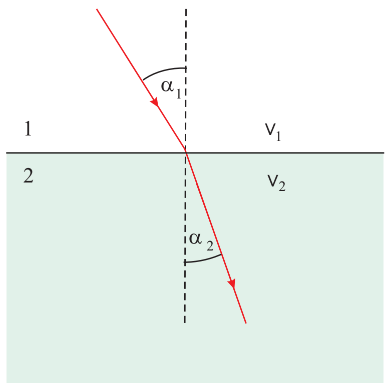
Ćwiczenie 42
Wyznaczanie ogniskowych soczewek

Wstęp teoretyczny: Krzysztof Rębilas.
Autorem ćwiczenia w Pracowni Fizycznej Zakładu Fizyki Uniwersytetu Rolniczego w Krakowie jest Józef Zapłotny.

ZJAWISKO ZAŁAMANIA ŚWIATŁA

Światło, przechodząc z jednego ośrodka do drugiego, np. z powietrza do wody, na granicy tych ośrodków zmienia gwałtownie kierunek biegu - Rys. 1. Zjawisko to nazywamy **zjawiskiem załamania światła**. Przyczyną tego zjawiska jest różna prędkość światła w ośrodkach. Biorąc pod uwagę fakt, iż częstotliwość fali świetlnej nie zmienia się przy zmianie ośrodka, można pokazać, iż zjawiskiem załamania rządzi **prawo załamania** lub inaczej **prawo Snella**:



Rysunek 1. Zjawisko załamania światła.

Promień załamany, promień padający i normalna poprowadzona w punkcie załamania leżą w jednej płaszczyźnie, a stosunek sinusa kąta padania α_1 do sinusa kąta załamania α_2 jest wielkością stałą i jest równy stosunkowi prędkości światła v_1 i v_2 w tych ośrodkach:

$$\frac{\sin\alpha_1}{\sin\alpha_2} = \text{const} = \frac{v_1}{v_2}. \tag{1}$$

Stała, o której mówi prawo załamania, oznaczana jest jako n_{21} i nosi nazwę **względnego współczynnika załamania światła** ośrodka drugiego względem pierwszego. Mamy zatem:

$$n_{21} = \frac{v_1}{v_2}. \tag{2}$$

Jeżeli pierwszym ośrodkiem jest próżnia, w której prędkość światła wynosi c, wówczas współczynnik załamania danego ośrodka względem próżni nazywamy **bezwzględnym współczynnikiem załamania światła**. Spełnione są przy tym relacje:

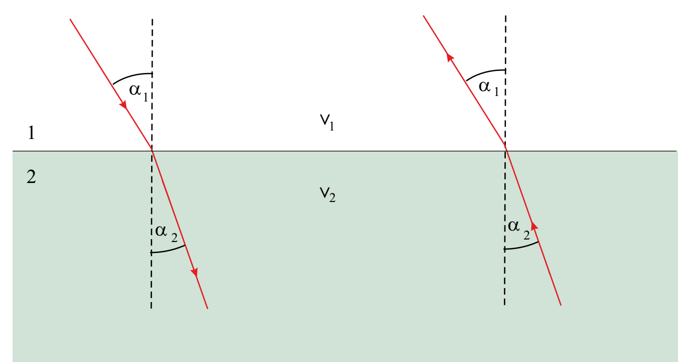
$$n_1 = \frac{c}{v_1}, \qquad n_2 = \frac{c}{v_2}, \tag{3}$$

gdzie n_1 i n_2 oznaczają bezwzględne współczynniki załamania światła odpowiednio dla ośrodka pierwszego i drugiego. Ponieważ prędkość światła w próżni c jest zawsze większa od prędkości w jakimkolwiek innym ośrodku, zatem współczynnik załamania jest dla każdego ośrodka liczbą większą od jeden.

Mamy także związek:

$$n_{21} = \frac{n_2}{n_1}. \tag{4}$$

Zwróćmy uwagę, że w optyce obowiązuje tzw. zasada **odwracalności** biegu światła, co należy rozumieć w ten sposób, że jeżeli promień światła biegnie z punktu A do punktu B po pewnej drodze, to w kierunku przeciwnym będzie biegł po tej samej drodze. Wynika stąd, iż jeżeli promień świetlny pada na granicę ośrodków "1" i "2" od strony ośrodka drugiego pod kątem padania α_2, to w ośrodku pierwszym biec będzie pod kątem załamania α_1 i w dalszym ciągu słuszne będzie prawo (1) - Rys. 2.



