

## POMIAR ODLEGŁOŚCI OGNISKOWYCH SOCZEWEK CIENKICH

**Cel ćwiczenia:** zapoznanie się z procesem wytwarzania obrazów przez soczewki cienkie oraz z metodami wyznaczania odległości ogniskowych soczewek cienkich.

**Zagadnienia:** soczewki cienkie, ogniskowe, zdolność skupiająca, odwzorowanie optyczne, powiększenie poprzeczne.

### 77.1. Wprowadzenie

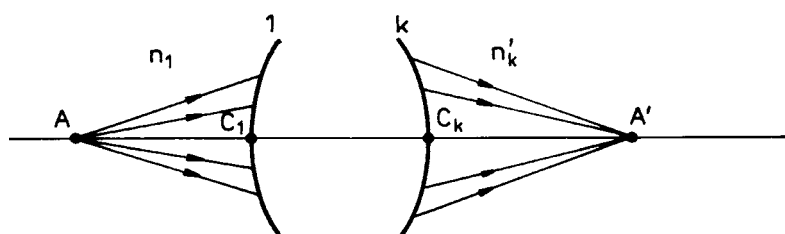
Wiązka promieni, posiadających jeden wspólny punkt przecięcia, nazywa się wiązką homocentryczną. Może ona być wiązką rozbieżną lub zbieżną. Zadaniem układu optycznego jest przekształcenie każdej wiązki homocentrycznej w wiązkę inną, również homocentryczną. Będziemy rozpatrywali tylko układy składające się z powierzchni sferycznych. Oś optyczną takiego układu będzie prosta, na której znajdują się środki krzywizn tych powierzchni.

Każdy przedmiot będziemy traktowali jako zbiór punktów wysyłających promieniowanie. Obrazem takiego przedmiotu będzie również zbiór punktów, do których schodzą się homocentryczne wiązki promieni.

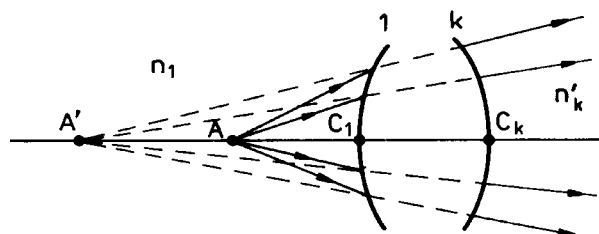
Zbiór punktów przestrzeni, w której znajdują się przedmioty nazywamy przestrzenią przedmiotową, a zbiór obrazów punktów przestrzeni przedmiotowej tworzy przestrzeń obrazową.

Rozróżniamy przedmioty rzeczywiste i urojone oraz obrazy rzeczywiste i urojone. Z przedmiotu rzeczywistego z każdego jego punktu wysyłana jest

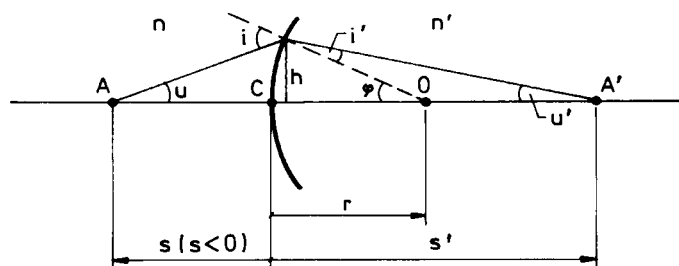
wiązka rozbieżna promieni. Takie rozbieżne homocentryczne wiązki promieni będą padały na rozpatrywany element optyczny. W przypadku przedmiotu urojonego na element optyczny będzie padała zbieżna wiązka promieni. Punkt przecięcia się przedłużeń tych promieni daje urojony przedmiot. Obraz będzie rzeczywisty, jeśli promienie po przejściu przez np. soczewkę rzeczywiście się przecinają. Jeśli po przejściu przez element optyczny promienie tworzą wiązkę rozbieżną, tzn. przecinają się w rzeczywistości ich wsteczne przedłużenia (rys. 77.2), to wtedy mamy obraz urojony. Punkt  $C$ , w którym oś optyczna przecina powierzchnię łamiącą nazywamy wierzchołkiem tej powierzchni (rys. 77.1). Symbole odnoszące się do przestrzeni obrazowej będziemy oznaczali indeksem „prim”. Kolejne powierzchnie łamiące będą numerowane liczbami (np. 1,2,3,... $k$ ).



