Praktická astronomická optika

Zdeněk Řehoř

OLOMOUC 2015
Univerzita Palackého v Olomouci

Obsah

Úvodem 6
1. Základy geometrické optiky 7
1.1 Základní zákony geometrické optiky 7
1.1.1 Optické záření 7
1.1.2 Přímočarost šíření 9
1.1.3 Odraz světla a zobrazení zrcadlem 10
1.1.4 Zákon lomu 12
1.2 Zobrazovací rovnice 17
1.3 Aberace optických soustav 19
1.3.1 Sférická aberace (kulová vada) 19
1.3.2 Asymetrická chyba (koma) 21
1.3.3 Astigmatismus a zklenutí obrazu 23
1.3.4 Zkreslení (distorze) 24
1.3.5 Chromatické aberace (barevné vady) 25
1.3.6 Aberace a spot diagram 27
2. Astronomický dalekohled 29
2.1 Princip činnosti dalekohledu 29
2.2 Vlastnosti dalekohledu 31
2.3 Druhy astronomických dalekohledů 35
2.3.1 Refraktory 35
2.3.2 Reflektor 38
2.3.3 Katadioptrický systém 41
2.4 Porovnání čočkových a zrcadlových dalekohledů 43
3. Hodnocení kvality optických přístrojů 45
3.1 Číselná kritéria 45
3.1.1 Kritérium PV 45
3.1.2 Kritérium RMS 47
3.1.3 Strehlův podíl (SR koeficient) 48
3.1.4 Rayleighovo kritérium 49
3.2 Test na hvězdu 51
3.2.1 Umělá hvězda 51
3.2.2 Realizace testu na hvězdu 52
3.2.3 Sférická aberace 53
3.2.4 Deformovaný optický člen 54
3.2.5 Astigmatismus 54
3.2.6 Zonální chyby 55
3.2.7 Sražené hrany 55

3.3. Ronchiho test ... 58
3.3.1 Základ Ronchiho testu ... 58
3.3.2 Varianty uspořádání Ronchiho testu ... 60
3.3.3 Vyhodnocení Ronchiho testu ... 61
3.3.4 Vliv aberací na vzhled Ronchigramu ... 63
3.3.5 Nelineární testy ... 66
3.4. Modulační přenosová funkce ... 72
3.4.1 Co to je modulační přenosová funkce ... 72
3.4.2 Modulační přenosová funkce lidského oka ... 74
3.4.3 Interpretace modulační přenosová funkce ... 75
3.4.4 Vliv centrálního stínění ... 78
3.5 Určení modulační přenosová funkce ... 82
3.5.1 Test USAF-1951 ... 82
3.5.2 Test KOREN 2003 ... 84
3.5.3 Siemensova hvězda ... 85
4. Astronomické příslušenství ... 87
4.1 Okuláry ... 87
4.1.1 Základní vlastnosti a výběr vhodného okuláru ... 87
4.1.2 Základní typy okulárů ... 92
4.1.3 Ortoskopické okuláry ... 94
4.1.4 Širokoúhlé okuláry ... 95
4.2 Čočka Barlow ... 99
4.3 Astronomické filtry ... 102
4.3.1 Planetární filtry ... 102
4.3.2 Mlhovinové filtry ... 102
5. Astronomické montáže ... 107
5.1 Druhy montáží astronomického dalekohledu ... 107
5.1.1 Azimutální montáž ... 107
5.1.2 Paralaktická montáž ... 110
5.1.3 Automatizované montáže ... 112
5.2 Další doplňkové příslušenství ... 113
6. Základní pravidla používání optických přístrojů ... 115
6.1 Používání dalekohledu ... 115
6.2 Kolimace dalekohledu ... 118
6.2.1 Kolimace Newtonova dalekohledu mechanickým kolimátorem ... 119
6.2.2 Kolimace Newtonova dalekohledu laserovým kolimátorem ... 123
6.2.3 Kolimace katadioptrických systémů ... 124
6.2.4 Kolimace refraktorů ... 128
7. Čištění optických členů ... 131
7.1 Suché čištění ... 131
7.2 Mokré čištění ... 132

7.3. Postupy čištění objektivů 134
7.3.1 Postup čištění čočkových objektivů 134
7.3.2 Čištění zrcadlového objektivu 137
7.3.3 Čištění rovinných zrcadel 143
7.3.4 Čištění katadioptrických systémů 144
Závěrem 152
Přehled použitých symbolů a zkratek 153
Doporučená literatura 155
Přílohy 156
P.1 Přehled nejdůležitějších vzorců 156
P.2 Deformace zrcadla během skladování 157
P.3 Haasova stupnice rozlišení dvojhvězdy 159
P.4 Filtry UVBRI 160

Úvodem

Jediným prostředkem pro pozorování vesmíru bylo po dlouhá tisíciletí pouze lidské oko. Poznání o okolním vesmíru tak bylo limitováno jeho omezenými schopnostmi. Prakticky žádný přístroj v historii lidstva tak mnoho nerozšířil obzory jako dalekohled. Dalekohledy nejrůznějších rozměrů přiblížily vzdálené objekty a umožnily proniknout do jejich tajů. Dalekohled se stal jedním z nedůležitějších přístrojů astronomů, ale nejen jich. Záhy se objevilo mnoho variací těchto přístrojů využívajících různé konstrukce i optické prvky. S tím vyvstala i celá řada nových otázek souvisejících mj. s jejich vlastnostmi i provozem.

S ohledem na počet nejrůznějších konstrukcí je tato kniha omezena pouze na ty, které se v astronomické praxi využívají nejčastěji. Cílem této knihy je proto poskytnout základní přehled o astronomické technice a základních zákonitostech, kterými se řídí. Kniha je určena studentům optických oborů a oborů příbuzných. Svou koncepcí nabízí pohled na astronomické přístroje nejen z teoretického, ale zejména praktického hlediska. Nabízí tak styčný prostor pro přiblížení této problematiky i z pohledu uživatelů této techniky. Je proto vhodná i pro širokou astronomickou veřejnost.

Kniha je rozdělená do sedmi kapitol. První seznamuje zejména pro seznámení se zákony optického zobrazování a základními optickými vadami. Navazující druhá kapitola se zabývá základními druhy a vlastnostmi astronomických dalekohledů. Svým rozsahem jsou tyto kapitoly určeny zejména začínajícím astronomům, popř. těm, kteří si chtějí osvěžit své znalosti nutné v dalších kapitolách.

Třetí kapitola tohoto textu je věnována způsobům a kritériím hodnocení kvality optických přístrojů. Cíleně jsou vybrány ty, které nevyžadují nákladné laboratorní vybavení, ale které jsou přitom dostatečně citlivé a mají vysokou vypovídající hodnotu. S jejich využitím lze tak provést dostatečný rozbor optických vlastností astronomických dalekohledů. Jednotlivé podkapitoly jsou proto doplněny mimo teoretických základů i praktickými informacemi pro případnou realizaci.

Čtvrtá a pátá kapitola pojednává o doplňkovém přístrojovém vybavení. Mimo popis jeho základních vlastností zde naleznete i konkrétní srovnání některých, v současnosti vyráběných, prvků a rady pro jejich případný výběr.

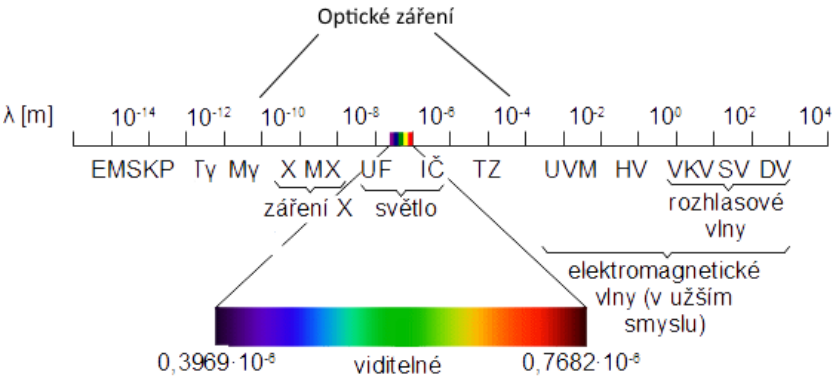
Poslední dvě kapitoly (šest a sedm) jsou věnovány provozu a údržbě astronomických dalekohledů. Právě tato oblast je velmi často opomíjená a je zdrojem četných mýtů a obav. Velkou část v ní proto zabírají podrobné postupy, které mají za cíl poskytnout návod k co nejsnadnějšímu udržení astronomického dalekohledu v co nejlepším stavu.

1. Základy geometrické optiky

1.1 Základní zákony geometrické optiky

1.1.1 Optické záření

Veškeré optické přístroje, tedy nejen ty využívané v astronomii, jsou určeny ke „zpracování“ optického záření. Optické záření je část elektromagnetického záření (viz obr. 1.1), která sahá od tepelného infračerveného záření přes viditelné světlo a ultrafialové záření až k záření rentgenovému. Astronomové se přirozeně snaží využít pro získání co nejvíce informací o pozorovaných objektech co nejširší část z dopadajícího optického záření. Z části je tato snaha omezena vnějšími faktory (např. atmosféra Země propouští jen některé spektrální obory), z části pak omezeními plynoucími z vlastností přijímacích přístrojů, popř. konečných detekčních členů (lidské oko, CCD kamera). V astronomické praxi se nejčastěji využívá poměrně úzká oblast optického záření, a to světlo, popř. blízké infračervené záření.



Obr. 1.1 K pojmu optické záření a světlo

Zatímco k popisu elektromagnetické vlny v užším slova smyslu (rozhlasové či TV vysílání, mikrovlny využívané v radarech, ...) je využíváno její frekvence, u optického záření je zpravidla využíván jiný parametr - **vlnová délka**. Obě veličiny lze velmi snadno mezi sebou převést pomocí vztahu [1]:

$$c = f \times \lambda \,, \qquad (1.1)$$

kde c je fázová rychlost světla (přibližně 3×10^8 m/s), f frekvence záření [Hz] a λ vlnová délka záření [m].

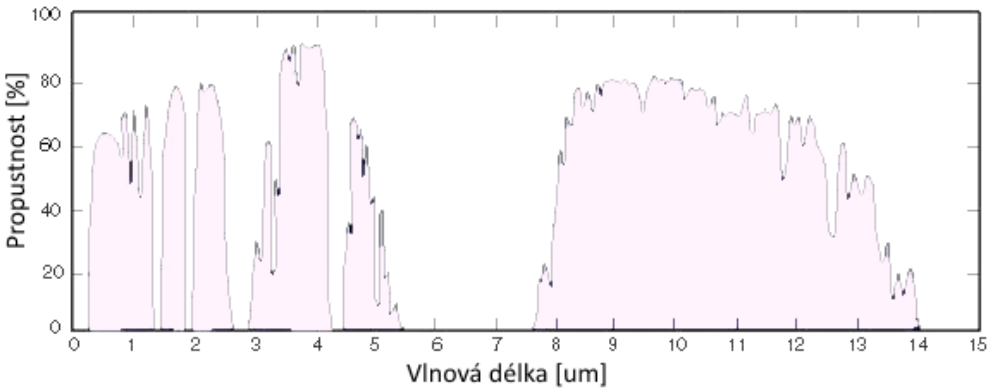
Světlo, tedy okem viditelná část elektromagnetického záření, je pak

charakterizováno vlnovými délkami v rozsahu přibližně 390–770 nm (nebo chcete-li o frekvenci $3{,}9\times10^{14}$ Hz až $7{,}9\times10^{14}$ Hz). Užší pásma v uvedeném rozmezí vnímá lidské oko jako barvy (barva světla je určena jeho vlnovou délkou). Např. světlo v rozsahu vlnových délek (380 nm až 455 nm) je vnímáno okem jako fialové, modré barvě odpovídají vlnové délky (455 nm až 492 nm), zelené (492 nm až 577 nm), žluté (577 nm až 597 nm), oranžové (597 nm až 622 nm) a červené (622 nm až 740 nm). „Správným“ poměrem vlnových délek lze pak vytvořit jakoukoliv vnímatelnou barvu světla.

Přiléhající oblasti vně viditelného pásma mají názvy odvozené od krajních barev. Předpona "ultra" má význam "nad, přes, více". Předpona "infra" má význam "dole, nízko, pod". Ultrafialová oblast popisuje optické záření přiléhající k fialové barvě, jeho vlnová délka je kratší než cca 390 nm. Infračervená oblast pak popisuje optické záření přiléhající k červené barvě. Spektrum infračervené oblasti leží v rozmezí vlnových délek 740 nm až 1 mm.

Atmosféra Země některé vlnové délky optického záření propouští lépe, jiné hůře, popř. pro některé je zcela nepropustná. Oblasti dobré propustnosti optického záření, tedy ty oblasti, ve kterých je jejich zeslabení (útlum) malé, se označují jako tzv. **atmosférická okna** (viz obr. 1.2).

Mimo optické okno ve viditelné a k ní přiléhající ultrafialové a infračervené oblasti, existují takové oblasti propustnosti i v jiných částech elektromagnetického spektra. Např. v infračervené oblasti je rozsah vlnových délek (3-5) μm označován jako tzv. první atmosférické okno a (8-14) μm jako tzv. druhé atmosférické okno. Není bez zajímavosti, že tyto vlnové délky odpovídají vlastnímu tepelnému vyzařování objektů o teplotách řádově stovky stupňů Celsia (první atmosférické okno), popř. za běžných pokojových teplot (druhé atmosférické okno). Přirozeně existují takováto okna i v jiných spektrálních oblastech, zejména pak v rádiové oblasti.



Obr. 1.2 Spektrální propustnost atmosféry Země

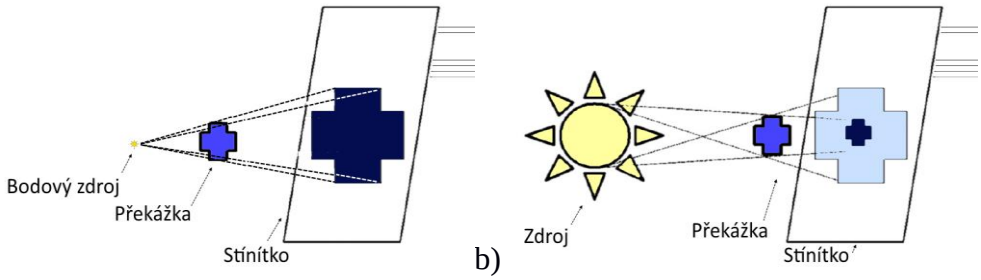
Protože termín světlo je jednoslovný a velmi flexibilní, užívá se často (byť poněkud nepřesně) i pro neviditelné optické záření (např. infračervené světlo, zákon lomu světla, ...). Bez ohledu na vlnovou délku optického záření platí pro něj společné principy, které lze využít pro konstrukci optických přístrojů. V dalším zjednodušeném popisu se omezíme na základní popis pomocí tzv. geometrické optiky. V ní se světlo znázorňuje pomocí paprsků. Paprsek je přímka, která vyznačuje směr šíření světelné vlny.

1.1.2 Přímočarost šíření

Šíření světla (nebo chcete-li optického záření obecně) prostorem se řídí některými základními zákonitostmi. Jedním z nejdéle známých zákonů šíření světla je zákon přímočarosti jeho šíření.
V homogenním a izotropním prostředí se světlo šíří mezi dvěma body po přímce, která spojuje tyto dva body. V geometrické optice jsou tyto přímky představovány paprsky, které se navzájem neovlivňují a jsou na sobě nezávislé.

Tento zákon lze vyjádřit i velmi prostě. **Světlo mezi dvěma body se ve stejnorodém prostředí šíří vždy po co nejkratší dráze**. Praktický důsledek zná každý – je to tvar a velikost stínu. Jeho tvar a velikost přesně odpovídá spojnicím mezi zdrojem, vlastním předmětem a stínítkem. Nejlépe je tato situace patrná v případě úhlově malého, v ideálním případě bodového, zdroje (např. LED). Hranice pozorovaného stínu odpovídají průsečíku stínítka se spojnicemi stínícího předmětu a zdroje (obr. 1.3a).

V případě plošného zdroje (obr. 1.3b) se oblast, do které paprsky nemohou proniknout kvůli překážce, nazývá **úplný stín (umbra)**. Oblast, ve které je zastíněna část zdroje, se nazývá **polostín (penumbra)**. Praktický příklad se vybaví asi každému – jsou jimi např. příjemné stíny stromů v parném létě. Mezi nejvelkolepější příklady patří i úplné, popř. částečné zatmění Slunce či Měsíce.



Obr.1.3 Přímočarost šíření světla:
a) stín bodového zdroje světla,
b) stín u plošného zdroje světla

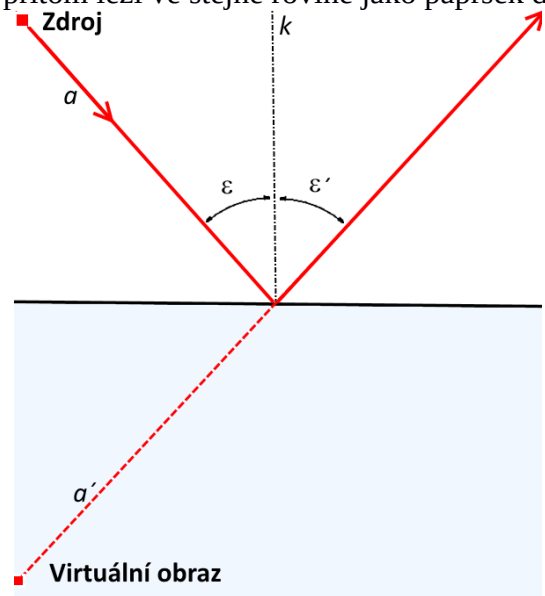
1.1.3 Odraz světla a zobrazení zrcadlem

Při dopadu paprsku na rozhraní dvou prostředí dochází v případě, že paprsek nevstupuje do druhého prostředí k jeho odrazu. Předpokládejme rovinnou plochu, která vytváří rozhraní mezi dvěma prostředími (např. vzduch a sklo). Toto rozhraní vymezuje rovinu dopadu. Přímka kolmá na rozhraní v bodě dopadu světelného paprsku je kolmice dopadu. Optické přístroje přirozeně využívají i jiné plochy než rovinné (nejčastěji sférické). V tom případě je kolmice dopadu vymezena kolmicí k tečné rovině v místě dopadu.

Zákon odrazu je velmi prostý (obr. 1.4) - **úhel dopadu je roven úhlu odrazu**, neboli [1]:

$$\varepsilon = \varepsilon' \qquad (1.2)$$

Odražený paprsek přitom leží ve stejné rovině jako paprsek dopadající.



Obr. 1.4 Odraz paprsku od rozhraní dvou prostředí

Dopadne-li rovnoběžný svazek paprsků na rovinný povrch, je odražený svazek paprsků rovněž rovnoběžný. Tento jev se využívá u **rovinných zrcadel**. Odražený paprsek se zdá, jako by vycházel z bodu ležícího zdánlivě za zrcadlem. Pozorujeme **zdánlivý (virtuální) obraz**, který má stejnou velikost jako předmět a stejnou vzdálenost za zrcadlem, a je stejně daleko od zrcadla jako předmět.

Mimo rovinných zrcadel se v astronomických přístrojích využívají i zrcadla zakřivená. Nejčastěji to jsou zrcadla sférická, jejichž plocha

představuje vrchlík koule a asférická, jejichž plocha je tvořena vrchlíkem některé asférické plochy (např. paraboloidu u parabolického zrcadla). Podle toho, na které straně vrchlíku je odrazná plocha, dělíme zakřivená zrcadla na **dutá** a **vypuklá**. Duté zrcadlo odráží světelné paprsky povrchem, který je zakřiven dovnitř (např. část vnitřního povrchu koule). Vypuklé zrcadlo má odrazný vnější povrch.

Pro popis paprsků platí v tomto případě několik základních zákonitostí:

1. Paprsky rovnoběžné s optickou osou se odráží tak, že ji protínají před zrcadlem v bodě *F* na ose – **ohnisku** (přesně to platí pro parabolické zrcadlo, tedy zrcadlo, které má tvar plochy vzniklé otáčením paraboly kolem její osy).
2. Naopak paprsky, které prochází ohniskem, se odráží rovnoběžně s optickou osou.
3. Paprsky, které se šíří po optické ose, se odráží po této ose zpět.
4. Paprsky, které dopadají do vrcholu zrcadla *V* (průsečík optické osy s povrchem zrcadla) se odráží podle zákona odrazu (tzn. pod stejným úhlem pod jakým do tohoto bodu dopadly).

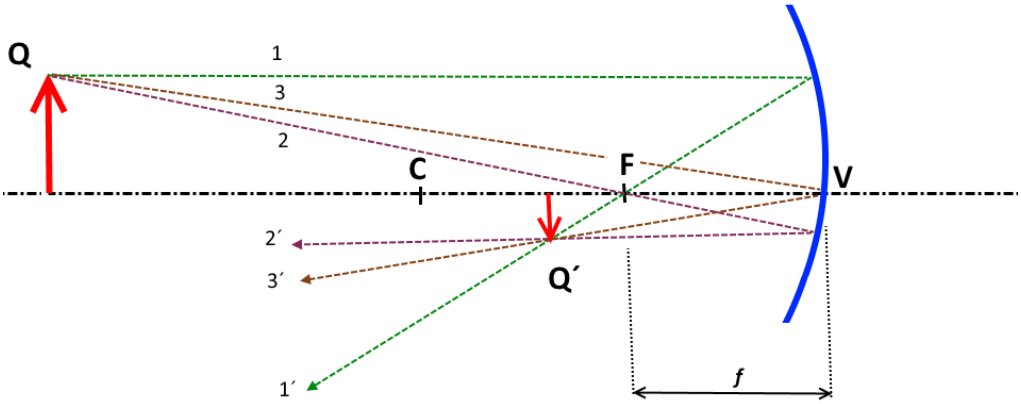
Výše uvedená pravidla lze snadno použít pro **geometrickou konstrukci zobrazení** zrcadlem (obr. 1.5). Velikost, poloha a typ obrazu závisí na tom, jak je předmět od zrcadla vzdálený. Z uvedeného lze učinit tyto snadno aplikovatelné závěry:

1. Pro předmět v nekonečnu (resp. velmi vzdálené předměty) dopadá na zrcadlo prakticky rovnoběžný svazek paprsků. Od plochy zrcadla se odráží zpět a vytváří obraz v rovině ohniska (rovinu kolmou na optickou osu procházející ohniskem nazýváme ohniskovou rovinou). Výsledný obraz je v tomto případě zmenšený, výškově a stranově převrácený a **skutečný (reálný)**. To znamená, že jej lze v případě potřeby fyzicky zachytit např. na stínítku. Vzdálenost mezi ohniskem a vrcholem zrcadla se nazývá **ohnisková vzdálenost** zrcadla.

2. Nachází-li se předmět mezi ohniskem a středem křivosti (resp. mezi jednoduchou a dvojnásobnou ohniskovou vzdáleností), bude výsledný obraz zvětšený, reálný a výškově a stranově převrácený.

3. Pro předměty blíže zrcadlu než je ohnisková vzdálenost, bude výsledný obraz zvětšený, zdánlivý a vzpřímený.

V případě vypuklého zrcadla je situace ještě snadnější – výsledný obraz je vždy zdánlivý, vzpřímený a zmenšený. Ostatně s jejich aplikací se setkáváme všichni velmi často – např. v nepřehledných křižovatkách na silnici.



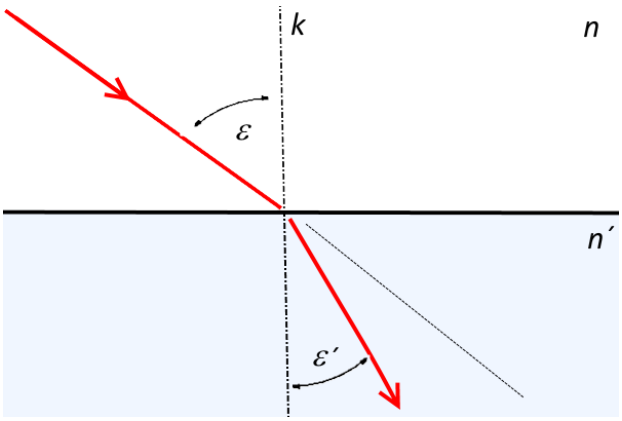
Obr. 1.5 Geometrická konstrukce zobrazení zrcadlem

1.1.4 Zákon lomu

Lom světla je jev, ke kterému dochází na rozhraní dvou prostředí v případě, že paprsek (popř. jeho část) vstupuje do druhého prostředí (obr. 1.6). Je to přímý důsledek rozdílných rychlostí šíření světla v různých prostředích. Maximální rychlost světla je ve vakuu, přibližně $3 \cdot 10^8$ ms^{-1}. Ve hmotném prostředí je tato rychlost nižší. Poměr rychlostí ve vakuu a hmotném prostředí udává tzv. optickou hustotu prostředí - ***index lomu*** daného prostředí.
Pro ***úhel lomu paprsku*** platí [1]:

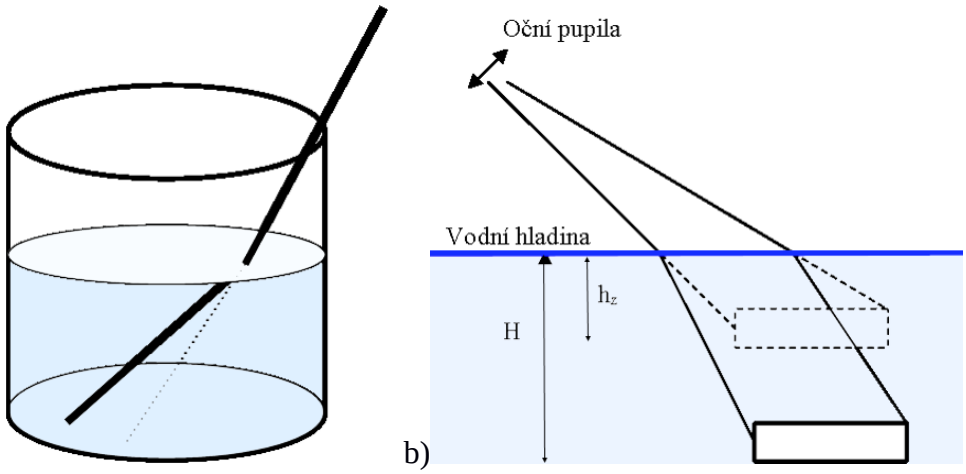
$$n \cdot sin(\varepsilon) = n' \cdot sin(\varepsilon'), \qquad (1.3)$$

kde n je index lomu původního prostředí, n' index lomu druhého prostředí, ε úhel dopadu paprsku a ε' úhel lomu paprsku.



Obr. 1.6 Lom světla

Praktických příkladů tohoto zákona najdeme kolem sebe jistě celou řadu (obr. 1.7). Pro nejjednodušší demonstraci postačuje naplnit sklenici vodou a vložit do ní např. brčko. Vlivem lomu paprsků na rozhraní voda-vzduch se nám bude zdát brčko při pohledu na vodní hladinu zalomené. Jiným příkladem je jev, který jistě znají milovníci vodních hrátek, zejména pak potápěči. Podíváme-li se v čisté vodě přes hladinu na dno, zdá se nám hloubka vody menší, než je ve skutečnosti. Na vině je opět zákon lomu. Paprsky, které se šíří od pozorovaného dna, jsou na rozhraní voda-vzduch lomeny. Mozek „předpokládá“, že se světelné paprsky šíří po přímce. Ve skutečnosti však, jak již víme, změnily směr. Proto není předmět tam, kde se zdá být.



Obr. 1.7 Optické jevy založené na lomu světla:
a) „Zlomené“ brčko ponořené do vody,
b) Zdánlivá (h_z) a skutečná hloubka (H) vody

Zákona lomu se přímo využívá u mnoha optických prvků. Těmi nejznámějšími jsou čočky. Pravidla, které jsme si uvedli u zrcadel jsou velmi podobná těm, která platí pro průchod paprsku čočkou (obr. 1.8). Pro jednoduchost předpokládejme tenkou čočku.

1. Paprsek procházející středem čočky se neláme.
2. Paprsek dopadající rovnoběžně s optickou osou se láme do obrazového ohniska.
3. Paprsek procházející předmětovým ohniskem se láme rovnoběžně s optickou osou.

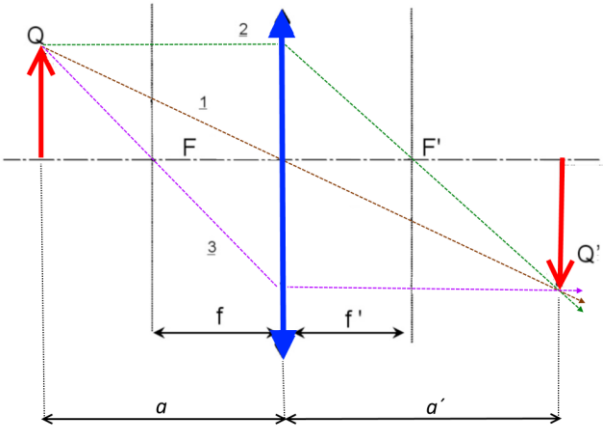
Existují dva základní typy čoček – **rozptylky** a **spojky**. Rozptylky mají

zápornou ohniskovou vzdálenost (blíže viz znaménková konvence v kapitole 1.2). Svými vlastnostmi jsou obdobou vypuklým zrcadlům. Spojky s kladnou ohniskovou vzdáleností jsou pak ekvivalentem dutým zrcadlům. Základní rozdíl oproti zrcadlům je tedy v tomto ideálním případě pouze v tom, že paprsek po vstupu do čočky pokračuje dále za čočku (u zrcadel se odráželo zpět do tzv. předmětového poloprostoru).

Geometrická konstrukce obrazu pro spojnou čočku je na obr. 1.8. Rovněž pro výsledný obraz platí obdobná pravidla, která byla uvedena u zrcadel:

1. Předmět v nekonečnu je zobrazen do ohniskové roviny. Je výškově a stranově převrácený, zmenšený a skutečný. Pro předmět ve větší vzdálenosti než je dvojnásobná ohnisková vzdálenost čočky je jeho obraz výškově a stranově převrácený, reálný, zmenšený a nachází se mezi jednoduchou a dvojnásobnou ohniskovou vzdáleností.
2. Leží-li předmět mezi jednoduchou a dvojnásobnou ohniskovou vzdáleností je obraz předmětu výškově a stranově převrácený, reálný (skutečný) a zvětšený. Pro předmět ve dvojnásobné ohniskové vzdálenosti je obraz výškově a stranově převrácený, je ve dvojnásobné ohniskové vzdálenosti od čočky a má stejnou velikost jako předmět.
3. Pokud leží předmět mezi čočkou a ohniskem, bude obraz předmětu zdánlivý (virtuální), výškově a stranově nepřevrácený, vzpřímený a zvětšený. Jde v podstatě o lupu. Leží-li předmět v ohnisku, je jeho obraz promítán do nekonečna. V praxi se této konstrukce využívá např. v kolimátorech (jednou z jeho variant je např. oblíbený hledáček typu „red point“).

Obraz předmětu zobrazeného rozptylkou je bez ohledu na vzdálenost předmětu vždy zdánlivý, výškově a stranově správně orientovaný a zmenšený



Obr. 1.8 Geometrická konstrukce zobrazení čočkou

Jiným příkladem aplikace zákona lomu jsou **hranoly**. Běžně se setkáváme se dvěma základními typy hranolů – **odraznými** a **disperzními**. V astronomické praxi jsou častěji zastoupeny **hranoly odrazné** (obr. 1.9a). Tyto hranoly jsou, podobně jako např. rovinné zrcátko, určeny k „zalomení“ optické osy. Paprsek procházející hranolem dopadá na jeho zadní plochu. Pokud je úhel dopadu na rozhraní menší než tzv. **mezní úhel** [1]:

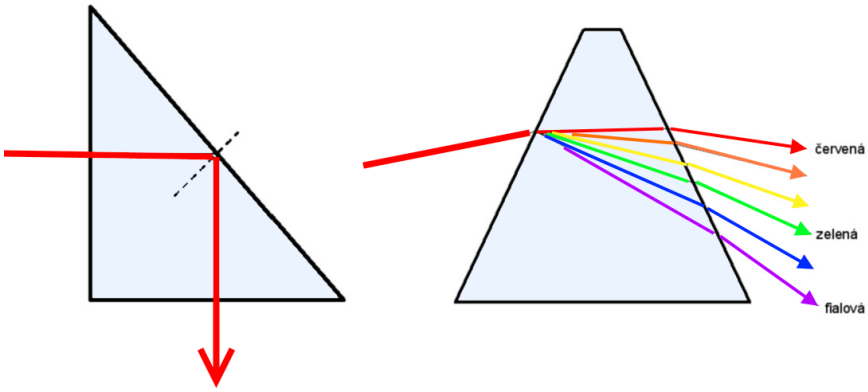
$$sin(\varepsilon_m) = \frac{n}{n'}, \qquad (1.4)$$

pak na tomto rozhraní sklo-vzduch dojde k lomu paprsků a paprsek hranolem projde. Pro větší úhel dopadu, což je náš případ, je veškeré dopadající světlo odraženo zpět do původního prostředí, dochází k totálnímu odrazu. V našem případě dochází k totálnímu odrazu od zadní plochy hranolu (na obr. 1.9a směrem dolů). Veškeré světlo se na tomto rozhraní odrazí zpět a nevstoupí do nového prostředí.

Hranoly disperzní (obr 1.9b) jsou určeny k rozkladu světla na jednotlivé vlnové délky. Index lomu hmotného prostředí není pro různé vlnové délky světla zpravidla stejný. Dopadne-li tedy bílé světlo na rozhraní dvou prostředí, budou jednotlivé vlnové délky, z nichž se bílé světlo skládá, lámány různě. Dochází k rozkladu světla na jednotlivé vlnové délky - **disperzi světla**. K jejímu popisu se využívá celá řada charakteristik a koeficientů. K těm nejznámějším patří Abbeovo číslo ν [1]:

$$\nu = \frac{n_D - 1}{n_F - n_C}, \qquad (1.5)$$

kde n_D, n_F *a* n_C jsou hodnoty indexu lomu pro vlnové délky odpovídajících Frauenhoferovým čárám D, F a C (tj. 589,2 nm, 486,1 nm a 656,3 nm). S rostoucí hodnotou disperze Abbeovo číslo klesá. Proto jsou v disperzních hranolech využívána skla s malou hodnotou Abbeova čísla. Důsledkem je, že z hranolu bude vystupovat světlo rozložené na jednotlivé vlnové délky. V astronomii se s nimi lze setkat zejména v některých typech spektroskopů.



a) b)

Obr. 1.9 Optické hranoly:
a) pravoúhlý odrazný hranol,
b) disperzní hranol

Poznamenejme, že pro orientační charakteristiku optických vlastností skla stačí znát střední index lomu n_D a Abbeovo číslo υ. Druhy skel s velkou disperzí mají střední disperzi (rozdíl indexu lomu pro vlnové délky F a C, tj. n_F - n_C) velikou a následkem toho malé υ, kdežto skla s malou disperzí mají malou střední disperzi a velké Abbeovo číslo. V praxi dělíme skla s ohledem na disperzi a Abbeovo číslo na:

a) korunová skla - sklo s malou disperzí a velkým υ (υ > 55),
b) flintová skla - sklo s velkou disperzí a malým υ (υ < 50).

Jejich vhodnou kombinací lze dosáhnout zvýraznění, či u astronomických přístrojů častěji, potlačení rozkladu světla na jednotlivé barevné složky (viz dále kapitola 2.3.1).

1.2 Zobrazovací rovnice

Tato rovnice udává vztah mezi vzdálenostmi předmětu a jeho obrazu od vrcholu zakřiveného zrcadla (popř. středu čočky) a ohniskovou vzdáleností. Protože obraz (ať již skutečný nebo zdánlivý) může vznikat na kterékoliv straně zrcadla nebo čočky, je nutno zavést tzv. **znaménkovou konvenci** (tj. souhrn pravidel pro označení kladných a záporných směrů):

1. Optickou soustavu kreslíme vždy tak, že paprsky procházejí soustavou zleva doprava.
2. Znaménková konvence pro zrcadla (obr. 1.5):
   - · všechny vzdálenosti, které se nacházejí před zrcadlící plochou, mají znaménko kladné;
   - · všechny vzdálenosti, které se nacházejí za zrcadlící plochou, mají znaménko záporné;
   - · ohnisková vzdálenost dutého zrcadla je kladná, vypuklého zrcadla záporná;
   - · vzniká-li obraz *Q´* vzpřímený, pak má velikost obrazu znaménko kladné, vzniká-li obraz převrácený, pak má velikost obrazu znaménko záporné.
3. Znaménková konvence pro čočky (obr. 1.8):
   - · předmětová vzdálenost *a* má vždy znaménko kladné;
   - · obrazová vzdálenost *a´* má znaménko kladné, je-li ve směru paprsků procházejících čočkou (tj. obraz vzniká „za“ čočkou), jestliže obraz vzniká ve stejné části prostoru jako leží předmět, pak má obrazová vzdálenost znaménko záporné;
   - · ohnisková vzdálenost spojky je kladná, rozptylky záporná;
   - · je-li obraz *Q´* vzpřímený, pak má velikost obrazu znaménko kladné, je-li obraz *Q´* převrácený, pak má velikost obrazu znaménko záporné.

Pro jednoduchost dále předpokládejme jen optické zobrazení ideální tenkou čočkou. Protože světlo čočkami prochází, rozlišujeme prostor ze kterého světlo do čočky vstupuje, tzv. předmětový prostor. A prostor do kterého světlo po průchodu vystupuje, tzv. obrazový prostor.

Geometrické řešení chodu paprsků bylo již uvedeno v předcházející kapitole (obr. 1.8). Pro matematický popis pak lze na základě tohoto obrázku odvodit základní zobrazovací rovnici čočky ve tvaru [1]:

$$\frac{1}{a'} + \frac{1}{a} = \frac{1}{f'}, \qquad (1.6)$$

kde *f’* je ohnisková vzdálenost čočky, *a* je vzdálenost předmětu od čočky a *a’* vzdálenost obrazu od čočky.

Zde je na místě malé upozornění. Mimo výše uvedené obrazové rovnice se občas můžete setkat s rovnicí, kde na místo součtu zlomků na levé straně figuruje jejich rozdíl. „Viníkem“ této odlišnosti je jinak pojatá znaménková konvence, kdy za kladný směr je považován směr měřený vždy zleva doprava.

Pro úplnost dodejme, že vztah (1.6) se nazývá **Gaussova zobrazovací rovnice**. Tuto rovnici lze s výhodou použít při určování konstrukčních délek přístrojů, při experimentování s různými kombinacemi okulárů, spojných převracecích soustav či pokusech o prodloužení ohniskové vzdálenosti objektivu (pomocí tzv. Barlowovy čočky).

Protože rovnice umožňuje stanovit předpokládanou polohu obrazu a', je astronomy velmi často využívána i ke stanovení potřebné ohniskové vzdálenosti čočky, pokud vznikne potřeba dostat obraz dále od jeho současné polohy. Typickým příkladem je potřeba připojení dodatečného příslušenství (např. CCD kamery), se kterou původní mechanické řešení dalekohledu nepočítalo (např. ohnisko je příliš blízko/hluboko a není možné obraz zaostřit). V tomto případě je výhodnější využít tzv. **Newtonovu zobrazovací rovnici**, která má tvar[1] [1]:

$$q \cdot q' = f \cdot f' = f^2, \qquad (1.7)$$

kde q je vzdálenost předmětu od ohniska, q' vzdálenost obrazu od ohniska, f je předmětová ohnisková vzdálenost čočky a f' obrazová ohnisková vzdálenost čočky.

[1] *U tenkých čoček za předpokladu, že je z obou stran čočky stejné prostředí (např. vzduch), platí, že předmětová ohnisková vzdálenost je stejná jako obrazová ohnisková vzdálenost [1]. Odtud vyplývá pravá část vztahu (1.7). Toto zjednodušení lze s dostatečnou přesností přijmout i pro většinu konstrukcí zde uvedených astronomických dalekohledů.*

1.3 Aberace optických soustav

V této kapitole se seznámíte se základními optickými vadami, tzv. aberacemi, které způsobují zhoršení kvality pozorovaného obrazu oproti jeho ideálnímu vzoru. Celý text byl maximálně zjednodušen tak, aby byl srozumitelný i pro čtenáře se znalostí středoškolské fyziky. Pokud přesto nebudete v této kapitole něčemu rozumět, můžete tuto část přeskočit a pokračovat dále.

Nejprve ale nezbytná krátká exkurze do matematiky. Všechny goniometrické funkce lze nahradit rozvojem do řady (např. Taylorovy). Např. pro funkci *sin(α)* platí (hodnotu úhlu α je nutno dosazovat v radiánech) [2]:

$$\sin\alpha = \alpha - \frac{\alpha^3}{3!} + \frac{\alpha^5}{5!} - \frac{\alpha^7}{7!} + \ldots \qquad (1.8)$$

Pro velmi malé úhly (cca do 2°) je možné nahradit vlastní funkci *sin(α)* pouze prvním členem rozvoje. Oblast kolem optické osy soustavy, vymezená tímto úhlem, se nazývá **paraxiální prostor**. Protože v tomto případě jsme se omezili pouze na první člen rozvoje, je paraxiální prostor též nazýván podle mocniny členu - prostor prvého řádu nebo též Gaussův prostor. Pokud budeme uvažovat i druhý člen rozvoje, lze při popisu funkce *sin(α)* hovořit o prostoru třetího řádu nebo též Seidelově prostoru. Za ten lze považovat úhly kolem optické osy do cca 15°.

Ve zjednodušeném popisu jsou optické soustavy sestávající z odrazných a lámavých optických ploch popisované v paraxiálním prostoru považovány za ideálně zobrazující. Při popisu reálných astronomických optických soustav vystačíme zpravidla s prostorem třetího (popř. pátého řádu). Níže uvedené aberace se týkají Seidelova prostoru.

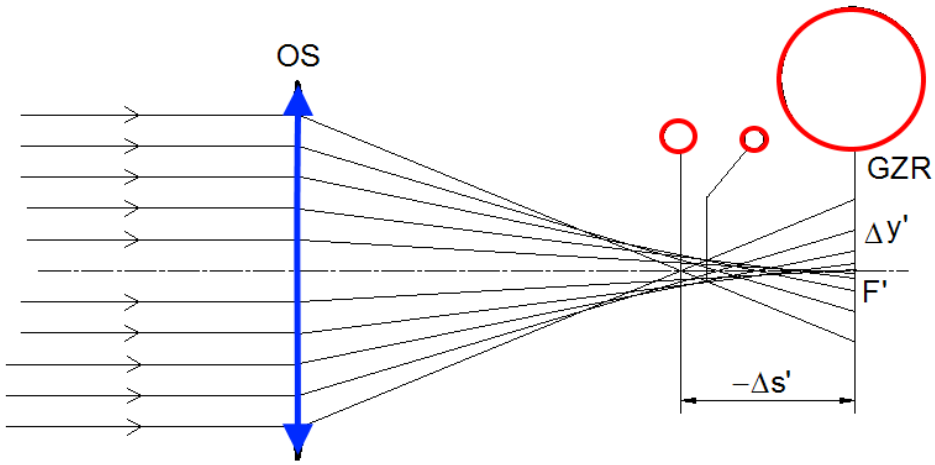
1.3.1 Sférická aberace (kulová vada)

Narušení homocentričnosti svazku paprsků, které přecházejí přes optickou soustavu, při zachování jeho symetrie vůči ose svazku, se nazývá ***sférická aberace***. Lze ji definovat jako vadu optických soustav, kdy při zobrazení předmětového bodu na optické ose se paprsky, které dopadají v různých výškách vstupní pupily, přetínají v obrazovém prostoru v různé vzdálenosti od paraxiálního obrazu (obr. 1.10).

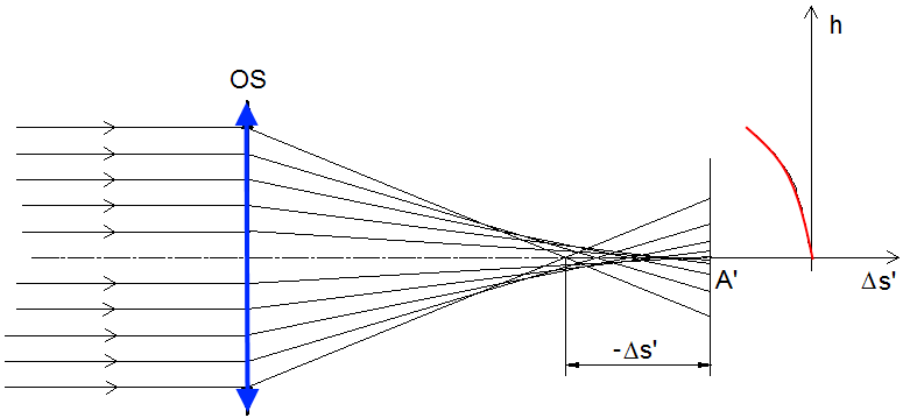
Její projev je zřejmý. Rovnoběžně dopadající paprseky po průchodu optickou soustavou se neprotínají přesně v ohnisku. Paprsky blíže optické ose mají ohnisko dále než paprsky procházející okrajem optické soustavy. Obraz bodu tedy nebude bodový, ale bude tvořen neostře ohraničenou ploškou. Velikost sférické aberace není závislá na velikosti pozorovaného předmětu *Q*, ale na velikosti apertury soustavy (průměru objektivu), resp. její relativní

světelnosti (viz kapitola 2.2). Poloměr rozptylného kroužku je demonstrován na obr. 1.10. Spojka a rozptylka mají opačné znaménko sférické aberace (obr. 1.11). Vhodnou kombinací spojky a rozptylky lze tuto aberaci proto zmenšit. Další možností její minimalizace je použití asférických ploch (např. paraboloid) namísto kulových. Menší kulovou vadu mají i ploskovypuklé čočky, popř. soustava dvou slabších čoček (s delšími ohniskovými vzdálenostmi) namísto jedné silné.

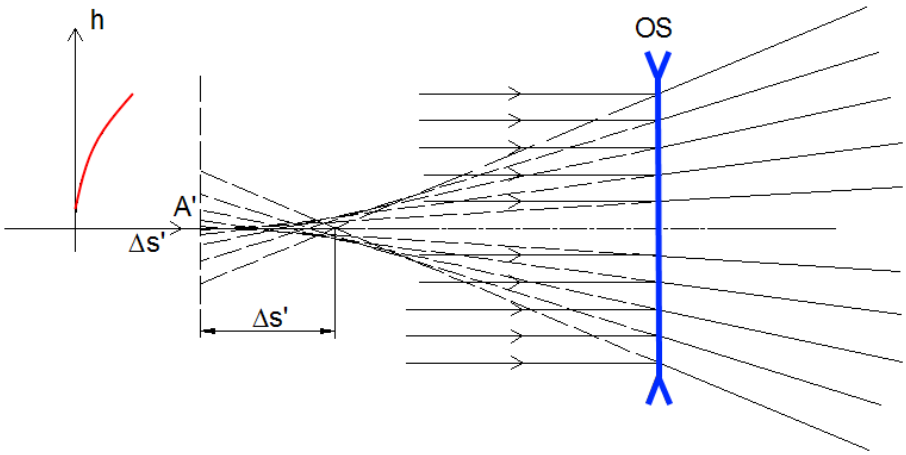
S touto vadou zobrazení se setkáváme i u zrcadel, zejména mají-li kulový tvar. Pro relativní otvor sférických zrcadel 1:4 a větší je sférická aberace velmi silná. Celkově velmi ruší pozorování, resp. zhoršuje kvalitu výsledného obrazu. Při relativním otvoru 1:8 až 1:10 je vada výrazně menší, ale ještě je stále patrná. Teprve při relativním otvoru 1:11 je znatelná již jen nepatrně. S klesající světelností (resp. relativním otvorem) zrcadla pak velikost této vady dále klesá. Pro jednoduché světelné objektivy - zrcadla vyšších světelností (s větším relativním otvorem) je proto nezbytné použít asférická, tedy např. parabolická, zrcadla.



Obr. 1.10 Vznik sférické aberace spojné optické soustavy



a)



b)

Obr. 1.11 Sférická aberace a její velikost u a) spojné a b) rozptylné optické soustavy

1.3.2 Asymetrická chyba (koma)

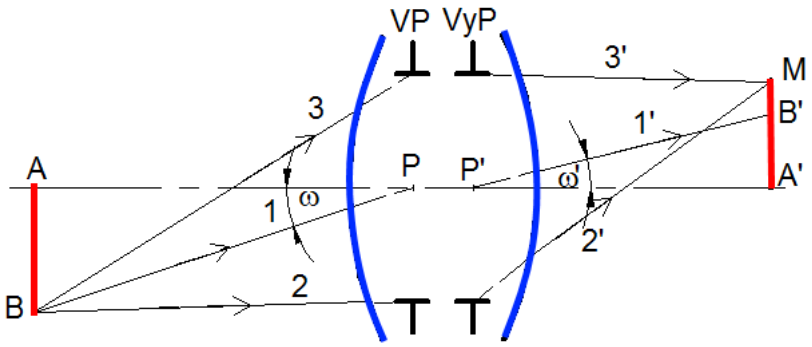
Narušení symetrie svazku paprsků vycházejících z mimoosového předmětového bodu se nazývá ***koma*** (asymetrická vada). V případě, že na optickou soustavu šikmo dopadá široký svazek paprsků, nenastane v reálné optické soustavě v žádné rovině bodové zobrazení (obr. 1.12). Světelné paprsky dopadající na optickou plochu pod větším úhlem se rozptylují více.

Pokud vstupní pupilu rozdělíme na řadu koncentrických zón s význačnými body na okraji vstupní pupily (obr. 1.13), pak každé zóně bude odpovídat vlastní kružnice, která je vnější konturou rozptylového obrazce.

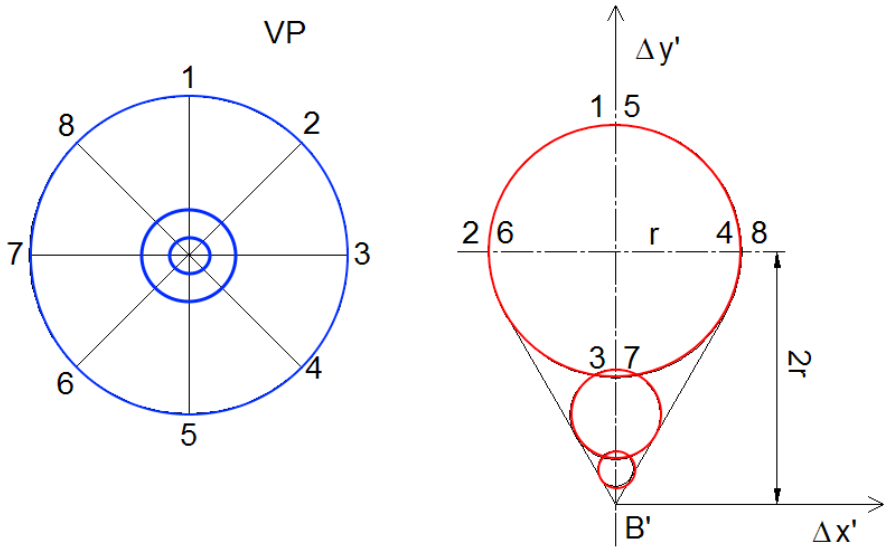
Výsledný zobrazovaný bod má podobu komety nebo hrušky.

