

Astronomická společnost v Hradci Králové

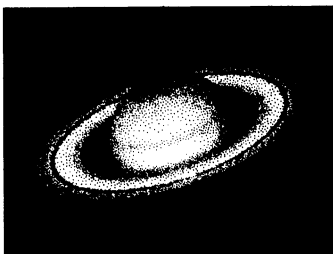
PŘEDNÁŠKY

č.3

POZOROVÁNÍ PLANET: REFRAKTOR VERSUS REFLEKTOR

William P. Zmek

4.10.1997





Autor William Zmek je optickým mechanikem u Hughes Danbury Optical Systems, Inc., v Danbury ve státě Connecticut. Poznámává: „Ano, hrál jsem roli při konstrukci Hubblova teleskopu, protože jsem byl v týmu, který vyvíjel a konstruoval rychlý fotometr, když jsem byl studentem na universitě ve Wisconsinu“.

Co motivuje pozorovatele planet a Měsíce vybírat si určitý dalekohled? Většina souhlasí, že je vedena snahou získat co nejjemnější detaily. Mnozí amatéři už mají vyhraněný cit (správný nebo špatný) pro to, jak by měl vypadat ideální dalekohled, pokud jde o kvalitu vlnoplochy a optický design. Postoje a názory se v posledních letech vyostřily, zvláště s objevením se kvalitních komerčních apochromatických refraktorů.

V některých kruzích si tyto poklady skleněné technologie a designu získaly reputaci nejlepšíh přístrojů pro Měsíc a planety. Jsou však drahé, a proto nechávají mnohé pozorovatele v zajetí méně vhodných přístrojů. Dokonce i klasický dublet 1:15 je často doporučován pro pozorování planet, přestože má zbytkovou barevnou vadu.

Nějaký čas zachvátila amatérský svět „průměrová horečka“ a nyní se v některých případech objevuje „refraktorová horečka“ spolu s nevysloveným rozkvětem „reflektorového zoufalství“. Amatéři mají právo se ptát, proč je takový zmatek v oblasti kvality obrazu. Často se otočí velké sumy peněz, než dojde k rozhodnutí, který dalekohled koupit. Na druhou stranu je potřeba říci, že teprve dost pozdě v historii dalekohledů - až ve čtyřicátých letech - našla našla optická věda prostředky ke kvantifikaci kvality obrazu přístroje na plošných objektech.

V tomto článku se pokusím seznámit širší amatérskou veřejnost s výsledky tohoto výzkumu. Během dlouhé cesty ke kvantifikaci kvality obrazu dalekohledu se objeví i několik jednoduchých vzorců a zvláště se zaměřím na vysvětlení rozdílu mezi refraktory a reflektory při pozorování planet.

KONTRAST: KLÍČ KE KVALITĚ OBRAZU

Kdybch se zeptal co charakterizuje dobrý obraz v dalekohledu, dobře informovaný amatér by měl odpovědět: "Vysoký kontrast". Nemůžete slyšet pravdivější slova, pokud jde o zaznamenávání jemných detailů a stínů. Základním faktorem je schopnost teleskopu *zachovávat* kontrast, jenž už je přítomen v obrazu objektu, který pozorujeme. Kontrast je obecně lepší v případě velkých detailů a horší v případě těch jemných. Také záleží na průměru dalekohledu, konfiguraci a optické kvalitě.

Součástí problému je samozřejmě i lidské oko. Kontrast musí překročit určitou minimální úroveň, aby se stal viditelným. Tomu se říká *vizuální práh kontrastu*. Detaily v obrazu existují, ať už se na ně díváme, nebo ne, protože jsou skutečnou součástí optického obrazu vytvořeného světlem v ohniskové rovině dalekohledu. Ale pokud je kontrast oproti původnímu planetárnímu disku pod vizuálním prahem (menší než 0,1), detaily nebo útvary nebudou viditelné. Prah kontrastu závisí mimo jiné i na úhlovém rozměru útvaru, který pozorujeme.

Jakákoliv diskuse o kvalitě obrazu dalekohledu tedy musí zahrnovat tři nezávislé faktory:

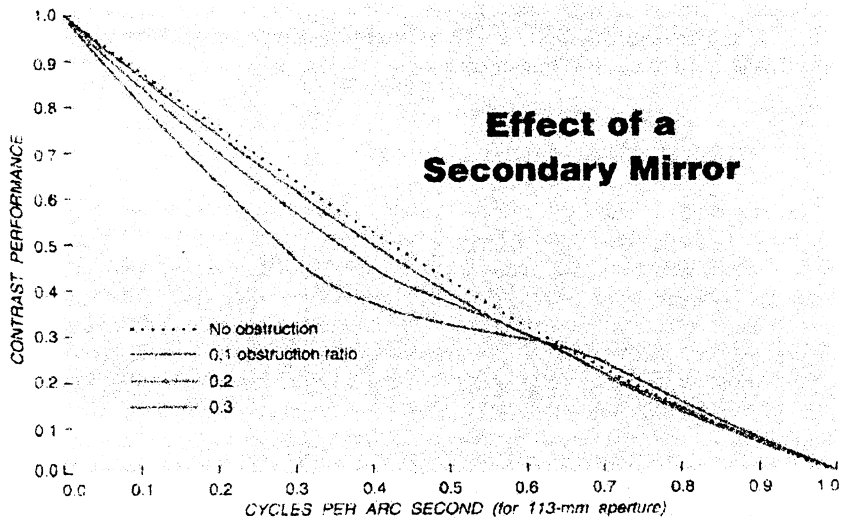
- * vlastní kontrast plošného objektu jako je planeta,
- * kontrastní kvalitu dalekohledu,
- * kontrastní práh lidského oka.

Začneme jedním z hlavních problémů debaty reflektor versus refraktor, tedy efektem umístění malé překážky do cesty světla v dalekohledu.

