PROGRAM ROZWOJOWY
POLITECHNIKI WARSZAWSKIEJ

Optyka 2

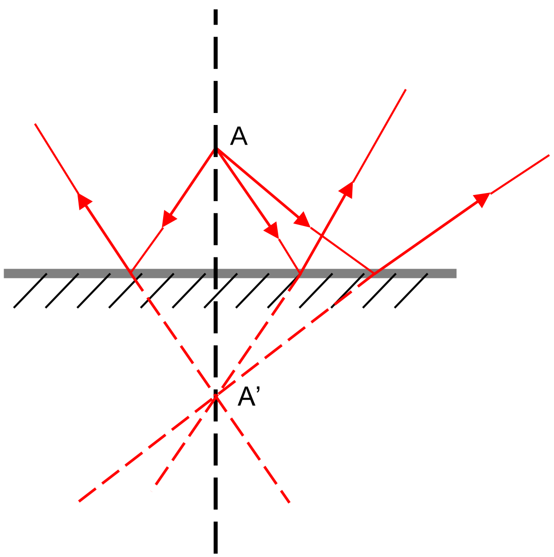
KAPITAŁ LUDZKI
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI

UNIA EUROPEJSKA
EUROPEJSKI
FUNDUSZ SPOŁECZNY

Projekt współfinansowany przez Unię Europejską w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego

Optyka II

Promień świetlny padając na powierzchnię zwierciadła odbija się zgodnie z prawem odbicia omówionym w poprzedniej lekcji.



Konstrukcja obrazu pozornego A'.

Zwierciadło płaskie

Konstrukcja obrazu pozornego A'.

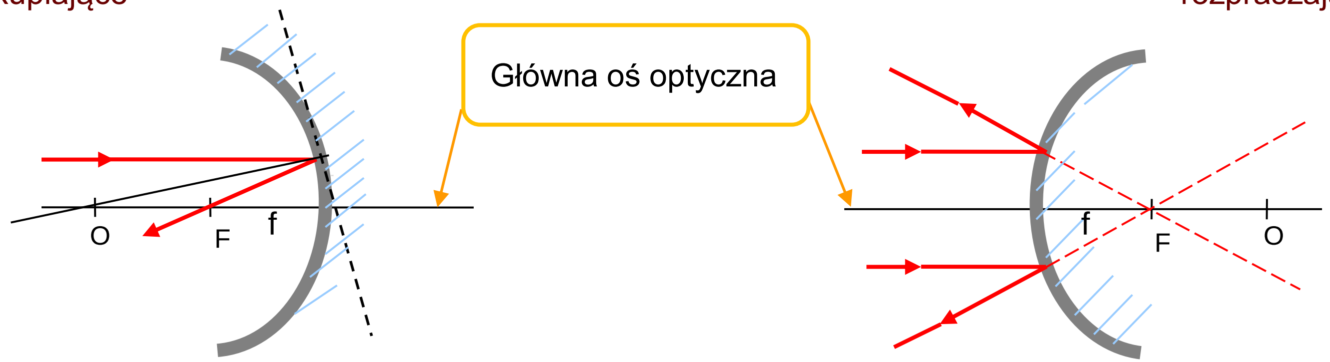
Obraz pozorny A' przedmiotu A powstaje na przedłużeniu promieni wychodzących z punktu A i odbitych od zwierciadła. Promienie odbite od zwierciadła są rozbieżne, natomiast ich przedłużenia zbiegają się w jednym punkcie – w miejscu tym powstaje obraz pozorny.

Wielkość obrazu pozornego jest równa wielkości przedmiotu, a odległość obrazu od zwierciadła jest równa odległości przedmiotu od zwierciadła.

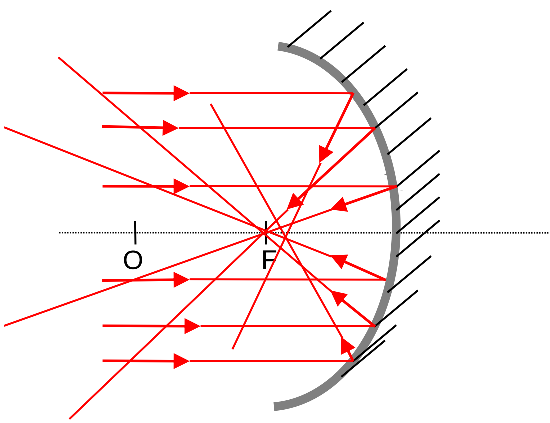
Zwierciadła sferyczne

Wklęsłe,
skupiające

Wypukłe,
rozpraszające



Punkt oznaczony przez O nazywamy środkiem krzywizny, a punkt F nazywamy ogniskiem. Odległość ogniska od zwierciadła nazywamy ogniskowa zwierciadła i oznaczamy literą f.



Aberracja sferyczna

Ognisko dla zwierciadła wklęsłego jest punktem, w którym przecinają się promienie padające równolegle do osi optycznej (w przypadku zwierciadła wypukłego ognisko jest punktem, w którym przecinają się przedłużenia promieni, które padały równolegle i odbiły się od powierzchni zwierciadła).

