

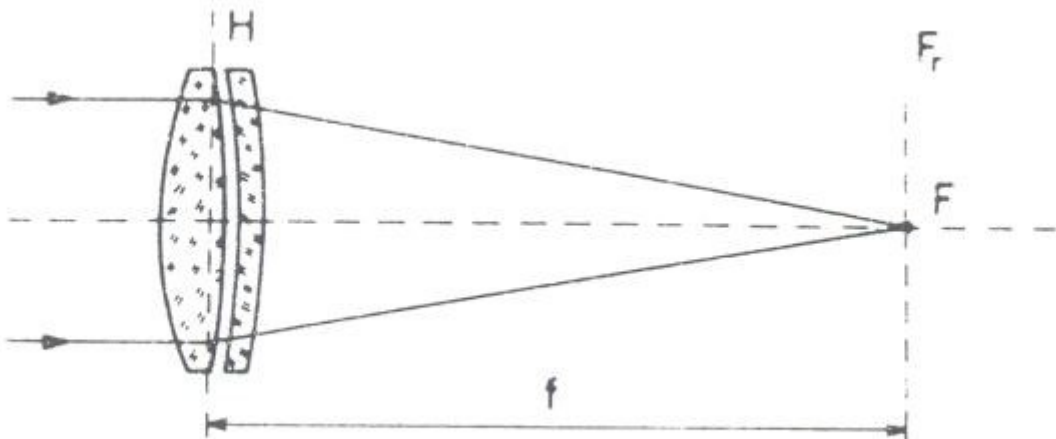
Teleskopie – díl třetí

(Jednoduché metody měření a výpočty pro amatérskou konstrukci dalekohledů)

Je již téměř pravidlem, že se amatérští astronomové krom otázek týkajících se vesmíru, zajímají též o principy praktické optiky. Optické přístroje (dalekohledy a fotokomory) představují prostředky, které umožňují přátelům astronomie pronikat hlouběji do vesmíru, ale u řešení jiných zajímavých otázek. Nejen ten, kdo se připravuje na vlastní konstrukci dalekohledu, ale i ten, kdo se snaží o dokonalé a mnohostranné využití přístroje tovární výroby se musí seznámit s řešením některých základních problémů optiky. Cílem následujících řádků je naznačit jednoduché řešení nejčastějších otázek. Přesnost výsledků měření a výpočtů sice v drtivé většině případů nemůže dosáhnout profesionální úrovně, pro amatérské konstrukce a úpravy přístrojů jsou však dostačující.

1. měření optické vzdálenosti optických členů dalekohledů

Rovnoběžné světelné paprsky, které vycházejí z velmi vzdálených objektů (Slunce, Měsíc, hvězdy, apod.) a dopadají na spojnou (zvětšovací) čočku se za ní v určitém místě protínají - v ohnisku (F). Rovina, která prochází tímto bodem kolmo na směr osy čočky se nazývá ohnisková rovina (Fr). Když do tohoto místa vložíme projekční plochu (kousek papíru), zjistíme, že se zde vytváří zmenšený, obrácený a skutečný obraz objektu (např. Slunce). Pokud změříme vzdálenost ohniska od hlavní roviny čočky (H), určíli jsme ohniskovou vzdálenost čočky (f).



Obr. 1: ohnisková vzdálenost spojně čočky (f); F - ohnisko; Fr - ohnisková rovina; H - hlavní rovina čočky

V našem případě, tedy u spojných čoček s přibližně stejným zakřivením obou optických ploch stačí předpokládat, že se hlavní rovina nachází uprostřed mezi přední a zadní plochou čočky (v 1/2 její hloubky). Při měření ohniskové vzdálenosti budeme proto nejlépe postupovat tak, že zjistíme vzdálenost od ohniska po zadní plochy čočky a k tomuto číslu připočteme ještě 1/2 její hloubky.

