

Geometrická optika - Ohniskové vzdálenosti čoček a zvětšení optických přístrojů

Pomůcky: Optická lavice s jezdcí a držáky čoček, světelný zdroj pro optickou lavici, mikroskopický objektiv, Ramsdenův okulár v držáku s Abbeho kostkou, spojné čočky +100, +200, rozptylka -100, matnice, clona s otvorem, clona se šípkou, pomocný světelný zdroj s milimetrovou stupnicí, objektivový mikrometr se stupnicí 100 x 0,01 mm, matnička se stupnicí 50 x 0,1 mm, pomocný mikroskop se stupnicí v zorném poli dělenou po 0,1 mm, pomocný dalekohled,

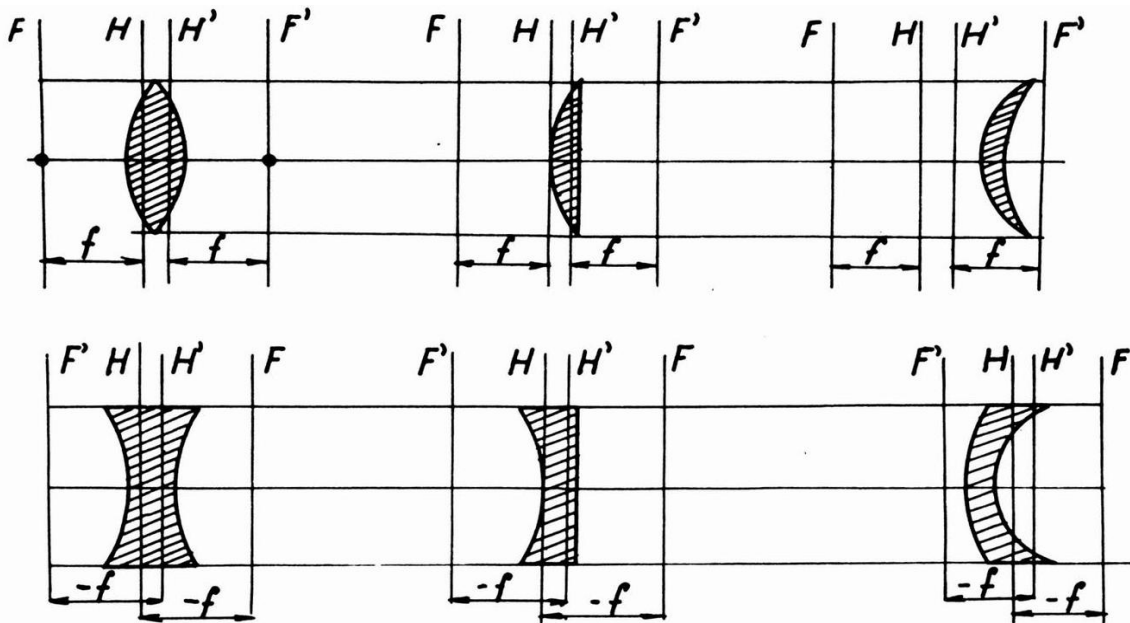
1 Základní pojmy a vztahy

Základní pojmy z geometrické optiky a principy optických přístrojů jsou podrobně popsány v knihách [1-6]. Zde připomeneme pouze základní fakta.

A. Zobrazování čočkami

Při zobrazování čočkou lze prostor rozdělit rovinou kolmou na její osu (tzv. optickou osu) na dvě části: předmětovou a obrazovou, mezi nimiž existuje vztah kolineace, tj. bodu, přímce a rovině nacházející se v předmětovém prostoru odpovídá v obrazovém prostoru zase bod, přímka nebo rovina. Některé z nich mají zvláštní důležitost. Předmět ležící v rovině nekonečně vzdálené (v úběžné rovině) se zobrazí do tzv. ohniskové roviny, ležící v konečné vzdálenosti od čočky. Podobně předmět ležící v ohniskové rovině se zobrazí do úběžné roviny nekonečně vzdálené.

V předmětovém prostoru lze dále nalézt dvě tzv. hlavní roviny, které mají tu vlastnost, že předmět v nich ležící se zobrazí do odpovídajících hlavních rovin v obrazovém prostoru ve stejné velikosti, a to buď vzpřímený (tzv. kladné hlavní roviny), nebo obrácený (tzv. záporné hlavní roviny). Kladné hlavní roviny leží vždy mezi příslušnou ohniskovou rovinou a čočkou, záporné hlavní roviny leží vždy vně příslušných ohniskových rovin (tj. směrem od čočky). Vzdálenosti ohniskové roviny od příslušné kladné a záporné hlavní roviny jsou stejné a rovnají se ohniskové vzdálenosti f . Obě kladné hlavní roviny mohou v případě tenké čočky spolu splýnout a leží v rovině čočky. U tlusté čočky mohou mít kladné hlavní roviny obecnou polohu a mohou ležet i mimo čočku (viz obrázek 1).