CENTRÁLNÍ ZACLONĚNÍ

Většina běžných konstrukcí reflektorů počítá se sekundárním zrcátkem, umístěným v přicházejícím svazku paprsků. Jak je všeobecně známo, tato částečná blokáce průměru mění difrakční obrazec hvězd a v případě Měsíce a planet zmenšuje kontrast. Ovšem méně známé je, *o kolik* je vlastně kontrast redukován. Na OBR. 1 na následující straně je znázorněna kvalita kontrastu pro čtyři různé, vysoce kvalitní dalekohledy, z nichž tři mají centrální zaclonění a jeden ne. Jak se dá předpokládat, čím větší je sekundární zrcátko, tím horší je výsledek. (Kuriózní je kvalita u zacloněných dalekohledů o něco málo lepší v případě jemných detailů blízko limitu rozlišovací schopnosti).

Lze tyto závěry sumarizovat v nějakém jednoduchém vzorci? Na první pohled se kresby zdají být příliš komplikované, ale vezmeme-li v úvahu fakt, že většina útvarů na planetách má nízký kontrast a zahrneme-li ještě práh lidského vidění, můžeme tu komplikovanější část křivek, poblíž limitu rozlišovací schopnosti, ignorovat.



OBR. 1: Kvalita kontrastu dalekohledů s různými středovými zcloněními v porovnání s nezacloněným přístrojem. Každá křivka je označena poměrem průměru clonící překážky a průměru primárního zrcadla. Prohlubeň v křivkách ilustruje ztrátu kontrastu a podporuje tvrzení, že Newtonovy a Cassegrainovy dalekohledy redukuje kontrast. Avšak kvalita obrazu takových přístrojů dohání, ba dokonce předčí kvalitu obrazu nezacloněného dalekohledu v případě jemných detailů poblíž hranice rozlišovací schopnosti (pravý konec křivek).

OBR. 2 ukazuje, jak centrálně zcloněný teleskop zvládá plošný objekt o nízkém kontrastu, jako je třeba Mars. Ta část křivky, která se nachází nad vizuálním prahem, téměř přesně odpovídá kontrastní křivce o něco menšího, nezacloněného dalekohledu. Jinak řečeno, *kvalita obrazu nezacloněného dalekohledu na detailech s nízkým kontrastem je stejná, jako kvalita obrazu nezacloněného dalekohledu s o něco menším průměrem.*

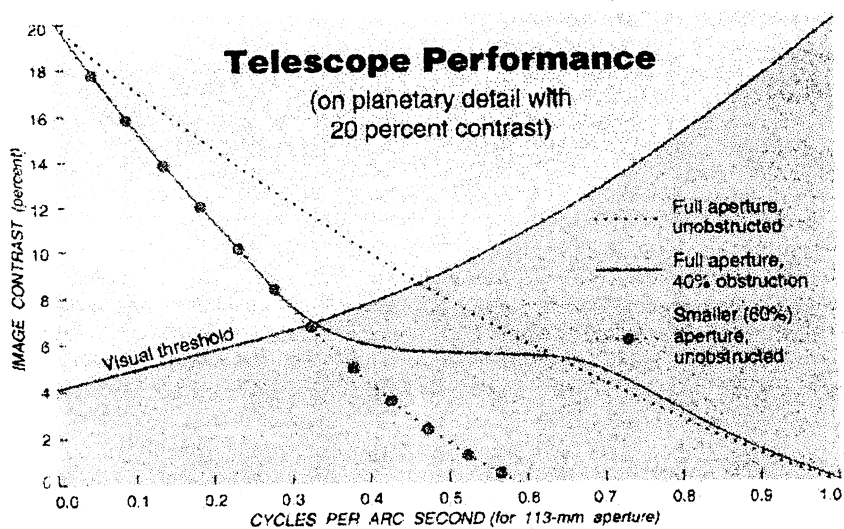
Můžeme tedy uvažovat o pojmu *efektivní průměr*, který je menší, než skutečný průměr, který odpovídá danému přístroji se sekundárním zrcadlem. Jak se jasné z kresby, platí tento jednoduchý vzorec:

$$D_{\text{efekt}} = D_{\text{prim}} - D_{\text{sekund}}$$

kde **D** označuje průměr. Například desetipalcový dalekohled s třípalcovým sekundárním zrcátkem bude na planetách ukazovat stejné detaily, jako nezacloněný sedmipalcový dalekohled odpovídající kvality. (Vzorec je poněkud pesimistický v případě velmi malých zclonění.)

Tento překvapivý výsledek přesouvá problém centrálního zaclonění do perspektivy, kterou pozorovatel může dobře a intuitivně pochopit. Konvenční moudro, že sekundární zrcátko redukuje kontrast, se přemění na termín efektivního průměru. To umožní uživatelům reflektorů jakékoliv kvality setřást pocit, že některé jejich dalekohledy nejsou adekvátní pro pozorování planet.

Vidíme, že centrální zaclonění není fatální vadou. Vysoce kvalitní obraz planety *není* výhradní doménou refraktorů. Dokonce špičkový šestipalcový reflektor s jednopalcovým diagonálním zrcátkem bude schopen překonat jakýkoliv čtyřpalcový apochromatický refraktor. Pokud tomu pořád ještě nevěříte, přečtete si poznámky od Terence Dickinsona a Douglase George, dvou velmi zkušených pozorovatelů ve Sky and Telescope, březen 1952, str. 253.



OBR. 2: Kontrast obrazu typického planetárního disku s vlastním kontrastem 0,20, jak je zobrazen dalekohledem se středovým zacloněním 4/10 průměru hlavního zrcadla. Čára s velkými kolečky odpovídá tomu, jak by to vypadalo v nezacloněném dalekohledu o velikosti 6/10 onoho průměru. Zakreslena je také křivka pro práh vizuálního kontrastu. Z obrázku je jasné, že kontrast poskytovaný menším dalekohledem v oblasti nad vizuálním prahem je téměř identický s obrazem poskytovaným velkým dalekohledem se zacloněním.

