

## Ćwiczenie 53

# Soczewki

### Cel ćwiczenia

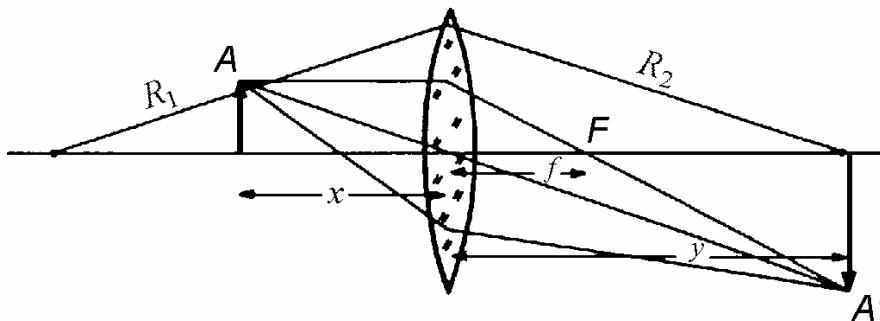
Pomiar ogniskowych soczewki skupiającej i układu soczewek (skupiająca i rozpraszająca), obliczenie ogniskowej soczewki rozpraszającej. Obserwacja i pomiar wad odwzorowań optycznych. Pomiar ogniskowej soczewki okularów i obiektywu.

### Wprowadzenie

Światło widzialne stanowi małą część rozległego widma fal elektromagnetycznych różniących się między sobą długością fali. W przybliżeniu zwany optyką geometryczną zakłada się, że długości fal są bardzo małe w porównaniu z rozmiarami urządzeń służących do ich badania, a więc można zaniedbać efekty dyfrakcyjne.

W optyce geometrycznej zakłada się, że w ośrodkach jednorodnych światło rozchodzi się po liniach prostych. Promienie wychodzące z dowolnego punktu przedmiotu tworzą wiązkę rozbieżną. Przekształcenia tej wiązki na zbieżną, równoległą lub bardziej (mniej) rozbieżną można dokonać za pomocą soczewki.

Soczewką nazywamy zwykle bryłę z przeźroczystego materiału, ograniczoną dwiema powierzchniami sferycznymi o promieniach  $R_1$  i  $R_2$  (rys. 1).



Rys. 1. Soczewka: wymiary geometryczne ( $R_1, R_2$ ) oraz parametry optyczne ( $x, y, f$ )

Ogniskowa soczewki  $f$  jest określona wzorem [1], [2]

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

gdzie  $n$  oznacza współczynnik załamania światła dla materiału soczewki. Przyjmujemy dodatnią wartość promienia krzywizny dla powierzchni wypukłych, a ujemną dla wklęsłych. Wobec tego ogniskowe soczewek skupiających są dodatnie, a rozpraszających – ujemne.

Odwrotność ogniskowej nosi nazwę zdolności skupiającej soczewki  $D = 1/f$ . Jej jednostką jest 1 dioptria (czyli 1/m). Pojęcie zdolności skupiającej jest w szczególności stosowane w okulistyczce do określania własności okularów. Przykładowo, soczewka okularów o zdolności skupiającej +2 dioptre ma ogniskową 0,5 m. Ujemne wartość zdolności skupiającej dotyczy soczewek wkleśnych, używanych do korekcji krótkowzroczności.

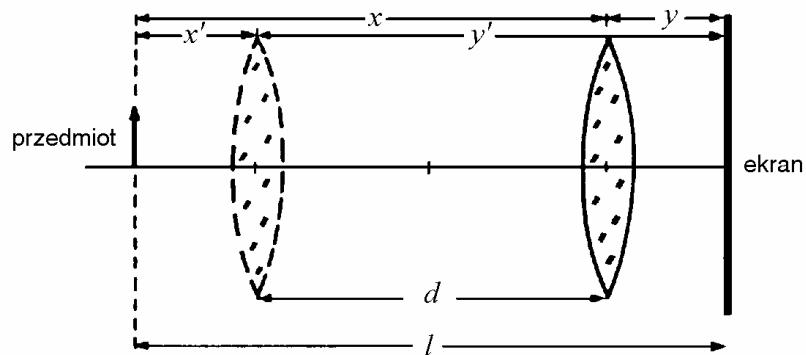
### Pomiar ogniskowej soczewek

Zależność między odległością przedmiotu  $x$ , odlegością obrazu  $y$  i ogniskową soczewki  $f$  wyraża wzór [1], [2]

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{x} + \frac{1}{y}. \quad (2)$$

Związek ten zwany *równaniem soczewki* pozwala wyznaczyć ogniskową soczewki skupiającej na podstawie bezpośredniego pomiaru odległości  $x$  oraz  $y$ . Opisaną metodę bezpośrednią stosować można tylko w przypadku pojedynczych soczewek wypukłych, dla których odległości  $x$  i  $y$  mierzymy względem środka geometrycznego soczewki.