Obrázek 1: Poloha kladných hlavních rovin H a ohniskových rovin F u základních typů čoček

B. Stanovení ohniskové vzdálenosti spojné čočky

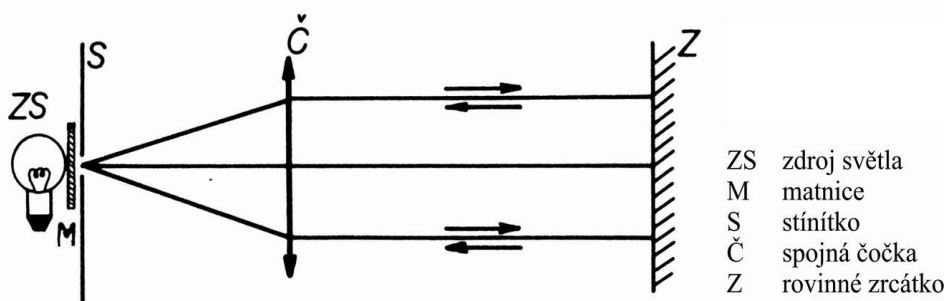
Určení ohniskových vzdáleností tenkých spojných čoček provádíme těmito způsoby: odhadem, autokolimací, z čočkové rovnice (tj. z polohy předmětu a obrazu), z bočního zvětšení a Besselovou metodou. Pro tlusté spojky lze použít metody z bočního zvětšení a Besselovy metody.

1. Určení ohniskové vzdálenosti odhadem

Tuto metodu používáme k orientačnímu odhadu ohniskové vzdálenosti. Princip metody spočívá v tom, že obraz předmětu značně vzdáleného vzniká v ohniskové rovině čočky a je skutečný. Vzdálenost čočky od stínítka změříme měřítkem a dostaneme tak přímo ohniskovou vzdálenost čočky.

2. Měření ohniskové vzdálenosti autokolimací

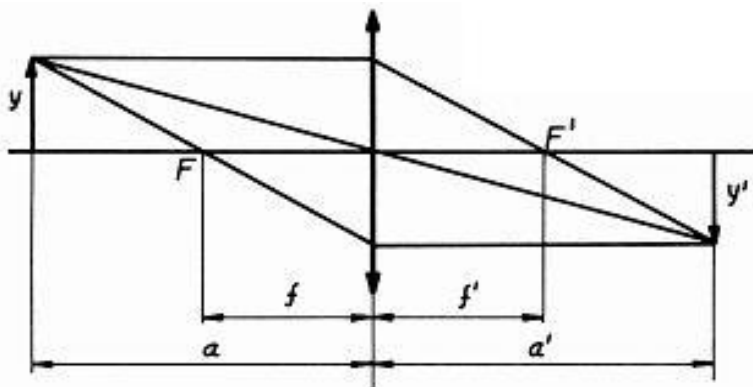
Tato metoda spočívá v tom, že paprsky vycházející z ohniska čočky jsou po lomu rovnoběžné s osou čočky a že naopak paprsky rovnoběžné s osou čočky se po lomu čočkou soustředí v jejím ohnisku. Experimentální uspořádání měření je na obrázku 2.



Obrázek 2: Měření ohniskové vzdálenosti spojky

Posunujeme-li čočkou tak, že se zobrazovaný otvor stínítka dostane do jejího ohniska, budou paprsky za čočkou rovnoběžné s osou čočky. Proto se otvor ve stínítku po odrazu paprsků na zrcadle zobrazí ostře zpět v ohnisku čočky. Nepatrným sklopením zrcátka Z dosáhneme toho, že tento ostrý obraz padne těsně vedle zobrazovaného otvoru (autokolimace). Vzdálenost čočky od stínítka pak udává ohniskovou vzdálenost čočky.

3. Měření ohniskové vzdálenosti z polohy předmětu a jeho obrazu



Obrázek 3: Zobrazení spojnou čočkou

Pro zobrazování tenkou spojnou čočkou pomocí paprsků (monochromatického světla) velmi blízkých optické ose (v tzv. Gaussově nitkovém prostoru) platí čočková rovnice (obrázek 3), viz [2]

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

kde a , a' jsou vzdálenosti předmětu a obrazu od středu čočky (vzaté v absolutních hodnotách), f je ohnisková vzdálenost čočky.

Změříme-li vzdálenosti a a a' , můžeme vztah (1) použít k určení ohniskové vzdálenosti f .

Platí

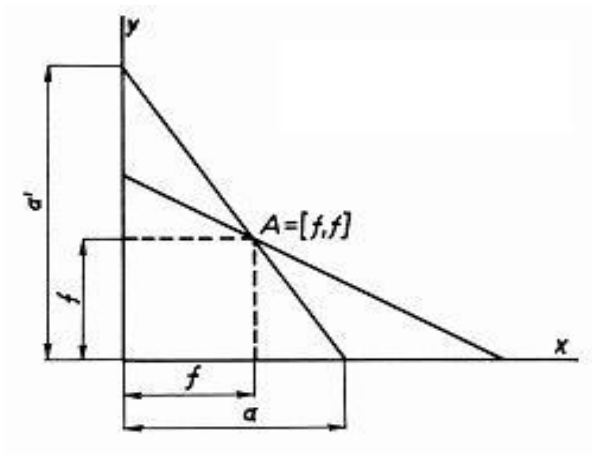
$$f = \frac{aa'}{a + a'}. \tag{2}$$

Ohniskovou vzdálenost spojky lze místo výpočtu stanovit také graficky (obrázek 4). Čočkovou rovnici (1) můžeme přepsat na tvar

$$\frac{f}{a} + \frac{f}{a'} = 1, \tag{3}$$

který je podobný úsekové rovnici přímky s úseky a , a' na souřadných osách.

Naneseme tudíž délku a na osu x , délku a' na osu y a spojíme takto získané body přímkou (obrázek 4). Sestrojíme-li několik takových přímek pro různé dvojice a a a' , budou se všechny protínat v bodě A o souřadnicích $A(f, f)$.



