

Zobrazovací vlastnosti několika významných reflektorů

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

Abstrakt:

V této práci předkládáme výsledky simulací zobrazovacích vlastností několika významných historických zrcadlových dalekohledů, které konstruovali Newton, Hadley, Herschel, Rosse.

Imaging properties of several important reflectors

Abstract

At this paper we present the results of simulation of imaging properties of several remarkable historical reflectors, which were constructed by Newton, Hadley, Herschel, Rosse.

1. Historie vývoje zrcadlových dalekohledů

Zobrazovací vlastnosti konkávní zrcadlové plochy byly známy již od starověku. Proto se brzy po vynalezení dalekohledu řada optiků pokoušela o výrobu přístroje, u kterého byl čočkový objektiv nahrazen konkávním zrcadlem.

Jedním z nich byl italský optik Zucchi, který v roce 1616 zkusil zkonstruovat dalekohled s nakloněným konkávním sférickým zrcadlem a s okulárem - rozptylkou, umístěnou vně vstupujícího světelného svazku. Navrhl optický systém, který úspěšně vyrobil William Herschel až o 150 let později.

V první polovině 17. století nebyly pokusy o výrobu zrcadlového dalekohledu úspěšné, protože optici nedovedli vyrobit dostatečně přesná kovová zrcadla.

Snahy o zlepšení zobrazovacích vlastností prvních čočkových dalekohledů byly nejenom stimulem pro skláře a brusiče čoček, ale i pro fyziky, matematiky a mechaniky.

Velkým přínosem pro fyziku byl objev zákona lomu Willibaldem Snellem v roce 1621 a užití nového matematického aparátu – analytické geometrie Reného Descarta v polovině 30. let 17. století.

Descartes zjistil, že jednoduchou čočkou se sférickými plochami nelze zobrazit hvězdu jako bod. Aby toto bylo možné, navrhl zadní plochu asférizovat do tvaru hyperboloidu. Podobně uvažoval i o asférických tvarech ploch zrcadel. Bodového zobrazení hvězdy bylo schopné jen paraboloidické zrcadlo v blízkosti jeho optické osy. Descartes byl první, kdo zavedl asférické profily ploch do optiky.

Ve 30. letech 17. století jeho přítel Mersenne navrhl několik typů dvojzrcadlových afokálních systémů. Pozorovatel by se měl v nich dívat otvorem v hlavním zrcadle do menšího, sekundárního zrcadla, sloužícího jako okulár. Jako dalekohledy byly tyto soustavy nepoužitelné, protože u nich nebylo možné přiblížit oko do blízkosti jejich výstupní pupily.

Značným problémem byla u prvních čočkových dalekohledů jejich barevná vada. Tehdejší fyzika ji nebyla schopna vysvětlit a její vznik byl optiky spojován s nepřesností výroby čoček.

V polovině 17. století byla známa teorie výpočtu profilů ploch zrcadlových zobrazujících prvků, které však nedokázali brusiči vyrobit. Výrobu objektivů - singletů optici již dobře zvládali, neznali příčinu vzniku barevné vady. Empiricky věděli, jakou ohniskovou vzdálenost musí mít objektiv - singlet daného průměru, aby jeho barevná vada příliš nerušila jeho zobrazovací vlastnosti.

První reálný zrcadlový dalekohled navrhl v roce 1665 skotský duchovní James Gregory.

Jeho základem bylo paraboloidické zrcadlo se středovým otvorem. Sekundární zrcadlo o profilu rotačního elipsoidu bylo umístěno vpředu dalekohledu za ohniskem primárního zrcadla a odráželo paprsky z primárního zrcadla vzad. Jedno ohnisko eliptického sekundáru leží v ohnisku primárního paraboloidického zrcadla. Poloha druhého ohniska sekundáru je za vrcholem primárního zrcadla. Pozorovatel prohlíží okulárem obraz v ploše s tímto druhým ohniskem.

Gregory se pokoušel o výrobu svého systému. Ale ani on, ani jeho vrstevníci nevyrobili kvalitní dalekohled tohoto typu, protože v té době neexistovala technologie výroby dostatečně přesných ploch kovových zrcadel.

Koncem 60. let 17. století se začal zabývat optikou i Isaac Newton. Ve věku 20 let studoval povahu světla a příčiny vzniku optických vad tehdejších neachromatických dalekohledů.

Objevil, že barevná vada singletu vzniká rozkladem světla na rozhraní dvou prostředí s různými indexy lomu a ne nepřesnou prací výrobců čoček. Výpočtem prokázal, že pokud bude jednoduchý objektiv dostatečně dlouhý, není nutné asférizovat jeho zadní plochu, aby zobrazoval stigmaticky.

Isaac Newton ze svých pokusů s hranoly, rozkládajícími bílé světlo na barvy, neobjevil vztahy mezi indexy lomu materiálů a jejich rozdíly pro různé barvy světla.

Z jeho měření vyplynulo, že všechny materiály mají tento vztah stejný a tudíž nelze dosáhnout stavu, aby jedna čočka kompenzovala barevnou vadu druhé.