W przypadku układu soczewek (np. pokazanego na rys. 4) powstaje problem z określeniem odległości  $x$  i  $y$ , nie wiadomo bowiem, względem którego punktu należy je mierzyć. Sposób na ominięcie tej trudności podał Bessel (rys. 2).



Rys. 2. Zasada metody Bessela

Niech  $l$  oznacza ustaloną odległość ekranu (z obrazem) od przedmiotu świecącego. Spróbujmy określić dla jakich położen  $x$  soczewki na ekranie wytworzy się ostry obraz. Mamy wtedy układ dwóch równań:

$$\begin{aligned} x + y &= l, \\ \frac{1}{x} + \frac{1}{y} &= \frac{1}{f}. \end{aligned} \quad (3)$$

Rozwiązujeając układ równań (3) ze względu na szukaną odległość  $x$  dostajemy równanie kwadratowe

$$x^2 - l x + l f = 0, \quad (4)$$

którego rozwiązań zależą od wyróżnika  $\Delta = l(l - 4f)$ .

Aby równanie (4) miało dwa rozwiązania rzeczywiste konieczne jest, by  $\Delta > 0$ , co zachodzi dla  $l > 4f$ . Fizycznie oznacza to, że odległość od obiektu do jego obrazu na ekranie winna być co najmniej czterokrotnie większa od ogniskowej. Jeżeli tak nie jest, nie uda się uzyskać ostrego obrazu dla żadnego położenia soczewki.

Dla  $l > 4f$  istnieją dwa rozwiązania:

$$x_1 = \frac{1}{2} \left( l - \sqrt{l(l - 4f)} \right), \quad x_2 = \frac{1}{2} \left( l + \sqrt{l(l - 4f)} \right). \quad (5)$$

Jednemu odpowiada obraz powiększony, drugiemu pomniejszony. Odległość między tymi dwoma położeniami wynosi  $d = x_1 - x_2 = \sqrt{l(l - 4f)}$ . Metoda Bessela polega na pomiarze odległości  $d$ , przy zadanym  $l$ , i wyliczeniu ogniskowej

$$f = \frac{1}{4} \left( l - \frac{d^2}{l} \right). \quad (6)$$

### Ogniskowa układu soczewek

Ogniskowa  $f$  układu dwu soczewek o ogniskowych  $f_1$  i  $f_2$  jest dana przybliżonym równaniem [2]

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} - \frac{\delta}{f_1 f_2}, \quad (7)$$

gdzie  $\delta$  oznacza odległość między soczewkami.

Soczewki rozpraszające nie wytwarzają obrazów rzeczywistych na ekranie. Dla doświadczalnego wyznaczenia ich ogniskowych zestawia się je z soczewką skupiającą tak, by uzyskany układ optyczny wykazywał własności skupiające. Z równania (7) otrzymuje się ogniskową soczewki rozpraszającej  $f_2$  na podstawie zmierzonych poprzednio wartości  $f$  i  $f_1$ ,

