

Zbytkové optické vady Clarkova osmipalcového objektivu z Ondřejova.

Zdeněk Rail, Daniel Jareš, Vít Lédl
Ústav fyziky plazmatu AV ČR, v.v.i. - OD
Skálova 89, 51101 Turnov
e-mail : vod@ipp.cas.cz

Referát se zabývá zbytkovými vadami historického Clarkova osmipalcového (průměr 203 mm) objektivu z Astronomického ústavu AV ČR, v.v.i. v Ondřejově.

V roce 1999 byl objektiv ve Vývojové optické dílně AV ČR rozebrán, vyčištěn a u čoček byly proměřeny optické parametry, umožňující matematickou simulaci dubletu.

Residual aberrations of Clark 8" telescope of Ondřejov.

This paper deals with residual aberrations of Clark 8" (diameter 203 mm) lens of Astronomical Institute of AS CR, v.v.i. in Ondřejov.

Objective was disassembled and cleaned in Development Optical Workshop of AS CR in Turnov in 1999. During this process optical parameters of lenses were measured and this makes possible to evaluate mathematical simulation of this doublet.

1. Historie dalekohledu

Málokteré fyzikální přístroje mají za sebou tak dlouhou kariéru jako refraktory s achromatickými objektivy z 19. století. Dodnes řada z nich poskytuje cenné služby s vysokou vědeckou hodnotou.

Jedním takovým přístrojem je dalekohled s 8" (průměr 203 mm) objektivem Alvana Clarka observatoře Astronomického Ústavu Akademie věd České republiky v.v.i. v Ondřejově.

Dalekohled byl vyroben Alvanem Clarkem na zakázku reverenda R.W. Dawese v letech 1858-1859 pro pozorování proměnných hvězd, dvojhvězd, planet, Měsíce a Slunce [1], [2].

Dawes dalekohled velice záhy prodal N. Martindaleovi z Liverpoolu ve Velké Británii.

Po jeho smrti byl přístroj v roce 1888 odkoupen profesorem Vojtěchem Šafaříkem z Prahy, kde byl umístěn na jeho observatoři na Královských Vinohradech.

Začátkem 20. století se osmipalcový dalekohled dostal na hvězdárnu Josefa Jana Friče na Žalově poblíž Ondřejova. Pro objektiv byla vyrobena nová železná objímka a původní mahagonový tubus byl nahrazen kovovým.

Od padesátých let minulého století je dalekohled s Clarkovým objektivem využíván pouze pro studium sluneční fotosféry a chromosféry.

V dubnu roku 1999 byl objektiv přivezen do Vývojové optické dílny AV ČR v Turnově, kde byl odborně rozebrán, čočky byly vyčištěny a přeměřeny.

Z těchto a ze starších měření Dr. Pauliho a Dr. Šternberka [1] bylo možné vyjádřit zbytkové optické vady tohoto objektivu.

2. Obecný postup zjištění zbytkových vad

- a) Na autokolimátoru změřit sečné vzdálenosti paraxiálních paprsků dubletu v několika vlnových délkách. Tak zjistíme profil chromatické křivky dubletu, určující typ jeho korekce.
- b) Čočky se vyjmou z objímky a totéž měření se provede pro spojku.
- c) Změří se poloměry křivosti ploch čoček a jejich středové tloušťky.
- d) Zjistí se vzdálenost čoček od sebe.
- e) Z poloměrů křivosti ploch spojky, její středové tloušťky a sečných vzdáleností paraxiálních paprsků pro několik vlnových délek, vypočteme indexy lomu materiálu,

z něhož je spojka vyrobena.

- f) Dopočítáme indexy lomů rozptylky tak, aby se teoreticky vypočtené hodnoty sférochromatické vady dubletu co nejlépe shodovaly s naměřenými. Není-li možné dokompenzovat sférickou aberaci, zavedeme další parametr, kterým je asféricita poslední plochy dubletu. Díky němu dosáhneme požadované korekce.
- g) Tímto známe všechny parametry nutné k matematickému popisu dubletu. Zbytkové vady dubletu dopočítáme

3. Praktické provedení

Měření sečných vzdáleností bylo prováděno na autokolimátoru s pomocí filtrů s dostatečně úzkou pološířkou propustnosti. K dispozici byly interferenční filtry pro tyto vlnové délky: 656,3 nm, 588 nm, 546,1 nm a 467 nm s pološířkami nepřesahujícími 10 nm.

V jednotlivých oborech byla změřena i hodnota podélné sférické aberace - rozdíl sečných vzdáleností středových a krajních paprsků.

V literatuře byly objeveny dvě chromatické křivky, jedna pochází z období okolo roku 1909 od Dr. Pauliho z Zeissových závodů v Jeně, kdy byla provedena kontrola objektivu. Druhé měření je od Dr. Šternberka z roku 1940 [1].

Vzhledem k tomu, že objektiv jsme měli k dispozici pouze na tři hodiny, sečné vzdálenosti dubletu byly změřeny pouze pro čtyři vlnové délky a u spojky jen tři. Pro přesnější popis dubletu by bylo lepší vykonat měření pro co nejvíce bodů v širokém rozsahu viditelného světla.

Měření chromatické křivky u spojky probíhala v orientaci spojky vnitřní plochou dopředu. V tomto uspořádání je otvorová vada čočky menší a to umožňuje přesnější určení sečných vzdáleností monochromatických paprsků.

