

## Sférochromatické vada Clarkova objektivu z observatoře v Ondřejově

Zdeněk Rail, Bohdan Šrajer, Daniel Jareš, David Vápenka, Pavel Pintr

Ústav fyziky plazmatu AV ČR, v.v.i. - Toptec

Soboteká 1660, 51101 Turnov

e-mail : [rail@ipp.cas.cz](mailto:rail@ipp.cas.cz), [srajer@ipp.cas.cz](mailto:srajer@ipp.cas.cz), [daniel.jares@yahoo.com](mailto:daniel.jares@yahoo.com), [vapenka@ipp.cas.cz](mailto:vapenka@ipp.cas.cz),  
[pintr@ipp.cas.cz](mailto:pintr@ipp.cas.cz)

V naší práci jsou předloženy výsledky matematické simulace zbytkových vad Clarkova objektivu o průměru 8 palců (203.2 mm). Tento achromatický dublet je používán na observatoři v Ondřejově více než 100 let k pozorování Slunce.

### The Spherochromatic Aberration of the Clark's Objective Lens of the Ondřejov Observatory

In our paper the results of mathematical simulations of the residual aberrations of Clark's 8 inch (diameter 203.2 mm) objective lens are presented. This achromatic dublet has been used at the Ondřejov Observatory for more than 100 years mostly for solar observation.

#### 1. Úvod

Refraktory mají z historického hlediska výsadní postavení v tom, že to byly první astronomické dalekohledy vyráběné profesionálními optiky.

Teorii achromatického objektivu, složeného ze dvou tenkých čoček, vypracovali v polovině 18. století Cauchy, D'Alembert, Euler. Na jejich práci navázal Joseph Fraunhofer, který začal systematicky vyrábět objektivy s definovanými zbytkovými vadami. Zavedl matematickou kontrolu chodu paprsků optickou soustavou, aby zjistil a optimalizoval její vady. Své objektivy vyráběl z optického skla, odlévaného metodou švýcarského chemika Pierre-Louis Guinanda. Po Fraunhoferově smrti pokračovala řada optiků ve zdokonalování výroby achromatických objektivů a zvětšování jejich průměrů. [1]

Ve Spojených státech k nim patřil Alvan Clark, který se optikou začal zabývat v polovině 40. let 19. století. Nejprve vyrobil několik kovových zrcadel, poté zkoušel přebrušovat a retušovat objektivy vyrobené jinými optiky. Věhlas získal až po deseti letech práce, kdy jeho přístroje umožnily astronomům pozorovat řadu velice obtížně rozlišitelných dvojhvězd.

U svých objektivů zvětšoval průměry, až nakonec vyrobil čtyřicetipalcový dublet (průměr 1016 mm), jehož průměr nebyl dosud překonán. Pro svoji vysokou kvalitu se dalekohledy s Clarkovými objektivy staly na řadě hvězdárna hlavními přístroji. Jako ostatní výrobci optických přístrojů, i Clark svoje metody výpočtů, výrobní postupy a měření pečlivě tajil. [2], [6]

Osmipalcový (průměr 203.2 mm) objektiv observatoře v Ondřejově, vyrobený Alvanem Clarkem, je patrně nejdéle aktivně vědecky používaný objektiv u nás. Přesný rok jeho výroby není znám, avšak nejpravděpodobněji byl v Bostonu zhotoven kolem roku 1858 - 1859 pro reverenda R.W.Dawese. Velice záhy byl prodán britskému astronomu Nicolasu Martindaleovi z Liverpoolu, který s ním řadu let pozoroval. Po jeho smrti dalekohled koupil v roce 1888 profesor Vojtěch Šafařík, který jej umístil na svoji hvězdárnu v Praze na Královských Vinohradech. Po smrti profesora Šafaříka, počátkem 20. století, věnovala vdova Pavlína přístroj J.J.Fričovi. Celý dalekohled byl zrekonstruován, čočky objektivu byly uloženy do nové, ocelové objímky, mahagonový tubus byl nahrazen kovovým a byla zhotovena nová montáž. Přístroj byl přestěhován na Ondřejov, kde zůstal dodnes. Od padesátých let 20. století slouží na observatoři Astronomického ústavu Akademie Věd České Republiky v Ondřejově výlučně k pozorování Slunce, převážně se s ním fotografuje sluneční fotosféra. [2], [3]

V roce 2013 byl objektiv dovezen na turnovské pracoviště ÚFP AV ČR, v.v.i. - Toptec k vyčištění a justáži. Při této operaci byly čočky vyjmuty z objímky a přeměřeny. Ze získaných dat bylo možné vytvořit matematický popis zbytkových optických vad tohoto dubletu.

## 2. Popis měření

Aby bylo možné vytvořit matematický popis zbytkových optických vad objektivu, bylo nutné nejprve proměřit sečné vzdálenosti paraxiálních paprsků pro různé vlnové délky a určit jeho chromatickou křivku. Toto měření jsme provedli autokolimačním testem s použitím Ronchiho testovacího přístroje s mřížkou 5 vrypů/mm. K dispozici jsme měli 18 filtrů

ve spektrálním rozsahu od 422 nm do 723 nm s dostatečně úzkými pološířkami propustnosti. Filtry jsme umísťovali mezi mřížku Ronchiho přístroje a okem. Dále byly ve čtyřech vybraných vlnových délkách (475 nm, 546.1 nm, 578 nm a 656 nm) měřeny hodnoty podélné otvorové vady. Poté jsme čočky vyjmuli z objímky a pomocí sférinterferometru Fisba změřili poloměry křivosti první, druhé a třetí plochy. Poloměr křivosti čtvrté plochy o hodnotě -4618 mm byl vypočítán z měření užitím blízkých interferenčních kalibrů. Přitom se ukázalo, že tato výstupní plocha objektivu je s vysokou pravděpodobností asférizována.