$$f_2 = \frac{f(f_1 - \delta)}{f_1 - f} \quad (8)$$

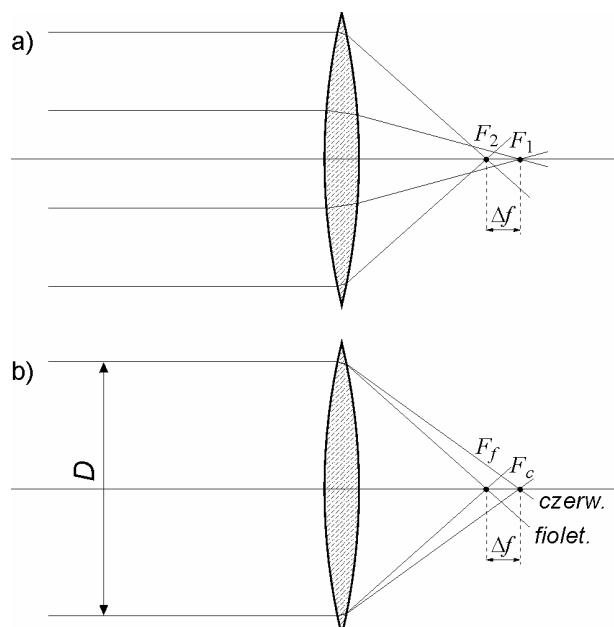
Wzór (7) pomaga też zrozumieć działanie okularów. Nasze oko jest układem optycznym o krótkiej ogniskowej  $f_1$ , wytwarzającym obraz na siatkówce oka. W przypadku wad wzroku określanych jako krótkowzroczność względnie dalekowzroczność ostry obraz tworzy się nieco przed siatkówką, względnie za siatkówką. Układ oko plus soczewka okularów tworzy układ optyczny, którego wypadkową ogniskową  $f$  można regulować przez dobór ogniskowej  $f_2$  soczewki okularów. O istnieniu wyrazu  $\delta/(f_1 f_2)$  w równaniu (7) można się przekonać, odsuwając okulary od oczu: widziany przez nasze oko obraz zmienia się.

## Wady odwzorowań optycznych

Przy wyprowadzeniu wzorów (1) i (2) zakłada się, że promienie są równoległe do osi optycznej lub tworzą z nią niewielkie kąty, że ich odległość od osi jest mała oraz, że soczewki są cienkie. Dzięki tym założeniom, teoretycznym obrazem punktu świecącego jest punkt. Spełnienie tych założeń oznacza jednak, że stosunek średnicy soczewki do ogniskowej musi być mały, a taka soczewka daje małą jasność obrazu. Przy konstrukcji układów optycznych posługujemy się soczewkami grubymi, o dużej wartości stosunku średnicy do ogniskowej. Pojawiające się przy tym odstępstwa od idealnego obrazu nazywamy wadami odwzorowań optycznych (lub krótko „wadami soczewek”), chociaż ich występowanie nie jest konsekwencją złej jakości wykonania soczewek, lecz wynika z fizyki zjawiska załamania.

Obraz świecącego punktu leżącego na osi optycznej podlega dwu wadom, aberracji sferycznej i aberracji chromatycznej.

1) *Aberracja sferyczna* polega na tym, że punkt skupienia promieni położonych blisko osi soczewki (oznaczony jako  $F_1$  na rysunku 3a) znajduje się dalej od soczewki niż punkt skupienia promieni padających na zewnętrzne strony soczewki (punkt  $F_2$  na rysunku 3a).



Rys. 3. Aberracje układów optycznych: a) aberracja sferyczna; b) aberracja chromatyczna

Dla zrozumienia istoty i nazwy tej aberracji przydatna jest analogia z ogniskowaniem światła przy pomocy zwierciadeł wklęsłych. W przypadku wiązki równoległej idealne ogniskowanie zapewnia użycie zwierciadła o przekroju parabolicznym – zwierciadła takie stosowane są np. w teleskopach, reflektorach samochodowych i antenach satelitarnych. Natomiast zwierciadło kuliste nie ogniskuje w jednym punkcie, zatem obarczone jest aberracją *sferyczną*. W pojedynczej soczewce aberrację sferyczną można usunąć jedynie przez wykonanie soczewki, której powierzchnia nie jest sferą. Pojedyncze soczewki asferyczne stosowane są od niedawna w obiektywach wysokiej klasy [3], niemniej korekcja tej i innych aberracji polega na wykorzystaniu układu soczewek sferycznych, które znacznie łatwiej wykonać.

Doświadczalne badanie aberracji sferycznej polega na pomiarze ogniskowej soczewki, na którą zakładamy pierścieniowe przesłony kierujące światło na środkowe bądź skrajne części soczewki. Miarą aberracji sferycznej jest różnica ogniskowych  $\Delta f = f_1 - f_2$ .

2) *Aberracja chromatyczna* wywołana jest zjawiskiem dyspersji, czyli rozszczepienia światła. Współczynnik załamania  $n$  jest tylko w przybliżeniu ustaloną liczbą. W istocie jest funkcją  $n(\lambda)$  długości fali  $\lambda$ , czyli barwy światła. Wzór (1) pokazuje, że ogniskowa soczewki zależy od współczynnika załamania, zatem od barwy światła. Promienie światła czerwonego skupiają się dalej (punkt  $F_c$  na rysunku 3b) niż promienie „fioletowe” (punkt  $F_f$ ).

