Materiały do wykładu



Fizyka w doświadczeniach

Krzysztof Korona

Uniwersytet Warszawski
Wydział Fizyki

2010-26

Materiały do celów dydaktycznych przeznaczone dla studentów Uniwersytetu Warszawskiego,
Wykorzystanie ich w innych celach jest możliwe pod warunkiem uzyskania zgody autora.

V Światło widzialne i niewidzialne

Kolejne dwa wykłady poświęcone będą światłu, jego właściwościom i oddziaływaniu z materią. Światło jest najszybszym obiektem znanym fizyce, a jego prędkość jest jedną z podstawowych stałych fizycznych. Światło ma też ogromne znaczenie dla nas osobiście, bo dzięki niemu widzimy.

Najnowsze odkrycia pozwalają nam lepiej wykorzystywać światło w technice: światłowody dla komunikacji, lasery w medycynie i przemyśle itd. Dziedzinę fizyki zajmującą się światłem nazywamy optyką.

12. Właściwości światła



Rys. 12.1 Tęcza w Sudetach

12.1 Wstęp

Naturę światła ludzie próbowali odgadnąć od wielu wieków, jednak dopiero od niedawna (nieco ponad 100 lat) wiemy, że światło jest falą elektromagnetyczną, a jednocześnie strumieniem fotonów.

W niniejszym wykładzie będą omawiane falowe właściwości światła.

Plan wykładu

1. Wstęp
2. Widmo światła
3. Dyfrakcja
4. Interferencja
5. Rozpraszanie i polaryzacja światła
6. Podsumowanie

12.2 Widmo światła

Widmem nazywamy wykres lub inny sposób przedstawienia, z jakich częstości składa się dane drganie lub fala. W przyrodzie, dzięki zjawisku tęczy, w naturalny sposób możemy od czasu do czasu przekonać się, jakie składniki zawiera światło słoneczne (patrz rys. 12.1).

Widmo częstości światła

Światło widzialne to fale elektromagnetyczne o długościach od 0,38 do 0,78 μm (1 μm = 0.001 mm = 10^{-6} m), czyli o częstościach od 380 do 790 THz (1 THz = 1000 GHz = 1 mln MHz = 1 bilion Hz). Przypomnijmy tu, że zależność pomiędzy długością (λ) a częstością (ν) fali świetlnej dana jest wzorem:

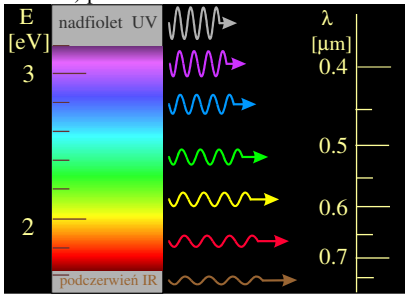
$$\lambda = c/\nu \,, \qquad (12.1)$$

gdzie prędkość światła c = 299 792 458 m/s ≅ 300 μm*THz.

Najwyższe częstości (najkrótsze fale) posiada światło fioletowe, najniższe częstości (najdłuższe fale) posiada światło czerwone.

Orientacyjne zakresy długości fal dla poszczególnych barw wynoszą:

- fioletowa 380-430 nm,
- niebieska 430-500 nm,
- zielona 500-570 nm,
- żółta 570-620 nm,
- czerwona 620-780 nm.

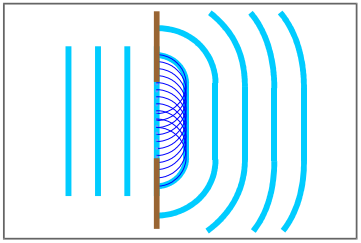


Rys. 12.2 Widmo fal świetlnych

12.3 Dyfrakcja

Zachowanie się fali w pobliżu przeszkody można wyjaśnić w oparciu o zasadę Huygensa. Mówi ona, że każdy punkt frontu falowego jest źródłem nowej fali kulistej.

Wyjaśnimy to na przykładzie fali przechodzącej przez otwór.



Rys. 12.3 Dyfrakcja fal na szczelinie

Analizę rozpoczynamy w momencie, gdy grzbiet fali mija szczelinę. Punkty grzbietu traktujemy jak źródła nowych fal (patrz rys. 12.7). Fale z sąsiednich punktów sumują się, tworząc nowy płaski grzbiet, ale końcowe punkty grzbietu przechodzącego przez szczelinę, nie mające sąsiadów, dadzą fale kuliste rozchodzące się na boki.
Efekt ten obserwowaliśmy na wykładzie, wykorzystując fale rozchodzące się po powierzchni wody.

Dyfrakcja i interferencja fal (!)

Dyfrakcja fal to zmiana kierunku ruchu fal polegająca na rozchodzeniu się fal we wszystkich kierunkach, po ominięciu przeszkody. Dyfrakcje łatwo zauważymy w przypadku fal na wodzie. Natomiast, aby

zaobserwować ugięcie (dyfrakcję) fal, świetlnych należy użyć bardzo wąskiej szczeliny i źródła fal spójnych (mających ustaloną fazę), czyli lasera.

