



## 12. Światło jako fala

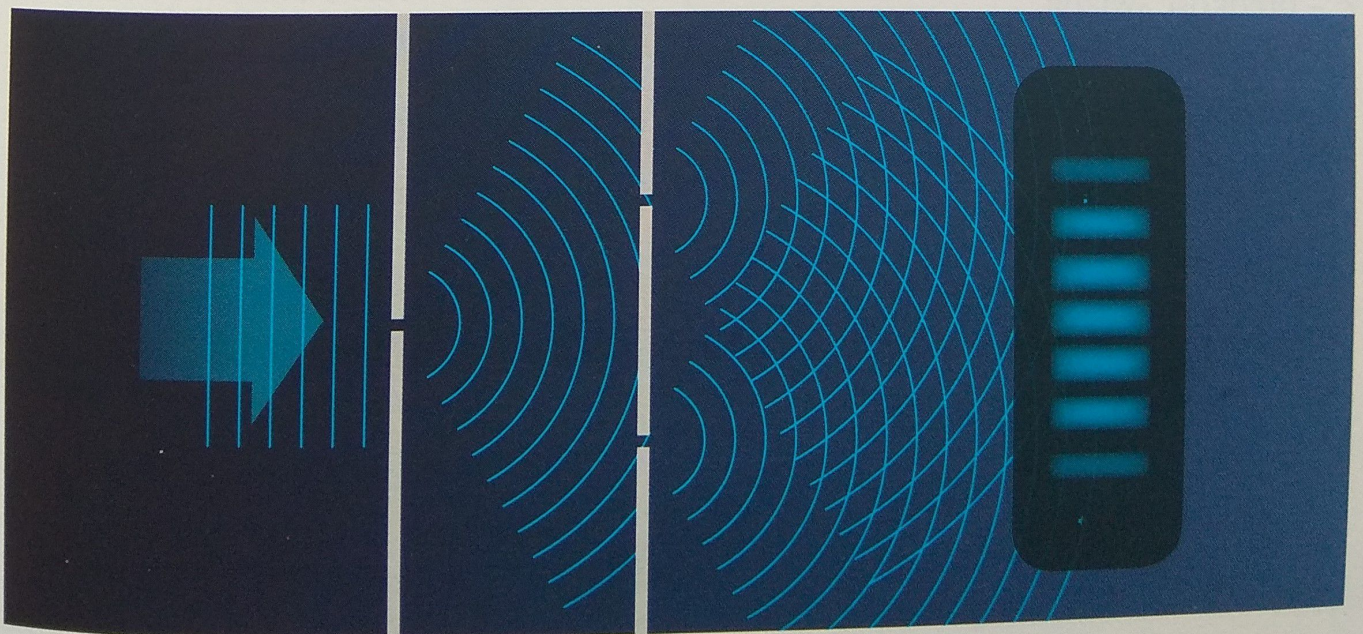
- Doświadczenie Younga
- Fale elektromagnetyczne
- Polaryzacja światła

**Przypomnij sobie** zjawiska dyfrakcji i interferencji fal.

Zdecydowaną większość informacji o otaczającym świecie dostarcza nam światło wpadające do naszych oczu. To właśnie dzięki niemu widzimy wszystkie przedmioty. Gdy patrzymy np. na stół, ścianę czy niebo za oknem, widzimy światło rozproszone przez cząsteczki. Przyjrzyjmy się bliżej własnościom światła.

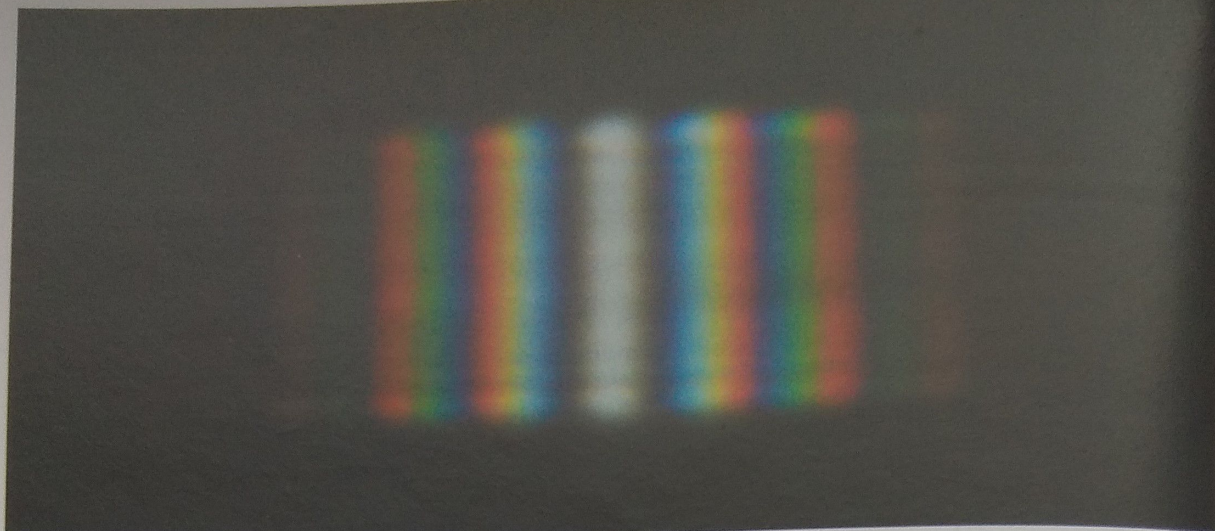
### Doświadczenie Younga

Czym jest światło? Na to pytanie szukało odpowiedzi wiele pokoleń uczonych. Isaac Newton sądził, że światło jest strumieniem małych cząstek. Ogromny autorytet Newtona ułatwił upowszechnienie się jego teorii. Jednak na początku XIX wieku angielski fizyk Thomas Young przeprowadził doświadczenie, które dziś uznawane jest za jedno z najważniejszych w dziejach fizyki. W jego eksperymencie światło przechodziło przez układ szczelin: najpierw przez jedną, a następnie przez dwie szczeliny położone bardzo blisko siebie. Na ekranie pojawiał się obraz jasnych i ciemnych prążków (ryc. 12.1).



**Ryc. 12.1.** Falowe wyjaśnienie powstawania jasnych i ciemnych prążków w doświadczeniu Younga. Światło ulega dyfrakcji najpierw na jednej szczelinie, później na dwóch szczelinach, a jeszcze później dwie fale nakładają się i powstaje obraz interferencyjny





**Ryc. 12.2.** Prążki na ekranie uzyskane po przejściu światła białego przez układ dwóch szczelin

Na rycinie 12.2 widzimy obraz interferencji fal, którego powstawanie wyjaśniliśmy w rozdziale 11. (patrz ryc. 11.2). Na środku obrazu 12.2 widnieje biały prążek – to środkowa linia wzmocnień światła. Występuje ona zawsze, niezależnie od długości fali. Kolejne prążki to wzmocnienia rozmieszczone symetrycznie względem środkowego. Dlaczego są one barwne? Światło o danej częstotliwości fali wywołuje wrażenie określonej barwy (z zestawu kolorów tęczy). Światło białe jest mieszaniną fal o wszystkich częstotliwościach. Z częstotliwością związana jest długość fali:

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

(1)

gdzie:

$\lambda$  – długość fali,

$c$  – prędkość światła,

$f$  – częstotliwość fali.

Położenie linii wzmocnień (poza środkową) zależy od długości fali, a więc światło o różnych długościach fali (czyli różnych barwach) wzmacnia się w różnych miejscach ekranu.

 $10^{-12}$ 

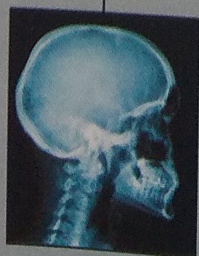
promieniowanie rentgenowskie



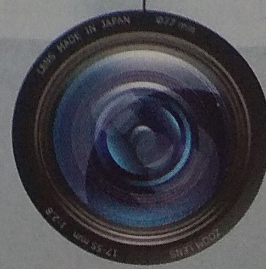
światło

 $10^{-6}$ 

promieniowanie gamma

 $10^{-9}$ 

nadfiolet



podczerwień



**Doświadczenie 1.**

Doświadczenie przeprowadź w dość ciemnym pokoju. Połóż na stole płytę kompaktową, „zapisaną” częścią do góry. Skieruj na nią prawie pionowo promień lasera. Uwaga, światło laserowe może trwale uszkodzić wzrok! Obserwuj odbicia lasera od płyty na suficie. Ile ich jest? Czy DVD daje taki sam obraz jak CD? Skieruj na płytę wąską wiązkę światła białego. Co teraz obserwujesz na suficie?