S touto chybou se nejčastěji setkáváme u přístrojů s velkým zorným polem, popř. jednoduchých (nekorigovaných) přístrojích s asférickými plochami (např. konstrukce dalekohledu typu Newton s hlavním parabolickým zrcadlem).

Komu lze téměř odstranit návrhem optické soustavy (např. objektivu) tak, aby byla souměrná vůči středové cloně. Optické soustavy, u kterých je korigovaná sférická aberace a koma, se nazývají ***aplanatické optické soustavy*** (aplanáty).



Obr. 1.12 Průchod širokého světelného svazku optickou soustavou, která je zatížena komou



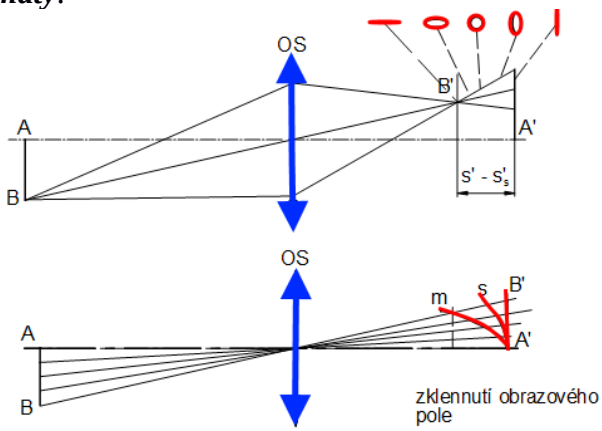
Obr. 1.13 Vstupní pupila se třemi zónami a odpovídající tvar rozptylného obrazce

1.3.3 Astigmatismus a zklenutí obrazu

Jedná se o vady optického zobrazování způsobené úzkým svazkem paprsků vycházejících z mimoosového předmětového bodu. Světelné paprsky vycházející z tohoto bodu předmětu dopadající na jednotlivé zóny čočky (popř. zrcadla) pod různými úhly a jsou lámány různě. Světelné paprsky předmětu položeného mimo optickou osu dopadající na okrajové oblasti čočky (zrcadla), se lámou jinak, než paprsky dopadající poblíž optické osy.

Astigmatismus se projevuje tím, že krajní paprsky ve dvou kolmých rovinách - rovině nákresny (rovina tangeciální, meridionální) a rovině k ní kolmé (sagitální), se protnou s hlavním paprskem ve dvou různých bodech. Obrazem roviny kolmé k optické ose je tedy rotační plocha (resp. dvě rotační plochy - v rovině tangenciální a sagitální), jejíž tečnou rovinou je paraxiální obrazová rovina. Astigmatické svazky proto nevytvářejí nikde bodové ohnisko. Vzdálenost mezi tzv. fokály (průsečíky paprsku s rovinami) se nazývá astigmatický rozdíl (viz obr. 1.14). Při průmětu do obrazové roviny má obraz bodového zdroje (např. obrazu hvězdy na CCD senzoru) tvar protáhlé čárky (ve fokálu) až elipsy (mimo fokál).

Skutečnost, že se body ležící v rovině kolmé k optické ose se nezobrazují v obrazové rovině kolmé k ose, ale na zakřivené ploše, vede i ke **zklenutí pole** (obrazu). Obraz bude na různých místech zakřivený a různě ostrý. S určitým zjednodušením lze říci, že zobrazované body se v obrazu zobrazují ostře v různých za sebou ležících rovinách. Pokud do obrazové roviny umístíme např. rovinný fotografický film, nebo CCD detektor, bude ostře zobrazena jen určitá oblast za sebou ležících rovin. Zklenutí obrazového pole se vyskytuje i u složených optických soustav (např. Schmidtových a Maksutovových fotokomor). Optické soustavy, u kterých je odstraněn astigmatizmus a obrazové pole je rovinné, jsou označovány jako ***anastigmatické*** nebo též jako ***anastigmaty***.

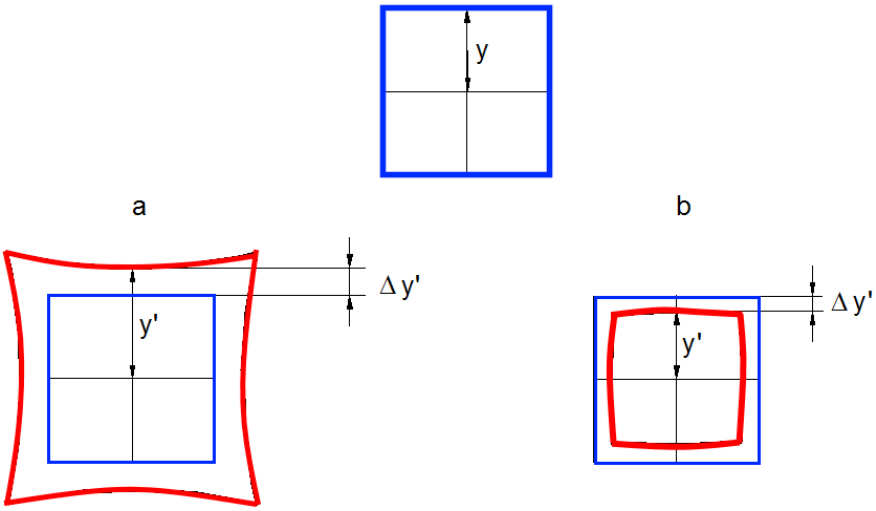


Obr. 1.14 Astigmatismus (nahoře) a zklenutí pole (dole)

1.3.4 Zkreslení (distorze)

Je-li zvětšení optické soustavy v blízkosti optické osy jiné, než na okraji zorného pole, nezobrazí se čtverec jako čtverec, ale jeho strany jsou prohnuté ven nebo dovnitř. Aberace, která způsobuje narušení podobnosti mezi předmětem a jeho obrazem se nazývá ***distorze*** nebo ***zkreslení***. Na rozdíl od předcházejících aberací, distorze nezpůsobuje vady ostrosti obrazu. Roste-li zvětšení od středu k okraji, nastává tzv. ***poduškové*** zkreslení. Vzrůstá-li naopak od okraje do středu, nazýváme toto zkreslení ***soudkové*** (obr. 1.15).

Z popisu je zřejmé, že hodnota zkreslení roste s velikostí zorného pole. Pro malá zorná pole astronomických objektivů je zkreslení poměrně malé. U okulárových soustav jsou zorná pole již poměrně velká. Proto je u okuláru tento parametr poměrně důležitý. Soustavu čoček, které jsou prosté zkreslení, nazýváme ***ortoskopické***.



Obr.1.15 Zobrazení čtverce optickou soustavou zatíženou:
poduškovým zkreslením (a) a soudkovým zkreslením (b)

V předcházejícím textu byla provedena analýza čistých monochromatických aberací optické soustavy (tj. aberací vztažených k jediné vlnové délce) v prostoru třetího řádu. Na základě této analýzy můžeme učinit následující závěry. Optická soustava zatížená aberacemi třetího řádu může vytvářet zobrazení, které je blízké ideálnímu, jenom v tom případě, že jsou všechny dosud uvedené aberace nulové anebo mají aspoň velmi malé hodnoty. V takovémto případě by byla optická soustava aplanatická, anastigmatická a ortoskopická. Realizace takové optické soustavy je velmi

obtížná, nákladná, ale často i zbytečná. Například, pokud optická soustava zobrazuje bodový předmět na optické ose, potom se projevuje jenom sférická aberace a takovouto soustavu postačuje korigovat pouze na ni.

Zobrazení bodů, které se nacházejí v blízkosti optické osy, bude ostré, pokud v optické soustavě bude korigována sférická aberace a koma. Předmětové body ležící ve velkých vzdálenostech od optické osy budou ostře zobrazovány, pokud jsou odstraněny sférická aberace, koma, astigmatizmus a zklenutí pole. Jestliže kromě toho požadujeme, aby obraz zachovával vysokou podobnost s předmětem, musí být optická soustava korigována na zkreslení.

1.3.5 Chromatické aberace (barevné vady)

Bílé světlo se průchodem přes lámavé optické plochy rozkládá do barevného spektra. Tento jev se nazývá ***disperze*** a je způsoben závislostí indexu lomu prostředí na vlnové délce procházejícího světla. Vady zobrazení vyvolané disperzí materiálu jsou ***chromatické aberace***. Z uvedeného vyplývá, že chromatickou aberací nejsou zatížené optické soustavy využívající jen zákon odrazu (zrcadla). Na rozdíl od monochromatických aberací se chromatické aberace projevují i v paraxiální oblasti.

Chromatické aberace v paraxiálním prostoru se rozdělují na ***chromatické aberace polohy*** a ***chromatické aberace zvětšení***. Principiálně není možné odstranit tyto dvě barevné vady současně pro všechny barvy. Z tohoto důvodu je libovolná optická soustava vždy zatížena zbytkovým chromatizmem.

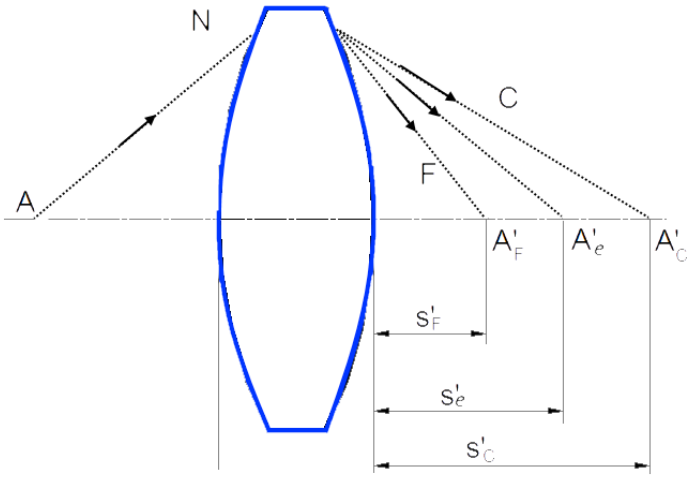
Na obr. 1.16 je znázorněný chod paraxiálního paprsku *AN* optickou soustavou. V důsledku disperze se tento paprsek po refrakci v optické soustavě rozkládá na dílčí barevné paprsky. Paprsek červeného světla *C* (644 nm) vytváří zobrazení v bodě A'_c, paprsek zeleného světla *e* (546 nm) vytváří obraz v bodě A'_e a paprsek modrého světla *F* (480 nm)v bodě A'_F. K tomu, aby optická soustava vytvářela ostré zobrazení, je zapotřebí ztotožnit zobrazení pro dvě vlnové délky, např. pro *F* a *C*. Při takovém ztotožnění se provede smíchání paprsků různých barev a výsledné zobrazení je bez barevných okrajů.

Diference vzdáleností (s'_F-s'_c) se nazývá ***podélná chromatická (barevná) aberace (vada) polohy zobrazení***, nebo též zkráceně ***chromatizmus polohy***. I když je v optické soustavě odstraněna chromatická aberace polohy, neznamená to ještě, že zobrazení nebude "zabarveno". Aberace vztahující se k velikosti obrazu *y'* je různá pro rozdílné vlnové délky (obr. 1.17).

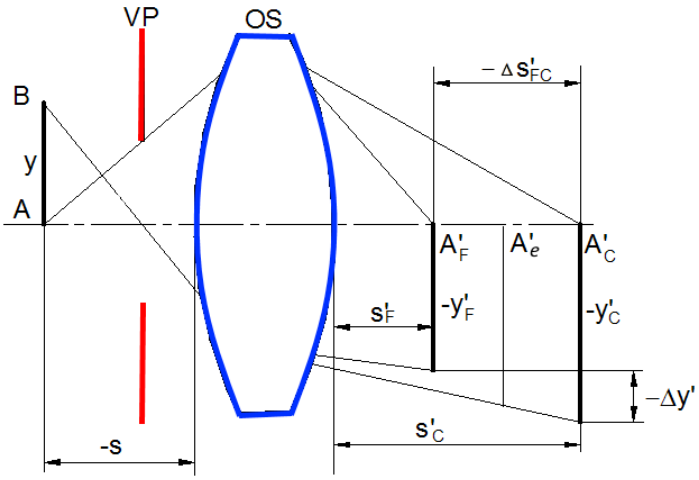
Změna velikosti zobrazení pro různé vlnové délky světla se nazývá ***chromatická aberace velikosti obrazu*** nebo ***chromatizmus zvětšení***.
Z obr. 1.17 je patrné, že chromatizmus zvětšení závisí na chromatizmu polohy

a polohy vstupní pupily. Pokud je v optické soustavě odstraněn chromatizmus polohy, pak velikost chromatizmu zvětšení nezávisí na poloze vstupní pupily.

Chromatickou vadu lze zmenšit vhodnou kombinací různých optických skel s vhodnou hodnotou disperze (např. korunové spojky a flintové rozptylky), popř. použitím nízkodisperzních materiálů (tj. skel s velmi malou závislostí indexu lomu na vlnové délce). Více se o tom dozvíte v kapitole věnované jednomu z druhu dalekohledů – refraktorům.



Obr. 1.16 Chromatická aberace polohy

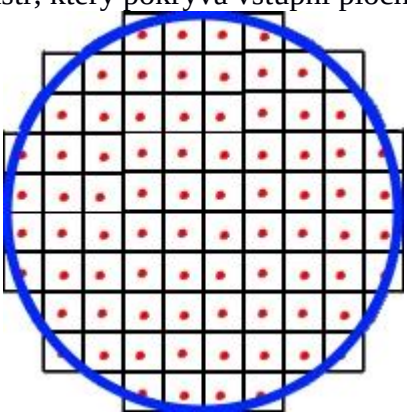


Obr. 1.17 Chromatická aberace velikosti zobrazení

1.3.6 Aberace a spot diagram

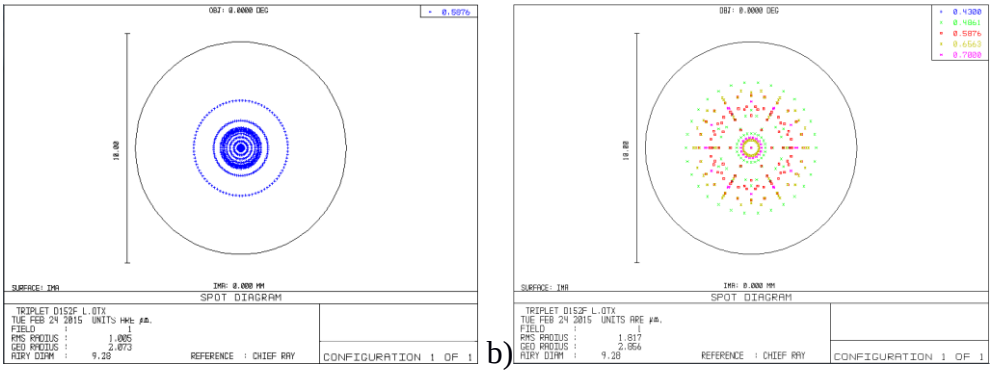
Předpokládejme optickou soustavu, kterou prochází paprsky z bodového zdroje (předmětu). Spot diagram zobrazuje paprsky prošlé touto soustavou na obrazovou rovinu. Každému paprsku protínajícímu obrazovou rovinu přísluší v daném místě průchodu bod. Při vytváření spot diagramu může být uvažován buď jen čistě geometrický průchod paprsku nebo lze zahrnout i difrakční jevy. Pro orientační posouzení astronomických přístrojů zpravidla postačuje první přístup. Příklad takového spot diagramu je na obr. 1.19.

Aby bylo možné spot diagram vytvořit, je nutné, aby z bodového zdroje prošel optickou soustavou velký počet paprsků. Jednotlivé paprsky jsou přitom voleny tak, že dopadnou na různá místa optické soustavy. Předpokládejme např. jednoduchý mřížkový rastr, který pokrývá vstupní plochu optické soustavy.

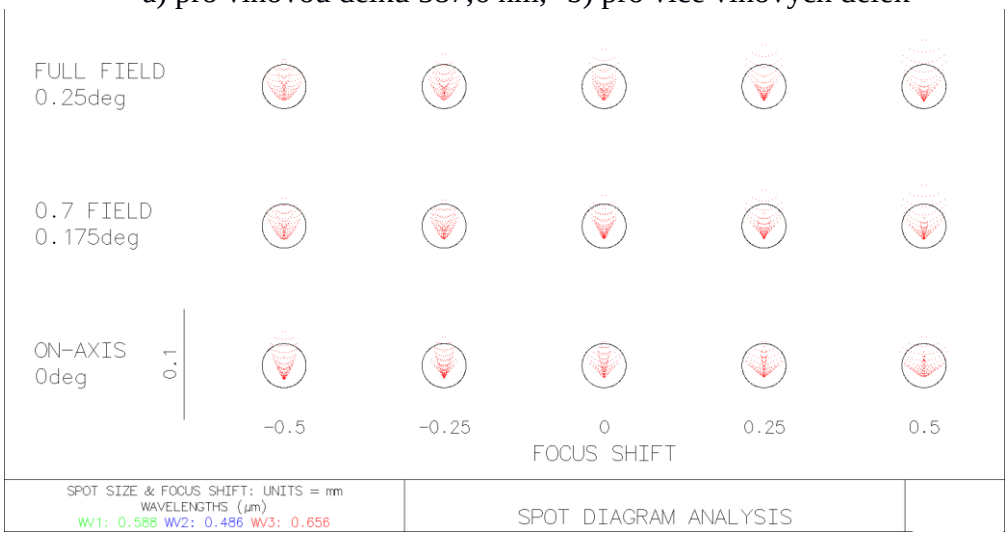


Obr. 1.18 Mřížkový rastr definující optickou soustavou (modře) procházející paprsky (červeně)

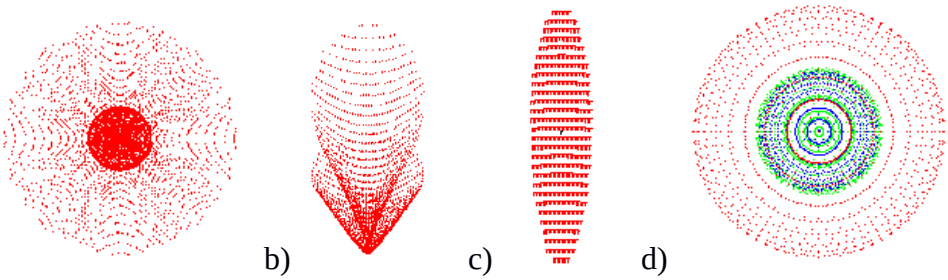
Vlivem aberací neprotnou prošlé paprsky obrazovou rovinu v jediném bodě, ale vytvoří plošku. Z její velikosti a tvaru lze usuzovat na vliv aberací na kvalitu obrazu (obr. 1.21). Pro odhad velikosti aberací a jejich celkového vlivu je často využíváno zakreslení kružnice o velikosti Airyho disku (viz kapitola 2.2 – „Vlastnosti dalekohledu“). Velmi často není zobrazován spot diagram pro jediný (např. osový) bod, ale pro celé zorné pole. Pokud zvolíme další předmětové body (zdroje) odpovídající různým zorným úhlům, lze vyjádřit vlastnosti pro celé zorné pole optické soustavy (na obr. 1.20 svislé sloupce). V jednotlivých řádcích lze pak vyjádřit spot diagram v okolí obrazové roviny. Spot diagramy v obrázcích 1.19 až 1.21 byly vytvořeny v programu Optalix firmy Optenso.



Obr. 1.19 Příklad spot diagramu (refraktor, triplet D=156, f=1200 mm):
a) pro vlnovou délku 587,6 nm, b) pro více vlnových délek



Obr. 1.20 Spot diagram pro více zorných polí
(rozkolimovaný dalekohled typu Newton)



Obr. 1.21 Spot diagram základních aberací:
a) sférické vada, b) koma, c) astigmatismus, d) barevná vada

2. Astronomický dalekohled

Dalekohledy jsou v astronomii nejčastěji používanými optickými přístroji. První oficiálmí počátky dalekohledu spadají do Holandska roku 1608. Krátce na to se o tomto vynálezu dověděl Galileo Galilei a v roce 1609 sám sestrojil svůj první astronomický dalekohled s nímž učinil své první objevy. Od té doby se objevila celá řada nejrůznějších více či méně úspěšných konstrukcí. Všechny spojuje základní funkce, které má dalekohled plnit:

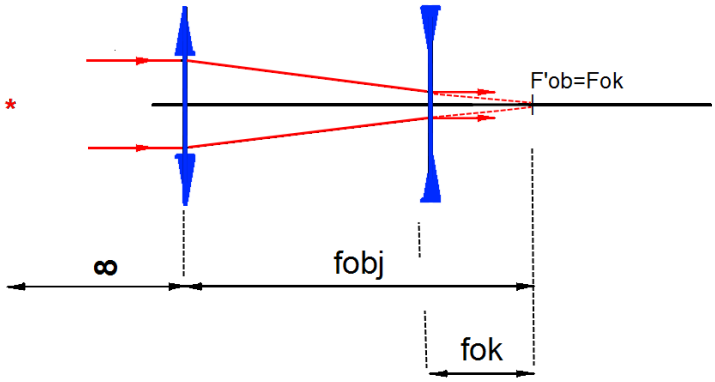
- má soustředit do oka pozorovatele více světla než prosté oko pozorovatele;
- má přibližovat vzdálené předměty, tj. umožnit je pozorovat pod větším zdánlivým úhlem, než pod jakým jsou vidět prostým okem;
- má zvětšit rozlišovací schopnost oka pozorovatele.

V dnešní době oko pozorovatele velmi často nahradily citlivé detektory (např. CCD kamery), ale základní funkce dalekohledu samozřejmě platí i nadále.

2.1 Princip činnosti dalekohledu

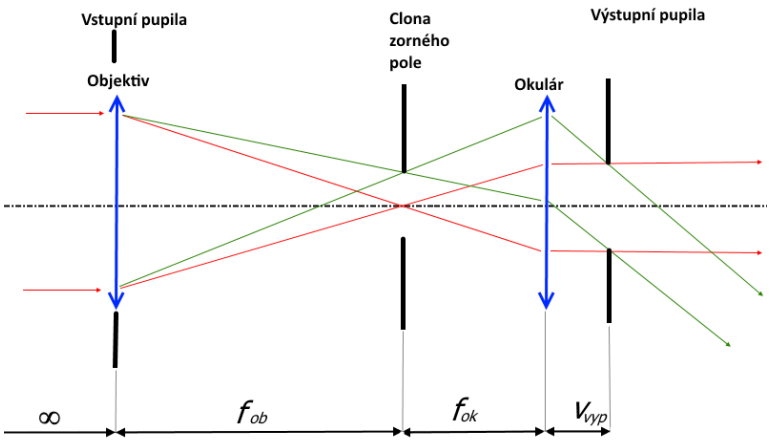
První dalekohledy byly čočkové (tzv. Refraktory). Podle použitého typu okuláru lze rozlišit jejich dva základní typy - Galileův a Keplerův. Historicky starší je **Galileův dalekohled**. Ten je tvořen objektivem - spojkou a okulárem - rozptylkou (čočkou se zápornou ohniskovou vzdáleností). Obrazové ohnisko objektivu a předmětové ohnisko okuláru jsou totožná (předmětové a obrazové ohnisko rozptylky je vzájemně prohozeno, tzn. předmětové ohnisko se nachází vpravo od čočky). Díky tomu je konstrukční vzdálenost Galileova dalekohledu menší než Keplerova – je rovna **rozdílu** ohniskových vzdáleností objektivu a okuláru. Objektiv láme dopadající rovnoběžný svazek tak, aby vytvořil výškově a stranově převrácený obraz ve své ohniskové rovině. Dříve, než je obraz vytvořen, jej ale zachytí okulár, který láme dopadající svazek tak, že vychází rovnoběžně. Okulár v podstatě „promítá“ zdánlivý obraz do nekonečna.

Pro četné optické nedostatky se Galileovy dalekohledy používají u astronomických přístrojů jen zřídka. Mezi nejčastější nedostatky patří poměrně malá obrazová pole, nerovnoměrný jas obrazu v zorném poli (k okrajům jas klesá), neexistence reálné obrazové roviny, kam by bylo možné umístit např. záměrný kříž.



Obr. 2.1 Galileův dalekohled

V mnohem menším měřítku, případně vůbec, se s většinou těchto vad setkáme u druhého typu dalekohledu – **Keplerova dalekohledu** (obr. 2.2). U něj je objektiv i okulár spojná čočka. Na objektiv dopadá rovnoběžný svazek světla ze vzdáleného objektu (např. hvězdy). V souladu se zobrazovací rovnicí (viz minulá kapitola) je za objektivem vytvořen jeho výškově a stranově převrácený obraz. Pro hvězdu, která je z tohoto pohledu prakticky v nekonečnu, je obraz vytvořen v ohniskové rovině objektivu. Pozorovatel pak pozoruje okulárem tento obraz. V tomto případě okulár plní stejnou funkci, jakou plní lupa – zvětší pozorovaný obraz vytvořený objektivem. Vstupuje-li do takovéto soustavy rovnoběžný svazek paprsků, bude i vystupující svazek rovnoběžný. Podobně jako v případě Galieova dalekohledu jde o tzv. **afokální soustavu**. Pozorovaný předmět se nám dále jeví v nekonečnu, jen se „zdá“ x-krát větší a je výškově a stranově převrácený.



Obr. 2.2 Keplerův dalekohled

2.2 Vlastnosti dalekohledu

Základním parametrem každého dalekohledu je **relativní otvor** jeho objektivu. Pro objekt v nekonečnu to je poměr jeho průměru k jeho ohniskové vzdálenosti. Obvykle se setkáváme i s vyjádřením tohoto parametru v relativním tvaru, tj. vztaženého k ohniskové vzdálenosti tohoto objektivu (např. f/5). Čím je jeho hodnota větší, tím je daný objektiv „světelnější“, tzn. obraz pozorovaného objektu je v obrazové rovině objektivu jasnější. Při dvojnásobné ohniskové vzdálenosti je zobrazen pozorovaný objekt v obrazové rovině objektivu na čtyřnásobku plochy, tzn. jeho jasnost se zmenší na čtvrtinu. Zkrátíme-li naopak ohniskovou vzdálenost při stejném průměru na polovinu, bude zobrazení objektu menší, ale čtyřikrát jasnější. Velmi často je relativní otvor objektivu dalekohledu zaměňován se **světelností** objektivu. Světelnost na rozdíl od relativního otvoru závisí i na celé řadě dalších faktorů (počtu jednotlivých aktivních optických ploch, ztrátách světla absorpcí uvnitř čoček a odrazech na optických rozhraních, …). Přesný výpočet světelnosti je proto poměrně náročný. O to větší má váhu při fotografování. Protože ale tato kapitola je určena zejména začínajícím astronomům, budeme se v dalším popisu zabývat využitím pro vizuální pozorování.

Bez ohledu na to, zda se jedná o Galileův či Keplerův dalekohled je jednou z jeho základních i nejznámějších vlastností **zvětšení** Γ [2]:

$$\Gamma = \frac{D_{\mathrm{vs}}}{D_{\mathrm{vy}}} = \frac{f_{\mathrm{ob}}}{f_{\mathrm{ok}}}, \qquad (2.1)$$

kde D_{vs} je průměr vstupní pupily (zpravidla průměr objektivu), D_{vy} průměr výstupní pupily (tj. průměr vystupujícího rovnoběžného svazku), f_{ob} ohnisková vzdálenost objektivu, f_{ok} je ohnisková vzdálenost okuláru (bez znaménka).

Velikost zorného pole (tedy to jak velkou část prostoru budeme schopni najednou pozorovat) je závislá nejen na zvětšení dalekohledu, ale i na velikosti zorného pole okuláru (druhá část výrazu platí pro malé úhly) [1]:

$$\Gamma = \frac{\tan(\omega_{\mathrm{ok}})}{\tan(\omega_{\mathrm{ob}})} \simeq \frac{\omega_{\mathrm{ok}}}{\omega_{\mathrm{ob}}}, \qquad (2.2)$$

kde ω_{ob} je polovina zorného pole objektivu (tj. skutečného zorného pole) a ω_{ok} polovina zorného pole okuláru (tzn. hodnoty měřené od středu po okraj).

Hodnota doporučeného zvětšení závisí na mnoha faktorech. Pro plošné, zpravidla méně jasné, objekty je vhodné volit zvětšení dalekohledu co nejmenší. Minimální využitelné zvětšení (též označované jako **normální zvětšení**) je takové, při kterém je průměr výstupního svazku (resp. velikost výstupní pupily) rovna průměru zorničky (ta má při plné adaptaci na tmu průměr 6-8 mm). Je-li zvětšení ještě menší, je průměr výstupní pupily příliš velký a část světla a tím i světelného zisku dalekohledu ztracena.

Pro pozorování planet a Měsíce je doporučeno zpravidla zvětšení rovné

polovině až průměru objektivu (v mm). U kvalitních optických soustav lze využít zvětšení až okolo dvojnásobku průměru objektivu. Takové zvětšení se označuje jako **maximální užitečné**. U velmi kvalitních čočkových objektivů lze, zejména při pozorování dvojhvězd, využít zvětšení až kolem trojnásobku průměru objektivu. Další zvyšování zvětšení nemá význam. Nedochází k žádnému nárůstu detailů, naopak klesá kontrast a jas zobrazené scény. Obecně lze říci, že nejvýhodnější je takové zvětšení, při němž se zobrazí jasně i jemné detaily pozorovaného objektu. Zejména začátečníci mají tendence k volbě nadměrně velkých zvětšení bez ohledu na konkrétní situaci (stav atmosféry, …).

Důležitým parametrem dalekohledu je i jeho **rozlišovací mez**. Jde o úhel, o který musí být od sebe vzdáleny 2 body, aby byly ještě od sebe za ideálních podmínek rozlišitelné. Toto omezení úzce souvisí s vlnovou povahou světla, jejímž důsledkem se nezobrazí bodový zdroj ani ve fyzikálně dokonalé optické soustavě jako bod, ale jako kruhová ploška. Průměr tzv. **Airyho disku** je závislý na průměru objektivu a uvažované vlnové délce světla [3]:

$$\delta = 1{,}22\,\frac{\lambda}{D_{VS}}. \qquad (2.3)$$

Při velmi velkých zvětšeních jsou kolem Airyho disku patrné soustředné kroužky (obr. 2.3a). Pro rozlišení dvou bodů od sebe neexistuje jednoznačné kritérium a tato problematika by vydala na samostatné pojednání. Asi nejznámějším je Rayleighův difrakční limit (resp. rozlišovací schopnost). Číselný vztah pro Rayleighův difrakční limit dalekohledu obdržíme snadno dosazením do předchozího vztahu (2.3), vyjádříme-li rozlišovací mez δ v úhlových vteřinách, dosadíme střední vlnovou délku světla rovnu 555 nm a průměr objektivu v milimetrech. Pak platí [3]:

$$\delta = \frac{138}{D_{VS}}. \qquad (2.4)$$

Hodnotě úhlu δ odpovídá situaci, kdy maximum prvního Airiho disku se nachází v minimu druhého (viz obr. 2.3b). Hodnota koeficientu „*138*“ platí pro fyzikálně dokonalou optickou soustavu nezatíženou žádnými optickými vadami. Reálná optická soustava má tento koeficient zpravidla o trošku větší (např. pro kvalitní dalekohled má hodnotu pod „*144*“). Z tohoto kritéria mj. lze i určit maximální použitelné zvětšení přístroje. Krátkou analýzou bychom dospěli právě k hodnotě 0,5-2D (tj. polovině až dvojnásobku průměru objektivu D_{VS} [mm]).

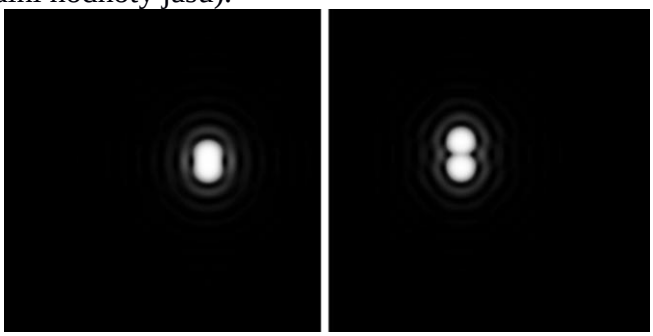
U kvalitních optických soustav budeme schopni rozlišit dva body od sebe, i když se budou překrývat více. To je patrné zejména při rozlišování těsných dvojhvězd, kdy mohou pomoci dokonce difrakční kroužky (zejména prvního řádu, tedy ty nejblíže vlastnímu Airyho disku). Případ, kdy se Airyho disky překrývají v 50 % maximální intenzity disku (viz obr. 2.3b), vyjadřuje

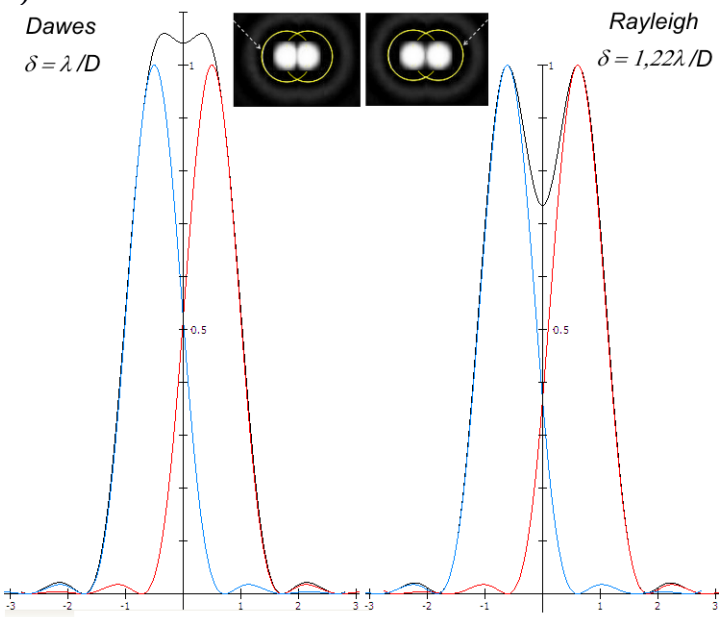
tzv. Dawesovo kritérium [3]:

$$\delta = \frac{116}{D_{\mathrm{vs}}}. \qquad (2.5)$$

Tento limit byl stanoven na základě zkušeností anglickým pozorovatelem Williamem R. Dawesem při pozorování dvojhvězd, když se pokoušel empiricky stanovit závislost mezi parametry dalekohledu a ještě rozlišitelnými těsnými dvojhvězdami. Zatímco separace (resp. pokles intenzity mezi oběma pozorovatelnými obrazy hvězd) je u Raileighova kritéria cca 25 % maximální hodnoty jasu, u Dawesova limitu dochází k poklesu o přibližně 2 % (tj. 0,02 maximální hodnoty jasu).

a)





b)

Obr. 2.3 Rozlišovací mez dalekohledu:

a) Překrývající se Airiho disky,

b) Srovnání Dawesova kritéia a Rayleigho limitu

Velmi často se v souvislosti s rozlišovací mezí lze setkat i s pojmem **rozlišovací schopnost**. Souvislost mezi oběma pojmy je velmi prostá.

Rozlišovací schopnost dalekohledu je rovna převrácené hodnotě rozlišovací meze. Zatímco tedy dalekohled je tím „lepší“, čím je rozlišovací mez (tj. z našeho pohledu úhel) menší, pro rozlišovací mez platí, že dalekohled je tím „lepší“, čím je větší jeho rozlišovací schopnost. Jinak řečeno: rozlišovací schopnost dalekohledu roste se zvětšováním průměru objektivu.

Z výše uvedeného rovněž vyplývá: rozlišovací mez (popř. schopnost) dalekohledu nezávisí na zvětšení, které pozorovatel použije! Zásadní podmínkou z pohledu pozorovatele jen je, aby skutečná (celková) rozlišovací schopnost na výstupu z dalekohledu měla větší hodnotu, než je aktuální rozlišovací schopnost oka pozorovatele.

Zdánlivou úhlovou velikost pozorovaného detailu zjistíte poměrně snadno – pro malé úhly stačí vynásobit úhlový rozměr pozorovaného detailu použitým zvětšením přístroje. Např. při pozorování detailu 5“ a zvětšení 100x se bude na výstupu přístroje tento detail jevit pod úhlem 500“, tj. cca 8,3‘. Rozlišovací schopnost oka má u průměrného pozorovatele za běžných podmínek střední hodnotu cca 60“. Při poklesu jasu obrazu (tj. při pozorování slabých scén) ale zpravidla vzrůstá na dvoj- až pětinásobek této hodnoty. Z uvedeného je patrné to, co již bylo uvedeno výše: zvětšení musí být úměrné pozorovanému objektu i aktuální rozlišovací schopnosti (tj. nejen rozlišovací schopnosti dalekohledu, ale i aktuálním podmínkám). Méně je v tomto případě velmi často více.

Dalekohled s větším průměrem objektivu dokáže soustředit do oka pozorovatele více světla. Zatímco plocha zorničky o průměru cca 8 mm je cca 0,5 cm^2, dalekohled o průměru pouhých 50 mm má plochu téměř 40x větší. Úměrně s tímto poměrem roste i **světelný zisk** dalekohledu. Ten se nejčastěji charakterizujeme nejslabší hvězdnou velikostí, kterou lze za ideálních podmínek daným přístrojem ještě rozpoznat – **mezní hvězdnou velikostí přístroje** [3]:

$$MHV_p = 2{,}5 + 5 \cdot \log D_{\mathrm{VS}}. \qquad (2.6)$$

Tab. 2.1 Dosah dalekohledu

Průměr objektivu [mm]	8	60	100	150	250	300	350
MHV [mag]	7,0	11,3	12,5	13,3	14,4	14,9	15,2
Světelný zisk [-]	1	56x	156x	351x	976x	1406x	1919x
Zisk ve hv. velikostech [mag]	0	4,3	5,5	6,3	7,4	7,9	8,2

2.3 Druhy astronomických dalekohledů

V průběhu svého vývoje se objevila celá řada konstrukcí dalekohledu. V zásadě je však můžeme rozdělit do tří základních skupin: refraktory, reflektory a katadioptrické systémy.

2.3.1 Refraktory

Refraktory jsou dalekohledy, v nichž je objektiv i okulár sestaven z čoček. První dalekohledy byly jednoduché soustavy čoček. Slovo soustava je v tomto případě trošku nadnesené. Skládaly se z pouhých dvou čoček – jedné plnící funkci objektivu a druhé ve funkci okuláru. Takovéto jednoduché konstrukce samozřejmě trpěly celou řadou optických vad. Drtivou většinu těchto vad lze odstranit zařazením dalších korekčních členů - čoček do optické soustavy. Výroba takovéto soustavy je ale poměrně složitá a cena proto velmi rychle roste s průměrem objektivu.

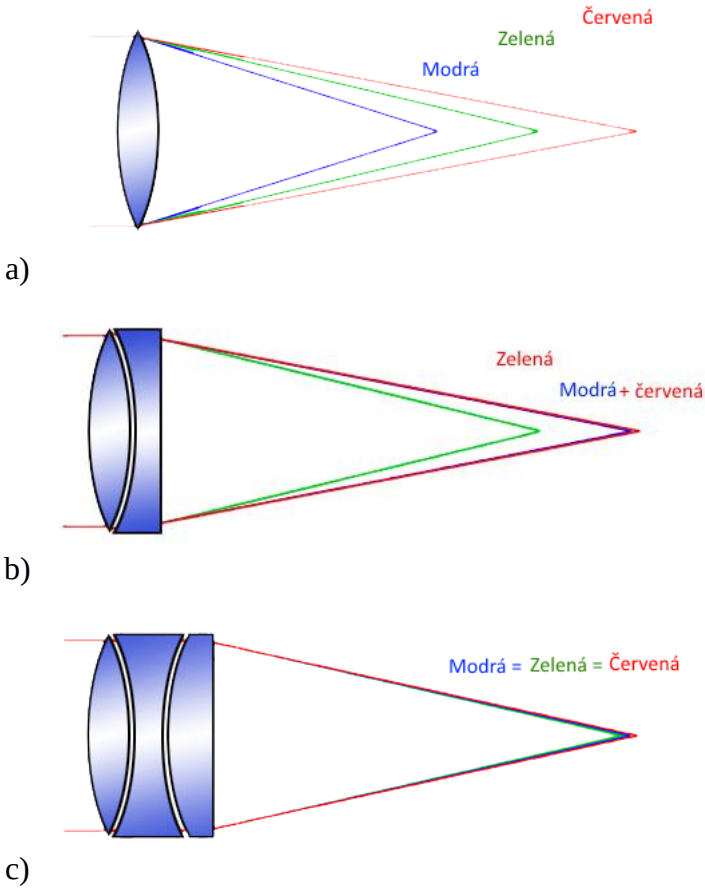
Asi nejmarkantnější vadou jednoduchých čočkových objektivů je jejich barevná vada. Jak již bylo uvedeno, různým vlnovým délkám odpovídají různé indexy lomu. Toho se s výhodou využívá např. u disperzních hranolů. Zde je ale tento jev na škodu kvalitě zobrazení. Částečně lze barevnou vadu kompenzovat kombinací dvou čoček vyrobených z různých typů skel (korunového a flintového). Takovýto objektiv se nazývá **achromatický**. Barevná vada je u něj oproti jednoduché čočce silně potlačena. Přesto je, zejména u velkých zvětšení a pozorování jasných objektů, patrná a může působit silně rušivě.

Pro lepší korekci barevné vady bylo až do nedávna jediné řešení, a to použít další čočku (čočky) z vhodného typu skla. Takovýto minimálně tříčočkový objektiv (v tomto případě hovoříme o tripletu) je již mnohem lépe korigován na barevnou vadu než dvoučočkový achromát. Takovýto plně korigovaný objektiv (**apochromát**) je ale bohužel velmi drahý.

Soudobé vybrané druhy skel se vyznačují nízkou disperzí (tj. závislostí indexu lomu na vlnové délce světla). Proto platí, že jejich index lomu je pro různé vlnové délky velmi blízký a tedy i z nich vyrobené objektivy mají velmi malou barevnou vadu. Tyto materiály jsou výrobci označovány různými zkratkami – nejčastěji ED (popř. jejich trošku starší obdobou LD). Pomocí ED skla je možné vyrobit dvoučočkový, a tím i cenově přijatelnější, **ED objektiv**, který se bude úrovní kompenzace barevné vady velmi často blížit pravému apochromátu. Tyto objektivy jsou označovány jako semiapochromáty. S ohledem na jejich malou zbytkovou vadu jej ale mnozí výrobci přímo označují jako apochromáty.

Základní rozdíl mezi výše uvedenými kategoriemi refraktorů ilustrují

obrázky *2.4* a *2.5*. Zatímco achromatická soustava je korigovaná pro dvě vlnové délky, apochromatická pro tři. To znamená, že obraz těchto vlnových délek/barev se promítne v ideálním případě „na sebe“ a uvidíme je ostře. Je-li soustava korigovaná pro více než tři vlnové délky, hovoříme o superapochromátu (s ním se však u astronomických přístrojů setkáme spíše výjimečně). Tomu přirozeně odpovídá i případná chyba zaostření (a tím i neostrost obrazu jiné barvy/vlnové délky, než na kterou je aktuálně zaostřeno). Nikoho asi nepřekvapí, že největší je u jednoduché čočky a nejmenší u apochromátu (popř. superapochromátu).



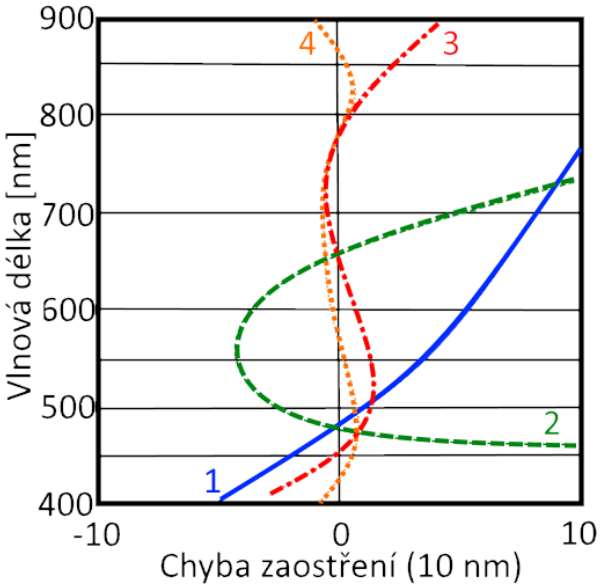
Obr. 2.4 Barevná vada:
a) jednoduché čočky, b) achromatického dubletu,
c) apochromatického tripletu

Dnes jsou typické menší refraktory achromáty vyráběny nejčastěji s relativním otvorem f/8 až f/12. Občas se setkáme i se soustavou s relativním otvorem větším než f/8, typicky např. f/5. Tyto soustavy jsou určeny primárně

pro malá zvětšení (např. jako přehledové dalekohledy). Typický zástupce této kategorie - hledáček komet: dalekohled s malým zvětšením, ale velkým zorným polem). Při větších zvětšeních již u nich musíme předpokládat poměrně velkou barevnou vadu. Chceme-li kratší soustavu (tzn. s větším relativním otvorem) a použít velká zvětšení, je nutné použít pravý apochromát, popř. refraktory z nízkodisperzních skel (ED objektivy). Ty jsou vyráběny nejčastěji s relativním otvorem f/6 – f/7,5, často i menším.

Tab.2.2 Základní vlastnosti refraktoru

Výhody	Nevýhody
- velmi dobrá až výborná ostrost a kontrast kresby	- vysoký poměr cena/průměr
- mohou mít velké zorné pole	- zbytková barevná vada u achromátu
- konstrukce umožňuje pomocí vnitřních clon účinně potlačit parazitní odrazy	- rosení objektivu
- uzavřený tubus chrání vnitřní optický systém	- nelze pořídit soustavy velkých průměrů
- nenáročné na údržbu či seřízení	



Obr. 2.5 Barevná chyba a chyba zaostření:
1 – jednoduchá čočka, 2 – achromatický dublet,
3 – apochromatický triplet, 4 – vícečočkový superapochromát

Tab. 2.3 Některé největší refraktory světa

Dalekohled	Průměr objektivu	Ohnisko	Rok výroby
Yerkes (USA)	1,02m	19.4m	1897
Lizat (USA)	0,91m	17,6m	1888
Paříž (Francie)	0,83m	16,2m	1891
Postdam (Německo)	0,80m	12,0m	1899

2.3.2 Reflektor

Vyrobit refraktor s objektivem velkého průměru je velmi nákladná záležitost. Svého maxima dosáhly již na přelomu 19. a 20. století. Dnešní technologie by sice byly schopny vyrobit průměr ještě o něco větší, ale to pouze za cenu nesmírných finančních nákladů. Z tohoto pohledu je na tom mnohem lépe druhá velká skupina dalekohledů – reflektory. Reflektory využívají nikoliv zákonu lomu (jak je tomu u refraktorů), ale zákonu odrazu. Hlavní optické členy jsou totiž zrcadla. Toto řešení přináší celou řadu výhod. Odraz není závislý na vlnové délce a tudíž nevzniká barevná vada. Současně je mnohem snadnější vyrobit jednu odraznou plochu než čočkový objektiv. Použití odrazných členů sebou ale přináší i některé nevýhody. U běžných konstrukcí je asi nejčastěji zmiňovanou nevýhodou tzv. **centrální zastínění**. Jeho vliv je ale velmi často přeceňován. Umístění sekundárního zrcadla před primárním způsobí, že část světla je zacloněna a nedopadne na primární zrcadlo. Tím dochází ke ztrátě malého množství světla a mírnému zhoršení kontrastu pozorovaného obrazu. Pro úplnost jen dodejme, že pozorovaný obraz je rovněž zatížen difrakčními obrazci, které vyvolává držák sekundárního zrcadla. Obraz hvězdy je pak „ozdoben“ paprsky, které z ní vycházejí. Do značné míry to je i věcí vkusu. Někomu se paprsky u hvězd líbí, jiní je proklínají.

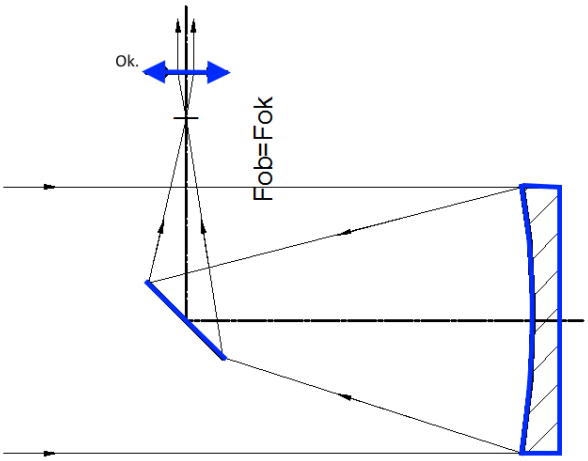
První reflektor sestrojil r. 1663 Isaac **Newton**, po němž nese tento nejjednodušší reflektor jméno. Vlastní objektiv je tvořen sférickým, popř. dnes častěji parabolickým zrcadlem. Svazek odražený zpět tímto primárním zrcadlem je odkloněn stranou kolmo na optickou osu rovinným zrcátkem pootočeným o 45° (tzv. sekundárním zrcadlem). Ohnisko, kde vzniká obraz, leží mimo vlastní tubus. Díky poměrně jednoduché konstrukci je tento typ dalekohledu mezi astronomy velmi oblíben. Jeho největší nevýhodou je jen poměrně malé zorné pole nezatížené aberacemi. Tento typ dalekohledu sice netrpí barevnou vadou, ale je zatížen v případě sférického zrcadla otvorovou vadou a u parabolického zrcadla zejména komou a astigmatismem. Čím je relativní otvor větší, tím jsou tyto vady zřetelnější. Pro vizuální pozorování

jsou nejvhodnější Newtonovy dalekohledy s parabolickým primárním zrcadlem a relativním otvorem f/5 až f/6. Dalekohledy s relativním otvorem pod f/4.5 jsou vhodnější spíše pro fotografické využití.

