

Zobrazovací vlastnosti několika historických dalekohledů ze 17. století

Zdeněk Rail, Daniel Jareš, David Tomka, Roman Doleček

Ústav fyziky plazmatu AV ČR, v.v.i - Toptec, Skálova 89, 51101 Turnov, e-mail : vod@ipp.cas.cz

www.toptec.eu

Tento referát se zabývá zobrazovacími vlastnostmi několika historických dalekohledů ze 17. století, u nichž známe jejich optické parametry.

Jedná se o přístroje, jejichž výrobcem byl s vysokou pravděpodobností Galileo Galilei a bratři Constantine a Christian Huygensovi.

Imaging Properties of Several Telescopes of 17th Century

This paper deals by imaging properties of some historical telescopes of 17. century which optical parameters are known to us.

Some of them were probably made by Galileo Galilei and brothers Constantine and Christian Huygens.

1. Úvod

Dnes si již málokdo uvědomuje význam dalekohledu a jeho použití v astronomii.

Na jeho princip přišly děti holandského očního optika Jana Lippersheye při náhodné hře s čočkami. [1] V roce 1608 si všimly, že pokud se vhodně postaví určitá kombinace čoček za sebou, vznikne soustava, která úhlově zvětšuje obrazy vzdálených předmětů. Když tento objev sdělily otci, neváhal a přístroj dal okamžitě zpatentovat

Jan Lippershey dokázal využít svého vynálezu komerčně, dalekohledy začal vyrábět a nabízet je na svých cestách v řadě evropských zemí.

Zpráva o zázračném přístroji, přibližující vzdálené objekty, se v létě roku 1609 dostala i k matematikovi padovské univerzity, Galileu Galileimu. [1], [2]

Koncem července 1609 mu v Benátkách jeho přítel a velmi vlivný politik Sarpí podal zprávu o existenci dalekohledu, kterou potvrdil z Paříže Jacques Badovere, jejich společný známý. Navíc se Galilei dozvěděl, že Jan Lippershey v nejbližších dnech bude svůj vynález prezentovat v Padově. Neváhal a okamžitě odjel do Padovy, aby se dozvěděl, že prezentace dalekohledu bude v Benátkách a dokonce i u benátského dóžete. Proto se opět vrátil do Benátek, kde se za pomoci Sarpího rozhodl Lippersheyovu audienci překazit.

Ambiciózní Galilei chtěl předvést svůj vlastnoručně vyrobený přístroj. Jakmile se vrátil zpět domů do Padovy, jen s mlhavými informacemi o principu dalekohledu začal brousit a skládat čočky tak, že ještě též večer se mu podařilo zkonstruovat přístroj s trojnásobným zvětšením.

Velice záhy vyrobil dalekohled s osminásobným zvětšením, který úspěšně předvedl benátským senátorům a dóžeti.

Na konci roku 1609 již vlastnil přístroj s třicetinasobným zvětšením, se kterým vykonal 7.1.1610 své památné pozorování Jupitera. [1], [2] Při pohledu na něho spatřil tři hvězdičky, seřazené vedle sebe. Při dalších pozorováních si povšiml, že jejich pozice se s časem mění a navíc k nim přibyla další, čtvrtá hvězda. Zjistil, že měsíční povrch není dokonale hladký, jak hlásali stoupenci Aristotela, naopak na něm viděl krátery a horstva podobná těm, která jsou na Zemi. Zaujal ho zajímavý vzhled Saturna, avšak na vysvětlení povahy jeho prstence bylo nutné počkat ještě 45 let. Při pozorování Venuše spatřil změny její fáze podle polohy vůči Slunci. Byl fascinován pozorováním Mléčné dráhy, skládající se z ohromného množství slabých hvězd. Viděl i sluneční skvrny a málem při tom přišel o zrak.

Výsledky svých pozorování publikoval v knize „Hvězdný posel“, kterou poslal řadě vědců a významných osobností tehdejšího světa.

Knihy se dostala i do rukou Jana Keplera, kterého inspirovala v roce 1610 k napsání prvního vědeckého pojednání o dalekohledu, vidění a funkci oka. Toto dílo s názvem „Dioptrica“ vyšlo v roce 1611 v Praze.

Galileo způsobil revoluci ve vědě i filozofickém nazírání na svět. Do tehdejší doby vládl názor na vesmír v duchu řeckého filozofa Aristotela a všeobecně se přijímala Ptolemaiova soustava, v níž celý vesmír obíhal kolem Země. Galileo svým pozorováním získal dostatečné množství důkazů, aby Ptolemaiovu teorii vyvrátil.

2. Zbytkové vady jednočočkových objektivů

Dominantní zbytkovou vadou dalekohledů ze 17. století s jednočočkovým objektivem je barevná vada. [3]

Napiše-li se čočková rovnice pro plankonvexní čočku, v níž ($1/R_2 = 0$)

$$1/f = (n-1)/R_1 \quad (1)$$

potom $R_1 = (n-1) * f \quad (2)$

kde : f je ohnisková vzdálenost singletu
 n je index lomu materiálu
 R_1 je poloměr křivosti konvexní plochy čočky

Vytvoříme-li diferenciál z rovnice (2), dostaneme

$$d(R_1) = d(n) * f + (n-1) * d(f) \quad (3)$$

protože $R_1 = \text{konstanta}$, $d(R_1) = 0$

$$d(n) * f + (n-1) * d(f) = 0 \quad (4)$$

upravíme na tvar $d(f)/f = -d(n)/(n-1) \quad (5)$

z čehož plyne, že

$$d(f)/f = 1/v(d) \quad (6)$$

kde $d(f) = f(C) - f(F)$ je rozdíl sečných vzdáleností pro paprsky o dvou různých vlnových délkách – 486.1 nm (vlnová délka Fraunhoferovy čáry F) a 656.3 nm (vlnová délka Fraunhoferovy čára C) a dále $v(d)$ je Abbeho číslo, definované

$$v(d) = (n(d) - 1) / (n(F) - n(C)) \quad (7)$$

V tomto vztahu jsou $n(d)$, $n(F)$ a $n(C)$ indexy lomu skla čočky pro vlnové délky 587.6 nm, 486.1 nm, 656.3 nm.