Pro dvojočkový objektiv musí platit dvě podmínky :

1) rovnice výsledné optické mohutnosti dubletu

$$\varphi_1 + \varphi_2 = 1$$

2) podmínka achromasie

$$\varphi_1 / v_1 + \varphi_2 / v_2 = 0$$

kde φ_1, φ_2 jsou optické mohutnosti čoček
 v_1, v_2 jsou materiálové konstanty skel.

Později byla čísla v_1 a v_2 vyjadřující poměr $(n_d - 1) / (n_F - n_C)$ nazvána Abbeho čísla.

kde n_d je index lomu pro čáru d
 n_C je index lomu pro čáru C
 n_F je index lomu pro čáru F

V případě, že všechny materiály mají shodné hodnoty v_1 a v_2 , jak vyplynulo z Newtonových nepřesných měření, nelze tyto dvě podmínky současně splnit. Autorita Isaaca Newtona byla tak vysoká, že těmito závěry pozdržel vývoj refraktoru cca o 50 let.

Newton navrhl a zkonstruoval první reálný zrcadlový dalekohled. V něm mělo být hlavní zrcadlo o profilu rotačního paraboloidu. Druhým prvkem jeho systému bylo rovinné sekundární zrcadlo, umístěné uprostřed vstupního svazku a skloněné o úhel 45° . Tento člen zalomil sbíhavý svazek z primárního zrcadla o 90° a vyvedl jeho ohniskovou plochu vně tubusu.

První takový dalekohled byl zkonstruován v letech 1668-1669. V roce 1671 předvedl svůj další přístroj Královské společnosti.

Tento dalekohled měl hlavní kovové zrcadlo o průměru cca 32 mm, zacloněné na průměr cca 27 mm a ohniskovou vzdálenost cca 152 mm. Jednoočkový okulár poskytoval zvětšení 30-35 krát. Když svůj dalekohled porovnával s refraktorem s neachromatickým objektivem o stejném průměru a ohniskové vzdálenosti cca 1200 mm, reflektor velice ostře zobrazoval planetu Jupiter bez barevného okraje, avšak obraz byl tmavší než v čočkovém dalekohledu.

Newtonova zrcadla byla vyrobena ze slitiny mědi, cínu a arzenu, odrážela pouze 16 procent světla a jejich povrch velice rychle ztrácel odrazivost. Okrajové zóny zrcadel bylo nutné zaclonit, protože měly delší ohnisko než středové paprsky. Projevovala se u nich vada zleštění krajů. Newton byl první, kdo použil pro leštění zrcadla smolu.

Krátce po objevu Newtonova dalekohledu se objevila i další dvojjzrcadlová soustava, Cassegrainova, která byla nejprve podrobena tvrdé kritice. Díky ní se tento systém začal vyrábět až o 150-200 let později. Nakonec, od konce 19. do poloviny 20. století, se Cassegrainův systém ze dvojjzrcadlových systémů konstruoval nejčastěji. Ve dvacátých letech minulého století byl nahrazován aplanatickým systémem Ritchey-Chrétien.

První zrcadlový dalekohled, který mohl svými zobrazovacími vlastnostmi konkurovat neachromatickým refraktorům, zkonstruoval Hadley na počátku 18. století.

Byl to přístroj systému Newton o průměru cca 152 mm a ohniskovou vzdáleností cca 1550 mm.

Dalekohled byl ve své době porovnáván s refraktory Christiana Huygense, které podávaly světlejší obrazy, což bylo způsobeno nízkou odrazivostí vyleštěného povrchu kovového zrcadla a také tím, že Huygensovy objektivy měly větší průměr.

U zrcadlového dalekohledu si astronomové vysoce oceňovali kvalitu obrazu, pohodlnost při pozorování, snadné hledání objektů pomocí hledáčku a to, že s ním bylo možné pozorovat i za soumraku, což s dlouhofokálními refraktory nebylo možné. Díky oxidaci zrcadlových ploch však bylo nutné čas od času zrcadla přelešřovat. Rozměry celého dalekohledu byly podobné rozměrům většího stolu.

Jedním z prvních optiků, kteří se začali ve 40. letech 18. století zabývat výrobou zrcadlových dalekohledů, byl James Short. Společně se svými bratry vyrobil řadu dalekohledů typu Newton a Gregory až do průměru okolo 500 mm. Byl první, kdo se úspěšně prosadil na trhu a mohl si diktovat i ceny přístrojů. Zvládl i asferezaci optických ploch svých zrcadel.

Zároveň po dlouhých pokusech se mu podařilo odlévat kovová zrcadla, která po vyleštění měla odrazivost téměř 70 procent.

Řada optiků po něm své umění výroby kovových zrcadel ještě zlepšila. Vývoj technologie kvalitních kovových disků trval několik desítek let. Každý výrobce většinou musel odlít spoustu disků než se mu povedlo nalézt takovou slitinu, která měla potřebné vlastnosti: Tvrdost, leštitelnost, dobrou odrazivost po vyleštění a odolnost povrchu proti oxidaci.

V 70. letech 18. století se začal zajímat o astronomii i William Herschel v anglickém městě Bath. První jeho dalekohledy byly zakoupeny od anglických optiků. Později zkusil sám vyrobit několik refraktorů s objektivy - singlety, s jejichž výkony nebyl spokojen.