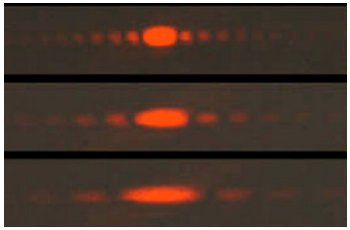
Dyfrakcja lasera na szczelinie

Przyrządy i materiały

- laser,
- szczelina 0,1 – 0,5 mm,
- ekran.

Przebieg doświadczenia

Laser ustawiamy w odległości 2 - 5 m od ekranu, a w jego wiązkę wstawiamy szczelinę.



Rys. 12.4 Obraz dyfrakcja lasera na szczelinie.
Od góry: szeroka, średnia i wąska szczelina.

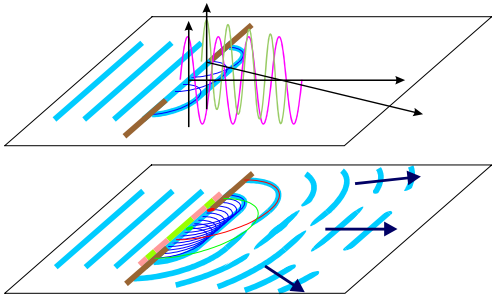
Obserwujemy obraz jak na rys. 12.5. Dla szeroko otwartej szczeliny widzimy pojedynczy promień lasera. Gdy zwężimy szczelinę, zamiast pojedynczej plamki lasera pojawia się szereg prążków. Zmieniając dalej szerokość szczeliny stwierdzamy, że im węższa szczelina, tym szersze prążki (i większe odstępy pomiędzy nimi). W miarę zwężania szczeliny obraz poszerza się, ciemnieje, aż w końcu znika.

12.4 Interferencja

Zjawisko interferencji powstaje wtedy, gdy nakładają się na siebie dwie fale o tej samej częstości i stałej różnicy faz. Jeśli fale nakładają się zgodnie w fazie, czyli grzbiet trafia na grzbiet, a dolina na dolinę, to dodają się (mówimy o interferencji konstruktywnej). Jeśli grzbiet jednej fali trafia na dolinę drugiej, to fale odejmują się tak, że obie mogą zniknąć.

Warto zauważyć, że dodawać mogą się też dwa strumienie cząstek. Jednak cząstki nie mogą odejmować się. Fakt, że nakładające się dwa strumienie światła mogą się osłabić, dowodzi, że światło jest falą.

Przy przejściu przez przesłonę rozważaliśmy poprzednio tylko dyfrakcję powodującą zmianę kierunku. W rzeczywistości następuje również interferencja fal wychodzących z różnych punktów szczeliny.



Rys. 12.5 Dyfrakcja i interferencja

Dla różnych kierunków drogi, nakładających się fal są różne. Zatem dla niektórych kierunków fale dodadzą się, a fale biegnące w innych

kierunkach odejmą się.

Jeśli fale interferują pod małym kątem, to powstaje obraz o rozmiarach znacznie większych od długości fali, a więc łatwy do obserwacji. Dzięki temu możemy obserwować obraz interferencyjny dla fal świetlnych, mimo, iż mają one długość poniżej 1 μm (0,001 mm).

Doświadczenie Younga polega na nałożeniu na siebie fal przechodzących przez dwie, blisko siebie leżące szczeliny.

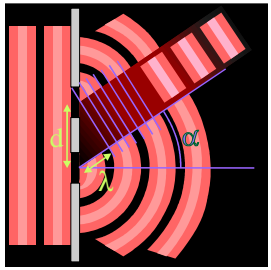
Interferencja na 2 szczelinach (!)

Przyrządy i materiały

- laser,
- podwójna szczelina,
- ekran.

Przebieg doświadczenia

Doświadczenie wykonujemy podobnie jak w przypadku pojedynczej szczeliny. Układ dwóch szczelin można wydrukować na folii przy pomocy drukarki komputerowej. Drukarka o rozdzielczości 600 dpi może w zasadzie drukować paski o szerokości 0,05 mm. Dobry obraz można uzyskać ze szczelin o szerokości 0,1 mm odległych o 0,2, 0,3 i 0,4 mm. Ekran ustawiamy w odległości 2 – 3 m.



Rys. 12.6 Dyfrakcja i interferencja na dwóch szczelinach

Porównując pary szczelin o różnych odległościach, stwierdzamy, że im mniejsza odległość, tym szersze prążki (i większe pomiędzy nimi odstępy).

Geometryczna analiza interferencji pokazuje, że aby nastąpiła interferencja pozytywna, różnica dróg dla fal z dwóch szczelin powinna być wielokrotnością długości fali, czyli wynosić $\Delta s = m\lambda$ (m = 0, 1, 2 ..). Musi być zatem spełniony warunek: $d \sin(\alpha) = m\lambda$, czyli:

$$\sin(\alpha) = \frac{m\lambda}{d} \qquad (12.2)$$

gdzie α – kąt obserwacji, m = 0, 1, 2, .. - numeruje kolejne prążki interferencyjne.

