Korektor komy D.M.Maksutova

Zdeněk Rail, Daniel Jareš, David Vápenka
Ústav fyziky plazmatu AV ČR,v.v.i .- Toptec
Sobotecká 1660, 51101 Turnov
e-mail : rail@ipp.cas.cz, daniel.jares@yahoo.com, vapenka@ipp.cas.cz

Abstrakt:

Nejjednodušším korektorem komy paraboloidického zrcadla je jednočočkový meniskový korektor Maksutova. Tento korektor, umístěný do sbíhavého svazku paraboloidu, opravuje komu a zároveň zachovává stigmatičnost systému na optické ose. Je snadno vyrobitelný a zvětšuje zorné pole paraboloidu třikrát.

The Coma Corrector of D.M.Maksutov

The simpliest coma corrector of the paraboloidal mirror is a singlet-meniscus of Maksutov.
This corrector placed into converging beam of a paraboloidal mirror corrects coma and saves stigmatic image of the system on its optical axis.
The corrector can be easily to built and enlarges the field of view about three times.

1. Úvod.

Optický návrh meniskového korektoru komy pochází již z dvacátých let minulého století. Tehdy optici zkoumali nové, snadno vyrobitelné katadioptrické systémy s dobře opravenými optickými vadami. Pomocí výpočtů postupně zjistili, že k tomuto účelu lze použít řadu optických prvků. Tak byly objeveny korekční vlastnosti menisku i izochromatického dubletu, umístěného ve sbíhavém svazku sférického nebo asférického zrcadla. Tyto čočky se pak staly důležitými součástmi složitých korekčních soustav.

Ve dvacátých letech byla popsána soustava sférického zrcadla, v jehož sbíhavém svazku byl před ohniskem umístěn menisek, opravující optické vady. Velice záhy bylo sférické zrcadlo nahrazeno paraboloidickým. Ukázalo se, že jednoduchým meniskem lze opravit komu paraboloidického zrcadla a zvětšit jeho zorné pole. Později byly zkoumány optické vlastnosti soustav s několika korekčními menisky.

Od třicátých letech se optici začali zajímat o korekci vad fotografického zorného pole 200 palcového paraboloidického zrcadla, projektovaného pro teleskop observatoře na Mount Palomaru. Zorné pole o průměru několika centimetrů měl opravit dvojčočkový korektor, navržený F. E. Rossem. Korektor snižoval světelnost primárního zrcadla z 1/3,3 na 1/5,3 a neposkytoval na optické ose stigmatické obrazy hvězd. Proto byl později doplněn tenkým, silně zakřiveným meniskem, kompenzující zbytkovou otvorovou vadu.

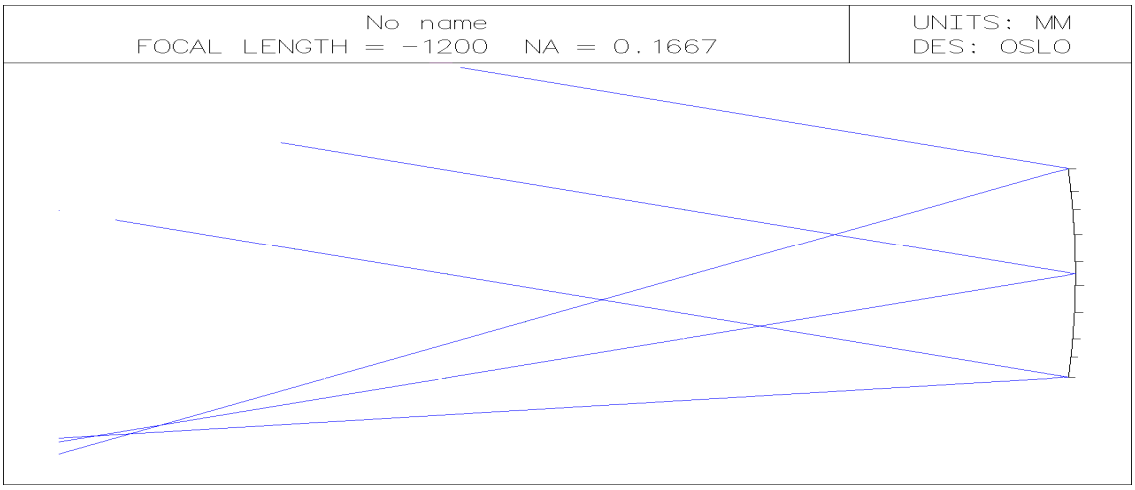
Po druhé světové válce se začalo používat k návrhům složitějších korekčních soustav prvních počítačů. V nich našly uplatnění nejen čočky, ale i asférické desky.
V návrzích se proslavil Wynne, Meinel, Gascoigne a další. Byly počítány a konstruovány i speciální širokoúhlé fotografické přístroje, Schmidtovy a Maksutovovy komory a jejich modifikace.

V našem referátu popisujeme nejjednodušší meniskový korektor, schopný 2.5 krát zvětšit zorné pole paraboloidu a zachovat stigmatičnost systému na optické ose. Průměr korektoru je roven přibližně 35 - 40 % průměru vstupní apertury. Je umístěn do sbíhavého svazku paraboloidického zrcadla před newtonovské sekundární zrcadlo. Jeho vstupní plocha je konkávní, výstupní plocha je konvexní. Korektor může být navržen tak, že obě jeho plochy mají stejné poloměry křivostí a jsou velmi snadno kontrolovatelné pomocí páru kalibračních skel. Jeho nevýhodou je to, že menisek musí být velmi přesně zjustován ve sbíhavém svazku primárního zrcadla.

2. Koma

Koma je dominantní mimoosovou vadou konkávních zrcadel. Dopadá-li paralelní svazek paprsků šikmo na konkávního zrcadlo, paprsky z jednotlivých zón zrcadla se odrážejí pod různými úhly a protínají se v rozdílných sečných vzdálenostech od vrcholu zrcadla.

Umístíme-li do ohniskové plochy středových paprsků stínítko, objeví se na něm charakteristický obraz, připomínající kometu.



