

Ćwiczenie 57 (domowe) Wyznaczanie współczynnika załamania światła dla cieczy.

Joanna Janik-Kokoszka, Roman Kokoszka

Cel ćwiczenia: wyznaczenie współczynnika załamania światła dla wody oraz oleju.

Podstawowe wiadomości i definicje

Światło to fala elektromagnetyczna o częstotliwościach, na które reaguje oko ludzkie. Prędkość światła w próżni, oznaczana symbolem c , jest jedną z podstawowych stałych fizycznych. Jej wartość w próżni jest stała i wynosi 299 792 458 m/s (dla wielu obliczeń wystarczy przyjmować wartość przybliżoną $c \approx 3.00 \cdot 10^8$ m/s). Wartość ta nie zależy od kierunku obserwacji ani od częstotliwości i wynika z równań Maxwella. Dla wszystkich fal prędkość fali jest związana z jej częstotliwością oraz długością równaniem:

$$c = \lambda f \quad (1)$$

Barwa światła jest związana z jego częstotliwością.

Jeżeli światło rozchodzi się w innym ośrodku niż próżnia, wówczas dla danej częstotliwości jego prędkość oraz długość fali przyjmują mniejszą wartość niż w próżni. Wartości te w ośrodku materialnym zależą od częstotliwości.

Własności optyczne ośrodka określa się podając współczynnik załamania światła. Bezwzględny współczynnik załamania światła definiuje się jako stosunek wartości prędkości światła w próżni do wartości prędkości światła w danym ośrodku:

$$n = \frac{c}{v} \quad (2)$$

gdzie v jest prędkością światła w danym ośrodku.

Bezwzględny współczynnik załamania światła przyjmuje zwykle wartości większe od jedności.¹ Dla wody wartość $n = 1.33$, dla szkła w zależności od jego rodzaju może przyjmować wartości 1.5 ÷ 1.8, dla alkoholu etylowego 1.37, dla oleju 1.47. Dla powietrza współczynnik załamania światła ma wartość zbliżoną do jedności (1.0003).

Prawo odbicia i załamania światła

Zachowanie światła na granicy dwóch ośrodków wynika z równań Maxwella.

Jeżeli światło pada na granicę między materiałami o różnych własnościach optycznych, czyli charakteryzującymi się różnymi wartościami współczynnika załamania światła, wówczas częściowo ulega ono odbiciu, a częściowo przechodzi do drugiego ośrodka (rys.1). Wszystkie trzy promienie, czyli padający, odbity oraz załamany leżą w jednej płaszczyźnie.

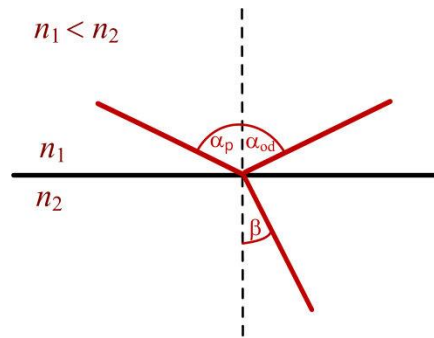
Prawo odbicia światła było znane już w starożytności. Mówi ono, że:

Kąt padania jest równy kątowi odbicia:

$$\alpha_p = \alpha_{od} \quad (3)$$

¹ Dla substancji przezroczystych z którymi mamy do czynienia, w zakresie częstotliwości światła widzialnego współczynnik załamania światła jest większy od jedności. Mogą jednak istnieć zakresy częstotliwości, w których współczynnik załamania światła będzie przyjmował wartości mniejsze od jedności, może być również wielkością zespoloną.

gdzie kąt α_p jest kątem padania, a α_{od} kątem odbicia. Oba kąty są liczone od normalnej, czyli prostej prostopadłej do powierzchni granicznej.



Rys. 1. Światło padające na granicę dwóch ośrodków częściowo odbija się od tej granicy, a częściowo przechodzi do drugiego ośrodka. Promień padający, odbity i załamany leżą w jednej płaszczyźnie. Kąty padania α_p , odbicia α_{od} oraz załamania β są liczone od tzw. normalnej, czyli prostej prostopadłej do powierzchni granicznej.

Prawo załamania światła, wyprowadzone na podstawie doświadczeń i sformułowane przez Snelliusa mówi, że:

Stosunek sinusa kąta padania do sinusa kąta załamania jest wielkością stałą:

$$\frac{\sin(\alpha_p)}{\sin(\beta)} = const, \quad (4)$$

gdzie α_p oraz β są odpowiednio kątami padania i załamania.