Dwie szczeliny przepuszczają niewiele światła. Dokładając kolejne, równoodległe szczeliny przepuszczamy więcej światła, a jednocześnie zjawisko interferencji potęguje się. Przyrząd złożony z szeregu równoodległych szczelin nazywamy siatką dyfrakcyjną. Siatki dyfrakcyjne posiadają znacznie większe możliwości niż para szczelin i dlatego wykorzystywane są często do analizy widma światła.

Aby zaobserwować działanie siatki dyfrakcyjnej, musimy uwidocznić bieg promieni. Pomoże nam w tym akwarium z wodą lekko zamąconą mlekiem.

Siatka dyfrakcyjna przed akwarium (!)

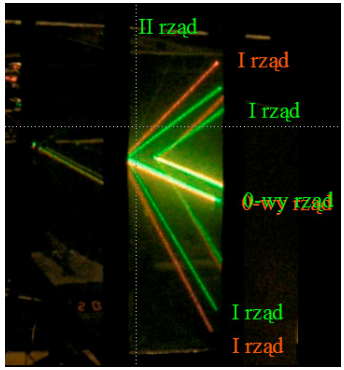
Przyrządy i materiały

- Siatka dyfrakcyjna (na zdjęciu: siatka 150/cm).
- Laser (na zdjęciu: czerwony, AlGaAs, 650 nm i zielony, Nd:YAG, 532 nm).
- Akwarium z wodą, do której dodano odrobinę mleka lub mydła, aby zwiększyć rozpraszanie światła i poprawić widoczność promieni.

Przebieg doświadczenia

Siatkę dyfrakcyjną mocujemy do ścianki akwarium i oświetlamy laserem.

W wodzie obserwujemy rozchodzenie się światła. Oprócz głównego promienia lasera pojawiają się prążki interferencyjne.

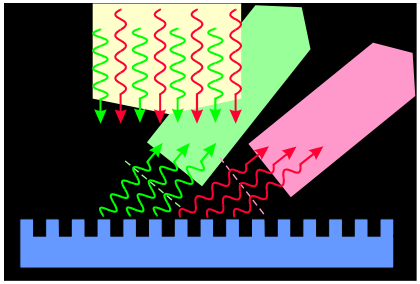


Rys. 12.7 Interferencja na siatce dyfrakcyjnej w akwarium (2 lasery: czerwony i zielony)

Prążki interferencyjne światła o krótszej fali (zielonego) odchylają się mniej niż prążki światła o dłuższej fali (czerwonego). Efekt ten jest zgodny ze wzorem (12.2), który pokazuje, że im dłuższa fala tym większy kąt. Warto zauważyć, że zależność ta jest odwrotna niż dla rozszczepienia światła w pryzmacie (tam im krótsza fala tym większy kąt).

Przykładem łatwo dostępnych siatek dyfrakcyjnych są płyty kompaktowe. Płyty CD odbijają światło od metalizowanych linii, czyli są to siatki odbiciowe. Prążki interferencyjne występują dla takich kątów, aby różnica dróg fal odbitych od sąsiednich linii odpowiadała

długości fali (patrz rys. 12.8). W tym wypadku obowiązuje takie samo równanie jak dla siatki transmisyjnej (12.2).



Rys. 12.8 Odbicie fali świetlnej od siatki dyfrakcyjnej.

Odległości pomiędzy rowkami wynoszą: d = 1,6 μm, a więc zgodnie ze wzorem (12.2) dla światła o λ = 0,5 μm (zielone) pierwszy prążek interferencyjny (m = 1) odchyli się o kąt 18^o.

Dualizm korpuskularno-falowy, cząstki jako fale

Na początku XX wieku odkryto, że światło jest równocześnie falą i strumieniem cząstek. W ślad za tym Louis de Broglie wysunął hipotezę (potwierdzoną niedługo potem), że wszystkie obiekty materialne mają charakter falowy. (Louis de Broglie otrzymał nagrodę Nobla w 1929 r.)
Obiekty materialne o masie *m*, prędkości *v*, pędzie *p* i energii kinetycznej E_{kin} są falami o długości fali λ:

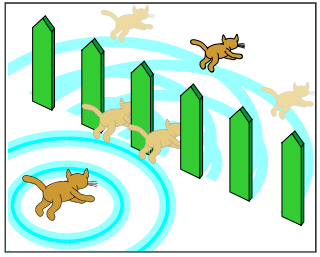
$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv} = \frac{h}{\sqrt{2mE_{kin}}} \qquad (12.3)$$

gdzie h – stała Plancka = $6{,}626070015 \cdot 10^{-34}$ J·s
≈ 4,13 meV·ps.

Stała Plancka jest wartością bardzo małą, więc własności falowe dużych ciał są praktycznie niedostrzegalne. Niemniej jednak powinniśmy o nich pamietać.

Przykłady:
Elektron o energii 100 keV:
λ = 1,2 Å.
Kot o masie 3 kg (*v* = 5 m/s):
$\lambda = 0{,}4 \cdot 10^{-24}$ Å.

1Å = 10^{-10} m ≈ średnica atomu.



Rys. 12.9 Czy kot może znajdować się jednocześnie w kilku stanach?

Jak widać własności falowe kota są trudne do zaobserwowania. Największymi obiektami, na których zaobserwowano interferencje, są cząsteczki fullerenów C_{60}. Natomiast od dawna wykorzystuje się falowe własności elektronów do budowy mikroskopów elektronowych.

