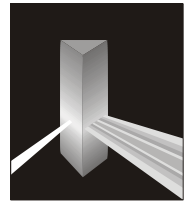


**KATEDRA FIZYKI**  
**WYDZIAŁ INŻYNIERII PRODUKCJI  
I TECHNOLOGII MATERIAŁÓW  
POLITECHNIKA CZĘSTOCHOWSKA**



**PRACOWNIA OPTYKI**



**ĆWICZENIE NR 0-4**

**BADANIE WAD SOCZEWEK**

## I. Zagadnienia do opracowania

1. Równanie soczewki, jego dyskusja, konstrukcje obrazów
2. Metody pomiaru ogniskowej soczewki
3. Zjawisko dyspersji światła
4. Rodzaje wad soczewek i sposoby ich usuwania
5. Zasada działania noniusza

## II. Wprowadzenie teoretyczne

Soczewki odwzorują przedmiot punktowy w obraz punktowy tylko wtedy, gdy światło pada na soczewkę pod małymi kątami, dla których w przybliżeniu można przyjąć, że  $\sin \varphi = \varphi$  ( $\varphi$  mierzone w radianach). Warunek ten jest spełniony dla soczewek cienkich. Soczewki występujące w większości przyrządów optycznych należy traktować jako soczewki grube, dla których nie można stosować tego upraszczającego założenia. Takie soczewki wykazują odstępstwa od wzoru soczewkowego:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{x} + \frac{1}{y} = \left( \frac{n_2}{n_1} - 1 \right) \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \quad (1)$$

gdzie:  $f$  jest to ogniskowa soczewki,

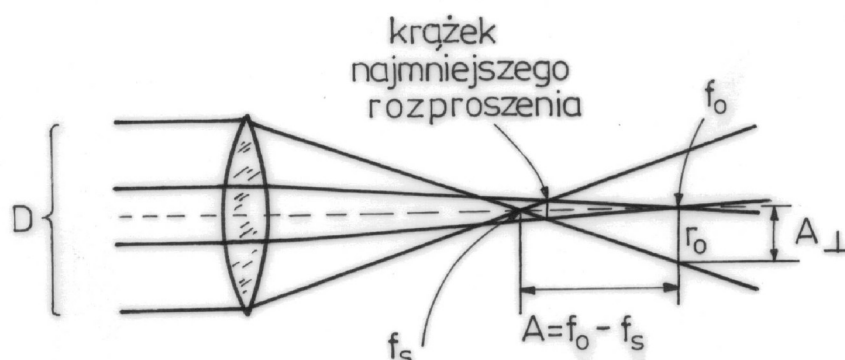
$x, y$  – odległości przedmiotu i obrazu od soczewki,

$n_2$  - bezwzględny współczynnik załamania materiału soczewki,

$n_1$  - bezwzględny współczynnik załamania ośrodka, w którym znajduje się soczewka. Dla powietrza  $n_1 = 1$ .

$r_1$  i  $r_2$  – promienie krzywizny soczewki. Dla soczewek grubych występują różnego rodzaju wady odwzorowań powodujących zniekształcenia obrazów i brak ostrości.

Jedną z takich wad jest aberracja sferyczna. Występuje ona wtedy gdy promienie przechodzące przez różne strefy soczewki tworzą ogniska w różnych miejscach (rys. 1).



Rys. 1. Aberracja sferyczna

Promienie skrajne szerokiej wiązki równoległej padającej na soczewkę skupiającą o znacznej średnicy załamują się w ognisku leżącym bliżej soczewki, natomiast promienie bliskie osi optycznej skupiają się dalej od soczewki. Odległość ognisk dla promieni przyosiowych i skrajnych jest miarą aberracji sferycznej podłużnej  $A_l = f_0 - f_s$ . Na ekranie ustawionym prostopadle do osi optycznej zamiast ogniska punktowego obserwujemy krążek, którego promień zmniejsza się gdy ekran odsuwamy od ogniska promieni skrajnych, osiąga wartość minimalną a następnie wzrasta. Promień krążka mierzony w płaszczyźnie ogniskowej promieni przyosiowych jest miarą aberracji sferycznej poprzecznej  $A_{\perp}$ . Związek między aberracją podłużną i poprzeczną można znaleźć na podstawie rys. 1.