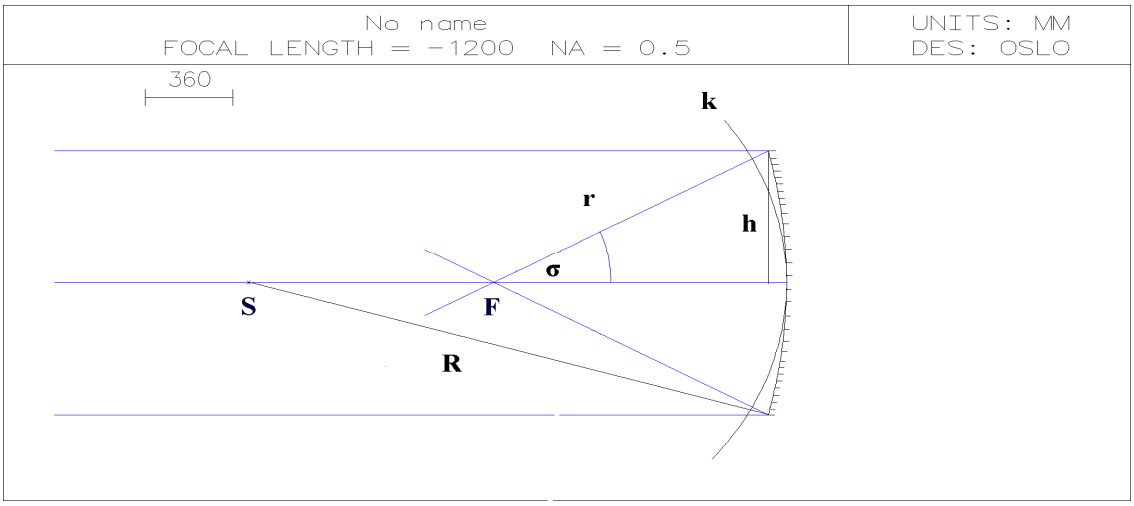
Obrázek 1.

Obrázek 1 je znázorňuje chod paprsků skloněného paralelního svazku po odrazu od paraboloidického zrcadla. Světelná zrcadla, používaná zvláště pro astronomickou fotografii, mají díky komě značně omezená zorná pole. U astrometrických přístrojů její nepravidelný obraz znemožňuje přesné nastavení vláknového mikrometru na obraz hvězdy.

Ve druhé polovině 19. století německý optik Ernst Abbe stanovil podmínku pro aplanatickou soustavu, v níž je opravena sférická vada a koma. Pro všechny paprsky, paralelní s optickou osou, musí platit podmínka:

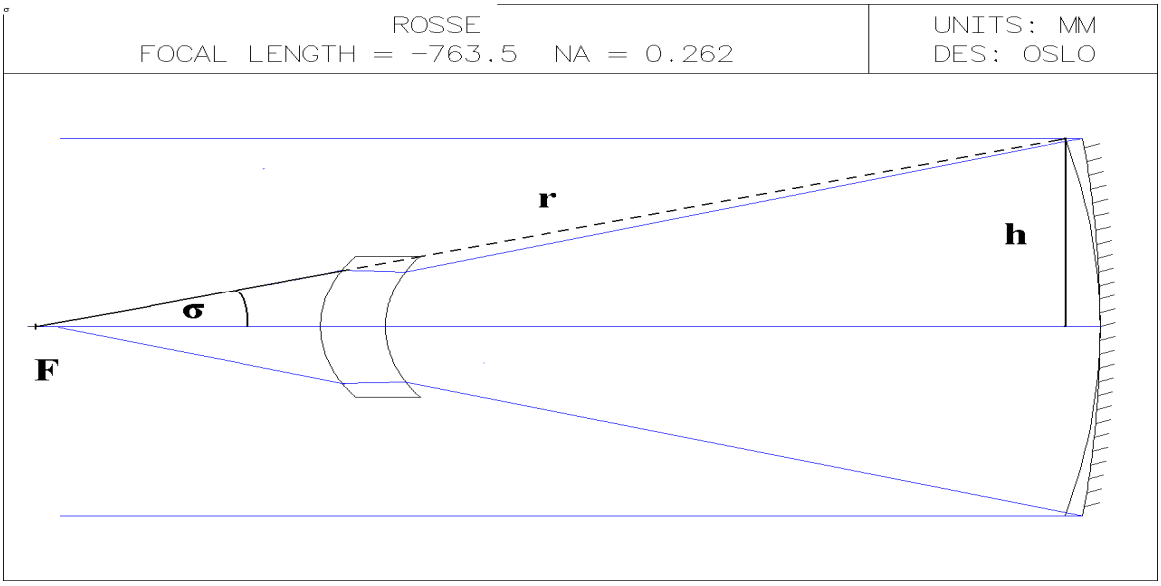
$$r = h / \sin(\sigma) = \text{konstanta}$$

kde σ je úhel, který svírá s optickou osou paprsek, přicházející do ohniska F ze zóny výšky h vstupní apertury. Tato podmínka znamená, že paprsky po průchodu aplanatickou soustavou musí vycházet z optické soustavy do ohniska z pomyslné sférické plochy **k** se středem v ohnisku **F** soustavy.



Obrázek 2.

Z obrázku 2 vyplývá, že v případě konkávního paraboloidického zrcadla o poloměru křivosti **R** vycházejí odražené paprsky ze zrcadlové plochy, která není koncentrická s ohniskem F, ale se středem křivosti S.



Obrázek 3.

Obrázek 3 ukazuje, způsob, jak opravit komu paraboloidického zrcadla. Do sbíhavého svazku paprsků, odražených z primárního zrcadla, umístíme před ohnisko meniskový korektor. Tato tlustá čočka upravuje chod paprsků tak, aby byla splněna rovnice Abbeho sinové podmínky.

3. Metoda výpočtu.

První výpočty byly prováděny pro soustavu paraboloidického zrcadla a korekčního menisku. Nejdříve jsme se pokoušeli určit poloměry křivostí ploch menisku řešením Seydelových sum pro sférickou aberaci a komu. Zavedením parametru, tloušťky menisku se tvary Seydelových sum značně zkomplikovaly. Poloměry křivostí bylo nutné nalézt užitím numerických metod. Trigonometrické výpočty prokázaly, že toto řešení má velké zbytkové vady a v praxi není použitelné. Ukázalo se také, že zvolená tloušťka menisku, rovná 1/100 ohniskové vzdálenosti primárního zrcadla, je příliš malá.