Stała z równania (4) jest równa stosunkowi wartości prędkości światła w ośrodku 1 do jej wartości w ośrodku 2, czyli względnemu współczynnikowi załamania światła ośrodka drugiego względem pierwszego, n_{21} . Można ją wyliczyć znając współczynniki załamania światła w obu ośrodkach:

$$const = n_{21} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{\frac{c}{v_2}}{\frac{c}{v_1}} = \frac{v_1}{v_2} \quad (5)$$

Prawo załamania światła można więc zapisać jako:

$$\frac{\sin(\alpha_p)}{\sin(\beta)} = \frac{n_2}{n_1} \quad (6)$$

Przekształcając równanie (6) otrzymujemy najłatwiejszą do zapamiętania postać prawa załamania światła:

$$n_1 \sin(\alpha_p) = n_2 \sin(\beta) \quad (7)$$

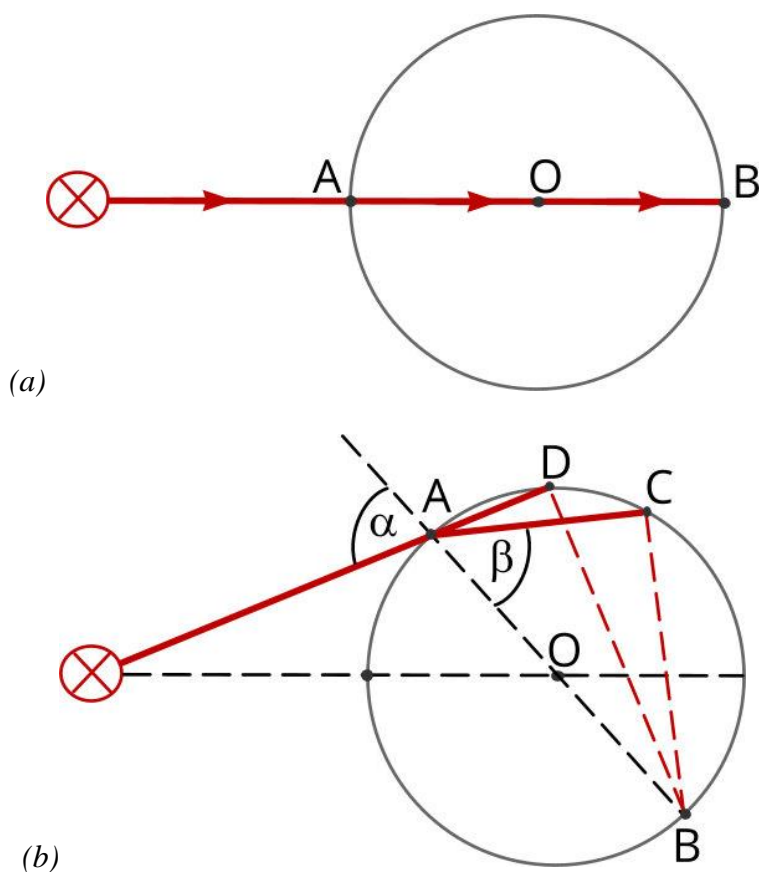
Prawa odbicia i załamania światła są podstawowymi prawami optyki geometrycznej. Można je wyprowadzić w prosty sposób korzystając ze sformułowanej w XVII w. zasady Fermata, która mówi, że *promień świetlny przebiega pomiędzy dwoma punktami taką drogą, żeby czas na jej przebycie był ekstremalny*². Można je sformułować również wykorzystując zasadę Huygensa. Zgodnie z nią, *każdy punkt czola fali jest źródłem fal kulistych. Nowe czoło fali (np. po czasie t) jest dane przez powierzchnię styczną do tych fal kulistych.*

² Zwykle jest to czas minimalny.

Zasada pomiaru³

Jeżeli światło pada na powierzchnię dokładnie prostopadle do niej, czyli pod kątem 0° do normalnej, to zgodnie z prawem załamania kąt załamania również wynosi 0° . Przy dowolnym innym kącie padania kąt załamania będzie zależał od względnego współczynnika załamania światła substancji pomiędzy którymi promień się załamuje⁴.

W doświadczeniu będziemy używać naczyń o przekroju okręgu (patrz Rys. 2). Bieg promienia zarówno przez powietrze, jak i przez naczynie napełnione cieczą w pierwszym przypadku jest pokazany na rysunku 2a. Jeżeli naczynie, częściowo wypełnione badaną substancją skreścimy o pewien kąt, wówczas promień światła pada na naczynie pod kątem innym niż 0° . Wtedy promień znajdujący się w powietrzu (czyli nad powierzchnią cieczy) nie ulega załamaniu i na powierzchnię naczynia pada w punkcie oznaczonym na rysunku jako D (zaniedbujemy niewielkie przesunięcie równoległe promienia w ścianie naczynia). Promień światła biegnący poniżej powierzchni cieczy ulega załamaniu i na powierzchnię naczynia pada w punkcie C. Sytuacja opisana w tym przypadku jest narysowana schematycznie na rysunku 2b.



Rys. 2. Bieg promienia przez naczynie napełnione wodą przy promieniu prostopadłym do granicy między ośrodkami (a) oraz przy dowolnym kącie padania, AD – bieg światła w powietrzu, AC bieg promienia światła w badanej cieczy (b). Na rysunku A oznacza szczelinę, punkt B określa miejsce, w którym otrzymujemy obraz przy padaniu prostopadłym światła (kąt od normalnej wynosi 0°), C jest obrazem dolnej części (pod powierzchnią cieczy) szczeliny, a D obrazem górnej części (nad powierzchnią cieczy).

