

## Optické parametry význačných refraktorů

*Zdeněk Rail, Daniel Jareš, Pavel Pintr, David Vápenka*  
*Ústav fyziky plazmatu AV ČR, v.v.i. - Toptec*

Abstrakt: V tomto referátu publikujeme optické parametry několika historických dalekohledů, které jsme v literatuře a na webových stránkách získali. Data byla vložena do optického programu ZEMAX, v němž byly vyčísleny jejich zbytkové vady.

### The Optical Parameters of Famous Refractors

Abstract: In this paper we publish the optical parameters of several historic telescopes, which we have found in scientific literature or web pages. Data were inputed into the optical program ZEMAX, which evaluated their residual aberrations.

#### 1. Historie dalekohledu

První zpráva o dalekohledu pochází z roku 1608. Tehdy holandský optik Hans Lippershey přihlásil patent na optický přístroj, umožňující zvětšeně pozorovat vzdálené předměty. Záhy po podání své žádosti se k autorství dalekohledu přihlásili i Jacob Metius a Zacharias Janssen. Patent nebyl udělen nikomu z nich. Objektivy prvních holandských dalekohledů byly jednoduché spojné čočky o průměrech cca 25 - 35 mm a ohniskových vzdálenostech 250 - 350 mm. Skla, ze kterých byly tyto čočky vyrobeny, mají přibližně stejné optické parametry jako dnešní materiály K13, K7 a Float s hodnotami indexů lomů pro žluté světlo (vlnová délka 587.6 nm) přibližně  $n_d = 1.523$  a Abbeho číslech  $v_d$  přibližně 58 - 60. První holandské dalekohledy dosahovaly většinou kolem čtyřnásobného zvětšení. Jako objektivy astronomických dalekohledů byly singlety používány až do počátku 18. století. Kvůli zmenšení jejich barevné vady byly konstruovány přístroje o ohniskových vzdálenostech i několika desítek metrů.

Na začátku 18. století přišlo několik optiků a fyziků s myšlenkou, že dvojčočkový objektiv, sestavený z čoček ze skel o rozdílných disperzních schopnostech, může radikálně potlačit barevnou vadu. Záhy vznikala teorie achromatického objektivu - dubletu, kterou se v polovině 18. století zabývali významní matematici, např. Clairaut, Euler, d'Alembert a další. Výsledkem jejich práce byl optický návrh - výpočet objektivu, složeného ze dvou tenkých čoček, který měl minimální zbytkové vady. Systematicky tyto dublety začal vyrábět až počátkem 19. století Joseph Fraunhofer. Po celé toto století refraktory dominovaly v astronomii než byly nahrazeny zrcadlovými dalekohledy. Každou optickou soustavu charakterizují její zbytkové vady, které s daným počtem optických prvků již nelze opravit. U dalekohledu s dvojčočkovým achromatickým objektivem jsou dominantními zbytkovými vadami hlavně jeho sférochromatické vada - sférická aberace chromatických svazků a astigmatismus. Charakter zbytkových optických vad soustav je dán nejen jejich vlastními optickými návrhy, ale i jejich zhotovením. Výroba optických prvků velkých přístrojů byla téměř vždy volena s ohledem na úroveň a možnosti technologie v dané době. I dnes lze využít poznatků a zkušeností starých optiků pro konstrukci moderních optických přístrojů. Publikace, ve kterých jsou uveřejněny optické parametry historických přístrojů, jsou vzácné. Pro tento referát jsme čerpali data o starých přístrojích z několika článků, které se objevily v časopisech Applied Optics, Sky and Telescope a dále z webových stránek. [1], [2] V několika případech jsme využili i příležitost, kdy objektivy historických přístrojů jsme restaurovali a mohli proměřit. Z naměřených dat jsme provedli v programu ZEMAX počítačovou simulaci jejich zbytkových vad. V naší práci navazujeme na předchozí referát z konference v Úpici z roku 2012, kdy jsme referovali o zbytkových vadách několika významných refraktorů z 19. století. Hlavním úkolem tohoto referátu je publikování optických parametrů a výsledků simulací vad těchto přístrojů.

## 2. Optické parametry dalekohledů

V této části referátu jsou uvedeny optické parametry a výsledky počítačových simulací zbytkových vad několika čočkových dalekohledů. K parametrům patří poloměry křivosti optických ploch čoček, jejich středové tloušťky a vzdálenost jejich vrcholů od sebe, indexy lomů skel. V několika případech jsme byli nuceni použít i asférického rozvoje jedné z ploch, abychom v simulaci lépe vyjádřili sférochromatickou vadu. U skel uvádíme osm hodnot indexů lomů pro osm vlnových délek ve spektrálním rozsahu čar g a r. (435.8 nm a 706.5 nm). Tento počet hodnot indexů lomů umožňuje v programu Zemax nalézt koeficienty rozvoje pro vyjádření Schottovy formule. Pro posouzení úrovně zbytkových optických vad objektivů předkládáme obrázky s grafy sférochromatické vady, podélné chromatické vady, dále spotdiagramy a matrix spotdiagramy pro paprsky třech vlnových délek.

### a) Clarkův refraktor o průměru čtyřicet palců Yerkesovy observatoře.

Tento dalekohled s objektivem o průměru 40 palců ( 1016 mm) a ohniskové vzdálenosti 19354 mm pro vlnovou délku 560 nm byl postaven na Yerkesově observatoři ve Williams Bay ve Wisconsinu v roce 1897. Jedná se o refraktor s největším průměrem objektivu na světě. Vyrobila jej firma Alvan Clark and Sons v Cambridge v Massachusetts. Disky z optického skla pocházejí z francouzské firmy Charles Feil v Paříži. Jejich odlévání bylo náročné a skláři museli vykonat mnoho pokusů, než dosáhli potřebné homogenity skla. Dalekohled byl předurčen hlavně pro spektroskopická měření, astrometrická měření paralax a vlastních pohybů hvězd. Přesné optické parametry, poloměry křivosti čoček a jejich tloušťky nejsou známy. [1], [2] Ve třicátých letech minulého století se pokusil F.E Ross navrhnout korektor, který by změnil chromatickou korekci tohoto dubletu z vizuální na fotografickou. Byly objeveny vzorky skel, ze kterých jsou vyrobeny čočky a změřena chromatická křivka dubletu. Poloměry křivosti čoček byly dodatečně dopočítány tak, aby simulované sečné vzdálenosti paprsků a tvar chromatické křivky souhlasily s měřením. V Rossově simulaci byla spojka uvažována jako symetrická bikonvexní čočka, poloměr vstupní konkávní plochy rozptylky navrhl tak, aby co nejlépe opravoval otvorovou vadu. Poloměr křivosti výstupní plochy rozptylky byl zvolen tak, aby svazky o vlnové délce čar B (687 nm) a F (486.1 nm) měly v zóně cca 0.707 R ( R - polovina průměru objektivu) společnou sečnou vzdálenost. S takto spočtenými daty ukazuje simulace dubletu na překorigovanou otvorovou vadu cca 6 mm. Objektiv je v jednom místě mírně astigmatický. V našem referátu jsme použili parametry objektivu, publikované v práci J. Churcha. [1] V tabulce 1 a 2 jsou uvedeny parametry objektivu a indexy lomů skel.