Poloměry křivosti ploch čoček změřil RNDr. Zbyněk Melich přesným mechanickým sférometrem, zapůjčeným z firmy Dioptra Turnov.

Poté byly dopočítány pomocí programu Zemax indexy lomů rozptylky tak, aby spočítaný systém měl stejnou sférochromatickou vadu jako měřený.

4. Výsledky

Ondřejovský Clarkův 8“ dublet je obecný dvojčočkový objektiv o průměru 203 mm a ohniskové vzdálenosti 2800 \pm 1,0 mm. Měření chromatické křivky prokázalo, že objektiv má vizuální B-F korekci a je achromatizován pro vlnové délky 687 nm a 486,1 nm. Její průběh byl identický s tím, který naměřil Dr. Šternberk v roce 1940.

Tento typ vizuální korekce pro čáry B - F zavedl počátkem 19. století Joseph Fraunhofer a stal se standardním po celou dobu 19. století. Na konci 19. století však byl nahrazen korekcí C - F (656,3 nm, 486,1 nm) nebo C' - F' (643,9 nm, 480 nm).

Důvodem volby této korekce bylo to, že v tehdejší době bylo hlavním kritériem kvality dalekohledů zobrazení planet, Měsíce, dvojhvězd. Střed spektrálního oboru B - F korekce je blíže ke žluté nebo oranžové barvě, kde se nachází těžiště spektrální křivky slunečního spektra. Tímto odraženým světlem září právě planety. V této oblasti spektra se chromatická křivka objektivu (závislost sečných vzdáleností paprsků na vlnové délce) pro širokou spektrální oblast příliš nemění a dublet v ní vykazuje nejmenší podélnou barevnou i otvorovou vadu.

Charakteristickým rysem B - F korekce je to, že objekty - jasné hvězdy, planety a Měsíc jsou obklopeny modrým nebo modrozeleným halem.

Pokud halo rušilo při pozorování jasných objektů, bylo vhodným filtrem potlačeno.

Korekce C - F nebo C' - F' má naopak halo nachové až fialové a začala se používat u vizuálních přístrojů až na konci 19. století. Je výhodnější pro pozemské dalekohledy a je používána dodnes. Ronchigramy objektivů s korekcí B - F a C - F jsou ukázány na obrázku číslo 10. Velikost chromatického rozdílu (rozdíl společné sečné vzdálenosti B a F paprsků a nejkratších paprsků o vlnové délce okolo 550 nm) námi změřená byla 1,1 mm. Dr. Pauli naměřil 1,7 mm. Jeho velikost odpovídá relativním disperzím skel, ze kterých je dublet vyroben. Clark použil skla, která tehdejší skláři dokázali v dostatečné kvalitě vyrobit. Patří do skupiny tzv. starých skel, u kterých korunová skla měla indexy lomu okolo 1,5 a Abbeho čísla 58-63. Flintová skla měla indexy lomu okolo 1,6 a Abbeho čísla 32-38.

Podélnou chromatickou vadu, rozdíl sečných vzdáleností společných B,F paprsků od nejkratších o vlnové délce 550 nm $\Delta_{(BF,550nm)}$, lze spočítat ze vztahu :

$$\Delta_{(BF,550nm)} = (P_1' - P_2') / (v_1 - v_2)$$

kde P_1' a P_2' jsou relativní disperze skel, v_1 a v_2 jsou jejich Abbeho čísla.

Výsledky měření indexů lomu spojky ukázaly, že spojka je z korunového skla o indexu lomu $n_d = 1,515$ a Abbeho čísla $v_d = 58$. Rozptylka je vyrobena z flintového skla s indexem lomu $n_d = 1.615$ a Abbeho číslo $v_d = 38$.

Skla, ze kterých je dublet vyroben jsou prakticky identická s těmi, ze kterých je vyroben Lickův, Yerkesův a objektiv USNO [3].

Z materiálů, které vyrábí firma Schott, jim nejlépe odpovídají materiály K7 a F5.

Chromatickou křivku spojky se povedlo spočítat s přesností desetin milimetrů na celkovém intervalu několika centimetrů.

Po spočtení indexů lomů spojky byly dopočteny indexy lomů rozptylky tak, aby chromatická křivka dubletu co nejlépe odpovídala měřením. Chyby měření v tomto případě na intervalu (1,5-2) mm byly maximálně (0,10-0,15) mm.

Objektiv má dokonale vykorigovanou otvorovou vadu pro střední vlnovou délku okolo 560 nm, pouze na jeho středu je tvar vlnoplochy mírně deformován. Je to projevem zbytkového pnutí spojky, které v čočce není zcela odstraněno a ve středu čočky má uzal. V polariskopu je v ní vidět kříž.

Prekvapující je to, že vnitřní poloměr křivosti spojky je delší než vnitřní poloměr křivosti rozptylky, takže čočky dubletu se dotýkají na obvodu. Díky tomu je koma objektivu překorigována.

Středové tloušťky čoček jsou malé a to vždy činí při výrobě problémy. Při opracování konvexních ploch mechanicky tenkých čoček se na nich zpravidla vytvoří asférický profil zploštělého sféroidu. Pokud se takový objektiv složí dohromady, bude jeho otvorová vada nedokorigována, krajní paprsky mají kratší sečnou vzdálenost než středové.

Odstranit tuto vadu znamená leštit plochy objektivu tak dlouho, dokud tyto nebudou přesně sférické. Figure optických ploch se tak velmi prodlužuje.