a. určení ohniskové vzdálenosti objektivu dalekohledu

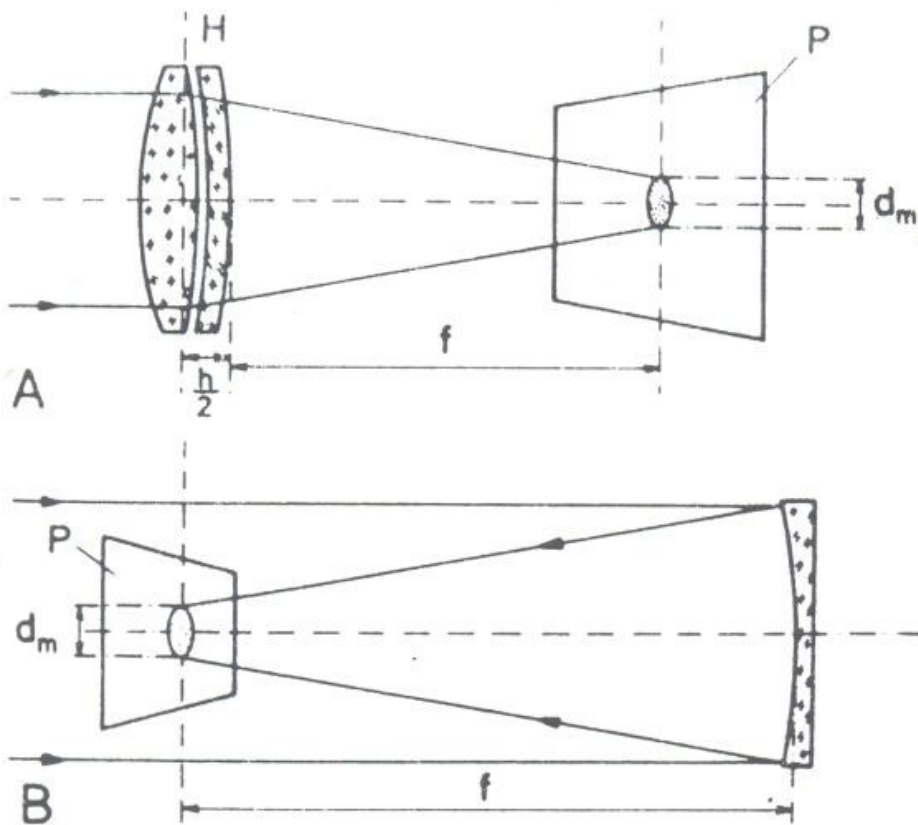
V případě čočkového dalekohledu (refraktoru) nás zajímá ohnisková vzdálenost objektivu (tedy ohnisková vzdálenost přední objektivové čočky) a okuláru (čočky na konci přístroje).

Ohniskovou vzdálenost uvádíme nejčastěji v milimetrech. Ohnisková vzdálenost okulárových skel, které často používají amatérští astronomové při konstrukci malých dalekohledů se vyjadřuje v dioptriích (D). Počet dioptrií nám udává tzv. optickou mohutnost čočky, která je obrácenou hodnotou ohniskové vzdálenosti (vyjadřované v metrech). Čočka s optickou mohutností +2D je spojná čočka s ohniskovou vzdáleností 1/2 m, čočka 1/2 D má ohniskovou vzdálenost 2 m.

Rozptylová okulárová skla se označují záporným znaménkem (např. -2D).

Objektiv astronomického dalekohledu je nejčastěji složený ze dvou čoček (spojné a rozptylné), které jsou slepené, nebo na sebe těsně přiložené. Při měření ohniskové vzdálenosti postupujeme tak, jako by se jednalo pouze o jednu čočku (viz. výše). Při tom objektiv namíříme na Slunce (nebo na Měsíc) a za objektiv vložíme kousek tvrdšího papíru, který držíme rovnoběžně s čočkou (kolmo k ose čočky). V žádném případě se však na Slunce přes dalekohled nedíváme!!! Slunce, střed objektivu a střed papíru musí být v jedné přímce. Když budeme papír postupně posouvat dál od objektivu, v určitém okamžiku se nám na této improvizované projekční ploše objeví ostrý obraz objektu. Když je obraz nejostřejší, změníme vzdálenost mezi papírem a středem zadní plochy objektivu a přičteme ještě $1/2$ jeho hloubky ($h/2$). Výsledek je ohnisková vzdálenost objektivu.

Při určování ohniskové vzdálenosti dutých zrcadel (tedy objektivu pro zrcadlové dalekohledy - reflektory) postupujeme podobně. Zrcadlo obrátíme proti Slunci či Měsíci a jejich obraz zachytíme na malém kousku papíru, který držíme mezi zrcadlem a objektem kolmo na spojnici středu zrcadla a Slunce (Měsíce). Když se nám na papíře objeví ostrý obraz, změříme vzdálenost mezi středem duté plochy zrcadla a projekční plochou (papírem). Tato vzdálenost se rovná ohniskové vzdálenosti zrcadla (f).



Obr. 2: měření ohniskové vzdálenosti čočkového objektivu A a zrcadlového objektivu B; H - hlavní rovina objektivu; $h/2$ - poloviční hloubka objektivu; P - promítací plocha; d_m - průměr obrazu (Slunce)

Výhodou metody určování ohniskové vzdálenosti je to, že nepotřebujeme znát polohu hlavní roviny měřeného optického systému. Metoda je nejméně vhodná fotografické objektivy, které se skládají z většího počtu členů a jejich délka je větší. Je tedy těžké určit polohu hlavní roviny, od které máme měřit vzdálenost k ohnisku. V tomto případě postupujeme tak, že si stanovíme polohu ohniskové roviny a co nejpřesněji si změříme průměr promítnutého obrazu. Obraz můžeme případně zachytit

na citlivou fotografickou vrstvu. Víme, že tato tělesa na obloze vidíme pod úhlem $0,52^\circ$. Na projekční ploše se tyto objekty (Slunce nebo Měsíc) promítnou různě velké, přičemž průměr jejich obrazu je v reálném poměru s ohniskovou vzdáleností objektivu. Platí zde rovnice, podle které průměr obrazu Slunce nebo Měsíce (dm) se rovná ohniskové vzdálenosti objektivu (f) v součinu s číslem 0,009.