12.5 Załamanie i odbicie światła

Ludzie od dawna wiedzieli, że promień światła wchodzący do wody zmienia kierunek. Jednak wyjaśnienie tego zjawiska wcale nie jest oczywiste. Aby je zrozumieć, trzeba wiedzieć, że światło jest falą i że jego prędkość zależy od ośrodka, w którym się rozchodzi.

Pomiar drogi optycznej dalmierzem

Na wykładzie używaliśmy dalmierza laserowego. Urządzenie to wysyła impulsy, które odbijają się od mierzonego obiektu. Dalmierz wykrywa odbite impulsy i na podstawie czasu przelotu oblicza odległość. Zakłada przy tym, że światło porusza się w powietrzu.

Przy pomocy dalmierza zmierzyliśmy długość akwarium częściowo wypełnionego wodą. Gdy wiązka lasera poruszała się w powietrzu, otrzymaliśmy długość akwarium około 42 cm. Gdy pomiar powtórzyliśmy, ale tak, że wiązka przechodziła przez wodę, otrzymaliśmy wynik około 56 cm. Efekt ten wynika ze zmniejszenia prędkości światła w wodzie. Stosunek prędkości wynosi n = 56/42 = 1,33 i jest równy współczynnikowi załamania wody.

Załamanie światła

Gdy światło przechodzi z ośrodka o danym współczynniku załamania do ośrodka o innym współczynniku załamania, zmienia kierunek swojego biegu. Zjawisko to, zwane załamaniem światła na granicy ośrodków, najłatwiej jest analizować, używając promienia lasera wchodzącego z powietrza do wody.

Załamanie światła w akwarium (!)

Przyrządy i materiały

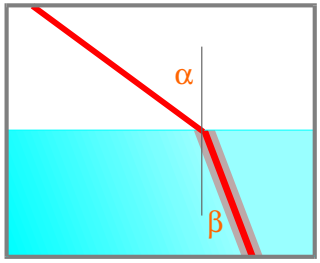
- akwarium,
- laser wskaźnikowy,
- kadzidełko lub rozpylacz.

Przebieg doświadczenia

Bieg światła w powietrzu możemy uwidocznić przy pomocy dymu z kadzidełka lub mgiełki z rozpylacza, a w wodzie dodając kilka kropli mleka (nie więcej!).

Jeśli kąt padania $\alpha = 0$, to światło biegnie po prostej. Gdy α rośnie, zwiększa się też zmiana kierunku na skutek załamania.

Kąty padania α i załamania β mierzone są pomiędzy promieniami światła, a prostą prostopadłą do powierzchni.



Rys. 12.10 Załamanie światła na granicy dwóch ośrodków

Prawo załamania światła (!)

Prawo Snelliusa

Stosunek sinusa kąta padania α do sinusa kąta załamania β jest stały i równy współczynnikowi załamania n.

$$\frac{\sin\alpha}{\sin\beta} = n \qquad (12.4)$$

Prawo to podał Willebrord Snel van Royen w 1621 r.

Współczynnik załamania światła wyznaczony jest przez prędkość światła w danym materiale.

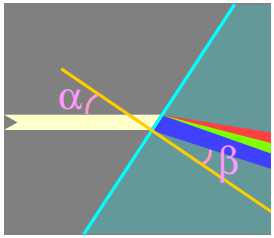
$$n = \frac{c}{v_{\text{światła w materiale}}} \qquad (12.5)$$

Przykładowe współczynniki załamania światła:

soczewka oka	n = 1,42
szkło	n = 1,5 - 1,9
diament	n = 2,417

Dyspersja światła

Prędkość rozchodzenia się fali świetlnej w ośrodku (a więc i współczynnik załamania) zależy od długości fali (czyli barwy światła). Zjawisko to nazywamy **dyspersją**.



Rys. 12.11 Załamanie światła na granicy dwóch ośrodków

Dyspersja sprawia, iż światło o różnych barwach załamuje się pod różnymi kątami, co prowadzi do **rozszczepienia światła.**

Warto tu przypomnieć, że tęcza jest efektem rozszczepienia światła białego na składowe o różnych długościach fali. Różne fale załamują się pod różnymi kątami, bo współczynnik załamania światła zmienia się z długością fali.

Na ogół współczynniki załamania są wyższe dla krótszych fal. Na przykład dla lekkiego szkła:

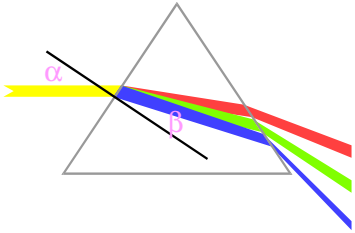
λ = 700 nm, n = 1,513

λ = 450 nm, n = 1,526

Światło przechodzące przez szybę załamuje się na jej przedniej powierzchni w jedną stronę, a na tylnej w drugą. W efekcie, po wyjściu z szyby światło biegnie w tym samym kierunku. Inaczej sprawa wygląda w przypadku pryzmatu.