Velikost geometrického obrazu hvězdy lze zjistit touto úvahou:

Nechť D je průměr singletu, f je jeho ohnisková vzdálenost, $d(f) = f(C) - f(F)$ rozdíl sečných vzdáleností pro spektrální čáry F a C, d_{geom} je geometrický průměr chromatického kroužku, potom platí

$$D/f = d_{\text{geom}} / 0,5 * d(f) \quad (8)$$

což lze upravit na $d_{\text{geom}} = A * D / 2 \quad (9)$

kde $A = d(f)/f = 1/v(d) \quad (10)$

V rovnici vidíme, že geometrický obraz hvězdy závisí pouze na průměru vstupní apertury singletu a na materiálu, ze kterého je vyroben. Průměr obrazu hvězdy nezávisí na ohniskové vzdálenosti objektivu.

Je-li d_{difr} průměr difrakčního kroužku hvězdy pro vlnovou délku λ roven

$$d_{\text{difr}} = f * 2,44 * \lambda / D \quad (11)$$

potom geometrický průměr chromatického kroužku d_{geom} je roven

$$d_{\text{geom}} = D / (2 * v(d)) \quad (12)$$

Rovnice (11) a (12) zdůvodňují, proč bylo nutné konstruovat dalekohledy s neachromatickým objektivem - singletem o velmi dlouhé ohniskové vzdálenosti.

Z rovnice (11) plyne, že průměr chromatického kroužku singletu d_{geom} závisí pouze na průměru čočky D a na materiálové konstantě $v(d)$ – Abbeově čísle. Znamená to, že pokud vyrobíme čočky o stejném průměru, ale o různých ohniskových vzdálenostech ze stejného materiálu, zobrazí hvězdu do chromatického kroužku o stejně velkém průměru. [3]

Z druhé rovnice je vidět, že průměr difrakčního kroužku d_{difr} se zvětšuje s ohniskovou vzdáleností čočky. Zvětšíme-li dostatečně ohniskovou vzdálenost čočky tak, aby chromatický obraz hvězdy měl blízký průměr kroužku difrakčnímu, chromatická vada přestane rušit obraz.

Většina skel, která se v 17. století používala k výrobě objektivů dalekohledů měla Abbeho číslo $v(d)$ blízké 60, protože tehdejší sklářská technologie nedokázala vyrobit dostatečně homogenní sklo o hodnotách odlišných od této hodnoty.

Sférická aberace u objektivů dalekohledů ze 17. století byla též vážnou vadou, avšak ta plynula z nedokonalé technologie, ne ze samotného optického návrhu. [4]

Čočky byly vyráběny s velmi malou středovou tloušťkou, protože tlustší sklo nebyli skláři schopni vyrobit bez šlír a bublin, které výrazně zhoršovaly kvalitu obrazu.

Je důležité připomenout, že sférická aberace singletu závisí na jeho tvarových parametrech a na orientaci jeho ploch vůči předmětu. Menisek, plankonvexní čočka a bikonvexní čočka mají při stejně velké ohniskové vzdálenosti rozdílné sférické aberace.

Čočka s poloměry křivosti R_1 , R_2 a indexem lomu n má minimální sférickou aberaci, jestliže platí :

$$R_1 = f * 2 * (n + 2) * (n - 1) / n * (2n + 1) \quad (13)$$

$$R_2 = f * 2 * (n + 2) * (n - 1) / (2n^2 - n - 4) \quad (14)$$

Pro skla o $n = 1,5$ vyjde R_1 cca $0,6 f$ a R_2 cca $3,6$.

Sférická vada pečlivě vyrobené plankonvexní čočky měla minimální vliv na zhoršení obrazu. Odchylky tvaru čočky poblíž jejího okraje, způsobené nedokonalostí v technologii výroby, byly odcloněny.

Použijeme-li pro stavbu dalekohledu za objektiv brýlový menisek o optické mohutnosti +1D (ohnisková vzdálenost $f = 1000$ mm), obrazy budou silně zhoršeny otvorovou vadou i při zaclonění na optický průměr (25-30) mm. Tvarové parametry brýlové čočky jsou optimalizovány pro účely oční optiky a nikoli pro stavbu dalekohledů. Spoddiagramy čočky o optické mohutnosti +1D jsou na obrázku 10.

3. Dalekohledy Galileiho ve Florencii

Ve světových muzejích existuje řada dalekohledů ze 17. století. [1], [5]

Ve Muzeu historie vědy (dnes Galileovo muzeum) ve Florencii je osobnosti Galilea Galileiho věnována jedna místnost, protože zde žil a konal pozorování se svými přístroji. Součástí této expozice jsou i dva dalekohledy a objektiv, jejichž autorství je připisováno samotnému Galileimu. Přístroje nepochybně pocházejí ze začátku 17. století a mají obrovskou historickou a kulturní cenu, avšak prokázat jejich autorství Galileimu je velice obtížné. Pouze zmiňovaný samostatný objektiv s velkou pravděpodobností patřil dalekohledu, se kterým Galileo objevil Jupiterovy měsíčky. Tento singlet byl věnován vévodovi toskánskému, studentu Galileiho, aby byl zachován jako památka pro budoucí generace.

Objektiv je bikonvexní čočka o optickém průměru 38 mm a ohniskové vzdálenosti 1689 mm. Jeho mechanický průměr je 58 mm. Čočka je prasklá. (<http://catalogue.museogalileo.it/object/GalileosObjectiveLens.html>)

Objektiv je připevněn na stativu dvou dalekohledů o průměrech 16 a 26 mm a ohniskových vzdálenostech 956 a 1327mm, z nichž první, kratší dalekohled, dosahuje dvacetinásobného zvětšení.

(<http://catalogue.museogalileo.it/section/TelescopeObservingMeasuringAstronomicalPhenomena.html>)

Druhý je vybaven nepůvodním okulárem ze dvou spojek, vytvářející v dalekohledu 14 násobného zvětšení. Všechny objektivy i okuláry byly v minulosti několikrát proměřeny a výsledky publikovány. Data z těchto měření umožnily matematické analyzování jejich zbytkových vad.

Měření provedl ve 20. letech Vasco Ronchi a v 90. letech Giuseppe Molesini a Vincenzo Greco. [5] Z dat, která naměřil Vasco Ronchi, poloměrů křivostí, tloušťek čoček, sečných vzdáleností pro několik vlnových délek jsme určili chromatické křivky materiálů čoček.

Z těchto parametrů byly spočteny spotdiagramy a MTF křivky.

Spotdiagramy, které jsou výsledkem našich výpočtů podle Ronchiho a Grecova měření, jsou uvedeny na obrázcích 1 až 5.

