

**POLITECHNIKA ŚLĄSKA**  
**WYDZIAŁ CHEMICZNY**

KATEDRA FIZYKOCHEMII I TECHNOLOGII  
POLIMERÓW

---

***LABORATORIUM Z FIZYKI***

***I BIOFIZYKI***

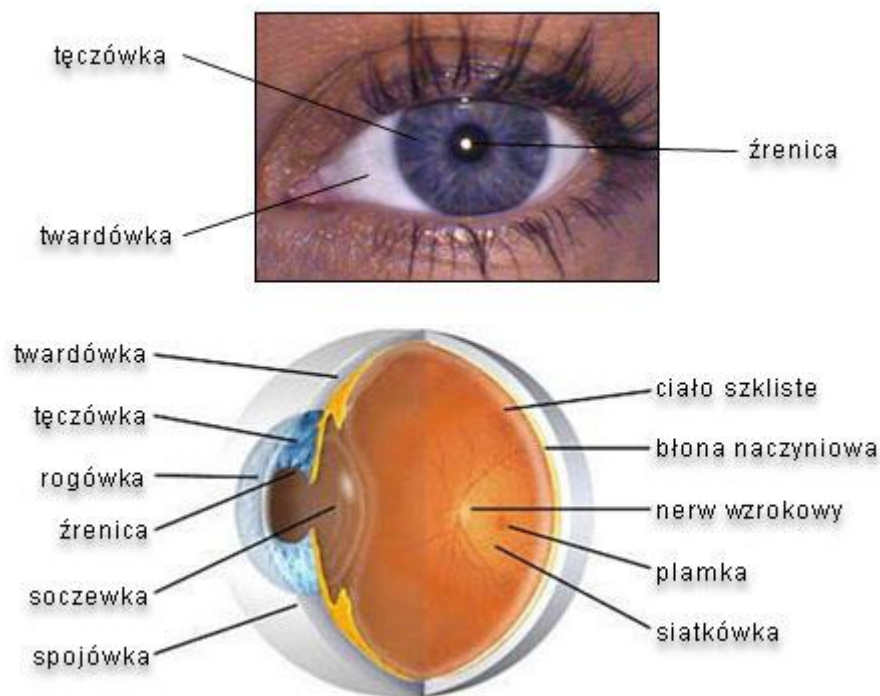
**CZEŚĆ A**

***Budowa i funkcjonowanie oka ludzkiego  
jako złożonego układu optycznego***

## 8.1. Wprowadzenie

### 8.1.1 Budowa oka ludzkiego

Oko ludzkie jest w przybliżeniu kulą o średnicy 25 milimetrów. Gałka oka ludzkiego otoczona jest sprężystą błoną, podzieloną na trzy warstwy: wewnętrzną - siatkówkę, środkową - naczyniówkę i zewnętrzną - twardówkę. Twardówka stanowi mocną, zbitą łącznotkankową osłonę ochraniającą wewnętrzną, delikatną strukturę i nadającą oku znaczną sztywność. Przednia, nieco uwypuklona i przezroczysta część twardówki to rogówka, przez którą przechodzą promienie świetlne. Znajdująca się za nią część naczyniówki o kształcie zabarwionej przesłony, nazywa się tęczówką, a okrągły otwór w jej środku – źrenicą (rys.1).



Rys.1 Budowa oka ludzkiego

Przestrzeń pomiędzy soczewką, tęczówką i rogówką, tzw. komora przednia wypełniona jest cieczą wodnistą. Wnętrze gałki ocznej za soczewką wypełnione jest przezroczystą masą tzw. ciałem szklistym. Oba płyny mają duże znaczenie w utrzymywaniu kształtu oka.

