

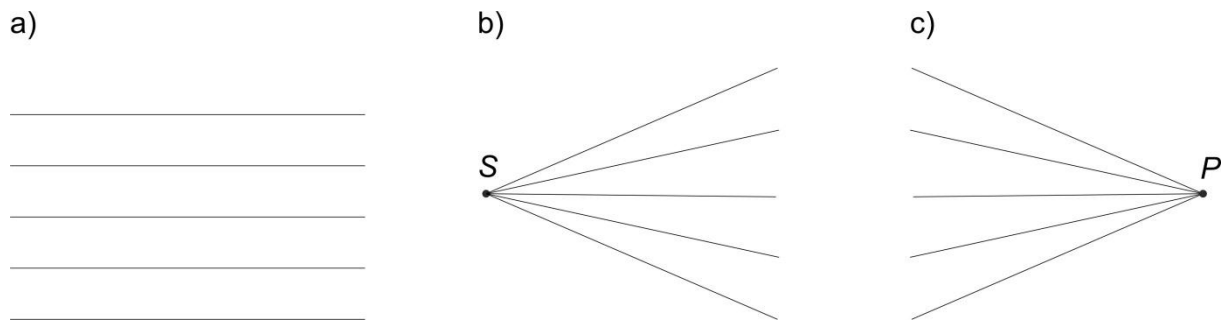
## Ćwiczenie 2

### Wyznaczanie ogniskowych soczewek cienkich oraz płaszczyzn głównych obiektywów lub układów soczewek. Aberracje.

#### Wprowadzenie teoretyczne

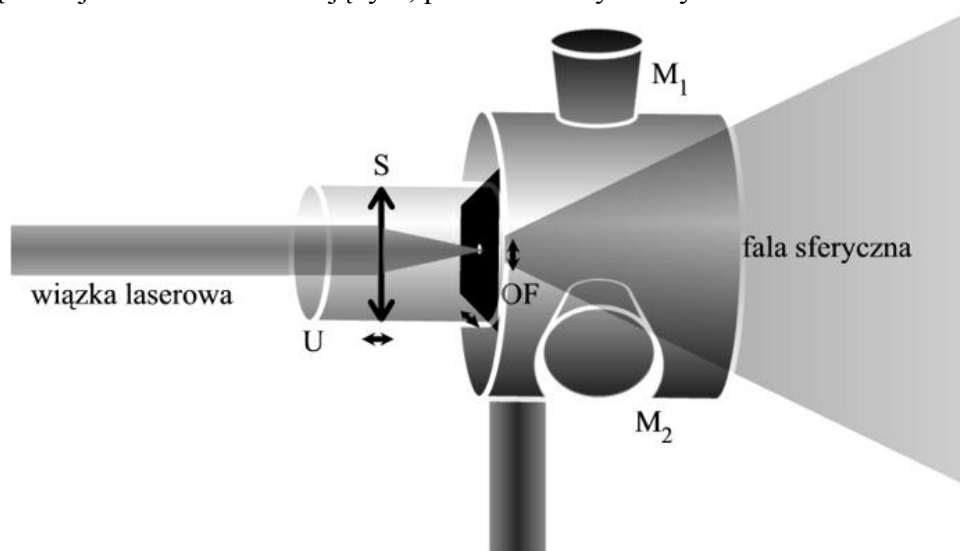
#### Podstawy

Działanie obrazujące soczewek lub układu soczewek wygodnie jest opisywać przy pomocy optyki geometrycznej, gdzie front falowy jest przedstawiony w postaci zbioru promieni prostopadłych do powierzchni stałej fazy. Fala płaska odpowiada tutaj wiązce promieni równoległych (Rys. 1a), biegnących w kierunku propagacji. Fala sferyczna rozbieżna (Rys. 1b) lub zbieżna (Rys. 1c) jest natomiast zbiorem promieni wybiegających z punktu źródła  $S$  lub zbiegających się do punktu  $P$ .



Rysunek 1

Najefektywniejszy, praktyczny sposób sformowania fali sferycznej zapewnia układ soczewki połączonej z otworkiem filtrującym, przedstawiony na Rys. 2.