$$\frac{A_{\perp}}{D/2} = \frac{f_0 - f_s}{f_s} \quad \Rightarrow \quad A_{\perp} = \frac{D}{2} \frac{f_0 - f_s}{f_s} \quad (2)$$

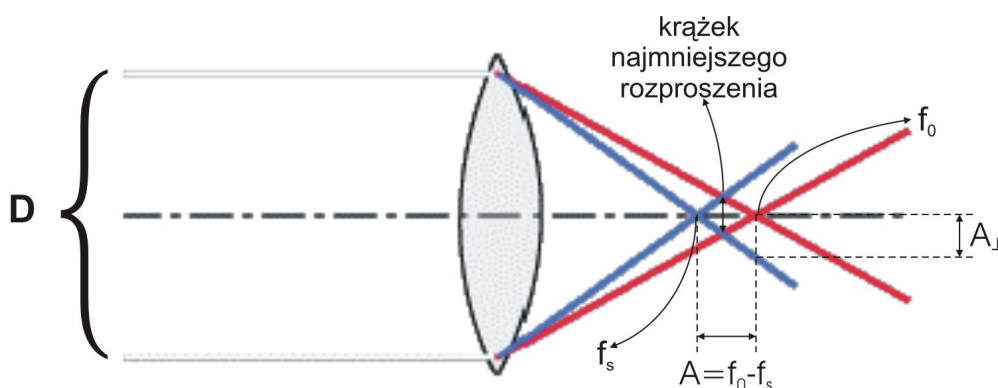
gdzie: D jest średnicą soczewki lub przesłony ograniczającej wiązkę promieni padających na soczewkę (D zwie się również aperturą).

Wielkość aberracji sferycznej zależy od promieni krzywizn powierzchni soczewki. Zależy również od tego która powierzchnia soczewki jest zwrócona w stronę źródła światła. Np. dla soczewki płasko-wypukłej aberracja sferyczna będzie większa jeżeli zwrócimy ją w stronę źródła światła stroną płaską. Aberracja sferyczna maleje wraz ze zmniejszeniem apertury i zwiększeniem współczynnika załamania materiału soczewki. Aby więc zmniejszyć aberrację sferyczną stosuje się różnego rodzaju przesłony ograniczające wiązkę światła padającego do wąskiej wiązki przyosiowej, traci się w tym wypadku na jasności obrazu. Przesłony o różnych rozmiarach i położeniu odgrywają dużą rolę w takich przyrządach optycznych jak aparat fotograficzny, mikroskop, luneta. Aberrację sferyczną można również zmniejszyć stosując układ o dodatniej ogniskowej, złożony z soczewki skupiającej i rozpraszającej. Dla soczewki rozpraszającej różnica ogniskowych dla promieni przyosiowych i skrajnych ma wartość ujemną a więc przeciwną do znaku aberracji podłużnej dla soczewki skupiającej. Soczewka rozpraszająca kompensuje więc aberrację sferyczną podłużną soczewki skupiającej. Inną wadą soczewek jest aberracja chromatyczna związana z rozszczepieniem (dyspersją) światła padającego na soczewkę wywołaną zależnością współczynnika załamania szkła soczewki od długości fali światła padającego na soczewkę. Promienie każdej barwy będą miały inne ognisko. Najsilniej załamywane są promienie fioletowe, ich ognisko leży więc bliżej soczewki aniżeli ognisko promieni czerwonych załamywanych słabiej (rys.2). Odległość ognisk dla promieni czerwonych i fioletowych  $A_{\perp}^{ch} = f_{cz} - f_f$  jest miarą aberracji chromatycznej podłużnej. Korzystając ze wzoru (1) możemy zapisać:

$$f_{cz} - f_f = f_{cz} f_f (n_{cz} - n_f) \cdot \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \quad (3)$$