Proto začal sám brousit vlastní zrcadla, jejichž průměr neustále zvětšoval. V jeho domech vznikaly dílny na výrobu kovových zrcadel včetně odlévání.

Jedním z jeho nejslavnějších přístrojů je Newton cca 158/2100, se kterým objevil v březnu 1781 planetu Uran.

Tento přístroj se mu mimořádně povedl a byl mnohokrát porovnáván s řadou přístrojů včetně těch, které se používaly na hvězdárně v Greenwich. William Herschel společně se svým bratrem Alexandrem vybrousili několik stovek kovových zrcadel, která pak prodával s kompletními montážemi. Postupně zvětšoval svá zrcadla až do průměru cca 1200 mm a ohniskové vzdálenosti cca 12000 mm.

Herschel vybrousil několik stovek kovových zrcadel až do průměru 1200 mm a ohniskové vzdálenosti 12000 mm. Většinu svých dalekohledů zkonstruoval jako systém Newton o světelnosti okolo 1/12. Výhodou těchto méně světelných zrcadel byla jejich snadnější výroba vzhledem k menší hodnotě asférickosti-odchylky asférické-paraboloidické plochy od sféry. Přístroje měly i menší mimoosovou vadu komu.

Velkou část svých pozorování Herschel prováděl i s 480 mm dalekohledem typu Newton o ohniskové vzdálenosti cca 6100 mm. U tohoto přístroje pokusně umístil okulár před tubus tak, aby neclonil vstupní svazek světla a vyhnul se použití sekundárního rovinného zrcátka. Shledal, že takový optický systém podává slušné obrazy hvězd a zároveň neztrácí světelnou energii odrazem od povrchu sekundárního zrcátka. Později tuto zkušenost aplikoval i u svého největšího dalekohledu o průměru 1200 mm.

S tímto přístrojem pozoroval méně, protože jeho menší dalekohledy byly pro pozorování mnohem snadněji ovladatelné. Nárůst plochy velkého zrcadla nebyl doprovázen radikálním zvětšením dosahu přístroje. Přesto s ním objevil dva Saturnovy měsíce, Enceladus a Mimas.

Později je oba pozoroval i ve svém menším dalekohledu o průměru 480 mm. Mimoosové vady přístroje se skloněným primárním zrcadlem částečně kompenzoval vhodně naloněným okulárem. Herschel konstruoval i dvouzrcadlové soustavy Gregory.

Přesnost většiny jeho zrcadel, která byla později měřena, ukázala, že zrcadla splňovala Rayleighovo kritérium nebo byla velice blízko jeho hodnotě. Optická plochy zrcadel se od ideálních ploch nelišily více než o 1/8 vlnové délky.

Herschel byl znám i používáním extrémně velkých zvětšení, dosahujícím několik tisíc krát. Ve dvacátých letech 20. století bylo měřeno cca 45 jeho okulárů, které tato fakta potvrdily. Okulár s nejkratší ohniskovou vzdáleností měl její hodnotu 0,27 mm.

Ve 40. letech 19. století Lord Rosse v Birr Castle v Irsku postavil svůj dalekohled o průměru 1800 mm a ohniskové vzdálenosti cca 16 000 mm. S ním se mu podařilo rozlišit spirálovou strukturu mlhoviny M51 v souhvězdí Honící Psi.

Dalekohled Lorda Rosse byl dlouhou dobu největším dalekohledem na světě a je největším reflektorem s kovovým zrcadlem. Původní zrcadlo o průměru cca 1800 mm je nyní muzejním exponátem ve Science Museum v Londýně. Dalekohled byl v nedávné minulosti restaurován a má hlavní zrcadlo vyrobeno z hliníku.

Významným astronomem a konstruktérem zrcadlových dalekohledů s kovovými zrcadly byl William Lassell. Se svým 600 mm dalekohledem o světelnosti 1/10 na paralaktické montáži, objevil v říjnu roku 1846 měsíc Triton planety Neptun. Nalezl i měsíce Ariel a Umbriel planety Uran a Saturnův Hyperion. Jeho přístroj s velice

přesným zrcadlem o průměru 600 mm, který byl dokončen v roce 1845, se velmi dobře uplatnil při pozorování planet. Zrcadlo si udrželo poměrně dlouhou dobu svoji odrazivost.

Ještě větší dalekohled o průměru 1220 mm a ohniskové vzdálenosti 11300 mm počátkem 60. let 19. století odvezl na Maltu, kde byl seeing mnohem lepší než v Anglii.

Posledním velkým reflektorem, zkonstruovaným s kovovým zrcadlem, byl Cassegrainův dalekohled v Melbourne z roku 1868. V polovině 19. století angličtí astronomové usilovali o studium objektů jižní oblohy. Bylo to i tím, že hlavní hvězdárny s výkonnými přístroji byly postaveny především na severní polokouli a objekty jižní oblohy byly prostudovány mnohem méně. Proto byla navržena stavba velkého dalekohledu typu Cassegrain o průměru primárního zrcadla 1210 mm a ohniskové vzdálenosti cca 9750 mm. Ekvivalentní ohnisková vzdálenost soustavy Cassegrainu byla cca 50600 mm.

