

Simulace zbytkových optických vad objektivu 210/3452 slunečního spektrografu na observatoři v Ondřejově

Zdeněk Rail, Daniel Jareš, Radek Melich
Ústav fyziky plazmatu AV ČR, v.v.i. - Toptec
Sobotecká 1660, 51101 Turnov
e-mail : rail@ipp.cas.cz, jares@ipp.cas.cz, melichr@ipp.cas.cz

Koncem roku 2012 bylo provedeno přeměření a vyčištění objektivu 210/3452 slunečního spektrografu observatoře AsÚ AVČR v Ondřejově. Spektrograf pracuje v čáře H-Alfa a je tvořen tímto objektivem a dvojlomně-polarizačním filtrem, umístěným před jeho ohniskovou plochou. Z naměřených hodnot jsme vyčíslili jeho optické vlastnosti. V refrátu předkládáme jak výsledky matematického vyčíslení zbytkových vad, tak nové optické návrhy systémů vhodných pro použití filtrů Fabry-Perota.

Simulation of Residual Optical Aberrations of Objective Lens 210/3452 of Solar Spectrograph of Ondřejov Observatory

At the end of year 2012 our workshop accomplished measurement and restauration of objective 210/3452 of the spectrograph of Astronomical Institute of Czech Academy of Sciences. This objective lens is used together with narrow-band birefringent filter for solar chromosphere imaging. In this work we present both results of mathematical evaluations of residual aberrations and new designs of systems suitable for Fabry-Perot filter application.

1. Úvod

V prosinci 2012 jsme byli požádáni pracovníky Slunečního oddělení Astronomického Ústavu AV ČR v.v.i. provést kontrolu optického systému chromosférického dalekohledu. Tento přístroj je umístěn v kopuli hlavní budovy ondřejovské observatoře na společné montáži s fotosférickým dalekohledem s objektivem Alvana Clarka 203/2800 mm.

Chromosférický dalekohled je vybaven dvojlomně-polarizačním filtrem Šolcova typu s pološířkou propusti cca 0,07 nm v oboru čáry H Alfa (656,3 nm). Filtr je v něm umístěn do sbíhavého svazku objektivu před jeho ohniskovou plochou.

Objektiv byl vyroben v závodech Carl Zeiss Jena okolo roku 1950, má průměr 210 mm a ohniskovou vzdálenost 3451,3 mm pro paprsky o vlnové délce 656,3 nm. Před objektivem je umístěn determální filtr z materiálu KG3 o průměru 170 mm a tloušťce 5,2 mm.

V nedávné minulosti začaly být problémy se zobrazovacími vlastnostmi přístroje a to byl důvod, proč se k nám dostaly jeho díly ke kontrole. Na optickou lavici se dostal objektiv 210/3451,3 a dále determální filtr, zabraňující infračerveným paprskům vstup do přístroje.

2. Postup měření

Postup měření dubletu byl standartní, nejdříve byla na autokolimátoru proměřena jeho podélná barevná vada. Pomocí řady filtrů byly proměřeny sečné vzdálenosti pro paprsky jednotlivých vlnových délek.

Poté byly čočky pracovníkem Bohdanem Šrajcerem vyjmuty z objímky a u spojky byla též měřena chromatická křivka pro paraxiální paprsky. Toto měření bylo provedeno pouze v jedné orientaci spojné čočky vypouklejší plochou k objektu. U druhé orientace spojky vypouklejší plochou dozadu ke vstupním paprskům je sférická aberace mnohem větší a brání k přesnému určení sečné vzdálenosti. Obě měření sečných vzdáleností byla prováděna s přesností +/- 0,2 mm. Z naměřených hodnot sečných vzdáleností spojky bylo možné v programu

Zemax spočítat index lomů čočky pro jednotlivé vlnové délky. Z nich pak byla sestavena disperzní křivka spojky. Disperzní křivka rozptylky byla spočtena na základě výsledků měření sečných vzdáleností kompletního dubletu. Pro přesný výpočet zbytkových vad objektivu bylo nutné pro výstupní plochu objektivu zavést dodatečně další parametr - asféricnost plochy. S tímto parametrem byly získány výsledky simulací blízke s naměřenými.