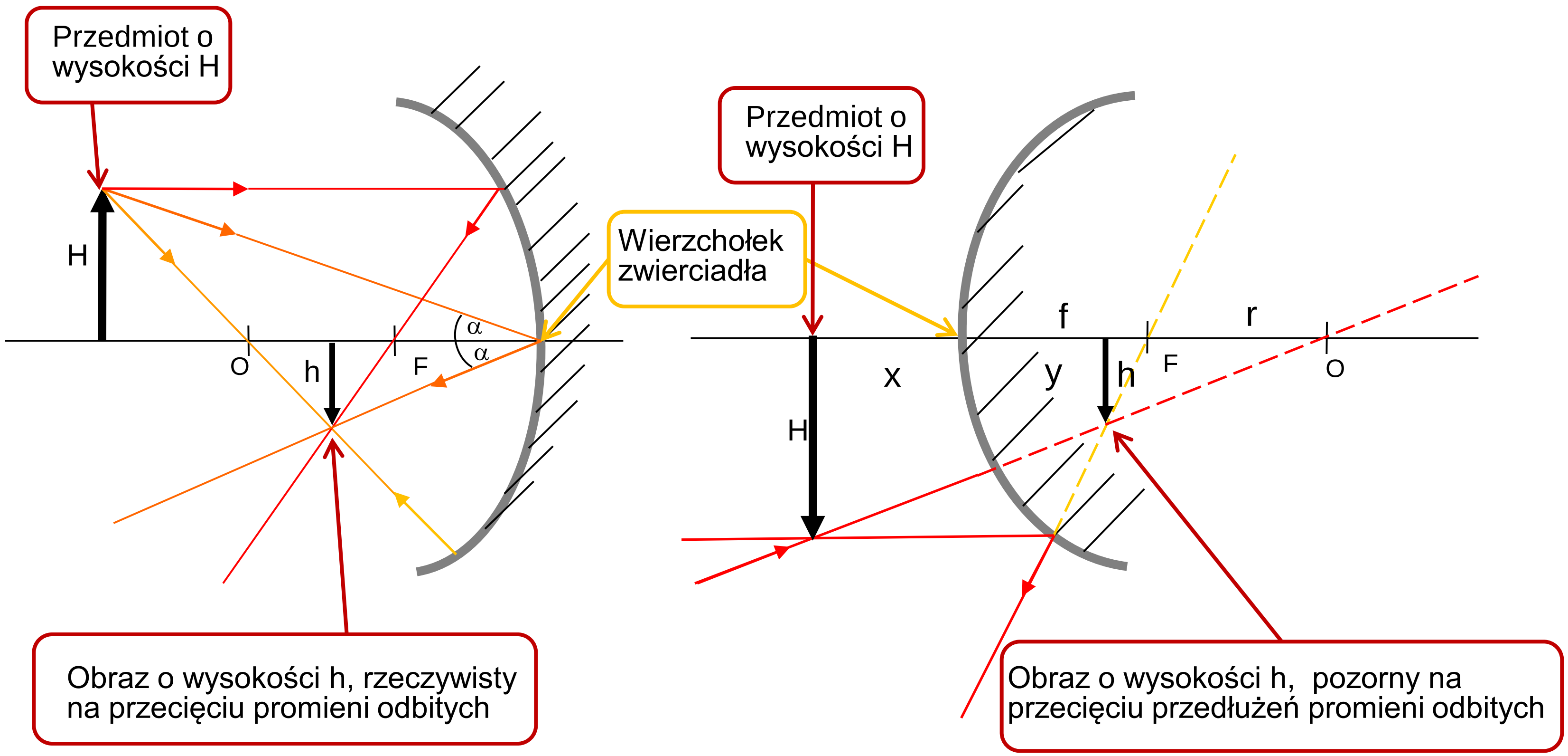
Dotyczy to tylko promieni przyosiowych w przypadku zwierciadła sferycznego. Promienie biegnące dalej od osi optycznej, przecinają się w różnych punktach. Zjawisko to nazywamy aberracją sferyczną.

Konstrukcja obrazu dla zwierciadła wklęsłego i wypukłego

Zasady konstrukcji:

a) promień padający równolegle do osi po odbiciu przechodzi przez ognisko i odwrotnie: promień padający, przechodzący przez ognisko powraca jako równoległy do osi;

b) promień padający przechodzący przez środek krzywizny, powraca po tej samej drodze.



Równanie zwierciadła sferycznego

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

$$f=\frac{r}{2}$$

x, y - odległość odpowiednio przedmiotu i obrazu od wierzchołka zwierciadła

f – ogniskowa, odległość ogniska od wierzchołka zwierciadła. Ognisko leży w środku pomiędzy wierzchołkiem a środkiem krzywizny O. Należy pamiętać, że współrzędne **x** i **y** , a także ogniskowa oraz promień krzywizny r, mogą być ujemne.

Liniowe powiększenie obrazu

$$p=\frac{h}{H}$$

dla obrazów rzeczywistych $p=\frac{y}{x}$

dla obrazów pozornych $p=-\frac{y}{x}$

czyli

$$p=\left|\frac{y}{x}\right|$$

Reguły dotyczące znaków:

- Ogniskowa f jest dodatnia dla zwierciadeł wklęsłych, ujemna dla wypukłych
- Wszystkie odległości mierzone po stronie przedmiotu (przed zwierciadłem) są dodatnie,
- Wszystkie odległości po przeciwnej stronie (za zwierciadłem) są ujemne, a więc odległości obrazów pozornych od zwierciadła są ujemne).