Rys.77.1. Przedmiot punktowy  $A$  i jego rzeczywisty obraz  $A'$



Rys. 77.2. Obraz urojony  $A'$  punktu  $A$



Rys. 77.3. Reguła znaków dla odcinków i kątów  $s, u, i, i' < 0$

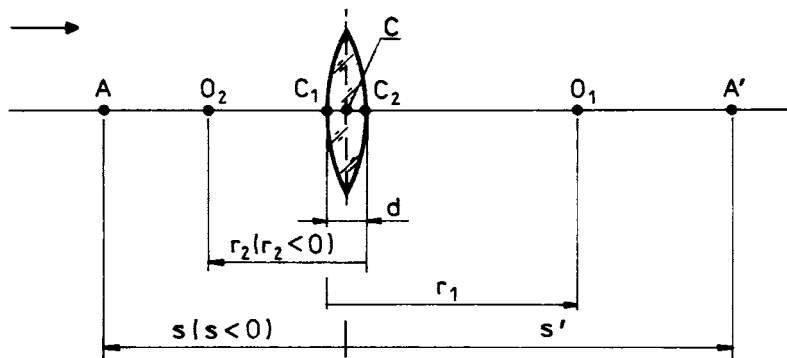
Obowiązywać będzie następująca konwencja znaków: Wszystkie odległości mierzymy od środka powierzchni załamującej (punkt  $C$ , rys. 77.3). Środek powierzchni możemy jak gdyby umownie uważać za początek układu współrzędnych. Wszystkie odcinki mierzone od punktu  $C$  zgodnie z kierunkiem promieni świetlnych bierzemy ze znakiem dodatnim (rys. 77.3). Odcinki mierzone od punktu  $C$  w przeciwną stronę do biegu promieni świetlnych bierzemy ze znakiem ujemnym. Odcinki prostopadłe do osi optycznej skierowane ku górze są dodatnie, ku dołowi ujemne. Kąty są mierzone od osi optycznej lub od prostopadłej do powierzchni załamującej (rys. 77.3) do promienia światła. Jeśli ten kąt ma kierunek zgodny z ruchem wskazówek zegara bierzemy go ze znakiem dodatnim, gdy kąt ten ma kierunek przeciwny do ruchu wskazówek zegara, uważamy go za ujemny (rys. 77.3). Promień krzywizny powierzchni łamiącej jest dodatni, gdy promienie świetlne padają na stronę wypukłą.

### 77.1.1. Soczewki cienkie

Soczewką nazywamy bryłę z materiału przezroczystego ograniczoną z dwóch stron powierzchniami sferycznymi (jedna z nich może być płaska). Środkami krzywizny  $O_1, O_2$  soczewki nazywamy środki kul, których

częściami są powierzchnie łamiące soczewki, a promieniami krzywizn  $r_1$ ,  $r_2$  soczewki – promienie tych kul (rys. 77.4).

Oś optyczną nazywamy prostą przechodzącą przez środki krzywizn obu powierzchni soczewki. Odległość między wierzchołkami powierzchni kul jest jej grubością  $d$  (rys. 77.4).



Rys. 77.4. Soczewka skupiająca

Soczewkę nazywamy cienką, jeśli grubość soczewki  $d$  można zaniedbać w porównaniu z promieniami krzywizn powierzchni ograniczających soczewkę. Dla soczewek cienkich można przyjąć, że punkty  $C_1$  i  $C_2$  pokrywają się ze środkiem geometrycznym soczewki  $C$ , od którego należy liczyć odległości (rys. 77.4). Punkt  $C$  nazywa się środkiem optycznym soczewki.

Wzór wiążący odległości przedmiotu  $s$  oraz obrazu  $s'$  od soczewki cienkiej ma postać

$$\frac{1}{s'} - \frac{1}{s} = \left( \frac{n}{n'} - 1 \right) \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \quad (77.1)$$

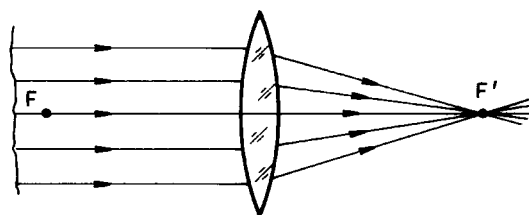
gdzie:  $r_1$ ,  $r_2$  – promienie krzywizny pierwszej i drugiej powierzchni łamiącej soczewki,  $n$  – współczynnik załamania materiału soczewki,  $n'$  – współczynnik załamania ośrodka, w którym znajduje się soczewka.