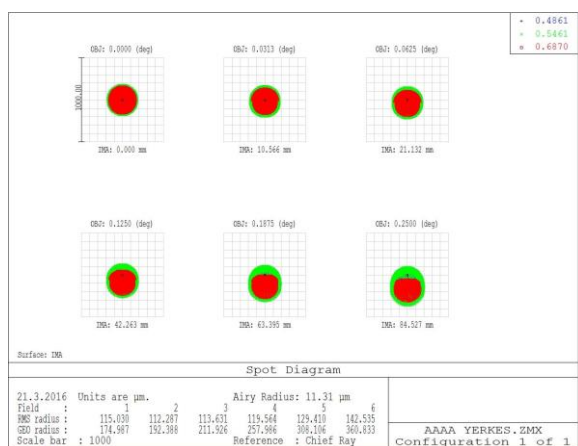
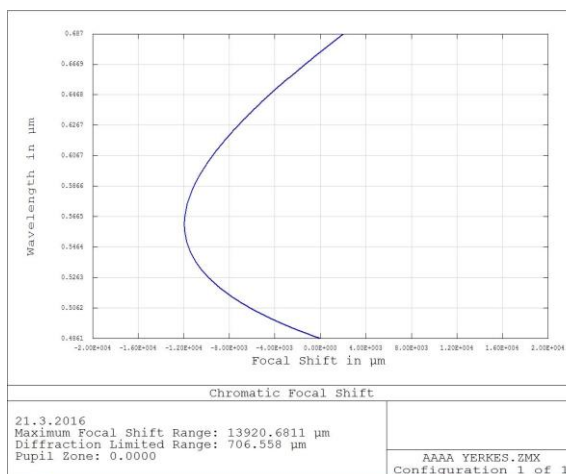
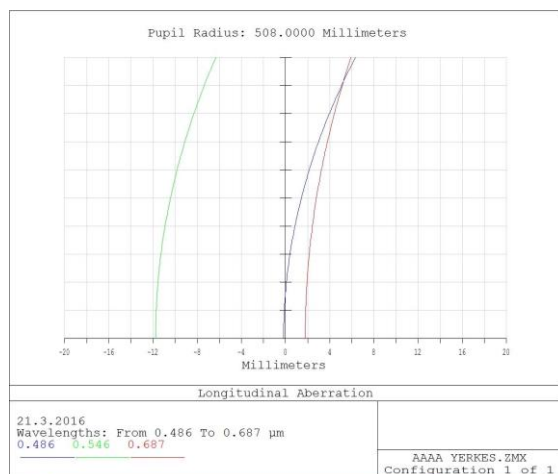
Tabulka 1. Optické parametry čoček z matematické simulace zbytkových vad objektivu o průměru 1016 mm a ohniskové vzdálenosti 19354 mm pro žlutozelenou barvu (560 nm) Yerkesovy observatoře. [1], [2]

	Surf.Type	Radius	Thickness	Glass	SemiDia n	Conic
OBJ	Standard	Infinity	Infinity		Infinity	0.000
1	Standard	6909.8	58	CROWNYERKES	508	0.000
2	Standard	-6909.8	215		508	0.000
3	Standard	-6504	28	FLINTYERKES	508	0.000
4	Standard	96010	18669.34		508	0.000
IMA	Standard	Infinity				0.000

Tabulka 2. Indexy lomů korunového a flintového skla objektivu Yerkesovy observatoře. [1], [2]

Vlnová délka [mikron]	0.435800	0.486133	0.546100	0.587562
Korunové sklo spojka	1.52687688	1.52202937	1.51797970	1.51587582
Flintové sklo rozptylka	1.63653776	1.62681882	1.61897291	1.61501268
Vlnová délka [mikron]	0.623400	0.656273	0.687000	0.706500
Korunové sklo spojka	1.51437382	1.51319299	1.61009203	1.51167272
Flintové sklo rozptylka	1.61223918	1.61009203	1.60836001	1.60737265

Obrázky 1-4. Sférochromatická vada, chromatická křivka, spotdiagramy a matrix spotdiagramy Clarkova objektivu o průměru 1016 mm Yerkesovy observatoře.



b) Clarkův objektiv o průměru 914 mm Lickovy observatoře.

Dalekohled s objektivem Alvana Clarka o průměru 914 mm byl vyroben pro Lickovu observatoř v roce 1888. Nachází na hoře Mount Hamilton v jižní Kalifornii poblíž města San José v nadmořské výšce cca 1300 m. Optické parametry přístroje - poloměry křivosti, tloušťky čoček nejsou známy. V literatuře byla publikována pouze údaje z měření jeho ohniskové vzdálenosti a chromatické křivce. [4] Z těchto dat byly spočteny poloměry křivosti objektivu tak, aby byl získán co nejlepší souhlas simulace s naměřenými výsledky. Simulovaný optický návrh dubletu v práci vychází z návrhu čtyřicetipalcového objektivu Yerkesovy hvězdárny a je jeho devadesátiprocentním zmenšením. Tloušťky čoček a vzdálenost mezi jejich vrcholy jsou přibližné. Výpočty ukazují dobře kompenzovanou otvorovou vadu dubletu. Barevná vada je v simulaci korigována pro čáry B a F o vlnových délkách 687 nm a 486.1 nm. Data [1] prokázala mírně, cca 2 mm, barevně nedokorigovaný objektiv. Znamená to, že modré paprsky o vlnové délce 486.1 nm se protínají cca o 2 mm blíže k čočce než červené, o vlnové délce 687 nm. Změnou vzdálenosti čoček ze 165 mm na 160 mm lze získat řešení objektivu, u kterého mají paprsky o vlnové délce 486.1 nm a 687 nm společnou sečnou vzdálenost. Přitom se ale změní o několik milimetrů ohnisková vzdálenost objektivu. Dalekohled byl používán pro spektroskopická pozorování, zvláště pro měření radiálních rychlostí hvězd a mlhovin. Bylo s ním fotografovány objekty na obloze i prováděny kresby planet. Vizualně s ním byl objeven 5. Jupiterův měsíc Amaltheia. Parametry, které jsme použili našem referátu, pocházejí z práce J. Churcha. [1] Tab.3, Tab 4.

Tabulka 3. Simulované optické parametry čoček objektivu Lickovy observatoře. [1], [3], [4]

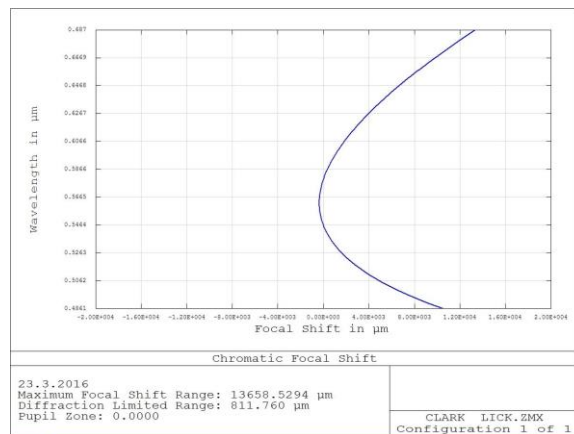
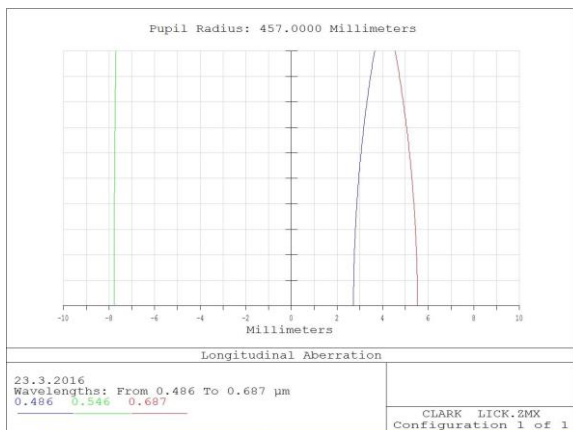
	Surf.Type	Radius	Thickness	Glass	SemiDiam	Conic
OBJ	Standard	Infinity	Infinity		Infinity	0.000
1	Standard	6558	52.2	CROWN LICK	457	0.000
2	Standard	-6558	165		457	0.000
3	Standard	-6334	25.2	FLINT LICK	457	0.000
4	Standard	180000	17120		457	0.000
IMA	Standard	Infinity				0.000

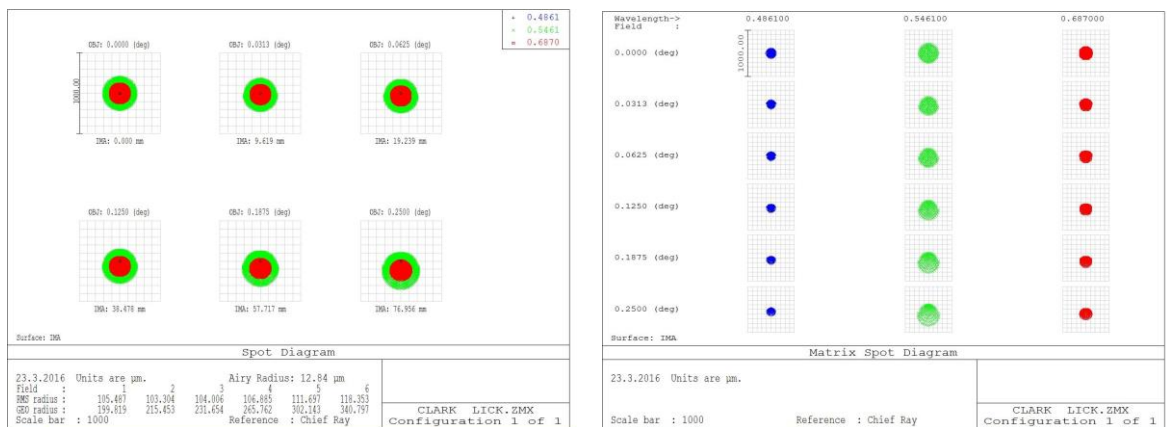
Tabulka 4. Indexy lomů korunového a flintového skla objektivu Lickovy observatoře. [1], [3], [4]

