

Laboratorium Optyki Geometrycznej i Instrumentalnej

Budowa układów optycznych

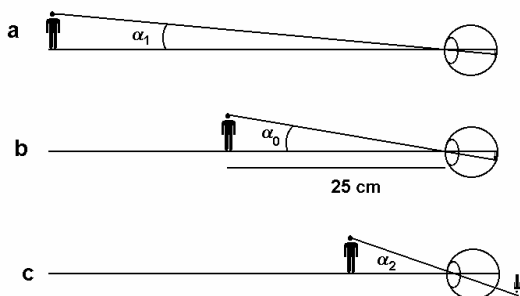
1. Cel Laboratorium

Celem ćwiczenia jest zapoznanie studentów z budowa podstawowych układów optycznych lupy, lunety Keplera i Galileusza oraz mikroskopu, samodzielna budowa układów optycznych na ławie oraz ich charakteryzacja

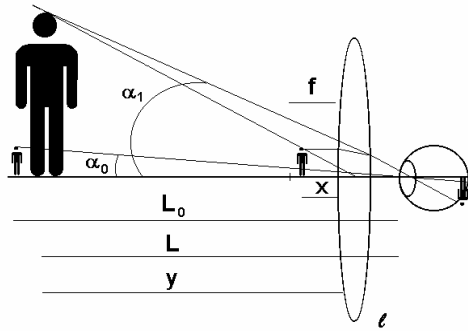
1. Opis układów optycznych

1.1. Lupa

Podstawowym układem optycznym jest pojedyncza soczewka skupiająca, lupa, która może służyć do powiększania obserwowanych obiektów wspomagając ludzkie oko, czyli tzw. szkło powiększające. ostre widzenie przedmiotów znajdujących się w różnej odległości od oka wymaga “dopasowania” ogniskowej tak, by obraz wypadł zawsze na siatkówce (akomodacja oka). Ponieważ wielkość obrazu na siatkówce oka rośnie z malejącą odległością przedmiotu od oka wprost proporcjonalnie do kąta widzenia przedmiotu α , korzystnie jest oglądać przedmioty z bliska. Warto także wprowadzić dodatkową miarę powiększenia, tzw powiększenie kątowe m_α . Powiększenie to dla trzech przypadków pokazanych na rys. 4-3 osiąga największą wartość dla przypadku c), gdy przedmiot znajduje się najbliżej oka. Niestety dla tego przypadku (odległość przedmiotu od oka mniejsza niż pewna minimalna odległość na którą pozwala zdolność akomodacji oka, tzw odległość dobrego widzenia) obraz jest duży ale nieostry. Przyjmuje się, że odległość dobrego widzenia, choć różna dla różnych ludzi, wynosi średnio około 25 cm.



Rys. 1. Ten sam przedmiot oglądany przez oko dla zmieniającej się odległości i związanej z nią kąta widzenia. a) przedmiot daleko, kąt widzenia α_1 , obraz mały. b) przedmiot w odległości dobrego widzenia, kąt widzenia α_0 , obraz większy. c) przedmiot bardzo blisko, kąt widzenia α_2 , obraz duży ale nieostry



Rys. 2. Oko wspomaganie lupą. Pokazano dwa przypadki: przedmiot w odległości dobrego widzenia L_0 (bez lupy), kąt widzenia α_0 ; przedmiot w odległości x , obraz pozorny w odległości y od lupy (L od oka), kąt widzenia α_1

Rys. 2. przedstawia działanie lupy. . Przedmiot, który z odległości dobrego widzenia (L_0) jest widziany pod kątem α_0 , może być, dzięki lupie, widziany pod znacznie większym kątem α_1 . Choć przedmiot znajduje się teraz bliżej oka (w odległości $x+l$), nie ma problemu z akomodacją, gdyż jego pozorny obraz, wytworzony przez lupę i widziany przez oko, znajduje się w odległości L , która powinna być nie mniejsza niż odległość dobrego widzenia L_0 . Odległość przedmiotu od lupy wynosi x , odległość obrazu pozornego od lupy wynosi y , odległość lupy od oka wynosi l , a ogniskowa lupy, f .