S technologickou asféricitou ploch je však možné počítat dopředu a rozptylku navrhnout tak, aby ji dokázala u dubletu co nejlépe vykompenzovat. Dodatečnou lokální retuší některé z ploch, nejlépe poslední, lze vykompenzovat sférickou aberaci pro střední vlnovou délku úplně.

Pokud by byl ondřejovský objektiv se sférickými plochami, měl by pro paprsky o vlnové délce 560 nm vlnovou aberaci $3,5 - 4 \mu (6 - 7 \lambda)$. Z tohoto důvodu je vysoká pravděpodobnost, že některé z ploch jsou asférické.

V našich výpočtech tato asfericita byla započtena pouze na zadní ploše tak, aby byla vykompenzována otvorová vada pro paprsky o vlnové délce 560 nm.

V době měření náš podnik nevládnul sféroidinterferometr, takže měření asférických povrchů ploch nebylo provedeno.

Výrobce objektivu Alvan Clark zřejmě posuzoval kvalitu objektivu podle kontrastních obrazů, čemuž podřídil tvar sférochromatické vady. Úplnou korekci mimoosové vady - komy u objektivu považoval za méně důležitou.

To je důvod, proč tento objektiv dosahuje zobrazení s vysokým kontrastem.

Díky dobré péči o objektiv jsou plochy ve velmi dobrém stavu a jsou na nich jen velice drobné vlasové defekty.

Výstupy z programu ZEMAX - spotdiagramy objektivu, MTF křivka, chromatická křivka, podélná otvorová vada a matrix spotdiagramy jsou dále uvedeny pro obě měření chromatických křivek.- naše (Dr.Šternberk) i Dr.Pauliho z roku 1909.

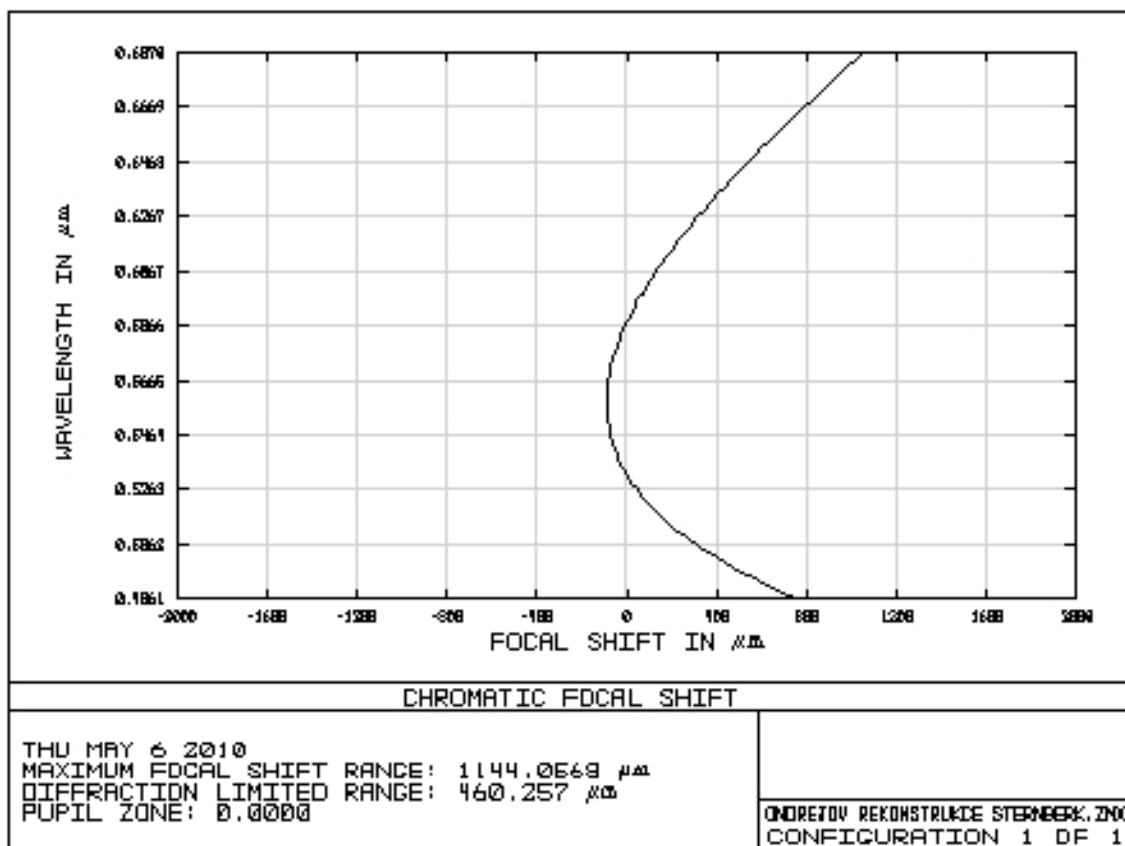
Práce je řešena jako dílčí část grantu „Podpora projektů cílového výzkumu AV ČR“, číslo 1SQ100820502.