Další výpočty byly prováděny takto : Počáteční řešení soustavy bylo navrženo tak, aby 1. paraxiální paprsek procházel meniskem paralelně s optickou osou. Tím bylo možné spočítat poloměr křivosti vstupní, konkávní plochy menisku. Pak byl spočítán poloměr křivosti konvexní, výstupní plochy menisku tak, aby vycházející paprsek z menisku svíral s optickou osou stejný úhel jako vstupující. Tak byla zajištěna afokálnost menisku.

Spočtené parametry byly dosazeny do Seydelových sum pro sférickou aberaci, komu a chromatickou vadu polohy. Takto navržený menisek je afokální, achromatický a hodnota Seydelovy sumy pro sférickou aberaci je rovna nule. Hodnota Seydelovy sumy pro komu zůstávala stejná jako u samotného paraboloidu, rovna 1/2. Seydelova suma pro chromatickou vadu polohy byla anulována.

Poté byl zkracován poloměr křivosti vstupní - konkávní plochy. Následkem toho se začal 1. paraxiální paprsek odklánět od optické osy. Aby menisek byl afokální, bylo nutné změnit i poloměr křivosti výstupní konvexní plochy. Po dosazení parametrů do Seydelovy sumy pro komu se začala její hodnota zmenšovat.

Výsledky byly kontrolovány trigonometrickým výpočtem paprsků v tangenciální rovině.
Postupnou změnou odklonu 1. paraxiálního paprsku v menisku bylo nalezeno takové řešení poloměrů křivostí, které zcela opravovalo tangenciální komu a zároveň na optické ose
zachovávaly stigmatické obrazy. Obrazová plocha byla silně zakřivená, konkávní k zrcadlu.

Optimální menisek vyšel s mírně negativní optickou mohutností, soustavě mírně prodlužoval ohniskovou vzdálenost a u soustavy s paraboloidem o rozměrech 300/1500 se jeho poloměry křivostí lišily od sebe jen cca 0,5 mm. Bylo možné navrhnout menisek jako jednorádiusový, aniž by došlo k výraznému zhoršení osových i mimoosových obrazů.
Astigmatismus soustavy se zvětšil cca trojnásobně a stal se dominantní mimoosovou vadou, omezující zorné pole systému.

4. Parametry několika soustav

V referátu uvádíme parametry několika optimalizovaných soustav s paraboloidickým zrcadlem o průměru 300 mm a ohniskovou vzdáleností 1500 mm.
Dále jsme v literatuře objevili i několik dalších řešení, které jsme přepočítali pro paraboloid s uvedenými rozměry.

Tabulka 1. Optické parametry soustavy sférického zrcadla a korekčního menisku, umístěného poblíž ohniska zrcadla.

Surface	Type	Radius [mm]	Thickness [mm]	Glass	Diameter [mm]	Conic	Comment
OBJ	standard	inf	inf		0	0	
1	standard	-3000	-1000	mirror	300	0	
2	standard	205.28	-45	BK7	130	0	
3	standard	213.64	-523.83		130	0	
IMA	standard	378.28			0		

Tabulka 2. Optické parametry soustavy paraboloidického zrcadla a menisku Maksutova, vypočtené ze Seydelových sum.

Surface	Type	Radius [mm]	Thickness [mm]	Glass	Diameter [mm]	Conic	Comment
OBJ	standard	inf	inf		0	0	
STO	standard	-3000	-1203	mirror	300	-1	
2	standard	154,98	-25	BK7	100	0	
3	standard	155,55	-298,13		100	0	
IMA	standard	300			0		

Tabulka 3. Soustava paraboloidického zrcadla a menisku Maksutova, optimalizovaná v programu Zemax.

Surface	Type	Radius [mm]	Thickness [mm]	Glass	Diameter [mm]	Conic	Comment
OBJ	standard	inf	inf		0	0	
STO	standard	-3000	-1200	mirror	300	-1	
2	standard	162	-25	BK7	100	0	
3	standard	162	-300,01		100	0	
IMA	standard	250			0		

Tabulka 4. Soustava paraboloidického zrcadla o průměru 300 mm a ohniskové vzdálenosti 1500 mm a menisku Maksutova s přepočítanými parametry Dragana Mikesice z [7].

Surface	Type	Radius [mm]	Thickness [mm]	Glass	Diameter [mm]	Conic	Comment
OBJ	standard	inf	inf		0	0	
STO	standard	-3000	-1000	mirror	300	-1	
2	standard	275	-46	BK7	130	0	
3	standard	275	-500,03		130	0	
IMA	standard	350			0		

Tabulka 5. Soustava paraboloidického zrcadla o průměru 300 mm a ohniskové vzdálenosti 1500 mm a menisku Maksutova s přepočítanými parametry podle D.L.Harmera, C.G.Wynna z [8].

Surface	Type	Radius [mm]	Thickness [mm]	Glass	Diameter [mm]	Conic	Comment
OBJ	standard	inf	inf		0	0	
1	standard	-3000	-1422,08	mirror	300	-1	
2	standard	50,74	-8,37	BK7	28	0	
3	standard	50,03	-76,83		25	0	
IMA	standard	100			0		

5. Závěr

Meniskový korektor Maksutova je nejjednodušší optický prvek, umožňující opravit komu paraboloidického zrcadla a zachovat na optické ose stigmatický obraz. Je snadno vyrobitelný a lze jej dobře kontrolovat pomocí interferenčních kalibrů. Je vhodný pro použití u paraboloidů do průměru 300-400 mm a světelností 1/4 - 1/6. Optimální tloušťku menisku je potřeba volit okolo 2-3 % ohniskové vzdálenosti primárního zrcadla.

Korektor do soustavy nevnáší podstatnou barevnou vadu. Není-li zrcadlo přesně paraboloidické, lze vzdáleností vrcholu zrcadla od korektoru zbytkovou otvorovou vadu soustavy vykompenzovat. V tomto případě koma nebude plně opravena.

Nejvýhodnější pozice korektoru je přibližně ve 30 až 35% ohniskové vzdálenosti před ohniskem.

