



11. Optyka

11.1. Prawo odbicia i załamania

11.2. Zwierciadła i soczewki

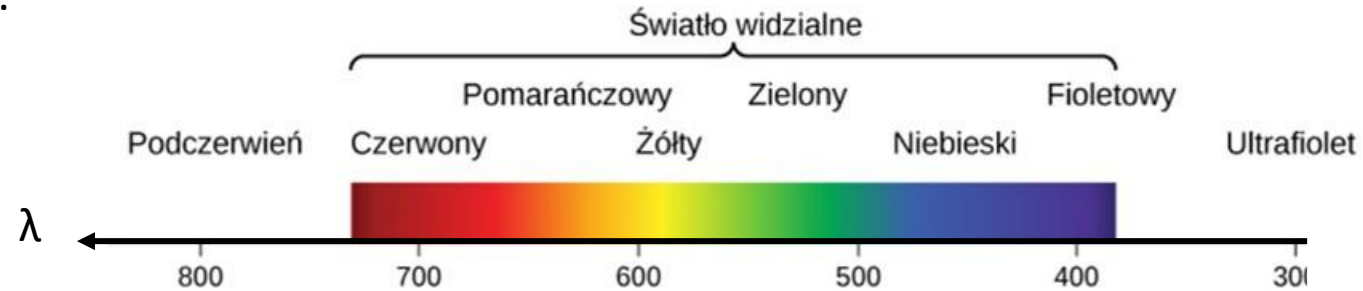
11.3. Dyfrakcja i interferencja światła



Fale świetlne

Optyka stanowi dział fizyki, który zajmuje się światłem. W mowie potocznej przez termin „światło” rozumiemy zarówno wrażenia wzrokowe, jak i zjawiska, które je wywołują.

Z dzisiejszego punktu widzenia fale świetlne stanowią pewien wycinek widma fal elektromagnetycznych, obejmujący fale o długościach zawartych w granicach od 380 nm do 780 nm ($1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$). Najkrótsze z nich widzimy jako światło fioletowe, najdłuższe jako czerwone.

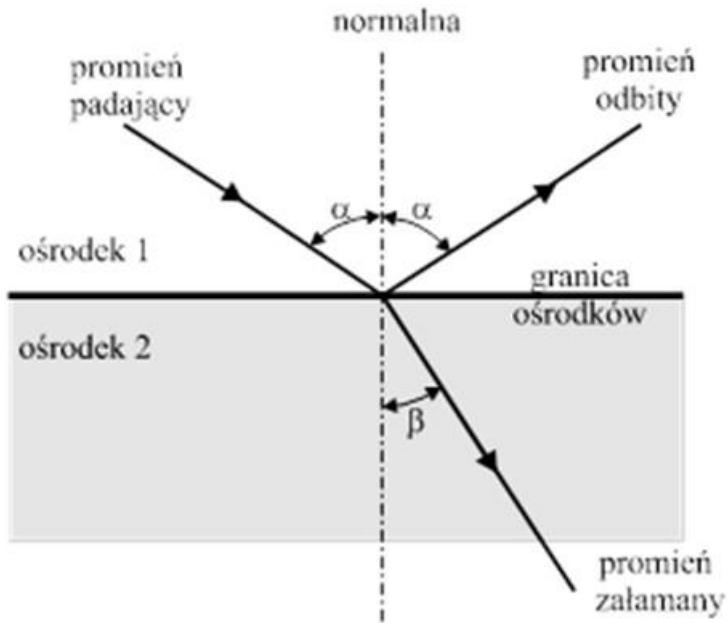


Podstawowe prawa opisujące rozchodzenie się światła:

1. Codzienne doświadczenie uczy nas, że światło rozchodzi się po liniach prostych. Jeśli na drodze promieni ustawimy przeszkodę, to za nią powstanie cień.
2. Promienie świetlne biegną w przestrzeni całkowicie od siebie niezależnie.
3. Odwracalność biegu promieni świetlnych oznacza, że jeśli światło biegnie po określonej drodze w pewnym kierunku, to również po tej samej drodze może biec w kierunku przeciwnym.
4. Gdy wiązka świetlna trafia na swej drodze na inny ośrodek, to na powierzchni granicznej (granicy dwóch ośrodków) część promieniowania zostaje odbita, a reszta przechodzi do drugiego ośrodka ulegając załamaniu.
5. Gdy wiązka światła trafia na przeszkodę np. mały otwór, ulega ugięciu i w wyniku nakładania się ugiętych wiązek następuje interferencja światła – powstanie jasnych i ciemnych prążków.

11.1. Prawo odbicia i załamania

Gdy wiązka świetlna trafia na swej drodze na inny ośrodek, to na powierzchni granicznej (granicy dwóch ośrodków) część promieniowania zostaje odbita, a reszta przechodzi do drugiego ośrodka ulegając załamaniu.



Zachowanie się promienia na takiej granicy regulują dwa prawa: **prawo odbicia** i **prawo załamania**.

Prawo odbicia jest następujące:

1. promień padający, odbity i normalna (prostopadła) do powierzchni granicznej leżą w jednej płaszczyźnie;
2. kąt padania jest równy kątowi odbicia.

Prawo załamania zostało sformułowane przez Snelliusa i brzmi następująco:

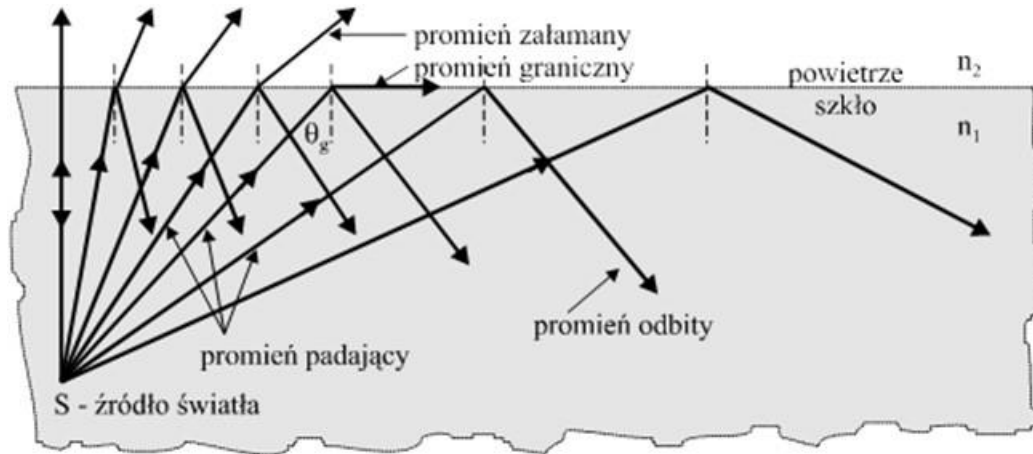
1. promień padający, załamany i normalna do powierzchni granicznej leżą w jednej płaszczyźnie;
2. stosunek sinusa kąta padania α do sinusa kąta załamania β jest wielkością stałą:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = n_{21}$$

gdzie n_{21} nazywamy współczynnikiem załamania ośrodka, do którego promień wchodzi (ośrodek 2), względem ośrodka z którego wychodzi (ośrodek 1).

Zjawisko całkowitego wewnętrznego odbicia

Ciekawy efekt możemy zaobserwować na granicy ośrodków kiedy promień wychodzi z ośrodka optycznie gęstszego (np. woda) i przechodzi do ośrodka optycznie rzadszego (powietrze).



Taki obraz zobaczymy np. w zbiorniku wodnym oświetlonym „od dołu”.