Przykład 1

Promień krzywizny zwierciadła kulistego wklęsłego wynosi r = 24 cm. W jakiej odległości od zwierciadła należy umieścić przedmiot, aby jego ostry, rzeczywisty obraz był powiększony na ekranie 4 razy?

Rozwiązanie

Taki obraz otrzymamy, gdy $f < x < 2f$

Dla zwierciadła sferycznego mamy tu układ trzech równań z trzema niewiadomymi.

$$\begin{cases} f = \dfrac{r}{2} \\ p = \dfrac{y}{x} \\ \dfrac{1}{x} + \dfrac{1}{y} = \dfrac{1}{f} \end{cases}$$

Rozwiązujemy ten układ równań z niewiadomymi: $f, \ x, \ y$.

Wykonujemy podstawienie $y = p \cdot x$

i przekształcenia

$$\frac{1}{x} + \frac{1}{p \cdot x} = \frac{2}{r} \qquad \frac{p+1}{p \cdot x} = \frac{2}{r}$$

Otrzymujemy

$$x = \frac{r \cdot (p+1)}{2 \cdot \mathrm{p}} = \frac{24cm(1+4)}{2 \cdot 4} = 15cm$$

Odpowiedź: W odległości 15 cm.

Zależności dla zwierciadła wklęsłego i soczewki skupiającej

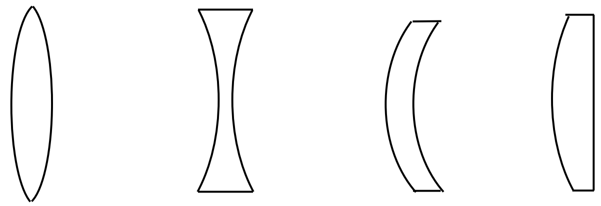
x	y	p	
$x = \infty$	$y = f$	$p = 0$	wiązka promieni równoległych do osi optycznej skupia się w ognisku
$x > 2f$	$f < y < 2f$	$p < 1$	obraz rzeczywisty, zmniejszony, odwrócony
$x = 2f$	$y = 2f$	$p = 1$	obraz rzeczywisty, wielkości przedmiotu, odwrócony
$f < x < 2f$	$y > 2f$	$p > 1$	obraz rzeczywisty, powiększony, odwrócony
$x = f$	$y = \infty$	$p = \infty$	promienie wychodzące z ogniska po odbiciu od zwierciadła (po przejściu przez soczewkę) stają się równoległe
$0 < x < f$	$y < 0$	$p > 1$	obraz pozorny, powiększony, prosty
$x < 0$	$0 < y < f$	$p < 1$	obraz rzeczywisty przedmiotu pozornego, zmniejszony, prosty

Zależności dla zwierciadła wypukłego i soczewki rozpraszającej

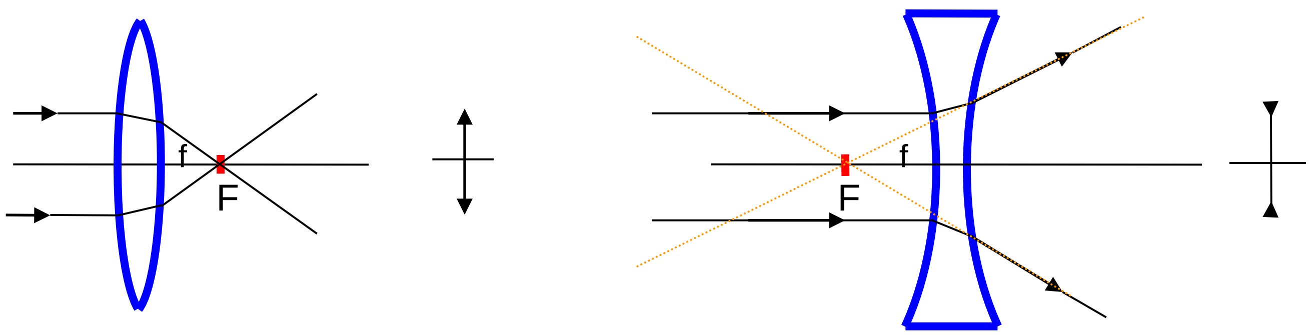
x	y	p	
$x > 0$	$- f < y < 0$	$p < 1$	obraz pozorny przedmiotu rzeczywistego, zmniejszony, prosty
$- f < x < 0$	$y > 0$	$p > 1$	obraz rzeczywisty przedmiotu pozornego, powiększony, prosty
$x = - f$	$y = \infty$	$p = \infty$	wiązka promieni zbieżnych do ogniska po odbiciu od zwierciadła (przejściu przez soczewkę) staje się równoległa
$-2f < x < -f$	$y < - 2f$	$p > 1$	obraz pozorny przedmiotu pozornego, powiększony, odwrócony
$x = - 2f$	$y = - 2f$	$p = 1$	obraz pozorny przedmiotu pozornego, wielkości przedmiotu, odwrócony
$x < - 2f$	$- 2f < y < - f$	$p < 1$	obraz pozorny przedmiotu pozornego, zmniejszony, odwrócony
$x = \infty$	$y = - f$	$p = 0$	promienie wychodzące z ogniska po odbiciu od zwierciadła (po przejściu przez soczewkę) stają się równoległe

Soczewki sferyczne

Soczewki sferyczne są obiektami zazwyczaj cienkimi, wykonanymi z przezroczystego materiału, przy czym powierzchnie ich mają kształt sferyczny lub są płaskie. Poniżej przedstawione są przykładowe soczewki: od lewej - obustronnie wypukła, obustronnie wklęsła, wypukło-wklęsła, wypukło-płaska.