Vlnová délka [mikron]	0.435800	0.486133	0.546100	0.587562
Korunové sklo spojka	1.52509279	1.52031679	1.51630653	1.51421938
Flintové sklo rozptylka	1.65141208	1.64134063	1.63321512	1.62911024

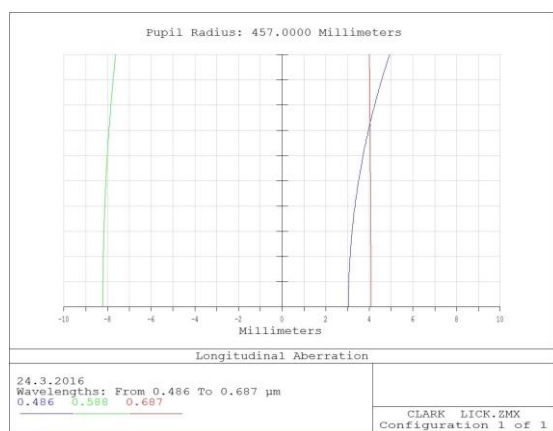
Vlnová délka [mikron]	0.623400	0.656273	0.687000	0.706500
Korunové sklo spojka	1.51273615	1.51156754	1.51060500	1.5100411
Flintové sklo rozptylka	1.62625378	1.62404503	1.62225719	1.62122417

Obrázky 5 - 8. Sférochromatická vada, chromatická křivka, spotdiagramy a matrix spotdiagramy Clarkova objektivu o průměru 914 mm a ohniskové vzdálenosti 17628 mm Lickovy observatoře. [1], [3], [4]





Obrázek 9. Simulace objektivu o průměru 914 mm Lickovy observatoře se zmenšeným optickým intervalem mezi čočkami ze 165 mm na 160 mm. [1]



c) Clarkův objektiv US Naval Observatory ve Washingtonu o průměru 660 mm.

Tato hvězdárna byla založena v roce 1830 pro potřebu amerického námořnictva. Jejím hlavním úkolem bylo přesné měření času, zajištění přesné navigace lodí na moři a určení zeměpisných souřadnic. Ve druhé polovině 19. století astronomové na této observatoři změřili přesné pozice velkého počtu hvězd. V roce 1873 byla vybavena dalekohledem s Clarkovým objektivem o průměru 26 palců (660 mm), který po desetiletí byl největším dalekohledem na světě. Parametry objektivu byly několikrát měřeny, avšak nezachovaly se žádné informace o sklech anglické firmy Chance, ze kterých byl vyroben. Ze známých skel této firmy byla vybrána dvojice, která v počítačové simulaci podává výsledky velmi blízké naměřeným hodnotám. U objektivu vychází ohnisková vzdálenost 9836 mm pro D čáru. V roce 1877 s tímto přístrojem objevil astronom Asaph Hall Marsovy měsíce Phobos a Deimos. Parametry z práce J. Churcha jsme použili našem referátu. [1], [5], Tab.5, Tab 6.

Tabulka 5. Simulované optické parametry čoček objektivu US Naval Observatory. [1], [3], [4], [5]

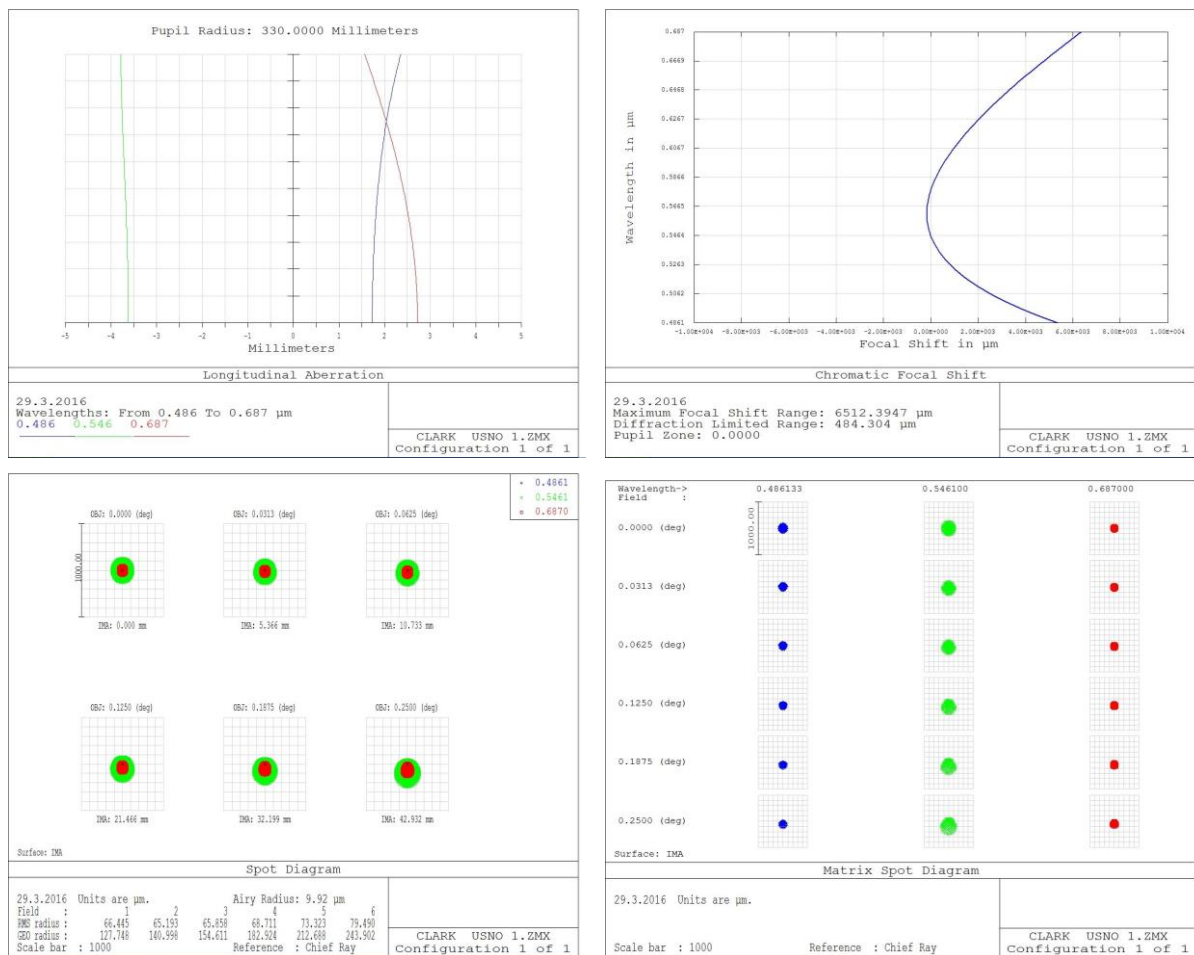
	Surf.Type	Radius	Thickness	Glass	SemiDiam	Conic
OBJ	Standard	Infinity	Infinity		Infinity	0.000
1	Standard	4099.3	47.85	CROWNUSNO	330	0.000
2	Standard	-4099.3	0.74		330	0.000
3	Standard	-4116.6	24.3	FLINTUSNO	330	0.000
4	Standard	-4.944E+5	9783.36		330	0.000
IMA	Standard	Infinity				0.000

Tabulka 6. Indexy lomů korunového a flintového skla objektivu US Naval Observatory. [1]

Vlnová délka [mikron]	0.435800	0.486133	0.546100	0.587562
Korunové sklo spojka	1.52617354	1.52147745	1.51757911	1.51556252
Flintové sklo rozptylka	1.64504944	1.63486457	1.62671202	1.62262513

Vlnová délka [mikron]	0.623400	0.656273	0.687000	0.706500
Korunové sklo spojka	1.51412660	1.51300088	1.51208096	1.51155278
Flintové sklo rozptylka	1.61977653	1.61758169	1.61581442	1.61481073