Zorná pole Galileových dalekohledů byla velice omezená, 10-15 minut podle ohniskové vzdálenosti objektivu. Rozlišovací schopnost dalekohledů byla zjišťována přímým pozorováním objektů na obloze a činila (10 – 20)“. Přesnost ploch změřil Molesini v roce 1992 na sférointerferometru a shledal, že plochy na použitém optickém průměru jsou blízké nebo vyhovují Rayleighovu kritériu. (Plocha má v optickém průměru hodnoty blízké hodnotám $\lambda/4$). [1], [5], [6]

Kvalita vyleštění optických ploch odpovídala tehdejší úrovni technologie výroby optiky a leštění optiky. Na optických plochách je mnoho drobných škráb. Samotné sklo obsahovalo řadu defektů -bublínek, šlírek, nečistot. Bývalo i zbarveno obsahem příměsí železa do zelená.

V naší práci jsme uvedly u dalekohledů s ohniskovými vzdálenostmi výsledky z obou měření, jak Vasca Ronchiho, tak Vincenza Greca. [5] Výsledky jsou velice podobné.

4. Dalekohledy Christiana a Constantina Huygense

Bratři Christian a Constantine Huygensovi pocházeli z významné holandské rodiny. K jejich zájmům patřila fyzika a astronomie. [1], [7]

Bratři Huygensovi nebyli spokojeni s kvalitou optiky tehdejších dalekohledů a tak se rozhodli vyrábět optiku sami.

Nejdříve si zjistili informace o broušení a leštění u nejlepších optiků, poté totéž provedli s obstaráním nejkvalitnějšího skla. Bratři vyrobili okolo 40 objektivů - singletů, se kterými vykonali řadu objevů. Jedním z nich byl objev Saturnova měsíce Titan v březnu 1655.

Dále jako první spatřili skvrny na Marsu a objevili povahu Saturnových prstenů.

Huygensovi používali k výbrusu svých objektivů stále stejných brusných šál, takže se poloměry křivostí ploch opakují na řadě čoček. Jejich objektivy dosahovaly ohniskových vzdáleností až 65 metrů. Přístroje s takovou stavební délkou již nebylo možné konstruovat s pevným tubusem. Problém vyřešili tak, že umístili objektiv na vysoký sloup a okulár byl umístěn na přenosném stativu. Objekt našli v objektivu a pak je prohlíželi okulárem. Tímto způsobem se vyhnuli konstrukci dlouhých tubusů, které i v mírném závanu větru rozechvívaly a znemožňovaly kvalitní pozorování.

V literatuře jsme získali parametry pro dalekohledy o ohniskových vzdálenostech 3,37 m, 37,9 m, 50,1m a 65,2 m. Průměry těchto singletů byly 54 mm, 195mm, 210mm a 230 mm. [1], [7]

Poloměry křivostí ploch, tloušťky čoček a ohniskové vzdálenosti jsou známy. [7] Abbeho čísla skel jsou blízká hodnotám 60. Spotdiagramy objektivů, které jsme simulovali na základě publikovaných parametrů jsou uvedeny na obrázcích 6 až 9.

Pro porovnání jsme uvedli i spotdiagramy brýlové čočky o průměru 55 mm a optické mohutnosti +1D ($f = 100\text{mm}$), zacloněné na průměr 30 mm. Díky jejím tvarovým parametrům, jedná se o menisek, otočený konvexní plochou k předmětu, vykazuje značnou otvorovou vadu oproti plankonvexní čočce o stejné optické mohutnosti. Pro konstrukci dalekohledu je méně vhodná.

Jedním z nejlepších optiků poloviny 17. století byl Giuseppe Campani z Říma. Ten vyrobil řadu kvalitních dalekohledů s neachromatickými objektivy. K jeho nejproslulejším patří přístroje, které vyrobil pro Domenica Cassiniho, který s nimi dosáhl řady objevů. [8]

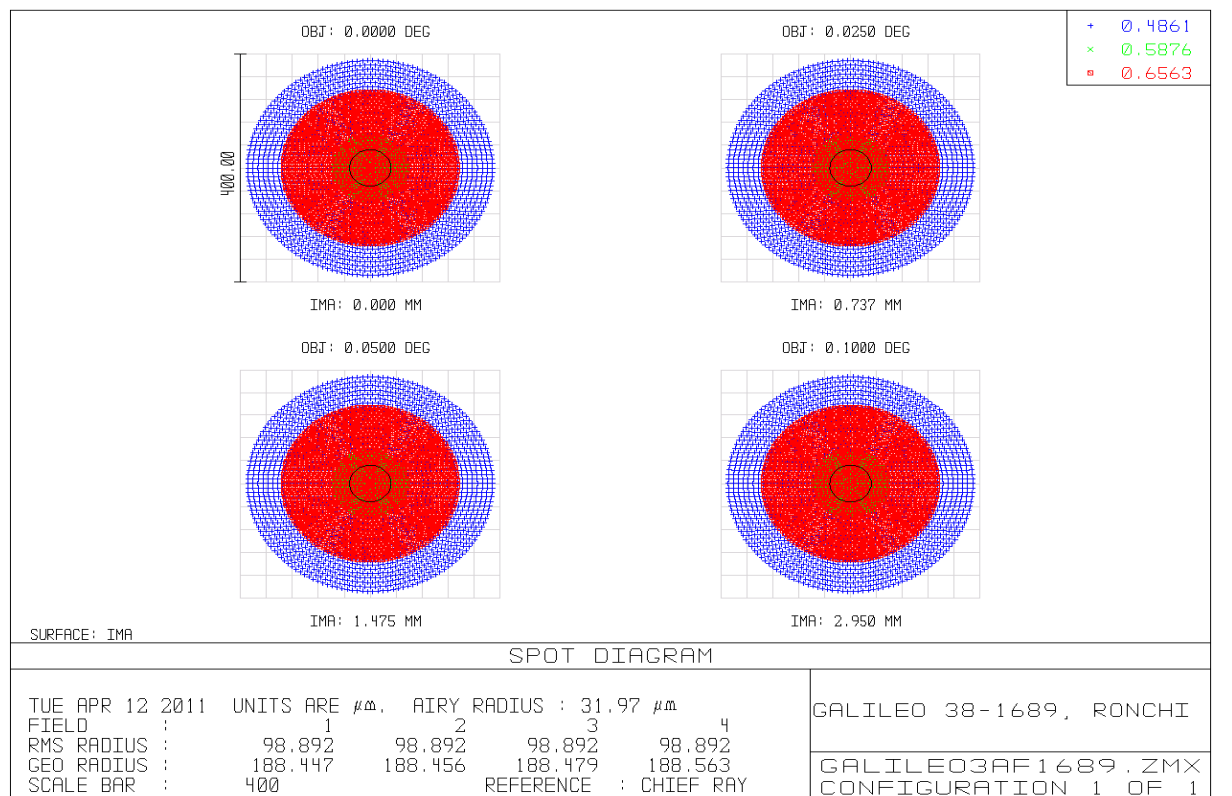
S dalekohledy s neachromatickými objektivy byly učiněny základní poznatky o nebeských objektech. Jejich využití pomalu končilo s vynalezením Newtonova zrcadlového dalekohledu a achromatického objektivu.