Przejście światła przez pryzmat

Pryzmat jest bryłą geometryczną, która ma ściany ustawione pod pewnym kątem względem siebie. Dzięki temu światło przechodzące przez pryzmat może załamać się na przedniej i na tylnej powierzchni w tę samą stronę. W efekcie jego kierunek silnie się zmieni. Kąt wyjściowy znacząco zależy od współczynnika załamania, a więc jest różny dla różnych długości fal (czyli dla różnych barw). Dzięki temu strumień światła białego ulega w pryzmacie rozszczepieniu na poszczególne barwy.



Rys. 12.12 Załamanie i rozszczepienie światła w pryzmacie

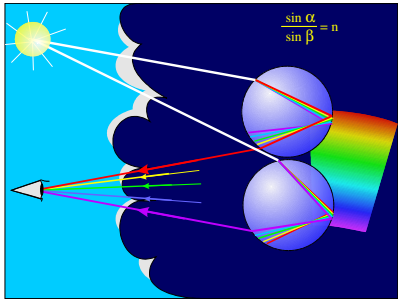
Ponieważ współczynniki załamania są wyższe dla krótszych fal, pryzmat najsilniej odchyla światło fioletowe, a najsłabiej czerwone.

Tęcza (!)

Tęcza powstaje, gdy światło słoneczne pada na unoszące się w powietrzu krople wody. Fale o różnej długości rozchodzą się w wodzie z różnymi prędkościami, co oznacza, że mają różne współczynniki załamania. Na skutek załamania na granicy powietrza i wody, światło rozszczepia się na poszczególne barwy. Zjawisko tęczy przypomina nam o dwóch ważnych faktach:

1. Światło białe jest mieszaniną poszczególnych barw.
2. Światło o różnej barwie ma różne współczynniki załamania.

Warto pamiętać o tym, gdy będziemy mieli okazje podziwiać piękną tęczę.



Rys. 12.13 Powstawanie tęczy

Wiedząc, że do wytworzenia tęczy wystarczy białe światło i woda, spróbujemy odtworzyć to zjawisko przy pomocy doświadczenia "Tęcza w szklance".

Tęcza w szklance

Przyrządy i materiały

- jasna lampa, szczelina i soczewka (ogniskowa f = 15 – 30 cm),
- ekran,
- szklanka lub zlewka z wodą. Doświadczenie wychodzi też na okrągłej kolbie (bardziej przypominającej kroplę wody).

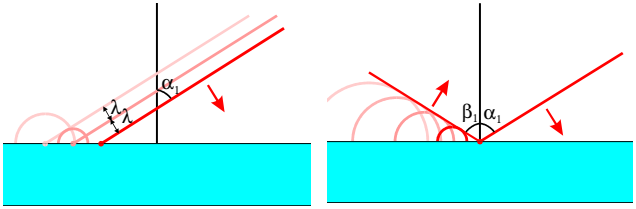
Przebieg doświadczenia

Przy pomocy szczeliny i soczewki formujemy wiązkę światła lampy tak, aby na ekranie tworzyła wąski pasek. W strumień światła wstawiamy szklankę tak, aby światło wchodziło prawie stycznie do bocznej powierzchni. Ustawiamy ekran w taki sposób, aby padał na niego strumień światła odbity wewnątrz szklanki i rozszczepiony przy wejściu i wyjściu z wody. Regulujemy ostrość soczewką. Na ekranie obserwujemy barwny pas tęczy utworzonej przez światło rozszczepione w wodzie.

Prawo odbicia (!)

Jeżeli rozważymy odbicie ciała sprężystego, np. piłki, możemy wyznaczyć prawo odbicia, analizując składowe wektora pędu. Załóżmy, że odbijamy piłkę od poziomej płaszczyzny. W takim wypadku składowa pozioma pędu, p_x, zachowuje się, natomiast składowa pionowa pędu, p_y, zmienia się na przeciwną. Wynika stąd, że w przypadku piłki kąt padania będzie równy kątowi odbicia.

Aby odtworzyć sposób odbicia fali od powierzchni, należy użyć zasady Huygensa mówiącej, że każdy punkt grzbietu fali jest źródłem nowej fali kulistej. Przedstawione to zostało na rysunku 12.14.



Rys. 12.14 Konstrukcja Huygensa: odbicie fali od powierzchni

Kąt padania $\alpha = 90^o - \alpha_1$, kąt odbicia $\beta = 90^o - \beta_1$.

Gdy grzbiet fali dochodzi do kolejnych punktów powierzchni, generuje fale kuliste. Fale te składają się ze sobą, odtwarzając grzbiet.

Porównując odległości i kąty, zauważymy, że nowy grzbiet rozchodzi się pod kątem β, równym kątowi padania α.

Prawo odbicia fal

Kąt padania jest równy kątowi odbicia.

Prawo to podał już Euklides w dziele "Optyka" w 300 r. p.n.e. Omawiał tam też zwierciadła wypukłe i wklęsłe.

Zauważmy, że spełniając takie prawo odbicia, światło porusza się po najkrótszej drodze łączącej dwa punkty znajdujące się nad zwierciadłem przy pomocy linii, która dotyka do powierzchni tego zwierciadła.