3. Výsledky měření

Čočky objektivu jsou uloženy v objímce s označením Carl Zeiss, Nr.1481 E.

Z měření chromatické aberace vyplývá, že objektiv o průměru 210 mm má pro paprsky čáry H-Alfa sečnou vzdálenost 3430 mm. Horní hranice jeho vlnové aberace pro tuto spektrální čáru je lepší než $\lambda/10$, to znamená hodnotu lepší než 65 nm.

Rozdíl sečných vzdáleností paprsků o vlnových délkách 422 nm a 723 nm je cca 26,5 mm.

Plochy objektivu byly vyčištěny a zhruba 10 mm velká lastura na výstupní ploše objektivu byla zabroušena a vyčerněna.

Sbíhavý svazek z hlavního objektivu, zacloněného determálníním filtrem na konvergenci $1/20,3$, vstupuje do dvojlomně polarizačního filtru Šolcova typu o pološifce propustnosti 0,07 nm a optické délce cca 200 mm.

S objektivem byla k přeměření dodána planparalelní deska o průměru 170 mm a tloušťce 5,2 mm z materiálu KG3. Její funkce je odfiltrovat paprsky v IR oboru a zabránit ohřevu vnitřku tubusu.

Tato deska způsobuje zhoršení vlnové aberace soustavy o průměru 170 mm přibližně na $\lambda/4$. Je umístěna cca 200 mm před objektivem.

Planparalelní desky byla měřena autokolimačním testem pomocí přesného paraboloidu o průměru 210 mm a ohniskové vzdálenosti 1392 mm, který vytvářel svazek paralelních paprsků. Do tohoto svazku byla umístěna planparalelní deska ze skla KG3. Rovinným zrcadlem se svazek paprsků zpětně odrazil do desky a paraboloidického zrcadla, které odražené paprsky vrátilo do ohniska. Analyzátozem byla v tomto případě Ronchi mřížka.

Velikost odchylky vlnoplochy, způsobené chybou planparalelní desky, byla změřena na cca 150 nm.

4. Simulace optických soustav s původním objektivem

a/ Základní sestava se Šolcovým filtrem

Objektiv o průměru 210 mm má pro vlnovou délku paprsků 656,3 nm ohniskovou vzdálenost 3451,3 mm. Pro přesnější vyčíslení sférické aberace dubletu bylo v návrhu nutné použít asférický profil jeho 4. plochy o asféricnosti -7,5.

Bez této hodnoty by dublet pro čáru 656,3 nm měl vlnovou aberaci cca $\lambda/4$. Z výpočtu vyplývá, že dublet je blízky aplanátu s malou zbytkovou komou. Před objektivem se nachází determální filtr z materiálu KG3 o tloušťce 5,2 mm a průměru 170 mm.

V simulaci spektrografu byl dvojlomně-polarizační filtr Šolcova typu o přibližné optické délce 200 mm, umístěn tak, že jeho výstupní plocha byla ve vzdálenosti 100 mm před ohniskovou plochou. Soustavou lze pozorovat na Slunci nevignetované pole o průměru 16,8 úhlových minut, reprezentujících lineární rozměr 17 mm. S dvojlomně-polarizačním filtrem Šolcova typu o přibližné délce 200 mm lze pozorovat na Slunci nevignetované pole o průměru 16,8 úhlových minut, reprezentujících lineární rozměr 17 mm. Šířka propusti filtru pro čáru H α byla 0,07 nm.

Pro simulaci našich optických soustav byly optické parametry skla KG3 nahrazeny parametry skla BK7. V katalogu Schottových skel je uvedena hodnota indexu lomu KG3 1.51 pro heliovou čáru d 587.6 nm.