Ze wzoru (77.1) wynika, że jeśli  $s = \infty$ , to  $s' = f'$  jest odległością ogniskową obrazową soczewki

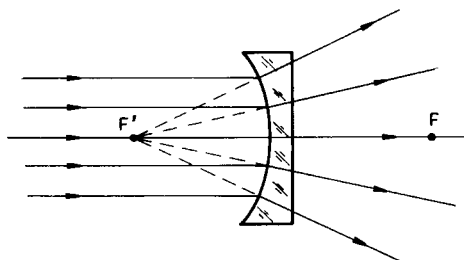
$$\frac{1}{f'} = \left( \frac{n}{n'} - 1 \right) \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right). \quad (77.2)$$

Jeśli natomiast  $s' = \infty$ , to  $s = f$  jest odległością ogniskową przedmiotową soczewki

$$\frac{1}{f} = - \left( \frac{n}{n'} - 1 \right) \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right). \quad (77.3)$$



Rys. 77.5. Przejście wiązki równoległej przez soczewkę skupiającą:  $F, F'$  - ogniska przedmiotowe i obrazowe soczewki



Rys. 77.6. Przejście wiązki równoległej przez soczewkę rozpraszającą:  $F, F'$  – ogniska przedmiotowe i obrazowe soczewki

Ogniskiem obrazowym  $F'$  soczewki nazywamy punkt, w którym skupiają się promienie przyosiowe równoległe do osi optycznej soczewki po przejściu przez nią lub wsteczne przedłużenia tych promieni (rys. 77.5 i rys. 77.6).

Podobnie ogniskiem przedmiotowym  $F$  soczewki jest punkt, którego obraz znajduje się w nieskończoności. Jak wynika ze wzorów 77.2 i 77.3

$$f' = -f$$

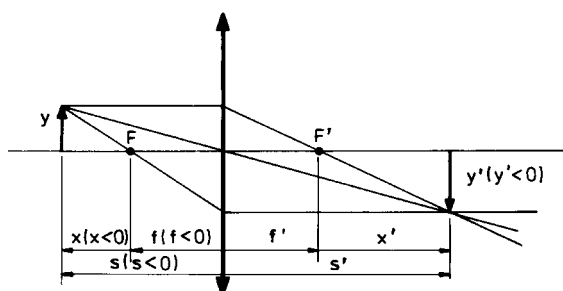
jeśli po obu stronach soczewki znajduje się ten sam ośrodek  $n'$ . Wprowadzając pojęcie odległości ogniskowej obrazowej soczewki  $f'$  do wzoru (77.1) otrzymujemy równanie soczewek cienkich w postaci

$$\frac{1}{s'} - \frac{1}{s} = \frac{1}{f'} . \quad (77.4)$$

Istnieje również inna postać równania soczewki cienkiej, znana pod nazwą wzoru Newtona. We wzorze Newtona odległości przedmiotu mierzone są od ogniska przedmiotowego ( $x$ ); natomiast obrazu – od ogniska obrazowego ( $x'$ ) (rys. 77.7). Wzór Newtona ma następującą postać

$$xx' = ff' = -f'^2 = -f^2 . \quad (77.5)$$

Soczewki zgodnie z ich działaniem dzielimy na dwie grupy: skupiające lub dodatnie oraz rozpraszające lub ujemne.

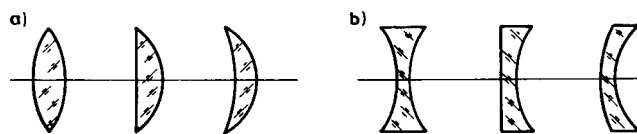


Rys. 77.7. Ilustracja do powiększenia soczewki oraz wzoru Newtona

Soczewkę nazywamy skupiającą, jeśli jej ogniskowe  $F'$  i  $F$  są rzeczywiste, tzn. jeśli wiązki promieni równoległych do osi optycznej po załamaniu w soczewce zostają w nich skupione. Dla soczewek skupiających  $f' > 0$ .

Soczewkę nazywamy rozpraszającą, jeśli jej ogniska  $F'$  i  $F$  są urojone (pozorne), tzn. jeśli promienie równoległe do osi optycznej po załamaniu w soczewce stają się rozbieżne, a przecinają się tylko ich wsteczne przedłużenia. Dla soczewek rozpraszających  $f' < 0$ .

Analizując wzór soczewkowy (77.2) widzimy, że soczewki wykonane z materiału o współczynniku załamania większym niż współczynnik załamania otaczającego soczewkę ośrodka ( $n > n'$ ) są skupiające, gdy są grubsze w środku niż na brzegu (rys 77.8a). Należą do nich soczewki dwuwypukłe, płasko-wypukłe oraz wklęsło-wypukłe.



Rys. 77.8. Typy soczewek

Do soczewek rozpraszających należą dwuwklęsłe, płasko-wklęsłe oraz wypukło-wklęsłe, tzn. soczewki cieńsze w środku niż na brzegu (rys. 77.8b).

Zdolnością skupiającą soczewki ( $Z$ ) nazywamy odwrotność odległości ogniskowej obrazowej  $f'$

$$Z = \frac{1}{f'}. \quad (77.6)$$

Jeśli  $f'$  jest wyrażona w metrach, to  $Z$  otrzymujemy w dioptriach (D).