Zwróćmy też uwagę, że dla ciał materialnych (cząstek, piłeczek itp.) prawo odbicia jest identyczne. Zatem sam sposób odbicia nie pozwala odróżnić, czy mamy do czynienia z falą, czy ze strumieniem cząstek.

Współczynnik odbicia od dielektryka

Wewnątrz materii, na skutek przesuwania się ładunków elektrycznych, do natężenia pola elektrycznego E dodaje się polaryzacja P. Wytwarzane w ten sposób pole indukcji elektrycznej D jest proporcjonalne do natężenia E:

$$D = \varepsilon_0 \varepsilon_1 E \qquad (12.6)$$

gdzie ε_1 – stała dielektryczna ośrodka.

Jeżeli dielektryk zmienia natężenie pola padającej fali, to prowadzi to do odbicia fali elektromagnetycznej. Odbicie jest jedynie częściowe. O tym, jaka część natężenia wiązki padającej (I_0) odbije się (I_R), mówi nam współczynnik odbicia $R = I_R/I_0$. W przypadku odbicia od dielektryka o stałej ε, współczynnik ten wynosi:

$$R = \frac{\left(\sqrt{\varepsilon} - 1\right)^2}{\left(\sqrt{\varepsilon} + 1\right)^2} \qquad (12.7)$$

Ponieważ pomiędzy stałą dielektryczną, a współczynnikiem załamania istnieje związek $n^2 = \varepsilon\mu$, a podatność magnetyczna μ wynosi na ogół 1, możemy podać wzór:

$$R = \frac{(n-1)^2}{(n+1)^2} \qquad (12.8)$$

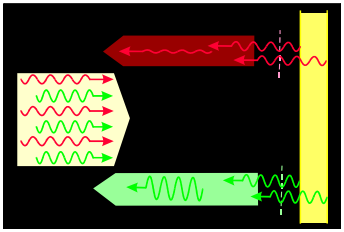
Na przykład dla szkła n = 1,5; R = 4%, a dla wody n = 1,33; R = 2%.

Interferencje w cienkich warstwach (!)

Każdy pewnie nieraz obserwował zmieniające się barwy baniek mydlanych albo plam oleju rozlanego na wodzie. W obu przypadkach barwa odbitego światła ustala się dzięki zjawisku interferencji w cienkich warstwach.

Na wykładzie obserwowaliśmy odbicie od płaskiej błonki mydlanej

rozpiętej na pętli z drutu. Błonka u góry była cieńsza, a u dołu grubsza, dzięki czemu można było podziwiać interferencję fal o różnych długościach, a więc różnych barwach.



Rys. 12.15 Odbicie fal świetlnych od cienkiej warstwy

Fala świetlna odbija się od przedniej i od tylnej powierzchni warstwy o grubości d. Natężenie obu odbitych fal jest podobne, ale fala odbita od tylnej warstwy musi przebyć drogę dłuższą o 2d w ośrodku, w którym ma *n* razy mniejszą prędkość, a więc spóźni się tak, jakby pokonała drogę 2d*n*. Obie fale będą interferować. Wzmocnienie następuje gdy:

$$2dn = m\lambda,\ m = 1, 2, .. \qquad (12.9)$$

gdzie: λ – długość fali, d – grubość warstwy, n – współczynnik załamania.

Zjawisko interferencji w cienkich warstwach wykorzystuje się w filtrach interferencyjnych. Filtry takie składają się na ogół z wielu cienkich (kilkaset nanometrów) warstw dielektryków, dobranych tak, aby na skutek interferencji przechodził tylko zadany zakres fal świetlnych.

Interesującą własnością filtrów interferencyjnych jest zmiana przepuszczanej barwy w zależności od kąta padania światła. Związane jest to ze zmiana długości dróg fal rozchodzących się w warstwach dielektryka.

12.6 Rozpraszanie i polaryzacja światła

Dlaczego niebo jest niebieskie? – aby poznać odpowiedź na to pytanie, wykonujemy doświadczenie "zachód słońca w wodzie z mlekiem".

Zachód słońca w wodzie z mlekiem (!)

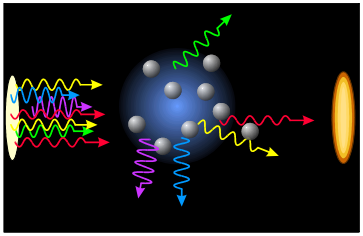
Przyrządy i materiały

- akwarium,
- mydło,
- rzutnik lub silna lampa i soczewka.

Przebieg doświadczenia

Rzutnik ustawiamy tak, aby dawał jasną, okrągłą plamę na ekranie. Następnie w strumień światła wstawiamy akwarium z czystą wodą.

Do akwarium powoli, mieszając, dolewamy rozcieńczony roztwór wody z mydłem lub mlekiem.



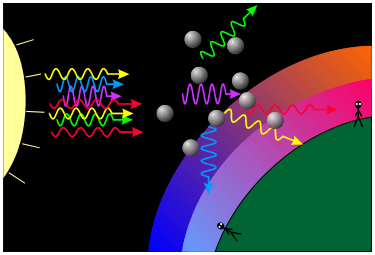
Rys. 12.16 Rozpraszanie światła w wodzie z mlekiem

Światło rozprasza się na cząsteczkach mydła tworząc smugę, która wchodząc do akwarium jest niebieskawa, a dalej żółknie. Jednocześnie plama światła na ekranie, która początkowo była biała, w miarę dodawania mleka żółknie, a potem robi się czerwona, tak jak zachodzące słońce.