Powiększenie kątowe obrazu oglądanego przez lupę, odniesione do kątowej wielkości przedmiotu oglądanego z odległości dobrego widzenia L_0 bez lupy wyniesie:

$$m_\alpha = \frac{\alpha_1}{\alpha_0} . \quad (1)$$

Wielkość m_α powinna być dodatnia (obraz prosty), no i większa od jedności. Wprowadzając oznaczenia h i H na wysokość przedmiotu i obrazu, mamy dalej (w przybliżeniu małych kątów):

$$m_\alpha \cong \frac{H}{L} \cdot \frac{L_0}{h} = \frac{L_0}{L} \cdot \frac{-y}{x} \quad (2)$$

gdzie uwzględniliśmy fakt, że y jest ujemne (obraz pozorny). Korzystamy z równania Gaussa i wyrażamy odwrotność x przez różnicę odwrotności ogniskowej f i y , a następnie zastępujemy y przez L i l ($-y = L - l$):

$$m_\alpha \cong \frac{L_0}{L} \cdot \frac{-y}{x} = \frac{L_0}{L} \cdot (-y) \cdot \left(\frac{1}{f} - \frac{1}{y} \right) = \frac{L_0}{L} \cdot \left(\frac{L-l}{f} + \frac{L-l}{L-l} \right) \cong L_0 \cdot \left(\frac{1}{f} + \frac{1}{L} \right) \quad (3)$$

Najkorzystniej dla powiększenia obrazu na siatkówce oka jest by l było bliskie zera.

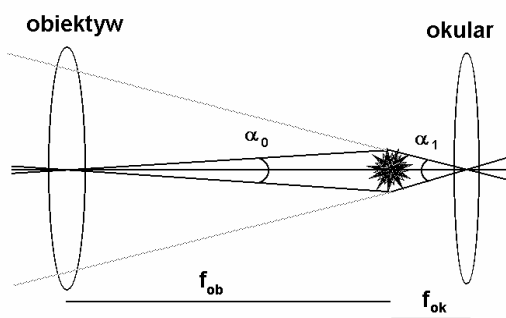
Po tych zmianach, uwzględniając, iż $\frac{1}{f} = D$, gdzie D jest mocą optyczną soczewki (lupy) otrzymujemy:

$$m_{\alpha} \cong L_0 \cdot \left[\frac{1}{L} + D \right] = L_0 \cdot D + \frac{L_0}{L}, \quad (4)$$

wyrażenie, z którego wnioskujemy, że powiększenie kątowe m_{α} jest zawarte pomiędzy L_0D (dla nieskończonej odległości obrazu od lupy, przedmiot w ognisku, swobodne oko) i L_0D+1 (dla obrazu znajdującego się w odległości dobrego widzenia L_0 od oka). Dla typowej lupy o mocy optycznej rzędu +10D (ogniskowa 10 cm) powiększenie kątowe będzie w takim razie zawarte pomiędzy 2.5 i 3.5 co odpowiada obserwacji bezpośredniej przedmiotu (przez osobę bez wad wzroku) z odległości 7 do 10 cm.

1.2 Luneta astronomiczna Keplera

Luneta astronomiczna Keplera składa się z dwóch soczewek zbierających o dwóch różnych ogniskowych, tzw obiektywu o stosunkowo długiej ogniskowej f_{ob} i okularu o krótkiej ogniskowej f_{ok} . Ponieważ dla bardzo odległych obiektów obraz wytworzony przez obiektyw w jego ognisku będzie rzeczywisty, pomniejszony i odwrócony (warto zauważyć, że powiększenie kątowe obiektywu jest jeden), uzyskanie większego od jedności powiększenia kąowego wymaga zastosowania drugiej soczewki zbierającej, tzw okularu, pracującego jak lupa. Maksymalizacja powiększenia wymaga zatem by, w przybliżeniu, ogniska obu soczewek pokrywały się (rys. 4-5).



Rys. 4-5. Luneta astronomiczna Keplera. W ognisku obiektywu powstaje obraz rzeczywisty, pomniejszony i odwrócony, który obserwujemy przez okular pracujący jako lupa. Cienkimi liniami pokazano przedłużenia promieni prowadzące do obrazu pozornego wytworzonego przez okular i obserwowanego przez oko.