Poděkování : Tato práce byla řešena jako dílčí část výzkumného záměru, projekt AV0Z20430508, bylo využito poznatků z projektu 1QS100820502.

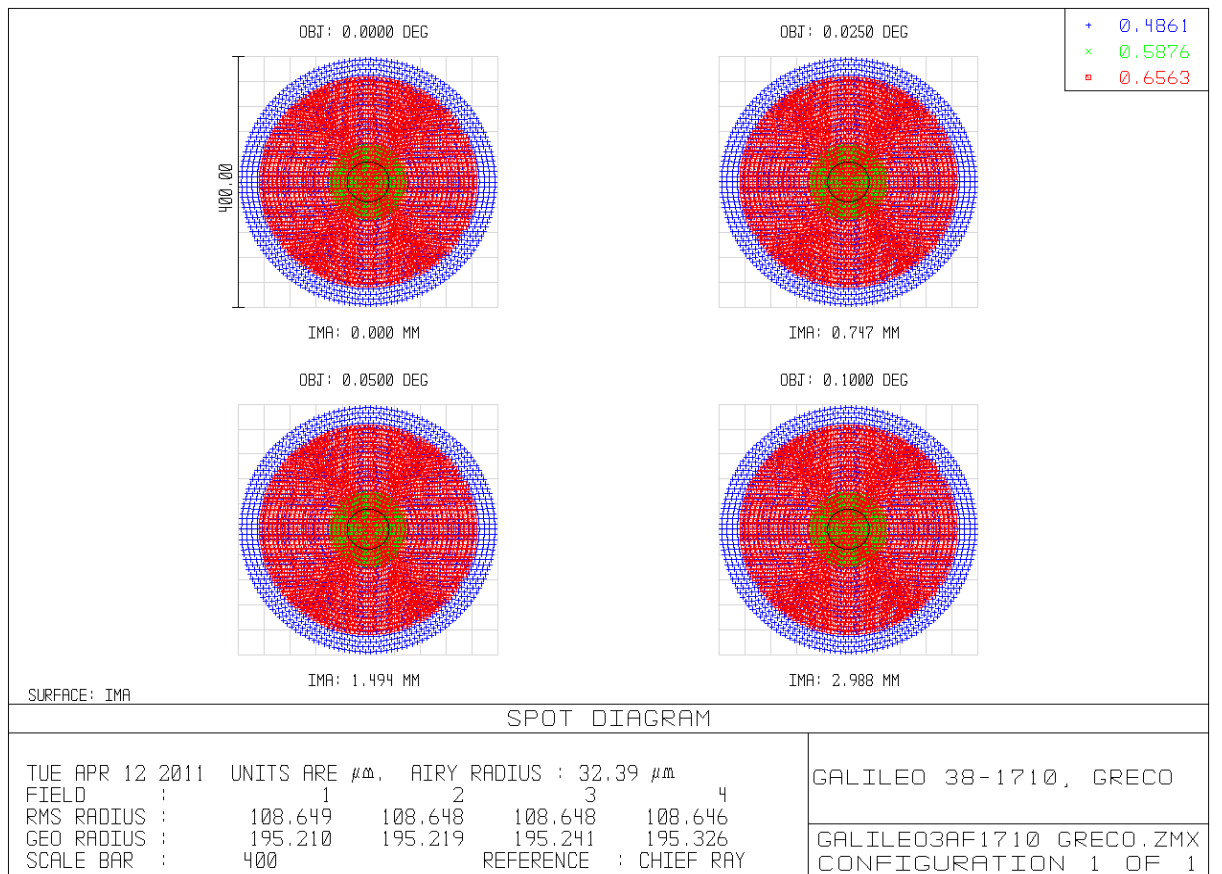
5. Literatura

- [1] The History of the Telescope, Henry C. King, Dover Publications, Mineola, New York, 2003