Před objektivem je ve vzdálenosti cca 200 mm umístěn determální filtr, omezující vstupní aperturu spektrografu na průměr 170 mm. Tloušťka materiálu filtru ze skla KG3 je 5,2 mm. Ze simulace vyplývá, že spektrograf má geometrické obrazy bodu mnohem menší než difrakční v celém zorném poli 16,8 úhlových minut. Toto je základní sestava spektrografu, s jakou se dnes pozoruje Slunce.

b/ Sestava s Day-Star filtrem

Ve spektrografu s objektivem 210/3450, zacloněném deternálním filtrem na průměr 170 mm, lze nahradit dvojlomně-polarizační filtr Šolcova typu filtrem Day-Star o optickém intervalu 25 mm a průměru vstupní apertury 30 mm.

Objektiv o světelnosti 1/20,3 je příliš světlý pro použití Day-Star filtru, u kterého výrobce doporučuje konvergenci svazku maximálně 1/30.

c/ Spektrograf s Day-Star filtrem s kolimačním a zobrazujícím objektivem

V našem referátu předkládáme optický návrh spektrografu, vybaveného filtrem typu Day-Star o průměru vstupní apertury 30 mm, optickou délkou 25 mm z materiálu silica – tavený křemen.

Systém je tvořen původním objektivem, vícečlenným kolimačním a jednoočkovým zobrazujícím objektivem, Day Star filtrem v paralelním svazku a deternálním filtrem z KG3. Vstupní apertura systému je 170 mm.

Výsledná ohnisková vzdálenost spektrografu je 4890 mm pro obor čáry H α .

Průměr Slunce je cca 43 mm. Spektrograf je navržen tak, aby bylo možné zobrazit Day-Star filtrem o optickém průměru 30 mm nevinětované zorné pole o průměru 37,5 úhlových minut.

Divergence paprsků, procházející tímto filtrem činí 1/160. Nevýhodou navrhovaného přístroje je jeho stavební délka 5400 mm.

Rovinným zrcadlem by bylo možné spektrograf zkrátit.

d/ Spektrograf s Day-Star filtrem s kolimačním a zobrazujícím objektivem

Spektrograf s Day-Star filtrem je blízký předchozímu optickému návrhu c/, avšak s omezeným zorným polem o průměru 10,8 úhlových minut. Ohnisková vzdálenost spektrografu je 5700 mm a stavební délka celého přístroje činí 5750 mm. Paprsky procházejí Day-Star filtrem s konvergencí svazku 1/400.

Přístroj je vhodný pro detailní zobrazení menší části povrchu Slunce o průměru 10,8 úhlových minut s vysokým kontrastem.

Parametry a výsledky simulací jejich zbytkových vad jsou uvedeny na obrázcích v elektronické verzi referátu.

5. Zhodnocení

Hlavním úkolem naší práce bylo hledání potenciální příčiny, proč spektrograf nefunguje. Proto byla provedena kontrola hlavního objektivu 210/3450 a deternálního filtru ze skla KG3 o průměru 170 mm. Bylo shledáno, že tyto členy jsou po optické stránce v pořádku a nejsou schopny do systému zavést pozorovaná zhoršení.

Příčinou nefunkčnosti spektrografu je s nejvyšší pravděpodobností dvojlomně-polarizační filtr, který je nutné prohlédnout a proměřit.

Objektiv byl u nás vyjmut z mechanické objímky a jeho optické plochy očištěny. Na zadní straně objektivu byla zabroušena a zabarvena lastura na optické ploše. Přitom bylo možné změřit mechanické a optické parametry dubletu. Podobně byla změřena i deska z KG3.

Z výsledků měření objektivu byla provedena jeho simulace zbytkových optických vad v programu ZEMAX.

Dále byla v programu ZEMAX zkoumána používaná konfigurace spektrografu, složená z dubletu a dvojlomně-polarizačního filtru Šolcova typu. Pro malé zorné pole o průměru 16,8 úhlových minut tato soustava může poskytovat vynikající výsledky.

Podobně byla zkoumána soustava objektivu s Day-Star filtrem, umístěným do sbíhavého svazku před ohniskem. Tato soustava by též měla poskytovat vynikající obrazy, avšak objektiv o světelnosti 1/18 je pro tento typ filtru příliš světlý. Výrobce filtru doporučuje, aby paprsky procházející filtrem měly konvergenci nižší než 1/30.