Rysunek 2

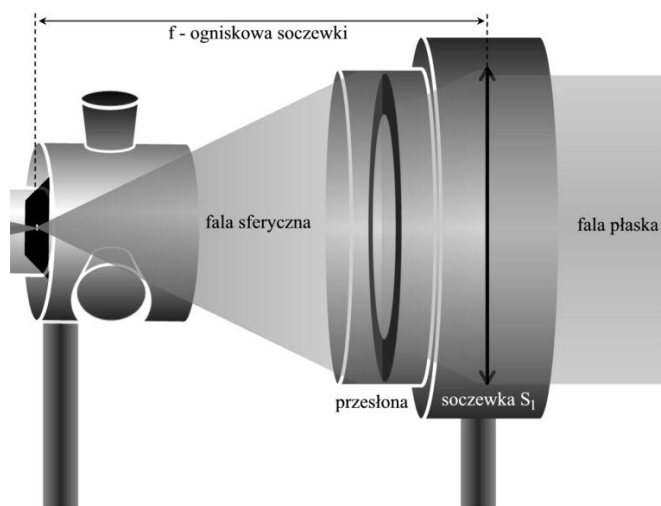
Symbolem S na Rys.2 oznaczono soczewkę lub obiektyw mikroskopowy zamontowany w mogącym się obracać uchwycie U. Powyższy obrót umożliwia poziomy przesuw elementu S względem małego otwarka filtrującego OF. Otworek jest przesuwany precyzyjnie dwoma śrubami mikrometrycznymi  $M_1$  i  $M_2$ . Jedna z nich umożliwia ruch otwarka w płaszczyźnie rysunku, druga w kierunku do niego prostopadłym. Kiedy wiązka laserowa zostanie zogniskowana dokładnie w obszarze otwarka filtrującego, wówczas za otworkiem pojawia się intensywne pole świetlne, będące realnym przybliżeniem rozbieżnej fali sferycznej.

Sformowanie fali sferycznej za pomocą układu z Rys.2 można podzielić na następujące etapy:

- 1) Ustawienie soczewki lub obiektywu S prostopadle do kierunku wiązki laserowej.
- 2) Znalezienie przy pomocy śruby mikrometrycznej położenia otwarka OF, odpowiadającego największemu natężeniu światła w jego obrębie. Optymalne położenie znajdujemy obserwując otworek od strony przeciwnej do kierunku oświetlenia wiązką laserową.
- 3) Przesuwanie elementu S poprzez obrót uchwyty U w kierunku odpowiadającym coraz intensywniejszemu oświetleniu otwarka. Jednocześnie nieznacznie przemieszczamy otworek OF śrubami mikrometrycznymi aby uzyskać jego optymalne położenie.

**Uwaga!** Przy pojawieniu się dużego natężenia światła w obrębie otwarka nie patrzymy dalej wewnątrz bezpośrednio a obserwujemy plamkę świetlną na kartce papieru umieszczonej za otworkiem. Justowanie prowadzimy do chwili pojawienia się na papierze możliwie najjaśniejszej plamki świetlnej.

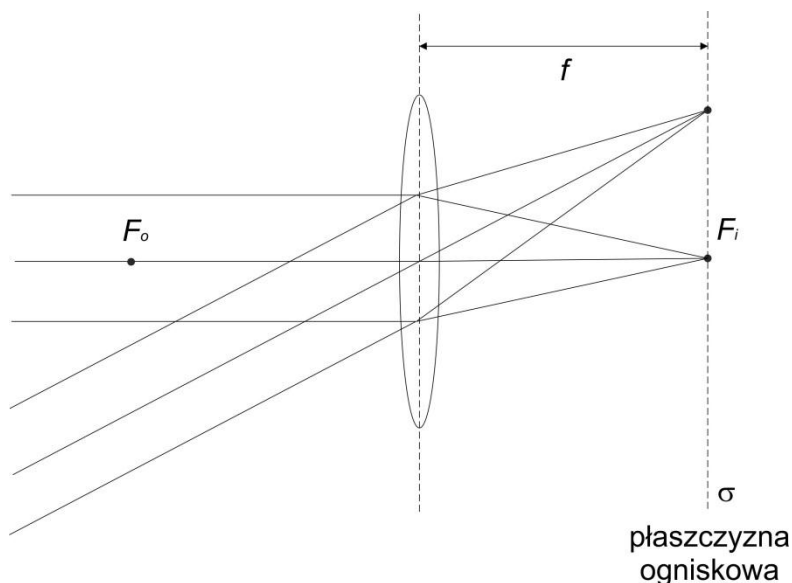
W układzie optycznym falę płaską można sformować przy użyciu zjustowanego otwarka filtrującego OF, umieszczonego w ognisku soczewki  $S_1$  tak jak to pokazano na Rys. 3.