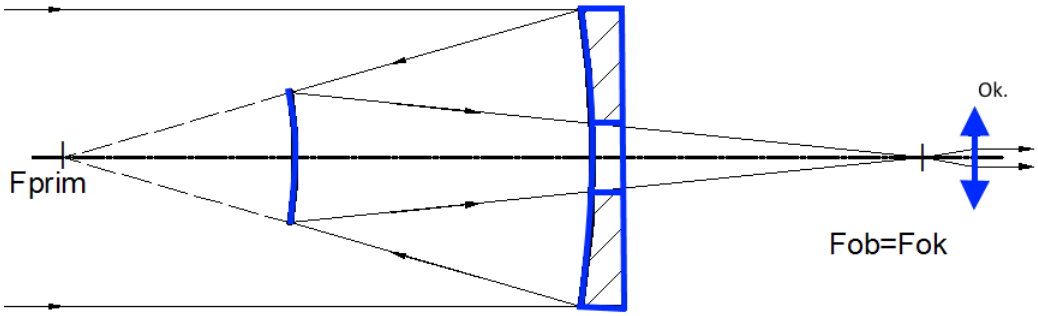
Konstrukčně složitější je dalekohled **Gregoryho** (obr. 2.8) navržený skotským matematikem J. Gregorym již v roce 1663 a **Cassegrainův** (obr. 2.9) sestrojený v r. 1672 v té době téměř neznámým francouzským fyzikem a vynálezcem L. Cassegrainem. Oba typy mají primární parabolické zrcadlo s otvorem uprostřed. V současnosti jsou tyto konstrukce v nových přístrojích používány pouze výjimečně. U klasického Cassegrainova dalekohledu je na místě sekundárního zrcadla zrcadlo vypuklé (hyperbolické). Svazek odražený od primárního parabolického zrcadla dopadá na sekundární zrcadlo, které mění sbíhavost dopadajícího/odraženého svazku, tzn. „protahuje jej“. Odražené paprsky prochází otvorem za primární zrcadlo. Výsledná ohnisková rovina se u tohoto typu přístroje nachází za primárním zrcadlem v ose přístroje. Cassegrainův dalekohled dává podobně jako klasický Keplerův dalekohled výškově a stranově převrácený obraz. Protože se sekundární zrcadlo nachází ještě před ohniskem primárního (myšleno ve směru chodu paprsků), je jeho konstrukční délka velmi krátká. Naopak výsledná ohnisková vzdálenost celé soustavy je mnohem větší. V případě Gregoryho dalekohledu je sekundární zrcadlo konkávní (duté). Je umístěno za primárním ohniskem tak, aby promítalo obraz objektu vytvořený primárním zrcadlem za primární zrcadlo. Výsledná velikost ohniskové vzdálenosti je podobně jako v předchozím případě větší, než by odpovídalo pouhé konstrukční délce tohoto dalekohledu. Tento typ dalekohledu tedy umožňuje navrhnout soustavu o velkých ohniskových vzdálenostech, byť celková konstrukční délka je větší než u Cassegrainova dalekohledu. Dnes se s tímto typem dalekohledu setkáváme jen zřídka.
U dalekohledů s primárním zrcadlem větších průměrů se můžeme setkat i se systémem **Ritchey-Chrétien**. Základní princip vychází z Cassegeinova dalekohledu, ale obě zrcadla jsou hyperbolická. To odstraňuje většinu optických vad původní soustavy Cassegrain (koma, sférická vada). Bohužel je výroba hyperbolických zrcadel poměrně náročná (technicky i cenově) a tak jsou využívány převážně u špičkových profesionálních zařízení.

Tab. 2.4 Základní vlastnosti Newtonova dalekohledu

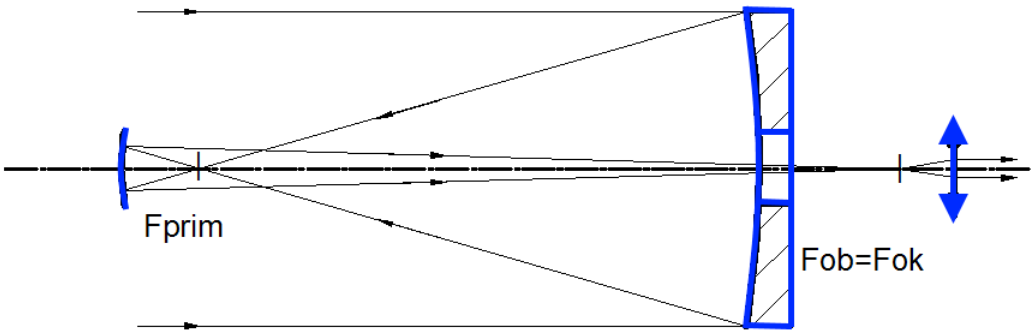
Výhody	Nevýhody
- relativně malé centrální stínění	- malé zorné pole
- nulová barevná vada	- v okraji zorného pole obraz zatížen komou
- výborná kresba v optické ose	- nutná příležitostná kolimace
- velmi výhodný poměr ceny a průměru	



Obr. 2.7 Schéma Newtonova dalekohledu



Obr. 2.8 Schéma Cassegrainova dalekohledu



Obr. 2.9 Schéma Gregoryho dalekohledu

2.3.3 Katadioptrický systém

Jak klasické refraktory, tak i reflektory mají své výhody, ale trpí určitými nedostatky. Katadioptrické systémy jsou kombinací odrazných prvků (zrcadel) i prvků využívajících zákona lomu (čočky a korekční členy). První praktické pokusy s využitím korekčních prvků využívajících lomu v zrcadlových systémech byly učiněny až počátkem 20. století. Poprvé pak byla korekční deska představena estonským optikem B. Schmidtem v roce 1930 v Schmidtově fotokomoře určené výhradně pro fotografování. Korekční deska má v tomto případě poměrně komplikovaný tvar. Proto je její výroba náročná.

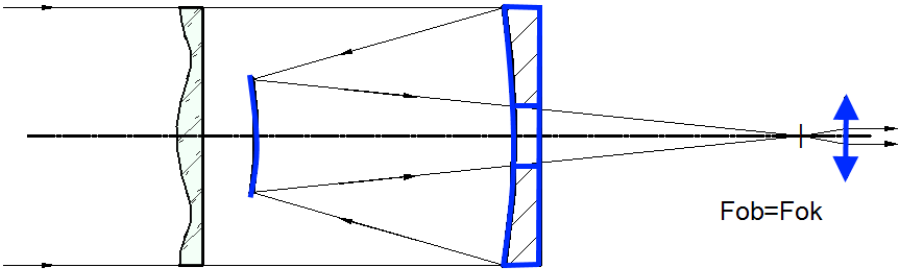
Kombinací Schmidtovy korekční desky s Cassegrainovým dalekohledem vznikl dnes poměrně rozšířený systém **Schmidt-Cassegrain** (SCT). Tento systém (obr. 2.10) kombinuje některé výhody jak reflektorů, tak refraktorů. Výhodou bezesporu je, že při krátké konstrukční délce mají tyto dalekohledy relativně velké ohniskové vzdálenosti vhodné např. pro pozorování planet, popř. je lze snadno umístit i v menší kopuli. Protože ohnisko celé soustavy se nachází za primárním zrcadlem a pozorovatel se dívá ve směru na objekt, je nutné zabránit parazitnímu světlu přímému průchodu do obrazové roviny. Proto se umisťují dovnitř soustavy clony/tubusky (jeden u primárního a druhý u sekundárního zrcadla). Nevýhodou tohoto řešení je omezení zorného pole. Schmidt-Cassegrain se vyrábí zpravidla s relativním otvorem f/10 až f/12.

Snahu nahradit složitou Schmidtovu korekční desku s úspěchem završil v roce 1941 D. Maksutov v Maksutově fotokomoře, která byla modifikována přidáním sekundárního zrcadla do **Maksutovova dalekohledu** (MCT). Jako základ v původním návrhu je zvoleno kulové primární i sekundární zrcadlo. V systému (obr. 2.11) pak stačilo vykompenzovat otvorovou vadu. Jeho korekční člen je mnohem jednodušší (jde o meniskus). Je ovšem nutná větší tloušťka takovéhoto korekčního členu, což samozřejmě přináší i určité nevýhody. Mezi ně patří zejména větší hmotnost a doba potřebná k tepelnému vyrovnání přístroje a tím i jeho optických vlastností.

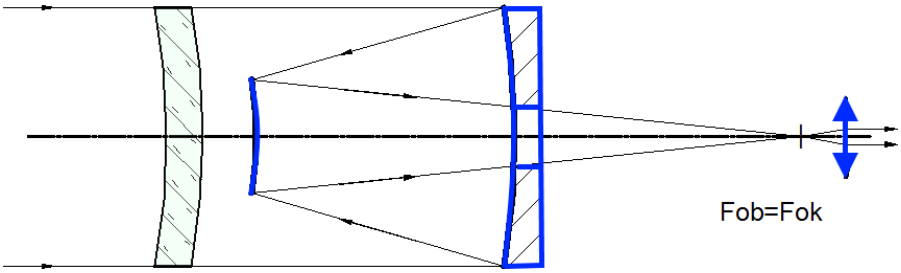
V roce 1957 modifikoval J. Gregory (shoda příjmení s vynálezcem dříve zmíněného dalekohledu je čistě náhodná) konstrukci Maksutovova dalekohledu. Nahradil sekundární zrcadlo pokovením části vnitřní plochy menisku. Touto úpravou se podařilo zjednodušit výrobní postup i hodnotu centrálního zastínění. Díky svým vlastnostem patří **Gregory-Maksutov** (obr. 2.12) mezi nejčastěji používané modifikace využívající Maksutův meniskus. Relativní otvor konstrukcí odvozených z Maksutovova se pohybuje zpravidla od f/10 až po f/15.

Tab. 2.5 Základní vlastnosti katadioptrických systémů

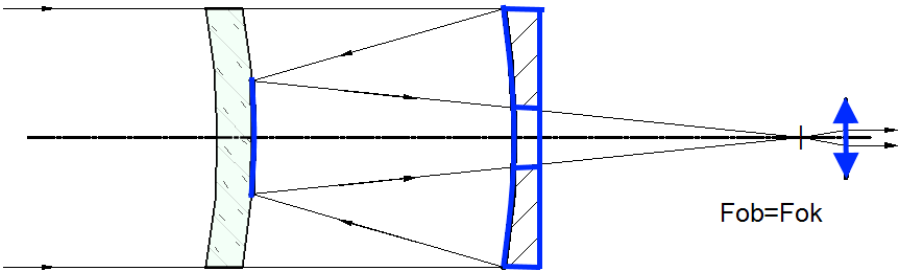
Výhody	Nevýhody
- velmi malá nebo žádná barevná vada	- malé zorné pole
- velmi kompaktní rozměry	- rosení korekční desky
- uzavřený tubus	- větší centrální stínění
- vyrovnaná kvalita kresby v celém zorném poli (zejména MCT a nezkrácený SCT)	- u větších průměrů může být relativně dlouhá doba potřebná k vytemperování přístroje
- malé nároky na údržbu	



Obr. 2.10 Schéma Schmidtova-Cassegrainova dalekohledu



Obr. 2.11 Schéma Maksutovova dalekohledu



Obr. 2.12 Schéma Gregoryho-Maksutovova dalekohledu

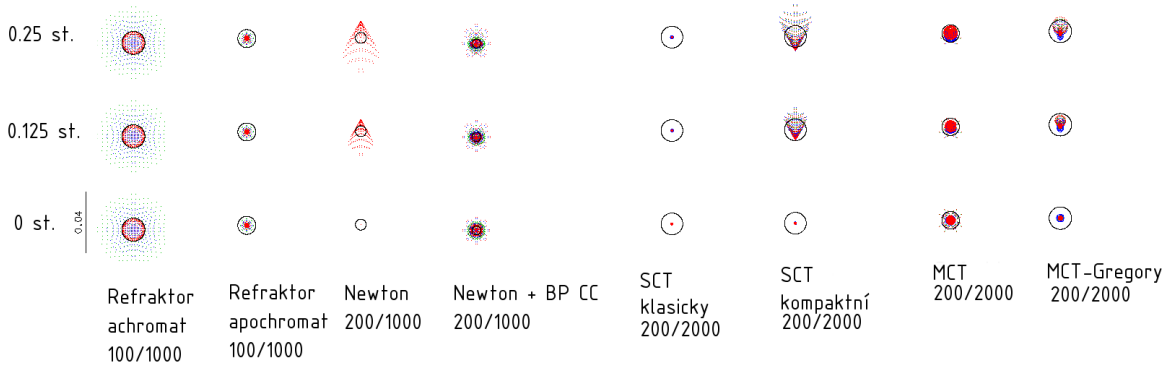
2.4 Porovnání čočkových a zrcadlových dalekohledů

Mimo výše uvedené základní typy dalekohledů existuje samozřejmě velký počet různých variací a odvozenin. Je třeba mít ale na paměti, že každá taková modifikace přináší určité výhody, ale zároveň i své nedostatky.

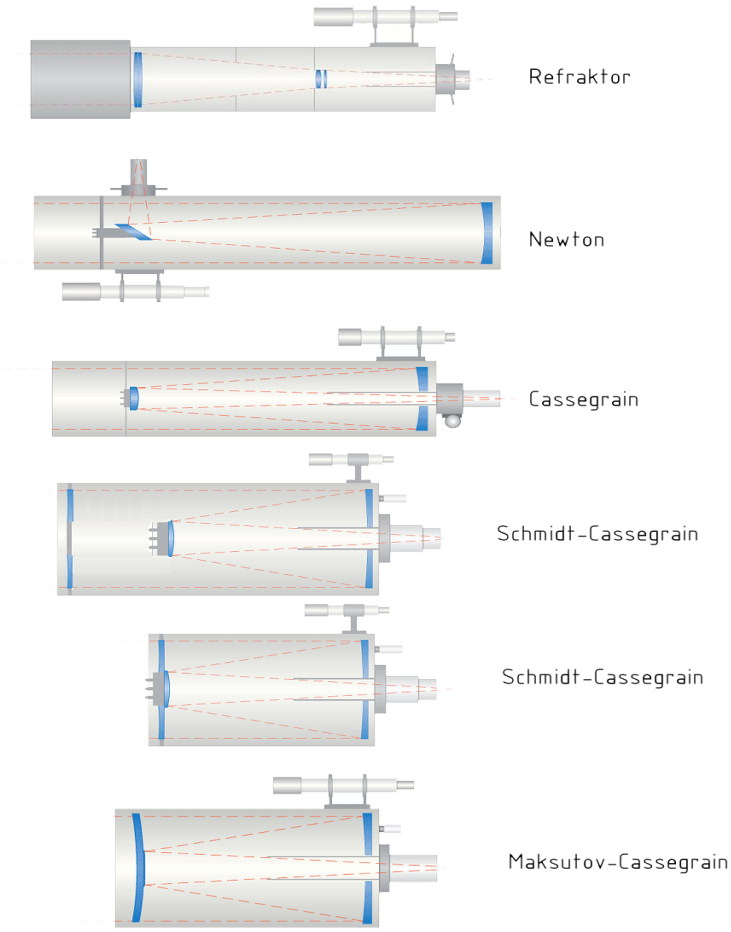
Mezi astronomy se občas najdou horliví zastánci té či oné koncepce astronomického přístroje, kteří odmítají jakoukoliv jinou koncepci přístroje, než tu svoji. Shrňme si tedy základní vlastnosti alespoň těch základních skupin. Nespornou výhodou refraktoru je jeho relativně velké zorné pole a uzavřená konstrukce chránící většinu optických ploch. Čočkové dalekohledy mají zpravidla menší průměr objektivu. Díky tomu jsou i méně citlivé na neklid atmosféry. Jejich velkou výhodou rovněž je, že optické plochy refraktoru (tj. čočky) mají zpravidla delší životnost než zrcadla používané v reflektorech. Patrně největší nevýhodou je jejich drahá a složitější výroba. Refraktor je obvykle mnohem dražší, než reflektor stejného průměru a úrovně jakosti. Navíc ty jednodušší a levnější refraktory (achromáty) jsou zatíženy zbytkovou barevnou vadou.

Reflektor má oproti refraktoru méně optických ploch a je proto zpravidla levnější než stejný průměr refraktoru. Samozřejmostí je, že reflektor netrpí barevnou vadou. Bohužel ale má zpravidla menší bezvadné zorné pole. Klasický reflektor má zpravidla otevřenou konstrukci. Díky tomu a zejména díky zpravidla většímu průměru primárního zrcadla je citlivější na nepokoj atmosféry.

Jaký přístroj si tedy vybrat? Na tuto zdánlivě jednoduchou otázku bohužel neexistuje jednoznačná odpověď. Čas od času se na různých astronomických fórech kolem tohoto tématu rozpoutají vášnivé debaty zastánců obou skupin. Tato debata zpravidla skončí nerozhodně. Ideální univerzální dalekohled prostě neexistuje. Pro pozorování planet je bezesporu velmi vhodný kvalitní refraktor. Naopak pro pozorování slabých objektů je výhodou velký průměr reflektoru. Snaha o nalezení univerzálního dalekohledu vhodného na všechna pozorování je do značné míry marná. Určitým kompromisem mezi těmito požadavky i oběma skupinami přístrojů jsou (alespoň pro běžné využití) katadioptrické systémy. Funkci univerzálního přístroje (zvláště pak pro mírně pokročilé astronomy amatéry) bezesporu velmi dobře zastane Newtonův reflektor. Který dalekohled je tedy nejlepší? Inu ten, kterým se skutečně pozoruje a přináší radost svému uživateli.



Obr. 2.13 Srovnání spot diagramu nejčastějších konstrukcí dalekohledu (černý kroužek odpovídá velikosti Airyho disku)



Obr. 2.14 Srovnání nejčastějších konstrukcí dalekohledu

3. Hodnocení kvality optických přístrojů

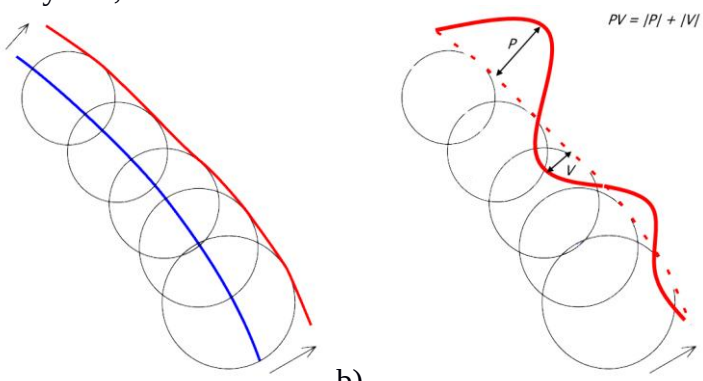
Tato kapitola je zaměřena na nejčastěji používaná kritéria pro hodnocení kvality optických přístrojů. Primárně je zaměřena na ta, která jsou vhodná k hodnocení astronomických dalekohledů. Další vhodná kritéria naleznete např. v [4] a [5].

3.1 Číselná kritéria

3.1.1 Kritérium PV

Mezi nejznámější kritéria hodnocení kvality optických přístrojů patří v astronomické veřejnosti kritérium označované PV (Peak to Valley; vrchol-údolí, popř. max-min). Toto kritérium je značně přeceňované a pro celkové hodnocení kvality zobrazení určitým přístrojem jde jen o pomocný údaj. Jak již jeho název napovídá, PV vyjadřuje rozdíl mezi minimálním a maximální odchylkou optické plochy od ideálního průběhu.

Pro jednoduchost předpokládejme sférickou vlnoplochu procházející obrazovou rovinou. Jak se nyní projeví optické aberace a vady vzniklé např. během výroby optických členů? Odpověď je nasnadě – deformací této vlnoplochy. Jinak řečeno, projeví se to odchylkami skutečné vlnoplochy od jejího ideálního tvaru (obr. 3.1). Kritérium PV je určeno velikostí maximální a minimální odchylky vlnoplochy od této ideální plochy (obr. 3.1b). V souladu s Rayleighovým kritériem (viz kapitola 3.1.4) platí, že pokud je velikost této odchylky (tj. PV kritérium) menší než je čtvrtina uvažované vlnové délky ($\lambda/4$), nebudou přítomné vady viditelně zhoršovat kvalitu obrazu. Např. pro vlnovou délku 550 nm tomu odpovídá odchylka mezi nejvyšším (P) a nejnižším (V) bodem vlnoplochy 137,5 nm.



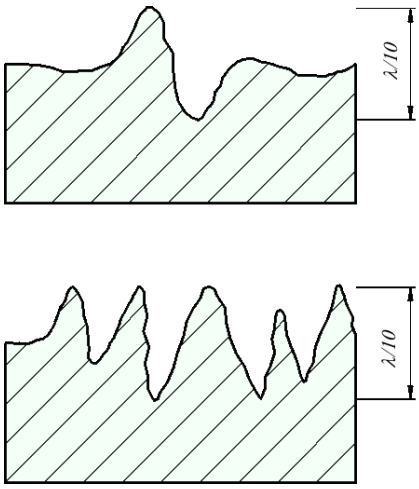
a) b)

Obr. 3.1 K pojmu vlnoplocha: a) ideální, b) deformovaná vlnoplocha (P … peak, vrchol; V … valley, údolí)

U astronomických dalekohledů se lze setkat rovněž s kritériem PV vztaženému nikoliv k určité vlnoploše (např. v obrazové rovině), ale k optické ploše (předpokládejme dále zrcadla).

Protože světelný svazek v tomto případě musí vykonat cestu 2x (tam a zpět), případná odchylka od ideálního tvaru se zdvojnásobí. Proto v souladu s Rayleighovým kritériem pro jednu reflexní plochu (zrcadlo) platí, že pro pokud je velikost PV kritéria tohoto zrcadla menší než je osmina uvažované vlnové délky ($\lambda/8$), nebudou případné přítomné vady viditelně zhoršovat kvalitu obrazu. Číselně je tedy hodnota PV kritéria vztaženého na plochu zrcadla při stejné kvalitě obrazu v našem případě poloviční.

Význam takto pojatého kritéria si ukážeme na jednoduchém příkladu. Na obr. 3.2 jsou znázorněny dva průběhy ploch fiktivních zrcadel. Předpokládejme, že odchylka mezi maximem (vrcholem) a minimem (údolím) je u obou ploch např. 55 nm. Tento údaj se velmi často udává vztažený na vlnovou délku (pro vizuální pozorování zpravidla λ=550 nm), tedy $\lambda/10$. Z obrázku je patrné, že obě zrcadla mají naprosto odlišný průběh. Kvalita zobrazení první plochou bude při tom vyšší než plochou druhou. Hodnota PV je přitom pro obě plochy shodná. Z příkladu je patrná i základní nevýhoda kritéria PV. Bere v úvahu pouze dva body (maximální a minimální) a ignoruje celý průběh mezi nimi. Ignoruje rovněž celkovou plochu těchto deformací a tím i jejich celkový příspěvek na výsledné zobrazení. Zrcadlo s hodnotou PV např. $\lambda/2,5$ může být ve skutečnosti velmi kvalitní s většinou plochy kvalitnější než $\lambda/12$. Nízká hodnota PV může být zapříčiněna jediným defektem, který navíc může být i skryt pod centrálním zastíněním.



Obr. 3.2 Průběh části optických ploch dvou různých zrcadel

Příčin popularity PV je více a některé mají z části i historické kořeny. Když testujeme optický systém některou z jednodušších metod (např. Ronchiho či Foucaultův test) některé vady optické plochy jsou v porovnání s citlivějšími metodami (např. interferometrickými) zeslabeny, popř. zcela nepozorovatelné. Toho je samozřejmé možné s výhodou využít i při výrobě. Ronchiho i Foucaultův test odhalí spolehlivě chyby a zóny, které způsobují při zobrazení vážné problémy (zejména pak asymetrické vady plochy – např. astigmatismus).

Použitím citlivějších metod, např. interferometru, může ta samá plocha vykazovat celou řadu zdánlivých zón astigmatismu. Nepravý (zdánlivý) astigmatismus zmizí po umístění zrcadla do dalekohledu, kde je řádně v objímce podloženo. Když odhadujeme chyby plochy pomocí hrany nože popř. Ronchiho testem, závisí jejich velikost na měření zóny symetricky umístěné ke středu zrcadla. Zde je kritérium PV relativně snadno srozumitelné. Zmenšení hodnoty PV na minimální hodnotu obvykle zajistí poměrně kvalitní zrcadlo.

Při interferometrickém měření jsou ale zpravidla měřeny velmi malé oblasti. Pro celkovou analýzu je pak nutno kompletovat výsledky mnoha měření. Z uvedeného je patrný i zásadní rozdíl mezi různými druhy měření. V amatérské praxi jsou většinou upřednostňovány jednodušší metody měření (Foucaultova, Ronchiho, …). Oproti tomu profesionální výroba velmi přesných přístrojů se orientuje na aplikaci interferometrie. To samozřejmě vyžaduje i nová kritéria hodnocení kvality. Z uvedeného je zřejmá obliba kritéria PV u amatérských astronomů, zatímco profesionálové dávají přednost jiným, výstižnějším kritériím.

Je zřejmé, že kritérium PV není ani zdaleka všeobsahující. Je nutno varovat před jednoznačnými závěry týkající se kvality optického systému jen na základě tohoto jediného parametru. Proto typický komentář hodnotící např. zrcadlo by mohl vypadat např: „zrcadlo má PV rovno $\lambda/10$, ale 0,1D od středu zrcadla je malá podbroušená zóna $\lambda/3$, která bude zastíněna sekundárním zrcadlem“.

U interferometrického měření se na místo PV kritéria využívají zpravidla jiné parametry (viz dále), které jsou lepším podkladem pro analýzu souhrnného vlivu na celkovou kvalitu zobrazení celou optickou plochou.

3.1.2 Kritérium RMS

Kritérium RMS (Root Mean Square) je založeno na měření optické plochy v mnoha bodech a následném statistickém zpracování. V podstatě jde o analogii směrodatné odchylky ve statistice. Čím je pak hodnota RMS blíže nule, tím se průměrná hodnota optické plochy více blíží ideální. Bohužel ani toto kritérium nevystihuje zcela jednoznačně vliv odchylek (popř. deformací)

optické plochy na výslednou kvalitu obrazu. Navíc udávání hodnot RMS v poměru k vlnové délce může u neinformovaného uživatele vyvolat řadu dalších otázek a pochybností.

Téměř každý astronom-amatér ví, že pro kvalitní optický systém je nutné, aby byla optická plocha vyrobena dle PV kritéria s přesností $\lambda/4$ (u zrcadel samozřejmě dvojnásobek, tj. $\lambda/8$). Bohužel pro hodnotu RMS žádný takový striktní standard přijat nebyl. Rayleigh tiše a Marechal písemně předpokládal hodnotu RMS rovnu $\lambda/14$. Jinak řečeno tuto hodnotu RMS lze považovat za přibližně rovnou známé Rayleighově podmínce $PV = \lambda/4$.

Zatímco hodnota kritéria PV je více méně intuitivní, představit si směrodatnou odchylku je již poměrně obtížné. Předpoklad, že např. PV rovno $\lambda/10$ je ekvivalentní RMS rovnému $\lambda/35$, je poměrně obtížně odůvodnitelný. Ve skutečnosti totiž žádný intuitivní bezprostřední jednoduchý vztah mezi PV a RMS neexistuje (viz příklad hodnoty PV pro dvě různé plochy v části věnované kritériu PV). Výše uvedené porovnání vyplývá z odhadu úrovně korekce dané plochy.

3.1.3 Strehlův podíl (SR koeficient)

Na rozdíl od předchozích kritérií je Strehlův podíl (též koeficient SR, Strehl Ratio) mírou optické dokonalosti dané optické soustavy jako celku. Vyjadřuje poměr množství světla obsaženém v Airyho disku reálné optické soustavy k teoretickému maximu fyzikálně dokonalé optické soustavy. Nabývá hodnot od nuly do jedné. SR roven jedné má fyzikálně dokonalá optická soustava, menší hodnota SR pak signalizuje horší optickou soustavu.

Airyho disk nezastíněného ideálního objektivu obsahuje cca 83.8 % energie z celkové energie obrazu hvězdy. Difrakční kroužek prvního řádu bude obsahovat 7.2 % světla, kroužek druhého řadu 2.8 %, a tak dále. Za jasné klidné noci je zpravidla viditelný mimo centrálního Airyho disku pouze kroužek prvního řádu, kroužky vyšších řádů zpravidla jen u optického systému většího průměru popř. u jasných hvězd. S rostoucí energií soustředěnou do centrálního Airyho disku je optická soustava považována za kvalitnější. Tuto podmínku je možno považovat pro praktické účely za obecně platnou. Určitou výjimkou je snad jen případ, kdy o trochu zvýšený podíl energie v prvním difrakčním kroužku napomáhá rozlišení dvojhvězd.

Pro přesné experimentální stanovení hodnoty koeficientu SR je nutno provádět velký počet měření s velkou přesností v různých bodech optické plochy. Proto jsou pro přesné stanovení tohoto koeficientu zvláště výhodné interferometrické metody. Existuje ale i způsob, jak určit SR koeficient přibližně. Pro velké hodnoty SR koeficientu (cca nad 0,8) lze využít

jednoduchý aproximační vztah využívající hodnotu RMS kritéria [4]:

$$\mathrm{SR} = 1 - (2 \cdot \pi \cdot \mathrm{RMS})^2. \qquad (3.1)$$

Oproti RMS má koeficient SR jednu nespornou výhodu. Je do značné míry intuitivní a jeho význačné hodnoty jsou poměrně snadno zapamatovatelné. Jak již bylo uvedeno, fyzikálně dokonalá optická soustava má hodnotu SR koeficientu rovnu jedné. Výtečná optická soustava má SR lepší než 0,95. U velmi dobré optické soustavy je SR rovno minimálně 0,9. Dobrá optická soustava by měla mít hodnotu SR koeficientu minimálně 0,8. Pokud je SR koeficient menší než tato hodnota, není již optická soustava příliš kvalitní. Takovéto hodnocení optických soustav má i jednu další výhodu – umožňuje přistoupit k hodnocení a vzájemnému porovnání kvality různých optických systémů. I to je jeden z důvodů, proč právě SR koeficient je stále oblíbenějším parametrem nejen mezi profesionály.

3.1.4 Rayleighovo kritérium

Předpokládejme nedokonalou optickou plochu. Původně rovinná vlna, která na ni dopadá, se deformuje. Jak velké mohou být tyto deformace vlnoplochy, aniž by byl patrný úbytek kvality obrazu? Odpověď dává tzv. Rayleighovo kritérium.

Jedná se asi o nejznámějším kritérium hodnocení optické kvality. Nezaměňujte toto kritérium s Rayleighovým limitem vyjadřujícím rozlišovací schopnost dalekohledu. **Rayleighovo kritérium říká, že jestliže vlnoplocha, která vstupuje do oka pozorovatele, je deformovaná od ideální sférické o více než λ/4, budou v obraze pozorovány degradace.**

Jen nutno zdůraznit, že tento standard je nutno vnímat jako minimum. Deformaci vlnoplochy λ/4 odpovídá hodnota RMS λ/14 (statické Marechalovo kritérium). Dosazením do výše uvedeného aproximačního vztahu pro SR koeficient dospějeme k ekvivalentní hodnotě SR rovné cca 0,8 (přesnější hodnota je 0,82). Pokud tedy je deformace vlnoplochy pod touto hodnotou, bude přístroj splňovat bez ohledu na druh aberace, základní Rayleighovo kritérium kvality i výchozí požadavky na kvalitu zobrazování pro běžného pozorovatele.

Zkušený a náročný pozorovatel ovšem zpravidla vyžaduje vyšší stupeň kvality, tj. nižší deformaci vlnoplochy. Ve výrobě kvalitních optických prvků se v současnosti předpokládá, že nárůst optického výkonu je ještě pozorovatelný u optických systémů majících výslednou deformaci vlnoplochy lepší než λ/8. Tato hodnota přípustné deformace vlnoplochy nepochybně přispívá k vyšší výsledné optické kvalitě. Proto je u soudobých špičkových přístrojů povolena maximálně polovina hodnoty Rayleighova kritéria, tj. právě

oněch λ/8. Této hodnotě odpovídá hodnota RMS koeficientu 0,036 a SR koeficientu 0,95.

Základní Rayleighovo kritérium postihuje pouze sférickou aberaci. To je poměrně vážný nedostatek. Jiné typy aberací pak přirozeně dávají rozdílné hodnoty kritéria PV, RMS i následný pokles RMS i na hodnotu kolem 0,8.

Pro dosažení konečné přesnosti vlnoplochy λ/8 a při uvažování i hromadění chyby (vliv okuláru, … bez uvažování vad oka) je nutno standard pro primární objektiv dále zvýšit – např. namísto λ/8 na λ/10. To je již hodnota, kterou splňují zpravidla jen ty nejdražší objektivy určené pro speciální použití. Této hodnotě odpovídá hodnota RMS cca 0,028 (λ/35.7), popř. SR kolem 0,97. Příklad porovnání hodnot různých kritérií kvality je v tab. 3.1. Jedná se o orientační hodnoty. Nelze z ní tedy dovozovat obecné teoretické závěry.

Tab. 3.1 Orientační ekvivalentní hodnoty různých kritérií kvality

PV (zlomek λ)	PV	RMS	SR koeficient	Poznámka
1/3	0,333	0,094	0,71	
1/4	0,250	0,071	0,82	Rayleighův limit
1/5	0,200	0,057	0,88	
1/6	0,167	0,047	0,92	Dobrá
1/7	0,143	0,041	0,94	Velmi dobrá
1/8	0,125	0,036	0,95	Vynikající
1/10	0,100	0,028	0,969	
1/12	0,083	0,024	0,978	

3.2 Test na hvězdu

Test na hvězdu patří mezi velmi snadné a při tom velmi citlivé testy. Umožňuje odhalit nedokonalosti optických systémů o velikosti až $\lambda/20$ (podle druhu aberace). U rychle se měnících aberací dokonce i dvojnásobek této hodnoty. Nedostatkem této metody je zejména to, že odhad velikosti aberací je jen relativní (v porovnání s velikostí pozorovaného difrakčního obrazce). Kvantifikace velikostí aberací je pak jen přibližná, nicméně možná. Přesnější kvantifikace aberací pomocí tohoto testu by pak již vyžadovala sérii etalonů, optických soustav s definovanou velikostí aberací. To je však již nad možnosti drtivé většiny astronomů-amatérů.

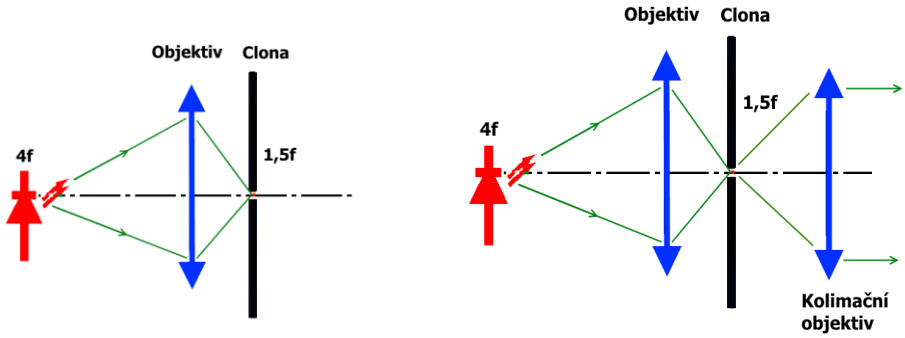
3.2.1 Umělá hvězda

Atmosféra Země je poměrně neklidné prostředí pro šíření optického záření. To je patrné zejména při pozorování difrakčního obrazce hvězdy. Tento obrazec se zpravidla bude vlivem neklidného ovzduší neustále vlnit i měnit tvar. Okamžiků, kdy je atmosféra dostatečně klidná, je jen pár do roka. Proto je výhodné si vytvořit takovouto hvězdu uměle. Existuje celá řada nejrůznějších více nebo méně dokonalých konstrukcí. Od soustav generujících svazek rozbíhavý (hvězda se jeví v konečné vzdálenosti) až po soustavy „generující“ hvězdu v nekonečnu.

Mezi nejjednodušší patří **umělá hvězda** vyrobená z obyčejného laserového ukazovátka. Základem každé umělé hvězdy je světelný zdroj. Při výběru laserového ukazovátka je jen nutno dát pozor na to, aby maximální výstupní výkon byl nižší než 1 mW. Z ukazovátka pak již jen stačí demontovat plastovou čočku (je zpravidla našroubována pod krycí čepičkou na výstupu ukazovátka). Vlastní laserová dioda (resp. její zářivá oblast) je velmi malá. Pokud umístíme takto upravené ukazovátko dostatečně daleko (zpravidla postačuje vzdálenost do několika desítek metrů) je možné využít takovýto zdroj jako náhradu umělé hvězdy.

Samozřejmě je možno konstruovat i umělou hvězdu, kterou lze umístit do menší vzdálenosti. Schéma takovéto „klasické“ umělé hvězdy je na obr. 3.3. Jako světelný zdroj může posloužit opět upravené laserové ukazovátko z předchozího příkladu. Laserová dioda se nachází v několikanásobku předmětové ohniskové vzdálenosti objekitvu. Čím bude ohnisková vzdálenost objektivu menší a laserová dioda bude dále, tím bude menší i obraz pozorované hvězdy a výsledně bude pozorovaná hvězda intenzivnější. Minimální „rozumná“ vzdálenost laserové diody od objektivu je cca čtyřnásobek ohniskové vzdálenosti – obraz zdroje pak bude zhruba poloviční oproti předchozímu případu. Při umístění zdroje do dvojnásobku ohniskové vzdálenosti by již použití objektivu postrádalo smysl (obraz zdroje by měl

stejnou velikost). Na kvalitě objektivu příliš nezáleží. Vyhoví prakticky jakákoliv trošku slušná spojná soustava (jen kratší ohnisková vzdálenost soustavy klade vyšší nároky na přesné ustavení následné clony). Na výstupu je kruhová clonka. Je umístěna v rovině, kde je objektivem vytvářen zmenšený obraz laserové diody. Čím menší bude velikost kruhového otvoru, tím lépe. Na druhou stranu, tím méně světla nám umělá hvězda poskytne. Otvor cca 0,1 mm bude představovat na vzdálenost 10 m hvězdu o velikosti přibližně 2 úhlové vteřiny. Při potřebě menší umělé hvězdy (vyššího rozlišení) je nutno velikost clonky úměrně snížit, popř. zvýšit vzdálenost. Zpravidla je proto vhodné mít několik vhodných clon různých průměrů (od desetin po setiny milimetrů).



a) b)

Obr. 3.3: Principiální schéma umělé hvězdy:
a) základní schéma s objektivem,
b) s promítnutím umělé hvězdy do nekonečna

Pokud vznikne požadavek na umělou hvězdu v nekonečnu, lze tuto sestavu doplnit další spojnou soustavou, v jejímž ohnisku bude clonka s kruhovým otvorem (obr. 3.3b). Pro minimalizaci vlivu tohoto objektivu (jde vlastně o kolimátor) jsou ale poměrně vysoké nároky na jeho kvalitu.

Použití umělé hvězdy přináší hned několik výhod. Zejména na takto malých vzdálenostech je vliv atmosféry minimální a obraz Airyho disku je stabilní. Laserová dioda je zdroj prakticky monochromatického světla. Jejím použitím pak dostaneme poměrně kontrastní difrakční obrazec s přesně definovanými vzdálenostmi mezi jednotlivými difrakčními kroužky. Takovouto umělou hvězdu lze samozřejmě využít i např. k přesné kolimaci zrcadlových dalekohledů.

3.2.2 Realizace testu na hvězdu

Při hodnocení kvality optických systémů pomocí testu na hvězdu je nutné, aby přístroj, který chceme testovat, byl tepelně vyrovnaný s okolní

teplotou. Pokud nebudete používat umělou hvězdu, je vhodné zvolit klidnou noc se stabilním ovzduším. Zvolená hvězda by se měla nacházet alespoň 60 ° nad vodorovnou rovinou.

Provedení vlastního testu na hvězdu je pak poměrně jednoduchou záležitostí. Provádí se s využitím velkého zvětšení, zpravidla srovnatelného s průměrem testovaného objektivu vyjádřeného v milimetrech. Když je hvězda zaostřena ve středu zorného pole, byl by v ideálním případě vidět difrakční obrazec – centrální Airyho disk se soustřednými difrakčními kroužky. Případné centrální zastínění reflektorů způsobí přerozdělení energie v pozorovaném difrakčním obrazci - malé zmenšení průměru pozorované části Airyho disku, mírné zhuštění difrakčních kroužků a zejména pak zvýšení jasu vnějších difrakčních kroužků.

Jak již bylo uvedeno, je viditelnost difrakčních kroužků závislá na jasnosti pozorované hvězdy, stavu kolimace přístroje a v případě pozorování reálné hvězdy i na stavu atmosféry. Vlivem turbulencí v atmosféře má obrazec tendenci „vařit“ a je pak obtížné rozpoznat detaily v obraze.

Test na hvězdu začneme zaostřením hvězdy přesně do ohniska. Pokud je dalekohled tepelně vyrovnaný a alespoň průměrné kvality, budeme pozorovat obrazec více či méně podobný výše uvedenému teoretickému případu. Při rozostření směrem k objektivu a od objektivu se bude pozorovaný obraz měnit. Může se to zdát paradoxní, ale opravdu je mnohem jednodušší hodnotit aberace soustavy z rozostřeného obrazu hvězdy než z přesně zaostřeného. V obrazu rozostřené hvězdy bude vidět sérii kruhů. Postupně jak se bude hvězda rozostřovat směrem k objektivu, uvidíte mezi čtyřmi až šesti kruhy. V tomto okamžiku zastavte rozostřování. Uvidíte relativně jasný nejkrajnější kruh a světlo v podstatě rovnoměrně rozšířené mezi jednotlivé kruhy. Postupně otáčejte ostřením na druhou stranu (směrem od objektivu). Obraz se nejprve znovu zaostří a následně se opět začne rozostřovat. Rozostřování opět zastavte při stejné velikosti rozostřeného obrazu. Oba rozostřené obrazy – před i za ohniskem budou v dokonalém optickém systému prakticky totožné. Rozdíl je ale mezi obrazem pozorovaným v refraktoru (obr. 3.4) a reflektoru (obr. 3.5). Refraktor bude mít rozostřený obraz, který je vyplněný. Optický systém s centrálním stíněním má rozostřený obraz podobný „koblize“ (s temnou centrální částí). V následujících částech je ukázán vliv některých základních aberací na vzhled pozorovaného obrazu.

3.2.3 Sférická aberace

Zhodnocení přítomnosti sférické aberace spočívá v porovnávání předohniskového a zaohniskového rozostřeného obrazu hvězdy. Systém bez sférické aberace má oba obrazy (před i za ohniskem) totožné. Pro soustavu

zatíženou sférickou aberací to neplatí. Když je primární zrcadlo nebo čočka podkorigováno, budete vidět při rozostření směrem k objektivu slabý centrální disk s kruhy, jejichž jas roste z centra k vnějšímu okraji. To je extrémně nápadné u venkovního okraje difrakčního vzoru. Pro rozostření za ohniskem bude světlo soustředěné do centra a centrální disk je téměř malý a jasný jako v ohniskové rovině. Jas venkovních kruhů klesá směrem k okraji velmi rychle, okraje obrazce jsou slabé a jen slabě ohraničené. Pro překorigované zrcadlo nebo čočku je průběh pozorovaných obrazců opačný oproti předchozímu případu.

3.2.4 Deformovaný optický člen

Když pozorujeme zkreslený obraz (ať již před či za ohniskem), který vyhlíží spíše více jako trojúhelníkový či polygonální namísto kruhového, jde pravděpodobně o deformaci některého optického prvku (např. zrcadla). Typickou příčinou bývá příliš silné utáhnutí upínacích prvků (u zrcadel), nebo objímky (u čočkových soustav).

Toto je zřejmé obzvláště v Newtonových reflektorech v případě, že zrcadlo je v buňce připevněno příliš těsně. Může k tomu ale dojít u refraktoru, kdy objímka čočky je příliš dotažená.V neposlední řadě může být tento pozorovaný deformovaný difrakční obrazec způsoben i nedostatečně vytemperovaným přístrojem. To je patrné zejména u uzavřených systémů typu Maksutov, kde doba potřebná na tepelné vyrovnání je poměrně velká (např. při průměru menisku kolem 100-127 mm i několik hodin, viz obr. 3.7).

3.2.5 Astigmatismus

Astigmatizmus se v obraze projevuje stáčením pozorovaného obrazu při přeostřování před a za ohnisko. Místo soustředných kroužků budete pozorovat elipsu, jejíž velká poloosa se při přeostřování bude stáčet. Při přesném zaostření budete zpravidla pozorovat na místě Airyho disku typický kříž (viz obr. 3.8).

Problémy s astigmatismem byly vcelku běžné v systémech Schmidt-Cassegrain, kde jej měl často na svědomí slabě mechanicky uchycený korektor. Poznamenejme ovšem, že nepravý astigmatismus může být vyvolán špatně zkolimovanou soustavou, popř. není-li tato soustava dostatečně tepelně vyrovnaná se svým okolím.

U dalekohledů typu Newton může astigmatismus rovněž indikovat, že sekundární zrcátko (zejména jeho kratší diagonála) není dokonalé rovinné, ale mírně vypouklé, popř. duté. Odlišení od astigmatismu hlavního zrcadla je poměrně snadné. Postačuje otáčet hlavním zrcadlem o 45°. Pokud se

astigmatismus neotáčí souběžně se zrcadlem, je chyba s nejvyšší pravděpodobností v sekundárním zrcadle.

Další zdroj pozorovaného astigmatismu může být oko pozorovatele. Nicméně, případný mírný astigmatismus vašich očí nebude pozorovatelný při použití velkého zvětšení, kdy je malá výstupní pupila. Pokud přesto astigmatismus pozorujete, je poměrně snadné se ujistit, že „zdrojem“ není vaše oko. Otáčejte se (resp. vaši hlavu) okolo optické osy. Jestliže pozorovaný astigmatismus sleduje váš pohyb, potom je vaše oko astigmatické. V neposlední řadě může být zdrojem astigmatismu i použitý okulár. Test astigmatismu okuláru je poměrně snadný. Postačuje jeho otáčení kolem optické osy v okulárovém výtahu. Jestliže obraz sleduje otáčení, je problém v okuláru.

3.2.6 Zonální chyby

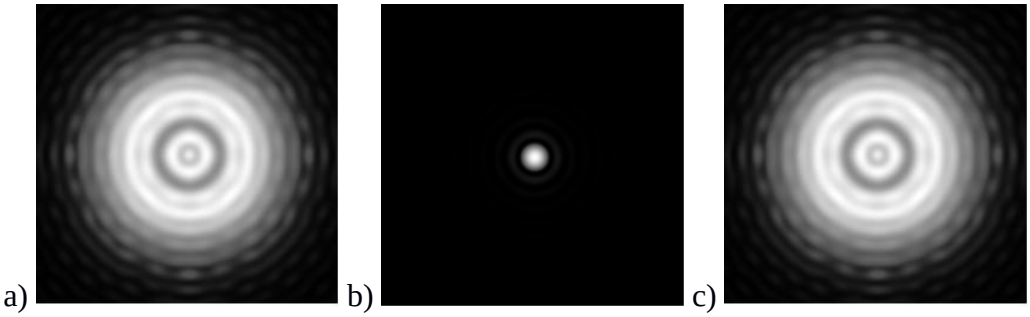
Zonální chyby vznikají, když je při výrobě optického členu nedostatečně vybroušený/natvarovaný optický povrch finálně leštěn. Výsledkem pak jsou malá „údolí“ či „vrcholky“. V této části testu, je nutno se zaměřit na nalezení těchto zonálních vad. Ty lze v obraze hvězdy identifikovat podle toho, zda jsou některé ze soustředných kroužků v předohniskové či zaohniskové pozici zúžené, popř. rozšířené. Nalezení takového zúžení/rozšíření napomůže plynulé přeostřování do obou krajních poloh.

3.2.7 Sražené hrany

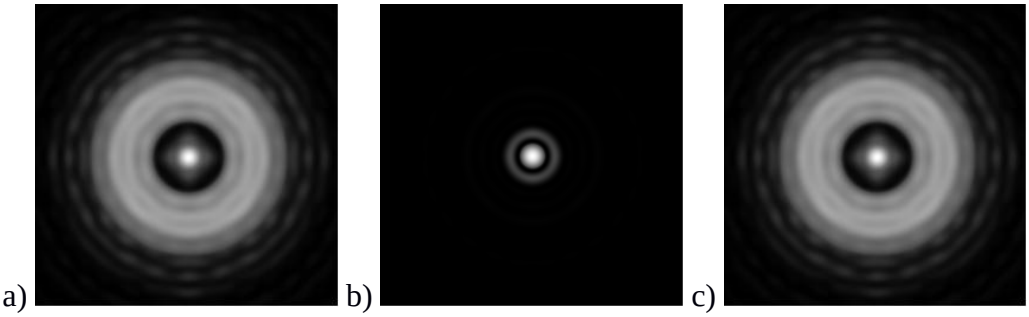
Sražené hrany na optických prvcích vznikají nevhodným tlakem při leštění optické plochy. Mnohem častěji se vyskytuje u zrcadel než u čoček. Příčina je velmi prostá – okraje čočky v refraktoru jsou skryty v objímce objektivu a na výsledné zobrazení nemají vliv. Podobným způsobem lze „vyléčit“ i zrcadlo. Postačuje přiclonit jeho okraje kruhovou maskou (zpravidla stačí 5-10 mm).

U reflektoru rozpoznáme sražené okraje poměrně snadno. V pozici před ohniskem lze u rozostřeného difrakčního obrazce pozorovat roztřepení („vousy“). V ohnisku je difrakční obrazec plochý, jen kroužky nejsou zobrazeny ostře. Za ohniskem se difrakční obrazec podobá dokonalému zrcadlu. Při vyvýšených hranách je projev opačný. Před ohniskem vypadá difrakční obrazec ideálně, za ohniskem má „vousy“.

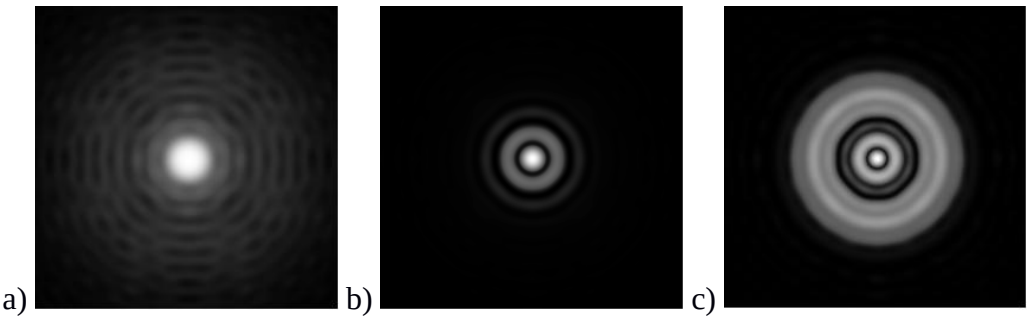
Refraktor má projev sražených/vyvýšených hran opačný než u zrcadla.