Soustava zrcadla a korektoru Maksutova má ohniskovou plochu zakřivenou, konkávně k zrcadlu. Z tohoto důvodu je nutné pro fotografování použít Piazzi čočku pro srovnání Petzvalovy křivosti pole.

Dominantní mimoosovou optickou vadou je astigmatismus, přibližně třikrát větší než u ekvivalentního paraboloidického zrcadla.

U předložených soustav o průměrech 300 mm a ohniskových vzdálenostech 1500 mm vycházejí zorná pole o průměru cca 0,5˚, ve kterých jsou geometrické obrazy hvězd srovnatelné s difrakčními.

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

[2] R.N.Wilson, Reflecting Telescope Optics, Springer-Verlag Berlin-Heidelberg-New York,Second Printing, 2000

[3] Rutten,van Venrooij, Telescope Optics, Willmann-Bell, Inc.,Richmond,Virginia,2002

[4] N.N.Michelson, Optičeskije teleskopy, Izdatelstvo "Nauka", Glavnaja redakcija fiziko-matematičeskoj literatury, Moskva, 1976

[5] Lens Systems for Correcting Coma of Mirrors, Frank E. Ross, Astrophysical Journal, 1935, http://articles.adsabs.harvard.edu/cgi-bin/nph-iarticle_query?1935ApJ....81..156R&data_type=PDF_HIGH&whole_paper=YES&type=PRINTER&filetype=.pdf

[6] Apenko M.I., Dubovik A., S., Prikladnaja optika, Nauka, Moskva, 1982

[7] A Simple Coma Corrector for Newtonians, Dragan Mikesic, Sky and Telescope, Vol. 66, July,1983, str.67-69

[8] A Single-Lens Small-Field Paraboloid Field Corrector, D.L.Harmer, C.G.Wynne, The Royal Greenwiche Observatory, The Observatory, Vol. 96,239-241 (1976) http://adsabs.harvard.edu/full/1976Obs....96..239H

[9] Optical Design Program Zemax, User's Guide, Version 10, Focus Software, Inc., Tuscon 2005