Jeżeli kąt padania θ wzrasta, dochodzimy do sytuacji, w której promień załamany biegnie równolegle do powierzchni oddzielającej oba ośrodki (powierzchni łamiącej) – czyli kąt załamania równa się 90° . Wtedy spełniona jest równość:

$$n_1 \sin \theta_g = n_2 \sin 90^\circ$$

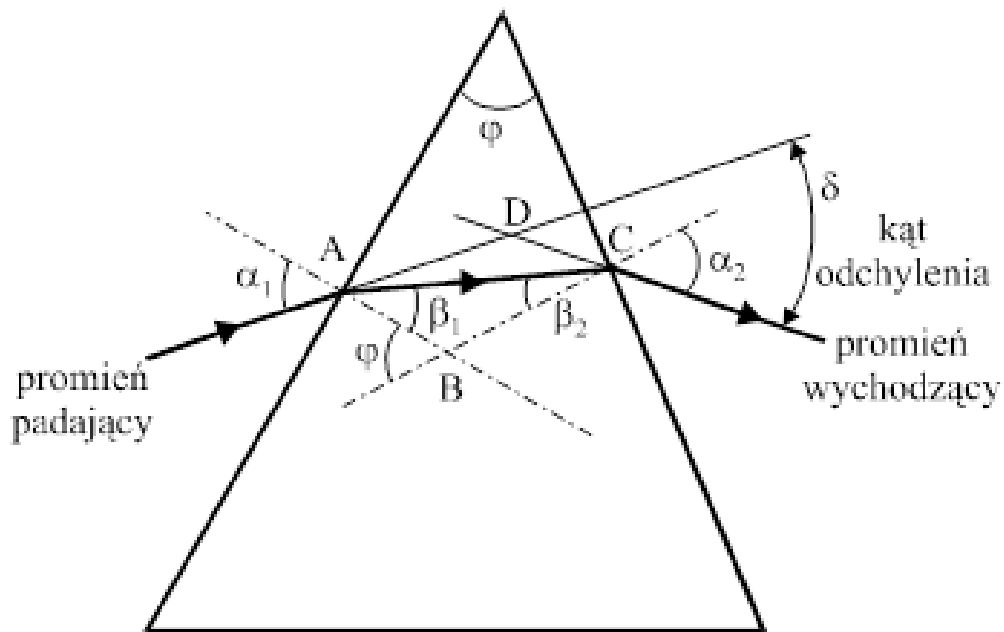
ponieważ $\sin 90^\circ = 1$ więc $\sin \theta_g = \frac{n_2}{n_1}$

Dla promieni padających pod kątem większym od kąta granicznego θ_g nie otrzymujemy już promieni załamanych – obserwowane zjawisko zwane jest **całkowitym wewnętrznym odbiciem**.



Zjawisko to jest powszechnie wykorzystywane m.in. w światłowodzie, który jest cienkim „włóknem” szklanym, a wiązka światła jest w nim prowadzona poprzez całkowite wewnętrzne odbicie na granicy szkło-powietrze.

Załamanie światła w pryzmacie



Pryzmatem nazywamy ciało przezroczyste (np. szkło) ograniczone dwiema płaszczyznami przecinającymi się wzdłuż prostej zwanej krawędzią pryzmatu i tworzącymi kąt φ - zwany kątem łamiącym pryzmatu. Pryzmat może zmienić bieg promieni świetlnych – odchylać je o kąt δ . Jeżeli n jest współczynnikiem załamania pryzmatu, a n' współczynnikiem załamania ośrodka otaczającego pryzmat (przy założeniu, że $n' < n$) to dla kątów padania i załamania zachodzą związki:

$$n' \sin \alpha_1 = n \sin \beta_1$$

$$n \sin \beta_2 = n' \sin \alpha_2$$

Ponieważ kąty φ i δ są kątami zewnętrznymi trójkątów ACB i ACD, więc możemy zapisać:

$$\varphi = \beta_1 + \beta_2$$

$$\delta = (\alpha_1 - \beta_1) + (\alpha_2 - \beta_2) = (\alpha_1 + \alpha_2) - (\beta_1 + \beta_2) = \alpha_1 + \alpha_2 - \varphi$$

Dla małych kątów możemy przyjąć, że: $n' \alpha_1 \approx n \beta_1$ i $n \beta_2 \approx n' \alpha_2$

$$\text{czyli} \quad \alpha_1 = \frac{n}{n'} \beta_1 \quad \text{i} \quad \alpha_2 = \frac{n}{n'} \beta_2$$

wówczas równanie na kąt odchylenia pryzmatu przyjmie postać:

$$\delta = \frac{n}{n'} (\beta_1 + \beta_2) - \varphi = \left(\frac{n}{n'} - 1 \right) \varphi$$

Jeżeli ośrodkiem otaczającym pryzmat jest powietrze, dla którego $n' \approx 1$ wtedy otrzymujemy: $\delta = (n - 1) \varphi$

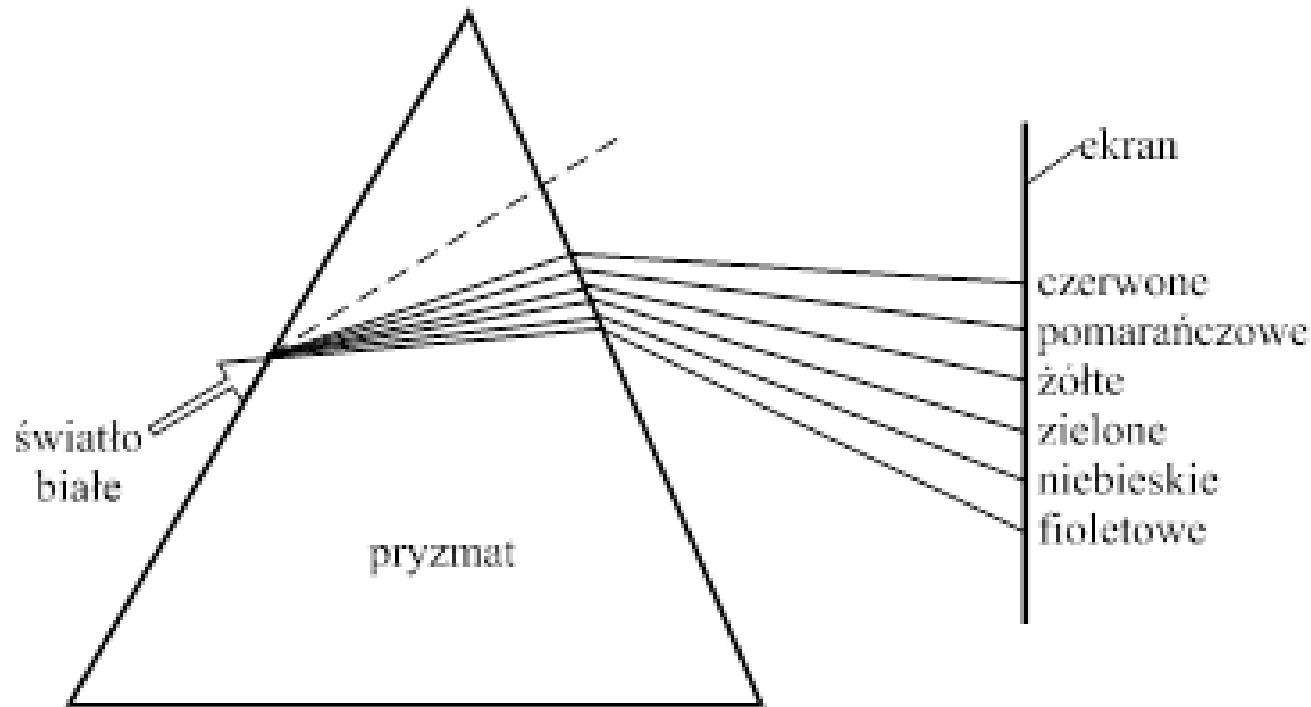
W tym miejscu należy podkreślić, że pryzmat ma właściwości rozszczepiające światło. Ponieważ światło białe (np. słoneczne) jest mieszaniną „różnobarwnych” promieni, z których każdy rozchodzi się w pryzmacie z inną prędkością v , a jak wiemy współczynnik załamania zgodnie z zależnością :

$$n(v) = c/v \quad \text{gdzie } c - \text{prędkość światła w próżni,}$$

zależy od prędkości rozchodzenia się fali, więc kąt odchylenia promienia δ będzie zależał od jego barwy:

$$\delta = (n(v) - 1)\varphi$$

czyli po przejściu światła białego przez pryzmat na ekranie uzyskujemy widmo o kolejności barw jak to przedstawia poniższy rysunek i zdjęcie.