Mechanické rozměry - průměry čoček a jejich středové tloušťky byly změřeny prostorovým 3D měřicím strojem Dea s přesností setiny milimetru.

Disperzní křivka skla spojky byla určena autokolimační metodou : Pomocí rovinného zrcadla, Ronchiho testovacího přístroje a filtrů jsme změřili sečné vzdálenosti paraxiálních paprsků. Indexy lomů skla pro jednotlivé vlnové délky jsme vypočetli užitím optického programu Zemax. Při tomto testu byla spojka orientována svou vypouklejší stranou dopředu kvůli menší otvorové vadě. Poté byly dopočítány programem Zemax i hodnoty indexů lomů rozptylky tak, aby spočtená chromatická křivka dubletu souhlasila s naměřenou. Protože pomocí interferenčního kalibru bylo zjištěno, že čtvrtá, výstupní plocha je asférizována, v programu Zemax jsme přidali k vyjádření profilu této plochy další dva koeficienty rozvoje plochy, 4. a 6. mocniny. U čoček byl prohlédnut stav jejich optických ploch, dále čistota a pnutí uvnitř skel.

## 3. Výsledky měření

Achromatický dvojčočkový objektiv, vyrobený Alvanem Clarkem v Bostonu cca v letech 1858 - 1859, má průměr  $D = 203.2$  mm a pro paprsky o vlnové délce 546.1 nm je jeho ohnisková vzdálenost 2800.7 mm. Čočky dubletu mají mechanické průměry 212 mm a jsou velmi tenké, spojka má středovou tloušťku 17.5 mm a rozptylka 9.0 mm.

Objektiv je achromatizován pro čáry B a F (686.7 nm a 486.1 nm). Pro tyto vlnové délky mají paprsky v zóně o poloměru cca 0.7R ( $R = 101.5$  mm,  $D = 2R$ ) společnou sečnou vzdálenost. Korekci achromatických objektivů pro tyto dvě vlnové délky zavedl počátkem 19. století Joseph Fraunhofer na základě svých empirických zkušeností. Tehdy hlavním kritériem při posuzování kvality objektivu bylo zobrazení detailů na kotoučcích planet. Při vizuálním pozorování korekce B - F poskytuje v oblasti spektra od žlutozelené až po červenou barvu kontrastnější obraz, protože lépe vyhovuje Planckově křivce slunečního světla s maximem o vlnových délkách cca 580 nm. V modré a fialové části spektra je chromatická vada horší a projevuje se indigově modrozeleným kroužkem okolo jasných objektů. K odstranění tohoto hala se používaly vhodné žluté, žlutozelené nebo oranžové filtry. Od konce 19. století byly vizuální achromatické objektivy navrhovány s korekcí C - F ( 656.3 nm a 486.1 nm), která je výhodnější i pro pozemská pozorování.

Objektiv s tímto typem korekce vykazuje okolo jasných objektů fialově nachový kroužek, který je oproti indigovému halu vizuálně méně výrazný. [4], [5]

Podélná chromatická vada v oboru spektrálních čar B - F má hodnotu 1.9 mm. Sférická vada je optimálně kompenzována pro vlnovou délku cca 656 nm, její profil má tvar písmene S. V čáře C (656.3 nm) byl naměřen rozdíl sečné vzdálenosti paprsků zóny 0.7R a společné sečné vzdálenosti středových a krajních paprsků cca 0.4 mm. Pro paprsky o vlnové délce 578 nm je tento rozdíl 0.5 mm, pro 546 nm nabývá hodnoty je 0.7 mm a pro 475 nm je 1 mm. Aby bylo dosaženo této opravy otvorové vady, byla retušována čtvrtá plocha. Znamenalo to odebrat více materiálu v krajních zónách této plochy. Při výpočtech bylo nutné ke sférickému řezu čtvrté plochy přidat koeficienty rozvoje plochy čtvrté a šesté mocniny. Objektiv není navržen jako aplanatický, s opravenou komou. Spotdiagramy mimoosových obrazů ukazují charakteristický, vějířovitý, komatický tvar. Oproti spotům paraboloidického zrcadla je jejich orientace opačná, vějířek se rozšiřuje směrem k optické ose. Metodika výpočtu osmipalcového objektivu není známa. Pokud je objektiv navržen jako Fraunhoferův aplanát, pak poloměr křivosti vnitřní konvexní plochy spojky je většinou kratší než poloměr křivosti konkávní plochy rozptylky. U Clarkova objektivu je tomu naopak.

Kdyby si rozptylka zachovala své původní poloměry křivosti z Clarkova řešení a její zadní strana nebyla asférizována, bylo by možné se spojkou o poloměrech křivosti  $R_1 = 1553.92$  mm a  $R_2 = -761.01$  mm a tloušťce  $d_1 = 17.5$  získat dublet, blízký aplanatickému. Jeho ohnisková vzdálenost by měla hodnotu  $f = 2800.1$  mm.

Optická skla, ze kterých je objektiv vyroben, patří podle Abbeho čísel a relativních disperzí ke klasickým sklům. Spojka je vyrobena ze skla s indexem lomu  $n_e = 1.516138$  a Abbeho číslem  $v_e = 58.34$ , rozptylka má index lomu  $n_e = 1,618120$  a Abbeho číslo  $v_e = 37.60$ . Čočky v sobě obsahují řadu drobných bublinek a prachu.

Obě čočky byly kontrolovány v polariskopu, bylo zjištěno velice slabé pnutí uvnitř 17.5 mm tlusté spojky. V rozptylce o tloušťce 9 mm podstatné pnutí pozorováno nebylo. Po finálním smontování byl objektiv jako celek znovu prohlédnut v polariskopu, aby se předešlo přílišnému utažení čoček a jejich deformaci v ocelové objímce z počátku 20. století.