Dalekohled měl sloužit k revizi katalogu objektů jižní oblohy, který vytvořil Sir John Herschel. Přístroj s kovovými zrcadly byl vyroben v Dublinu firmou Grubb pro observatoř v australském Melbourne.

V době jeho stavby byla již běžně vyráběna skleněná zrcadla, na jejichž povrch byla chemicky nanášena stříbrná vrstva s odrazivostí okolo 90 procent. Výroba melbournského dalekohledu s kovovými optickými prvky byla krokem zpět. Později přístroj byl přestavován a dostal světlejší skleněné zrcadlo.

Úspěšným přístrojem byl Newtonův reflektor se skleněným postříbřeným zrcadlem Leona Foucalta na observatoři v Marseille o průměru 800 mm a ohniskové vzdálenosti okolo 4400 mm, který sloužil pro spektroskopická pozorování.

Dalším známým dalekohledem byl Newton Crossleyho observatoře o průměru 910 mm a ohniskové vzdálenosti 5300 mm nebo světelný Newton - Cassegrain George Ritcheyho o průměru 600 mm a světelnosti primárního zrcadla 1/3,9. Sekundární ohnisko tohoto přístroje bylo využíváno pro spektrografická měření. Fotografie mlhoviny v Andromedě, pořízené s tímto přístrojem, se staly na konci 19. století legendárními.

Rozvoj velkých reflektorů byl na konci 19. a začátkem 20. století způsoben velkým zájmem astronomů o fotografování oblohy a spektroskopii. Velké přístroje se konstruovaly zpravidla tak, že v ohniskové ploše primárního zrcadla - paraboloidu se fotografovaly objekty.

V sekundárním ohnisku Cassegrainova systému byla umístěna štěrbinová spektrograf.

Takto byly navrženy 60 palcový /průměr 1520 mm/ dalekohled observatoře Mount Wilson. Primární zrcadla mají světelnosti okolo 1/5, cassegrainovská ohniska 1/20 a 1/16, coudé ohniska pro spektroskopii 1/30. Výrobcem optiky tohoto přístroje byl George Ritchey.

Záhy tento astronom a optik zkonstruoval ještě větší přístroj s primárním zrcadlem o průměru 100 palců / 2540 mm/. Světelnost primárního zrcadla byla 1/5,1, cassegrainovského systému 1/16 a coudé 1/30, podobně jako u 60 palcového dalekohledu.

Až do počátku 20. století se systémy zrcadlových dalekohledů neměnily. V astronomii se používaly dalekohledy typu Newton a Cassegrain. Systém Gregory se od konce 18. století stavěl jen výjimečně. Totéž platí pro systém s nakloněným primárním zrcadlem, navržený Herschelem.

V roce 1905 navrhl Schwarzschild dvojzrcadlový dalekohled, kompenzující astigmatismus. Ten se také prakticky nepoužívá kvůli velké stavební délce a řadě nevýhod, hlavně malého zorného pole.

Ve dvacátých letech 20. století se objevuje dvojzrcadlový aplanatický systém Ritchey-Chrétien. Oproti Cassegrainu má zhruba třikrát větší zorné pole než Cassegrainův systém.

Od padesátých let se prakticky všechny velké dalekohledy konstruují jako Ritchey - Chrétien s hyperboloidickým primárním zrcadlem. Jedinou výjimkou je šestimetrový dalekohled BTA na Kavkaze, konstruovaný jako Cassegrainův systém

Nové systémy s hyperboloidálními primárními zrcadly jsou výhodné i pro použití složitých korektorů pole, umístěných ve sbíhavém svazku primárního zrcadla těsně před ohniskovou plochou zrcadla. Pro fotografování objektů jsou nacházena řešení korektorů pro velikosti zorných polí, pro které dosud rozměrově neexistují dostatečně velké CCD detektory.

Po 2. světové válce byl dokončen pro hvězdárnu Mount Palomar dalekohled s průměrem primárního paraboloidického zrcadla o průměru 200 palců /5080 mm/ a ohniskové vzdálenosti 17300 mm. Přístroj je využíván pro spektroskopii. Ekvivalentní ohniskové vzdálenosti cassegrainovského systému je 1/16 a coudé 1/30.

Později byl v SSSR vyroben i paraboloid o průměru 6000 mm a ohniskové vzdálenosti 24000 mm pro hvězdárnu v Zelenčuku na severozápadě Kavkazu. Též tento přístroj využívá coudé sekundární, vytvářející dvojzrcadlové systémy o světelnostech okolo 1/30.

2. Vady zrcadel

Technologie výroby optických ploch kovových zrcadel se vyvíjela postupně. Nejprve byla zvládnuta výroba sférických ploch, poté byly vyráběny i soustavy, u kterých bylo nutné zrcadla asférizovat.

Má-li zrcadlo Newtonova dalekohledu průměr D nebo poloměr $r = D/2$, poloměr křivosti plochy R , pak odchylka plochy $\delta(x)$ paraboloidu od sféry je rovna

$$\delta(x) = (r^4) / 32 * R^3$$

Pokud má zrcadlo kvalitně zobrazovat, neměla by hodnota odchylky $\delta(x)$ přesahovat cca 60 nm. Seeing zpravidla nedovolí využít rozlišovací schopnost velkého dalekohledu naplno.