Literatura:

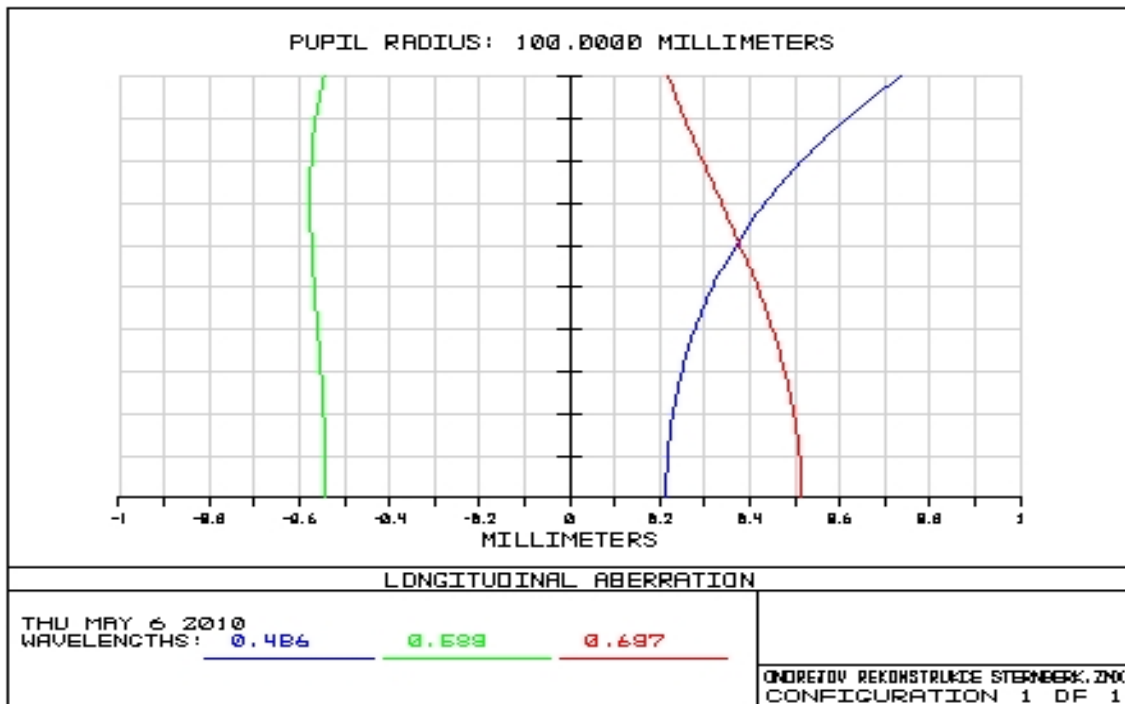
- [1] Scripta astronomica 9, ISSN 1210-0579, Jednoapůlstoletý osmipalcový objektiv Alvana Clarka hvězdárny astronomického ústavu akademie věd České republiky v Ondřejově u Prahy. Vydal Astronomický ústav Akademie věd České republiky, Ondřejov, 25165

[2] Alvan Clark & Sons, Artists in Optics, Deborah Jean Warner, Smithsonian Institution Press, Washington, 1968

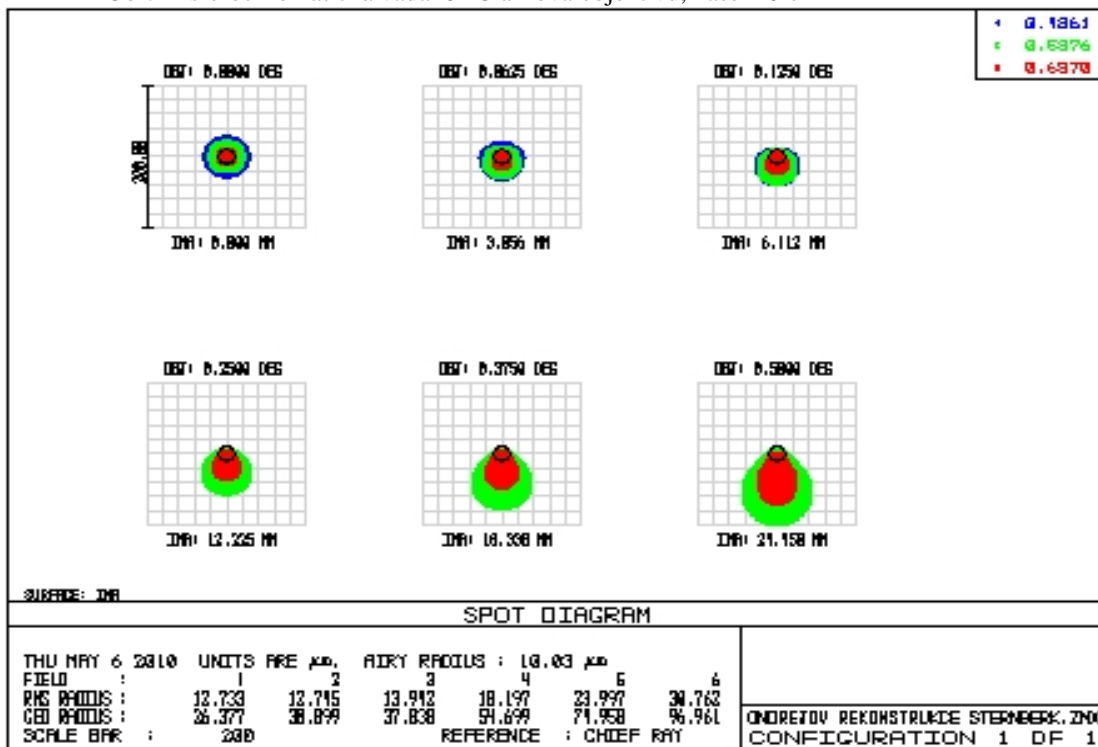
[3] Optical Designs of Some Famous Refractors, John Church, Sky and Telescope, March, 1982