Ve skutečnosti odpovídá šestipalcový reflektor s jednopalcovým diagonálním zrcátkem pětipalcovému dalekohledu, pokud uvažujeme o potenciální kvalitě obrazu planet. Diagonální zrcátko je ještě méně škodlivé pro světelný dosah, kde je důležitá nezacloněná plocha. Tam je efektivní průměr kolem 5,9 palce (v případě té nejlepší antireflexní vrstvy). TAB. 1 uvádí podobné výpočty pro několik běžných komerčních přístrojů.

TAB. 1: dalekohledy se středovým zacloněním (všechny rozměry jsou v palcích)

<i>Model dalekohledu</i>	<i>Typ optiky</i>	<i>Průměr zrcadla</i>	<i>Průměr zaclonění</i>	<i>efektivní průměr světel. zisk</i>	<i>kontrast</i>
Celestron 5	1:10, SC	5,0	1,9	4,6	3,1
Celestron 8	1:10, SC	8,0	2,7	7,5	5,3
Meade Starfinder	1:6, Newt.	8,0	1,5	7,9	6,5
Meade 2080	1:10, SC	8,0	3,0	7,4	5,0
Parks 8-inch	1:6, Newt.	8,0	1,8	7,8	6,2
Parks H.I.T.	1:12, Cass.	8,0	2,7	7,5	5,3
Parks H.I.T.	1:20, Cass.	16,0	4,6	15,3	11,4

RAMENA PAVOUKU

Difrakční jevy způsobené uchycením pomocného zrcátka byly v astronomických kruzích po generace podceňovány. Valná část diskuse se vztahuje k paprskům, které se objevují u obrazů hvězd. Úplná nepřítomnost upevňovacích držáků (pavouku) u mimoosových soustav a refraktorů je obecně hodnocena jako výrazná výhoda. Pokud mají jasné hvězdy přímé paprsky, které jsou snadno viditelné, musí zde existovat *něco*, co také poškozují obrazy planet. To je pravda, ale potvrzuje to víru, že ramena musejí být buďto odstraněna, nebo zakřivena, jak se někteří pozorovatelé domnívají?

Porovnání kvality kontrastu dalekohledu s rameny (s pavoukem) a bez pavouku snadno tuto otázku vyřeší. Na OBR. 3 a OBR. 4 jsou nakresleny výsledky pro několik různých šířek ramen (zahrnul jsem také křivku pro dalekohled bez pavouku).

Křivky na tomto grafu nám dávají druhý vzorec, který se vztahuje k difrakci na dvouramenném pavouku:

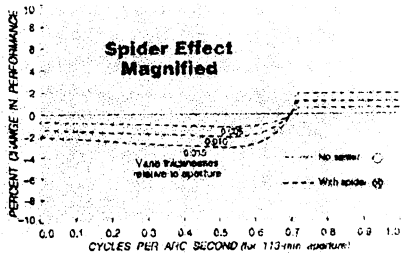
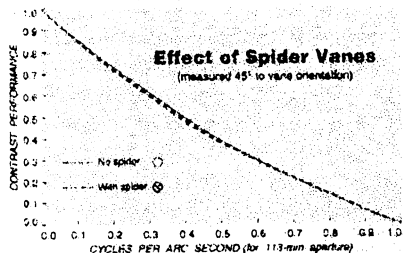
$$\text{Maximální ztráta kontrastu} = 2 T_{\text{ramene}} / D_{\text{prim}} ,$$

kde T_{ramene} je šířka ramene a D_{prim} je průměr primárního zrcadla. Tento zákon, získaný odhadem, nám ukazuje poměrnou ztrátu kontrastu pro detaily, které mají dvakrát takovou velikost, než je hranice rozlišovací schopnosti. (V případě detailů jiných velikostí jsou ztráty ještě menší.) Chcete-li tuto hodnotu převést do procent, vynásobte ji 100. Například třípalcový dalekohled s 0.03 palce tlustými rameny utrpí přibližně 1% ztráty kontrastu ! Pro čtyři ramena je třeba ve vzorci změnit koeficient ze 2 na 4 a ztráta kontrastu v odpovídajícím případě pak bude 2%.

Je jasné, že ztráta kontrastu, způsobená rameny pavouku je proti běžným představám zanedbatelná. Ovšem *možnost* znatelné ztráty kvality obrazu stále ještě

existuje. Natočené, nezcentrované paprsky, nemluvě o příliš tlustých paprscích, mohou samozřejmě způsobit ztlačení kontrastu. Efekt difrakce na pavouku může být také vyjádřen přibližně následujícím vzorcem:

$$D_{\text{efekt}} = D_{\text{skut}} - 2 T_{\text{ramene}}$$



OBR. 3: Kvalita kontrastu dalekohledu vybaveného dvouramenným pavoukem s různými tloušťkami ramen. Na normálním grafu je vliv pavouku tak malý, že se křivky prakticky překrývají. Z toho důvodu byl graf překreslen do OBR. 4 jako procentuální ztráta kontrastu a byl vertikálně roztažen kvůli zvýraznění. Šířky ramen jsou vyjádřeny jako zlomky průměru, čímž se tento graf stává použitelným pro teleskop jakéhokoliv průměru, zatímco horizontální měřítko je přečíslováno tak, jak je to popsáno v rámečku „CO TO JE KVALITA KONTRASTU“. Ztráta kontrastu pro ramena o šířce 0,01 je maximálně dvě procenta. Ve skutečnosti je vidět, že difrakce na ramenech zlepšuje obraz v případě jemných detailů poblíž hranice rozlišovací schopnosti dalekohledu.

Aby se ramena pavouku úplně eliminovala, je možné připevnit pomocné zrcátko na optické okno, tedy planparalelní desku na vstupní otvor dalekohledu nebo u Schmidtových a Maksutovových soustav na korekční čočku. Pokud to uděláte v případě Newtonova dalekohledu, výsledkem bude, že okno vám přidá ještě další člen do optického systému. Jeho kvalita nikdy nemůže být dokonalá. (Ovšem dobrá okna, dokonce i ta téměř perfektní, jsou k dostání za slušnou cenu.)