Obrázky 10 -13. Sférochromatická vada, chromatická křivka, spotdiagramy a matrix spotdiagramy Clarkova objektivu o průměru 660 mm US Naval Observatory ve Washingtonu. [1]



d) Merzův objektiv o průměru 325 mm observatoře v Greenwich

V polovině 50. let 19. století navštívil George B. Airy mnichovskou firmu Merz, aby dojednal výrobu nového a výkonnějšího přístroje pro observatoř v Greenwich. Krátce po návratu domů mu byl nabídnut jeden z objektivů o průměru objektivu 325 mm a ohniskové vzdálenosti 5421 mm, který byl rozpracován a měl být brzo hotov. Objektiv se dostal do Greenwichské observatoře v roce 1857 a okamžitě byl Airym testován. Celý dalekohled byl hotov v roce 1860 a jeho zobrazení bylo považováno za velmi kvalitní. Sloužil jako víceúčelový přístroj pro pozorování planet, určování pozic komet, astrometrii, pozorování dvojhvězd. Byl použit i pro měření tepelného záření hvězd. Později byl vybaven spektroskopem pro měření radiálních rychlostí hvězd. Od roku 1896 jej používali jako hledáček k většímu, 26 palcovému Thomsonovu fotografickému dalekohledu. Po optické stránce je Merzův objektiv blízký Litrowova typu s téměř symetrickou spojkou a plankonkávní rozptylkou. Objektiv je neaplanatický, je velmi pravděpodobně asféricky retušován tak, aby krajní a středové paprsky měly společnou sečnou vzdálenost. Je mírně astigmatický. Tyto zbytkové optické vady jsou v běžných podmínkách seeingu prakticky nezjistitelné. Jejich simulaci jsme provedli podle výsledků, publikovaných v práci C.M.Lowneho. [6] Parametry čoček a indexy lomů skel jsou uvedeny v tabulkách 7, 8, výsledky simulací jsou zobrazeny na obrázcích 14 až 17.

Tabulka 7. Simulované optické parametry čoček objektivu o průměru 325 mm a ohniskové vzdálenosti 5421 mm v Greenwiche. [6]

	Surf.Type	Radius	Thickness	Glass	SemiDiam	Conic
OBJ	Standard	Infinity	Infinity		Infinity	0.000
1	Standard	2378	22.5	CROWNGRNWCH	162.5	0.000
2	Standard	-2203	0.3		162.5	0.000
3	Standard	-2267	9.7	FLINTGRNWCH	162.5	0.000
4	Standard	-1391000	5395		162.5	0.000
IMA	Standard	Infinity				0.000

Aby bylo možné co nejlépe vyjádřit reálný profil vlnové aberace objektivu, bylo nutné aproximovat poslední plochu asférickým rozvojem o tvaru :

$$\Delta x = k * r^2 + l * r^4 + m * r^6 + n * r^8$$

kde r je vzdálenost zóny od středu čočky a k, l, m, n jsou koeficienty rozvoje.

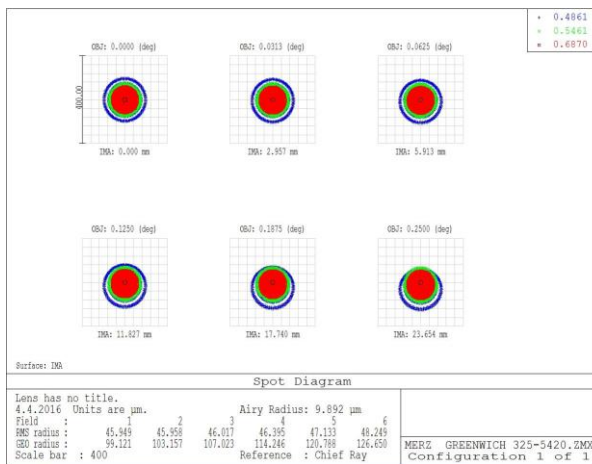
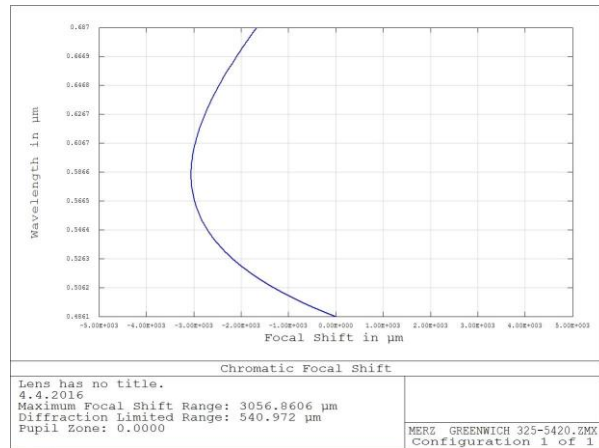
koeficient $r^2$	:	-5e-008
koeficient $r^4$	:	-1.1e-011
koeficient $r^6$	:	9e-016
koeficient $r^8$	:	-1.6e-020

Tabulka 8. Indexy lomů korunového a flintového skla objektivu observatoře v Greenwich. [6]

Vlnová délka [mikron]	0.435800	0.486133	0.546100	0.587562
Korunové sklo spojka	1.54252004	1.53719717	1.53294637	1.53081814
Flintové sklo rozptylka	1.65945816	1.64837630	1.63970106	1.63543609

Vlnová délka [mikron]	0.623400	0.656273	0.687000	0.706500
Korunové sklo spojka	1.52933985	1.52820000	1.52728474	1.52676485
Flintové sklo rozptylka	1.63251174	1.63028132	1.62850737	1.62750697

Obrázky 14 -17. Sférochromatická vada, chromatická křivka, spotdiagramy a matrix spotdiagramy Merzova objektivu o průměru 325 mm a ohniskové vzdálenosti 5421 mm observatoře v Greenwich. [6]



e) Simulace Fraunhoferova typu objektivu o průměru 158 mm a ohniskové vzdálenosti 2552 mm observatoře v Koenigsbergu

Původně byly heliometry přístroje, navržené k měření úhlového průměru Slunce. Později se ukázaly možnosti k jejich širšímu využití v astrometrii. Měřily se s nimi přesné úhlové vzdálenosti, zvláště dvojhvězdy. Nejslavnější heliometr, jehož objektiv navrhl Joseph Fraunhofer, měl průměr 158 mm a ohniskovou vzdálenost 2552 mm. Jeho návrh se stal vzorem pro pozdější aplanatické dublety. Celý přístroj byl dokončen v roce 1828 až po Fraunhoferově smrti. Následující rok jej zakoupila observatoř v Koenigsbergu, kde s ním Rudolph Bessel v roce 1838 poprvé změřil paralaxu hvězdy 61 Cygni. Optické parametry objektivu byly nalezeny v 80. letech 19. století ve Fraunhoferově korespondenci. Dublet měl korekci typu B - F, paprsky o vlnových délkách 486.1 nm a 687 nm měly pro zónu o poloměru 0.707 R, (kde R je polovina průměru D objektivu), společnou sečnou vzdálenost. Tento typ korekce Fraunhofer empiricky přijal, protože jej považoval za nejvhodnější pro pozorování planet. Kvalita dalekohledu se tenkrát posuzovala podle kontrastu zobrazení detailů na planetárních kotoučcích. Později optici zvolili korekci objektivů typu C - F nebo C' - F', která je vhodnější pro pozorování pozemských objektů. Při vizuálním pozorování je u nich zbytkové barevné halo kolem jasných objektů méně výrazné. Objektiv téměř dokonale koriguje komu a proto se toto tvarové řešení nazývá aplanátem Fraunhofera. Parametry čoček a indexy lomů skel pro naši práci jsou uvedeny v tabulkách 9 a 10. Byly získány z práce Johna Churcha. [1]

Tabulka 9. Simulované optické parametry čoček objektivu o průměru 158 mm a ohniskové vzdálenosti 2552 mm objektivu hvězdárny v Koenigsbergu. [1]

	Surf.Type	Radius	Thickness	Glass	SemiDiam	Conic
OBJ	Standard	Infinity	Infinity		Infinity	0.000
1	Standard	1890.75	13.53	CROWNKNGSBRG	79	0.000



