



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV FYZIKÁLNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF PHYSICAL ENGINEERING

NÁVRH TELESKOPU PRO SPEKTRÁLNÍ ANALÝZU VZDÁLENÝCH OBJEKTŮ

DESIGN OF THE TELESCOPE SPECTROGRAPH FOR DISTANT OBJECT ANALYSIS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

TOMÁŠ DROBIL

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. JAN NOVOTNÝ, Ph.D.

BRNO 2022

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav fyzikálního inženýrství
Student:	Tomáš Drobil
Studijní program:	Fyzikální inženýrství a nanotechnologie
Studijní obor:	bez specializace
Vedoucí práce:	Ing. Jan Novotný, Ph.D.
Akademický rok:	2021/22

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Návrh teleskopu pro spektrální analýzu vzdálených objektů

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Spektrální analýza záření, které je generováno vzdálenými objekty, je hojně využívána mimo jiné v astronomických aplikacích. Analýza záření bolidů vstupujících do zemské atmosféry navíc vyžaduje vypořádat se s objekty, které mohou být znatelně v pohybu relativně k zornému poli. Předmětem práce je návrh teleskopu, který by kromě obrazu s definovaným zorným polem poskytoval také spektroskopická data detekovaného záření.

Cíle bakalářské práce:

- Rešerše teleskopů kombinovaných se spektrometry.
- Optický návrh na základě požadovaných parametrů.
- Výběr vhodných komponent, včetně kamery, s ohledem na požadované parametry.
- Mechanický návrh s ohledem na dané maximální zástavbové rozměry.

Seznam doporučené literatury:

SMITH, Warren J. Modern optical engineering: the design of optical systems. 4th ed. New York: McGraw Hill, 2008. ISBN 00-714-7687-3.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2021/22

V Brně, dne

L. S.

prof. RNDr. Tomáš Šíkola, CSc.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

Abstrakt

Spektra meteorů získaná z oběžné dráhy obsahují velké množství spektrálních čar v ultrafialové oblasti, která je z velké části pohlcována atmosférou a nemůže být tak pozorována z pozemních stanic. Tato bakalářská práce se zabývá návrhem teleskopu kombinovaným se spektrometrem, který bude umístěn v CubeSatu velikosti 2U, určeného pro detekci meteoru a jeho spektrální analýzu v ultrafialové až blízké infračervené oblasti. Součástí návrhu je výběr vhodné kamery. Na základě požadovaných parametrů bylo vytvořeno několik návrhů, průběh vývoje je shrnut v poslední kapitole. V práci se také nachází řešení teleskopů kombinovaných se spektrometry, určenými výhradně pro pozorování meteorů.

Summary

Meteor spectra obtained from orbit include many spectral lines in the ultraviolet region, which is mostly absorbed by the atmosphere and thus cannot be observed from ground stations. This bachelor thesis focuses on the design of a spectrograph, placed in a 2U CubeSat, suitable for meteor observation and its spectral analysis in the range from the ultraviolet to near-infrared region. The design includes choice of a suitable camera. Based on the required parameters, several designs have been created, and the process is summarized in the last chapter. The research study of telescopes combined with spectrometers used for meteor observations is also included.

Klíčová slova

teleskop, spektrometr, spektrograf, optický návrh, Zemax, meteor, CubeSat

Keywords

telescope, spectrometer, spectrograph, optical design, Zemax, meteor, CubeSat

DROBIL, T. *Návrh teleskopu pro spektrální analýzu vzdálených objektů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2022. 45 s. Vedoucí Ing. Jan Novotný, Ph.D.

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci s názvem *Návrh teleskopu pro spektrální analýzu vzdálených objektů* vypracoval samostatně, pouze za odborného vedení Ing. Jana Novotného, Ph.D., a že jsem uvedl všechny použité podklady v seznamu použité literatury.

Tomáš Drobil

Děkuji Ing. Janu Novotnému, Ph.D. za odborné vedení práce. Dále děkuji své rodině za podporu během studia a psaní této práce.

Tomáš Drobil

Obsah

Úvod	3
1 Pozorování a studium spekter meteorů	4
1.1 Meteor a související pojmy	4
1.2 Historie a současnost spektrometrie meteorů	4
1.3 Detekce meteorů a jejich spekter	5
1.3.1 Pozemní pozorovací sítě	5
1.3.2 Detekce meteorů z oběžné dráhy	6
1.4 Spektra meteorů	6
1.4.1 Spektrální složení malých meteoroidů	6
1.4.2 Spektrální složení velkých meteoroidů	7
1.4.3 Spektrum meteorů v ultrafialové oblasti	8
2 Optické systémy a optická spektrometrie	9
2.1 Paraxiální aproximace	9
2.2 Seidlova aproximace	9
2.3 Optické materiály	10
2.3.1 Optické materiály pro ultrafialovou oblast	10
2.4 Optické vady	10
2.4.1 Vyhodnocování kvality obrazu a vlivu vad	10
2.4.2 Otvorová vada	11
2.4.3 Koma	12
2.4.4 Astigmatismus a zklenutí pole	12
2.4.5 Zkreslení	14
2.4.6 Barevné vady	15
2.5 Způsoby korekce vad	15
2.6 Optimalizace optického systému	17
2.7 Základní popis optického systému	17
2.8 Clony v optickém systému	17
2.9 Difrakční limit	17
2.10 Princip spektrometru	18
2.10.1 Difrakce na mřížce	18
2.10.2 Účinnost difrakční mřížky	19
2.11 Detektory	20
2.12 Teleskopy/objektivy kombinované se spektrometry	20
3 Návrh spektrometru	23
3.1 Požadavky	23
3.2 Komerční řešení	23
3.2.1 Rešerše kamer	23
3.2.2 Rešerše objektivů	23
3.2.3 Možné sestavy	24
3.3 Vlastní řešení objektivu	26
3.3.1 Aspekty optického návrhu	26

OBSAH

3.3.2	Předběžný návrh	27
3.3.3	Přesnější návrh	29
3.3.4	Srovnání komerčního řešení a řešení s navrhovaným objektivem – prostorové umístění v CubeSatu	30
3.3.5	Zlepšení přesnějšího návrhu	30
	Závěr	40
	Literatura	41
	Seznam použitých zkratk a symbolů	45

Úvod

Spektrometrie meteorů přináší důležité informace o složení meziplanetární hmoty. Při vstupu tělesa do atmosféry dochází k ablacii materiálu a je proto možné spektroskopicky určit složení meteoroidu, tedy podobně jako je tomu v případě metody spektrometrie laserem buzeného plazmatu – LIBS (Laser-induced breakdown spectroscopy). Do budoucna se uvažuje o těžbě na asteroidech a proto je klíčové znát jejich složení a jaké materiály obsahují.

Spektrometrie meteorů má relativně dlouhou historii, avšak ultrafialová část spektra, obsahující velké množství atomárních a molekulárních čar, je prakticky neprozkoumanou oblastí vzhledem k tomu, že zemská atmosféra tuto část spektra absorbuje a jedinou možností je proto pozorování z oběžné dráhy. Předmětem této práce je návrh teleskopu v CubeSatu o velikosti 2U (10 cm × 10 cm × 20 cm) pozorující v širším intervalu vlnových délek, který zahrnuje právě i ultrafialovou oblast.

Tato práce nejprve přibližuje stručnou historii a problematiku meteorů se zaměřením na zkoumání jejich spekter. Ve druhé části je rozebrána teorie k optickým systémům a spektrometrii a je uveden přehled používaných teleskopů kombinovaných se spektrometry, spektrografy, sloužících k získávání spekter meteorů. Třetí, poslední část, je věnována výběru komponent a samotnému optickému návrhu.

1. Pozorování a studium spekter meteorů

1.1. Meteor a související pojmy

Meteor rozumíme světelný úkaz na obloze doprovázející průlet částice atmosférou, typicky částice z meziplanetárního prostoru¹ zvanou *meteoroid*, mezi laiky je tento úkaz znám pod označením „padající hvězda“ nebo „létavice“. Tento jev probíhá vysoko v atmosféře – ve výškách zhruba 80 až 140 km nad povrchem, vstupní rychlost je zhruba 16 až 72 km·s⁻¹. Jako *bolid* pak označujeme velice jasný meteor s jasností převyšující -4 mag. V ojedinělých případech těleso přežije průlet atmosférou a dopadne na zemský povrch, takový fragment původního meteoroidu nazýváme *meteorit*². [4, 1, 2]

Velká část meteorů patří mezi některý z *meteorických rojů*³, což je označení pro zvýšenou četnost meteorů vlivem průchodu Země *proudem* meteoroidů mající původ v kometárním prachu. Jako *radiant* označujeme zdánlivý bod na obloze, odkud meteory daného roje vylétávají (název roje pak zpravidla plyne z názvu souhvězdí, ve kterém leží radiant). [4, 1]

Pomineme-li pohyb v kosmickém prostoru, pak lze interakci meteoroidu se Zemí rozdělit na několik fází. Nejprve, v nejvyšších výškách atmosféry, tedy zhruba mezi 100 a 300 km, se nahřívá povrch meteoroidu. Vnitřek zůstává prakticky netknutý. Pokud se nejedná o jemný prach a meteoroid přežije nahřívání, nastává v hustších vrstvách atmosféry ablace. Povrch se taví a odpařuje při teplotě sahající až k hodnotě okolo 2 500 K, těleso se zpravidla rozpadá, probíhá zpomalování. Celá tato fáze trvá pouze několik sekund. Jestliže se celé těleso neodpaří a je zpomaleno na rychlost přibližně 3 km·s⁻¹ dostatečně vysoko na zemi, padá dále po temné dráze, těleso pohasíná a k zemi padá volným pádem. Tento pád trvá řádově několik minut. Následně interakce končí dopadem, u větších těles vzniká impaktní kráter. [1]

1.2. Historie a současnost spektrometrie meteorů

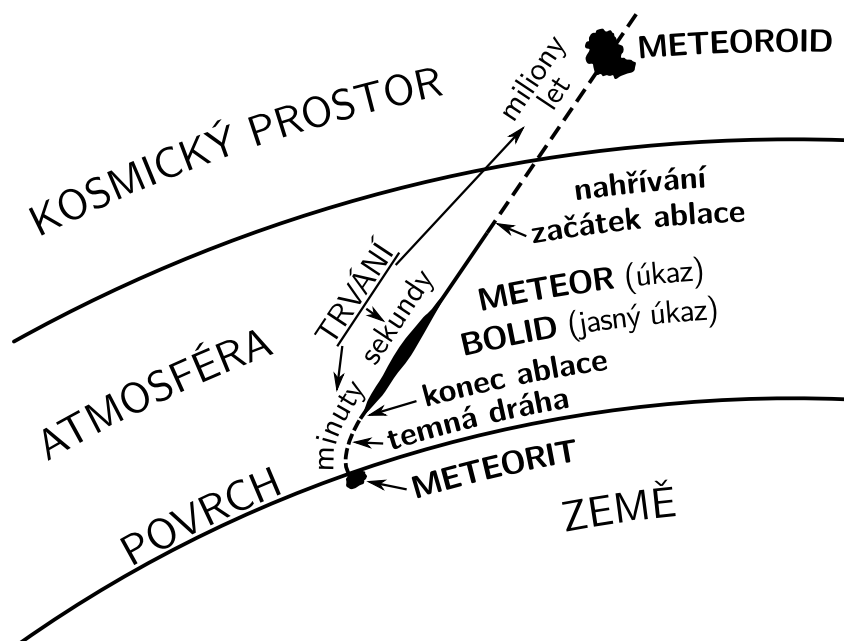
Historie spektrometrie meteorů je pochopitelně spjatá s vývojem techniky. Počátky fotografického záznamu spekter meteorů sahají na přelom 19. a 20. století. První snímek spektra meteoru byl pořízen dílem náhody roku 1897, první program pro získání spekter meteorů vznikl v roce 1904 v Moskvě, avšak další až roku 1931 v Kanadě. První snímky spekter obsahovaly pouze modrou část viditelného světla, až později obsáhly celé viditelné spektrum. Viditelné spektrum bylo rozšířeno o infračervenou oblast (zhruba do 9 000 Å) možnostmi fotografie začátkem 50. let, o blízkou UV oblast (do 3 100 Å) díky speciální optice až koncem 60. let. Další pokrok zhruba od 50. let umožnila dostupnost difrakčních mřížek, které tak nahradily do té doby používané hranoly, a později možnosti televizních kamer a čipů. [1, s. 338–340, 6, 7]

Za první polovinu 20. století však bylo pořízeno pouze několik desítek spekter a toto odvětví stálo spíše na okraji zájmu (do roku 1940 získáno 60, do roku 1970 pak 1 500

¹Mohou existovat i *umělé meteory* za účelem kalibrace teoretických modelů [1, str. 343].

²Terminologie je korektně definovaná v dokumentu [2], resp. [3].

³Nejvíce Perseidy a Geminidy, dohromady přes 50 % všech meteorů [5, str. 37].



Obrázek 1.1: Schématické znázornění některých pojmů. Překresleno podle obrázku v článku [1, str. 330].

různých spekter). Až v šedesátých letech 20. století vznikají větší pozorovací programy v několika státech včetně tehdejšího Československa. Počínaje koncem 60. let minulého století se začalo používat také televizních a později videokamer, větší rozmach nastal až v 90. letech. [1, 6] Videokamery měly oproti fotografickým metodám nižší rozlišení, nabývaly však vyšší citlivost, a tedy možnost zachycení slabších meteorů. Zhruba od počátku nynějšího milénia se ale výhody a nevýhody mezi videopozorováním a fotografií smazávají díky zlepšující se technice. [6, 8, str. 92]

1.3. Detekce meteorů a jejich spekter

Pozorování a spektrometrie meteorů se poměrně výrazně liší od jiných astronomických a možná ještě více od laboratorních měření. Poloha meteoru je totiž časově i prostorově nepředvídatelná a trvá často jen zlomky či jednotky sekund, navíc se jedná o rychle se pohybující předmět. Je tak nutné provozovat nepřetržitá pozorování. Ideální spektrometr pro takový účel by měl mít velké zorné pole, vysokou citlivost a velký spektrální rozsah. Tyto požadavky však jsou zpravidla protichůdné. Navíc ke zjištění trajektorie meteoru, absolutní jasnosti a dalších parametrů je potřeba meteor pozorovat alespoň ze dvou stanišť. Takové pozorování je tudíž výrazně významnější. V současné době proto funguje několik pozorovacích sítí, které umožňují systematický sběr dat. [8, str. 91 až 93]

1.3.1. Pozemní pozorovací síť

Pozorování meteorů probíhá v současnosti v rámci několika sítí v mnoha zemích. Existují tzv. bolidové sítě (anglicky *fireball network*) – European Fireball Network, Desert Fireball Network (v Austrálii) a Tajikistan Fireball Network. Tyto fotografické sítě jsou nejpřesnějším zdrojem dat – zejména trajektorií a intenzit meteorů. Dále existují projekty zaměřené na videopozorování meteorů, např. v Kalifornii a zemích Beneluxu (CAMS),

1.4. SPEKTRA METEORŮ

Japonsku (SonotaCo), Španělsku (SPMN) a střední Evropě (EDMOND). [8] V rámci některých z nich jsou získávána i spektra meteorů, typické přístroje používané k takovému účelu, tj. kamery kombinované se spektrometry, jsou uvedeny a popsány v další kapitole.