Przykład 11.1.

Punktowe źródło światła zanurzone do wody na głębokość $h = 1$ m. Oblicz średnicę koła na powierzchni wody, z którego światło wydobywa się z wody, jeżeli współczynnik załamania wody względem powietrza wynosi $n = 1,33$.

Rozwiązanie:

Zgodnie z prawem Snelliusa

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

„Plama” światła jest ograniczona do obszaru, gdzie promień światła może wyjść z wody do powietrza. Graniczny promień jest zdefiniowany przez efekt całkowitego wewnętrznego odbicia.

$$\alpha = \alpha_{gr} \quad \text{gdy} \quad \beta = \frac{\pi}{2}$$

wtedy $\sin \beta = 1$

$$\frac{1}{\sin \alpha_{gr}} = n \rightarrow \sin \alpha_{gr} = \frac{1}{n} = \frac{1}{1,33} = 0,75$$

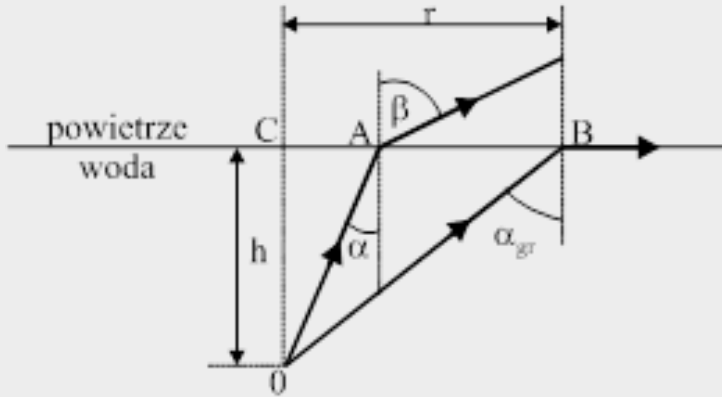
Promień r możemy wyznaczyć z trójkąta OCB:

$$\frac{r}{h} = \operatorname{ctg} \left(\frac{\pi}{2} - \alpha_{gr} \right) \quad \text{czyli} \quad r = h \cdot \operatorname{ctg} \left(\frac{\pi}{2} - \alpha_{gr} \right)$$

stąd średnica d :

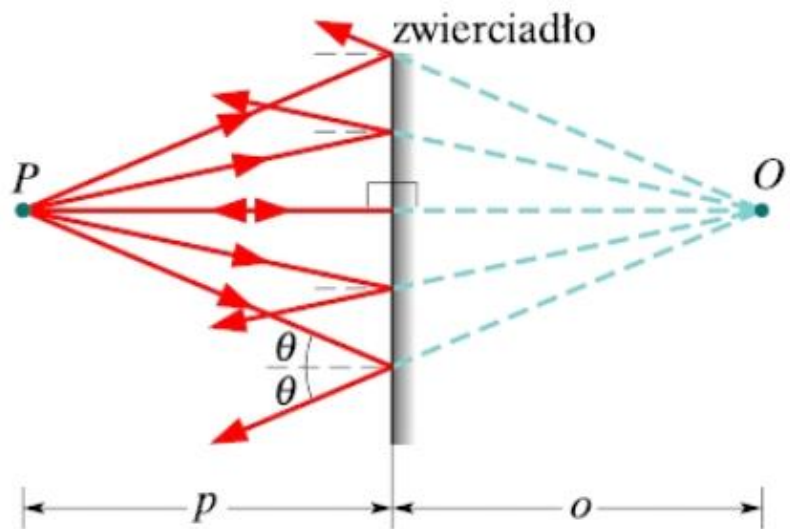
$$d = 2r = 2h \operatorname{ctg} \left(\frac{\pi}{2} - \alpha_{gr} \right) = 2h \operatorname{tg}(\alpha_{gr}) = 2h \frac{\sin \alpha_{gr}}{\cos \alpha_{gr}} = \frac{2h \cdot \sin \alpha_{gr}}{\sqrt{1 - \sin^2 \alpha_{gr}}} \cong 2,27 \text{ m}$$

Odpowiedź: Średnica „plamy” światła na powierzchni wody wynosi 2,27 m.

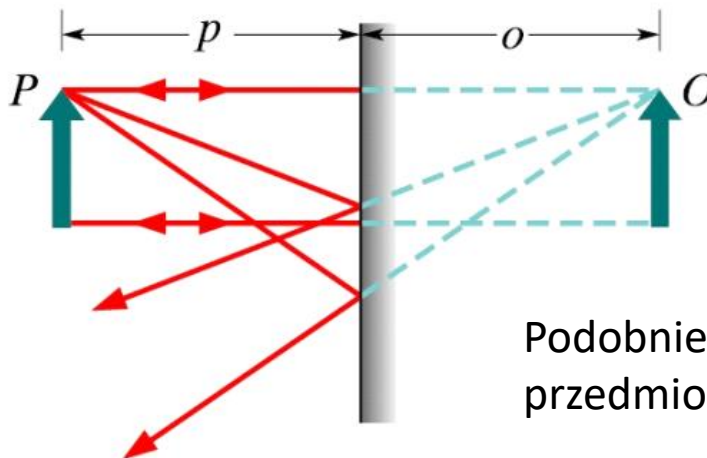
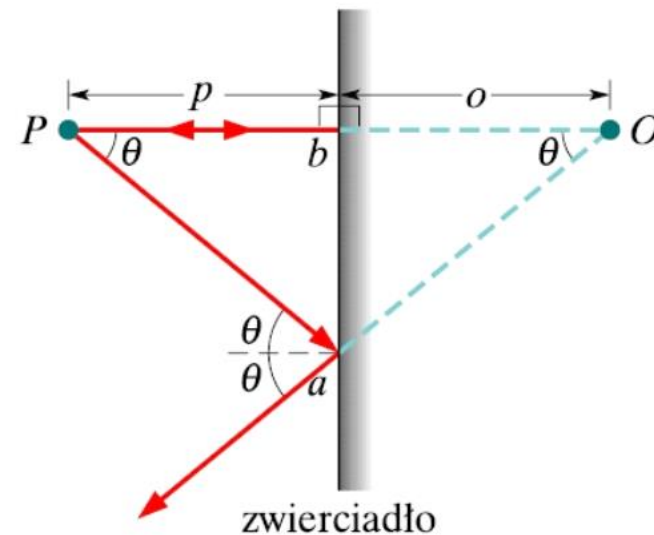


11.2. Zwierciadła i soczewki

Obraz widziany w zwierciadle płaskim jest obrazem pozornym (powstaje za zwierciadłem) – tworzą go przedłużenia promieni odbitych od zwierciadła.



Aby wykreślić obraz punktu w zwierciadle wybieramy dwa promienie, zgodnie z prawem odbicia wykreślamy ich bieg – następnie rysujemy przedłużenie promieni odbitych – na ich przecięciu otrzymujemy obraz punktu.



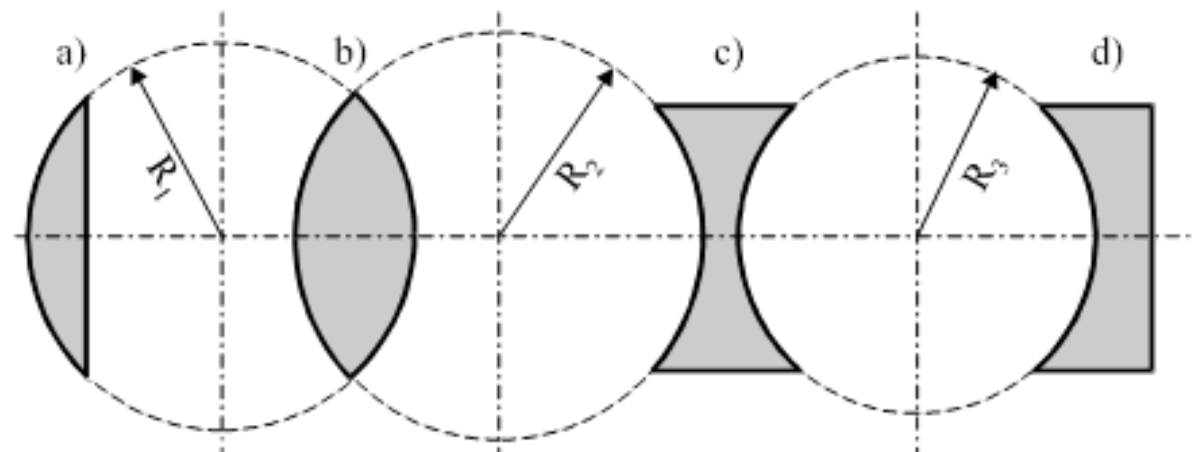
Podobnie konstruujemy obraz przedmiotu np. strzałki.