Wewnętrzna ścianka gałki ocznej pokryta jest siatkówką, stanowiącą płaskie rozgałęzienie nerwu wzrokowego o dwóch rodzajach zakończeń w postaci tzw. czopków

i pręcików. Oko ludzkie zawiera około 7 mln czopków i 120 mln pręcików. Zdolność rozróżniania barw zależy od czopków i one odgrywają główną rolę w przekazywaniu wrażeń przy silnym oświetleniu. W siatkówce występują trzy rodzaje czopków wrażliwych na trzy podstawowe barwy: czerwień, zieleń i fiolet. Poszczególne typy czopków zawierają odpowiednie związki fotochemiczne, które w wyniku zadziałania bodźców świetlnych o odpowiedniej długości fali (a co za tym idzie barwy), ulegają rozkładowi i wywołują one odpowiednie wrażenia wzrokowe. Odebrane bodźce przekształcane są w impulsy nerwowe, które poprzez nerw wzrokowy trafiają do ośrodków w korze mózgowej, gdzie następuje interpretacja i powstanie odpowiednich wrażeń barwnych.

Największe skupienie czopków (około 150 000 na 1 mm<sup>2</sup>) znajduje się mniej więcej na wprost źrenicy i tworzy tzw. plamkę żółtą. Prosta przechodząca przez środek źrenicy i przez plamkę żółtą nazywa się linią widzenia. Jest ona odchylona o około 5-7 minut od osi optycznej oka, którą stanowi prosta przechodząca przez środek powierzchni łamiącej i przez tzw. punkt węzłowy.

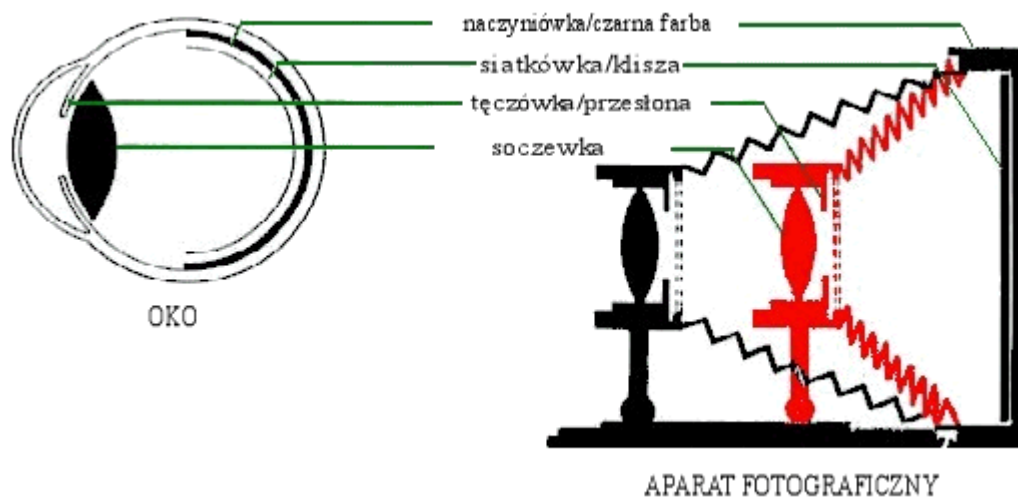
Pręciki są rozmieszczone na obwodzie siatkówki. Każdy pręcik zawiera barwnik wrażliwy na światło, zwany rodopsyną. Rodopsyna zbudowana jest z opsyny i części barwnikowej - retinenu (aldehyd witaminy A). Pochłonięta energia świetlna powoduje przekształcenie rodopsyny. W wyniku izomeryzacji, rodopsyna, która zawiera formę cis-retinen zostaje zamieniona w lumirodopsynę, która jest nietrwałym związkiem zawierającym formę trans-retinen. Następnie lumirodopsyna przekształca się w metarodopsynę, która rozpada się na wolny retinen i opsynę. Odbiór bodźców wzrokowych zachodzi, gdy padające promienie świetlne napotkają rodopsynę, powodując jej izomeryzację z formy cis na trans. Dalsze pobudzenie pręcików możliwe jest dopiero po procesie resyntezy, w której trans-retinen ulega przekształceniu w formę cis. Ta forma łączy się z opsyną, tworząc rodopsynę, która warunkuje proces widzenia.

Pręciki reagują one słabo na barwy, ale są około 1000 razy czulsze na światło, niż czopki. Służą głównie do przekazywania wrażeń przy słabym oświetleniu, dlatego też wszystkie przedmioty oglądane przy bardzo słabym oświetleniu wydają się szare.