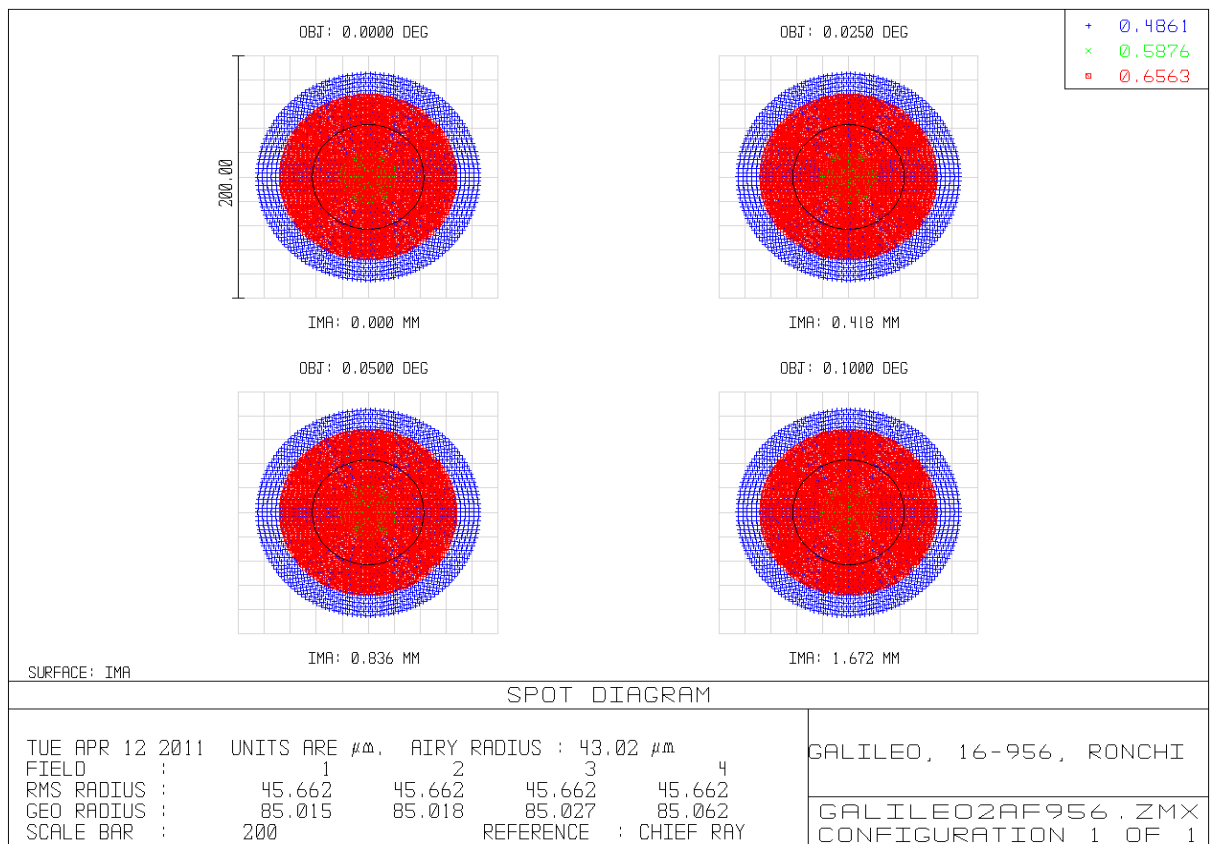
- [2] Antikrist Galileo, Michal White, Praha, Academia, 2011
- [3] Matematický aparát, použitý v referátu „Dílenská optika“, soubor prací, RNDr. Ivan Šolc, CSc., interní soubor prací ÚFP AVČR, v.v.i., O. D.,
- [4] N.N. Michelson, Optičeskije teleskopy, Izdatelstvo “Nauka”, Glavnaja redakcija fiziko matematičeskoj literatury, Moskva, 1976
- [5] Galilean Telescope Homepage, http://www.pacificer.com/~tpope/Additional_Info.htm
- [6] On the Accuracy of Galileo’s Observations, <http://legacy.jefferson.kctcs.edu/faculty/graney/CMGRESEARCH/PhysicsAstro/OnTheAccuracy-BAFinalVersion.pdf>
- [7] Lens Production by Christian and Constantijn Huygens, Anne C. van Helden and Rob H. van Gent, Museum Boerhaave, Postbus 11280, NL-2301 EG, Leiden, The Netherlands <http://hotgates.stanford.edu/Eyes/library/annals56.pdf>
- [8] The Optical Workshop Equipment of Giuseppe Campani, Silvio A. Bedini, Oxford Journals <http://hotgates.stanford.edu/Eyes/library/campanisworkshop.pdf>



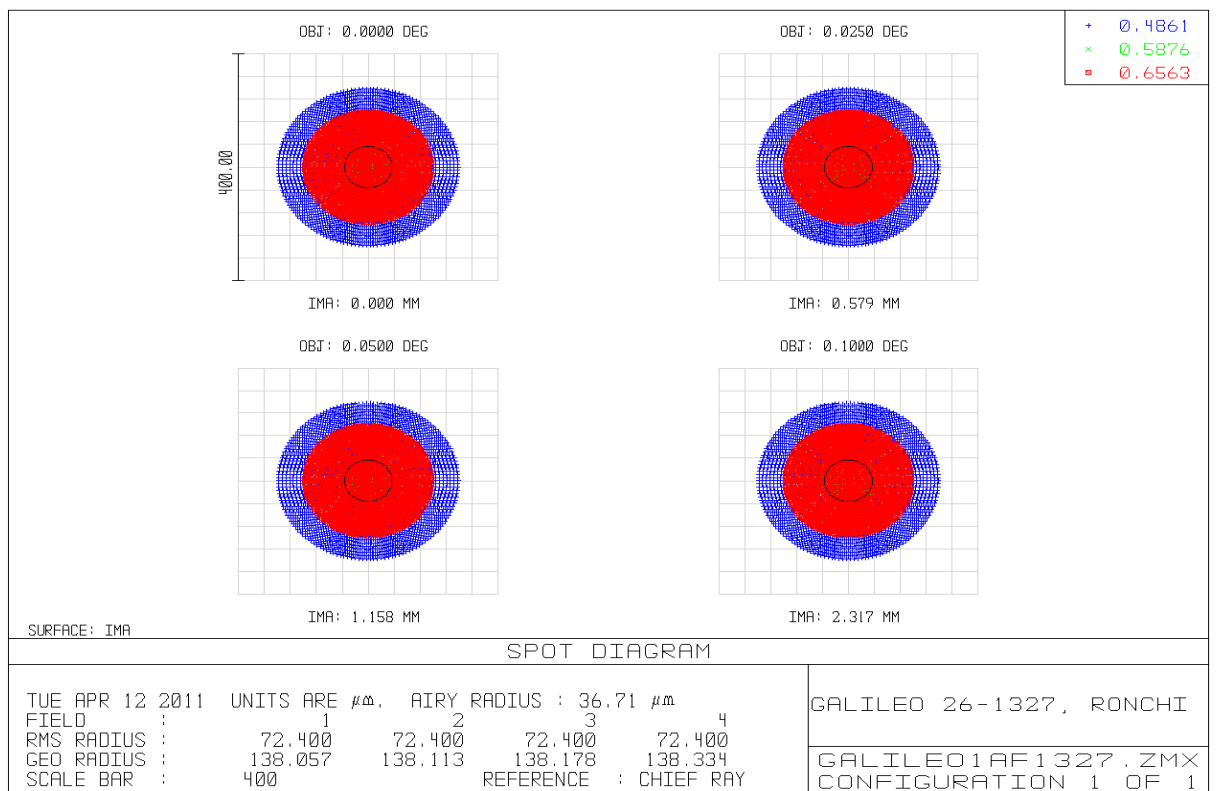
Obrázek 1. Spotdiagramy Galileova dalekohledu 38/1689. Měření z roku 1923, V. Ronchi