Zkušeni pozorovatelé planet však všude vyhláší výhody takových oken. Co je tedy skutečně odpovědné za zlepšení obrazu? Nemůže to být nepřítomnost pavouku, protože, jak jsme viděli, změna kterou způsobí v kontrastu, je nepozorovatelná (předpokládáme-li, že ramena jsou dostatečně tenká). Mnohem přijatelnějším důvodem je, že uzavření tubusu, které se vlastně týká i refraktorů, způsobí výrazné zlepšení i v jiné oblasti: v oblasti lokálního neklidu vzduchu.

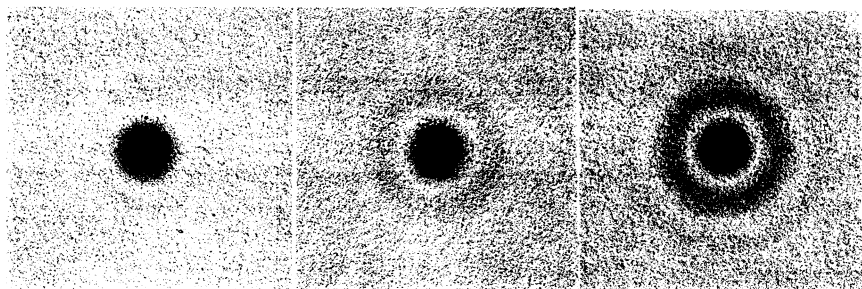
CO TO JE KVALITA KONTRASTU

Kdokoli, kdo otáčí knoflíky na televizním přijímači, nebo má rád hezké fotografie, má asi svoji intuitivní představu o kontrastu. Na obraze se světlými a tmavými plochami je kontrast mezi nimi definován jako rozdíl jejich jasnosti dělený součtem. Čím vyšší je toto číslo, tím nápadnějším a hrubším se stává daný útvar. Maximální možný kontrast je 1,0. Hodnocení kvality kontrastu dalekohledu je ve skutečnosti záležitostí nakreslení poměru kontrastu obrazu ke kontrastu objektu pro detaily v celém rozsahu rozlišovacích schopností (úhlových velikostí). V technické literatuře je kontrast často nazýván modulací a kvalita kontrastu je to samé, jako modulace funkce transferu, neboli MTF. Přesně řečeno, kresba tohoto typu odpovídá spíš průběhu změny jasnosti se sinusovkou přes planetární disk, než ve skvrně nebo útvaru. Grafy v tomto článku ukazují kvalitu kontrastu dalekohledu o průměru objektivu 113 mm. (4,4 palce). Je zvykem zakreslovat velikosti detailů podle horizontální osy v inverzních jednotkách, například 0,2 reprezentuje detail velký 5". Abyste získali hodnoty platné pro větší dalekohledy, jednoduše vynásobte čísla podél horizontální osy grafu faktorem $D/113$, kde D je nový průměr dalekohledu v milimetrech. Zakreslené křivky zůstávají nezměněny. Na vertikální ose je kvalita kontrastu. 0,5 znamená, že detail na obraze se jeví s polovičním kontrastem, než je na objektu ve skutečnosti. Z těchto grafů plynou tři velmi důležité závěry:

* *Kontrast obrazu je vždy menší, než kontrast na samotném objektu.* Dokonce i pro perfektní dalekohled. Čím je detail na objektu menší, tím slabší se tento detail jeví na obraze. Tedy Enkeho dělení Saturnova prstence A je mnohem hůře viditelné v malém amatérském dalekohledu, než mnohem širší Cassiniho dělení. Tyto útvary, které mají v opozici úhlové rozměry (šířky) 0,74" resp. 0,05", mají přibližně stejný vlastní kontrast - přes 0,9. Ale kontrast na obraze může být pro užší z mezer blízký nule.

* *Existuje hranice rozlišovací schopnosti* a to v bodě, označeném 1,0 na horizontální ose, kde křivky klesají k nule. Ve 113 mm velkém dalekohledu nebudou vidět žádné detaily v obraze, které jsou menší, než 1", dokonce i když nebeský objekt je přeplněný útvary takto velkými nebo menšími. Saturnovy prstence obsahují velmi jemná dělení, "drážky na gramofonové desce", objevené během misí sond Voyager. Nikdy je nemůžeme vidět ze Země menšími dalekohledy, dokonce i když jejich optika a neklid vzduchu jsou perfektní, protože jsou prostě menší, než hranice rozlišovací schopnosti pro takové přístroje.

* *Kvalita kontrastu může být přesně vypočítána*, dokonce i měřena v laboratoři. Dalekohledy, které mají defekty ve výbrusu nebo zcentrování, budou mít křivky kvality kontrastu horší, tedy nižší, než ty, které jsou nakresleny na grafech. Porušení vlnoplochy kvůli chybám v broušení nebo nezcentrování dalekohledu nebo chvění vzduchu, stejně jako světlo rozptýlené na překážkách, to všechno produkuje specifické křivky kvality kontrastu.



OBR. 5: Centrální zacinění mění způsob, jakým dalekohled vytváří obrazy hvězd, stejně tak planet. Zleva jsou zde obrazy hvězd vytvořené dalekohledy se zaciněním 0, 25 a 50 procent. Všimněte si, jak nepravé Airyho disky se stávají slabšími a menšími a difrakční kroužky jsou postupně jasnější. Počítačový program, který vygeneroval tyto teoretické obrázky, napsal Richard Berry. Pracuje na rychlých počítačích IBM PC (nebo kompatibilních) s grafikou VGA. I vy je můžete obdržet, pošlete-li označovanou obálku se zpáteční adresou a formátovanou disketu na adresu Route 1, Box 58A, 6388 Sauk Trail Rd., Cedar Grove, WI 53 013.