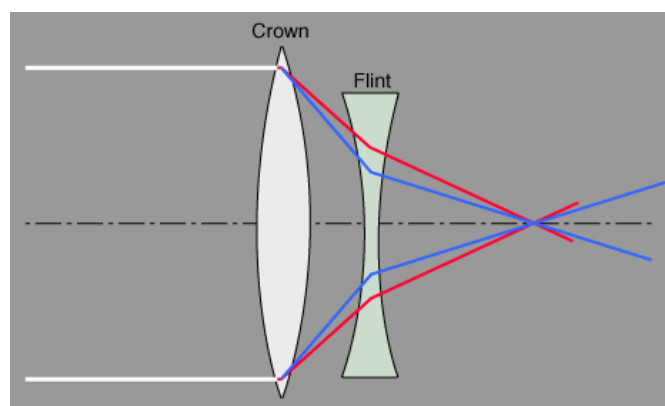
z którego wynika zależność tej wady od różnicy współczynników załamania czyli od dyspersji szkła soczewki a także od promieni krzywizn. Aberracja chromaticzna powoduje, że obraz przedmiotu punktowego oglądany w świetle białym będzie plamką o różnym zabarwieniu. Np. obraz oglądany w płaszczyźnie promieni czerwonych, fioletową obwódkę. Korzystając z rys. 2 i prostych zależności geometrycznych możemy wyprowadzić wzór na aberrację chromaticzną poprzeczną, którą definiujemy jako promień najmniejszego krążka:\*

$$\frac{A_{\perp}^{chr}}{\frac{1}{2}(f_{cz} - f_f)} \approx \frac{\frac{1}{2}D}{f_f} \rightarrow A_{\perp}^{chr} \approx \frac{1}{4}D \frac{f_{cz} - f_f}{f_f} \quad (4)$$



Rys. 2. Aberracja chromaticzna

Aberrację chromaticzną możemy skompensować przez zastosowanie układu o dodatniej ogniskowej (zwanego achromatem) złożonego z dwóch soczewek, jednej skupiającej ze szkła zwykłego (crown) i drugiej rozpraszającej ze szkła ołowiowego (flint) (rys.3).



Rys.3. Układ do kompensacji aberracji chromaticznej (achromat)

\* Przy wyprowadzeniu wzoru przyjmujemy w przybliżeniu, że krążek ten leży w połowie odcinka równego  $A_{ll}^{chr} = f_{cz} - f_f$

Soczewka rozpraszająca kompensuje rozszczepienie dawane przez soczewkę skupiającą (aberracja chromatyczna soczewki rozpraszającej ma znak przeciwny). Pokrycie się ognisk czerwonego i fioletowego nie oznacza, że ogniska innych barw również się pokrywają. Wybór długości fali dla których zachodzi korekcja zależy od celu, dla którego zaprojektowano układ. Np. błona fotograficzna jest bardziej czuła na barwę w niebieską niż oko ludzkie, dlatego obiektywy fotograficzne są achromatyzowane dla barw bliższych niebieskiej. Niektóre układy są achromatyzowane dla trzech barw (np. niektóre obiektywy mikroskopów). Układ złożony jest wtedy z trzech soczewek zwanych apochromatem. Kompensację aberracji chromatycznej można również uzyskać dla dwóch soczewek skupiających, wykonanych z tego samego szkła i oddalonych na odległość  $d = \frac{f_1 \div f_2}{2}$ . Tego typu układy stosowane są w okularach np. lunet i mikroskopów.

Inne wady soczewek, których nie będziemy badać w ćwiczeniu to koma i astygmatyzm. Powstają one wówczas, gdy wiązka światła padająca na soczewkę nie jest symetryczna w stosunku do osi optycznej układu (wiązka światła pada skośnie na soczewkę). W przypadku komy obrazem punktu będzie krążek z rozszerzającym się ogonem (podobnym do komety). W przypadku astygmatyzmu obrazem punktu będzie plama w kształcie elipsy, która w pewnym położeniu przyjmuje kształt odcinka poziomego w innym położeniu natomiast odcinka pionowego.