Miejsce wejścia nerwu ocznego jest zupełnie pozbawione czopków i pręcików i tworzy tzw. plamkę ślepą.

### 8.1.2. Układ optyczny oka

Oko ludzkie stanowi przyrząd optyczny działający na zasadzie praw optyki geometrycznej. Widzenie przedmiotu, znajdującego się przed okiem, odbywa się podobnie jak w aparacie fotograficznym (rys.2). Promienie, idące od obrazu, załamują się w soczewce oraz w innych ośrodkach przezroczystych oka i wytwarzają na siatkówce obraz rzeczywisty, odwrócony i zmniejszony. Rolę soczewek obiektywu spełniają rogówka i soczewka oka, rolę przysłony - tęczówka, a warstwy światłoczułej kliszy - siatkówka.



Rys.2 Porównanie oka i aparatu fotograficznego

Światło wpadające do oka biegnie przez rogówkę, soczewkę i ciało szkliste do siatkówki wywołując wrażenie wzrokowe przekazywane do mózgu za pośrednictwem nerwów wzrokowych. Rogówka, wraz z cieką wodnistą, soczewką i ciałem szklistym, stanowią układ skupiający promienie świetlne tak, by na siatkówce pojawiał się ostry obraz obserwowanego przedmiotu.

Dokładne rozpatrywanie powstawania obrazów w oku jest dosyć trudne, gdyż oko stanowi skomplikowany układ osiowy powierzchni łamiących. W uproszczonej postaci można przedstawić schemat oka w postaci tzw. oka zredukowanego, dla którego przyjmuje się:

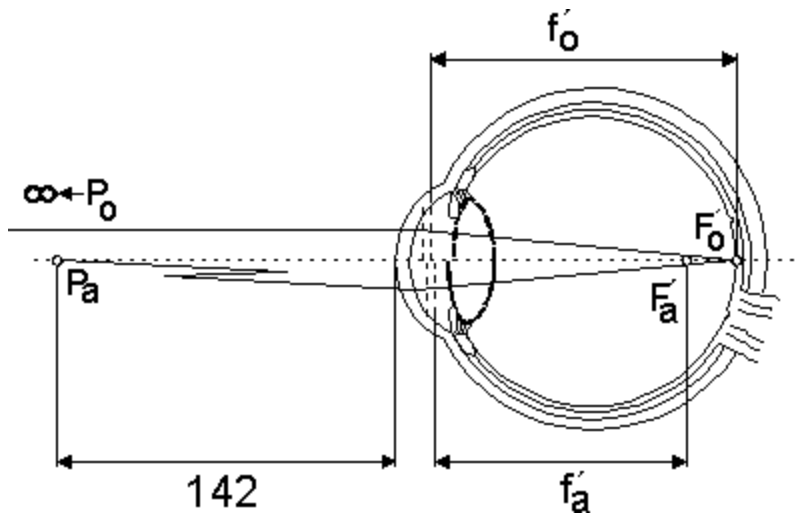
1. załamanie zachodzi tylko na powierzchni rogówki, której promień krzywizny wynosi 5 mm
2. współczynnik załamania całego oka równa się 1.33.

Ważną zdolnością oka jest akomodacja. W oku ludzkim odległość soczewki od siatkówki jest stała, a przystosowanie oka do oglądania przedmiotów z różnych odległości polega na zmianie grubości soczewki ocznej, zmieniającej jej zdolność skupiającą. Taki proces nosi nazwę akomodacji. Zdolność zbierającą oka można znaleźć na podstawie równania soczewkowego

$$\frac{1}{a} + \frac{n}{b} = \frac{1}{f} = D \quad (8.1)$$

gdzie  $a$  - jest odległością przedmiotu od soczewki,  $b$  - odległością obrazu od soczewki,  $n$  to współczynnik załamania oka.

