

SKRYPT DO LABORATORIUM

BIOFIZYKA

ĆWICZENIE 8: Badanie własności układów optycznych

autor:

dr inż. Małgorzata Śmiałek-Telega

Gdańsk, 2010

1 USTALENIA WSTĘPNE

Wymagania wstępne

Zapoznanie się z wiadomościami teoretycznymi dotyczącymi głównych zagadnień w ćwiczeniu:

- Światło widzialne
- Odbicie, ugięcie, rozproszenie i załamanie promieni
- Rodzaje i własności soczewek optycznych
- Wady układów optycznych

Zapoznanie się z przebiegiem ćwiczenia zawartym w instrukcji do ćwiczenia.

Cele ćwiczenia:

1. Zapoznanie studentów ze sposobem pomiaru promienia krzywizny soczewki
2. Zapoznanie studentów z metodą wyznaczania współczynnika załamania ośrodka
3. Obserwacja wpływu zmiany współczynnika załamania ośrodka na przebieg wiązki promieni
4. Pomiar aberracji sferycznej soczewki skupiającej i układu soczewek
5. Obserwacja i analiza defektów występujących w układach soczewek
6. Analiza zebranych danych i sformułowanie wniosków

Wykaz przyrządów, materiałów i aparatury niezbędnych do przeprowadzenia ćwiczenia:

- Soczewka płasko-wypukła (2x)
- Soczewka wklęsto-wypukła
- Dwukomorowy cylinder
- Zbiornik na ciecz z podklejoną skalą milimetrową
- Lampa halogenowa z przesłonami (2x)

Spodziewane efekty kształcenia - umiejętności i kompetencje:

- zrozumienie badanego zjawiska oraz wpływu parametrów zmiennych na wyniki pomiarowe
- obsługa przyrządów pomiarowych
- dobór zadanych parametrów
- przeprowadzenie pomiarów, ocena niepewności pomiarowych i ich źródeł, rachunek błędów
- opracowanie wyników pomiarowych w postaci czytelnej i estetycznej (tabele, wykresy, zapis danych pomiarowych)

Metody dydaktyczne:

Odrębne stanowisko pomiarowe, instrukcja w formie elektronicznej, opieka i pomoc prowadzącego

Zasady oceniania/warunek zaliczenia ćwiczenia

Przedmiotem oceny będzie przegotowanie teoretyczne, prawidłowe przeprowadzenie pomiarów i jakość ich opracowania. Opracowanie wyników powinno zawierać podsumowanie i wnioski. Maksymalną liczbę punktów można otrzymać jedynie w przypadku sprawozdania zawierającego opracowane wyniki i wynikające z nich wnioski.

Wykaz literatury podstawowej do ćwiczenia:

- | | |
|----|-------------------------|
| 1. | Instrukcja do ćwiczenia |
|----|-------------------------|

1.1 UWAGI

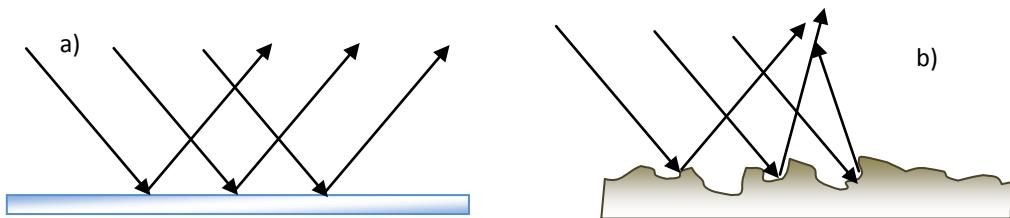
Halogenowe źródło światła jest bardzo jasne. Należy unikać patrzenia bezpośrednio w kierunku źródła światła!