Dále byly spočteny dvě soustavy spektrografů o ohniskových vzdálenostech 4890 a 5750 mm, umožňující využití Day-Star filtru pro pozorování celého slunečního disku nebo pozorování zorného pole omezeného na průměr cca 10,8 úhlových minut s vysokým kontrastem.

Nevýhodou těchto návrhů je jejich dlouhá stavební délka přístrojů – cca 5400 a 5700mm.

Tu by bylo možné pomocí rovinného zrcadla zkrátit na polovinu, avšak v současné době je taková úprava dalekohledu těžko realizovatelná.

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.

5.Literatura

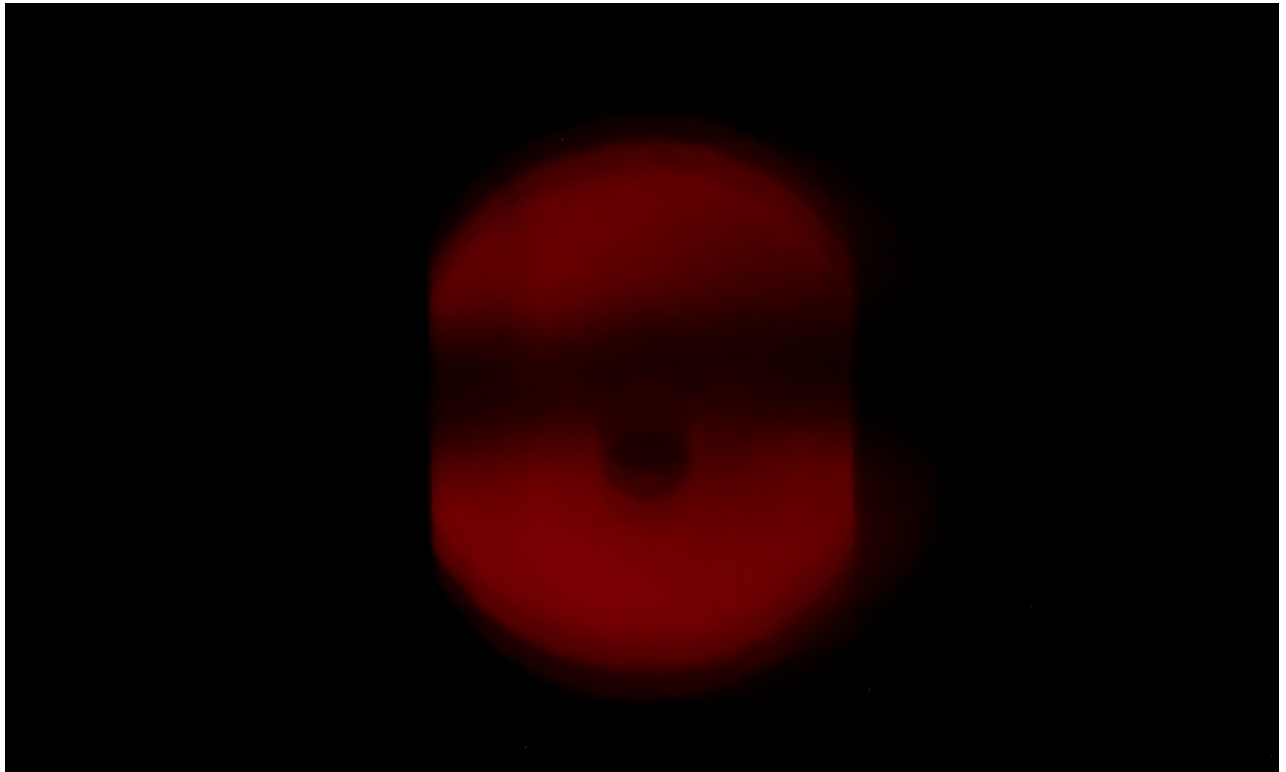
- [1] Kuiper G. P., The Sun, The University of Chicago Press, Chicago, Illinois, 1953 (Překlad Dž.Kojper, Solnce, Izdatelstvo inostrannoj literatury, Moskva, 1957)
- [2] Michelson N.N., Optičeskije teleskopy, Izdatelstvo Nauka, Moskva, 1976
- [3] Jareš.D., Lédl V., Rail Z., Zobrazovací soustava pro spektrograf s vícekanálovým Šolcovým filtrem, Člověk ve svém pozemském a kosmickém prostředí, Sborník referátů, rok 2007
- [4] Rail Z., Melich Z., Projekt optické části slunečního robotnického dalekohledu, interní zpráva ÚFP AVČR v.v.i., OD, Turnov
- [5] Rutten van Venrooij, Teleskope Optics, Willmann-Bell, Inc., Richmond, Virginia, 2002
- [6] Volosov D.S., Metody rasčeta složnych fotografičeskich sistem, OGIZ, Leningrad, 1948
- [7] Maksutov D.D., Izgotovljenije i issledovanije astronomičeskoj optiki, Nauka, Moskva, 1984
- [8] Optical design Program Zemax, User's Guide, Version 10, Focus Software, Inc., Tucson, 2005