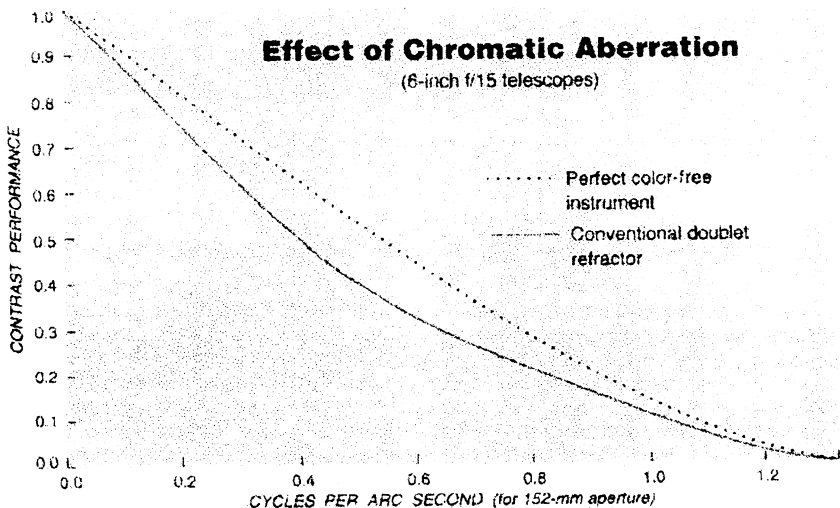
BAREVNÉ EFEKTY

Všechny refraktory donedávna dosažitelné na amatérském trhu trpěly výraznou chromatickou vadou - „sekundárním spektrem“ achromatického objektivu. Reflektivní optika samozřejmě barevnou vadu nemá. Na pořadu je tedy pohled na vliv barevné vady na obraz poskytovaný dalekohledem.

Tvůrci objektivů se obvykle snaží přivést dvě vybrané vlnové délky - jednu červenou a druhou modrou - do společného ohniska. Všechny ostatní vlnové délky jsou korunovým a flintovým sklem kompenzovány nedokonale a přicházejí do poněkud odlišného ohniska. Z toho důvodu je obraz v ohnisku obklopen barvami, ale úroveň této vady je extrémně malá v porovnání s tím, co bychom dostali jednoduchým objektivem se stejnou ohniskovou vzdáleností a průměrem. Navíc, oko je mnohem méně citlivé na vlnové délky, které vytvářejí halo kolem obrazu (jde především o hluboké fialové a vzdálené červené vlnové délky), než k vlnovým délkám, které vytvářejí jádro obrazu.

To všechno lze modelovat z ohledem na vliv na kontrast. Výsledek pro jinak perfektní refraktor - dublet 1:15 s typickou barevnou vadou - je zobrazen na OBR. 6 na následující straně. Ve skutečnosti achromát zobrazuje přibližně stejně dobře jako perfektní reflektor s asi třicetiprocentním centrálním zaciněním. Jak záhy uvidíme, také ukazuje velmi podobně, jako objektiv bez barevné vady s chybou vlnoplochy 1/4 vlnové délky.

To je velmi důležitý výsledek. Zdůrazňuje skutečnost, že centrálně zaciněný reflektor *nemusí* ukazovat hůř než běžný refraktor se stejným průměrem. Pouze mimoosové reflektory a apochromatické refraktory zůstávají, i když spíše teoreticky, lepší, protože nejsou zaciněné a zároveň netrpí téměř žádnou barevnou vadou.



OBR. 6: Zbytková barevná vada typického dubletu 1:15 snižuje jeho kontrast přibližně stejným způsobem a o stejnou hodnotu, jako to činí centrální zaclonění Newtonova reflektoru. Proto obecně přijímané tvrzení, že refraktory zobrazují lépe planety, musí být diskutováno s ohledem na ostatní vlivy probírané v textu. Všimněte si, že barevné vady nemají stejné měřítko jako ostatní vlivy a tudíž tento diagram, narozdíl od všech ostatních, se vztahuje pouze k běžnému refraktoru s šestipalcovým průměrem z korunového a flintového skla 1:15. Světelnější šestipalcový dalekohled bude zobrazovat hůře. Větší refraktor se světelností 1:15 bude mít také horší obraz, menší refraktor se světelností 1:15 bude lepší.

ROZPTYL

Kontaminace částicemi (špinou), lokální defekty v pokovení optiky, mikrokapky vlhkosti a škrábance a vyhlazeniny zbylé po leštění - to vše způsobuje rozptyl světla primární vlnoplochy a vytváří slabé široké halo okolo jasných objektů. Tyto defekty fungují jako malinká zaclonění, rozbíjejí přicházející vlnoplochu a rozptylují světlo difrakcí. Navíc většina světla dopadajícího přímo na tyto defekty samotné je odražena nebo lámána pod různými úhly.

Rozptyl je samozřejmě všudypřítomný jak v reflektorech, tak v refraktorech. Pokovení reflektoru však bude mnohem pravděpodobněji časem trpět "obnošením a potrháním". Prostě reflektory mají tendenci přitahovat tuto chorobu. Rozptýlené světlo se přidává poměrně malým dílem téměř rovnoměrného světla k obrazu planety, čímž poněkud snižuje kontrast. Následující vzoreček přibližně udává ztrátu, kterou můžeme očekávat:

$$\text{Změna v kontrastním faktoru} = 1 - 2(A_{\text{rozptyl}}/A_{\text{prim}}) ,$$

kde A je celková plocha. Pouze mikroskopický průzkum optického povrchu může ukázat relativní plochu rozptylujících částic.

Jako příklad si představme, že zrcadlo je pokryto škrábanci po leštění o průměru 10 mikronů v množství přibližně 130 na jeden čtvereční milimetr. Takový povrch bude v normálním pokojovém světle viditelně šedý a pod mikroskopem bude vypadat hrozně. Jednoduchý výpočet ukazuje, že pouze jedno procento plochy bude zacloněno. Když tuto úroveň dosadíme do předcházejícího vzorce, dostaneme pouze dvě procenta ztráty kontrastu.