### 71.1.2. Konstrukcja obrazów tworzonych przez soczewki cienkie, powiększenie soczewki

Pośród wszystkich promieni wychodzących z każdego punktu przedmiotu istnieją trzy promienie charakterystyczne, których bieg przez soczewkę jest łatwy do prześledzenia.

1. Promień przechodzący przez środek optyczny soczewki nie zmieniają swojego kierunku.
2. Promień równoległy do osi optycznej soczewki skupiającej po przejściu przez tę soczewkę przechodzi przez jej ognisko.
3. Promień, lub ich przedłużenia, przechodzące przez ognisko przedmiotowe po przejściu przez soczewkę stają się równoległe do osi optycznej.

Podczas wykreślania obrazów dawanych przez soczewkę wystarczy wziąć dwa spośród tych trzech promieni charakterystycznych, wychodzące z jednego punktu przedmiotu. Punkt przecięcia się tych dwóch wybranych promieni po przejściu przez soczewkę (lub przedłużenia tych promieni) wyznacza obraz (rys. 77.7).

Miarą powiększenia poprzecznego  $\beta$  danego przez soczewkę jest stosunek wielkości obrazu  $y'$  do wielkości przedmiotu  $y$  (rys. 77.7) czyli

$$\beta = \frac{y'}{y} = \frac{s'}{s} . \quad (77.7)$$

Znak (+) lub (–) ilorazu oznacza, że obraz jest prosty lub odwrócony w stosunku do przedmiotu.

Obrazy przedmiotów, dawane przez soczewkę, zależą od odległości przedmiotu od soczewki. W celu przeprowadzenia dyskusji wzorów (77.4) i (77.7) napiszemy je w postaci

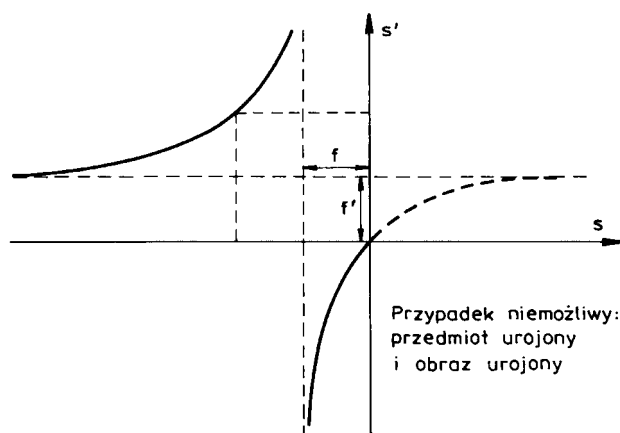
$$s' = \frac{f'}{1 + \frac{f'}{s}} , \quad (77.8)$$



$$\beta = \frac{1}{1 + \frac{s}{f'}} \quad (77.9)$$

Przedstawimy graficznie zależność  $s'$  od  $s$  dla soczewek skupiających ( $f' > 0$ ) (rys. 77.9) oraz dla soczewek rozpraszających ( $f' < 0$ ) (rys. 77.10).

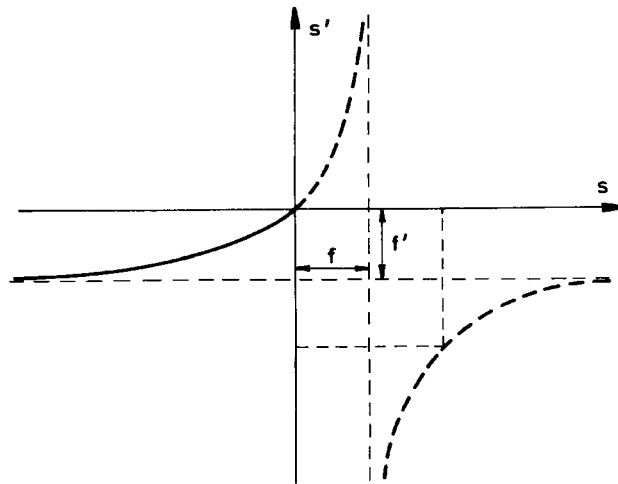
Jak wynika z rys. 77.9, dla przedmiotów rzeczywistych ( $s < 0$ ), obrazy dawane przez soczewkę skupiającą mogą być zarówno rzeczywiste ( $s < f$ ) jak i urojone ( $f < s < 0$ ). Natomiast dla przedmiotów urojonych ( $s > 0$ ) obrazy dawane przez soczewkę skupiającą będą zawsze rzeczywiste i pomniejszone.