Soczewki sferyczne

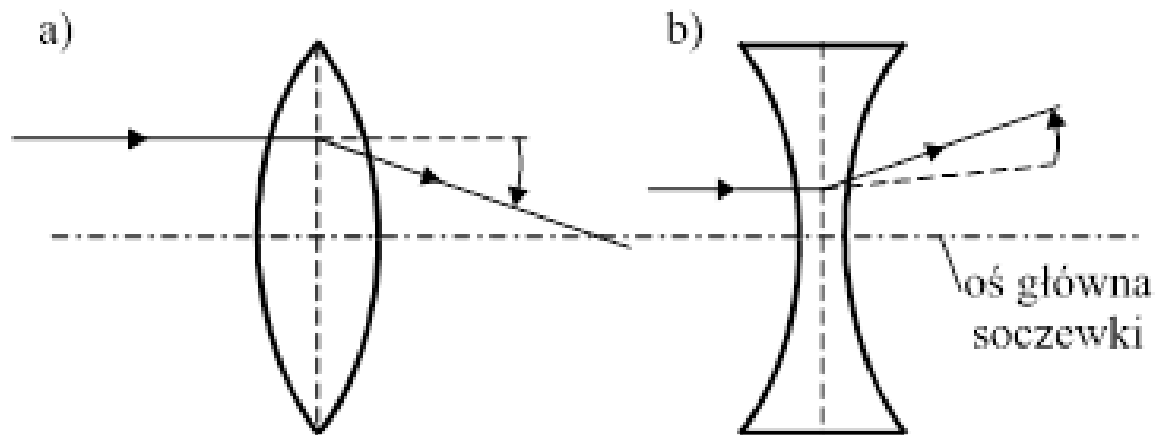
Soczewką nazywamy przezroczystą bryłę ograniczoną dwiema powierzchniami sferycznymi o jednakowych lub różnych promieniach krzywizny.

W przypadku, gdy soczewka jest typu płasko-wypukła lub płasko-wklęśta (patrz rysunek), jedną powierzchnią ograniczającą jest płaszczyzna (czyli sfera o nieskończenie wielkim promieniu krzywizny).

Typy soczewek sferycznych: a) płasko-wypukła, b) obustronnie wypukła, c) obustronnie wklęśta, d) płasko-wklęśta.

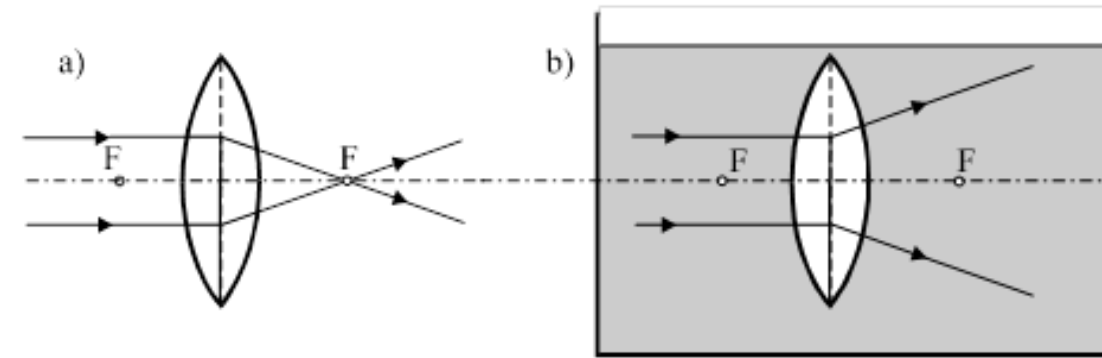


Soczewki mogą być: a) skupiające lub b) rozpraszające.

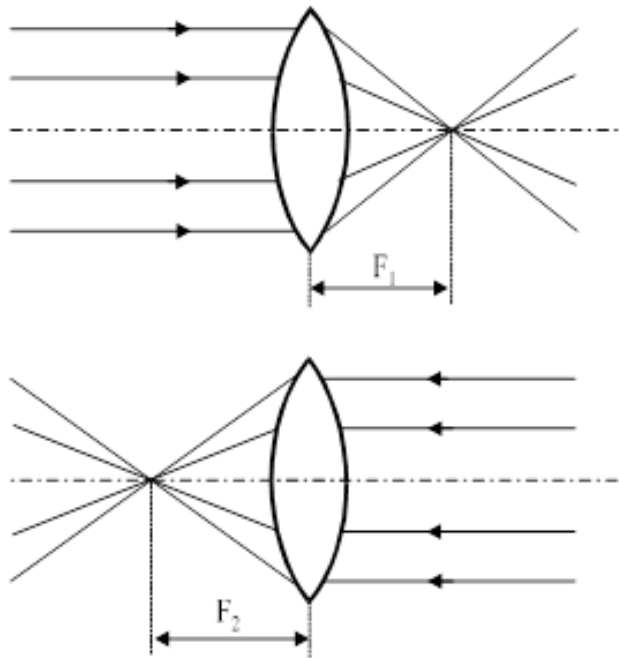


Soczewkę nazywamy skupiającą, gdy promień biegnący równoległe do osi głównej po przejściu przez soczewkę zostaje odchylony w kierunku osi głównej.
Soczewkę nazywamy rozpraszającą, gdy promień zostaje odchylony w kierunku od osi głównej.

W tym miejscu dla pełnej jasności należy podkreślić, że właściwości soczewek zależą nie tylko od ich kształtu oraz współczynników załamania materiału, z którego zostały one wykonane, lecz także zależą od współczynnika załamania otaczającego je ośrodka. Soczewka obustronnie wypukła znajdująca się w ośrodku o większym współczynniku załamania w stosunku do współczynnika załamania materiału soczewki zachowuje się jak soczewka rozpraszająca.

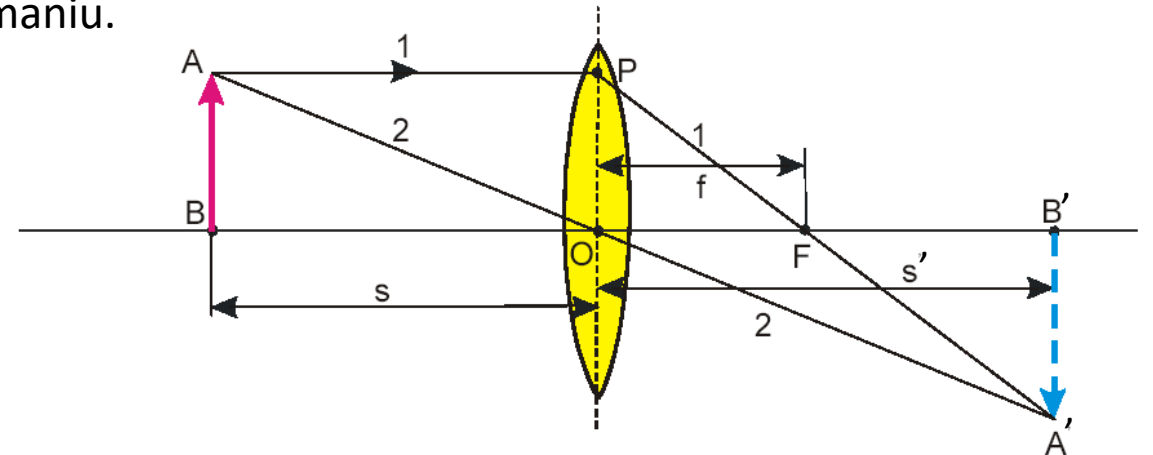


Aby określić powstawanie obrazów w soczewce musimy pamiętać, że promienie biegnące równoległe do osi głównej po przejściu przez soczewkę skupiają się w ognisku. Każda soczewka ma dwa ogniska (zależne od promienia krzywizny).