Je tedy vidět, že dokonce očividně špinavá nebo poškrábaná optika nesníží nijak vážně kontrast obrazu. Moje první zrcadlo dokončené v době, kdy mi bylo něco přes deset let, je pomníkem této skutečnosti. Vypadalo, jako kdyby na něj někdo zautočil čistícím práškem, a přesto jsem s ním poprvé viděl polární čepičky a tmavé útvary na Marsu.

POROVNÁNÍ: REFRAKTORY VERSUS REFLEKTORY

Téměř všechny běžné zdroje vad vlnoplochy mají větší vliv na reflektory než na refraktory. Hlavní chybou refraktoru je nedokonalá korekce barev a ta je obvykle vyvážena jinými problémy reflektorů.

* *Chyby při broušení.* Při dané toleranci chyby povrchu zůstávající po parabolizaci je dvouzrcadlový reflektor zatížen přibližně 3x větší chybou vlnoplochy než klasický dublet se vzduchovou mezerou. S citlivostí reflektoru na tlak v objímce je to dokonce ještě horší.

* *Centrování.* V porovnání s refraktory má optika reflektoru obvykle více nastavitelných součástí, které se vychylují z nastavené polohy kvůli tepelným cyklům a mechanickým vlivům při transportu a používání dalekohledu.

* *Neklid vzduchu.* Reflektor s centrálním zacloněním musí mít větší průměr než nezacloněný dalekohled, aby se docílilo stejného obrazu v případě objektů s nízkým kontrastem a větší průměr je mnohem citlivější na efekty špatného seeingu a vzduch ohříváný pozorovatelem má mnohem větší šanci narušit přicházející vlnoplochu. Uzavřený tubus refraktoru snižuje gradienty

CHYBA VLNOPLOCHY

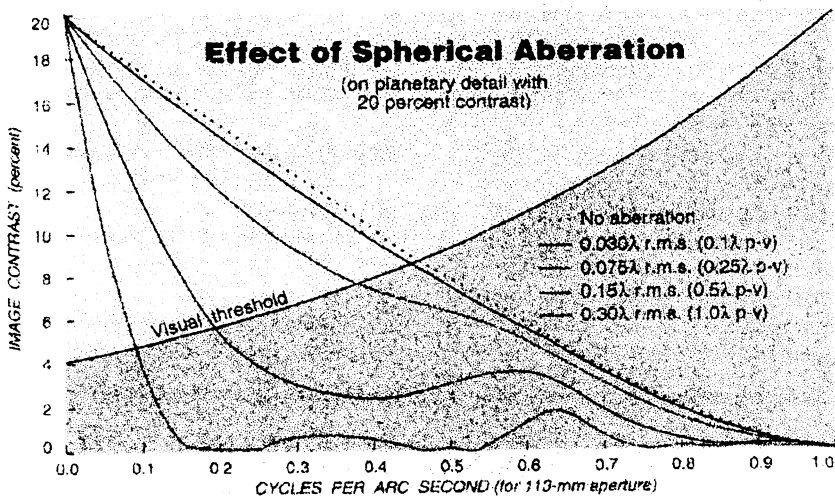
Jak už jsme viděli, ani chromatická vada, ani rozptyl světla, nejsou rozhodujícími faktory při rozhodování mezi správně zkonstruovaným refraktorem a reflektorem stejného průměru. Minulé odstavce přinesly stejný závěr, pokud jde o vlivy způsobené centrálním zacloněním a rameny pavouku. Co tedy ještě zbývá ?

Mnohem podstatnějšími mezi problémy ovlivňujícími amatérské přístroje, jsou chyby při broušení optiky, nesprávné zcentrování optiky, napětí způsobené špatnou montáží optiky a neklid vzduchu. Překvapivě, všechny tyto vlivy způsobující porušení vlnoplochy mají tendenci více ovlivňovat reflektory než refraktory. To je nešťastná situace, protože kontrast jemných planetárních detailů je obzvlášť citlivý na chyby vlnoplochy. Zbývá nám zjistit, *jak* citlivý.

OBR. 7 porovnává kontrast pro několik úrovní sférické aberace s přístrojem bez aberace a ukazuje ztrátu vizuálního rozlišení. Abychom charakterizovali tuto ztrátu, můžeme opět vypočítat efektivní průměr dalekohledu. I když s menší přesností, než se nám to podařilo v případě centrálního zaclonění. Použitelný odhad dává následující rovnici:

$$D_{\text{efekt}} = D_{\text{skut}} \exp(-33E^2)$$

kde E je střední odmocnina chyby vlnoplochy. Tato rovnice opět platí pouze pro detaily s *nizkým kontrastem*, ale slouží stejně dobře pro refraktory i pro reflektory. Je docela přesná až do střední odmocniny chyby vlnoplochy $0,15 \lambda$. V tomto bodě je efektivní průměr dalekohledu již menší než *polovina* skutečného průměru ! Skutečně, vliv těchto vad může být pro pozorovatele planet velmi nepříznivý.



OBR. 7: Pouze velmi kvalitní dalekohled může ukázat jemné detaily na planetách co nejlépe. Každá ze čtyř zobrazených křivek se vztahuje k teleskopu s danou hodnotou střední odmocniny chyby vlnoplochy (s absolutními hodnotami chyb uvedenými v závorkách). Abyste odhadli vizuální kontrast jiného přístroje, přehodnoťte vodorovnou osu pro daný průměr dalekohledu tak, jak je vysvětleno v rámečku „CO TO JE KVALITA KONTRASTU“.