Rys. 77.9. Zależność odległości obrazu  $s'$  od odległości przedmiotu  $s$  dla soczewek skupiających:  $f$  – ogniskowa przedmiotowa,  $f'$  – ogniskowa obrazowa; linia ciągła – dla przedmiotów rzeczywistych, linia przerywana – dla przedmiotów urojonych

Dla soczewek rozpraszających ( $f' < 0$ ) obrazy przedmiotów rzeczywistych ( $s < 0$ ) (rys. 77.10) są zawsze urojone i pomniejszone. Dla przedmiotów natomiast urojonych ( $s > 0$ ) obrazy dawane przez soczewkę rozpraszającą mogą być zarówno rzeczywiste ( $0 < s < f$ ) jak i urojone ( $f < s$ ) w zależności od położenia przedmiotu urojonego w stosunku do ogniska przedmiotowego.

Rozważania i otrzymane wzory soczewkowe są przybliżone i słuszne tylko dla promieni przyosiowych i nachylonych do osi pod małymi kątami, tzn. takich, dla których można przyjąć  $\sin \alpha \cong \operatorname{tg} \alpha \cong \alpha$ . Promienie te dają po przejściu przez soczewkę cienką punktowe obrazy punktów świecących.



Rys. 77.10. Zależność odległości obrazu  $s'$  od odległości przedmiotu  $s$  dla soczewek rozpraszających:  $f$  – ogniskowa przedmiotowa,  $f'$  – ogniskowa obrazowa; linia ciągła – dla przedmiotów rzeczywistych, linia przerywana – dla przedmiotów urojonych

## **77.2. Zasady pomiaru**

### **77.2.1. Orientacyjne oszacowanie odległości ogniskowych soczewek skupiających**

Wytworzyć ostry obraz odległego przedmiotu (np. wysoko zawieszonej żarówki) i zmierzyć odległość otrzymanego obrazu od soczewki. Odległość ta będzie w przybliżeniu ogniskową obrazową soczewki.

### **77.2.2. Wyznaczanie odległości ogniskowej soczewki skupiającej metodą wzoru soczewkowego**

Dla wielu różnych odległości przedmiotu od soczewki  $s$  zmierzyć odpowiednie odległości wytworzonych obrazów od soczewki  $s'$  i obliczyć ogniskową obrazową soczewki na podstawie wzoru soczewkowego (77.4).

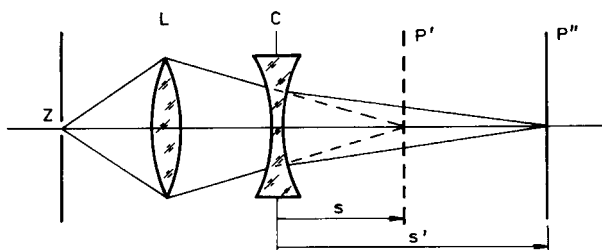
Badaną soczewkę, oświetlony przedmiot oraz ekran ustawiamy na ławie optycznej, która jest zaopatrzona w skalę milimetrową.

### **77.2.3. Wyznaczanie odległości ogniskowej soczewki rozpraszającej metodą pozornego przedmiotu**

Jak wynika z rys. 77.10 soczewki rozpraszające nie dają rzeczywistych obrazów dla przedmiotów rzeczywistych ( $s < 0$ ) natomiast, dają obrazy rzeczywiste ( $s' > 0$ ) dla przedmiotów urojonych umieszczonych między soczewką rozpraszającą a jej ogniskiem przedmiotowym ( $0 < s < f$ ).

Przedmiot pozorny dla soczewki rozpraszającej uzyskujemy umieszczając, między przedmiotem rzeczywistym  $Z$  i soczewką rozpraszającą, soczewkę skupiającą  $L$  (rys. 77.11) w ten sposób, aby na soczewkę rozpraszającą padała zbieżna wiązka promieni świetlnych. Przedmiotem pozornym dla soczewki rozpraszającej będzie obraz  $P'$  przedmiotu  $Z$  dawany przez soczewkę skupiającą  $L$ . Soczewka rozpraszająca wytworzy obraz rzeczywisty  $P''$  tego

przedmiotu pozornego  $P'$ . Mierząc odległości  $s$  i  $s'$  i wykorzystując wzór soczewkowy (77.4) obliczamy ogniskową obrazową soczewki rozpraszającej.

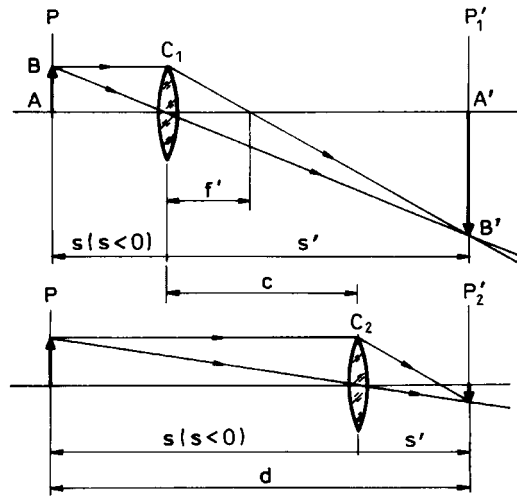


Rys. 77.11. Wyznaczanie odległości ogniskowej soczewki rozpraszającej C: Z – źródło światła,  $P'$  – obraz dawany przez soczewkę skupiającą L,  $P''$  – obraz przedmiotu pozornego  $P'$  tworzony przez soczewkę rozpraszającą C

