

## Ćwiczenie 55

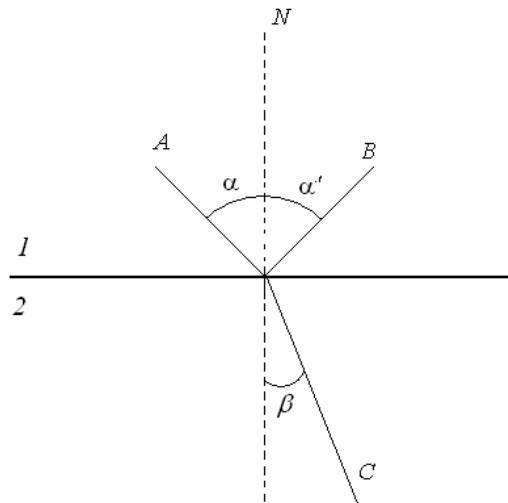
# Prawa odbicia i załamania światła

### Cel ćwiczenia

Sprawdzenie praw odbicia i załamania światła – na granicy powietrza i cieczy. Wyznaczenie współczynnika załamania światła oraz kąta granicznego dla całkowitego wewnętrznego odbicia na granicy tych ośrodków.

### Wprowadzenie

Promień światła, padający pod pewnym kątem na gładką powierzchnię rozgraniczającą dwa ośrodki przezroczyste, w punkcie padania na nią dzieli się na dwie części - dwa promienie, z których jeden odbija się od niej jak od zwierciadła płaskiego, a drugi wchodzi do drugiego ośrodka, zmieniając w punkcie padania kierunek biegu (załamuje się na granicy ośrodków). Promienie: padający, odbity i załamany, leżą w jednej płaszczyźnie, prostopadłej do powierzchni rozdzielającej ośrodki.



**Rys. 1.** Odbicie i załamanie światła: *A* – promień padający, *B* – promień odbity, *C* – promień załamany. *N* – normalna (czyli prostopadła) do powierzchni rozdzielającej ośrodki 1 i 2,  $\alpha$  – kąt padania,  $\alpha'$  – kąt odbicia,  $\beta$  – kąt załamania

Już Euklides (w starożytnej Grecji) wiedział – a dziś nazywamy to prawem odbicia światła – że kąt odbicia  $\alpha'$  równy jest kątowi padania  $\alpha$  (por. rys. 1),

$$\alpha' = \alpha . \quad (1)$$

Natomiast w roku 1626 Snell odkrył doświadczalnie, że między kątem załamania  $\gamma$  a kątem padania  $\alpha$  zachodzi związek

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = n. \quad (2)$$

gdzie  $n$  jest wielkością stałą dla określonego ośrodka, zwaną bezwzględnym współczynnikiem załamania. Wartości  $n$  podawane są w tablicach fizycznych.

**Tabela 1.** Wybrane wartości współczynników załamania (w warunkach normalnych, dla  $\lambda = 589 \text{ nm}$ , wg. [2]).

Materiał	$n$
próżnia	1
powietrze	1,00027
woda	1,3333
alkohol etylowy	1,359
gliceryna	1,474
soczewka oka	1,42
kwarc topiony	1,458
szkło typowe	1,50 - 1,58
szkło typu flint	do 1,92
pleksiglas	1,49
chlerek sodu	1,544
diamant	2,417

Równanie (2) jest słuszne, jeżeli ośrodkiem 1 jest próżnia oraz – w dobrym przybliżeniu - powietrze. W przypadku ogólnym obowiązuje równanie

$$n_1 \sin \alpha = n_2 \sin \beta. \quad (3)$$

*ośrodek 1    ośrodek 2*

gdzie  $n_1$  oraz  $n_2$  oznaczają współczynniki załamania ośrodków 1 i 2. Wzór (3) może np. posłużyć do obliczenia kątów załamania na granicy dwu różnych ośrodków przezroczystych, np. woda-szkło. Pozwala też obliczyć kąty załamania dla przypadku, gdy ośrodkiem 1 jest powietrze ( $n = 1,00027$ ) a ośrodkiem 2 - woda ( $n = 1,33$ ) i porównać z analogicznym wynikiem dla załamania na granicy próżnia-woda. Obliczenie takie pokaże, że dla kąta padania  $45^\circ$  różnica kątów załamania wynosi około  $1'$  (1 minuta katowa), czyli znacznie mniej niż niepewność pomiaru kąta w naszym ćwiczeniu. Zatem do opracowania wyników naszych pomiarów można bez obawy posługiwać się wzorem (1).

Prawo załamania można wyprowadzić teoretycznie<sup>1</sup> zakładając, że prędkość światła w próżni wynosi  $c = 299\,792 \text{ km/s}$ , natomiast w ośrodku przezroczystym jest równa

$$v = \frac{c}{n}. \quad (4)$$

<sup>1</sup> Patrz str. 76 i 77 w podręczniku [1].

Wzór (4) pozwala zrozumieć, dlaczego współczynniki załamania (tabela) są liczbami większymi od jedności. Zgodnie z teorią względności prędkość światła w próżni jest największą możliwą prędkością, z jaką rozchodzić się może energia albo sygnały przenoszące informację. Prędkość światła  $v$  w każdym ośrodku jest mniejsza niż  $c$ . By spełnić nierówność  $v < c$  musi być  $n > 1$ .