Łatwo zauważyć, że przy takim ustawieniu powiększenie kątowe wyniesie:

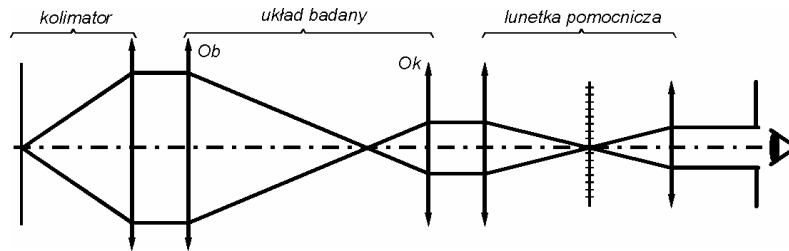
$$m_{\alpha} = \frac{\alpha_1}{\alpha_0} = \frac{h}{f_{ok}} \cdot \frac{f_{ob}}{h} = \frac{f_{ob}}{f_{ok}}, \quad (5)$$

gdzie h jest wysokością obrazu rzeczywistego w ognisku obiektywu. Ponieważ pozorny obraz wytworzony przez okular jest prosty, obserwowany przez lunetę Keplera obraz odległego obiektu (gwiazd itd) jest odwrócony, gdyż taki był jego obraz pośredni wytworzony przez obiektyw. Dla obserwacji astronomicznych wada ta nie ma jednak większego znaczenia.

1.3. Sposób zestawienia układu i justowanie

Podczas zestawienia modelowego układu lunety w laboratorium, ze względu na brak na ogół dostatecznie odległych punktów do obserwacji, wykorzystuje się jako przyrząd pomocniczy kolimator (przyrząd gotowy lub zestawiony z odpowiednich elementów optycznych). W laboratorium należy zestawić kolimator wykorzystując zjawisko paralaksy. Potrzebna jest do tego lunetka pomocnicza, która konstrukcyjnie ustawiona jest „na nieskończoność”. Na ławie optycznej należy ustawić w płaszczyźnie ogniskowej przedmiotowej obiektywu kolimatora przedmiot testowy. Obserwując obraz testu przez lunetkę, przesuwając poosiowo obiektyw, należy wyeliminować paralaksę (patrz literatura poz.1).

Przy zestawieniu układu lunety umieszcza się przed jej obiektywem kolimator, zaś za okularzem lunetkę pomocniczą. Układ na ławie przedstawia rys.6.



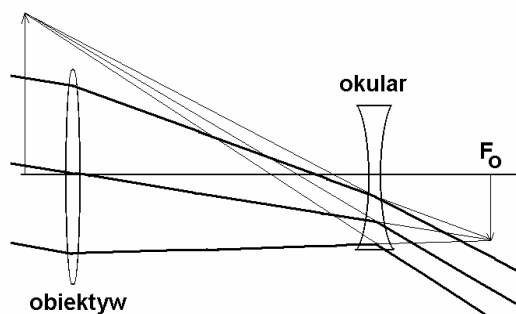
Rys. 6. Układ lunety Keplera wraz z układem kolimatora i lunetki pomocniczej

Prawidłowo zestawiony układ lunety (w ustawieniu podstawowym – „na 0 dioptrii”) powinien charakteryzować się tym, że ognisko obrazowe obiektywu pokrywa się z ogniskiem przedmiotowym okularu, zaś w przypadku istnienia w układzie płytki ogniskowej – również ze środkiem rysunku tej płytki. O ile pokrycie płaszczyzny krzyża płytki ogniskowej z płaszczyzną obrazu pośredniego jest stosunkowo łatwe również bez pomocy lunetki pomocniczej, to ustawienie okularu w położeniu 0 dioptrii, ze względu na akomodację oka obserwatora, nie jest możliwe bez pomocy tego przyrządu. Należy ustawić ją za zestawionym układem tak, aby źrenica wejściowa lunetki pomocniczej (na ogół jest to oprawa jej obiektywu) pokryła się z płaszczyzną źrenicy wyjściowej zestawionego układu. Obserwując przez okular lunetki pomocniczej jej płytkę ogniskową, zaś na jej tle obrazy testu kolimatora i ewentualnie płytki ogniskowej zestawionej lunety – eliminujemy paralaksę między tymi elementami przesuając wzdłuż osi optycznej okular lunety zestawianej.