Optické plochy dubletu, díky jejich proleštění leštící rouge, mají po stopadesáti letech na sobě jen drobné vlasové rýhy a skvrnu, naleptanou dešťovou vodou, která se dostala mezi jeho vnitřní plochy. Zbytky rouge z leštění jsou patrné na obvodových plochách obou čoček. Hrubé škráby na plochách nejsou.

#### 4. Závěr

V roce 2010 jsme publikovali výsledky simulace optických vad Clarkova osmipalcového objektivu na základě měření, provedeného během jeho několikahodinového pobytu v Turnově. Tehdy byla chromatická křivka určena čtyřmi hodnotami sečných vzdáleností, měřených u nás a dvěma dalšími, nalezenými v 70 let staré práci Dr. Šternberka. [3], [5]

Druhou příležitostí na proměření Clarkova dubletu jsme dostali na konci roku 2013, kdy objektiv setrval na pracovišti ÚFP AVČR v.v.i. – Topotec v Turnově několik týdnů. Během této doby jsme několikrát opakovali měření, abychom získali co nejpřesnější výsledky. Chromatická křivka objektivu i spojky byla sestavena z 18 hodnot.

Naměřené sečné vzdálenosti se od vypočtených liší většinou maximálně do dvou desetín milimetru. Pouze ve fialové části spektra se vyskytuje několik chyb v určení sečných vzdáleností okolo 0.4 mm díky nižší citlivosti oka. Oproti původním výsledkům z roku 2010 jsou největší

rozdíly v hodnotách indexů lomů skel, lišících se na 3. místě. Tehdy byly měřeny poloměry křivosti ploch pomocí mechanického sférometru, zatímco nyní byly tyto parametry určeny s pomocí sféroiinterferometru Fisba s vyšší přesností.

Příčné aberace objektivu, posuzované podle spotdiagramů, vycházejí velmi podobně.

V novém měření a zpracování jsme asférickým rozvojem 4. plochy lépe vyjádřili profily křivek sférické aberace pro jednotlivé vlnové délky světla. Současná práce poskytuje mnohem věrohodnější a přesnější simulaci zbytkových vad Clarkova objektivu.

Bude-li zajištěna stálá péče o Clarkův osmipalcový objektiv jako tomu bylo dosud, může ještě dlouhou dobu poskytovat cenné informace o dějích ve sluneční fotosféře.

#### 5. Poděkování

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.

#### 6. Literatura

- [1] The History of the Telescope, Henry C.King, Dover Publications, Inc, Mineola, New York, 2005
- [2] Alvan Clark & Sons, Artists in Optics, Deborah Jean Warner, Smithsonian Institution Press, Washington, 1995, ISBN-13: 978-0943396460
- [3] 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
- [4] Optical Designs of Some Famous Refractors, John Church, Sky and Telescope, March, 1982

- [5] Zbytkové optické vady Clarkova osmipalcového objektivu z Ondřejova, Zdeněk Rail, Daniel Jareš, Vít Lédl. Člověk ve svém pozemském a kosmickém prostředí. Bulletin referátů z konference. Úpice : Hvězdárna v Úpici, 2011. S. 41-51. ISBN 978-80-86303-26-0
- [6] A Visit to Alvan Clark, JR., By Rev. John F. Sullivan,D.D., <http://adsabs.harvard.edu/full/1927PA.....35..388S>

## 7. Autoři

Zdeněk Rail, prom.fyz., Ústav fyziky plazmatu AV ČR, v.v.i., Regionální centrum speciální optiky a optoelektronických systémů TOPTEC, Sobotecká 1660, 511 01 Turnov, tel.: 420 487 953 904, e-mail: rail@ipp.cas.cz

Bohdan Šraj, Ústav fyziky plazmatu AV ČR, v.v.i., Regionální centrum speciální optiky a optoelektronických systémů TOPTEC, Sobotecká 1660, 511 01 Turnov, tel.: 420 487 953 904, e-mail: [srajer@ipp.cas.cz](mailto:srajer@ipp.cas.cz)

Ing.Daniel Jareš, [daniel.jares@yahoo.com](mailto:daniel.jares@yahoo.com)

Ing. David Vápenka, Ústav fyziky plazmatu AV ČR, v.v.i., Regionální centrum speciální optiky a optoelektronických systémů TOPTEC, Sobotecká 1660, 511 01 Turnov, tel.: 420 487 953 904, e-mail: vapenka@ipp.cas.cz

RNDr. Pavel Pintr PhD, Ústav fyziky plazmatu AV ČR, v.v.i., Regionální centrum speciální optiky a optoelektronických systémů TOPTEC, Sobotecká 1660, 511 01 Turnov, tel.: 420 487 953 904, e-mail: pintr@ipp.cas.cz

## 8. Obrázky a tabulky

Tabulka 1. Parametry objektivu

Povrch	Typ	Poloměr křivosti [ mm]	Tloušťka [mm]	Sklo	Průměr [mm]	Koeficienty rozvoje řezu plochy do řady $k*r^4+1*r^6$	Pozn.
OBJ	standard	inf	inf	Air	0	0	
1	standard	1383.4	17.5	CROWN	203.2	0	
2	standard	-810.2	0.2	Air	203.2	0	
3	standard	-785.4	9.0	FLINT	203.2	0	
STO	standard	-4618	2786.154	Air	203.2	Koef. $r^4$ : - 6.47e-011 Koef. $r^6$ : -7.60e-016	
IMA	standard	inf			48.9	0	

