Maksutovovy soustavy z Turnova

Zdeněk Rail, Zbyněk Melich, Daniel Jareš, Pavel Pintr, David Vápenka
Ústav fyziky plazmatu AV ČR,v.v.i .- Toptec
Sobotecká 1660, 51101 Turnov

Abstrakt: Tento referát popisuje vývoj a výrobu optických soustav, u kterých byl použit meniskový korektor Maksutova jako vstupní člen. Řada těchto vysoce kvalitních systémů byla v Turnově vyráběna od sedmdesátých let na několika pracovištích.
V naší práci presentujeme zkušenosti s optickým designem, výrobou a konstrukcí meniskových dalekohledů a komor.

1.Úvod

Historie Maksutovovy soustavy se vstupním korekčním meniskem sahá do druhé poloviny třicátých let minulého století, kdy D.M. Maksutov dostal za úkol zkonstruovat levný a snadno vyrobitelný školní dalekohled. Postupným vývojem dospěl k dvojzrcadlovému systému se vstupním korekčním meniskem. První takovou soustavu o průměru 100 mm a ohniskové vzdálenosti 850 mm vyrobil v Joškar Ole v říjnu 1941. Jednalo se o systém se dvěma zrcadly, jehož vstupní menisek byl svou vypouklou plochou otočen k objektu.
Na jeho zadní konkávní ploše bylo chemicky naneseno stříbrné sekundární zrcátko, které odráželo světlo do ohniskové plochy za primárním zrcadlem. Optický návrh své soustavy popsal D.M. Maksutov v článku „New Catadioptric Meniscus Systems“ v roce 1944. [1]
Brzy po skončení 2. světové války se nezávisle objevily i práce dalších optiků, A.Bouverse, K. Penninga a D. Gabora, popisující podobné meniskové systémy. Podrobnou analýzou jejich optických návrhů a vad se zabývala řada publikací, vydávaných od konce 40. let v bývalém SSSR. Maksutov byl autorem mnoha meniskových vizuálních i fotografických přístrojů, jak jednozrcadlových, tak i dvojzrcadlových. Většina z nich byla určena pro observatoře v tehdejším SSSR. Největší fotografická komora měla průměr 700 mm a ohniskovou vzdálenost okolo 2100 mm. Kompaktnost, malá chromatická vada a dobře opravené mimoosové vady umožnily využití těchto přístrojů i v astrometrii.
V 50. a 60. letech byla v odborných časopisech publikována řada optických návrhů s menisky, které později vyráběli i amatéři. Zprávy o nich se objevovaly v článcích zahraničních amatérských časopisů, které byly u nás dostupné na hvězdárnách.
V roce 1957 se v časopise Sky and Telescope objevil optický návrh J.F. Gregoryho, označovaný jako Spot-Maksutov (Spot-Maksutov Cassegrain). Byl to dvojzrcadlový meniskový systém, který má na konvexní výstupní ploše korektoru napařenou kruhovou odraznou plochu jako sekundární zrcadlo. [2], [3], Tab. 1 a 2, Obr. 1 - 4.
V USA byly komerčně tyto dalekohledy vyráběny firmou Questar. Přístroj se stal velice oblíbeným jak u amatérských, tak i profesionálních astronomů. Vyráběl se o průměrech 90 mm, 130 mm a 180 mm a světelnostech okolo 1/12. V roce 1958 byly na světové výstavě v Bruselu předvedeny podobné, ale fotografické systémy MTO 110 z SSSR.
V 60. letech se objevila i řešení Maksutovova-Cassegrainu od R.D. Sieglera a M. Simmondse. [5], [6], Tab. 3 a 4, Obr. 5 - 8.
Jsou to soustavy s obecnými vzdálenostmi sekundárního zrcadla a menisku od vrcholu primárního zrcadla. Vzdálenosti jako parametry lze využít k lepší korekci mimoosových obrazů. Zobrazení tímto přístrojem je blízké anastigmatickému koncentrickému Schmidt-Cassegrainu.
Na trhu se dnes objevují meniskové teleskopy hlavně jako Spot-Maksutovy, nejčastěji o průměrech 70 mm, 90 mm, 100mm, 127mm, 180 mm a 200 mm. Vzácněji lze získat Rutten-Maksutov, dvojzrcadlový systém s obecnou hodnotou poloměru křivosti sekundárního zrcadla, upevněného na menisku. [7]
Nedávno byl prodáván i vizuální a fotografický dalekohled o průměru 190 mm a ohniskové vzdálenosti 1000 mm s newtonovským sekundárem, připevněným na menisku. Soustava je neaplanatická. Firma Astrophysics vyrábí aplanatickou verzi Spot-Maksutova o průměru 250 mm a ohniskové vzdálenosti 3700 mm s asférickým primárním zrcadlem.
Sieglerův obecný systém Maksutov-Cassegrainu dnes sériově nevyrábí žádná firma.
Ve sluneční astronomii i v optických laboratořích se mohou dobře uplatnit i mimoosové systémy Maksutovových soustav bez centrálního stínění.

Korekční schopnosti Maksutovových soustav vedly i k vývoji speciálních širokoúhlých a světelných soustav s několika menisky. V nedávné minulosti se optické návrhy těchto přístrojů o průměru 300 mm a světelnosti 1/1.5 objevily i v praci V. Terebishe z Ruské Federace. [8]
Tyto soustavy se třemi korekčními menisky jsou schopny zobrazovat hvězdy o průměrech několika mikron na sedmistupňových zorných polích. Průměr sekundárního zrcadla u komory může dosahovat až 60 % průměru primárního zrcadla.

2.Maksutovovy dalekohledy v České republice

První informace o meniskových dalekohledech se do Československa dostaly až po skončení druhé světové války. Na jejich uvedení mají u nás největší podíl bratři Vilém a Josef Erhartovi z Loučovic v jižních Čechách. V Československu byli prvními optiky, kteří se na podzim roku 1948 rozhodli vyrobit Maksutovovu komoru o průměru menisku 160 mm. Její světelnost byla 1/2.4 a primární zrcadlo mělo průměr 200 mm. Zpočátku s výrobou komory měli problémy, které překonali přesnějším dodržením poloměrů křivostí menisku. Komora byla zkoušena amatérským fotografem J.Zemanem z Hradce Králové, který s ní získal řadu pěkných fotografií oblohy. [4] Bratři Erhartové vyrobily řadu světelných meniskových přístrojů až do průměru cca 360 mm a pokoušeli se o konstrukci mnohem větších. V 80. a 90. letech na jejich práci navázal další optik, pan Milan Vavřík z Tábora. Zkonstruoval několik meniskových přístrojů do průměru cca 350 mm a ohniskové vzdálenosti 1400 mm.
U svých dalekohledů použil tenké menisky cca 10 -12 mm, které do příslušného tvaru ohnul ve sklářské peci. Výroba těchto tenkých čoček je velmi náročná na dodržení poloměrů křivostí. Řadu přístrojů, hlavně meniskových Cassegrainů, vyrobili amatérští astronomové, kteří měli možnost využít zázemí optických továren, např. Meopty Přerov, Dioptry Turnov nebo byli schopni optické prvky vybrousit doma. Fotografické i vizuální soustavy vyráběl pan J. Drbohlav ve Rtyni a amatérští brusiči na Moravě. V 70. letech byl do západní kopule Štefánikovy hvězdárny na Petříně zakoupen dalekohled Maksutov-Cassegrain o průměru 350 mm a ohniskové vzdálenosti cca 3500 mm. Byl vyroben v závodech Carl Zeiss v Jeně a je využíván návštěvníky hvězdárny pro vizuální pozorování oblohy. Svou velikostí je pravděpodobně největším vizuálním dalekohledem s korektorem Maksutova u nás. Jeho zrcadla byla několikrát napařována v Turnově odraznými vrstvami.
V 80. letech byly dva přístroje, Maksutov-Cassegrain o rozměrech 260/2600 a Maksutovova komora 350/840 mm, vyrobeny pro hvězdárnu v Úpici v Oddělení přesné optiky Dioptry v Turnově. Po překonání velkých obtíží při justáži a ostření RNDr. L. Vyskočil nafotografoval s touto komorou mnoho obrázků komet, mlhovin a dalších objektů na obloze. Největší Maksutovovu komoru u nás zkonstruoval doc. Mrkos pro observatoř na Kleti a využíval ji k fotografováni planetek a komet. Měla průměr okolo 630 mm a ohniskovou vzdálenost cca 1850 mm.

3. Maksutovovy soustavy vyrobené v podniku Dioptra Turnov

Koncem 70. let byly vyrobeny v Oddělení přesné optiky podniku Dioptra Turnov dva meniskové přístroje, určené pro observatoř v Úpici. Autorem optických návrhů obou soustav byl RNDr. Zbyněk Melich z Turnova.
Prvním přístrojem byl dalekohled Maksutov-Cassegrain o průměru 260 mm a ohniskové vzdálenosti 2600 mm. Jednalo se o systém se sekundárním zrcadlem, přitmeleným k výstupní, konvexní ploše menisku, který se dnes označuje jako Rutten-Maksutov. [7]
Přístroj sloužil k vizuálnímu pozorování oblohy až do poloviny 90. let, kdy byl panem Jiřím Drbohlavem učiněn pokus o vylepšení jeho zobrazovacích vlastností.
Sekundární zrcadlo bylo odlepeno z menisku a vyrobeno nové. Pro jeho uchycení byl vyroben držák s možností justáže zrcadla. Menisek byl posunut do větší vzdálenosti od primárního zrcadla, aby byly lépe kompenzovány mimoosové vady, koma a astigmatismus. Konvexní plocha menisku byla asférizována zleštěním okraje, aby byla opravena otvorová vada změněného systému. S dalekohledem byla konána dalších deset let pozorování. V roce 2005 se celý systém dostal do VOD AV ČR v Turnově, kde byl důkladně proměřen a v programu Zemax vytvořen jeho matematický model. Měřením se zjistilo, že primární a nové sekundární zrcadlo jsou díky malým tloušťkám astigmaticky zborceny a proto bylo rozhodnuto je obě vyrobit nová, silnější. Bylo též nutné přeleštit obě plochy menisku, jeho asférickou konvexní plochu vrátit do sférického tvaru.
Matematická simulace ukázala, že menisek s původními poloměry křivostí a sférickými plochami není schopen vytvořit s parametry starých zrcadel stigmatickou soustavu. Proto byla navržena soustava s upravenými poloměry křivostí zrcadel. Tab. 5, Obr. 9 - 14.
Mezitím byla do tubusu tohoto Maksutov-Cassegrainu vyrobena náhradní soustava Popova o průměru 305 mm a ohniskové vzdálenosti 2900 mm, aby bylo možné nahradit výpadek v pozorování tímto dalekohledem.
Opravená soustava Maksutov-Cassegrainu, navržená podle R.D. Sieglera, s novými zrcadly a retušovaným meniskem, vykázala zbytkové vady blízké teoreticky výpočteným.