$$dm = f \cdot 0,009$$

Lze říci, že promítnutý obraz má průměr přibližně $1/100$ ohniskové vzdálenosti objektivu. To znamená, že objektiv s ohniskovou vzdáleností $f = 1\,000\text{mm}$ nám dává obraz Slunce o průměru 9 mm. Když jsme změřili, že objektiv dává v ohnisku obraz Slunce o průměru 13,5 mm, použijeme rovnici ve tvaru

$$f = dm / 0,009$$

a vypočítáme, že objektiv má ohniskovou vzdálenost 1 500 mm. Tato metoda zároveň dokazuje, že při pozorování takových objektů běžnými fotoaparáty s ohniskovou vzdáleností 50 mm nebo 80 mm vzniká obraz nepatrného průměru (0,45 mm a 0,72 mm).

b. jak zjistíme ohniskovou vzdálenost okuláru

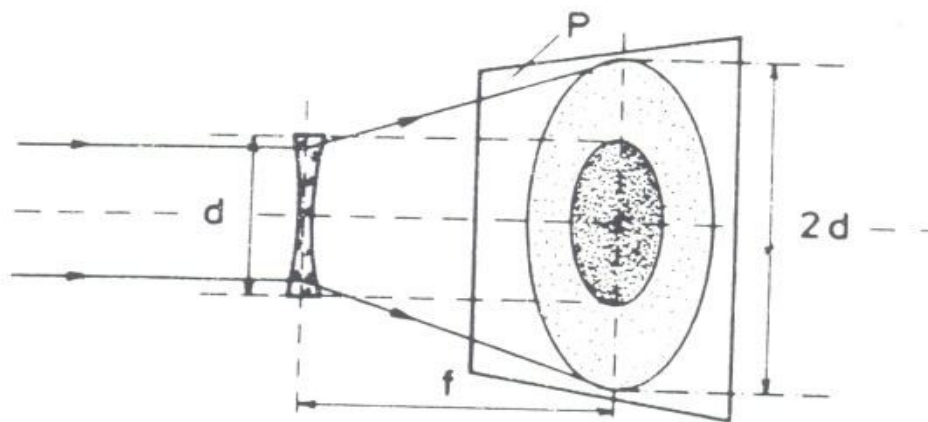
Zjistit ohniskovou vzdálenost okuláru je relativně obtížné. Polohu ohniskové roviny si snadno zjistíme promítáním (jako v případě objektivu), ale nevíme, odkud měřit vzdálenost ohniska. Okuláry jsou krátkoohniskové soustavy a proto při měření průměru promítnutého obrazu Slunce, který je menší než 1mm bychom se dopouštěli velkých nepřesností. Pro nás nejpřístupnější bude výpočet ohniskové vzdálenosti okuláru ze zvětšení dalekohledu.

Astronomické okuláry tovární výroby mají vždy označenou ohniskovou vzdálenost (označení bývá na plášti okuláru). U amatérských dalekohledů lze použít i okuláry určené pro mikroskopy. Pokud jsou kvalitní, jsou dobře použitelné i pro astronomická pozorování. Na mikroskopových okulárech často bývá označení jejich typu a zvětšení; např. O 10x je ortoskopický okulár v mikroskopu zvětšující 10x. Z uvedeného zvětšení můžeme vypočítat ohniskovou vzdálenost (f) okuláru v milimetrech tak, že zvětšení (Z) dělíme číslem 250:

$$f = 250 / Z \text{ (mm)}$$

c. určení ohniskové vzdálenosti rozptylové (zmenšovací) čočky

Rozptylné čočky ve svém ohnisku nevytvářejí skutečný obraz. Ohnisko se nachází před čočkou ve směru objektu, proto údaje o ohniskové vzdálenosti rozptylných čoček uvádíme se záporným znaménkem (-).



Obr. 3: měření ohniskové vzdálenosti rozptylné čočky; d - průměr čočky; $2d$ - průměr disku rozptýleného světla; f - ohnisková vzdálenost; P - promítací plocha

Rozptylné čočky mají v amatérské astronomické technice své místo, i když se s nimi astronom-amatér setká jen velmi zřídka. Vysvětlíme si jednoduchou metodu měření ohniskové vzdálenosti. Použijeme opět promítací plochu (kousek bílého papíru), na kterou si nakreslíme kruh, jehož průměr se rovná dvojnásobku průměru dvojnásobku čočky. Čočku obrátíme směrem ke Slunci a promítací plochu vložíme za čočku z druhé strany. Projekční plochu posouváme k čočce tak dlouho, až je průměr kruhové plochy rozptýleného světla tak velký, že vyplňuje právě nakreslený kruh a jeho průměr je tedy shodný s dvojnásobkem průměru čočky. Nyní změříme vzdálenost mezi promítací plochou a středem plochy čočky. Tato vzdálenost se rovná ohniskové vzdálenosti rozptylné čočky. Při tomto měření platí všeobecný vzorec

$$f = l \cdot d / (d - b + 0,0094 \cdot l),$$

kde l = vzdálenost čočky od promítací plochy, d = průměr čočky, b = průměr plochy kruhu rozptýleného světla na papírové ploše.