Informacja na płycie kompaktowej jest zapisana w postaci równoległych wypukłości i rowków różnej długości. Takie równoległe drobne wypukłości fizycy nazywają odbiciową siatką dyfrakcyjną. Gdy płyta jest oświetlona, na wypukłościach powstają fale kuliste, które się nakładają. Wówczas otrzymujemy kolorowe „odbicia”.

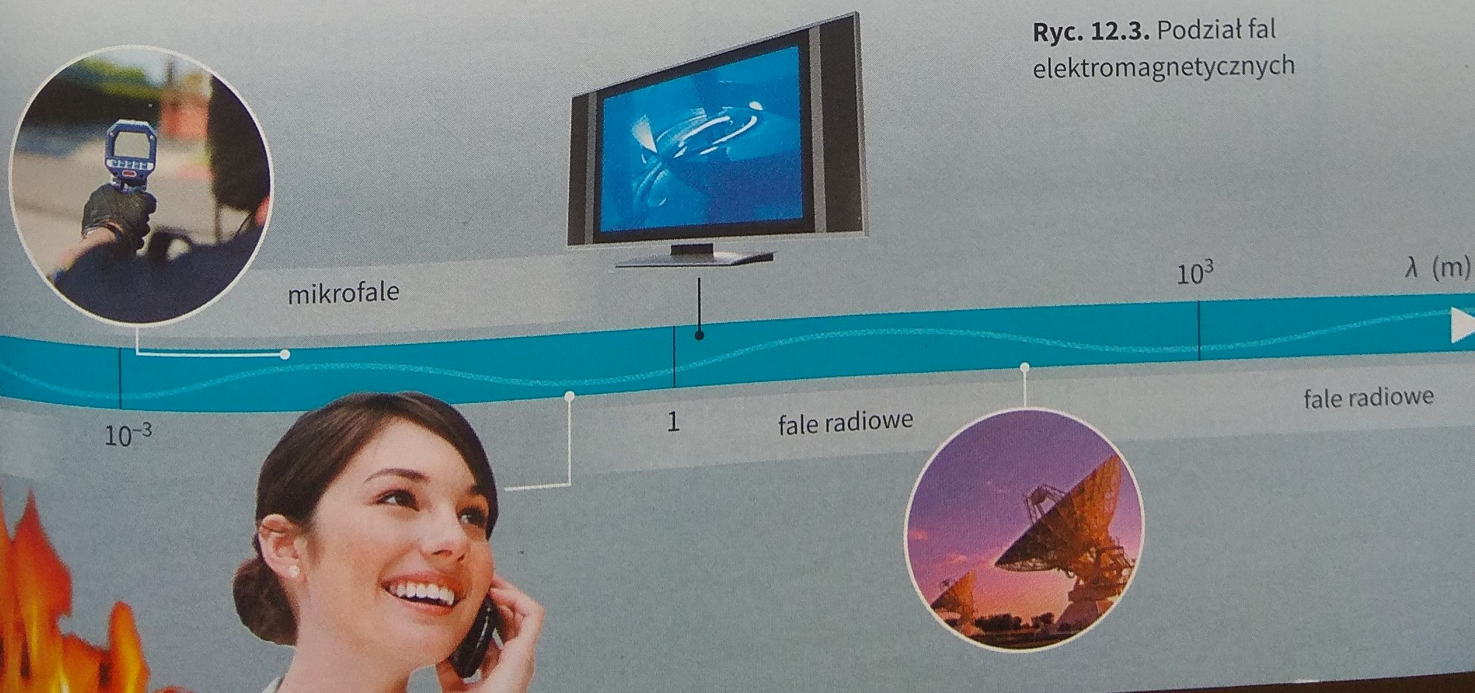
Z płyty kompaktowej możesz również uzyskać siatkę dyfrakcyjną ze szczelinami, która daje lepsze efekty dyfrakcyjne. W tym celu przyklej do „opisowej” strony płyty taśmę klejącą, a następnie ją zedrzyj. Taśma oderwie się razem z zewnętrzną warstwą płyty.

Wykonaj doświadczenie jeszcze raz, ale tym razem przepuść światło lasera przez otrzymaną siatkę dyfrakcyjną.

**Światło jako fala elektromagnetyczna**

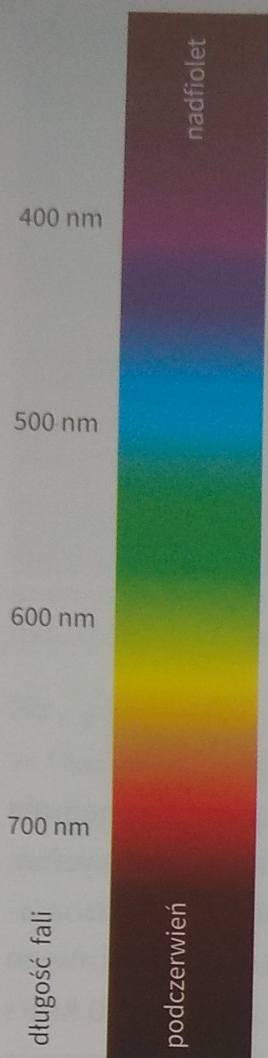
Fala elektromagnetyczna to rozchodzące się i wzajemnie przenikające zmienne pola elektryczne i magnetyczne. Źródłem takiej fali jest każdy drgający ładunek elektryczny, ale jest też odwrotnie – ładunki elektryczne zaczynają drgać pod wpływem fal elektromagnetycznych. Fale elektromagnetyczne to fale poprzeczne. Mogą rozchodzić się zarówno w ośrodkach materialnych, jak i w próżni. W próżni mają prędkość ok. 300 000 km/s (tzw. prędkość światła, oznaczana literą  $c$ ). To maksymalna prędkość przekazywania energii w przyrodzie.

Fale elektromagnetyczne mają różne własności, związane z ich częstotliwością. Z tego względu podzielono je na kilka zakresów: fale radiowe, mikrofałe, podczerwień, światło, nadfiolet, promieniowanie rentgenowskie (X) oraz promieniowanie gamma (ryc. 12.3). Tylko światło odbieramy za pomocą oczu. Pozostałe zakresy fal elektromagnetycznych rejestrujemy za pomocą specjalistycznych urządzeń, takich jak radioteleskopy czy aparaty rentgenowskie.



**Ryc. 12.3.** Podział fal elektromagnetycznych





Światło to fale elektromagnetyczne o długościach w przybliżeniu od 400 nm do 700 nm (precyzyjne granice przedziału są trudne do określenia ze względu na różną wrażliwość ludzkich oczu). Nanometr (nm) to jedna miliardowa metra ( $1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$ ), zatem długości fal świetlnych to nieco poniżej 1 mikrometra ( $1 \mu\text{m} = 10^{-6} \text{ m}$ ). Z tego powodu dyfrakcja światła jest zauważalna wówczas, gdy światło przechodzi przez bardzo małe otwory. Z drugiej strony ilość światła przechodząca przez tak małe otwory jest znikoma, co utrudnia obserwacje. Nic więc dziwnego, że falowa natura światła długo była nieznaną. Żeby wyraźnie zobaczyć interferencję światła, trzeba użyć przeszkody o szczelinach odległych od siebie o ułamki milimetra. Przy przejściu światła przez otwory o rozmiarach kilku milimetrów nie obserwuje się dyfrakcji, widzimy już wyraźną jedną wiązkę światła, nazywaną promieniem (zobacz ryc. 10.3).

Każda długość fali (i jej częstotliwość) odpowiada innej barwie. Na przykład światło o długości fali 400 nm wywoła w oku (a właściwie w mózgu) wrażenie barwy fioletowej, a światło o długości 700 nm – barwy czerwonej. Za światłem fioletowym rozciąga się nadfiolet, a za czerwonym – podczerwień (ryc. 12.4).

Ryc. 12.4. Światło białe rozszczepione na wszystkie barwy składowe

### Przykład 1.

Obliczmy częstotliwość światła zielonego o długości fali 550 nm.

Dane zapisujemy w jednostkach podstawowych:

$$\lambda = 550 \cdot 10^{-9} \text{ m} = 5,5 \cdot 10^{-7} \text{ m}$$

$$c = 300\,000 \frac{\text{km}}{\text{s}} = 3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Przekształcamy wzór (1) do postaci:

$$f = \frac{c}{\lambda}$$

Po podstawieniu danych otrzymujemy:

$$f = \frac{3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{5,5 \cdot 10^{-7} \text{ m}} \approx 5,5 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$$

Otrzymaliśmy częstotliwość światła rzędu  $10^{14}$  Hz, czyli sto bilionów herców. To znaczy, że ładunek elektryczny musi drgać z taką częstotliwością, by wyemitować światło.