Zjawisko całkowitego wewnętrznego odbicia światła

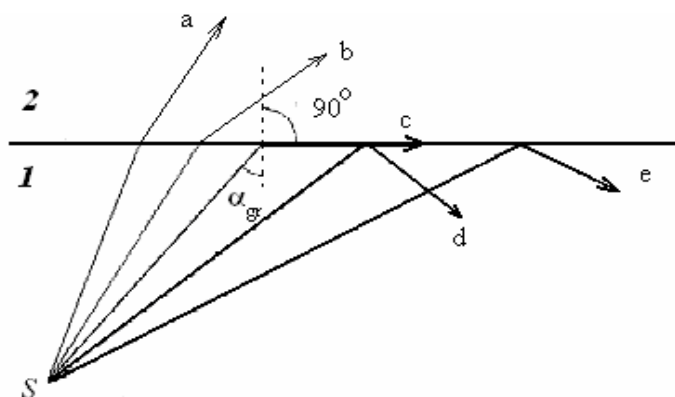
Przyjęto się ośrodki o mniejszym współczynniku załamania nazywać optycznie rzadszymi, a te o współczynniku załamania większym – optycznie gęstszymi. Przy przechodzeniu światła z ośrodka optycznie rzadszego do ośrodka optycznie gęstszego kąt załamania jest mniejszy, niż kąt padania  $\gamma < \alpha$ , a promień załamany istnieje dla dowolnej wartości kąta padania  $\alpha$ .

Rozpatrzmy przechodzenie światła z wody (ośrodek 1, kąt padania  $\alpha$ , wsp. załamania  $n_1$ ) do powietrza (ośrodek 2, kąt załamania  $\beta$ , wsp. załamania  $n_2 \cong 1$ ). Z równania (3) wynika, że w tym przypadku kąt załamania jest większy od kąta padania,  $\beta > \alpha$ . Dlatego stopniowe powiększanie kąta padania  $\alpha$  doprowadza w końcu przy pewnej jego wartości  $\alpha_{gr}$  do osiągnięcia przez kąt załamania wartości  $90^\circ$  – promień załamany biegnie wtedy wzdłuż granicy obu ośrodków (rys. 2) („kładzie się” na granicy ośrodków). Odpowiadający tej sytuacji kąt padania  $\alpha_{gr}$  nosi nazwę kąta granicznego.

Podstawiając do równania 3 wartości:  $n_1 = n$  (woda),  $n_2 \cong 1$  (powietrze), oraz  $\sin \beta = \sin 90^\circ = 1$  otrzymujemy wzór

$$\sin \alpha_{gr} = \frac{1}{n}. \quad (5)$$

Związek (5) umożliwia wygodne wyznaczenie względnego współczynnika załamania światła – wystarczy zmierzyć dla niego kąt graniczny  $\alpha_{gr}$ .



**Rys. 2.** Trzy rodzaje zachowania się promienia świetlnego na granicy dwu ośrodków, z których drugi jest optycznie rzadszy od pierwszego: przypadki a i b:  $\alpha < \alpha_{gr}$ , c:  $\alpha = \alpha_{gr}$ , d, e:  $\alpha > \alpha_{gr}$ .

Dalsze zwiększanie kąta padania  $\alpha$  – ponad wartość kąta granicznego  $\alpha_{gr}$  – powoduje, że promień nie przechodzi do drugiego ośrodka, lecz staje się promieniem odbitym od powierzchni rozgraniczającej oba ośrodki. Odbitym zgodnie z prawem odbicia – kąt odbicia  $\alpha'$  jest równy kątowi padania. W dodatku, mimo iż powierzchnia ta jest całkowicie przezroczysta, odbija się od niej w całości. Zjawisko to, zachodzące tylko dla promienia padającego z ośrodka optycznie gęstszego ku ośrodkowi optycznie rzadszemu, nosi nazwę

całkowitego wewnętrznego odbicia\*. W kierunku przeciwnym – dla promienia padającego w kierunku od ośrodka rzadszego ku gęstszemu – całkowite wewnętrzne odbicie nie zachodzi.

Zjawisko całkowitego wewnętrznego odbicia jest często wykorzystywane tam, gdzie zależy nam na uniknięciu strat jasności obrazu przy odbiciu światła w sprężenie optycznym. Na przykład, w zwykłej lornetce, w pryzmatach zamieniających obraz z odwróconego na prosty.

Współcześnie, najważniejszym zastosowaniem zjawiska całkowitego wewnętrznego odbicia są światłowody telekomunikacyjne. Światłowód jest cienkim włóknem szklanym (średnica rzędu 0,1 mm), którego warstwa zewnętrzna ma współczynnik załamania większy niż środek włókna. Światło biegnie w nich – nawet powyginanych – jak „uwięzione”: padając na ich ścianki zawsze pod kątem większym od granicznego, nie jest w stanie wydostać się z nich na zewnątrz i stale odbija się z powrotem do wnętrza włókna światłowodu. W porównaniu do metalowych przewodów przesyłowych światłowód umożliwia przesyłanie olbrzymiej ilości informacji. Jednym włóknem światłowodu przesyłać można jednocześnie tysiące rozmów telefonicznych i sygnałów łączności internetowej.

### *Literatura*

- [1] D. Halliday, R. Resnick, J. Walker, *Podstawy fizyki tom 4*, PWN, Warszawa 2003.
- [2] W. Mizerski, W. Nowaczek, *Tablice fizyczno-astronomiczne*, Wydawnictwo Adamantan, Warszawa 1995.

---

\* Dla „zwykłego” odbicia i załamania na granicy ośrodków przezroczystych (rys. 1), natężenie wiązki odbitej stanowi małą część natężenia światła padającego. Przykładowo, na granicy powietrza i wody przy kącie padania  $45^\circ$  odbija się 4,5%, reszta światła (95,5%) wchodzi do drugiego ośrodka.