Pro tento dalekohled by bylo velmi vhodné vyrobit adekvátní mechanickou část, plně využívající jeho zobrazovací vlastnosti na zorném poli o průměru cca 70 mm.

Druhým přístrojem, vyrobeným v Oddělení přesné optiky podniku Dioptra Turnov, je fotografická Maksutovova komora o průměru 360 mm a ohniskové vzdálenosti 840 mm. Přístroj je velice světelný a byl navržen v době, kdy se fotografovalo na film nebo fotografické desky. Komora je schopna vykreslit velké zorné pole o průměru 80 mm s průměry obrazů hvězd okolo 30-40 mikron. Vzhledem k těmto hodnotám se pro moderní CCD kamery s pixely o rozměrech 7-10 mikron příliš nehodí. Původně byla navržena tak, že se válcová patrona s fotografickým materiálem - filmem vkládala do držáku, připevněného na menisku. Toto mechanické uspořádání bylo nahrazeno justovatelným držákem. Komoru se podařilo RNDr. Liboru Vyskočilovi po dlouhé době zjustovat a získat s ní řadu snímků. V současné době se uvažuje o její adaptaci pro digitální fotografování.
Menisek je vyroben ze skla BaLF4, které bylo tenkrát k dispozici. Stavební délka komory byla navržena s ohledem na hloubku vidlice montáže hlavního dalekohledu. Její světelnost je 1/ 2.4. Tab. 6, Obr. 15 - 16.
Kdyby Maksutovova komora o průměru 360 mm měla ohniskovou vzdálenost cca 1500 mm, pak by poskytovala stigmatické obrazy a bylo by ji možné použít i pro vizuální pozorování.
V podniku Dioptra Turnov pracovala i řada zaměstnanců se zájmem o astronomii, kteří vyrobili několik přístrojů Maksutov-Cassegrain o rozměrech cca 110/1700 mm a 160/2000 mm. Jednalo se o přístroje Spot-Maksutov a dále o kompaktní neaplanatické dalekohledy Rutten-Maksutov se sekundárem, připevněným na menisku. Přístroje se zaostřovaly posunem sekundárního zrcadla pomocí mikrometrického šroubu. Toto uspořádání není pro noční pozorování příliš vhodné.

4. Maksutovovy soustavy z pracoviště VOD AV ČR Turnov

V roce 1993 byla vyrobena ve VOD AV ČR Turnov první soustava Maksutov-Cassegrainu o průměru 127 mm a ohniskové vzdálenosti 1013 mm. Jednalo se o soustavu s obecnými vzdálenostmi menisku a sekundárního zrcadla od primárního zrcadla, navrženou podle parametrů R.D.Sieglera z článku v časopise Sky and Telescope ze září, 1975. [5]
Přístroj, v literatuře dnes označovaný jako Siegler-Maksutov, byl určen jako univerzální dalekohled pro vizuální pozorování i pro fotografování. Tab. 7, Obr. 17 - 18.
V té době nebyl na pracovišti VOD AV ČR sférointerferometr a tak bylo nutné řešit problémy s měřením poloměrů křivostí ploch menisku. Výroba tohoto Siegler-Maksutova přinesla cenné poznatky z hlediska technologických postupů, měření, které byly později použity při výrobě dalších meniskových přístrojů.
Dalšími optickými soustavami byly dvě identické Maksutovovy komory o průměru 190 mm a ohniskové vzdálenosti 550 mm. Jednu z nich zakoupil pan L. Šmíd z Plzně, který s ní úspěšně fotografoval oblohu. Tab. 8, Obr. 19 - 22.
Následovala výroba čtyř optických souprav Maksutov-Cassegrainů o rozměrech 120/800 mm a dále dvou systémů 150/1200 mm. Všechny soustavy byly navrženy podle řešení R.D.Sieglera. Tab. 9, Obr. 23 - 24.
Jejich geometrické obrazy na optické ose mají stejný nebo menší průměr než je průměr difrakčního kroužku. K některým z nich byly vyrobeny i Piazzi čočky pro srovnání obrazového pole do roviny.
Dalším přístrojem byl Siegler-Maksutov o průměru 240 mm a ohniskové vzdálenosti cca 2220 mm. Tab. 10, Obr. 25 - 28.
Po něm následovalo několik Maksutovových komor o průměrech 150-160 mm a ohniskových vzdálenostech 570 - 650 mm. Ty lze použít i jako světelné širokoúhlé dalekohledy. Tab. 11, Obr. 29 - 32.
V nedávné minulosti byly vyrobeny i dvě soustavy Maksutov-Newtonu o průměru 150 mm a ohniskové vzdálenosti 1220 mm. U těchto přístrojů se počítá s možností použití i malých, vyměnitelných sekundárních rovinných zrcadel o průměru cca 20 - 25 mm pro zvýšení kontrastu obrazu. Stavební délka této aplanatické soustavy je 1750 mm. Tab. 12, Obr. 33 - 36.
V roce 2008 byly pro grantový úkol vyrobeny dvě soustavy mimoosových Maksutov-Newton o průměrech 140 mm a ohniskových vzdálenostech 2000 mm. [12]
Měly sloužit jako hlavní dalekohled slunečního spektrografu pro několik pracovních spektrálních čar. Vstupní meniskový systém bez centrálního stínění sliboval vynikající zobrazovací vlastnosti celého spektrografu. Menisky byly vybroušeny jako mimoosové čočky s klínovitostí cca 0.47 mm. Soustava měla celkovou délku 2750 mm. Tab. 13, Obr. 37 - 40.
Ukázalo se, že meniskový spektrograf, pracující v několika spektrálních čarách, by vyžadoval návrh neúměrně složitého mnohačočkového kolimačního a zobrazovacího objektivu. Nakonec byla pro tento účel vyrobena čočková soustava z klasických skel, BK7 a F2. [12]

5. Projekty Maksutovových dalekohledů Centra Toptec

Krátce po vzniku Regionálního optoelektronického centra Toptec v Turnově v roce 2010 byl pracovníky AsÚ SAV vznesen dotaz na možnost vývoje a výroby fotografické komory o velké světelnosti a průměru zorného pole. Pro tento účel byl spočítán třímeniskový systém, blízký návrhu ruského optika Valerije Terebishe. Průměr komory byl 300 mm a ohnisková vzdálenost 450 mm. Oproti jeho původnímu návrhu byly v naší soustavě použity před ohniskovou plochou dva dvojčočkové korektory, obsahující člen z nízkodisperzního skla FPL53. [8], Tab. 14, Obr. 41 - 42.
Kamera zobrazuje na na poli o průměru 7˚ a ve spektrálním oboru od 420 nm do 1000 nm obrazy hvězd o průměrech blízkým difrakčním. Její nevýhodou je velké centrální stínění, způsobující ztrátu 40% světelné energie. Pro zadané účely fotografování oblohy tento problém nevadí. Výrobní tolerance a nároky na justáž takového přístroje jsou velice přísné.
Třímeniskový Maksutov-Cassegrain s korektorem pole byl navržen jako hlavní napájecí dalekohled spektrografu pro hyperspektrální zobrazení v rámci grantu Ministerstva vnitra.
Přístroj je určen pro zjišťování škodlivých látek, které se vytvářejí během požárů. Obr. 43 - 44. Pracovní obor přístroje je pro vlnové délky od 7 do 14 mikron a jeho čočky jsou navrženy z germánia a ZnSe, které v uvedeném oboru propouštějí IR záření. Průměr vstupních členů je cca 70 mm a ekvivalentní ohnisková vzdálenost celého systému je 63.8 mm. Systém dokáže
zobrazit zorné pole o průměru 7˚ a spektrum v rozsahu 7 - 14 mikron na CCD detektor o rozměrech 8 x 10.5 mm. Také tato menisková soustava má velké centrální stínění. [13]
Podobný optický návrh byl počítán i pro naváděcí satelitární čidlo o průměru cca 16 mm a ohniskové vzdálenosti 16 mm. Jeho důležitým parametrem byla celková hmotnost optických prvků. Původní, čistě čočková verze, obsahovala čočky s velkými středovými tloušťkami z flintového skla, odolného vůči pronikavému záření. Z důvodu velké hmotnosti těchto optických prvků bylo hledáno alternativní řešení v podobě katadioptrické třímeniskové soustavy, ve které menisky by byly vyrobeny z krystalických materiálů, např. ZnS a ZnSe. Obr. 45 - 46.

6. Metody výpočtů meniskových soustav

Výpočet systémů s korektorem Maksutova ze Seidelových sum je velmi složitý. Zavedení konečné tloušťky menisku značně komplikuje jejich tvar. Pro zjednodušení výpočtu D.M.Maksutov odvodil dva soubory empirických vztahů, podle kterých se počítaly přibližné parametry Maksutovovy komory. Tento hrubý návrh komory je nutné zkontrolovat trigonometrickým výpočtem. Přesnější vztahy pro výpočet Maksutovovy soustavy pocházejí od M.S. Volosova. [4], [9], [14]
Dnešní výpočetní programy Zemax, Oslo a další výpočet podstatně usnadnily. D.M. Maksutov popsal i možnost opravy sférochromatické vady retuší jedné z ploch meniskových komor, nejlépe zrcadla. Asférizace plochy primárního zrcadla opravuje sférochromatickou vadu na optické ose, avšak do soustavy vnáší nezanedbatelný astigmatismus. Na ose a v její blízkosti jsou obrazy hvězd menší než v komoře se sférickými plochami. Mimoosové obrazy jsou mnohem horší. Pokud by se asférizovala výstupní plocha menisku, soustava by měla zbytkové vady menší na optické ose a pouze v její blízkosti. Vzhledem k větším odchylkám asférické plochy od sféry je taková úprava Maksutovovy komory technologicky velice náročná. Tab. 15, Obr. 47 - 50.