Przyczyną tego efektu jest fakt, że im krótsza fala, tym silniej się rozprasza.

Najsilniej rozpraszane jest światło niebieskie i fioletowe, więc dlatego światło rozproszone ma barwę niebieską. Najłatwiej przechodzi światło

czerwone i dlatego plama światła na ekranie staje się czerwona.
Pomaga to zrozumieć, na przykład, dlaczego niebo jest niebieskie.



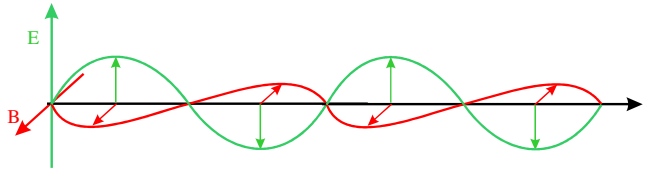
Rys. 12.17 Rozpraszanie światła w atmosferze

Niebieskie światło jest silnie rozpraszane i dlatego dociera do nas z różnych stron nieba i właśnie ten efekt powoduje, że niebo jest niebieskie.
Niebieskie światło dociera do nas z różnych stron nieba, także tych odległych od słońca, a więc zimnych. Rozproszone niebieskie światło nadaje też barwę wodzie. Światło czerwone słabo się rozprasza, dlatego dociera do nas głównie wprost ze słońca. Pewnie dlatego czerwień kojarzy nam się z ciepłem, a niebieski z zimnem.

Na wykładzie sprawdzamy też polaryzację światła wychodzącego z akwarium. Okazuje się, że światło rozproszone w bok ma polaryzację prostopadłą do kierunku światła padającego.

Polaryzacja

Światło jest falą poprzeczną, co oznacza, że kierunek jego drgań leży w płaszczyźnie prostopadłej do kierunku biegu światła. Jeżeli ustalimy kierunek drgań pola elektrycznego tak, aby odbywały się w jednej, wyznaczonej płaszczyźnie, to powiemy, że światło to ma określoną polaryzację.

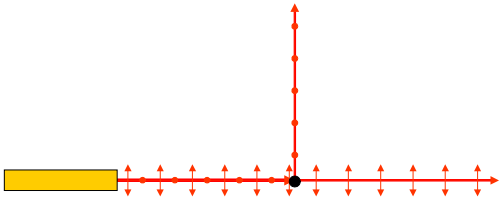


Rys. 12.18 Fala świetlna spolaryzowana pionowo.

Fala świetlna składa się z pola elektrycznego i magnetycznego drgających w kierunkach prostopadłych. Umownie zakładamy, że kierunkiem polaryzacji światła jest kierunek pola elektrycznego.

Polaryzowanie światła (!)

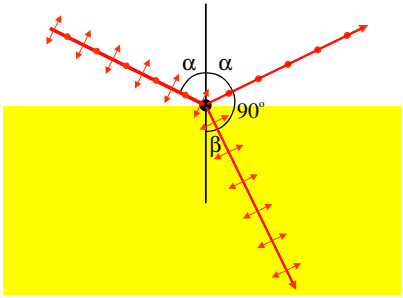
Światło możemy polaryzować przy pomocy polaryzatorów wykorzystujących siatkę bardzo gęstych linii albo przy pomocy folii wykonanych z polimerów, czyli substancji chemicznych o długich, równolegle ułożonych cząsteczkach. Wykorzystuje się także kryształy dwójłomne.
Światło polaryzuje się też przy odbiciu i rozpraszaniu.



Rys. 12.19 Odbicie fali świetlnej prowadzi do jej polaryzacji.

Wiemy, że pole w fali elektromagnetycznej musi być prostopadłe do kierunku biegu fali. Zatem fala rozproszona lub odbita nie będzie miała składowej równoległej do kierunku biegu fali padającej. Dlatego będzie spolaryzowana prostopadle do kierunku fali padającej. Tego typu polaryzację możemy zobaczyć w przypadku światła rozproszonego w akwarium lub odbitego od szyby. Spolaryzowane jest także światło słoneczne rozproszone na chmurach. Fakt ten wykorzystują pszczoły do orientowania się w kierunku słońca w pochmurny dzień.

Pełną polaryzację przy odbiciu, uzyskujemy jeżeli światło pada na powierzchnię pod kątem Brewstera.



Rys. 12.20 Odbicie fali od dielektryka pod kątem Brewstera

Warunek na kąt Brewstera α związany jest ze współczynnikiem załamania światła, *n,* dla dielektryka, który odbija światło:

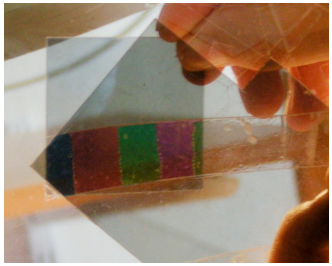
$$\mathrm{tg}(\alpha) = n \qquad (12.10)$$

Także światło odbijające się od mokrej drogi jest spolaryzowane. Dla kierowców robi się zatem specjalne okulary zatrzymujące światło o polaryzacji poziomej, która dominuje w przypadku światła odbitego od drogi. Fotografowie z kolei używają filtrów polaryzacyjnych, aby

uniknąć światła odbitego od szyby i móc fotografować przez okno.