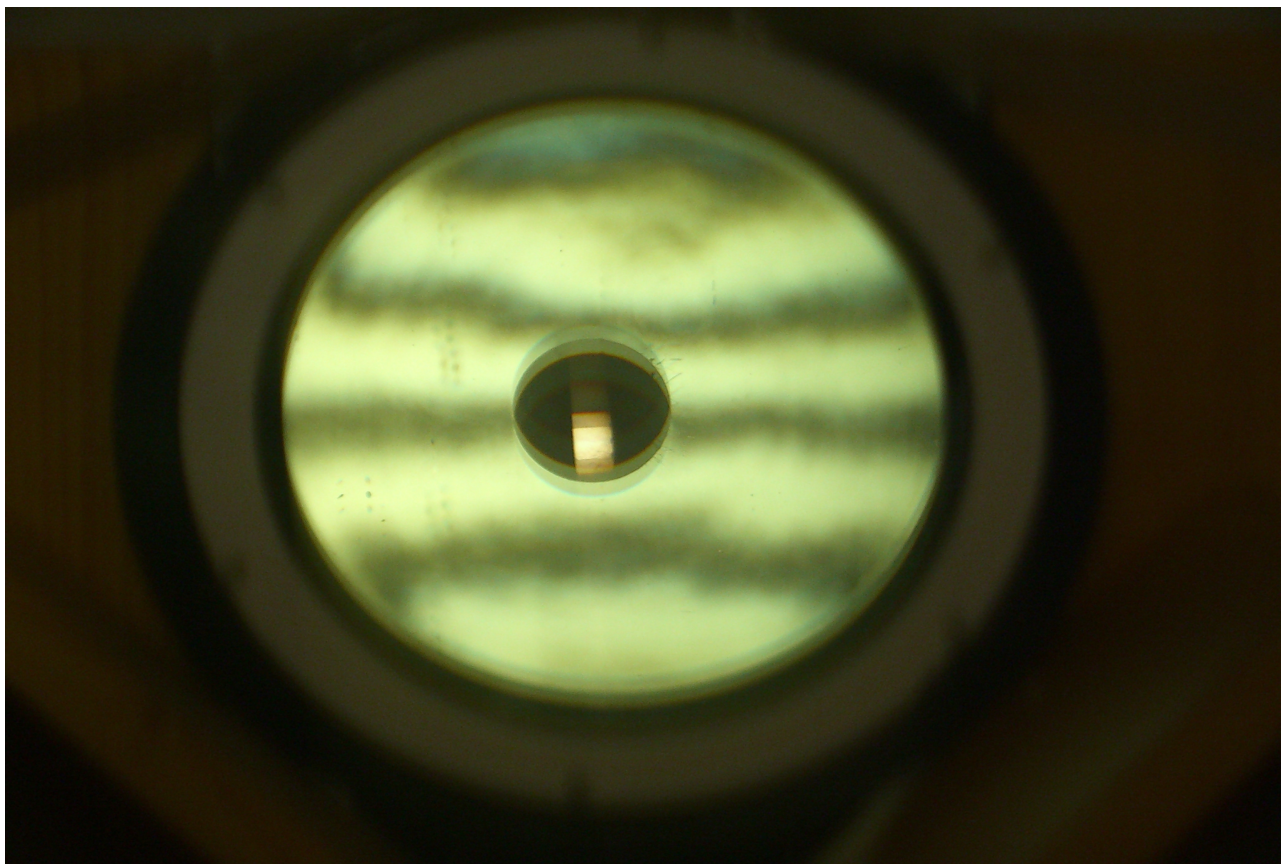
Obrázek 1. Objektiv 210/3450 Carl Zeiss Jena. Pohled shora.