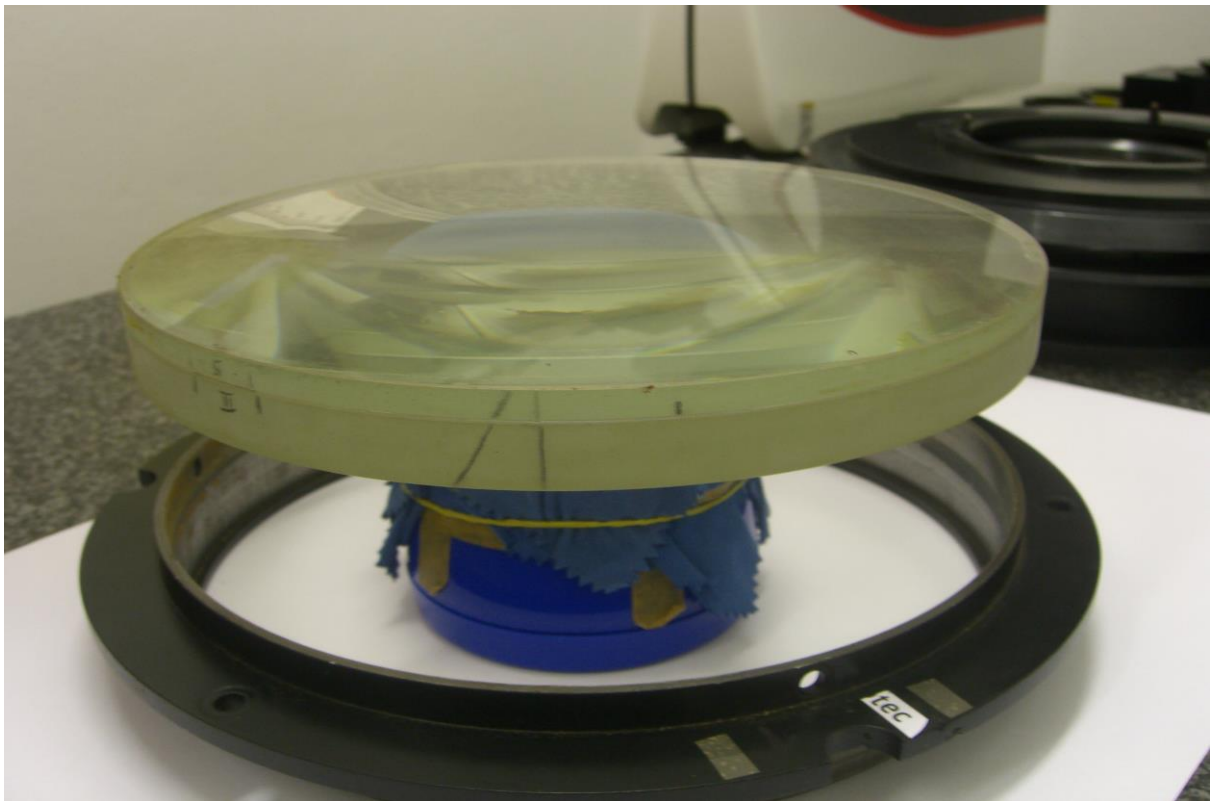
Tabulka 2. Indexy lomů korunového a flintového skla

Vlnová délka [mikron]	0.404600	0.435800	0.486133	0.546100	0.587562
Korunové sklo spojka	1.52928539	1.52562824	1.52039281	1.51613820	1.51404534
Flintové sklo rozptylka	1.64413806	1.63654562	1.62618704	1.61811957	1.61425822

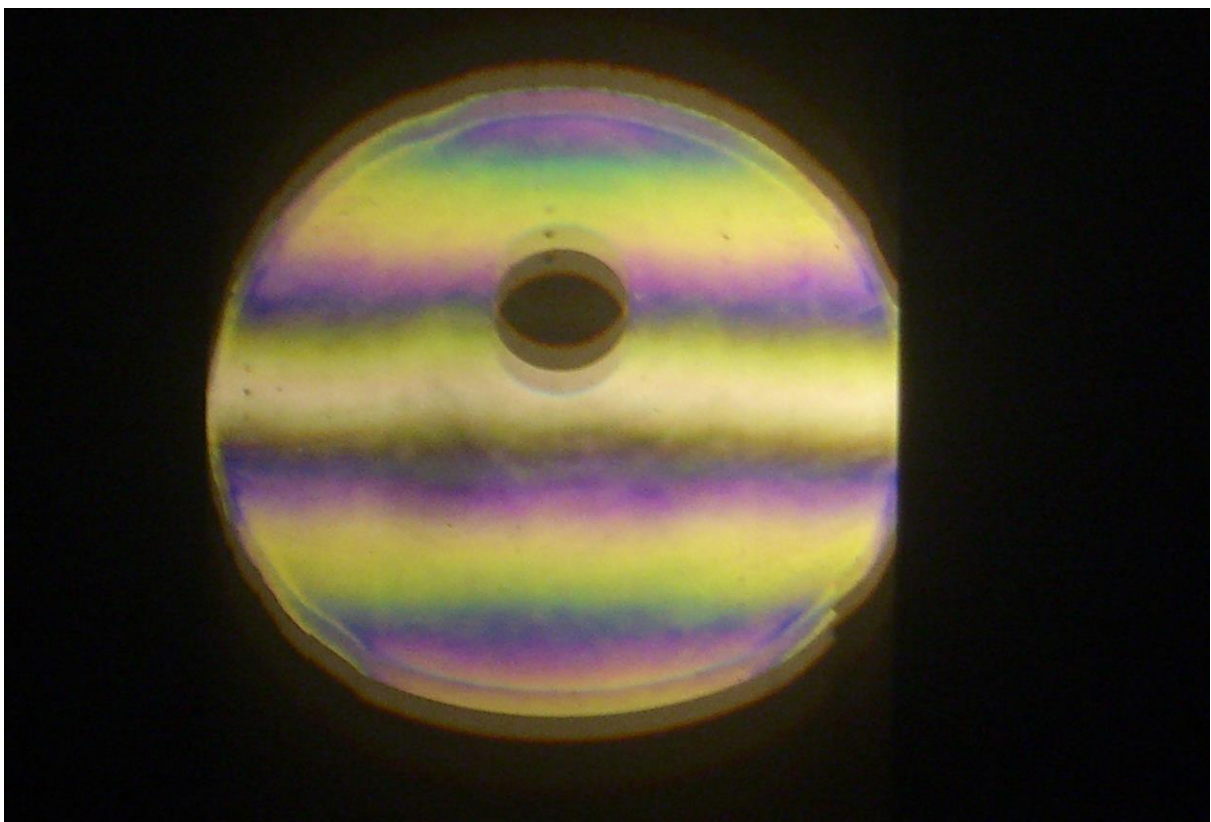
Vlnová délka [mikron]	0.623400	0.656273	0.687000	0.706500	0.768200
Korunové sklo spojka	1.51261209	1.51154520	1.51073951	1.51031913	1.50943595
Flintové sklo rozptylka	1.61165344	1.60974280	1.60832857	1.60760908	1.60622011