7. Technologické zkušenosti z výroby

Masová výroba meniskových dalekohledů je i dnes obtížná díky přísným tolerancím na optické parametry menisku a tvar zrcadel. Jejich nedodržení způsobuje zvětšení zbytkových vad dalekohledů, kvůli kterým přístroj nebude dobře zobrazovat. Chybám, které jsme pozorovali při kontrole starších meniskových soustav od cizích výrobců, jsme se snažili vyhnout. Technologické postupy jsme vyvíjeli již od výroby prvního dalekohledu Siegler-Maksutov 127/1013 mm.
Původní výrobní postup probíhal takto: Nejprve bylo vyrobeno co nejpřesněji sférické primární zrcadlo. Velký důraz byl kladen na přesný sférický tvar plochy bez zleštění vnějšího kraje i okolí středového otvoru. Ukázalo, že tvar zrcadla se může zbortit použitím nevhodného tmelu při zaslepení středového otvoru skleněnou zátkou. Nejprve byla k lepení použita černá tmelící smola, která byla brzy nahrazena šedou sádrou, vytvářející menší pnutí. Po vyleštění zrcadla se takto nalepená skleněná zátka ze středového otvoru hůře odstraňovala.
Hotové primární zrcadlo bez krajových defektů, zonálních vad a zlomů je předpoklad pro výrobu meniskového dalekohledu se zbytkovými vadami, blízkými teoreticky vypočteným. Protože hluboká zrcadla s krátkým poloměrem křivosti vůči jejich průměru se bezprostředně po výbrusu často bortí, vyplatil se je jejich finální tvar

dokončit až po několika týdnech relaxace. Po pečlivém změření bylo dokončené primární zrcadlo napařeno odraznou vrstvou Al+SiO2.
Dalším vyráběným optickým prvkem je sekundární zrcadlo. Také tento člen musí mít co nejpřesnější sférický tvar. V době výroby v roce 1993 byl měřen interferenčním kalibrem, protože pracoviště nedisponovalo sférointerferometrem. Sekundární zrcadlo nebylo po
vyleštění napařeno odraznou vrstvou, případnou retuší této plochy jsme chtěli opravit zbytkovou sférickou aberaci celé soustavy.
Nakonec byl vyráběn menisek. Bez strojního opracování by jeho formování bylo velmi zdlouhavé. Po nafrézování hrubého tvaru byla nejprve broušena jeho vstupní konkávní plocha. V našem prvním dalekohledu Siegler-Maksutov 127/1013 byl její tvar kontrolován pomocí Ronchi testu. Přesnost měření poloměru křivosti vstupní konkávní plochy na optické lavici byla cca 0.5 mm. Po výbrusu byla plocha co nejrovnoměrněji naleštěna.
Poté byla broušena i konvexní plocha tak, aby její poloměr křivosti byl o několik desetin milimetrů delší oproti výpočtu. Těsně před jejím dobroušením na konečnou hodnotu středové tloušťky menisku jsme tuto plochu naleštili a celou soustavu proměřili autokolimačním testem. Protože zadní plocha menisku měla delší poloměr křivosti, dalekohled vykázal překorigovanou podélnou otvorovou vadu cca o hodnotě 1.7 mm. Krajní paprsky protínaly optickou osu o 1.7 mm dále než středové. Razantnějším broušením krajních zón bylo provedeno zkrácení poloměru křivostí konvexní plochy s minimální změnou středové tloušťky. První korekce zmenšila podélnou otvorovou vadu na cca 0.7 mm, další na 0.3 mm. Broušení nejjemnějším brusivem SiC o hrubosti No. 1000 bylo zakončeno tehdy, když jsme naměřili hodnotu zbytkové podélné otvorové vady cca 0.10-0.15 mm. Teprve pak byl menisek na obou stranách leštěn. Jeho klínovitost nepřesáhla hodnotu 0.003 mm a dodržení středové tloušťky bylo splněno do cca +/- 0.03 mm.
Později byly menisky kontrolovány pomocí interferenčních kalibrů. Nejprve byla co nejpřesněji vyrobena a změřena konkávní plocha kalibru pro vstupní plochu menisku.
Tento kalibr se stal základem pro výrobu druhé, konkávní kalibrační plochy pro výstupní plochu menisku. Jeho tětiva, měřená sférometrem, byla spočítána a odměřována podle konkávní plochy prvního kalibru. Tak se podařilo velmi přesně dodržet rozdíl poloměrů křivostí meniskových ploch. Poté byly dobroušeny i konvexní plochy kalibrů. Pokud vyleštšná soustava vykazovala hodnoty podélné sférické aberace blízké teoretickým, bylo sekundární zrcadlo a menisek předán na napaření odrazné a antireflexní vrstvy. Sekundární zrcadlo s nesférickým tvarem během autokolimačního testu pomocí Ronchi mřížky ukázalo při vyosení z optické osy deformaci proužků.
Veškerý použitý materiál pro výrobu optických soustav byl kontrolován v polariskopu na pnutí. Disky optického skla na menisky byly na obou stranách vybroušeny a naleštěny. Na optické lavici byla sestavena soustava, umožňující v dvojitém chodu paprsků nalézt ve skle šlíry. Pokud disky nesplňovaly předpoklad úspěšné výroby optického systému, byly vyřazeny jako nepoužitelné. Zrcadla byla vyráběna pouze z křemičitého skla Simax, menisky byly vybroušeny z Schottova skla BK7 nebo čínského skla K7.

8. Závěr

V rámci této práce se podařilo prokázat 20-25 meniskových systémů, vyrobených v různých optických pracovištích v Turnově od počátku 70. let. Všechny dalekohledy z Turnova byly vyráběny klasickou technologií, broušeny volným brusivem SiC a leštěny na smolných podložkách. Díky tomu je mikrodrsnost jejich optických ploch velice malá. Na rozdíl od ploch, leštěných umělohmotnými podložkami, na plochách nedochází k výraznému rozptylu světla. Větší tloušťky menisku znamenají větší tepelnou kapacitu skla, které se v průběhu noci ochlazuje nepatrně pomaleji než okolní vzduch a tak dochází k rosení optiky za podstatně delší dobu než u tenkých korekčních desek Schmidt-Cassegrainů. Ty je nutné vyhřívat.
Příliš velkou tepelnou kapacitu meniskového dalekohledu s uzavřeným tubusem lze zmenšit odvětráváním tubusu pomocí ventilátorů. V případě optických přístrojů s extrémně velkými požadavky na kontrastní zobrazení je nutné vhodně vyřešit uložení zrcadel, zvláště primárních. U komerčních přístrojů bývá primární zrcadlo uchyceno za okraj středového otvoru. Tato filozofie vychází z výpočtu z oblasti pružnosti a pevnosti tuhých materiálů, avšak nerespektuje jejich tečení. Logičtější je uložení primárního zrcadla tak, aby se jeho hmotnost co nejrovnoměrněji rozložila na celou zadní plochu. Trvalé změny zrcadel byly na řadě primárních zrcadel pozorovány.
Optické prvky, zvláště zrcadla, byly vyráběny s tím, že zhruba jeden až dva měsíce po opracování dochází ve skleněném disku k vyrovnávání pnutí, které deformuje vyleštěnou ptickou plochu. Na základě této zkušenosti byla zrcadla na tuto dobu odstavena a finální figurace optických ploch proběhly později. Tím se podstatně eliminovaly jejich dodatečné změny tvaru ploch.
Téměř všechny meniskové soustavy, které jsou uloženy v ÚFP AV ČR v.v.i.- Centru Toptec, byly v posledné době zkontrolovány na optické lavici autokolimačním testem a výsledky nafotografovány. Měření ukázalo, že

zbytkové vady přístrojů jsou velice blízké těm, které byly vypočítány v programu Zemax. Za dobu 15-20 let u nich nedošlo k výraznějším změnám optických ploch a tudíž ke zhoršení jejich zobrazovacích vlastností. Pokud bylo vyrobeno několik shodných souprav, z hlediska zbytkových optických vad nejsou mezi nimi podstatné rozdíly. Zveřejnění všech dostupných atestů meniskových soustav by znamenalo neúměrnou délku publikovaného článku.
Prakticky všechny vyrobené přístroje z VOD AV ČR v Turnově byly klasické Maksutovovy komory a verze Sieglerova Maksutov-Cassegrainu, využívající své parametry pro maximální opravu zbytkových optických vad. Během měření autokolimačním testem se ukázalo, že tyto systémy, na rozdíl od soustav Spot-Maksutovů lze mnohem snadněji centrovat. Hlavním kriteriem optických návrhů byla podmínka, aby se všechny paprsky ve spektrálním oboru mezi čarami C-F (656.1 nm a 486.1 nm) protly v obrazci o průměru rovným nebo menším než je průměr difrakční. Mnohdy se podařilo tento obor rozšířit na celý viditelný a blízký infračervený.
Za ideální světelnosti Maksutovových komor považujeme 1/3.7- 4 a u Maksutov-Cassegrainů
1/8 -10 pro průměry do 600 mm. Menší soustavy lze navrhnout i světelnější.
Katadioptrické systémy se vstupním meniskem před zrcadlovou soustavou reprezentují skupinu přístrojů, umožňující široké využití. Meniskovým korektorem nebo jejich soustavou lze opravit vady optických systémů pro zobrazení širokých zorných polí s vysokým kontrastem. Výroba menisků je i pro moderní technologie náročná. Z těchto důvodů se využívá pro fotografování velkých zorných polí spíše soustav s asférickými primárními zrcadly a s několikačočkovými korektory, umístěnými v jejich sbíhavých svazcích. Dále jsou využívány menší světelné refraktory, obsahující čočky z nízkodisperzních skel s dobrou korekcí sférochromatické vady.
V současné době jsou teprve vyvíjeny detektory, schopné plně využít zobrazovacích vlastností meniskových dalekohledů. Pro porovnání barevné vady uvádíme na obrázcích 51-54 Phase Ronchigramy a Ronchigram jednoho z nejlepších komerčních čtyřčočkových objektivů. Jeho průměr je okolo 100 mm a ohnisková vzdálenost cca 500 mm.

[1] D.D. Maksutov: New Catadioptric Meniscus Systems, Journal of the Optical Society of America, Vol.34, Issue 5, str. 270-284, (1944)

[2] Cassegrain Maksutov Telescope Design for the Amateurs, John F. Gregory, Sky and Telescope, 1957, March, str. 236-240

[3] An 11-Inch Maksutov Telescope, W.C.Chenney, Sky and Telescope, December 1957, str. 96-99, str.64-70

[4] Amatérské astronomické dalekohledy, Druhé přepracované vydání,Vilém Erhart - Ing. Josef Erhart, Polytechnická knižnice,Praha 1989, str. 183-184

[5] A High-Performance Maksutov Telescope, Robert D.Siegler, Sky and Telescope, September 1975, str. 190-197

[6] Optical Configurations for Astronomical Photography, Mike Simmons, Sky and Telescope, July, 1980, str.64-70

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

[8] Brief historical remarks concerning one type of wide-field catadioptric telescopes V.Yu. Terebish,Moscow University
http://www.baader-planetarium.de/tec/bild+pdf-tec300vt/Terebizh_Historical_Remarks.pdf

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

[10] Dmitri Maksutov: The Man and His Telescopes, By Eduard Trigubov and Yuri Petrunin, http://www.telescopengineering.com/history/dmitrimaksutov.html

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

[12] Optický návrh zobrazovací soustavy spektrografu s vícekanálovým filtrem, Zdeněk Rail, Daniel Jareš, Vít Lédl, Radek Melich, Zbyněk Melich, Jan Václavík a Pavel Oupický

[13] Optické systémy pro hyperspektrální zobrazení, Zdeněk Rail, Pavel Pintr, Jemná Mechanika a optika, č. 1, ročník 2016