### 77.2.3. Wyznaczanie odległości ogniskowej soczewek skupiających metodą Bessela

Jak wynika ze wzoru soczewkowego (77.4) wielkości  $s$  i  $s'$  wchodzą do wzoru symetrycznie. Zatem dla tej samej odległości przedmiotu i ekranu można znaleźć dwa położenia soczewki, dla których otrzymujemy na ekranie ostry obraz – raz pomniejszony, drugi raz powiększony. Oba położenia soczewki są symetryczne względem przedmiotu i ekranu (rys. 77.12). Jeśli odległość przedmiotu od ekranu oznaczmy przez  $d$ , zaś odległość między obu położeniami soczewek przez  $c$ , to jak wynika z rys. 77.12

$$d = -s + s', \quad c = |-s - s'|, \quad \text{lub} \quad c = |s' + s|.$$



Rys. 77.12. Wyznaczanie odległości ogniskowej soczewki skupiającej metodą Bessela:  $AB$  – przedmiot,  $A'B'$  – obraz,  $f'$  – ogniskowa obrazowa soczewki,  $C_1$  i  $C_2$  – pierwsze i drugie położenie soczewki,  $c$  – odległość między tymi położeniami,  $d$  – odległość między przedmiotem a ekranem

Po podstawieniu wartości  $s$  i  $s'$  do wzoru soczewkowego (77.4) otrzymujemy

$$f' = \frac{1}{4} \left( d - \frac{c^2}{d} \right). \quad (77.10)$$

Ponieważ  $c^2 = d^2 - 4df' = d(d - 4f') \geq 0$  metoda Bessela daje się zastosować tylko wtedy, gdy  $d > 4f'$ .

Metoda Bessela jest jedną z najdokładniejszych metod. Wyższość tej metody polega na tym, że odległości  $d$  i  $c$  są tylko pośrednio związane z odległościami  $s$  i  $s'$ . W przypadku menisków lub soczewek grubych, odległości  $s$  i  $s'$  należałoby mierzyć od tzw. płaszczyzn głównych soczewek, których położenia wyznaczyć tutaj nie potrafimy. W metodzie Bessela trudność tę omijamy, gdyż przez pomiar  $c$ , jako różnicy dwóch położen soczewki, błędy wynikłe z rozrzucenia płaszczyzn głównych są małe.

Metodę Bessela można również zastosować do wyznaczenia odległości ogniskowej soczewek rozpraszających. W tym celu badaną soczewkę należy złożyć razem z soczewką skupiającą o znanej ogniskowej obrazowej  $f'_1$  tak dobranej, aby otrzymany układ soczewek był skupiający (dodatni), a jego ogniskowa  $4f'_{1,2} < d$ .

Odległość ogniskową  $f'_2$  soczewki rozpraszającej wyznaczamy korzystając z zależności dla układu dwu soczewek złożonych razem

$$\frac{1}{f'_{1,2}} = \frac{1}{f'_1} + \frac{1}{f'_2},$$

gdzie  $f'_1$  – odległość ogniskowa obrazowa soczewki skupiającej,  $f'_2$  – odległość ogniskowa obrazowa soczewki rozpraszającej,  $f'_{1,2}$  – odległość ogniskowa obrazowa układu soczewek. Ogniskową  $f'_{1,2}$  wyznaczamy metodą Bessela, wkładając dwie soczewki do wspólnej oprawy.