Obrázek 4: Grafická metoda pro řešení čočkové rovnice

4. Měření ohniskové vzdálenosti z bočního zvětšení

Boční zvětšení β je definováno jako poměr velikosti obrazu y' k velikosti předmětu y . Z obrázku 3 vysvítá, že pro zvětšení β platí vztah

$$\beta = \frac{y'}{y} = \frac{a'}{a}. \quad (4)$$

Ze vztahů (2) a (4) dostaneme pro ohniskovou vzdálenost

$$f = \frac{a'}{1 + \beta} = a \frac{\beta}{1 + \beta}. \quad (5)$$

Zvětšení β určíme změřením předmětu a jeho obrazu. Prakticky se jako předmět používá osvětlované průsvitné milimetrové měřítko, které zobrazujeme na matnici opatřené milimetrovým dělením.

Z (5) plynou pro zvětšení β vztahy

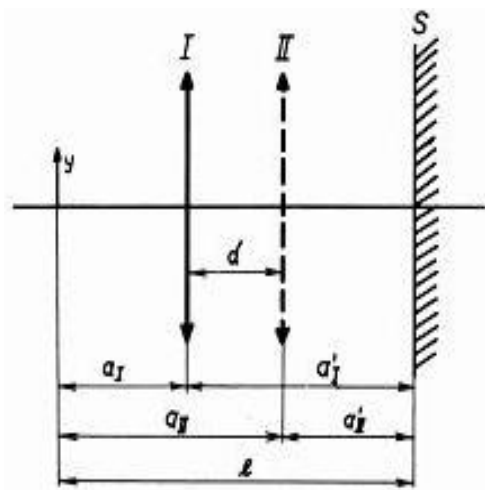
$$\beta = \frac{f}{a - f} = \frac{a' - f}{f}, \quad (6)$$

kde a a a' jsou vzdálenosti předmětu a obrazu od příslušných kladných hlavních rovin, jejichž polohu v tlusté čočce (nebo systému čoček) obecně neznáme. Vytvoříme tlustou čočkou ostrý obraz ve dvou vzdálenostech její kladné hlavní roviny od předmětu a_1 a a_2 . Obrazy vzniknou ve vzdálenostech a'_1 a a'_2 příslušné druhé kladné hlavní roviny od stínítka. Podle (6) lze pro tento případ odvodit vztah

$$f = \frac{a'_1 - a'_2}{\beta_1 - \beta_2} = \frac{\Delta a'}{\Delta \beta}. \quad (7)$$

Z (7) je tedy zřejmé, že lze ohniskovou vzdálenost tlustého optického systému určit ze změny zvětšení $\Delta \beta$ při posunu čočky o $\Delta a'$, který lze měřit posuvem libovolného bodu na optické soustavě.

5. Určení ohniskové vzdálenosti Besselovou metodou



Obrázek 5: Určení ohniskové vzdálenosti Besselovou metodou

Tato metoda je založena na souměrnosti vztahu (1), který zůstává v platnosti při záměně a a a' . Jestliže splňuje vzdálenost předmětu od stínítka e (obrázek 5) podmínku $e > 4f$, existují dvě polohy čočky I a II, ve kterých se na stínítku vytvoří ostrý obraz předmětu (v poloze I zvětšený a v poloze II zmenšený).

Při měření nastavíme předmět y a stínítko S na pevnou vzdálenost $e > 4f$ (f určíme odhadem). Spojnou čočkou umístěnou mezi nimi posunujeme tak, abychom na stínítku dostali ostrý obraz předmětu, čehož dosáhneme při dvou polohách čočky. Změřením e a d vypočítáme ohniskovou vzdálenost ze vzorce

$$f = \frac{e^2 - d^2}{4e}. \quad (8)$$

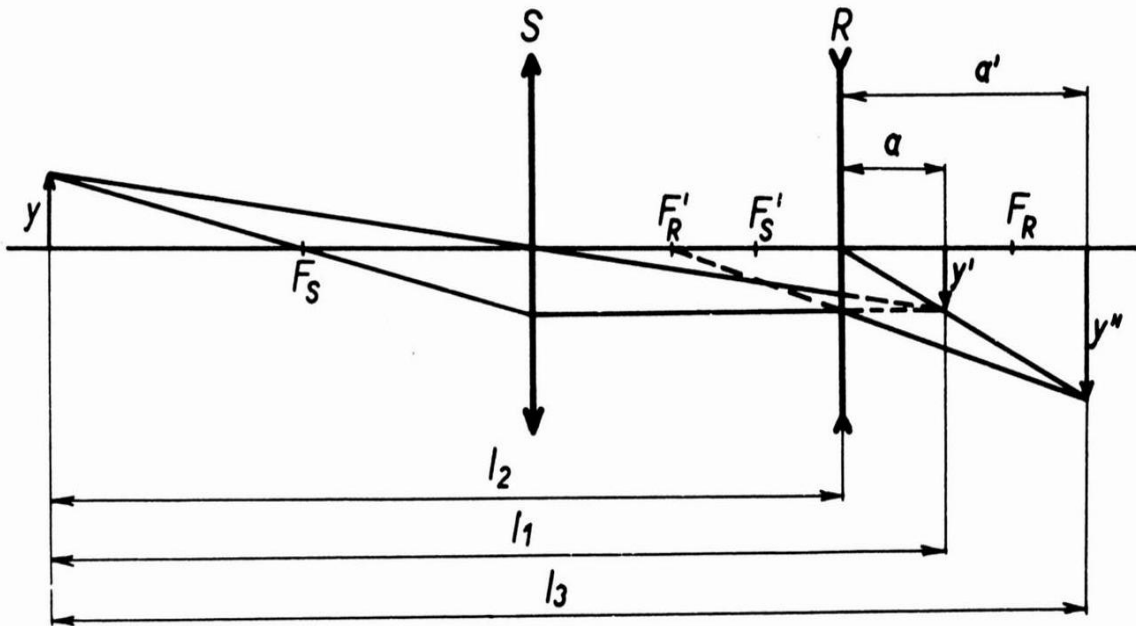
Výhodou této metody je, že při ní není třeba měřit vzdálenosti předmětu a obrazu od čočky. Přesná měření těchto vzdáleností jsou v praxi obtížná. Metoda se také hodí pro určování ohniskových vzdáleností tlustých čoček.