Dla wykreślenia obrazu ($A'B'$) wybierzemy dla każdego punktu szczególnego przedmiotu (strzałki AB) dwa promienie:

- promień 1 równoległy do głównej osi soczewki, który po załamaniu przechodzi przez ognisko;
- promień 2 przechodzący przez środek geometryczny soczewki, który zgodnie z rysunkiem nie ulega załamaniu.



Równanie soczewki

Jak widać z rysunku położenie, wielkość i ustawienie obrazu względem głównej osi soczewki zależą dla danej soczewki od położenia przedmiotu względem środka optycznego O soczewki. Stosunek wielkości obrazu do wielkości przedmiotu nazywamy powiększeniem i oznaczamy W.

Jeżeli oznaczmy: $s = BO$ – odległość przedmiotu od soczewki; $s' = B'O$ – odległość obrazu od soczewki; $f = FO$ – ogniskową soczewki, to z rysunku widać, że powiększenie obrazu możemy zapisać w postaci:

$$W = \frac{A'B'}{AB}$$

Z rysunku widać, że trójkąty ABO i A'B'O są podobne (ponieważ mają takie same kąty), czyli

$$\frac{A'B'}{AB} = \frac{s'}{s} \qquad W = \frac{s'}{s}$$

Z podobieństwa trójkątów POF i A'B'F wynika, że:

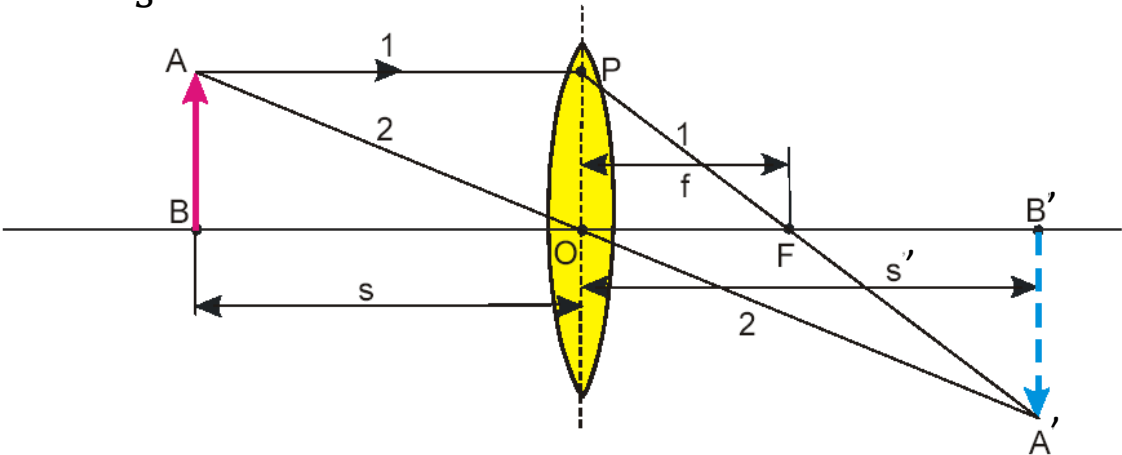
$$\frac{A'B'}{PO} = \frac{s' - f}{f}$$

Ponieważ, że $PO = AB$ otrzymujemy:

$$\frac{s'}{s} = \frac{s' - f}{f}$$

stąd otrzymujemy **równanie soczewki**:

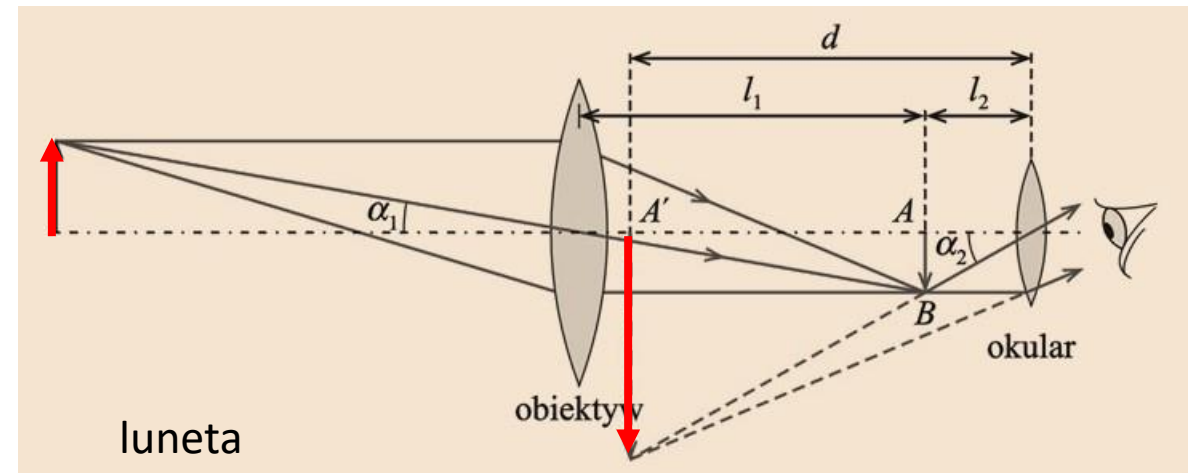
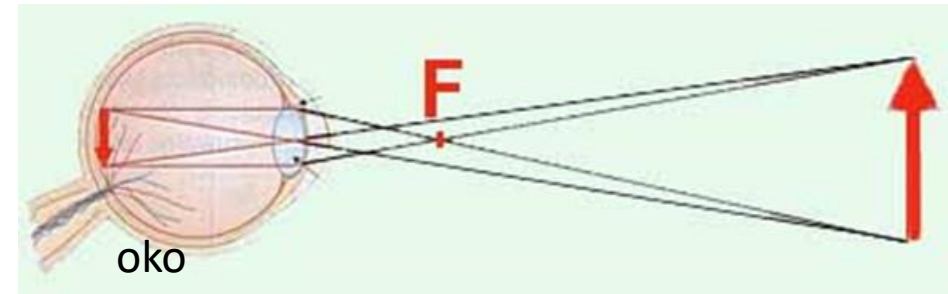
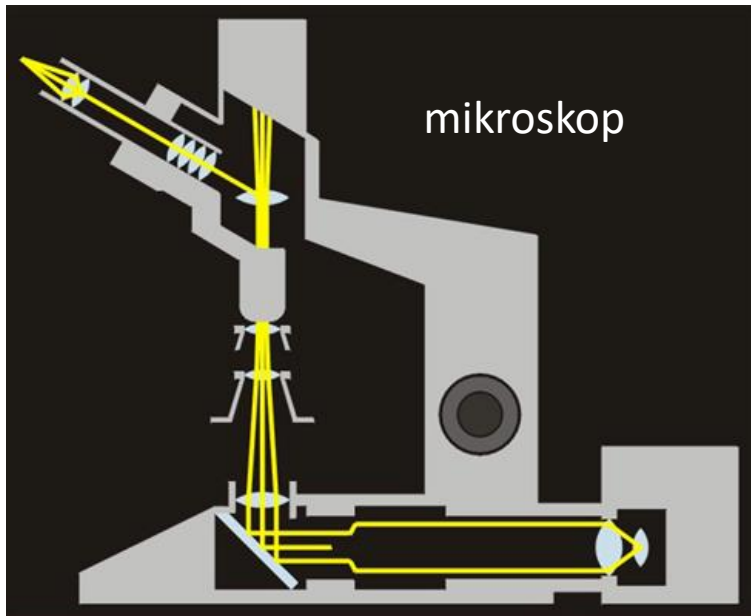
$$\frac{1}{s} + \frac{1}{s'} = \frac{1}{f}$$



Za pomocą soczewek, w zależności od miejsca umieszczenia przedmiotu względem soczewki, możemy otrzymać następujące obrazy:

- **rzeczywiste** – czyli takie, które powstają w punktach przecięcia się odpowiednich promieni świetlnych – obrazy takie mogą być obserwowane na ekranie – odwrócone, powiększone lub pomniejszone;
- **urojone** – czyli takie, które powstają na siatkówce oka obserwatora w miejscu przecięcia przedłużeń promieni – proste (nie odwrócone) – powiększone lub pomniejszone.