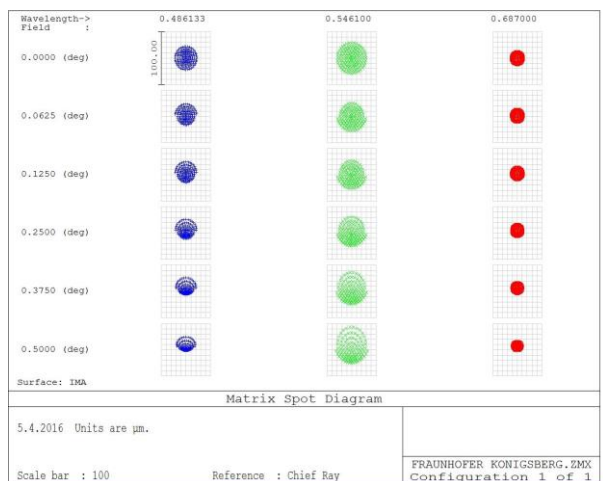
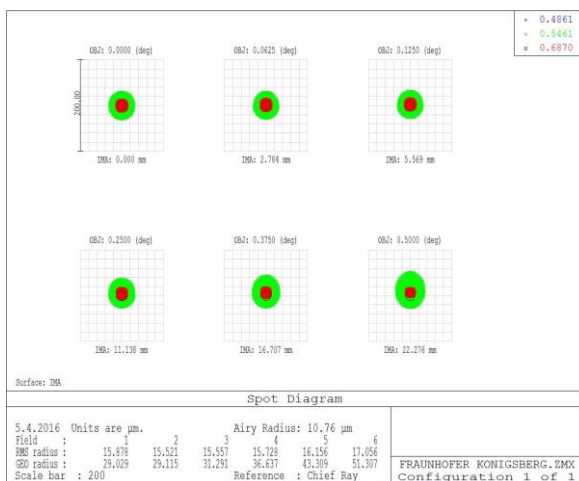
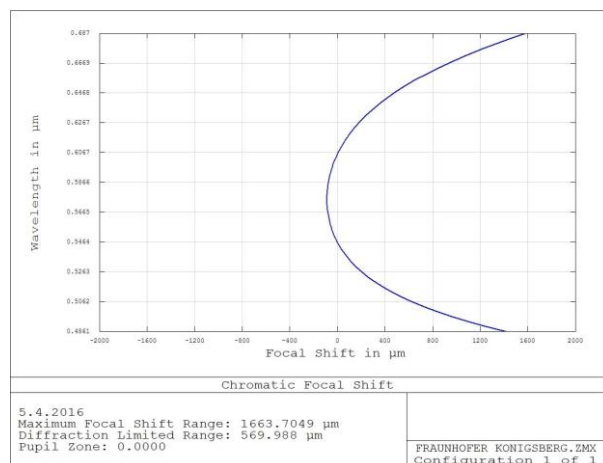
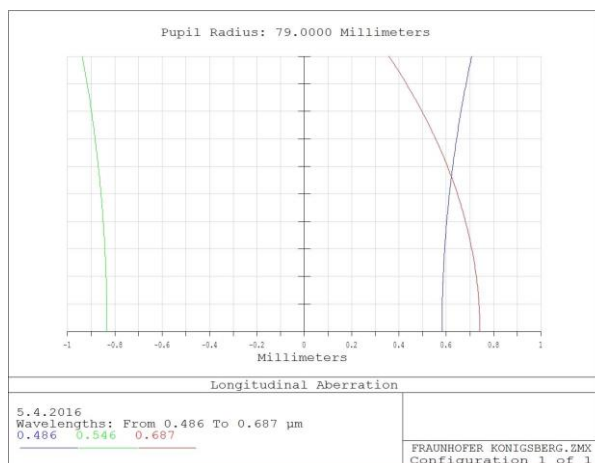
2	Standard	-752.92	0		79	0.000
3	Standard	-768.19	9.02	FLINTKNGSBRG	79	0.000
4	Standard	-2644.97	2543.35		79	0.000
IMA	Standard	Infinity				0.000

Tabulka 10. Indexy lomů korunového a flintového skla objektivu hvězdárny v Koenigsbergu.[1]

Vlnová délka [mikron]	0.435800	0.486133	0.546100	0.587562
Korunové sklo spojka	1.53864392	1.53369633	1.52955974	1.52742098
Flintové sklo rozptylka	1.65923115	1.64844934	1.63989308	1.63557911

Vlnová délka [mikron]	0.623400	0.656273	0.687000	0.706500
Korunové sklo spojka	1.52591998	1.52473800	1.52374600	1.52314957
Flintové sklo rozptylka	1.63259663	1.63030700	1.62846300	1.62740414

Obrázky 18 -21. Sférochromatická vada, chromatická křivka, spotdiagramy a matrix spotdiagramy Fraunhoferova objektivu o průměru 158 mm a ohniskové vzdálenosti 2552 mm observatoře v Koenigsbergu. [1], [7]



f) Koenigův dalekohled hvězdárny na pražském Petříně o průměru 180 mm a ohniskové vzdálenosti 3430 mm

Přesný datum výroby tohoto přístroje není zdokumentováno. Předpokládá se, že dalekohled byl v Zeissových závodech vyroben mezi roky 1905 až 1907. Ve dvacátých letech přístroj z pozůstalosti po vídeňském selenografovi Koenigovi odkoupila petřínská hvězdárna, kde jej umístili do hlavní kopule. Od této doby slouží k popularizaci astronomie. V roce 2005 byl objektiv dovezen do VOD Turnov, kde na jeho plochy měly být napařeny antireflexní vrstvy. Objektiv byl přeměřen a vzhledem k chemickému poškození spojky bylo nutné její plochy přeleštit. Přitom se ohnisková vzdálenost dubletu prodloužila asi o 6 mm. Materiál, který byl použit na výrobu čoček, velice dobře odpovídá kombinaci skel K7 - F1. Objektiv je aplanatický a jeho typ korekce je C – F. V tabulkách 11 a 12 jsou uvedeny změřené optické parametry objektivu o průměru 180 mm a ohniskové vzdálenosti 3430 mm petřínské hvězdárny a indexy lomů skel, ze kterých je vyroben. [8]

Tabulka 11. Optické parametry čoček objektivu o průměru 180 mm a ohniskové vzdálenosti 3430 mm petřínské hvězdárny. [8]

	Surf.Type	Radius	Thickness	Glass	SemiDiam	Conic
OBJ	Standard	Infinity	Infinity		Infinity	0.000
1	Standard	2045.2	20.88	K7	90	0.000
2	Standard	-1006	0.2		90	0.000
3	Standard	-1032.75	13.78	F1	90	0.000
4	Standard	-4791.5	3406.469		90	0.000
IMA	Standard	Infinity				0.000

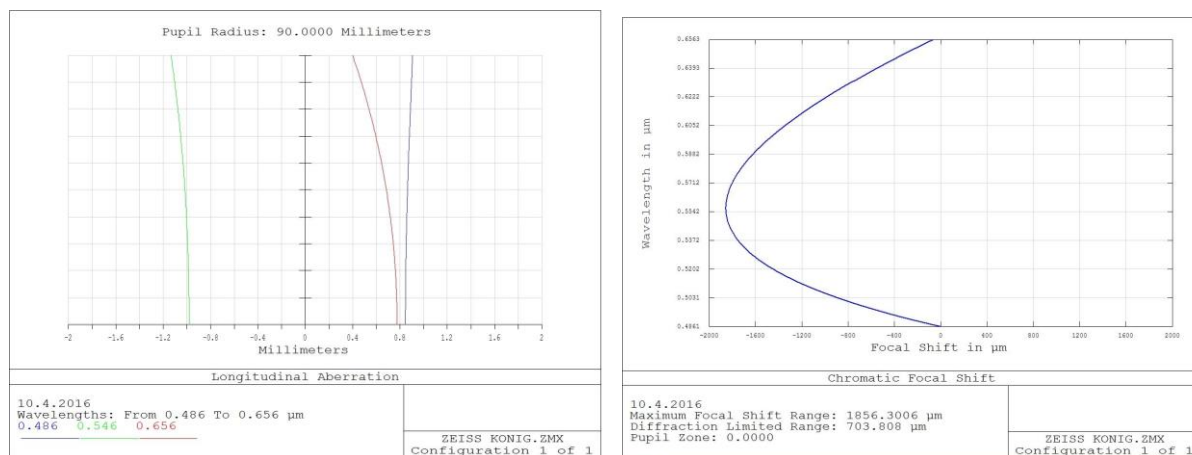
Tabulka 12. Indexy lomů korunového a flintového skla ze simulace objektivu petřínské hvězdárny. [8]