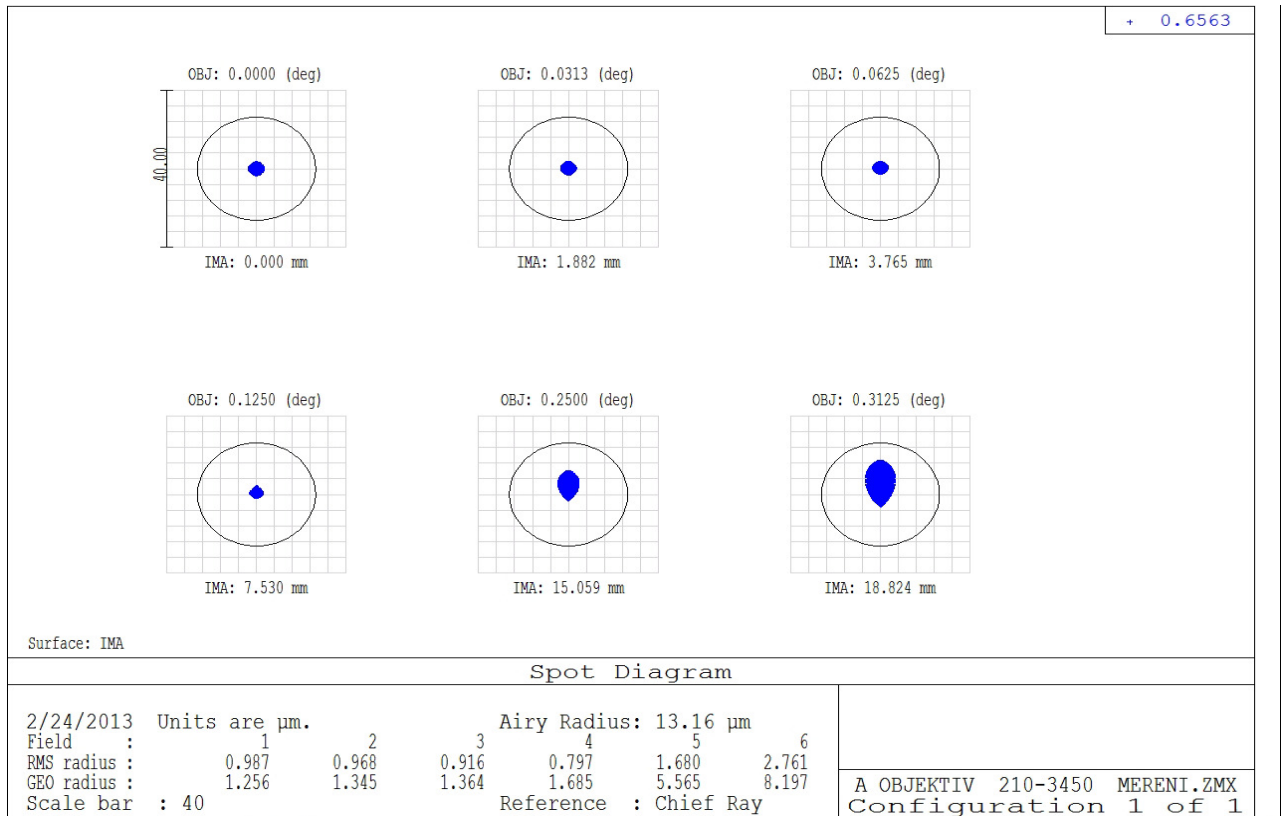
Obrázek 2. Objektiv 210/3450 Carl Zeiss Jena. Pohled z boku.