Rysunek 3

Za soczewką  $S_1$  pojawia się wiązka świetlna, będąca przybliżeniem fali płaskiej. Optymalne położenie soczewki  $S_1$  za otworkiem OF dobieramy w ten sposób, że średnica wyjściowej wiązki świetlnej obserwowanej na ekranie powinna być stała niezależnie od odległości ekranu od soczewki  $S_1$ .

Idealna cienka soczewka skupiająca spełnia warunek zilustrowany na Rys. 4, zgodnie z którym wiązka promieni równoległych padających na soczewkę jest transformowana w ten sposób, że promienie za soczewką przecinają się w jednym punkcie, który leży w płaszczyźnie ogniskowej (zaznaczonej na Rys. 4 przerywaną linią), odległej o  $f$  od środka soczewki  $O$ .



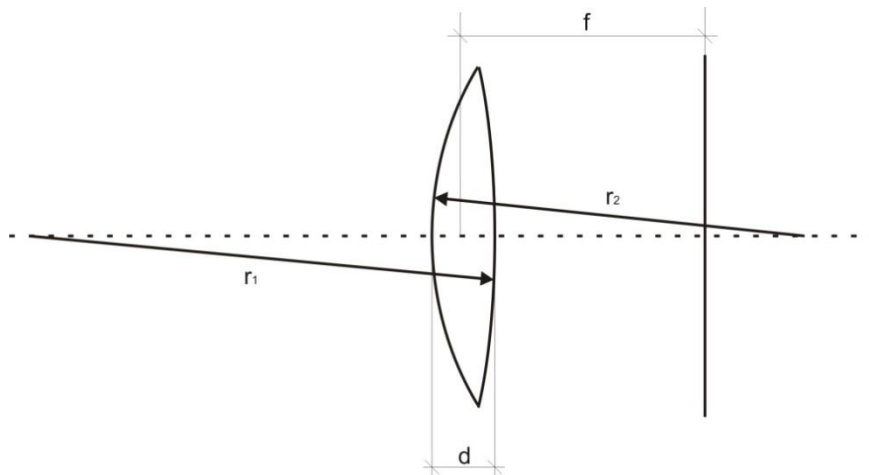
Rysunek 4

Odległość  $f$  nazywa się ogniskową soczewki. Punkt przecięcia promieni wygodnie jest wyznaczyć jako przecięcie płaszczyzny ogniskowej z promieniem przechodzącym przez środek soczewki  $O$ , który nie zmienia swojego kierunku. Prosta będąca osią symetrii powierzchni ograniczających soczewkę nazywa się osią optyczną. Punkt przecięcia osi optycznej z płaszczyzną ogniskową wyznacza ognisko soczewki  $F_i$ . Po przeciwnej stronie soczewki w tej samej odległości  $f$  leży na osi optycznej drugie ognisko  $F_o$ .