2 WPROWADZENIE DO ĆWICZENIA

2.1 WIADOMOŚCI TEORETYCZNE

2.1.1 OPTYKA – ZAGADNIENIA PODSTAWOWE DOTYCZĄCE ŚWIATŁA

Potocznie światłem określa się widzialną część promieniowania elektromagnetycznego, z zakresu 400 – 700 nm. Jest to fala elektromagnetyczna, w której wektor natężenia pola elektrycznego i magnetycznego drgają pod kątem prostym względem siebie w płaszczyźnie prostopadłej do kierunku rozchodzenia się fali. Ludzkie oko rozróżnia dwa parametry fali świetlnej: długość i amplitudę. Różnice długości fali są dla nas widoczne jako różnice kolorów, a zmiany amplitudy fali jako różnice w jasności. Oko ludzkie nie jest natomiast w stanie zaobserwować kierunku drgań wektora natężenia, czyli polaryzacji. Światło może być emitowane z obiektów podgrzanych, w wyniku emisji termicznej (żarówka), jako skutek zmiany prędkości lub kierunku ruchu cząstek naładowanych w polu elektrycznym lub magnetycznym (promieniowanie synchrotronowe) lub w wyniku zmiany poziomów energetycznych przez elektrony w atomie lub cząsteczce (laser). Rozróżniamy promieniowanie monochromatyczne, kiedy wszystkie fotony w wiązce mają taką samą długość fali i niemonochromatyczne, zawierające różne długości fali (np. światło białe). Podstawowymi zjawiskami dotyczącymi zachowania fali elektromagnetycznej, kiedy natrafia ona na przeszkodę są odbicie, załamanie, ugięcie i rozproszenie fali.



Rysunek 8. 1 Odbicie a) lustrzane i b) rozmyte.

O odbiciu fali mówimy, gdy fala elektromagnetyczna padając na granicę dwóch ośrodków zmienia kierunek rozchodzenia się, pozostając w ośrodku pierwotnej propagacji. Obraz powstający w wyniku odbicia równoległej wiązki światła padającego może być lustrzany (Rysunek 8. 1 a), wszystkie promienie odbite rozchodzą się równolegle) lub rozmyty (Rysunek 8. 1 b), promienie odbite rozchodzą się w różnych kierunkach). Dla każdego promienia w wiązce spełnione jest prawo odbicia fali. Prawo to mówi nam, że kąt odbicia fali jest równy kątowi padania fali, a promień odbity, padający i normalna do powierzchni odbicia leżą w jednej płaszczyźnie. Prawo to pokazuje Rysunek 8. 2 a). W wyniku odbicia zmienia się tylko kierunek rozchodzenia fali, nie zmienia się natomiast jej długość.

Jeżeli natomiast fala świetlna padając na granicę dwóch różnych przepuszczalnych dla niej ośrodków przejdzie przez granicę tych ośrodków, to zmieni się kierunek jej propagacji. Stosuje się tu prawo Snella, które mówi, że promień padający i załamany oraz normalna do powierzchni załamującej leżą w jednej płaszczyźnie, a kąt padania, θ_1 , i załamania, θ_2 , związane są ze sobą następującą zależnością:

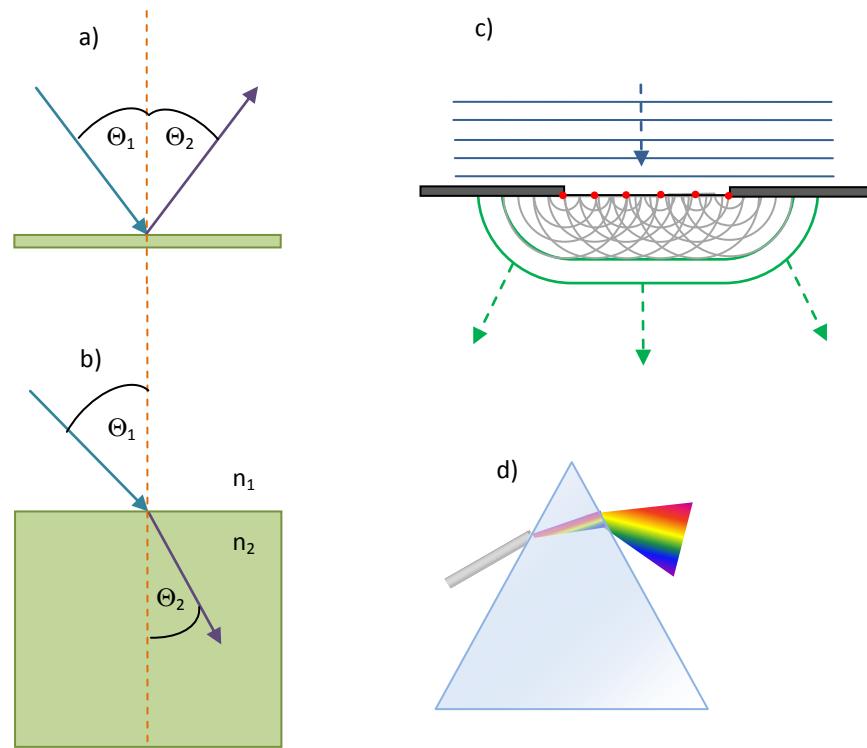
$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{n_2}{n_1} \quad (8.1)$$