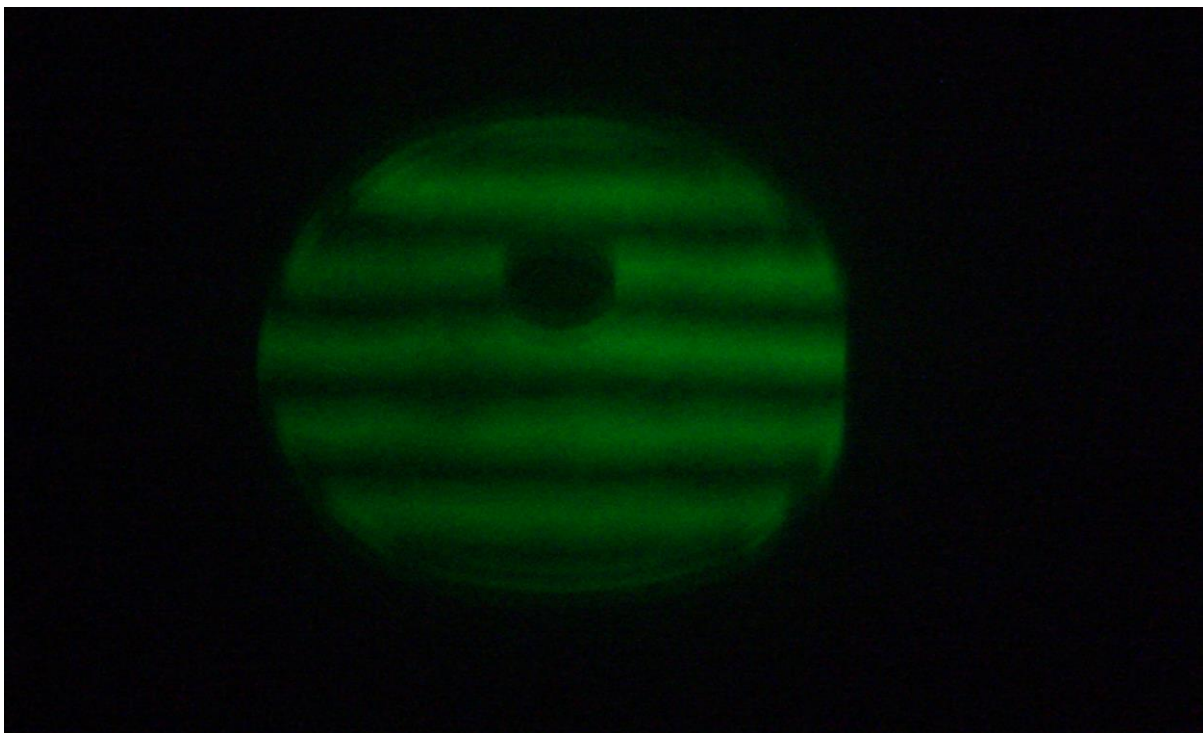
Obrázek 1. Osmipalcový Clarkův objektiv v přepravním boxu