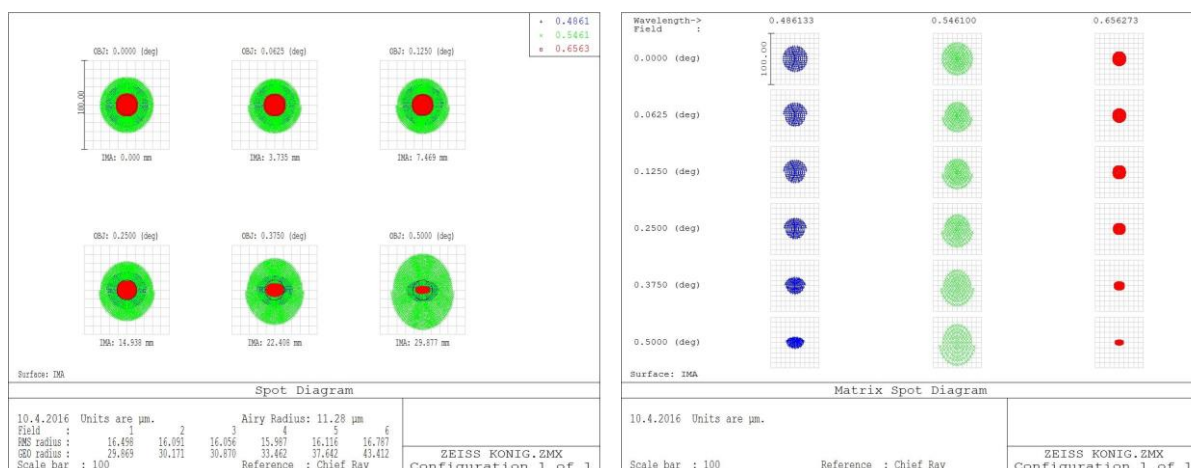
Vlnová délka [mikron]	0.435800	0.486133	0.546100	0.587562
Korunové sklo spojka	1.52159388	1.51700222	1.51313732	1.51112096
Flintové sklo rozptylka	1.63424223	1.62461227	1.61685044	1.61293099

11

Vlnová délka [mikron]	0.623400	0.656273	0.687000	0.706500
Korunové sklo spojka	1.50967777	1.50854082	1.50760669	1.50706752
Flintové sklo rozptylka	1.61018633	1.60806399	1.60634980	1.60537384

Obrázky 22 -25. Sférochromatická vada, chromatická křivka, spotdiagramy a matrix spotdiagramy Zeissova objektivu o průměru 180 mm a ohniskové vzdálenosti 3430 mm hvězdárny na Petříně. [8]





g) Clarkův objektiv o průměru 203 mm a ohniskové vzdálenosti 2802.1 mm Observatoře v Ondřejově.

Tento objektiv byl vyroben Alvanem Clarkem pro reverenda Davise koncem 50. let 19. století. Počátkem 60. let jej prodal N. Martindaleovi z Liverpoolu, který s ním intenzivně pozoroval. V roce 1888 jej koupil od vdovy po Martindaleovi profesor Šafařík a umístil jej na svoji hvězdárnu na Královských Vinohradech. Po jeho smrti byl celý dalekohled věnován ondřejovské hvězdárně, budované na přelomu 19. a 20. století J.J. Fričem. Tam se stal na dlouhou dobu hlavním dalekohledem hvězdárny. Od 50. let 20. století slouží v kopuli hlavní budovy observatoře k fotografování Slunce. Na společné montáži je umístěn s dalším přístrojem, se kterým se fotografuje Slunce v úzké spektrální čáře H-Alpha (vlnová délka 656.3 nm). [11], [13] Objektiv je znám svými výbornými zobrazovacími vlastnostmi. Je korigován pro B a F čáru a není aplanačnický. Objektiv má s vysokou pravděpodobností retušovanou 4. plochu tak, aby jeho otvorová vada byla opravena. Z tohoto důvodu bylo nutné pro tuto plochu zavést koeficienty asférického rozvoje tak, aby výsledek matematické simulace co nejlépe souhlasil s naměřenými daty.

Tabulka 13. Optické parametry čoček Clarkova objektivu o průměru 203 mm a ohniskové vzdálenosti 2802.1 mm ondřejovské hvězdárny. [9]

	Surf.Type	Radius	Thickness	Glass	SemiDiam	Conic
OBJ	Standard	Infinity	Infinity		Infinity	0.000
1	Standard	1383.4	17.5	CROWNDREJOV	101.6	0.000
2	Standard	-810.2	0.2		101.6	0.000
3	Standard	-785.44	9	FLINTONDREJOV	101.6	0.000
4	Standard	-4618	2786.154		101.6	0.000
IMA	Standard	Infinity				0.000

Koeficienty asférického rozvoje o tvaru

$$\Delta x = k * r^2 + l * r^4 + m * r^6 + n * r^8$$

kde r je vzdálenost zóny od středu čočky a k, l, m, n jsou koeficienty rozvoje.

nabývají hodnot:

koeficient $r^2$	:	0
koeficient $r^4$	:	-6.47e-011
koeficient $r^6$	:	-7.60e-016
koeficient $r^8$	:	0

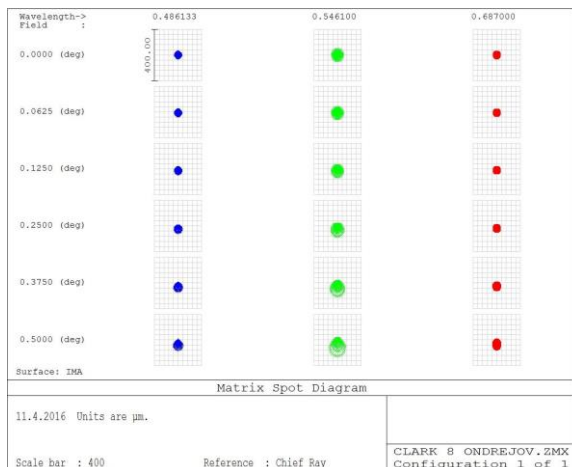
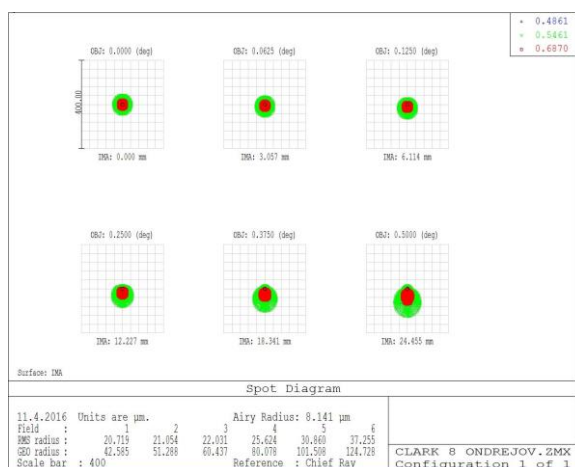
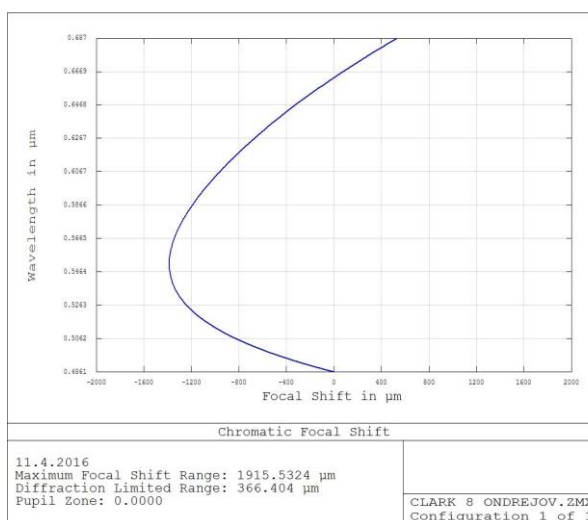
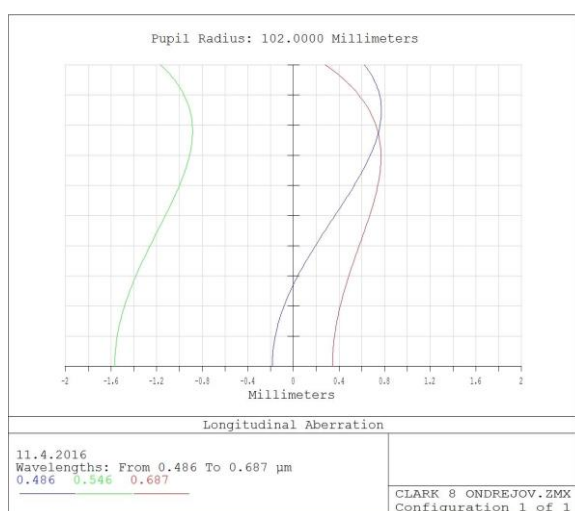
Tabulka 14. Indexy lomů korunového a flintového skla objektivu ondřejovské hvězdárny. [9]