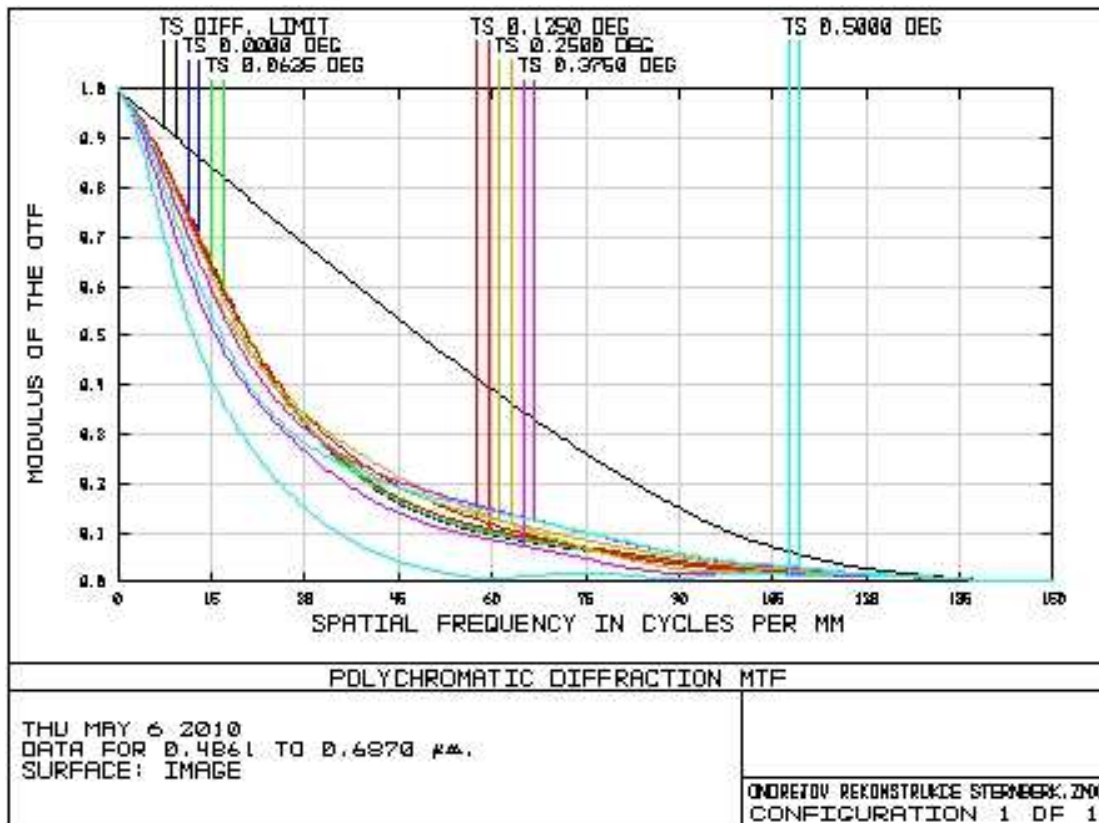
Obr.1 - chromatická křivka 8" Clarkova objektivu, naše měření



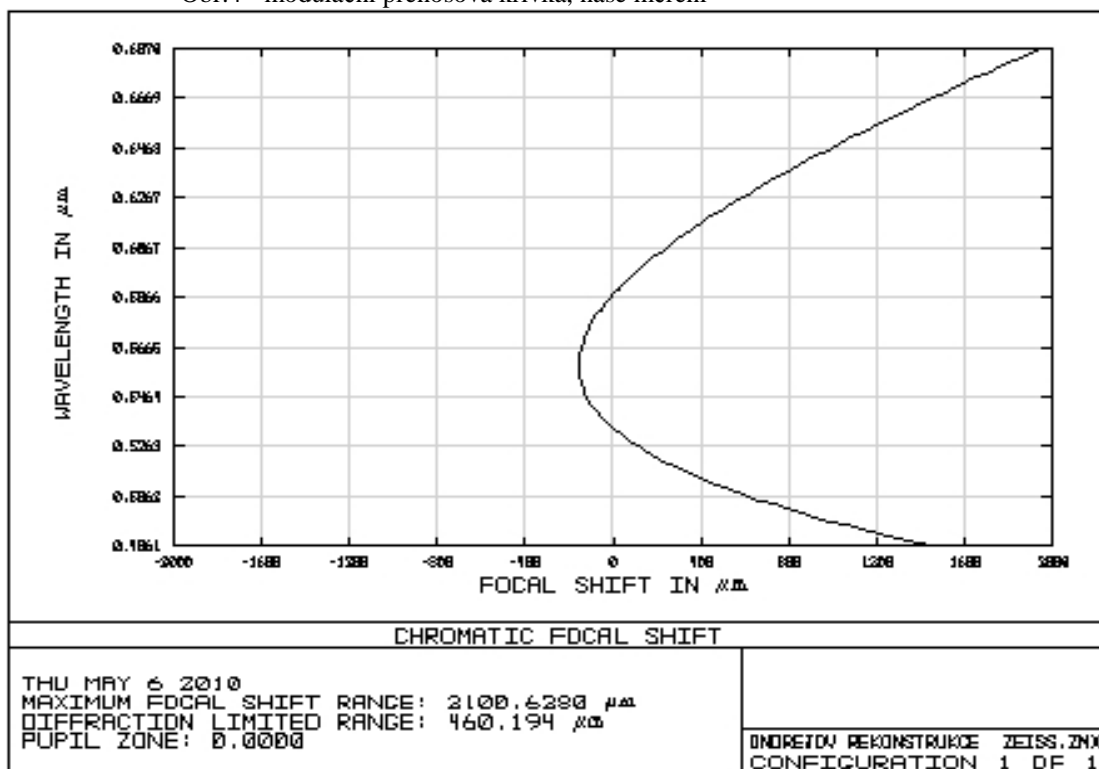
Obr.2 - sférochromatická vada 8" Clarkova objektivu, naše měření