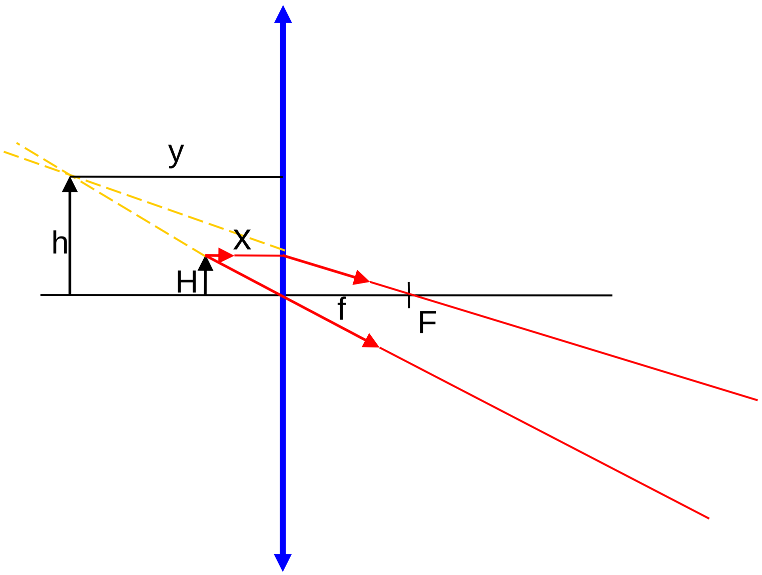
Promienie przyosiowe, biegnące równolegle do osi, dla soczewki skupiającej przecinają się w jednym punkcie F, który nazywamy ogniskiem. W przypadku soczewki rozpraszającej, przecięcia przedłużeń promieni załamanych przecinają się w punkcie, który nazywamy ogniskiem. Obok podano uproszczone symbole dla soczewki skupiającej i rozpraszającej.



Ogniskową soczewki nazywamy odległość f ogniska od środka soczewki.

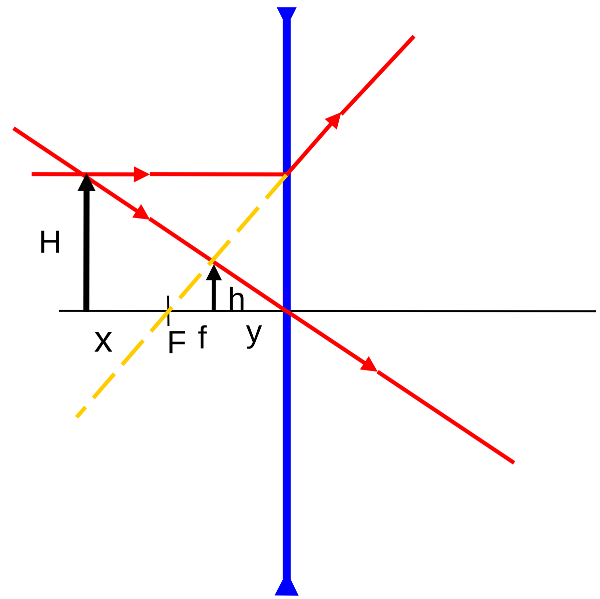
Konstrukcje obrazów w soczewce

Promień przechodzący przez środek soczewki nie ulega ugięciu.
Promienie padające równolegle do osi optycznej, po przejściu przez soczewkę, przecinają się w ognisku (dla soczewek skupiających), lub rozchodzą się tak, że ich przedłużenia przecinają się w ognisku (dla soczewek rozpraszających).



Soczewka wypukła, skupiająca

$f > 0$



Soczewka wklęsła, rozpraszająca

$f < 0$

Równanie soczewki

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

Liniowe powiększenie obrazu

$$p=\frac{h}{H}$$

$$p=\frac{|y|}{x}$$

Wzór do wyznaczania ogniskowej soczewki:

$$\frac{1}{f}=\left(\frac{n}{n_0}-1\right)\cdot\left(\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R_2}\right)$$

n - współczynnik załamania materiału soczewki , n_0 – współczynnik załamania ośrodka,

R_1, R_2 – promienie krzywizny powierzchni soczewek, pierwsza od strony promieni padających.

Obowiązuje następującą **konwencja**:

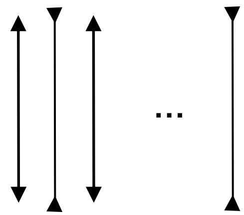
- dla powierzchni wypukłej promień krzywizny jest dodatni , a dla wklęsłej ujemny.
- jeżeli któraś z powierzchni jest płaska, to jej promień krzywizny jest nieskończony.