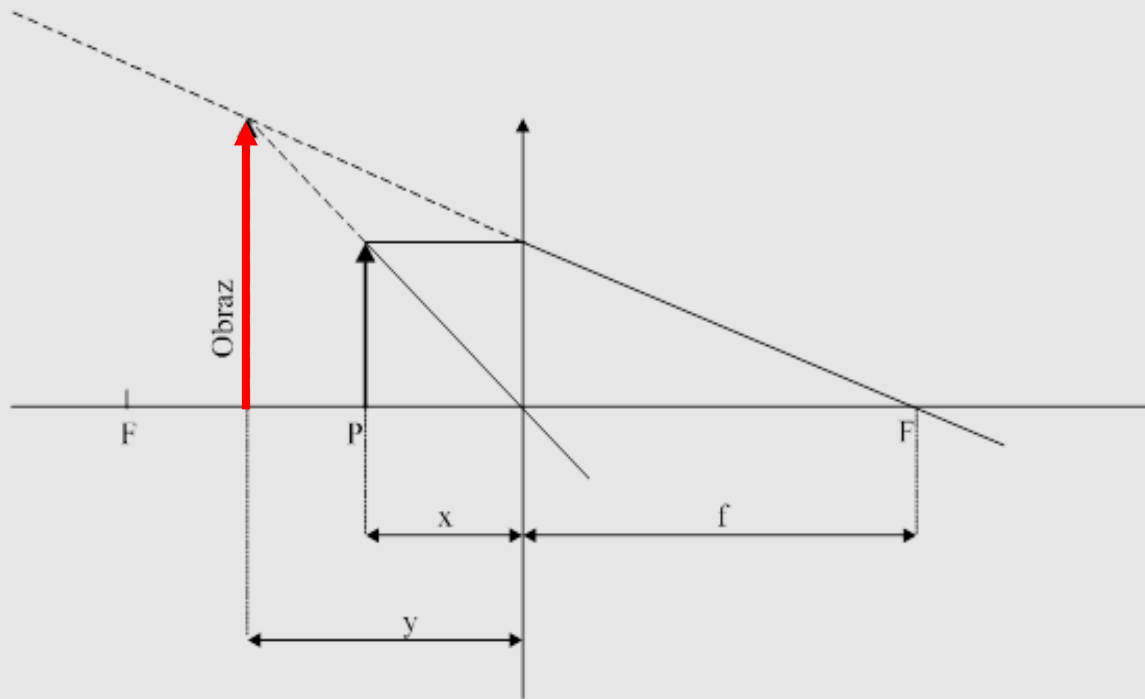
Wykorzystujemy je do budowy różnych przyrządów optycznych, przykładowe przedstawiono poniżej:



Przykład 11.2.

Ogniskowa f cienkiej soczewki skupiającej jest równa 24 cm. Przedmiot P położony jest w odległości $x = 9$ cm od soczewki. Opisać obraz powstający w soczewce.

Rozwiązanie:



Wychodzimy z równania soczewki:

$$\frac{1}{x} + \frac{1}{y} = \frac{1}{f}$$

y – odległość obrazu od soczewki,
 x – odległość przedmiotu od soczewki,
 f – ogniskowa.

Wstawiając dane do powyższego równania otrzymujemy:

$$\frac{1}{9} + \frac{1}{y} = \frac{1}{24}$$
$$\frac{y + 9}{9 \cdot y} = \frac{1}{24}$$

$$24 \cdot (y + 9) = 9 \cdot y \rightarrow y = -14,4 \text{ cm}$$

co oznacza, że obraz jest pozorny.

Powiększenie w obrazu jest dane wzorem:

$$W = \frac{y}{x} = \frac{|-14,4|}{9} = 1,6$$

Odpowiedź: W soczewce otrzymujemy obraz pozorny, prosty i powiększony 1,6 razy. Opisany w tym przykładzie obraz, to obraz powstający w lupie, czyli pojedynczej soczewce skupiającej.

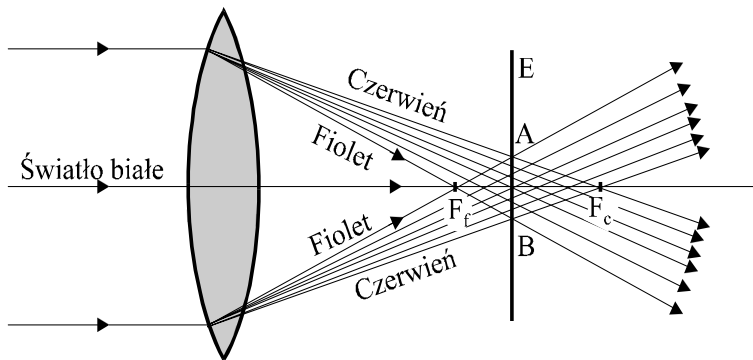
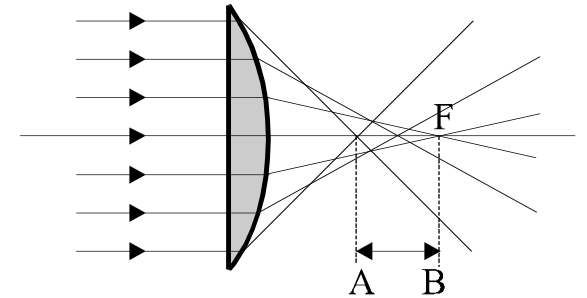
Wady odwzorowania soczewek

Pamiętajmy, że wzory wyprowadzone dla soczewek są słuszne tylko przy następujących założeniach:

- krzywizny soczewek są dokładnie kuliste,
- soczewki są bardzo cienkie,
- kąty, jakie tworzą promienie padające z osią soczewki, są bardzo małe,
- światło jest monochromatyczne.

W układach rzeczywistych warunki te rzadko są spełnione. W związku z czym występują zniekształcenia odwzorowania obrazu. Do najczęściej obserwowanych wad soczewek należą: **aberracja sferyczna** i **aberracja chromatyczna**.

Aberracja sferyczna – polega na tym, że zamiast ogniska punktowego obserwujemy ognisko rozmyte wzdłuż głównej osi optycznej soczewki. Zjawisko to występuje, gdy promienie świetlne tworzą z osią soczewki duże kąty oraz gdy wiązka padająca na soczewkę jest „szeroka”. Aberracja sferyczna spowodowana jest silnym załamaniem „promieni skrajnych”, bardziej oddalonych od głównej osi optycznej niż „promieni środkowych”, wskutek czego następuje przesunięcie ogniska promieni skrajnych w stosunku do promieni środkowych i wtedy obraz staje się nieostry.



Aberracja chromatyczna – występuje wówczas, gdy światło padające na soczewkę nie jest monochromatyczne. Polega na rozszczepieniu światła białego na soczewce analogicznie jak to zostało przedstawione dla pryzmatu (soczewka wypukła to dwa złożone podstawami pryzmaty). W wyniku rozszczepienia po przejściu przez soczewkę promienie czerwone przecinają się w punkcie dalej leżącym od soczewki niż promienie fioletowe. Skutkiem tego obrazem na ekranie E punktu P wysyłającego światło białe nie jest jasny punkt, lecz kolorowa plamka o średnicy AB.