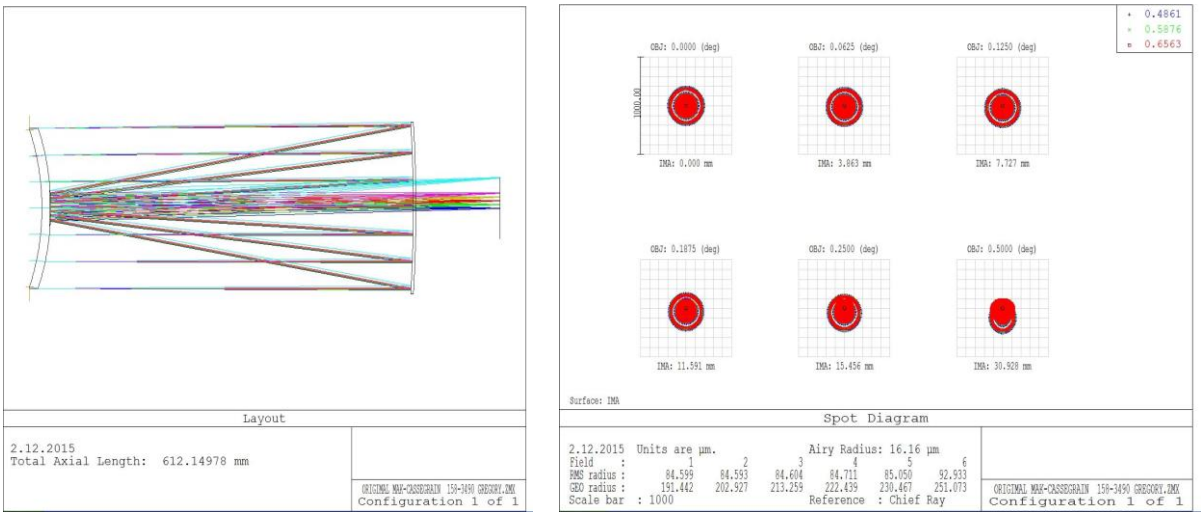
[14] Volosov D.S., Metody rasčota složnych fotografičeskich sistem, OGIZ, Leningrad,1948

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.

11. Optické parametry meniskových soustav

	Surf.Type	Radius	Thickness	Glass	SemiDiam	Conic
OBJ	**Standard**	**Infinity**	**Infinity**		**Infinity**	**0.000**
1	**Standard**	**-204.22**	**11.38**	**BSC-2**	**79.50**	**0.000**
2	**Standard**	**-210.64**	**470.94**		**81.13**	**0.000**
3	**Standard**	**-1100.07**	**-470.94**	**Mirror**	**84.54**	**0.000**
4	**Standard**	**-210.64**	**542.41**	**Mirror**	**15.30**	**0.000**
IMA	**Standard**					**0.000**

Tabulka 1. Parametry Spot-Maksutova 159/3490 z článku Gregory, SaT [2]. Později byly tyto parametry publikovány i v knize bratří Erhartů. [4]

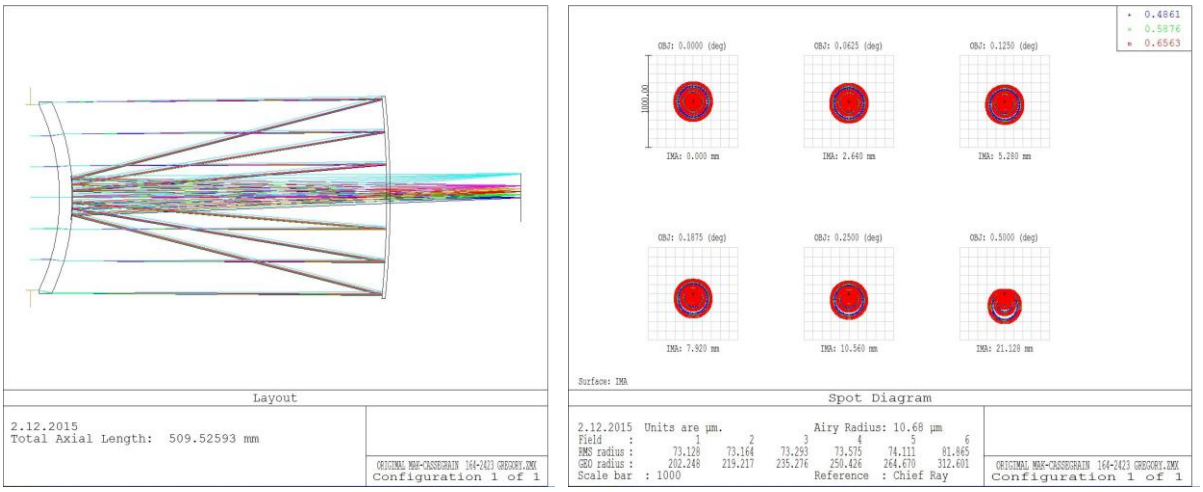


Obrázek 1 a 2. Schéma a spotdiagramy Spot-Maksutova 159/3490 z článku Gregory, SaT [2]. Tyto parametry jsou publikovány i v knize bratří Erhartů. [4]

	Surf.Type	Radius	Thickness	Glass	SemiDiam	Conic
OBJ	**Standard**	**Infinity**	**Infinity**		**Infinity**	**0.000**
1	**Standard**	**-167.21**	**13.74**	**BSC-2**	**81.93**	**0.000**
2	**Standard**	**-174.96**	**326.82**		**84.52**	**0.000**
3	**Standard**	**-782.83**	**-326.82**	**Mirror**	**89.50**	**0.000**
4	**Standard**	**-174.96**	**428.98**	**Mirror**	**18.90**	**0.000**
IMA	**Standard**					**0.000**

Tabulka 2. Parametry Spot-Maksutova 164/2423 z článku Gregory, SaT [2]. Později byly tyto parametry publikovány i v knize bratří Erhartů. [4]

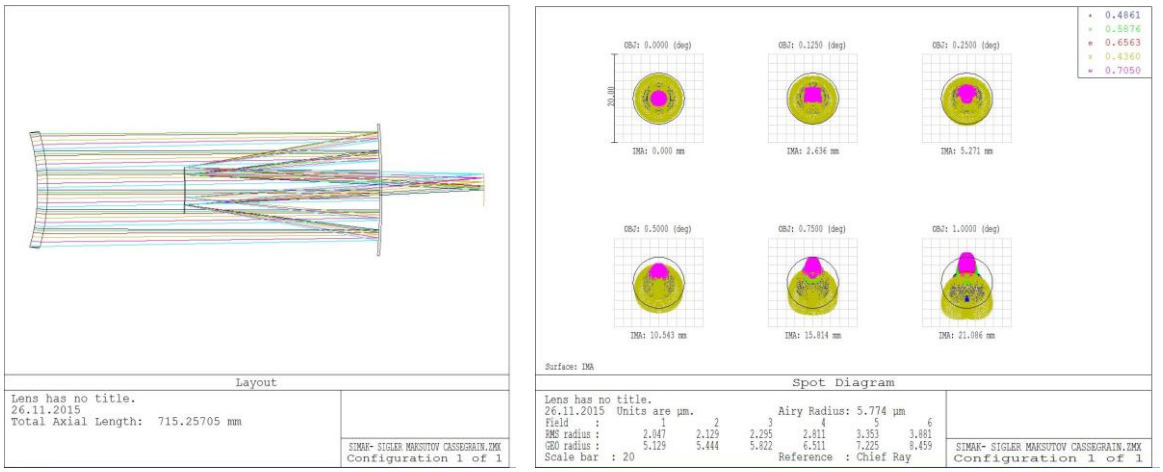
11



Obrázek 3 a 4. Schéma a spotdiagramy Spot-Maksutova 164/2423 z článku Gregory, SaT [2]. Parametry jsou publikovány i v knize bratří Erhartů. [4]

	Surf.Type	Radius	Thickness	Glass	SemiDiam	Conic
OBJ	**Standard**	**Infinity**	**Infinity**		**Infinity**	**0.000**
1	**Standard**	**-226.85**	**15.70**	**BK7**	**76.20**	**0.000**
2	**Standard**	**-235.81**	**528.50**		**76.25**	**0.000**
3	**Standard**	**-999.62**	**-315.06**	**Mirror**	**89.02**	**0.000**
4	**Standard**	**-645.49**	**481.75**	**Mirror**	**39.14**	**0.000**
IMA	**Standard**	**-961.03**			**21.23**	**0.000**

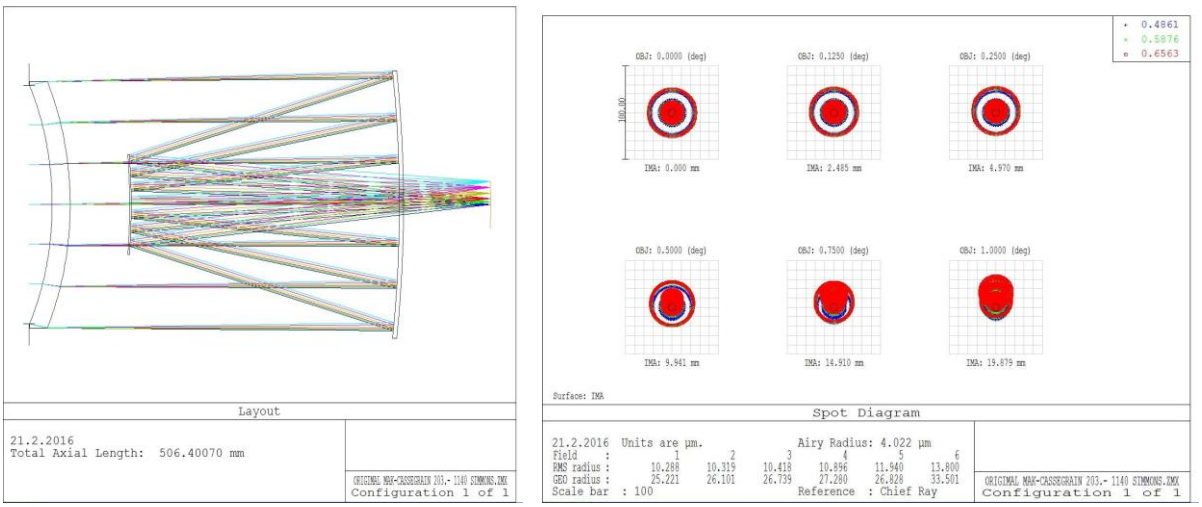
Tabulka 3. Parametry dalekohledu Siegler-Maksutov Cassegrain 150/1200 z článku R.D.Sieglera. [5]



Obrázek 5 a 6. Schéma a spotdiagramy Siegler-Maksutova 150/1200 z článku R.D.Sieglera. [5]

	Surf.Type	Radius	Thickness	Glass	SemiDiam	Conic
OBJ	**Standard**	**Infinity**	**Infinity**		**Infinity**	**0.000**
1	**Standard**	**-220.96**	**19.74**	**BK7**	**101.61**	**0.000**
2	**Standard**	**-232.69**	**361.26**		**105.17**	**0.000**
3	**Standard**	**-860.76**	**-294.31**	**Mirror**	**113.88**	**0.000**
4	**Standard**	**-458.98**	**394.31**	**Mirror**	**42.49**	**0.000**
IMA	**Standard**	**-685.80**			**19.91**	**0.000**