Zdolność skupiająca soczewki

Zdolność skupiającą soczewki wyrażamy w dioptriach i zapisujemy wzorem:
(Zdolność skupiająca soczewki wynosi 1D, jeśli jej ogniskowa wynosi 1 metr).

$$\boxed{D = \frac{1}{f}}$$

Jeśli ustawimy kolejno kilka soczewek, to zdolność skupiająca takiego układu będzie równa sumie zdolności skupiających poszczególnych soczewek.



$$\boxed{\frac{1}{f} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} + \frac{1}{f_3} + \cdots + \frac{1}{f_n}}$$

Przykład 2
Soczewka płasko-wypukła o promieniu krzywizny r = 0,3 m daje obraz rzeczywisty w odległości 1,2 m od soczewki. Gdzie znajduje się przedmiot i jaką ma wysokość, jeżeli wysokość obrazu wynosi 0,5 m, a współczynnik załamania materiału, z którego wykonana jest soczewka wynosi n = 1,45.
<u>Rozwiązanie</u>

$$\frac{1}{f} = \frac{n-1}{r} \qquad \frac{1}{x} + \frac{1}{y} = \frac{n-1}{r} \quad \Rightarrow \quad x = \frac{r \cdot y}{(n-1) \cdot y - r}$$

$$p = \frac{y}{x} \qquad p = \frac{h}{H} \qquad h = \frac{y}{\dfrac{r \cdot y}{(n-1) \cdot y - r}} \cdot H \quad \Rightarrow \quad H = \frac{r \cdot h}{(n-1) \cdot y - r}$$

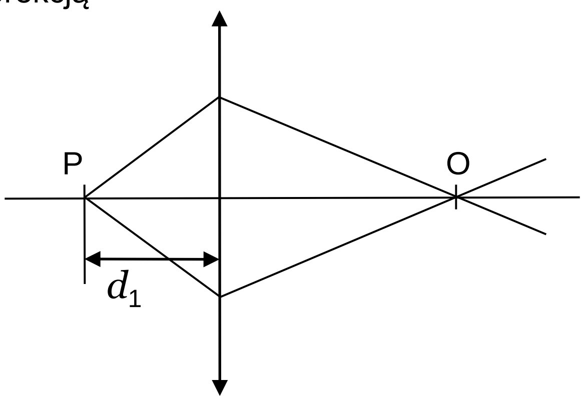
<u>Odpowiedź</u>: Przedmiot w odległości 1,5 m od soczewki, a jego wysokość to 0,625 m.

Przykład 3

Krótkowidz widzi dobrze z odległości d_1 = 15 cm. Znaleźć zdolność skupiającą soczewek okularów, które powinien nosić, aby widzieć ostro z odległości d_2 = 25 cm?

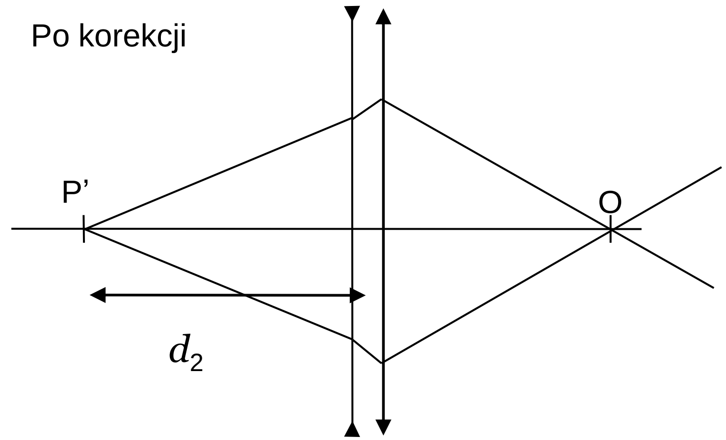
<u>Rozwiązanie</u>

Przed korekcją



$$\frac{1}{d_1}+\frac{1}{y}=\frac{1}{f_0}$$

Po korekcji



$$\frac{1}{d_2}+\frac{1}{y}=\frac{1}{f_0}+\frac{1}{f}$$

Odejmujemy teraz od drugiego równania pierwsze i otrzymujemy

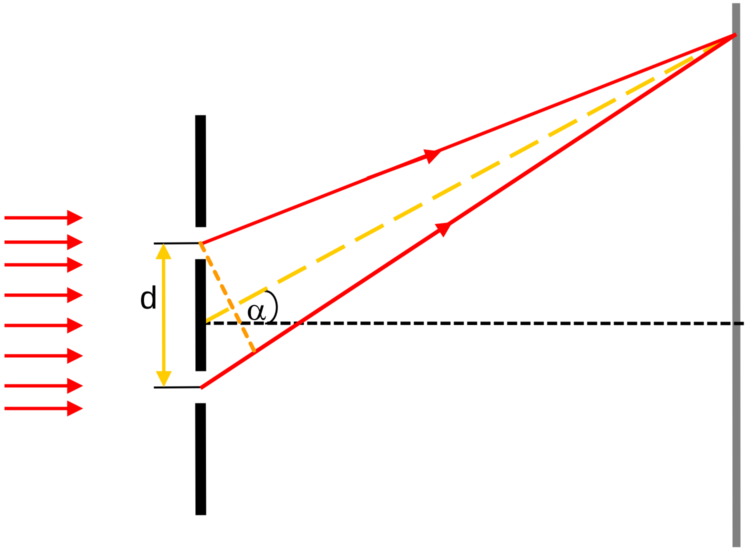
$$D=\frac{1}{f}=\frac{1}{d_2}-\frac{1}{d_1}=\frac{d_1-d_2}{d_1\cdot d_2}$$

<u>Odpowiedź</u>: Powinien nosić okulary -- 2,(6) dioptrii.