[10] OSLO LT Rev. 6.1 Sinclair Optics, Verze 6.1, http://www.sinopt.com/

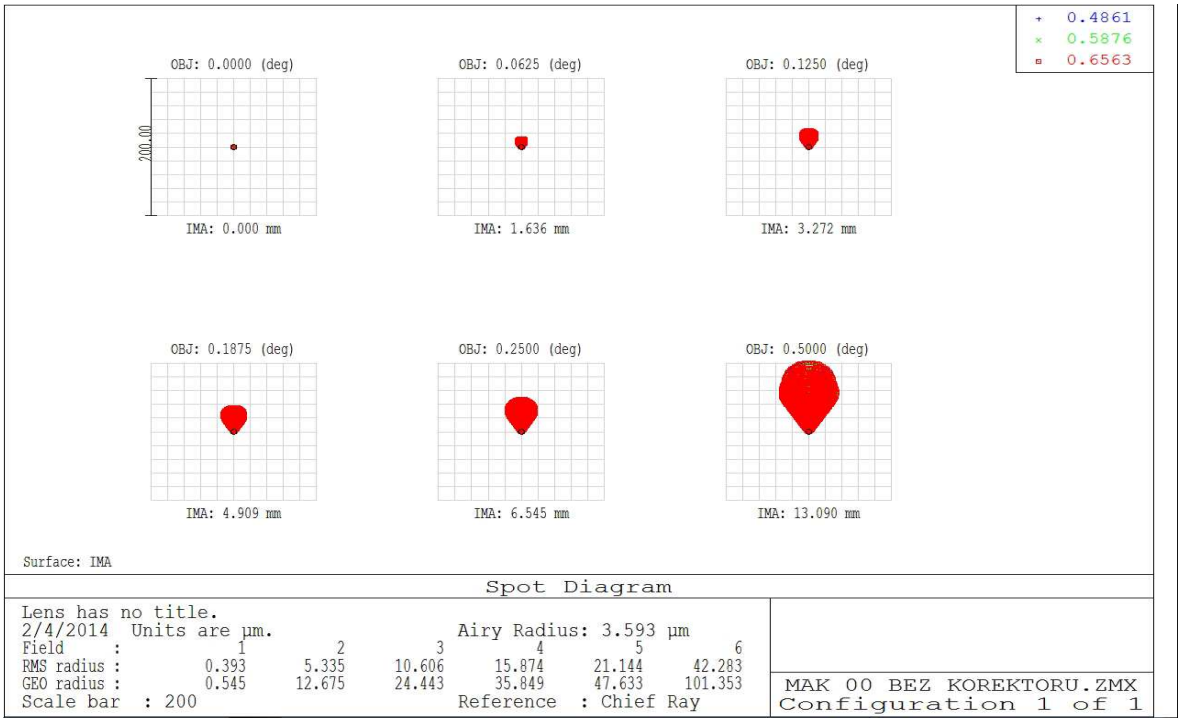
7. Autoři

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

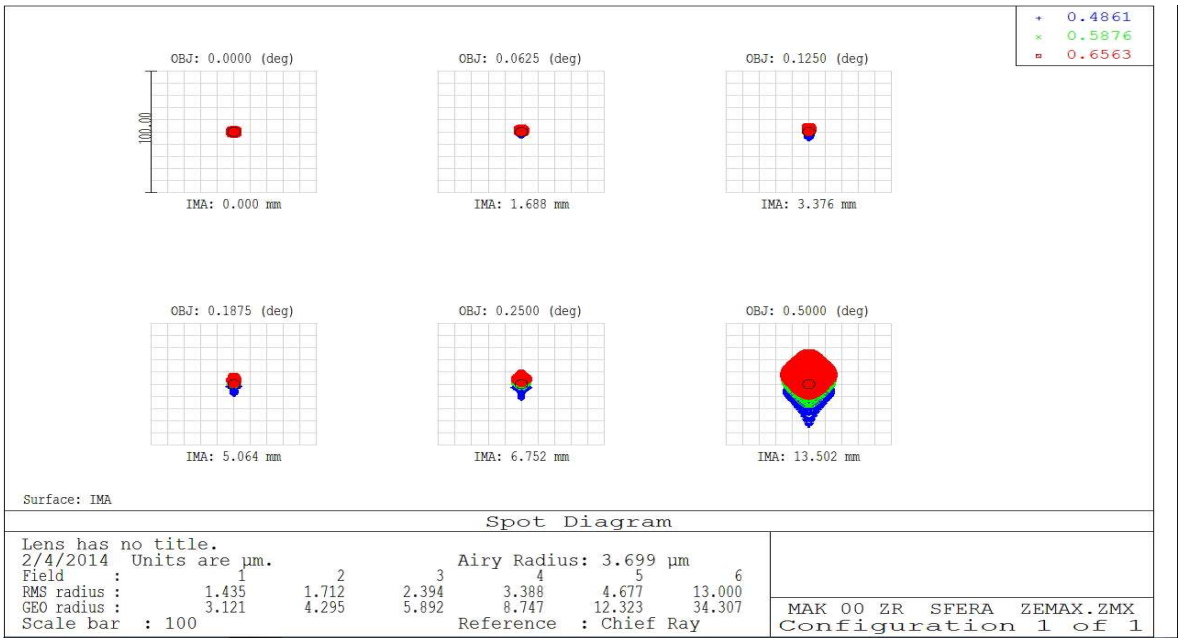
Ing. Daniel Jareš, Ústav fyziky plazmatu AV ČR, v.v.i., Regionální centrum speciální optiky a optoelektronických systémů TOPTEC, Sobotecká 1660, 511 01 Turnov, tel.: 420 487 953 904, e-mail: jares@ipp.cas.cz

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

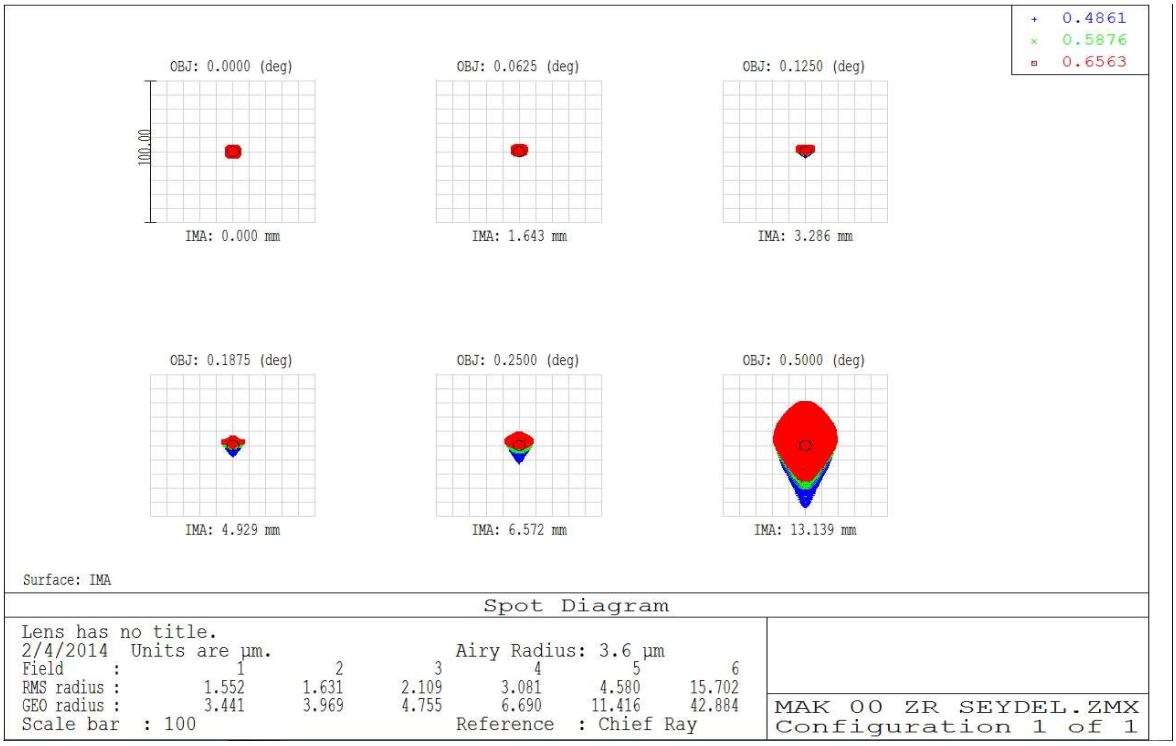
8. Obrázky



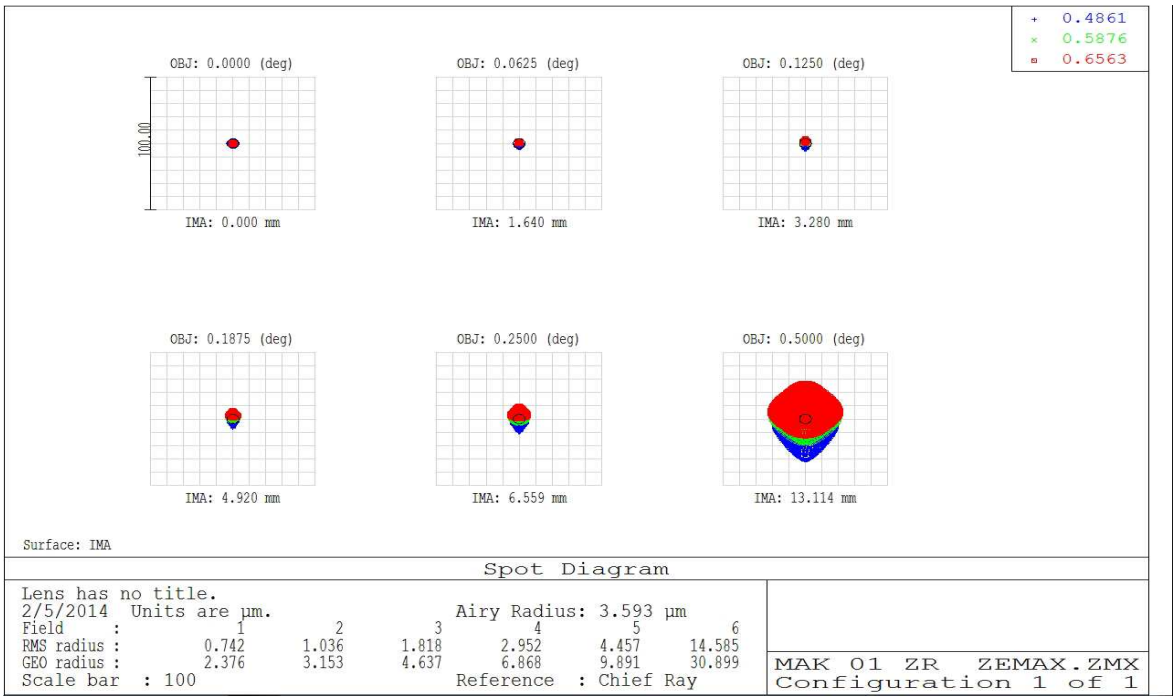
Obrázek 4. Spotdiagramy paraboloidického zrcadla o průměru 300 mm a ohniskové vzdálenosti 1500 mm.