1.3 Luneta ziemiska Galileusza

Wady związanej z odwróconym obrazem, dokuczliwej dla obserwacji prowadzonych na Ziemi, pozbawiony jest inny przyrząd, tzw luneta ziemiska (Galileusza), pokazana na rys. 4-6.

obraz



Rys. 4-6. Luneta ziemiska (Galileusza). Luneta ziemiska, podobnie jak teleobiektyw, składa się ze skupiającego obiektywu i rozpraszającego okularu. Promienie od odległego obiektu przechodzące przez układ pokazano grubymi liniami; ich przedłużenia, cienkimi. Obraz przedmiotu wytworzony przez obiektyw w ognisku F_0 przez obiektyw jest przedmiotem pozornym (!!!) dla okularu, który wytwarza obraz pozorny (ozn. obraz) gdzieś pomiędzy nieskończonością i odległością dobrego widzenia.

Luneta ta zawiera, podobnie jak luneta Keplera, soczewkę skupiającą, pracującą jako obiektyw, ale okular jest soczewką rozpraszającą. Ustawienie okularu jest takie, by wytworzony przez obiektyw pośredni obraz rzeczywisty, odwrócony i pomniejszony (liniowo, kątowe powiększenie będzie oczywiście równe 1), znajdujący się w ognisku obiektywu, leżał równocześnie w ognisku okularu, tak jak pokazano na rys. 4-6. Warto zwrócić uwagę, że zbieżna wiązka promieni, załamanych w soczewce obiektywu, natrafia na rozpraszający okular *zanim* zdąży utworzyć obraz; zatem obraz ten staje się *pozornym przedmiotem* dla okularu. Z równania dla soczewki rozpraszającej:

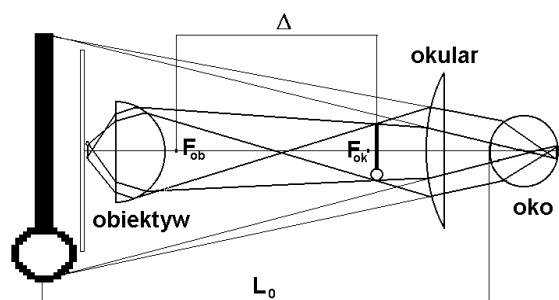
$$-\frac{1}{x} + \frac{1}{y} = -\frac{1}{f} \quad (6)$$

gdzie ujemny znak odległości przedmiotowej i ogniskowej zostały już uwzględnione, wynika, że dla $x \approx f$ y musi być bardzo duże, ujemne (obraz pozorny) bądź dodatnie (obraz rzeczywisty), zależnie od tego, czy x jest większe czy mniejsze od f . Oczywiście obserwator będzie manipulował przyrządem tak, by otrzymać obraz pozorny, gdyż nie jest on w stanie zobaczyć obrazu rzeczywistego utworzonego nie przed, lecz poza soczewką jego oka.

Kątowe powiększenie dla lunety Galileusza będzie, podobnie jak dla lunety Keplera, równe stosunkowi ogniskowych obiektywu i okularu.

1.4 Mikroskop

Mikroskopy służą do otrzymywania silnie powiększonych obrazów małych przedmiotów. Podobnie jak w przypadku lunety astronomicznej, w skład najprostszego mikroskopu wchodzi dwie soczewki zbierające, obiektyw o krótkiej ogniskowej tworzący obraz pośredni



(rzeczywisty, odwrócony i powiększony), oraz okular, który pozwala na dalsze powiększenie tworząc obraz pozorny, powiększony i prosty, tak jak pokazano na rys. 4-7.

Rys. 4-7. Mikroskop. Rzeczywisty obraz pośredni przedmiotu umieszczonego na płytce wytworzony przez obiektyw znajduje się w odległości Δ od ogniska F_{ob} obiektywu. Pozorny obraz wytworzony przez okular znajduje się w odległości dobrego widzenia L_0 od oka obserwatora. Promienie przechodzące przez układ pokazano grubymi liniami, a ich przedłużenia, prowadzące do obrazu pozornego, cienkimi.