Siatka dyfrakcyjna

Aby wyjaśnić powstawanie obrazów interferencyjnych po ugięciu światła na siatce dyfrakcyjnej, należy uwzględnić **falową naturę światła**. U podstaw wyjaśnienia zjawisk falowych jest tzw. zasada Huygensa.

Zasada Huygensa (czytaj: hojchensa) mówi, iż każdy punkt ośrodka, do którego dotarło czoło fali można uważać za źródło nowej fali kulistej. Fale te zwane są falami cząstkowymi interferują ze sobą.



Obiekt z bardzo regularnie ułożoną dużą liczbą szczelin nazywamy **siatką dyfrakcyjną**. Odległość między środkami szczelin w siatce nazywamy **stałą siatki** i oznaczamy ją przez d. Jeżeli na siatkę dyfrakcyjną pada fala płaska, to rozkład punktów jasnych (prążki, maksima interferencyjne) na ekranie jest opisany wzorem:

$$\boxed{n \cdot \lambda = d \cdot \sin\alpha \qquad (n = 0, \pm 1, \pm 2, \cdots)}$$

Ugięcie (dyfrakcja) światła na dwóch szczelinach i interferencja (nakładanie się) fal ugiętych na płaszczyźnie ekranu. W wyniku otrzymujemy obraz interferencyjny – rozkład natężenia światła na ekranie.

gdzie λ jest długością fali, a α jest kątem, pod którym jest obserwowane n - te maksimum interferencyjne nazywane też rzędem widma dyfrakcyjnego.

Stała siatki jest rzędu długości fali świetlnej, ponieważ $1 \geq \sin\alpha = \frac{n \cdot \lambda}{d}$ to $n \leq \frac{d}{\lambda}$

Zadania z rozwiązaniami

Zadanie 1
Po umieszczeniu przedmiotu na osi optycznej zwierciadła sferycznego otrzymano rzeczywisty obraz o powiększeniu p_1 = 1/3. Przedmiot przysunięto do zwierciadła o l = 4 cm, a następnie przesunięto ekran tak, że na ekranie powstał ostry obraz o powiększeniu p_2 = 1/2. Oblicz ogniskową zwierciadła.
<u>Rozwiązanie</u>

$$\begin{cases} x_2 = x_1 - l \\ p_1 = \dfrac{y_1}{x_1} \\ p_2 = \dfrac{y_2}{x_2} \\ \dfrac{1}{x_1} + \dfrac{1}{y_1} = \dfrac{1}{f} \\ \dfrac{1}{x_2} + \dfrac{1}{y_2} = \dfrac{1}{f} \end{cases}$$

Taki obraz otrzymamy dla zwierciadła wklęsłego, gdy $x > 2f$
Mamy tu do rozwiązania układ pięciu równań z pięcioma niewiadomymi.

Rozwiązujemy ten układ równań z niewiadomymi: f, x_1, y_1, x_2, y_2.

Wykonujemy podstawienia i przekształcenia

$$y_1 = \frac{x_1}{3} \qquad y_2 = \frac{x_1 - 4}{2}$$

$$\frac{1}{x_1} + \frac{3}{x_1} = \frac{1}{x_1 - 4} + \frac{2}{x_1 - 4}$$

$$\frac{4}{x_1} = \frac{3}{x_1 - 4}$$

Otrzymujemy $x_1 = 16\ cm \qquad y_1 = \frac{16}{3}\ cm \qquad f = 4\ cm$

<u>Odpowiedź</u>: Ogniskowa zwierciadła f = 4 cm.

Zadania z rozwiązaniami

Zadanie 2
W zwierciadle sferycznym wypukłym ogniskową f = - 6 cm, odległość przedmiotu od zwierciadła x = 8 cm, wielkość przedmiotu H = 1 cm. Oblicz odległość obrazu od zwierciadła i wielkość obrazu
<u>Rozwiązanie</u>

Otrzymamy tu pozorny obraz przedmiotu, zmniejszony, prosty, bo $x > 0$
Mamy tu do rozwiązania układ trzech równań z trzema niewiadomymi.

$$\begin{cases} p = \dfrac{h}{H} \\ p = \dfrac{|y|}{x} \\ \dfrac{1}{x} + \dfrac{1}{y} = \dfrac{1}{f} \end{cases}$$