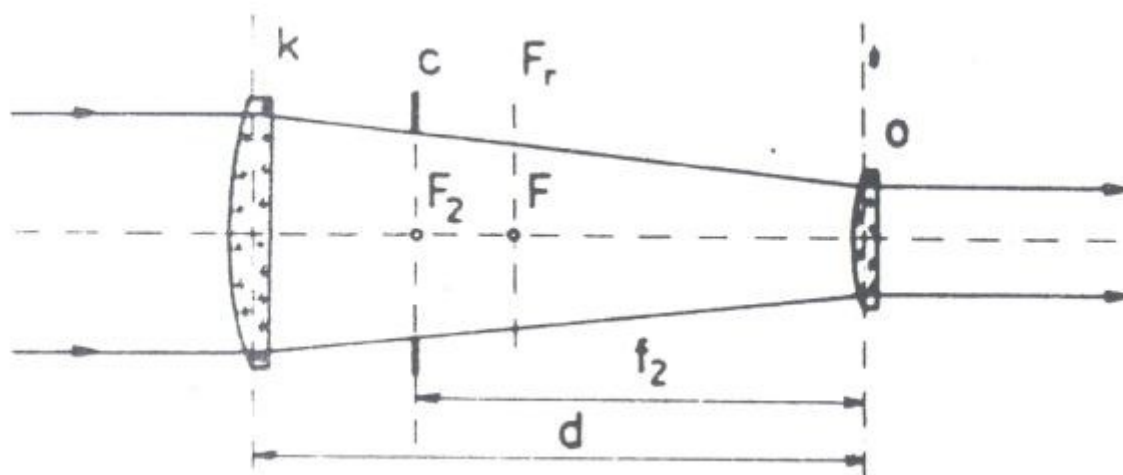
2. výpočet ohniskové vzdálenosti dvoučočkového systému

Při výpočtech ohniskové vzdálenosti systému složeného ze dvou čoček lze použít následující rovnici (platí jak pro jednoduché, tak i pro složené čočky):

$$f = f_1 \cdot f_2 / (f_1 + f_2 - d),$$

kde f = celková ohnisková vzdálenost systému; f_1 a f_2 jsou ohniskové vzdálenosti jednotlivých členů (čoček) a d = vzdálenost mezi hlavními rovinami obou čoček (tedy přibližně vzdálenost čoček). Pokud je v systému rozptylová čočka, musíme do vzorce k údaji o ohniskové vzdálenosti uvést záporné znaménko (-).

a. výpočet ohniskové vzdálenosti pro okulár Huygens (složený ze dvou čoček)



Obr. 4: uložení čoček v Huygensově okuláru: F_2 - ohnisko čočky "o"; F_r - ohnisková rovina okuláru; F - ohnisko okuláru; f_2 - ohnisková vzdálenost čočky "o"; d - vzdálenost mezi čočkami "o" a "k"; c - clona okuláru

Pro tento typ okuláru použijeme dvě spojné čočky ploskovypuklého tvaru. Jejich ohnisková vzdálenost musí být v poměru 3:2. Čočky jsou uloženy ve vzájemné vzdálenosti, která se rovná

$$d = 0,5 \cdot (f_1 + f_2).$$

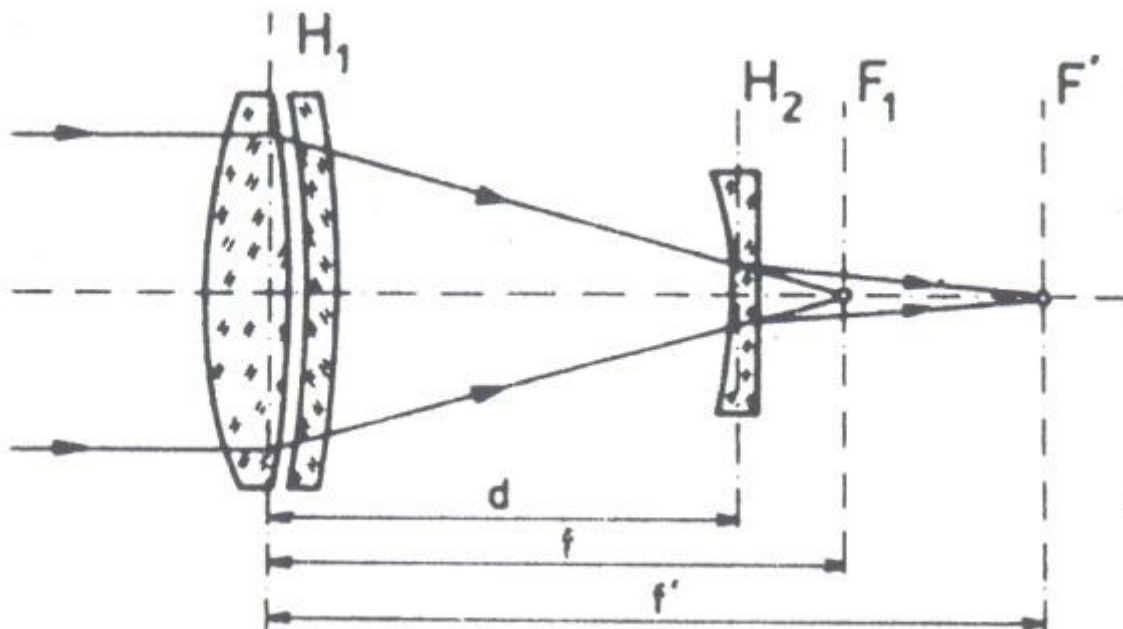
Tím získáme obraz téměř bez chromatické vady, zkreslení a reflexů.