Obrázek 2. Čočky objektivu, vyjmuté z objímky

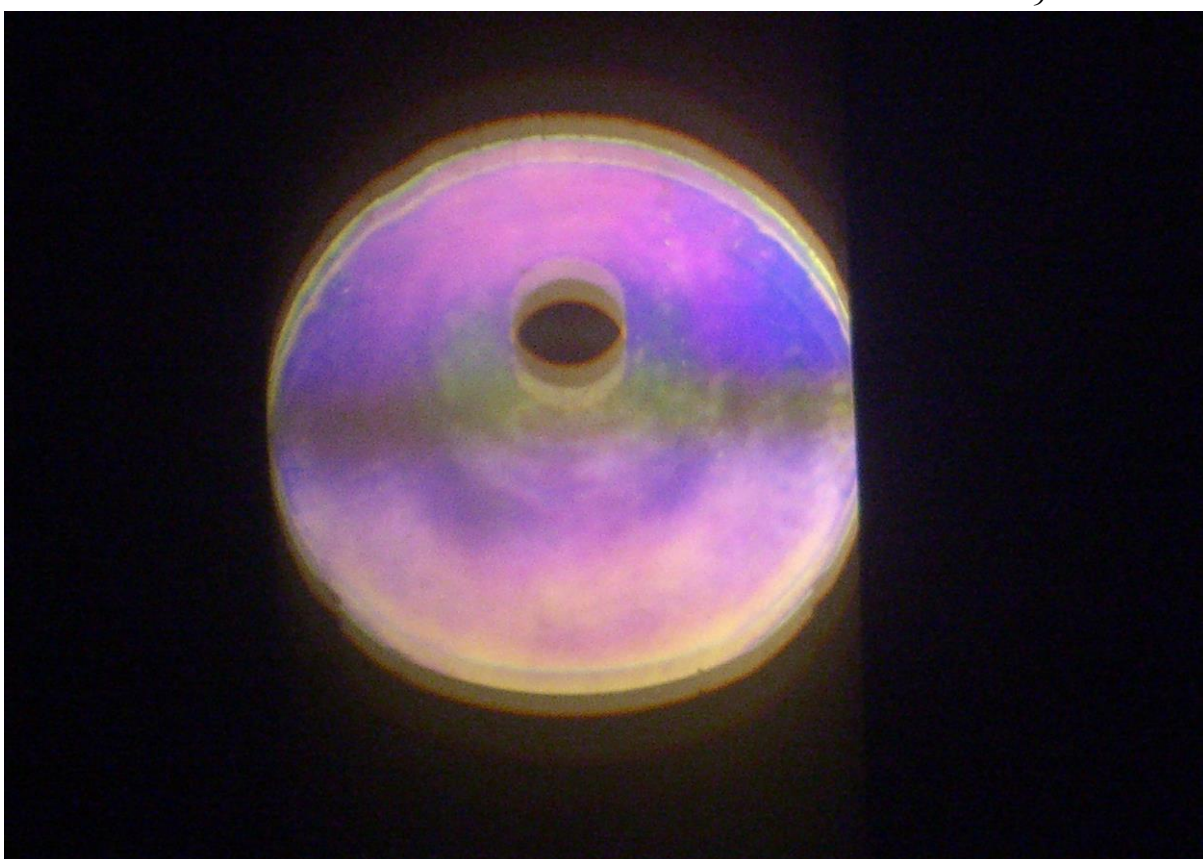


Obrázek 3. Ronchigram objektivu v bílém světle

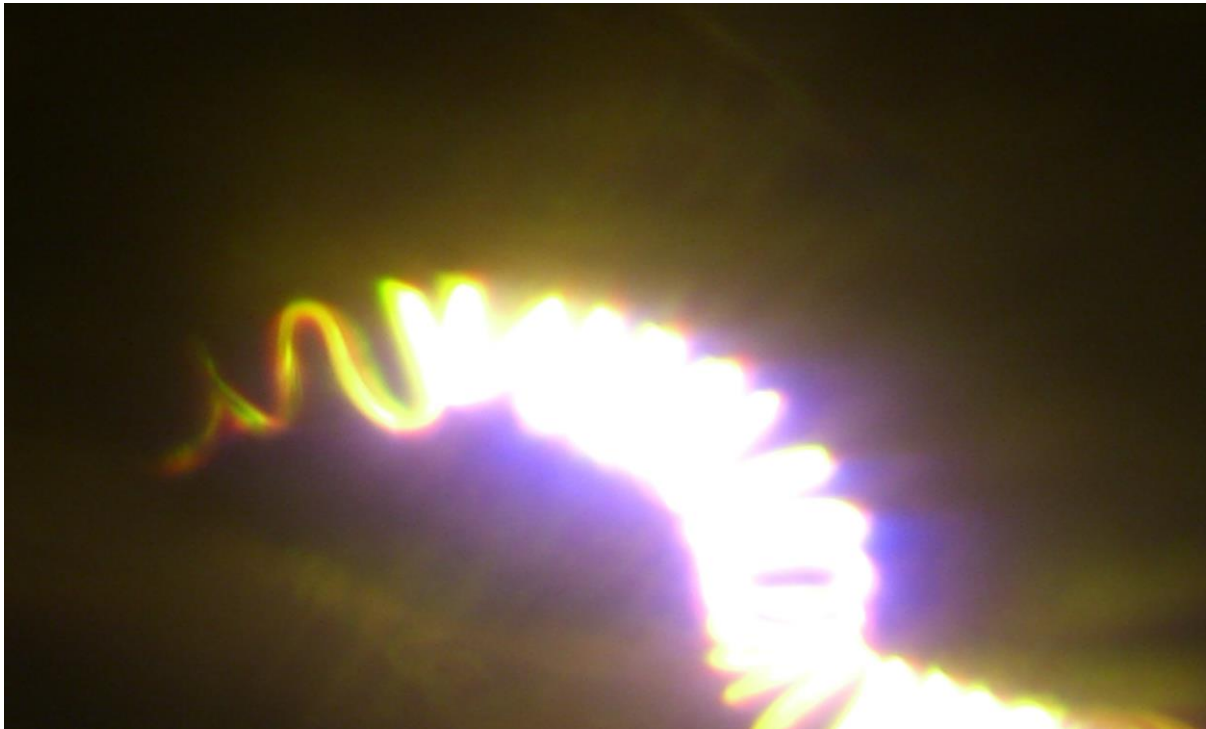


Obrázek 4. Ronchigram objektivu v zeleném světle ( $\lambda = 546.1 \text{ nm}$ )