Powiększenie mikroskopu będzie równe iloczynowi powiększeń obiektywu i okularu. Korzystając ze wzoru (17) z wykładu 3, powiększenie poprzeczne obiektywu będzie równe:

$$m_{Tob} = \frac{\Delta}{f_{ob}}, \quad (7)$$

gdzie Δ jest odległością obrazu pośredniego od ogniska obiektywu F_{ob} , a f_{ob} jest ogniskową obiektywu, a powiększenie okularu, z rozważań nad lupą:

$$m_{Tok} = \frac{L_0}{f_{ok}}, \quad (8)$$

gdzie L_0 jest odległością dobrego widzenia, a f_{ok} ogniskową okularu (pomijamy jedynekę). Zauważmy, że powiększenie kątowe i poprzeczne dla lupy, o ile oglądany przez lupę obraz znajduje się w odległości dobrego widzenia, są sobie równe.

Bardzo często konstruktorzy mikroskopów przyjmują, że odległość pomiędzy ogniskami obiektywu i okularu, zwana długością tubusa i w przybliżeniu równa Δ , wynosi 16 cm. Zakładając, że odległość dobrego widzenia wynosi 25 cm otrzymujemy ostatecznie:

$$m_{mik} = \left(-\frac{16}{f_{ob}} \right) \cdot \left(\frac{25}{f_{ok}} \right) \quad (9)$$

gdzie ogniskowe obiektywu i okularu należy wyrazić w cm.

2. Przebieg Cwiczenia

1. Budowa lunety Keplera i Galileusza

Wykonać obliczenia charakterystycznych parametrów i zestawić lunety zgodnie z założeniami podanymi przez prowadzącego. Przyjąć średnicę źrenicy wyjściowej $\Phi'_z = 5 \text{ mm}$. Określić położenie luk w układzie, jeśli źrenicą wejściową jest oprawa obiektywu. Określić wpływ zastosowania dodatkowej przysłony pełniącej rolę przysłony aperturowej na wyniki pomiarów. W tym celu należy zmierzyć o ile wysunięta jest ta przysłona przed obiektywem. Wykonać pomiary przedstawione w punktach 3.2.÷3.4 oraz niezbędne obliczenia.

2.1.1. Pomiar wielkości i położenia źrenicy wyjściowej lunety

Pomiaru dokonuje się za pomocą mikroskopu pomocniczego. Należy odnaleźć ostry obraz źrenicy wyjściowej, a następnie regulując wielkość przysłony aperturowej (ustawionej przed obiektywem), doprowadzić do tego, by źrenica wyjściowa miała wielkość 4 mm. Następnie przesuwa się mikroskop po ławie do momentu ujrzenia ostrego obrazu ostatniej powierzchni okularu. Z różnicy położenia mikroskopu na ławie można określić położenie źrenicy wyjściowej za układem.

2.1.2. Pomiar powiększenia lunety

Pomiaru powiększenia lunety można dokonać kilkoma metodami:

a) metoda pomiaru średnic źrenic (patrz punkt 1.2)

Po dokonaniu regulacji i pomiaru opisanego w punkcie 3.2 należy przestawić mikroskop pomocniczy tak, by można było dokonać pomiaru średnicy źrenicy wejściowej badanego układu. Średnicę tą odczytuje się z podziałki mikroskopu pomocniczego podczas obserwacji ostrego obrazu przysłony aperturowej.

b) przez pomiar kątów pola w przestrzeni przedmiotowej i obrazowej

Należy zastosować kolimator o znanej podziałce katowej (kąt przedmiotowy w) oraz lunetkę pomocniczą z płytką ogniskową (kąt obrazowy w'). Z ilorazu kątów w i w' określamy powiększenie lunety.

2.1.3. Pomiar pola widzenia lunety

Pomiaru przedmiotowego kąta pola lunety dokonuje się za pomocą kolimatora szerokokątnego, odczytując ilość podziałek na płytce ogniskowej kolimatora (stojącego przed lunetą badaną) widoczną w polu widzenia lunety. W analogiczny sposób należy wyznaczyć obrazowy kąt pola lunety. Obiektyw kolimatora musi być wówczas ustawiony w źrenicy wyjściowej lunety, a obserwację prowadzimy umieszczając oko w płaszczyźnie źrenicy wejściowej.