Vlnová délka [mikron]	0.435800	0.486133	0.546100	0.587562
Korunové sklo spojka	1.52562824	1.52039281	1.51613820	1.51404534

Flintové sklo rozptylka	1.63654562	1.62618704	1.61811957	1.51404534
-------------------------	------------	------------	------------	------------

Vlnová délka [mikron]	0.623400	0.656273	0.687000	0.706500
Korunové sklo spojka	1.51261209	1.51154440	1.51073951	1.51031913
Flintové sklo rozptylka	1.61165344	1.60974138	1.60832857	1.60760908

Obrázky 26 -29. Sférochromatická vada, chromatická křivka, spotdiagramy a matrix spotdiagramy Clarkova objektivu o průměru 203 mm a ohniskové vzdálenosti 2802.1 mm hvězdárny Ondřejov. [9]



#### h) Objektiv firmy Merz o průměru 160 mm a ohniskové vzdálenosti 1796.5 hvězdárny v Úpici

Původním majitelem tohoto dalekohledu byl baron Kraus, který v roce 1912 založil v Pardubicích první veřejnou hvězdárnu, kde sloužil veřejnosti k pozorování oblohy. Po jeho smrti v roce 1930 přístroj získala Česká astronomická společnost. Od roku 1960 je dalekohled trvale umístěn v hlavní kopuli úpické hvězdárny. V roce 2008 byl objektiv čištěn a byla získána příležitost jej proměřit. Z výsledků pak byla provedena simulace jeho zbytkových vad. Objektiv je aplanatický a má korekci typu C – F. Přední plocha je zjevně poškozená čištěním. Jeho průměr je 160 mm a ohnisková vzdálenost je 1796.5 mm. Na čočky dubletu byla použita kombinace skel BK7 a F3, přičemž indexy lomů flintového skla v simulaci se nepatrně liší od tabulkových hodnot. Aby bylo možné simulovat naměřený profil sférochromatické vady, bylo nutné považovat poslední plochu jako asférickou o hodnotě asféricitosti přibližně -0.50.

Tabulka 15. Optické parametry čoček objektivu Merz úpické hvězdárny o průměru 160 mm a ohniskové vzdálenosti 1796.5 mm. [10]

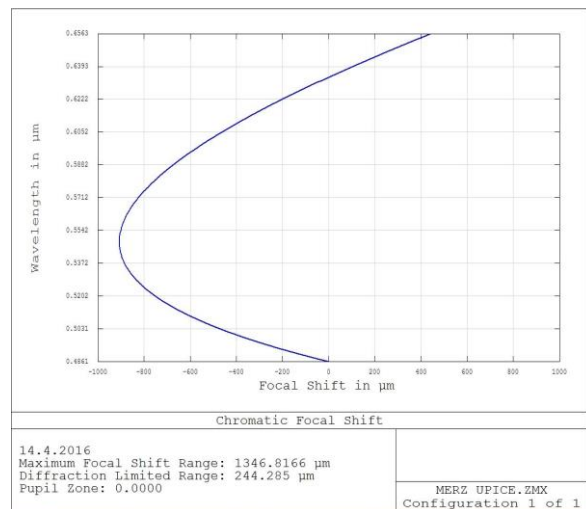
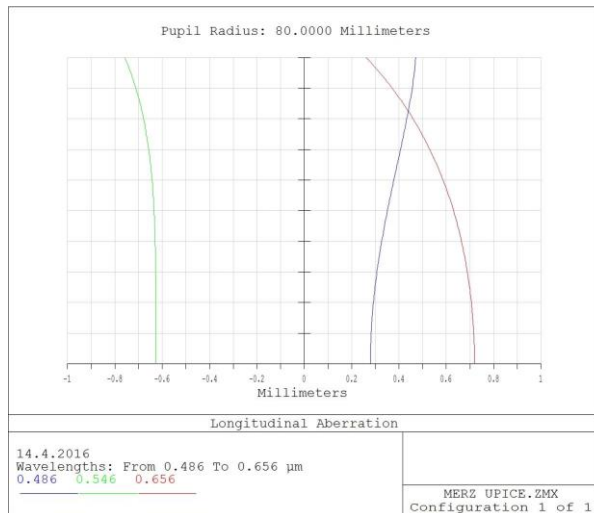
	Surf.Type	Radius	Thickness	Glass	SemiDiam	Conic
OBJ	Standard	Infinity	Infinity		Infinity	0.000
1	Standard	1062.34	15.773	BK7	80	0.000
2	Standard	-503.29	0.3		80	0.000
3	Standard	-516.82	8.302	F3	80	0.000
4	Standard	-2637.75	1780.113		80	-0.50
IMA	Standard	Infinity				0.000

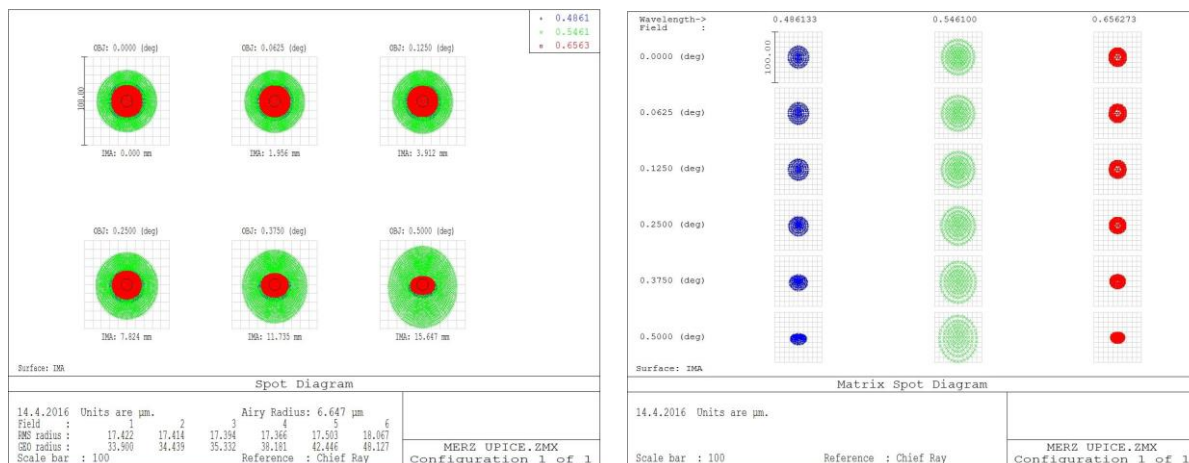
Tabulka 16. Indexy lomů korunového a flintového skla objektivu Merz Hvězdárny v Úpici. [10]

Vlnová délka [mikron]	0.435800	0.486133	0.546100	0.587562
Korunové sklo spojka	1.52668806	1.52237629	1.51872064	1.51680003
Flintové sklo rozptylka	1.63335506	1.62458752	1.61750593	1.61392748

Vlnová délka [mikron]	0.623400	0.656273	0.687000	0.706500
Korunové sklo spojka	1.51541750	1.51432235	1.51341762	1.51289301
Flintové sklo rozptylka	1.61141942	1.60947815	1.60790889	1.60701505

Obrázky 30 -33. Sférochromatická vada, chromatická křivka, spotdiagramy a matrix spotdiagramy objektivu Merz o průměru 160 mm a ohniskové vzdálenosti 1796.5 mm hvězdárny v Úpici. [10]





### 3. Závěr

Refraktory s achromatickými objektivami jsou prvními dalekohledy, které byly vyráběny profesionálními optiky. První exempláře byly vyroběny v Anglii počátkem 30. let 18. století podle návrhů Chester Moore Halla. Patent na jejich výrobu získal John Dollond.

V té době byl vyvíjen matematický rozbor jejich zbytkových vad a jejich výpočet.