Velikost odchylky asférické plochy zároveň určuje technologickou složitost výroby zrcadla.

Zrcadlo o asféricitě b , ohniskové vzdálenosti f , poloměru r (polovina průměru zrcadla D) se bude na optické ose zobrazovat hvězda o geometrickém průměru :

$$\text{Geometrický průměr hvězdy} = f * (1 + b) * (r^3) / (16 * f^3) \quad [\text{mm}] \quad (1)$$

nebo v úhlových vteřinách :

$$\rho = (3600) * \arctang(1 + b) * (r^3) / (16 * f^3) \quad ['] \quad (2)$$

Příčný rozměr komatického obrazce se u zrcadla zvětšuje se vzdáleností θ od optické osy.

$$\text{Délka komatického obrazu} = f * (3 * \theta * r^2) / (4 * f^3) \quad [\text{mm}] \quad (3)$$

nebo v úhlových vteřinách :

$$\varphi = (3600) * \arctang(3 * \theta * r^2) / (4 * f^3) \quad ['] \quad (4)$$

Příčný rozměr astigmatického obrazce se u zrcadla o poloměru r a ohniskové vzdálenosti f zvětšuje se vzdáleností θ od optické osy.

$$\text{Délka astigmatického obrazu} = f * (r * \theta^2) / (f^3) \quad [\text{mm}] \quad (5)$$

nebo v úhlových vteřinách

$$\sigma = (3600) * \arctang(r * \theta^2) / (f^3) \quad ['] \quad (6)$$

Hlavní zrcadla systémů Newton, Gregory a Cassegrain jsou paraboloidická

$$b1 = -1$$

Asféricitost sekundárního zrcadla Cassegrainova dalekohledu $b2$ je rovna

$$b2 = (f + f1) / (f - f1)$$

kde f je ekvivalentní ohnisková vzdálenost soustavy dvou zrcadel a $f1$ je ohnisková vzdálenost primárního zrcadla.

Pro dvě zrcadla s ohniskovými vzdálenostmi $f1$, $f2$, která jsou mezi sebou vzdáleny od sebe ve vzdálenosti d platí rovnice

$$1/f = 1/f1 + 1/f2 - d / (f1 * f2)$$

3. Závěr

Myšlenka výroby zrcadlových dalekohledů vznikla záhy po objevu dalekohledů. Na její praktické uskutečnění bylo nutné vyvinout technologii výroby jak kovových materiálů, tak jejich přesné opracování.

Jakmile se toto stalo, zrcadlové dalekohledy s kovovými zrcadly se staly hlavními přístroji, které přinášely informace o vesmíru. Velké reflektory dominovaly po celé 18. století, na jehož konci měl největší refraktor průměr cca 120 mm.

Tento proces byl počátkem 19. století přerušeno, kdy se podařilo úspěšně zvládnout technologii výroby optického skla, umožňující výrobu velkých čočkových objektivů.

Ve druhé polovině 19. století došlo k několika objevům: Podařilo se objevit chemický postup, kdy se na skleněnou plochu podařilo nanést tenkou stříbrnou vrstvu o odrazivosti okolo 90 %. Dále Leon Foucault objevil stínové metody, které umožňovaly dosahovat vysoké přesnosti při měření optických ploch.

Velkou revolucí v astronomii způsobilo fotografování nebeských objektů.

Fotografie zcela změnila nároky na optické parametry dalekohledů. Velké refraktory s malou světelností, barevnou vadou, značnými mechanickými rozměry nebyly vhodné pro fotografování řady objektů, které tehdy zajímaly astronomy.

V té době se začaly opět stavět reflektory se skleněnými zrcadly o mnohem menší stavební délce, větších průměrech a světelnostech, se kterými byly získávány cenné údaje o vesmírných tělesech. Již u 60 palcového dalekohledu se projevilo značné navýšení výkonů oproti starším čočkovým dalekohledům. Tento přístroj se stal prototypem pro další, větší přístroje.

V časopise *Sky and Telescope* byla publikována tato myšlenka : zásadní objevy v astronomii přinesly pouze tři dalekohledy. Tím prvním byl Galileův dalekohled „Objevitel“, se kterým byly poprvé pozorovány krátery na Měsíci, fáze Venuše, měsíce Jupitera, podivný vzhled Saturna, stavba Mléčné dráhy. Tím druhým přístrojem byl Fraunhoferův heliometr z observatoře v Königsbergu, se kterým byla poprvé změřena paralaxa pro hvězdu 61 Cygni.

Třetím byl 100 palcový dalekohled observatoře na Mount Wilsonu, jehož dosah umožnil ve dvacátých letech 20. století Edwinu Hubbleovi nalézt cefeidy v galaxii M31 a vztah mezi vzdálenostmi pozorovaných galaxií a její radiální rychlostmi.