³ Sposób wykonania ćwiczenia opracowany na podstawie ćwiczenia 42 „Zbiór zadań z olimpiad fizycznych. Zadania doświadczalne wraz z rozwiązaniami”, W. Gorzkowski, A. Kotlicki, Wydawnictwa Szkolne i Pedagogiczne, Warszawa 1984

⁴ Cienka warstwa szkła powoduje niewielkie przesunięcie promienia i nie wpływa na wynik doświadczenia.

Korzystamy z prawa załamania światła:

$$\frac{\sin(\alpha)}{\sin(\beta)} = \frac{n_c}{n_p}, \quad (8)$$

gdzie n_c oraz n_p są współczynnikami załamania światła odpowiednio badanej cieczy oraz powietrza (można przyjąć, że $n_p = 1$).

Trójkąty ABC oraz ABD są trójkątami prostokątnymi, ponieważ są oparte na średnicy okręgu. Kąt DAB jest równy kątowi α , ponieważ są to kąty wierzchołkowe. Korzystając z definicji funkcji sinus w trójkącie prostokątnym można wyliczyć:

$$\sin \alpha = \frac{BD}{AB} \quad (9)$$

Podobnie, korzystając z trójkąta ABC wyliczamy:

$$\sin \beta = \frac{BC}{AB} \quad (10)$$

Podstawiając równania (9) oraz (10) do (8) otrzymujemy szukany współczynnik załamania światła dla badanej cieczy:

$$n_c = \frac{\frac{BD}{AB}}{\frac{BC}{AB}} = \frac{BD}{BC} \quad (11)$$

Przyrządy:

1. Szklane naczynie o cienkich ściankach o kształcie walca (może być szklanka, naczynie z zaparacza kawy lub inne),
2. Pasek papieru lekko prześwitującego z wyciętą wąską szczeliną (szczelina nie może być zbyt wąska, żeby w pomiarze nie przeszkadzały efekty dyfrakcyjne),
3. Źródło światła (latarka, wskaźnik laserowy, latarka z komórki),
4. Cyrkiel i linijka lub suwmiarka,
5. Podstawa pod źródło światła (np. książki),
6. Woda, olej.

Sposób wykonania ćwiczenia:

1. Na cienkościenne walcowate naczynie należy nakleić pasek prześwitującego papieru z wąską szczeliną. Szczelina powinna być pionowa.
2. Mniej więcej do połowy wysokości szczeliny nalać wody.



Zdjęcie 2. Szklanka z naklejonym paskiem napelniona wodą.

3. Jako źródła światła można użyć diodki oświetlającej z komórki, latarki itp. Ustawić naczynie tak, aby źródło światła, środek szklanki oraz szczelina leżały w jednej prostej (odpowiada to sytuacji z rysunku 2a). Sytuację taką osiąga się wtedy, gdy obraz szczeliny nad i pod powierzchnią wody, prześwitujący przez papier będzie tworzył jedną prostą. W ten sposób jest określone położenie punktu B, który należy zaznaczyć na papierze oklejającym naczynie.
4. Obrócić szklankę o pewien kąt. Obraz szczeliny nad i pod powierzchnią cieczy rozdzieli się. Górna plamka światła będzie wyznaczała położenie punktu D (bieg promienia w powietrzu), a dolna odpowiadająca biegowi promienia przez ciecz wyznaczy położenie punktu C (patrz rys. 2b). Zaznaczyć te punkty na papierze przyklejonym do naczynia.
5. Obrócić szklankę i ponownie zaznaczyć położenie punktów D i C
6. Powtórzyć pomiar tak, aby otrzymać co najmniej siedem różnych par wartości BC i BD.
7. Korzystając z suwmiarki (lub cyrkla i linijki) zmierzyć odległości BC oraz BD (ewentualnie po odklejeniu paska można zmierzyć długość łuku i wyliczyć długość odpowiedniej cięciwy)
8. Doświadczenie proszę powtórzyć dla oleju. W sprawozdaniu proszę podać jego rodzaj.
9. Proszę wykonać zdjęcie (selfie) swojej osoby wraz z zestawem pomiarowym (lub poprosić kogoś z rodziny o wykonanie takiego zdjęcia). Zdjęcie jest dowodem osobistego wykonania ćwiczenia i będzie równoważne podpisanym przez asystenta wynikom pomiarowym.
10. Przekształcając równanie (11), otrzymujemy zależność liniową między długościami odcinka BD oraz BC, współczynnik kierunkowy prostej jest równy współczynnikowi załamania światła dla badanej cieczy:

$$BD = n_w \cdot BC$$

11. Do otrzymanych punktów dopasować metodą najmniejszych kwadratów prostą

$$y = ax + b.$$

Wyznaczyć parametry a oraz b wraz z niepewnościami.

12. Porównać otrzymany wynik z wartością tablicową dla badanej cieczy.
13. Przedyskutować otrzymane wyniki.