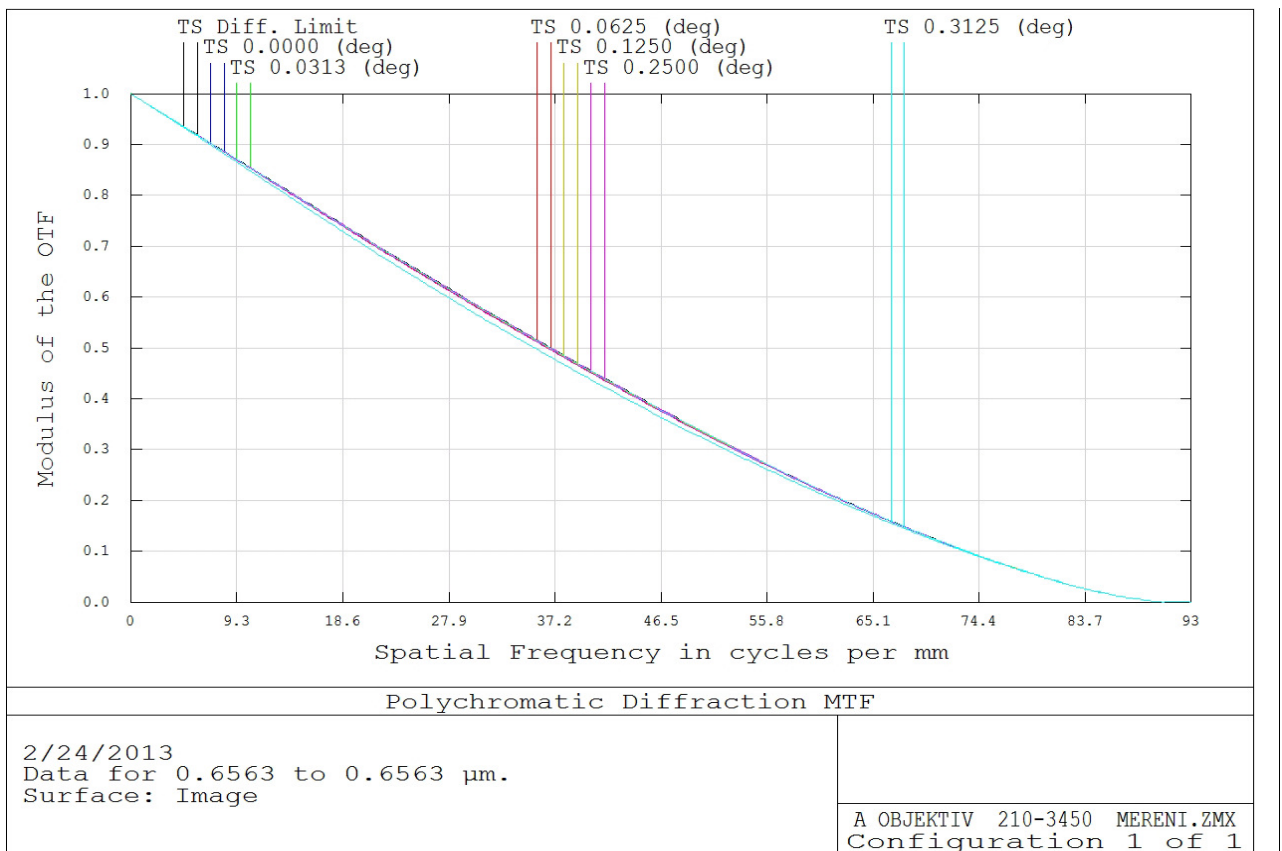
Obrázek 3. Ronchigram samostatného objektivu ve světle o vlnové délce 656,3 nm.(H- α) Mřížka 5 vrypů na mm.