Pokud $f_1 = 30$ mm; $f_2 = 20$ mm; $d = 25$ mm, potom:

$$f = f_1 \cdot f_2 / (f_1 + f_2 - d) = 600 / (50 - 25) = 24 \text{ mm.}$$

b. výpočet prodloužení ohniskové vzdálenosti objektivu rozptylnou čočkou

Takový problém musíme řešit v kupříkladu v okamžiku, kdy máme krátký okulárový výtah a dalekohled neumožňuje zaostřit obraz při použití pentagonálního hranolu pro pozorování Slunce. V takovém případě okulár zůstává příliš daleko od ohniskové roviny objektivu. Zařazením rozptylné čočky (tzv. Barlow čočky) ještě před ohnisko získáme prodloužení ohniskové vzdálenosti. Dvojitá achromatická Barlow čočka dává lepší obraz než jednoduchá rozptylka. Pokud však nemá být prodloužení ohniskové vzdálenosti příliš velké, postačí nám i jednoduché sklo z brýlí.



Obr. 5: prodloužení ohniskové vzdálenosti objektivu rozptylnou čočkou: H_1 - hlavní rovina objektivu; H_2 - hlavní rovina rozptylné čočky; F_1 - původní ohnisko objektivu; F' - ohnisko soustavy; d - vzdálenost obou čoček; f - původní ohnisková vzdálenost; f' - prodloužená ohnisková vzdálenost

Pokud máme objektiv s ohniskovou vzdáleností $f_1 = 1000$ mm a rozptylku s ohniskovou vzdáleností $f_2 = -100$ mm, kterou umístíme do vzdálenosti $d = 980$ mm za objektiv, tedy 20mm před ohniskovou rovinu objektivu, potom výslednou ohniskovou vzdálenost systému f opět vypočítáme podle vztahu:

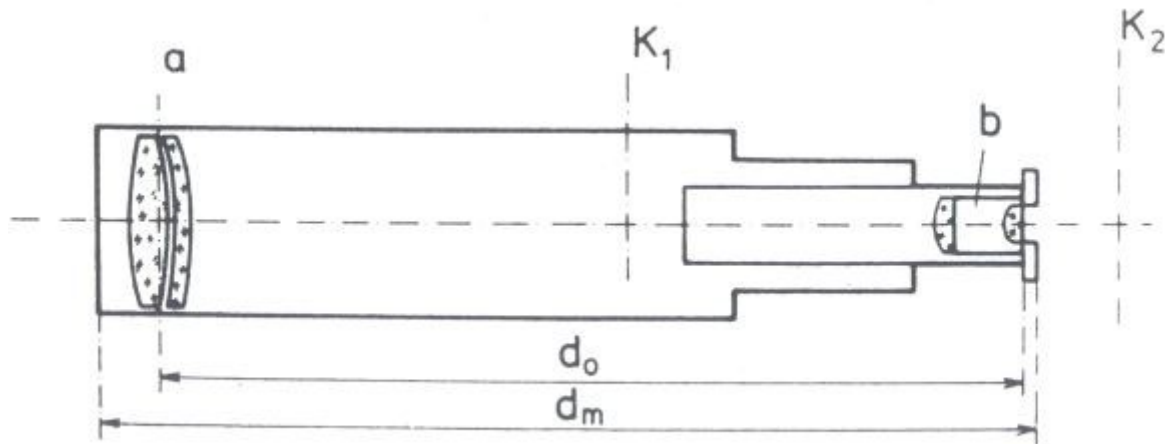
$$f = f_1 \cdot f_2 / (f_1 + f_2 - d) = 1000 \cdot (-100) / [1000 + (-100) - 980] = 1250\text{mm.}$$

3. určení délky dalekohledu

Pokud uvažujeme o dalekohledu jako o optickém systému, potom je jeho délka (měřená od hlavní roviny objektivu k hlavní rovině okuláru) rovná součtu ohniskových vzdáleností obou těchto součástí (objektivu a okuláru). Když si však pro konstrukci dalekohledu připravujeme rouru pro tubus dalekohledu a též pro okulárový výtah (pro uložení okuláru), musíme počítat s tzv. mechanickou délkou dalekohledu. Mechanická délka je přirozeně delší, jež délka optická. Je tomu tak proto, že objektiv je uložený v pouzdře, které začíná před vlastní čočkou. Též okulár mechanickou délku o kousek prodlouží. Jeho hlavní rovina se totiž nenachází na jeho konci, ale mezi jeho čočkami (viz. výše).