RAYLEIGHOVO KRITÉRIUM

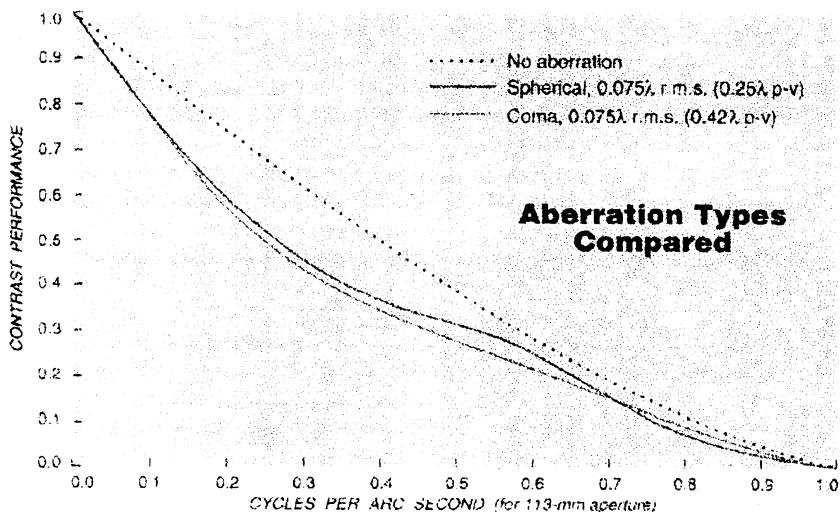
Moderní optická věda nám říká, že známé čtvrtvlnové kritérium Lorda Rayleigha je nedostatečné pro přijatelné zobrazení dalekohledu. Je třeba uvažovat také *plochu*. Pro ilustraci: představme si, že chyba $1/4$ lambda zatěžuje pouze $1/100$ průměru dalekohledu. To způsobí velmi malé poškození obrazu v porovnání s defekty, které mají vliv na celý průměr (jako je třeba astigmatismus).

Tudíž lepší cestou k vyjádření Rayleighova kritéria je využívání plošné míry pro úroveň chyby, jako je střední odmocnina chyby vlnoplochy. Taková volba má smysl i proto, že je podporována i dalším závěrem difrakční teorie, že ztráta maximální jasnosti obrazu hvězdy závisí na střední odmocnině chyby vlnoplochy a ne na absolutní hodnotě chyby.

Vychází, že sférická aberace $1/4$ vlnové délky v absolutní hodnotě je dost přesně rovna střední odmocnině chyby vlnoplochy $0,075$ lambda. Použijeme-li tuto hodnotu, můžeme pomocí rovnice uvedené výše vytvořit novou podobu tradičního Rayleighova kritéria:

$$D_{\text{efekt}} = 0,83 D_{\text{skut}}$$

Jinými slovy: pokud jde o kontrast, dalekohled využívající Rayleighovy tolerance bude zobrazovat asi stejně, jako dokonalý dalekohled s přibližně $8/10$ jeho průměru. Pouze zkušený pozorovatel si může být jist, že zaznamená takový rozdíl.



OBR. 8: Dvě obvyklé optické vady přítomné se stejnou hodnotou střední odmocniny chyby vlnoplochy mají přibližně stejný vliv na kontrast obrazu. Sférická aberace je obvykle výsledkem špatné parabolizace, zatímco koma se objevuje v případě, že optika není zcentrovaná.

Až dosud jsme se zabývali pouze vlivem sférické vady, běžným problémem dalekohledu, který je často výsledkem nedokonalé parabolizace. Další vada, koma, se v osovém obrazu planet objevuje pouze zřídka, pokud optika není nezcentrovaná.

OBR. 8 ukazuje, že hodnota střední odmocniny chyby vlnoplochy $0,075 \lambda$, ať už jde o sférickou aberaci *nebo* komu, má přibližně stejný vliv na kontrast. V tom případě má ale koma skutečnou absolutní hodnotu chyby $0,42 \lambda$! Pokud tedy trváme na Rayleighově čtvrtvlnovém kritériu, zjistíme, že koma produkuje pouze polovinu ztráty kontrastu oproti sférické aberaci. To vše jasně potvrzuje naše předchozí závěry, že absolutní hodnoty vad jsou zavádějící, zatímco velikost vady vyjádřená jako střední odmocnina může sloužit v případě kontrastu jako vynikající vodítko.

CHYBY VLNOPLOCHY: K JÁDRU PROBLÉMU

Zkušení amatéři vědí, že musejí věnovat pozornost nikoli hodnotě chyby vlnoplochy dalekohledu, ale tomu, jak byla tato hodnota získána. Když na konci 19. století Lord Rayleigh stanovil své čtvrtvlnové kritérium pro zobrazení dalekohledu, měl na mysli, že rozdíl mezi maximální a minimální chybou na vlnoploše přicházející směrem k ohnisku nebude větší než $1/4$ vlnové délky.

Alternativní míra - střední odmocnina chyby - si získala špatnou pověst mezi amatéry kvůli domněnce, že by výrobci mohli toto kritérium zneužít k tomu, že jejich produkty budou vypadat lepší, než ve skutečnosti jsou. Avšak střední odmocnina chyby, pokud ji bereme jako takovou, dává lepší „ocenění“ pro porovnání přístrojů, protože uvažuje jak velikost, tak plošný rozsah defektů. Je to prostě druhá odmocnina součtu druhých mocnin chyb naměřených na stovkách různých míst vlnoplochy.

Jednoduše si pamatujte, že střední odmocnina je numericky veliká asi jako 30% absolutní hodnoty chyby v případě, že dalekohled trpí čistou sférickou aberací. Takový přístroj splňuje Rayleighovo kritérium pouze v případě, že střední odmocnina chyby vlnoplochy je $0,075 \lambda$ a nebo menší.

Převést měřítko absolutní hodnoty chyby vlnoplochy nebo střední odmocniny na ekvivalent chyby skleněného povrchu je jednoduché. Pro zrcadlo dělte 2, pro čočku dělte faktorem $(n-1)$, kde n je index lomu skla. Protože n je v průměru 1,57 (v případě čoček používaných v astronomických dalekohledech), plyne z toho, že čočky mohou mít až 3,5x větší chyby povrchu než zrcadlo, aby dosáhly stejného porušení vlnoplochy.