6. Určení poloh ohniskových rovin tlustých čoček

K tomuto měření využijeme poznatku, že předmět ležící v ohniskové rovině optické soustavy se zobrazí do nekonečna (tj. rovnoběžným svazkem paprsků). Budeme-li takový svazek pozorovat pomocným dalekohledem zaostřeným na nekonečno uvidíme ostrý obraz předmětu.

C. Stanovení ohniskové vzdálenosti tenké rozptylky

Rozptylka zobrazuje skutečný předmět virtuálně, vytváří jeho neskutečný (zdánlivý) obraz, který nelze na stínítku zachytit. Naproti tomu vytváří skutečný obraz virtuálního předmětu. Abychom mohli použít předešlých metod pro tenkou rozptylku, vytvoříme nejprve spojkou S (obrázek 6) reálný obraz y' předmětu y a



Obrázek 6: Měření ohniskové vzdálenosti rozptylky

použijeme ho jako předmětu pro měřenou rozptylku R . Rozptylka vytvoří nový obraz y'' , který bude na stejné straně jako předmět y' (viz obrázek 6). Čočková rovnice pro tenkou rozptylku má tvar

$$\frac{1}{a'} - \frac{1}{a} = -\frac{1}{f}, \quad (9)$$

kde a' , a jsou vzdálenosti obrazu a předmětu (brané absolutně), f je absolutní hodnota ohniskové vzdálenosti rozptylky.

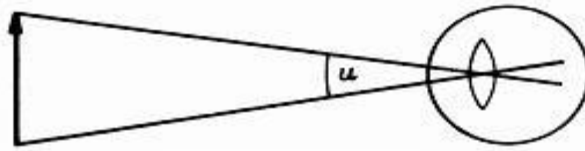
Při měření vytvoříme spojkou S reálný, poněkud zmenšený obraz y' předmětu y . Obraz y' zachytíme na stínítku a odečteme polohu stínítka l_1 . Potom vsuneme mezi spojku a obraz y' měřenou rozptylku R . Stínítko pak posuneme do takové polohy, aby vznikl ostrý obraz y'' předmětu y' a opět odečteme polohu stínítka. Dostaneme tak hodnotu l_3 . Změříme-li ještě vzdálenost l_2 , můžeme z hodnot l_1 , l_2 , a l_3 vypočítat vzdálenosti obrazu (y'') a předmětu (y') od tenké rozptylky, tj. vzdálenosti a' , a . Z rovnice (9) pak vypočítáme ohniskovou vzdálenost rozptylky.

D. Vady čoček

Vady čoček jsou způsobeny jednak podstatou bílého světla (vada barevná), jednak tím, že zobrazování se neděje jednotlivými paprsky, ale celými svazky paprsků. U čoček rozeznáváme tyto vady: barevnou (chromatickou), sférickou, astigmatickou, zkreslení pole a zklenutí pole a komu, podrobné informace viz např. [2], str. 161-3 nebo [6], str. 762-7.

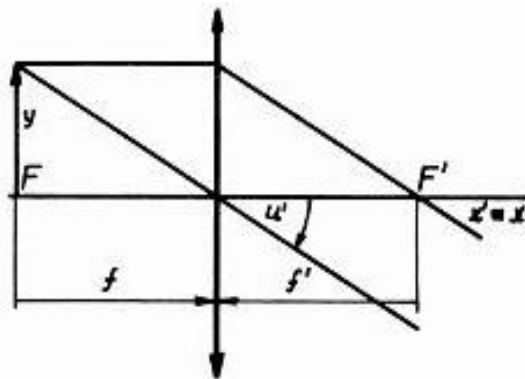
E. Optické přístroje

Optické přístroje pro vizuální pozorování slouží zpravidla k zvětšení zorného úhlu, pod nímž vidí oko pozorovaný předmět. Zorný úhel je takový úhel, který svírají paprsky spojující krajní body předmětu se středem oční pupily (obrázek 7).



Obrázek 7: Zorný úhel předmětu

V mezním případě oko ještě rozliší dva body, jejichž zorný úhel je $60''$. Zorný úhel předmětu je malý buď proto, že je předmět malý, nebo proto, že je příliš vzdálený. V prvním případě používáme lupy a mikroskopu, ve druhém dalekohledu.