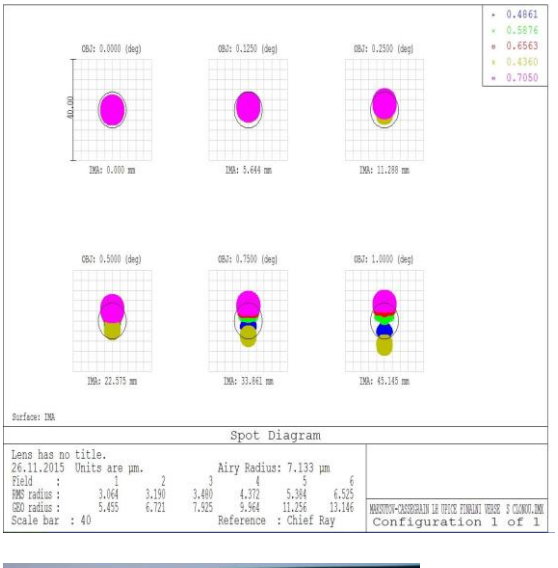
Tabulka 4. Parametry Simmonsova Maksutov-Cassegrainu 203/1140 z článku S and T. [6]

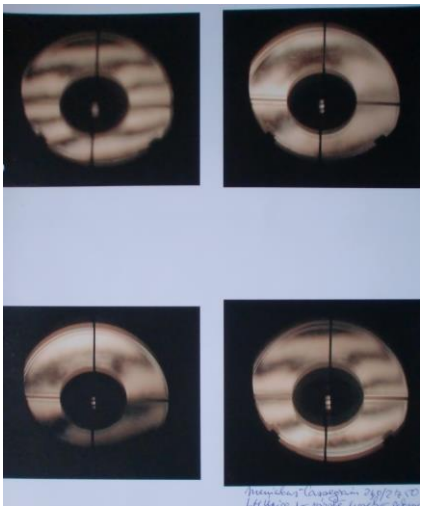


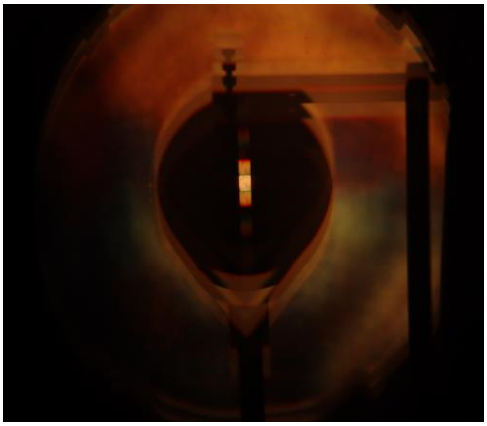
Obrázek 7 a 8. Schéma a spotdiagramy fotografického Maksutov-Cassegrainu M. Simmonse 203/1140 z článku M.Simmonse. [6]

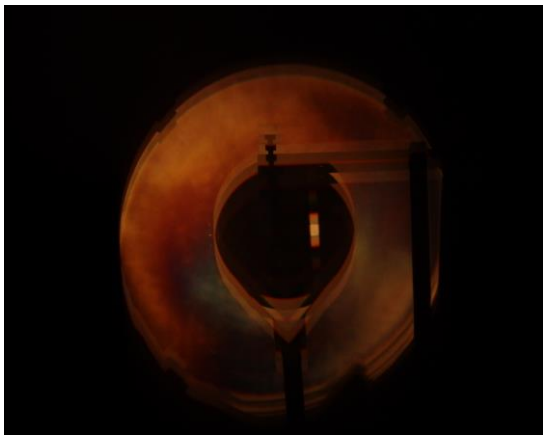
	Surf.Type	Radius	Thickness	Glass	SemiDiam	Conic
OBJ	**Standard**	**Infinity**	**Infinity**		**Infinity**	**0.000**
1	**Standard**	**-431.88**	**25.36**	**BK7**	**130**	**0.000**
2	**Standard**	**-446.65**	**1050**		**130**	**0.000**
3	**Standard**	**-1997**	**671.5**	**Mirror**	**150**	**0.000**
4	**Standard**	**-1103**	**907.28**	**Mirror**	**52.5**	**0.000**
IMA	**Standard**	**-1272**			**22.58**	**0.000**

Tabulka 5. Parametry teleskopu Maksutov-Cassegrain 260/2600 z Dioptry Turnov, přepracované v roce 2006 podle návrhu R.D.Sieglera na ÚFP AVČR v.v.i.. [5]





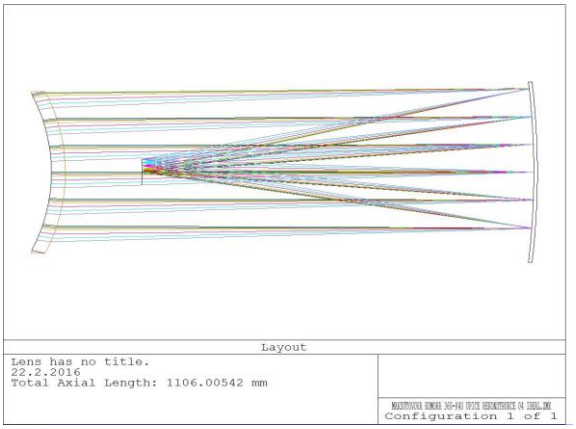


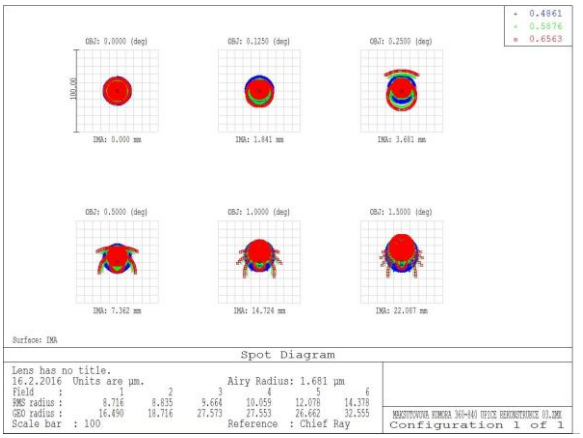


Obrázky 9 až 14. Spotdiagramy teleskopu Maksutov-Cassegrain 260/2600 z Dioptry Turnov, přepracované v roce 2006 podle návrhu R.D.Sieglera na ÚFP AVČR v.v.i.. [5]
Soustava na optické lavici při autokolimačním testu. Ronchigramy dalekohledu před opravou, rok 2005. Ronchigramy dalekohledu po opravě, rok 2006. Phase Ronchigram opravené soustavy na optické ose. Phase Ronchigram obrazu opravené soustavy cca 20 mm od optické osy.

	Surf.Type	Radius	Thickness	Glass	SemiDiam	Conic
OBJ	**Standard**	**Infinity**	**Infinity**		**Infinity**	**0.000**
1	**Standard**	**-367.46**	**31.7**	**BaLF4**	**180**	**0.000**
2	**Standard**	**-386.60**	**1074.209**		**185**	**0.000**
3	**Standard**	**-1751.2**	**-898.09**	**Mirror**	**215**	**0.000**
IMA	**Standard**	**831.3**				**0.000**

Tabulka 6. Přibližné parametry Maksutovovy komory 360/840 úpické hvězdárny.

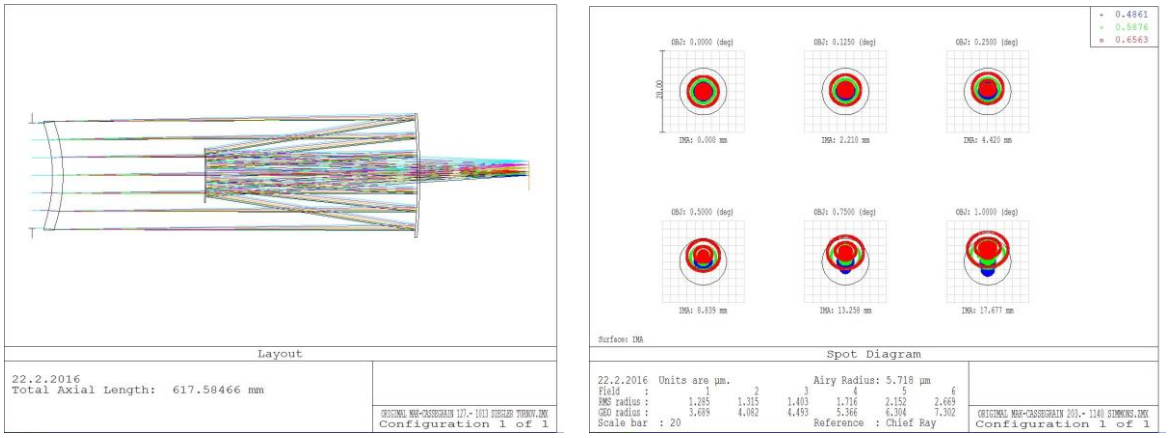




Obrázky 15 a 16. Schéma a spotdiagramy simulace Maksutovovy komory 360/840 úpické hvězdárny.

	Surf.Type	Radius	Thickness	Glass	SemiDiam	Conic
OBJ	**Standard**	**Infinity**	**Infinity**		**Infinity**	**0.000**
1	**Standard**	**-189.05**	**13.08**	**BK7**	**63.5**	**0.000**
2	**Standard**	**-196.49**	**440.40**		**63.5**	**0.000**
3	**Standard**	**-833.00**	**-262.50**	**Mirror**	**75.0**	**0.000**
4	**Standard**	**-537.90**	**401.20**	**Mirror**	**28.0**	**0.000**
IMA	**Standard**	**-700.00**				**0.000**

Tabulka 7. Parametry první experimentální soustavy Maksutov-Cassegrainu 127/1013, vyrobená v roce 1993 ve VOD AVČR v Turnově. Jedná se o zmenšené řešení Siegler-Maksutova z článku v Sky and Telescope. [5]

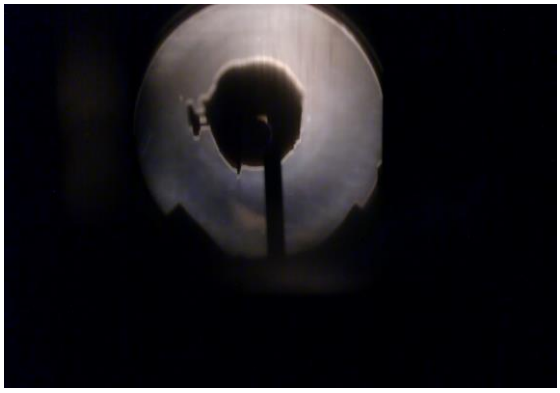


Obrázek 17 a 18. Schéma a spotdiagramy Siegler-Maksutova 127/1013 mm podle návrhu R.D. Sieglera, na kterém byly zkoušeny technologické postupy výroby přístrojů s korektory Maksutova. [5]

	Surf.Type	Radius	Thickness	Glass	SemiDiam	Conic
OBJ	**Standard**	**Infinity**	**Infinity**		**Infinity**	**0.000**
1	**Standard**	**-233.27**	**20.65**	**BK7**	**95**	**0.000**
2	**Standard**	**-245.10**	**780**		**95**	**0.000**
3	**Standard**	**-1143.7**	**-585.37**	**Mirror**	**130**	**0.000**
IMA	**Standard**	**-550**			**23**	**0.000**

Tabulka 8. Parametry Maksutovovy komory 190/550 podle návrhu RNDr. Zbyňka Melicha.