Skrzyżowane polaryzatory

Jeżeli ustawimy dwa polaryzatory jeden za drugim równolegle, to światło będzie przez nie przechodzić. Gdy polaryzatory skrzyżujemy (czyli ich kierunki polaryzacji będą prostopadłe), to światło nie przejdzie. Okazuje się jednak, że niektóre obiekty potrafią skręcać płaszczyznę polaryzacji, umożliwiając światłu pokonanie takiej przeszkody.



Rys. 12.21 Paski folii pomiędzy polaryzatorami dają efekt barwny.

Jeżeli pomiędzy skrzyżowanymi polaryzatorami umieścimy folię celofanową, kryształy gipsu lub naprężone kawałki pleksi, to światło będzie mogło przejść, gdyż materiały te potrafią obracać płaszczyznę polaryzacji.

Skręcalność optyczną wykazują cząsteczki nie mające symetrii odbiciowej. Zjawisko to zwane jest aktywnością optyczną. Aby wyjaśnić zjawisko skręcalności, należy wiedzieć, że oprócz polaryzacji liniowej (np. pionowej i poziomej) istnieje też polaryzacja kołowa, która może być prawo- lub lewo-skrętna. Substancje aktywne optycznie inaczej oddziałują z falą prawo- a inaczej z lewo-skrętną. Aktywność

optyczna powoduje różne prędkości rozchodzenia się fal prawo- i lewo-skrętnych, a w konsekwencji skręcenie płaszczyzny polaryzacji - skręcalność optyczną.

Taką właściwość ma wiele substancji organicznych, których cząsteczki nie posiadają symetrii odbiciowej. Skręcanie polaryzacji można wykorzystać, na przykład, do badania roztworów cukru.

Skręcenie płaszczyzny polaryzacji w roztworze cukru (!)

Przyrządy i materiały

- rura z płaskim dnem,
- rzutnik i polaryzator,
- woda z cukrem.

Przebieg doświadczenia

Należy przyrządzić stężony roztwór cukru i wlać do rury. Rurę podświetlamy od dołu spolaryzowanym światłem. Obserwujemy wielobarwną śrubę światła.

Światło dochodzi do nas po rozproszeniu się w roztworze cukru. Aby jednak mogło rozproszyć się w naszym kierunku, musi mieć polaryzację prostopadłą do kierunku obserwacji.

Na skutek skręcalności cząsteczek cukru płaszczyzna polaryzacji światła przechodzącego przez roztwór obraca się.



Rys. 12.22 Cukier skręca polaryzację

Współczynnik skręcalności optycznej zależy od długości fali. Z tej przyczyny światło o różnych barwach osiąga optymalną polaryzację

(prostopadłą do kierunku obserwacji) w innych miejscach rury. Stąd poszczególne barwy będą widoczne w różnych miejscach rury.

Rożne substancje mają różne współczynniki skręcalności. Dzięki temu pomiar skręcalności wykorzystuje się w polarymetrii np. do analizy składu badanych substancji.

12.7 Podsumowanie

Światło to fale elektromagnetyczne o długościach od 380 do 780 nm, czyli częstościach od 380 do 790 THz.
1 THz = 1000 GHz = 1 mln MHz = 1 bln Hz

Prawo Snelliusa (prawo załamania):
Stosunek sinusa kąta padania α do sinusa kąta załamania β jest stały i równy współczynnikowi załamania *n*.

$$\frac{\sin\alpha}{\sin\beta} = n$$

Tęcza (rozszczepienie światła w wodzie) powstaje dzięki różnicom współczynników załamania dla różnych długości fal, czyli **dyspersji**.

- Zgodnie z zasadą Huygensa, fale napotykając na przeszkody ulegają ugięciu i rozchodzą się we wszystkich kierunkach (**dyfrakcja**).
- Gdy fale nakładają się na siebie, następuje **interferencja**. W przypadku dyfrakcji i interferencji obowiązuje zasada, że im węższa szczelina, tym szersze prążki. Interferencja fal ugiętych wywołuje efekty barwne na płytach kompaktowych, a interferencja fal wielokrotnie odbitych – na bańkach mydlanych.

- Fale mogą **rozpraszać się** na cząsteczkach zawiesiny. Światło niebieskie jest silniej rozpraszane niż czerwone, co nadaje barwę niebu i wodzie.

- Światło można **polaryzować**. Kierunek polaryzacji odpowiada kierunkowi wektora pola elektrycznego. Światło polaryzuje się przy przechodzeniu przez niektóre substancje, przy odbiciu od dielektryków oraz przy rozpraszaniu.
- Substancje aktywne optycznie mogą **skręcać płaszczyznę polaryzacji** światła. Różnice we współczynniku skręcalności prowadzą do efektów barwnych dla światła spolaryzowanego.