F a F' označují předmětové a obrazové ohnisko
f a f' příslušné ohniskové vzdálenosti

Obrázek 8: Zobrazení lupou při oku akomodovaném na ∞

a) Lupa

Každá spojná čočka může být použita jako lupa. Předmět musíme umístit mezi lupu a její ohnisko. Vytvoří se zvětšený, vzpřímený a zdánlivý obraz. Zvětšením lupy se nazývá poměr tangenty zorného úhlu u' , pod nímž vidíme předmět lupou, k tangentě zorného úhlu u , pod nímž se oku jeví v konvenční vzdálenosti $l = 25$ cm, tj.

$$Z = \frac{tgu'}{tgu}. \quad (10)$$

Takto definované zvětšení závisí na akomodaci oka, kterým pozorujeme předmět pomocí lupy. Pod zvětšením lupy se obvykle rozumí zvětšení při oku akomodovaném na nekonečno:

$$Z = \frac{y}{f} : \frac{y}{l} = \frac{l}{f}, \quad (11)$$

kde y označuje lineární velikost předmětu, f předmětovou ohniskovou vzdálenost lupy, l konvenční zrakovou vzdálenost (orientovanou kladně).

Orientace vzdáleností, os a úhlů je popsána podrobně např. v [1], str. 38-46.

Pozorujeme-li okem akomodovaným na konečnou vzdálenost, je zvětšení lupy větší než l/f . Zobrazení lupou při akomodaci oka na normální zrakovou vzdálenost ($l' = l$) je na obrázku 9. Dosadíme-li za tgu' do vztahu (10) podle obrázku 9, zřejmě dostaneme

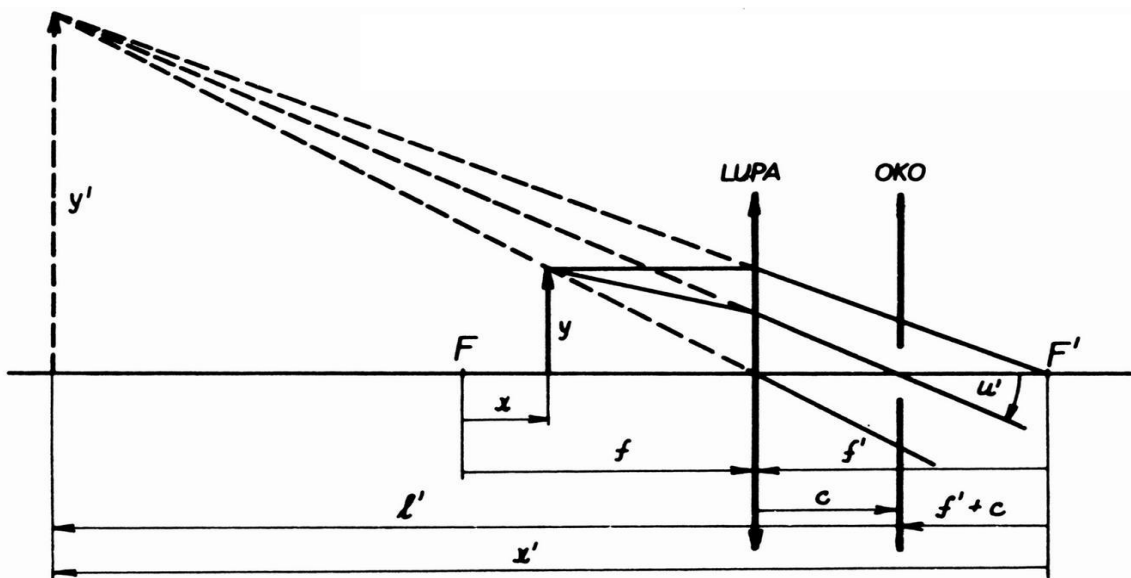
$$Z_l = \frac{y'}{l'} : \frac{y}{l} = \frac{y'}{y}. \quad (12)$$

Ze zobrazovacích rovnic vztažených k ohniskům (Newtonovy zobrazovací rovnice; [1], str. 43)

$$x \cdot x' = f \cdot f', y' = \frac{f}{x} y, y = \frac{f'}{x'} y' \quad (13)$$

pro příčné (boční) zvětšení β plyne:

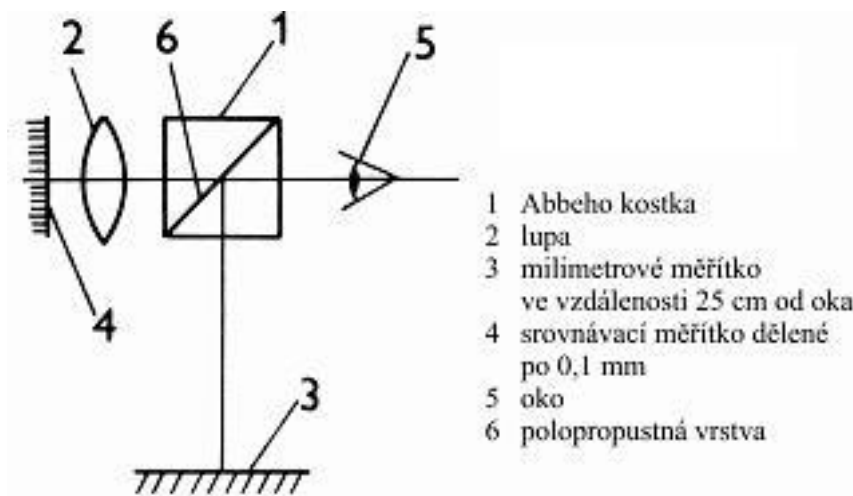
$$\beta = \frac{y'}{y} = \frac{x'}{f'}, \quad (14)$$