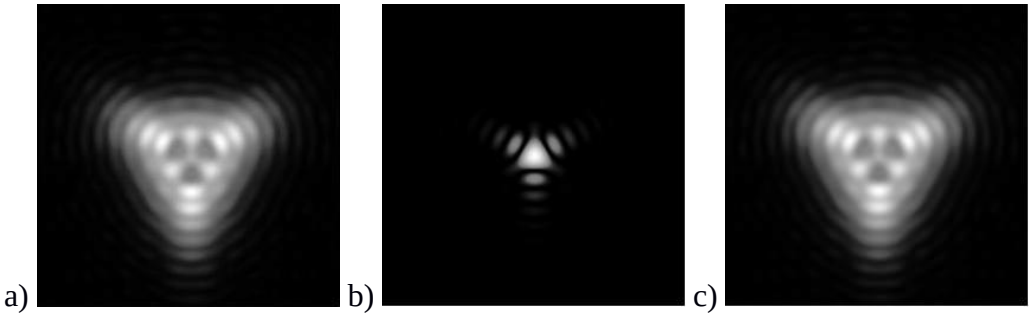
Obr. 3.4: Airyho disk a vedlejší prstence ideální soustavy (refraktoru):
a) před ohniskem, b) v ohnisku, c) za ohniskem



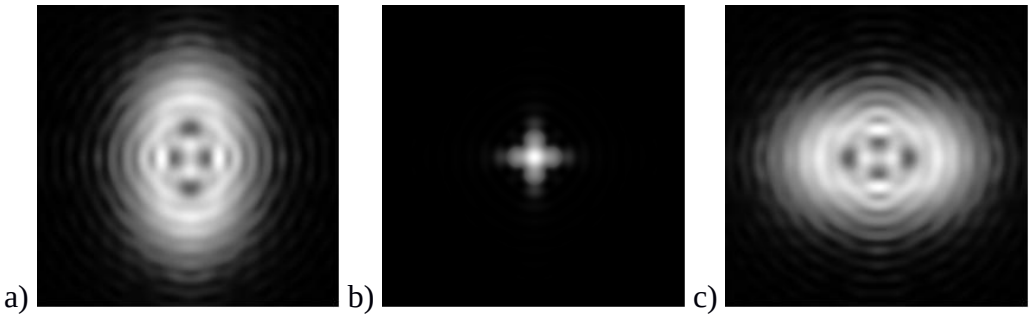
Obr. 3.5 Airyho disk a vedlejší prstence ideální soustavy (reflektoru):
a) před ohniskem, b) v ohnisku, c) za ohniskem



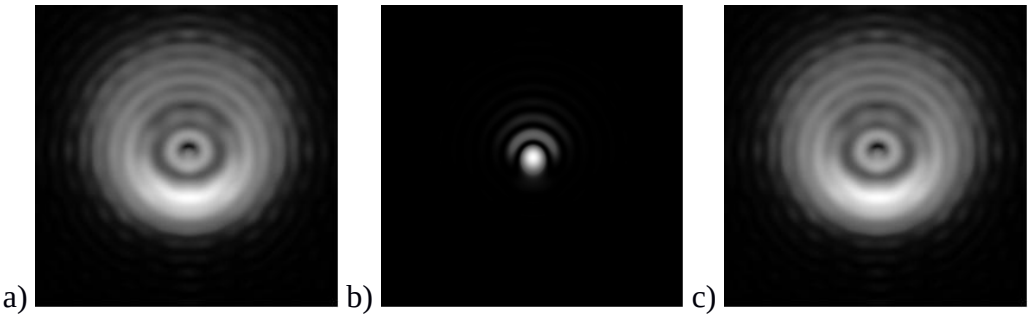
Obr. 3.6 Obraz zatížený sférickou aberací:
a) před ohniskem, b) v ohnisku, c) za ohniskem



Obr. 3.7 Obraz deformovaný přílišným mechanickým tlakem:
a) před ohniskem, b) v ohnisku, c) za ohniskem



Obr. 3.8 Obraz zatížený astigmatismem:
a) před ohniskem, b) v ohnisku, c) za ohniskem



Obr 3.9 Obraz zatížený komou:
a) před ohniskem, b) v ohnisku, c) za ohniskem

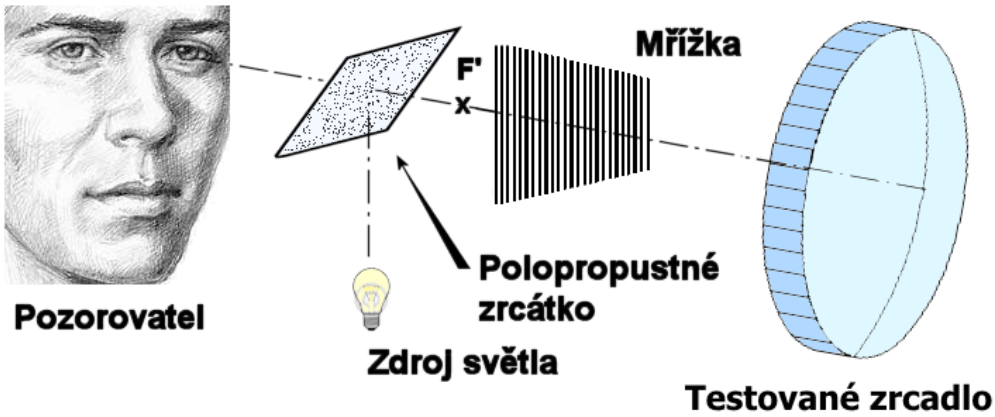
3.3. Ronchiho test

Potřeba testovat kvalitu optických přístrojů je stejně stará jako optické přístroje samy. Z počátečních přístupů typu pokus-omyl postupně přinesl pokrok v polovině 18. století R. Smith a zejména pak W. Herchel se svým testováním zonálních vad prostřednictvím masek. Skutečnou revoluci pak znamenal až v polovině 19. století test navržený L. Foucault. I přes nesporné výhody Foucaultova testu však stále chyběla metoda, která by umožňovala určit kvalitu optického systému rychle, byť jen orientačně. V roce 1922 publikoval Vasco Ronchi postup testování optických zrcadel velkých průměrů pomocí mřížek. Mnohem později byl tento test nazván po svém autorovi. Od svého prvního uvedení doznal tento test mnoha variací a díky své jednoduchosti se stal zejména mezi astronomy amatéry velmi populární.

3.3.1 Základ Ronchiho testu

Základní realizace Ronchiho testu je poměrně jednoduchá. Mějme testovaný objektiv (např. zrcadlo). Umístíme-li do dvojnásobku ohniskové vzdálenosti světelný zdroj (pro jednoduchost nyní uvažujme pouze bodový), promítne objektiv obraz bodu do vzdálenosti dané zobrazovací rovnicí. Za/před tento obraz zdroje nyní umístíme testovací mřížku. Pozorujeme-li nyní přes tuto mřížku testovaný objektiv (zrcadlo), uvidíme na jeho povrchu soustavu světlých a tmavých pruhů, tzv. Ronchigram. Při posouvání mřížky směrem k rovině, ve které je formován obraz bodu (tzv. obrazová rovina), se budou pozorované pruhy roztahovat. Tzn. jejich počet se bude zmenšovat a poroste jejich tloušťka. V okamžiku, kdy bude mřížka v obrazové rovině, lze pozorovat obraz obdobný Foucaltově testu. Při pohybu směrem od obrazové roviny se budou pozorované pruhy „nahušťovat“ (tj. poroste jejich pozorovaný počet). Z průběhu a tvaru pozorovaných pruhů lze přitom usuzovat na kvalitu optické soustavy.

Příklad jednoduché realizace Ronchiho testu je na obrázku 3.10. Světelný tok ze zdroje za pomocí polopropustného zrcadla prochází přes mřížku na testovanou optickou soustavu - např. zrcadlo. Od něj se odráží svazek zpět k pozorovateli. Ten vracející se svazek pozoruje přes mřížku. Z uvedeného je patrné, že každý Ronchiho test je složen z několika nezbytných části.



Obr. 3.10 Základní uspořádání Ronchiho testu

Zdroj světla v Ronchiho testu se skládá z vlastního zdroje světla, difuzéru a prostorového filtru. Na vlastní zdroj světla nejsou kladeny žádné zásadní požadavky. Světelný zdroj nemusí být přísně monochromatický. V případě testování soustav s disperzními materiály (refraktory) zpravidla plně postačí prostý barevný filtr, popř. vhodné následné zpracování. Je-li Ronchiho test vyhodnocován vizuálně, musí mít světelný zdroj i přiměřený světelný výkon, zejména nesmí být příliš silný, aby nehrozilo riziko poškození zraku. Raději proto v tomto případě rovnou zapomeňte na laserové moduly s výkonem přes 1 mW. Pro fotografický záznam je větší světelný výkon zdroje samozřejmě přípustný (a mnohdy dokonce nutný). Pro běžné testování není zpravidla použití laserů nutné. Pro jednoduchý test funkci světelného zdroje velmi dobře zastane i obyčejná žárovička či LED dioda. Pokud přeci jen máte v úmyslu využít monochromatický zdroj (např. zdroj bude určen i k jiným druhům testů) zpravidla postačí laser s výkonem pod 1mW (tedy oku relativně bezpečný). Tomuto účelu vyhovuje i upravené laserové ukazovátko. Vlastní úprava je velmi prostá – postačuje vyšroubovat kolimační čočku, která je umístěna ve vlastním těle ukazovátka pod nástavci s hologramy (zpravidla výměnnými). Vlastní laserová dioda je velmi malá a jejím využitím obdržíme poměrně slušný bodový zdroj. Na místo kolimační čočky pak stačí našroubovat dírkovou clonu (např. plynovou trysku), která bude plnit funkci prostorového filtru.

Ve funkci světelného zdroje lze využít i vzdálených zdrojů s vlastním prostorovým filtrem v potřebné vzdálenosti od testovaného objektivu. Vzdáleným zdrojem může být i např. diaprojektor či hvězda na obloze (v tomto případě ale platí určitá specifika).

Účelem **difuzéru** je homogenizovat (zrovnoměrnit) světelný tok ze zdroje, který bude procházet prostorovým filtrem. Je-li světelný tok dostatečně rovnoměrný, lze jej vynechat. **Prostorový filtr** moduluje vystupující světelný

svazek. V závislosti na typu testu se využívá:

1. Dírková clona (bodový zdroj) tvořená velmi malým kruhovým otvorem. Tento typ modulátoru lze využít prakticky pro všechny typy Ronchiho testů. Zdroj lze tedy využít u nelineárních testů, které s jinými typy zdrojů nefungují (např. Mobsbyho test). Výsledky pomocí dírkové clonky jsou nejzřetelnější. Proto ji lze doporučit zejména pro začátečníky. Nevýhodou je mnohem menší množství světla, které je k měření k dispozici (pro tyto účely se mi osvědčila právě upravená laserová ukazovátka). Další nevýhodou jsou zvýšené nároky na kvalitu pozorovací mřížky.
2. Štěrbina poskytuje mnohem více světla než předchozí případ. Je vhodná i v případě méně kvalitních mřížek.
3. Modulační mřížka. Máme-li dvě mřížky (popř. jednu dostatečně velkou pro zdroj i pozorování), lze ji využít ve funkci prostorového filtru (jde vlastně o *x* štěrbin vedle sebe). Pro jednoduchost konstrukce zdroje s využitím jediné mřížky je tato varianta velmi používaná.

Testovací mřížka je v nejjednodušším případě tvořena soustavou čar shodné tloušťky i odstupu (lineární test). Existují i varianty testu, kde jsou rovné čáry nahrazeny soustřednými kruhy či křivkami (viz dále). Minimální doporučená hustota testu jsou 4 páry čar/mm. S rostoucí hustotou mřížky roste i citlivost testu. Na druhou stranu vyšší hustota čar vyžaduje umístění testu blíže ohnisku a jemnější posuny. Použití extrémně hustých testů je tedy rovněž kontraproduktivní. Doporučené maximum pro běžné použití pro orientační testy je cca 15-20 párů čar/mm.

Pro přesnost je ale nutné uvést, že citlivost a „výkon“ mřížky nelze oddělovat od použitého zdroje. Existují 3 základní varianty kombinací zdroje a mřížky:

1. Mřížkový zdroj (plošný zdroj před který je umístěná lineární mřížka) a „pozorovací“ mřížka.
2. Štěrbinový zdroj a „pozorovací“ mřížka.
3. Bodový zdroj a „pozorovací“mřížka.

3.3.2 Varianty uspořádání Ronchiho testu

Ronchiho test lze aplikovat v několika uspořádáních (obr. 3.11):

1. Zdroj i testovací mřížka v blízkosti vrcholu křivosti (dvojnásobku ohniskové vzdálenosti).
2. Zdroj v nekonečnu a testovací mřížka v ohniskové rovině.
3. Zdroj i testovací mřížka v ohniskové rovině (autokolimační uspořádání).

Případ, kdy je zdroj i testovací mřížka **v okolí dvojnásobku ohniskové vzdálenosti**, je uspořádání vhodné zejména pro laboratorní měření. V tomto uspořádání lze využít jakékoliv výše uvedené kombinace zdroje a testovací mřížky. Určitou nevýhodou je větší potřebná délka (prostor) pro testování.

Druhé často využívané uspořádání je situace, kdy je **zdroj v nekonečnu**. V tomto případě je zdrojem zpravidla hvězda (ať umělá či skutečná). V ohniskové rovině objektivu je pak umístěna mřížka. Ta je zpravidla lineární. V určitých speciálních případech lze ale využít i některých nelineárních testů (např. Terebizhův kruhový test). Obrovská výhoda právě popsaného uspořádání je v možnosti využít objektiv v jeho původním uchycení (tubusu) bez nutnosti jeho demontáže. Mřížku pak lze snadno vložit do okulárového výtahu. Pro snadnost aplikace je uvedený postup mezi astronomy amatéry velmi oblíbený.

Předchozí uspořádání lze využít pro testování prakticky jakékoliv dalekohledové soustavy. Určitým omezením ale je, že ji lze využít zpravidla pouze za tmy (zdrojem je zpravidla jasná hvězda). Navíc v tomto případě může rušivě působit i turbulence atmosféry.

Pro testování menších průměrů refraktorů je možné využít i **autokolimačního** uspořádání. Zdroj je umístěn v ohniskové rovině objektivu. Ten jej promítá do nekonečna. Před objektivem je umístěno rovinné zrcadlo, které odráží z objektivu vystupující rovnoběžný svazek zpět. Svazek je pak objektivem soustředěn zpět do ohniskové roviny. Zdroj i pozorovací mřížka se tedy v tomto případě nachází v jedné rovině.

3.3.3 Vyhodnocení Ronchiho testu

Orientační vyhodnocení

Kresba mřížky (resp. jednotlivé pozorované pásy) odráží průběh vlastní optické plochy zrcadla. Pozice každého pozorovaného pásu je dána rozhraním mezi světlým a tmavým pásem. Je určitě lákavé za pomocí Ronchigramu ze známých parametrů testu určovat exaktně kvalitu optické soustavy, popř. i poloměry křivosti jednotlivých zón asférických objektivů. Pro první přiblížení je ale nutné se nejprve naučit správně interpretovat výsledky testu. To se neobejde bez zapamatování si základních průběhů, které jsou typické pro jednotlivé aberace.

Pro přibližný odhad kvality soustavy není nutné měřit přesnou pozici mřížky od aktuální obrazové roviny. Na základní vlastnosti testovaného optického systému lze usuzovat přímo ze vzhledu pozorovaného obrazu (Ronchigramu). Interpretaci Ronchigramu je nutno dělat komplexně. Rozbor dílčích prvků, ze kterých je složen typický Ronchigram je uveden níže.

Teprve pak je možné přistoupit k mnohem detailnější analýze. Pro její

vyhodnocení je nutné znát zejména hustotu mřížky (např. 10 párů čar/mm), parametry objektivu (ohniskovou vzdálenost, průměr, …) a pozici testu (před či za ohniskem, velikost offsetu).

Sférická plocha

Sférické plochy se využívají velmi často u refrakčních optických členů. U zrcadel jsou vhodné pouze u systémů s menším relativním otvorem, popř. u některých katadioptrických systémů.

Pro testování sférických ploch lze použít klasickou čárovou mřížku. Bez ohledu na to, zda je mřížka umístěna před či za ohnisko, pozorovaný obraz bude mít obdobný charakter. V pozorovaném Ronchigramu lze u ideální sférické plochy pozorovat systém světlých a tmavých pásů. Velikost posunu mřížky od ohniska (offset) se projeví jen změnou počtu těchto pásů. Rovněž není podstatné, zda je počet zobrazených pruhů sudý či lichý, zda je v centru světlý či tmavý pruh, nebo zda jsou pruhy svisle či vodorovně. Výsledek je vždy správný (obr. 3.13).

Pro asférické plochy bude průběh poněkud složitější. Obecně je ale možné využít základní lineární test i pro jejich testování. Jen interpretace výsledků je poněkud složitější. V tomto případě je výhodnější pro první intuitivní odhad použít některý z nelineárních testů.

Dále jsou uvedeny základní průběhy odchylek od sférické plochy a jejich vliv na výsledný Ronchigram. Pro jednoduchost je předpokládáno prosté sférické zrcadlo.

Sféra ve sféře (probroušený střed)

Poměrně často mívají zejména doma vyráběná zrcadla „probroušený“ střed. V tomto případě má vnitřní oblast (zóna) menší poloměr křivosti, než zóna vnější. Pak lze původně celistvou sférickou plochu rozdělit na dvě zóny. Zóna v okolí středu má menší poloměr křivosti (a úměrně s tím i menší ohniskovou vzdálenost) než zóna u okraje.

Předpokládejme mřížku umístěnou za středem křivosti zrcadla (dvojnásobkem ohniskové vzdálenosti). Odpovídající Ronchigram (obr. 3.14) je složen ze dvou oblastí. Pokud jsou obě zóny sférické, jsou čáry v obou rovné a rovnoměrně rozmístěné. Protože vnitřní zóna má kratší ohniskovou vzdálenost je pozice mřížky dále od středu křivosti. V tomto případě má vnitřní oblast vyšší hustotu čar (čáry jsou tenčí). Pozorované kruhové zakřivení čar v Ronchigramu odpovídá zobrazení čáry procházející přechodovou oblastí mezi oběmi poloměry křivosti. Takto je poměrně přesně i vymezena vlastní velikost vnitřní zóny. Pokud je velikost „probroušeného středu“ poměrně malá a mřížka je příliš blízko středu křivosti, nemusí se ve vlastním Ronchigramu její přítomnost projevit. Celá středová oblast může zůstat ukryta uvnitř širokého

středového pásu. Proto je doporučený počet zobrazovaných čar právě 3-4 temné pásy.

U soustav s centrálním stíněním je menší „centrální díra“ přípustná bez vlivu na kvalitu optické soustavy (centrální část je stíněna sekundárním zrcadlem). U refrakčních soustav je naopak nepřípustná.

Prstenec

Při dodatečné nedokonalé korekci, popř. pokud vnitřní zóna z předešlého příkladu je nevhodně odstraněna, zůstane v přechodové oblasti úzký pás tvořící „prstýnek“.

Vlastní Ronchigram je podobný Ronchigramu z předešlého případu (obr. 3.15). Je zde ale několik odchylek. Čáry procházející okrajem prstýnku tvoří „smyčky“. Mezery (světlý pruh) mezi vnitřním a vnějším regionem jsou identické.

„Sražený“ okraj

Asi nejčastější vadou, se kterou se setkáme u velké části ručně i strojově vyráběných optických prvků, je „sražený“ okraj. Příčinu sražených okrajů je třeba hledat v technologii výroby optických ploch.

Neduhem sražených hran netrpí samozřejmě jen zrcadla, ale i optické prvky využívající zákona lomu (čočky). Na rozdíl od zrcadel jsou ale sražené okraje v tomto případě ukryty v objímkách těchto optických prvků. Proto se na kvalitě zobrazení neprojevují. Pokud chceme omezit vliv i u zrcadel lze k tomu využít drobného triku. Zpravidla stačí zastínit okraj zrcadla clonou s vnitřním průměrem jen o několik milimetrů menší, než je vlastní průměr zrcadla. Vyšší kvalita pozorovaného obrazu za cenu mírného snížení světelnosti určitě stojí.

V Ronchigramu na obr. 3.16 se sražené okraje projeví „zalomením“ okrajů čar a jejich nahuštěním při okraji. Pro odhalení „sražených“ okrajů postačí sledovat průběh vybrané čáry. Nejlepší oblast pro ověření je alespoň 1/3 průměru od středové čáry. Nedoporučuje se ale vybírat čáry, které jsou příliš u okraje zrcadla.

3.3.4 Vliv aberací na vzhled Ronchigramu

Doposud byla řeč jen o vlivu deformací plochy zrcadla (resp. výsledné ekvivalentní deformaci u soustav s více plochami) na zobrazený Ronchigram. Mimo dílčích zón s defektem existují samozřejmě i deformace pozvolné, které se projeví pozvolnou změnou Ronchigramu.

Vliv dílčích aberací na vzhled Ronchigramu je demonstrován na obrazcích *3.17* až *3.19*, kde jsou znázorněny Ronchigramy s přehnaně velkými

aberacemi. Ve skutečnosti bude projev menších aberací mnohem menší a bude se projevovat ve spojení s ostatními vlivy.

Sférická aberace

Klasický Ronchiho test je také vhodný pro stanovení velikosti sférické aberace. S jeho pomoci je při pečlivé práci odhalitelný tento typ aberace odpovídající deformaci vlnoplochy až o velikosti λ/20. Sférická aberace u kulové plochy způsobuje u lineárního testu „prohnutí“ pozorovaných čar. Směr a míra tohoto prohnutí je přitom závislý na pozici mřížky (před/za ohniskem, velikosti posunu od obrazové roviny) a samozřejmě na velikosti sférické aberace. Při mřížce dostatečně vzdálené od obrazové roviny můžeme pozorovat test, jehož středová oblast je blízká ideálnímu průběhu. Okrajová oblast vykazuje prohnutí. Pro první odhad její velikosti postačuje plynule posouvat test z oblasti za obrazovou rovinou směrem k měřenému objektivu. S klesající vzdáleností od obrazové roviny bude klesat počet čar (stejně jako u ideální plochy). Bude však docházet k jejich postupnému ohýbání.

Přesné určení velikosti sférické aberace z tvaru Ronchigramu je samozřejmě možné. Je ovšem již poněkud komplikovanější a náročné na velmi pečlivou práci. Rovněž se již neobejdeme bez měření pozice mřížky od ohniskové roviny. Vlastní velikost aberace A je dána vztahem [4]:

$$4A(\eta^2 + \xi^2) + 2T\eta = -\mathrm{md}/r, \qquad (3.2)$$

kde A je koeficient sférické aberace, η a ξ jsou souřadnice středu prohnutí, m je řád odčítaného pruhu (kolikátý pruh je od středního), d je velikost periody testu a parametr T je dán vztahem $T = l'/(2r^2)$, v němž l' je vzdálenost mřížky od ohniska a r poloměr křivosti vlnoplochy.

Koma

Nesymetrické aberace (koma a astigmatismus) jsou sice obecně Ronchiho testem zjistitelné, vyžadují však obzvláště svědomitou práci. I tak ale mohou v určitých případech zůstat neodhaleny. Koma se v Ronchigramu projevuje nahuštěním čar do jedné strany. Na straně opačné jsou naopak čáry rozestoupené od sebe a je zpravidla patrné i jejich prohnutí. Pokud pootočíme mřížku, zůstává nahuštění ve stejné oblasti pozorovaného objektivu. Vizuálním pozorováním jsme schopni odhalit deformace vlnoplochy vyvolané komou o velikosti cca do λ/10. Pozorovaná velikost bude evidentně záviset na vzdálenosti pozorovaného bodu od optické osy. Na optické ose bychom přirozeně u slušné optické soustavy neměli zjistit žádnou komu.

Pro číselné vyjádření komy je nutné oproti předešlému případu znát i úhel naklonění φ, který svírá mřížka s meridiální (poledníkovou) rovinou. Pro hodnotu koeficientu komy B platí [4]:

$$B[-2(1+\sin\phi)(\eta^2+\xi^2)+(\eta^2+3\xi^2)] = -\mathrm{md}/r. \qquad (3.3)$$

Astigmatismus

Ronchiho test není podobně jako v případě komy pro stanovení astigmatismu primárně určen. Nejjednodušší metodou jeho zjištění je pravděpodobně pozorování bodového zdroje pomocí okuláru před a za ohniskem (viz předchozí kapitola). V některých situacích může dokonce Ronchiho testem zůstat astigmatismus neodhalen. Pro jeho zjištění touto metodou je nutné proto občas pootáčet i zrcadlo (popř. mřížku) podél optické osy. Test je nejcitlivější, když svírá s podélnou osou astigmatismu úhel cca 45°. Budeme-li posouvat testovací mřížku směrem k ohniskové rovině, projeví se vliv astigmatismu natáčením pozorovaných pruhů při přiblížení/průchodu testu ohniskovou rovinou. Z rychlosti přetáčení dokáže zkušený pozorovatel odhadnout i velikost astigmatismu. Pomocí této metody je možné odhalit přítomnost astigmatismu podobně jako v předchozím případě z deformací vlnoplochy do λ/10.

Ke stanovení hodnoty astigmatismu je nutné znát úhel α, který svírá pozorovaný obraz pruhu k podélné orientaci mřížky (tzn. k pruhům na mřížce). Přesnost jeho určení není zpravidla příliš vysoká. Proto jeho číselnou hodnotu je nutno brát s určitou rezervou. Obecně pro koeficient astigmatismu C platí [4]:

$$\mathrm{tg}\alpha = \frac{C\sin(2\phi)}{T+C\big(2-\cos(2\phi)\big)}. \qquad (3.4)$$

Hodnota úhlu α se mění se změnou polohy mřížky. Pro poměr T/C mezi -1 až -3 lze využít zjednodušený tvar, ve kterém není nutné úhel α stanovovat [5]:

$$T + C\big(2-\cos(2\phi)\big) = 0. \qquad (3.5)$$

3.3.5 Nelineární testy

Doposud jsme se zabývali pouze využitím Ronchiho testu pro testování sférických ploch. Ve velké míře se ale dnes setkáváme i s asférickými plochami, zejména parabolickými. Zobrazení klasického lineárního (čárového) testu u ideální asférické (např. parabolické) plochy není pro nezkušeného pozorovatele příliš čitelné. Asférická plocha způsobí zkřivení pozorovaných čar a odhadnout to „správné“ není snadné. Jednoduchý čárový test může být i přesto využit pro testování plynulosti plochy, tzn. k testování přítomnosti lokálních zón. Ty se ve výsledném Ronchigramu projeví lokálním rozšířením/zúžením pozorovaných pruhů, roztřepením jejich okrajů.

Pokud chceme rychle orientačně zhodnotit celkovou kvalitu soustavy, je vhodnější využít některý z nelineárních testů. Na rozdíl od prostých čárových se skládají z dopředu napočítaných křivek, které odpovídají testované konfiguraci (excentricitě testované plochy, vzdálenosti testu od ohniska). Příklad dvou nelineárních Ronchiho testů jsou na obr. 3.10. Nelineárních testů existuje celá řada. Dále jsou uvedeny nejčastější dva snadné na použití i vyhodnocení.

Mobsbyův test asférických ploch

Mobsbyův test byl původně napočítán pro parabolické plochy. Po úpravách průběhu křivek je možno jej použít obecně pro jakoukoliv plochu. Pro jeho návrh existuje celá řada freeware a shareware programů (např. InvRon, popř. MODAS).

Test předpokládá bodový zdroj umístěný v dvojnásobku ohniskové vzdálenosti objektivu. U zrcadla je tedy zdroj nacházející se ve středu křivosti zrcadla (přesněji řečeno ve středu křivosti centrální části zrcadla). Testovací mřížka musí být umístěna do vzdálenosti, pro kterou byl test navržen, tj. zpravidla v definované vzdálenosti před obrazovou rovinou. Při správném umístění by měl pozorovatel v ideálním případě pozorovat rovnoběžné pásy podobně jako u testování sférické plochy. Použití, projevy vad a aberaci i konečná interpretace tohoto testu je pak prakticky shodná s klasickým lineárním testem. V případě jeho použití lze jen s malými omezeními použít závěry uvedené u sférické plochy.

Kruhový test Popov-Terebizh

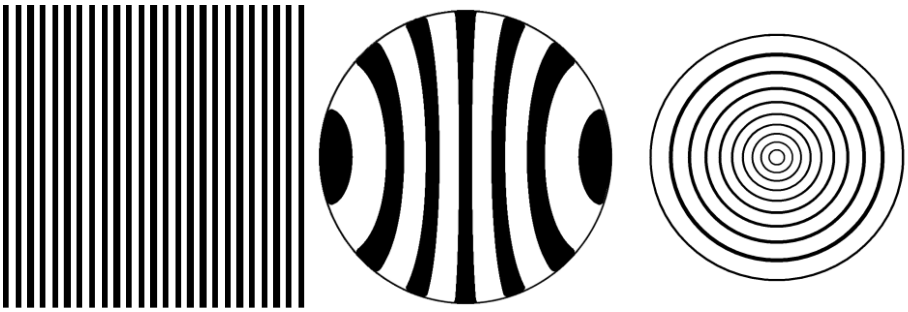
Kruhový test se skládá ze soustředných kružnic, jejichž vzájemná vzdálenost je volena tak, aby při ideální parabolické ploše zrcadla (viz [4]), popř. při obecně jakékoliv známé excentricitě jeho plochy (Terebizh), pozorovatel viděl v obraze rovnoměrně rozmístěné soustředné kruhy shodné tloušťky.

Prostřednictvím tohoto testu lze velmi dobře testovat lokální deformace

zrcadla. Na rozdíl od předchozích testů je možno tento test použít i pro testování nesymetrických aberací, tedy komy a astigmatismu. Vady zrcadla se projeví rozšířením/zúžením šířky pásů, popř. odchylkou od kruhového tvaru. Přítomnost komy se projeví protažením soustředných kružnic pouze v jednom směru od středu testu. Přítomnost astigmatismu pak protažením podél celé jedné osy (namísto kruhu pozorujeme elipsu). Při případném posunu testu podél optické osy směrem k ohnisku se navíc poloha velké osy této elipsy stáčí.

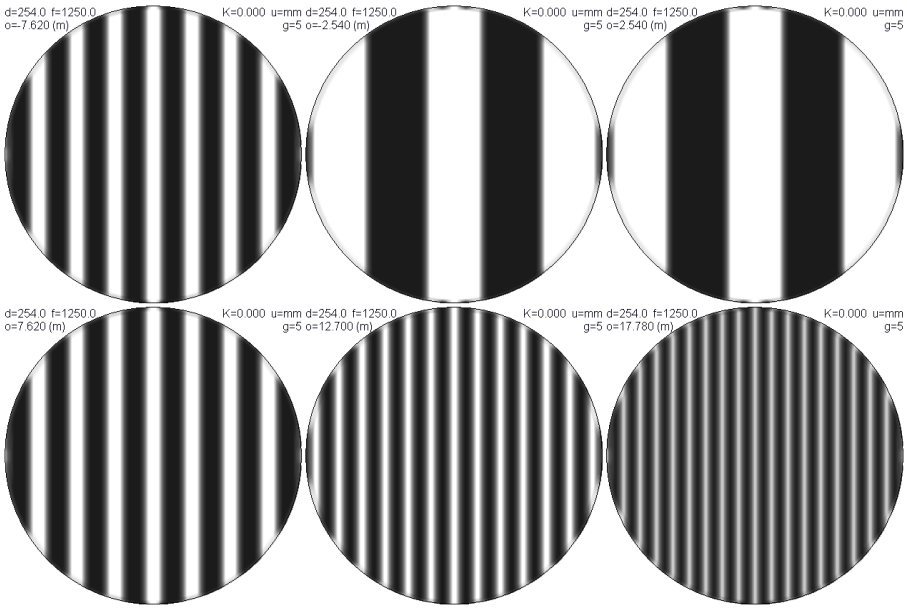
Pro použití tohoto testu platí stejná pravidla jako u Mobsbyho testu. Test tedy musí být umístěn v definované vzdálenosti od středu křivosti. Nejjednodušším způsobem je nastavit test tak, aby se při jeho zobrazení promítl na zrcadlo předem daný počet kruhů. Rovněž tento test lze nejsnadněji navrhnout existujícími programy (např. již výše uvedený výborný program MODAS).

Během let vznikla celá řada dalších modifikací tohoto testu, které umožňují měření některých specifických vlastností/aberací, popř. optických soustav. Lze tedy říci, že využití Ronchiho testu je dodnes velmi široké.

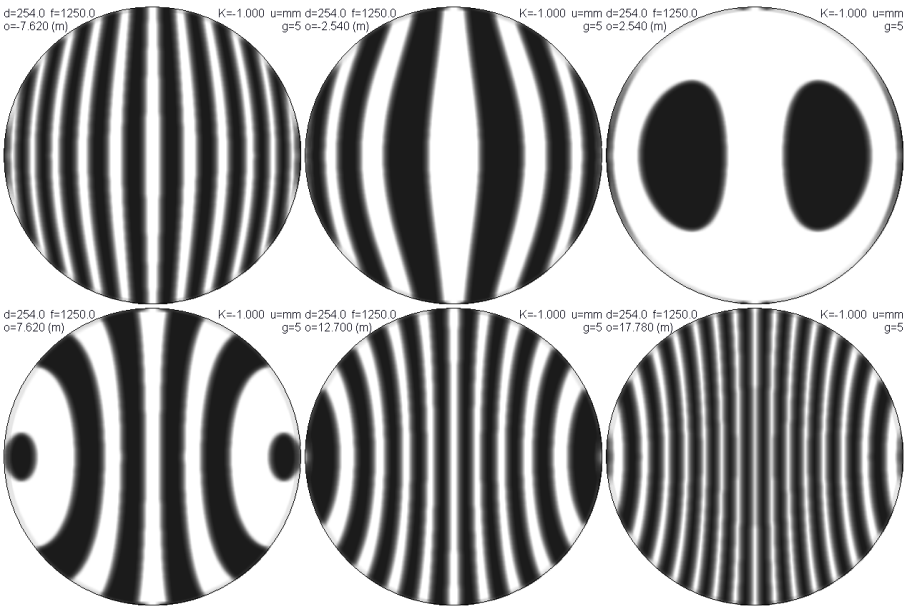


a) b) c)

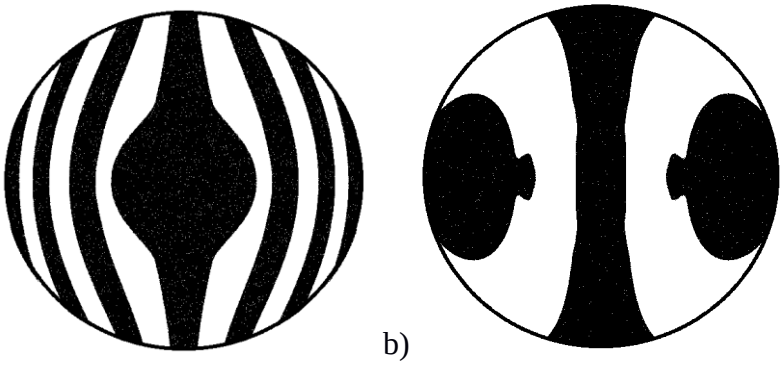
Obr. 3.11 Různé varianty Ronchiho testu:
a) lineární Ronchiho test,
b) Mobsbyho test navržený pro umístění před obrazovou rovinu,
c) Terebizhův kruhový test



Obr. 3.12 Ronchigram ideální sférické plochy:
(g … hustota mřížky, o … vzdálenost mřížky od obrazové roviny)

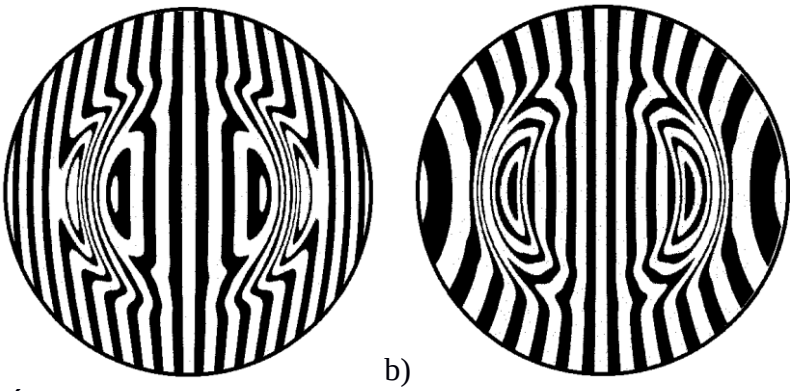


Obr. 3.13 Ronchigram lineární mřížkou ideální parabolické plochy
(g … hustota mřížky, o … vzdálenost mřížky od obrazové roviny)



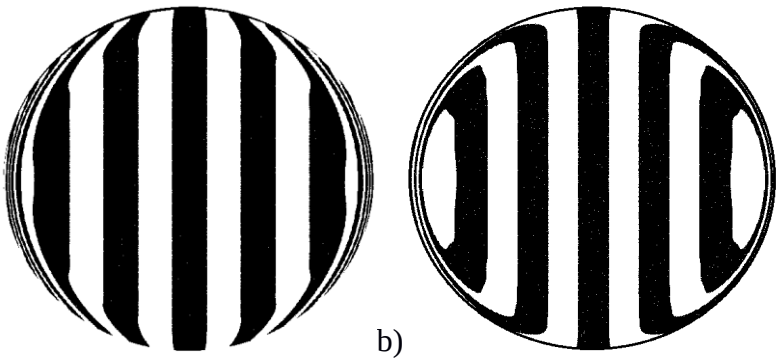
a) b)

Obr. 3.14 Probroušený střed:
a) mřížka před obrazovou rovinou, b) mřížka za obrazovou rovinou



a) b)

Obr. 3.15 Úzká kruhová zóna (prstenec):
a) mřížka před obrazovou rovinou, b) mřížka za obrazovou rovinou

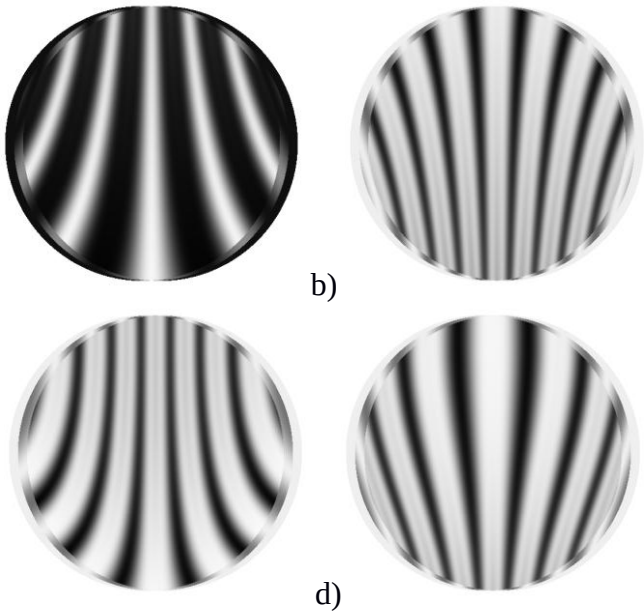


a) b)

Obr. 3.16 Sražené okraje:
a) mřížka před obrazovou rovinou, b) mřížka za obrazovou rovinou

a) b) c)

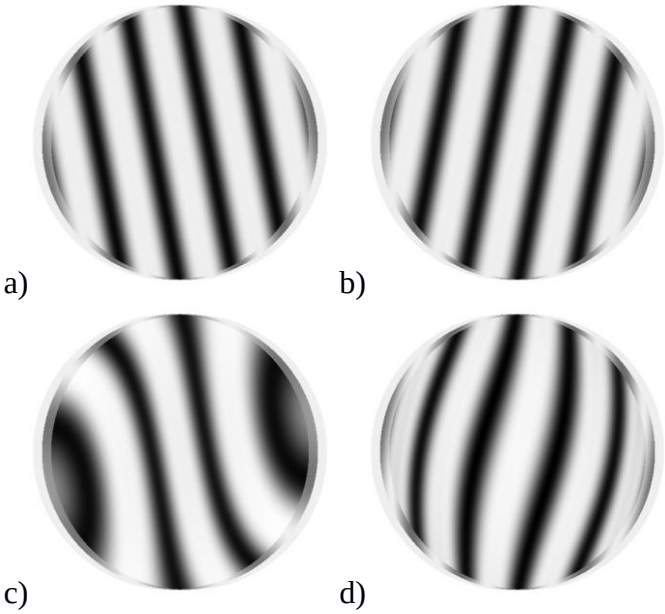
Obr. 3.17 Ronchigram sférické aberace na kulové ploše:
a) mřížka před obrazovou rovinou,
b) mřížka těsně za obrazovou rovinou,
c) mřížka za obrazovou rovinou



a) b)

c) d)

Obr. 3.18 Ronchigram komy:
sférická plocha: mřížka a) před, b) za obrazovou rovinou,
parabolická plocha: mřížka c) před, d) za obrazovou rovinou



Obr. 3.19 Ronchigram astigmatismu:
sférická plocha: mřížka a) před, b) za obrazovou rovinou,
parabolická plocha: mřížka c) před, d) za obrazovou rovinou

3.4. Modulační přenosová funkce

V předešlých kapitolách jsme uvedli některé nejčastější postupy využívané astronomy k hodnocení kvality optických přístrojů. Uživatele zpravidla ale příliš nezajímá vlastní kvalita přístroje, ale spíše kvalita výsledného obrazu. V této kapitole se zaměříme na komplexní hodnocení kvality soustavy a její vliv na výslednou jakost zobrazení. Řeč bude o přenosové funkci optické soustavy.

3.4.1 Co to je modulační přenosová funkce

Optický signál postupující od pozorovaného objektu do oka pozorovatele (popř. po záznamové médium) je ovlivňován prostředím, v němž se tento signál šíří. Prakticky každý pozorovatel velmi dobře zná rušivý vliv atmosféry, která svými vlastnostmi a jevy v ní probíhajícími dokáže značně narušit pozorovanou scénu. Vliv na pozorovaný obraz má samozřejmě i optická soustava přístroje.

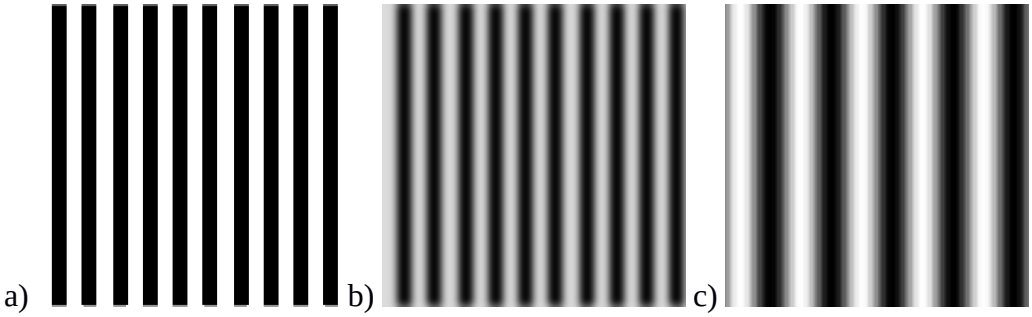
Pro jednoduchost předpokládejme místo pozorovaného objektu jednoduchý čárový test tvořený bílými a černými čarami. V ideálním případě by pozorovatel za optickým přístrojem pozoroval rovněž soustavu bílých a černých pruhů. V reálné situaci nebude ale přechod černá-bílá dokonalý, ale postupný. S rostoucí hustotou čar pak bude sledovaný test pozorován stále méně zřetelně.

S druhem a uspořádáním testu souvisí i tzv. modulace. Modulace signálu je chápána jako prostorové rozložení jasu v obraze. Přesněji řečeno je to poměr rozdílu a součtu minimální a maximální intenzity v rámci jedné periody vzorku. Vzorek s pravoúhlým i se sinusovým průběhem, kde maximum je prezentováno bílou a minimum černou barvou, má modulaci (popř. kontrast) rovnu jedné (resp. 100 %) .

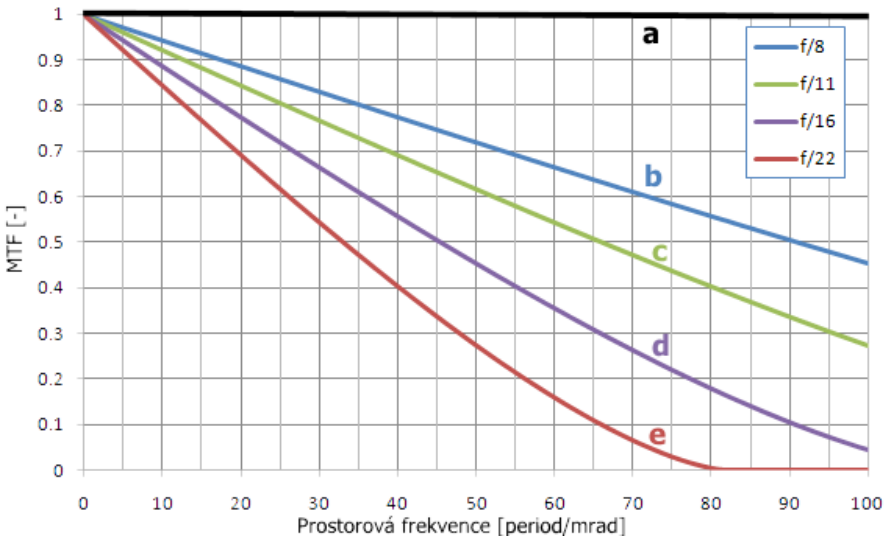
Přenosem modulace je rozuměn poměr modulace na vstupu optické soustavy ku modulaci téhož signálu na výstupu optické soustavy. Pro jednoduchost nahraďme úroveň jasu bílé jedničkou a černé nulou. Modulace na vstupu je pak rovna (1-0)/(1+0) = 1. Vlivem vlastností optické soustavy bude výstupní modulace nižší, řekněme např. 0,85. Přenos modulace je v našem případě tedy 0,85/1 = 0,85. Pokud nyní budeme měnit hustotu testu obdržíme různé hodnoty přenosu modulace – modulační přenosovou funkci, zkráceně MTF (z angl. Modulation Transfer Function).

Na *y*-ové ose MTF je přenos modulace, který nabývá hodnot od 0 do 1 (tzn. od 0 do 100 %). Hodnota rovná 1 znamená, že signál se přes optický systém přenesl bez degradace. Hodnota rovna 0 pak signalizuje, že optický signál daných parametrů (tj. i hustoty testu) přes danou optickou soustavu nelze smysluplně přenést. Na *x*-ové ose je tzv. prostorová frekvence testu (obdoba

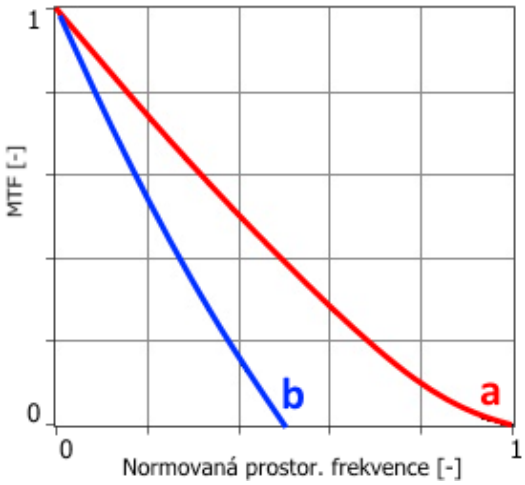
„klasické“ frekvence v hertzích [Hz] používané např. u elektrických signálů) prezentovaná hustotou testu v počtu period na milimetr. U starších měření se můžeme setkat i s jednotkou počet čar na milimetr (2 čáry jsou rovny jedné periodě testu). Pro přístroje určené k pozorování vzdálených předmětů je pak výhodnější přepočet na úhlové míry, tedy jednotka [period/rad].



Obr. 3.20 Jednoduchý čárový test:
a) původní test,
b) test po průchodu optickou soustavou,
c) diskrétní sinusový čárový test (16 úrovní šedé)



Obr. 3.21 Modulační přenosová funkce:
a) ideální MTF,
b) až e) MTF fyzikálně dokonalé optické soustavy (bezaberační, difrakčně omezené)

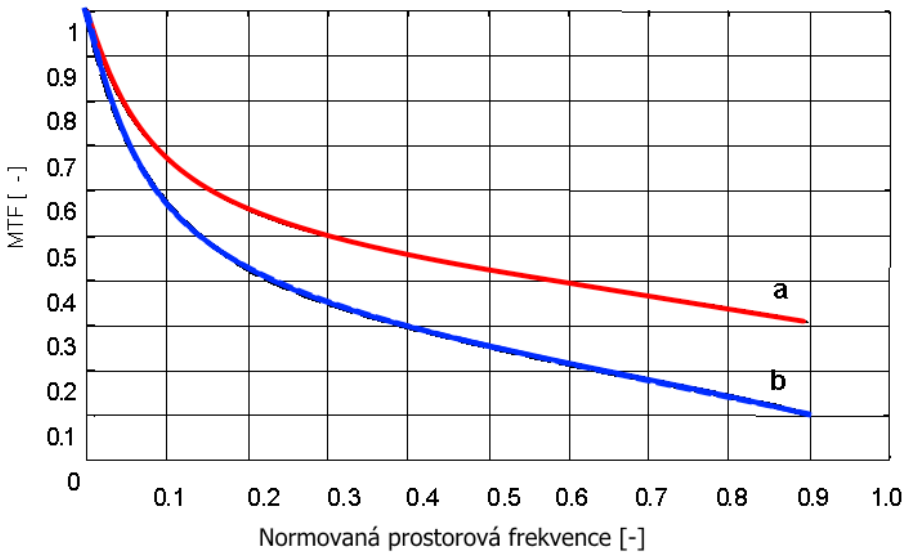


Obr. 3.22 Průběhy MTF fyzikálně dokonalé optické soustavy pro průměry vstupní apertury a) D, b) D/2

3.4.2 Modulační přenosová funkce lidského oka

Přenosovou funkcí lze popsat samozřejmě nejen optické přístroje, ale např. i lidské oko. Normální lidské oko je za dobrých světelných podmínek schopno rozlišit vzorek černých a bílých čar o úhlové velikosti cca 60“ (tj. 0,000291 rad). Zdravé cvičené oko může být schopno rozpoznat i polovinu této hodnoty. Na druhou stanu za špatných světelných podmínek klesá rozlišovací schopnost lidského oka i na hodnotu 5’ (300“) i hůře. Jednoduchým výpočtem lze pak zjistit hustotu čárového testu v konvenční vzdálenosti lidského oka (tj. vzdálenost, na kterou je schopno průměrné oko ještě zaostřit), která je rovna 25cm při standardní ohniskové vzdálenosti čočky lidského oka (16,7 mm).

Pro dobré světelné podmínky obdržíme hodnotu 6,88 period/mm (tzn. párů čar na mm), resp. pro vzdálené objekty 0,58 period/mrad. Jinak řečeno – na vzdálenost 25 cm je lidské oko schopno rozpoznat zpravidla detail cca 0,15 mm. To samozřejmě platí jen za dobrých světelných podmínek a při modulaci (resp. kontrastu objekt/pozadí) rovné jedné. Modulace (resp. kontrast objekt/pozadí) takto pozorovaného detailu (resp. soustavy čar) již ale nebude rovna jedné, ale bude mít minimální hodnotu nutnou k jeho rozlišení. Úhlově větší detaily jsou pak zobrazeny s modulací mezi touto minimální a ideální (1,0) hodnotou. Typický průběh MTF lidského oka je ukázán na obrázku níže.



Obr. 3.23 Modulační přenosová funkce lidského oka:
a) průměr zřítelnice 2 mm, b) průměr zřítelnice 6 mm

3.4.3 Interpretace modulační přenosová funkce

Kontrast/brilance, ostrost obrazu

Modulační přenosová funkce je jednou z nejlepších charakteristik popisujících kvalitu přístroje. Lze z ní přímo vyčíst, popř. odvodit, celou řadu základních vlastností příslušné optické soustavy. Průběh MTF není bohužel shodný pro celé zorné pole. Pro úplnost je nutno dodat, že průběh MTF nemusí být obecně zcela totožný ani pro dva na sebe kolmé směry v témže místě zorného pole.

Nejjednodušší je situace u soustav s velmi malým zorným polem. Této podmínce vyhovuje velká část astronomických dalekohledů. V tomto případě je pokles průběhu MTF v okrajích velmi malý a soustavu lze souhrnně popsat klasickým průběhem MTF tak, jak je uvedeno výše.