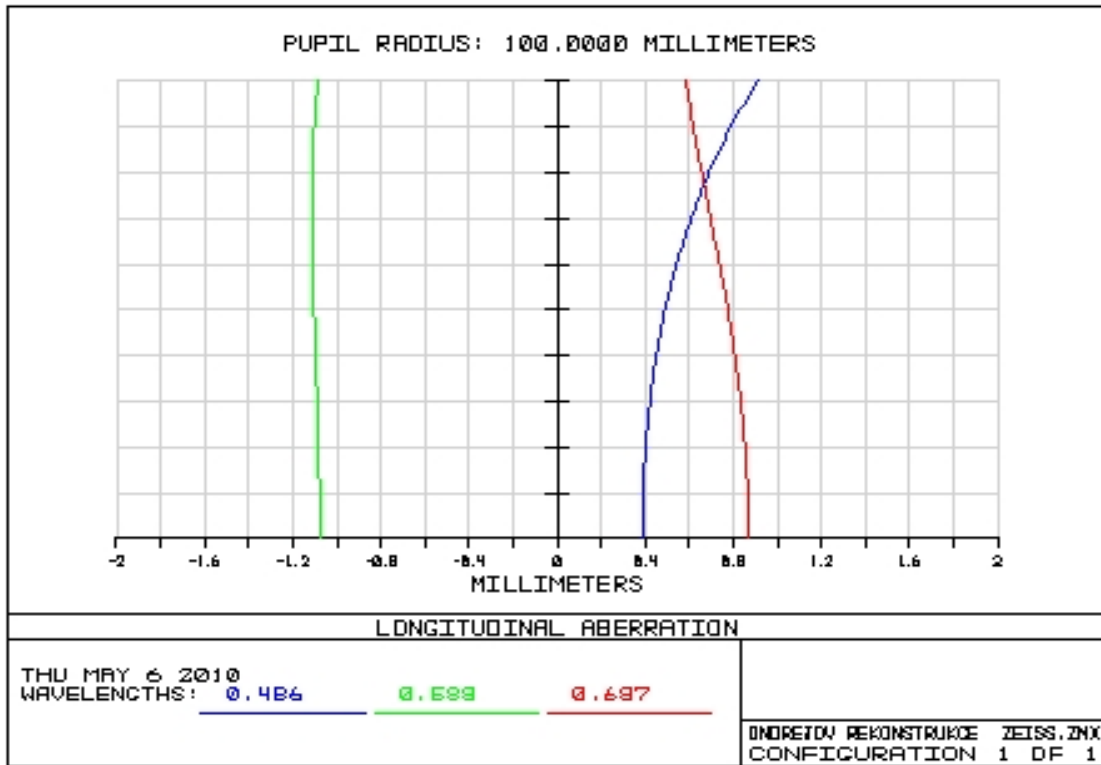
Obr. 3 - spotdiagramy Clarkova dubletu, naše měření



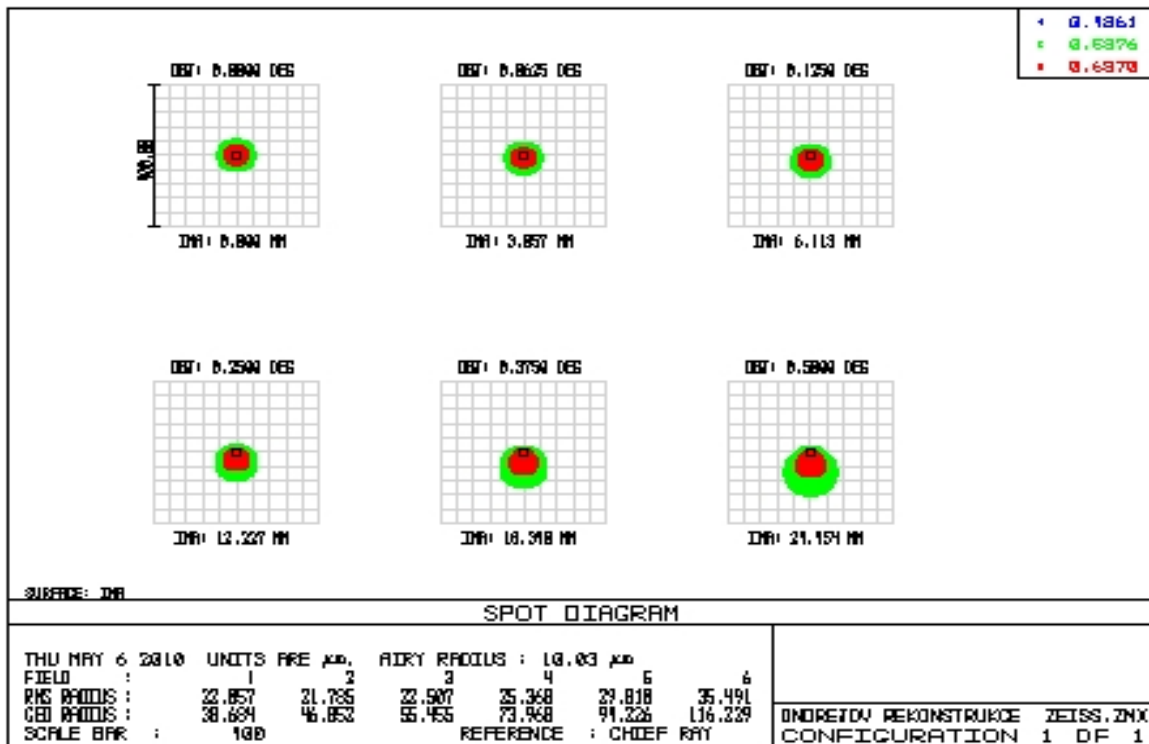
Obr.4 - modulační přenosová křivka, naše měření