1.3.2. Detekce meteorů z oběžné dráhy

Kromě pozemního pozorování lze meteory pozorovat také z oběžné dráhy Země, takové pozorování meteorů probíhá např. z Mezinárodní vesmírné stanice (ISS) [9]. To přináší určité výhody, k asi největší patří možnost pozorování meteorů v ultrafialové oblasti s vlnovou délkou menší než 3 500 Å. První a dosud jediné spektrum meteoru (z roje Leonid) z oběžné dráhy bylo pořízeno v rámci mise Midcourse Space Experiment (MSX). [10] Jak již bylo uvedeno, pozorování meteoru z více stanic je cenné, proto se nabízí spolupráce s pozemními pozorováními. Přesnost určení trajektorie v takovém případě je zpracována v [11].

1.4. Spektra meteorů

Spektrum meteoru lze obecně rozdělit na dvě části – očekávané emisní čáry prvků a molekul z odpařeného materiálu meteoroidu (většina viditelného světla) a tepelné kontinuum vznikající zejména díky zahřáté atmosféře v blízkém okolí tělesa. Spektrum zpravidla nebývá neměnné, naopak dochází v závislosti na výšce v atmosféře a v čase k až poměrně prudkým změnám. Typicky bývá zpočátku viditelná jasná sodíková spektrální čára, postupně dochází ke snižování její intenzity, ke konci děje může tato čára zmizet úplně. Naopak je tomu u prvků s vyšší teplotní odolností – např. vápník (Ca) a hliník (Al) se odpařují jako poslední. Kromě toho se ve vysokých vrstvách atmosféry (nad 130 km) spektrum skládá pouze z čar prvků a molekul atmosféry (O, N, N₂). [8, 12, 13] V dalším se zaměříme na spektrální čáry spektra zářících par, z nichž lze do jisté míry určit složení meteoroidu⁴, přičemž tento způsob je jediný možný pro určení složení malých meteoroidů (o milimetrové až centimetrové velikosti). [14]

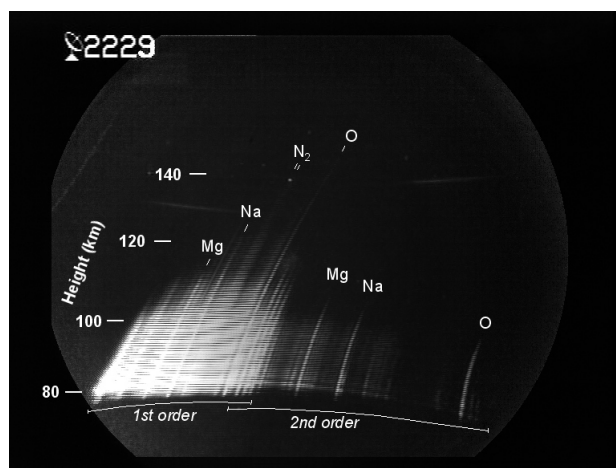
1.4.1. Spektrální složení malých meteoroidů

Spektra malých meteoroidů obsahují ve viditelné oblasti pouze několik čar – lze detekovat výhradně čáry prvků Mg (5 180 Å), Na (5 890 Å) a Fe (5 270 Å až 5 450 Å). Další čáry v modré oblasti jsou obtížněji detekovatelné a rozlišitelné. K nim patří čáry Ca I (4 230 Å), Ca II (3 930 Å až 3 970 Å), Cr I (4 250 Å až 4 300 Å), Mn I (4 030 Å), Mg I (3 830 Å), ovšem tři poslední se překrývají s čarami Fe. Infračervená oblast obsahuje převážně čáry patřící prvkům a molekulám obsažených v atmosféře, tj. O, N a molekulární pásy N₂. V infračervené oblasti se pak kromě nich nachází čáry Na I (8 190 Å) a K I (7 700 Å). Spektra meteorů pro malé meteoroidy se díky výskytu tří výrazných čar, Mg I, Na I a Fe I, klasifikují pomocí ternárního diagramu na základě poměru intenzit jednotlivých složek, viz obr. 1.4. [8, 12]

⁴Rozdíl oproti skutečnému složení může být zapříčiněn např. tzv. diferenciální ablací (neboli neúplnému odpařování) či tvorbou molekul. [8]



Obrázek 1.2: Spektrum meteoru zachycené fotoaparátem Canon EOS Mark II s rybím okem $f/2,8$ a ohniskovou vzdáleností 15 mm a mřížkou $1\,000\text{ mm}^{-1}$. Převzato z [8, str. 330].

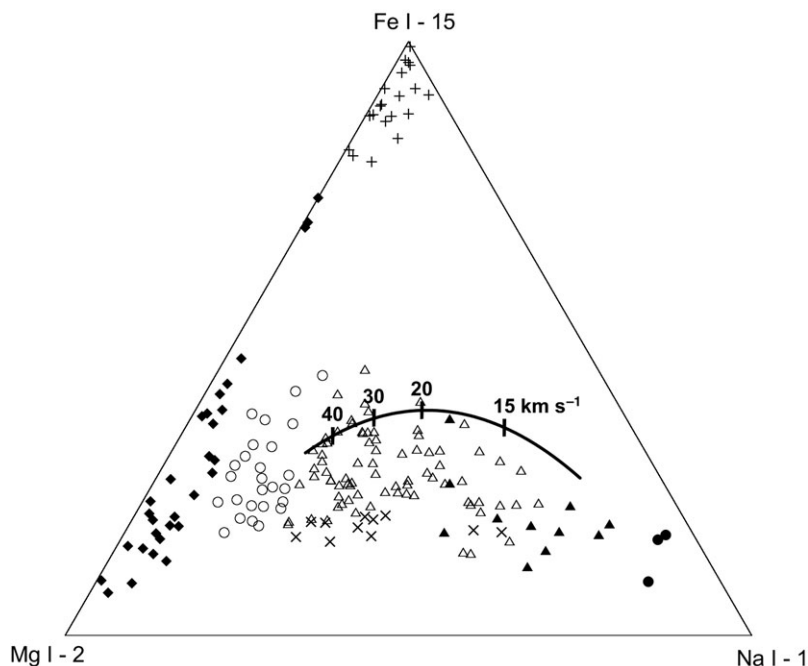


Obrázek 1.3: Spektrum meteoru s určenými spektrálními čarami pořízené videokamerou s objektivem $f/1,4$ s ohniskovou vzdáleností 50 mm a mřížkou 600 mm^{-1} , zorné pole 50° . Všimněme si překrývajících se difrakčních řádů, toto je velmi častý problém u podobných spektrometrů. Převzato z [13].

1.4.2. Spektrální složení velkých meteoroidů

Oproti malým meteoroidům lze u velkých (průměr větší než 10 cm) meteoroidů, tedy v případě bolidů, pozorovat více spektrálních čar. Spektrum bolidů se skládá ze dvou částí, resp. skupin spektrálních čar – hlavní, vždy se vyskytující, část odpovídá nízkoteplotní excitaci (zhruba 4 500 K). Druhá část odpovídá vysokoteplotní excitaci (zhruba 10 000 K), přičemž tato část výrazně závisí na rychlosti průletu – rychlé bolidy mají tuto část výraznější než pomalé. První část obsahuje čáry zejména neutrálních prvků – Fe I, Mg I, Na I, Ca I, Cr I, Mn I (shodné jako u malých meteoroidů), dále pak také Ti I, Ni I, Co I, Li I, Si I, Al I. Druhá část, pozorovatelná pouze u dostatečně jasných a rychlých meteorů, zahrnuje čáry Mg II, Si II, Fe II a někdy H I. [8]

1.4. SPEKTRA METEORŮ



Obrázek 1.4: Klasifikace meteoroidů pro malé meteoroidy na základě spekter meteorů pomocí ternárního diagramu. Poloha v diagramu je určena poměrem intenzit příslušných spektrálních čar. Vyznačená křivka znázorňuje polohu chondritických meteoroidů v závislosti na jejich rychlosti. Symboly určují klasifikaci meteoroidů – normální (Δ), chudé na sodík (\circ), bez sodíku (\blacklozenge), tzv. *Na-enhanced* (\blacktriangle), bohaté na sodík (\bullet), chudé na železo (\times), železité ($+$). Převzato z [8, str. 50].

1.4.3. Spektrum meteorů v ultrafialové oblasti

V odstavcích výše byla popsána typická spektra pozorovatelná z povrchu Země. Jak již bylo zmíněno, výhodou pozorování z oběžné dráhy je možnost pozorovat množství dalších spektrálních čar vyskytujících se v ultrafialové oblasti s vlnovou délkou pod přibližně 3500 Å díky absenci hustých vrstev atmosféry. Mezi důležité prvky mající silné spektrální čáry v UV patří především uhlík a síra. Spektrum meteorů v ultrafialové oblasti není takřka prozkoumané, dosud jediné spektrum meteoru obsahující ultrafialovou oblast bylo získáno v rámci mise MSX (1100 Å až 8600 Å). Byly identifikovány spektrální čáry O I, N I, H I (atmosferického původu), Fe I, Fe II, Mg I, Mg II, Si I, NO, OH. [8, 10, 15]

2. Optické systémy a optická spektrometrie

Pojmem *optický systém* rozumíme soustavu *optických členů*, tj. čoček, zrcadel, clon apod., vytvářející pro předmět obraz dané velikosti, zvětšení, v dané poloze a v dané orientaci, zobrazující členy, tj. čočky a zrcadla označujeme jako *optické prvky*. Optický systém můžeme zpravidla zjednodušit – typicky nahradit několik optických prvků jedním, případně nahradit optické prvky o nulové tloušťce. [16]

Zpravidla tak při návrhu postupujeme od jednoduchého ke složitějšímu, což proces zjednodušuje i zpřehledňuje. Techniky, proces a úskalí návrhu jsou přiblíženy níže.

2.1. Paraxiální aproximace

Pro hrubé výpočty nebo prvotní návrh je zpravidla vhodné počítat se vztahy platnými v paraxiální aproximaci. Funkci sinus lze vyjádřit jako mocninnou řadu

$$\sin \alpha = \alpha - \frac{\alpha^3}{3!} + \frac{\alpha^5}{5!} + \dots, \quad (2.1)$$

v paraxiální aproximaci zanedbáme všechny členy kromě prvního, tedy platí

$$\sin \alpha \approx \alpha. \quad (2.2)$$

Tato aproximace velmi dobře platí pro paprsky s malým¹ úhlovým odklonem od osy. Mluvíme pak o výpočtech v *paraxiálním prostoru* (též *Gaussově*). [17, 18]

V paraxiálním prostoru platí pro tenkou čočku známá zobrazovací rovnice

$$\frac{1}{a'} - \frac{1}{a} = \frac{1}{f'}, \quad (2.3)$$

přičemž f' je ohnisková vzdálenost čočky, a a a' jsou vzdálenosti předmětu a obrazu při znaménkové konvenci užitá v [18], která se při zobrazování předmětu v nekonečnu značně zjednoduší – obraz leží v ohniskové rovině. [18]

2.2. Seidlova aproximace

Pokud funkci sinus aproximujeme prvními dvěma členy mocninné řady (2.1), tj.

$$\sin \alpha \approx \alpha - \frac{\alpha^3}{3!}, \quad (2.4)$$

počítáme již v aproximaci významně bližší realitě. Hovoříme o výpočtech v *Seidlově prostoru* a v rámci něj můžeme studovat obrazové vady 3. řádu, které jsou popsány níže. [18, 19]

¹Záleží na požadované přesnosti.

2.3. Optické materiály

Optické materiály můžeme rozdělit na optická skla, krystaly a plastické hmoty. Nejdůležitějším materiálem jsou optická skla, kromě jiného poskytují širokou škálu různých optických vlastností. Optické materiály zpravidla mají normální disperzi, tj. pro index lomu závislém na vlnové délce platí

$$\frac{dn}{d\lambda} < 0, \quad (2.5)$$

což má za následek, že kratší vlnové délky se lámou více, což je příčinou barevné vady popsané níže. Disperze je charakterizována *Abbého číslem* zpravidla definovaným jako

$$\nu = \frac{n_d - 1}{n_F - n_C}, \quad (2.6)$$

přičemž F, d, C jsou Fraunhoferovy čáry po řadě 4 861 Å, 5 876 Å, 6 563 Å. [17, 18]

2.3.1. Optické materiály pro ultrafialovou oblast

Mezi speciální materiály patří krystaly, na rozdíl od obvyklých skel jsou typicky dobře propustná v ultrafialové a infračervené oblasti spektra. Takové materiály jsou v tabulce 2.1. Protože se nejedná o skla, nelze vytvářet tmelené prvky a je proto nutné, aby byla v optickém systému s takovými materiály každá čočka uložena samostatně. To komplikuje návrh a následkem také může být i větší množství vad. [17, 20, str. 371]

Tabulka 2.1: Důležité materiály pro použití v ultrafialové oblasti. Převzato z [17, str. 152] a upraveno. Číselné hodnoty pro index lomu a Abbého číslo podle [21]. Index lomu je platný pro čáru d (tj. 5 876 Å).

Materiál	n	ν	rozsah/ μm
SiO ₂	1,459	67,82	0,15 až 4,0
Al ₂ O ₃ (safír)	1,768	72,31	0,17 až 5,5
BaF ₂	1,475	81,78	0,18 až 12
CaF ₂	1,434	94,99	0,12 až 11,5
MgF ₂	1,378	106,22	0,12 až 9,0

2.4. Optické vady

Uskutečnění perfektního zobrazení je zpravidla nemožné, každý reálný optický systém je typicky zatížen jistými vadami (aberacemi), které mají vliv na kvalitu obrazu. Při návrhu optického systému se tedy snažíme vady korigovat na žádoucí mez. Abychom toho mohli dosáhnout, je důležité optické vady kategorizovat a znát jejich projevy. [17]

2.4.1. Vyhodnocování kvality obrazu a vlivu vad

Proces optického návrhu typicky znamená kontrolu a vylepšování kvality obrazu na požadovanou mez. Kvalitu obrazu resp. vliv vad na optický systém přitom typicky vyhodnocujeme pomocí různých diagramů, ty stěžejní jsou přiblíženy v následujících odstavcích.