Vlnová délka je docela vhodná jednotka pro posuzování kvality, právě protože je tak malá. Pro žlutozelené světlo, ke kterému je lidské oko nejcitlivější, je vlnová délka asi 0.00056 mm .

ZÁVĚRY

Proč mají tedy refraktory lepší pověst než reflektory ? Většinu odpovědi už známe.

Chyby vlnplochy způsobují relativně vážné ztráty při pozorování Měsíce a planet a reflektory jsou mnohem náchylnější k těmto problémům, než refraktory. Dalším faktorem je i centrální zaclonění, ale pouze pokud porovnáваме skutečné průměry dalekohledů a nikoli efektivní.

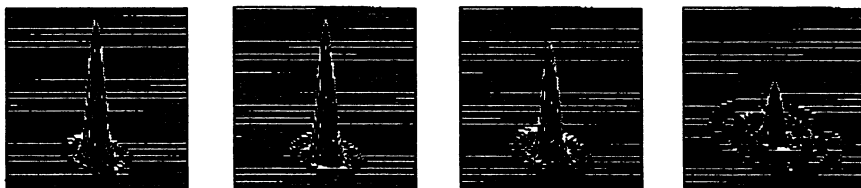
Je pravda, že všechny refraktory trpí alespoň zbytkovou chromatickou vadou, ale mám podezření, že lidský zrak - ten skvělý obrazový procesor - může ve skutečnosti získat z obrazu refraktoru mnohem více informace než vyplývá z křivky kontrastu nakreslené na OBR. 6. Toto podezření je založeno na skutečnosti, že chromatická vada je vlastně „barevně kódována“ a tudíž se týká barevného kontrastu, který má lidské oko šanci dekódovat.

Pokud by nestačily tyto výhody, jsou ještě další faktory přispívající k tendenci refraktorů překonávat reflektory. Patří mezi ně tuhá konstrukce (tuhé reflektory jsou velmi vzácné) a lokální neklid vzduchu.

Druhý z těchto problémů je obzvláště závažný v případě reflektorů. Horní konec tubusu Newtonova dalekohledu je v místě, kde pozorovatel dýchá a zahřívá vzduch a tím způsobuje vážné poškození přicházející vlnplochy. Problém je dokonce ještě horší v případě otevřeného nosníkového tubusu. Na druhé straně objektivy refraktorů leží relativně daleko od pozorovatele.

Navíc termálně otevřené tubusy většiny reflektorů trpí vnitřním gradientem teploty vzduchu, zvláště v okolí sekundárního zrcátka a pavouku. Vnitřek uzavřeného tubusu refraktoru nevyzařuje přímo do prostoru a tím činí vznik gradientu teploty méně pravděpodobným.

Během let se shromáždily i jiné (i když spíše anekdotické) „znalosti“. Většina z nich je ovšem subjektivní. Výjimkou je známý Dawestův limit pro úhlové rozlišení, který platí pro dvojhvězdy, ale nedá se použít u jasných plošných objektů.



OBR. 9: Dokonce i v případě dalekohledu bez centrálního zaclonění může sférická vada vážně porušit obraz hvězdy. Výšky těchto „hradů z písku“ ukazují (zleva doprava) obraz vytvořený optikou s absolutními chybami vlnplochy 0, 1/10, 1/4 a 1/2 vlnové délky. Všimněte si, jak stále více a více světla se přesouvá z centrálního vrcholku, který odpovídá jádru obrazu, do okolních difrakčních kroužků.

Souhrnný efekt všech uvedených problémů lze najít vynásobením výsledných koeficientů obsažených v jednotlivých vzorcích. Výsledek může být zářející. Například desetipalcový dalekohled s třípalcovým zcloněním a střední odmocninou chyby vlnoplochy $1/8$ lambda může rozlišovat detaily ne lepší než vysoce kvalitní nezacloněný čtyřpalcový dalekohled. A navíc detail stále ještě viditelný bude podstatně méně nápadný než ve čtyřpalcovém dalekohledu. A pokud ani tohle není dost, pak neklid vzduchu je mnohem vážnější v případě desetipalcového dalekohledu jednoduše proto, že světlo musí procházet tlustším sloupcem turbulentního vzduchu.

Pokud však ten samý desetipalcový dalekohled byl vyleštěn se střední odmocninou chyby vlnoplochy $1/16$ lambda a je vybaven jednopalcovým sekundárním zrcátkem, bude se zobrazení blížit osmipalcovému dokonalému přístroji. Namontování sekundárního zrcátka na planoparalelní desku vysoké kvality výrazně zredukuje turbulenci uvnitř a v okolí dalekohledu a tím zvýší šanci, že se dalekohled dostane až ke svému difrakčnímu limitu i v případě ne úplně malého neklidu vzduchu.

Navzdory všem probraným skutečnostem neexistují žádné vlastní důvody proč by refraktory měly být lepší. Dalekohled obsahující zrcadla místo čoček může stále dávat obraz poblíž stejných teoretických limitů. Žádný dalekohled, dokonce ani ten nejlepší apochromatický refraktor *nemůže být lepší*, než umožňují teoretické limity zobrazení.

Reflektor je prostě pouze mnohem náchylnější k vadám a pozorovacím vlivům. Uživatelé reflektorů se tedy nemusejí vzdávat kvalitního obrazu, ale musí daleko tvrději pracovat, aby jej docílili.

WILLIAM P. ZMEK
138 Millville Avenue
Naugatuck, CT 06770
U.S.A.

Ze Sky & Telescope, červenec 1993, str. 91 a září 1993, str. 83 (Telescope Making - Edited by Roger W. Sinnott - Rules of Thumb for Planetary Scopes) přeložil Jan Veselý

Vydala Astronomická společnost v Hradci Králové 4.10.1997

Překlad textu: Jan Veselý

Sazba a zlom: Vladimír Kocour, Jan Veselý

Překlad stránek a tisk: Martin Cholasta