Najistotniejszym elementem układu skupiającego promienie świetlne jest soczewka, której współczynnik załamania jest różny w poszczególnych jej warstwach. W jądrze wynosi 1,40, a w warstwach zewnętrznych 1,33. Dodatkowo, przez różne napięcie mięśnia soczewki staje się ona bardziej lub mniej wypukła. Dzięki temu zdolność skupiająca oka jest zmienna, co przy praktycznie stałej odległości układu optycznego oka od siatkówki umożliwia tworzenie na siatkówce obrazów przedmiotów bliskich i dalekich. Właściwość tę nazywa się akomodacją oka. Akomodacja oka ma pewien skończony zakres, wyznaczony przez zdolność do odwzorowania ostro na siatkówce obszaru między punktami osiowymi  $P_0$  i  $P_a$ . Najbliższy punkt, na jaki oko zdoła skupić spojrzenie, nosi nazwę punktu bliży wzrokowej  $P_a$ . Punktem dali wzrokowej  $P_0$  nazywa się najdalszy punkt, jaki oko widzi wyraźnie. W tym przypadku oko nie akomoduje zupełnie. Odległość od punktu bliży wzrokowej od punktu dali wzrokowej nazywa się zakresem akomodacji.



Rys. 3 Schemat optyczny przeciętnego oka miarowego.

Oko normalne widzi punkty bardzo dalekie, tzn., że promienie równoległe dają obraz na siatkówce. Taki stan oka nazywa się metropią lub stanem miarowym. Odchylenia od tego stanu to ametropia. Należą do niej miopia (krótkowzroczność) i hipermetropia (dalekowzroczność). W oku krótkowidza promienie równoległe skupiają się przed siatkówką, wobec czego dla usunięcia tej wady stosuje się soczewki rozpraszające. W oku dalekowidza promienie równoległe przecinają się poza siatkówką, wobec czego stosuje się soczewki skupiające. Najczęściej spotykaną przyczyną ametropii jest zniekształcenie gałki ocznej. Oko krótkowidza jest najczęściej wydłużone, oko dalekowidza jest najczęściej spłaszczone.

Inną wadą oka ludzkiego jest astygmatyzm. Astygmatyzm powstaje przy zniekształceniach rogówki albo soczewki ocznej. Zmiana kształtu kulistej rogówki powoduje duże zmiany w ostrości obrazu, zniekształcenie soczewki ma mniejsze znaczenie z uwagi na to, że współczynniki załamania środowiska otaczającego soczewkę i samej soczewki mało się różnią od siebie. Astygmatyzm oka mierzy się przyrządami zwanymi oftalmometrami.

Sztwygnięcie soczewki ocznej z wiekiem powoduje zmniejszanie zakresu akomodacji w ten sposób, że punkt bliski  $P_a$  zbliża się do punktu dalekiego  $P_0$ . Proces ten nazywa się prezbiopią.

## 8.2 Pomiary

### 8.2.1 Akomodacja oka

**Celem** tej części ćwiczenia jest wyznaczenie punktu bliży i dali wzrokowej.

**Potrzebne do wykonania:** ołówek lub długopis, linijka.

**Uwaga !** Każdy student jest kolejno osobą badaną i badającą.

Osoba badana trzyma w wyciągniętej ręce ołówek i jednym okiem obserwuje jego czubek, a następnie wolno przybliża ołówek do oka. Po ustaleniu punktu, w który badany dokładnie widzi czubek ołówka, badający mierzy odległość między ołówkiem a okiem. W podobny sposób wyznaczany punkt dali wzrokowej, znajdując najdalszy punkt, który widzimy wyraźnie.

### 8.2.2 Rozmieszczenie pręcików i czopków w siatkówce oka u człowieka

**Cel:** Określić zależność postrzegania barwy przedmiotu od jego położenia w polu widzenia.

**Potrzebne do wykonania:** niewielki przedmiot w jaskrawym kolorze (np. czerwony długopis)

**Uwaga:** Każdy student jest kolejno osobą badaną i badającą.

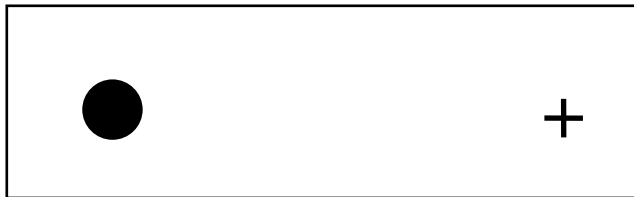
Osoba badana zasłania dłonią prawe oko, wpatrując się lewym w jeden punkt przed sobą, a osoba badająca powoli przesuwa barwny przedmiot od prawej strony głowy osoby badanej na linię jej wzroku. Badany informuje słownie eksperymentatora o pojawieniu się przedmiotu w polu widzenia (określamy kąt  $\alpha_1$ ), a następnie stara się go opisać bliżej,

sygnalizując moment, w którym może już określić jego kolor (określamy kąt  $\alpha_2$ ).  
Ćwiczenie powtarzamy zasłaniając lewe oko.

