

## Katadioptrické soustavy Argunova, Popova a Klevcova.

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 dvojjzradlovými soustavami Argunova, Popova a Klevcova, s meniskovými korektory ve sbíhavém svazku, vloženými poblíž sekundárních zrcadel.

Takové soustavy umožňují konstrukci přístrojů s vysokým stupněm korekce optických vad. Několik dalekohledů tohoto typu se dnes komerčně vyrábí a patří k nejlépe vykorigovaným katadioptrickým soustavám.

### Catadioptric systems of Argunov, Popov and Klevcov.

This paper deals with two-mirror systems of Argunov, Popov and Klevcov which use meniscus correctors in convergent beam of light placed near their secondaries.

These systems make possible to construct of highly aberration corrected devices. Several telescopes of this type are produced commercial and belong to the best corrected catadioptric systems.

#### 1. Úvod

V posledních letech se na trhu objevila řada zajímavých katadioptrických soustav. Jejich charakteristickým rysem je čočkový korektor v blízkosti sekundárního zrcadla, kterým světlo prochází dvakrát.

Existuje jen velmi málo článků, které se zabývají optickými vadami těchto typů dalekohledů. Naše práce porovnává zbytkové vady několika základních soustav tak, jak se historicky vyvíjely.

Výpočty jsou provedeny pro jednotný rozměr soustav o průměru 400 mm a ohniskové vzdálenosti 4000 mm. Jsou ukázány i varianty s korektory pole, umístěné poblíž ohniskové plochy.

#### 2. Stručná historie vývoje

Dvojjzradlové katoptrické systémy, Gregory a Cassegrain, byly objeveny ve druhé polovině 17. století, ale do počátku 20. století se nevyvíjely.

Až v roce 1905 Schwarzschild navrhl řešení dvojjzradlového anastigmatu, složené ze dvou konkávních hyperboloidických zrcadel. Soustava opravovala otvorovou vadu, komu i astigmatismus. Její stavební délka vycházela velmi dlouhá a v praxi se neuplatnila.

Reálnou soustavu, složenou z elipsoidálního primárního zrcadla a sekundárního ve formě Manginova zrcadla, se podařilo navrhnout až v roce 1913 Sampsonovi [1].

Ve dvacátých letech vznikl aplanatický dalekohled Ritchey-Chrétien, který se později dočkal velkého uplatnění, zvláště u velkých a středních průměrů dalekohledů.

V tomto období se též objevila řada návrhů dvojjzradlových systémů se sférickými zrcadly a dvojjčočkovými korektory, avšak ty se většinou díky konstrukční složitosti nerealizovaly [1],[2].

#### 3. Argunovovy soustavy

V první polovině šedesátých let 20. století vychází práce profesora Argunova z Oděsy, ve které autor navrhl dalekohled se sférickým primárním zrcadlem a se sekundárním složeným ze dvou členů vyrobených z různých skel [1],[2],[3].

Prvním členem byla čočka, ke které byl přitmělen druhý - Manginovo zrcadlo. Dalekohled byl technologicky snadno vyrobitelný, všechny jeho plochy byly sférické.

Argunovův návrh měl při světelnosti 1/10 sférochromatickou vadu na úrovni dobrého apochromátu. Dominantní mimoosová vada byla velká koma. Zbytkové vady neumožnily výrobu velkého a světelnějšího přístroje s větším zorným polem.

Pro zlepšení své soustavy profesor Argunov navrhl čočky korektoru rozdělit na dvě, vyrobit je ze stejného skla a přidat k nim samostatný sférický sekundár. Tímto způsobem radikálně opravil sférochromatickou vadu a komu. Dominantní mimoosovou vadou byl astigmatismus a chromatismus zvětšení. Tento korektor se nazývá izochromatický.

U některých řešení dvojčočkového korektoru v blízkosti sekundárního zrcadla nastaly problémy se vznikem nežádoucích reflexů, které bylo nutné vhodnými antireflexními vrstvami zredukovat.

Za jedno z nejlepších řešení Argunovova dalekohledu je považováno to, jenž má na čočkách korektoru středy křivosti ploch, které jsou konkávní směrem k ohnisku. U tohoto typu je značně potlačen vznik reflexů, jejichž sečná vzdálenost vychází blízko ohniskové ploše.

Existuje řada jak meniskových, tak i nemeniskových řešení korektoru, vhodných pro výrobu.

Velice zajímavé je provedení korektoru, které má vnější poloměry křivosti ploch stejné. Jeden z nich je konvexní a druhý konkávní. Vnitřní poloměry křivosti jsou velmi dlouhé - řádově metry.

Výhodou Argunovovy izochromatické soustavy je především to, že její dvojčočkový korektor před sekundárním zrcadlem je složen ze dvou tenkých čoček, jejichž optické vlastnosti příliš nezávisí na jejich tloušťce. To umožňuje vyrábět čočky s menšími nároky na dodržení středové tloušťky.

Jeden z největších přístrojů tohoto typu je umístěn na Slovensku na observatoři u Kolonice ve Vihorlatském pohorí. Má průměr primárního zrcadla 1000 mm a je využíván pro fotometrii hvězd.

#### 4. Popovova soustava

Řešení Argunovovy soustavy se stejnými poloměry křivosti vnějších ploch korektoru, jedné konvexní a druhé konkávní, našel i profesor Popov [1]. Ten nahradil korekční dublet jediným meniskem s mírně rozdílnými poloměry křivosti ploch. Všechny plochy soustavy byly opět sférické.

Dalekohled tohoto schématu je velice jednoduchý a snadno se vyrábí, kritický parametrem je pouze rozdíl poloměrů křivosti a tloušťka menisku. Aby systém eliminoval vady vyšších řádů, musí se středová tloušťka menisku volit dostatečně silná, (20 -25) % jeho průměru.

Absorbce světla, které prochází tímto členem dvakrát, je u malých dalekohledů zanedbatelná, avšak u velkých jsou světelné ztráty značné. Z tohoto důvodu je Popovův systém pro průměry nad 600 mm méně výhodný oproti systému Argunova s izochromatickým korektorem.

Popovův dalekohled zobrazuje na optické ose stigmaticky v celém viditelném oboru, optimálně zkorigovaná sférochromatická vada je mírně nedokorigovaná. Mimo optickou osu má velkou komu.

Ve srovnání s ekvivalentním Schmidt-Cassegrainem s primárním zrcadlem o světelnosti 1:2 a s ekvivalentní ohniskovou vzdáleností 1:10 není Schmidt-Cassegrain schopen stigmatického zobrazení na optické ose kvůli chromatické vadě, způsobené Schmidtovou deskou. Navíc, Popovova soustava má proti tomuto Schmidt-Cassegrainu poloviční komu. Lze ji opravit vložením dvoučočkového korektoru do sbíhavého svazku před její ohnisko.

Popovova práce o své soustavě byla publikována v roce 1968.

#### 5. Klevcovův systém

Začátkem sedmdesátých let 20. století přišel J.A.Klevcov na další typ těchto dalekohledů [1],[2]. Jeho optická soustava se skládala ze sférického primárního zrcadla, meniskového korektoru a Manginova zrcadla. Byla spočtena řada návrhů korektorů, z nichž nejvýhodnější má plochy konvexní k ohnisku soustavy. U těchto návrhů jsou minimalizovány reflexy vznikající na plochách.

Původní Klevcovův návrh korektoru byl izochromatický, skla menisku a Manginova zrcadla byla ze stejného materiálu. Později autor zjistil, že vhodnou volbou kombinace exotických typů skel - LaK, LaF, lze podstatným způsobem redukovat osový chromatismus, rozšířit pracovní spektrální obor nebo umožnit výrobu soustavy o světelnostech až 1:6.5 – 1:7.

Výsledný profil sférochromatické vady základní Klevcovovy soustavy je podobný profilu, vytvářeného soustavami s menisky. Podrobnou analýzou řešení se ukázalo, že lze dosáhnout korekcí sférochromatické vady s úplným odstraněním vad vyšších řádů, podobně jak tomu je u dalekohledů se Schmidtovými deskami. Mají vykompenzované vady vyšších řádů, dokonce existují taková řešení, kde paprsky ze dvou zón mají společnou sečnou vzdálenost. Této korekce se dosahuje pomocí systémů dvou asférických desek z různých materiálů, což je velice obtížné.

Dominantní mimoosovou vadou je astigmatismus, který lze vhodným korektorem eliminovat.

Porovnáme-li základní Klevcovovu soustavu s ekvivalentním dalekohledem typu Ritchey-Chrétien, základní Klevcovova má dvojnásobně větší zbytkový astigmatismus.

Výhodou Klevcovovy soustavy je to, že ji lze navrhnout s velice světelným sférickým sekundárem, 1:1,5 a volit koeficienty prodloužení dalekohledu v širokém rozsahu.

Tím se získají jak světelné soustavy s velkým, téměř rovinným zorným polem, tak i soustavy o velké ekvivalentní ohniskové vzdálenosti s velice malým (20 %) centrálním stíněním.

Při optimalizaci Klevcovovy soustavy se zpravidla za proměnné parametry volí i tloušťky Manginova zrcadla a meniskového korektoru. U většiny takto spočtených soustav vychází středová tloušťka meniskového korektoru vysoká, (20 – 30) % jeho průměru a naopak velice tenké Manginovo zrcadlo, (8-10) % svého průměru. Taková středová tloušťka u odrazného prvku je z mechanických důvodů zcela nedostatečná, zvláště, je-li na výrobu Manginova zrcadla použito skel LaK, LaF. Proto je nutné volit tloušťku Manginova zrcadla kompromisně. Klevcovovy soustavy lze též snadno vylepšit s korektory pole a sférochromatické vady.