2. OPTICKÉ SYSTÉMY A OPTICKÁ SPEKTROMETRIE

Spot diagram představuje obraz vzniklý v obrazové rovině pro velké množství paprsků vycházející z předmětového bodu a procházející, typicky rovnoměrně, vstupní pupilou optického systému. Spot diagram nezahrnuje difrakční jevy („analogii“ počítající s difrakčními jevy je graf *Rozptylové funkce PSF – Point Spread Function*), je však základním nástrojem pro vyhodnocování optického systému. Velikost vzniklého obrazu můžeme kvantifikovat číselnou hodnotou r_{rms} – význam je přiblížen na obr. 2.1 (pro přesnou definici viz [19, str. 78]). [17, 19]

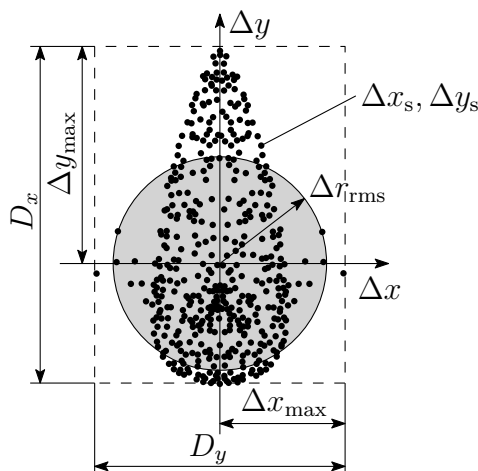
Ray fan zobrazuje příčnou vadu zobrazení v závislosti na poloze průsečíku paprsku ve vstupní pupile. [17]

Aberace vlnoplochy, vztahující se k danému obrazovému bodu, je typicky 3D graf a znázorňuje odchylku vlnoplochy od referenční kulové vlnoplochy. [17]

Funkce přenosu kontrastu (MTF – Modulation Transfer Function) zobrazuje kontrast, definovaný pomocí extrémů intenzity jako

$$K = \frac{I_{\text{max}} - I_{\text{min}}}{I_{\text{max}} + I_{\text{min}}}, \quad (2.7)$$

v závislosti na prostorové frekvenci, jejíž jednotkou je typicky cyklus/mm, což odpovídá jednomu páru světlého a tmavého proužku. [19]

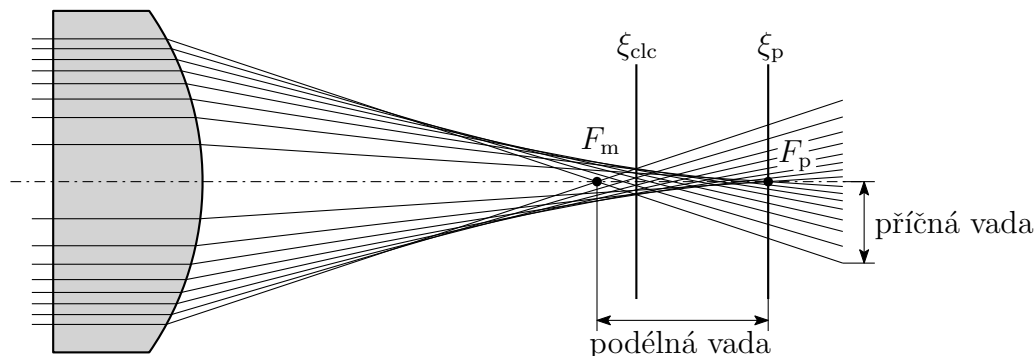


Obrázek 2.1: Spot diagram a znázornění významu poloměru r_{rms} . Překresleno podle obrázku v [19, str. 77].

2.4.2. Otvorová vada

Touto vadou trpí všechny optické systémy, jejichž optické prvky mají kulový povrch (odtud někdy také název *kulová* nebo *sférická* vada). Projevuje se obdobně jako rozostření a postihuje všechny body pole na rozdíl od ostatních vad uvedených v této kapitole mimo vad barevných. Taktéž snižuje kontrast. Příčinou otvorové vady je různá ohnisková vzdálenost pro paprsky procházející v různé vzdálenosti od středu optického prvku (tj. zóně apertury) – jestliže mají marginální paprsky (procházející okrajem čočky) ohnisko blíže k předmětu, hovoříme o podkorigované vadě, ta zpravidla nastává u spojek. Naopak je tomu u rozptylek, ty mají marginální ohnisko dále, mluvíme o překorigované otvorové vadě. [22, 16, 19]

2.4. OPTICKÉ VADY

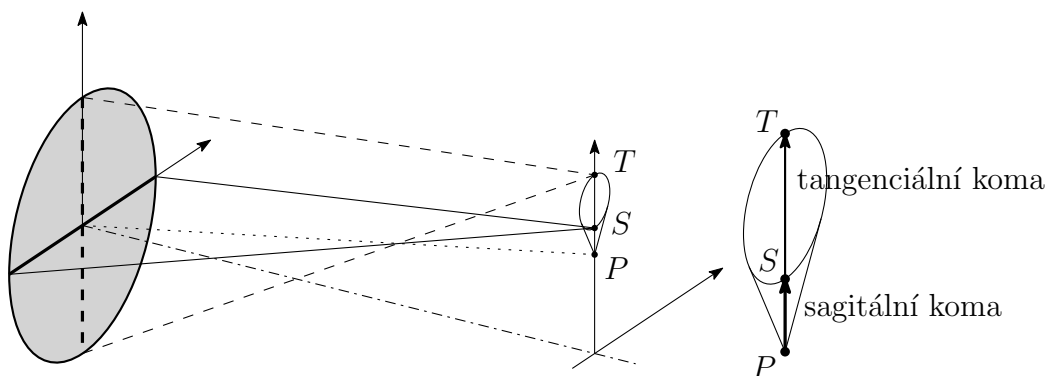


Obrázek 2.2: Schématické znázornění otvorové vady pro osové paprsky přicházející z nekonečna. V tomto případě se jedná o podkorigovanou otvorovou vadu, marginální ohnisko F_m se nachází před paraxiálním ohniskem F_p . ξ_p značí paraxiální ohniskovou rovinu, ξ_{clc} rovinu, v níž má stopa nejmenší průměr (v anglicky psané literatuře označováno jako *circle of least confusion*). Překresleno a upraveno podle obrázku v [17, str. 507].

2.4.3. Koma

Komu lze chápat jakožto změnu zvětšení v závislosti na poloze v apertuře. Jedná se o nesymetrickou vadu postihující široký mimoosový svazek paprsků. Tato vada je zpravidla nežádoucí z toho důvodu, že lze kvůli nesymetrickému tvaru spotu obtížně určovat přesnou polohu bodového obrazu. Odstraněním komy se typicky do jisté míry odstraní i jiné vady, proto se snažíme optický systém této vady zbavit prioritně. [22, 16, 17]

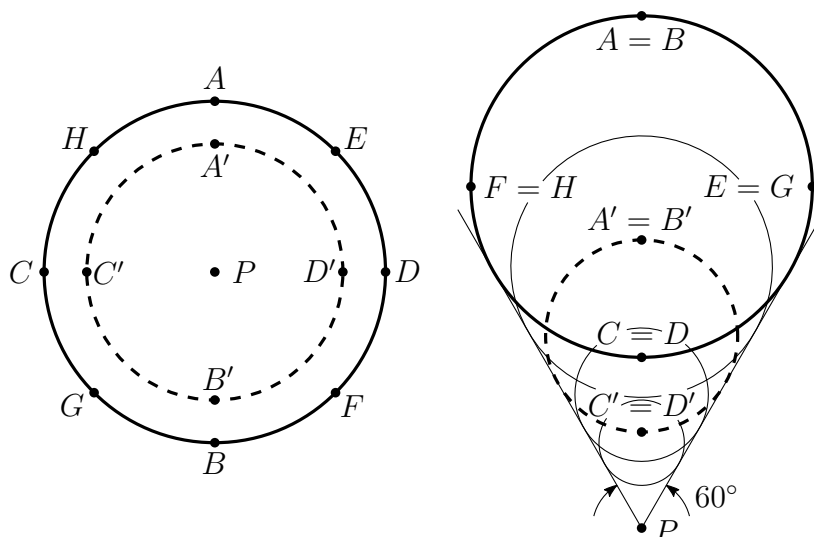
Na obrázku 2.3 můžeme vidět princip vzniku komy. Vzdálenost $|PT|$ označuje tangenciální koma. Podobně $|PS|$ označuje sagitální koma, její velikost je třetina tangenciální komy [16, str. 79]. (doplnit větu) V axiálně symetrickém optickém systému proto tento kometární obrazec vždy mívá směr od/do středu zorného pole – rozlišujeme vnější a vnitřní koma v tomto pořadí, přičemž jako směr komy chápeme z bodu P do T . Podrobnější popis je znázorněn na obr. 2.4 – paprsky z každé aperturní zóny – tj. kružnice – v komě opět tvoří kružnici, ale „dvakrát obtočenou“. [16, 17, 19, 22]



Obrázek 2.3: Vznik komy. Plně vyznačeny krajní sagitální paprsky, čárkovaně tangenciální a tečkovaně hlavní paprsek. Nakresleno podle obrázku v [19, str. 24].

2.4.4. Astigmatismus a zklenutí pole

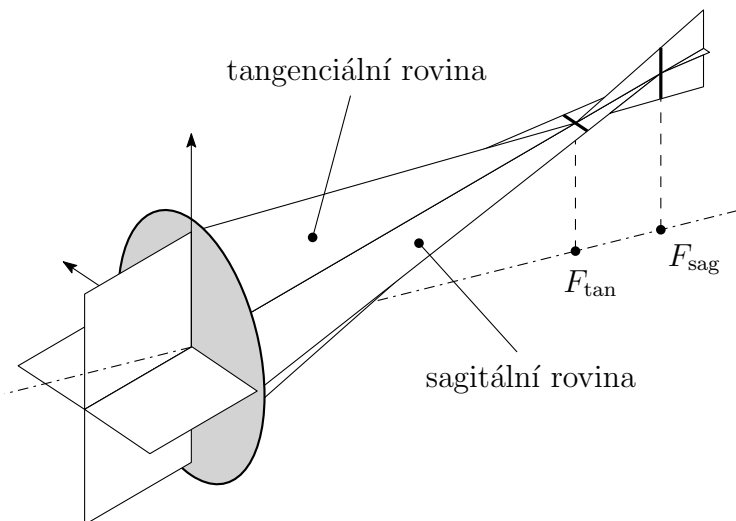
Nejprve definujeme jako *tangenciální* (nebo též *meridionální*) takovou rovinu, v níž leží osa optické soustavy. Rovinu na ní kolmou v níž leží hlavní paprsek označme jako *sagi-*



Obrázek 2.4: Koma (vpravo). Schématicky znázorněný vztah mezi pozicí paprsků v zóně apertury (vlevo) a pozicí ve spot diagramu (vpravo). Celá jedna kružnice ve spot diagramu příslušející dané zóně je tak vlastně obsáhnuta pouze půlkružnicí ze zóny. Tučně jsou vyznačeny odpovídající si kružnice, další jsou dokresleny tenče. Průměr kružnic vpravo odpovídá druhé mocnině průměrů kružnic vlevo. [16] Nakresleno podle obrázků v [17, str. 516] a [16, str. 78].

tální. Paprsky ležící v těchto rovinách označme tímž názvem – tedy jakožto *tangenciální* (*meridionální*) a *sagitální* paprsky. [16]

Astigmatismus je taková vada, při níž má optický systém různou polohu ohniska pro tangenciální a sagitální rovinu, viz obr. 2.5. Stopou je v ohniscích F_{tan} a F_{sag} úsečka, mezi ohnisky pak elipsa. Stejně jako v případě komy astigmatismus závisí na poli – pro nulové pole vada nenastává a s větší hodnotou pole je horší. [22, 16]



Obrázek 2.5: Astigmatismus. Ohnisková vzdálenost pro tangenciální a sagitální paprsky je odlišná. Nakresleno podle obrázku v [16, str. 80].

S astigmatismem úzce souvisí zklenutí pole, což je vlastně deformace ohniskové roviny. Sagitální i tangenciální ohnisková je totiž deformována na paraboloid. Pokud bychom

2.4. OPTICKÉ VADY

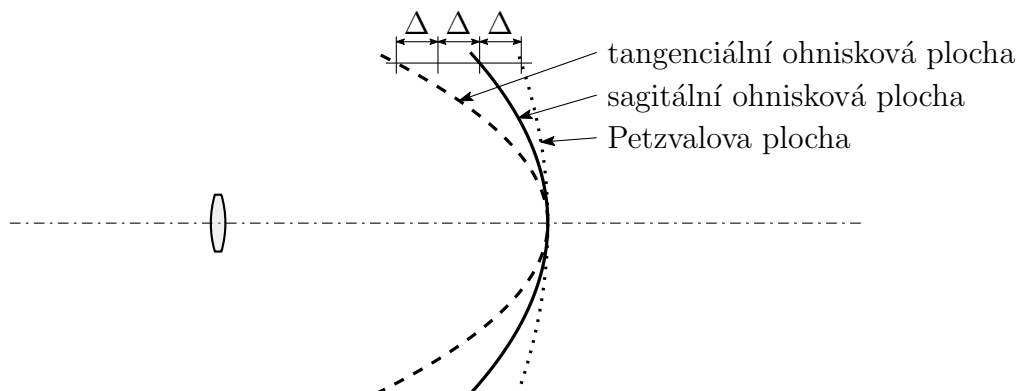


Obrázek 2.6: Projev astigmatismu. V tangenciální ohniskové rovině jsou ostré kroužky a rozmazané radiální úsečky, v sagitální ohniskové rovině je tomu naopak, tuto skutečnost lze domyslet z obr. 2.5. Překresleno podle obrázku v [17, str. 511].

optický systém zbavili astigmatismu, sagitální i tangenciální ohnisková rovina by sice splynula, ale obecně bychom se stále nezbavili zklenutí pole. V takovém případě, tj. zklenutí pole bez astigmatismu, označujeme ohniskovou rovinu jako *Petzvalovu plochu*, kterou zpravidla aproximujeme kulovou plochou, pro jejíž poloměr r_P platí

$$\frac{1}{r_P} = -n' \cdot \sum_k \frac{1}{n_k f_k'} \quad (2.8)$$

kde n' je index lomu, v němž je obraz (zpravidla $n' = 1$), n_k a f_k' jsou index lomu a ohnisková vzdálenost k -tého optického prvku. Tuto plochu uvažujeme i při nenulovém astigmatismu. Potom platí, že tangenciální ohnisková rovina je vzdálená od Petzvalovy plochy přesně trojnásobku vzdálenosti sagitální ohniskové roviny od Petzvalovy plochy, tato skutečnost je znázorněna na obr. 2.7. [17, 16]



Obrázek 2.7: Zklenutí pole v souvislosti s astigmatismem. Obrázek je v měřítku. Všimněme si, že vzdálenost tangenciální ohniskové plochy je trojnásobek vzdálenosti sagitální ohniskové plochy. Překresleno podle obrázku v [16, str. 81].