gdzie: n_1 i n_2 to współczynniki załamania ośrodków: pierwotnego i wtórnego. Oznacza to, że jeżeli fala przechodzi z ośrodku o mniejszym współczynniku załamania do ośrodku o większym współczynniku załamania ($n_1 < n_2$), np. z powietrza do wody, to kąt załamania jest mniejszy od kąta padania ($\theta_1 > \theta_2$), tak jak pokazuje to Rysunek 8. 2 b). Współczynnik załamania dla danego ośrodku rośnie wraz z jego gęstością. Dla różnych ośrodków zasada ta również się sprawdza, ale są od niej odstępstwa. Dla powietrza wartość współczynnika załamania wynosi 1.

Dyfrakcja (inaczej ugięcie fali), którą ilustruje Rysunek 8. 2 c), to zmiana kierunku rozchodzenia fali świetlnej, powstająca na krawędziach przeszkód i w ich pobliżu. Zjawisko to zachodzi na przeszkodach każdego rozmiaru, nie mniej jednak jest najlepiej zauważalne wtedy, gdy rozmiary przeszkody są porównywalne z długością padającego promieniowania elektromagnetycznego. Zjawisko to wykorzystuje się do badań niewielkich obiektów, np. kryształów. Jeżeli fala przechodzi np. przez szczeleńkę to ulega na niej ugięciu. Ponieważ zgodnie z zasadą Huygensa, każdy punkt ośrodku, do którego dotarło czoło fali staje się źródłem nowej fali kulistej, po ominięciu przeszkody fale te nakładają się na siebie, interferując. Tworzy się w ten sposób obraz interferencyjny, złożony z ciemnych i jasnych prążków.

Dispersja (rozproszenie fali) to zjawisko związane ze zmianą właściwości optycznych ośrodków w zależności od długości fali promieniowania padającego na ośrodek. Szczególnie dobrze widoczne jest w przypadku, gdy światło białe przechodzi przez pryzmat lub soczewkę, jak pokazuje Rysunek 8. 2 d). Ponieważ wartość współczynnika załamania danego materiału zależy

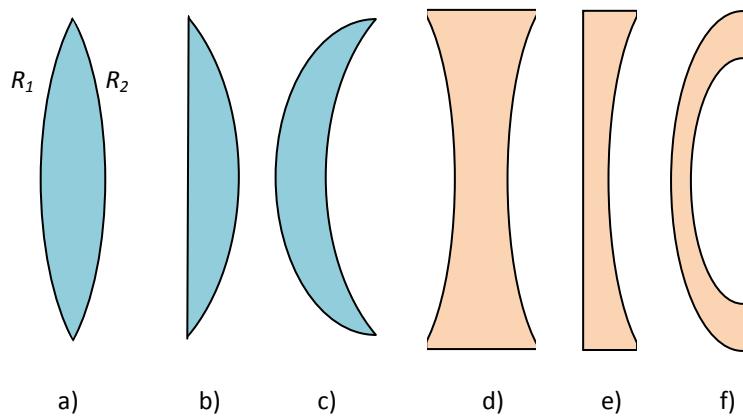
od długości fali świetlnej (jest to zależność wyznaczana empirycznie dla konkretnego materiału), wiązka światła białego rozszczepia się na poszczególne barwy tworzące ją, wychodząc w postaci wielokolorowej wstęgi.



Rysunek 8. 2 Graficzne przedstawienie a) odbicia, b) załamania, c) ugięcia i d) rozszczepienia fali świetlnej.

2.1.2 SOCZEWKI – RODZAJE, WŁASNOŚCI I ZASADA DZIAŁANIA

Soczewka to bryła wykonana z przezroczystego materiału, ograniczona dwiema powierzchniami sferycznymi, których środki leżą na tzw. osi optycznej soczewki. Każdy promień, który przechodzi przez soczewkę, ulega dwukrotnemu załamaniu na powierzchniach ograniczających ją. Ze względu na właściwości wynikające z kształtu powierzchni ograniczających soczewki mają właściwość skupiania bądź rozpraszania wiązki świetlnej. Soczewki skupiące to takie, które są grubsze w środku niż na brzegach. Należą do nich soczewki dwuwypukłe, płasko-wypukłe i wkłędło-wypukłe (Rysunek 8. 3 a)-c) i Tabela 8. 1). W odwrotnej sytuacji soczewka rozprasza wiązkę światła. Przykładem takich soczewek są soczewki dwuwklęste, płasko-wklęste, wypukło-wklęste (Rysunek 8. 3 d)-f) i Tabela 8. 1).