Obrázek 9: Zobrazení lupou při akomodaci oka na normální zrakovou dálku

kde x' označuje vzdálenost obrazu od obrazové ohniskové roviny a x vzdálenost předmětu od předmětové ohniskové roviny. Dosadíme-li do této rovnice $x' = l' + f' + c$ (viz obrázek 9), dostaneme

$$Z_l = \frac{l' + c}{f} + 1. \quad (15)$$



Obrázek 10: Měření zvětšení lupy

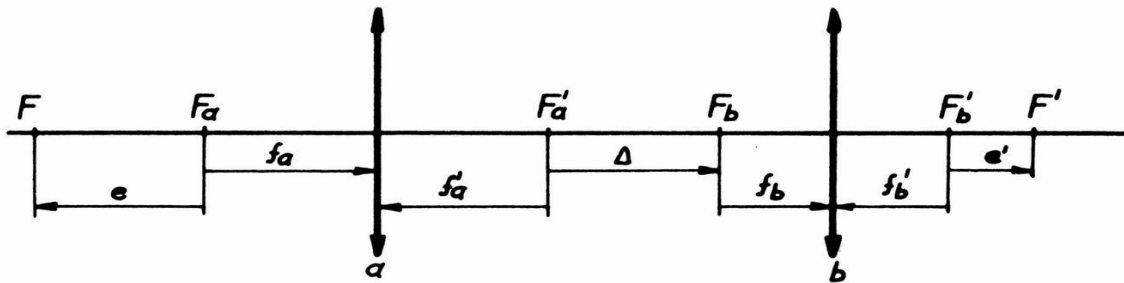
Měření zvětšení provedeme přímou metodou. Ve vzdálenosti $l = 25$ cm od pupily oka umístíme milimetrové měřítko. Pozorovaný předmět (srovnávací měřítko) dáme do takové vzdálenosti od lupy, abychom jeho obraz viděli ostře současně se srovnávacím měřítkem. Mezi oko a lupu umístíme Abbeho kostku (obrázek 10), která nám umožní současně pozorovat zvětšený obraz srovnávacího měřítka i milimetrové měřítko. Zvětšení lupy při akomodaci oka na normální zrakovou vzdálenost je potom dáno poměrem velikostí obou stupnic. Můžeme-li zanedbat vzdálenost oka od středu čočky, můžeme z rovnice (15) vypočítat obrazovou ohniskovou vzdálenost lupy.

b) Mikroskop

Mikroskop se skládá ze dvou spojných soustav - objektivu a okuláru. Objektiv vytvoří skutečný, zvětšený a převrácený obraz, který pozorujeme okulárem jako lupou. Předmět klademe do větší vzdálenosti od objektivu, než je jeho ohnisková vzdálenost. Okulár bývá sestaven ze dvou čoček (což zmenšuje vady zobrazení), z nichž bližší k oku se nazývá oční, vzdálenější pak polní (nebo kolektiv). Nejčastěji užívané jsou okuláry Ramsdenův a Huygensův. V dalším budeme okulár považovat za centrovanou soustavu dvou tenkých čoček.

Centrovaná soustava dvou čoček má výsledná ohniska, jejichž poloha je určena vzdálenostmi e a e' (viz obrázek 11).

$$e' = \frac{f_b f_b'}{-\Delta} = \frac{f_b^2}{\Delta}, \quad (16)$$



f_a, f'_a, f_b, f'_b označují ohniskové vzdálenosti čoček a b, Δ je optický interval soustavy

Obrázek 11: Soustava dvou tenkých čoček f_a, f'_a, f_b, f'_b označují ohniskové vzdálenosti čoček a b, Δ je optický interval soustavy (většinou 15-20 cm)

$$e = \frac{f_a f'_a}{\Delta} = -\frac{f_a^2}{\Delta}. \quad (17)$$

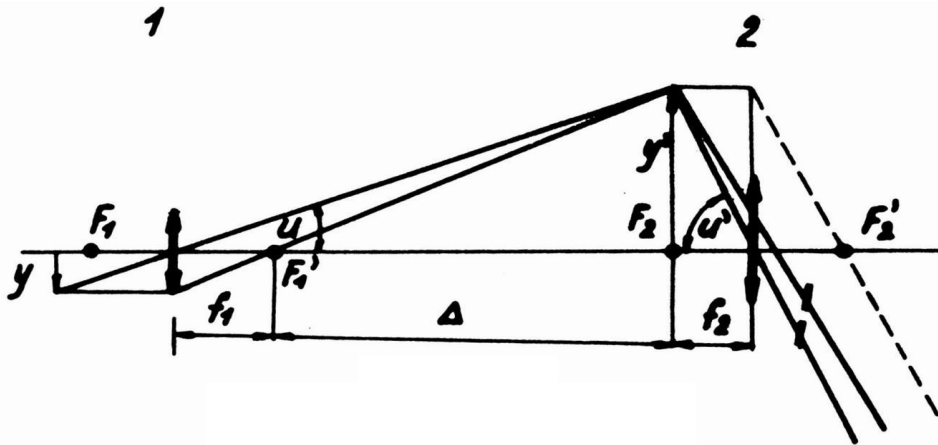
Výsledné ohniskové vzdálenosti f a f' jsou

$$f = -\frac{f_a f_b}{\Delta}, f' = -f. \quad (18)$$

Vztahy (16), (17) a (18) jsou odvozeny např. v [1], str. 47 až 49.