### III. Zestaw pomiarowy

Ława optyczna, żarówka z oprawką, transformator, kolimator, przezroczka jako przedmiot, soczewka, przesłony, filtry barwne, matówka na stoliku krzyżowym z noniuszem, lupa, przymiar metrowy

### IV. Przebieg ćwiczenia

#### **UWAGA: Żarówkę zasilać napięciem 9 V**

#### 1. Wyznaczanie miary aberracji sferycznej

- a) na jednym końcu ławy ustawić na stałe żarówkę, kolimator i przedmiot (oświetlone światłem z kolimatora przezroczce), na drugim końcu stolik krzyżowy z matówką spełniającą rolę ekranu. Skalę noniusza ustawić w pozycji zerowej.
- b) Między przedmiotem i matówką ustawić soczewkę zwróconą częścią wypukłą w stronę źródła światła; przed soczewką ustawić przesłonę przepuszczającą promienie skrajne,
- c) Przedmiot, soczewkę i przesłonę należy ustawić tak, by ich środki leżały na jednej prostej pokrywającej się z osią optyczną soczewki, a płaszczyzny przedmiotu i przysłony były do niej prostopadłe,
- d) Soczewkę z przesłoną i matówką ustawić w takiej odległości od przedmiotu, aby na matówce uzyskać ostry, pomniejszony obraz przezroczca. Ostrość obrazu ustalamy za pomocą lupy,

- e) Za pomocą śrub przymocować do ławy soczewkę, przesłonę i stolik krzyżowy z matówką,
  - f) Zmierzyć przymiarem metrowym odległość przedmiotu i obrazu od soczewki,
  - g) Nie zmieniając pozycji przedmiotu i soczewki, czynności d i f powtórzyć pięciokrotnie,
  - h) Umieścić przed soczewką (nie zmieniając położenia soczewki i stolika krzyżowego) przesłonę przepuszczającą promienie środkowe,
  - i) Uzyskać ostry obraz przedmiotu przesuwając matówkę na stoliku za pomocą śruby stolika krzyżowego. Odległością obrazu będzie wówczas wartość zmierzona w punkcie (f), plus wskazania noniusza. Czynność tę powtórzyć pięciokrotnie,
  - j) Czynności opisane w punktach a – i powtórzyć dla soczewki zwróconej w stronę źródła częścią płaską,
2. Wyznaczenie miary aberracji chromatycznej
    - a) obok przedmiotu umieścić filtr czerwony; zdjąć przesłonę,
    - b) wykonać czynności opisane w punktach 1 a – g pamiętając o ustawieniu noniusza w pozycji 0,
    - c) umieścić obok przedmiotu filtr fioletowy i wykonać czynności opisane w punkcie 1 „i” pamiętając, aby nie zmieniać położenia soczewki i stolika krzyżowego.
  3. Wyniki pomiarów wpisać do tabeli

## V. Tabele pomiarowe

**Tabela 1**

	Promienie skrajne				Promienie środkowe				
	$x_1$	$y_1$	$f_1$	$f_{1sr}$	$x_1$	$y_2$	$f_2$	$f_{2sr}$	
A	1								
	·								
	5								
B	1								
	·								
	5								

A – soczewka zwrócona częścią wypukłą w stronę źródła

B - soczewka zwrócona częścią płaską w stronę źródła

**Tabela 2**

L.p.	Filtr fioletowy				Filtr czerwony				$f_f - f_{cz}$
	$x_1$	$y_1$	$f_f$	Wartość średnia $f_f$	$x_1$	$y_1$	$f_{cz}$	Wartość średnia $f_{cz}$	
1.									
.									
.									
5									

### **VI. Opracowanie ćwiczenia**

Ogniskowe soczewki obliczyć z równania soczewki. Miara podłużnej aberracji sferycznej  $d$  będzie różnica ogniskowych obliczonych dla promieni skrajnych i promieni środkowych. Miarą podłużnej aberracji chromatycznej będzie różnica ogniskowych dla barwy fioletowej i czerwonej.

### **VII. Rachunek błędu**

Błąd pomiaru aberracji sferycznej i chromatycznej wynosi  $a = 2\Delta f$ . Za błąd  $\Delta f$  przyjmujemy największą różnicę pomiędzy wartością średnią ogniskowej i mierzoną.

### **VIII. Literatura**

1. T. Dryński – Ćwiczenia laboratoryjne z fizyki
2. A. Zawadzki, H. Hofmokr – Laboratorium fizyczne
3. H. Szydłowski – Pracownia fizyczna
4. Sz. Szczeniowski – Fizyka doświadczalna, cz. IV, Optyka