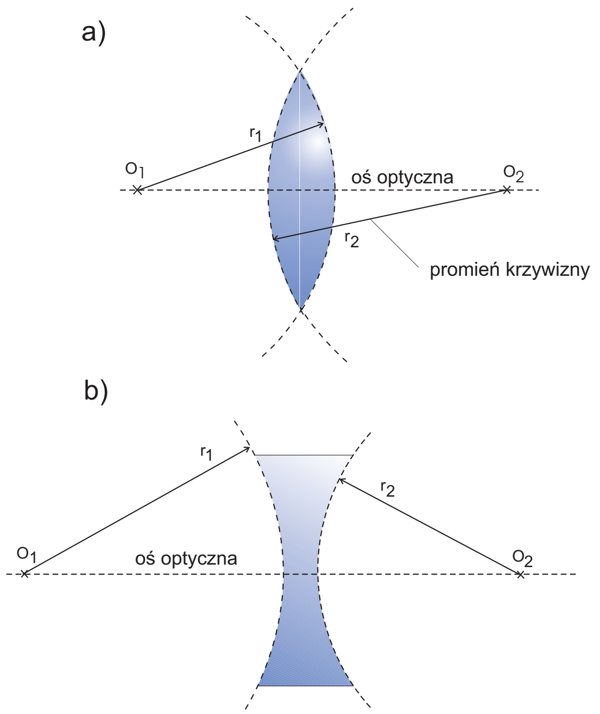
Rysunek 2. Zasada odwracalności biegu światła.

Zauważmy, że z prawa załamania światła (1) wynika iż kąt, jaki tworzy z normalną ulegający załamaniu promień świetlny, jest *większy* w tym ośrodku, w którym jest *większa* prędkość światła (tj. w ośrodku o *mniejszej* **gęstości optycznej**), i to niezależnie od kierunku biegu promienia, czyli: $v_1 > v_2 \Rightarrow \alpha_1 > \alpha_2$.

SOCZEWKA

Soczewka to ciało przezroczyste, ograniczone dwiema powierzchniami kulistymi o promieniach krzywizny r_1 i

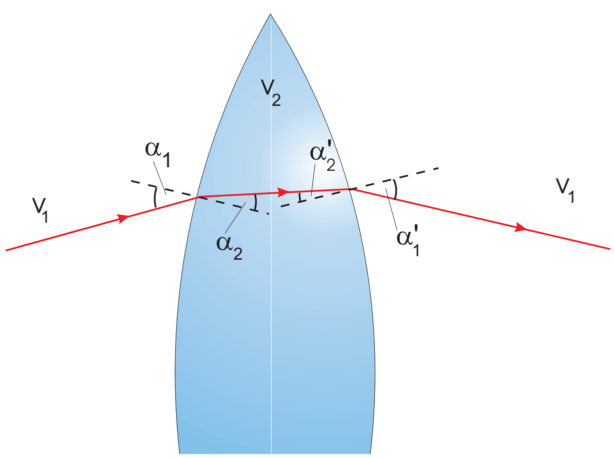
r_2 . Soczewka może być również płaska z jednej strony, wtedy $r = \infty$. Rysunek 3 pokazuje sposób graficznego



Rysunek 3. Środki krzywizny O_1 i O_2, promienie krzywizny r_1 i r_2 oraz oś optyczna soczewki a) dwuwypukłej, b) dwuwklęsłej.

wyznaczenia *środków krzywizny* O_1 i O_2 oraz *osi optycznej* dowolnej soczewki: a) dwuwypukłej, b) dwuwklęsłej.

Promień świetlny biegnący przez soczewkę ulega dwukrotnemu załamaniu na powierzchni soczewki. Rys. 4 przedstawia bieg promienia świetlnego w soczewce dwu-



Rysunek 4. Bieg promienia świetlnego przez soczewkę.

wypukłej otoczonej powietrzem. Zgodnie z prawem załamania:

$$\frac{\sin \alpha_1}{\sin \alpha_2} = \frac{\sin \alpha'_1}{\sin \alpha'_2} = \frac{v_1}{v_2}. \tag{5}$$

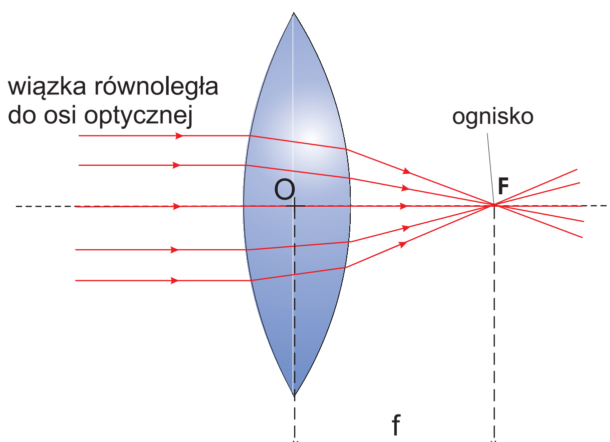
Jeżeli soczewka zrobiona jest ze szkła i otoczona jest powietrzem, wówczas $v_1 > v_2$, a zatem na mocy prawa załamania $\alpha_1 > \alpha_2$ oraz $\alpha'_1 > \alpha'_2$. W efekcie promienie przechodzące przez taką soczewkę kierowane są ku jej osi optycznej. Soczewka dwuwypukła jest zatem soczewką **skupiającą**.