## 6. Katadioptrické varianty s korektory

Zlepšit mimoosové vady u těchto soustav lze pomocí korektorů umístěných ve sbíhavém svazku poblíž ohniska soustavy. V našich prezentovaných soustavách byly navrženy izochromatické korektory nebo jim blízké, které radikálně zlepšují zobrazení. Všechny plochy soustav jsou přísně sférické. V současnosti se komerčně vyrábějí přístroje i s asférickými primárními zrcadly, hlavně pro fotografické účely.

Za článkem jsou ukázány spotdiagramy základních příkladů soustav o průměrech 400 mm a ohniskových vzdálenostech 4000 mm bez i s izochromatickým korektorem. V našich návrzích bylo použito jako materiálu pro korektory sklo BK7.

Vhodnou volbou skel se tyto soustavy dají ještě dále zlepšit. Při navrhování korektorů komy a astigmatismu se často vybírá kombinace skel s blízkými indexy lomu, ale s rozdílným Abbeho číslem. Tak lze minimalizovat sférochromatickou vadu i chromatismus zvětšení.

Při použití exotických skel (např. LaK, LaF) je však nutné brát ohled na jejich chemickou stabilitu, může se jednat o velmi korozivní skla.

Výše popisované soustavy mají dostatek parametrů pro kompenzaci optických vad. Dojde-li k nepřesnostem při výrobě, pak lze změnou vzdáleností mezi nimi tyto vady dokompenzovat.

Argunovova soustava je vhodný systém pro výrobu velkého dalekohledu.

Po technologické stránce nepředstavuje velké problémy, které by nedokázal zvládnout i nepříliš zkušený, ale pečlivý optik i v průměrech primárního zrcadla okolo 1000 mm.

Dodatečně lze navrhnout i vhodné reduktory ohniskové délky, které u přístroje rozšíří velikost zorného pole.

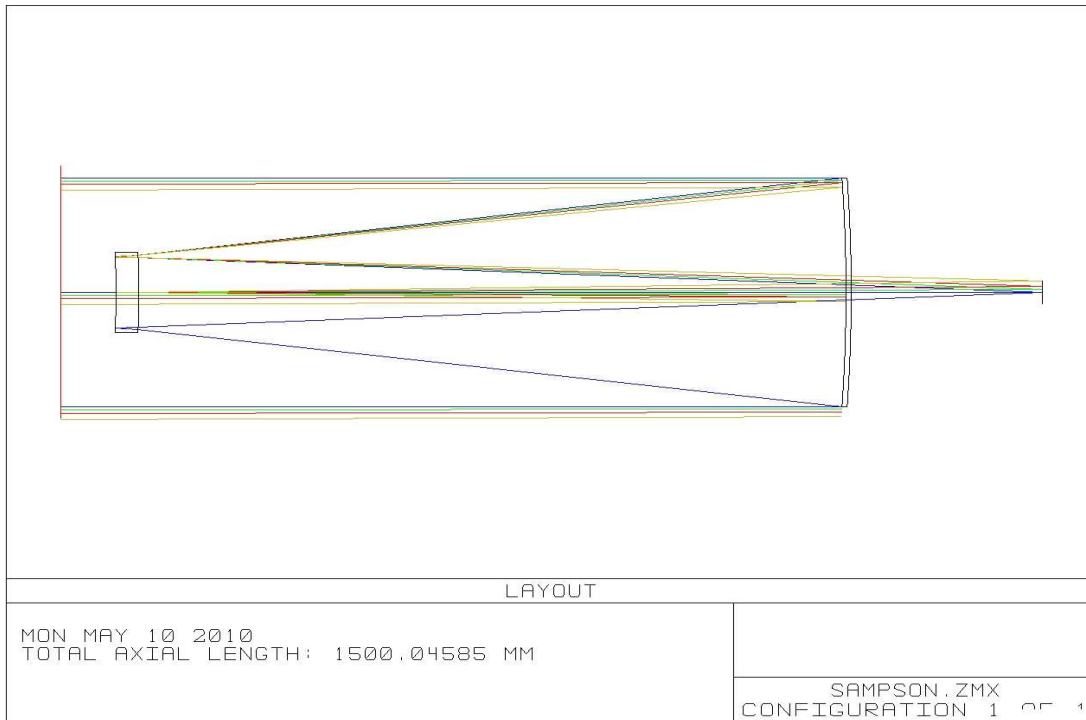
Přehled schémat soustav i jejich spotdiagramů je za textem.

Výpočty byly provedeny v programu Zemax.[4]

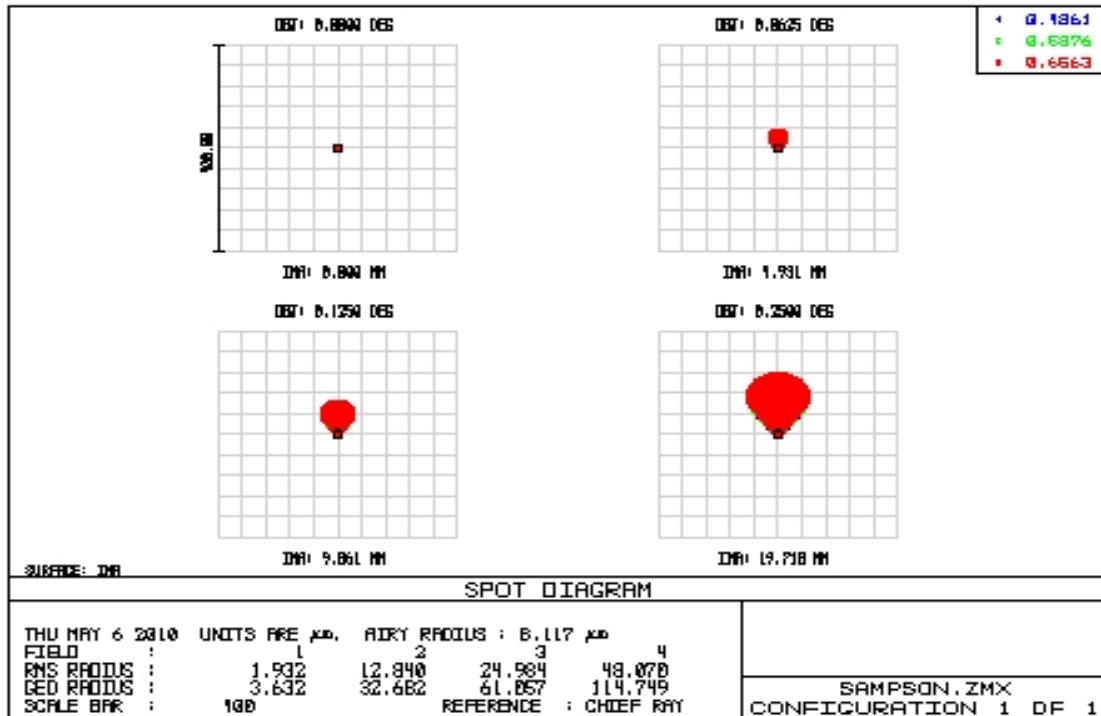
Práce je řešena jako dílčí část úkolu „Podpora projektů cílového výzkumu AV ČR“, číslo 1SQ100820502.

## Literatura

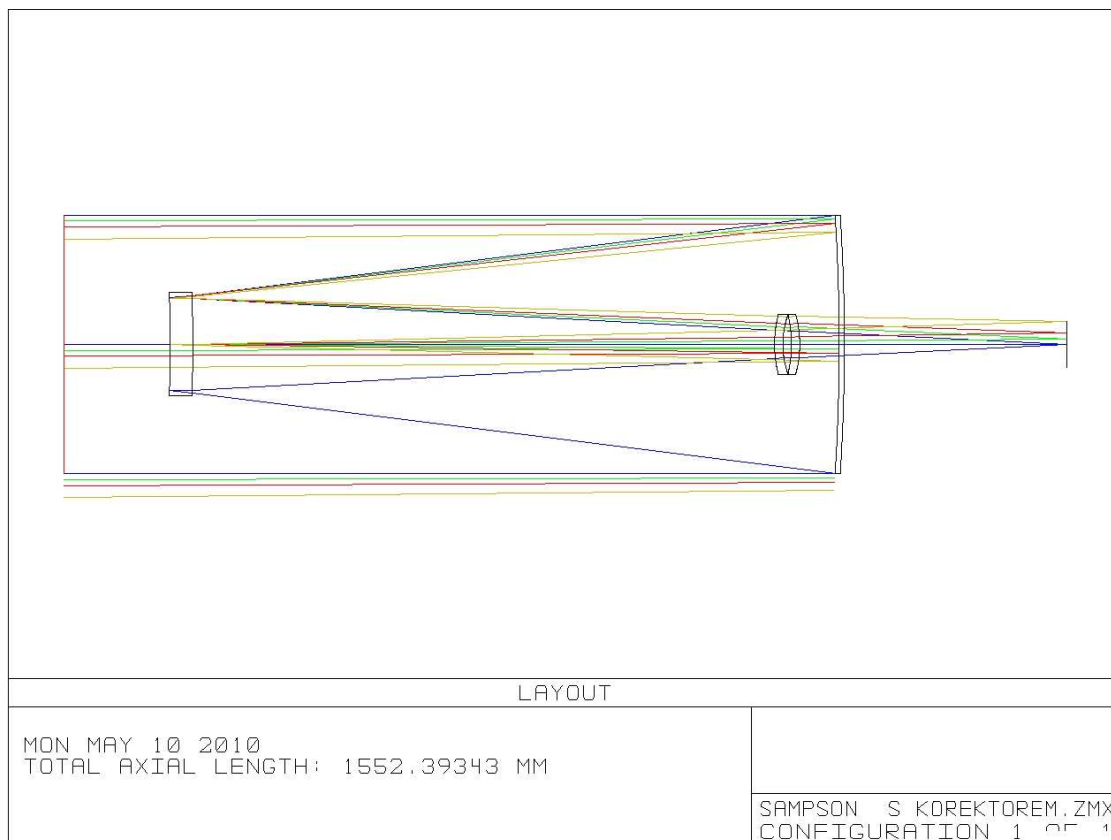
- [1] Perspektivy razvitija Kassegrenovskich teleskopov s korektorom v schodjaščichsja pučkach lučej, J.A.Klevcov, Optičeskij žurnal, tom 71, No.10, 2004
- [2] [http://vega.inp.nsk.su/articles/equipment/klvsys/Klev\\_sys.html](http://vega.inp.nsk.su/articles/equipment/klvsys/Klev_sys.html), Ju.A. Klevcov, 2000
- [3] N.N.Michelson, Optičeskije teleskopy, Izdatelstvo “Nauka“, Glavnaja redakcija fiziko-matematičeskij literatury, Moskva, 1976
- [4] Optical design Program Zemax, User’s Guide, Version 10, Focus Software, Inc., Tucson, 2005