Zvětšení mikroskopu. Chod paprsků v mikroskopu je zřejmý z obrázku 12, z něhož plyne pro zvětšení předmětu y objektivem

$$Z_1 = \frac{y'}{y} = \frac{\Delta + f_1}{f_1}. \quad (19)$$



Obrázek 12: Chod paprsku v mikroskopu (1 - objektiv, 2 - okulár)

Protože $\Delta \gg f_1$, lze psát

$$Z_1 = \frac{\Delta}{f_1}. \quad (20)$$

Zvětšení okuláru je pak podle (11) rovno

$$Z_2 = \frac{l}{f_2}. \quad (21)$$

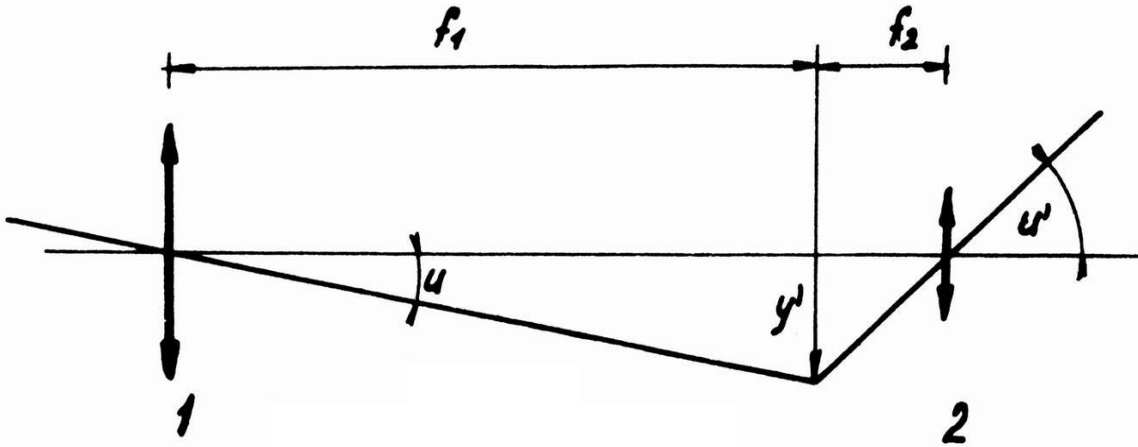
Výsledné zvětšení mikroskopu je

$$Z = Z_1 Z_2 = \frac{\Delta l}{f_1 f_2}. \quad (22)$$

c) Dalekohled

Dalekohled slouží k zvětšení zorného úhlu, pod nímž vidíme vzdálené předměty. Sestává nejčastěji ze dvou spojných soustav, objektivu a okuláru. Objektiv vytvoří ve své ohniskové rovině obraz vzdáleného předmětu, který pozorujeme okulárem jako lupou.

Uvažujeme-li dalekohled jako centrovanou soustavu dvou čoček, je její optický interval $\Delta = 0$, následkem čehož $e' \rightarrow \infty$; $e \rightarrow \infty$; $f \rightarrow \infty$. Paprsky vstupující do takové soustavy rovnoběžně z ní vystupují zase rovnoběžně.



Obrázek 13: Chod paprsků v dalekohledu (1 - objektiv, 2 - okulár)

Zvětšení dalekohledu lze nejjednodušeji vyjádřit na základě poměru zorných úhlů. Z obrázek 13 plyne

$$u \approx \operatorname{tg} u = \frac{y'}{f_1} \quad ; \quad u' = \frac{y'}{f_2} \quad ; \quad (23)$$

$$Z = \frac{u'}{u} = \frac{f_1}{f_2}. \quad (24)$$

Pozorujeme-li dalekohledem blízký předmět, ležící ve vzdálenosti a od objektivu, vznikne jeho obraz ve vzdálenosti a' od objektivu, která je větší než ohnisková vzdálenost.

Z čočkové rovnice plyne

$$a' = \frac{af_1}{a - f_1} \quad (25)$$

a zvětšení

$$Z' = \frac{a'}{f_2} = \frac{f_1}{f_2} \frac{a}{a - f_1} = Z \frac{a}{a - f_1}. \quad (26)$$

Pokud platí, že vzdálenost předmětu $a \gg f_1$, lze chybu způsobenou konečnou vzdáleností a zanedbat.

Zvětšení dalekohledu lze vyjádřit i poměrem průměrů jeho vstupní a výstupní pupily. Vstupní pupilou rozumíme průměr otvoru, jímž vstupuje světlo do dalekohledu. Obvykle je průměr vstupní pupily roven průměru objektivu. Optická soustava dalekohledu zobrazí vstupní pupilu D_1 tak, že z okuláru vystupuje svazek paprsků, jehož průměr D_2 určuje průměr výstupní pupily. Pro zvětšení dalekohledu platí

$$Z = \frac{D_1}{D_2}. \quad (27)$$

Průměr výstupní pupily lze změřit tak, že celou plochu objektivu osvětlíme rovnoběžným svazkem paprsků, za okulárem zachytíme vystupující svazek na stínítko a změříme jeho průměr.

2 Pracovní úkoly

1. Určete ohniskovou vzdálenost tenké spojky následujícími metodami: odhadem, autokolimací, ze znalosti polohy předmětu a jeho obrazu (pro čtyři různé polohy předmětu; provést též graficky). Pokud jste se v Základech fyzikálních měření již s těmito metodami seznámili, je pro Vás tento úkol nepovinný.
2. Besselovou metodou určete ohniskovou vzdálenost tenké spojky. V přípravě odvoďte rovnici č.(8) a načrtněte chod paprsků v obou případech, kdy je vidět ostrý obraz. Proč je nutná podmínka $e > 4f$? Na čem závisí ohnisková vzdálenost čočky?
3. Určete ohniskovou vzdálenost tenké rozptylky.
4. Besselovou metodou změřte ohniskovou vzdálenost mikroskopického objektivu a Ramsdenova okuláru. V přípravě vysvětlete rozdíl mezi Ramsdenovým a Huygensovým okulárem.