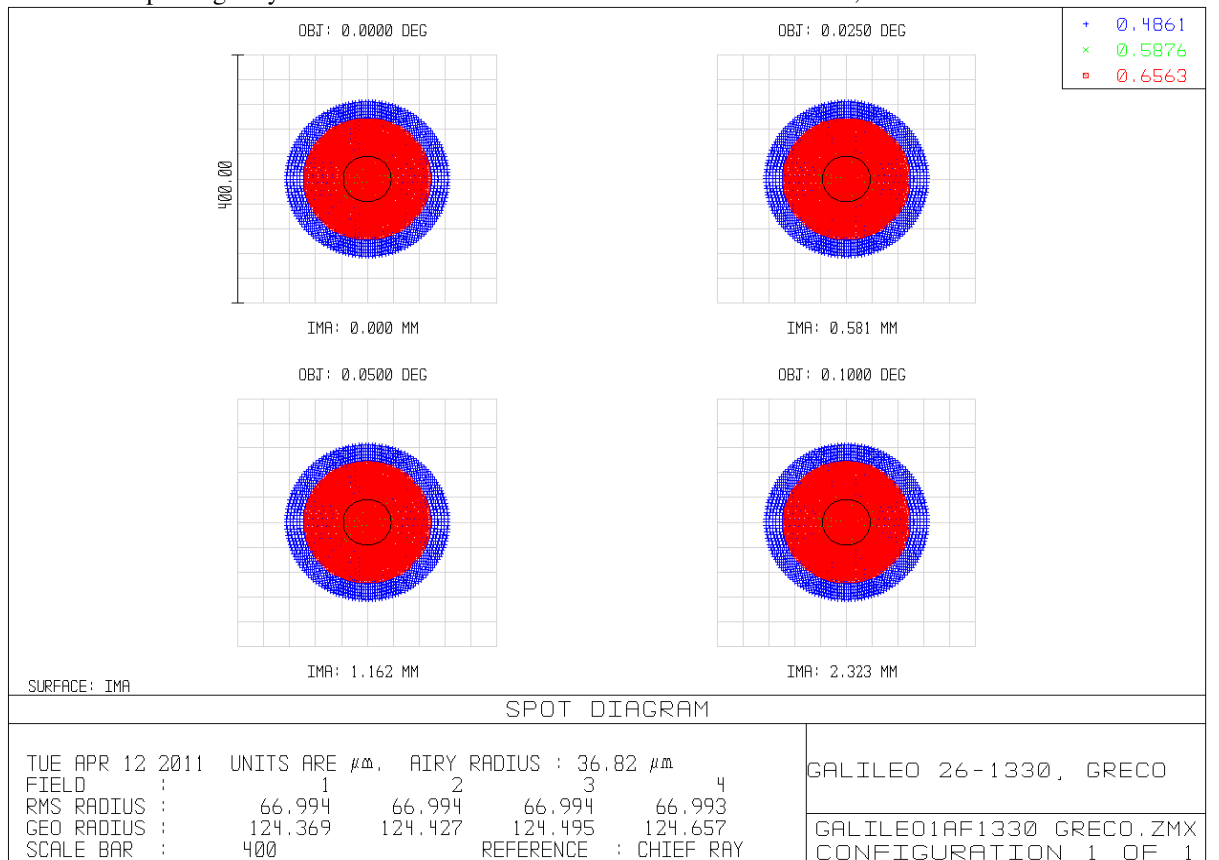
Obrázek 2. Spotdiagramy Galileova dalekohledu 38/1710. Měření z roku 1992, V.Greco



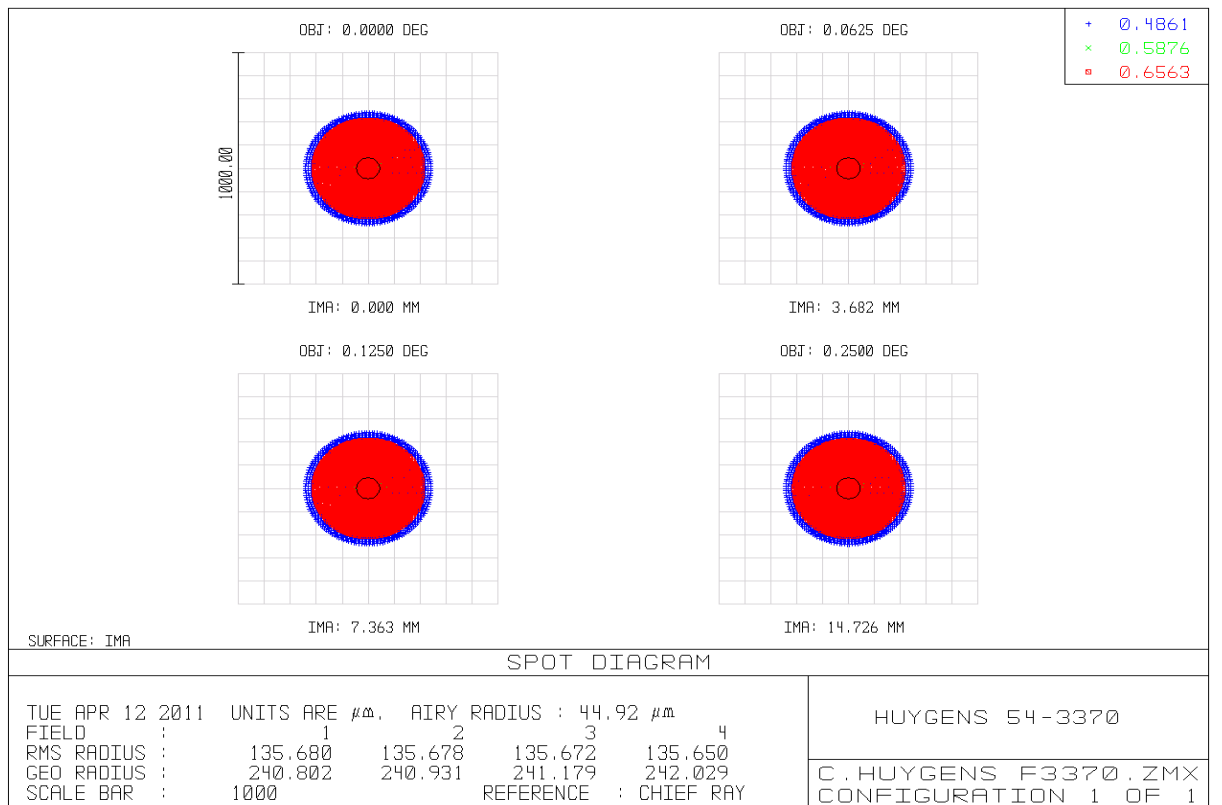
Obrázek 3. Spotdiagramy Galileova dalekohledu 16/956. Měření z roku 1923, V.Ronchi.