W podobny sposób można pokazać, że soczewka dwuwklęsła jest soczewką **rozpraszającą**.

Symbolicznym graficznym przedstawieniem soczewki skupiającej jest odcinek zakończony na obu końcach strzałkami skierowanymi na zewnątrz, a soczewki rozpraszającej - odcinek ze strzałkami skierowanymi do środka.

OGNISKO I OGNISKOWA SOCZEWKI

Jeżeli na soczewkę skupiającą pada przyosiowa wiązka promieni *równoległych* do osi optycznej soczewki, wówczas po przejściu przez soczewkę promienie te przecinają się w jednym punkcie F zwanym **ogniskiem** soczewki - Rys. 5. Jeśli przyosiowa wiązka promieni równoległych

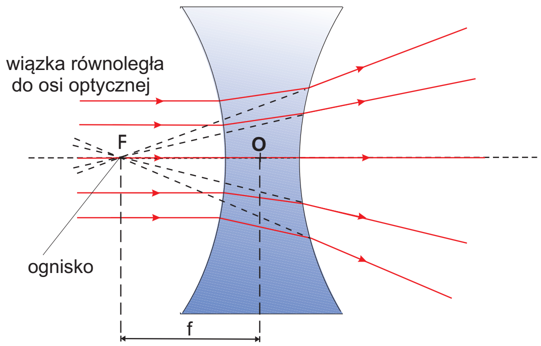


Rysunek 5. Ognisko F i ogniskowa f soczewki skupiającej.

do osi optycznej przechodzi przez soczewkę rozpraszającą, wówczas przedłużenia promieni wychodzących z soczewki przecinają się w jednym punkcie F, który nazywamy ogniskiem soczewki rozpraszającej - Rys. 6. Soczewka cienka ma dwa położone symetrycznie po obu jej stronach ogniska.

Środek optyczny soczewki O to punkt wewnątrz soczewki leżący na jej osi optycznej charakteryzujący się tym, że wszystkie promienie przechodzące przez ten punkt wychodzą z soczewki bez zmiany swego pierwotnego kierunku.

Ogniskową f soczewki nazywamy odległość ogniska soczewki od środka optycznego soczewki. Ogniskowej so-



Rysunek 6. Ognisko F i ogniskowa f soczewki rozpraszającej.

czewki skupiającej przypisujemy wartość dodatnią, a dla soczewki rozpraszającej - ujemną.

Ogniskowa soczewki zależy od promieni krzywizn r_1 i r_2 ograniczających soczewkę i od względnego współczynnika załamania światła materiału soczewki względem otaczającego ośrodka. Przedstawia to poniższy wzór:

$$\frac{1}{f} = \left(\frac{n_2}{n_1} - 1\right)\left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2}\right), \tag{6}$$

gdzie n_1 to bezwzględny współczynnik załamania ośrodka otaczającego soczewkę, n_2 - bezwzględny współczynnik załamania materiału, z którego zrobiona jest soczewka. Należy pamiętać także o regule znaków: promień krzywizny r jest dodatni dla powierzchni wypukłej i ujemny dla powierzchni wklęsłej, oraz równy nieskończoności dla powierzchni płaskiej.

Ze wzoru (6) wynika, że np. soczewka dwuwypukła ($r_1 > 0$, $r_2 > 0$) wykonana ze zwykłego szkła, która w powietrzu jest soczewką skupiającą ($f > 0$), po zanurzeniu jej np. w anilinie, której bezwzględny współczynnik załamania światła jest większy niż szkła ($n_1 > n_2$), będzie w niej soczewką rozpraszającą ($f < 0$).

Wielkością używaną często do charakteryzowania soczewek jest ich **zdolność skupiająca** D: jest to odwrotność ogniskowej wyrażonej w metrach, $D = \frac{1}{f[m]}$. Jej jednostką jest *dioptria*. Zdolność skupiającą 1 dioptrii ma soczewka skupiająca o ogniskowej 1 m, więc soczewka o ogniskowej 5 cm ma zdolność skupiającą 20 dioptrii. Zdolność skupiająca układu cienkich soczewek stykających się ze sobą jest równa sumie zdolności skupiających tych soczewek:

$D_u = D_1 + D_2$

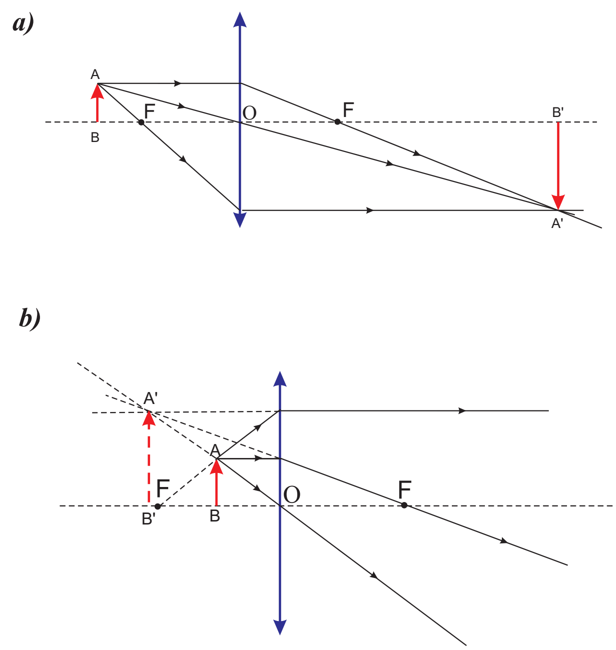
Jeżeli dwie soczewki cienkie umieszczone są w odległości d od siebie, to zdolność skupiająca takiego układu jest wyrażona następującym wzorem:

$D_u = D_1 + D_2 - dD_1D_2$

OBRAZY TWORZONE PRZEZ SOCZEWKI

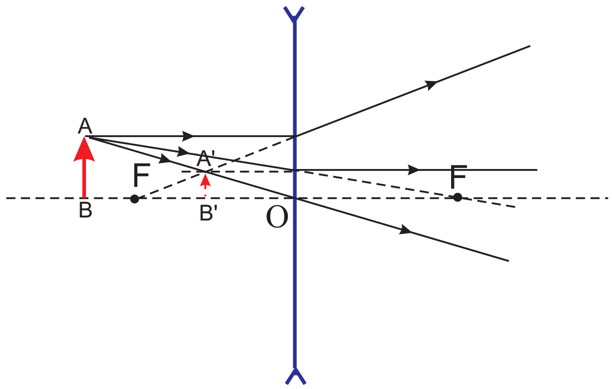
Każdy przedmiot wysyła ze swej powierzchni światło (własne lub odbite) we wszystkich kierunkach. Okazuje się, że promienie świetlne wychodzące z jakiegoś punktu A przedmiotu, *po przejściu przez soczewkę* albo: przecinają się w jednym punkcie A' (A' nazywamy **obrazem rzeczywistym** punktu A), albo przedłużenia promieni wychodzących z soczewki przecinają się w jednym punkcie A' (wówczas A' nazywamy **obrazem pozornym** punktu A). Na ekranie można obserwować jedynie obrazy rzeczywiste. Obrazy pozorne obserwujemy bezpośrednio gołym okiem.

Graficzną konstrukcję obrazów w soczewkach wykonuje się kreśląc bieg dwóch z trzech następujących promieni (Rys. 7 i 8):



Rysunek 7. Konstrukcja obrazu tworzonego przez soczewkę skupiającą gdy przedmiot AB umieszczony jest wzgledem soczewki w odległości: a) większej, b) mniejszej niż ogniskowa soczewki.

a) promienia biegnącego z wierzchołka przedmiotu równolegle do osi optycznej soczewki, który po załamaniu w niej przechodzi przez ognisko F (soczewka skupiająca) lub jego przedłużenie przechodzi przez ognisko (soczewka rozpraszająca);
b) promienia biegnącego z wierzchołka przedmiotu przez środek optyczny O soczewki bez załamania;
c) promienia biegnącego z wierzchołka przedmiotu przez ognisko soczewki (lub którego przedłużenie przechodzi przez ognisko), który po załamaniu w soczewce biegnie równolegle do osi optycznej soczewki.



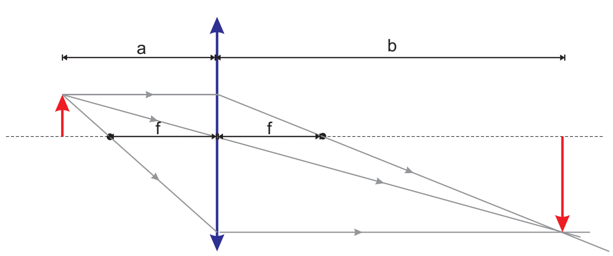
Rysunek 8. Konstrukcja obrazu tworzonego przez soczewkę rozpraszającą.

RÓWNANIE SOCZEWKI CIENKIEJ

Powstawaniem obrazów otrzymywanych za pomocą soczewek cienkich rządzi tzw. **równanie soczewki cienkiej**:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{a} + \frac{1}{b} \ , \tag{7}$$

gdzie:
f - ogniskowa soczewki cienkiej,
a - odległość przedmiotu od środka optycznego soczewki,
b - odległość obrazu od środka optycznego soczewki. (por. Rys. 9)

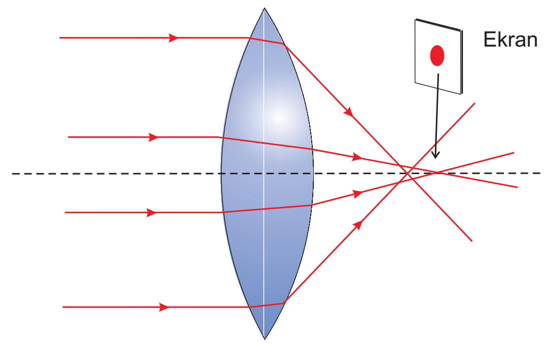


Rysunek 9. Położenie przedmiotu i jego obrazu tworzonego przez soczewkę powiązane są ze sobą poprzez równanie soczewki (7).