2.4.5. Zkreslení

Zkreslení na rozdíl od předchozích vad nerozmazává obraz, ale pouze jej zkresluje. Zkreslení obrazu nastává, jestliže se obraz (pro mimoosové paprsky) svojí velikostí liší od velikosti dané paraxiálním výpočtem, což můžeme také chápat tak, že se mění zvětšení v závislosti na vzdálenosti od optické osy. Příčina zkreslení spočívá mj. v otvorové vadě hlavního

2. OPTICKÉ SYSTÉMY A OPTICKÁ SPEKTROMETRIE

paprsku a na uspořádání clon. Zkreslení dělíme na *soudkovité* a *poduškovité*, viz obr. 2.8. Tyto dva případy po řadě nastávají, vložíme-li clonu před nebo za optický systém. [17, 18]

Při porovnání vzniklého obrazu s paraxiálním můžeme zkreslení kvantifikovat vztahem

$$V = \frac{y'_{\text{real}} - y'_{\text{ideal}}}{y'_{\text{ideal}}}, \quad (2.9)$$

kde y'_{real} a y'_{ideal} jsou po řadě vzdálenosti obrazového bodu od osy studovaného a paraxiálního obrazu. [17]



Obrázek 2.8: Dva typy zkreslení. U soudkovitého zkreslení dochází k poklesu zvětšení pro rostoucí pole, u poduškovitého naopak k růstu. Překresleno podle obrázku v [18, str. 40].

2.4.6. Barevné vady

Poněvadž index lomu skla závisí na vlnové délce (typicky klesá s delší vlnovou délkou), závisí na ní i ohnisková vzdálenost. Můžeme tak definovat *barevnou vadu polohy obrazu* jako rozdíl ohniskových vzdáleností pro různé vlnové délky, zpravidla čáry F (4 861 Å) a C (6 563 Å),

$$f'_F - f'_C. \quad (2.10)$$

Pro prvky se zápornou ohniskovou vzdáleností (rozptylky) je barevná vada záporná, tj. podkorigovaná, pro prvky s kladnou ohniskovou vzdáleností (spojky) pak naopak kladná – překorigovaná. Dále pak rozlišujeme *barevnou vadu velikosti obrazu*, tj. pro různou vlnovou délku dostáváme odlišnou velikost obrazu a analogicky zavádíme rozdíl velikostí obrazu

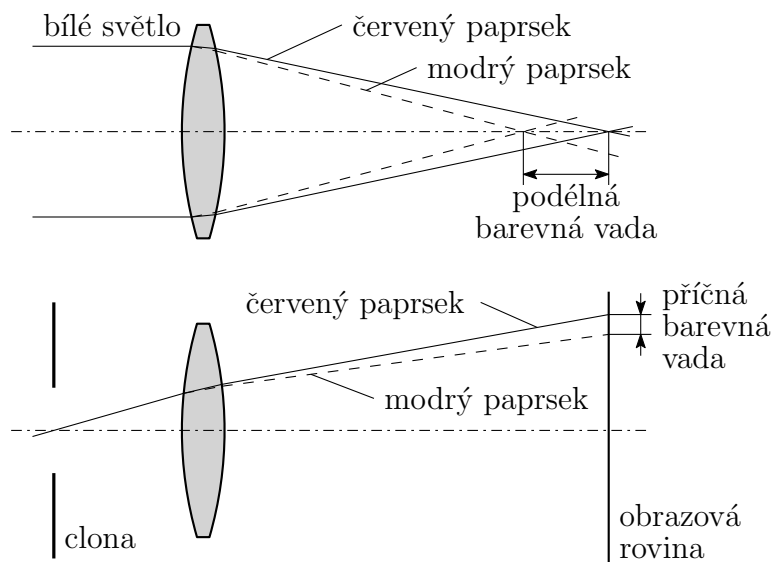
$$y'_F - y'_C. \quad (2.11)$$

Tato vada je podkorigovaná, resp. překorigovaná pro spojku s clonou před ní, resp. za ní. Obě tyto vady jsou znázorněny na obr. 2.9. Vada velikosti obrazu tak závisí na poloze clony, protože ta ovlivňuje, jakou část čočky projde hlavní parsek a potažmo celý svazek. [22, 16, 18]

2.5. Způsoby korekce vad

Při optickém návrhu se snažíme zbavovat nebo korigovat optické vady. Existuje několik technik/způsobů, jak snížit optické vady. Těmito způsoby lze buď optickým vadám předejít, nebo je kompenzovat, což znamená, že vadu vznikající na některém optickém povrchu kompenzujeme vadou vznikající na jiném povrchu. Obecně platí, že se spíše snažíme optickým vadám předcházet, je-li to možné. [19]

2.5. ZPŮSOBY KOREKCE VAD



Obrázek 2.9: Barevná vada polohy obrazu (nahore) a barevná vada velikosti obrazu (dole). Překresleno podle obrázků v [16, str. 83, 84].

Základním technikou je změna poloměrů čočky, resp. změna tvaru čočky při zachování ohniskové vzdálenosti. Dalším způsobem je rozdělení optické mohutnosti čočky do většího počtu prvků, čímž se zmenší dopadové úhly na povrch čoček. Oběma způsoby lze velmi efektivně korigovat otvorovou vadu. Další možností je kombinace čoček různých typů skel, tj. s různým Abbého číslem. Tímto způsobem např. dobře korigujeme barevnou vadu dubletem vzniklým spojením spojky z korunového skla a rozptylky z flintového skla. Mezi další techniky patří změna vzdáleností optických prvků a jejich tloušťek, změna pozice aperturní clony, změna skla. [19]

Techniky vyjmenované v předchozím odstavci jsou vypsány v tabulce 2.2, kde je zároveň zhodnocena jejich účinnost na dané optické vady.

Tabulka 2.2: Účinnost technik na korekci optických vad. Převzato a upraveno podle [19, str. 217].

	Otvorová vada	Koma	Astigmatismus	Petzvalovo zklenutí	Zkreslení	Bar. vada pol. obr.	Bar. vada vel. obr.								
<table border="1"> <tr> <td>■</td> <td>Velký vliv</td> </tr> <tr> <td>■</td> <td>Menší vliv</td> </tr> <tr> <td>■</td> <td>Zanedbatelný vliv</td> </tr> <tr> <td>□</td> <td>Žádný vliv</td> </tr> </table>	■	Velký vliv	■	Menší vliv	■	Zanedbatelný vliv	□	Žádný vliv							
■	Velký vliv														
■	Menší vliv														
■	Zanedbatelný vliv														
□	Žádný vliv														
Změna křivosti	■	■	■	■	■	■	■								
Rozdělení mohutnosti	■	■	■	■	■	■	■								
Kombinace skel	■	■	■	■	■	■	■								
Změna vzdáleností	■	■	■	■	■	■	■								
Změna polohy aperturní clony	□	■	■	■	■	■	■								
Změna skla / index lomu	■	■	■	■	■	■	■								

2.6. Optimalizace optického systému

Optimalizace je obecně popsána vektorem \vec{x} s n parametry a účelovou funkcí $\vec{f}(\vec{x})$ ² dimenze m . Cílem je pak zvolit parametry tak, aby bylo dosaženo zvolené cílové funkce $f_{\text{tar}}(\vec{x})$. Návrh optického systému je zpravidla posuzován tzv. *meritní funkcí*, přičemž cílem optimalizace návrhu je v ideálním případě dosažení globálního minima meritní funkce definované jako vážená suma (s vahami w_j)

$$F(\vec{x}) = \sum_{j=1}^m w_j \cdot [f_{\text{tar},j} - f_j(\vec{x})]^2. \quad (2.12)$$

Při optickém návrhu je poměrně zásadní počáteční volba návrhu, která značně ovlivňuje iterativní hledání minima meritní funkce. [19]

2.7. Základní popis optického systému

Každý optický systém lze charakterizovat několika parametry. K těm základním patří jeho *ohnisková vzdálenost* f' a průměr *vstupní pupily* (viz dále), který označme D . Pak

$$f/\# = \frac{f'}{D} \quad (2.13)$$

je *clonové číslo*. Tento vztah přísně vzato platí přesně pouze pro zobrazování z nekonečna, což však je případ navrhovaného optického systému v rámci této práce. [17]

2.8. Clony v optickém systému

V každém optickém systému jsou clony omezující množství procházejícího světla. *Aperturní clonou* nazýváme tu clonu, která určuje světelný kužel, jenž může optický systém zobrazovat. Obraz aperturní čočky před optickým systémem nazýváme *vstupní pupila*, obraz za pak *výstupní pupilou*. [16, 17]

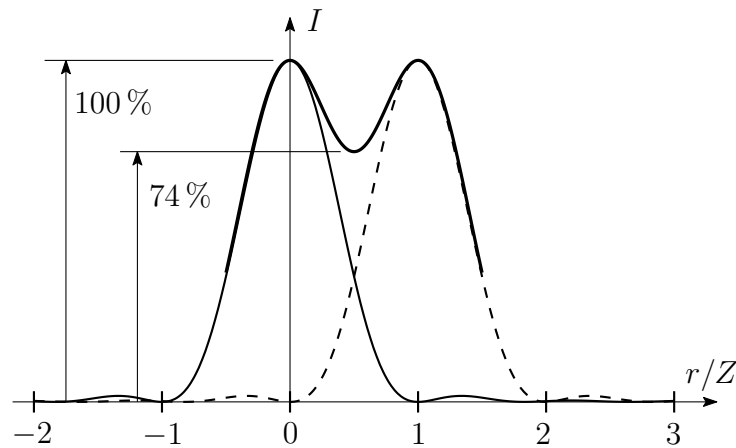
V reálném optickém systému zpravidla některé clony, resp. velikost čoček, omezují průchod světla z mimoosových bodů tak, že světlo z nich projde pouze částí aperturní clony. V takové situaci nastává *vinětace* – obrazy některých mimoosových bodů mají nižší jas, dochází k zatmavení/zastínění okrajů zorného pole vlivem stínících clon.

2.9. Difrakční limit

Vlnová povaha světla má za následek, že se předmět ani v případě dokonalého optického systému, tj. zbaveného všech paprskových vad, nezobrazí do bodu. Pro optický systém s kruhovou vstupní aperturou o poloměru R je průběh intenzity popsán pomocí Besselovy funkce J_1 , viz např. [23, str. 207]. Pro poloměr tzv. *Airyho disku*, tj. vzdálenosti prvního tmavého kroužku od středu Airyho disku, resp. polohy geometrického obrazu, platí

$$Z = 1,22\lambda(f/\#). \quad (2.14)$$

²Funkci $\vec{f}(\vec{x})$ zpravidla požadujeme spojitou a diferencovatelnou. [19]



Obrázek 2.10: Rozptylová funkce při zobrazení dokonalým systémem (plně, maximum v bodě 0). Znárodnění Rayleighova kritéria. Nakresleno podle obr. z [16, str. 193].

Tato vzdálenost zároveň odpovídá Rayleighovu kritériu pro rozlišitelnost dvou bodů, kdy tak maximum rozptylové funkce jednoho bodu leží v minimu druhého a naopak, viz obr. 2.10. [16]

2.10. Princip spektrometru

2.10.1. Difrakce na mřížce

Difrakční mřížka představuje optický prvek s periodicky se opakující strukturou – v nej-jednodušším případě, na který se dále omezíme, pouze v jedné dimenzi. Navíc budeme dále uvažovat pouze rovinnou difrakční mřížku. V souladu s obr. 2.11 označme g mřížkový parametr – tj. délku opakující se struktury, ϑ_0 úhel dopadající vlny, ϑ úhel odklonu, λ vlnovou délku světla a $m \in \mathbb{Z}$ difrakční řád. Namísto mřížkového parametru se mnohdy počítá s hustotou vrypů N , přičemž platí jednoduchý vztah

$$N = \frac{1}{g}. \quad (2.15)$$

Potom mezi těmito veličinami platí rovnost

$$g(\sin \vartheta + \sin \vartheta_0) = m\lambda, \quad (2.16)$$

odkud lze úhel odklonu vyjádřit jako

$$\vartheta = \arcsin \left(\frac{m\lambda}{g} - \sin \vartheta_0 \right). \quad (2.17)$$

[17]

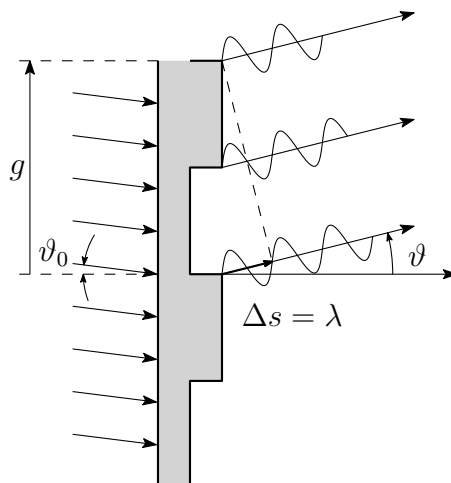
Tento popis ovšem platí pouze pro takové dopadající paprsky, kdy je rovina dopadu kolmá k vrypům na mřížce. Pro světelný paprsek dopadající pod obecným úhlem platí rovnice

$$g(\sin \vartheta + \sin \vartheta_0) \cos \varepsilon = m\lambda, \quad (2.18)$$