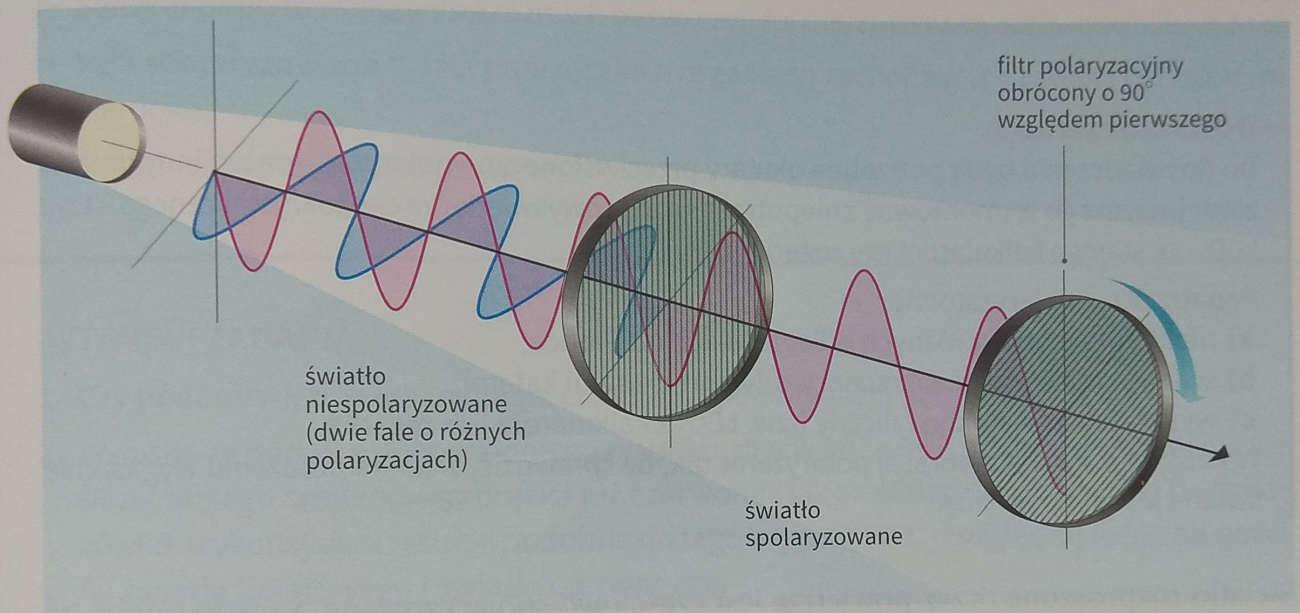
### Polaryzacja światła

W wielu falach poprzecznych drgania mają różne kierunki, zawsze jednak prostopadłe do kierunku rozchodzenia się fali. Taką falę można wzbudzić na sznurze. Tego typu falę nazywamy **niespolaryzowaną**. Falę poprzeczną, w której kierunek drgań jest określony



(np. pionowy), nazywamy z kolei **spolaryzowaną**. Falę niespolaryzowaną możemy spolaryzować. Wystarczy przystawić do liny dwie deseczki ustawione na przykład pionowo. Przez szczelinę przejdą tylko drgania pionowe i za deseczkami fala będzie już spolaryzowana pionowo.

Urządzenie do polaryzowania fali jest nazywane polaryzatorem. Co się stanie, gdy na drodze fali ustawimy drugi polaryzator, prostopadłe do pierwszego? Przepuści on tylko drgania poziome. Jednak w fali, która przeszła przez pierwszy polaryzator, drgań poziomych już nie ma, bo zostały wycięte przez pierwszy polaryzator. Wniosek jest oczywisty: dwa polaryzatory polaryzujące falę w kierunkach prostopadłych do siebie całkowicie wygaszają tę falę (ryc. 12.5).



**Ryc. 12.5.** Światło niespolaryzowane można wygasić za pomocą dwóch odpowiednio ustawionych polaryzatorów. Rysunek schematyczny

Okazuje się, że światło również można spolaryzować. Istnieją substancje, które mają takie właściwości – najczęściej są to przezroczyste płytki z odpowiedniego tworzywa sztucznego. Nasze oczy nie odróżniają światła spolaryzowanego od niespolaryzowanego, trzeba więc użyć polaryzatorów, by sprawdzić, czy jest ono spolaryzowane. Gdy ustawimy dwa polaryzatory tak, że kierunki ich polaryzacji będą prostopadłe do siebie, światło zostanie całkowicie wygaszone (ryc. 12.6 i 12.7).



**Ryc. 12.6.** Niektóre okulary przeciwsłoneczne mają szkła wykonane z polaryzatora, który przepuszcza tylko światło o określonej polaryzacji. Przez skrzyżowane okulary polaryzacyjne światło nie przechodzi



## 13. Odbicie światła

- Polaryzacja światła przy odbiciu
- Prawo odbicia światła
- Obrazy w zwierciadłach płaskich

**Przypomnij sobie**, czym jest światło.

Zjawisko odbicia światła obserwujemy na co dzień. Widzimy swój obraz w lustrze, refleksy na wypolerowanej podłodze, możemy zauważyć odbicia w szybie lub na powierzchni wody. Dzięki zjawisku odbicia możemy także skierować światło w pożądaną przez nas stronę.

### Powierzchnie odbijające światło

Odbicie światła zachodzi na granicy dwóch ośrodków. Gdy promień światła pada na powierzchnię gładką, wypolerowaną, następuje odbicie, w którym wiązka światła kierowana jest w jednym kierunku. Mówimy wtedy o odbiciu zwierciadlanym. Natomiast gdy powierzchnia, na którą pada światło, jest choć w niewielkim stopniu chropowata, wiązka światła po odbiciu staje się w większym lub mniejszym stopniu rozmyta, rozproszona.

Powierzchnie metalowe odbijają prawie całe padające na nie światło, dlatego zwierciadła (czyli lustra) zwykle wykonuje się z cienkiej warstwy srebra, położonej na odpowiednio uformowanym podłożu, najczęściej szklanym.

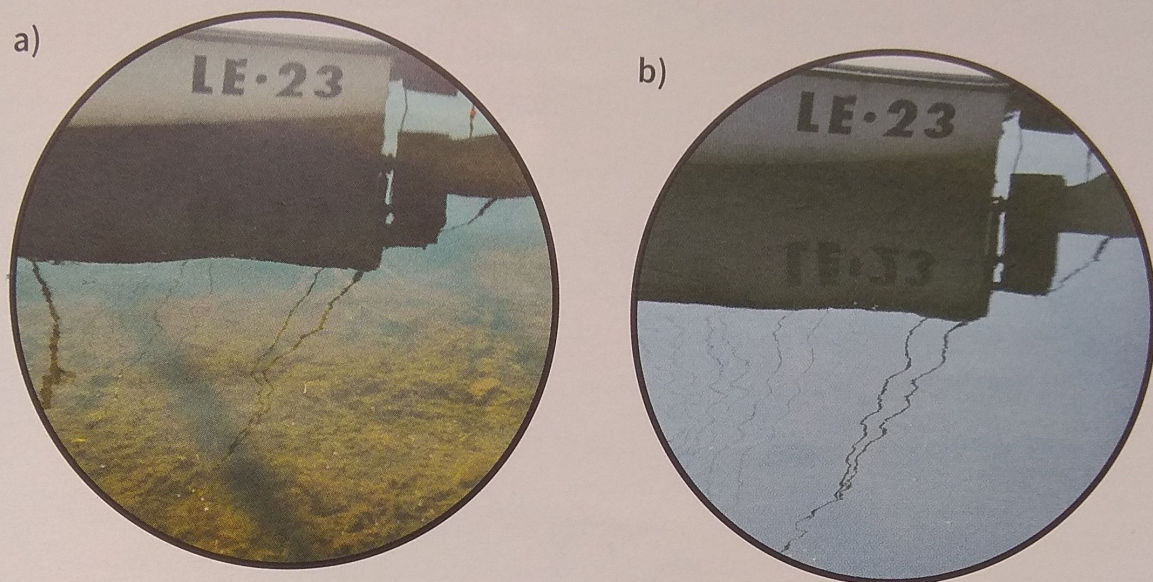


**Ryc. 13.1.** W dolnej części szklanki jest gliceryna, a nad nią woda. Prędkość światła w szkłe i w glicerynie jest taka sama, dlatego nie widzimy szklanej rurki w glicerynie

Odbicie światła zachodzi również na granicy dwóch materiałów przezroczystych, takich jak powietrze i woda. W tym przypadku tylko część światła się odbija, a reszta przechodzi do drugiego ośrodka. Ilość światła odbitego zależy od kąta, pod jakim wiązka światła pada na powierzchnię graniczną. Gdy promień jest prostopadły do powierzchni materiału przezroczystego, tylko niewielka część światła ulega odbiciu. Natomiast gdy promień jest niemal równoległy do powierzchni, światło odbija się prawie w całości. Jeżeli w obydwu materiałach światło rozchodzi się z tą samą prędkością, na ich granicy nie nastąpi odbicie, lecz światło będzie biegło dalej po linii prostej. Wówczas nie będziemy widzieć granicy ośrodków (ryc. 13.1).