Równanie (7) stosuje się również do soczewek rozpraszających, którym przypisujemy ujemną wartość ogniskowej f. Należy pamiętać także o następujących zasadach dotyczących znaków:
$''a''$ jest dodatnie dla każdego przedmiotu rzeczywistego,
$''b''$ jest dodatnie dla obrazów rzeczywistych i ujemne dla obrazów pozornych.

WADY SOCZEWEK RZECZYWISTYCH

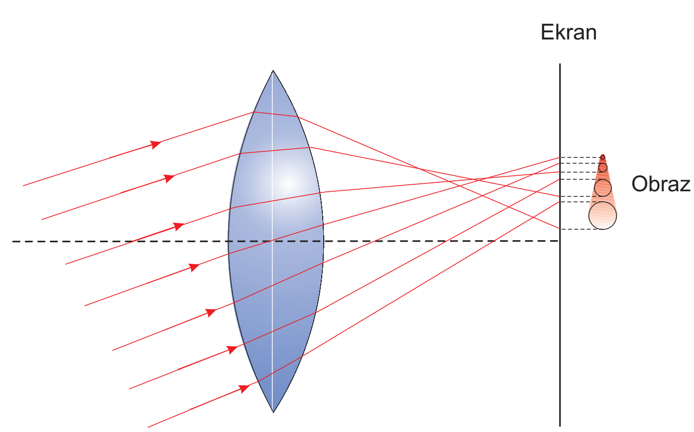
Jeżeli na soczewkę pada szeroka wiązka promieni świetlnych, to promienie odległe od osi optycznej padają na soczewkę pod większym kątem niż promienie przyosiowe, i po załamaniu w niej przecinają oś optyczną soczewki bliżej środka optycznego niż promienie przyosiowe (Rys. 10). Ognisko jest więc rozmyte. Rozmyte będą



Rysunek 10. Aberracja sferyczna. Promienie skrajne przecinają się bliżej soczewki niż promienie przyosiowe. W miejscu ogniska (dla promieni przyosiowych) obserwujemy na ekranie, zamiast punktu, rozmytą plamkę.

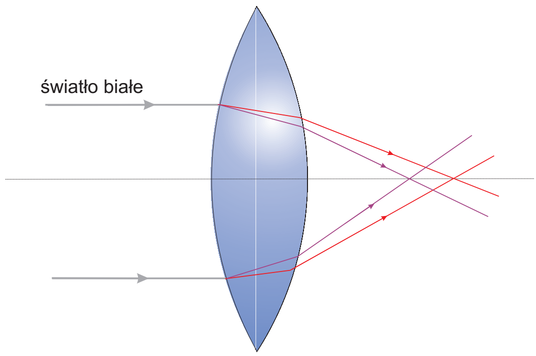
również obrazy przedmiotów, bowiem równanie soczewki (7) spełnione jest jedynie dla promieni przyosiowych. Zjawisko to nazywamy **aberracją sferyczną** soczewki. Możemy ją ograniczyć stosując przysłony lub układy soczewek o odpowiednio dobranych promieniach krzywizn i współczynnikach załamania.

Odmianą aberracji sferycznej jest tzw. **koma**. Gdy źródło światła nie jest usytuowane na osi optycznej soczewki, wówczas, z powodu większego załamywania się promieni skrajnych w stosunku do tych biegnących blisko środka optycznego soczewki, otrzymujemy obraz rozmyty w formie nakładających się na siebie plamek o stopniowo zwiększającej się średnicy (Rys. 11). Cały obraz kształtem przypomina kometę i stąd pochodzi nazwa tego efektu. Wadę tę likwiduje się stosując odpowiednie układy soczewek.



Rysunek 11. Koma. Gdy źródło światła nie leży na osi optycznej soczewki, z powodu aberracji sferyczej zamiast obrazu punktowego obserwujemy na ekranie obraz rozmyty przypominający kometę.

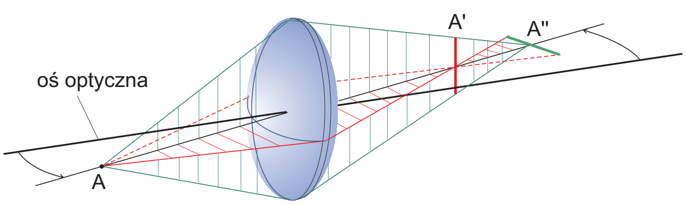
Innym zjawiskiem zniekształcającym powstawanie obrazów w soczewce, nawet dla promieni przyosiowych, jest **aberracja chromatyczna**, wynikająca z zależności współczynnika załamania światła od częstotliwości fali świetlnej. (Rys. 12). Ogniskowa dla promieni fioletowych



Rysunek 12. Aberracja chromatyczna. Promienie o różnych długościach fali (barwach) przecinają się w różnych miejscach.

nie jest równa ogniskowej dla promieni czerwonych. Obraz białego przedmiotu świecącego nie będzie biały, ale będzie złożony z obrazów barwnych. Wadę tę usuwamy budując układ przylegających do siebie soczewek, wykonanych z różnych rodzajów szkła, o różnych kształtach.