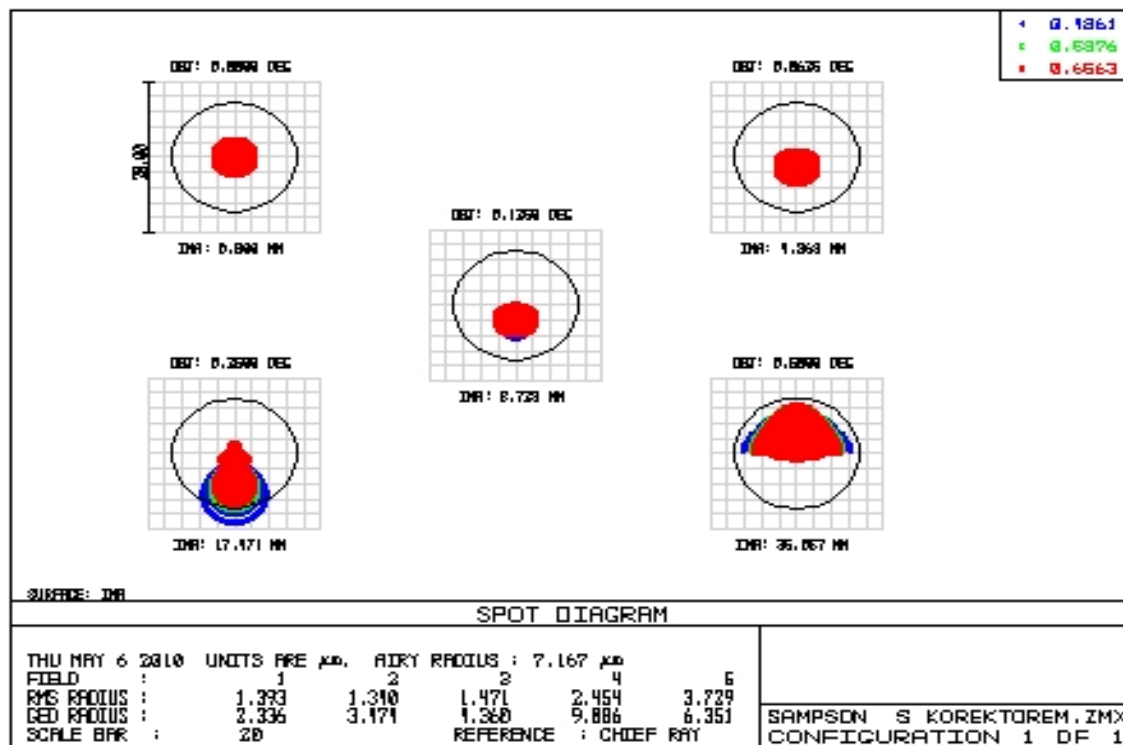
Obr.1. Schema dalekohledu Sampsona



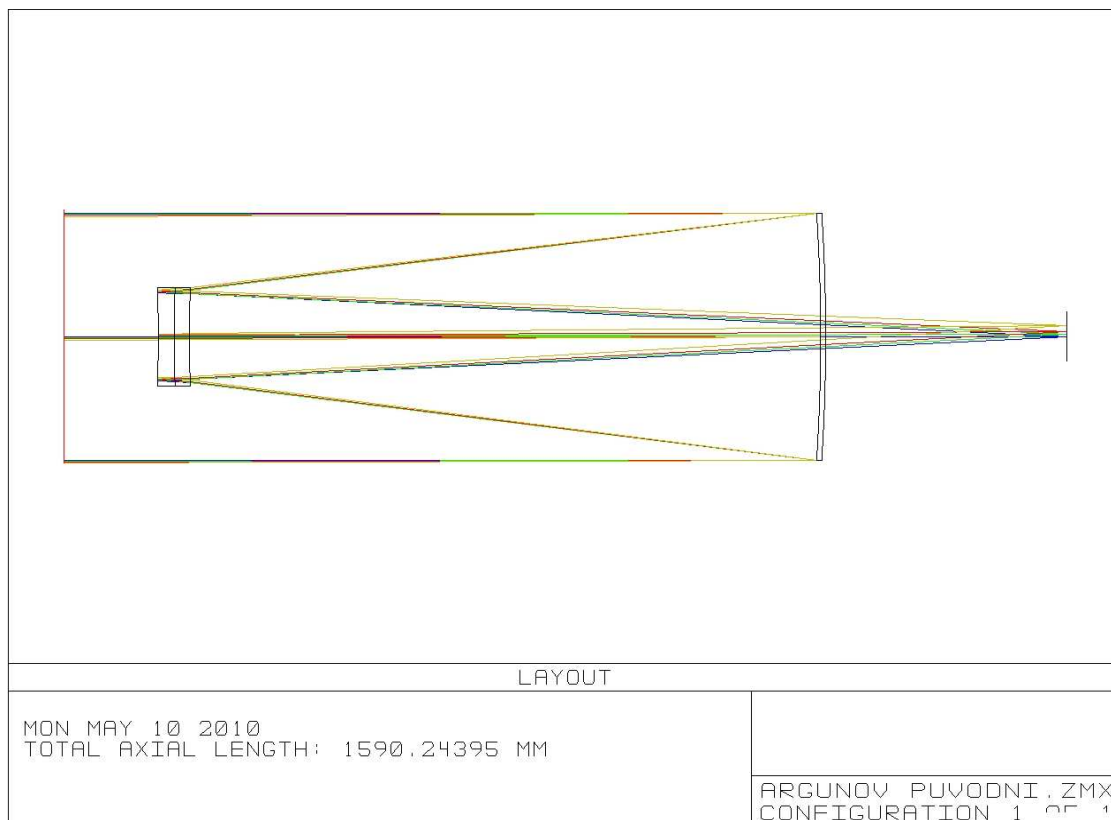
Obr.2 Spotdiagramy dalekohledu Sampsona



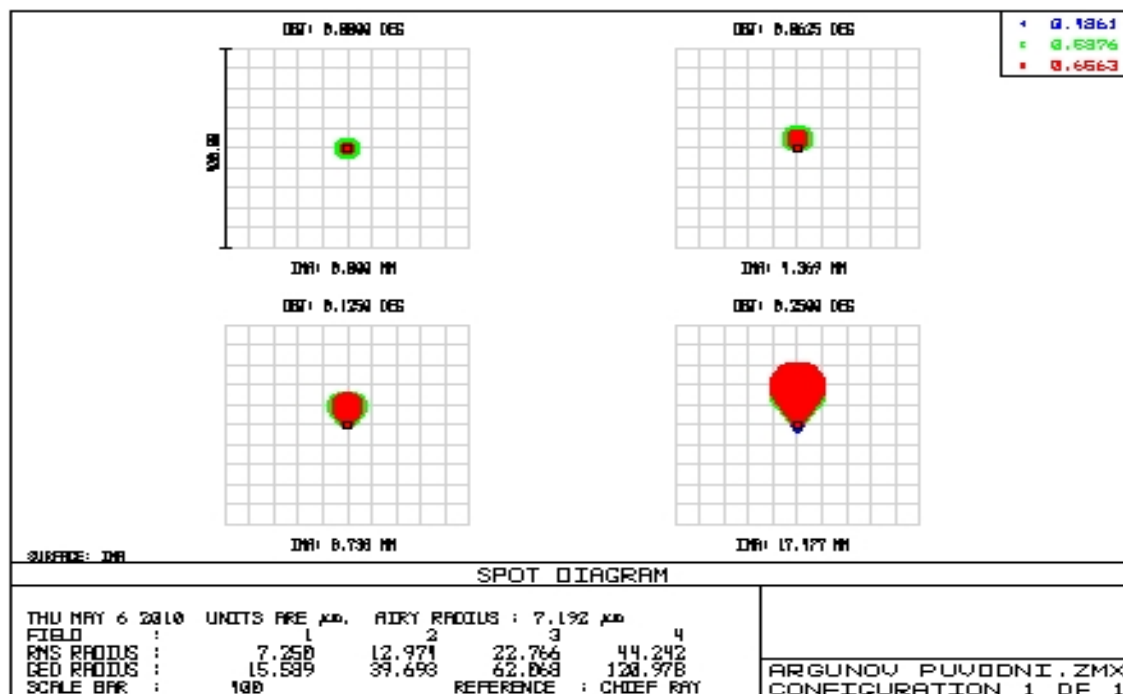
Obr. 3. Schema dalekohledu Sampsona s korektorem