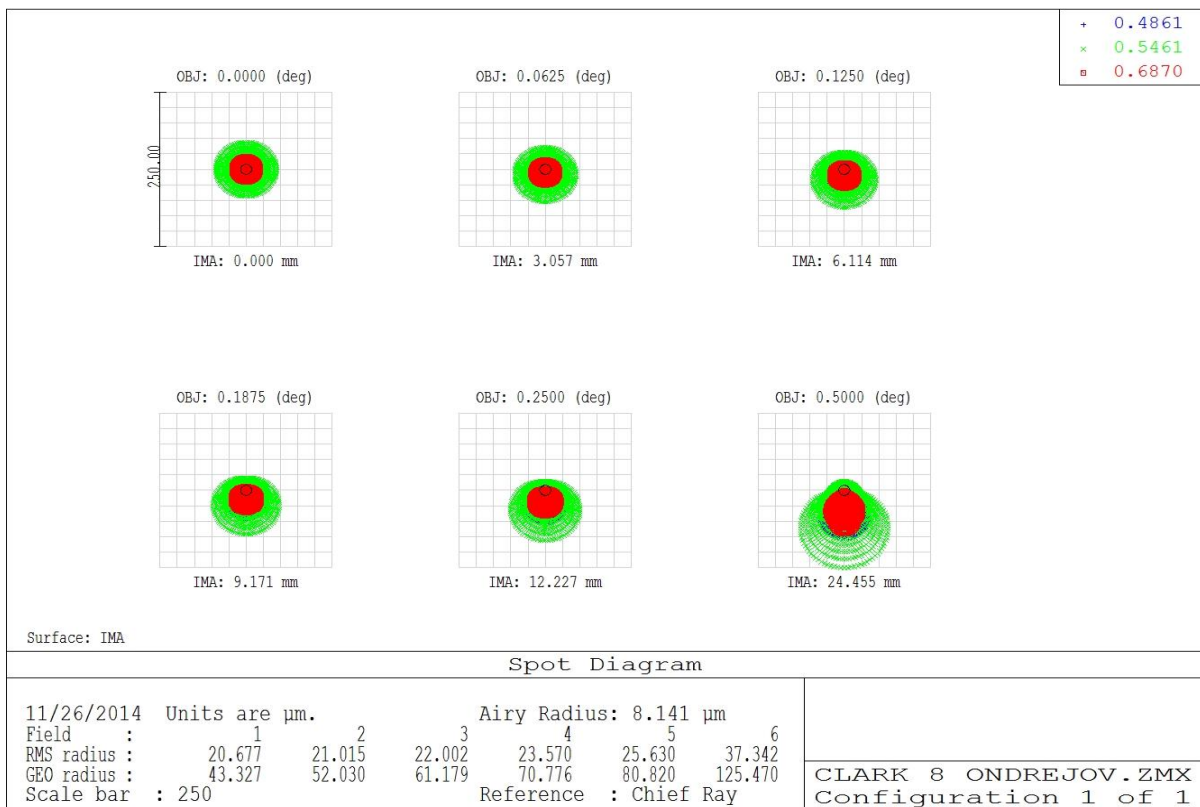
9



Obrázek 5. Ronchigram objektivu v sečné vzdálenosti paprsků o vlnové délce  $\lambda = 587 \text{ nm}$

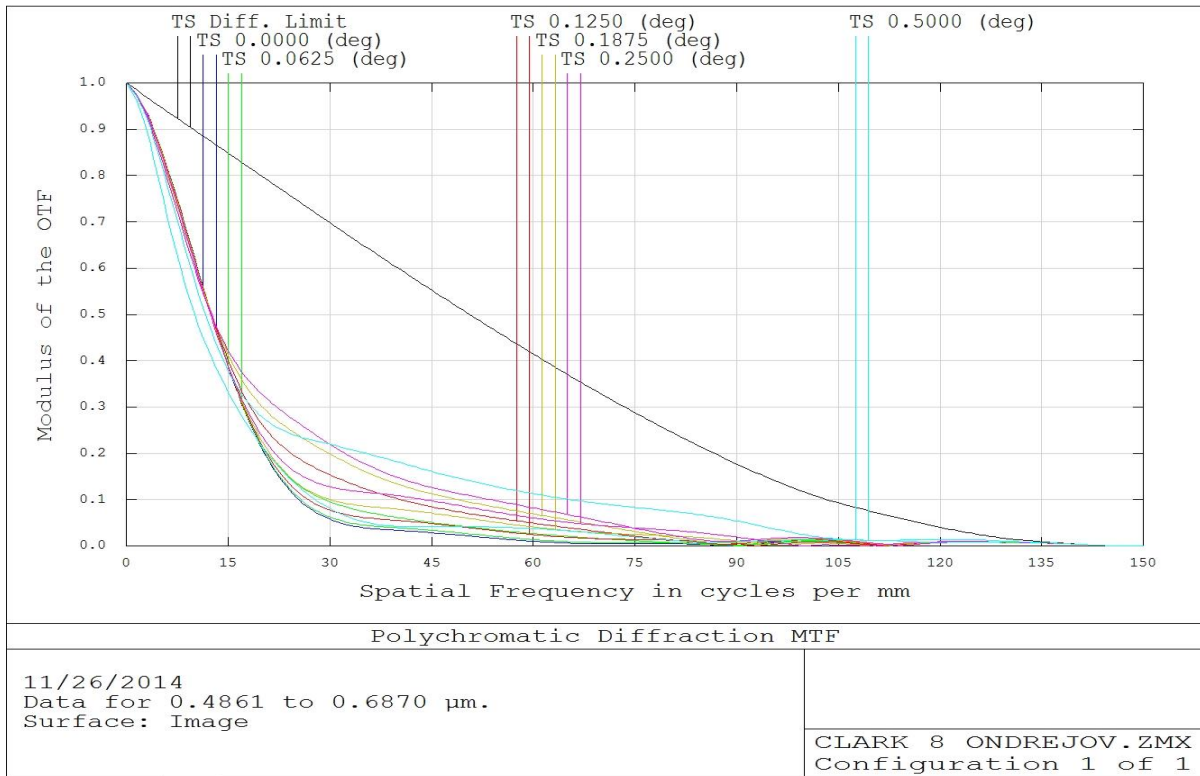


Obrázek 6. Fotografie vlákna žárovky s modrozeleným halem, charakteristickým pro B-F korekci