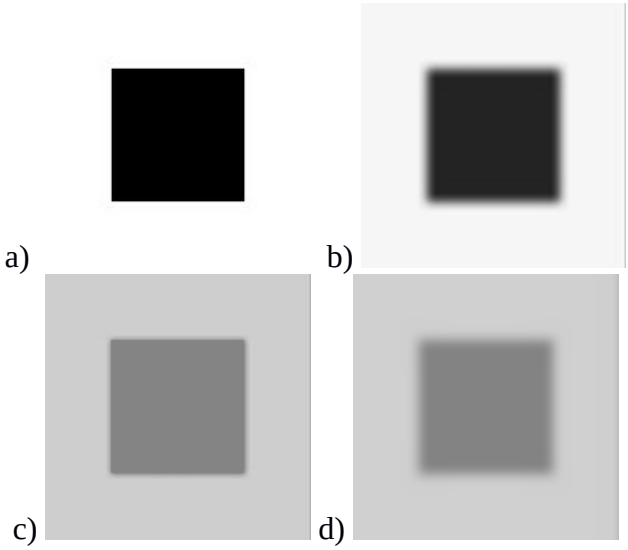
Složitější situace je u soustav s větším zorným polem (např. fotoaparáty, dalekohledy s velkým relativním otvorem). Zpravidla nejblíže ideálnímu bývá průběh MTF v okolí středu (optické osy) a směrem k okrajům se jeho průběh zhoršuje. Pro popis těchto systémů je vhodnější prezentaci MTF upravit. Na rozdíl od předchozího případu není na *x*-ové ose rostoucí prostorová frekvence. Pro test je využit rastr s normovanou hustotou čar a je zkoumáno, s jakým výsledným kontrastem je tento test zobrazen v různých částech zorného pole.

Na *x*-ové ose je proto vynesena vzdálenost zobrazení od optické osy, popř. přímo příslušná hodnota zorného pole. Standardní hustoty používaných testů jsou definovány pro potřeby fotografické techniky. Používají se testy o hustotě čar zpravidla 10 period/mm (v některých případech jen 5 period/mm) a 40 period/mm (občas i 30-70 period/mm). Pro potřeby astronomů je občas nutné využít testy s vyšší hustotou.

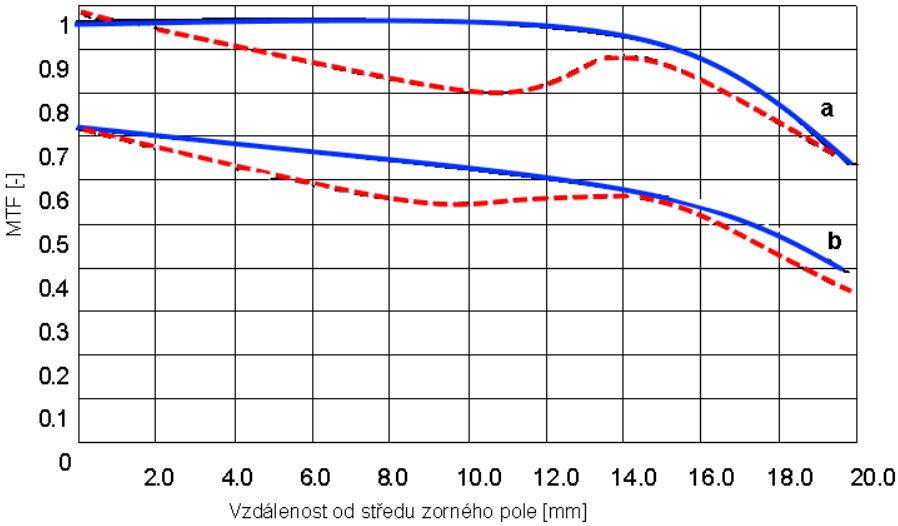
V případě testu 10 period/mm se výsledný graf nazývá **kontrastem obrazu**. Jde o trošku nešťastně zvolenou terminologii, kdy je nutno odlišit od původního významu slova kontrast používaného v optice (poměr jasu objektu k jasu pozadí). Proto je vhodné využívat i druhý název – **brilance obrazu**. Pozorovatel je schopen v obraze rozlišit i velmi malé rozdíly (i 2,5 %). Dobrá optická soustava má mít hodnotu kontrastu/brilance obrazu přes 95 %.

Při použití testu s vyšší hustotou (40 period/mm) pak hovoříme o **ostrosti obrazu**. Ostrost obrazu nese informaci, jak kvalitně jsou zobrazeny velmi jemné struktury. Oproti kontrastu/brilanci obrazu nejsou již rozpoznatelné malé rozdíly. např. při hustotě testu 40 period/mm nejsou zpravidla pozorovatelné rozdíly v zobrazení testu i 10 %. Z obrázku níže je patrné, že ostrost obrazu bezpodmínečně nevyžaduje vysoký kontrast/brilanci obrazu.

Je to možná trošku udivující, ale zobrazení objektivu, který má obraz s velkým kontrastem/brilancí a menší ostrostí, je vnímáno okem pozorovatele ostřeji než u objektivu s větší ostrostí a menším kontrastem/brilancí obrazu. Optimální je samozřejmě optická soustava s vysokým kontrastem/brilancí i ostrostí zobrazení.



Obr. 3.24 Vliv kontrastu/brilance a ostrosti zobrazení na výsledný obraz:
a) dokonalý kontrast/brilance obrazu i ostrost,
b) vysoký kontrast/brilance obrazu, horší ostrost,
c) horší kontrast/brilance obrazu, vysoká ostrost,
d) nízký kontrast/brilance obrazu i ostrost



Obr. 3.25 Kontrast/brilance a ostrost zobrazení:
a) kontrast zobrazení (plně – tangenciální směr, čárkovaně - meridiální),
b) ostrost zobrazení (plně – tangenciální směr, čárkovaně – meridiální)

Rozlišovací schopnost, difrakční limit

V ideálním případě by MTF představovala křivka rovnoběžná s osou *x* a protínající osu *y* v hodnotě jedna (resp. 100 %). Fyzikálně dokonalá optická soustava (tj. soustava bez optických aberací) je oproti tomuto ideálnímu stavu omezena i difrakčními limity. Soustava s menší vstupní aperturou (menším průměrem objektivu) bude popsána křivkou, která klesá k nulovým hodnotám rychleji než soustava s větší vstupní aperturou. S rostoucím průměrem vstupní apertury roste rozlišovací schopnost této soustavy a klesá průměr Airyho disku. Průběh křivky MTF fyzikálně dokonalé optické soustavy pak oproti ideálnímu případu od určité prostorové frekvence klesá a přibližuje se k nulové hodnotě. Na Airyho disk můžeme pohlížet i jako na obdobu/segment čárového testu. V obrazové rovině objektivu je jeho velikost rovna převrácené hodnotě hustoty ekvivalentního čárového testu.

Průběh MTF reálné optické soustavy se bude svým průběhem v závislosti na její kvalitě více či méně blížit průběhu MTF fyzikálně dokonalé optické soustavy. Čím bude průběh křivky MTF bližší ideálnímu, tím kvalitnější bude i soustava. V klasickém tvaru (tj. s prostorovou frekvencí popř. hustotou testu na *x*-ové ose) poklesne MTF v určitém místě grafu na minimální přípustnou úroveň. Pro lidské oko je tato hodnota dána prahovým kontrastem lidského oka – tj. MTF = 0,02. Pro jiné detekční systémy může být tato hodnota jiná a pohybuje se zpravidla v rozmezí 0,005 až 0,1. Příslušná *x*-ová hodnota se pak nazývá mezní frekvencí. Převrácená hodnota této frekvence charakterizuje rozlišovací schopnost soustavy.

MTF je sice jednou z nejuniverzálnějších charakteristik optické soustavy, nicméně ji nelze považovat za „všeobsahující“. Např. distorze, zklenutí obrazového pole či vinětace nejsou přímo z jediné MTF určitelné. Rovněž pro stanovení zbytkové barevné vady je nutno stanovit průběh MTF pro různé vlnové délky. Nekvalitní antireflexní vrstvy se u refrakčního optického systému projeví poklesem kontrastu zobrazení často bez zhoršení mezní frekvence (resp. rozlišovací schopnosti).

Na druhou stranu lze z průběhu MTF velmi dobře určit např. astigmatismus. Při testování optické soustavy k tomu postačí dva testy otočené o 90 °. Pokud křivky zjištěné MTF se vůči sobě výrazněji rozbíhají, signalizuje to právě potíže s astigmatismem.

3.4.4 Vliv centrálního stínění

Modulační přenosová funkce ideální difrakčně omezené optické soustavy tak, jak je popsána výše, platí pro soustavu bez centrálního stínění, tedy pro refraktory. Velká část astronomických dalekohledů je ale tvořena zrcadlovými soustavami, u nichž často sekundární zrcátko stíní část primárního

zrcadla. Velikost tohoto stínění lze vyjádřit poměrem průměru sekundárního a primárního zrcadla - tzv. **koeficient centrálního stínění**[2] (obr. 3.27).

V obrazu hvězdy (resp. v jeho difrakčním obrazci) se vliv centrálního stínění projeví snížením intenzity centrálního Airyho disku a přesunem energie z něj do soustředných prstenců. Toto stínění se přirozeně projeví i ve výsledném tvaru křivky MTF. Ideální difrakčně omezená optická soustava s centrálním stíněním má MTF, jejíž průběh je v oblasti nižších a středních prostorových frekvencí pod průběhem obdobné fyzikálně dokonalé optické soustavy bez centrálního stínění. Velikost tohoto poklesu je tím větší, čím je větší centrální stínění. V oblasti vysokých prostorových frekvencí naopak dochází ke zvýšení kontrastu nad úroveň fyzikálně dokonalé optické soustavy bez centrálního stínění. Hodnota mezní frekvence (a tím i rozlišovací mez) se přitom nemění. Při pozorování jasných a kontrastních objektů (např. Měsíc, kotoučky planet, prstence Saturnu včetně Cassiniho dělení), kdy je hlavním kritériem rozlišovací mez přístroje, jsou soustavy s centrálním stíněním plně srovnatelné se soustavami bez centrálního stínění stejných parametrů.

Řada astronomů považuje za jedno z hlavních kritérií kvality jejich přístroje právě rozlišovací mez. Z uvedeného je patrné, že takto pojatá kvalita optického přístroje není limitována jeho centrálním stíněním. V reálných situacích ji mnohem více ovlivňují okolnosti spjaté s provozem přístroje – tepelné vyrovnání optického systému, ale i mechanických částí, přesnost a stabilita zaostření, stabilita mechanických komponent, v nichž je uložen optický systém, ...

Z výše uvedeného popisu je patrný i vliv centrálního stínění na výsledný obraz. Soustava s centrálním stíněním bude obraz zobrazovat s nižším kontrastem/brilancí. Přírůstek ostrosti zobrazení je zpravidla velmi malý až nepozorovatelný.

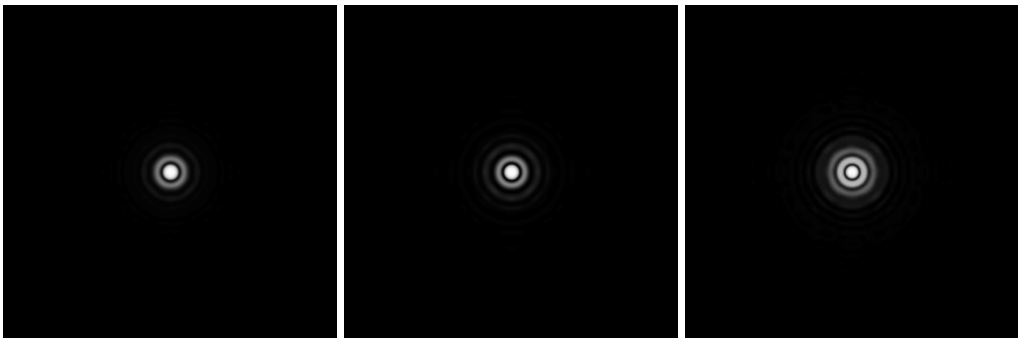
Pro koeficient centrálního stínění pod cca 0,2 (tj. 20 %) je vliv centrálního stínění prakticky zanedbatelný. Pro hodnotu pod cca 0,33 (tj. 33 %) jej můžeme považovat za malý. K výraznému poklesu kontrastu obrazu dochází až u soustav s centrálním stíněním nad cca 0,4-0,6 (tj. 40-60 %). Pro zobrazení málo výrazných (tj. málo kontrastních) prvků, jako jsou např. detaily na povrchu planet, je proto výhodnější využít optickou soustavu bez centrálního stínění. Využití optických soustav bez centrálního stínění je důležité zejména v situacích, kdy je pozorován detail, jehož kontrast je jen o málo vyšší, než je prahový kontrast lidského oka (popř. použitého detekčního systému). V opačném případě nemusí být detail rozpoznán.

[2] *Pozn: Koeficient centrálního stínění je občas definován nikoliv jako poměr průměrů stínícího (sekundárního) a primárního zrcadla, ale jako poměr jejich ploch. Při posuzování tohoto vlivu je nutno ověřit, pro jakou definici jsou uvedené hodnoty platné.*

Zjednodušeně lze říci, že kontrast zobrazení fyzikálně dokonalé optické soustavy s centrálním stíněním s průměrem hlavního zrcadla *D* a sekundárního *d* je přibližně roven kontrastu zobrazení fyzikálně dokonalé optické soustavy bez centrálního stínění o průměru *D-d*. Přibližné průměry fyzikálně dokonalých optických soustav s a bez centrálního stínění pro dosažení stejného kontrastu/brilance zobrazení jsou uvedeny v tab. 3.2. Tato tabulka je pouze orientační. Reálná optická soustava se může přirozeně lišit.

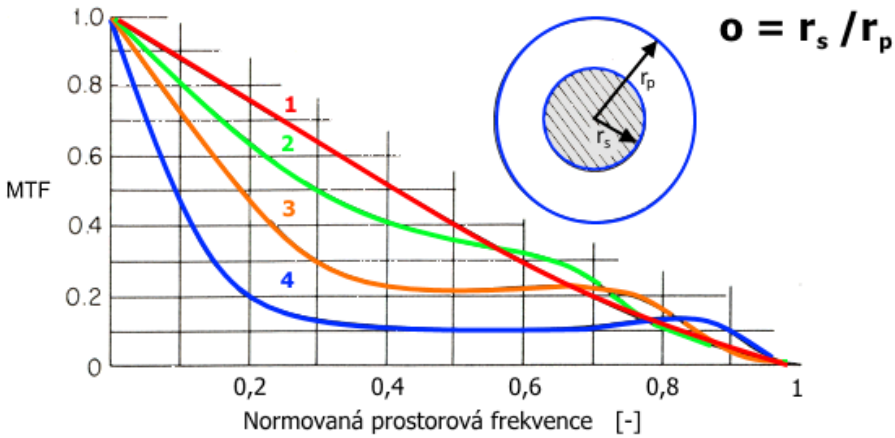
Tab. 3.2 Ekvivalentní průměry objektivu u soustav s a bez centrálního stínění

Průměr objektivu OS [mm]				
bez centrálního stínění	**s centrálním stíněním 15 %**	**s centrálním stíněním 30 %**	**s centrálním stíněním 45 %**	**s centrálním stíněním 60 %**
100	85	70	60	40
150	127	100	80	60
200	170	140	100	80
250	210	170	120	100
350	300	250	210	140



a) b) c)

Obr. 3.26 Vliv centrálního stínění na difrakční obrazec hvězdy:
a) soustava bez centrálního stínění,
b) soustava s koeficientem centrálního stínění 30 %,
c) soustava s koeficientem centrálního stínění 60 %



Obr. 3.27 Vliv centrálního stínění na tvar MTF:

1) soustava bez centrálního stínění,
2) soustava s centrálním stíněním 0,25 (25 %),
3) soustava s centrálním stíněním 0,44 (44 %),
4) soustava s centrálním stíněním 0,75 (75 %)

3.5 Určení modulační přenosová funkce

Pro určení MTF je vhodné využít některý ze standardizovaných testů. Příkladem vhodných čárových testů je např. čárový test označovaný USAF-1951 a KOREN-2003 a tzv. Siemensova hvězda. V praxi se často uspořádávají jednotlivé testy tak, aby bylo jediným měřením pokryto celé zájmové (zorné) pole. Jsou tedy umístěny ve středu i na okrajích zorného pole.

3.5.1 Test USAF-1951

Test USAF-1951 byl původně definován americkou vojenskou normou MIL-STD-150A. Dnes je široce využíván pro testy optických přístrojů. Je primárně určen k určení rozlišovací schopnosti soustavy. Je tvořen soustavou několika skupin elementárních testů (tab. 3.3). V každé skupině je šest elementárních různě velkých o 90° pootočených dvojic čárových testů. Skupiny s nižší hustotou čar jsou umístěny vně, skupiny s vyšší hustotou čar u středu testu. To umožňuje určit najednou průběh MTF pro oba na sebe kolmé směry (sagitální i meridiální). Platí, že velikost prvního testu ve skupině má vždy poloviční velikost než velikost prvního testu skupiny předešlé.

Pro korektní odčítání hodnot je nutné umístit tento test do příslušné vzdálenosti (tab. 3.4). Tu lze určit pomocí jednoduchého pravidla - na každý milimetr ohniskové délky objektivu je nutné počítat 1 palec (25,4 mm) vzdálenosti. Objektivu o ohniskové vzdálenosti např. 1 m odpovídá vzdálenost testu 25,4 m. Pozorovaná rozlišovací schopnost prvních testů ve skupinách je pak uvedena v tab. 3.5. V případě potřeby např. dvojnásobného rozlišení postačuje vyrobit test dle rozměrů z tab. 3.4 dělených dvěma, popř. jej umístit do dvojnásobné vzdálenosti.

Tab. 3.3 Měřítko jednotlivých testů uvnitř jedné skupiny testu USAF-1951

Test ve skupině	Násobitel (přesně)	Násobitel (číslo)
1	2^{0}	1,00000
2	$2^{-1/6}$	0,89090
3	$2^{-2/6}$	0,79370
4	$2^{-3/6}$	0,70711
5	$2^{-4/6}$	0,62996
6	$2^{-5/6}$	0,56123

Tab. 3.4 Příklad rozměrů testu USAF-1951

	Elementární test					
Skupina	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**
-2	10,00000	8,90899	7,93701	7,07107	6,29961	5,61231
-1	5,00000	4,45449	3,96850	3,53553	3,14980	2,80616
0	2,50000	2,22725	1,98425	1,76777	1,57490	1,40308
1	1,25000	1,11362	0,99213	0,88388	0,78745	0,70154
2	0,62500	0,55681	0,49606	0,44194	0,39373	0,35077
3	0,31250	0,27841	0,24803	0,22097	0,19686	0,17538
4	0,15625	0,13920	0,12402	0,11049	0,09843	0,08769

Tab. 3.5 Hustota elementárních testů

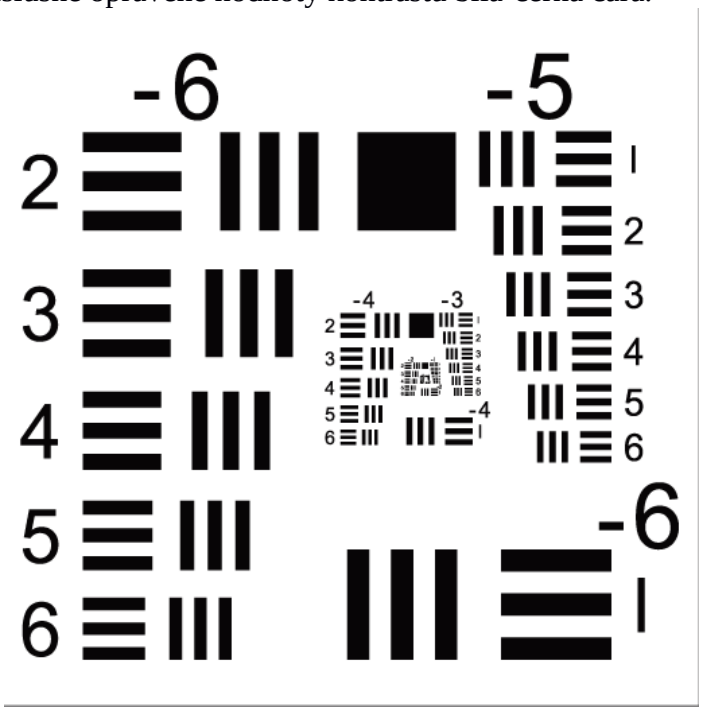
Skupina	**Délka čáry prvního elementu skupiny [mm]**	**Hustota testu [čar/mm]**
-2	10,000	0,25
-1	5,0000	0,50
0	2,5000	1
1	1,2500	2
2	0,62500	4
3	0,31250	8
4	0,15625	16
5	0,078125	32

Test lze využít i k přibližnému určení MTF. V tomto případě můžeme pominout rozdíl mezi sinusovým a čárovým vzorkem testů, resp. mezi modulací a kontrastem. Vlastní určení MTF spočívá v záznamu celého testu a určení kontrastů, s nimiž jsou jednotlivé testovací obrazce vykresleny (např. odečtením ze snímku testu). Pro stanovení orientačního průběhu křivky MTF zpravidla postačuje vyhodnotit test odpovídající zjištěné rozlišovací schopnosti a další čtyři elementární testy (z toho alespoň 1-2 v přechodové oblasti).

Následné zjištěné kontrasty testů je nutno před vynesením do grafu vynásobit koeficientem 0,785 ($\pi/4$). Pokud by byly vyneseny hodnoty kontrastu určené z pravoúhlého čárového testu přímo bez násobení opravným koeficientem, obdrželi bychom tzv. přenosovou funkci kontrastu pravoúhlých čar (CTF) nikoliv MTF [6]:

$$\mathrm{MTF} = 0{,}785 \cdot \mathrm{CTF}. \qquad (3.6)$$

Na ose *x* je hustota příslušného testu ([period/mm]). Na *y*-ovou osu jsou vyneseny příslušné opravené hodnoty kontrastu bílá-černá čára.



Obr. 3.28 Čárový test USAF-1951

3.5.2 Test KOREN 2003

Uvedená verze testu byla navržena Normanem Korenem v roce 2003. Na rozdíl od testu USAF-1951 tento test již dopředu počítá s určováním MTF. Proto umožňuje její přesné určení i pro velké prostorové frekvence (nad 100 period/mm).

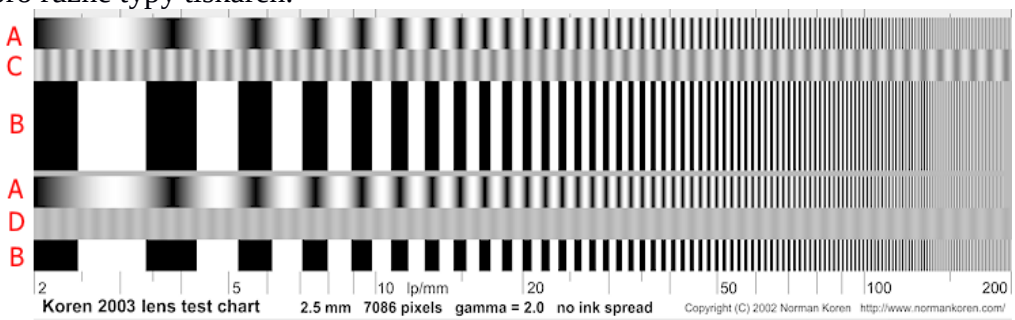
Test se skládá z šesti hlavních pásů (viz obr. 3.29). Základními jsou čárový test a test se sinusovým vzorkem. Hustota obou typů testů se postupně zvyšuje od 2 po 200 period/mm. Sinusový test je určen ke stanovení průběhu MTF. Čárový test pak pro určení úrovně zaostření obrazu. S výhodou lze využít

skutečnosti, že pravoúhlý čárový test je rozlišitelný do vyšších prostorových frekvencí (cca o 27 %) než sinusový test. Pří ostření stačí sledovat tento pás a doostřit tak, aby byla rozlišitelná co nejvyšší prostorová frekvence. Za pomoci vztahu (3.6) je pak možno jej využít i k určení MTF.

Zbývající pásy v testu obsahují konstantní prostorovou frekvenci se sinusovým testem s kontrastem 50 % (s hodnotami mezi 25 a 75 % max. hodnoty) a 10 % (s hodnotami mezi 45 a 55 %). Tyto pásy jsou využívány jen při vizuálním vyhodnocení testu pro přímé porovnání pozorovatelného kontrastu s vyhodnocovaným pásem (sinusový pás s 100 % kontrastem).
Obecný postup použití tohoto testu je podobný jako v předchozím případě.

1. Sestavení testovacího obrazce z dílčích testů. Zpravidla se umisťují vždy dva na sebe kolmé testy do středu, poloviny a kraje zorného pole.
2. Umístění testu do vhodné vzdálenosti a záznam odezvy testu (např. odfotografováním).
3. Vyhodnocení odezvy dílčích testů.

Podrobný postup určení MTF s využitím tohoto testu je popsán na webových stránkách autora testu (www.normankoren.com). Zde rovněž naleznete i vyhodnocovací software pro stanovení výsledné MTF a vlastní test pro různé typy tiskáren.



Obr. 3.29 Test KOREN-2003:

A … sinový test, B … čárový test,
C … sinový test s kontrastem 50%, D … sinový test s kontrastem 10%

3.5.3 Siemensova hvězda

Siemensova hvězda patří u astronomů mezi neprávem opomíjené testy. Starší generace jej možná zná pod názvem Jewellův test. Kruhová plocha testu je rozdělena na definovaný počet stejných výsečí střídavě bílých a černých. Tvoří obdobu čárového testu. Modulace jednotlivých výsečí může být pravoúhlá (tj. ostré přechody černá-bílá), popř. sinusová.

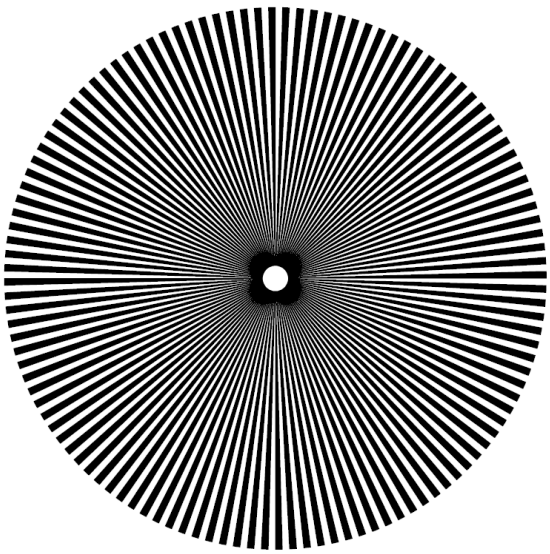
Pravoúhlé modulace se využívá zejména k určení rozlišovací schopnosti

optické soustavy. Pozorovatel při sledování testu vidí uprostřed kruhového testu nerozlišenou oblast (šedou plochu). Průměr této plochy je přímo úměrný rozlišovací schopnosti. Např. pro Siemensovu hvězdu o 72 výsečích pak pro rozlišovací schopnost platí jednoduchý vztah:

$$\psi = 18d/L, \qquad (3.7)$$

kde d je průměr nerozlišené plochy v mm a L vzdálenost testu v m. Nerozlišená plocha by přitom měla být kruhová. Pokud má tvar v nějakém směru protáhlejší, signalizuje to potíže optického systému s astigmatismem.

Tento test lze samozřejmě využít i k určení MTF optického systému (viz poznámka u testu USAF-1951). Pro její určení je ale výhodnější použít Siemensovu hvězdu se sinusovou modulací výsečí. V tomto případě je vhodné umístit pro přesné zaostření optického systému do středu testu malou Siemensovu hvězdu se čtyřmi výsečemi. Její velikost je nutné volit tak, aby celá ležela v nerozlišené části testu. Minimální testovaná prostorová frekvence je dána průměrem Siemensovy hvězdy a počtem těchto segmentů. Směrem do středu Siemensovy hvězdy pak pozorovaná prostorová frekvence roste. Nevýhodou tohoto testu je, že následné vyhodnocování je třeba provádět v polárních souřadnicích s počátkem ve středu testu (tzn. v soustředných kruzích). Výhodou na druhou stranu je, že zatímco test USAF-1951 umožňuje určovat rozlišovací schopnost a MTF ve dvou na sobě kolmých směrech, Siemensovu hvězda je vhodná pro určování MTF v libovolném směru obrazového pole.



Obr. 3.30 Siemensova hvězda

4. Astronomické příslušenství

Tato kapitola se zabývá vybraným optickým příslušenstvím dalekohledů. Zaměříme se především na to nejdůležitější – na okuláry. Okulárů existuje celá řada nejrůznějších typů a konstrukcí od okulárů vhodných pro obecné použití až po okuláry poměrně úzce specializované. Mimo kvalitu objektivu je právě okulár druhým velmi důležitým prvkem, na kterém závisí kvalita pozorovaného obrazu. Dále si něco řekneme o základním příslušenství k okulárům – tzv. čočkách Barlow a astronomických filtrech.

4.1 Okuláry

Drtivá většina astronomických dalekohledů má normovaný okulárový výtah, který je určen k doostřování pozorovaného obrazu. Velká část dnešních astronomických přístrojů využívá okulárových výtahů s uložením pro okulár o průměru 1,25“ (31,75 mm), popř. 2“ (50,8 mm). U některých starších přístrojů se můžeme setkat i s průměrem 0,965“ (24,5 mm).

Pokud předpokládáte přikupování dalšího příslušenství jednoznačně dejte přednost přístrojům o průměru 1.25“, popř. ještě lépe 2“. Pro průměr 0,965“ se dnes shání okuláry jen velmi obtížně.

4.1.1 Základní vlastnosti a výběr vhodného okuláru

Ohnisková vzdálenost a užitečné zvětšení

Základním kritériem pro výběr okuláru je jeho **ohnisková vzdálenost**. Na ní záleží výsledné zvětšení celé soustavy Γ, ale i průměr výstupní pupily (podíl průměru objektivu a zvětšení) podle známého vztahu [2]:

$$\Gamma = \frac{f_{\mathrm{ob}}}{f_{\mathrm{ok}}} = \frac{D_{\mathrm{vs}}}{D_{\mathrm{vyp}}} = \frac{\tan\omega'}{\tan\omega}, \qquad (4.1)$$

kde f_{ob} je ohnisková vzdálenost objektivu-dalekohledu, f_{ok} ohnisková vzdálenost okulárů, D_{vs} průměr objektivu-dalekohledu, D_{vyp} průměr výstupní pupily, 2ω skutečné zorné pole dalekohledu a $2\omega'$ zdánlivé zorné pole okuláru.

Fyzikální maximum užitečného zvětšení úzce souvisí s rozlišovací schopností dalekohledu (viz kapitola 2.2). Odpovídá takovému zvětšení, při kterém je úhel o velikosti rozlišovací schopnosti dalekohledu (např. dvě blízké hvězdy) zvětšen na jeho výstupu z okuláru na hodnotu odpovídající rozlišovací schopnosti lidského oka (60“ za běžných podmínek).

Maximálnímu užitečnému zvětšení pro dosažení rozlišovací

schopnosti dalekohledu odpovídá průměr výstupní pupily kolem 0,5 mm (viz tab. 4.1). Pokud použijeme okulár s kratší ohniskovou vzdáleností (tedy pro větší zvětšení než je právě 2D) nebudou se v obraze objevovat nové podrobnosti. Pouze dojde ke zvětšení velikosti původního obrazu za současného poklesu kontrastu – dosahujeme tzv. *jalové* (též *prázdné*) *zvětšení*. Pro některé pozorovací úlohy (např. pozorování dvojhvězd) může být přínosné zvětšení i mírně větší (až 3D). Vyžaduje však velmi kvalitní optickou soustavu okuláru i dalekohledu a vynikající pozorovací podmínky.

Průměr výstupní pupily kolem 1 mm nejčastěji zajišťuje maximum viděných detailů při planetárním pozorování za velmi dobrých podmínek. Je rovněž vhodné pro rozlišení dvojhvězd. Pro tyto objekty je za vynikajících podmínek rovněž možné občas zkusit i zvětšení odpovídající průměru výstupní pupily kolem 0,5 mm.

Průměr výstupní pupily kolem 2 mm obecně poskytuje nejlepší podmínky pro pozorování malých objektů (např. planet) za průměrných až dobrých podmínek. Při dostatečném jasu obrazu pak zároveň umožňuje využít rozlišovací schopnost oka. Ta se pro velké jasy (den, obraz Měsíce, planet) obrazu se pohybuje kolem 1’. Za nízkých jasů (jasné deep sky objekty, osvětlení krajiny v noci Měsícem) klesá na 5’. Pro velmi slabé jasy (noční krajina bez osvětlení a při tmavé obloze) ale může dosáhnout i několik desítek úhlových minut.

Nejmenší smysluplné zvětšení je limitováno zejména průměrem zorničky oka pozorovatele. Pokud použijeme okulár o příliš velké ohniskové vzdálenosti může být průměr výstupní pupily větší než průměr zorničky oka a to vede ke ztrátám optického zisku dalekohledu. Jinak řečeno využíváme jen část získaného světla. Při volbě minimálního zvětšení je dobré mít na paměti i jednu „maličkost“. Maximální průměr zorničky pozorovatele závisí i na věku pozorovatele. Čím je pozorovatel starší, tím má průměr zorničky menší. Zatímco u mladého pozorovatele je její maximální průměr nejčastěji v rozsahu 7-8 mm, u lidí středního věku (do 50 let) klesá postupně až na cca 4-5 mm. S rostoucím věkem pak dále klesá až k hodnotám kolem 2 mm.

Nejmenší smysluplné zvětšení rovněž ovlivňují i pozorovací podmínky – počasí či míra světelného znečištění. Příliš malé zvětšení pod nepříliš temnou oblohou v blízkosti velkého města zpravidla dokonale „zamaskuje“ slabé deep sky objekty. Díky malému kontrastu je proto nebude možné pozorovat. Průměrný pozorovatel si může při tmavé obloze (malém světelném znečištění) dovolit volbu zvětšení tak, že průměr výstupní pupily je v rozsahu 5-7 mm. V příměstské oblasti pak menší průměr vede ke ztmavení pozadí a relativnímu zlepšení kontrastu pozorovaných objektů. V okolí větších měst se osvědčuje výstupní pupila 3-4 mm. Menší průměr výstupní pupily pak pro adaptované oko rovněž znamená menší vliv astigmatismu a ostřejší obraz. Velmi často jsou

za normálních podmínek (i co se světelného znečištění týká) právě při tomto zvětšení dobře patrné i malé galaxie a planetární mlhoviny.

Právě k průměru výstupní pupily je nutno přihlédnout. Obecně by maximální průměr výstupní pupily neměl být větší, nežli je průměr panenky (zorničky) adaptovaného oka pozorovatele.

Tab. 4.1 Smysluplné hodnoty zvětšení

Zvětšení	**Výstupní pupila [mm]**	**Zvětšení na 10 mm průměru**	**Relativní zvětšení**	**Vhodné pro**
Velmi malé	4-7	1.5-2x		Širokoúhlé pozorování velkých partií oblohy, nejnižší smysluplné zvětšení.
Velmi malé	2-4	2.5-5x	$D_{vs}/2$	Obecná pozorování, dohledávání objektů, pozorování větších deep sky objektů.
Malé	1-2	5-10x		Měsíc, planety, malé deep sky objekty, některé dvojhvězdy.
Střední	0,7-1	10-20x	D_{vs}	Měsíc, planety za dobrých podmínek, dvojhvězdy, malé hvězdokupy.
Vysoké	0,7-0,5	20x	$2D_{vs}$	Planety za velmi dobrých podmínek, těsné dvojhvězdy.

Souhrnně lze říci, že ohniskovou vzdálenost okuláru je třeba volit tak, aby průměr výstupní pupily byl v rozsahu cca 0,5 mm (což odpovídá zvětšení rovnému dvojnásobku průměru objektivu) až 6-8 mm (pro minimální smysluplné zvětšení).

Tab. 4.2 Střední hodnota průměru zorničky pozorovatele

Věk pozorovatele	10	20	30	40	50	60	70	80
Průměr zorničky [mm]	8	8	7	6	5	4	3	2

Vzdálenost výstupní pupily

Při výběru vhodného okuláru zdaleka nevystačíme jen s ohniskovou vzdáleností. Velmi důležitým parametrem je i vzdálenost výstupní pupily. Tento údaj udává vzdálenost mezi poslední optickou plochou okuláru a rovinou, do které je nutné umístit zorničku pozorovatele. Je-li její hodnota příliš velká, je pozorování tímto okulárem nepohodlné. Příliš malá hodnota tohoto parametru je rovněž na pozorování nepříjemná.

Pro komfortní pozorování by měl mít okulár vzdálenost výstupní pupily nejlépe v rozsahu 12-20 mm. Pro pozorovatele s brýlemi může být tato hodnota i o něco větší. Je-li vzdálenost výstupní pupily menší než cca 5-6 mm, je pozorování takovým okulárem značně nepohodlné, až nemožné.

Velikost zorného pole

Zdánlivé zorné pole okuláru je další poměrně důležitý parametr. Je spjato se skutečným zorným polem pomocí již uvedeného vztahu (4.1).

Připomeňme, že lidské oko je schopno vidět ostře jen v poměrně malém zorném poli cca 1 ° až 2 °. Schopnost rozeznávat základní tvary a detaily je schopno ale v mnohem větším rozsahu 65 ° až 75 °. Ve větších úhlech (v periferiích) pak je oko schopno rozpoznávat jen omezeně (zejména změnu, tj. pohybující se objekty). Při volbě hodnoty zorného pole okuláru je dobré přihlédnout i k předpokládanému využití okuláru a výslednému zornému poli celého dalekohledu. Např. při zvětšení 100x je výsledné pole přístroje při použití okuláru o zorném poli 40 ° přibližně 0,4 °. Při použití okuláru se zorným polem 75 ° pak zhruba 0,9 °.

Specializované okuláry (např. planetární speciály) mají obvykle relativně úzké zorné pole 30 ° až 45 °. Běžné okuláry mívají zorné pole v rozsahu 50° až 60 °, širokoúhlé pak nejčastěji mezi 65° až 72°. Největší zorné pole mají ultraširokoúhlé okuláry a to až 120 °. Zpravidla lze říci, že konstrukce zaměřené na větší zorné pole mají ostrost a kontrast obrazu nižší než jejich ekvivalenty s menším zorným polem. Např. typický čtyřčočkový okulár

Plösslovy konstrukce o zorném poli typicky 50° má při pozorování planet zpravidla lepší obraz než okulár Erfle se zorným polem o 50 % větším. Toto pravidlo je narušeno snad jen u nejrenomovanějších značek v některých jejich speciálních konstrukcích.

Ostatní parametry okuláru

Na rozhraních vzduch sklo dochází k odrazu části světla zpět. Pro omezení těchto nežádoucích odrazů jsou dnes optické plochy okulárů vybaveny **antireflexními vrstvami**. Mimo základní vlastnosti o kvalitě/vhodnosti okuláru rozhoduje i kvalita antireflexních vrstev. To je důležité zejména u okulárů s velkým zorným polem, popř. okulárů používaných u dalekohledů s velkou relativní aperturou. Právě v kvalitě antireflexních vrstev velmi často bývá největší rozdíl mezi levnějšími a dražšími výrobky. Nekvalitní antireflexní vrstvy dokáží snadno znehodnotit jinak velmi kvalitní okulár. Nekvalitní antireflexní vrstvy způsobují pokles kontrastu pozorovaného objektu. Při zobrazení jasných objektů se navíc projeví reflexy („duchové“) v případě objektu mimo optickou osu, popř. nepříjemným halem kolem pozorovaného objektu je-li objekt na optické ose. Vhodnějšími jsou proto okuláry s antireflexními vrstvami na všech optických rozhraních vzduch-sklo. Výrobky s antireflexními vrstvami na všech plochách jsou označovány jako FC (fully coated). Výrobky s kvalitnějšími vícenásobnými vrstvami jako MC (multi coated). V tomto případě jde o okulár, který je vybaven antireflexní vrstvou na všech optických plochách a alespoň na jednu plochu (zpravidla první) je nanesena vícenásobná vrstva. Jsou-li vícenásobné antireflexní vrstvy naneseny na všechna rozhraní, je okulár označen jako FMC (fully multi coated).

Při výběru okuláru dejte přednost okulárům s kvalitnějšími antireflexními vrstvami. Rozpoznat je na první pohled není zpravidla možné. Určitým vodítkem může být cena (kvalitní antireflexní vrstvy jsou poměrně drahé), popř. alespoň údaj výrobce o typu antireflexních vrstev.

Občas se setkáte s označením, že daný **okulár je parfokální**. V praxi to znamená, že výrobce jej navrhl a vyrobil tak, že při jeho záměně v okulárovém výtahu za jiný nepotřebujete přeostřit a obraz tedy bude ostrý. Parfokální jsou zpravidla mezi sebou pouze okuláry stejného výrobce v určité řadě. Pokud tedy použijete okuláry stejného výrobce, ale jiné řady, okuláry mezi sebou sice mohou, ale většinou parfokální nejsou.

4.1.2 Základní typy okulárů

První okuláry byly v podstatě jen spojná (popř. rozptylná) čočka s malou ohniskovou vzdáleností. Pohled přes takovou soustavu byl zatížen celou řadou optických vad. Proto bylo velmi záhy přistoupeno ke kombinaci více čoček pro zlepšení kvality pozorovaného obrazu.

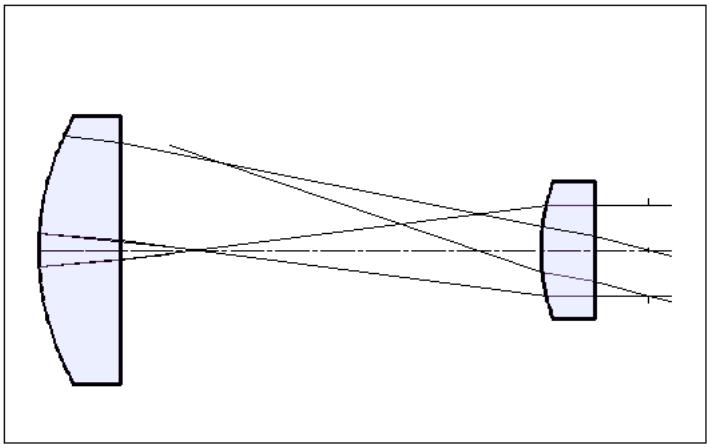
Již v roce 1693 navrhl Christiane Huygens později po něm pojmenovaný okulár. Při jeho návrhu bylo prioritou omezení barevné vady jednoduché čočky a zvětšení jeho zorného pole. Zorné pole **Huygensova okuláru** (obr. 4.1) se pohybuje maximálně kolem 40 °. Nevýhodou je poměrně malá vzdálenost výstupní pupily (řádově do *0,3f'*). Ačkoliv je barevná vada tohoto typu okuláru omezena, je vhodný pro dalekohledy s relativní aperturou do f/10 – f/12. Pro „světelnější“ soustavy není tento typ okuláru vhodný.

Druhým základním okulárem je **Ramsdenův okulár** (obr. 4.2) navržený Jesse Ramsdenem v r. 1783. Jeho konstrukce umožňuje zorné pole do 35 ° při vzdálenosti výstupní pupily opět v desetinách ohniskové vzdálenosti. Ani hodnota maximální vhodné relativní apertury se od Huygensova okuláru příliš neliší. Při použití moderních fluoritových skel by bylo možné dnes sestrojit tento okulár se zorným polem až kolem 60 ° a vhodností pro relativní apertury až kolem f/8. Dnes však již existuje celá řada modernějších konstrukcí, proto se této možnosti využívá jen výjimečně. Ramsdenův okulár se využívá dodnes hlavně v geodetických přístrojích. U soudobých astronomických přístrojů se setkáváme s oběma uvedenými typy okulárů pouze výjimečně.

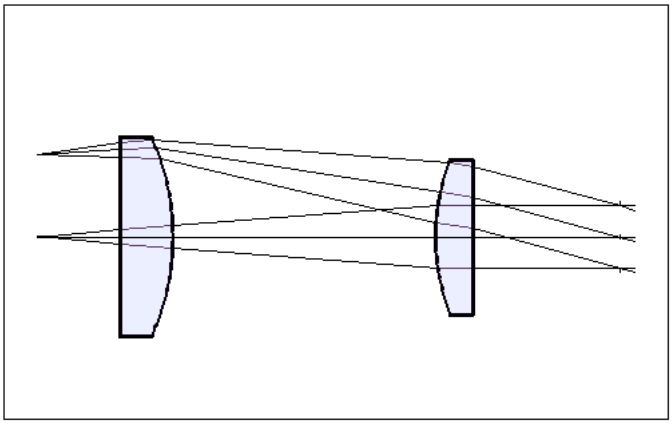
Sférická aberace, zbytkové koma a zejména pak zbytková barevná vada klasického Ramsdenova okuláru znemožňuje jeho smysluplné využití v přístrojích s relativním otvorem větším než cca f/8. Proto v roce 1849 Karl Kellner navrhl okuláru tvořený dvojicí jednoduchých spojných čoček: tmelený dubletek. Zajímavostí určitě je, že původní **Kellnerův okulár** (obr. 4.3) byl určen pro využití v mikroskopech. Díky svým, v porovnání s Ramsdenovým okulárem, lepším obrazovým vlastnostem se ale začal velmi záhy využívat v nejrůznějších modifikacích i v dalekohledech. Typicky dosahuje tento okulár přiměřeně korigovaného zorného pole kolem 45 ° při vzdálenosti výstupní pupily cca *(0,5-0,6)f´*. Kellnerův okulár je využíván i dnes. Jde o levnou alternativu ke složitějším okulárům. Zejména při větších ohniskových vzdálenostech jsou jeho vlastnosti poměrně dobré.

Z Ramsdenova okuláru byl rovněž odvozen Gustávem Simonem Plösslem v roce 1860 **Plösslův okulár** (obr. 4.4). Na rozdíl od Kellnerova okuláru je tvořen dvěma dublety. Je vhodný pro relativní apertury až f/4 při korigovaném zorném poli do 50 °. Stejně jako u předešlých typů je jeho největší nevýhodou u malých ohniskových vzdáleností poměrně malá vzdálenost výstupní pupily (cca 0,*4-0,7f´*). Plösslův okulár, popř. některé z něj odvozené

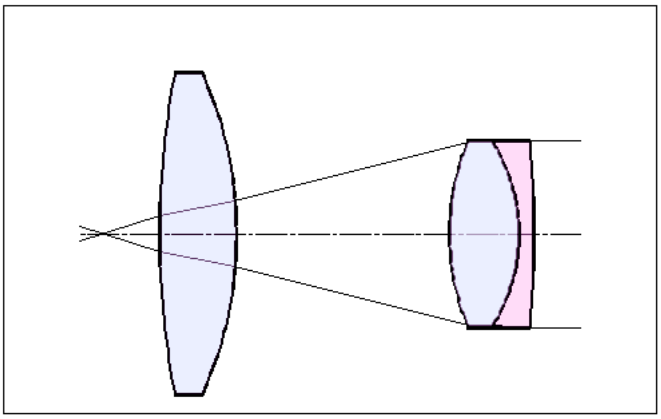
četné variace (např. Ultima firmy Celestron, popř. S-Plössl firmy TAL), dnes patří mezi velmi oblíbené. Vynikají velmi vysokou ostrostí kresby bez většího zkreslení při relativně velkém zorném poli. Proto je tato konstrukce považována pro větší a střední ohniskové vzdálenosti (limitem je vzdálenost výstupní pupily) za kompromis požadavků a lze ji tak pokládat za univerzální okulár.



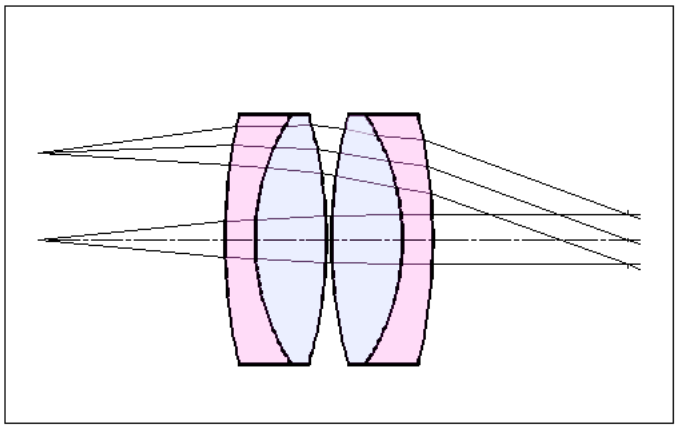
Obr. 4.1 Huygensův okulár



Obr. 4.2 Ramsdenův okulár



Obr. 4.3 Kellnerův okulár



Obr. 4.4 Plösslův okulár

4.1.3 Ortoskopické okuláry

Ortoskopické okuláry představují celou skupinu nejrůznějších konstrukcí okulárů. U jejich návrhů byl původně požadavek na fotografický objektiv navržený pro zobrazení bez zkreslení. Jejich hlavní výhodou jsou proto malá zkreslení při velkém kontrastu, což je velmi důležité při pozorování přímých linií na kraji zorného pole. Ve všech případech je pro tuto skupinu charakteristické bezvadné zorné pole s téměř dokonalou barevnou korekcí.

V roce 1880 navrhl Ernst Abbe pro firmu Zeiss **Abbeho ortoskopický okulár** (obr. 4.5) který se s velkým úspěchem a jen drobnými obměnami používá dodnes. V původním návrhu měl okulár zorné pole kolem 30 ° při vzdálenosti výstupní pupily do *0,8f´*. Dnešní modernizovaná konstrukce

s jednou asférickou (parabolickou) plochou umožňuje bezvadné zorné pole i přes 50 ° při vzdálenosti výstupní pupily cca *0,6f´*. Druhou velmi často dodnes používanou konstrukcí je **kalliskopický ortoskopický okulár** navržený rovněž pro firmu Zeiss v roce 1941. Svou koncepcí je velmi blízký okuláru navrženého Albertem Königem již v roce 1920. Tento typ okuláru má zorné pole 45 ° až 60° při vzdálenosti výstupní pupily *0,6f´ až 0,8f´*. Drobnými úpravami optické soustavy je ale možné dosáhnout u ortoskopického okuláru i podstatně větších vzdáleností výstupní pupily.

Ortoskopické okuláry mají při menším, popř. středně velkém zorném poli velký kontrast a malé zkreslení. Těmito vlastnostmi se plně vyrovnají mnohem složitějším (a tím i dražším) konstrukcím. Díky svým vlastnostem patří tato konstrukce okulárů mezi nejvhodnější pro planetární astronomii.

4.1.4 Širokoúhlé okuláry

Je patrné, že při požadavku na maximální využití zorného pole oka nebudou klasické okuláry uvedené výše zcela vyhovovat. Pro tyto účely bude vhodnější některý ze širokoúhlých okulárů.

Jedním z prvních širokoúhlých okulárů projektovaný již od základu pro velké zorné pole byl okulár navržený v roce 1917 Heinrichem Erflem. **Erfleho okulár** (obr. 4.6) byl původně určen pro využití ve vojenských zaměřovačích. Díky svým velmi dobrým vlastnostem se ale dočkal nesčetných variant a modifikací. S velkým úspěchem je rovněž využíván v astronomických přístrojích dodnes. Modifikace Erfleho okuláru mají zpravidla zorné pole v rozsahu 60 ° až 75 ° při vzdálenosti výstupní pupily *0,3-0,8f´*.