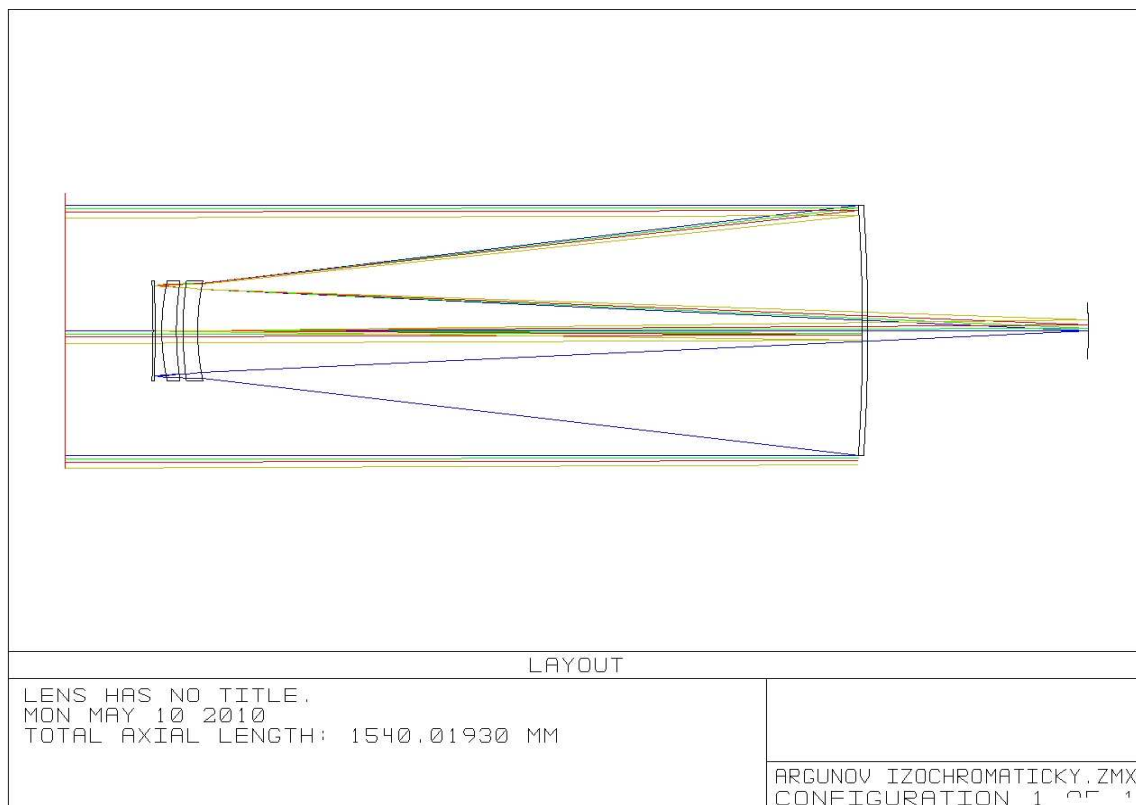
Obr. 4. Spotdiagramy dalekohledu Sampsona s korektorem



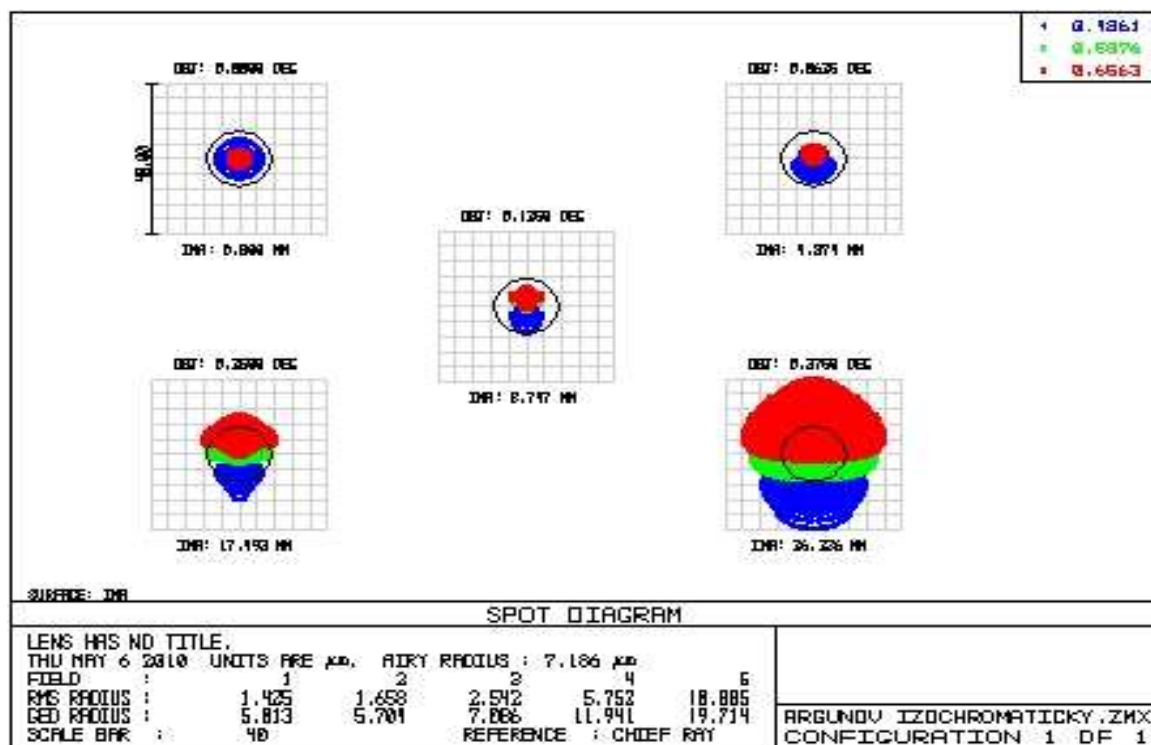
Obr. 5. Schema pôvodného návrhu ďalekohľedu Argunova



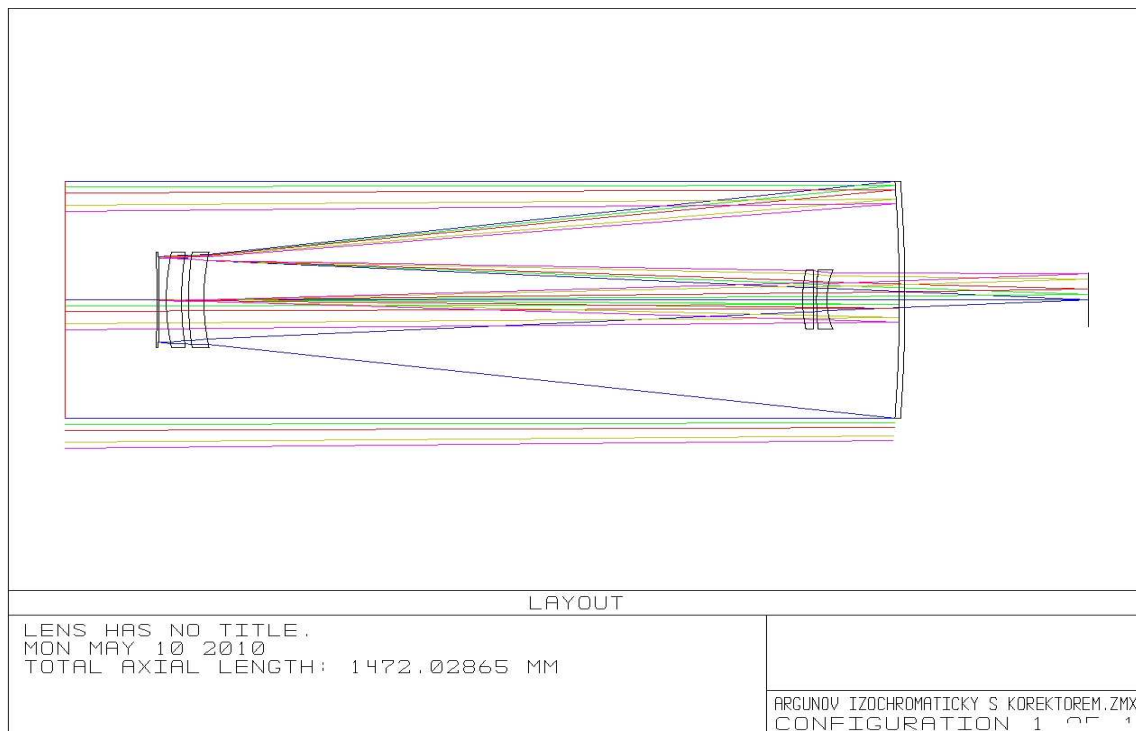
Obr. 6. Spotdiagramy pôvodného návrhu ďalekohľedu Argunova



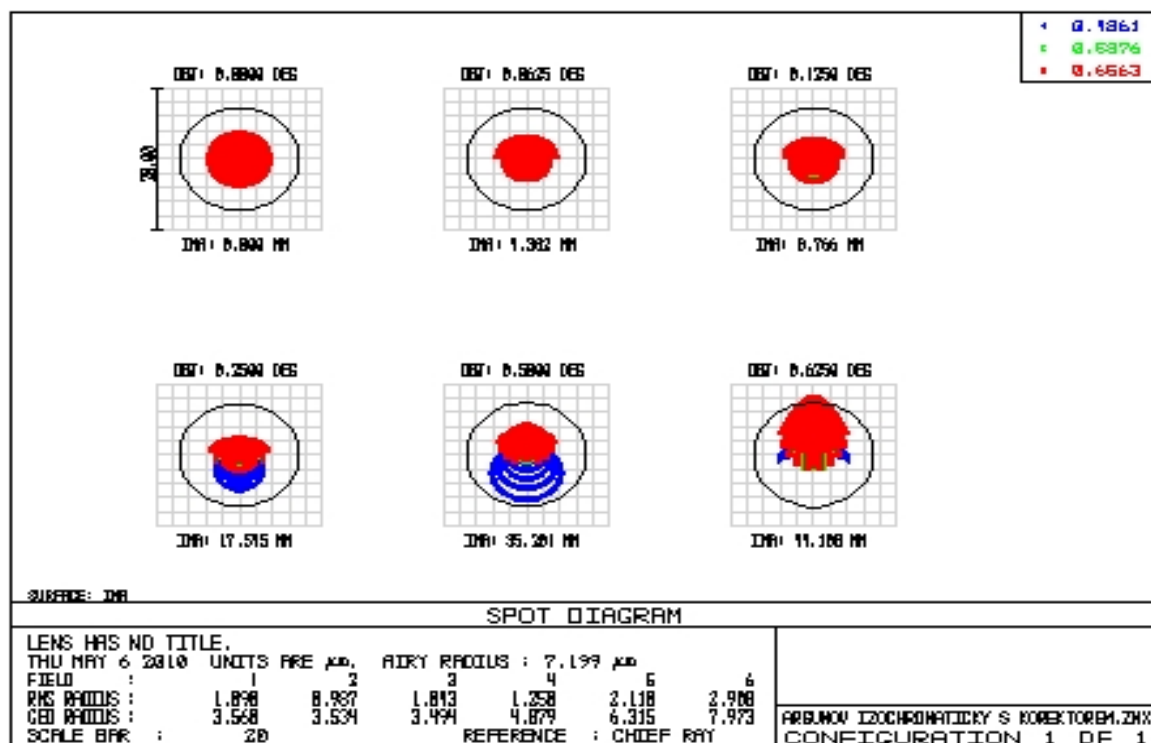
Obr.7 . Schema dalekohledu Argunova s izochromatickým korektorem