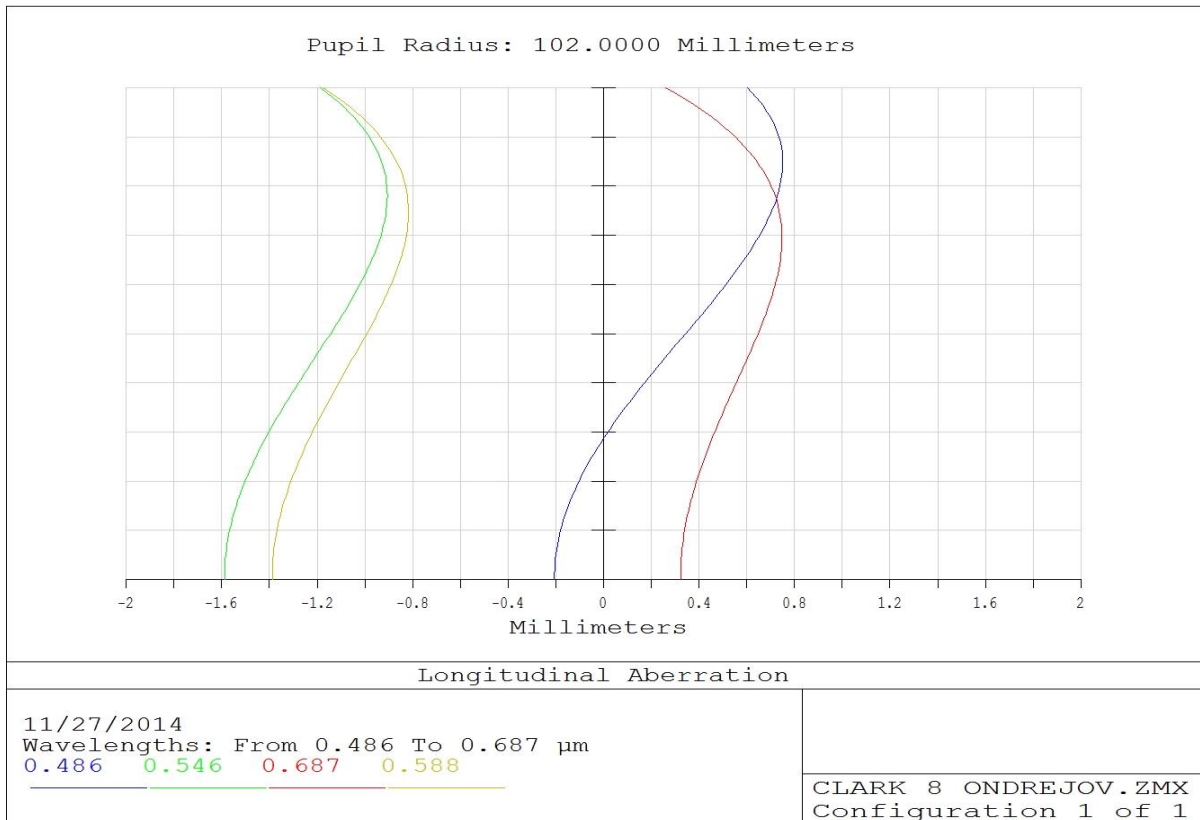
Obrázek 7. Spotdiagramy Clarkova objektivu v oboru 486.1nm až 687 nm



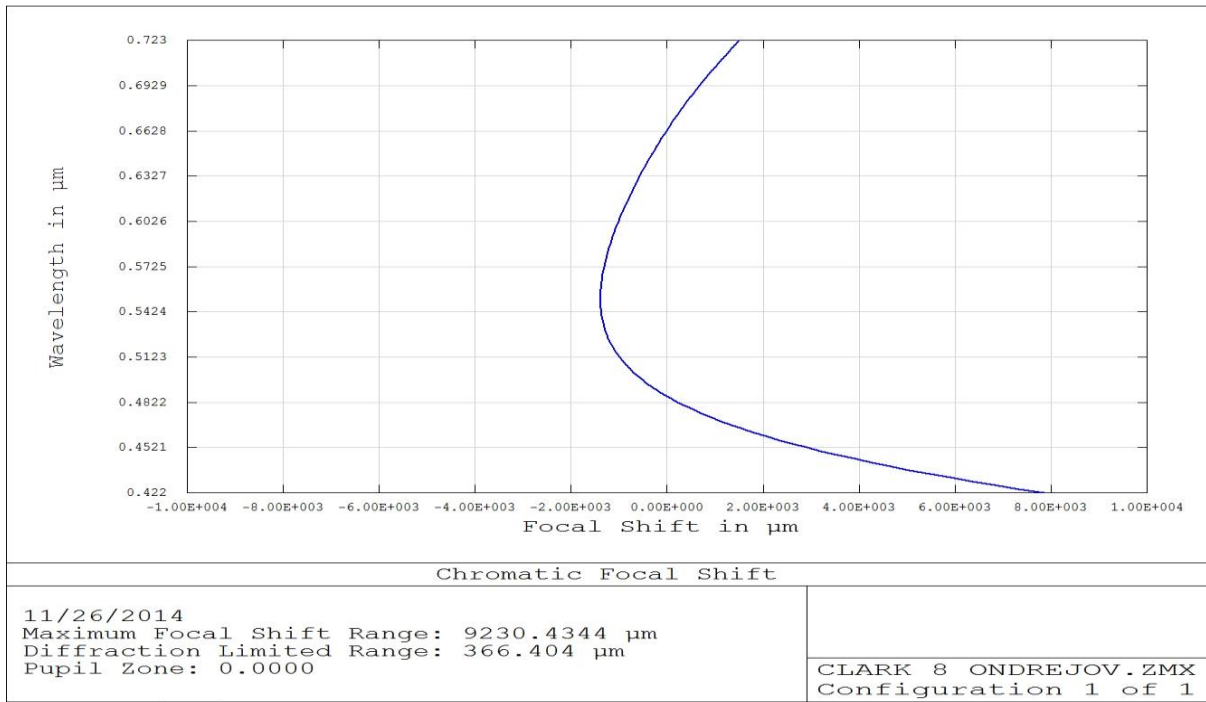


Obrázek 8. Modulační přenosová křivka objektivu pro obor 486.1 nm až 687 nm

11



Obrázek 9. Sférochromatická vada dubletu pro vlnové délky 486.1nm, 546.1nm, 587.6nm, 687 nm



Obrázek 10. Křivka podélné chromatické vady v oboru od 422 nm do 723 nm