Abychom při určování délky tubusu a okulárového výtahu neučinili chybu, bude vhodné si uložení čoček odzkoušet na improvizovaném modelu. Můžeme použít trubičku z tvrdého píru, která je o něco kratší, než je ohnisková vzdálenost objektivu. Do jednoho konce opatrně připevníme objektiv. Okulár držíme v ruce a přiložíme jej k opačnému konci trubice. Potom celý přístroj namíříme na libovolný objekt ve vzdálenosti cca. 1 až 2km. Snažíme se postupným posouváním okuláru ve směru osy dalekohledu zaostřit obraz pozorovaného objektu. Když je obraz jasně viditelný

(zaostřený), změříme si vzdálenost od zadního okraje objektivu k přednímu okraji okuláru. Tuto vzdálenost bude posléze nutné dodržet pro konstrukci dalekohledu. V opačném případě se může stát, že dalekohled nepůjde zaostřit. Je nutné počítat i s tím, že při budoucím pozorování použijeme i okulár s jinou (delší / kratší) ohniskovou vzdáleností. Je tedy nutné zajistit konstrukci okulárového výtahu tak, abychom mohli okulár ještě alespoň o 20 až 30mm přiblížit k objektivu, případně vzdálit. Pokud máme k dispozici i zenitový hranol, nejkratší potřebnou délku okulárového výtahu zjistíme použitím hranolu s okulárem o nejkratší ohniskové vzdálenosti. Naopak nejdelší potřebnou délku okulárového výtahu zjistíme s okulárem o nejdelší ohniskové vzdálenosti zeb použitím hranolu.



Obr. 6: mechanická délka (d_m) a optická délka (d_o) dalekohledu: a - objektiv; b - okulár; K₁ - K₂ - polohy okulárového výtahu při maximálním a minimálním vysunutí

4. určení zvětšení dalekohledu

Při pozorování nekonečně vzdálených objektů (pozn. překladu: v optice lze velmi vzdálené objekty považovat za nekonečně vzdálené) čočkovým refraktorem (např. Keplerovým dalekohledem) nebo zrcadlovým reflektorem (např. Newtonovým dalekohledem), jsou jejich optické systémy v takové poloze, že ohnisko objektivu a okuláru se nachází v jednom bodě. Světelné paprsky vstupující do objektivu a posléze do okuláru mají za těchto okolností podobu rovnoběžných svazků. Výpočet zvětšení dalekohledu (Z) je možné uskutečnit více způsoby.

a. zvětšení odpovídá poměru ohniskové vzdálenosti objektivu a okuláru

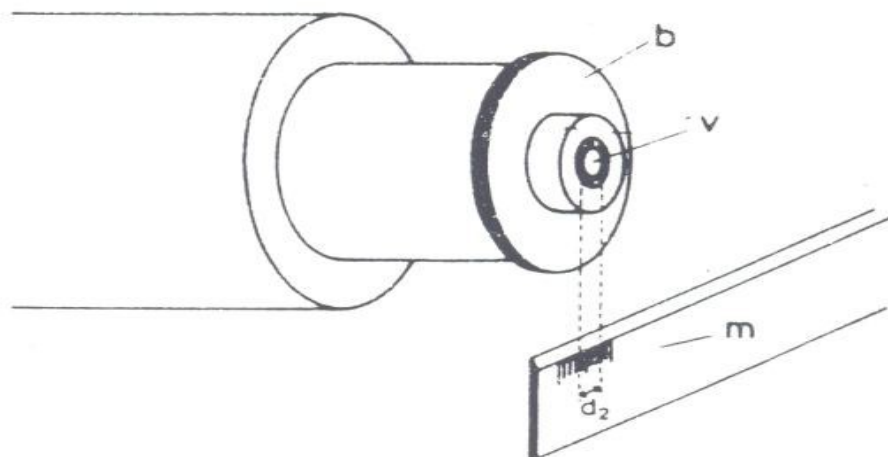
$$Z = f_1 / f_2,$$

kde je Z - zvětšení; f_1 - ohnisková vzdálenost objektivu; f_2 - ohnisková vzdálenost okuláru. Zvětšení tedy narůstá se rostoucí ohniskovou vzdáleností objektivu a s klesající ohniskovou vzdáleností okuláru.

b. zvětšení jako podíl průměrů pupil

Zvětšení můžeme vypočítat jako podíl průměru vstupní pupily (d_1) a výstupní pupily (d_2). Vstupní pupilou je myšlen průměr objektivu (omezený vnitřním okrajem jeho objímky). Výstupní pupilu vidíme jako světlou plošku na čočce okuláru při zaostření na nekonečno. Její průměr můžeme změřit přiložením průhledného měřítka, nebo lze výstupní pupilu promítnout na papír. Tento způsob zjištění zvětšení vyjadřuje rovnice

$$Z = d_1 / d_2.$$



Obr. 7: výstupní pupila dalekohledu (v); b - okulár; d2 - průměr výstupní pupily; m - průhledné měřítko

c. porovnání velikostí pozorovaného objektu

Výpočet zvětšení pozorováním velikosti pozorovaného objektu viditelného okem a dalekohledem pozorujeme libovolný objekt jedním okem přes dalekohled a druhým okem pozorujeme tentýž objekt přímo (tedy bez přístroje). Při použití této metody je vhodné pozorovat střechu pokrytou taškami. Pokud na stejně velké zorné pole připadají 3 tašky viděné dalekohledem, zatímco pouhým okem jich lze napočítat kupříkladu 60, zvětšení odpovídá přibližně 20ti násobku. Tato metoda je však velmi nepřesná a pouze orientační.