4. Příklady zobrazovacích vlastností – spotdiagramy několika význačných zrcadlových dalekohledů

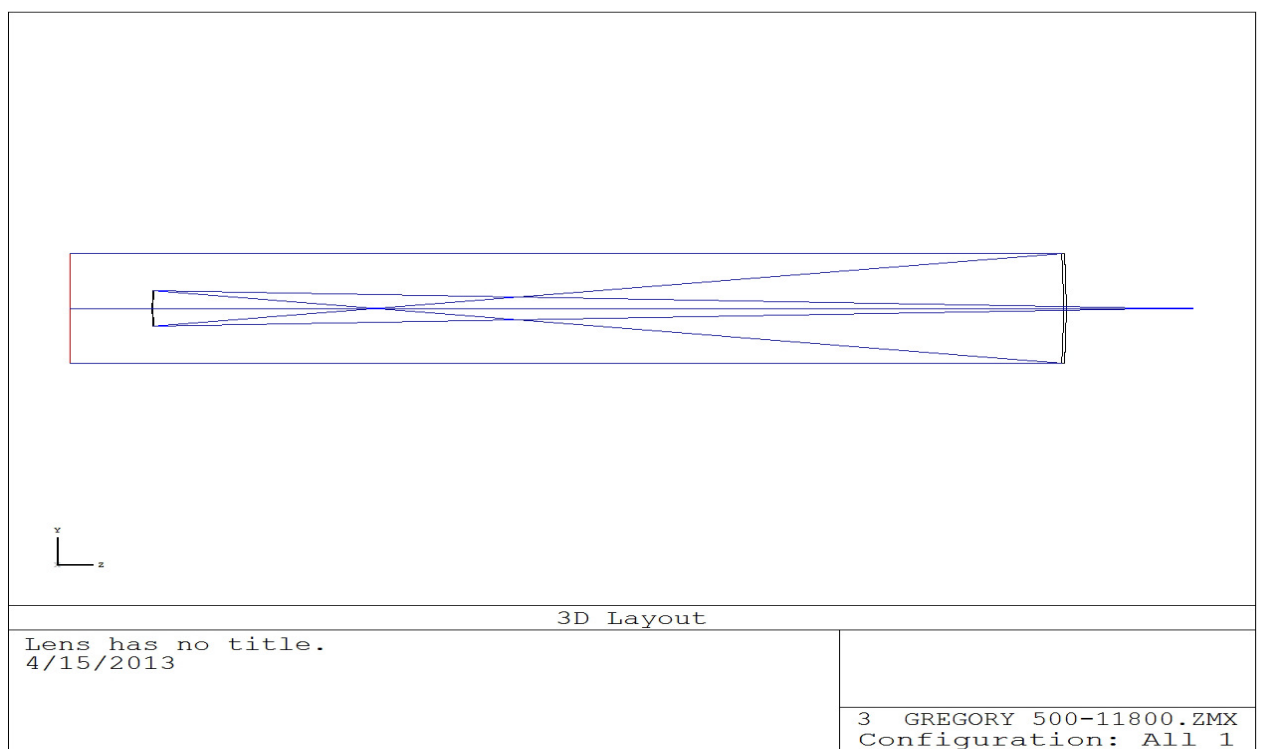
Vzhledem k tomu, že v literatuře se přesné parametry optických prvků publikují jen zřídka, pro naši simulaci zobrazovacích vlastností reflektorů jsme použili jen přibližné průměry zrcadel a jejich ohniskových vzdáleností. Ty jsou v literatuře velice často uváděny v palcích a stopách. U dalekohledů o průměru 60 a 100 palců z observatoře na Mount Wilsonu byly vzdálenosti sekundárních zrcadel od primárních odhadnuty z publikovaných fotografií.

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.