11.3. Dyfrakcja i interferencja światła

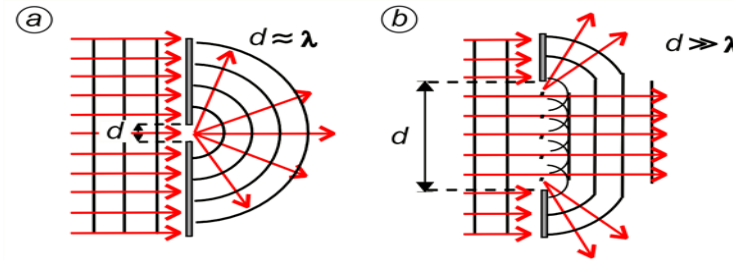
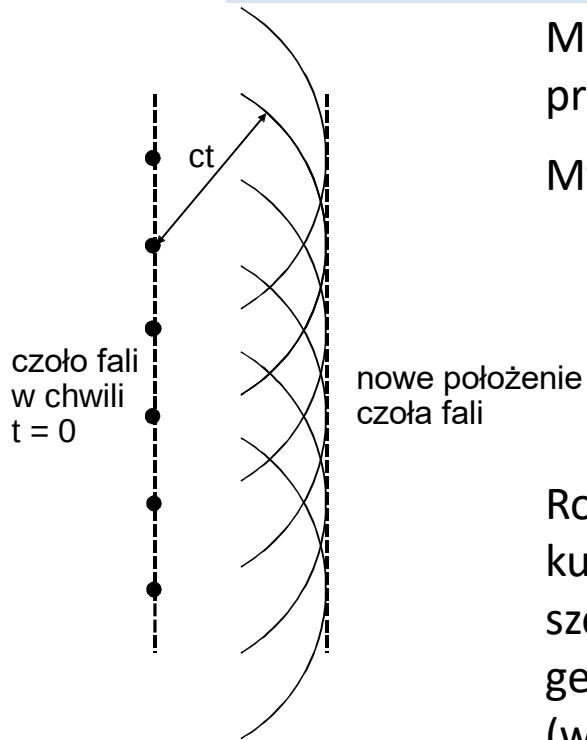
Pojęcia dyfrakcji i interferencji światła są związane z teorią falową światła. Teoria ta podana przez Christiana Huyghensa w 1678 r. zakłada się, że światło jest falą.

Teoria Huyghensa oparta jest na konstrukcji geometrycznej (zwanej zasadą Huyghensa), która pozwala przewidzieć gdzie znajdzie się czoło fali w dowolnej chwili w przyszłości, jeżeli znamy jej obecne położenie. Zasada ta głosi, że:

**Wszystkie punkty czoła fali można uważać za źródła nowych fal kulistych.
Położenie czoła fali po czasie t będzie dane przez powierzchnię styczną do tych fal kulistych.**

Metoda Huyghensa daje się zastosować jakościowo do wszelkich zjawisk falowych. Można przedstawić za pomocą fal elementarnych Huyghensa zarówno odbicie fal jak i ich załamanie.

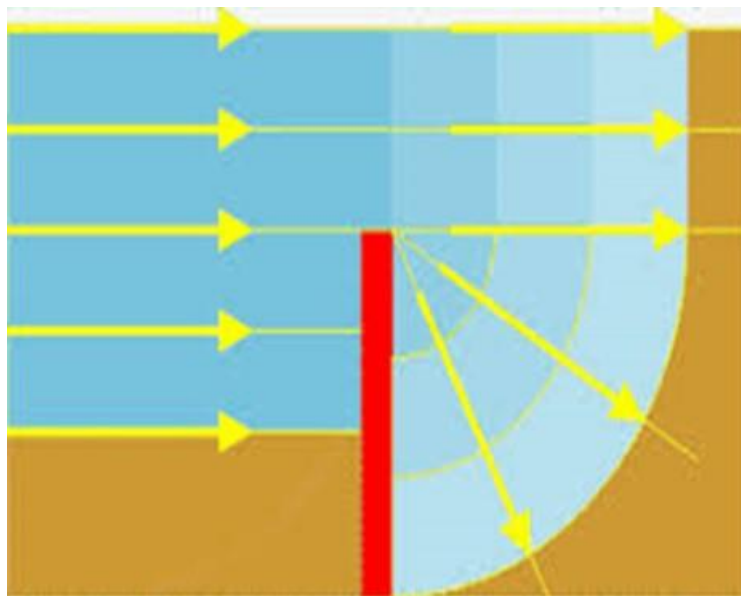
My zastosujemy je do wyjaśnienia ugięcia fal na szczelinie (przeszkodzie).



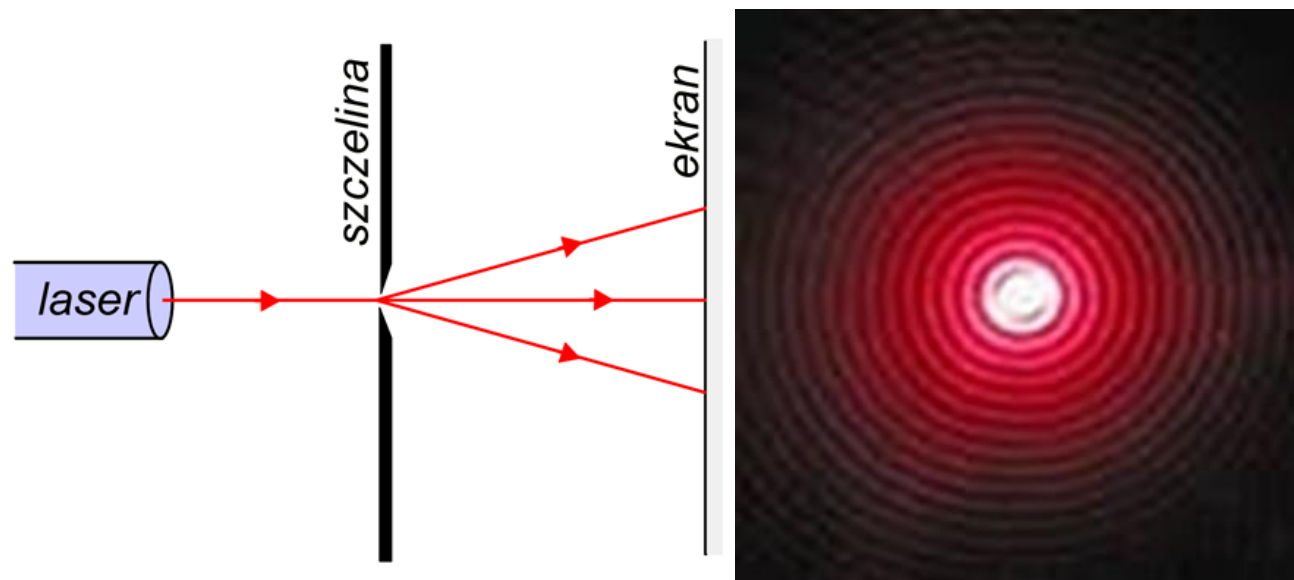
Rozpatrzmy czoło fali dochodzącej do szczeliny. Każdy jej punkt możemy potraktować jako źródło kulistych fal Huyghensa. Jednak przez szczelinę przechodzi tylko część fal. Fale leżące poza brzegami szczeliny zostają wyeliminowane i z tym jest związane zaginanie wiązki w obszar tzw. cienia geometrycznego. Zwróćmy jedynie uwagę na to, że gdy szerokość szczeliny staje się duża (w stosunku do długości fali) $d \gg \lambda$ to ugięcie można zaniedbać. Wydaje się, że światło rozchodzi się po liniach prostych co można przedstawić w postaci promieni podlegających wcześniej omówionym prawom odbicia i załamania. Mówimy, że wówczas mamy do czynienia z optyką geometryczną.

Dyfrakcja

Zjawisko dyfrakcji (ugięcia) odkrył Grimaldi (XVII w). Polega ono na uginaniu się promieni świetlnych przechodzących w pobliżu przeszkody (np. brzeg szczeliny). Na rysunku poniżej pokazano przebieg promieni świetlnych przechodzących w pobliżu nieprzezroczystej krawędzi.