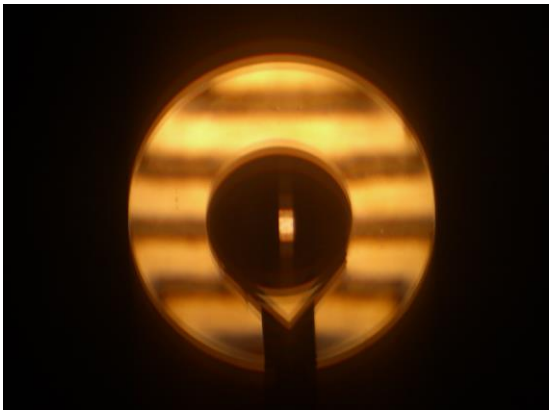
Obrázek 19 a 20. Kontrola Maksutovovy komory 190/550 návrhu RNDr. Z. Melicha autokolimačním testem v uspořádání Newtonova dalekohledu.

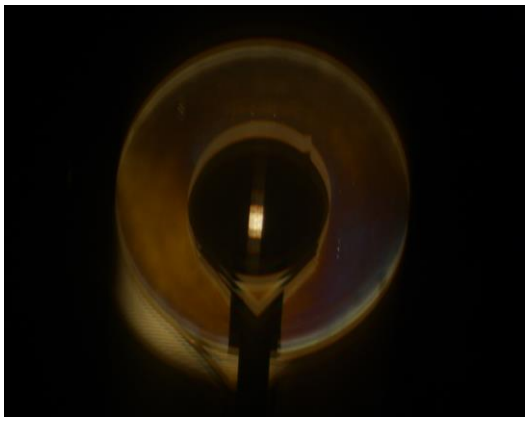


Obrázky 21 a 22. Kontrola Maksutovovy komory 190/550 návrhu RNDr. Z. Melicha autokolimačním testem v uspořádání Newtonova dalekohledu. Spotdiagramy Maksutovovy komory 190/550. Ronchigram Maksutovovy komory 190/550. Phase Ronchigram Maksutovovy komory 190/550.

	Surf.Type	Radius	Thickness	Glass	SemiDiam	Conic
OBJ	Standard	Infinity	Infinity		Infinity	0.000
1	Standard	-225.75	15.84	BK7	75	0.000
2	Standard	-234.75	532.50		75	0.000
3	Standard	-990	-312	Mirror	86.25	0.000
4	Standard	-637.50	478.91	Mirror	30	0.000
IMA	Standard	-944.07			21.09	0.000

Tabulka 9. Maksutov-Cassegrain 150/1200 podle návrhu R.D.Sieglera. [5]

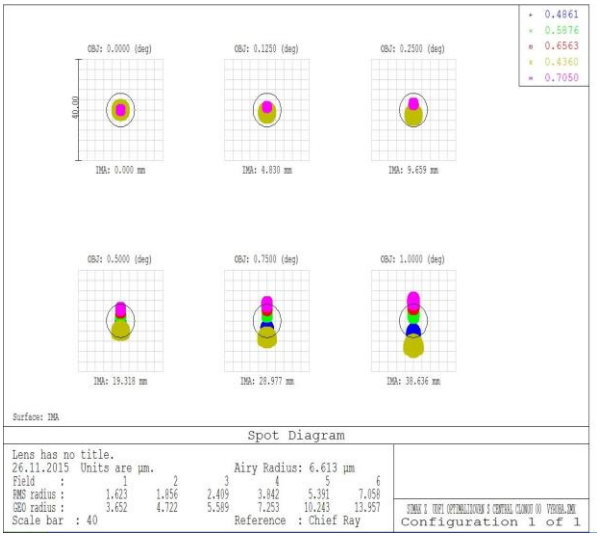


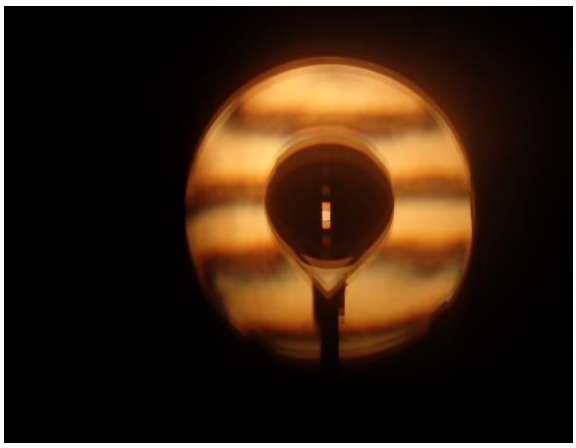


Obrázky 23 a 24. Ronchigram a Phase Ronchigram Maksutov-Cassegrainu 150/1200 podle návrhu R.D.Sieglera. [5] Spotdiagramy jsou blízké spotdiagramům z obrázku 6.

	Surf.Type	Radius	Thickness	Glass	SemiDiam	Conic
OBJ	Standard	Infinity	Infinity		Infinity	0.000
1	Standard	-431.92	32.40	K7	120	0.000
2	Standard	-450.66	1000.00		120	0.000
3	Standard	-1830	-573.00	Mirror	132.5	0.000
4	Standard	-1200	891.53	Mirror	52.5	0.000
IMA	Standard	-1848			19.42	0.000

Tabulka 10. Parametry Maksutov-Cassegrainu 240/2220. Konstrukční data spočteny v Turnově podle R.D.Sieglera. [5]

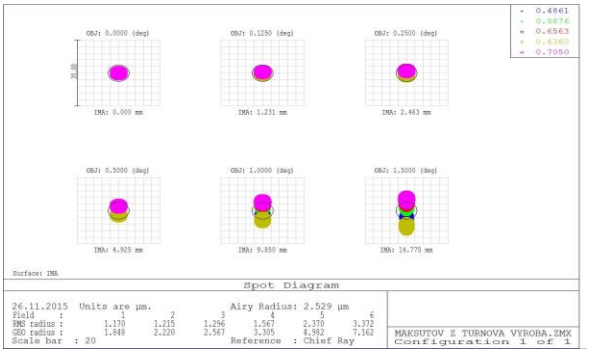


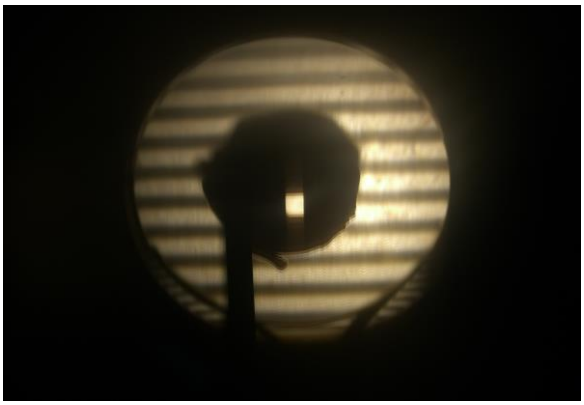


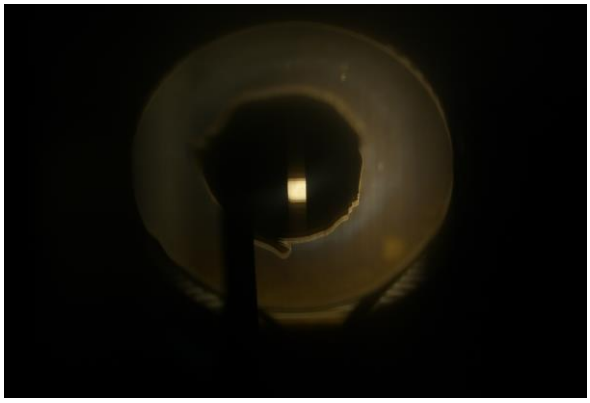
Obrázky 25 až 28. Obrázek soustavy Maksutov-Cassegrainu 240/2220. Spotdiagramy, Ronchigram a Phase Ronchigram Maksutov-Cassegrainu podle R.D.Sieglera. [5]

	Surf.Type	Radius	Thickness	Glass	SemiDiam	Conic
OBJ	**Standard**	**Infinity**	**Infinity**		**Infinity**	**0.000**
1	**Standard**	**-233.27**	**20.5**	**BK7**	**80**	**0.000**
2	**Standard**	**-245.10**	**740**		**80**	**0.000**
3	**Standard**	**-1170**	**-599.44**	**Mirror**	**90**	**0.000**
IMA	**Standard**				**14.78**	**0.000**

Tabulka 11.Parametry Maksutov-Newtona 150/564.



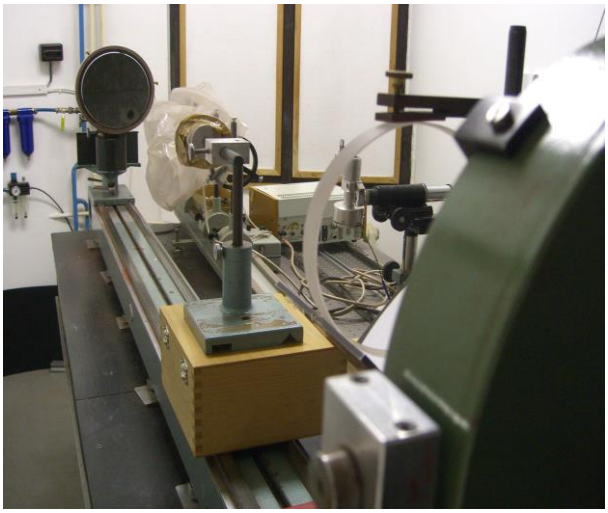


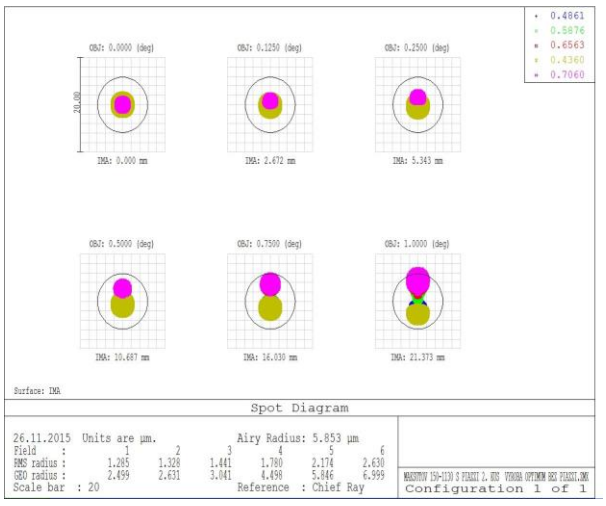


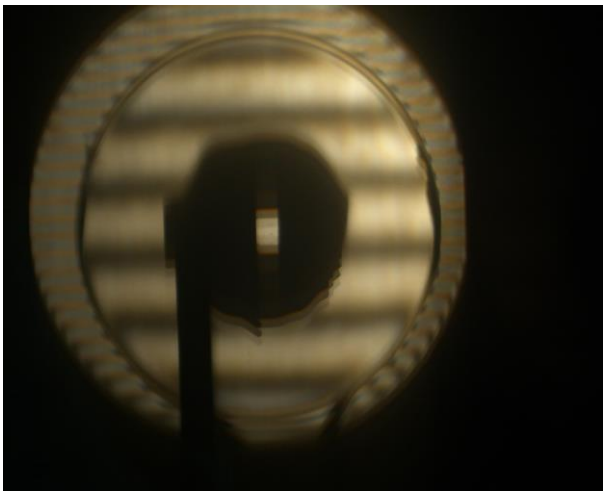
Obrázky 29 až 32. Schéma Maksutov-Newtona 150/564 s obecnou polohou menisku vůči primárnímu zrcadlu. Soustavu lze použít jak k vizuálnímu pozorování, tak k fotografování.
Dodatečně k ní byly vyrobeny Piazzi čočky na srovnání obrazového pole. Další obrázky ukazují spotdiagramy, Ronchigram a Phase Ronchigram.