### 8.2.3 Plamka ślepa

**Cel:** Stwierdzić obecność plamki ślepej w oku człowieka.

**Potrzebne do wykonania:** schemat do stwierdzania obecności plamki ślepej



Do stwierdzenia obecności plamki ślepej wykorzystujemy schemat. Zasłaniamy jedno oko, a drugim wpatrujemy się w krzyżyk. Schemat ustawiamy tak, aby krzyżyk znajdował się w polu widzenia bliżej nosa, a krążek bliżej części skroniowej czaszki. Następnie schemat wolno odsuwamy od oka (krzyżyk musi przez cały czas znajdować się w osi widzenia). Początkowo widzimy zarówno krzyżyk, jak i krążek. Przy pewnej odległości schematu od oka krążek staje się niewidoczny.

### 8.3 Wyniki, obliczenia i niepewność pomiaru

1. Obliczyć zakres akomodacji oka dla każdego studenta sekcji. Przeprowadzić stosowną analizę niepewności pomiaru.
2. W zadaniach nr II i III należy opisać i wytłumaczyć obserwowane zjawiska.



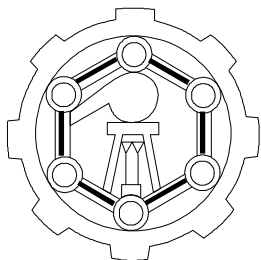
3. Narysować bieg promienia świetlnego w oku normalnym, oku krótkowidza i dalekowidza, oraz bieg promienia świetlnego po zastosowaniu odpowiednich soczewek korygujących (umieścić w sprawozdaniu).

#### **8.4 Pytania**

1. Omówić budowę i funkcjonowanie oka ludzkiego.
2. Co to jest akomodacja?
3. Omówić i narysować układ optyczny oka.
4. Oko, a aparat fotograficzny – omówić.
5. Omówić wady wzroku i metody ich korekcji.

#### **8.5 Literatura**

1. Jaroszy F., Biofizyka. PZWL, Warszawa, 2001.
2. McLaughlin D., Stamford J., White D., Fizjologia człowieka. Krótkie wykłady. PWN, Warszawa, 2008.
3. Villee C. A., Biologia, Państwowe Wydawnictwo Rolnicze i Leśne, Warszawa, 1990.
4. Bochenek A., Reicher M., Anatomia człowieka. PZWL, Warszawa, 2006
5. Pilawski A., Podstawy biofizyki. PZWL, Warszawa, 1985.
6. Suder E., Brużewicz Sz., Anatomia człowieka. Podręcznik i atlas dla studentów licencjatów medycznych. Górnicki, Wrocław, 2008.