Rysunek 8. 3 Rodzaje soczewek ze wskazaniem promieni krzywizn soczewki; soczewka a) dwuwypukła, b) płasko-wypukła, c) wkłędło-wypukła, d) dwuwklęsta, e) płasko-wklęsta, f) wypukło-wklęsta.

Wiązka promieni biegnących równolegle do osi optycznej soczewki skupiającej, po przejściu przez nią ulega załamaniu i skupieniu w punkcie zwany ogniskiem soczewki, F , (Rysunek 8. 4). W przypadku soczewki rozpraszającej, w ognisku przecinają się przedłużenia załamanych promieni wychodzących z soczewki (Rysunek 8. 5). Odległość ogniska od powierzchni środkowej (powierzchnia prostopadła do osi optycznej soczewki, przechodząca przez jej środek geometryczny) nazywamy ogniskową soczewki, f , której wartość jest dodatnia w przypadku soczewki skupiającej, a ujemna dla soczewek rozpraszających. Wynika to z tego, że ogniskowe mierzone wzdłuż biegu promieni rzeczywistych przyjmuje się jako dodatnie, a mierzone wzdłuż promieni pozornych jako ujemne. Każda soczewka ma dwa ogniska znajdujące się po obu jej stronach w jednakowych odległościach od środka soczewki, różnych wartości ogniskowej tej soczewki. Promień biegący pod dowolnym kątem po przejściu przez soczewkę nie ulegnie załamaniu tylko i wyłącznie wtedy, gdy przechodzi przez punkt zwany środkiem optycznym soczewki.

Tabela 8. 1 Podział soczewek ze względu na ich właściwości skupiące i rozpraszające.

Soczewki skupiące	Soczewki rozpraszające
Dwuwypukła, $R_1>0, R_2<0$	Dwuwklesła, $R_1<0, R_2>0$
Płasko-wypukła, $R_1=\infty, R_2<0$	Płasko-wklesła, $R_1=\infty, R_2>0$
Wklesło-wypukła, $R_1, R_2>0, R_1<R_2$	Wypukło-wklesła, $R_1, R_2>0, R_1>R_2$

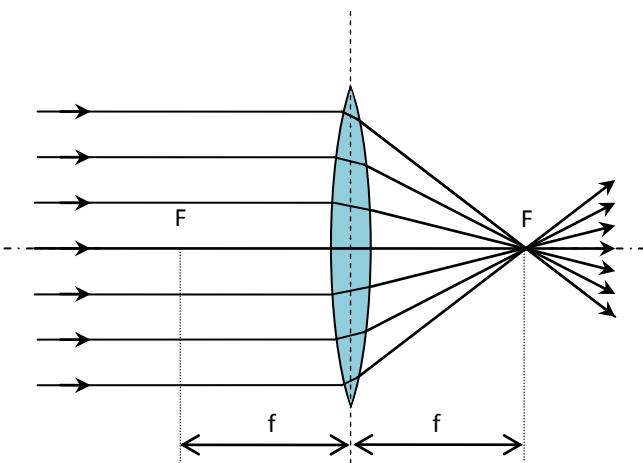
Soczewkę nazywamy cienką, kiedy jej grubość jest zaniedbywalnie mała w porównaniu z promieniem krzywizny. Soczewka gruba to taka, w której promień krzywizny i grubość są porównywalne.

Jeżeli rozważamy soczewkę cienką, to ogniskowa soczewki f_0 zależy od wartości obu promieni krzywizn R_1 i R_2 oraz od współczynnika załamania n materiału, z którego wykonano soczewkę i współczynnika załamania n' otaczającego ośrodkę zgodnie z zależnością:

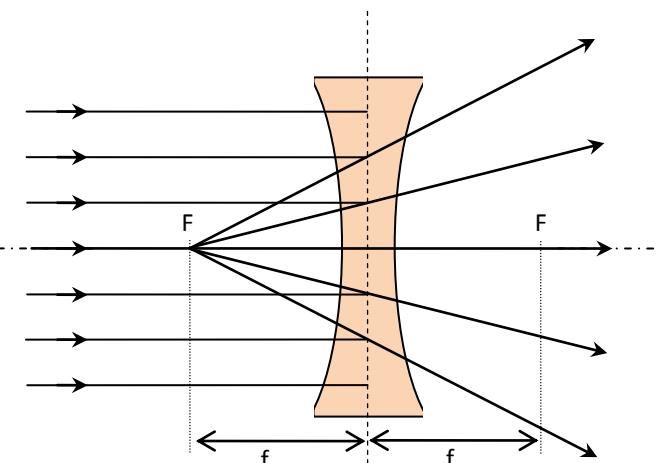
$$\frac{1}{f_0} = \left(\frac{n}{n'} - 1 \right) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) \quad (8.2)$$