W uproszczonym podejściu ogniskowa zależy od geometrii soczewki oraz rozkładu współczynnika załamania ośrodka, z którego jest wykonana soczewka. Tę funkcję opisujemy zależnością:

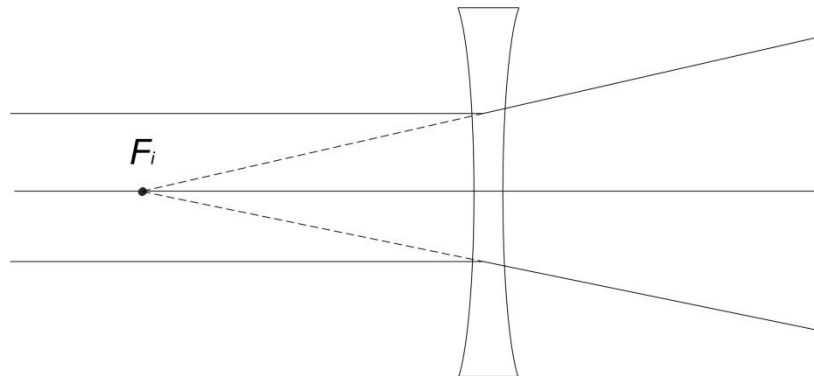
$$\frac{1}{f} = (n - 1) \left( \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right), \quad (1)$$

gdzie  $n$  jest względnym współczynnikiem załamania materiału soczewki względem otoczenia, a  $r_1$  i  $r_2$  to promienie krzywizny powierzchni soczewki (Rys. 5). Oczywiście zależność (1) dotyczy idealnej soczewki cienkiej.



Rysunek 5

Soczewka rozpraszająca, przedstawiona na Rys. 6. zachowuje się podobnie, ale równoległa wiązka światła jest transformowana w wiązkę promieni rozbieżnych. Jedynie przedłużenia tych promieni przecinają się. Oznacza to, że soczewka rozpraszająca ma ognisko pozorne.

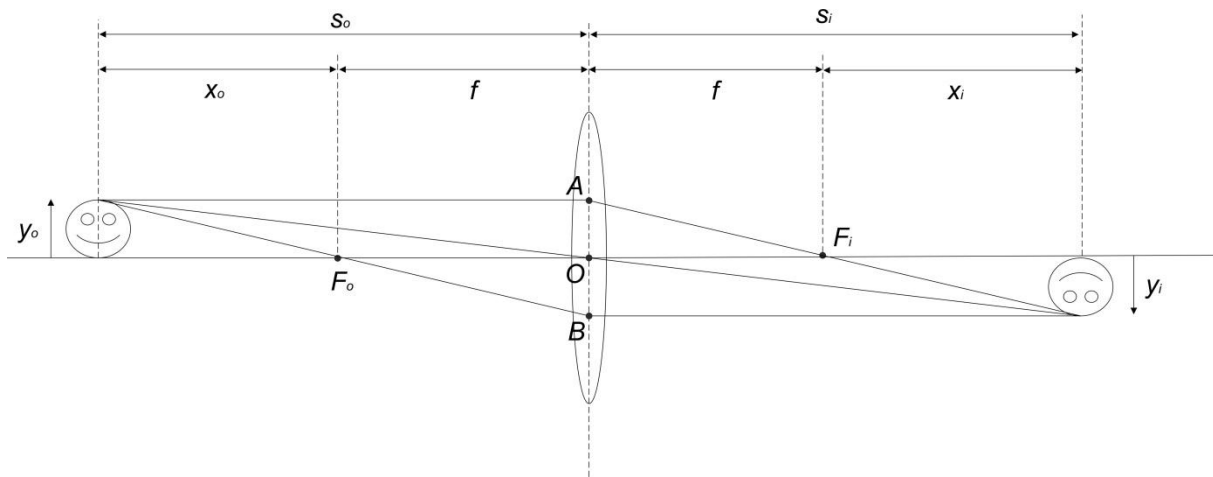


Rysunek 6

Powyższe soczewki spełniają 3 warunki Maxwella dla promieni przyosiowych (tzn. takich, które tworzą małe kąty z osią optyczną). Warunki te charakteryzują układy obrazujące, które są układami doskonałymi w sensie optyki geometrycznej.