2. Budowa mikroskopu

Na podstawie parametrów podanych przez prowadzącego należy zaprojektować i zestawić na ławie optycznej z odpowiednich elementów optycznych układ mikroskopu, a następnie dokonać pomiarów zgodnie z poniższymi zaleceniami. Zestawianie układu rozpocząć od ustawienia obiektywu w takiej odległości od przedmiotu, jak wskazują na to obliczenia. Pomiary należy rozpocząć od przeprowadzenia pomiaru powiększenia poprzecznego obiektywu.

2.2.1 Pomiar powiększenia poprzecznego obiektywu

Do pomiaru wykorzystuje się zależność

$$\beta_{ob} = \frac{y'}{y} \quad (15)$$

gdzie y i y' są wymiarami przedmiotu i jego obrazu danego przez obiektyw.

W celu dokonania pomiaru należy w płaszczyźnie przedmiotowej mikroskopu umieścić np. płytkę z dwiema liniami w znanej odległości od siebie. Wielkość obrazu mierzymy drugim przyziarem liniowym lub za pomocą mikroskopu pomocniczego z podziałką.

Jeżeli wartość zmierzona odbiega od wartości wynikającej z obliczeń, należy przesuwać obiektyw i dokonywać pomiaru do momentu, aż wielkość zmierzona będzie zgodna z obliczoną podczas projektowania układu.

2.2.2. Pomiar powiększenia wizualnego

Pomiaru powiększenia wizualnego należy dokonać za pomocą lunetki pomocniczej. Metoda ta polega na zmierzeniu kąta w przestrzeni obrazowej odpowiadającego przedmiotowi o danej wielkości. Wielkość kątową przedmiotu należy wyliczyć pamiętając, że zgodnie z definicją kąt w jest kątem, pod jakim widać przedmiot okiem nieuzbrojonym z odległości dobrego widzenia. Powiększenie oblicza się ze wzoru 1.

2.2.3. Pomiar wielkości i położenia źrenicy wyjściowej

Wykonuje się go za pomocą mikroskopu pomocniczego. Należy, patrząc przez mikroskop pomocniczy, znaleźć obraz źrenicy wyjściowej. Następnie przesuważąc mikroskop po ławie należy znaleźć ostry obraz ostatniej powierzchni okularu. Odległość pomiędzy kolejnymi położeniami mikroskopu określa położenie źrenicy wyjściowej.

3. Sprawozdanie

W sprawozdaniu należy zamieścić:

- cel i zakres ćwiczenia laboratoryjnego,
- opis stanowiska i przebieg realizacji eksperymentu,
- wyniki obliczeń wstępnych i pomiarów, a także obliczeń parametrów układu,
- rachunek błędów, uwagi i wnioski dotyczące ćwiczenia.

4. Literatura

1. Ratajczyk F. „Instrumenty optyczne”, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2005
2. Andrzej J. Wojtowicz, Wykłady z fizyki ogólnej, Wyd. UMK, 2008
3. Kowalik J., Wiertel M., Żołnierczuk R.: Ćwiczenia laboratoryjne z fizyki. Optyka. Wydawnictwa Uczelniane Politechniki Lubelskiej, 1995
4. Szwedowski A., Wojtaszewski A.: Laboratorium technologii elementów optycznych – pomiary optyczne. Wydawnictwo Politechniki Warszawskiej, 1994
5. Leśniewski M., Rafałowski M., Szwedowski A., Wojtaszewski A.: Przyrządy optyczne. Ćwiczenia laboratoryjne. Reprint FWRiWTO, Warszawa, 1992
6. Błaszczak U.J., Rafałowski M.: Podstawy Optyki – materiały pomocnicze do ćwiczeń rachunkowych i laboratoryjnych, Wydawnictwo Politechniki Białostockiej, 2004
7. Hanc T.: Pomiary optyczne, WNT, Warszawa, 1964

Materiały wyłącznie do użytku wewnętrznego. Materiały zostały przygotowane na podstawie: Andrzej J. Wojtowicz, Wykłady z fizyki ogólnej, UMK, 2008 oraz Błaszczak U.J., Rafałowski M.: Podstawy Optyki – materiały pomocnicze do ćwiczeń rachunkowych i laboratoryjnych, Wydawnictwo Politechniki Białostockiej, 2004