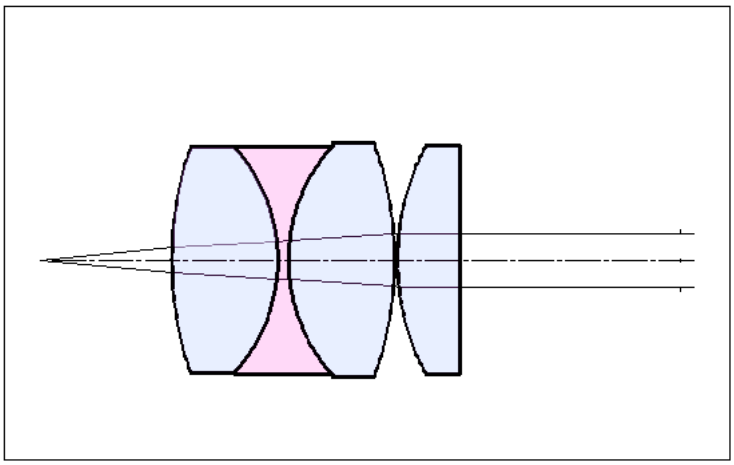
Další „vojenskou konstrukcí“ okulárů, která našla svoji cestu k astronomům, je **Berteleův okulár** (obr. 4.7) navržený Ludwigem Jakobem Bertelem. Jde bezesporu o poměrně zdařilou konstrukci. V původním návrhu se skládal z pouhých čtyřech čoček. Přitom je vhodný i pro přístroje s velkou relativní aperturou (f/5) a umožňuje zorné pole až 70 ° při vzdálenosti výstupní pupily *0,8f´*.

Wide Scan je jednou z nejlepších modifikací odvozených z Erfleho okuláru, konkrétně z okuláru Erfle II, resp. Z jeho modifikace - Zeiss Astroplanokular. Tento okulár má zorné pole cca 65 ° při vzdálenosti výstupní pupily až *1.2f'*. K zajištění komfortní vzdálenosti výstupní pupily využívá integrované čočky Barlow (viz kapitola dále). Obdobnou konstrukci využívá např. firma Baader Planetarium ve svých okulárech, které prodává pod obchodním názvem **Hyperion** nebo Takahashi ve svém okuláru **Super wide asferic**. Tento okulár má díky asférické ploše navíc velmi dobře korigováno zklenutí i zbytkovou sférickou aberaci v celém zorném poli (67 ° při vzdálenosti výstupní pupily *0,75f'* pro přístroj s relativní aperturou f/4).

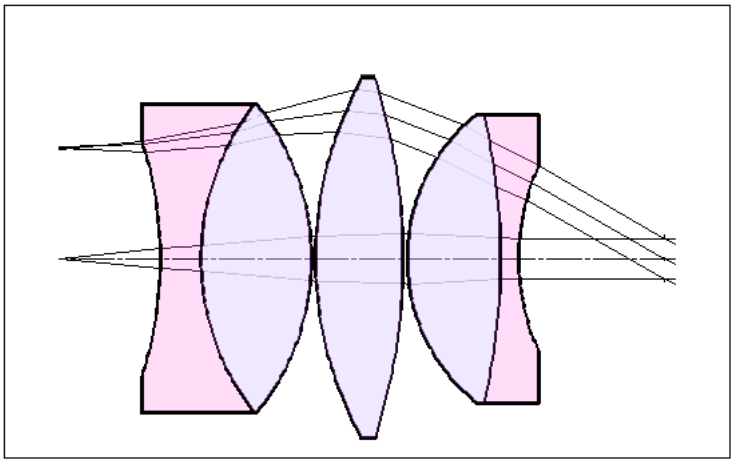
Z modifikace Erfleova okuláru (Zeiss astroplanar) vychází i okulár firmy **Vixen LV**. Pro dosažení maximální kvality zobrazení je zorné pole poněkud přicloněno (cca 52 °). Velká vzdálenost výstupní pupily je opět dosažena za pomoci čočky Barlow. Díky použití lanthalových skel pak je dosaženo velmi dobrých optických vlastností (vysoký kontrast zobrazení, vyrovnané zorné pole, …).

Na jiném základě jsou založeny okuláry firmy **Takahashi** a **TeleVue**. Okulár **Panoptic** vychází z Plösslova okuláru. Díky tomu je velmi vysoký kontrast zobrazení. Přidáním dvou čoček bylo dosaženo vysoce korigované zorné pole (68°) při vzdálenosti výstupní pupily *0,7f'*. Tento okulár prakticky splňuje podmínky na ortoskopický okulár s minimální zbytkovou barevnou vadou a astigmatismem.

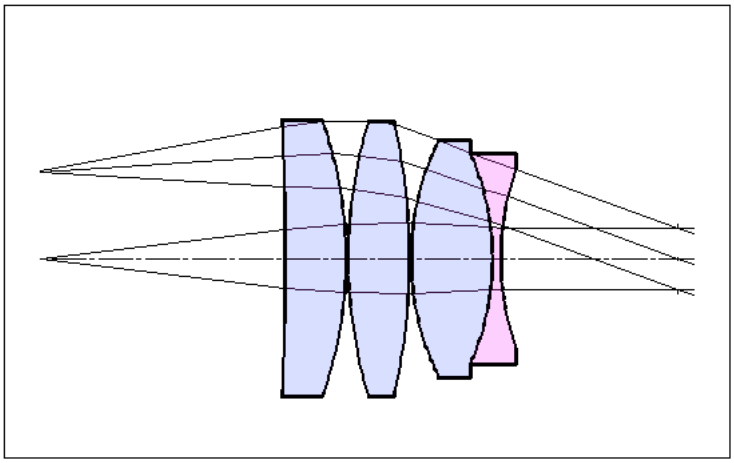
Naglerův okulár je širokoúhlý okulár navržený speciálně pro astronomické přístroje. Řada okulárů **Nagler I** a **Nagler II** využívá tzv. Smithova achromatického rovnače pole (obdoba čočky Barlow, jen navíc koriguje zklenutí pole). Díky němu je možné konstruovat okuláry i s velmi širokým zorným polem (až 82°) při výborné vzdálenosti výstupní pupily (cca *1.0-1.2f'*). Protože jsou tyto okuláry speciálně navrženy pro astronomické přístroje, byly již při návrhu zohledněna některá jejich specifika (např. hodnota relativního otvoru). Výsledkem je velmi kontrastní obraz v širokém zorném poli. Konstrukčně velmi podobný je i okulár **Meade UWA** s velmi podobnými vlastnostmi.



Obr. 4.5 Abbeho ortoskopický okulár



Obr. 4.6 Okulár Erfle II



Obr. 4.7 Okulár Bertele

Tab. 4.3 Přehled nejčastějších konstrukcí okulárů
(údaje jsou vztaženy ke klasické konstrukci daného typu okuláru)

Typ okuláru	**Zorné pole [°]**	**Vzdál, výst, pupily [násobek f']**	**Mezní rel, apertura [f'/D]**	**Pozn.**
Jednoduchá čočka	10	0,9	1:35	Bikonvexní čočka použitá Keplerem
Huyghenian	40	0,3	1:12	
Ramsden	35	0,4	1:10	Achromatický Ramsden
Kellner	45	0,45	1:6	
Kellner inverzní	50	0,4	1:5	
Plössl	45	0,4-0,7	1:4-1:6	
Symetrický	45	0,7	1:4	
Abbe ortoskop,	30	0,8	1:6	
König, ortoskop,	60	0,7	1:5	Plösslův okulár
Zeiss, ortoskop,	45	0,8	1:5	
Wide ortoskop,	50	0,5	1:4	
Erfle I	60	0,3*	1:5	
Erfle II	70	0,6*	1:5	
Erfle III	55	0,32	1:5	nezklenuté obraz, pole
Bertele	70	0,8	1:5	navržen pro voj, aplikace
TeleVue Panoptic	68	0,7	1:4	
Nagler I	82	1,2	1:4,5	
Nagler II	82	1,0	1:4,5	
Meade UW	84	1,5	1:4	
Vixen LV	52	20 mm	1:4,5	
Vixen LVW	65	20 mm	1:4	

4.2 Čočka Barlow

Výsledné zvětšení dalekohledu lze zvýšit využitím tzv. čočky Barlow (obr. 4.8). Jde o čočku se zápornou ohniskovou vzdáleností, která se umisťuje před ohniskovou rovinu objektivu (tj. mezi tuto rovinu a objektiv). Na vzdálenosti čočky Barlow od ohniskové roviny objektivu pak záleží „prodloužení“ výsledné ohniskové vzdálenosti objektivu. Čím je blíže k objektivu, tím je výsledná ohnisková vzdálenost větší. Tím je ovšem větší i potřebná vzdálenost mezi vlastní čočkou Barlow a následným okulárem. Koeficient prodloužení ohniskové vzdálenosti je dán vztahem [3]:

$$k = \frac{f'}{f'-B}, \qquad (4.2)$$

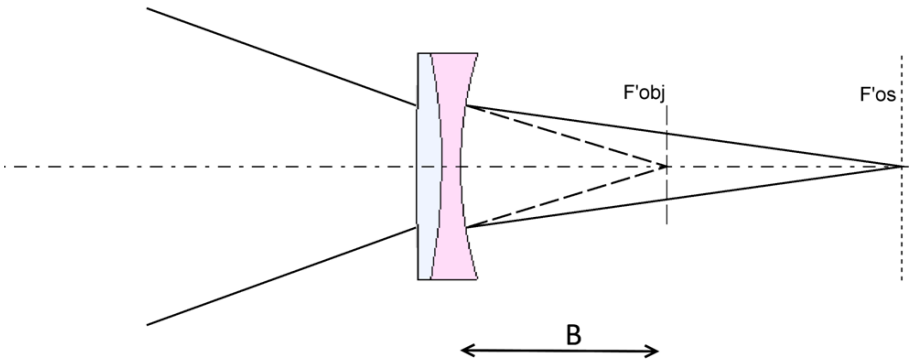
kde f' je ohnisková vzdálenost Barlowovy čočky a B je její vzdálenost před ohniskovou rovinou objektivu. Výsledná ohnisková vzdálenost je pak dána součinem ohniskové vzdálenosti objektivu a koeficientu prodloužení. Je-li např. tento koeficient 2 znamená to, že výsledná ohnisková vzdálenost objektivu při použití této čočky je 2x větší než bez ní.

Jak je ze vztahu (4.2) patrné, koeficient prodloužení lze měnit změnou vzdálenosti mezi čočkou Barlow a okulárem (resp. předsazení čočky před ohniskovou rovinou objektivu). Podobně jako okuláry se i čočky Barlow vyrábí v rozměrech pro vložení do okulárového výtahu (tj. 1.25“, popř. 2“). V nejčastější konfiguraci se vkládá okulár do vlastního tubusku čočky Barlow. Vyšroubováním čočky Barlow z jejího uložení a vešroubováním přímo do tubusku okuláru dojde ke zkrácení vzdálenosti Barlow-okulár a tím i ke snížení koeficientu prodloužení. Je-li výrobcem např. udáván koeficient prodloužení 2x vešroubováním přímo do okuláru získáme čočku Barlow s koeficientem prodloužení zpravidla mezi 1.25-1.5x. Naopak pokud vsuneme do tubusku čočky Barlow nástavec a vlastní okulár až do něj, lze dosáhnout zvýšení koeficientu prodloužení. Nadměrné zvyšování tohoto koeficientu je ale doprovázeno řadou nepříjemných důsledků (pokles kvality obrazu, vinětace okrajových paprsků).

Jednoduchá čočka Barlow je vyráběna zpravidla jako achromatická (tmelený dublet). Dokonalejší varianty jsou apochromatické (tří-, popř. čtyřčočková soustava).

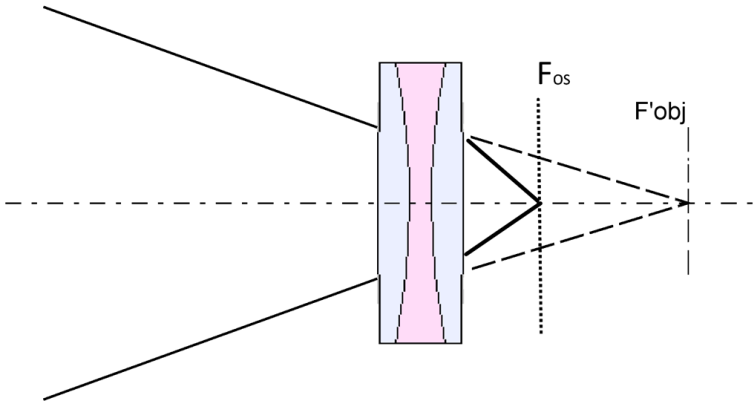
Použití čočky Barlow umožňuje využít pro shodné zvětšení okulár s větší ohniskovou vzdáleností. To je výhoda zejména u konstrukcí, u nichž je v tomto případě malá vzdálenost výstupní pupily. Čočka Barlow totiž prakticky vzdálenost výstupní pupily vlastního okuláru neovlivní. Čočka Barlow umožňuje využít každý okulár ke dvěma různým zvětšením. Dvěma vhodně vybranými okuláry je možné za pomoci čočky Barlow „pokrýt“ čtyři různá zvětšení. To umožňuje pokrýt nároky na většinu základních pozorování.

Aplikace čočky Barlow přináší ale i určité nevýhody. Méně kvalitní čočka Barlow způsobuje zhoršení kvality pozorovaného obrazu. Zhoršení jakosti pozorovaného obrazu přes kvalitní čočku Barlow je ale naproti tomu prakticky nepozorovatelné. Pokud tedy chcete čočku Barlow využívat, rozhodně dejte přednost výrobkům renomovaných výrobců než levným neznačkovým variantám.



Obr. 4.8 Čočka Barlow

Obdobně, jako rozptylka je využita k prodloužení ohniskové vzdálenosti, lze naopak spojku využít k jejímu zkrácení – jedná se o tzv. **Shapleyovu čočku**. Koeficient zkrácení je formálně shodný se vztahem 4.2. Použití Shapleyovy čočky v astronomických přístrojích omezené. Důvod je prostý - zkrácením ohniskové vzdálenosti se sice zvyšuje relativní otvor (světelnost) objektivu, ale současně jsou výraznější optické vady. Současně dochází k přiblížení obrazové roviny k poslední optické ploše, což často znemožňuje její využití např. pro vizuální pozorování. Častěji se proto s ní setkáváme v roli **reduktoru ohniskové vzdálenosti** v astrofotografii. Často jsou přitom kombinovány s korektory některé dominantní vady konkrétních systémů: např. komy u typu Schmidt-Cassegrain. Výsledkem pak je "reduktor a komakorektor v jednom. V úloze Shapleyovy čočky jsou používány vždy achromatické nebo apochromatické spojné systémy.



Obr. 4.9 Shapleyova čočka

4.3 Astronomické filtry

Dalším velmi zajímavým příslušenstvím jsou astronomické filtry. Pro vizuální případně fotografické použití existují dvě základní velké skupiny astronomických filtrů: „barevné“ (někdy též nazývané „planetární“) a „mlhovinové“. Šroubují se zpravidla přímo do tubusku výtahu okuláru.

Mimo uvedené skupiny existují i filtry určené pro specifické použití, např. fotometrii hvězd. Existuje celá řada systémů, z nichž asi nejznámější je UVBRI (viz příloha P.4).

4.3.1 Planetární filtry

Nejjednodušší „planetární“ filtry jsou klasické absorpční filtry s maximem propustnosti laděným pro určitou barvu. Jejich vhodnou aplikací lze zvýraznit pozorované útvary na povrchu planet.

Zásada jejich aplikace je poměrně jednoduchá. Pokud chceme pozorovaný útvar ztmavit, volíme filtr v doplňkové barvě. Pokud jej potřebujeme zesvětlit, volíme filtr v barvě co nejbližší pozorovanému útvaru. Cílem je vždy zvýšit kontrast pozorovaného útvaru vůči svému okolí.

Pro zvýraznění oblačných pásů v atmosféře planety Jupiter a Saturn se osvědčuje např. světle modrý, popř. zelený filtr. Oranžový filtr je naopak vhodný pro rozpoznání některých albedových útvarů na Marsu. Pro zvýraznění prachových bouří je vhodnější filtr žlutý.

Dnes jsou tyto jednoduché absorpční filtry doplňovány interferenčními vrstvami. Existují rovněž speciálně navržené filtry laděné pro určitý typ pozorování - např. oblaků v atmosféře Marsu či pro pozorování Venuše.

4.3.2 Mlhovinové filtry

Mlhovinové filtry jsou prakticky vždy interferenční (tj. jsou tvořeny na základovou destičku nanesenou soustavou tenkých vrstev z různých materiálů). Lze je rozdělit podle šířky pásma do tří základních kategorií.

1. Filtry LPR (light pollution reduction) snižují vliv světelného znečištění a tím zvyšují pozorovaný kontrast deep sky objektů (obr. 4.10a). Jsou navrženy tak, aby pokud možno v co nejvyšší míře nepropuštěly vlnové délky, na kterých vyzařuje noční osvětlení (zpravidla spektrální čáry sodíkových a rtuťových výbojek). Oproti jiným druhům interferenčních filtrů uvedených níže mají větší šířku spektrálního pásma, které propouštějí (to ostatně více než výmluvně dokládají výsledky měření).

Primárně jsou určeny pro zvýšení kontrastu objektů emisních (např. emisní a planetární mlhoviny), nicméně díky poměrně širokému spektrálnímu pásmu, ve kterém propouští záření, částečně pomohou i u některých ostatních DSO.

2. **Filtry UHC** (ultra high contrast) potlačují umělé přezáření oblohy. Jejich pásmo propustnosti (obr. 4.10b) je zpravidla oproti LPR filtrům o něco užší a propouští proto pouze okolí vlnových délek, na kterých vyzařují emisní mlhoviny (spektrální čáry O_{III}, H_α a H_β). Ostatní vlnové délky jsou potlačeny. To v konečném důsledku vede k tomu, že pozorovaná obloha ztmavne (a to výrazněji než u filtrů LPR). Jas pozorovaného objektu (mlhoviny) ale zůstane takřka na původní hodnotě. Je tak oproti pozadí kontrastnější, tj. lépe pozorovatelný. Podobně jako v předchozím případě lze filtry UHC použít jak pro vizuální pozorování, tak i pro fotografické účely (u některých UHC filtrů s některými omezeními). Na rozdíl od LPR filtrů je ale zeslabení ostatních vlnových délek natolik silné, že se pro pozorování jiných než emisních objektů prakticky nehodí. Jejich použitím při pozorování např. galaxií zpravidla žádného kladného efektu nedosáhneme.

Obecně jsou pro UHC filtry doporučovány oproti LPR filtrům dalekohledy větších průměrů, zpravidla o průměru objektivu alespoň 150 mm (6"). To samozřejmě neznamená, že jej nemůžete na svůj např. 120 mm refraktor vyzkoušet (byť jej nevyužijete na „100 %").

3. Úzkopásmové filtry mají oproti obou výše uvedeným kategoriím šířku pásma ještě menší. Propouští tedy jen bezprostřední okolí určité spektrální čáry. Mezi astronomy se nejčastěji využívá filtrů O_{III}, H_β a H_α.

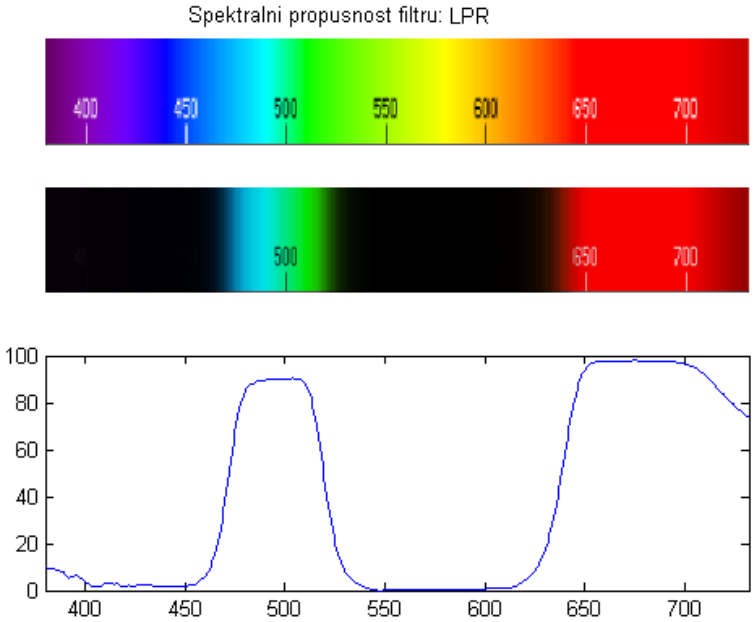
Filtr O_{III} *(*obr. 4.11a*)* propouští pouze bezprostřední okolí spektrální čáry O_{III} (cca 500,7 nm popř. 495,9 a 500,7 nm). Je vhodný tedy pouze pro objekty, které na této vlnové délce intenzivně vyzařují (planetární a emisní mlhoviny). Velmi dobrý efekt má např. u Řasové mlhoviny v Labuti, u M27 ale např. i M42. Tento, ale vlastně všechny úzkopásmovější filtry, se doporučují pro dalekohledy o průměru alespoň 150 mm (6"), pro pozorování vzdálených DSO alespoň 200 mm (10").

Filtr H_β (obr. 4.11b) *b*lokuje celé spektrum kromě čáry H_β (486,1 nm). Při jeho použití obloha extrémně ztmavne a umožní vyhledání velmi slabých mlhovin, které na této vlnové délce vyzařují.Vhodným cílem může být např. Koňská hlava (zde samozřejmě nevyzařuje temná mlhovina, ale mlhovina v pozadí), popř. Kalifornia. Filtr je vhodný pro dalekohledy o větším průměru objektivu - doporučené minimum se udává zpravidla kolem 200 mm (8"). Velmi často je nezbytné rovněž volit maximální možnou výstupní pupilu okuláru (co nejmenší zvětšení).

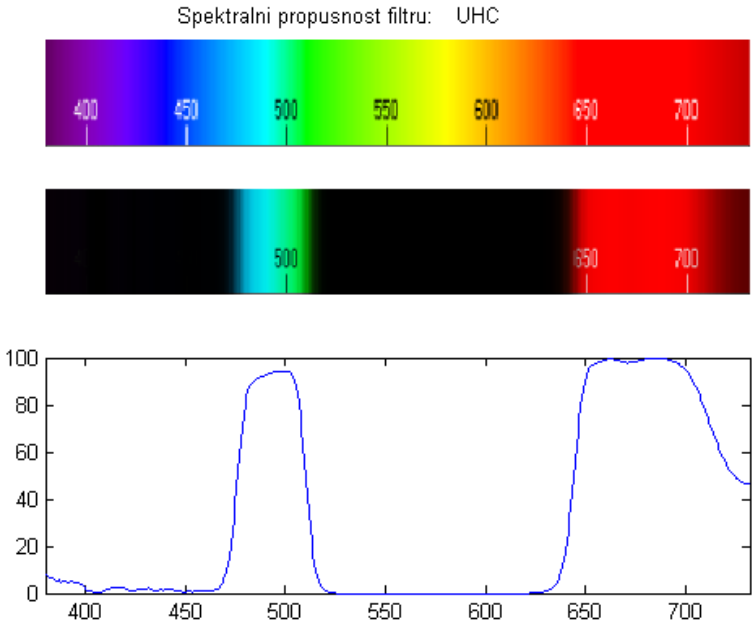
Trošku složitější je situace u **filtru H_α** (obr. 4.11c). V astronomii se

setkáte se dvěma typy filtrů H_α (656,3 nm). Širokopásmovější varianta (typicky o šířce pásma propustnosti cca 10-80 nm) je určená zejména pro fotografii na noční obloze. S ohledem na malou citlivost oka na této vlnové délce není pro vizuální pozorování v nočních podmínkách příliš vhodný. Úzkopásmovější varianta filtru s velmi úzkým pásmem propustnosti kolem H_α (typicky 0,1 až 0,8 nm) je určená pro denní pozorování Slunce v této spektrální čáře.

Závěrem této části malé shrnutí. Filtry LPR jsou vhodné zejména do oblastí se světelným znečištěním (což je v České republice bohužel již téměř všude). Pomohou nejen při pozorování emisních objektů (emisních či planetárních mlhovin), ale poměrně často i při pozorování ostatních DSO (např galaxií M33, M101, ...). Více než 50 % všech emisních objektů je nejlépe pozorovatelných UHC filtrem. Jedinou podmínkou je „rozumně" tmavé pozadí. Filtr OIII se uplatní zejména při silnějším světelném znečištění na slabších objektech (např. některé planetární mlhoviny), kde již ztmavení UHC filtrem nepostačuje. Velmi efektní je jeho použití např. na Řasové mlhoviny v Labuti. Filtr H_β je pak vhodný jen na pár objektů (např. již výše citovaná "Koňská hlava").

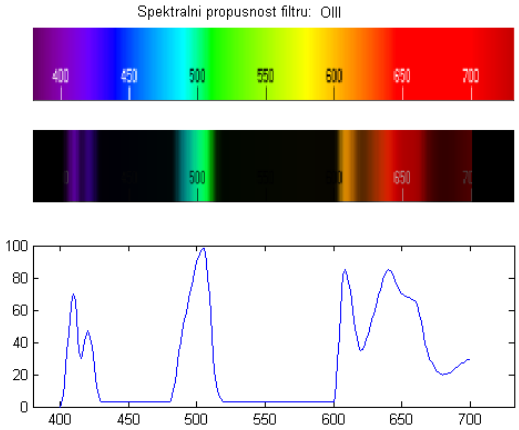


a)

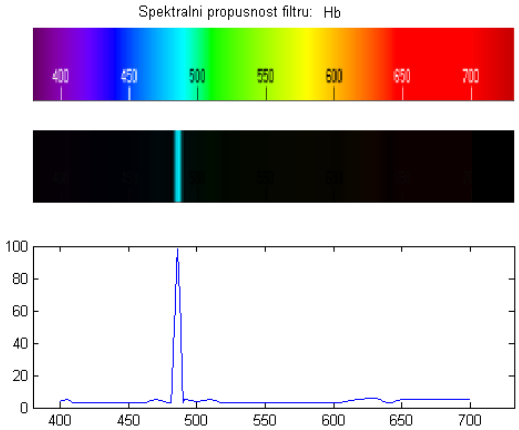


b)

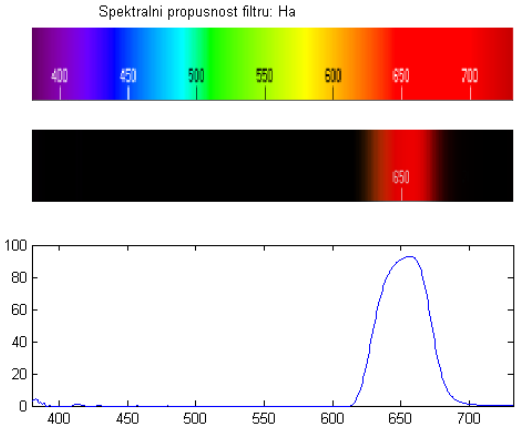
Obr. 4.10 Spektrální propustnost mlhovinového filtru:
a) filtr LPR, b) filtr UHC



a)



b)



c)

Obr. 4.11: Spektrální propustnost úzkopásmových filtrů
a) filtr OIII, b) filtr H_β, c) filtr H_α

5. Astronomické montáže

5.1 Druhy montáží astronomického dalekohledu

Cílem montáže umístěné pod dalekohledem (popř. jiným přístrojem) je zajistit fixaci jeho polohy. Proto musí být samozřejmě dostatečně pevná, stabilní. Sebelepší dalekohled nevynikne, pokud se obraz v něm bude neustále chvět při sebemenším dotyku pozorovatele. Mimo to by měla vhodná astronomická montáž umožnit i snadné a přesné navedení přístroje na sledovaný objekt, popř. i sledování jeho pohybu po obloze.

5.1.1 Azimutální montáž

Azimutální montáž (obr. 5.3a) je nejjednodušším typem montáže. Svoji základní koncepcí je podobná např. obyčejnému fotografickému stativu. Umožňuje pohyb podél dvou os (obr. 5.1a), kolem svislé (v azimutu) a vodorovné (ve výšce).

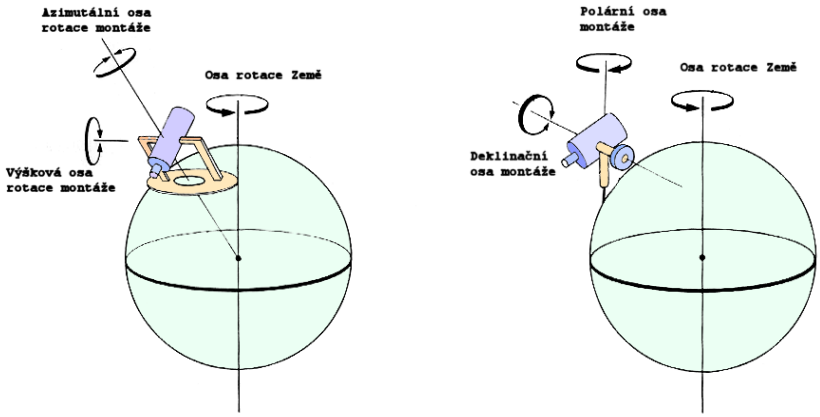
Obrovskou výhodou azimutální montáže je její snadné ovládání. Prakticky od narození je lidský mozek trénován v prostorové orientaci v základních směrech nahoru-dolů a doprava-doleva. Veškeré pohyby vedoucí k zamíření dalekohledu na požadované místo jsou proto u tohoto typu montáže velmi přirozené. Právě tato snadnost ovládání z něj dělá velmi vhodný typ montáže pro začínající astronomy a samozřejmě nejen pro ně. Navíc lze tuto montáž, díky snadnému a intuitivnímu ovládání, využít pro sledování rychle se pohybujících objektů (např. letadel, ale i družic).

Nevýhodou azimutální montáže je nutnost při sledování objektu na obloze pohybovat oběma osami najednou. I kdybychom udrželi azimutální montáží objekt přesně ve středu zorného pole, nebude jeho obraz nehybný. Při pohybu po obloze opisují objekty oblouk, jehož část, pozorovaná v přístroji na azimutální montáži, vyvolá dojem stáčení objektu. Rovněž zamíření přístroje do bodu v zenitu je poměrně obtížné.

Nejčastěji se můžeme setkat se dvěma typy azimutálních montáží. Základním typem je montáž velmi podobná fotografickému stativu doplněného o jemné pohyby v obou směrech. Vlastní hlava montáže pak bývá uchycena k vlastnímu stojanu-stativu nejčastěji tvořeného klasickou trojnožkou. Uchycení přístroje může být v tomto případě realizováno např. vidlicí. Tato konstrukce je vhodná pro uchycení např. refraktorů. Pro uvedenou konstrukci není problém v případě potřeby dořešit i jemné pohyby nutné k pohodlnému sledování pozorovaných objektů.

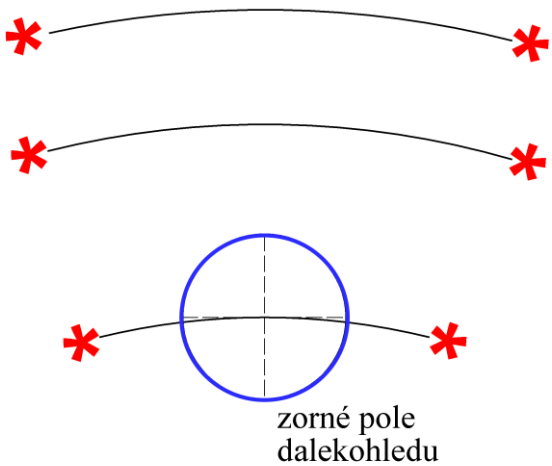
Azimutální montáže lze konstruovat velmi robustní. Příkladem tohoto typu je **Dobsonova** montáž Newtonových dalekohledů (obr. 5.3b). Dalekohled

je uchycen v těžišti do kolébky, která se otáčí na čepu na azimutální desce. Tato konstrukce je velmi nízká a stabilní. Přitom pro ni platí veškeré výhody azimutálních montáží. Jednoduchá konstrukce umožňuje snadnou aplikaci i Newtonových dalekohledů se zrcadly velkých průměrů. Montáže jiných typů by u nich nebyly vůbec realizovatelné, popř. jen za cenu velkých finančních nákladů.

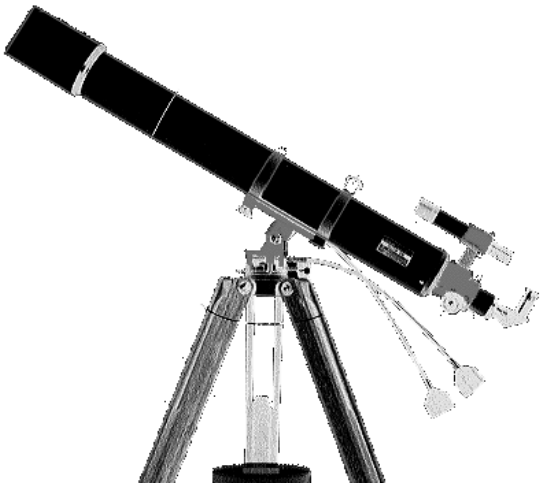


a) b)

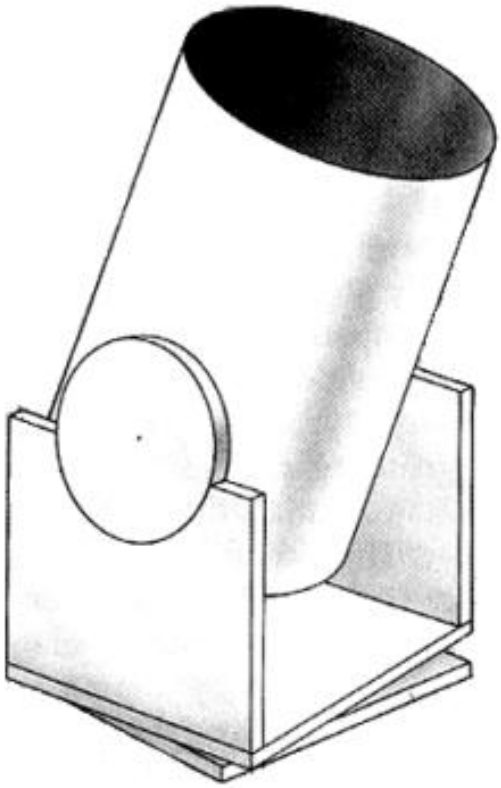
Obr. 5.1 Azimutální (a) a paralaktická (b) montáž



Obr. 5.2 Stáčení polohy objektu při sledování azimutální montáží



a)



b)

Obr. 5.3 Azimutální montáž:

a) klasická křížová montáž na stativ,

b) Dobsonova montáž

5.1.2 Paralaktická montáž

Zatímco pro vizuální pozorování lze azimutální montáž považovat za výbornou volbu, v případě, že chcete fotografovat delšími expozicemi je nutné kompenzovat vlastní pohyb sledovaných objektů (obr. 5.2). To umožňuje tzv. paralaktická (nazývaná též ekvatoriální) montáž. Azimutální montáž má svislou osu namířenu přímo do zenitu. Svírá proto s osou rotace Země úhel závislý na zeměpisné šířce místa pozorovatele. Pro kompenzaci pohybu Země je nutné tuto osu montáže sklonit tak, aby byla rovnoběžná s osou rotace Země, tj. tak, aby svírala s vodorovnou rovinou úhel rovný zeměpisné šířce našeho místa. Na severní polokouli přibližný směr udává pozice hvězdy Polárky. Tuto osu pak u paralaktické montáže nazýváme hodinovou, popř. též polární (obr. 5.1b). Pro udržení hvězdy v zorném poli pak stačí, když se přístroj kolem této osy otáčí rychlostí jedné otáčky za den. Mechanismus, který otáčí montáží kolem polární osy se nazývá z historických důvodů hodinový stroj. Pokud jím není paralaktická montáž vybavena již přímo z výroby, lze jej zpravidla snadno doplnit. Osu kolmou k polární ose nazýváme deklinací.

Druhů paralaktických montáží je celá řada. Pro astronomy amatéry jsou nejzajímavější montáže německé a vidlicové. **Vidlicová** paralaktická montáž (obr. 5.4b) je velmi podobná vidlicové montáži azimutální. Podobnost obou typů montáží velmi často vede výrobce astronomických přístrojů k tomu, že kombinují obě řešení do jediného. Azimutální montáž je doplněna mechanismem pro nastavení sklonu svislé osy – tzv. paralaktickým klínem. Ten může být jak součástí samotné montáže, tak (a to mnohem častěji) je volitelným příslušenstvím. Toto řešení je obzvláště vhodné pro Cassegrainův a Gregoryho dalekohled, popř. z nich odvozené katadioptrické systémy.

Německá paralaktická montáž (obr. 5.4a) patří mezi nejoblíbenější paralaktické montáže současnosti. U tohoto typu montáže je na kříži umístěn přístroj na jedné straně a na druhé je systém vyvážen závažím. Výhodou tohoto řešení je, že těžiště soustavy se nachází uprostřed v základně, což výrazně zvyšuje stabilitu tohoto řešení. Nevýhodou je nutnost neužitečné zátěže a nezbytnost vyvažování systému. Druhá podstatnější nevýhoda této montáže je v tom, že bez dalších úprav jí nelze nepřetržitě sledovat objekty od jejich východu až po jejich západ. V okolí meridiánu[3] je nutné montáž tzv. přeložit (otočit montáž o 180° kolem polární i deklinační osy). Tato vlastnost velmi ztěžuje některé typy astronomických pozorování. Obliba německé montáže spočívá v poměrně snadné rozložitelnosti, což výrazně usnadňuje její transport.

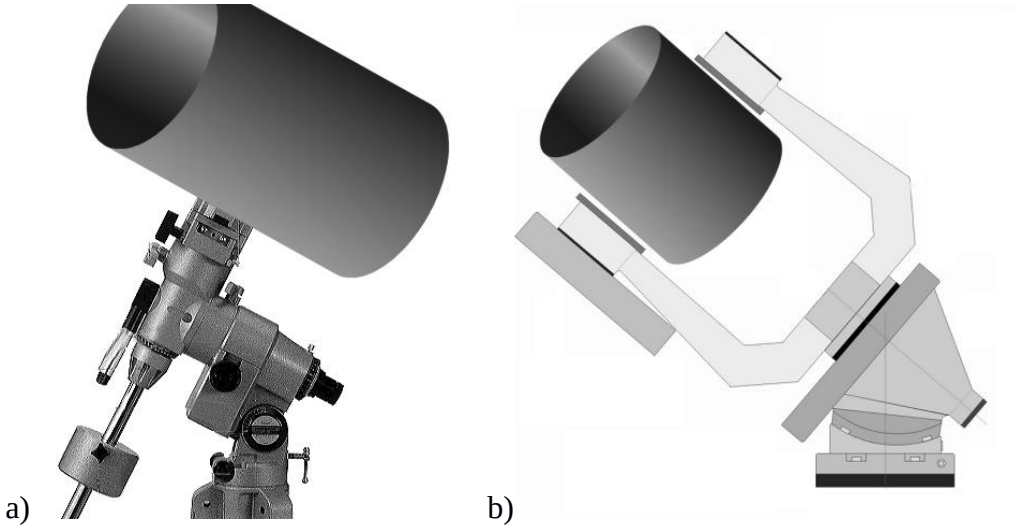
Mimo uvedené dva základní typy paralaktických montáží existuje celá

3 *Rovina meridiánu (tzv. místního poledníku) je dána severojížním směrem a zenitem. Při průchodu meridiánem hvězdy vrcholí (kulminují).*

řada jejich odvozenin a větších či menších úprav, ale i zcela originální konstrukce. Většina z nich je však zpravidla poměrně úzce zaměřena na určitý typ přístroje, popř. umístění montáže.

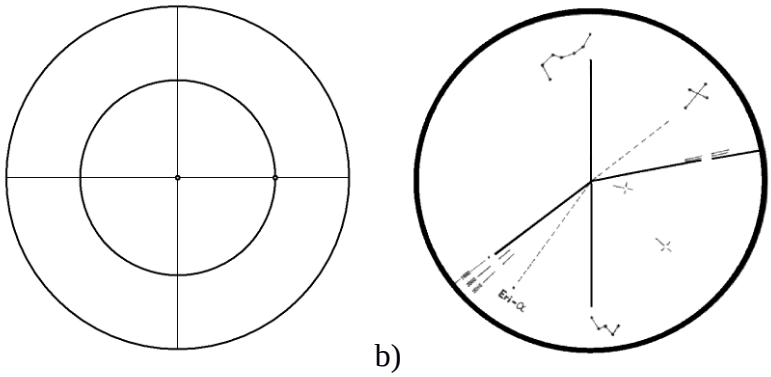
V souvislosti s paralaktickou montáží se můžete setkat s několika pojmy, které je dobré si objasnit. Již z principu uvedeného výše je jasné, že polární osa musí mít v prostoru poměrně přesně definovanou polohu. Proces nastavení polární osy tak, aby byla rovnoběžná s osou Země se nazývá **ustavení montáže**. Pro ustavení montáže je montáž vybavena pomocným nezávislým justážním mechanismem v azimutu i výšce. Pro první hrubou orientaci stačí zorientovat montáž pomocí kompasu (pozor na správně nastavenou magnetickou deklinaci daného místa) do zeměpisného severu a na výškové stupnici nastavit zeměpisnou šířku místa pozorovatele. Pro vizuální pozorování pak zpravidla zcela postačuje přibližná orientace na Polárku. Velmi dobrým pomocníkem pro přesnější ustavení je tzv. polární hledáček (obr. 5.5). Jde o pomocný dalekohled umístěný velmi často v duté polární ose (u německých montáží). V okuláru je umístěna ohnisková destička s křížem vyznačujícím polohu pólu a kresbou vyznačující požadovanou polohu Polárky pro aktuální datum a lokální čas nastavený na montáži. Ustavení pomocí polárního hledáčku je poměrně přesné a zcela postačuje pro vizuální pozorování i kratší fotografické experimenty.

V případě dlouhých expozicí je nutné ustavení ještě zpřesnit. K tomu je vypracována celá řada metod, mezi něž patří např. poměrně oblíbená **driftová metoda**. Ta je u některých typů montáží bez polárního hledáčku (např. vidlicové) i jednou z nejsnadnějších metod, jak zpřesnit ustavení montáže. Její podstata je velmi snadná. Mimo vlastní dalekohled potřebujete jen okulár se záměrným křížem (tzv. pointační okulár). Po ustavení stativu do vodorovné polohy a přibližné orientaci montáže zvolte nějakou jasnou hvězdu, která je v okolí meridianu poblíž světového rovníku. Vycentrujte hvězdu v zorném poli a sledujte její drift (pohyb v zorném poli). **Jestliže hvězda utíká k jihu, je polární osa příliš východně a naopak. Uchyluje-li se na sever, míří polární osa příliš západně.** Posuňte polohu polární osy správným směrem, vycentrujte hvězdu a celé pozorování opakujte dokud nezůstane hvězda ve směru sever-jih na místě (při zapnutém hodinovém stroji). Pokud hodinový stroj nemáte, musíte korekci provádět jemným pohybem kolem polární osy sami. Nyní vyberte hvězdu nad východním obzorem (nejlépe kolem 20° nad obzorem) poblíž nebeského rovníku. Vycentrujte ji a opakujte pozorování jako v předchozím případě. **Utíká-li hvězda k jihu, je polární osa příliš nízko. Uchyluje-li se hvězda k severu je polární osa naopak příliš vysoko (je třeba ji sklonit).** V případě, že použijete hvězdu nad západním obzorem jsou potřebné opravy opačné.



a) b)

Obr. 5.4 Paralaktická montáž: a) německá montáž, b) vidlicová montáž



a) b)

Obr. 5.5 Příklady ohniskových destiček (OD) polárního hledáčku:
a) OD polárního hledáčku SkyWatcher,
b) OD polárního hledáčku Losmandy

5.1.3 Automatizované montáže

Nalezení objektu na obloze vyžaduje určitou dávku zkušeností. Více či méně sofistikovaných metod pro nastavení dalekohledu do požadovaného směru je celá řada. Vždy ale platí, že nalezení objektu je obtížnější s jeho klesající intenzitou. Snaha o zjednodušení jeho nalezení vedla až k úplné či dílčí automatizaci celého procesu.

Nejjednodušším prvkem „automatizace“ jsou vlastní mechanické stupnice na montáži. Přímé nastavování požadovaných souřadnic objektu však zpravidla není dostatečně přesné. Existují sice postupy na zpřesnění jejich využití, to vše však klade další požadavky na pozorovatele. Za prvek skutečné

dílčí automatizace lze považovat mezi amatéry velmi oblíbené tzv. **digitální kruhy** (DSC – digital setting circle). V tomto případě jsou mechanické stupnice nahrazeny snímači, které snímají otáčení dalekohledu kolem os montáže. Signál ze snímačů je následně přepočítán na reálné souřadnice dalekohledu. Při známých souřadnicích hledaného objektu pak lze poměrně snadno koordinovat vlastní pohyby montáže správným směrem. V případě digitálních kruhů je tento pohyb zpravidla ruční. Výhodou tohoto doplňku montáže pak je, že jej lze velmi snadno aplikovat prakticky na jakýkoliv typ montáže a to i dodatečně. Mnohem pokročilejší jsou systémy s motorizovaným vystavením požadovaného objektu – tzv. **GoTo**. Tyto systémy jsou zpravidla doplněny rozsáhlými databázemi různých typů objektů. Rovněž je jejich součástí celá řada doplňkových funkcí pro usnadnění práce s přístrojem (např. GPS).

Stejně jako téma reflektor či refraktor je i téma montáže na astronomických fórech na celé Zemi častým tématem horlivých debat. Nutno ovšem říci, že podobně jako v diskuzích nad ideálním dalekohledem ani v tomto případě jednoznačná odpověď prostě neexistuje. Pro začínající pozorovatele je bezesporu vhodná azimutální montáž doplněná vhodným dalekohledem. Naopak pro zájemce o astrofotografii deep sky objektů je paralaktická montáž nezbytností. Rovněž se poměrně těžko hledá odpověď na otázku zda automatizované/GoTo systémy ano či ne. Začínající astronom-amatér by si měl určitě nejprve osvojit základní orientaci na obloze. Z tohoto pohledu je určitě výhodnější věnovat prostředky na nákup kvalitního přístroje. Naopak při pozorování slabých deep sky objektů může jejich nalezení trvat i poměrně dlouhou dobu. Pokud není vlastní hledání těchto objektů pro vás i určitým druhem sportu, je GoTo systém tím ideálním řešením.

5.2 Další doplňkové příslušenství

V předchozích kapitolách jsme se již seznámili s celou řadou konstrukcí používaných v astronomii – čočkové i zrcadlové dalekohledy, různé konstrukce okulárů i základní astronomické filtry. Mimo nich se samozřejmě využívá celá řada dalších užitečných konstrukcí. Jednou z nich jsou **binokulární nástavce**. Výhody pozorování oběma očima jsou zřejmé. To, co běžně ve dne považujeme za samozřejmost - pohodlí a přirozenost tohoto způsobu pozorování, to v noci při pozorování „obyčejným“ přístrojem s jedním objektivem velmi často neplatí. Ne vždy je však možné realizovat přístroj se dvěma nezávislými optickými větvemi tak, jako jsou řešeny např. obyčejné triedry. Proto je v tomto případě velmi příjemné využít doplněk, který pozorování oběma očima umožní – binokulární nástavec. Uvnitř každého nástavce je důmyslná optická soustava, zpravidla hranolů, které rozdělí přicházející optický svazek z objektivu na dva.

Tato optická soustava způsobuje určitý úbytek světla. Podle kvality binokulárního nástavce se pohybuje řádově i kolem deseti procent. U kvalitního nástavce dosahuje světelná ztráta ale i pouhých jednotek procenta. Ztrátu světla ale většinou vykompenzuje intenzivnější zrakový vjem při pozorování oběma očima. Binokulární nástavce jsou výborným pomocníkem zejména při pozorování objektů naší sluneční soustavy. Určitou nevýhodou použití binokulárního nástavce je zpravidla omezenější zorné pole a nutnost počítat při nákupu s vyššími výdaji za okuláry (je nutno nakupovat dvojmo). Zařazením binokulárního nástavce do optické soustavy dojde k prodloužení optické dráhy paprsku. To by u některých konstrukcí znemožnilo korektní zaostření přístroje. V případě dlouhých refraktorů a zejména Newtonových dalekohledů je proto nutné prodloužení kompenzovat „protažením“ ohniskové vzdálenosti. Kompenzátor (v podstatě jde o slabou Barlowovu čočku kombinovanou se slabým korektorem zbytkové barevné vady vyvolané následujícími hranoly) se vkládá mezi binokulární nástavec a vlastní dalekohled. Prodloužení ohniskové vzdálenosti je samozřejmě nutné přizpůsobit volbu ohniskové vzdálenosti okulárů. Kompenzátor optické dráhy není zpravidla nutný u některých katadioptrických konstrukcí Schmidt-Cassegrain a Maksutov-Cassegrain, kde lze binokulární nástavec použít přímo. Vždy je však lépe předem si ověřit rozsah ostření daného konkrétního dalekohledu.

Dalším zajímavým doplňkem je **reduktor ohniskové vzdálenosti** a **rovnač pole**. Velmi často se oba prvky spojují do jediného výrobku. Funkčně jde o speciálně navrženou spojnou soustavu, která se podobně jako v předchozím případě umisťuje na výstup dalekohledu před navazující prvky. Cílem reduktoru ohniskové vzdálenosti je zkrátit výslednou ohniskovou vzdálenost systému. Plní tedy opačnou funkci než již zmiňovaná Barlowova čočka. Toho lze s výhodou využít u systému s větší ohniskovou vzdáleností při potřebě zvětšit velikost výsledného zorného pole. Při zvětšení zorného pole dojde k zvýraznění zbytkových aberací, zejména zklenutí (zakřivení obrazové roviny). Rovnač pole pak má primárně za úkol toto zvětšené zorné pole „opravit“ tak, aby ve výsledné obrazové rovině byl pozorován obraz dostatečně kvalitní. Reduktor/rovnač pole je určen primárně pro CCD a astrofotografii. Lze jej však zpravidla využít i při vizuálním pozorování. Díky němu lze u některých konstrukcí (např. Schmidt-Cassegrain) realizovat pozorování jinak jen z těží myslitelná.

6. Základní pravidla používání optických přístrojů

6.1 Používání dalekohledu

Používání dalekohledu není žádná velká věda. Optický přístroj je nicméně poměrně jemné mechanické zařízení . Vyplatí se proto dodržovat pár základních zásad.