Natomiast, gdy rozważana soczewka jest soczewką grubą, to jej ogniskową, f , należy obliczyć korzystając z zależności uwzględniającej drogę promieni świetlnych w tej soczewce, d ,

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{f_0} - \frac{(n-n')^2}{nn'} \frac{d}{R_1 R_2} \quad (8.3)$$



Rysunek 8. 4 Załamanie światła w soczewce skupiającej.



Rysunek 8. 5 Załamanie światła w soczewce rozpraszającej.

Odległość d to odległość pomiędzy tzw. płaszczyznami głównymi w soczewce. Przyjmuje się, że w przybliżeniu, że wynosi ona $1/3$ odległości między skrajnymi płaszczyznami soczewki w punktach, przez które przechodzi oś optyczna soczewki.

2.1.3 WADY SOCZEWEK

Wady soczewek wywołane są najczęściej niedoskonałościami materiału, z którego wykonane są soczewki, rozmiarami samych soczewek, położeniem źródła światła względem osi optycznej soczewki, czy parametrami materiału, z którego wykonano soczewki, takimi jak np. współczynnik załamania.

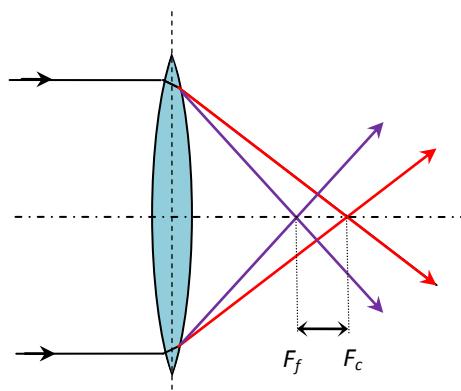
Do najbardziej rozpowszechnionych wad soczewek należą:

- a) aberracje optyczne – wady pojedynczych soczewek lub ich układów polegające na deformacji obrazu w formie zniekształcenia, utraty ostrości lub zmianach chromatycznych. Ze względu na pochodzenie aberracji wyróżnia się:
 - aberracja chromatyczna – wada wywołana zjawiskiem dyspersji, wynikającą z różnych odległości ogniskowania poszczególnych długości fali świetlnych względem na zależność współczynnika załamania światła materiału soczewki od długości fali światła padającego, dająca w wyniku wiązkę światła białego rozszczepionego na poszczególne składowe (kolory), skupiające się w różnych punktach;
 - aberracja komatyczna (koma) – wada polegająca na rozmyciu wiązki promieni po przejściu przez soczewkę, jeżeli wiązka padała na soczewkę nie wzdłuż osi optycznej soczewki, lecz pod pewnym kątem; otrzymany w ten sposób obraz tworzy plamę w kształcie przecinka lub komety; wada ta jest tym większa, im większy jest kąt pod którym promienie padają na soczewkę;
 - aberracja sferyczna – wada związana z geometrią układu, polegająca na skupianiu promieni przebiegających blisko osi optycznej soczewki w innym punkcie, niż promieni przechodzących przez skrajne części soczewki;
 - astygmatyzm – wada polegająca na ogniskowaniu promieni padających w dwu prostopadłych płaszczyznach w dwu różnych punktach, powodująca powstawanie zniekształconego i nieostrego obrazu;
 - dystorsja – polega na powiększaniu obrazu tego samego przedmiotu w różny sposób, w zależności od jego odległości od osi optycznej soczewki;
 - krzywizna pola – jeżeli wiązka promieni wychodzi z punktu położonego poza osią optyczną soczewki, to po przejściu przez soczewkę zamiast ogniskować się na płaszczyźnie, ogniskuje się na wklęszej lub wypukłej czaszy; wada ta uniemożliwia np. uzyskanie ostrego obrazu na całej powierzchni płaskiej kliszy fotograficznej
- b) flara (halacje) – efekt optyczny występujący w formie półprzecroczych kolorowych okrągów, powstający w skutek rozpraszenia wiązki światła na defektach w soczewce;
- c) winietowanie – wada powstająca w układach soczewek, polegająca na niedoświetleniu brzegów obrazu powstającego po przejściu promieni świetlnych przez układ; wada ta wynika z niedoskonałości soczewek oraz zakłuceniem brzegów torów optycznych innymi elementami układu.