**POLITECHNIKA ŚLĄSKA**  
**WYDZIAŁ CHEMICZNY**

KATEDRA FIZYKOCHEMII I TECHNOLOGII  
POLIMERÓW

---

***LABORATORIUM Z FIZYKI***  
***I BIOFIZYKI***

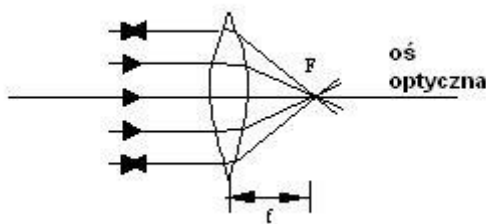
**CZEŚĆ B**

***Wyznaczanie ogniskowej soczewki za***  
***pomocą ławy optycznej***

## Wstęp

Jednym z najprostszych urządzeń optycznych powszechnego użytku jest bez wątpienia soczewka cienka. Rozwój urządzeń optycznych, których głównym elementem są soczewki, przypada na wiek XVI oraz XVII i dotyczy takich przedmiotów jak okulary, aparaty fotograficzne, szkła powiększające, teleskopy, lornetki, mikroskopy. Soczewkę nazywamy cienką, gdy jej grubość jest mała w porównaniu z promieniem krzywizny. Najczęściej spotykany typ soczewki to soczewka sferyczna, której przynajmniej jedna powierzchnia jest wycinkiem sfery. Każda z powierzchni takiej soczewki może być wypukła, wklęsła lub płaska i stąd mówi się o soczewkach dwuwypukłych, płasko-wklęsłych itd. Stosuje się również soczewki będące wycinkiem walca nazywane soczewkami cylindrycznymi, niemniej jednak naszą uwagę skupimy na soczewkach sferycznych.. Na rysunku 1 przedstawiono bieg promieni (równoległych do osi optycznej soczewki) przez soczewkę sferyczną obustronnie wypukłą.

Zakładamy, że soczewka wykonana jest ze szkła lub przezroczystego plastiku, tak że współczynnik załamania materiału soczewki jest większy niż otoczenia. Oś optyczna soczewki, jest to prosta przechodząca przez środek soczewki i prostopadła do jej obu powierzchni (Rys 1). Z prawa Snelliusa wynika, że każdy promień na rysunku 1 ulega załamaniu w kierunku osi optycznej. Ogniskiem  $F$  soczewki zbierającej nazywamy punkt, w którym skupia się wiązka promieni po przejściu przez soczewkę. W soczewce rozpraszającej w ognisku przecinają się przedłużenia promieni przechodzących.



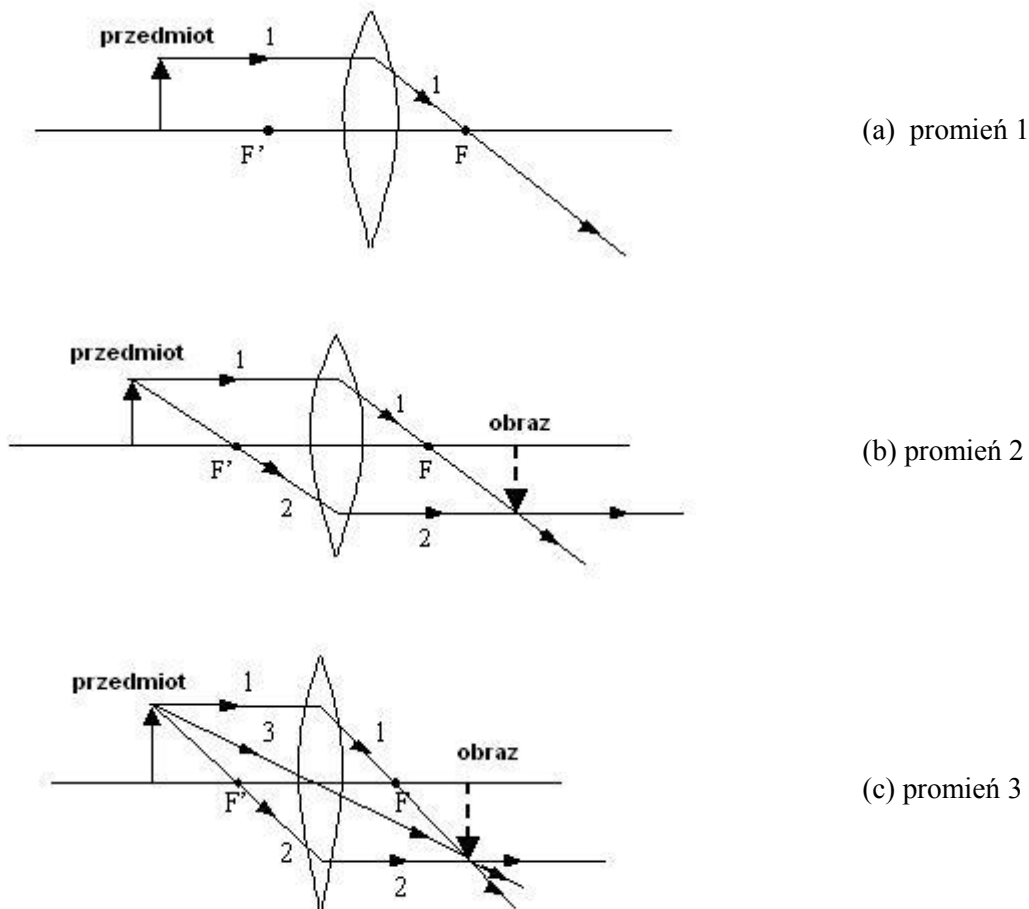
Rys. 1. Bieg promienia przechodzącego przez cienką soczewkę skupiającą.