Aberracji chromatycznej nie ma w przypadku zwierciadeł, bo związek między kątem padania i odbicia nie zależy od długości fali. Dlatego zwierciadła wkleśle stosowane są nie tylko w teleskopach, ale również w innych zastosowaniach (obiektywy satelitów, duże lornety i teleobiektywy, etc.). Jeżeli w konstrukcji obiektywu ograniczymy się do soczewek, korekcja aberracji chromatycznej jest możliwa przez wykorzystanie układu soczewek, które muszą być wykonane z co najmniej dwu rodzajów szkła optycznego, o różnej postaci funkcji  $n(\lambda)$ .

Badanie aberracji chromatycznej polega na pomiarze ogniskowej soczewki dla światła czerwonego oraz fioletowego. Miarą aberracji jest różnica ogniskowych  $\Delta f = f_c - f_f$ .

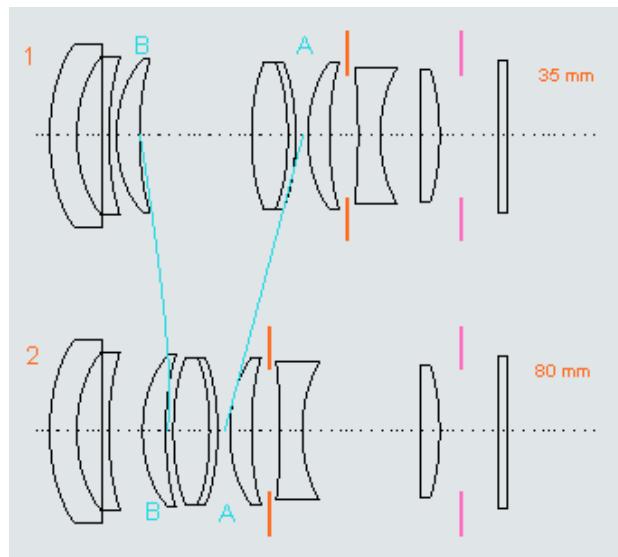
Aberracja sferyczna i chromatyczna są jedynymi wadami, jeżeli obiekt i obraz położone są blisko osi soczewki. Gdy punkty przedmiotu leżą pod dużym kątem w stosunku do osi optycznej pojawiają się dodatkowe wady odwzorowania, których nie będziemy omawiać.

### Obiektywy

Obiektywem nazywamy układ soczewek (od kilku do kilkunastu) o tak dobranych położeniach, krzywiznach i rodzaju szkła, by możliwe dobrze skorygować wady optyczne. Obiektywy stosowane są rozmaitych przyrządach: aparatach fotograficznych, mikroskopach, lornetkach, przyrządach geodezyjnych, kamerach video, rzutnikach komputerowych, itd.

Podstawowym parametrem obiektywu jest ogniskowa  $f$ . Dla eksperymentalnego wyznaczenia ogniskowej wykorzystujemy w ćwiczeniu metodę Bessela. Uzyskany wynik można porównać ze znamionową wartością ogniskowej (w mm) podanej na obudowie obiektywu. Drugim parametrem obiektywu jest jego jasność, zdefiniowana jako stosunek ogniskowej do średnicy otworu obiektywu do (np. 2.8).

Projektowanie i budowa współczesnych obiektywów to fascynujące wykorzystanie wielu dziedzin wysokiej technologii [3]. Rysunek 4 pokazuje przykładową konstrukcję obiektywu aparatu fotograficznego o zmiennej ogniskowej (tzw. zoom). Zmianę ogniskowej od 35 mm do 80 mm uzyskuje się przez precyzyjne przesuwanie względem siebie soczewek lub grup soczewek.



**Rys. 4.** Zasada działania obiektywu o zmiennej ogniskowej. Wg. opracowania [4].

### Literatura

Wyprowadzenie i omówienie podstawowych wzorów

- [1] Szczeniowski S.: *Fizyka doświadczalna. T. IV.* Warszawa, PWN 1983
- [2] Halliday, Resnick, Walker.: *Podstawy Fizyki, T. 4.* Warszawa, PWN 2003
- i inne podręczniki akademickie.

Na temat obiektywów jest dużo opracowań w internecie, polecić można:

- [3] *Technologia produkcji obiektywów EF.* Opracowanie f-my Canon.
- [4] *Budowa obiektywów zmiennoogniskowych.* Z internetowego podręcznika fotografii FOTOMANIA.