Wady soczewek można eliminować, stosując układy soczewek wykonanych z różnych materiałów lub, jak np. w przypadku astygmatyzmu, specjalne soczewki cylindryczne.

Do najbardziej powszechnych wad należą aberracja chromatyczna (Rysunek 8. 6) i aberracja sferyczna (Rysunek 8. 7). Miarą aberracji chromatycznej, Δf_c , jest różnica skrajnych ogniskowych rozszczepionej wiązki świetlnej, czyli ogniskowych promieni fioletowych, F_f , i czerwonych, F_c ,

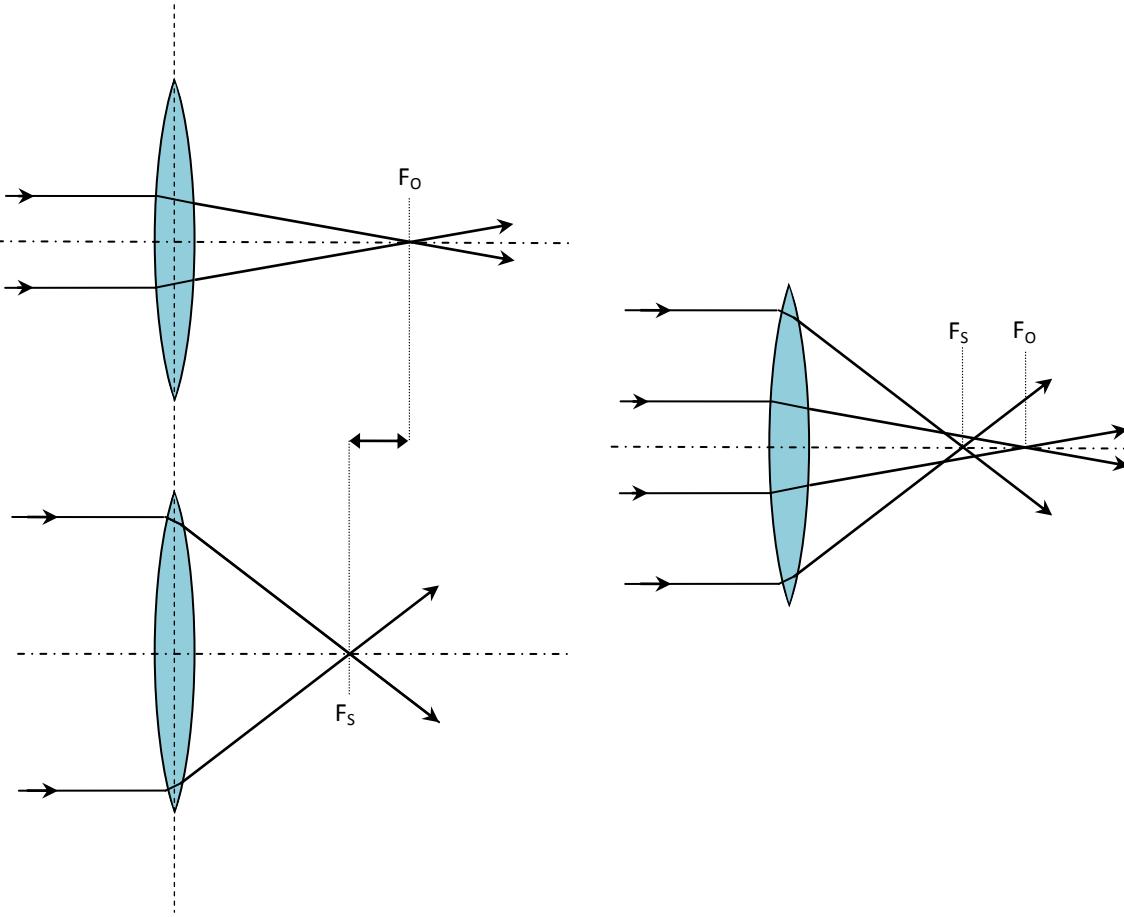
$$\Delta f_c = F_c - F_f. \quad (8.4)$$



Rysunek 8. 6 Schemat przedstawiający powstawanie aberracji chromatycznej w soczewce.