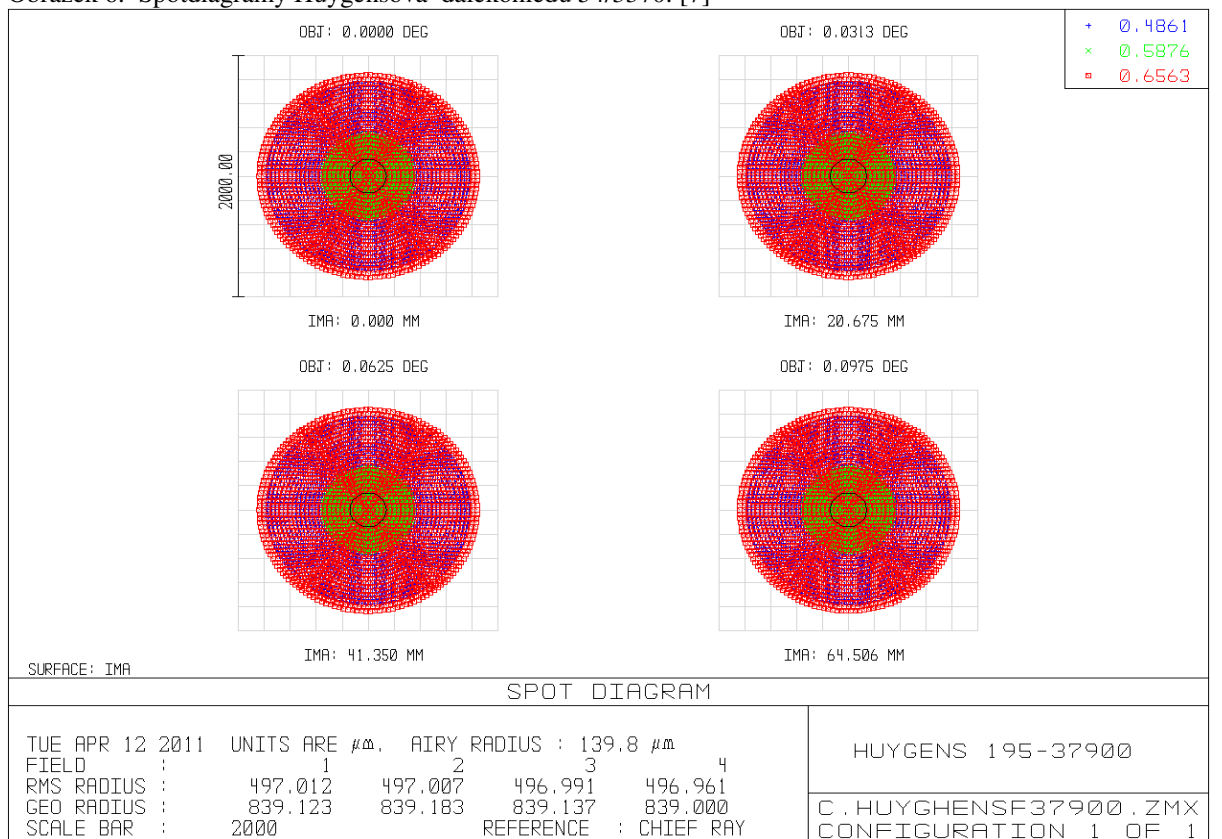
Obrázek 4. Spotdiagramy Galileova dalekohledu 26/1327. Měření z roku 1923, V. Ronchi



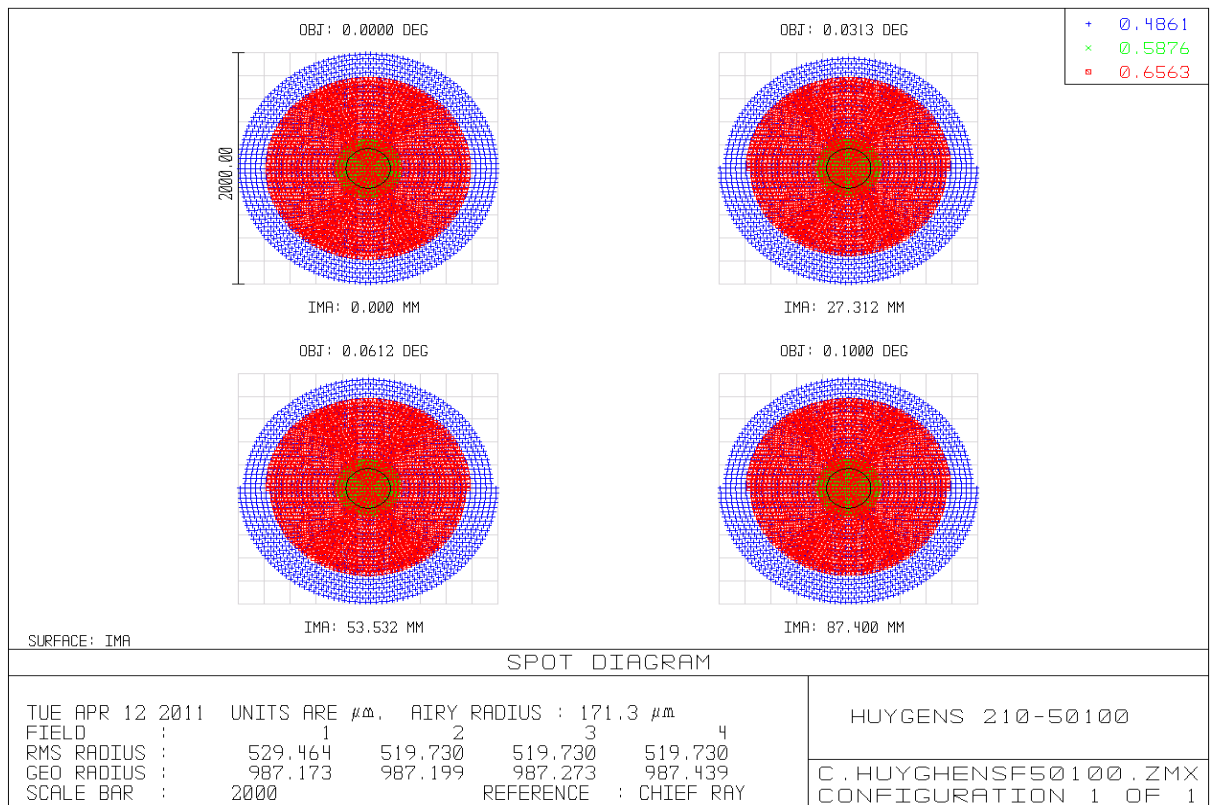
Obrázek 5. Spotdiagramy Galileova dalekohledu 26/1327. Měření z roku 1992, V. Greco