Rozwiązujemy ten układ równań z niewiadomymi: $h, p, y.$

Podobnie jak, poprzednio wykonujemy przekształcenia i obliczamy

$$\frac{1}{y} = \frac{1}{f} - \frac{1}{x} \Rightarrow y = \frac{x \cdot f}{x - f} \qquad y = -3\frac{3}{7}\ cm$$

$$h = p \cdot H = \frac{f}{x - f} \cdot H \qquad h = \frac{3}{7}\ cm$$

<u>Odpowiedź</u>: $y = -3\frac{3}{7}\ cm$ $\quad h = \frac{3}{7}\ cm$

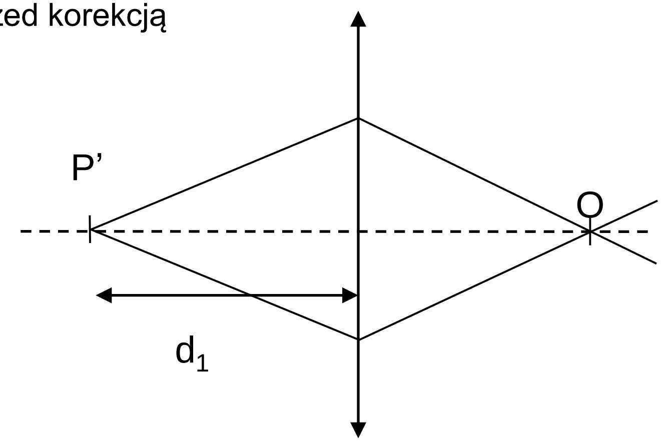
Zadania z rozwiązaniami

Zadanie 3

Dalekowidz widzi dobrze z odległości d_1 = 0,5 m. Znaleźć zdolność skupiającą soczewek okularów, które powinien nosić, aby widzieć ostro z odległości d_2 = 25 cm?

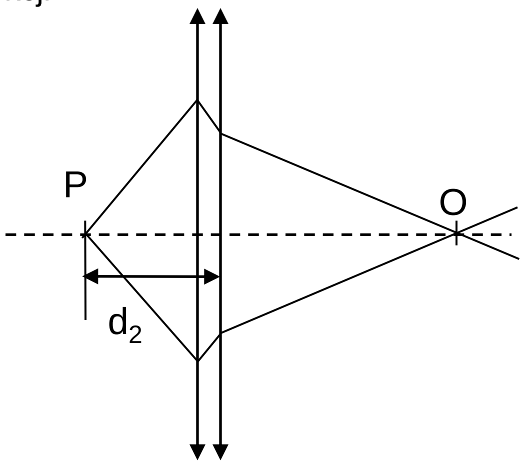
Rozwiązanie

Przed korekcją



$$\frac{1}{d_1}+\frac{1}{y}=\frac{1}{f_0}$$

Po korekcji



$$\frac{1}{d_2}+\frac{1}{y}=\frac{1}{f_0}+\frac{1}{f}$$

Odejmujemy teraz od drugiego równania pierwsze i otrzymujemy

$$D=\frac{1}{f}=\frac{1}{d_2}-\frac{1}{d_1}=\frac{d_1-d_2}{d_1\cdot d_2}$$

Odpowiedź: Powinien nosić okulary +2 dioptrie.

Zadania z rozwiązaniami

Zadanie 4

Odległość pomiędzy oświetlonym przedmiotem i ekranem wynosi d = 2,25 m. Pomiędzy przedmiotem i ekranem ustawiono soczewkę skupiającą o ogniskowej f = 0,5 m Określ dwa położenia soczewki i powiększenia obrazów przy których na ekranie powstaną ostre obrazy przedmiotu. Dla jakiej ogniskowej soczewki powstanie tylko jeden obraz?

Rozwiązanie

Z treści zadania mamy, że

$$\begin{cases} x + y = d \\ \dfrac{1}{x} + \dfrac{1}{y} = \dfrac{1}{f} \end{cases}$$

Rozwiązujemy ten układ równań z niewiadomymi: $x,\ y$.

$$y = d - x \qquad \frac{1}{x} + \frac{1}{d-x} = \frac{1}{f} \qquad x^2 - d \cdot x + f \cdot d = 0$$

Zakładając, że $\Delta = d^2 - 4 \cdot f \cdot d \geq 0$

Otrzymujemy dwa pierwiastki, którym odpowiadają dwa obrazy o różnych powiększeniach.

$$x_1 = \frac{d + \sqrt{d^2 - 4fd}}{2} \qquad x_2 = \frac{d - \sqrt{d^2 - 4fd}}{2}$$

Oraz, ponieważ $y = d - x$

$$y_1 = \frac{d - \sqrt{d^2 - 4fd}}{2} \qquad y_2 = \frac{d + \sqrt{d^2 - 4fd}}{2}$$

$$p_1 = \frac{y_1}{x_1} \qquad p_2 = \frac{y_2}{x_2}$$

Gdy $\Delta = 0$ to $d = 4 \cdot f$ $\quad x = y$ $\quad p = 1$

Odpowiedź: x_1 = 1,5 m, x_2 = 0,75 m, p_1 = 2, p_2 = 0,5, f_0 = 0,56 m

Zadania z rozwiązaniami

Zadanie 5
Wiązka fal elektromagnetycznych (mikrofal) o długości fali λ = 3,0 cm pada prostopadle na siatkę dyfrakcyjną o stałej d = 7,5 cm. Ile maksimów interferencyjnych (prążków) można zaobserwować za siatką?

Rozwiązanie

Dla siatki dyfrakcyjnej

$$n \cdot \lambda = d \cdot \sin\alpha$$

gdzie, α oznacza kąt odchylenia promieni, d to stała siatki, λ długość fali, a n jest rzędem prążka – wielkością, która przyjmuje tylko wartości całkowite.