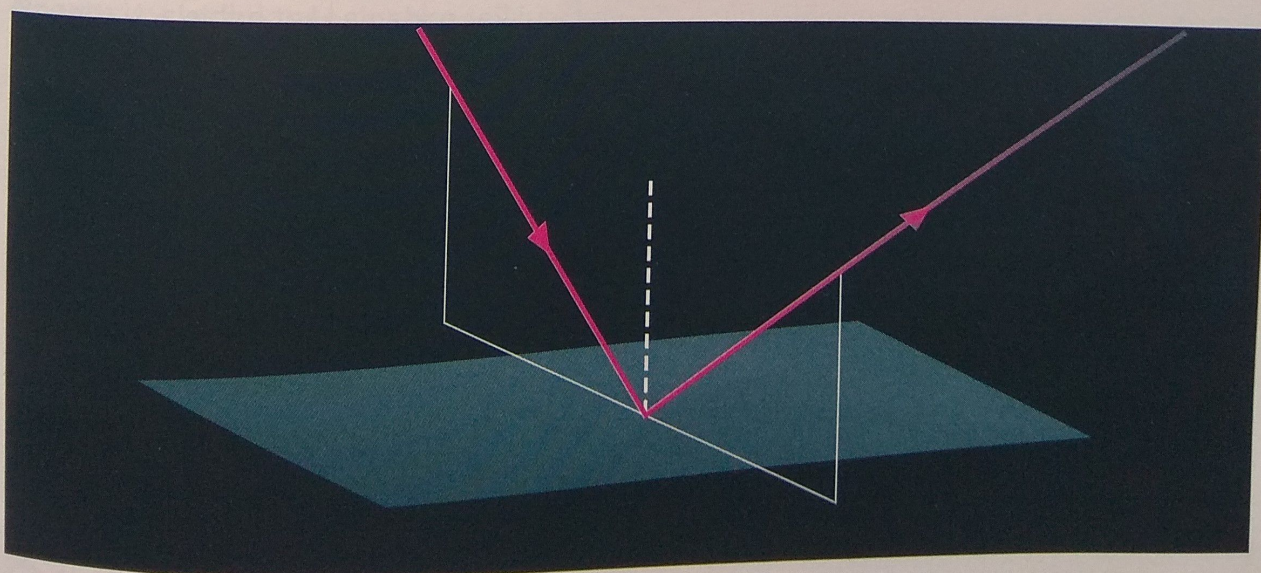
Światło odbite od materiałów przezroczystych **jest częściowo spolaryzowane**. Właśnie dlatego patrzenie na powierzchnię wody lub szkła przez odpowiednio ustawione polaryzatory powoduje, że duża część światła odbitego zostaje wygaszona. Okulary ze szkłami polaryzacyjnymi ułatwiają uprawianie sportów wodnych lub prowadzenie pojazdów (ryc. 13.2). Z kolei za pomocą filtrów polaryzacyjnych nakładanych na obiektyw aparatu fotograficznego można wykonać zdjęcia przedmiotów znajdujących się za szybą, gdy przeszkadzają nam refleksy pochodzące od oświetlenia.



**Ryc. 13.2.** Powierzchnia wody widziana w słoneczny dzień przez okulary polaryzacyjne. Na zdjęciu (a) okulary ustawione są „normalnie” i osłabiają częściowo spolaryzowane światło odbite od wody. Na zdjęciu (b) okulary przekręcone są o  $90^\circ$ . Widzimy niebo odbite od powierzchni wody

### Prawo odbicia światła

Światło odbija się pod takim samym kątem, pod jakim pada na powierzchnię odbijającą. Promień padający, promień odbity i prosta prostopadła do powierzchni granicznej znajdują się w jednej płaszczyźnie (ryc. 13.3).



**Ryc. 13.3.** Płaszczyzna wyznaczona przez promień padający i promień odbity jest prostopadła do płaszczyzny zwierciadła

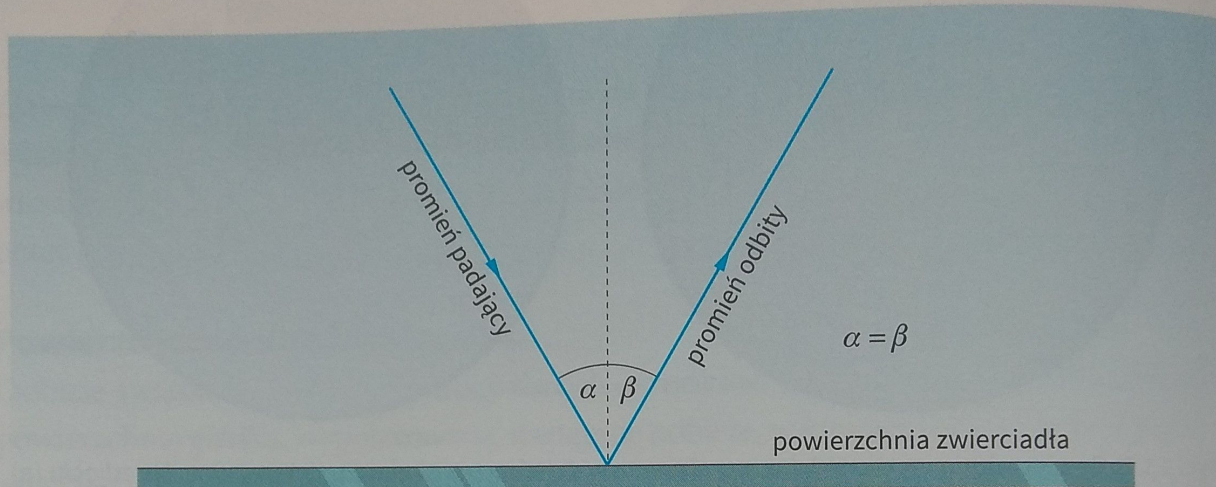


W optyce kąty padania, odbicia i załamania definiuje się jako kąty między promieniem światła a prostą prostopadłą do powierzchni, na którą pada światło.

### Prawo odbicia światła

Kąt odbicia jest równy kątowi padania. Promień padający i promień odbity leżą w płaszczyźnie prostopadłej do płaszczyzny zwierciadła.

Ponieważ odbicie światła zachodzi w płaszczyźnie prostopadłej do zwierciadła, bieg promieni światła możemy przedstawiać na rysunkach płaskich, na których powierzchnia zwierciadła jest ustawiona prostopadle do płaszczyzny rysunku (ryc. 13.4).



Ryc. 13.4. Promień światła padający i promień odbity od powierzchni zwierciadła. Kąt odbicia  $\beta$  jest równy kątowi padania  $\alpha$

### Doświadczenie 1.

Przymocuj ołówek (np. za pomocą plasteliny) prostopadle do powierzchni lusterka. Skieruj wiązkę światła latarki na lusterko, a następnie ustaw lusterko tak, aby światło po odbiciu od niego zmieniło kierunek w przybliżeniu o  $90^\circ$ . Oszacuj kąt padania i kąt odbicia. Następnie kilkakrotnie zmień ustawienie lusterka w stosunku do padającego światła i zaobserwuj, czy za każdym razem światło i ołówek leżą w jednej płaszczyźnie.

### Zwierciadła płaskie

Obraz widziany w zwierciadle płaskim nie istnieje w rzeczywistości po jego drugiej stronie – to nasz umysł tworzy takie wyobrażenie. Tego typu obrazy w optyce nazywamy **pozornymi**.