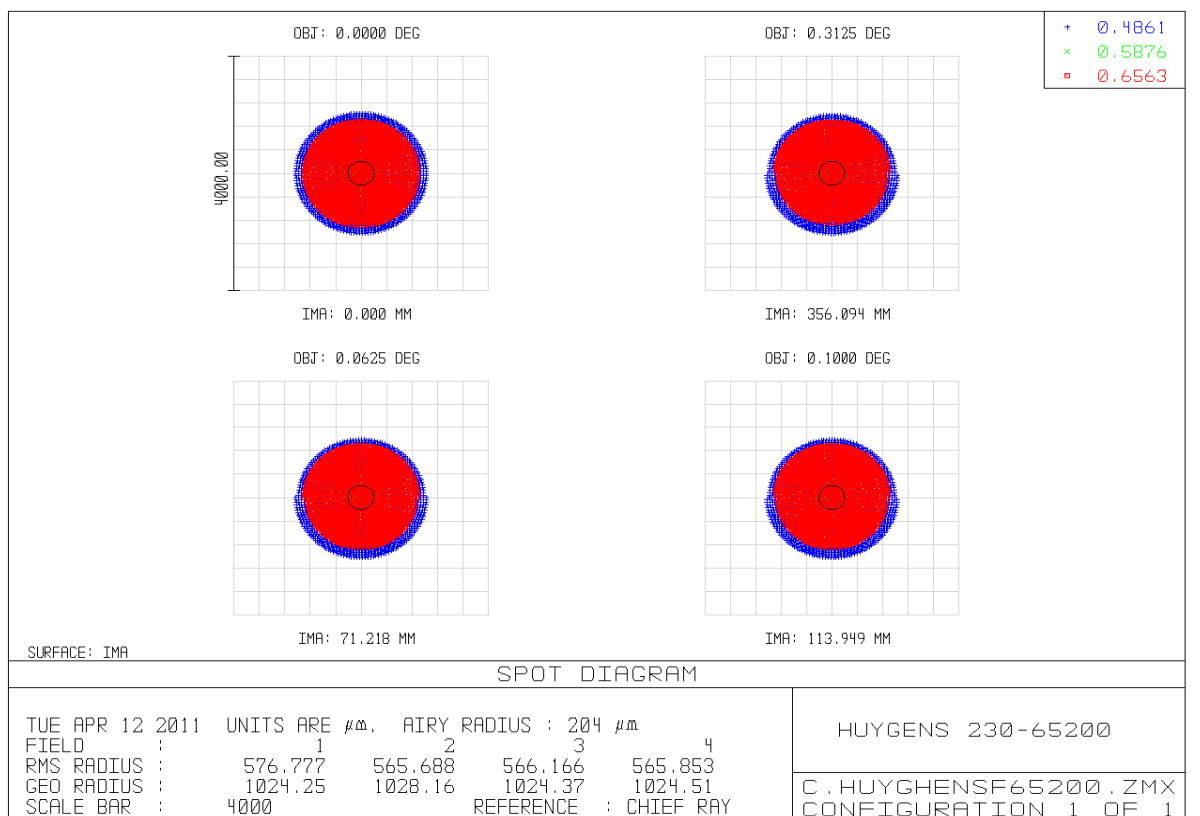
Obrázek 6. Spotdiagramy Huygensova dalekohledu 54/3370. [7]



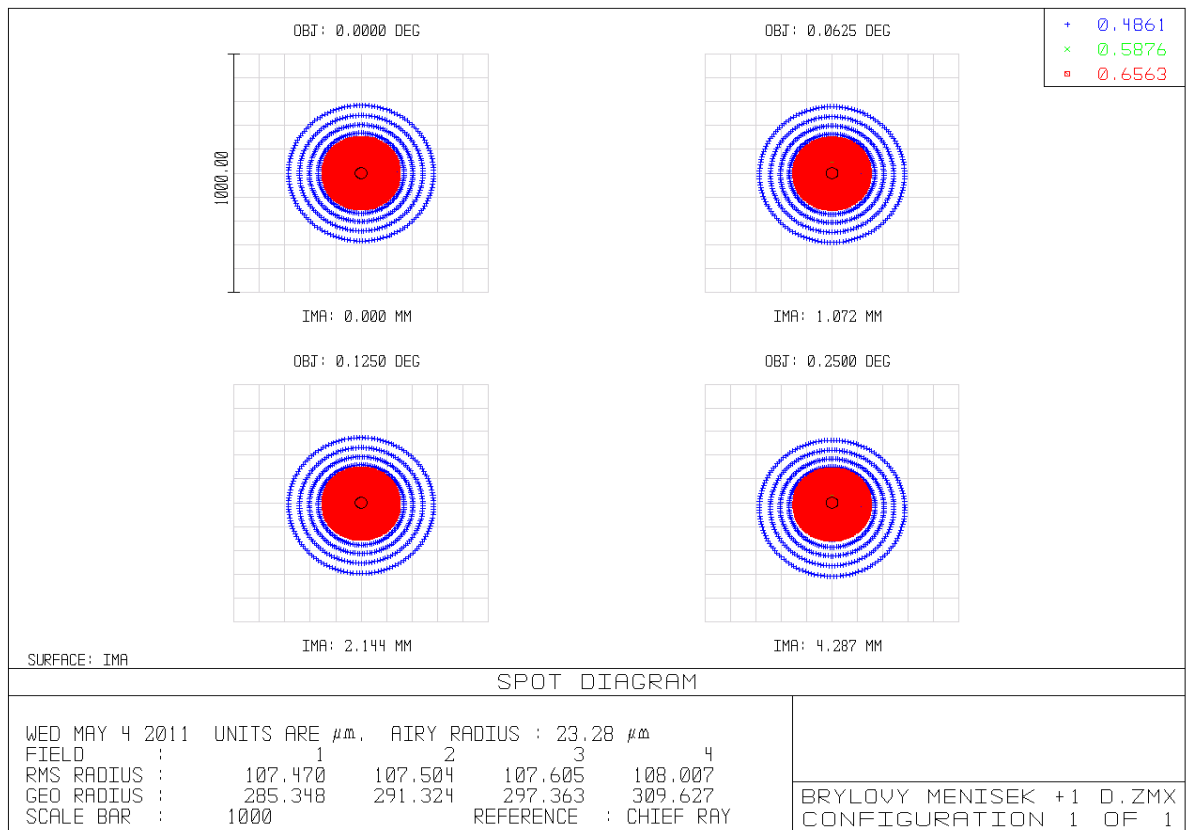
Obrázek 7. Spotdiagramy Huygensova dalekohledu 195/37900. [7]



Obrázek 8. Spotdiagramy Huygensova dalekohledu 210/50100. [7]



Obrázek 9. Spotdiagramy Huygensova dalekohledu 230/65200. [7]



Obrázek10. Spotdiagramy čočky z materiálu B270 (K13), jejíž optické parametry jsou srovnatelné s brýlovými čočkami +1D ($f = 1000$).