Gdy przedmiot nie leży na osi optycznej soczewki, wówczas obrazem punktowego przedmiotu nie będzie punkt, ale odcinek: pionowy, albo poziomy, zależnie od odległości ekranu od soczewki (Rys. 13). Efekt ten nosi nazwę **astygmatyzmu** soczewki. Można go zmniejszyć poprzez zastosowanie układów soczewek o odpowiednim kształcie, rozmieszczeniu, przysłonach i współczynniku załamania.

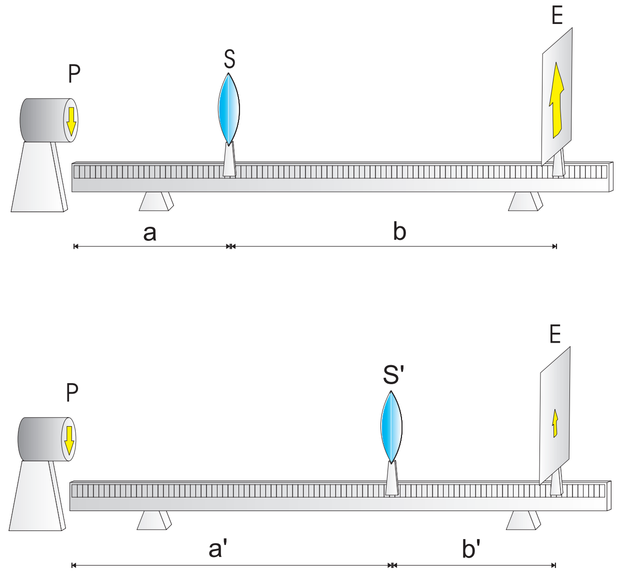


Rysunek 13. Astygmatyzm. Gdy przedmiot punktowy A nie znajduje się na osi optycznej soczewki, powstają dwa obrazy A' oraz A" mające formę odcinków usytuowanych w różnych odległościach od soczewki. Przyczyną tego efektu jest to, że z perspektywy przedmiotu soczewka wydaje się być pogrubiona w płaszczyźnie poziomej w stosunku do płaszczyzny pionowej.

ZASADA POMIARU OGNISKOWEJ

Soczewka skupiająca

Ogniskową soczewki skupiającej można wyznaczyć za pomocą ławy optycznej (Rys. 14). Na jej początku znajduje się przedmiot P, którym jest żarówka znajdująca się w osłonie z wyciętym otworem w kształcie strzałki. Na ławie umieszczamy ekran E, a pomiędzy nim i przedmiotem soczewkę skupiającą S. Soczewkę przesuwamy tak, aby na ekranie otrzymać ostry obraz przedmiotu. Odczytujemy odległość a przedmiotu od soczewki i odległość b obrazu od soczewki. Otrzymane wartości wstawiamy do wzoru:



Rysunek 14. Ława optyczna.

$$f = \frac{ab}{a+b}, \tag{8}$$

który powstał z przekształcenia wzoru (7).

Jeżeli odległość ekranu of przedmiotu $a + b = L > 4f$, to przy stałej pozycji ekranu istnieją dwa położenia soczewki skupiającej S i S', dla których uzyskamy na ekranie ostry obraz (powiększony i pomniejszony). Można wykazać, że:

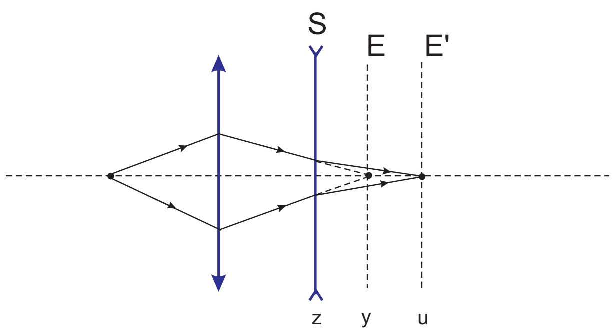
$$f = \frac{L^2 - d^2}{4L}, \tag{9}$$

gdzie $d = a' - a = b - b'$ (Rys. 14). Pomiar ogniskowej f oparty na wzorze (9) nosi nazwę *metody Bessela*. Metoda ta lepiej nadaje się do wyznaczania ogniskowej soczewki rzeczywistej, gdyż pozwala pominąć problemy wynikające z nieznajomości położenia środka optycznego soczewki rzeczywistej z jaką mamy przeważnie do czynienia.