### Doświadczenie 2.

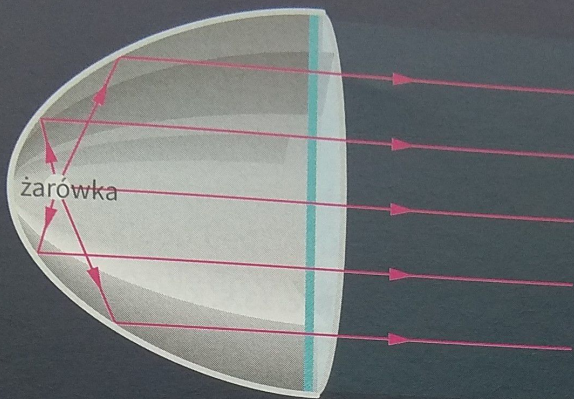
Przygotuj lustro na tyle duże, aby widzieć się w nim mniej więcej do połowy. Ustaw lustro na takiej wysokości, aby widzieć czubek swojej głowy na jego górnej krawędzi. Sprawdź, czy obserwacje za pomocą odpowiedniego rysunku.



## WIEDZIEĆ WIĘCEJ

**Reflektor**

Prawo odbicia światła pozwala projektować różne układy optyczne, które będą kierować wiązkę światła w określoną stronę. Jednym z takich układów jest reflektor samochodowy. W najprostszej wersji składa się on z żarówki, za którą umieszczone jest zwierciadło o odpowiedniej krzywiznie.



Żarówka emituje światło we wszystkie strony. Promienie padające na zwierciadło są odbijane w jedną stronę, tworzą więc równoległą wiązkę światła. Dzięki temu reflektor dobrze oświetla drogę nawet kilkaset metrów przed samochodem. Warto zwrócić uwagę na fakt, że gdy wiązka światła z reflektora jest skierowana w stronę naszych oczu, jesteśmy tak silnie oślepieni, jakby nasze oko znajdowało się w odległości zaledwie kilku centymetrów od żarówki. Dlatego podczas prowadzenia pojazdów tak ważna jest zmiana świateł drogowych na światła mijania, gdy tylko zauważymy pojazd jadący z naprzeciwka. Światła mijania kierują wiązkę światła nieco w dół, dzięki czemu nie wpada ona bezpośrednio do oczu innych kierowców.

Gdy do naszych oczu wpada światło, nerwy wzrokowe przekazują do mózgu sygnały, które są tam odpowiednio interpretowane. Na ich podstawie mózg buduje obraz otoczenia, w jakim się znajdujemy. Tworzy obraz otaczającej nas przestrzeni, przy założeniu że światło rozchodzi się po liniach prostych od obserwowanego obiektu do naszych oczu. Gdy światło nie biegnie po liniach prostych, tworzony przez mózg obraz otoczenia (czyli obiektów widzianych w przestrzeni) nie jest zgodny z ich

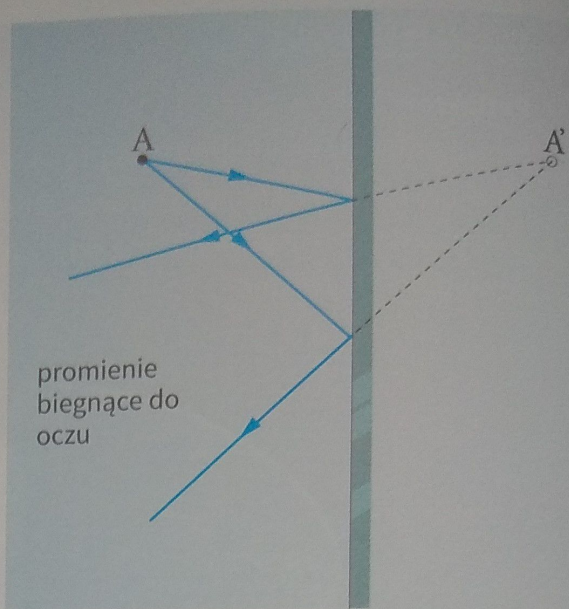


Ryc. 13.5. Osoba i jej obraz widziany w zwierciadle płaskim



rzeczywistym położeniem. Mówimy wtedy o obrazach pozornych. Taki właśnie jest obraz widziany w zwierciadle. Samego zwierciadła nie widzimy. Zauważamy, że jest ono umieszczone w danym miejscu, dopiero w momencie, gdy skojarzymy, że w pobliżu widzimy te same obiekty co w zwierciadle.

Jak skonstruować obraz dowolnego punktu w zwierciadle płaskim? Przeanalizujemy rycinę 13.6. Dwa promienie poprowadzone od punktu A w kierunku zwierciadła odbijają się od niego zgodnie z prawem odbicia. Gdy poprowadzimy przedłużenia tych odbitych promieni poza powierzchnię zwierciadła, przetną się one w punkcie A'. I to właśnie jest obraz pozorny punktu A.



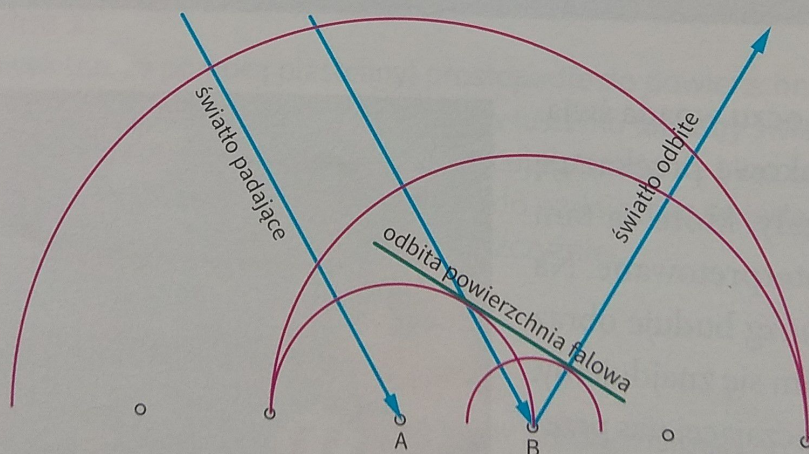
**Ryc. 13.6.** Konstrukcja obrazu punktu w zwierciadle płaskim. Obraz powstaje w miejscu przecięcia się przedłużeń promieni odbitych od zwierciadła

Z prawa odbicia wynika, że **przedmiot i jego obraz** widziane w zwierciadle płaskim są **symetryczne** względem powierzchni zwierciadła.

## WIEDZIEĆ WIĘCEJ

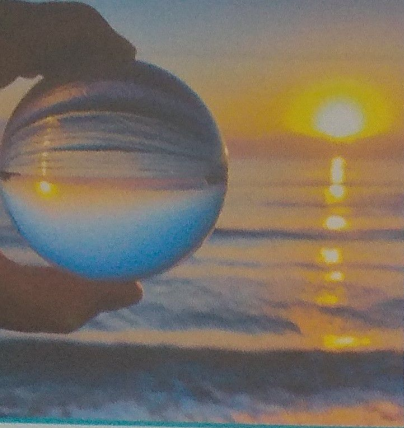
### Odbicie a interferencja

Gdy światło pada na powierzchnię ciała stałego lub cieczy, cząsteczki leżące na powierzchni rozpraszają to światło. Od każdej cząsteczki rozchodzi się fala kulista (ryc.).



Jeśli cząsteczki są ułożone regularnie w jednej płaszczyźnie (jak na wypolerowanej powierzchni ciała krystalicznego), tworzą odbiciową siatkę dyfrakcyjną. Gdy na powierzchnię odbijającą pada fala płaska, do cząsteczki A powierzchni falowe dochodzą wcześniej niż do B, tak jak na rysunku. Od cząsteczek tych rozchodzą się fale kuliste, które nakładają się na siebie (porównaj z ryc. 11.2). Odległość między atomami jest we wszystkich ciałach mniejsza od długości fali światła, zatem utworzy się tylko jedna linia wzmocnień. Zjawisko to nazywamy odbiciem fali. Promień odbity tworzy ten sam kąt z powierzchnią co promień padający.