W przypadku aberracji sferycznej, jej miarą, Δf_s , jest różnica ogniskowych F_S i F_O

$$\Delta f_s = F_S - F_O. \quad (8.5)$$



Rysunek 8. 7 Schemat przedstawiający powstanie aberracji sferycznej w soczewce.

3 PRZEBIEG ĆWICZENIA

L.p.	Zadanie
1.	Sprawdzenie przygotowania teoretycznego przez prowadzącego ćwiczenie
2.	Wprowadzenie prowadzącego, informacja o warunkach bezpieczeństwa
3.	Wyznaczanie Promienia krzywizny soczewki skupiającej w powietrzu
4.	Wyznaczanie ogniskowej soczewki rozpraszającej w powietrzu
5.	Pomiar aberracji sferycznej
6.	Obserwacje innych aberracji
7.	Obserwacje wpływu zmiany współczynnika załamania ośrodka na przebieg promieni wiązki świetlnej
8.	Wyznaczanie współczynnika załamania dla wody
9.	Analiza niepewności pomiarowych
10.	Zatwierdzenie protokołu pomiarów
11.	Opracowanie wyników

3.1 WYKONYWANIE POMIARÓW

Przed rozpoczęciem ćwiczenia należy zmierzyć za pomocą suwmiarki i zapisać rozmiary wszystkich soczewek!!!

3.2.1. WYZNACZANIE PROMIENIA KRZYWIZNY SOCZEWKI SKUPIAJĄCEJ W POWIETRZU

Włączyć źródło światła. Umieścić jedną soczewkę skupiającą w pustym zbiorniku płaską powierzchnią w kierunku źródła. Na źródło światła założyć przesłonę z pięcioma szczelinami. Znaleźć ogniskową soczewki. Zmierzyć jej położenie względem soczewki. Przekształcić równanie (8.3) tak, aby móc wyznaczyć promień krzywizny soczewki. Następnie umieścić dwie soczewki skupiające w pustym zbiorniku tak, aby powstała gruba soczewka dwuwypukła. Na źródło światła założyć przesłonę z pięcioma szczelinami. Znaleźć obie ogniskowe soczewki. Zmierzyć ich położenie względem soczewki. Przekształcić równanie (8.3) tak, aby móc wyznaczyć promień krzywizny drugiej soczewki.

Współczynnik załamania powietrza wynosi 1, a plexi, z którego wykonane są soczewki, 1,491.

3.2.2. WYZNACZANIE PROMIENIA KRZYWIZNY SOCZEWKI ROZPRASZAJĄCEJ W POWIETRZU

Włączyć źródło światła. Umieścić jedną soczewkę rozpraszającą w pustym zbiorniku wklęsłą powierzchnią w kierunku źródła. Na źródło światła założyć przesłonę z pięcioma szczelinami. Znaleźć ogniskową soczewki. Zmierzyć jej położenie względem soczewki. Przekształcić równanie (8.3) tak, aby móc wyznaczyć promień krzywizny soczewki.

3.2.3. POMIAR ABERRACJI SFERYCZNEJ

Umieścić pojedynczą soczewkę skupiającą zakrzywioną powierzchnią w kierunku źródła światła. W źródle umieścić przesłonę z dwiema szczelinami. Zapisać położenie ogniskowej na papierze milimetrowym względem brzegu soczewki. Nie przesuwając soczewki wstawić przesłonę z pięcioma szczelinami, zasłaniając trzy środkowe. Tak, jak poprzednio, zaznaczyć położenie ogniskowej. Soczewkę przesunąć o 2 cm w kierunku od źródła i powtórzyć pomiary, a następnie w kierunku źródła i powtórzyć pomiary. Korzystając z równania (8.5), obliczyć miarę aberracji sferycznej Δf_s dla wszystkich trzech położen soczewki.

3.2.4. OBSERWACJE INNYCH ABERRACJI

Za pomocą soczewki płasko wypukłej studenci sprawdzą, czy można zaobserwować aberrację chromatyczną i komatywną. Uzyskany obraz należy pokazać prowadzącemu ćwiczenie. Wykonać odpowiednie szkice i zapisać wnioski wynikające z doświadczenia.

3.2.5. OBSERWACJE WPŁYWU ZMIANY WSPÓŁCZYNNIKA ZAŁAMANIA OŚRODKA NA PRZEBIEG PROMIENI WIĄZKI ŚWIETLNEJ

W pustym pojemniku na ciecz należy umieścić najpierw pusty przedzielony walec i zanotować obserwacje. Następnie do jednej komory nalać wodę i umieścić walec najpierw przegrodą wzdłuż, a następnie w poprzek padających wiązek promieniowania i zanotować obserwacje. Wypełnić obie komory walca i zaobserwować zmiany. Jak wytłumaczysz swoje spostrzeżenia?