Warunki te brzmią następująco:

1. Wszystkie promienie wychodzące z dowolnego punktu obiektu wejściowego zostają tak przetransformowane przez układ, że przecinają się (w sposób rzeczywisty lub pozorny) w jednym punkcie.
2. Jeżeli obiekt wejściowy leży w płaszczyźnie prostopadłej do osi optycznej układu, wówczas obraz powstaje również w płaszczyźnie prostopadłej do osi optycznej.
3. Obiekt wejściowy, spełniający warunek punktu 2 jest geometrycznie podobny do swojego obrazu co oznacza, że powiększenie jest stałe dla ustalonej pary płaszczyzn obiektowej i obrazowej.



Rysunek 7

Rys. 7 przedstawia zasady konstruowania obrazu w przypadku soczewki cienkiej, tzn. takiej, której grubość można pominąć. Zgodnie z powyższymi zasadami promienie spełniają następujące warunki:

- Promień padający równoległe do osi optycznej przecina za soczewką ognisko  $F_i$ .
- Promień padający, przechodzący przez punkt  $O$  nie zmienia swojego kierunku za soczewką.
- Promień padający, przechodzący przez ognisko  $F_o$ , jest za soczewką równoległy do osi optycznej.

Zgodnie z oznaczeniami na Rys. 7 otrzymujemy z elementarnych rozważań geometrycznych równanie soczewkowe:

$$\frac{1}{s_o} + \frac{1}{s_i} = \frac{1}{f} \quad (2)$$

Poprzeczne powiększenie obrazu  $M$  spełnia warunek

$$M = \frac{y_i}{y_o} = \frac{s_i}{s_o} \quad (3)$$

W zależności od relacji między odległością obiektową  $s_o$  i ogniskową soczewki  $f$  mamy różne przypadki obrazów: obrazy powiększone, pomniejszone, proste, odwrócone, rzeczywiste i pozorne. Zagadnienia te są powszechnie znane i były omawiane w szkole średniej, dlatego je pominiemy.

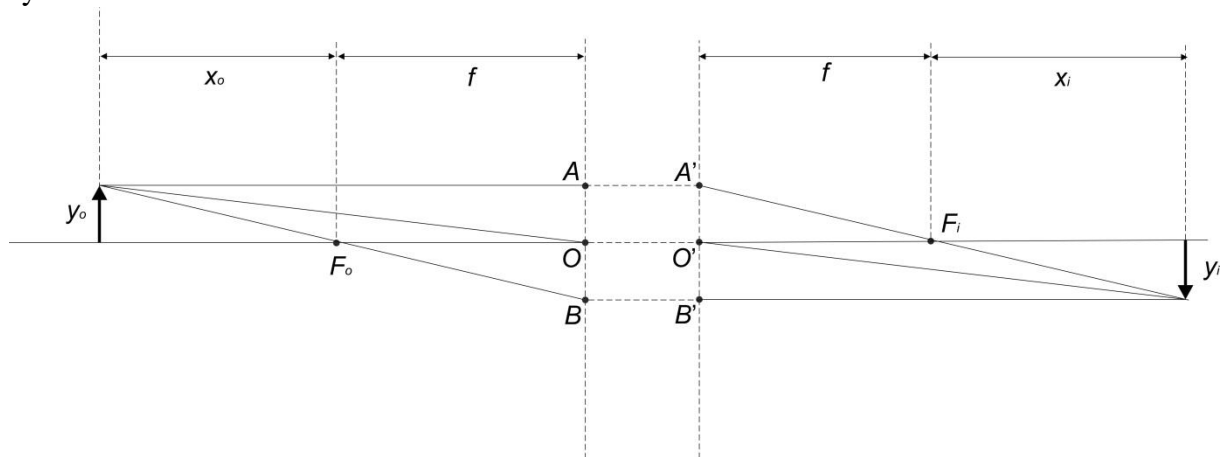
W przypadku, gdy odległości obiektowa  $s_o$  i obrazowa  $s_i$  są liczone nie od środka soczewki ale od ognisk, wówczas wzór (2) można przepisać w postaci równania soczewkowego Newtona

$$x_o \cdot x_i = f^2 \quad (4)$$

### Plaszczyzny główne

Równania (2), (3), (4) obowiązują dla dowolnych układów obrazujących spełniających przytoczone 3 warunki Maxwella. W ogólności jednak odległości  $s_o$  i  $s_i$  są mierzone od dwóch płaszczyzn prostopadłych do osi optycznej, charakteryzujących dany układ optyczny.