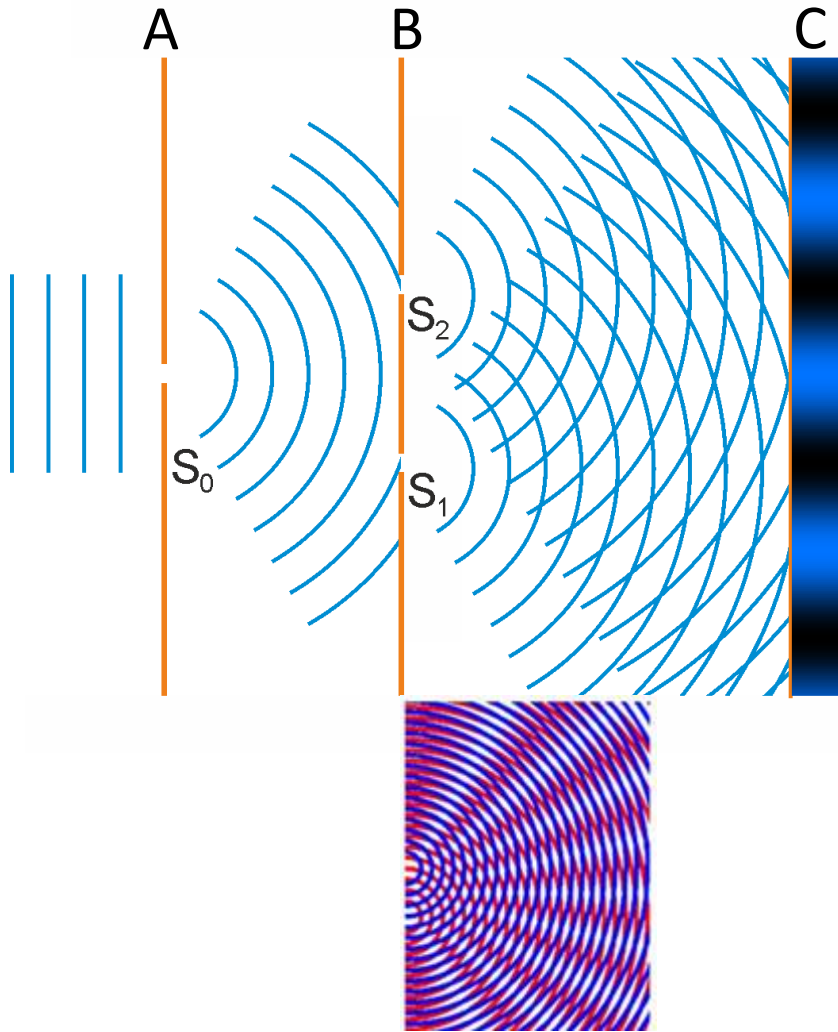


Poniżej przedstawiono obraz widziany na ekranie w wyniku dyfrakcji wiązki światła lasera na szczelinie w postaci niewielkiego otworu. Obraz nie przedstawia jasnego punktu o rozmiarach szczeliny, tylko serię prążków dyfrakcyjnych powstałych w wyniku interferencji światła ugiętego na krawędziach szczeliny. Cechą charakterystyczną tego obrazu jest szybki zanik natężenia dla kolejnych prążków (okręgów).



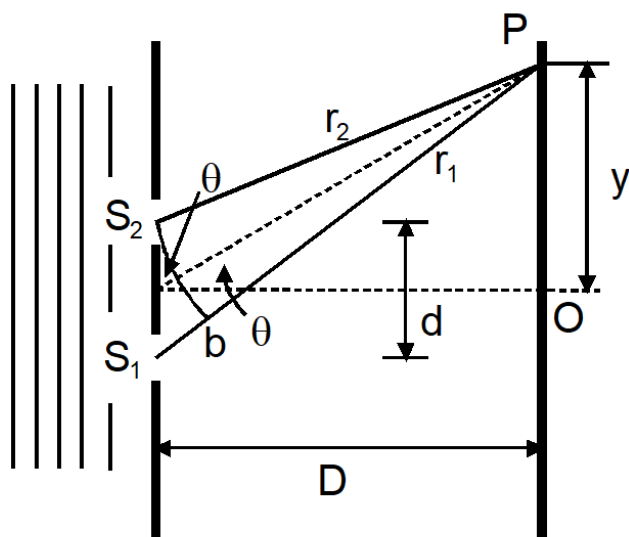
Doświadczenie Younga

Wykonane przez Thomasa Younga (w 1801 r.) doświadczenie pokazujące istnienie interferencji dla światła było pierwszym eksperymentem wskazującym na falowy charakter światła.



Idea doświadczenia Younga przedstawiona jest na rysunku:

- płaska fala monochromatyczna ugina się na szczelinie S_0 w ekranie A;
- światło dochodzące do ekranu B ulega ugięciu na szczelinach S_1 i S_2 , które działają jak źródła punktowe;
- promieniowanie ze źródeł S_1 i S_2 jest całkowicie spójne (różnica faz pozostaje stała w czasie), gdyż jest częścią jednej fali świetlnej ze źródła S_0 ;
- półkoliste linie pomiędzy ekranami B i C obrazują fale, które rozchodziłyby się gdyby któraś ze szczelin S_1 i S_2 była przysłonięta;
- w rzeczywistości pomiędzy ekranami B i C powstaje w wyniku interferencji nowy niewidoczny rozkład przestrzenny fali świetlnej zobrazowany na rysunku poniżej;
- gdy fale te dochodzą do ekranu C obserwujemy przestrzenne zmiany rozkładu natężenia w postaci prążków interferencyjnych.



Przeanalizujmy teraz doświadczenie Younga ilościowo.

Zakładamy, że światło padające posiada określoną długość fali (jest monochromatyczne). Na rysunku punkt P jest dowolnym punktem na ekranie, odległym o r_1 i r_2 od wąskich szczelin S_1 i S_2 odległych od siebie o d .

Linia S_2b została poprowadzona tak, aby $PS_2 = Pb$. Stosunek D/d przedstawiony na rysunku jest dla większej jasności przesadnie mały. W rzeczywistości odległość ekranu od szczelin $D \gg d$ i wówczas promienie r_1 i r_2 można traktować jako równoległe i kąt S_1S_2b jest równy w przybliżeniu kątowi θ .

Aby w punkcie P powstało **maksimum (jasny prążek)** to odcinek S_1b musi zawierać **całkowitą liczbę długości fal**. Warunek ten możemy zapisać w postaci:

$$S_1b = m\lambda, \quad m = 0, 1, 2, \dots, \quad \text{z trójkąta } S_1S_2b \text{ wynika, że } S_1b = d \cdot \sin \theta$$

czyli

$$d \cdot \sin \theta = m\lambda, \quad m = 0, 1, 2, \dots, \quad (\text{maksima}).$$

Zauważmy, że każdemu maksimum powyżej punktu O odpowiada położone symetrycznie maksimum poniżej punktu O.

Istnieje też centralne maksimum opisywane przez $m = 0$.

Dla uzyskania **minimum** w punkcie P, odcinek S_1b musi zawierać **połówkową liczbę długości fal**, to jest:

$$S_1b = (m+1/2) \lambda, \quad m = 0, 1, 2, \dots,$$

lub

$$d \cdot \sin \theta = (m+1/2) \lambda, \quad m = 0, 1, 2, \dots, \quad (\text{minima})$$

albo

$$d \cdot \sin \theta = (2m+1)\lambda/2, \quad m = 0, 1, 2, \dots, \quad (\text{minima}).$$

Interferencja

Dotychczas zjawisko **interferencji** było ściśle związane z dyfrakcją. Promienie świetlne przechodząc w pobliżu przeszkody ugięły się i następnie nakładały się na siebie dając obraz interferencyjny. Ale interferencja może zajść również na wskutek załamania i odbicia światła od cienkiej warstwy, tzw. interferencja bezdyfrakcyjna. Rozpatrzmy płaską falę padającą na powierzchnię cienkiej błonki. Promień 1 przechodzi jako promień 1'' do ośrodka błonki załamując się i po odbiciu od przeciwległej wewnętrznej powierzchni wychodzi z tego ośrodka, ponownie załamując się w kierunku równoległym do promienia 2' odbitego od powierzchni błonki. Promienie interferują ze sobą i w zależności od różnicy faz albo się wzmacniają albo osłabiają. Rezultat zależy od kąta padania promienia, grubości i współczynnika załamania błonki oraz od długości fali. Ten efekt interferencji światła znany jest z obserwacji plamy oleju na wodzie, czy baniek mydlanych mieniących się w słońcu różnymi kolorami.