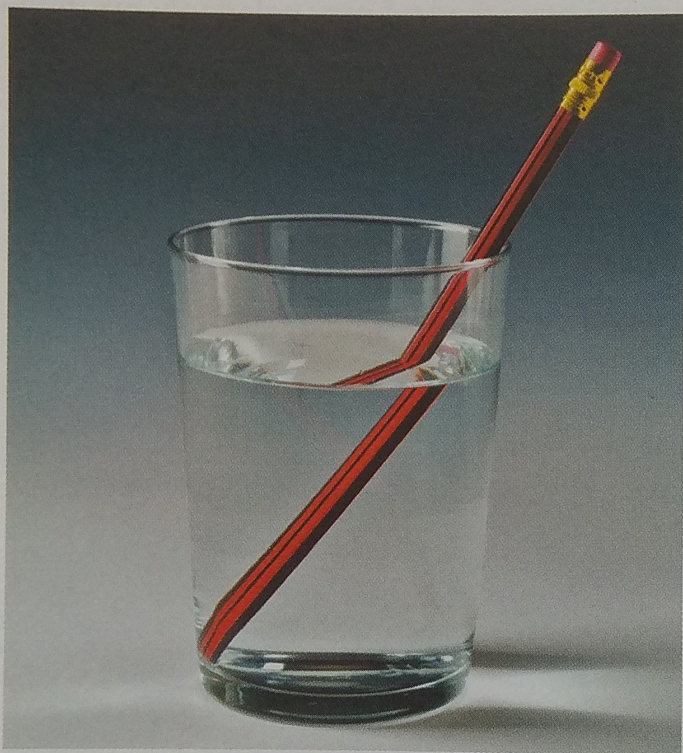




## 14. Załamanie światła

- Prawo załamania światła
- Efekty optyczne związane z załamaniem światła

**Przypomnij sobie**, czym jest światło i zjawisko odbicia światła, a także jak się konstruuje obrazy pozorne.



Chyba każdy z nas widział kiedyś jakieś efekty optyczne związane z załamaniem światła. Przykładem może być ołówek zanurzony w wodzie. Gdy patrzymy na niego z boku albo przez powierzchnię wody, wygląda, jakby był złamany. W tym rozdziale wyjaśnimy dokładniej przyczyny powstawania tego typu obrazów.

**Ryc. 14.1.** Zjawisko optyczne związane z załamaniem światła przy przejściu z wody do powietrza

### Załamanie światła

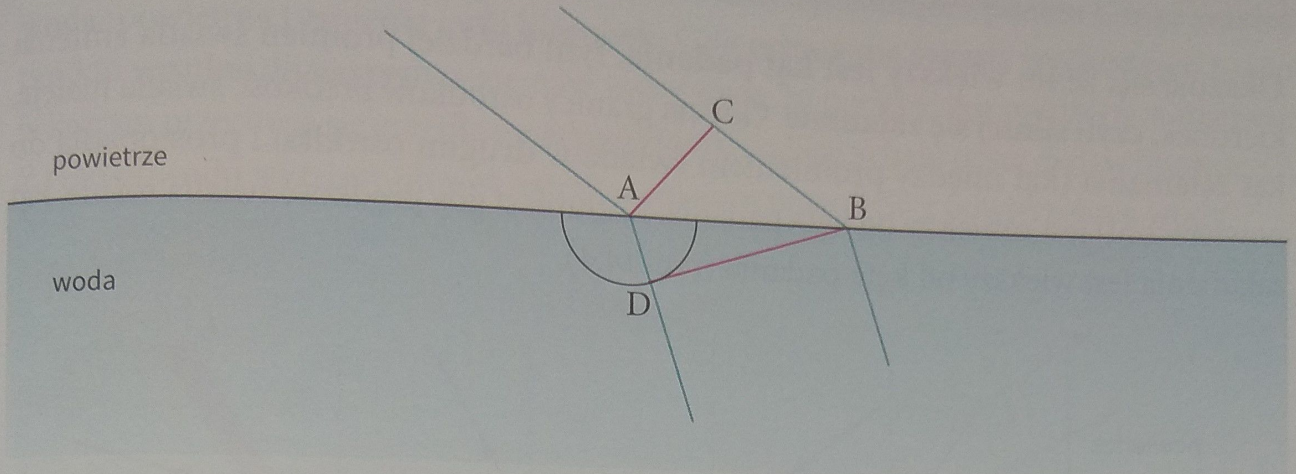
W ośrodku jednorodnym fale rozchodzą się ze stałą prędkością. Prędkość fali zależy od własności ośrodka. Światło jest falą i jego prędkość jest różna w różnych ośrodkach. Gdy światło przechodzi np. z powietrza do wody, na granicy tych ośrodków zmienia się jego prędkość (w wodzie jest mniejsza). Prędkość fali  $v$  związana jest z długością fali  $\lambda$  i częstotliwością  $f$  wzorem:

$$v = \lambda f$$

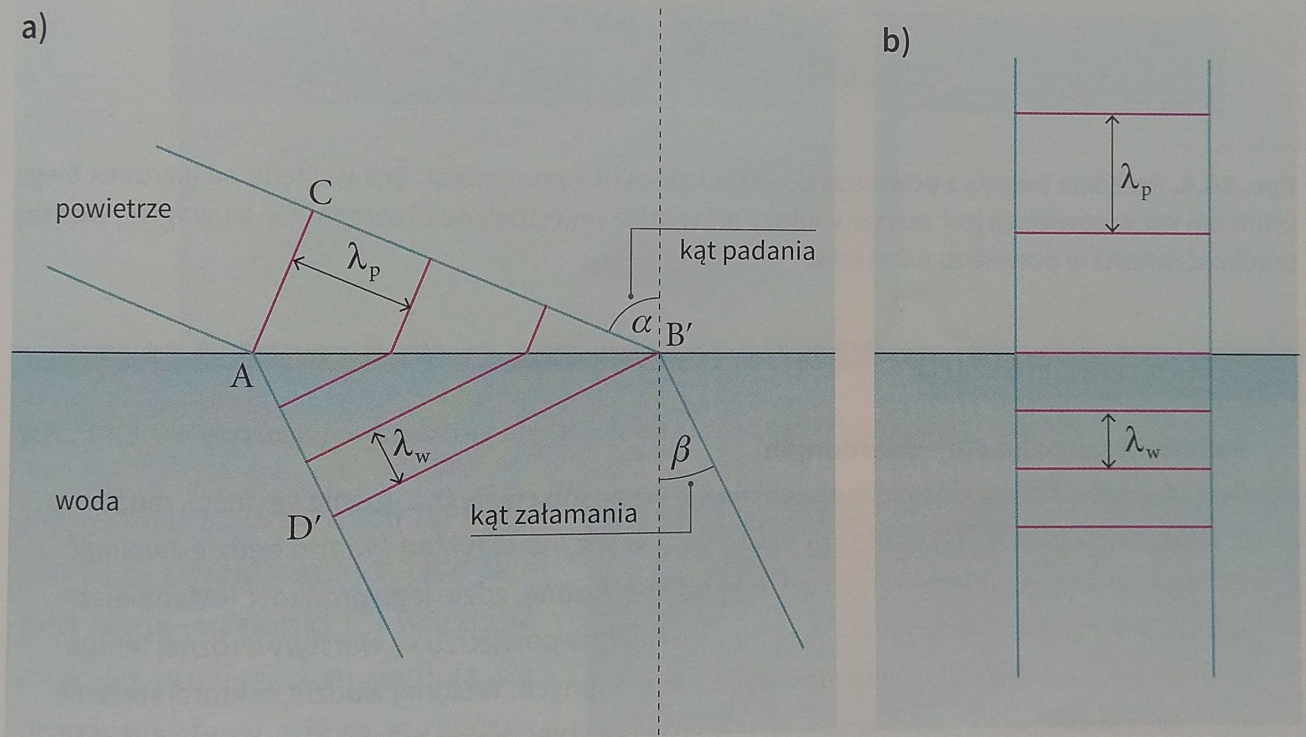
Z zależności tej wynika, że długość fali maleje tyle razy, ile razy maleje prędkość fali (częstotliwość fali nie ulega zmianie, gdyż jest to częstotliwość drgań źródła). Spójrzmy na rycinę 14.2, na której odcinek AC to linia grzbietów, a odcinek CB – długość fali w powietrzu. Gdy fala przebywa w powietrzu drogę CB, w wodzie przemieszcza się



na odległość AD (długość fali w wodzie). Gdy narysujemy z punktu A okrąg o promieniu AD, to styczna do tego okręgu narysowana z punktu B wyznacza linię grzbietów w wodzie (odcinek BD).