Obr. 8 . Spotdiagramy dalekohledu Argunova s izochromatickým korektorem

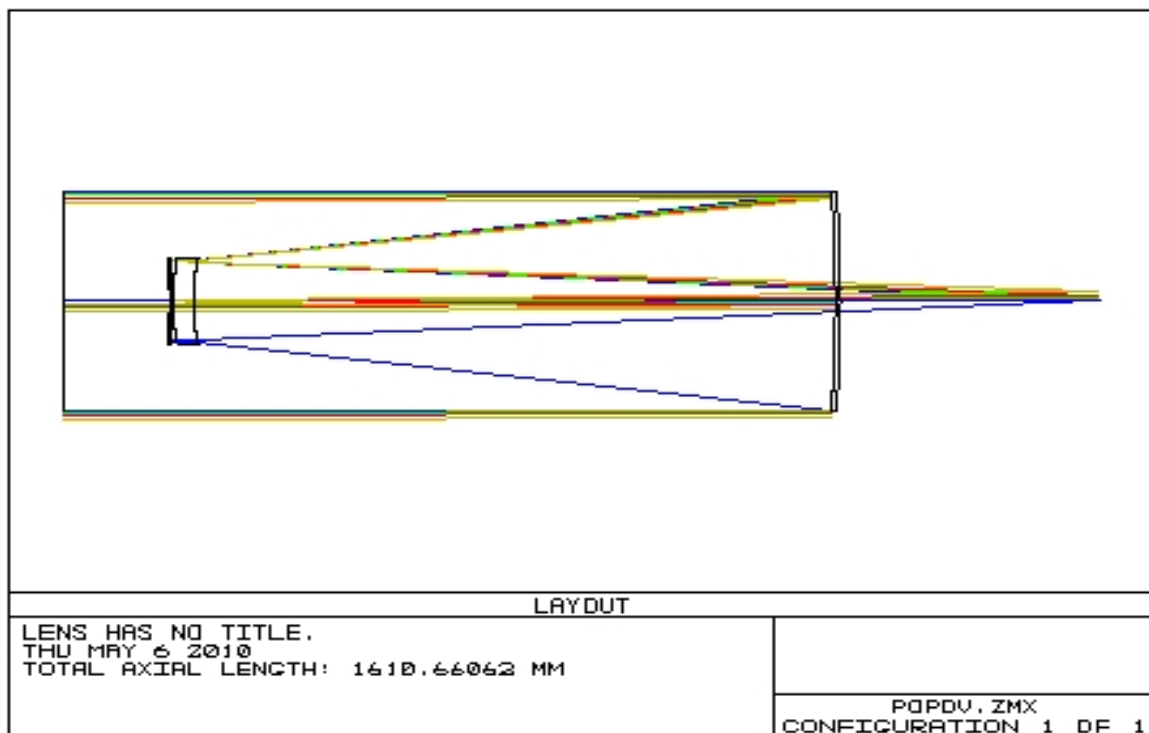


Obr . 9 . Schema dalekohledu Argunova s izochromatickým korektorem a korektorem pole

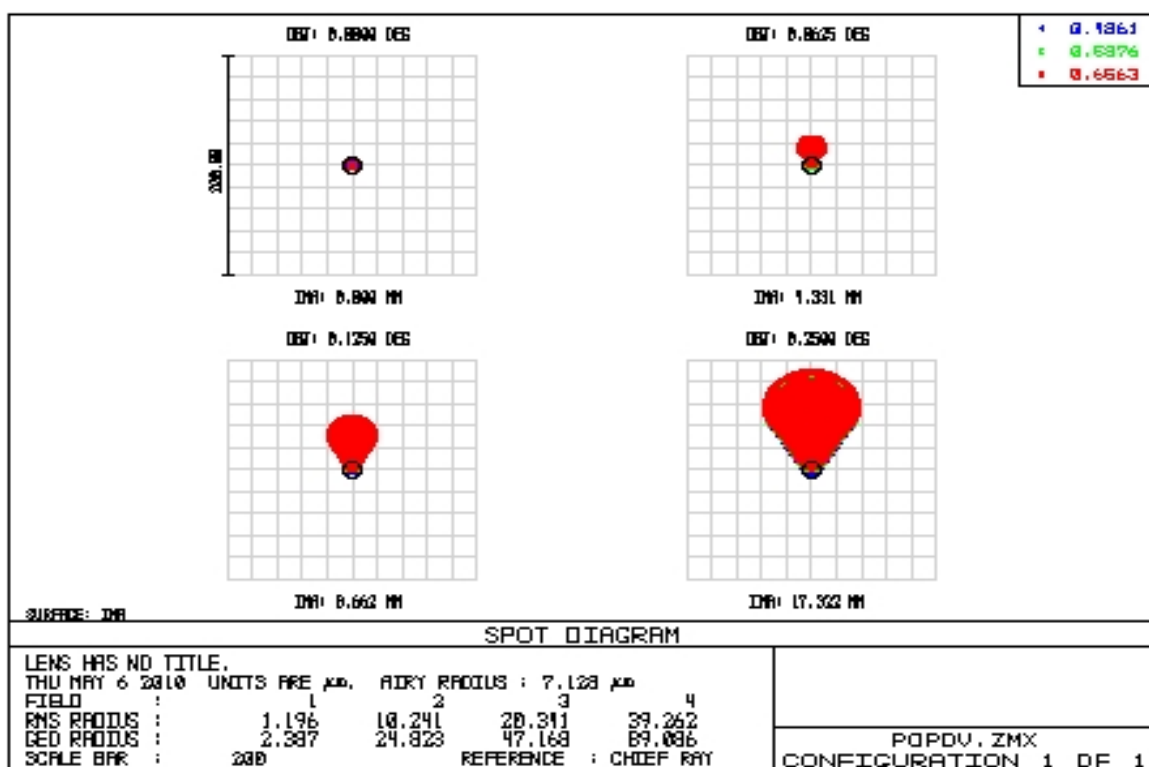


Obr . 10. Spotdiagramy dalekohledu Argunova s izochromatickým korektorem a korektorem pole