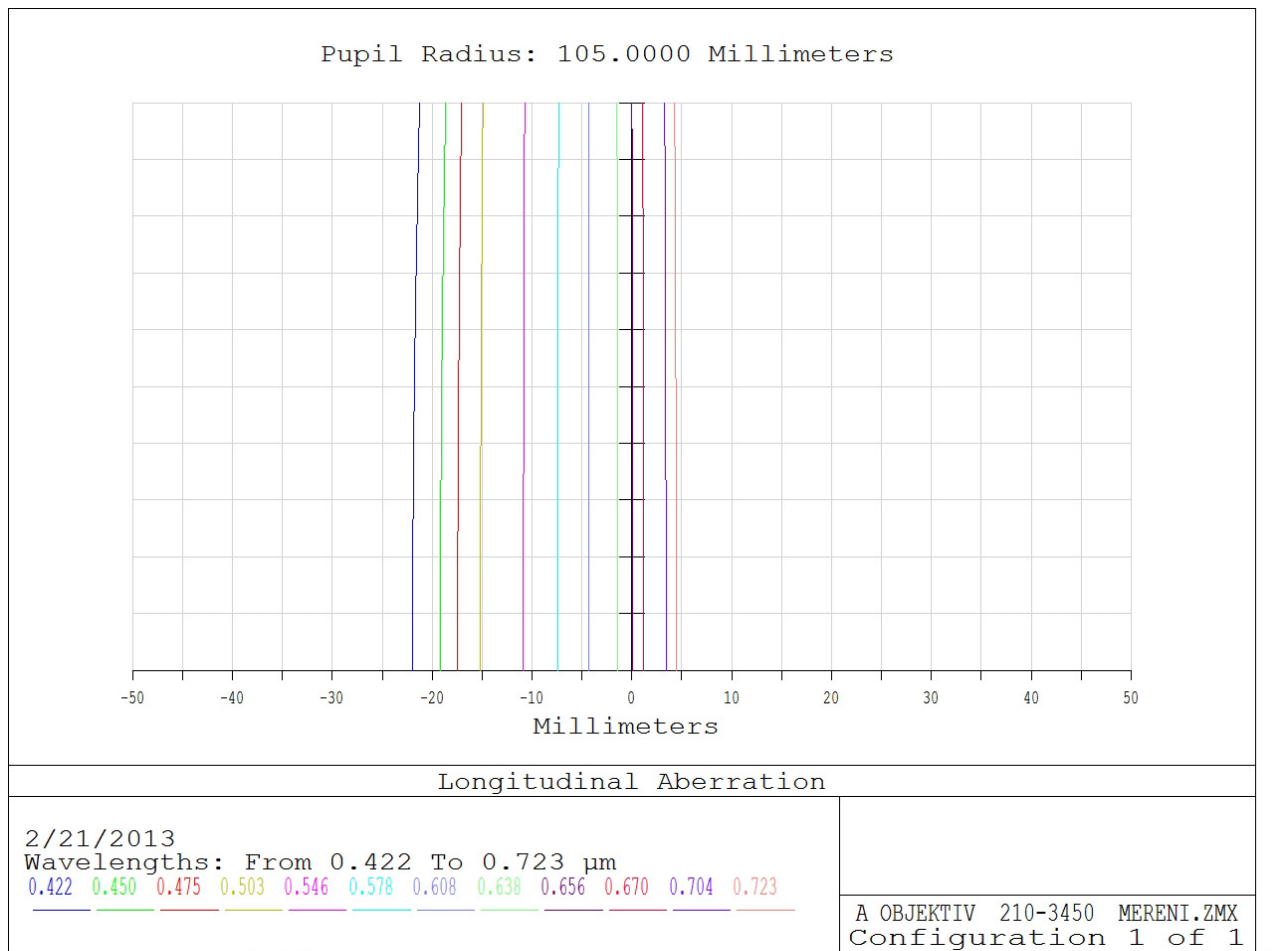
Obrázek 4. Ronchigram dubletu 210/3450 s deternálním filtrem o průměru 170 mm.



Obrázek 5. Spotdiagramy samostatného objektivu 210/3450 pro obor H- α . ($\lambda = 656,3 \text{ nm}$)



Obrázek 6. Modulační přenosová křivka dubletu 210/3450 pro obor H- α . ($\lambda = 656,3 \text{ nm}$)



Obrázek 7. Podélná chromatická vada dubletu 210/3450

Prezentace: [prezentace.ppt](#)

Obrázky: [obrazky](#)