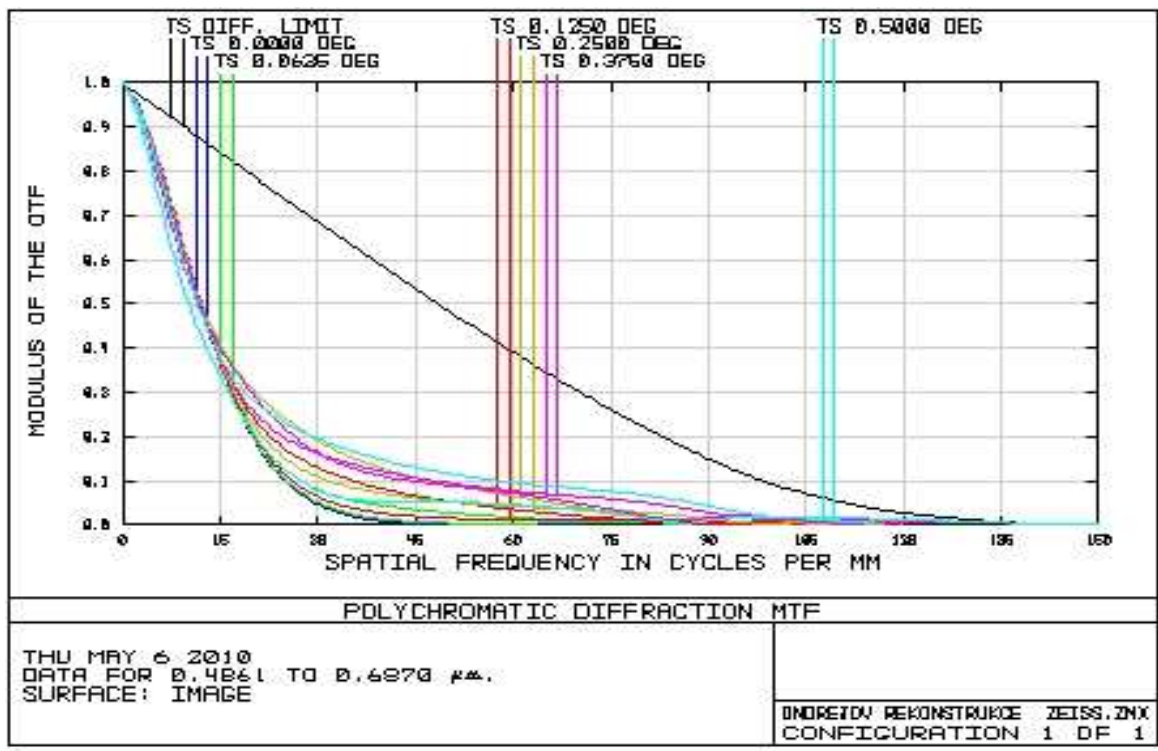
Obr. 5 - chromatická křivka, měření Dr. Pauliho, 1909



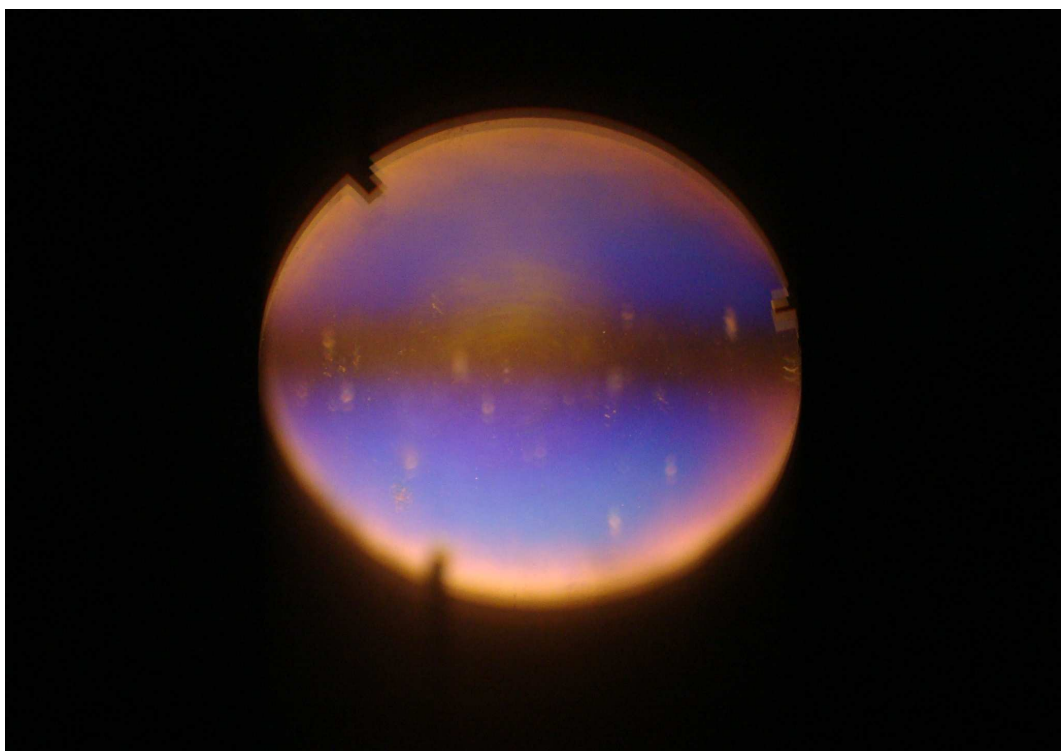
Obr.6 - sférochromatická vada, měření Dr.Pauliho, 1909