Soczewka rozpraszająca

Ponieważ soczewka rozpraszająca nie daje obrazów rzeczywistych możliwych do zaobserwowania na ekranie, jej ogniskowej nie można wyznaczyć w taki sam sposób, jak ogniskową soczewki skupiającej. Musimy posłużyć się dodatkową soczewką skupiającą, która wraz z badaną soczewka rozpraszającą wytworzy na ekranie obraz rzeczywisty.

Zasada postępowania jest następująca: najpierw umieszczamy na ławie optycznej *jedynie* soczewkę skupiającą, tak aby w odległości y od przedmiotu uzyskać na ekranie E ostry obraz przedmiotu, najlepiej pomniejszony. Następnie wstawiamy soczewkę rozpraszającą S między ekran a soczewkę skupiającą - obraz na ekranie nie będzie już ostry (Rys. 15). Nie zmieniając położenia soczewki skupiającej przesuwamy ekran i soczewkę rozpraszającą tak, aby znowu otrzymać ostry obraz na ekranie, tym razem w pozycji E'. Niech w tej sytuacji odległość soczewki rozpraszającej od przedmiotu wynosi z, a nowa odległość ekranu od przedmiotu u. Zwróćmy uwagę, że $u > y$, bowiem w wyniku rozproszenia promieni świetlnych przez soczewkę rozpraszającą, obraz musi teraz powstać dalej niż uprzednio, gdy mieliśmy jedynie soczewkę skupiającą.



Rysunek 15. Metoda pomiaru ogniskowej soczewki rozpraszającej S. Gdyby przedmiot był umieszczony w pozycji u, wówczas soczewka rozpraszająca dałaby obraz pozorny tego przedmiotu w miejscu y (por. Rys. 8).

Aby znaleźć związek między ogniskową soczewki rozpraszającej f a odległościami y, u, z należy odwrócić bieg promieni świetlnych i przyjąć jako "przedmiot" dla soczewki rozpraszającej uzyskany właśnie w odległości u obraz na ekranie. Pozorny "obraz" tego "przedmiotu" tworzony przez soczewkę rozpraszającą otrzymujemy w miejscu y, gdzie uprzednio powstawał rzeczywisty obraz, wytwarzany przez samą soczewkę skupiającą. Równanie soczewki rozpraszającej ma zatem postać:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{u-z} + \frac{1}{-(y-z)}, \tag{10}$$

gdzie $u - z$ to odległość "przedmiotu" od soczewki rozpraszającej, $-(y - z)$ to odległość "obrazu" od soczewki rozpraszającej (zastosowano regułę znaków dla obrazów pozornych). Po prostych przekształceniach otrzymamy:

$$f = \frac{(y-z)\,(u-z)}{y-u}. \tag{11}$$

WYKONANIE ĆWICZENIA

Metoda I

1. Ustawić ekran w odległości L od przedmiotu równej 80-100 cm. Zanotować wartość L.

2. Umieścić na ławie optycznej soczewkę skupiającą i włączyć do prądu żarówkę w obudowie, spełniającą rolę źródła światła.

3. Uzyskać na ekranie ostry obraz przedmiotu, czyli strzałki oraz zanotować odległość soczewki od przedmiotu a. Ustawienia ostrości obrazu dokonać pięciokrotnie, *nie zmieniając* przy tym odległości przedmiotu od ekranu (tj. nie zmieniając pozycji ekranu). Za każdym razem notujemy wartości a (tzn. a_1, a_2, ...,a_5).

4. Powtórzyć pomiary z punktu 3 dla innej soczewki skupiającej.

5. Zanotuj niepewność maksymalną *przyrządu* (ławy optycznej) dla pomiarów położenia ekranu i soczewki równą $\Delta_d L = \Delta_d a = 0,1$ cm.

6. Jako niepewność maksymalną *eksperymentatora* związaną z trudnością precyzyjnego ustalenia pozycji ekranu i soczewki (wynikającej ze skończonej szerokości wskazówki, niepewności związanej z umiejscowieniem soczewki w obudowie czy niedokładnego spionizowania soczewki i ekranu) można przyjąć wartość $\Delta_e L = \Delta_e a = 0,1$ cm.

Metoda II (Bessela)

1. Odczytaj odległość ekranu od przedmiotu L.

2. Dla jednej soczewki skupiającej zanotować te jej odległości od przedmiotu, w których przy *tym samym* położeniu ekranu otrzyma się obraz powiększony (odległość a) i pomniejszony (odległość a'). Pomiary te powtórzyć pięciokrotnie, otrzymując serie pomiarów (a_1, a_2, ...,a_5) oraz (a'_1, a'_2, ...,a'_5).

Metoda III dla soczewki rozpraszającej

1. Ustawić ekran w odległości nieco większej niż 80 cm od przedmiotu. Umieścić na ławie optycznej pomocniczą soczewkę skupiającą w takim położeniu, aby na ekranie uzyskać obraz pomniejszony. Zanotować odległość ekranu od przedmiotu y.