d. určení ohniskové vzdálenosti spojných čoček (nebo spojných soustav) ze zvětšení

V předešlém textu jsme již zmínili, že v případě krátkoohniskových systémů bychom se při přímém měření ohniskové vzdálenosti dopustili příliš velkých chyb. Proto budeme postupovat tak, že si nejprve zjistíme zvětšení jaké dává objektiv (určité ohniskové vzdálenosti f_1) se spojnou soustavou jejíž ohniskovou vzdálenost f_2 chceme určit. Použijeme zde metodu určování zvětšení podle poměru vstupní a výstupní pupily. Pokud je např. $f_1 = 1200$ mm a $Z = 100x$, potom bude ohnisková vzdálenost druhé soustavy f_2 :

$$f_2 = f_1 / Z = 1200 / 100 = 12 \text{ mm.}$$

Podobně můžeme určit neznámou ohniskovou vzdálenost objektivu (f_1). Musíme však znát ohniskovou vzdálenost okuláru (f_2) a zvětšení (Z):

$$f_1 = f_2 \cdot Z.$$

Největší zvětšení, které lze u klasického dalekohledu účelně použít se přibližně rovná dvojnásobku průměru jeho objektivu v milimetrech:

$$Z_{\max} = 2D$$

Velká zvětšení jsou vhodná pro pozorování planet, Měsíce a dvojhvězd.

Nejmenší vhodné zvětšení je takové, při kterém je průměr výstupní pupily okuláru 8mm. Označujeme ho jako normální zvětšení. Svazek paprsků z okuláru ještě celý vstupuje do otevřené zorničky oka. Když by byla výstupní pupila většího průměru (při ještě nižším zvětšení), část světla by se už do oka nedostala a zůstala nevyužitá. Normální zvětšení používáme při pozorování mlhovin, komet a jiných plošných (mlhavých) objektů. V tomto případě vidíme objekt tak jasný, jako při pozorování pouhým okem. Jedná se o nejvyšší jasnost, jakou můžeme dosáhnout při vizuálním pozorování (tj. při pozorování pouhým okem). Normální zvětšení lze vypočítat podle vzorce (údaje v milimetrech):

$$Z_{\text{norm.}} = d1 / 8.$$

5. určení rozlišovací schopnosti dalekohledu

Nejmenší vzdálenost dvou bodů, které dalekohled dokáže rozlišit za ideálních pozorovacích podmínek je označována jako rozlišovací schopnost (d''). Rozlišovací schopnost vypočítáme (v obloukových vteřinách) poměrem 138" a průměru objektivu v milimetrech (d):

$$d = 138 / d.$$

Rozlišovací schopnost je citlivým měřítkem optické kvality objektivu. Ke kontrolnímu hodnocení kvality používáme především dvojhvězdy. Je nutné pozorovat vždy za velmi dobrých atmosférických podmínek (při klidném ovzduší). Používáme zvětšení, které se rovná průměru objektivu v milimetrech, případně i více. Maximálně však použijeme zvětšení odpovídající dvojnásobku průměru objektivu v milimetrech.

6. určení zorného pole dalekohledu

Pokud používáme širokouhlý okulár, může průměr zorného pole dalekohledu (Z_p) určit přibližným podílem 30° a zvětšení dalekohledu:

$$Z_p = 30^\circ / Z.$$

Můžeme postupovat i tak, že si zjistíme úhlovou vzdálenost hvězd na obloze, které se nám do zorného pole dalekohledu ještě vejdou. Tato metoda se hodí i pro triedry a jiné přístroje s velkým zorným polem. V následující tabulce jsou vzdálenosti některých jasných hvězd Velkého vozu:

| hvězdy Velké medvědice (UMa) | úhlová vzdálenost (°) |
|------------------------------|-----------------------|
| gama - delta | 4,53 |
| alfa - beta | 5,38 |
| éta - ksí | 6,68 |
| beta - gama | 7,90 |
| gama - epsilon | 8,96 |
| delta - ksí | 9,78 |

Přístroje se zorným polem menším než 1° můžeme použít na odhad jeho průměru zdánlivý úhlový průměr Slunce nebo Měsíce (přibližně $0,5^\circ$).