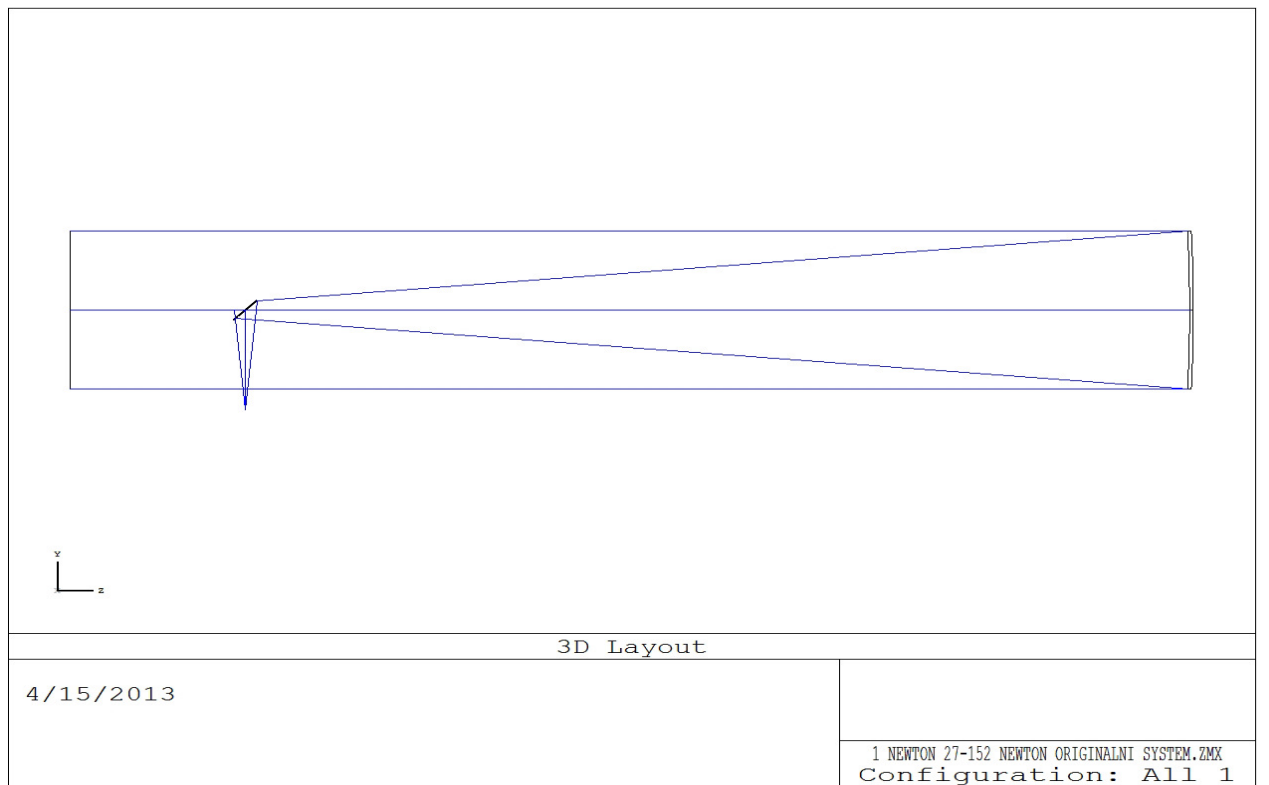
5. Literatura

- [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] S.C.B.Gascoigne, Recent Advances in Astronomical Optics, Applied Optics, Vol.12, No.7, July 1973
- [4] Rutten,van Venrooij, Telescope Optics, Willmann-Bell, Inc.,Richmond, Virginia,2002
- [5] N.N.Michelson, Optičeskije teleskopy, Izdatelstvo “Nauka“, Glavnaja redakcija fiziko-matematičeskoj literatury, Moskva, 1976

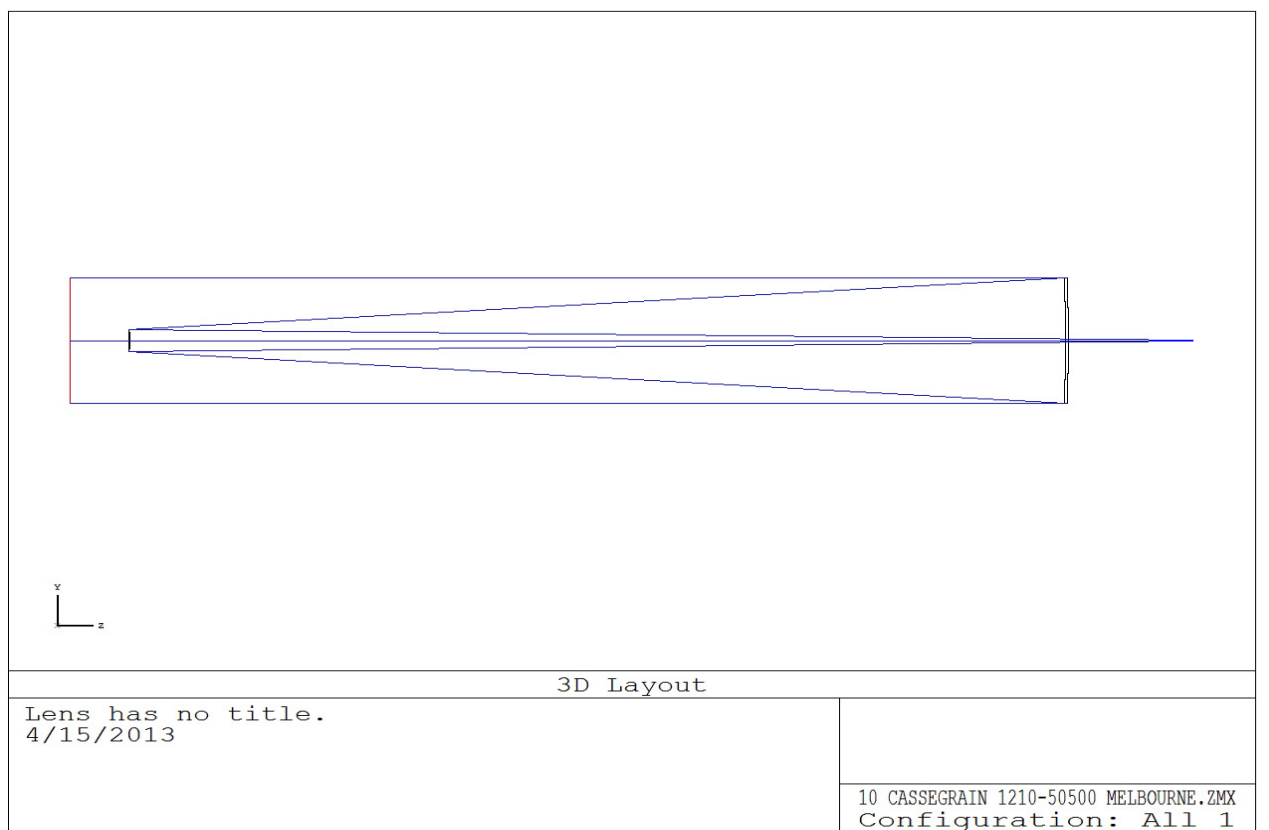
- [6] Apenko M.I., Dubovik A., S., Prikladnaja optika, Nauka, Moskva, 1982
- [7] Optical Design Program Zemax, User's Guide, Version 10, Focus Software, Inc., Tuscon 2005
- [8] Astronomical Society of the Pacific, San Francisco, California, Leafet No. 364—October, 1959, The Last of the Specula, Arthur R. Hogg, Mount Stromlo Observatory Canberra, Australia, <http://adsabs.harvard.edu/full/1959ASPL....8..105H>
- [9] Korekce optických vad astronomických zrcadel, Zdeněk Rail, Daniel Jareš, David Tomka, Roman Doleček, Sborník z Konference „Člověk ve svém pozemském a kosmickém prostředí“, Úpice 2011
- [10] James Gregory and the Reflecting Telescope, A.D.C. Simpson, National Museums of Scotland and University of Edinburgh, JHA, XXIII, 1992
http://articles.adsabs.harvard.edu/cgi-bin/nph-article_query?1992JHA....23...77S&data_type=PDF_HIGH&whole_paper=YES&