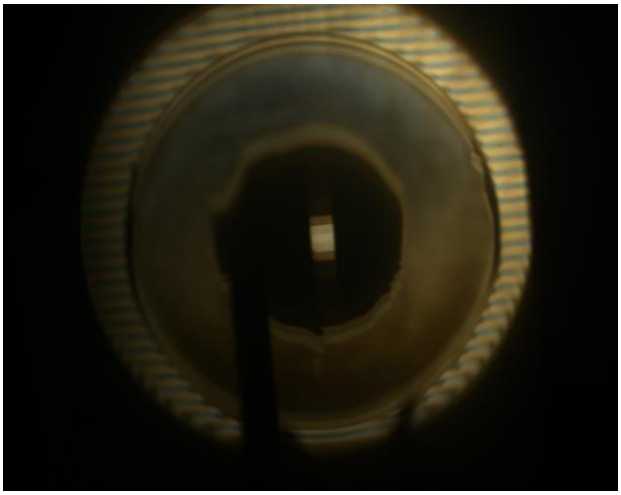
	Surf.Type	Radius	Thickness	Glass	SemiDiam	Conic
OBJ	**Standard**	**Infinity**	**Infinity**		**Infinity**	**0.000**
1	**Standard**	**-426.50**	**18**	**BK7**	**75**	**0.000**
2	**Standard**	**-437.30**	**1740**		**77**	**0.000**
3	**Standard**	**-2500**	**-1269.75**	**Mirror**	**95**	**0.000**
IMA	**Standard**	**-1220**			**21.38**	**0.000**

Tabulka 12. Parametry Newton –Maksutova 150/1220. Jedná se o aplanatickou verzi s obecnou polohou menisku vůči primárnímu zrcadlu.





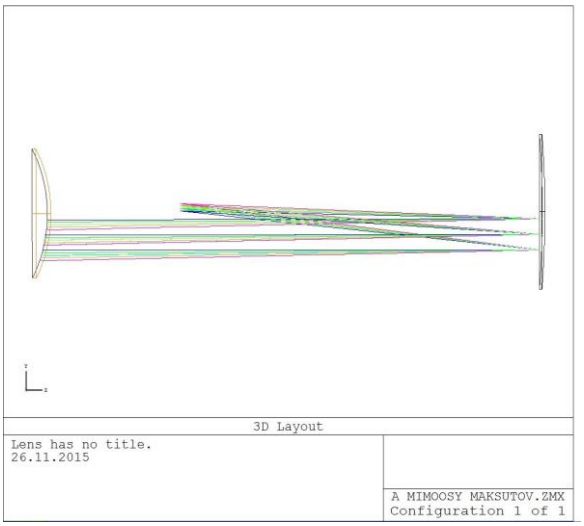


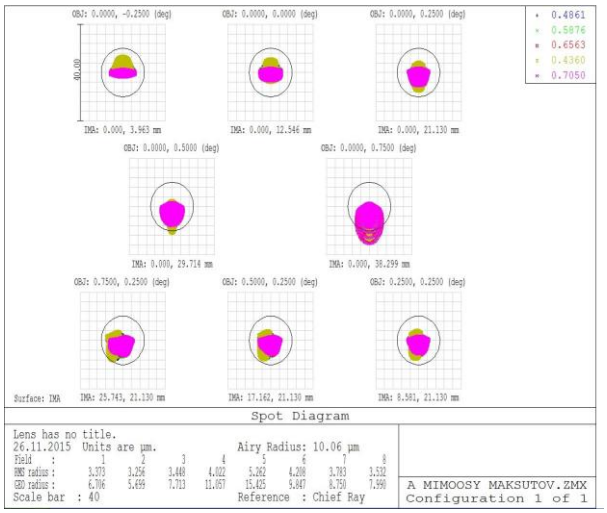


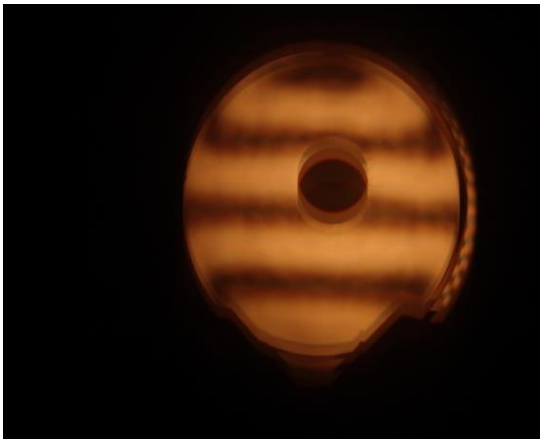
Obrázky 33 až 36. Schéma aplanatické verze Newton-Maksutova 150/1220 na optické lavici. Spotdiagramy, Ronchigram a Phase Ronchigram.

	Surf.Type	Radius	Thickness	Glass	SemiDiam	Conic
OBJ	**Standard**	**Infinity**	**Infinity**		**Infinity**	**0.000**
1	**Coord. Break -110 mm pod optickou osu**	**-570**	**20**	**BK7**	**300 Zacloněno na průměr 140**	**0.000**
2	**Standard**	**-581.2**	**2750**		**300**	**0.000**
3	**Standard**	**-4000**	**-2027.091**	**Mirror**	**360**	**0.000**
IMA	**Standard**	**-1954**				**0.000**

Tabulka 13. Optické parametry mimoosového Newton-Maksutova 140/2000. Mimoosový řez soustavou vznikne zacloněním soustavy na průměr 140 mm a excentrickým posunutím clony o -110 mm pod optickou osu.



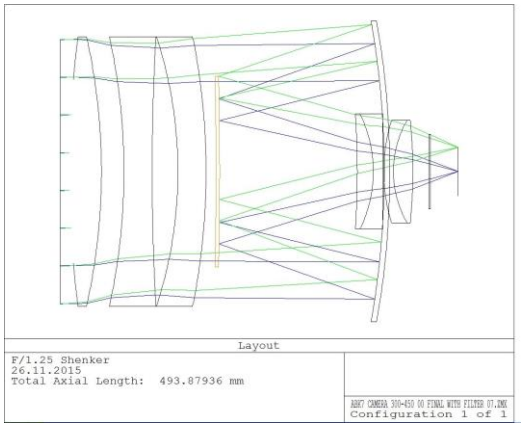


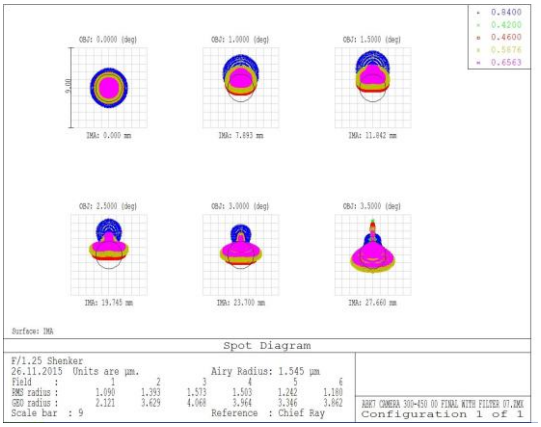


Obrázky 37 až 40. Schéma mimoosového Newton-Maksutova 140/2000. Na dalších obrázcích jsou jeho spotdiagramy, Ronchigram a Phase Ronchigram.

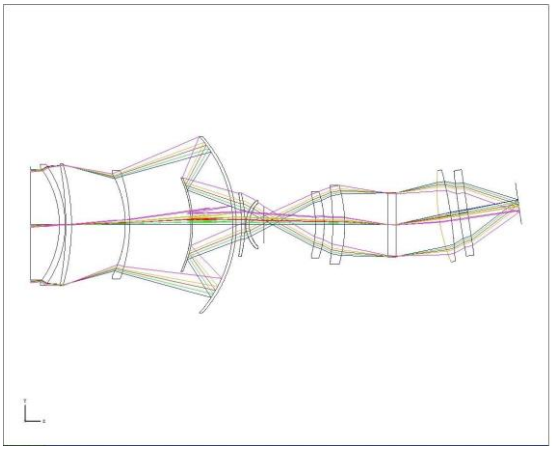
	Surf.Type	Radius	Thickness	Glass	SemiDiam	Conic
OBJ	Standard	Infinity	Infinity		0	0
1	Standard	Infinity	11		150	0
STO	Standard	1070.4	40	BK7	153.27	0
3	Standard	-640.6	27.9		¨ 153.27	0
4	Standard	-659	35	BK7	153.27	0
5	Standard	2500	32		153.27	0
6	Standard	-453	35	BK7	153.27	0
7	Standard	-708	221.1		153.27	0
8	Standard	-906	-204.371	Mirror	170.85	0
9	Standard	-4580	170.85	Mirror	108	0
10	Standard	-925	20	FK5	65.33	0
11	Standard	-137.6	12	BK7	65.33	0
12	Standard	-5000	1		65.33	0
13	Standard	179.6	12	FK5	58.29	0
14	Standard	108.2	24	FPL53	58.29	0
15	Standard	-538.5	20		58.29	0
16	Standard	Infinity	2	BK7	42.4	0
17	Standard	Infinity	34.401		41.89	0
IMA	Standard	Infinity			27.66	0

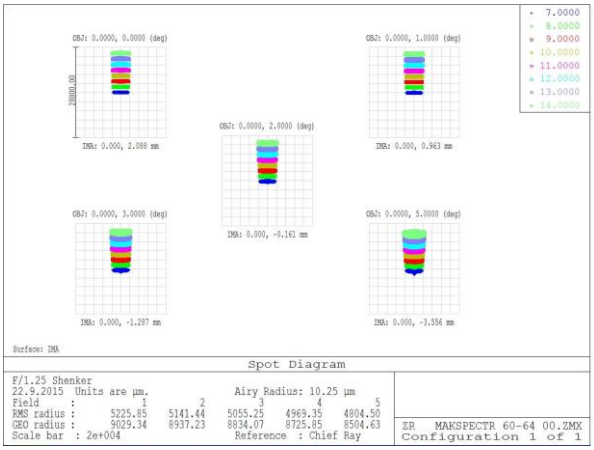
Tabulka 14. Parametry širokoúhlé trojmeniskové soustavy 300/450, varianta soustavy Valerije Terebishe. [7]