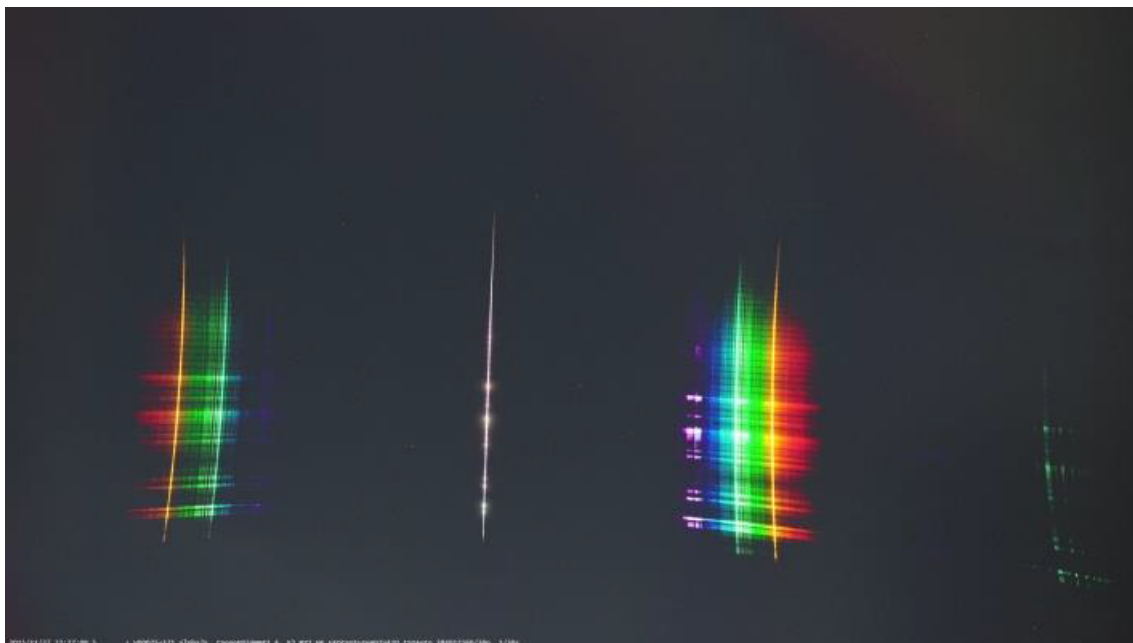
kde ε je úhel odklonu roviny dopadu. Velmi podstatným důsledkem této rovnice je, že při $\varepsilon \neq 0$ difrakční řády již neleží v jedné rovině, ale na povrchu kuželu, což se po zobrazení

2. OPTICKÉ SYSTÉMY A OPTICKÁ SPEKTROMETRIE

na obrazové rovině projeví tak, že spektrum neleží na přímce, ale je zakřivené do tvaru kuželosečky, viz obr. 2.12. [17, 22]. Tato distorze typicky ztěžuje následné zpracování spektra, to lze řešit relativně jednoduchou transformací obrazu. Čím větší je úhel odklonu od roviny kolmé na difrakční mřížku, tím výraznější je zakřivení. To je právě případ spektrometrie meteorů, kdy kamera s difrakční mřížkou zabírá široké až ultra-široké zorné pole. [24, 25]



Obrázek 2.11: Schématické znázornění difrakce na mřížce pomocí interference vln. Překresleno podle [17, str. 653].



Obrázek 2.12: Spektrum meteoru s dobře viditelným, zejména ve spodní části, zakřivením spektra v souladu s rovnicí (2.18). Převzato z [25].

2.10.2. Účinnost difrakční mřížky

Účinnost difrakční mřížky chápeme jako poměr energie v daném difrakčním řádu ku celkové energii daného světelného svazku. Přesný výpočet účinnosti je poněkud komplikova-

2.11. DETEKTORY

nější, závisí totiž na mnoha parametrech – předně na polarizaci dopadajícího světla, dále pak také na případné antireflexní vrstvě, profilu (např. sinový, pilovitý), materiálu. [17]

2.11. Detektory

Nejprve uvedme, že při zobrazování objektivem s *úhlem pole* $2w$ na snímač platí, že polovina délky jeho úhlopříčky, případně šířky nebo výšky, záleží k čemu přisoudíme úhel pole, je dána vztahem

$$|y'| = f' \cdot \operatorname{tg}(w), \quad (2.19)$$

kde f' je ohnisková vzdálenost objektivu. [18, str. 105]

Široce rozšířeným typem detektoru je v současné době CCD (charged-coupled device). Velmi rozšířené jsou také senzory typu CMOS, které jsou senzorem CCD principem funkčnosti podobné. Oproti CCD je však integrace všech funkcí na jednom čipu, což dělá tento typ kompaktnější. CMOS má také větší dynamický rozsah oproti CCD. Obě technologie, CCD i CMOS, jsou založeny na vnitřním fotoefektu. Dopadající foton předá svou energii polovodičovému materiálu za vzniku páru elektron-díra, což má za následek změnu vodivosti. [17]

Digitální CCD/CMOS kamery mají typicky elektronickou závěrku. Existují však dva typy – *rolling shutter* () a *global shutter*. První zmíněný typ vlastně skenuje postupně celou plochu senzoru, běžně po řádcích shora dolů, to má ale za následek, že (rychle) pohybující se předmět je na získaném snímku deformovaný, protože během snímání každého řádku se nacházel v odlišné pozici. Naproti tomu *global shutter* snímá/exponuje ve všech místech snímače ve stejný čas. [26]

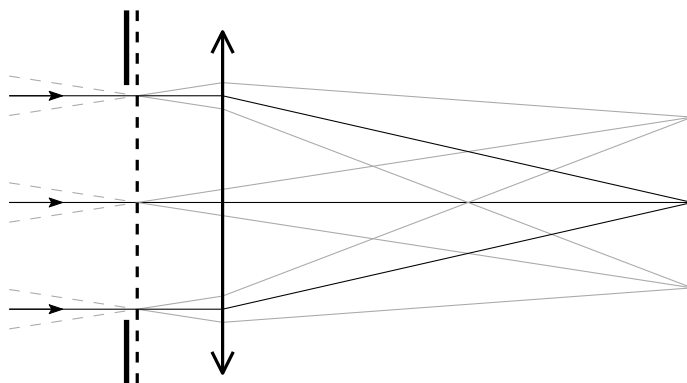
2.12. Teleskopy/objektivy kombinované se spektrometry

V běžné laboratorní praxi se často setkáváme se spektrometry se štěrbinou. Jejich princip je poměrně jednoduchý, obraz štěrbinový je s určitým zvětšením zobrazován na detektor, přičemž je uvnitř optické soustavy svazek (většinou rovnoběžný) rozložen na spektrum pomocí hranolu či difrakční mřížky. Pro vzdálené cíle (de facto ležící v nekonečné vzdálenosti) můžeme vložit hranol nebo difrakční mřížku před teleskop/objektiv, viz obr. 2.13. Takového uspořádání (tzv. slitless spectrography) se užívá výhradně v astronomických aplikacích nevyžadující příliš velké rozlišení pro dostatečně jasné objekty. [22] V tabulce 2.3 je přehled několika přístrojů sloužících ke spektroskopii meteorů.

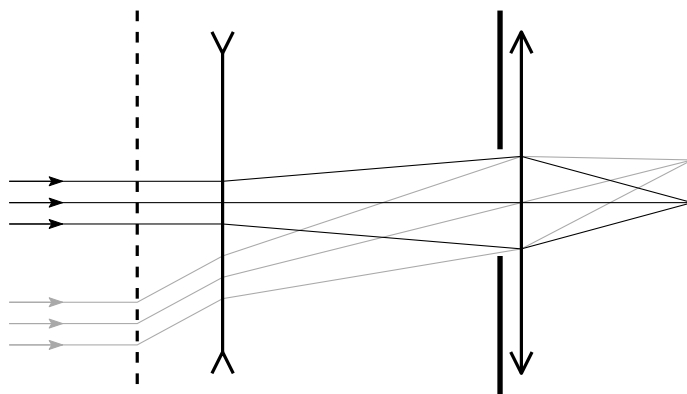
Přístroj č. 1 je fotografický spektrograf se záznamem na film o formátu $18 \text{ cm} \times 24 \text{ cm}$ s expozicí v řádu hodin (celá noc). Jedná se o typ přístroje na observatoři v Ondřejově, je zde v provozu dohromady šest obdobných spektrometrů, sloužících s úpravami již od 60. let 20. století. Jsou vybaveny mřížkou s počtem vrypů 600 mm^{-1} , nebo 400 mm^{-1} a jsou schopné detekovat meteory jasnější než -5 mag . Zajímavostí je pohybující se závěrka s frekvencí 15 s^{-1} , díky níž je stopa meteoru přerušovaná, z čehož lze zjistit rychlost průletu atmosférou. [6]

Přístroj č. 2 je videokamera se zesilovačem obrazu umístěná v Ondřejově a Kunžaku. Kamera má rozlišení $768 \text{ px} \times 576 \text{ px}$ s hloubkou obrazu 8 bit, snímá rychlostí 25 FPS a je vybavená mřížkou s počtem vrypů 600 mm^{-1} . Dosah je $+2 \text{ mag}$. [12, 13]

2. OPTICKÉ SYSTÉMY A OPTICKÁ SPEKTROMETRIE



Obrázek 2.13: Jednoduché schéma znázorňující princip spektrometru bez štěrbin s difrakční mřížkou. Zleva dopadá rovnoběžný svazek dalekého zdroje na difrakční mřížku, světlo určité vlnové délky jednak prochází dále (0. difrakční řád), zároveň se také odkládní o daný úhel v rámci difrakčních řádů – na obr. jsou šedě znázorněny $-1.$ a $1.$ řád. V případě meteoru tak vedle stopy meteoru pozorujeme spektrum, viz obr. 1.2.



Obrázek 2.14: Schéma spektrometru bez štěrbin pro retrofokální objektiv s aperturní clonou umístěnou na spojce. Černě vyznačena situace pro 0. difrakční řád, šedě 1. difrakční řád pro meteor ve směru optické osy, tj. $\vartheta_0 = 0^\circ$.

Přístroje č. 3 a 4 slouží v rámci sítě SMART (Spectroscopy of Meteoroids in the Atmosphere by means of Robotic Technologies) ve Španělsku (celkem padesát pět spektrografů na deseti stanovištích). Přístroj č. 3 je CCD videospektrograf (8 bit) s rozlišením $768 \text{ px} \times 576 \text{ px}$ snímající rychlostí 25 FPS a je vybaven mřížkou s počtem vrypů 500 mm^{-1} nebo 1000 mm^{-1} . Dosah je -3 mag . Přístroj č. 4 je CCD spektrograf s vysokou citlivostí a dobou expozice 30 s během bezměsíčné noci. Nevýhodou je, že mezi jednotlivými expozicemi je asi 10 s dlouhá pauza. Má mřížku s počtem vrypů 1000 mm^{-1} . [27]

Přístroj č. 5 je využíván v rámci sítě CAMS. CCD videokamera s rozlišením $640 \text{ px} \times 480 \text{ px}$ snímá rychlostí 29,97 FPS a je vybavena mřížkou s počtem vrypů 1379 mm^{-1} . Dosah je $+1 \text{ mag}$. Přístroj CAMSS (CAMS Spectrograph) vznikl složením šestnácti popsaných přístrojů pro pokrytí větší části oblohy. [28]

Přístroj č. 6 je videokamera systému AMOS (All-Sky Meteor Orbit System) se zesilovačem a projekčním objektivem 1,4/19 mm. Přístroj má rozlišení $1600 \text{ px} \times 1200 \text{ px}$

2.12. TELESKOPY/OBJEKTIVY KOMBINOVANÉ SE SPEKTROMETRY

Tabulka 2.3: Tabulka přístrojů užívaných k detekci spekter meteorů. Tabulka vytvořena na základě tab. z [8, str. 94], revidována a doplněna (parametry zorné pole a disperze u přístroje č. 8 byly dopočítány dle postupu blíže popsaneho v rámci rešerše v následující kapitole).

č.	Objektiv	Zorné pole	Rozlišení	Disperze	Rozsah/Å	Zdroj
1	4,5/360 mm	28° × 36°	2,5 Å	45 Å·mm ⁻¹	3 600–6 600	[6]
2	1,4/50 mm	∅50°	90 Å	30 Å·px ⁻¹	3 800–9 000	[12, 13]
3	$f/1,0$ až $f/1,2$	14° × 11° až 90° × 72°	30 Å	13 Å·px ⁻¹	3 700–8 000	[27]
4	$f/1,0$ až $f/2,8$	32° × 32° až 50° × 50°		5 Å·px ⁻¹	3 700–8 000	[27]
5	1,2/12 mm	30° × 22°	20 Å	11 Å·px ⁻¹	3 700–8 800	[28]
6	3,5/30 mm	∅100°	30 Å	13 Å·px ⁻¹	3 700–9 000	[29, 30]
7	1,4/24 mm	70° × 50°	20 Å	7 Å·px ⁻¹	4 000–6 600	[31]
8	1,4/50 mm	40° × 27°		7 Å·px ⁻¹	4 000–8 000	[31]
9	3,5/8 mm	140° × 90°	10 Å	4 Å·px ⁻¹	3 700–8 800	[8]
10	0,8/12 mm		30 Å	11,3 Å·px ⁻¹	4 000–8 000	[32]
11	0,98/(3 až 8) mm	60° × 48°		30,4 Å·px ⁻¹	3 500–8 000	[33]

a rychlostí snímání 12 FPS, počet vrypů mřížky je 1 000 mm⁻¹, dosah asi –2 mag. Přístroj je umístěn na observatoři Modra na Slovensku. [29, 30]

Přístroje č. 7 a 8 používají full frame CMOS kameru s rozlišením 3 840 px × 2 160 px (4K). Dosah je 0 mag. Přístroje jsou vybaveny po řadě mřížkami s počtem vrypů 600 mm⁻¹ a 300 mm⁻¹ a snímají rychlostmi 30 FPS a 60 FPS. Pozorování probíhá v Japonsku. [31]

Přístroj č. 9 je full frame zrcadlovka s označením DAFO (Digital Autonomous Fireball Observatories) s expoziční dobou 35 s. Tyto přístroje se nachází v české, slovenské a rakouské části Evropské bolidové sítě. [8]

Přístroj č. 10 je videokamera s rozlišením 720 px × 568 px (8 bit). Pro pozorování v [32] byly použity tři takové přístroje, dva s mřížkou 600 mm⁻¹, jeden s 300 mm⁻¹. V tabulce 2.3 je uvedena disperze pro přístroj s mřížkou 600 mm⁻¹. [32]

Přístroj č. 11 má rozlišení 720 px × 576 px a je vybaven mřížkou s počtem vrypů 500 mm⁻¹. Rychlost snímání je 25 FPS. Dosah je +2 mag. [33]

Všechny přístroje v tabulce 2.3 jsou umístěny v rámci pozemních stanic. Stojí za zmínku, že na přelomu minulého a současného století byl vyvíjen spektrograf, Schmidtův dalekohled $f/1,5$, $f' = 305$ mm, pro pozorování v UV (1 300 Å až 3 000 Å) se zorným polem 10° × 10° a nakloněnou odraznou difrakční mřížkou umístěnou před systémem. Přístroj byl zamýšlen k realizaci v rámci HH (Hitchhiker Program)³ nebo ISS. Nepodařilo se dohledat, zda byl tento projekt realizován. [35, 34]

³To však později nebylo možné kvůli tragédii raketoplánu Columbia. [34]

3. Návrh spektrometru

3.1. Požadavky

Cílem je vytvořit spektrometr, který se, i s elektronikou, rozměrově vejde do 2U CubeSatu (tj. krychle $10\text{ mm} \times 10\text{ mm} \times 20\text{ mm}$). Předběžně požadované parametry pro navrhovaný optický systém jsou v tabulce 3.1. Tyto požadavky, především spektrální rozsah, však nejsou zcela pevné a je cílem spíše posoudit jejich realizovatelnost. Pevným požadavkem je však zejména citlivost v UV vzhledem k tomu, že je to naprosto zásadní parametr, který není možné splnit při pozemních pozorováních a je tak předností tohoto projektu.