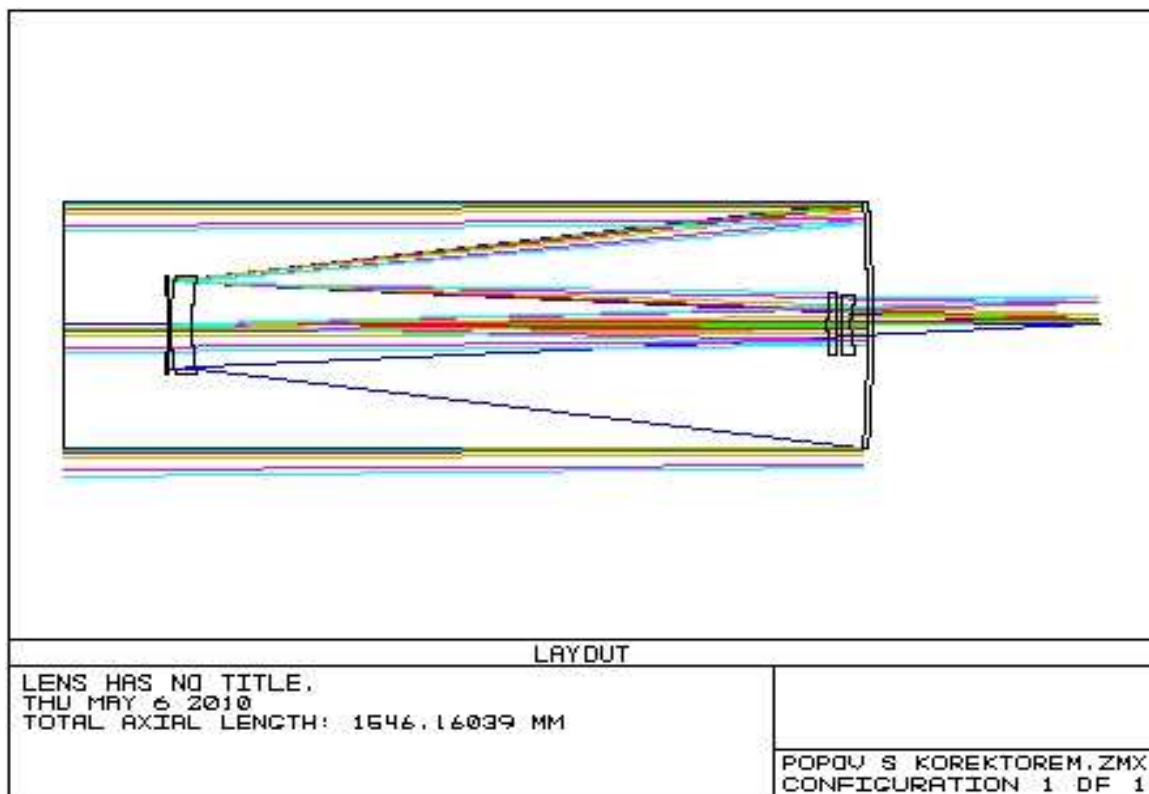




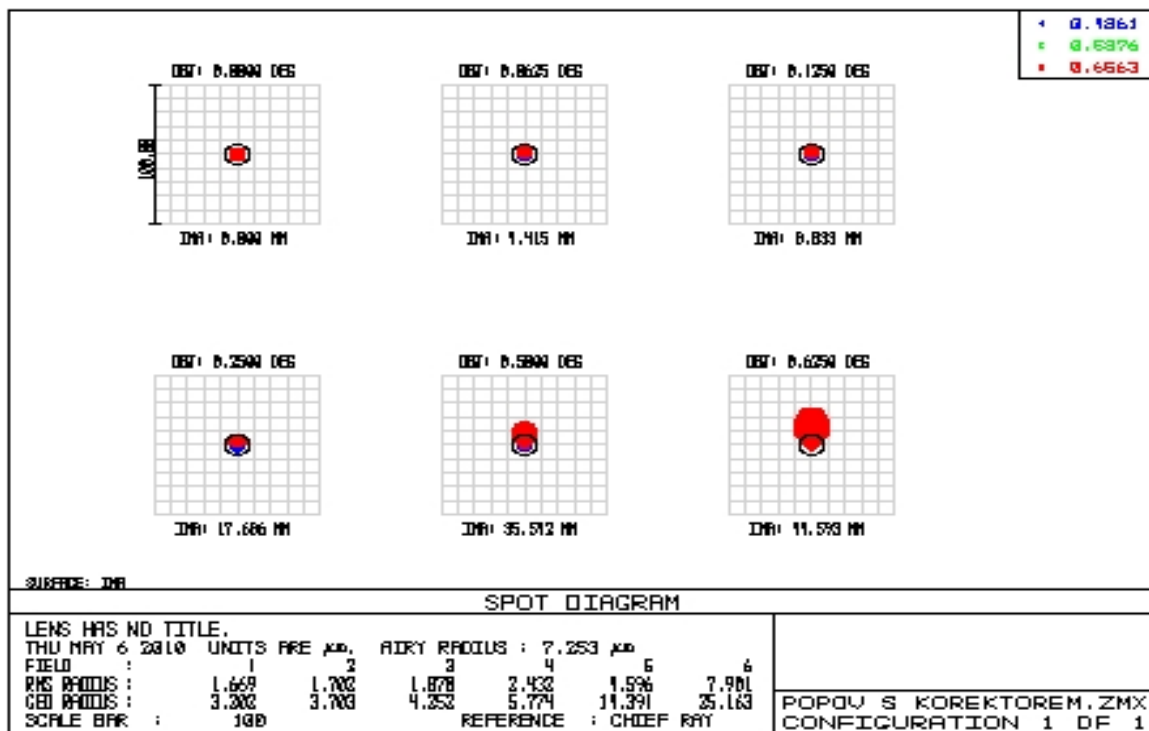
Obr.11 . Schema dalekohledu Popova



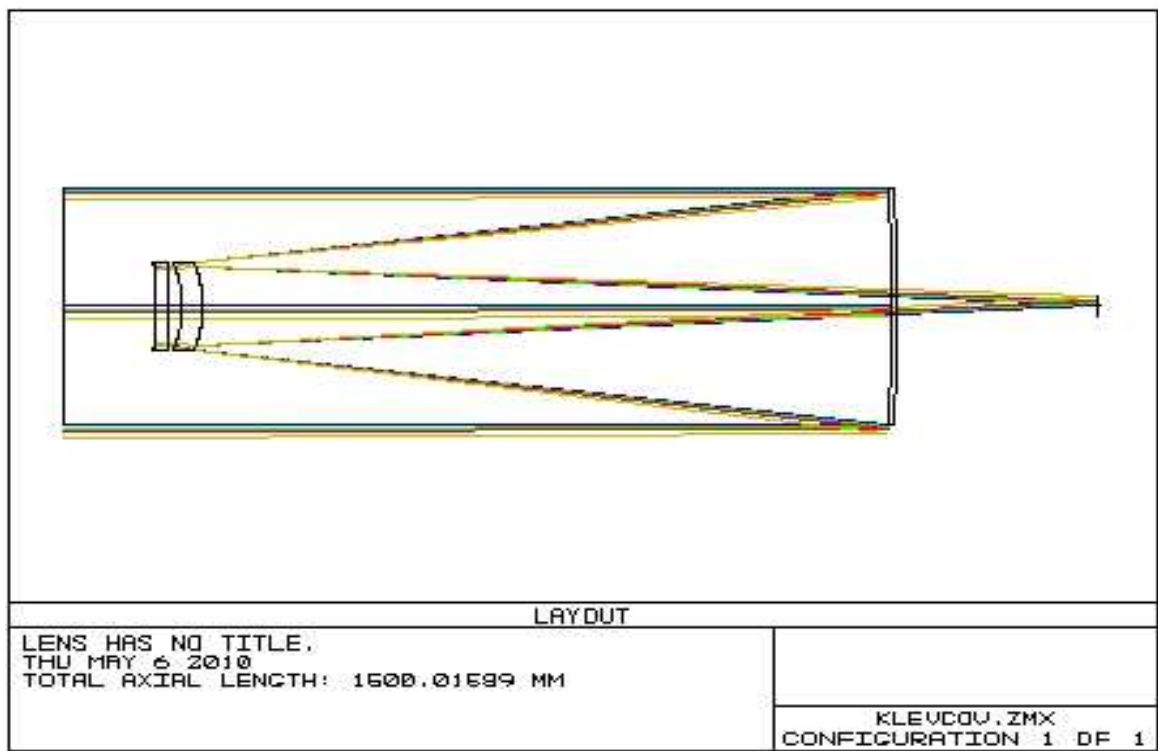
Obr. 12 . Spotdiagramy dalekohledu Popova



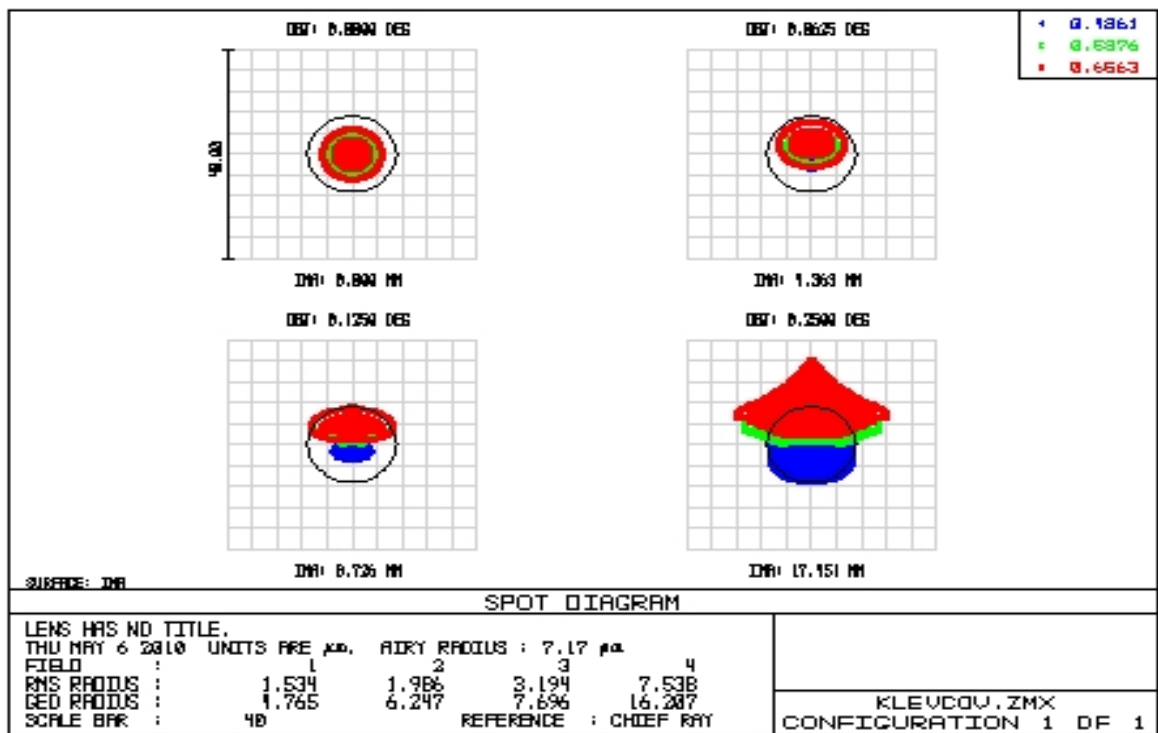
Obr. 13 . Schema dalekohledu Popova s korektorem pole