Velmi často je vlastní dalekohled uložen doma a na místo pozorování se musí dopravit. Zejména v zimě je vystaven poměrně velkému rozdílu teplot. Sklo je materiál s poměrně malou tepelnou vodivostí. Vyrovnání teplot okolí a přístroje proto může trvat poměrně dlouho. Po dobu vyrovnávání teplot může být obraz vytvářený dalekohledem poměrně nekvalitní v některých případech až nepoužitelný. Po umístění dalekohledu na pozorovací stanoviště je nutné počítat s určitou dobou na temperování. Její délka je závislá na velikosti rozdílu teplot, ale i konkrétním dalekohledu. Nejméně citlivé jsou na vlastní temperaci refraktory. Velmi dobře temperují otevřené konstrukce – např. Newtonův dalekohled. Zde závisí i na materiálu, z jakého je vyrobeno zrcadlo. Mimo běžného optického skla (např. BK7) se používají i materiály s malou teplotní roztažností (SUPRAX, PYREX, apod.). Zrcadla zhotovená z těchto materiálů temperují velmi rychle a doba temperace je oproti běžnému optickému sklu i poloviční až čtvrtinová. Nejdelší dobu na tepelné vyrovnání potřebují katadioptrické systémy, zejména pak Maksutov-Cassegrain. Zatímco doba temperace malého refraktoru či otevřeného Newtona s hlavním zrcadlem z Pyrexu je řádově desítky minut, tak doba temperace větších průměrů Maksutovova dalekohledu je při velkém rozdílu teplot i jedna až dvě hodiny. V případě rychlejšího poklesu teplot během pozorování je možné pozorovat zhoršení kvality obrazu. To je poměrně přirozený důsledek vlastností dalekohledu. Nejedná se tedy o jeho závadu. Zpravidla stačí určitou dobu počkat na nové tepelné vyrovnání přístroje. Tímto neduhem trpí hlavně katadioptrické systémy – jmenovitě již zmíněný Maksutov-Cassegrain.

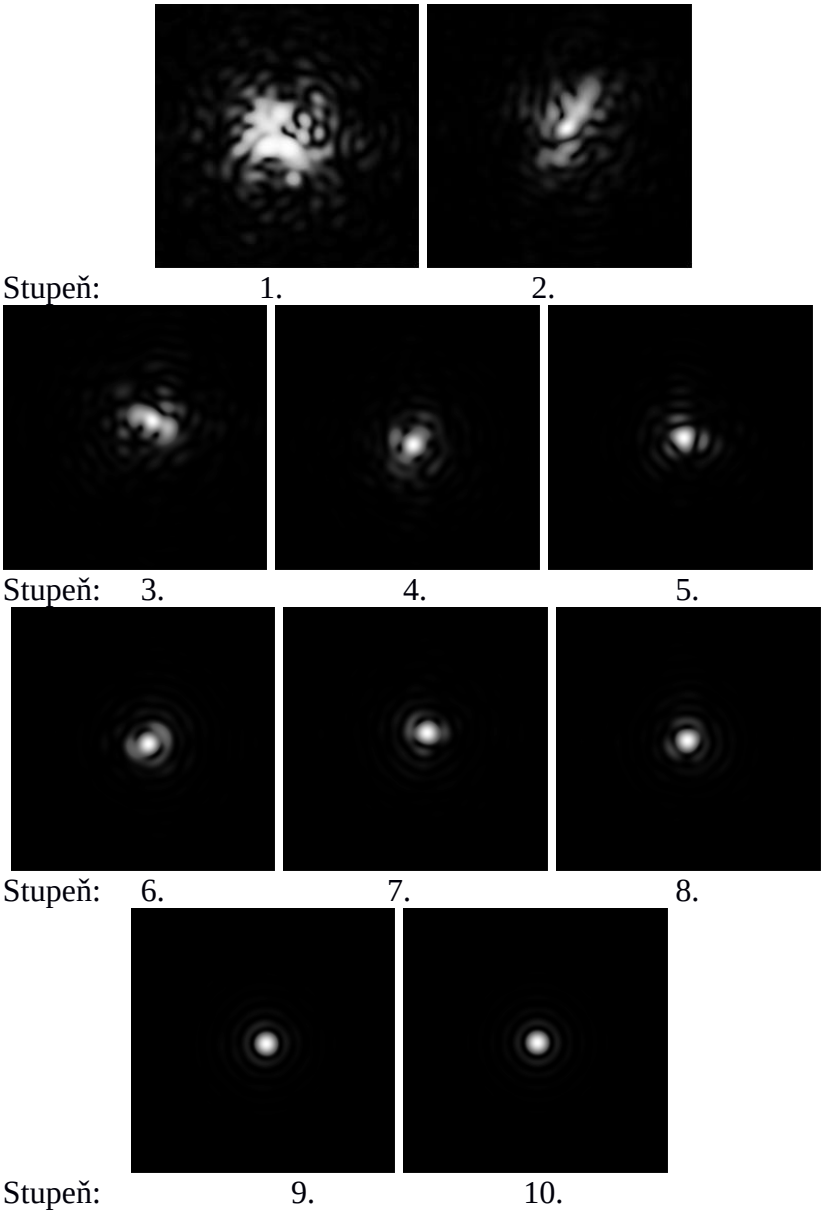
Ani kvalitní dalekohled spolu s dokonalým teplotním vyrovnáním nemusí nutně znamenat kvalitní obraz při pozorování. Viníkem není přístroj ani naše uživatelská chyba, ale atmosféra Země. Vzduchové vrstvy mezi námi a pozorovaným objektem nejsou prakticky nikdy zcela homogenní, ani v klidu. To má za následek „chvění“ části obrazu a jeho rozbití na fragmenty. Při velkých zvětšeních pak můžete pozorovat obraz, který je málo kontrastní, neustále se vlní a deformuje. Použité zvětšení pak musíte přizpůsobit (zmenšit) úměrně aktuální situaci. Stav atmosféry je zpravidla hodnocen pomocí různých

stupnic. V tabulce 6.1 je doporučená desetistupňová stupnice seeingu i s charakteristikami na výsledný obraz.

Při přepravě dalekohledu je ho nutno chránit před nadměrnými otřesy. Některé konstrukce (např. refraktory) jsou vůči otřesům poměrně odolné, jiné (např. Newtonův dalekohled) je snášejí hůře. Zpravidla sice nehrozí přímé fyzické poškození, po přepravě je ale občas nutné takovýto dalekohled zkolimovat.

Tab. 6.1 Desetistupňová stupnice seeingu

Stupeň	**Popis**
1	Obraz hvězdy je silně proměnný se stěží určitelným středem, jeho průměr větší než 14“
2	Difrakční obrazec není pozorovatelný, obraz hvězdy se mění a dosahohuje průměru 13-14“
3	Difrakční obrazec je prakticky nerozeznatelný, obraz hvězdy je jasnější ve středu, jeho průměr dosahuje průměru 6-7“
4	Airyho disk je viditelný jen občas, krátké fragmenty difrakčního kroužku jsou viditelné jen na krátké okamžiky
5	Airyho disk je ještě rozeznatelný, viditelné jsou proměnné fragmenty difrakčního kroužku
6	Airyho disk je viditelný, difrakční kroužek je ještě rozeznatelný, je rozbit na krátké obloučky
7	Airyho disk je po většinu času ostře ohraničen, difrakční disk tvoří dlouhý oblouk nebo je celý, je neustále v pohybu
8	Airyho disk je ostře ohraničen, disk je viditelný neroztříštěný, po většinu času je v pohybu
9	Airyho disk i vnitřní kroužek jsou stabilní, vnější stabilní po většinu času
10	Celý difrakční obraz hvězdy je stabilní



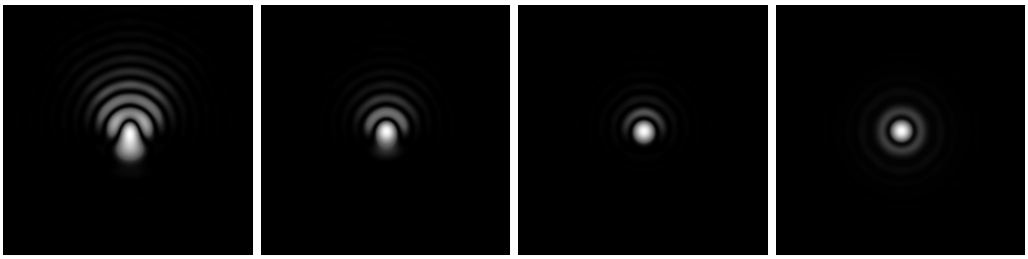
Obr. 6.1: Vliv seeingu na zobrazení hvězdy
(vygenerováno programem Aberrator).

6.2 Kolimace dalekohledu

Kolem kolimace dalekohledu je celá řada mýtů a pověr. Přitom její podstata i vlastní provedení je poměrně snadné. Cílem kolimace dalekohledu není nic jiného než dosažení takové vzájemné pozice optických ploch (zrcadel), aby výsledné zobrazení bylo co nejkvalitnější. V podstatě jde o snahu dosáhnout sesouhlasení optických os jednotlivých optických členů soustavy. K tomu je soustava (uložení zrcadel) vybavena stavěcími šrouby. Zpravidla jsou využity v kombinaci dva typy – tlačný/oporný a tažný/stavěcí.

Konkrétní postup kolimace pak závisí na konkrétním typu a konkrétní konstrukci daného přístroje. Během běžného užívání prakticky není nutné kolimovat všechny refraktory. Katadioptrické systémy vyžadují kolimaci jen příležitostně. Asi nejcitlivější na rozsouhlasení např. během přepravy jsou otevřené konstrukce s uchyceným sekundárním zrcadlem pomocí tří nebo čtyř ramenného kříže (tzv. pavouka). Typickým zástupcem této konstrukce je Newtonův dalekohled. Obecně lze říci, že tyto dalekohledy jsou zpravidla tím citlivější na přesnou kolimaci, čím mají větší světelnost.

Ověřit, zda je dalekohled nutno zkolimovat, je velmi snadné. Postačuje zamířit dalekohled na jasnou hvězdu a trošku rozostřit. Mimo rozostřeného obrazu hvězdy budeme u systému se sekundárním zrcátkem pozorovat uprostřed jeho tmavý stín a ve vlastním obrazu hvězdy tmavé kroužky. Pokud je kolimace korektní, musí být celý obrazec symetrický kolem středu - stín sekundárního zrcadla je umístěn uprostřed a kolem něj tmavé kroužky. Při použití většího zvětšení (cca dvojnásobku průměru objektivu) lze za velmi dobrých podmínek pozorovat dokonce difrakční obrazec přímo bez rozostření. V tom případě při korektní kolimaci uvidíme uprostřed jasný Airyho disk obklopený difrakčními kroužky. I tyto kroužky musí být symetrické kolem středu. Při posuzování kolimace musí být obraz hvězdy co nejvíce ve středu zorného pole. Rovněž musí být dalekohled teplotně vyrovnán.



a) b) c) d)

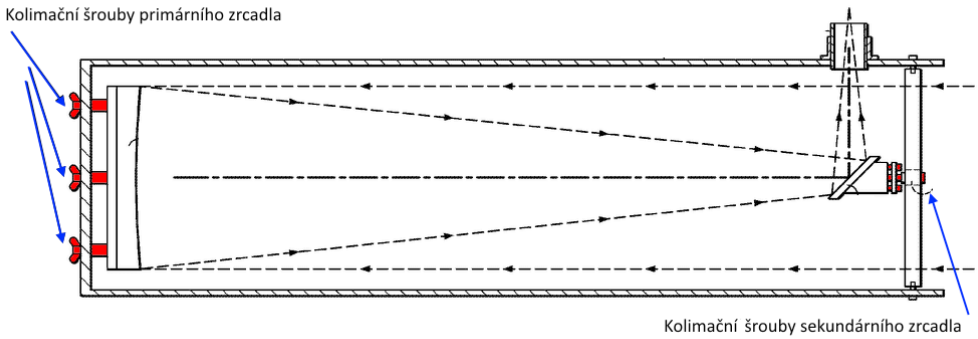
Obr. 6.2 Obraz hvězdy v postupně kolimovaném dalekohledu:
a)-c) špatně zkolimovaný přístroj, d) korektně zkolimovaný přístroj

6.2.1 Kolimace Newtonova dalekohledu mechanickým kolimátorem

Kolimace je snadný uživatelský úkon, ke kterému postačí jednoduché prostředky. Pokud nemáte k dispozici kolimační okulár, případně laserový kolimátor, je možné si vyrobit kolimační přípravek např. z plastové krabičky od 35 mm filmu (pro kolimaci dalekohledů s 1,25" výstupem). Do víčka udělejte přesně ve středu malý otvor a krabičce odřízněte dno. Tento nástroj vám pomůže udržet oko ve středu okulárového výtahu.

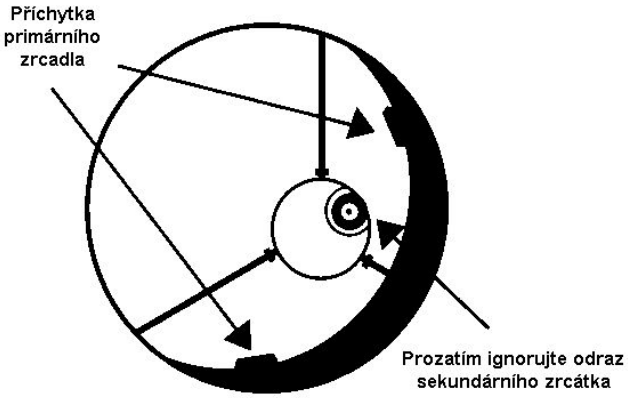
Obr. 6.3 Kolimační okulár - Chesire kolimátor určený pro kolimaci systému Newton

Newtonův dalekohled má dvě optická zrcadla, která bude nutno seřídit. Primární zrcadlo Newtonova dalekohledu je zpravidla uloženo v objímce a je držené na místě třemi příchytkami v rozestupu 120 °. Nahoře je oválné sekundární zrcátko, umístěné na držáku a nakloněné o 45 ° směrem k okulárovému výtahu. Primární zrcadlo se zpravidla seřizuje pomocí soustavy 2x3 šroubů ze spodní strany objímky (jeden slouží k seřízení a druhý k zajištění). Sekundární zrcátko se seřizuje středovým šroubem (ten pohybuje zrcátkem nahoru a dolů v tubusu) a třemi menšími šroubky okolo, které nastavují náklon zrcátka.



Obr. 6.4 Poloha kolimačních šroubů u Newtonova dalekohledu

Stav před kolimací. Nasaďte přípravek na okulárový výtah na místo okuláru. Namiřte proti světlému pozadí (obloha, stěna) a pokud se vám ukáže v kolimačním okuláru (přípravku) zhruba obrázek jako na obr. 6.5, je čas dalekohled zkolimovat.

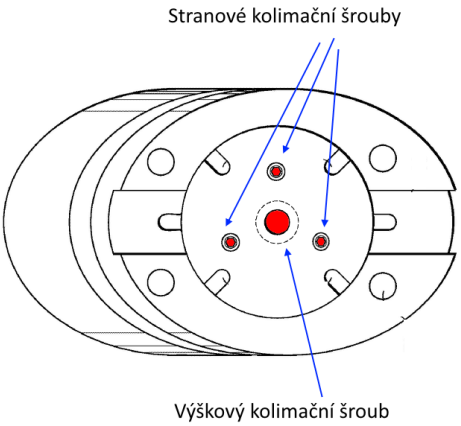


Obr. 6.5 Pohled do tubusu Newtonova dalekohledu

Vlastní kolimace probíhá ve dvou krocích (toto pořadí je nutno dodržet):

1. Seřízení sekundárního zrcátka.
2. Seřízení primárního zrcadla.

1. Seřízení sekundárního zrcátka

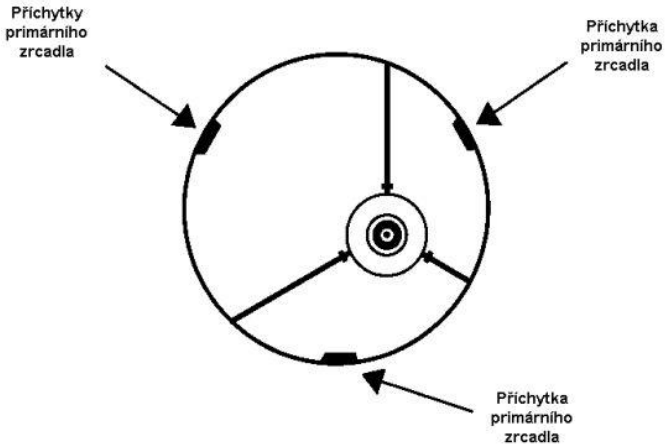


Obr. 6.6 Uložení sekundárního zrcátka a kolimační šrouby

Namiřte dalekohled na světlé místo a nasaďte kolimační nástavec místo okuláru na okulárový výtah a podívejte se do něj. Je možné, že budete muset pootočit zaostřováním, abyste neviděli okraj okulárového výtahu. Prozatím ignorujte odraz sekundárního zrcátka (s vaším okem nebo kolimátorem)

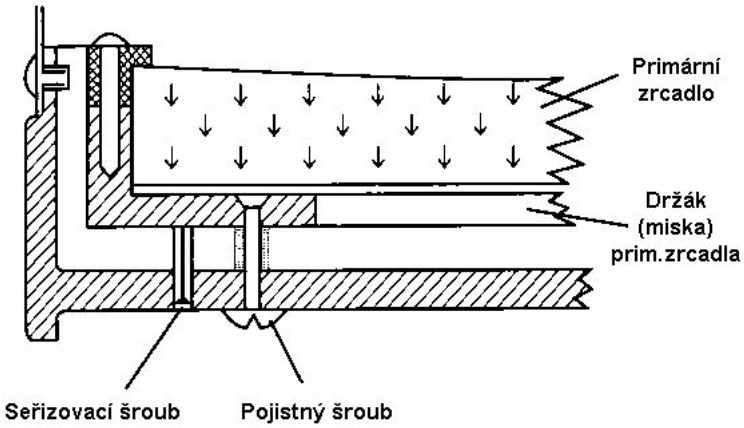
a zaměřte se na tři příchytky primárního zrcadla. Pokud je nevidíte, znamená to, že budete muset pohnout sklonem sekundárního zrcátka (třemi šroubky stranového náklonu) a to buď imbus klíčem nebo křížovým šroubovákem. Střídavě povolujte jeden a utahujte ostatní dva šroubky, dokud neuvidíte symetricky všechny tři příchytky primárního zrcadla. Poté se ujistěte, že tři šroubky sekundárního zrcátka jsou utažené a zrcátko je pevně uchyceno na místě. Snažte se dosáhnout vycentrování obrazu tak, jak je ukázáno na obr. 6.7.

Pokud vidíte při pohledu na sekundární zrcátko toto zrcátko celé, není nutno výškový šroub znovu seřizovat. Proto s ním není-li to nutné nemanipulujte.



Obr. 6.7 Seřízení sekundárního zrcátka Newtonova dalekohledu

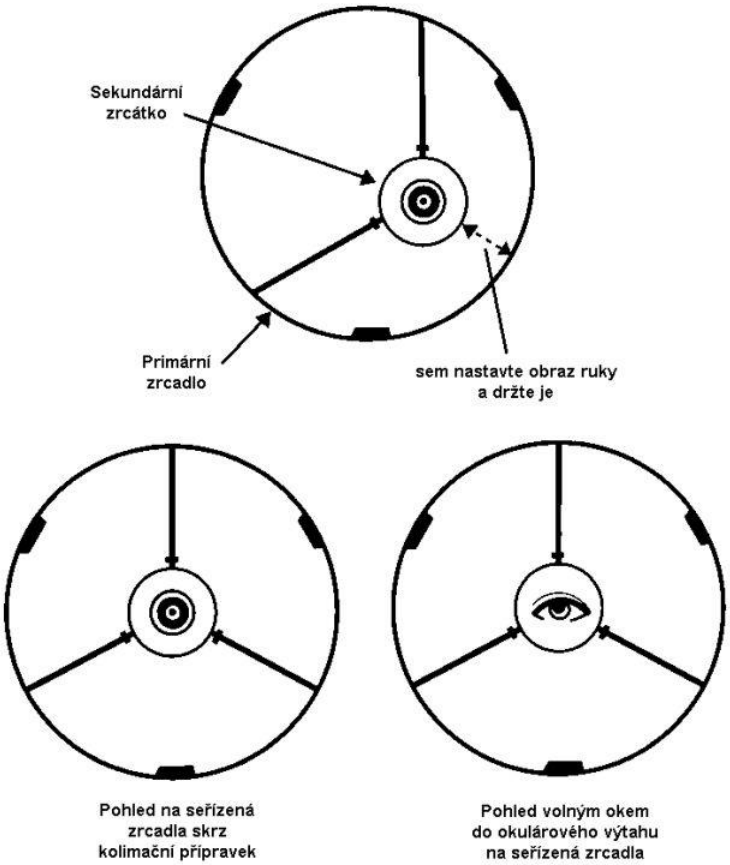
2. Seřízení primárního zrcadla



Obr. 6.8 Uložení primárního zrcadla Newtonova dalekohledu

Několika otočkami uvolněte tři pojistné šrouby primárního zrcadla na zadní části (dně) tubusu. Pokud jsou na dně 3 velké rýhované šrouby a 3 malé křížové šrouby, křížové jsou pojistné a rýhované jsou stavěcí (seřizovací). Pokud je na dně 6 křížových šroubů, pak 3 jsou dotaženy až po hlavu a 3 vyčnívají (nejsou zcela dotaženy). Pak 3 vyčnívající jsou pojistné a 3 dotažené jsou stavěcí. Pokud jsou na dně 3 křížové a 3 imbus šrouby, potom 3 imbus šrouby jsou pojistné a 3 křížové jsou stavěcí.

Přiložte oko k okulárovému výtahu (bez okuláru) a rukou pohýbejte okolo vnitřního okraje ústí tubusu. Ve výtahu uvidíte odraz své ruky. Ruku zastavte tam, kde je odraz sekundárního zrcátka nejblíže okraji primárního zrcadla. Držte ruku na tomto místě a přesvědčte se, zda na konci je v tomto směru stavěcí šroub. Pokud ano, pomalu jej povolte (doleva) a tím pohnete primárním zrcadlem směrem do středu. Pokud tam stavěcí šroub není, šroub na protilehlé straně dna utáhněte (doprava). Takto proces opakujte, dokud není obraz zcela symetrický dle obrázku 6.9.



Obr. 6.9 Seřízení primárního zrcadla Newtonova dalekohledu

Výhodou je, může-li vám někdo s kolimací pomoci, zejména u větších průměrů dalekohledů. Poté utáhněte pojistné šrouby, aby primární zrcadlo zůstalo pevně v seřízené poloze.

Výsledek svého úsilí zkontrolujte za dobrých pozorovacích podmínek na obrazu jasné hvězdy. Jsou-li odchylky malé, lze korekci kolimace provést i v noci pouze primárním zrcadlem. Nemáte-li na dalekohledu instalován hodinový stroj, zajišťující automatické sledování hvězd (např. dalekohledy Dobson), hodí se ke kolimaci Polárka, jejíž pohyb je nepatrný.

Ke kolimaci je možné použít také laserový kolimátor. Práce s ním je mnohdy pohodlnější, lze ji provádět i za bílého dne, i když může skrývat některá uskalí.

6.2.2 Kolimace Newtonova dalekohledu laserovým kolimátorem

Cílem kolimace je stav, kdy laser po odrazu nejprve na sekundárním a pak na hlavním zrcadle dopadne po stejné dráze opět na sekundární zrcátko a odrazí se zpět do kolimátoru. Tam jej uvidíte bočním otvorem na středu terčíku. Rovněž kolimace laserovým kolimátorem (obr. 6.10) se provádí ve dvou krocích a to seřízení polohy sekundárního zrcadla a seřízení polohy primárního zrcadla.

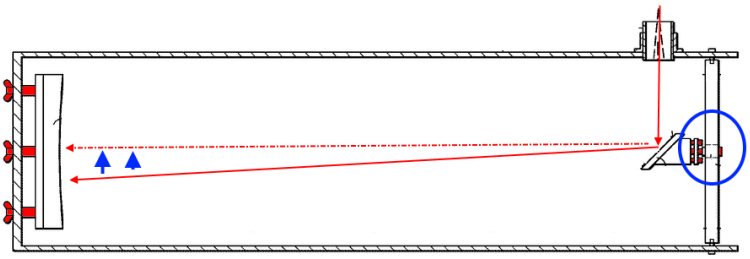
Obr. 6.10 Laserový kolimátor pro kolimaci zrcadlových systémů

1. Seřízení polohy sekundárního zrcadla

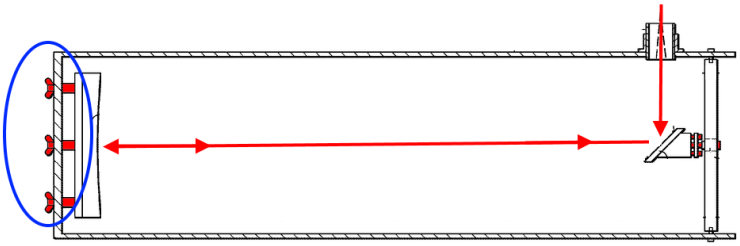
Seřízení se provádí nastavením místa dopadu laseru na primárním zrcadle stavěcími šrouby sekundárního zrcátka. Zasuňte kolimátor do okulárového výtahu a rozsviťte laser kolimátoru. Nastavujte stavěcí šroubky 1, 2 a 3 na sekundárním zrcátku, dokud laserový paprsek nedopadá přesně doprostřed hlavního zrcadla (většina dalekohledů jej má vyznačen terčíkem).

2. Seřízení polohy primárního zrcadla

Pohybem ruky před ústím dalekohledu zjistěte, zda se laserový paprsek neodráží tubusem ven mimo sekundární zrcátko. Pokud ano, stavěcími šrouby hlavního (primárního) zrcadla nastavte hlavní zrcadlo tak, aby se laserový paprsek odrážel zpět na sekundární zrcátko. Pak jej uvidíte na terčíku kolimátoru a další justáží hlavního zrcadla nastavte laserový bod do středu terčíku.



Obr. 6.11 Seřízení sekundárního zrcadla laserovým kolimátorem



Obr. 6.12 Seřízení polohy primárního zrcadla laserovým kolimátorem

6.2.3 Kolimace katadioptrických systémů

Na rozdíl od Newtonova dalekohledu je kolimaci u katadioptrických systémů (např. velmi oblíbený systém Schmidt-Cassegrain) možné realizovat jen pomocí seřízení polohy jednoho zrcadla. O to pečlivěji ale musí být provedena.

Obr. 6.13 Čelní pohled na dalekohled typu Schmidt-Cassegrain

Obr. 6.14 Zadní pohled na dalekohled typu Maksutov-Cassegrain

Nejčastěji je primární zrcadlo pevně uloženo v pohyblivém loži vnitřního tubusku zadní objímky. V tomto případě spočívá vlastní kolimace v seřízení polohy sekundárního zrcátka pomocí 3 šroubů na něm umístěných (např. systém Schmidt-Cassegrain). Druhým případem je situace, kdy je sekundární zrcátko napařeno na korekční desku (systém Maksutov-Cassegrain). V tomto případě je zrcadlo uloženo na vnitřním tubusku zadní objímky ve speciální misce, která umožňuje jeho polohování podobným způsobem jako

např. primární zrcadlo systému Newton. To znamená, že na jeho zadní straně nalezneme tři dvojice stavěcích a pojistných šroubů. Po povolení pojistných šroubů je seřízení obou systémů prakticky shodné (jen nezapomeňte na závěr opět tyto pojistné šrouby jemně a rovnoměrně dotáhnout).

Asi nejsnadnější je využít **kolimace na hvězdu**, která je vhodná prakticky pro všechny dalekohledové systémy. Výhodou je, pokud máte umělou hvězdu. Filozofie kolimace katadioptrického systému se svým postupem příliš neliší od seřizování jiných zrcadlových systémů. Proto ji uvedeme jen v základních krocích. Namiřte přístroj na středně jasnou hvězdu tak, aby hvězda byla v centru zorného pole. V prvním kroku nepoužívejte jeho okraje, ale opravdu střed. Při kolimaci by měl v tomto kroku stačit základní okulár (zvětšení odpovídající polovině průměru zrcadla v mm).

Nyní zaostřete hvězdu a trošku ji rozostřete, dokud neuvidíte klasickou „koblihu" (světlý kotouček s tmavým středem). Střed tmavého obrazce musí být dokonale vycentrovaný. Pakliže je temný střed „koblihy“ decentrovaný (což na 90 % bude tento případ), vycentrujte jej stavěcími šrouby. V případě kolimace pomocí sekundárního zrcadla je nutno pouze dodržet pravidlo, že pokud se jeden povolí, musí se oba protilehlé šrouby dotáhnout a naopak (nejprve se vždy povoluje a teprve pak protilehlé dotahují). V případě kolimace prostřednictvím polohování primárního zrcadla nezapomínejte úměrně povolit/utáhnout pojistné šrouby. Z počátku je možné zpravidla otáčet trochu rychleji (cca 1/4 otáčky šroubu), později jen jemně (max. 1/16 otáčky i méně).

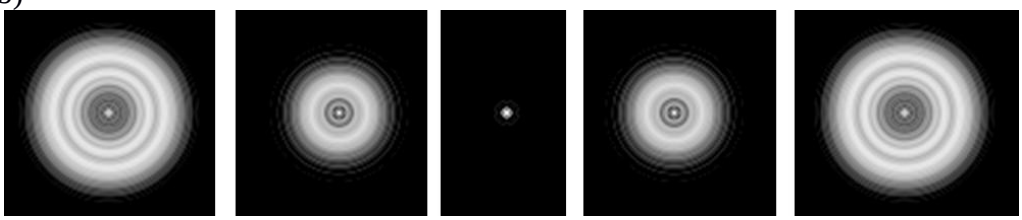
Při každém pootočení dojde i k posunutí obrazu hvězdy. Po každém takovém povolení/dotažení šroubů je proto nutno znovu vycentrovat obraz hvězdy na střed zorného pole. Po kontrole vycentrování následuje zpravidla znovu předchozí krok. Další vodítko, které pomůže ve vycentrování jsou tmavší soustředné kruhy uvnitř obrazce. Postupně, jak se kolimace bude blíží ideální pozici, jsou ostřejší. Zpravidla je vhodné rozostřit obraz hvězdy během kolimace na 3-7 kroužků. Při počátku kolimace nastavte více kroužků, později, během kolimování, lze jejich počet mírným doostřením snížit.

Nyní lze přistoupit k druhému kroku – zjemnění kolimace. Zpravidla ale je nutné si počkat na vhodné podmínky. To je výhoda využití umělé hvězdy. V této fázi je nutno použít zvětšení větší (min. rovno průměru primárního zrcadla v mm, lepe více - až dvojnásobek průměru). Opět je nutno zvolit vhodnou hvězdu. Tentokráte se ale budeme zajímat o difrakční proužky v ohnisku, popř. tmavé proužky (max. 3) v okolí zaostření. Vlastní difrakční kroužky jsou u velkých průměrů pozorovatelné zpravidla obtížněji. Další postup je podobný tomu předešlému. Opět je tedy nutno vycentrovat zvolenou hvězdu a podobně jako v předešlém případě seřídit vycentrování středu obrazce vůči kroužkům. Kroužky musí byt koncentrické s jasným středem (Airyho diskem).

a)

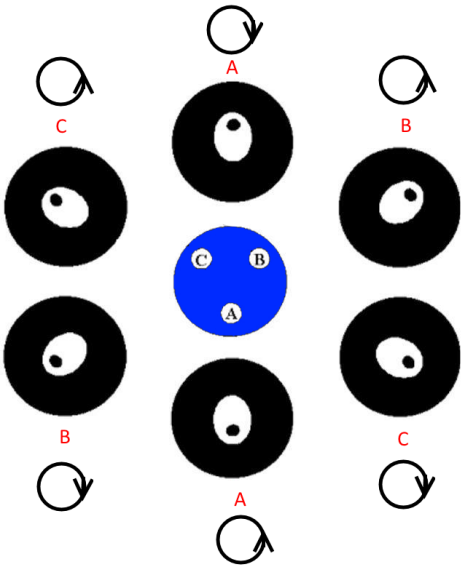
zobrazení: před ohniskovou rovinou v ohnisku za ohniskovou rovinou;

b)



zobrazení: před ohniskovou rovinou v ohnisku za ohniskovou rovinou;

Obr. 6.15 Kolimace dalekohledu – obraz hvězdy při ostření dalekohledu: a) rozkolimovaný, b) správně seřízený přístroj



Obr. 6.16 Nápověda pro kolimaci dalekohledu Schmidt-Cassegrain

Obrázek 6.16 je pomůckou pro volbu správného šroubu při kolimaci dalekohledu Schmidt-Cassegrain s vyznačenými šrouby (A-B-C) a směrem jejich otáčení v závislosti na obrazu pozorované hvězdy. Hvězda se musí nacházet ve středu zorného pole. Pro systém Maksutov-Cassegrain lze použít stejnou tabulku, jen smysl otáčení je opačný.

6.2.4 Kolimace refraktorů

Oproti zrcadlovým soustavám jsou refraktory značně mechanicky odolnější a potřeba jejich kolimace je velmi malá. Menší průměry objektivů dokonce ani často žádné kolimační mechanismy nemají. Zpravidla se totiž provádí naklápěním objímky objektivu pomocí stavících a pojistných šroubů (podobně jako např. pohyb primárního zrcadla u Newtonova dalekohledu). Zpravidla jsou opět uspořádány do tří dvojic (justážní a pojistný).

Obr 6.17 Kolimační šrouby refraktoru

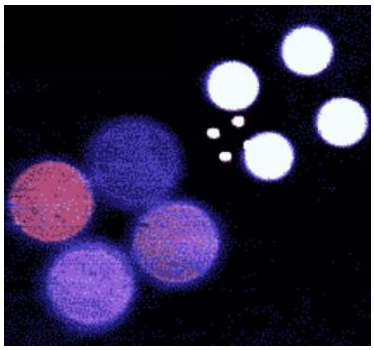
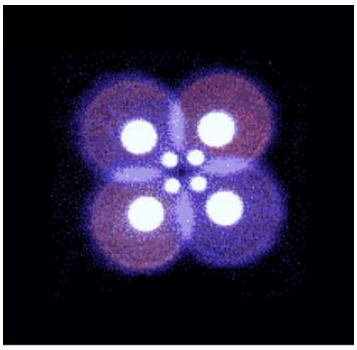
Pro hrubou kolimaci lze využít laserový kolimátor (obr. 6.10) určený původně pro Newtonův dalekohled. Pro přesné seřízení ale není jeho citlivost dostatečná. Pak je vhodnější např. metoda **kolimace na hvězdu** popsaná v předchozí kapitole. Cílem je dosáhnout obrazu hvězdy se soustřednými difrakčními kroužky (viz předchozí kapitola).

Obr. 6.18 GMK kolimátor

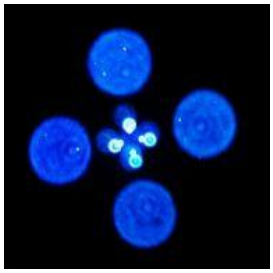
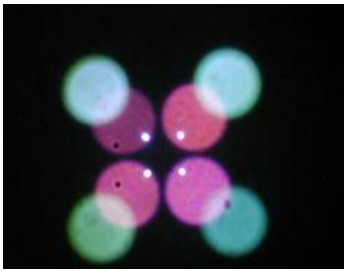
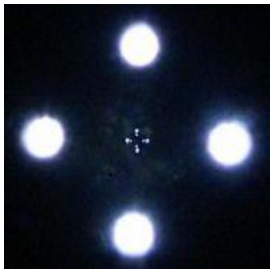
V případě potřeby kolimace během dne lze využít např. tzv. GMK

kolimátor (Grzybowski multifunkční kolimátor). Tento kolimátor (obr. 6.18) se umisťuje do okulárového výtahu podobně jako laserový kolimátor. Uvnitř má na své čelní straně skupinu do kříže uspořádaných LED, které zasvítí směrem k objektivu. Prostřednictvím okuláru pak pozorujete odraz těchto LED na jednotlivých optických plochách objektivu. Volbou vhodné ohniskové vzdálenosti okuláru lze volit citlivost a tím i přesnost seřízení.

Cílem seřízení je nastavit co nejsymetričtějšího obrazce (obr. 6.19). Toho dosáhnete postupným malým povolováním/utahováním jednotlivých justážních šroubů. GMK kolimátor umožňuje mimo vlastní kolimaci provést orientační kontrolu i celkového vycentrování objektivu. Pokud nelze obraz seřídit tak, aby byl dokonale symetrický a některé jeho barvy/části jsou oproti jiným trochu posunuty, signalizuje to problém s uložením/centrováním optického členu, na kterém vzniká příslušný odraz.

a)  b) 

Obr. 6.19 Kolimace prostřednictvím GMK kolimátoru:
a) rozkolimovaný refraktor , b) zkolimovaný refraktor

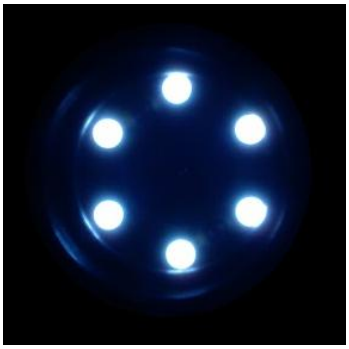
a)  b)  c) 

Obr. 6.20 Obrazy pozorované GMK kolimátorem:
a) mírně rozcentrovaný APO objektiv, b) zkolimovaný ED objektiv,
c) zkolimovaný Schmidt-Cassegrain

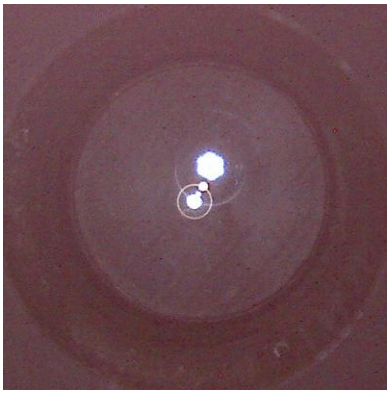
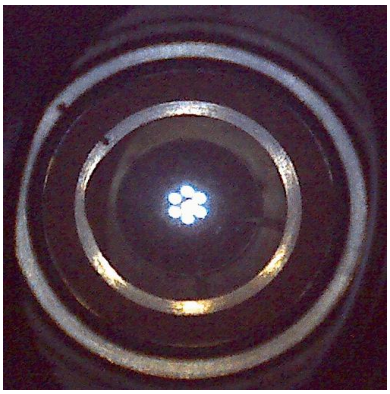
GMK kolimátor lze využít ke kolimaci všech základních optických

soustav - zrcadlových, čočkových i katadioptrických (obr. 6.20). Obdobně široké použití mají i digitální mikroskopické nástavce (obr. 6.21). V principu se jedná o digitální kameru, která je přeostřitelná od velmi krátkých ohniskových vzdáleností až po prakticky nekonečno. Na čelní straně (zasouvané do okulárového výtahu) je zpravidla osvětlovací soustava tvořená skupinou LED. Prostřednictvím mikrokopického nástavce pak podobně jako v případě GMK kolimátoru pozorujeme po zaostření obraz skupiny LED (obr. 6.22). Určitou výhodou i nevýhodou zároveň je zde možnost (a velmi často i nutnost) připojení k počítači pro zobrazení obrazu LED.

a)

b) 

Obr. 6.21 USB mikroskop s 1,25“ nástavcem:
a) vlastní mikroskop, b) osvětlovací LED (čelní pohled)

a) 
b) 

Obr. 6.22 Rozkolimovaná (a) a zkolimovaná (b) soustava refraktoru

7. Čištění optických členů

Při používání optických přístrojů si uživatel postupně povšimne nárůstu nejrůznějších nečistot na jednotlivých optických plochách. Zpravidla jde o miniaturní zrnka prachu, ale i pylů. Na očních čočkách okulárů jsou velmi častým jevem mastné skvrnky od řas víčka. Již tady je nutné zdůraznit, že většina těchto nečistot má vliv na snížení kvality pozorovaného obrazu naprosto minimální. Asi nejpodstatnějším vlivem je rozptyl světla na těchto nečistotách. Rozptýlené světlo je ale v drtivé většině odraženo zpět (ven od dalekohledu), popř. je pohlceno v tubusu. Tomu odpovídá i základní rada ohledně čištění. Pokud nejsou optické členy opravdu silně znečištěné, je nejlepší péče o ně, je nečistit.

7.1 Suché čištění

Není-li zbytí a je nutné optický přístroj vyčistit, je nutné postupovat s nejvyšší opatrností. Každé sebepečlivější čištění je obvykle spjato s mikroskopickým poškozením optické plochy. Proto je vhodné, pokud to je jen trochu možné, dát přednost bezkontaktním metodám čištění proudem vzduchu. Pro odstranění zrnek prachu je např. výhodné použít balónek na čištění optických členů nebo ještě lépe stlačený vzduch (popř. dusík). Speciální jemný štěteček na čištění optických členů je doporučeno používat jen pokud není zbytí. Korektní tahy štětečkem pak jsou krátké, lehké bez vynaložení síly a ve směru k okraji optické plochy (v tomto případě raději pouze čočky).

Pro čištění refrakčních členů lze v současnosti koupit i poměrně zajímavý a velmi účinný čisticí přípravek – tzv. **LensPen**. Je vyráběn v různých velikostech podle primárně předpokládaných čištěných ploch. Z jedné strany obsahuje tento nástroj jemný štětec na případné odstranění hrubých nečistot. Z druhé se pak pod krytkou skrývá malý zázrak – čisticí poduška pro odstranění nečistot z optického povrchu. Vlastní poduška je napuštěna čisticí směsí, která se u různých výrobců může trochu lišit. Zpravidla jde o oxidy hořčíku a uhlík ve speciální krystalické konfiguraci (jde o jakési miniaturní vločky). Jako celek pak LensPen umožňuje účinné odstraňování nečistot a to i mastných (např. nechtěného otisku prstu). Přitom rozhodně nemusíte mít obavy o případné narušení antireflexní vrstvy. Pomocí tohoto přípravku je jejich poškození nepravděpodobné. **Pro čištění zrcadel ale LensPen bohužel určen není**.

Obr. 7.1 Lenspen, optická utěrka a jemný štěteček

7.2 Mokré čištění

Mokré čištění by mělo být až tím posledním řešením, jak optický přístroj vyčistit. Některé nečistoty jsou poměrně úporné a nelze je odstranit jinak než důkladným očištěním pomocí čisticí lázně. Pro mokré čištění optických členů se používá celá řada roztoků. Jejich složení je velmi často tajemstvím jejich autorů. Některé jsou poměrně úzce zaměřeny na některé nečistoty, jiné zase na určité druhy optických prvků. Pro menší optické prvky a prvky, které nelze nebo není vhodné rozebrat (objektivy v objímkách, okuláry), je lépe využít postup, kdy je čisticí kapalina postupně nanášena. Některé optické členy, které jinak snáší mechanický kontakt hůře (typicky zrcadla), je lépe očistit v celkové čisticí lázni, kdy je mechanický kontakt s čisticím smotkem omezen na skutečné minimum.

Pro **lokální čištění, popř. postupné nanášení čisticí kapaliny**, patří mezi ty nejznámější a pravděpodobně i nejstarší a dříve nejoblíbenější roztoky na čištění nejen čoček tzv. Hoffmanské kapky[4]. Hoffmanské kapky jsou ideální čisticí prostředek na odstranění mastných nečistot (např. otisků prstů) z povrchu čoček. Jsou vhodné i k čištění ploch s antireflexními vrstvami. S výhodou lze rovněž k čištění čoček použít na místo Hoffmanských kapek i **izopropyl**. Ten lze koupit jak kapalný, tak ve spreji. To usnadňuje jeho aplikaci. Při jeho výběru je nutné dát pozor na jeho čistotu. V opačném případě může zanechávat na čištěných plochách šedavé skvrny. Vhodný přípravek lze zpravidla poznat snadno – výrobce jej deklaruje jako vhodný pro čištění optických přístrojů.

Pro vytvoření **celkové čisticí lázně** jako základ je zpravidla použita

[4] *Místo názvu Hoffmanské kapky se občas můžete setkat i s pojmenováním Hoffmanovy kapky. Jde o směs lihu a éteru v poměru 3:1 až 4:1. Obě vstupní složky musí být čisté, proto je lépe nechat si je namíchat v lékárnách.*

destilovaná voda nejlépe z lékárny. Demineralizovaná voda z drogerie či benzínky, prodávaná pod označením destilovaná, by po zaschnutí zanechala stopy. Pro zvýšení čisticí schopnosti lze k ní přidat pár kapek detergentu, popř. vytvořit směs izopropylu a destilované vody.

K vlastnímu čištění lze použít smotek z jemné chirurgické bavlny, popř na tenké pásky rozstříhanou optickou utěrku. Jako nouzové řešení je možné využít např. i vatové tyčinky na čištění uší. V tomto případě doporučuji ale postupovat obzvláště opatrně. Na čisticí smotek v žádném případě nevyvíjejte nadměrný tlak. Při pohybu po optické ploše je ideální, když po povrchu klouže jen svou vahou. Pokud chcete riziko případného poškození ploch minimalizovat je dobré dodržet i jednoduchou zásadu: nikdy nepoužívejte kruhové pohyby, ale krátké tahy od středu k okraji. Pro každý nový tah by měl být použit nový smotek.

Obr. 7.2 Pomůcky pro mokré čištění – izopropyl, optická utěrka a čisticí tyčinky

7.3. Postupy čištění objektivů

7.3.1 Postup čištění čočkových objektivů

Obecný postup čištění uvedený výše je zpravidla jednoduchou a přitom relativně bezpečnou cestou, která vede k úspěchu. Celý postup čištění čočkového objektivu tedy můžeme shrnout do tří základních kroků.

Hrubé čištění

Pomocí stlačeného vzduchu, optické utěrky nebo alespoň jemného štětečku odstraňte mechanické nečistoty z povrchu objektivu. Nepoužívejte přitom žádnou sílu. Cílem je opravdu pouze odstranit neulpěné nečistoty. Postupujte systematicky od středu čočky k jejímu okraji. Pokud používáte optickou utěrku či štětec, neopomeňte je průběžně měnit (resp. štěteček vyklepat).

Suché čištění

Tento postup je ideální v případě, že optické plochy jsou jen slabě znečištěné, popř. pokud potřebujete rychle odstranit např. otisk prstu. Při použití lenspenu a dodržení všech zde uvedených zásad je riziko poškození optické plochy opravdu minimální. Je proto dobré, mít vždy nějaký lenspen přibalený např. v kufříku s okuláry. Mějte pouze na paměti, že i lenspen se postupně opotřebovává. Zpravidla dojde „zásoba“ grafitu na houbičce uvnitř krytky lenspenu, nástroj „vyschne“. Proto je po určité době nutné jej nahradit za nový. Pokud nebyl objektiv silně znečištěn, není po vyčištění lenspenem velmi často další čištění nutné a přístroj lze považovat za vyčištěný. Mokré čištění se tedy zpravidla neprovádí.

Mokré čištění

K tomuto kroku přistupujeme až jako k poslední možnosti vyčištění objektivu. Obecně je doporučováno čištění čočkových objektivů ve vodorovné poloze (objektiv míří k nebi). Čisticí kapalina pak nestéká k jeho okrajům příliš rychle. Pokud je váš objektiv větších rozměrů, lze jej samozřejmě čistit i ve vertikální poloze. Jen jsou kladeny větší požadavky na pečlivost a zejména pak dávkování čisticí kapaliny. Jednotlivé čočky se z objímek při běžném čištění vyjímají pouze výjimečně a rozhodně to nelze doporučit nedostatečně znalým a v běžných domácích podmínkách. Mokré čištění tedy spočívá v nanášení a stírání čisticí kapaliny. Nanášejte ji proto opakovaně jen malé množství tak, aby nemohla zatéct pod přírubu, popř. mezi jednotlivé optické členy (v případě potřeby pomůže optická utěrka přidržená při okraji).

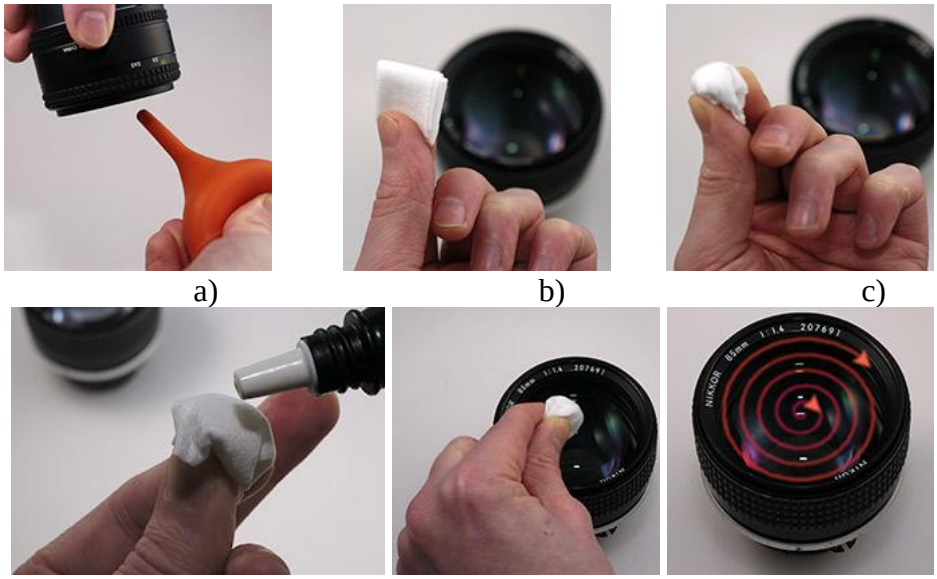
Vlastní čištění probíhá podobně jako při suchém čištění od středu

objektivu k jeho okrajům. Jediná výjimka je, pokud je objektiv umístěn vertikálně (tj. míří vodorovně). V tomto případě jej čistíme z vrchu dolů. Postupně nanášejte pomocí čistého smotku malé množství čisticí kapaliny na čištěnou optickou plochu. Zde jsou ve výhodě různé čisticí spreje, kde je vlastní nanesení přímo na optický povrch nejen rychlé, ale i rovnoměrné. Po chvilce působení kapalinu čistým suchým smotkem nebo suchým proužkem čisté optické utěrky setřete. U velkých průměrů zásadně používejte rovné tahy směrem od středu k okraji. U menších průměrů můžete použít i spirálový tah, kdy začínáte uprostřed objektivu a postupně se krátkými tahy ve spirále „propracujete“ k okraji. V tomto případě ale je nutné nezapomenout měnit čisticí smotek nejlépe po každém krátkém tahu.

Pokud nehrozí zatečení čisticí kapaliny mezi optické členy, lze rovněž natřít čisticí kapalinou celou optickou plochu a následně ji suchými smotky postupně stírat. Pro každý tah (resp. alespoň pro každý druhý) používejte čistý smotek. Pokud budete používat jeden smotek na setření celého objektivu, vězte, že z rozpuštěných nečistot se vytvoří na objektivu po zaschnutí nehezká mapa. Více než kde jinde zde platí: práce kvapná … .

Objektiv se nesnažte suchým smotkem setřít zcela do sucha. Hlavním cílem v tomto kroku je pomocí smotku dostat co nejvíce nečistot z povrchu objektivu pryč. Celý postup navlhčení objektivu a následného setření několikrát zopakujte (alespoň 2-3x). Na závěr naneste na objektiv pomocí smotku místo čisticího roztoku destilovanou vodu (může v ní být i trocha čistého lékárenského lihu. Zpravidla postačuje poměr 1 díl čistého lihu z lékárny na 2-3 díly destilované vody. Tento poslední „nátěr“ není třeba stírat. Pokud byla vaše práce pečlivá, vyschne, aniž by zanechal jakékoliv stopy.

Pokud ani tento pokus vyčistit objektiv nedopadl nejlépe, popř. pokud zjistíte větší nečistoty uzavřené uvnitř mezi jednotlivými čočkami objektivu, lze jen doporučit, abyste se obrátili na specialistu, popř. alespoň více znalé, kteří mají s čištěním optických přístrojů (ale např. i se zpětnou montáží jednotlivých čoček objektivu) větší zkušenosti.