**Ryc. 14.2.** Konstrukcja kierunku biegu fali na granicy dwóch ośrodków. Opis w tekście głównym



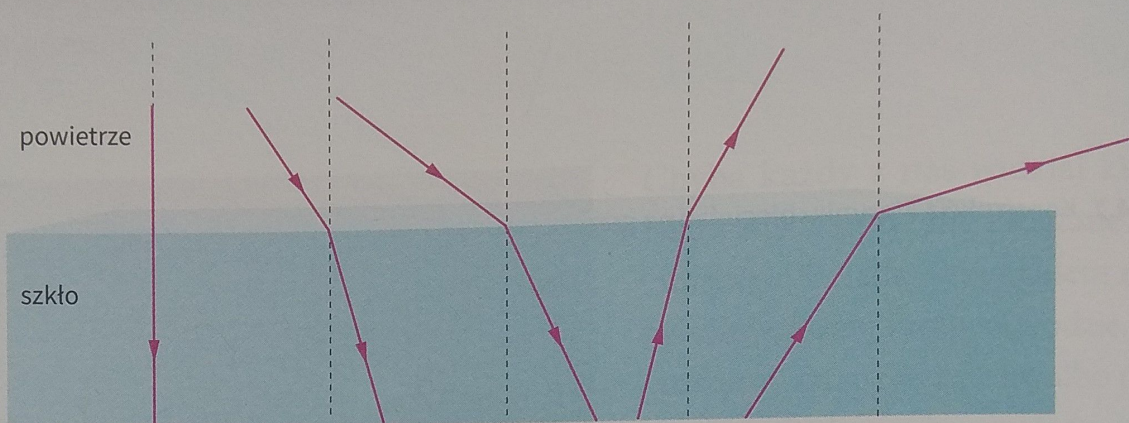
**Ryc. 14.3.** Promień światła przechodzący z powietrza do wody. Różowe równoległe odcinki to kolejne grzbiety fali, niebieskie linie wskazują kierunek rozchodzenia się fali

Przejście promienia światła przez granicę powietrza i wody przedstawiono schematycznie na rycinie 14.3. Ze względu na mniejszą prędkość światła w wodzie odległość między kolejnymi powierzchniami falowymi w wodzie jest mniejsza niż w powietrzu. Gdy kąt padania światła jest różny od  $0^\circ$ , powierzchnie falowe mają w wodzie inny kierunek niż w powietrzu (ryc. 14.3a). Oznacza to zmianę kierunku rozchodzenia się światła. Gdy kąt padania jest równy  $0^\circ$  (promień prostopadły do powierzchni), powierzchnie falowe w powietrzu są równoległe do powierzchni falowych w wodzie, więc promień się nie załamuje (ryc. 14.3b).



**Załamanie światła** polega na zmianie kierunku rozchodzenia się światła przy przejściu z jednego ośrodka do drugiego.

Okazuje się, że im **większy jest kąt padania**, tym bardziej promień światła zmienia kierunek, **czyli silniej się załamuje**. Gdy na granicy ośrodków prędkość światła maleje, kąt załamania (kąt między promieniem światła w drugim ośrodku i prostopadłą do powierzchni) jest mniejszy od kąta padania. Natomiast gdy prędkość światła rośnie, kąt załamania jest większy od kąta padania (ryc. 14.4).

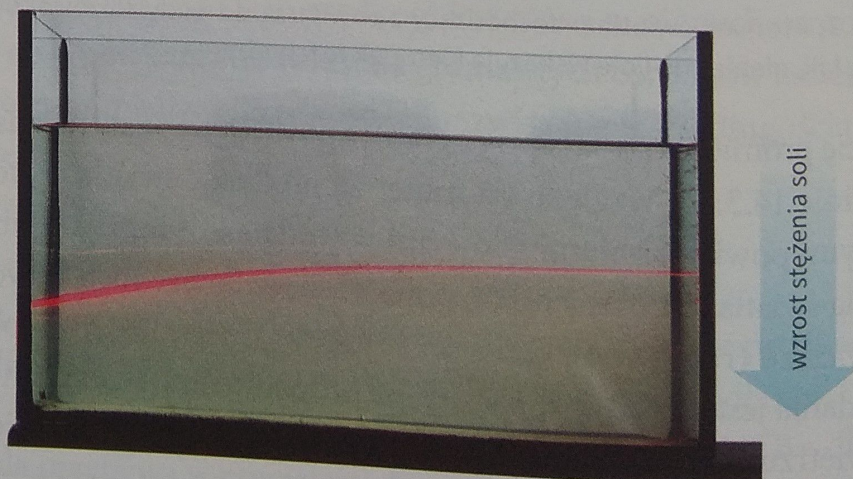


**Ryc. 14.4.** Przejście światła z powietrza do szkła i ze szkła do powietrza. Bez względu na kierunek biegu promieni kąt w powietrzu jest zawsze większy niż w szkłe (mierzony do prostopadłej) z uwagi na większą prędkość światła w powietrzu niż w szkłe

## WIEDZIEĆ WIĘCEJ

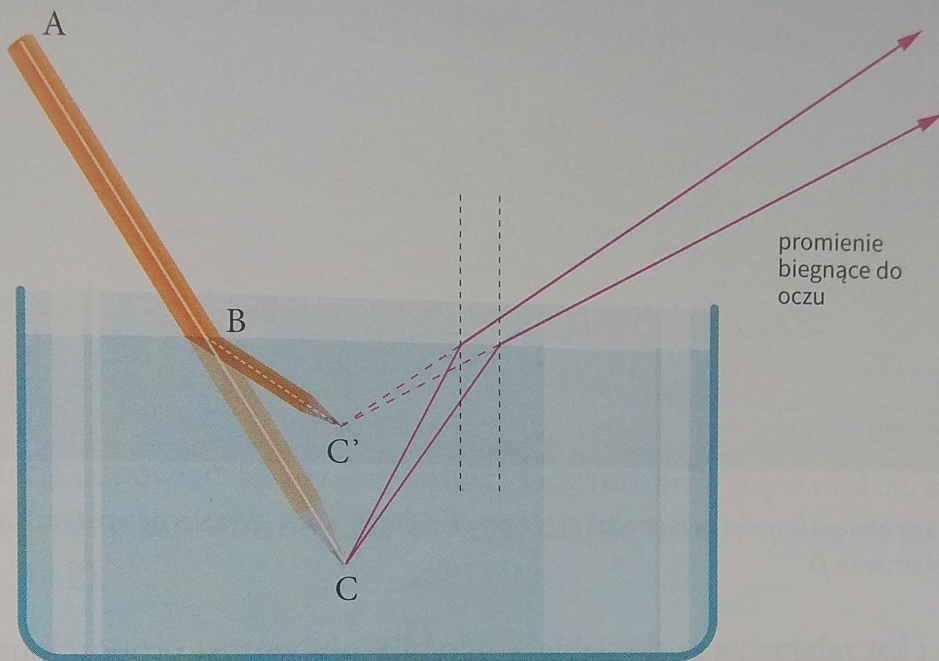
### Światło w ośrodku niejednorodnym

Gdy własności fizyczne ośrodka zmieniają się w sposób ciągły (np. rośnie gęstość), może się zdarzyć, że prędkość światła też będzie się zmieniać, na przykład światło będzie zwalniać. W takiej sytuacji promień światła będzie skręcać w stronę, gdzie jego prędkość jest mniejsza. Tak czasem dzieje się na przykład w atmosferze. Gdy w powietrzu są warstwy o różnej temperaturze i gęstości, światło biegnie po torach zakrzywionych. W słonej wodzie, w której stężenie soli zmienia się wraz z głębokością, światło również biegnie po zakrzywionym torze (ryc.).





Jak powstaje obraz przestawiony na rycinie 14.1? Na rycinie 14.5 przedstawiono schematycznie ołówek. Światło z punktów A i B biegnie do naszych oczu w powietrzu, więc tę część ołówka widzimy bez zmian. Natomiast światło wychodzące z punktu C mija granicę punktu i zmienia swój kierunek. Gdy promienie światła wychodzące z tego punktu wpadną do naszych oczu, nasz mózg uzna, że punkt C jest położony w miejscu, w którym przecinają się przedłużenia promieni wpadających do oczu, czyli w punkcie C'. Z tego powodu widzimy ołówek zgięty w miejscu przecięcia z powierzchnią wody.



**Ryc. 14.5.** Konstrukcja powstawania obrazu ołówka częściowo zanurzonego w wodzie

Jak wynika z konstrukcji na rycinie 14.5, obiekty znajdujące się pod wodą (tu punkt C) widziane z nad jej powierzchni wydają się położone płycej, niż są w rzeczywistości. Jeśli chcemy oszacować głębokość jeziora lub basenu, powinniśmy brać to pod uwagę (ryc. 14.6).