2. *Nie zmieniając położenia soczewki skupiającej* wstawić między nią i ekran soczewkę rozpraszającą.

Przesuwać ekran i soczewkę rozpraszającą aż do uzyskania ostrego obrazu na ekranie. Starać się uzyskać ostry obraz dla znacząco zwiększonej odległości ekranu od przedmiotu. Zanotować odległość z soczewki rozpraszającej od przedmiotu oraz nową odległość u ekranu od przedmiotu.

3. Dla pomiarów y, u i z przyjmij niepewność maksymalną ławy optycznej równą $\Delta_d y = \Delta_d u = \Delta_d z = 0,1$ cm oraz niepewność eksperymentatora $\Delta_e y = \Delta_e u = \Delta_e z = 0,1$ cm.

OPRACOWANIE WYNIKÓW

Metoda I

1. Dla każdej soczewki skupiającej obliczyć średnią wartość a. Obliczyć ogniskową z wzoru (8) przekształconego, dzięki zależności $b = L - a$, do postaci:

$$f = a - \frac{a^2}{L}. \tag{12}$$

2. Dla jednej z soczewek oblicz odchylenie standardowe średniej dla pomiaru odległości a (por. wzór (3) w materiałach [10]):

$$S_{\bar{a}} = \sqrt{\frac{(a_1 - \bar{a})^2 + (a_2 - \bar{a})^2 + ... + (a_5 - \bar{a})^2}{5(5-1)}}$$

oraz niepewność standardową pomiaru a (por. wzór (8) w [10]):

$$u(a) = \sqrt{S_{\bar{a}}{}^2 + \frac{(\Delta_d a)^2}{3} + \frac{(\Delta_e a)^2}{3}}.$$

3. Oblicz niepewność standardową pomiaru L (por. wzór (7) w [10]):

$$u(L) = \sqrt{\frac{(\Delta_d L)^2}{3} + \frac{(\Delta_e L)^2}{3}}.$$

4. Oblicz niepewność standardową ogniskowej f danej wzorem (12) - por. wzór (9) w [10]:

$$u(f) = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial a}\right)^2 u^2(a) + \left(\frac{\partial f}{\partial L}\right)^2 u^2(L)}.$$

5. Zaokrąglij otrzymaną wartość $u(f)$ oraz wynik uzyskany dla ogniskowej f wedug zasad przedstawionych w materiałach [10] oraz zaprezentuj wynik końcowy.

Matoda II

Do wzoru Bessela (9) podstawić wartości L i $d = a' - a$, gdzie a i a' to średnie wartości serii pomiarów uzyskanych w metodzie II. Obliczyć ogniskową soczewki. Jeżeli jedną i drugą metodą wyznaczano ogniskową tej samej soczewki, porównać otrzymane wyniki.

Metoda III

1. Do wzoru (11) wstawić wartości y, u oraz z i obliczyć ogniskową soczewki rozpraszającej.

2. Odnotuj niepewności standardowe pomiaru y, u i z jako (por. wzór (7) w [10]):

$$u(y) = \sqrt{\frac{(\Delta_d y)^2}{3} + \frac{(\Delta_e y)^2}{3}} = 0.082 \text{ cm},$$

$$u(u) = \sqrt{\frac{(\Delta_d u)^2}{3} + \frac{(\Delta_e u)^2}{3}} = 0.082 \text{ cm},$$

$$u(z) = \sqrt{\frac{(\Delta_d z)^2}{3} + \frac{(\Delta_e z)^2}{3}} = 0.082 \text{ cm}.$$

3. Oblicz niepewność standardową ogniskowej stosując formułę (patrz wzór (9) w [10]):

$$u(f) = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2 u^2(y) + \left(\frac{\partial f}{\partial u}\right)^2 u^2(u) + \left(\frac{\partial f}{\partial z}\right)^2 u^2(z)}.$$

4. Zaokrąglij otrzymaną wartość $u(f)$ oraz wynik uzyskany dla ogniskowej f wedug zasad przedstawionych w materiałach [10] oraz zaprezentuj wynik końcowy.

LITERATURA

1. J.Blinowski, J. Trylski, Fizyka dla kandydatów na wyższe uczelnie, PWN 1974.
2. K. Chyla, Fizyka dla ZSZ, WSiP 1999.
3. F. C. Crawford, Fale, PWN 1972.
4. R. P. Feynman, Feynmana wykłady z fizyki T.1, część 2, PWN 2003.
5. M. Herman i in., Podstawy Fizyki, PWN W-wa 1980.
6. W. A. Łobodiuk i in., Fizyka elementarna, W-wa 1981.
7. M. i J. Massalscy, Fizyka dla kl. IV, WSiP 1970.
8. S. Przestalski, Fizyka z elementami biofizyki i agrofizyki, UW 2009.
9. R. Resnick, Fizyka T.2, wyd. 8, PWN 1994.
10. K. Rębilas, Wprowadzenie do metod opracowania wyników pomiarowych.