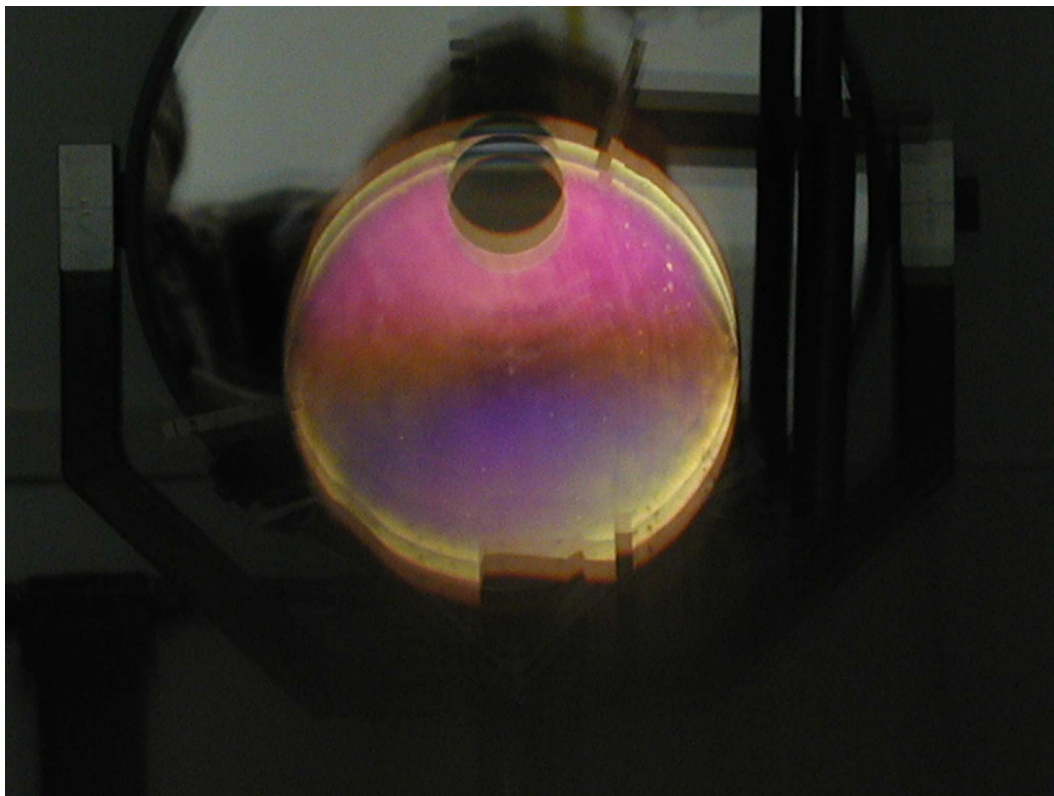
Obr.7 - spotdiagramy, výpočet podle výsledků měření Dr.Pauliho, 1909



Obr. 8 - modulační přenosová křivka, výpočet podle výsledků měření Dr.Pauliho, 1909



Obr.9 - Ronchigram objektivu s B-F korekcí



Obr.10 - Ronchigram objektivu s C-F korekcí

Parametry objektivu:

Spojka

Materiál : korunové sklo
 Optický průměr : $D = 203,2$ mm
 Poloměr křivosti první plochy : $R_1 = 1384,9$ mm
 Poloměr křivosti druhé plochy : $R_2 = -811,1$ mm
 Středová tloušťka spojky : $d_1 = 17,5$ mm

Vzdálenost vrcholů čoček $d_2 = 0,17$ mm

Rozptylka

Materiál : flintové sklo
 Optický průměr : $D = 203,2$ mm
 Poloměr křivosti první plochy : $R_3 = -784,4$ mm
 Poloměr křivosti druhé plochy : $R_4 = -4613,4$ mm
 Středová tloušťka spojky : $d_3 = 8,99$ mm
 Asféricnost čtvrté plochy $\sigma_4 = 60,5$

indexy lomů čoček :

vlnová délka [nm]	spojka	rozptylka	rozptylka – Dr. Pauli
-------------------	--------	-----------	-----------------------

0.435800	1.52222692	1.62791247	1.62823263
0.467800	1.51911441	1.62193443	1.62206494
0.486133	1.51761771	1.61908719	1.61915524
0.546100	1.51375332	1.61183048	1.61180229
0.587562	1.51173781	1.60810654	1.60808067
0.623400	1.51029489	1.60546902	1.60547483
0.656300	1.50915794	1.60340848	1.60345227
0.687000	1.50822714	1.60173359	1.60181898
0.706500	1.50769081	1.60077355	1.60088728