#### **77.2.5. Wyznaczanie odległości ogniskowych soczewek za pomocą okularu mikrometrycznego i kolimatora**

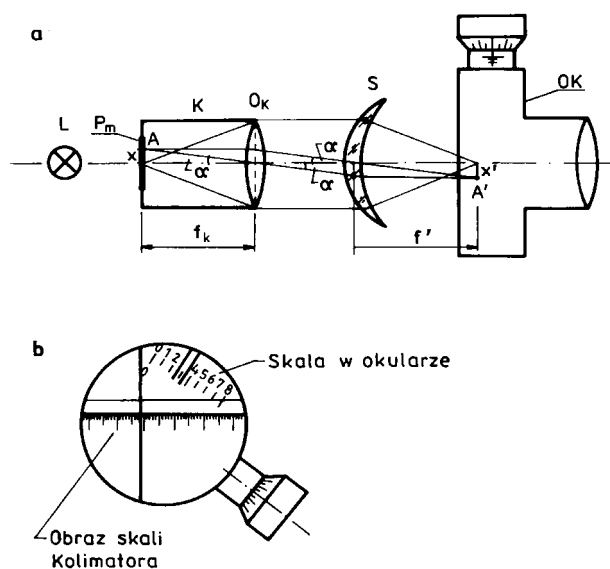
Kolimator składa się z obiektywu  $O_k$  o ogniskowej  $f_k$ , w którego płaszczyźnie ogniskowej umieszcza się płytkę  $P_m$  (zwaną płytką ogniskową) z naciętą na niej podziałką. Za kolimatorem umieszczamy na ławie optycznej badaną soczewkę skupiającą  $S$  (lub skupiający układ soczewek), której odległość ogniskową należy wyznaczyć (rys. 77.13a). Promienie wychodzące z dowolnego punktu  $A$  podziałki płytki ogniskowej kolimatora, odległego od osi optycznej układu o  $x$  (rys. 77.13a) są po wyjściu z obiektywu kolimatora wzajemnie równoległe i tworzą w płaszczyźnie ogniskowej badanej soczewki obraz  $A'$  tego punktu w odległości  $x'$  od osi. Jak widać na rysunku, z podobieństwa odpowiednich trójkątów wynika oczywista zależność

$$\frac{x}{f_k} = \frac{x'}{f'_s}.$$

Skąd

$$f'_s = \frac{x'}{\operatorname{tg} \alpha}, \quad (77.11)$$

przy czym  $\alpha$  jest kątem, jaki tworzy promień wychodzący z punktu  $A$  na skali kolimatora z osią optyczną układu. Ogólniej, ze znikomo małym błędem można przyjąć  $x$  za odległość dwóch dowolnych punktów skali kolimatora, a  $x'$  – za odległość ich obrazów. W celu zwiększenia dokładności pomiaru  $f'_s$  należy mierzyć odległość  $x$  między odległymi od siebie kreskami. Jeżeli mierzona odległość między kreskami wynosi  $k$  numerowanych działek skali, a odległość kątowna między kolejnymi numerowanymi kreskami skali wynosi  $\alpha_0$ , to  $\alpha = k\alpha_0$ . Wartość  $\alpha_0$  podana jest w instrukcji roboczej ćwiczenia.



Rys. 77.13. Zasada pomiaru odległości ogniskowej soczewki metodą kolimatora i okularu mikrometrycznego: a – schemat biegu promieni:  $L$  – oświetlacz,  $P_m$  – płytka ogniskowa z podziałką,  $K$  – kolimator,  $O_k$  – obiektyw kolimatora,  $f_k$  – ogniskowa przedmiotowa obiektywu kolimatora,  $S$  – badana soczewka,  $Ok$  – okular mikrometryczny; b – obraz w polu widzenia okularu

Ramiona krzyża okularu mikrometrycznego są ustawione pod kątem  $45^\circ$  do kierunku ich przesuwu (rys. 77.13b), zatem odległość  $x'$  między wybranymi kreskami obrazu skali kolimatora wyznaczamy dzieląc przesuw śruby  $d$  przez  $\sqrt{2}$ . Wartość działki elementarnej bębna śruby okularu mikrometrycznego wynosi 0,01 mm. Liczbę pełnych obrotów śruby można wyznaczyć obserwując w polu widzenia okularu mikrometrycznego przesuw dwóch równoległych kreszek. Odległość między numerowanymi kreskami tej skali odpowiada jednemu obrotowi śruby.

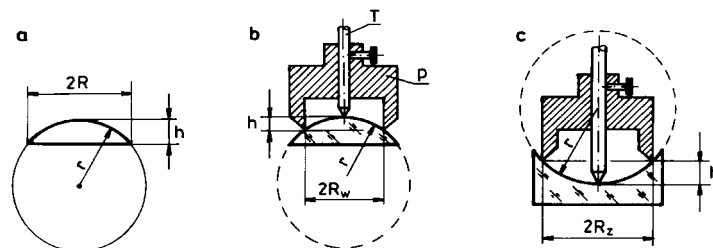
#### 77.2.6. Wyznaczanie odległości ogniskowych przez pomiar promieni krzywizn soczewek

Do pomiaru promieni krzywizny służy przyrząd zwany sferometrem. Sferometrem mierzymy strzałkę  $h$  czaszy kulistej o znanej średnicy podstawy  $2R$  (rys. 77.14)

$$R^2 = h(2r - h) \quad .$$

Skąd

$$r = \frac{R^2 + h^2}{2h} \quad . \quad (77.12)$$



Rys. 77.14. Wyznaczanie promienia krzywizny za pomocą sferometru pierścieniowego:  $h$  – strzałka czaszy,  $2R$  – średnica czaszy,  $r$  – promień krzywizny,  $T$  – trzpień czujnika,  $P$  – pierścień,  $2R_w$  i  $2R_z$  – średnice pierścieni sferometru (równe średnicy czaszy soczewki) do pomiaru odpowiednio powierzchni wypukłych i wklęsłych