Tabulka 3.1: Přibližné požadavky pro navrhovaný spektrometr.

Parametr	Požadovaná hodnota
Spektrální rozsah	od UV (2000 \AA) ideálně až do NIR (10000 \AA)
Zorný úhel	60° (přinejhorším 40°)
Pixelové rozlišení	$10\text{ \AA}\cdot\text{px}^{-1}$ nebo lepší
Typ závěrky	global shutter
Bitová hloubka	alespoň 12 bit
Snímková frekvence	alespoň 4 FPS

3.2. Komerční řešení

V první části byla provedena rešerše trhu kamer a objektivů. Cílem bylo prověřit možnost komerčně dostupného řešení, které by vyhovovalo zadaným parametrům, nebo se jim alespoň přiblížilo. Při průzkumu trhu bylo zjištěno, že jen velmi málo komponent splňuje požadavek citlivosti v UV. Nalezené komponenty jsou rozebrány v následujících odstavcích a jsou z nich sestaveny možná řešení splňující alespoň částečně zadané parametry.

3.2.1. Rešerše kamer

V rámci této rešerše bylo snahou najít dostupné kamery citlivé v UV. Byla analyzována nabídka několika firem, zejména EHD, ARTRAY, Imperx, JAI, Phonofocus, QHY, pco a Ximea. Nalezené kamery citlivé v UV se svými parametry jsou vypsány v tabulce 3.2 a 3.3. U většiny kamer nepovedlo dohledat cenu, u kamery EHD-704UV se nepodařilo najít informaci o bitové hloubce. Všechny kamery kromě QHY 42 PRO mají připojení objektivu pomocí C mount.

3.2.2. Rešerše objektivů

Bylo nalezeno pouze několik málo objektivů propustných v UV. Tyto objektivy jsou v tabulce 3.4. Všechny zde uvedené objektivy mají připojení typu C mount. Objektivy s označením začínajícím UV jsou optimalizovány pro vlnovou délku 2500 \AA a nejsou korigovány pro podélnou barevnou vadu [48], což je činí velmi málo vhodnými pro aplikaci vyžadující

3.2. KOMERČNÍ ŘEŠENÍ

Tabulka 3.2: Základní parametry nalezených kamer. Zdroje: [36], [37], [37], [38, 39, 40, 41], [42], [43, 44], [45], [46], [47].

Kamera	Typ čipu	Rozlišení	Velikost senzoru/mm ²	Citlivost/Å
ARTCAM-487UV	2/3" CMOS	2 856 × 2 848	7,82 × 7,80	2 000 až 10 000
EHD-SCM2020-UV	1,2" sCMOS	2 048 × 2 048	13,3 × 13,3	2 000 až 10 000
EHD-704UV	1/2" CCD	1 360 × 1 024	6,47 × 4,83	2 000 až 10 000
JAI GO5000M	1" CMOS	2 560 × 2 048	12,8 × 10,2	2 500 až 10 000
Photonfocus MV4-D1280U-H01-GT	1" CMOS	1 280 × 1 024	9,47 × 7,58	1 500 až 10 000
QHY 42 PRO	2" sCMOS	2 048 × 2 048	22,5 × 22,5	2 000 až 10 000
pco.ultraviolet	1/2" CCD	1 392 × 1 040	6,5 × 4,8	1 900 až 11 000
pco.edge 4.2 bi UV	1,2" sCMOS	2 048 × 2 048	13,3 × 13,3	1 900 až 11 000
pco.panda 4.2 bi UV	1,2" sCMOS	2 048 × 2 048	13,3 × 13,3	1 900 až 11 000

Tabulka 3.3: Další parametry kamer, podmínku alespoň 4 FPS splňují všechny kamery, čtyři nespĺňují požadavek na global shutter. Uvedená cena kamery QHY 42 PRO je přibližná horní hranice, vzhledem k tomu, že je tato kamera nabízena v několika verzích. Tabulka navazuje na tab. 3.2, informace čerpány ze zde uvedených zdrojů.

Kamera	Global shutter	Bitová hloubka	Snímková frekvence	Rozměr/mm ³	Cena
ARTCAM-487UV	ano	12 bit	38 FPS	70 × 60 × 50	6 500 USD
EHD-SCM2020-UV	ne	12 bit	45 FPS	68 × 68 × 44	4 500 EUR
EHD-704UV	ano		12 FPS	50 × 47 × 50	
JAI GO5000M	ano	12 bit	62 FPS	29 × 29 × 42	600 EUR
Photonfocus MV4-D1280U-H01-GT	ano	12 bit	28 FPS	59 × 59 × 103	
QHY 42 PRO	ne	12 bit	24 FPS	90 × 90 × 110	15 000 EUR
pco.ultraviolet	ano	14 bit	7,3 FPS	80 × 50 × 50	
pco.edge 4.2 bi UV	ne	16 bit	40 FPS	80 × 85 × 110	
pco.panda 4.2 bi UV	ne	16 bit	40 FPS	65 × 65 × 66	

pozorování na širším intervalu vlnových délek. Protože 25mm objektiv RICOH je ve stejné cenové kategorii jako UV2528B a má podobné parametry, lze očekávat, že barevnou vadu nemá též korigovanou.

3.2.3. Možné sestavy

Z kamer a objektivů byly vybrány možné sestavy, ty jsou uvedeny v tabulce 3.5. Zde uvedené kombinace by měly být kompatibilní, připojení všech objektivů by mělo být možné pouhým zašroubováním, s výjimkou kamery QHY 42 PRO, jež nemá C mount, a tudíž by bylo nutné použít redukci.

U sestav v tabulce 3.5 bylo spočítáno zorné pole pomocí rovnice (2.19) kromě těch sestav, kde je zorné pole uvedené jako průměr, jehož hodnota byla uvedena u příslušného objektivu. Dále je v tabulce 3.5 uvedeno rozlišení při použití difrakční mřížky s počtem

Tabulka 3.4: Dostupné UV objektivy. První dva uvedené mají totožné optické parametry. Zdroje: [49, 50, 51], [52, 53], [54, 55], [56, 57], [58, 59], [60, 61].

Objektiv	f'	$f/\#$	Rozměr/mm	Cena
RICOH FL-BC2528- -VGUV	25 mm	2,8	∅30 – 25	1 000 EUR
UV2528B	25 mm	2,8	∅30 – 30	1 000 EUR
UV1628CM	16 mm	2,8	∅29 – 36	1 600 EUR
UV1228CM	12 mm	2,8	∅31 – 29	1 200 EUR
UV0928CM	9 mm	2,8	∅29 – 32	1 600 EUR
UV0635B	6 mm	3,5	∅34 – 33	1 800 EUR

Tabulka 3.5: Možné kombinace objektivů a kamer z rešerše. Názvy některých kamer a objektivů jsou zde zkráceny. U sestavy s kamerou QHY 42 PRO by nebyl obraz vykreslen na celé oblasti senzoru, podobně by tomu bylo u kamery ARTCAM-487UV v kombinaci s 6mm objektivem. Hodnoty pro zorné pole jsou přibližné. Rozlišení je vypočtené přibližně pro mřížku s počtem vrypů 600 mm^{-1} .

Sestava	Zorné pole	Pix. rozlišení/ ($\text{\AA} \cdot \text{px}^{-1}$)	Global shutter
JAI GO5000M + RICOH 25mm	$29^\circ \times 23^\circ$	3,2	ano
EHD-SCM2020-UV + RICOH 25mm	$30^\circ \times 30^\circ$	4,2	ne
pco.panda 4.2 bi UV + RICOH 25mm	$30^\circ \times 30^\circ$	4,2	ne
QHY 42 PRO + RICOH 25mm	$\varnothing 35^\circ$	7	ne
Photonfocus + UV2528B	$20^\circ \times 17^\circ$	4,5	ano
Photonfocus + UV1628CM	$33^\circ \times 27^\circ$	7,4	ano
ARTCAM-487UV + UV1228CM	$36^\circ \times 36^\circ$	3,6	ano
ARTCAM-487UV + UV063BCM	$\varnothing 83^\circ$	6	ano
EHD-704UV + UV063BCM	$56^\circ \times 44^\circ$	11,8	ano
pco.ultraviolet + UV063BCM	$57^\circ \times 44^\circ$	11,7	ano

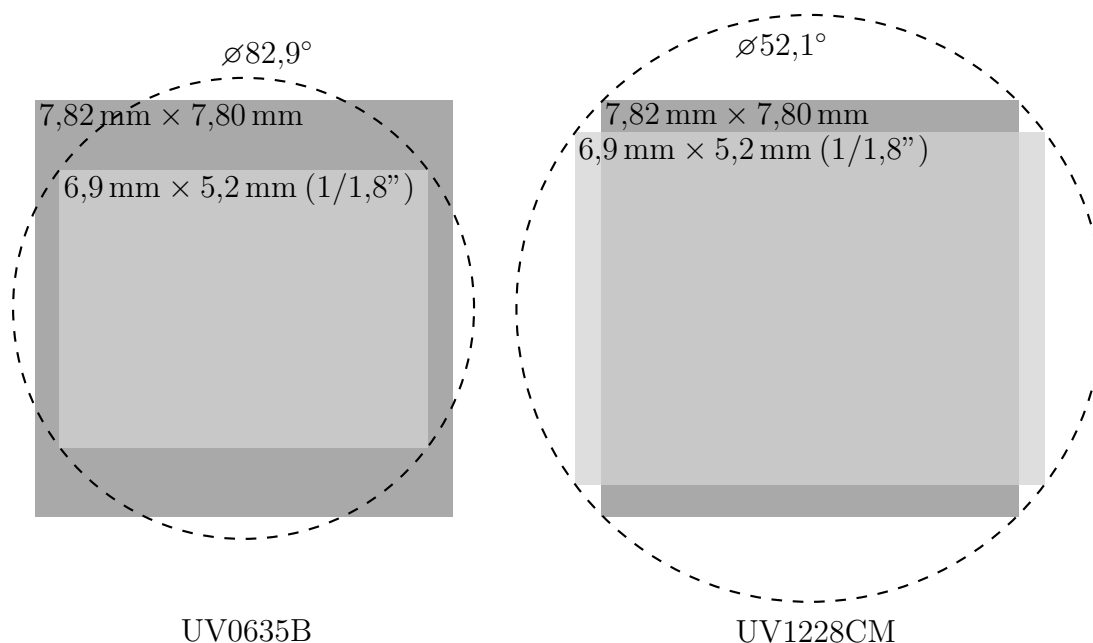
vrypů 600 mm^{-1} . Byl uvažován rozsah vlnových délek od 2000 \AA do 10000 \AA . Pro krajní hodnoty byl spočítán pomocí rovnice (2.17) úhel odklonu při 20° dopadovém úhlu. Rozdíl těchto spočítaných hodnot úhlů odklonu je pak přibližně $15^\circ - (-13^\circ) = 28^\circ$, tato hodnota tedy vlastně odpovídá úhlu, na který se zobrazí spektrum v uvažovaném rozsahu vlnových délek. Pixelové rozlišení pak můžeme spočítat jako

$$\frac{10000 \text{ \AA} - 2000 \text{ \AA}}{28^\circ} \cdot \frac{\text{horizontální zorné pole}}{\text{horizontální pixelové rozlišení}} \quad (3.1)$$

Takto vypočtené pixelové rozlišení je pouze orientační, může ale posloužit ke vzájemnému porovnání sestav. Navíc je nutné si uvědomit, že mnoho uvedených sestav má poměrně malé zorné pole a tedy by pro nulový dopadový úhel (tj. meteor proletí středem zorného pole) byly delší vlnové délky zobrazeny mimo zorné pole (dle rov. (2.17) pro mřížku s počtem vrypů 600 mm^{-1} se např. vlnové délky 8000 \AA a 10000 \AA odkloní pod úhly 29° a 37°).

Ze sestav v tabulce 3.5, při zohlednění všech parametrů, tj. rozlišení (na hraně jsou poslední dvě sestavy), global shutter (nevyhovují tři sestavy), velikost kamery (kamery

3.3. VLASTNÍ ŘEŠENÍ OBJEKTIVU



Obrázek 3.1: Znázornění zobrazení objektivu UV0635B ($f' = 6 \text{ mm}$) A UV1228CM ($f' = 12 \text{ mm}$) na (největší) kompatibilní sensor (světle šedá) a sensor kamery ARTCAM-487UV (tmavší šedá). Pro situaci s 6mm objektivem by tak v okrajích pravděpodobně docházelo k vinětaci. S objektivem UV0928CM ($f' = 9 \text{ mm}$) by byla situace totožná jako vlevo, pouze by čárkovaný kruh odpovídal $54,8^\circ$.

Photonfocus a QHY), zorné pole, citlivosti v UV (nevyhovuje kamera JAI), se jako nejvhodnější jeví ta s kamerou ARTCAM-487UV a 6mm objektivem, případně 12mm objektivem. Situace pro tyto varianty je zobrazena na obrázku 3.1. Na základě tohoto výběru kamery byla kontaktována firma ARTRAY ohledně cenové nabídky a dostupnosti kamery ARTCAM-487UV.

3.3. Vlastní řešení objektivu

3.3.1. Aspekty optického návrhu

Optický návrh byl vytvářen v programu Zemax OpticStudio. K optimalizaci byly využity standardní funkce tohoto programu v sekvenčním režimu. Samotná optimalizace pomocí optimalizačních funkcí programu probíhala bez difrakční mřížky. Při optimalizaci s difrakční mřížkou by mohlo dojít k opomenutí korekce barevné vady.