3.2.6. WYZNACZANIE WSPÓŁCZYNNIKA ZAŁAMANIA DLA WODY

Znając promień krzywizny soczewki można z równania (8.3) wyznaczyć współczynnik załamania wody. Pomiar przeprowadza się tak, jak dla przypadku soczewki płasko-wypukłej w powietrzu (sekcja 3.2.1). W tym celu należy zbiornik napełnić wodą i umieścić w nim soczewkę płasko-wypukłą, płaską stroną w kierunku źródła. Na źródło założyć przesłonę z pięcioma szczelinami. Znaleźć ogniskową i zapisać jej położenie. Przekształcić równanie (8.3) tak, aby móc wyznaczyć wartość n' dla wody.

3.2 ANALIZA WYNIKÓW

3.3.1. OBLCZENIA

Należy wykonać obliczenia z zadań w paragrafach 3.2.1, 3.2.2, 3.2.3 i 3.2.6. W tym celu należy tak przekształcić równanie (8.3), aby móc wyznaczyć szukane wartości. Porównać otrzymane wartości z wartościami tablicowymi.

3.3.2. WYZNACZANIE NIEPEWNOŚCI

Należy wyznaczyć niepewność obliczenia promienia krzywizny soczewki płasko-wypukłej i wklęsło-wypukłej jako

$$\delta R = \delta f \cdot \left(\frac{n}{n'} - 1 \right), \quad (8.6)$$

gdzie: $\delta f = \delta u + \delta v$ jest niepewnością wyznaczenia ogniskowej soczewki płasko-wypukłej, δu jest niepewnością odczytania położenia ogniska ze skali milimetrowej, a δv jest niepewnością wyznaczenia grubości soczewki suwmiarką. Dokładność odczytu obu tych wartości równa się najmniejszej podziałce miarki.

W przypadku wyznaczania niepewności aberracji sferycznej, należy skorzystać z

$$\delta \Delta f_s = \delta F_s + \delta F_o, \quad (8.7)$$

gdzie δF_s i δF_o są dokładnościami odczytania położen ognisk na papierze milimetrowym.

Dokładność wyznaczenia współczynnika załamania dla wody należy obliczyć z

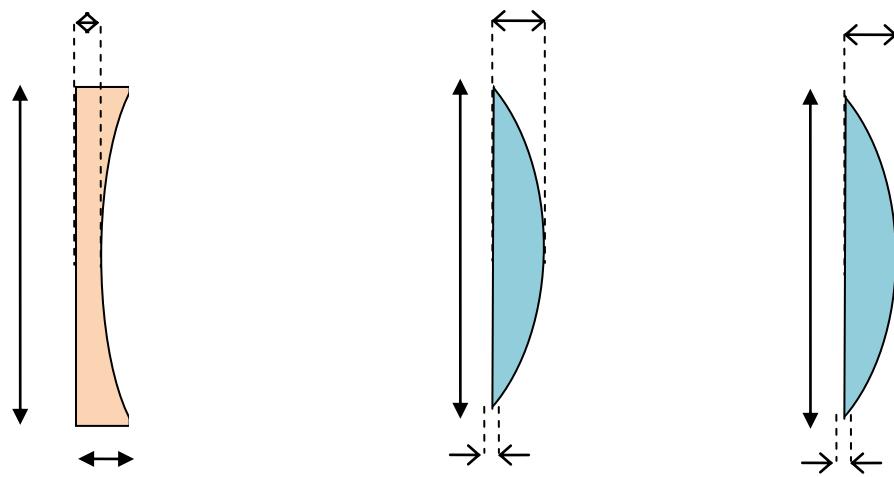
$$\delta n' = \frac{n(R+f)\delta f - nf(\delta R + \delta f)}{(R+f)^2}, \quad (8.8)$$

wstawiając uzyskane z pomiarów niepewności odczytu mierzonych wartości.

3.3 SPRAWOZDANIE

W sprawozdaniu muszą znaleźć się wszystkie wymagane obliczenia, rysunki i odpowiedzi na pytania dotyczące zagadnień obserwowanych. Sprawozdanie musi zawierać także rachunek błędu.

3.4 TABELE POMIAROWE



Rysunek 8. 8 Wymiary soczewek użytych w ćwiczeniu.