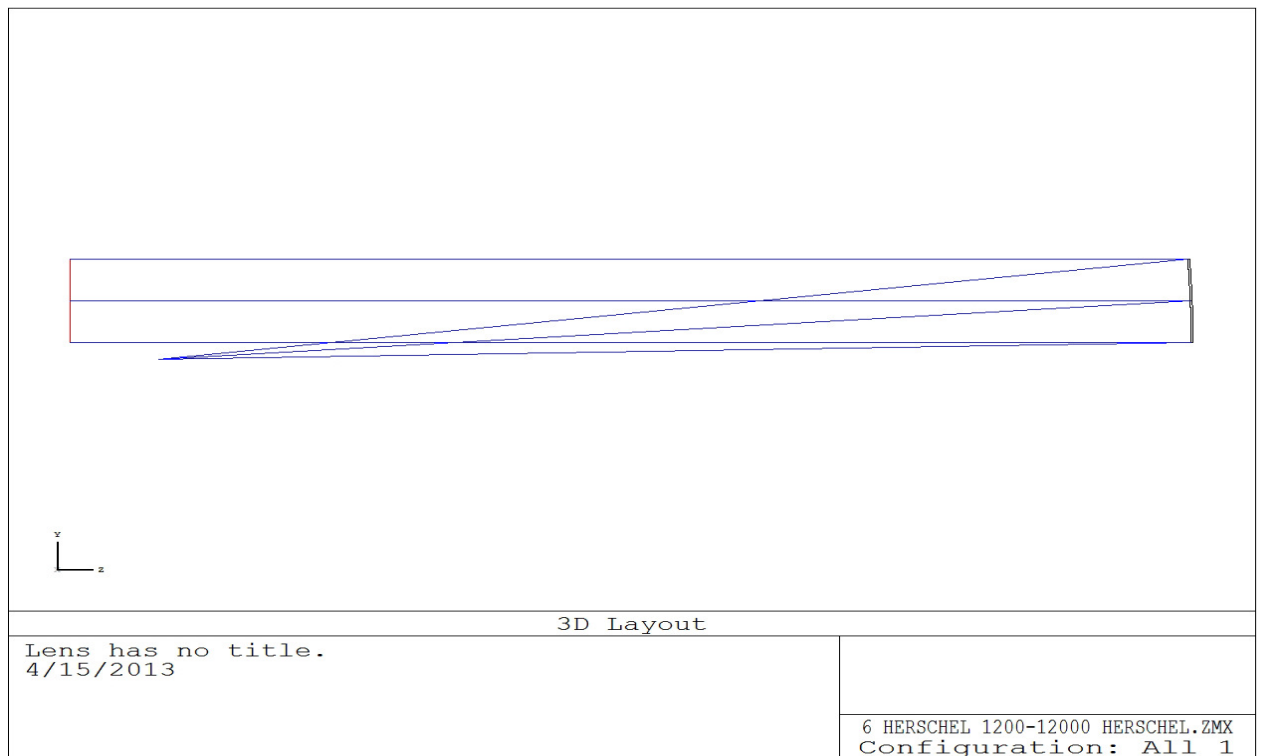
Obrázek 1. Schéma Gregoryho systému



Obrázek 2. Schéma Newtonova systému



Obrázek 3. Schéma Cassegrainova dalekohledu



Obrázek 4. Schéma Herschelova dalekohledu

Prezentace: [prezentace1.ppt](#)

Obrázky: [obrazky1](#)