Ponieważ, $n = \dfrac{d \cdot \sin\alpha}{\lambda}$ a kąt α nie może być większy od $\pi/2$, to

$$\frac{d}{\lambda} \cdot \sin\left(-\frac{\pi}{2}\right) \le n \le \frac{d}{\lambda} \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2}\right)$$

Obliczamy $-2{,}5 \le n \le 2{,}5$ Ale n może przybierać tylko wartości całkowite, więc

$$-2 \le n \le 2$$

Odpowiedź: Można zaobserwować razem 5 prążków. Będą to maksima o liczbach n = - 2, - 1, 0, 1, 2.

Zadania do rozwiązania

Zadanie 1

Rzeczywisty i 2 - krotnie powiększony obraz otrzymano w odległości 30 cm od zwierciadła kulistego wklęsłego. Znajdź ogniskową tego zwierciadła.

Odpowiedź 10 cm

Zadanie 2

W odległości 12 cm od zwierciadła kulistego wklęsłego o ogniskowej 8 cm ustawiono przedmiot. Oblicz odległość między przedmiotem i obrazem oraz powiększenie obrazu.

Odpowiedź Odległość 12 cm, powiększenie 2 – krotne.

Zadanie 3

Po umieszczeniu przedmiotu na osi optycznej zwierciadła sferycznego otrzymano rzeczywisty obraz o powiększeniu $p_1 = 2$. Przedmiot przesunięto w kierunku zwierciadła o l = 5 cm, a następnie przesunięto ekran tak, że na ekranie powstał ostry obraz o powiększeniu $p_2 = 3$. Oblicz ogniskową zwierciadła.

Odpowiedź 30 cm

Zadanie 4

Obraz pozorny w zwierciadle wypukłym o ogniskowej f = - 10 cm powstaje w pewnej odległości za zwierciadłem, a jego powiększenie wynosi p = 0,6. Oblicz odległość przedmiotu od zwierciadła.

Odpowiedź $x = 6\frac{2}{3}\, cm$

Zadania do rozwiązania

Zadanie 5

W odległości 0,5 m przed ogniskiem soczewki o zdolności skupiającej 2 D umieszczono przedmiot. W jakiej odległości od soczewki powstanie obraz?

Odpowiedź Przedmiot ustawiono w ognisku soczewki, $y = \infty$.

Zadanie 6

Soczewka wypukło-wklęsła o promieniach krzywizn równych 20 cm i 30 cm i współczynniku załamania 1,6 zanurzona jest w cieczy o współczynniku załamania 1,8. Jaka jest ogniskowa tej soczewki?.

Odpowiedź 5,4 m

Zadanie 7

W odległości $x = 0{,}2$ m od soczewki skupiającej o ogniskowej $f = 0{,}15$ m umieszczono przedmiot. Po przeciwnej stronie soczewki, w odległości $d = 0{,}4$ m znajduje się zwierciadło płaskie. W jakiej odległości od soczewki powstanie obraz przedmiotu i jakie będą jego cechy ?

Odpowiedź Powstaną dwa obrazy: rzeczywisty w odległości 0,2 m od soczewki i pozorny w odległości 0,6 m. Oba obrazy powiększone i odwrócone.

Zadania do rozwiązania

Zadanie 8

Dwuwypukłą soczewkę wykonaną z szkła o współczynniku załamania n = 1,5 przeniesiono z powietrza do wody o współczynniku załamania n_w = 1,3. Oblicz jak zmieniła się zdolność skupiająca soczewki.

Odpowiedź Zmniejszyła się około 3 – krotnie.

Zadanie 9

Oblicz ogniskową soczewki skupiającej, która w tym samym punkcie daje obrazy dwóch przedmiotów odległych od niej o 5 cm i 15 cm.

Odpowiedź 7,5 cm.

Zadanie 10

Przed soczewką płasko – wypukłą wykonaną ze szkła o współczynniku załamania n = 1,5 ustawiono w odległości d = 10 cm przedmiot i uzyskano na ekranie obraz rzeczywisty dwukrotnie powiększony. Oblicz promień krzywizny tej soczewki.

Odpowiedź. $r = 3\frac{1}{3}\,cm$

Zadania do rozwiązania

Zadanie 1

Pozorny i powiększony 3 - krotnie obraz otrzymano po umieszczeniu przedmiotu w odległości 10 cm od zwierciadła kulistego wklęsłego. Znajdź ogniskową tego zwierciadła.

Odpowiedź 15 cm

Zadanie 2

Jaki jest współczynnik załamania soczewki obustronnie wypukłej o równych promieniach krzywizny jeśli jej ogniskowa równa jest promieniowi krzywizny?

Odpowiedź n = 1,5

Zadanie 3

Jakie powiększenie przedmiotu daje soczewka płasko – wypukła o promieniu krzywizny R i współczynniku załamania n = 2, jeśli przedmiot umieścimy w odległości $2R$ od soczewki?.

Odpowiedź p = 1

Zadanie 4

Oblicz ogniskową f dla układu soczewek o ogniskowych f_1 = 10 cm , f_2 = - 20 cm.

Odpowiedź f = 20 cm

Zadanie 5

Na ekranie, za siatką dyfrakcyjną oświetloną światłem o długości fali λ = 500 nm zaobserwowano ugięte pod kątem 30^0 maksima dyfrakcyjne drugiego rzędu. Jaka była stała tej siatki dyfrakcyjnej?

Odpowiedź d = 2000 nm.