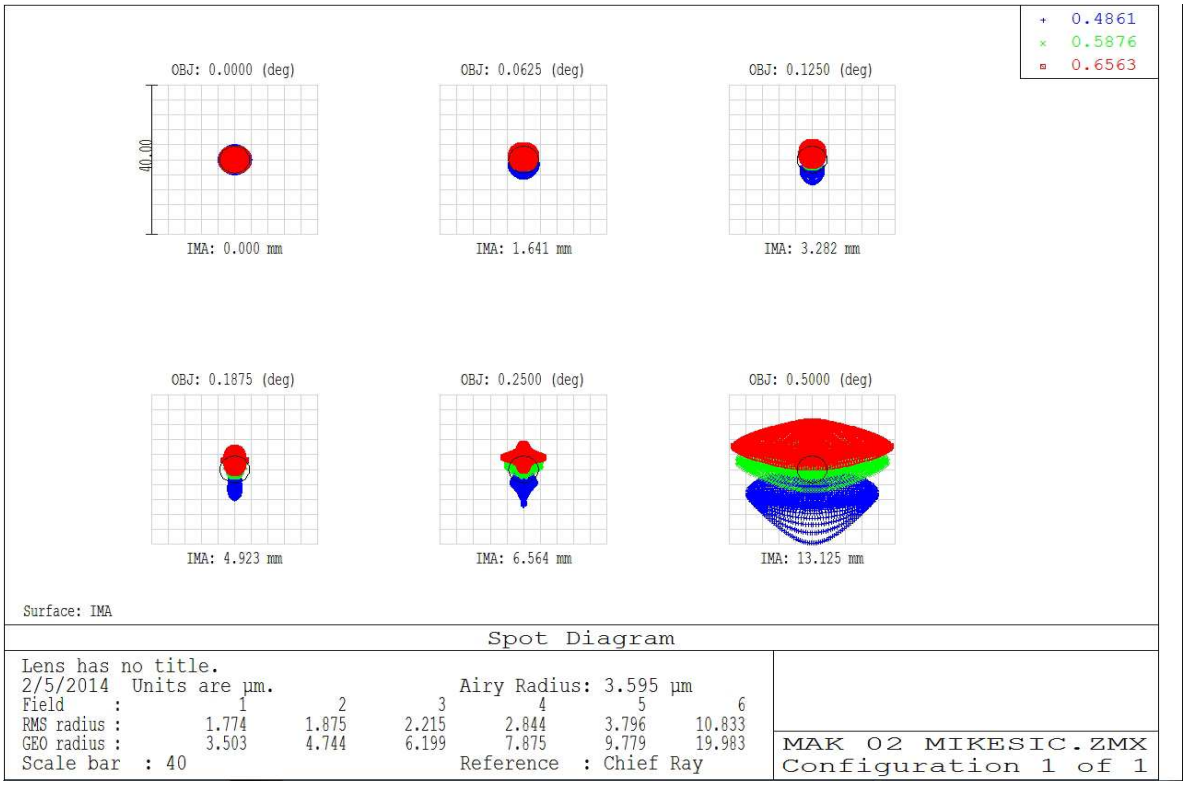
Obrázek 5. Spotdiagramy sférického zrcadla s korektorem komy s parametry z tabulky 1.



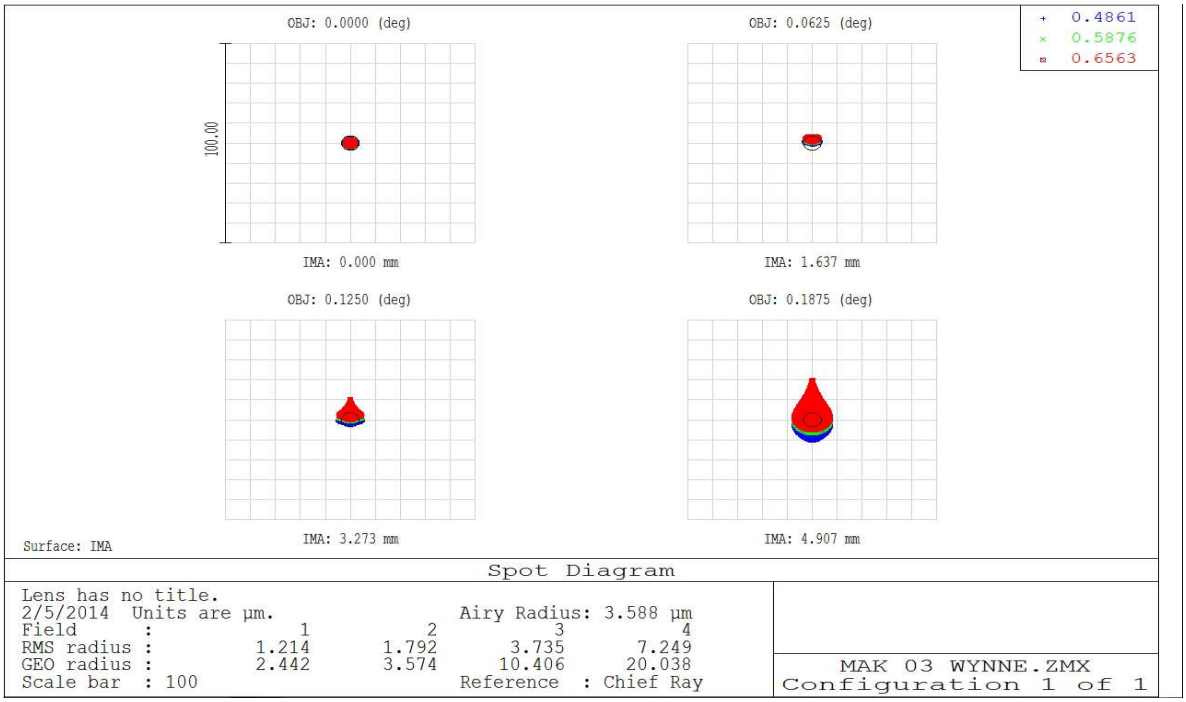
Obrázek 6. Spotdiagramy paraboloidického zrcadla s korektorem komy s parametry z tabulky 2.