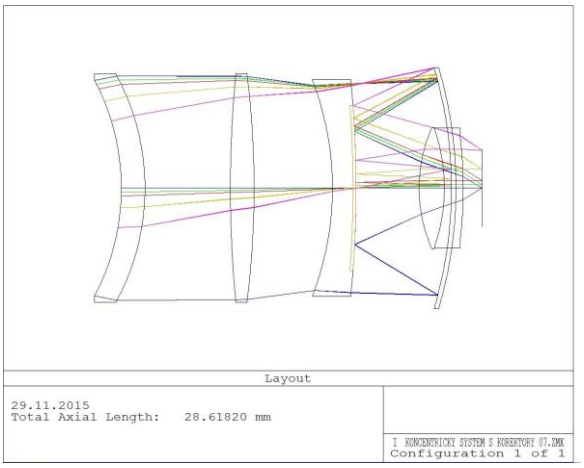


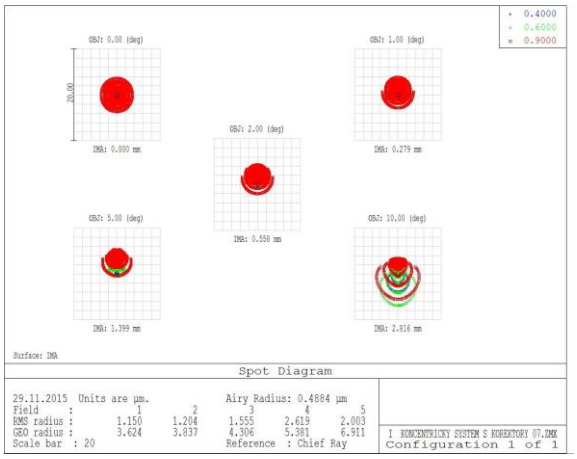
Obrázky 41 a 42.Schéma a spotdiagramy širokoúhlého systému 300/450 se třemi menisky, ekvivalentního se systémem Valerije Terebishe. [7]





Obrázky 43 a 44. Schéma a spotdiagramy optické soustavy pro hyperspektrální zobrazení. Vstupní soustava je třímeniskový Maksutovovův systém s korektorem pole. Průměr hlavního objektivu je 65 mm a ekvivalentní ohnisková vzdálenost je 65 mm.

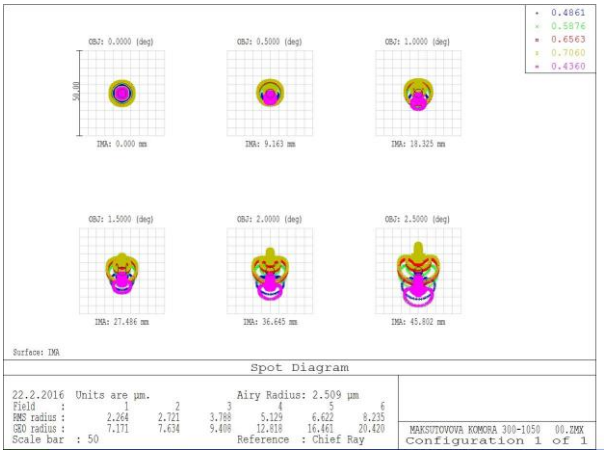


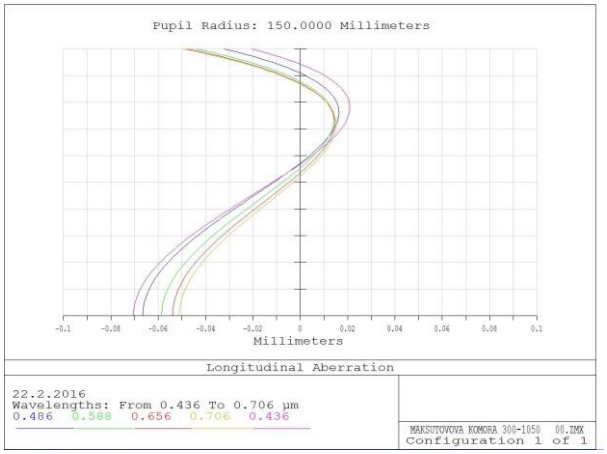


Obrázky 45 a 46. Schéma a spotdiagramy objektivu satelitárního čidla o průměru 16 mm a ohniskové vzdálenosti 16 mm. Objektiv je třímenisková soustava Maksutov-Cassegrainu s Piazzi čočkou, srovnávající obrazové pole do roviny.

	Surf.Type	Radius	Thickness	Glass	SemiDiam	Conic
OBJ	**Standard**	**Infinity**	**Infinity**		**Infinity**	**0.000**
1	**Standard**	**-411**	**29.4**	**BK7**	**150**	**0.000**
2	**Standard**	**-428**	**1416.8**		**155**	**0.000**
3	**Standard**	**-2165.5**	**-1106.02**	**Mirror**	**220**	**0.000**
IMA	**Standard**	**-1080**			**46**	**0.000**

Tabulka 15. Parametry Maksutovovy komory 300/1050, vypočtené a optimalizované ze vzorců M.S. Volosova.



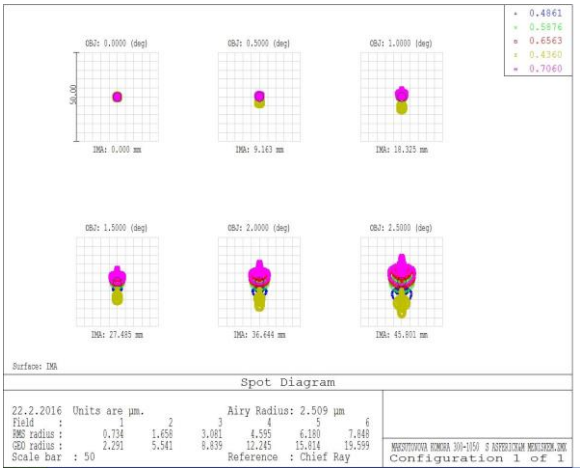


Obrázky 47 a 48. Spotdiagramy a sférochromatická vada Maksutovovy komory 300/1050.

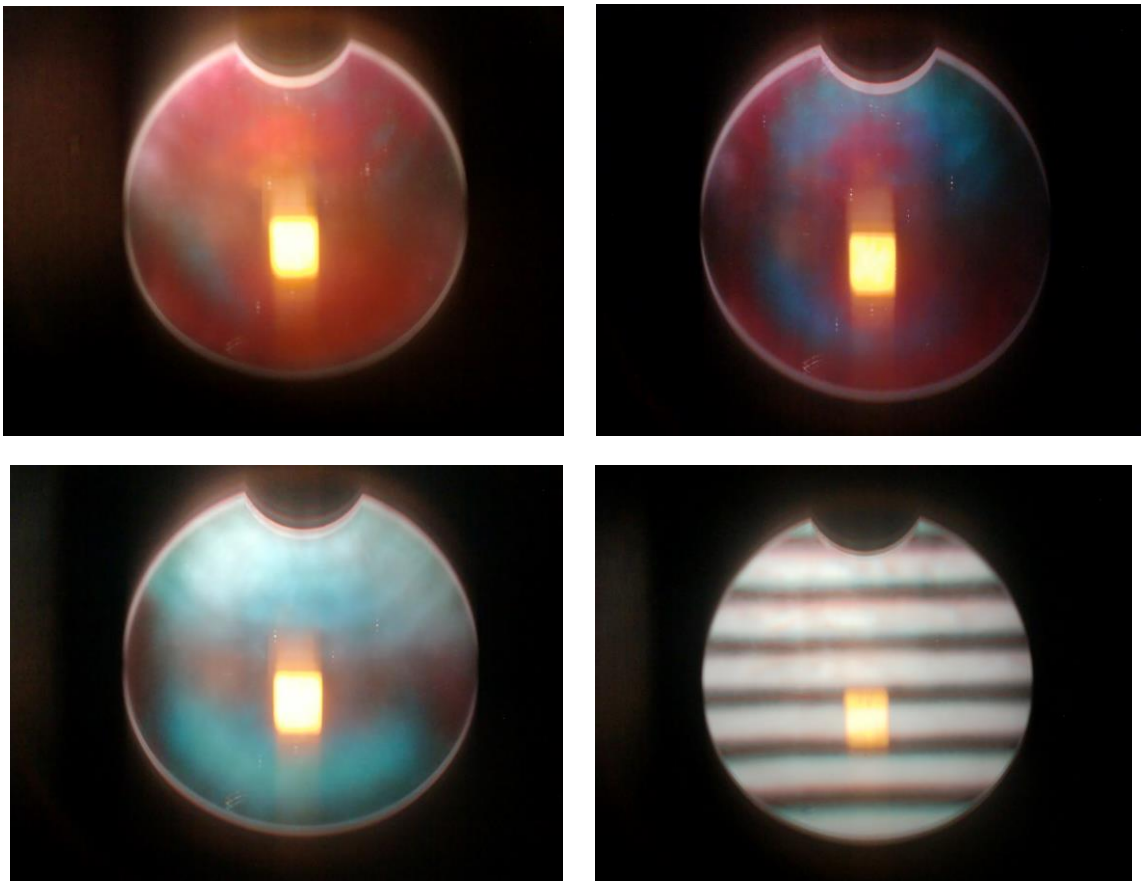
	Surf.Type	Radius	Thickness	Glass	SemiDiam	Conic
OBJ	**Standard**	**Infinity**	**Infinity**		**Infinity**	**0.000**
1	**Standard**	**-411**	**29.4**	**BK7**	**150**	**0.000**
2	**Standard**	**-428**	**1416.8**		**155**	**0.000**
3	**Standard**	**-2165.5**	**-1106.02**	**Mirror**	**220**	**0.000**
IMA	**Standard**	**-1080**			**46**	**0.000**

Koeficienty asférického rozvoje 2. konvexní plochy menisku: Koeficient R^2 0
Koeficient R^4 4.6E-12
Koeficient R^6 -1E-16
Koeficient R^8 -5E-22
Koeficient R^10 -3E-27

Tabulka 16. Parametry Maksutovovy komory s asférickou konvexní plochou menisku.



Obrázky 49 a 50. Spotdiagramy a sférochromatická vada Maksutovovy komory s asférickou konvexní plochou menisku, opravující vady vyšších řádů.



Obrázky 51 a 54. Phase Ronchigramy a Ronchigram jednoho z nejlepších komerčních čtyřčočkových objektivů o průměru 106 mm a ohniskové vzdálenosti 530 mm.