Płaszczyzny te nazywają się płaszczyznami głównymi. Na Rys. 8 oznaczono je odpowiednio symbolami  $AOB$  i  $A'O'B'$ .



Rysunek 8

Płaszczyzny główne można traktować jako płaszczyznę obiektową i obrazową o jednostkowym powiększeniu. Oznacza to, że promień padający, przecinający pierwszą płaszczyznę główną w punkcie  $A$  (a także  $B$  i  $O$ ) pojawia się na drugiej płaszczyźnie głównej w punkcie sprzężonym  $A'$  (lub odpowiednio  $B'$  i  $O'$ ), przy czym wektor  $\overline{AA'}$  (lub odpowiednio  $\overline{BB'}$  i  $\overline{OO'}$ ) jest równoległy do osi optycznej. Punkty  $O$  i  $O'$ , w których płaszczyzny przecinają oś optyczną, nazywają się punktami głównymi.

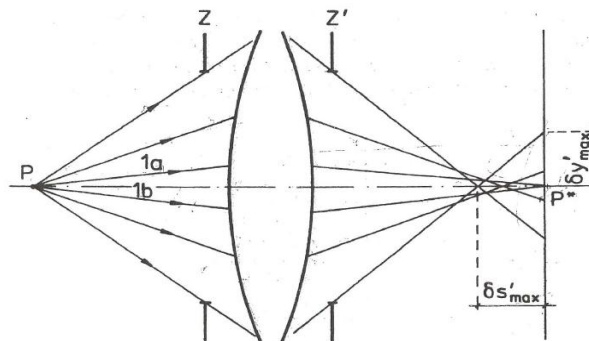
Podane wcześniej zasady (a), (c) konstruowania obrazu dla soczewki cienkiej obowiązują nadal. Soczewka cienka jest specjalnym przypadkiem układu obrazującego, gdzie można przyjąć, że płaszczyzny główne pokrywają się ze sobą.

## Aberracje

Aberracja optyczna to wada układu optycznego (pojedynczej soczewki lub obiektywu) polegająca na zniekształceniu uzyskanego obrazu, pogorszeniu ostrości lub niepożądanych zmianach chromatycznych. Wspomniane zjawisko *aberracji* łatwiej jest korygować w przypadku zbioru elementów optycznych, niż dla jednej soczewki. Należy dodać, że rzeczywiste soczewki nie spełniają przybliżenia soczewki cienkiej, stąd każda z nich posiada aberracje.

Aberracje możemy podzielić na dwie grupy: *aberracje monochromatyczne* oraz *aberracje niemonochromatyczne*. Pierwsze dotyczą układów, przez które przechodzi światło o dobrze określonej długości fali, drugie – układów, przez które przechodzi światło będące mieszaniną różnych barw. Do aberracji monochromatycznych zaliczamy: aberrację sferyczną, komę, astygmatyzm, krzywiznę pola oraz dystorsję. Do aberracji niemonochromatycznych natomiast – chromatyzm powiększenia i chromatyzm położenia. W niniejszym ćwiczeniu zajmiemy się jedynie niektórymi z wymienionych wyżej aberracji.

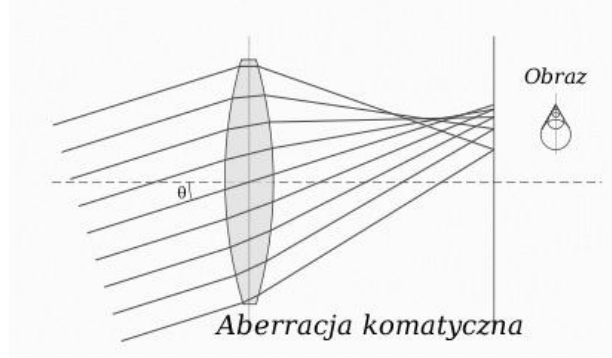
*Aberracja sferyczna* polega na mocniejszym załamaniu promieni padających dalej od osi optycznej (Rys. 9).