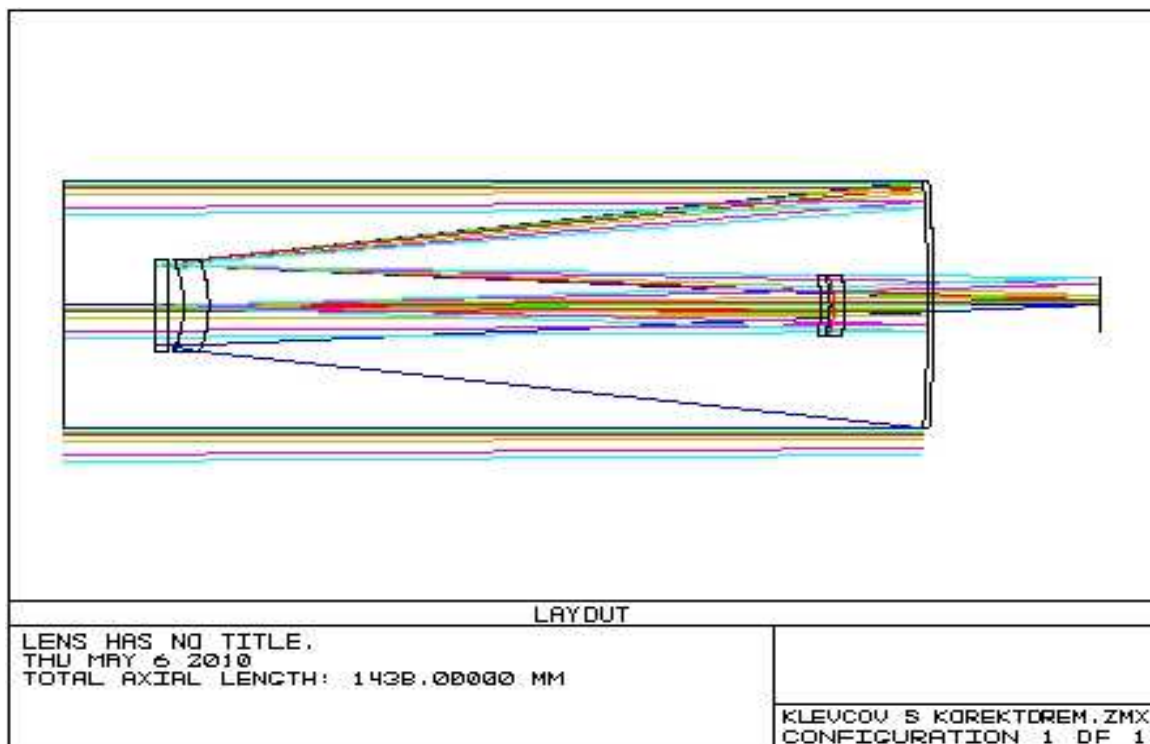
Obr. 14 . Spotdiagramy dalekohledu Popova s korektorem



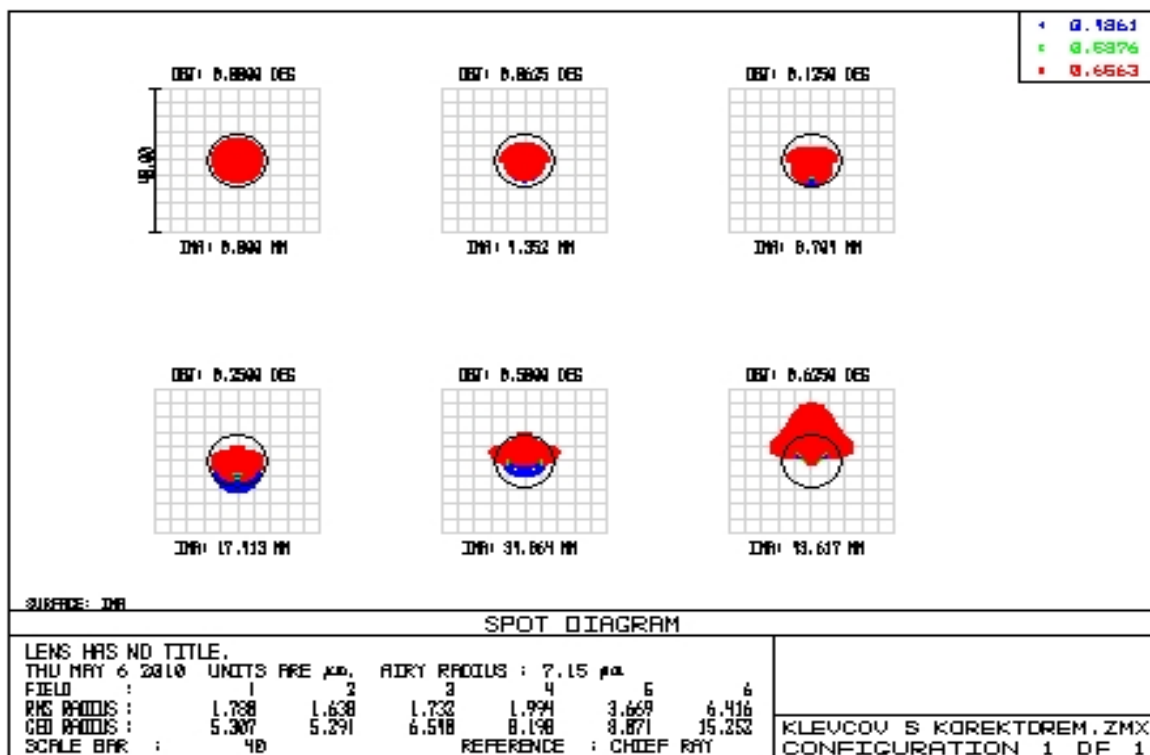
Obr. 15 Schema dalekohledu Klevcov



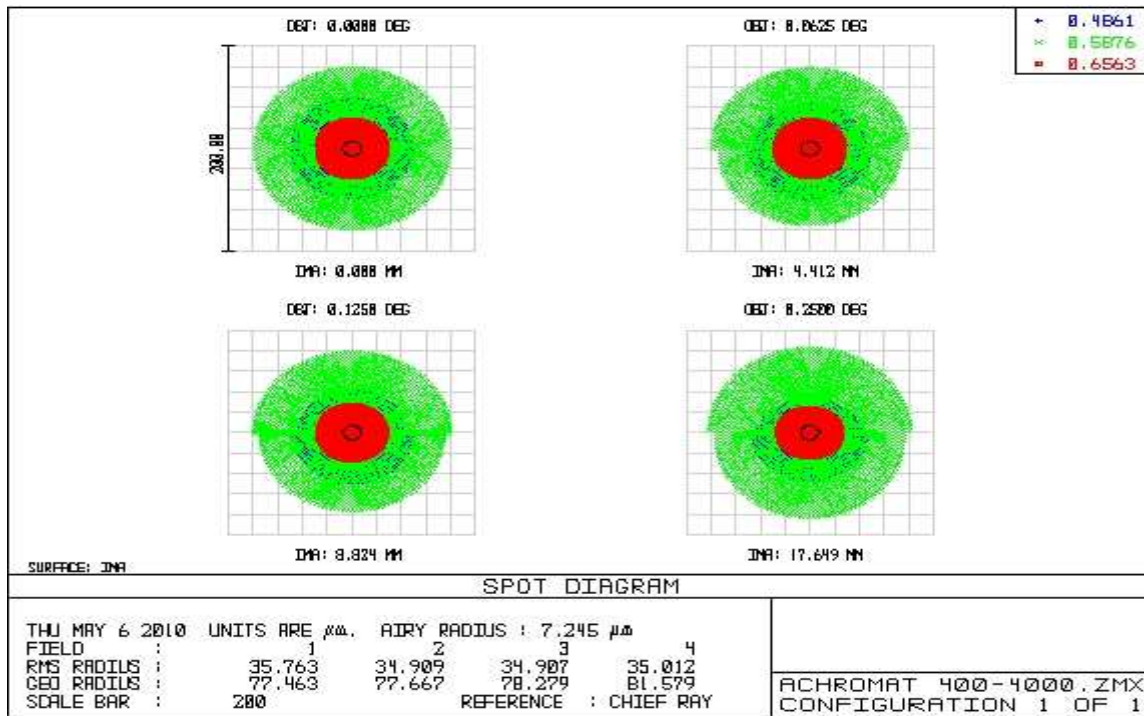
Obr. 16 Spottigramy dalekohledu Klevcov



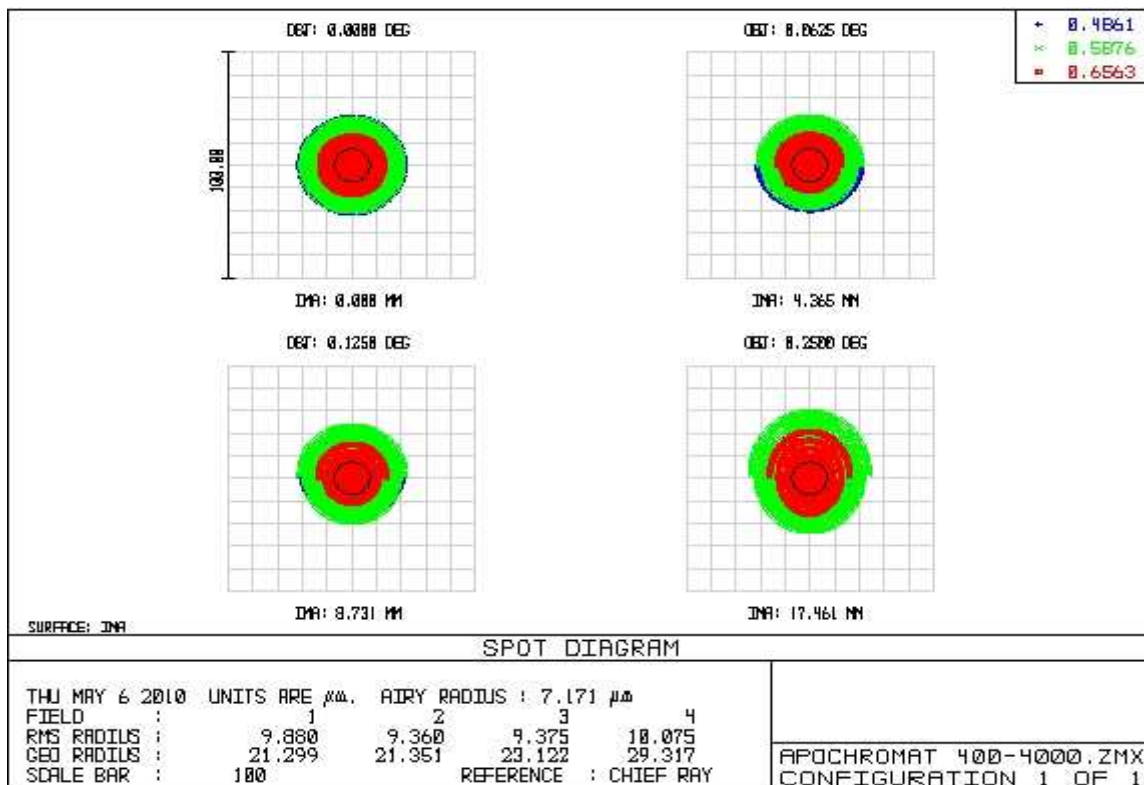
Obr.17 . Schema dalekohledu Klevcov s korektorem pole