Ogniskową  $f$  soczewki nazywamy odległość ogniska od powierzchni środkowej, czyli powierzchni prostopadłej do osi optycznej przechodzącej przez środek geometryczny soczewki. Jeżeli znamy  $f$  w łatwy sposób można wyznaczyć obraz przedmiotu. Obraz

uzyskany za pomocą cienkiej soczewki wykreślamy stosując konstrukcję przedstawioną na rys.2. W konstrukcji tej pod uwagę bierzemy trzy promienie:

- biegnący przez środek optyczny soczewki, który nie zmienia kierunku;
- równoległy do osi optycznej, który po załamaniu przechodzi przez ognisko  $F'$ ;
- biegnący przez ognisko, który po załamaniu biegnie równoległe do osi optycznej.

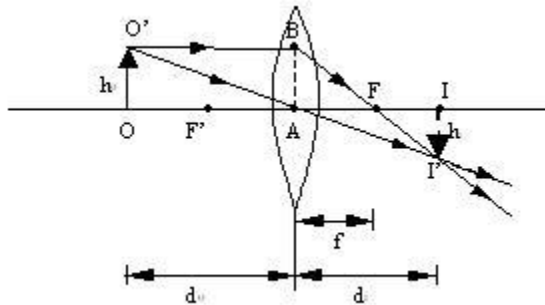
W praktyce jednoznaczne położenie obrazu określają dwa z tych promieni.



Rys.2 Sposób wyznaczania obrazu za pomocą promieni przechodzących przez soczewkę skupiającą.

Obraz powstający w wyniku przecięcia się promieni po przejściu przez soczewkę nazywamy *rzeczywistym*. W przypadku gdy promienie po przejściu przez soczewkę stają się rozbieżne, obraz powstaje w wyniku przecięcia się promieni przedłużonych i obraz taki nazywamy *pozornym*.

Wyprowadzimy równanie soczewki cienkiej, które opisuje związek ogniskowej soczewki z odległością przedmiotu i obrazu od soczewki. Niech  $d_0$  będzie odległością przedmiotu od środka soczewki,  $d_i$  odległością obrazu od środka soczewki, natomiast  $h_0$  i  $h_i$  odpowiadają wielkości przedmiotu i wielkości obrazu.



Rys 3. Rysunek pomocniczy do wyprowadzenia równania cienkiej soczewki skupiającej.

Na rysunku 3 przedstawiono bieg promieni przez cienką soczewkę sferycznie obustronnie wypukłą. Trójkąty  $F'I'I$  i  $FBA$  są podobne, ponieważ kąt  $AFB$  jest równy kątowi  $IFI'$ ; dlatego:

$$\frac{h_i}{h_0} = \frac{d_i - f}{f} \quad (1)$$

gdzie długość  $AB = h_0$ . Trójkąty  $OAO'$  i  $IAI'$  są podobne, dlatego:

$$\frac{h_i}{h_0} = \frac{d_i}{d_0} \quad (2)$$

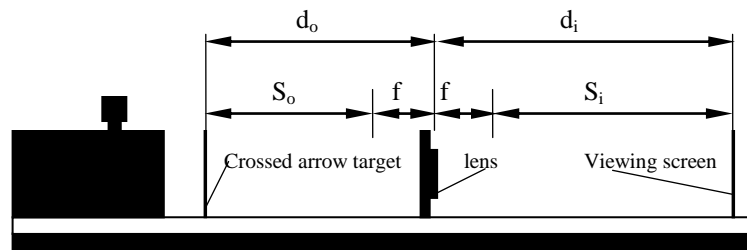
Przyrównujemy do siebie prawe strony równań (1) i (2), dzielimy przez  $d_i$ , a następnie po przekształceniu otrzymujemy:

$$\frac{1}{d_0} + \frac{1}{d_i} = \frac{1}{f} \quad (3)$$

Równanie (3) nazywamy równaniem soczewki cienkiej. Powiększeniem liniowym  $m$  nazywamy stosunek wielkości obrazu do wielkości przedmiotu  $m = h_i/h_0$ . Jak wynika z rysunku 3 otrzymujemy:

$$m = \frac{h_i}{h_o} = -\frac{d_i}{d_o} \quad (4)$$

### Wykonanie ćwiczenia



Rys 3. Zestaw pomiarowy.

Zestaw pomiarowy składa się z łąwy optycznej, którą stanowi metalowa szyna o dł. ok. 1,5 m, zaopatrzona w milimetrową skalę. Na jednym końcu skali znajduje się jasno oświetlony przedmiot w nieprzezroczystej tarczy. Badaną soczewką umieszczamy w odpowiedniej podstawce, którą można przesuwać wzdłuż łąwy. Obraz rzeczywisty, który daje soczewka powstaje na ekranie znajdującym się na drugim końcu łąwy.

Przesuwamy wzdłuż łąwy optycznej podstawkę z umieszczoną na niej soczewką zbierającą i szukamy takiego jej położenia, przy którym powstający na ekranie obraz, powiększony lub pomniejszony, jest najostrzejszy. Notujemy odległość przedmiotu od soczewki, odległość obrazu (ekranu) od soczewki, mierzymy linijką o podziałce milimetrowej wielkość powstałego na ekranie obrazu oraz wielkość samego przedmiotu. Pomiar powtarzamy sześć razy .

### Wyniki pomiarów oraz obliczenia

Dane z pomiarów należy zebrać w tabeli 1.

Tabela 1

Dane			Obliczenia			
$d_0$ [mm]	$d_i$ [mm]	$h_i$ [mm]	$1/d_i + 1/d_0$	$f$ [mm]	$h_i/h_0$	$-d_i/d_0$
500						
450						
400						
350						
300						
250						
200						
150						
100						
75						
50						

Obliczyć odległość ogniskową soczewki  $f$  oraz powiększenia liniowe  $m$ . Oszacować błąd pomiaru za pomocą odchylenia standardowego. Końcowy wynik zapisać w postaci:

$$f = \bar{f} \pm S_{\bar{f}} \quad (5)$$

$$m = \bar{m} \pm S_{\bar{m}} \quad (6)$$

### Pytania

1. Bazując na równaniu soczewki wyjaśnij co stanie się z  $d_i$  jeśli zwiększymy  $d_0$ ? Co stanie się z  $d_i$  jeśli  $d_0$  będzie bardzo duże?
2. Jaka wartość  $d_0$  sprawi, że nie będzie można dostać obrazu na ekranie? Użyj równaia soczewki do wyjaśnienia pytania.
3. Jakie znasz rodzaje równań soczewek?

4. Jaki parametr decyduje o rodzaju otrzymanego obrazu?
5. Jakie rodzaje obrazów otrzymujemy w mikroskopie, kinie i w oku ludzkim.
6. Omów rodzaje obrazu powstającego po przejściu światła przez soczewkę. Podaj warunki, w jakich one powstają.
7. Wyprowadź równanie soczewki uwzględniające współczynnik załamania światła materiału soczewki.
8. Podaj rodzaje obrazu, jaki może powstać w zależności od położenia przedmiotu względem soczewki. Jaki obraz powstaje na ekranie w kinie?
9. Wyjaśnij zjawisko korekty wzroku przez okulary.
10. Wyprowadź prawo załamania światła z zasady Fermata.

### **Literatura**

1. Dryński T., Ćwiczenia laboratoryjne z fizyki, PWN, Warszawa, 1959
2. Resnick R., Halliday D., Fizyka, Tom 2, PWN, Warszawa, 1989
3. Szydłowski H., Pracownia fizyczna, PWN, Warszawa, 1994