Rysunek 9

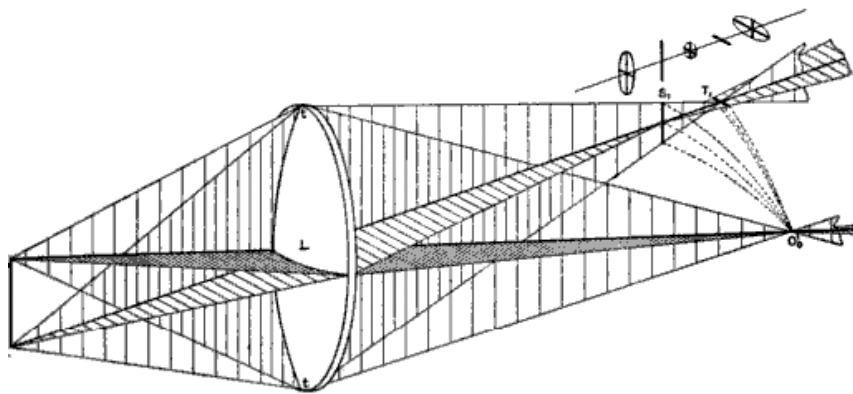
Poprzez odpowiedni dobór promieni krzywizny powierzchni względem współczynnika załamania ośrodka soczewki możliwe jest zminimalizowanie aberracji sferycznej. Możliwe jest też zaprojektowanie i wykonanie soczewki o powierzchni innej niż sferyczna. Jest to jednak bardzo trudne technologicznie i generuje wysokie koszty produkcji. Warto dodać, że idealna soczewka cienka nie wykazuje aberracji sferycznej.

Aberracja zwana *komą* występuje tylko dla punktów obrazu leżących poza osią optyczną. Oznacza to, że jedynie fala płaska propagująca się wzdłuż osi optycznej zostanie skupiona w symetryczną osiowo plamkę ogniskową. Fale propagujące się pod pewnym kątem względem osi optycznej zostaną skupione w plamkę aberracyjną przypominającą kometę, bądź przecinek (ang. *coma* – stąd nazwa aberracji). Pokazuje to Rys. 10 (płaszczyzna obrazowa).



Rysunek 10

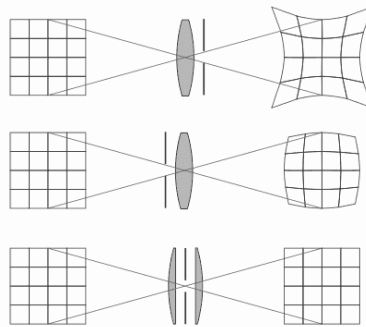
*Astygmatyzm* występuje dla przedmiotów położonych poza osią optyczną. Ten rodzaj aberracji polega na tym, że promienie padające w dwóch prostopadłych płaszczyznach ogniskowane są w różnych punktach. Pojawiają się dwa ogniska (południkowe i wzdłużne) mające postać prostopadłych prostych (Rys. 11).



Rysunek 11

*Krzywizna pola* polega na tym, że punkty ogniskowe nie leżą na płaszczyźnie, tylko na sferze. Aby przeprowadzać pomiary uwzględniające krzywiznę pola, konstruuje się detektory o powierzchni sferycznej, zamiast płaskiej.

*Dystorsja* jest aberracją, która nie wpływa na utratę ostrości obrazu, a tylko na jego zniekształcenie. Ten rodzaj aberracji polega na zmianie powiększenia fragmentu obrazu w zależności od jego położenia względem osi optycznej układu. Można wyróżnić dystorsję poduszkowatą i beczkowatą, co pokazuje Rys. 12. Dystorsję redukuje się za pomocą odpowiedniej (symetrycznej) konstrukcji obiektywów – płaszczyzną symetrii powinna być przysłona. Dystorsję można także korygować w procesie obróbki numerycznej uzyskanego obrazu.