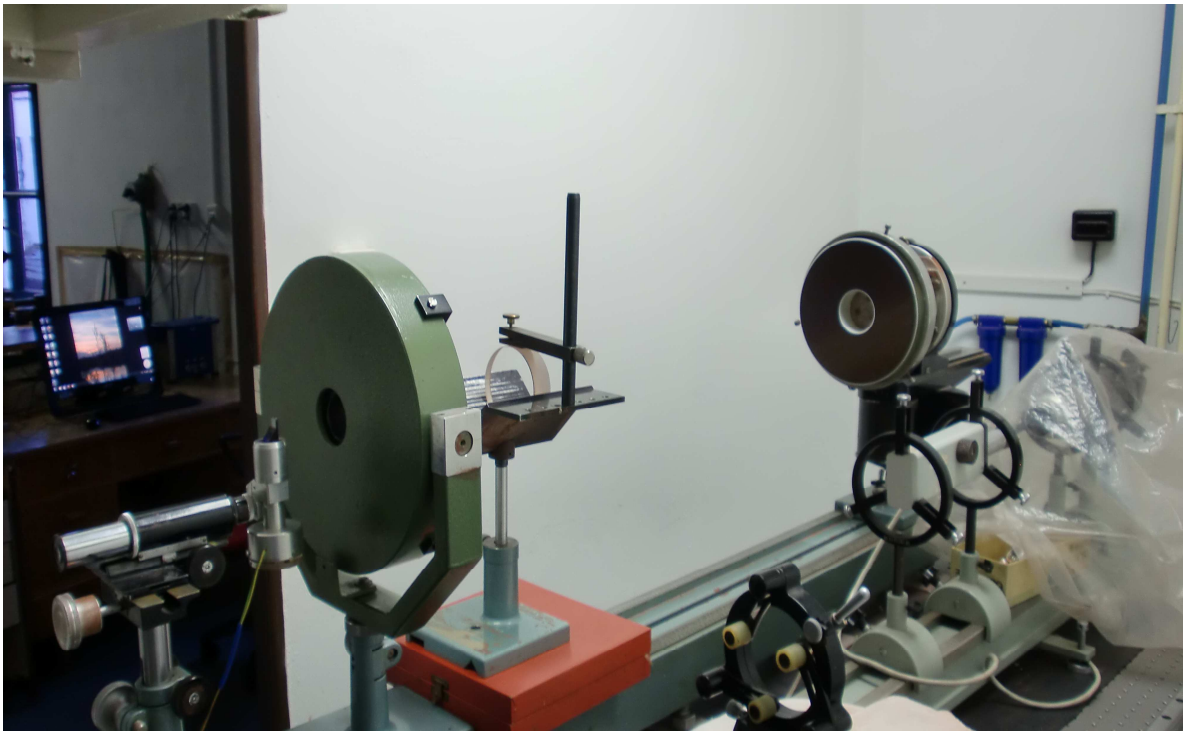
Obrázek 7. Spotdiagramy paraboloidického zrcadla s korektorem komy s parametry z tabulky 3.



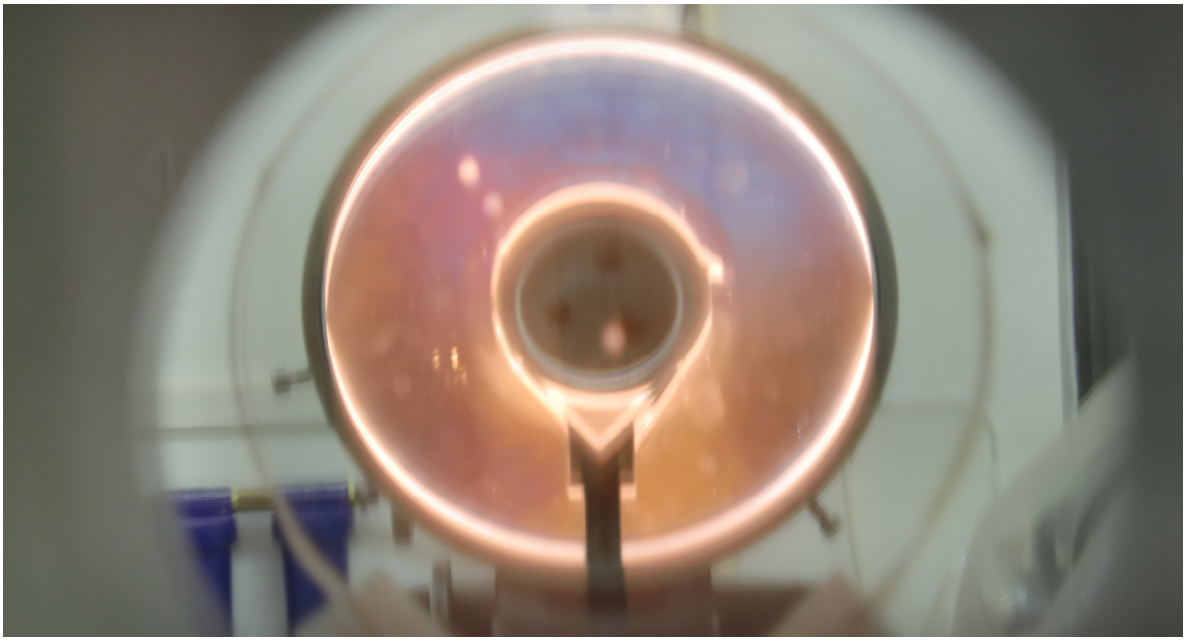
Obrázek 8. Spotdiagramy paraboloidického zrcadla s korektorem komy s parametry z tabulky 4.