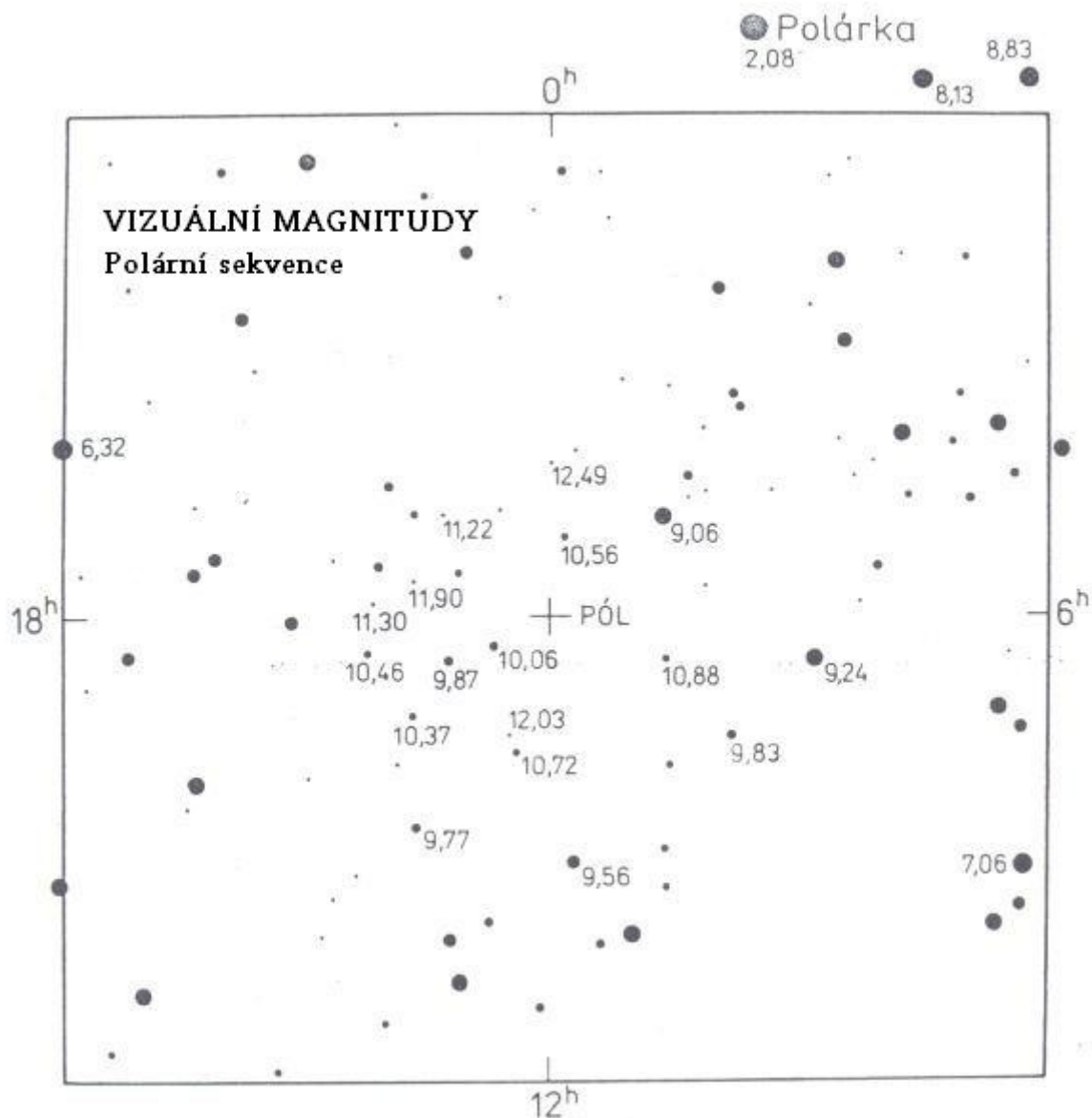
Poměrně přesný odhad průměru zorného pole dovoluje metoda, při které měříme čas přechodu hvězdy zorným polem nepointovaným dalekohledem. Vyhledáme si hvězdu nad jihem v blízkosti rovníku. Dalekohled orientujeme tak, aby hvězda při svém zdánlivém pohybu procházela středem zorného pole z jedné strany na druhou. (dalekohled se při tom nepohybuje). Následně odměříme čas (v sekundách), který hvězda potřebuje na projití celým zorným polem. Pokud zjištěný čas vynásobíme 15krát, získáme průměr zorného pole dalekohledu při použití daného okuláru:

$$Z_p = T \cdot 15.$$

Pokud hvězda například prochází zorným polem našeho dalekohledu 3min (tedy 180s), je průměr zorného pole 2700", tedy 45'.

7. viditelnost nejslabších hvězd

Viditelnost nejslabších hvězd okem i dalekohledem se velmi mění podle aktuálních pozorovacích podmínek (průzračnost atmosféry, rušivé vlivy osvětlení, apod.). Jaká je nejnížší jasnost hvězd, kterou nám dalekohled ukáže si můžeme nejpřesněji zjistit pozorováním hvězd s podrobnou mapou. K tomuto účelu se nejlépe hodí tzv. severní polární sekvence, tedy hvězdné okolí Polárky.



Obr. 8: Mapka okolí Polárky (severní polární sekvence); čísla uvádí hvězdné velikosti (magnitudy) jednotlivých hvězd.

Čím má dalekohled větší průměr objektivu (d), tím víc světla soustředí a tím slabší hvězdy jsou potom přes přístroj viditelné. Hvězdnou velikost (m) nejslabších hvězd, které ještě můžeme vidět menším dalekohledem s průměrem objektivu (v milimetrech) při použití zvětšení Z vypočítáme podle rovnice:

$$m = 5,5 + 2,5 \cdot \log d + 2,5 \cdot \log Z.$$

Vycházíme při tom z předpokladu, že pozorujeme za optimálních podmínek, přičemž nejslabší hvězdy viditelným okem jsou přibližně objekty 5,5 mag.