Najczęściej używane są sferometry pierścieniowe, z których najprostszym jest czujnik zegarowy z nałożonym na jego trzpień  $T$  pierścieniem  $P$  (rys. 77.14c). Przesuw trzpienia jest przekazywany za pomocą specjalnego mechanizmu przekładniowego wskazówce, która obraca się o odpowiedni kąt na tarczy ze skalą (zwykle pełny obrót wskazówki odpowiada przesunięciu o 1 mm, a wartość działki elementarnej podziałki wynosi 0,01 mm).

Wyznaczając na podstawie wzoru (77.12) promienie krzywizny obu powierzchni soczewki oraz znając współczynnik załamania szkła soczewki  $n$  można, ze wzoru soczewkowego (77.2), obliczyć ogniskową obrazową soczewki  $f'$ .

### 77.3. Zadania do wykonania

#### A) Pomiary

Przed rozpoczęciem dokładnych pomiarów oszacować orientacyjnie odległość ogniskową soczewki skupiającej, skierowując ją na odległe źródło światła. Znaleźć na ekranie ostry obraz źródła światła. Odległość od soczewki do ekranu jest równa w przybliżeniu odległości ogniskowej badanej soczewki. Następnie wyznaczyć dokładnie odległość ogniskową soczewki skupiającej oraz rozpraszającej kilkoma z omawianych metod (zgodnie z poleceniami prowadzącego zajęcia).

#### B) Opracowanie wyników

Oceny dokładności każdej metody pomiaru odległości ogniskowej należy dokonać osobno. Warunkiem podstawowym zmniejszającym błędy pomiarów we wszystkich metodach jest bardzo staranne ustawianie na ostrość obrazów otrzymanych na matówce (ekranie).

W metodzie wzoru soczewkowego dwie wielkości mierzone ( $s$  i  $s'$ ) są obarczone błędem. W ocenie błędu  $\Delta s'$  należy uwzględnić średni rozrzut pomiarów podczas ustawiania na ostrość oraz błąd w odczycie położenia soczewki (równy dokładności odczytu za pomocą linijki). Błąd  $\Delta s$  szacujemy

również z dokładności odczytu położenia przedmiotu i soczewki za pomocą linijki.

Dla układów soczewki skupiającej i rozpraszającej obrazy są rozmyte a przedział położenia ekranu, dla których kontury obrazu są względnie ostre, dość duży. By przedział nieco zmniejszyć, można na matówce osłaniającej żarówkę narysować ołówkiem dość gęstą siatkę i ustawić ekran na ostrość kresek tej siatki. Ustawienie to należy powtórzyć kilkakrotnie i z rozrzutu pomiarów obliczyć  $\Delta s'$  jako błąd średniej arytmetycznej. Błąd  $\Delta s$  jako mały w porównaniu do  $\Delta s'$  można tu pominąć.

W metodzie Bessela można przyjąć, że tylko odległość między jednym a drugim położeniem soczewki ( $c$ ) jest obarczona błędem. Odległość przedmiotu od ekranu ( $d$ ) jest dość duża (zawsze  $d > 4f'$ ), zatem błąd  $\Delta d / d$  może być pominięty. Błąd  $\Delta c$  jest równy podwojonemu błędowi odczytania każdego z położenia soczewki. Ponieważ ustawienie każdego z tych położenia powtarzamy przynajmniej trzykrotnie, błąd  $\Delta c$  możemy obliczyć jako średni błąd bezwzględny

Podczas wyznaczania  $f'$  metodą kolimatora i okularu mikrometrycznego należy uwzględnić zarówno dokładność odczytu za pomocą okularu (0,01 mm), jak i rozrzut pomiarów przy kilkakrotnym ustawieniu na ostrość.

Odległość kątowna  $\alpha_0$  między kolejnymi numerowanymi kreskami skali kolimatora przyjmujemy za wielkość nieobarczoną błędem.

Podczas obliczania błędu pomiaru wysokości czaszy kulistej należy uwzględnić zarówno dokładność odczytu skali czujnika (0,01 mm) jak i ewentualny rozrzut pomiarów. Błędy bezwzględne i względne odległości ogniskowej soczewki oraz błędy wyników otrzymanych dla promieni krzywizn soczewki zaleca się obliczać metodą różniczki zupełnej. Podczas stosowania metody logarytmicznej należy zwrócić uwagę, czy w stosowanych wzorach te same zmienne nie występują w liczniku i mianowniku wyrażenia. Porównać wyniki otrzymane dla tej samej soczewki różnymi metodami.