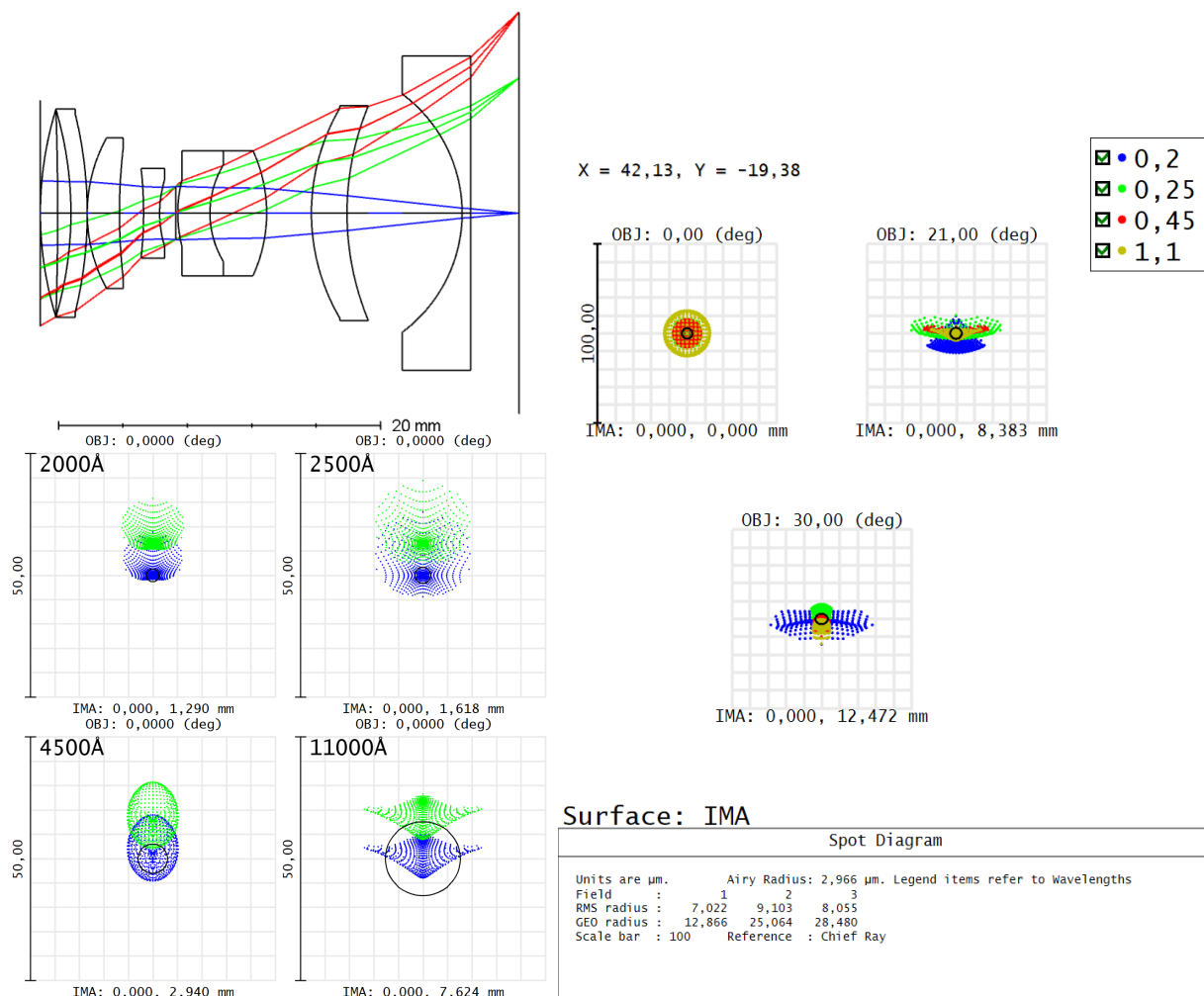
Při hodnocení spektrálního rozlišení podle spot diagramu nebo PSF diagramu je nutné mít na paměti, že zobrazovaným předmětem bude ve skutečnosti nikoliv bod, ale čára. Rozlišení tak může záviset na kombinaci polohy v zorném poli a orientace stopy meteoru, resp. úhlu stopy vůči orientaci vrypů na mřížce, obzvláště v případě, že je tvar spotu protáhlý. V případě stopy meteoru blízké kolmé orientaci na vrypy mřížky pak dokonce může být spektrum velmi špatně rozlišitelné. Orientace stopy meteoru je však do velké míry náhodná a proto tento aspekt nelze efektivně řešit.

3.3.2. Předběžný návrh

V rámci předběžného návrhu bylo potřeba demonstrovat potřebnou náročnost pro splnění zadaných požadavků. Tento návrh vznikl ještě před provedením rešerše kamer a tudíž nebyla známa potřebná velikost senzoru ani ohnisková délka.

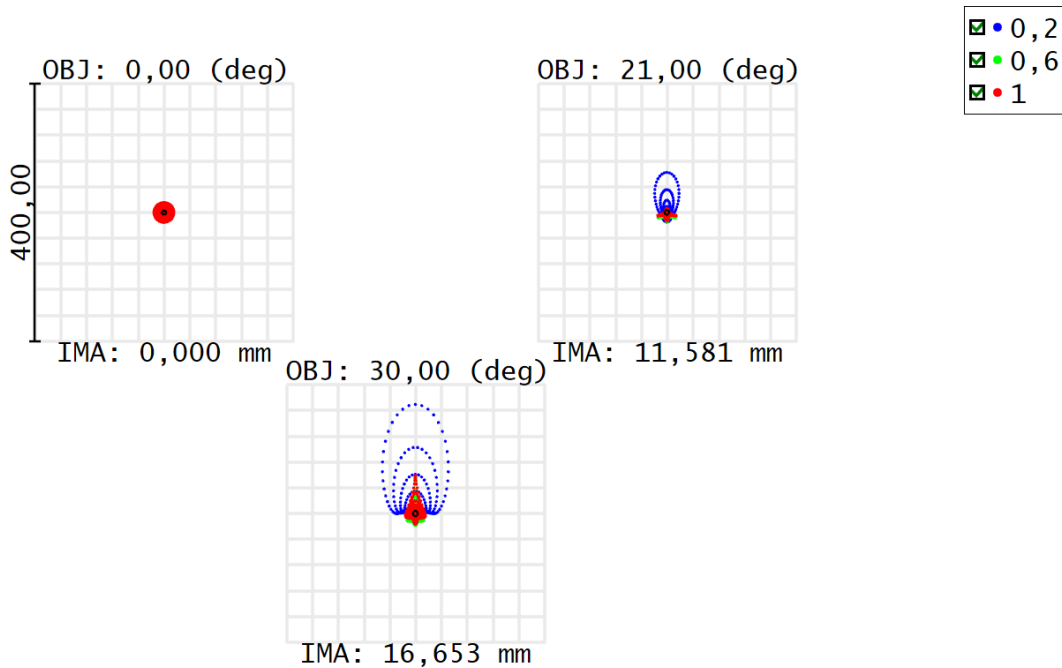
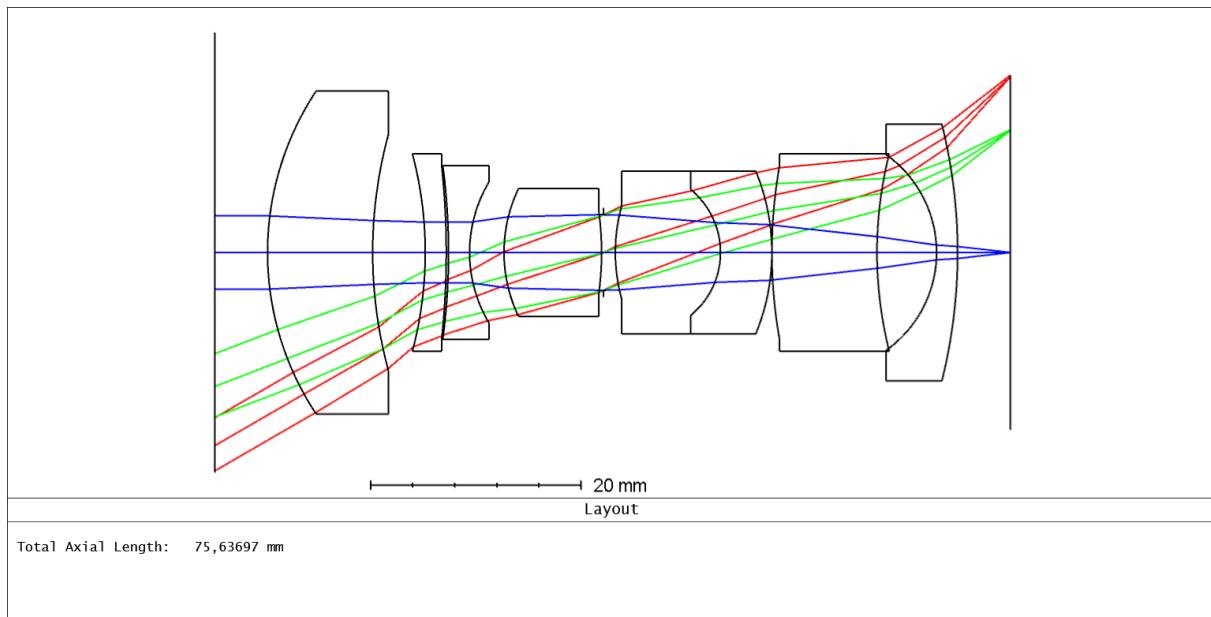
Návrh vychází velmi hrubě z objektivu typu Double-Gauss, použité materiály jsou MgF_2 a SiO_2 (resp. sklo pod označením C79-80 z katalogu Corning). U spojek byl volen materiál s větším Abbého číslem, tj. MgF_2 , v takovém smyslu, jako u chromatických dubletů je voleno korunové sklo. MgF_2 je však použito i u poslední rozptylné čočky, protože při náhradě byl po optimalizaci získán lepší obraz, resp. menší velikost spotu. Parametry návrhu jsou $f/5,4$, $f' = 21,8$ mm, dále viz obrázek 3.2. Ohnisková vzdálenost při optimalizaci nebyla nastavena.

Při zpětném pohledu tento návrh není dobrý, zejména kvůli uspořádání čoček a jejich často příliš malé tloušťce. Další předběžný návrh se snahou o vylepšení parametrů je na obrázku 3.3 a 3.4.



Obrázek 3.2: Předběžný návrh ($f/5,4$, $f' = 31$ mm). Vpravo: spot diagram, mimo střed pole mají stopy protáhlý tvar. Vlevo dole: zobrazení spektra s mřížkou 300 mm^{-1} předmětu v poloze $(0^\circ, 0^\circ)$ pro dvojice vlnových délek s rozdílem vlnových délek 10 \AA . Rozlišení je na hraně, lepšího rozlišení by bylo možné dosáhnout použitím mřížky s větší hustotou vrypů.

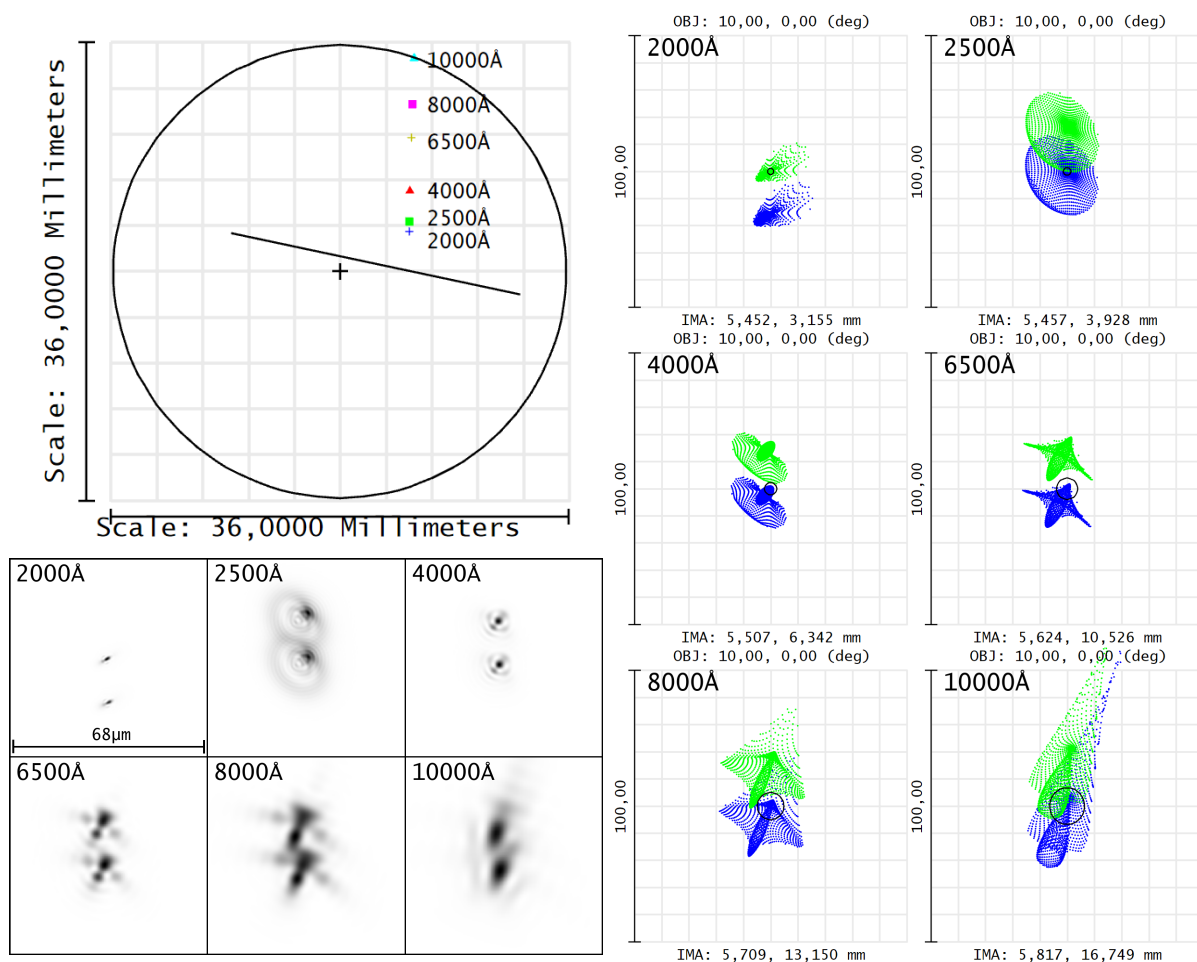
3.3. VLASTNÍ ŘEŠENÍ OBJEKTIVU



Surface: IMA

Spot Diagram			
Units are μm .	Airy Radius: 3,261 μm . Legend items refer to Wavelengths		
Field :	1	2	3
RMS radius :	9,707	11,367	27,722
GEO radius :	15,370	62,245	169,587
Scale bar :	400	Reference :	Chief Ray

Obrázek 3.3: Další předběžný návrh, $f/4,4$, $f' = 21,8\text{mm}$. Nahoře pohled na optický systém, dole stop diagram. Mimo střed pole je větší velikost spotu obzvláště pro kratší vlnovou délku 2000Å .