5. Abyste mohli určit optický interval mikroskopu v pracovním úkolu č. 7, určete nejprve polohy ohniskových rovin okuláru a objektivu. Rozmyslete si, zda potřebujete znát polohy jejich předmětových nebo obrazových ohniskových rovin.
6. Změřte zvětšení lupy při akomodaci oka na normální zrakovou vzdálenost. Stanovte z ohniskové vzdálenosti lupy zvětšení při oku akomodovaném na nekonečno.
7. Z mikroskopického objektivu a Ramsdenova okuláru sestavte na optické lavici mikroskop a změřte jeho zvětšení. Rozmyslete si, jak velký optický interval je vhodné zvolit.
8. Ze spojky +200 a Ramsdenova okuláru sestavte na optické lavici dalekohled a změřte jeho zvětšení přímou metodou a z poměru průměrů vstupní a výstupní pupily. V přípravě vysvětlete rozdíl mezi Galileovým a Keplerovým dalekohledem, načrtněte chod paprsků v obou případech.
9. Výsledky měření zvětšení mikroskopu a dalekohledu porovnejte s hodnotami vypočítanými z ohniskových vzdáleností a optického intervalu. Ohniskové vzdálenosti jste naměřili s určitou chybou, můžete proto spočítat i chybu vypočítaných zvětšení.

3 Poznámky

1. Měření ohniskové vzdálenosti tenké spojky (pracovní úkoly č. 1 a 2) proveďte na čočce označené +200, kterou použijete v pracovním úkolu č. 8 k sestrojení dalekohledu. Jako předmětu použijte clonu s průřezem ve tvaru šipky. Obraz vytvořený čočkou zachycujte na matnici obrácenou matnou stranou k čočce a pozorujte jej na průhled!
2. V pracovním úkolu č. 3 použijte jako rozptylku čočku označenou -100, jako spojku čočku označenou +100.
3. Ohnisková vzdálenost závisí na indexu lomu, který je různý pro různé barvy světla. Proto při zobrazování složeným bílým světlem vzniká odchylka, které říkáme barevná vada, projevující se zabarvením okrajů obrazu. Vidíte?
4. V pracovních úkolech č. 4, 5 a 6 použijte jako předmětu stupnici o velikosti 5 mm dělenou po 0,1 mm (na čtvercové tlusté skleněné destičce).
5. V pracovním úkolu č. 4 místo matnice použijte pomocný mikroskop s malým zvětšením ???. Stupnice v jeho zorném poli je dělena po 0,1 mm. Před měřením určete (zaostřením tohoto mikroskopu na stupnici sloužící za předmět) v jaké vzdálenosti od mikroskopu leží objekt, který je v mikroskopu vidět ostře. Tato vzájemná poloha matnice (mikroskop) a předmětu (stupnice) odpovídá v podstatě $e = 0$. Současně si změřte zvětšení pomocného mikroskopu (tj. jaké délce na předmětu odpovídá 1 dílek v jeho zorném poli).
6. V pracovním úkolu č. 5 vložte předmět do ohniskové roviny, čímž se zobrazí do nekonečna, tj. rovnoběžným svazkem paprsků. Pozorujeme-li jej pomocným dalekohledem zaostřeným na nekonečno, uvidíme ostrý obraz předmětu. Poloha čehokoli se udává vždy vůči něčemu. U tlusté čočky je tedy třeba, abyste si zvolili referenční rovinu, od níž budete měřit vzdálenost ohniskové roviny.
7. V pracovním úkolu č. 6 použijeme jako lupy Ramsdenův okulár. Abbeho kostku (která je k němu již připevněna! a je odklopitelná) umístíme mezi oko a okulár, což umožní současně pozorovat nezvětšené milimetrové měřítko umístěné ve vzdálenosti 25 cm od oka a zvětšený obraz stupnice dělené po 0,1 mm. Uvědomte si, že zvětšení při akomodaci oka na normální zrakovou vzdálenost je jiná veličina než zvětšení při oku akomodovaném na nekonečno!
8. V pracovním úkolu č. 7 zvětšení mikroskopu změříme podobně jako u lupy. Jako předmět použijeme jemně dělenou stupnici, tzv. objektivový mikrometr (stupnice o velikosti 1 mm dělená po 0,01 mm), jako srovnávací stupnici použijeme opět milimetrové měřítko. Zvětšení plyne opět z poměru velikostí obou stupnic.
9. K sestavení dalekohledu použijeme krátké pomocné optické lavice a trojnožky. Jako předmět použijeme stupnici dělenou po 1 cm, umístěnou svisle v dostatečně velké vzdálenosti (několika metrů).
10. Již v průběhu měření vypočítávejte pro kontrolu z naměřených hodnot ohniskové vzdálenosti a zvětšení.

Reference

- [1] Klier: Úvod do fyziky, IV. Část, Optika (skriptum), SPN, Praha, 1954.
- [2] Fuka, Havelka: Optika, SPN, Praha, 1961, str. 139 až 144, 154 až 177 a 254 až 320.
- [3] Horák: Praktická fyzika, SNTL, Praha, 1958, str. 515 až 521.
- [4] Brož: Základy fyzikálních měření I, SPN, Praha, 1983, str. 496 až 528.
- [5] Friš, Timoreva: Kurs fyziky III, NČSAV, Praha, str. 245 a 249 až 255.
- [6] Horák, Krupka: Fyzika. Příručka pro vysoké školy technického směru, SNTL/ALFA, Praha, 1976, str. 734 až 779.