V době Sedmileté války, vznikla teorie aplanatického dubletu, která umožňovala přibližný výpočet objektivu z tenkých čoček s opravenou chromatickou a sférickou vadou a dále komou. Informace o teorii se tehdy nerozšířila, protože válka přerušila kontakty mezi optiky.

Výhody aplanatických objektivů rozpoznal Joseph Fraunhofer, který je začal vyrábět. Počátkem 19. století tento mnichovský optik doplnil optický návrh dvojčočkového objektivu zavedením výpočtu chodu paprsků optickou soustavou. Umožnil tak kontrolu optického systému a minimalizaci jeho optických vad. Dominantní mimoosový astigmatismus se podařilo kompenzovat až v návrzích slovenského optika Jozefa Petzvala ve 40. letech 19. století. Pro jeho opravu bylo nutné použít tříčočkový systém.

V 80. letech 19. století byla Seidelem vypracována teorie výpočtu vad obecných optických soustav. V této době také dochází k intenzivnímu hledání způsobu, jak zmenšit chromatickou vadu čočkových objektivů. K jejímu potlačení bylo použito v závodě Carl Zeiss, Jena fluoritových čoček v kombinaci s vhodnými optickými skly. Zároveň se skládali snažili odlít nové druhy skel s anomálními disperzemi, které též umožňovaly potlačit barevnou vadu. Nejprve byly vyráběny materiály, které dostaly název langkrony a kurzflinty. Jejich použití v objektivěch redukovalo barevnou vadu na cca polovinu hodnot achromatických objektivů. Ale nejlepší výsledky opravy barevné vady byly dosahovány kombinacemi skel s fluoritem. Tento materiál má velmi špatné tepelné a mechanické vlastnosti a byla snaha jej nahradit sklem. Náhrada fluoritu nízkodisperzními skly pro viditelný a blízký infračervený obor se podařila po roce 1980. Velké achromatické objektivy 19. století byly často vyráběny jako dublety Littrowova typu nebo Clarkova, s velkou vzduchovou mezerou. Tyto typy achromatických dubletů jsou nejnázorněji vyrobitelné a mají nejmenší nároky na přípravkovou základnu. Skládají se ze symetrické bikonvexní spojky a rozptylky s vnější plochou o velmi dlouhém poloměru křivosti. Na výbrus a leštění symetrické bikonvexní spojky je potřeba dvojice podložní a brusné šály a dále jeden pár kalibrů, zabroušených do sebe. Poloměr křivosti vnitřní konkávní plochy rozptylky určuje výslednou otvorovou vadu. Jeho velikost je blízká hodnotě poloměrů křivosti spojky. Odchytkou poslední plochy od roviny lze korigovat barevnou vadu dubletu. Změnou vzdušného intervalu mezi čočkami lze též ovlivnit chromatismus dubletu a měnit typ korekce. Jak Littrowův, tak Clarkův typ objektivu nejsou aplanatické, jejich mimoosové obrazy jsou zatíženy komou. [11], [12]

Přesto tyto velké objektivy byly využívány pro přesná měření paralax, dvojhvězd a vlastních pohybů hvězd. Jejich výhodou byla velká ohnisková vzdálenost, která určovala měřítko na fotografiích.

Dalekohledy byly též využívány i pro spektroskopii, pro přesná měření radiálních rychlostí i jako vstupní objektivy pro spektroskopy soustav, zobrazující Slunce v úzkém spektrálním oboru.

Dnes se velká část hvězdáren potýká s problémy, jak velké refraktory využít. Nadále se s nimi provádějí různá astrometrická pozorování, např. dvojhvězdy, vlastní pohyby hvězd nebo měsíce planet. Jejich provoz a údržba není levná a tak s řadou z nich dnes pozorují návštěvníci hvězdáren objekty na obloze.

Tento článek vznikl v rámci projektu č. CZ.1.05/2.1.00/03.0079 Regionální centrum speciální optiky a optoelektronických systémů TOPTEC, který je realizován za podpory Evropského fondu pro regionální rozvoj v programu OP VaVpI a Ministerstva školství, mládeže a tělovýchovy České republiky.

#### Literatura:

- [1] Optical Design of Some Famous Refractors, John.A.Church, Sky and Telescope, March, 1982
- [2] Correcting Lenses for Refractors, Ross, Frank E. Astrophysical Journal, vol.76, Publication Date 10/32, [http://articles.adsabs.harvard.edu/cgi-bin/nph-article\\_query?1932ApJ....76..184R&data\\_type=PDF\\_HIGH&whole\\_paper=YES&type=PRINTER&filetype=.pdf](http://articles.adsabs.harvard.edu/cgi-bin/nph-article_query?1932ApJ....76..184R&data_type=PDF_HIGH&whole_paper=YES&type=PRINTER&filetype=.pdf)
- [3] On the Focal Length of the 36-Inch Refractor of the Lick Observatory and the Equivalent, in Seconds of Arc, of Revolution of the Micrometer Screw, W.H. Wright, Lick Observatory Bulletin, Number 466, [http://articles.adsabs.harvard.edu/cgi-bin/nph-article\\_query?1934LicOB..17...55W&data\\_type=PDF\\_HIGH&whole\\_paper=YES&type=PRINTER&filetype=.pdf](http://articles.adsabs.harvard.edu/cgi-bin/nph-article_query?1934LicOB..17...55W&data_type=PDF_HIGH&whole_paper=YES&type=PRINTER&filetype=.pdf)
- [4] On the Chromatic Aberration of the 36-inch Refractor of the Lick Observatory, James E. Keeler, Publications of the Astronomical Society of the Pacific, Vol. 2, No. 9, p.160, 07/1890, <http://adsabs.harvard.edu/abs/1890PASP....2..160K>
- [5] A Brief History of the Naval Observatory, Naval Oceanography Portal, <http://www.usno.navy.mil/USNO/about-us/brief-history>
- [6] The Object-Glass of the Greenwich "Great Equatorial Telescope", C.M.Lowne, Royal Greenwich Observatory, Journal for the History of Astronomy, Vol.19, No.3/Aug., p.169, 1988, Publ. Date 08 /1988, <http://adsabs.harvard.edu/full/1988JHA....19..169L>
- [7] Joseph Fraunhofer (1787-1826), Ian Howard-Duff, Journal of the British Astronomical Association, vol.97, No.6, str.339-347, <http://adsabs.harvard.edu/full/1987JBAA...97..339H>
- [8] Chromatická vada několika významných refraktorů 19. a 20. století, Zdeněk Rail, Daniel Jareš, David Tomka, Roman Doleček, Sborník z konference „Člověk ve svém pozemském a kosmickém prostředí“, Úpice, 2013, <http://www.cbks.cz/Upice2012/46.pdf>
- [9] Zbytkové optické vady Clarkova osmipalcového objektivu z Ondřejova, Zdeněk Rail, Daniel Jareš, Vít Lédl, Sborník z konference „Člověk ve svém pozemském a kosmickém prostředí“, Úpice, 2013, <http://www.cbks.cz/upice2010/041.pdf>
- [10] Objektiv Merz 160/1790 refraktoru Hvězdárny v Úpici, Zdeněk Rail, Bohdan Šrajer, Vít Lédl, Daniel Jareš, Pavel Oupický, Radek Melichl, Zbyněk Melich, <http://www.cbks.cz/2008/referaty/70.pdf>
- [11] The History of the Telescope, Henry C.King, Dover Publications, Inc, Mineola, New York, 2005
- [12] Alvan Clark & Sons, Artists in Optics, Deborah Jean Warner, Smithsonian Institution Press, Washington, 1995, ISBN-13: 978-0943396460
- [13] Jednoapůlstoletý osmipalcový objektiv Alvana Clarka hvězdárny Astronomického ústavu Akademie věd České republiky v Ondřejově u Prahy. Autor Cyril Polášek, Historická astrooptická studie věnovaná 145. výročí vzniku objektivu v Bostonu, USA, i Clarkova objevu podvojnosti 99 Her a reverenda W.R.Dawese v Hopefieldu u Haddenhamu v Anglii a 100. výročí smrti jeho prvního českého majitele prof. Dr.Vojtěcha Šafaříka, Vydal v roce 2002 Astronomický ústav Akademie věd české republiky 25165, Ondřejov, ISBN 80-902487-5-6
- [14] N.N.Michelson, Optičeskije teleskopy, Izdatelstvo "Nauka", Glavnaja redakcija fiziko-matematičeskoj literatury, Moskva, 1976