Obr. 7.3 Čištění objektivu není žádná věda:

a) nejprve očistěte hrubé nečistoty stlačeným vzduchem popř. jemně štětečkem,

b) můžete použít proužek optické utěrky, kterou uchopíte za konce a prostřední stranou jemně odstraníte nečistotu,

c) optickou utěrku můžete použít rovněž místo smotku na mokré čištění, po uchopení smotku se části, kterou budete čistit, NEDOTÝKEJTE,

d) naneste trochu čisticí kapaliny na smotek, popř. pomocí spreje přímo na čištěnou plochu,

e) lehkými krátkými tahy naneste čisticí kapalinu od středu ke kraji a následně přebytečnou kapalinu setřete čistým smotkem; pro každý tah použijte nový smotek,

f) pro čištění používejte krátké tahy a od středu k okraji, u menších průměrů můžete použít čištění po spirále, nezapomínejte smotky pravidelně měnit na čisté

7.3.2 Čištění zrcadlového objektivu

Nejběžnější optické zrcadlo je tvořeno tenkou odraznou vrstvou, která je nanesena na nosný substrát, nejčastěji vyrobený ze skla. Protože tenká odrazná vrstva je v dnešní době nejčastěji hliníková, její životnost by při používání byla velmi krátká a začala by velmi rychle oxidovat. Zrcadlo by získalo našedlý vzhled a odrazivost světla by klesla na zlomek původní hodnoty. Proto se odrazná vrstva kryje tenkými ochrannými vrstvami (v nejjednodušším případě SiO popř. SiO_2). Pro zlepšení odrazných vlastností pak někteří výrobci nanáší další vrstvy (a to pod i nad odraznou vrstvu), popř. využívají odolnější materiály na poslední „ochrannou“ vrstvu za účelem zvýšení mechanické odolnosti zrcadla. Díky těmto ochranným vrstvám zrcadlo vydrží mnohem více, než by se mohlo na první pohled zdát. Přesto je při práci s ním, při porovnání např. s prací s čočkovým objektivem, nutné dbát zvýšené opatrnosti. Rovněž proces čištění zrcadlového optického systému má určitá specifika, na které je nutno upozornit.

Podobně jako v případě čočkových objektivů je i u zrcadlových stěžejní otázka, zda nastal „ten pravý čas“ na vyčištění zrcadlového objektivu. Obecně lze říci, že zrcadlové objektivy je nutné čistit zejména u otevřených konstrukcí typu Newtonova dalekohledu častěji, než konstrukčně uzavřené typy (refraktor). Při běžném používání 1-2x týdně v nepříliš prašném prostředí (např. na zahradě či louce) zpravidla postačuje důkladnější čištění cca 1x za dva roky, v prašnějším prostředí 1x ročně.

Na rozdíl od čočkových objektivů prakticky nelze na zrcadla doporučit mechanické čištění na sucho pomocí lenspenu nebo jiné obdobné pomůcky. Ochranná vrstva SiO je pro tento typ čištění zpravidla příliš slabá a mohlo by dojít k mechanickému poškození zrcadla.

Pro vyčištění zrcadla od drobných prachových nečistot je vhodné využít proud vzduchu (popř. jiného stlačeného plynu), kdy jsou nečistoty sfouknuty mimo optickou plochu. Při ulpívající nečistotě pak je nutné použít mokré čištění a to buď pomocí speciálních čisticích kapalin prodávaných v prodejnách s optikou, nebo destilovanou vodou.

Pro mokré čištění platí stejné obecné zásady jako při čištění čočkových objektivů (viz předchozí kapitola). Snažte se omezit dýchání přímo na optické plochy zrcadel. Omezíte tak usazování mastnot a kapiček aerosolu obsažených ve vašem dechu na optické plochy. Rovněž pokud nemáte zkušenosti s čištěním optických přístrojů je doporučeno používat během celého procesu mytí bavlněné rukavice. Otisky prstů při náhodném dotyku s optickou plochou dokáží být až neuvěřitelně vytrvalé a nesnadno odstranitelné (obr. 7.4).

Mimo dostatečně velké nádoby budete pro vlastní čištění potřebovat:
- destilovanou vodu nejlépe z lékárny.
- jemné bavlněné pláténko/hadřík popř. optickou utěrku na výrobu smotků,
- vhodný detergent (saponát) bez příměsi leštidel či jiných přídavných látek,
- občas budete potřebovat i čisticí kapalinu.

Plátenko nastříhejte na proužky a několikrát přehněte tak, abyste vytvořili smotek o rozměrech cca 2x8cm, tedy takový, aby jej bylo možno pohodlně uchopit. Čisticí kapalinu buď koupíte u specializovaných prodejců optických přístrojů nebo si ji vyrobíte sami. Existuje celá řada nejrůznějších směsí. Asi nejčastější je směs čistého líhu a éteru v poměru cca 3:1. Použít ale lze např. i lihobenzín (tj. směs čistého líhu a technického benzínu v poměru 1:1), popř. izopropyl (isopropanol) nejlépe ve spreji, popř. 99 % roztok izopropylu doplněný o 10-30 % destilované vody. Velmi účinným čisticím prostředkem je i směs acetonu a alkoholu (líhu nebo izopropylu). V tomto případě je doporučeno zajistit dostatečné větrání, popř. pracovat na čerstvém vzduchu venku.

Zde je na místě jedno upozornění. Pokud nemáte zkušenosti s čisticími kapalinami nebo čištěním optických přístrojů obecně, raději než pokusy o míchání vlastních směsí, lze jen a jen doporučit zakoupit speciální čisticí kapaliny profesionálních firem.

Vlastní mokré čištění bohužel zpravidla vždy vyžaduje vyjmutí zrcadla z tubusu dalekohledu a následně i z jeho objímky. Obzvláště při vyjímání zrcadla z objímky postupujte opatrně, aby ocelové nářadí nesklouzlo a nepoškodilo optickou plochu zrcadla. Doporučený postup čištění zrcadla má několik fází.

1. Odstranění pevných částic

Po vyjmutí zrcadla z dalekohledu a objímky je zpravidla nutné nejprve odstranit hrubé nečistoty. K tomu je možné využít proud vzduchu popř. stlačeného dusíku. S výhodou lze využít i „balónky“ na čištění optických členů, které lze za pár korun koupit v každé slušné oční optice. Podobně jako u čištění refrakčních (čočkových) optických členů je použití stlačeného vysokotlakého vzduchu z kompresoru zcela nevhodné. Již při tlaku kolem 30 PSI (tj cca 2 bary, resp. 207 kPa) může být urychlení případných pevných prachových částic v proudu vzduchu z kompresoru tak velké, že může poškodit nejen ochranou SiO vrstvu, ale i vlastní odraznou vrstvu zrcadla.

Následuje-li mokré čištění, lze pevné nečistoty rovněž smýt proudem vody. V tomto případě postačuje volný proud vlahé vody z kohoutku.

2. Rozpuštění nečistot ve vodní lázni

Nejprve si připravte pracoviště. Do nádoby, do které zrcadlo uložíte (např. dřez nebo lavor vhodné velikosti), vložte na dno nejlépe froté ručník a napusťte ji čisticí lázní (obr. 7.6). Vždy volte nádobu raději o něco větší, než je průměr zrcadla tak, abyste mohli zrcadlo volně uchopit a pohybovat s ním. Ručník na dně omezí náhodné podklouznutí zrcadla během čištění a rovněž sníží riziko poškrábání optické plochy zrcadla v případě, že by vám během čištění zrcadlo vyklouzlo z rukou. Poté ponořte zrcadlo optickou plochou nahoru do teplé vodní lázně, do které jste přidali pár kapek saponátu.

Pro odmočení ulpívajících nečistot zpravidla postačuje 10-15 minut. Pro tuto fázi čištění není použití destilované vody nezbytné a lze přirozeně použít i vodu z kohoutku. Po následném opláchnutí optické plochy proudem vody pak celou operaci zopakujte v nové lázni. Pro odstranění drtivé většiny nečistot zpravidla postačují 2-3 lázně po 10 minutách. Na konci každé lázně uchopte zrcadlo zespodu tak, abyste se nedotýkali odrazné plochy a opakovaně jej rychle zvedejte těsně pod vodní hladinu a pokládejte zpět na dno nádoby. Proud vody velmi účinně odstraní i částečně rozpuštěné nečistoty.

Pokud je nějaká nečistota obzvláště setrvalá, lze ji odstranit pomocí jemného pohybu bavlněného smotku/odstřiženého proužku optické utěrky na optické ploše ponořené v čisticí lázni. Nikdy se nesnažte odstranit nečistotu nasucho! Smotek v čisticí lázni jen položte jedním koncem na optickou plochu a druhý uchopte. Volně s ním pak pohybujte rovnými tahy. Nepřitlačujte jej větším tlakem, zbytečně byste riskovali poškození optické plochy. Je lépe se smířit se smítkem na zrcadle, než riskovat poškození odrazné plochy zrcadla.

3. Rozpuštění nečistot čisticím roztokem

V případě potřeby lze použít pro odmočení zejména organických nečistot vhodnou čisticí kapalinu (např. čistý líh popř. směs líhu a éteru nebo jinou z výše uvedených). Protože prakticky všechny uvedené kapaliny jsou hořlavé, nesmí přijít ani jejich výpary do styku s otevřeným ohněm. Nekouřit je samozřejmostí, což ostatně platí nejen při práci s hořlavinami, ale obecně při práci s optikou.

Mezi nejúčinnější patří čisticí roztoky na bázi acetonu. Zejména pro ně platí, že je lze používat pouze v prostorech s dostatečným větráním za dodržení všech ostatních bezpečnostních a hygienických předpisů. Pro kapaliny na bázi acetonu rovněž platí, že by neměly přijít do styku s plastovými předměty a povrchy. Může na nich zanechat barevné skvrny, popř. dokonce některé druhy plastů naleptat nebo rozpustit. Čisticí kapaliny na bázi izopropylu (izopropyl sprej, roztok izopropylu a éteru, …) sice vyžadují časově delší aplikaci, jejich použití je však obecně bezpečnější a méně agresivní pro životní prostředí. Proto jim doporučuji dávat přednost vždy, kdy je to možné.

Čisticí roztok naneste pomocí bavlněného smotku přímo na optickou plochu zrcadla, popř. čisticí kapalinu na ni opatrně nalijte. V tomto případě tedy není nutno ponořovat do čisticí lázně celé zrcadlo, pouze dostatečně smočte optickou plochu (resp. vyplňte dutou optickou plochu čisticí kapalinou). Čisticí roztok nechte chvíli působit (zpravidla postačuje 3-5 minut) a následně opláchněte zrcadlo proudem vody. V případě potřeby lze celou proceduru opakovat. Podobně jako v předchozím případě lze k odstranění setrvalých nečistot použít smotku, kterým zlehka pohybujeme po povrchu zrcadla naplněného čisticí lázní.

Po aplikaci čisticího roztoku je vhodné omýt na závěr zrcadlo ještě jednou v mycí lázni tvořenou čistou vodou popř. s pár kapkami saponátu.

4. Závěrečné opláchnutí a zpětná montáž

Na závěr čištění je nutné důkladně zrcadlo opláchnout čistou destilovanou vodou. Tu naplňte do vhodné láhve (např. čistá PET láhev je téměř ideální). Umístěte zrcadlo na šikmou rovinu nebo nadzvedněte jednu jeho stranu rukou a opakovaně jej oplachujte proudem destilované vody. Postupujte systematicky ve vodorovných liniích shora dolů tak, abyste opláchli skutečně celou plochu. Ze zrcadla musí být bezpodmínečně smyty veškeré zbytky předchozí lázně nebo čisticích kapalin. Celý postup závěrečného opláchnutí několikrát zopakujte. Na zrcadlo o průměru 8“-12“ (200-300 mm) zpravidla postačují pro závěrečné opláchnutí 2-3 litry destilované vody.

Pokud si nejste kvalitou destilované vody příliš jisti, popř. pokud chcete schnutí urychlit, můžete na mokrý povrch volně položit optickou utěrku (skutečně jen položit, žádné „stírací pohyby“) a velké kapky takto vysušit. Někteří astronomové pro tento účel dokonce používají jemné papírové kapesníčky. Občas sice zůstane na optické ploše v závislosti na kvalitě utěrky/pláténka nějaké vlákno, ale to nemá viditelný vliv na výsledný obraz. V případě nekvalitní destilované vody můžete zabránit vzniku zaschnutých stop od vodních kapek.

Na závěr umístěte zrcadlo do klidného prostoru nejlépe ve vertikální poloze a nechte před montáží zpět do dalekohledu oschnout. Pokud byla použita skutečně destilovaná voda a závěrečné mytí bylo důkladné, zbylé vodní kapky vyschnou aniž by zanechaly jakékoliv stopy.

Zpětná montáž zrcadla opět není nic těžkého. Umístěte zrcadlo zpět do objímky a zafixujte jej stranově pokud to konstrukční řešení objímky vyžaduje. Následně upevněte pojistné třmínky, které fixují zrcadlo shora a zvolna přitáhněte pojistné šrouby. Právě zde dělají nezkušení amatéři asi největší chybu. Zatímco během vlastního čištění přistupují k zrcadlu občas možná až s přehnaným respektem a opatrnost jim nechybí, tak během závěrečné montáže dotahují pojistné šroubky zbytečně silně. Nadměrné dotažení („aby měli

jistotu“) je zcela zbytečné a velmi často kontraproduktivní. Zpravidla s ním pouze vyvoláte deformace optické plochy zrcadla (v drtivé většině případů naštěstí vratné), což se negativně projeví na výsledné kvalitě obrazu. U správně navržené objímky zrcadla je cílem pojistných třmínků přiléhajících shora k optické ploše zrcadla pouze omezit možný vertikální pohyb/posun zrcadla a jeho následné náhodné vypadnutí z objímky. Proto opravdu dostačuje pouze jemné dotažení pojistných třmínků tak, aby se nemohly samovolně pohybovat.

Zatímco čočkový dalekohled, pokud nebyl objektiv demontován z objímky, je možné po zpětné montáži používat bez větších nároků na nové seřízení, u zrcadlového dalekohledu je jeho nové seřízení prakticky vždy nutné. Po zpětné montáži zrcadla (zrcadel) je proto vždy nutné provést kolimaci dalekohledu (viz kapitola 6.2).

U nejrozšířenějšího dalekohledu systému Newton lze zpravidla seřídit polohu obou zrcadel. Kolimaci dalekohledu systému Newton je velmi snadná a pro uživatele, který se odhodlal k mytí zrcadla svépomocí, nebude činit potíže.

Obr. 7.4 Pozor na otisky prstů na optické ploše zrcadla,
hrozí zvýšené nebezpečí poškození optické plochy

Obr. 7.5 Zrcadlo vždy uchopte zespodu nebo z boku tak, abyste se nedotýkali optických ploch

Obr. 7.6 Základem čištění zrcadla je vodní lázeň

7.3.3 Čištění rovinných zrcadel

Mimo velkých hlavních zrcadel se setkáváme přirozeně i s menšími rovinnými zrcadly. Nejčastěji plní funkci sekundárního zrcadla (např. v Newtonově dalekohledu), popř. zenitálního zrcátka (pro zajištění pohodlného pozorování).

Obecně je možné aplikovat postup uvedený výše. Přesto je dobré mít na paměti několik specifik. Zejména vysoko odrazná dielektrická zrcadla mají vlastní odraznou vrstvu poměrně slabou a velmi snadno se poškodí. Protože přes malý průměr např. zenitálního zrcátka prochází prakticky veškeré světlo zachycené primárním zrcadlem, mají případné škrábance nebo poškození výrazně větší vliv na konečnou kvalitu obrazu. Proto zde platí více než kde jinde ono již zmiňované: mýt pouze v případě, kdy to je nezbytné.

Velká část usedlých nečistot je odstranitelná proudem stlačeného vzduchu bez potřeby jakkoliv demontovat zrcátko z uchycení. V případě, že je mokré mytí nutné, vyvarujte se v maximální možné míře nutkání používat mechanické čištění pomocí bavlněných smotků nebo optické utěrky. Celé čištění se zjednoduší po úvodním odstranění hrubých nečistot na opakovanou aplikaci čisticí lázně. Alespoň jedna čisticí lázeň není velmi často založená na vodní bázi, ale jde o jednu z čisticích směsí uvedených výše, popř. jsou tyto čisticí kapaliny do vody přidávány (např. izopropyl). Poslední čisticí lázeň by měla být již bez detergentu. Samozřejmostí je důkladné opláchnutí čistou destilovanou vodou.

Pokud máte problémy skutečně čistou destilovanou vodu sehnat, lze pro tento účel použít i zakoupenou čisticí kapalinu, u které výrobce uvádí, že je vhodná i pro zrcadla. Nepoužívejte pro tyto účely čisticí kapaliny založené na vodní bázi, popř. kapaliny určené primárně k čištění čoček. Tyto kapaliny zpravidla mohou obsahovat menší množství nečistot, které se projeví po zaschnutí rezidui/mapkami na optické ploše zrcadla.

Obr. 7.7 Sekundární zrcátko s držákem (pavoukem) vyjmuté z tubusu

7.3.4 Čištění katadioptrických systémů

Katadioptrických systému existuje celá řada variací. V této kapitole se budeme zabývat „klasickými“ katadioptrickými systémy, tvořenými zrcadlovou soustavou uzavřenou korekční deskou (meniskem). Do této skupiny můžeme řadit např. konstrukce Schmidt-Cassegrain, popř. Maksutov. Mimo „uzavřených“ katadioptrických systémů, kde vstup kryje korekční deska, existuje i velká skupina katadioptrických systémů, kde nenajdeme na první pohled žádné velké refrakční členy. Při pozornějším zkoumání těchto „otevřených“ systémů je však nalezneme zpravidla upevněné u sekundárního zrcadla či ve vnitřním tubusku umístěném u primárního zrcadla. Obecné poznatky zde uvedené lze přirozeně aplikovat i na ně.

Protože uvažovaný „klasický“ katadioptrický systém je podobně jako čočkový dalekohled z jedné strany uzavřený systém, jsou optické prvky umístěné dále za krycí korekční deskou dobře chráněné. Při čištění této soustavy velmi často postačuje čištění vlastní korekční desky a čištění zrcadel není zpravidla nutné. Zkušenosti ukazují, že na 3-5 čištění korekční desky je vhodné počítat pouze s jedním kompletním čištěním celé optické soustavy.

A je to právě korekční deska, která je často zdrojem obav. Přitom čištění korekční desky katadioptrického systému není nijak složité. Je však dobré dodržet pár zásad, které vám pomohou vyvarovat se úskalí s tímto čištěním spojeným.

Oproti čištění např. čočkového dalekohledu je čištění katadioptrického systému přeci jen o něco složitější a zejména komplexnější. Proto jej lze doporučit až po nabytí alespoň nějakých zkušeností s čištěním optických členů nebo pod dohledem někoho zkušenějšího.

Základní zásada čištění zůstává stejná jako u jiných typů optických přístrojů. K čistění korekční desky katadioptrických systémů byste měli přistoupit až v případě, že je vlastní deska značně znečištěná. Mírné znečištění, které nezpůsobí zhoršení kvality obrazu, rozhodně není důvodem k tomuto kroku. Frekvence čištění samozřejmě závisí na četnosti používání a prostředí, ve kterém je dalekohled používán. Podobně jako v případě refraktorů či reflektorů obvykle postačuje čištění jednou ročně až jednou za několik let.

Co budete potřebovat

Pomůcky které budeme pro čištění potřebovat, se nijak neliší od těch, které byly uvedeny při čištění optických přístrojů v předchozí kapitole. Před tím, než začnete, si proto připravte:

1. Dostatečně velkou nádobu, ve které budete korekční desku mýt. Rozměr volte tak, aby se do ní dala korekční deska volně položit. Je lepší, je-li

nádoba o něco větší tak, abychom mohli s korekční deskou nejen volně pohybovat, ale v případě potřeby ji i pevně uchopit ze strany.

2. Prostředek na mytí nádobí. Stejně jako při čištění jiných typů optických přístrojů i zde se vyplatí být pečlivý a neznámý výrobek předem odzkoušet např. na kousku krycího sklíčka. Jednoznačně zvolte čisticí prostředek bez dodatečných leštících přísad. Jakékoliv další přísady (např. právě leštící oleje) vytvoří na skle jemný film, kterého se pouhým následným opláchnutím tak snadno nezbavíte.
3. Destilovanou vodu je opět doporučeno nakoupit v lékárně. V případě pochybností o její kvalitě pak proveďte jednoduchý test na kousku sklíčka. Kapka destilované vody musí vyschnout a nezanechat **žádné** stopy.
4. V případě, že máte v plánu čistit celý přístroj, tj. i s primárním zrcadlem, připravte si navíc vhodný prostředek na odmaštění ostřících mechanismů (např. lihobenzín) a vhodné mazivo pro jejich opětovné namazání po vyčištění. Vhodné je v podstatě jakékoliv syntetické mazivo s dostatečným teplotním rozsahem. A to nejen co do minusových teplot (zatuhnutí ostření), ale i plusových (prevence skapávání maziva na sekundární zrcátko či korekční desku během skladování).
5. Určitě využijete stlačený vzduch (popř. jemný štěteček či fotografický balónek) a optické utěrky popř. jemné pláténko.
6. Nářadí není nijak náročné. Zpravidla postačuje vhodný šroubovák a tenké šídlo (nebo tenký nožík) na vytahování distančních podložek, kterými je fixována korekční deska. Rada pro ty méně zkušené - předem si odzkoušejte i velikost šroubováku a jeho vhodnost s ohledem na šroubky, které budete potřebovat povolit. Bylo by velmi nemilé, kdyby se nástroj smekl a sjel na korekční desku, kde by s největší pravděpodobností zanechal trvalé stopy. Navíc budete potřebovat kousek krepové lepící pásky a fix na označení pozice korekční desky.

Demontáž korekční desky

Největším zdrojem obav u katadioptrických systémů je manipulace s korekční deskou. Jak již její název napovídá je korekční deska určena ke korekci zobrazovacích vlastností celé soustavy. Proto je velmi často „napasována“ na konkrétní optický systém. Označením „napasována“ je míněna skutečnost, že její parametry jsou voleny, popř. dolaďovány během její výroby tak, aby co nejlépe odpovídala aktuálním parametrům např. zrcadel v soustavě (i stejný výrobek se může mírně kus od kusu lišit) a bylo dosaženo co nejlepšího zobrazení. U značkových katadioptrických systémů je navíc prováděna ruční konfigurace, kdy se konkrétní deska přizpůsobí konkrétní

optické soustavě. Lze tak odstranit zbytkové optické vady v maximální možné míře. Z uvedeného je zřejmé, proč vznikl kolem katadioptrických systémů mýtus ohledně jejich čištění.

Pokud dodržíte níže uvedený postup, maximálně tím snížíte riziko případných bezesných nocí při hledání nejvýhodnější vzájemné orientace jednotlivých optických členů.

1. Korekční deska u systému SCT je jištěna obrubou přišroubovanou po obvodu několika šrouby. Nejprve tedy demontujte tuto přírubu. Odstraňte všechny šrouby a příruba by měla jít volně sundat. Pokud je „přilepená“ nečistotami následkem častého střídání tepla a chladu ve spojení s vlhkostí, pomůže zpravidla ji pevně uchopit a s citem silněji zatáhnout. Pokud ani to nepomůže, spolehlivě pomůže navlhčit ji troškou vody. Po pár minutách jde zpravidla velmi snadno.
2. Každý výrobce katadioptrických systémů používá vlastní systém značek na korekční desce, které mají umožnit její rychlou a správnou montáž. U každého z nich je ale bohužel trošku jiná. Od čárky na fasetě korekční desky až po malou trojúhelníkovou značku v jejím okraji. Stejně tak se i liší její umístění (nejčastěji odpovídá pozici 3 nebo 12 hodin). Proto je asi nejlépe si označit korekční desku vlastními značkami, které budou pro uživatele zcela jednoznačné. Vlastní pozice korekční desky v tubusu je aretována zpravidla čtyřmi podložkami (nejčastěji buď korkovými nebo papírovými).
3. Zaznačte pozici jednotlivých podložek vůči korekční desce i vůči tubusu. K zaznačení polohy použijte buď lihový fix, kterým přímo na okraj korekční desky a tubusu vyznačte vzájemnou polohu. Z kreslením na okraj korekční desky nemusíte mít obavy. Při používání je tento okraj zakryt obrubou a na zobrazení nebude mít prakticky žádný vliv. Případně lze samozřejmě využít krepovou pásku (popř. oboje jako v případě na obrázku 7.8). Nezapomeňte jednotlivé pozice očíslovat. Teoreticky sice stačí dvě značky, doporučuji ale použít minimálně tři. Při případném smytí, popř. odlepení, některé z nich pak máte určitou rezervu. Pozici zaznačte co nejpečlivěji tak, abyste byli schopni umístit korekční desku zpět co nejpřesněji.
4. Po označení pozice dejte dalekohled korekční deskou nahoru a opatrně vyjměte distanční podložky. Nejlépe to jde pomocí tenkého šídla (popř. tenkého šroubováku či tupou stranou nožíku). Tím uvolníte vlastní korekční desku. Tu nyní vyjmete pouhým uchopením za držák sekundárního zrcátka a vytažením ven (nahoru). Pokud nemáte v úmyslu čistit i primární zrcadlo (což zpravidla není nutné), zakryjte tubus, aby se do něj během čištění menisku zbytečně neprášilo.
5. Součástí korekční desky je i sekundární zrcátko s jeho držákem

a cloněním. U některých systémů - např. Maksutov-Cassegrain (MCT) je dokonce napařeno přímo na korekční desku a je proto neoddělitelné. V ostatních případech je sice možné sekundární zrcátko vyjmout, v praxi je ale velmi často jednodušší ponechat sestavu v kuse a mýt společně korekční desku se sekundárním zrcátkem. Výrazně se tím zjednoduší zpětná montáž. Současné mytí korekční desky a sekundárního zrcátka mu nijak neublíží.

U některých systémů uchycení je vyjmutí sekundárního zrcátka velmi rychlé. U systémů FASTAR kompatibilních[5*5] je vyjmutí sekundárního zrcátka záležitostí několika málo sekund (bohužel to neplatí pro jeho zpětné seřízení). V případě že máte takovýto typ přístroje, je možné samozřejmě sekundární zrcátko vyjmout. V případě, že na jeho místě máte již umístěný zmíněný korektor, je nutné tento **korektor vyjmout**.

Obecně je vhodné při případné demontáži sekundárního zrcátka dodržet zásadu shodné orientace korekční desky a sekundárního zrcátka. V případě nejběžnějšího uchycení (tj. FASTAR nekompatibilního) je sekundární zrcátko uchyceno třemi šrouby, které jsou určeny současně pro jeho kolimaci. Pokud je odšroubujete současně, sekundární zrcátko **vypadne**! Mějte to proto na paměti a vhodně si dopředu poznačte jeho vzájemnou orientaci k menisku. Po opatrném vyjmutí sekundárního zrcátka jej můžete čistit samostatně jako běžné optické zrcadlo.

Čištění korekční desky

Nyní lze přistoupit k vlastnímu čištění. To se ve svých obecných zásadách nijak neliší od čištění např. čočkového objektivu. Protože to bylo již v předešlých kapitolách detailně probráno, zopakujme jej alespoň stručně v těch nejdůležitějších bodech.

1. Do nádoby napusťte teplou vodu (ideálně mírně nad 40 °C) a přidejte trochu jaru. Pro první čištění postačuje obyčejná teplá voda z vodovodu.
2. Ponořte meniskus do vodní lázně a nechte alespoň 10-15 minut namáčet. Drtivá většina ulpěných nečistot se sama uvolní.
3. Uchopte korekční desku za středový držák sekundárního zrcadla a pohyby zrcadla nahoru a dolů „zapumpujte“ s vodou. Během manipulace s korekční deskou buďte opatrní, abyste s ní „nešoupali“ o stěnu nebo dno nádoby.
4. V této chvíli je doporučeno zejména u velmi znečištěných korekčních

5 *Systém FASTAR je korektor navržený pro systémy SCT. Pro rychlé uchycení namísto sekundárního zrcadla je modifikováno i uchycení sekundárního zrcadla. Používá se u systémů u nichž se předpokládá použití záznamového zařízení (CCD kamery, fotoaparátu).*

desek vyměnit vodu za čistou. Opět přidejte trochu detergentu.

5. Zpravidla tato dvojitá koupel postačuje k odstranění téměř všech nečistot a mechanické čištění není potřeba.
6. Pokud přesto potřebujete lokálně vyčistit dílčí oblast, použijte nejlépe na proužky nastříhanou optickou utěrku, popř. smotek čisté vaty. Tu namotejte na kousek špejle a pod vodní hladinou lehkými **rovnými tahy** se pokuste odstranit nečistotu. Zde platí rozhodně více než u čočkových objektivů: zásadně na špejli **netlačte**. Nechte ji jen klouzat vlastní vahou po povrchu.
7. Po vyčištění je neméně důležité důkladné opláchnutí destilovanou vodou.
8. Opláchnutí musí být opravdu důkladné. Proto jej opakujte několikrát. Nezapomeňte přitom ani na držák sekundárního zrcadla, popř. i zrcadlo samotné. Velmi často se stává, že při mytí korekční desky, u níž nebylo odstraněno sekundární zrcátko, se opomine důkladně opláchnout nejen korekční desku se sekundárním zrcátkem, ale i stínící clonu, která je zpravidla součástí držáku zrcátka, a zejména pak i mechanismus kolimace (šrouby). Při následném schnutí pak odtud vytéká voda, která je znečištěna zbytky např. saponátu a ve výsledku pak zbytečně zanechá na korekční desce stopy.
9. Při nedostatečném opláchnutí by zůstaly na menisku skvrnky ze zaschnutých kapek se zbytky čisticího prostředku. Ty lze přirozeně odstranit novým mytím, popř. pouze opláchnutím destilovanou vodou.
10. Při dostatečném opláchnutí zaschnou kapky vody na menisku bez zanechání jakýchkoliv stop. Meniskus pouze jemně v ruce oklepte (pozor na pevné uchopení!) a postavte na vhodném místě ve vertikální pozici a nechte oschnout.

Obr. 7.8 Před sejmutím je nutné u korekční desky označit její orientaci vůči tubusu

Obr. 7.9 Základem dobrého čištění je dokonalé odmočení nečistot (korekční deska Schmidt-Cassegrain ve vodní lázni)

Čištění primárního zrcadla

Čištění primárního zrcadla vyžaduje alespoň průměrnou mechanickou zručnost při manipulaci s jemnou mechanikou. Naštěstí, jak již bylo uvedeno výše, není ve většině případů nutné vnitřní části uzavřeného katadioptrického systému čistit. Pokud máte katadioptrický systém otevřený, popř. pokud je již jeho primární zrcadlo značně znečištěné, je nutné jej nejprve demontovat. Existuje celá řada způsobů uložení primárního zrcadla, které se mohou v některých detailech lišit od zde popsaného (různý způsob řešení ostření či uzamykání zrcadla. Obecný postup ale zůstává zachován.

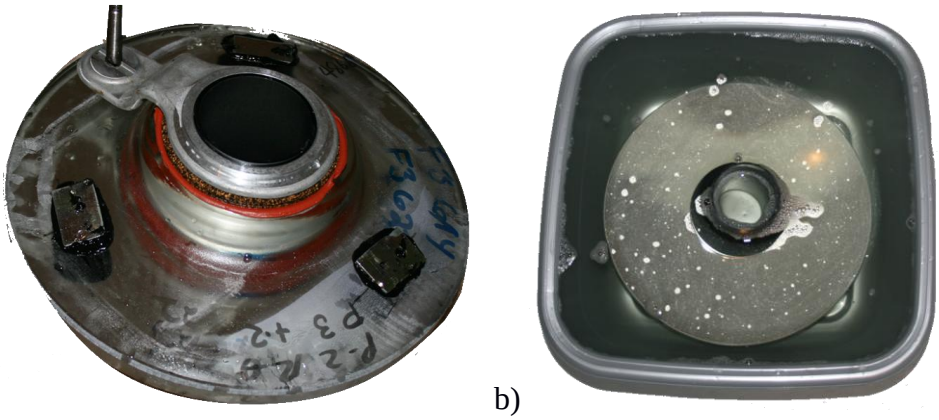
Katadioptrické systémy totiž velmi často ostří pohybem primárního zrcadla. Primární zrcadlo je zpravidla uloženo na vnitřním tubusu zadní objímky, který současně slouží jako vedení při ostření. Některé varianty těchto systémů jsou rovněž doplněny o mechanismus uzamykání, který umožňuje fixovat polohu zrcadla.

- I zde platí již několikrát zmiňované pravidlo zajištění shodné orientace při zpětné montáži. Proto je vhodné demontáž zahájit vyznačením vzájemné polohy tubusu a zadní objímky. Zpravidla postačují 2-3 značky.
- Odšroubujte šrouby, které spojují zadní objímku s tubusem. Některé

menší modely mají tento tubus s objímkou spojený závitem. V tomto případě tubus vyšroubujte. Zadní objímka se od tubusu poté oddělí prakticky sama bez vynaložení síly. **Pozor na samovolné převážení** a případný pád zadní objímky. Pokud nelze oddělení realizovat, zkuste se pečlivěji poohlédnout po obrubě zadní objímky. Zcela určitě jste přehlídli nějaký malý pojistný červík.

- Velmi často nyní při vizuální kontrole stavu zrcadla zjistíte, že postačuje odfouknutí usazeného prachu, popř. nečistot stlačeným plynem. Následně je po tomto zákroku možné tubus se zadní objímkou zpět zkompletovat, aniž se musí pokračovat body popsanými níže popisujícími klasické čištění.
- Je-li nutné důkladnější čištění, opatrně postavte zadní objímku na vnitřní tubus (tj. zrcadlem dolů), popř. na bok (**pozor na převážení**!) a demontujte ostřící mechanismus. Zpravidla se skládá z točícího kolečka, které je zajištěno ze strany bočními červíky a z vlastní osy ostření (zpravidla závitová tyč) aretované maticí nebo vhodnou přírubou. Doporučuji přidržet primární zrcadlo za vnitřní vedení, kterým je uložen na tubusku vnitřní objímky. Po povolení posledního spoje by zrcadlo mohlo sjet až na pojistný O kroužek. Je-li přístroj vybaven mechanismem uzamčení primárního zrcadla, demontujte jej podobným postupem. Musí být odstraněny všechny mechanismy, které by bránily vysunutí zrcadla ze zadní objímky. Zrcadlo by pak mělo zlehka dosednout na doraz tvořený pojistným O kroužkem na vnitřním tubusku.
- Až nyní můžete odstranit pojistný O kroužek, který vymezuje pohyb primárního zrcadla. K tomu uchopte zrcadlo za vedení na vnitřním tubusu, současně uchopte zadní objímku a opatrně otočte primární zrcadlo zpět směrem nahoru. Vlastní O kroužek pak je uložen v drážce na vnitřním tubusku zadní objímky a odstraníte jej snadno buď rukou, nebo za pomoci plochého šroubováku. V této chvíli by mělo jít zrcadlo oddělit od objímky prostým vysunutím nahoru.
- Pokud jsou ze zadní strany zrcadla další pomocné mechanismy (např. části mechanismu uzamčení zrcadla), které lze snadno odstranit, učiňte tak. Pomocí papírového ubrousku nebo kousku hadříku setřete staré mazivo na závitové tyči mechanismu ostření (popř. mechanismu uzamčení zrcadla). Celý mechanismus pak následně otřete vlhkým hadříkem namočeným do nějakého odmašťovacího prostředku (např. lihobenzín). Dokonalé odmaštění mechanismu není nutné.
- Vlastní primární zrcadlo vyčistěte postupem stručně shrnutým v části *7.3.4*. Mechanické čištění nebude pravděpodobně potřeba. V drtivé většině případů postačuje pro odstranění usazených prachových zrnek

pouze opláchnutí čistou vodou, popř. krátké odmočení v teplé čisticí lázni s troškou jaru. Protože primární zrcadla katadioptrických systémů jsou zpravidla světelnější (mají menší poloměr křivosti), není nutné ponořovat do čisticí lázně celé zrcadlo, ale postačuje několikrát po sobě jej naplnit teplou vodou s troškou detergentu podobně, jako se nalévají např. poháry. Nechte důkladně odmočit. Čisticí lázeň několikrát zopakujte. Pokud se přesto rozhodnete ponořit celé zrcadlo, opláchněte nejprve mechanismy, které byly namazány (ostření, uzamykání zrcadla) horkou vodou, popř. jej potřete jarem a následně opláchnete. Odstraníte tak většinu zbytků maziva. Pro první ponoření pak zvolte vodu o něco teplejší a přidejte více jaru. Na závěr samozřejmě nezapomeňte na následné důkladné opláchnutí destilovanou vodou.



a) b)

Obr. 7.10 Primární zrcadlo Schmidt-Casegraina vymontované z tubusu (a) a ve vodní lázni (b)

Zpětná montáž dalekohledu

Po vyschnutí všech čištěných částí jej lze smontovat. Vlastní zpětná montáž je relativně snadná. Postupujte opačným postupem, než jste prováděli jeho demontáž. Pokud jste demontovali zadní objímku s primárním zrcadlem, zkompletujte nejprve ji. U pohyblivých částí (vnitřní tubusek – vedení primárního zrcadla, mechanismus ostření, uzamykání zrcadla) naneste tenkou vrstvu maziva tak, aby se mohly jednotlivé části vzájemně snadno pohybovat. Nenanášejte zbytečně silnou vrstvu maziva, protože by hrozilo postupem času jeho stékání s následným znečištění sekundárního či primárního zrcadla. Po kompletaci zadní části přístroje můžete přikročit k montáži menisku se sekundárním zrcadlem.

Po vyčištění katadioptrického systému a jeho zpětné montáži je zpravidla nutná jeho kolimace. Asi nejsnadnější je využít kolimace na hvězdu.

Závěrem

Cílem této knihy nebyl podrobný výčet jednotlivých konstrukcí či vyčerpávající teoretická analýza jejich vlastností. Kniha obsahuje stručný přehled kapitol teorie optiky s důrazem na hodnocení kvality optických přístrojů.

V knize jsou rovněž vybrané, nejpoužívanější, typy astronomických dalekohledů a jeho příslušenství s ohledem na co nejsnadnější aplikaci zde uvedených poznatků v praxi. Pro další prohloubení teoretické znalosti v jednotlivých kapitolách uvedených lze proto doporučit samostudium např. literatury uvedené v části „Doporučená literatura“.

Hlavním cílem knihy bylo poskytnout jak praktické rady s dalekohledy samotnými, tak i poskytnout návody, jak o ně pečovat.

Přehled použitých symbolů a zkratek

Použité symboly

a	…	vzdálenost předmětu od optického členu (čočky, zrcadla) [mm]
a'	…	vzdálenost obrazu od optického členu (čočky, zrcadla) [mm]
B	…	vzdálenost čočky Barlow před ohniskovou rovinou objektivu [mm]
D_{vs}, D_{ob}	..	průměr objektivu [mm]
D_{vyp}	...	průměr výstupní pupily
c	…	rychlost světla (c = 299792,458 km/s)
n, n'	…	index lomu
f, f'	…	předmětová, obrazová ohnisková vzdálenost čočky [mm]
f_{ob}	…	ohnisková vzdálenost objektivu [mm]
f_{ok}	…	ohnisková vzdálenost okuláru [mm]
g	…	hustota mřížky [čar/mm]
MHV_p	…	mezní hvězdná velikost přístroje [mag]
k	…	koeficient prodloužení ohniskové vzdálenosti [-]
l'	…	vzdálenost mřížky od ohniska [mm]
o	…	koeficient centrálního stínění [-]
q	…	vzdálenost předmětu od ohniska [mm]
q'	…	vzdálenost obrazu od ohniska [mm]
v_{vyp}	…	vzdálenost výstupní pupily [mm]
Γ	…	zvětšení [-]
δ	…	rozlišovací mez přístroje [“]
ε, ε'	…	úhel dopadu, odrazu paprsku
λ	...	vlnová délka záření [μm]
υ	...	Abbeovo číslo
ω_{ob}	…	polovina zorného pole objektivu (tj. skutečného zorného pole) [°]
ω_{ok}	…	polovina zorného pole okuláru (tzn. hodnoty měřené od středu po okraj) [°]

Použité zkratky

APO	…	apochromatický objektiv
CCD	…	optoelektronická součástka pro detekci světla (Charge-Coupled Device)
CTF	…	přenosová funkce kontrastu
ED	…	nízkodisperzní sklo (Extra low Dispersion)

OS	…	optická soustava, optický systém
MHV	…	mezní hvězdná velikost
MTF	…	modulační přenosová funkce
LED	…	optoelektronická součástka vyzařující světlo (Light Emitting Diode)
LPR	…	filtr snižující vliv světelného znečištění (Light Pollution Reduction)
PV	…	kritérium vrchol-údolí (Peak to Valley), kritérium pro hodnocení kvality OS
RMS	…	kritérium kvadratický průměr (Root Mean Square), kritérium pro hodnocení kvality
SR	…	Strehlův podíl, kritérium pro hodnocení kvality OS
UHC	…	filtr pro zvýšení kontrastu emisních objektů (Ultra High Contrast)

Doporučená literatura

Česká literatura

[1] Malý, Pavel: Optika. 1. vydání, Karolinum, Praha 2014. ISBN: 9788024622460

[2] Bumbálek, Jan: Základy technické optiky. 2. vydání ČVUT Praha 1995. ISBN: 80-01-00184-9

[3] Kolář, Jan: Amatérské astronomické přístroje. 1. vydání, Hvězdárna a planetárium hlavního města Prahy, Praha 1988. CNB000045387

Cizojazyčná literatura

[4] Malacara, Daniel: Optical shop testing. 3. vydání, Hoboken, , Wiley 2006. ISBN: 978-0-471-48404-2

[5] Smith, Gregory, Hallock: Telescopes, eyepieces, and astrographs : design, analysis, and performance of modern astronomical optics. 1. vydání, Willmann-Bell, Richmond, 2012. ISBN: 978-0-943396-96-5

[6] Suiter, Harold, Richard: Star testing astronomical telescopes: a manual for optical evaluation and adjustment. 2. vydání, Willmann-Bell, Richmond, 2008. ISBN: 978-0-943396-90-3

[7] Cheng, Jingquan: The principles of astronomical telescope design. 1. vydání, N.Y. Springer, New York, 2009. ISBN: 978-0-387-88790-6

Elektronické zdroje

[8] Stránky přístrojové a optické sekce České astronomické společnosti: http://Posec.astro.cz.

[9] Norman Koren photography optics: http://www.normankoren.com/#Tutorial

[10] Astronomical optics: http://www.telescope-optics.net/

[11] Optics Info base: http://www.opticsinfobase.org/

Přílohy

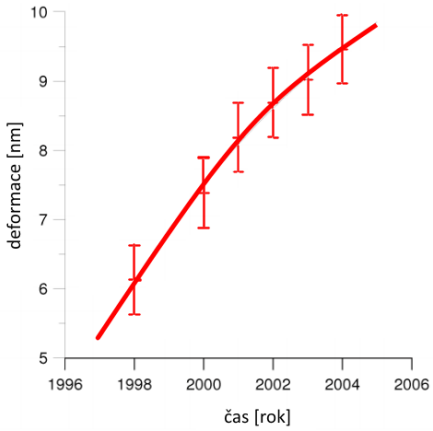
P.1 Přehled nejdůležitějších vzorců

Zvětšení dalekohledu	$\Gamma = \frac{D_{\mathrm{vs}}}{D_{\mathrm{vy}}} = \frac{f_{\mathrm{ob}}}{f_{\mathrm{ok}}}$
Minimální užitečné zvětšení dalekohledu (pro výstupní pupilu 7 mm)	$\Gamma_{min} = D_{\mathrm{vs}}/7$
Maximální užitečné zvětšení dalekohledu (výstupní pupila 2 mm)	$\Gamma_{opt} = D_{\mathrm{vs}}/2$
Maximální zvětšení dalekohledu (výstupní pupila 0,5 mm)	$\Gamma_{max} = 2 \cdot D_{\mathrm{vs}}$
Zvětšení potřebné k rozlišení dvojhvězdy o úhlové vzdálenosti složek ξ [–, “]	$\Gamma_{ds} = 480/\xi$
Velikost rozlišitelného detailu na Měsící [km]	$x = 38{,}8 \cdot \delta_{Dw}$
Rayleigho difrakční limit [“, mm]	$\delta = \frac{138}{D_{\mathrm{vs}}}$
Dawesovo kritérium [“, mm]	$\delta_{Dw} = \frac{116}{D_{\mathrm{vs}}}$
Mezní hvězdná velikost	$\mathrm{MHV}_p = 2{,}5 + 5 \cdot \log D_{\mathrm{VS}}$
Koeficient prodloužení čočky Barlow	$k = \frac{f'}{f' - B}$

P.2 Deformace zrcadla během skladování

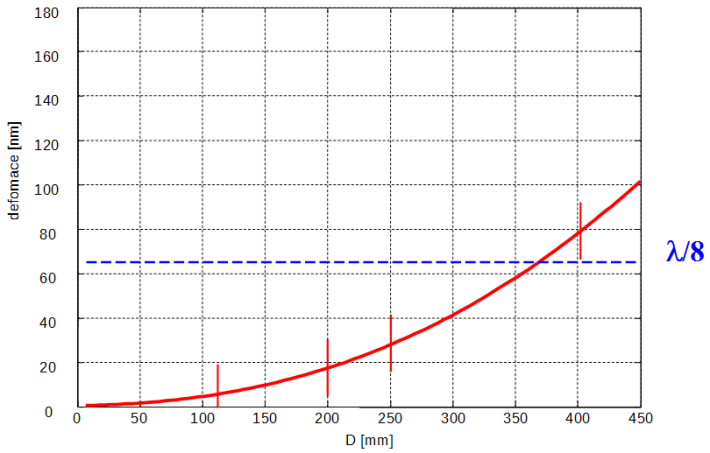
Optická plocha zrcadel je náchylnější ke vzniku deformace než refrakční členy. Zrcadla vyrobená z běžných optických skel (např. BK7) jsou na tuto deformaci náchylnější než zrcadla vyrobená z materiálů s nízkou tepelnou roztažností (SUPRAX, PYREX) [11].

K deformaci může docházet i nesprávným způsobem skladování zrcadla. Největší pravděpodobnost vzniku nežádoucích deformací zrcadla je při jeho skladování ve svislé poloze (tj., když tubus dalekohledu je vodorovně). Pro průměry zrcadla menší než cca 300 až 350 mm není tato deformace nijak významná a neprojevuje se na kvalitě obrazu ani v dlouhodobém horizontu. Zrcadla větších průměrů je doporučeno skladovat ve vodorovné poloze s optickou plochou směrem vzhůru (dalekohled míří směrem k nebi). V tomto případě poskytne objímka a lůžko zrcadla dostatečnou oporu.



Obr. P.1 Deformace rovinné plochy o průměru 114mm (sklo BK7) skladované ve svislé poloze

(Zdroj: Maurizio Vannoni (2006), Mirror long-term deformation at room temperature, Istituto Nazionale di Ottica Applicata, [11])



Obr. P.2 Deformace zrcadel (skla BK7) při dlouhodobém skladování (5 let) ve svislé poloze v závislosti na velikosti zrcadla, měřeno pro zrcadla o průměru 114, 200, 250 a 405 mm a následně aproximováno, modře je vyznačena hodnota odpovídající difrakčnímu limitu pro vlnovou délku 555 nm

(Zdroj: Přístrojová a optická sekce České astronomické společnosti, [8])

P.3 Haasova stupnice rozlišení dvojhvězdy

Tab. P.1 Haasova stupnice rozlišení dvojhvězd [6]

	Slovní zkratka	**Popis**	**Grafický náhled**
1	Tyčinkovité	~80% překryv, Dawesovo kritérium	
2	Osmička	~60% překryv, Rayleigho kritérium	
3	Dotyk	0% překryv, plně rozlišitelné	
4	Šterbina	Mezera 1/6 průměru disku nebo méně	
5	Drobná mezera	Mezera do 1/3 průměru disku	
6	Blízké	Mezera do 1 průměru disku	
7	Široké	Mezera do 1,5 průměru disku	
8	Velmi široké	Mezera do 2 průměru disku	
9	Extra široké	Mezera do 3 průměru disku	
10	Vzdálené	Popsán velikostí skutečného zorného pole	

Pro slovní popis pozorovaných dvojhvězd je často využívána desetistupňová Haasova stupnice v kombinaci s hodinovým úhlem a popř. i popisem barev složek (u jasných složek).

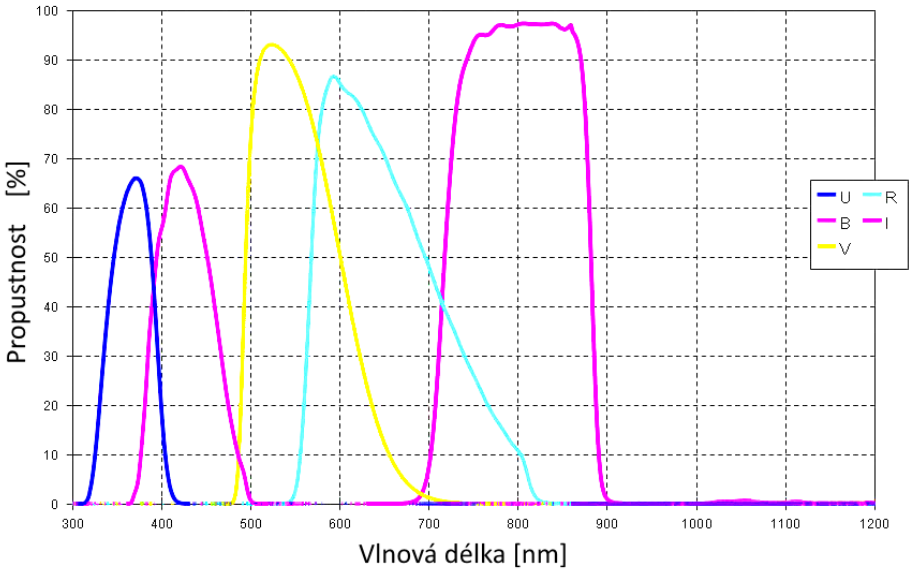
Příklad označení: *5-2h* dvojhvězda s drobnou mezerou a polohou složek 2h.

P.4 Filtry UVBRI

Všechna fotometrická měření (ať již minim proměnných hvězd, světelných křivek asteroidů, či supernov) by mělo být realizováno za použití nějakého standardního filtru, aby jej bylo možné porovnat s jinými měřeními.

Měřících systémů existuje celá řada. Jedním z nejstarších a nejpoužívanějších standardních fotometrických systémů je Johnson-Cousinsův fotometrický systém. Tento systém definuje pět spektrálních oblastí propustnosti: U (Ultra-violet), B (Blue), V (Visible), R (Red), a I (Infra-red).

Filtr U je používaný pouze výjimečně, protože kvantová účinnost většiny CCD chipů je v této oblasti velmi nízká. Filtru U má navíc velmi malou propustnost. Zbývající fotometrické filtry BVRI jsou využívány naopak velmi často.



P.3 Charakteristika filtrů UVBRI
(Zdroj: http://www.baader-planetarium.de/)