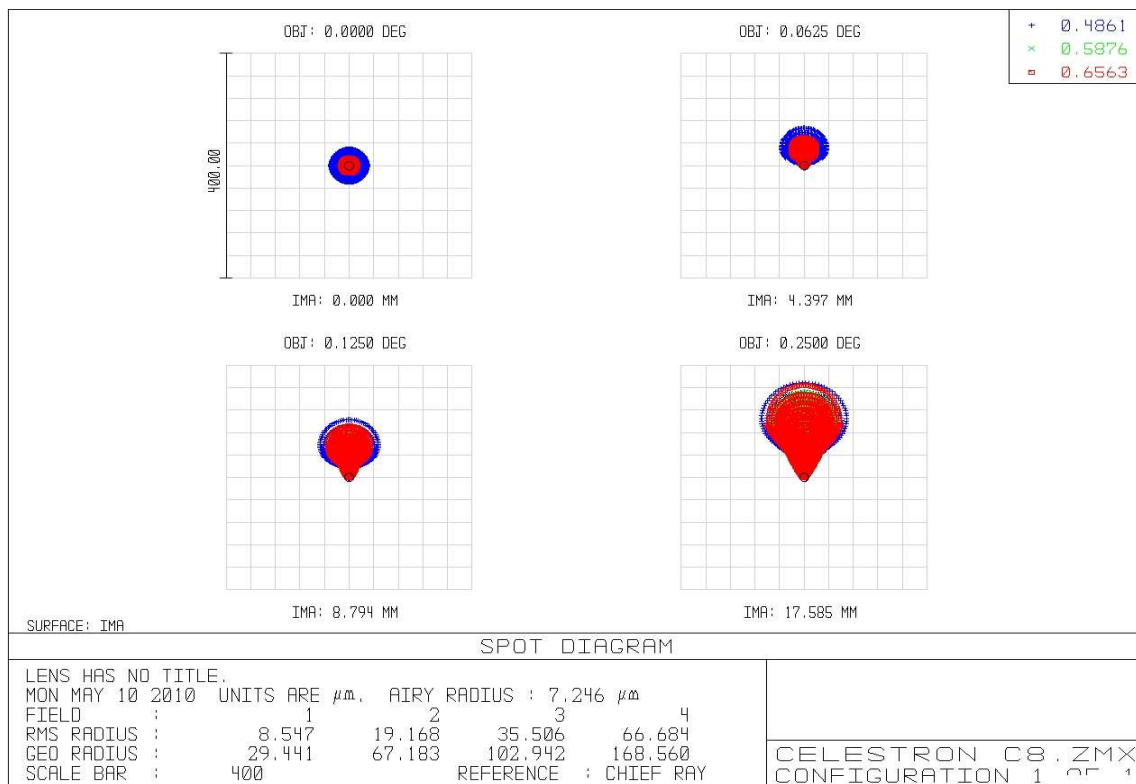
Obr. 18 . Spotdiagramy dalekohledu Klevcov s korektorem pole



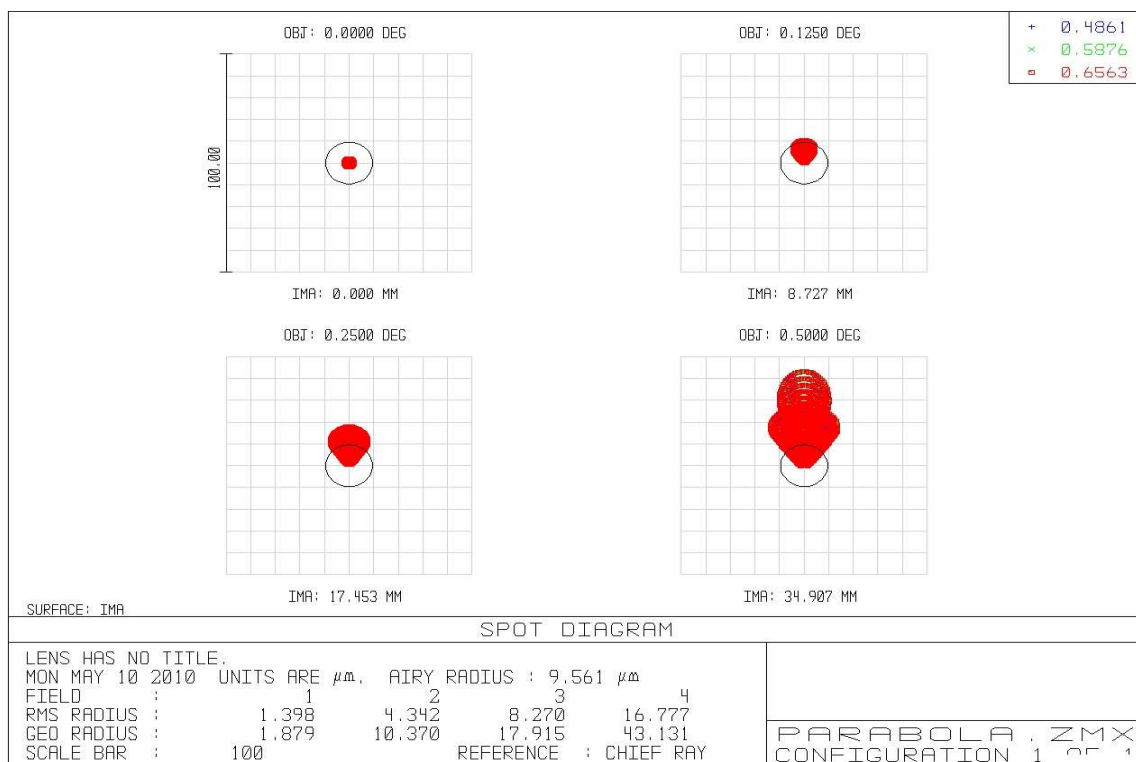
Obr . 19 . Spotdiagramy achromatického dubletu ze skel BK7-F2



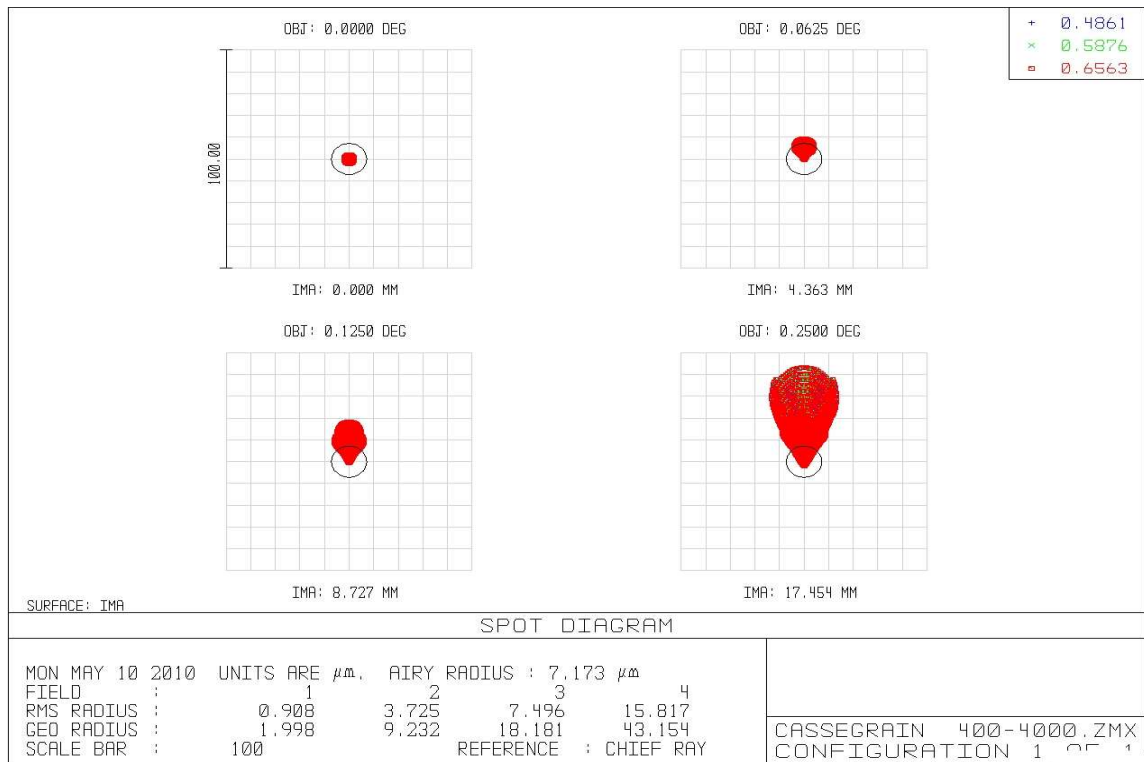
Obr . 20 . Spotdiagramy apochromatického dubletu ze skel KF3-FPL 53



Obr. 20 . Spotdiagramy komerčního Schmidt-Cassegrainu



Obr. 21 . Spotdiagramy Newtonu



Obr. 22 . Spotdiagramy Cassegrainu