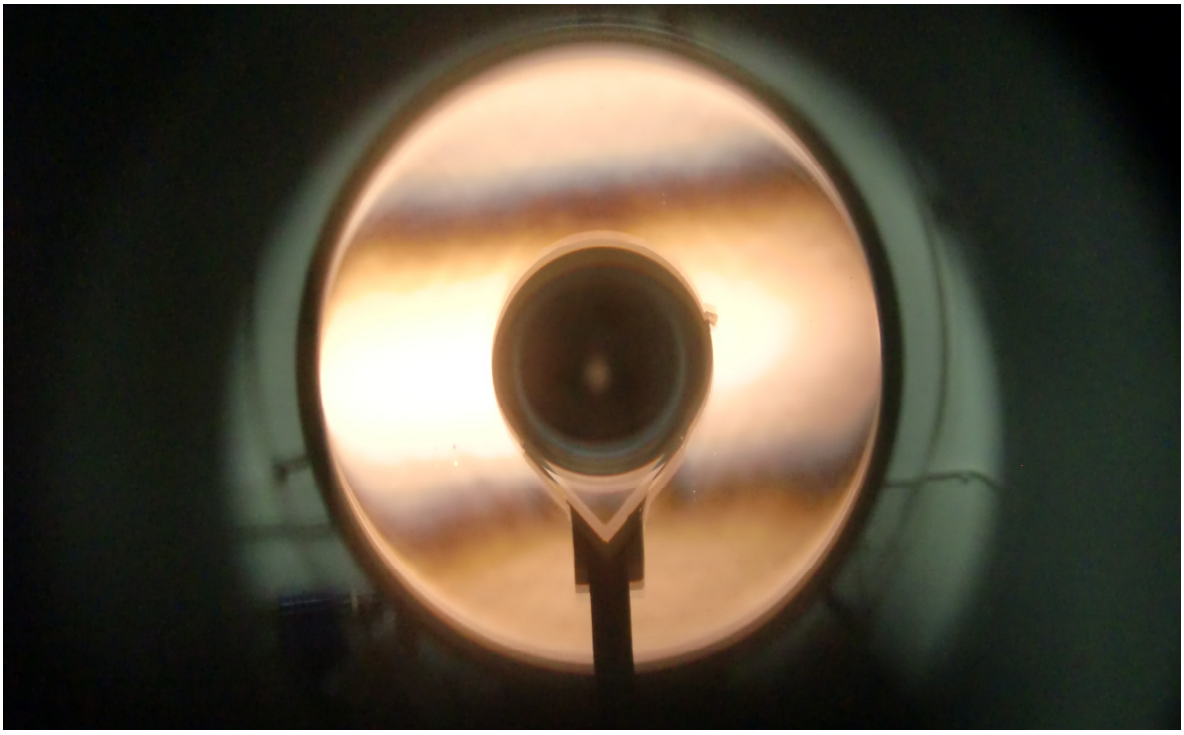
Obrázek 9. Spotdiagramy paraboloidického zrcadla s korektorem komy s parametry z tabulky 5.



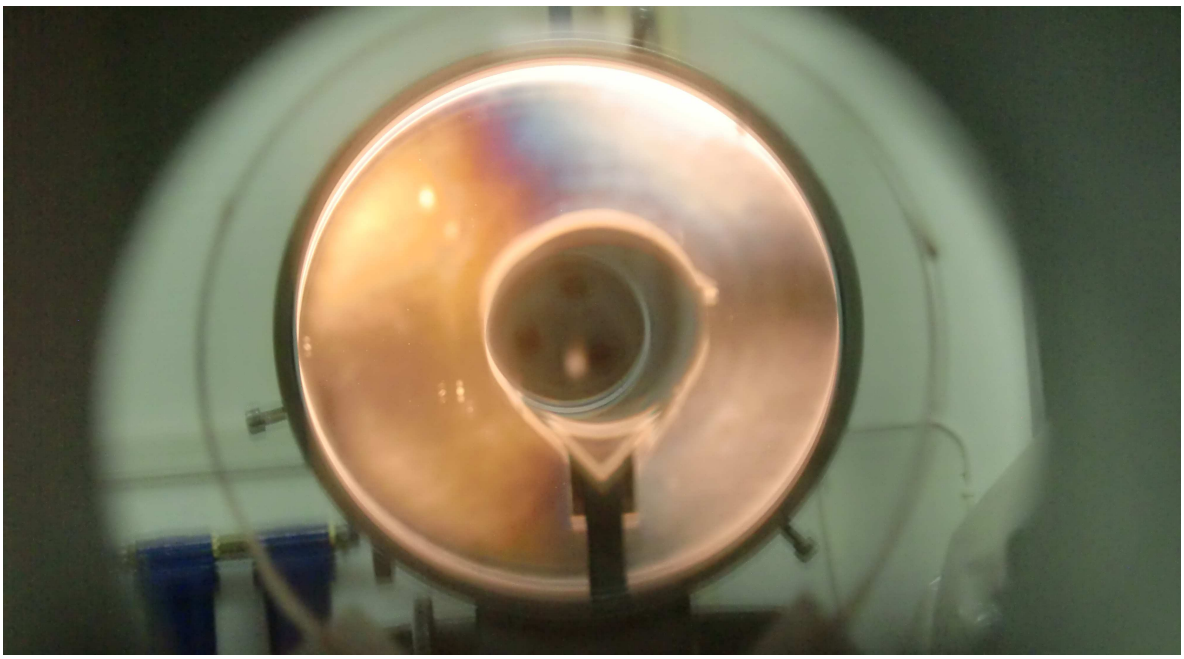
Obrázek 10. Soustava paraboloidického zrcadla 210/1000 a korektoru Maksutova při měření na optické lavici.



Obrázek 11. Ronchigram-sférochromatická vada soustavy paraboloidického zrcadla 210/1000 a korektoru Maksutova na optické ose.



Obrázek 12. Ronchigram soustavy paraboloidického zrcadla 210/1000 a korektoru Maksutova na optické ose.



Obrázek 13. Ronchigram soustavy paraboloidického zrcadla a korektoru Maksutova pro šikmý svazek 10 mm od optické ose.