Rysunek 12

Przejdźmy teraz do opisu aberracji chromatycznych, wynikających z dyspersji (zależności współczynnika załamania od długości fali). Wśród aberracji chromatycznych wyróżniamy chromatyzm położenia oraz chromatyzm powiększenia.

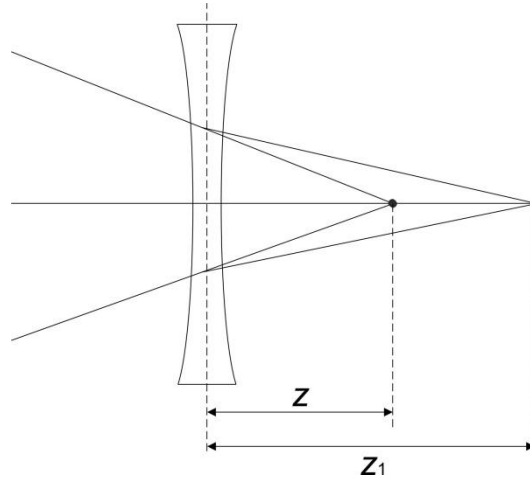
Chromatyzm położenia polega na różnych odległościach ogniskowych dla różnych długości fali. Ponieważ położenie ogniska jest inne dla każdej barwy, powiększenie dla każdej barwy także jest inne.

Redukcja chromatyzmu przeprowadzana jest zwykle dla dwóch wybranych (granicznych) długości fali, za pomocą tzw. *dubletów achromatycznych*, składających się z soczewki skupiającej i rozpraszającej. W praktyce, obiektywy fotograficzne o bardzo wysokiej jakości (a także cenie), mają korygowaną aberrację chromatyczną na więcej niż 2 długości fali. Stosuje się też specjalne szkło o bardzo niskiej dyspersji.



## Przebieg ćwiczenia

1. Wyznaczenie ogniskowych soczewek cienkich
  - a) w przypadku soczewek skupiających wystarczy zobrazować obiekt wejściowy i skorzystać ze wzoru soczewkowego (2) lub oświetlić soczewkę falą płaską i znaleźć położenie ogniska,
  - b) dla soczewki rozpraszającej wygodnie jest oświetlić ją falą sferycznie zbieżną, zbiegającą się w odległości  $Z$  za płaszczyznę soczewki jak to pokazano na Rys. 13.



Rysunek 13

Przy odpowiednio małej odległości  $Z$  fala sferyczna zostanie skupiona odpowiednio dalej w odległości  $Z_1$ , ze względu na rozpraszające działanie soczewki. Szukaną ogniskową  $f$  znajdujemy ze wzoru (2) przyjmując  $s_o = -Z$  (obiekt jest pozorny, gdyż fala padająca jest zbieżna, a nie rozbieżna) oraz  $s_i = Z_1$ .

2. Wyznaczenie płaszczyzn głównych obiektywów lub układu soczewek.  
Ogniska  $F_o$  i  $F_i$  układu znajdujemy doświadczalnie oświetlając go z dwóch stron falą płaską. Następnie obrazujemy dowolny obiekt i wyznaczamy odległości  $x_o$  i  $x_i$  zgodnie z oznaczeniami na Rys. 5. Dalej obliczamy ze wzoru (4) ogniskową  $f$  i mając położenia ognisk  $F_o$  i  $F_i$  wyznaczamy położenie płaszczyzn głównych.
3. Badanie chromatyzmu oraz komy.  
Oświetlamy „grubą” soczewkę falą płaską, wstawiamy ekran w płaszczyźnie ogniskowej, a następnie przekręcamy soczewkę wraz z ekranem o kilkanaście stopni. Na ekranie zaobserwujemy komę. Należy powtórzyć czynności dla obiektywu i porównać wyniki.

Aberracje chromatyczne dla soczewki oraz obiektywu porównujemy obrazując za ich pomocą wybrany obiekt w świetle białym.