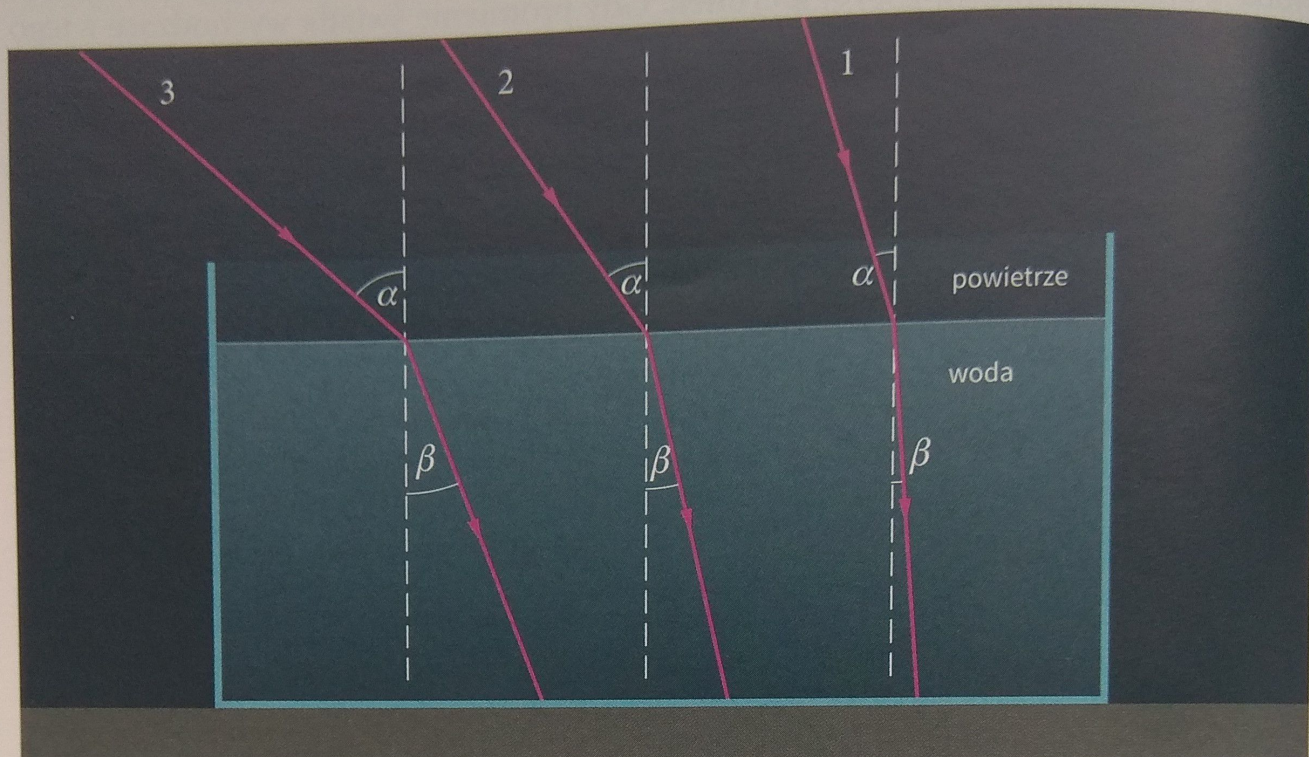


**Ryc. 14.6.** W wyniku załamania światła basen wydaje się płytszy, niż jest w rzeczywistości. Gdy stoimy w wodzie, nasze nogi wyglądają na krótsze



## Prawo załamania światła

Na rycinie 14.7 przedstawiono załamanie kilku promieni światła na granicy wody i powietrza. Im większy jest kąt padania światła, tym większy jest kąt załamania.



**Ryc. 14.7.** Kilka promieni światła przechodzi przez powierzchnię wody. Wraz ze wzrostem kąta padania  $\alpha$  rośnie kąt załamania  $\beta$

Kąt padania i kąt załamania są do siebie w przybliżeniu wprost proporcjonalne, o ile oba kąty są nieduże. Gdy światło przechodzi z próżni (lub powietrza) do przezroczystej substancji, zapisujemy to wzorem<sup>\*</sup>:

$$\frac{\alpha}{\beta} \approx n$$

(1)

gdzie:

$\alpha$  – kąt padania w próżni (lub w powietrzu),  $\beta$  – kąt załamania w substancji,  
 $n$  – współczynnik załamania światła dla danej substancji.

Współczynnik załamania światła  $n$  dla danej substancji (np. dla wody, szkła) związany jest z prędkością światła w próżni  $c$  i z prędkością  $v$  w danym ośrodku zależnością:

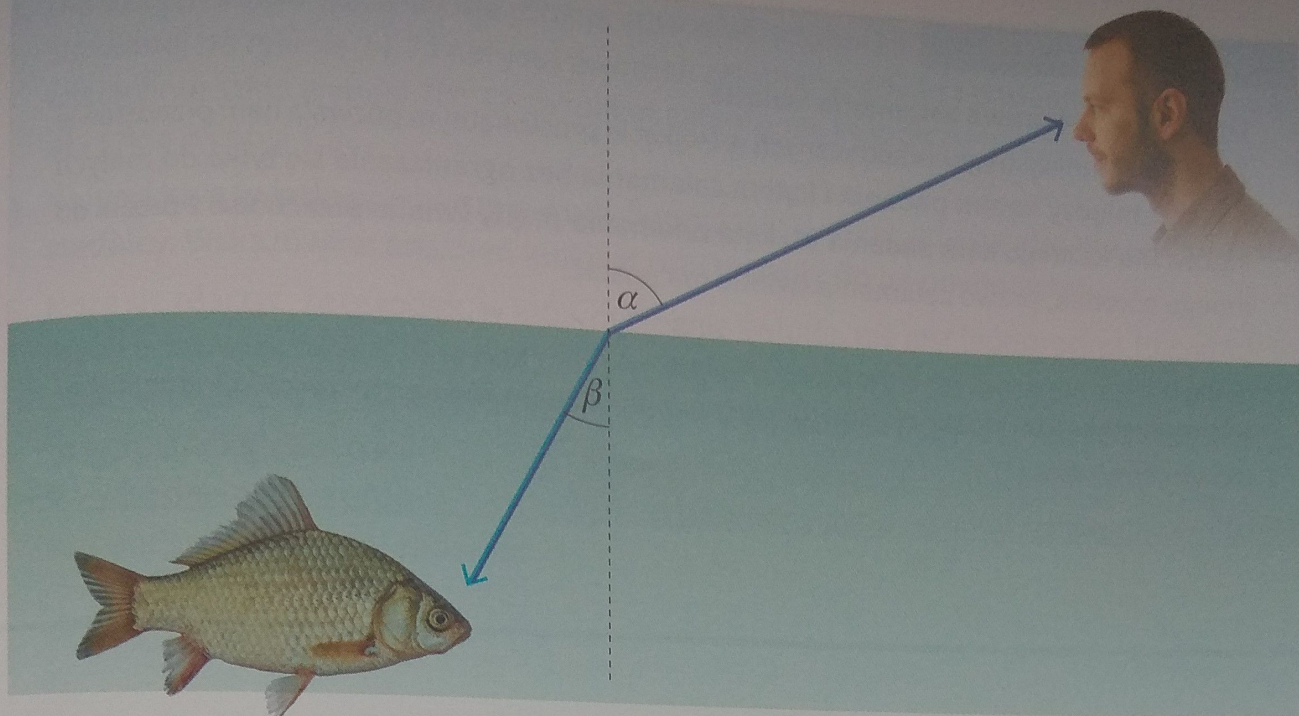
$$n = \frac{c}{v}$$

(2)

Współczynnik załamania określa, ile razy prędkość światła w próżni jest większa od prędkości światła w danym ośrodku.

<sup>\*</sup> Dla kątów padania mniejszych od  $30^\circ$  obliczony z podanego wzoru kąt załamania różni się od rzeczywistego o mniej niż  $1^\circ$ .





**Ryc. 14.8.** Bieg światła jest odwracalny. Nieważne, czy światło biegnie od oczu ryby do naszych czy odwrotnie – biegnie po tym samym torze

Bieg światła jest odwracalny. Na każdym rysunku można odwrócić bieg promieni i będzie to też sytuacja odpowiadająca rzeczywistości. Gdy widzimy rybę w wodzie, zapewne ryba widzi nas. Światło zarówno do naszych oczu, jak i do oczu ryby biegnie po tym samym torze (ryc. 14.8).

### Przykład 1.

Kąt padania promienia światła na powierzchnię szklanego prostopadłościanu wynosi  $27^\circ$ . O jaki kąt (w przybliżeniu) zmieni się kierunek rozchodzenia się światła w wyniku załamania w szkło? Współczynnik załamania światła dla szkła wynosi 1,5.

Obliczamy kąt załamania ze wzoru:

$$\frac{\alpha}{\beta} \approx n$$

Stąd:

$$\beta \approx \frac{\alpha}{n} = \frac{27^\circ}{1,5} = 18^\circ$$

Kąty  $\alpha$  i  $\gamma$  przedstawione na rysunku są kątami wierzchołkowymi, więc  $\alpha = \gamma$ . Promień odchylił się zatem od pierwotnego kierunku o kąt:

$$\delta = \gamma - \beta$$

$$\delta = 27^\circ - 18^\circ = 9^\circ$$