Obrázek 3.4: Další předběžný návrh: Zobrazení spektra s mřížkou 500 mm^{-1} . Vlevo nahoře: footprint diagram při poloze předmětu ($10^\circ, 0^\circ$), čarou je znázorněn možný průlet meteoru skrz tuto polohu. Vlevo dole: PSF diagramy pro dvojice vlnových délek s rozdílem vlnových délek 10 \AA . Vpravo: spot diagramy pro stejné dvojice vlnových délek jako v PSF diagramech.

3.3.3. Přesnější návrh

V další fázi již byly známy přibližné hodnoty výrobních omezení, viz. tabulka 3.6. Stejně tak již bylo známé, že vzhledem k nabídce kamer je potřeba uvažovat výrazně menší velikost senzoru, resp. ohniskovou vzdálenost objektivu. Ta byla v tomto návrhu zvolena 12 mm (při $f/3$), toho bylo dosaženo nastavením poloměru poslední plochy jako výpočet pomocí požadovaného clonového čísla.

Proces optimalizace vycházel z jednoduchého paraxiálního retrofokálního objektivu se zvolenou ohniskovou vzdáleností, postupným přidáváním optických prvků a změnou jejich polohy bylo dosaženo stavu, který je na obrázku 3.5 a 3.6, systém má zorné pole 44° . Hlavní snahou bylo splnění výrobního omezení na poloměr, tj. všechny poloměry jsou větší než 10 mm . Použité materiály jsou CaF_2 , SiO_2 a MgF_2 . Systém byl optimalizován pro vlnové délky od 2500 \AA .

Hlavním nedostatkem tohoto návrhu je přítomnost spojených optických prvků (triplet a dublet na konci optického systému), která je samozřejmě nerealizovatelná, jak bylo zmíněno v teoretické části této práce, nicméně toto uspořádání bylo jednodušší na opti-

3.3. VLASTNÍ ŘEŠENÍ OBJEKTIVU

malizace díky menšímu počtu proměnných a cílem bylo spíše upřesnění návrhu než úplné splnění všech omezení. Dalším nedostatkem je velmi špatné zobrazení pro vlnové délky kratší než 2 500 Å.

Tabulka 3.6: Tabulka výrobních omezení.

Parametr	Omezení
Okrajová tloušťka čočky	$> 3 \text{ mm}$ (min. $> 2 \text{ mm}$)
Středová tloušťka spojky	$> 1/6$ průměru čočky
Okraje rozptylky	$> 1/6$ průměru čočky
Poloměr křivosti povrchu	$> 10 \text{ mm}$
Mech. průměr povrchu/poloměr křivosti povrchu	$< 1,5$ (min $< 1,7$)
Dopadové úhly	$< 40^\circ$ (záleží na požadavcích na antireflexi)
Zóna na okraji optického povrchu	mech. průměr povrchu $>$ (optický průměr povrchu + (5 mm + 8 % optického průměru povrchu))
Tolerance z-pozice (podél optické osy) čočky	$\pm 0,1 \text{ mm}$
Tolerance xy-pozice (kolmo na optickou osu) čočky	$\pm 0,025 \text{ mm}$

3.3.4. Srovnání komerčního řešení a řešení s navrhovaným objektivem – prostorové umístění v CubeSatu

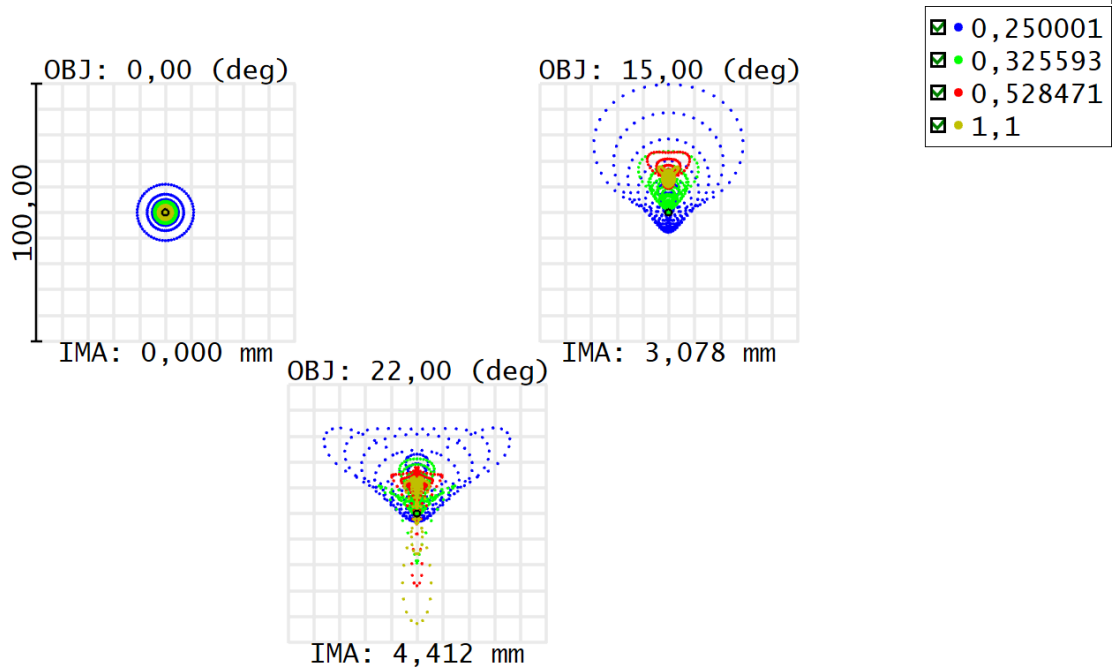
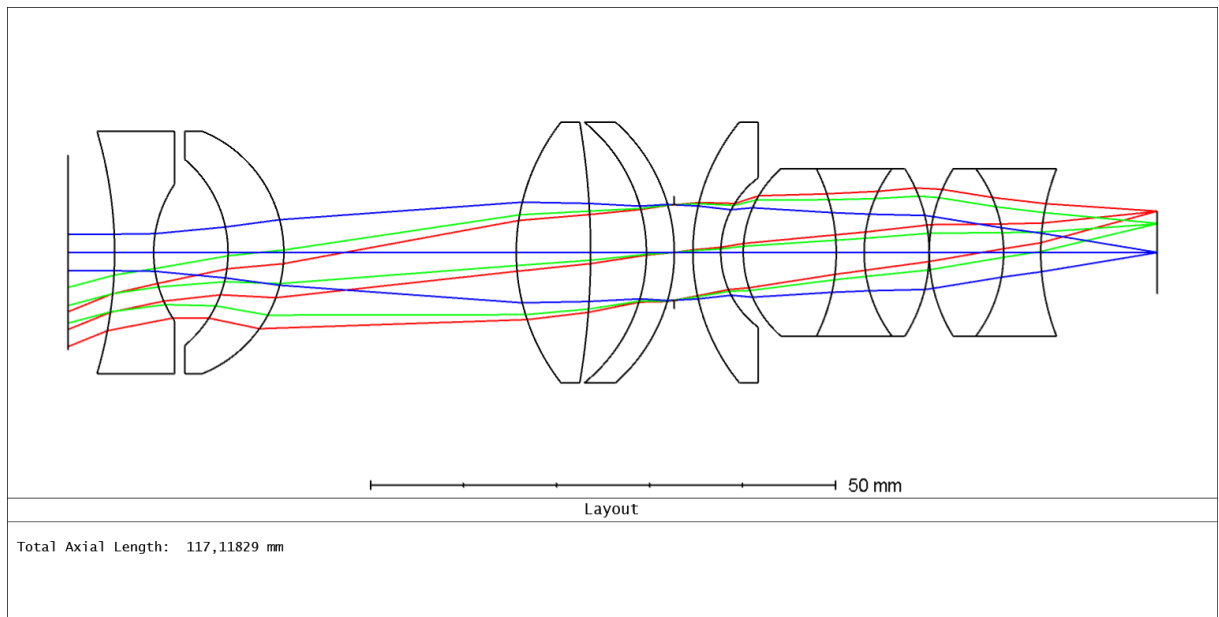
V další fázi byly porovnány přibližné prostorové nároky komerčního řešení (kamera ART-CAM-487UV a 6mm objektiv UV0635B) a řešení s navrhovaným objektivem v rámci 2U CubeSatu, viz obrázek 3.7. S řešením obsahující navrhovaná objektiv nebylo možné dosáhnout naklonění (zhruba 30°) pro dosažení požadovaného úhlu záběru kamery, ale pouze vodorovného umístění.

3.3.5. Zlepšení přesnějšího návrhu

Na základě předchozího srovnání se odvíjel další postup – pokusit se vytvořit optický návrh tak, aby bylo možné naklonění, tj. provést zkrácení, a zjistit, nakolik se zhorší zobrazení. Protože předchozí návrh měl zorné pole pouze 44° , bylo v další fázi také úkolem se dostat na požadované zorné pole 60° . Vedle těchto cílů byl také přehodnocen požadovaný spektrální rozsah, další optimalizace probíhala pro rozsah 2 000 Å až 6 000 Å.

Na rozdíl od předchozích návrhů byl ve dvou návrzích níže optimalizován i materiál. Byl vytvořen vlastní katalog materiálů obsahující MgF_2 , CaF_2 , BaF_2 , SiO_2 a u prvků byla nastavena možnost nahrazení z tohoto katalogu.

Podle předchozích kritérií tak optimalizací vznikl zkrácený návrh $f/4,2$, $f' = 8,4 \text{ mm}$, viz obrázek 3.8 a 3.9. Největší problém představovalo splnění velikostí poloměrů (větší než 10 mm), z tohoto důvodu jsou velikosti spotu poměrně velké. Ohnisková vzdálenost byla



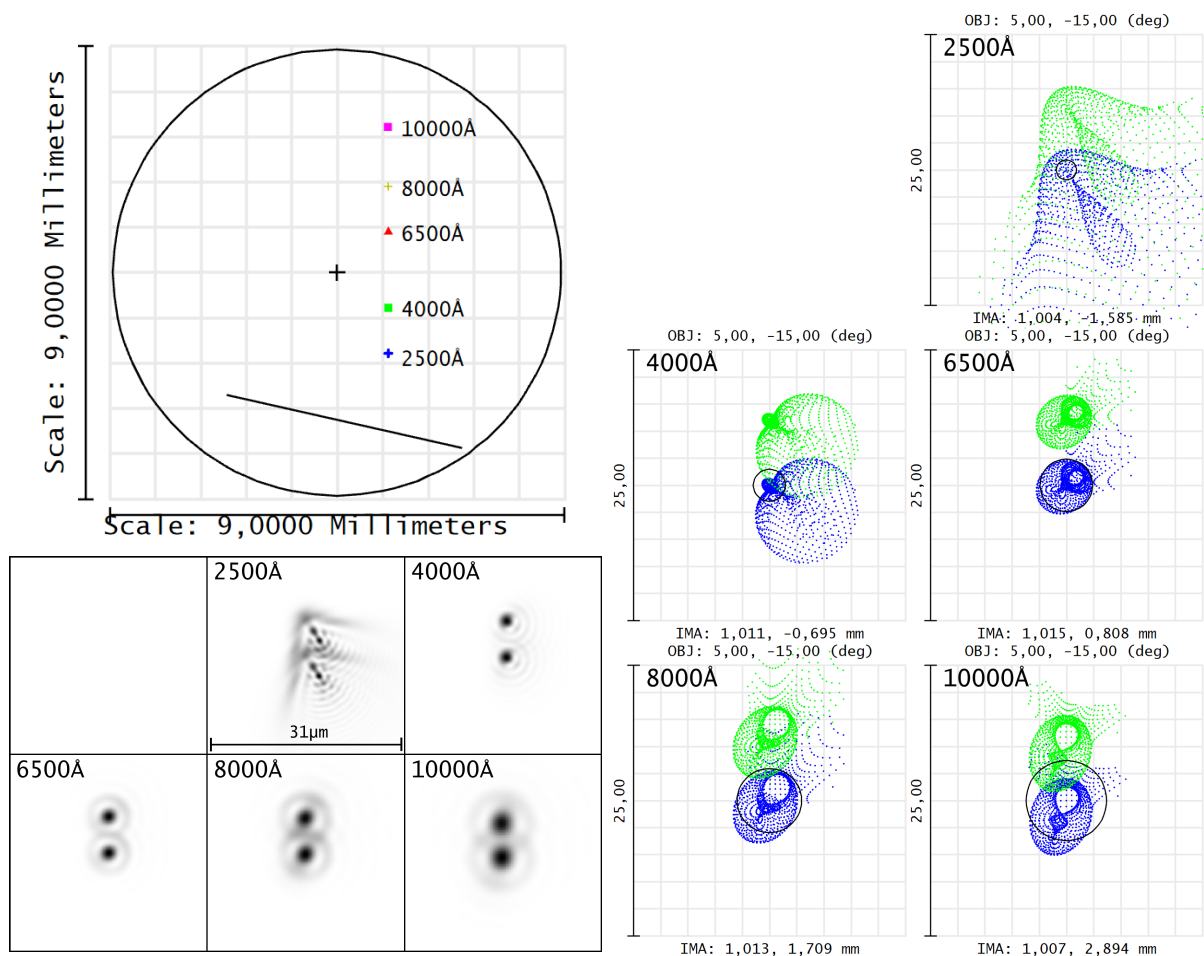
Surface: IMA

Spot Diagram				
Units are μm .	Airy Radius: 1,203 μm .		Legend items refer to Wavelengths	
Field :	1	2	3	
RMS radius :	3,664	14,373	14,678	
GEO radius :	10,948	49,769	47,031	
Scale bar :	100	Reference :	Chief Ray	

Obrázek 3.5: Přesnější návrh: Schéma optického systému a spot diagram. Velikost spotu je největší pro vlnovou délku 2500 Å.

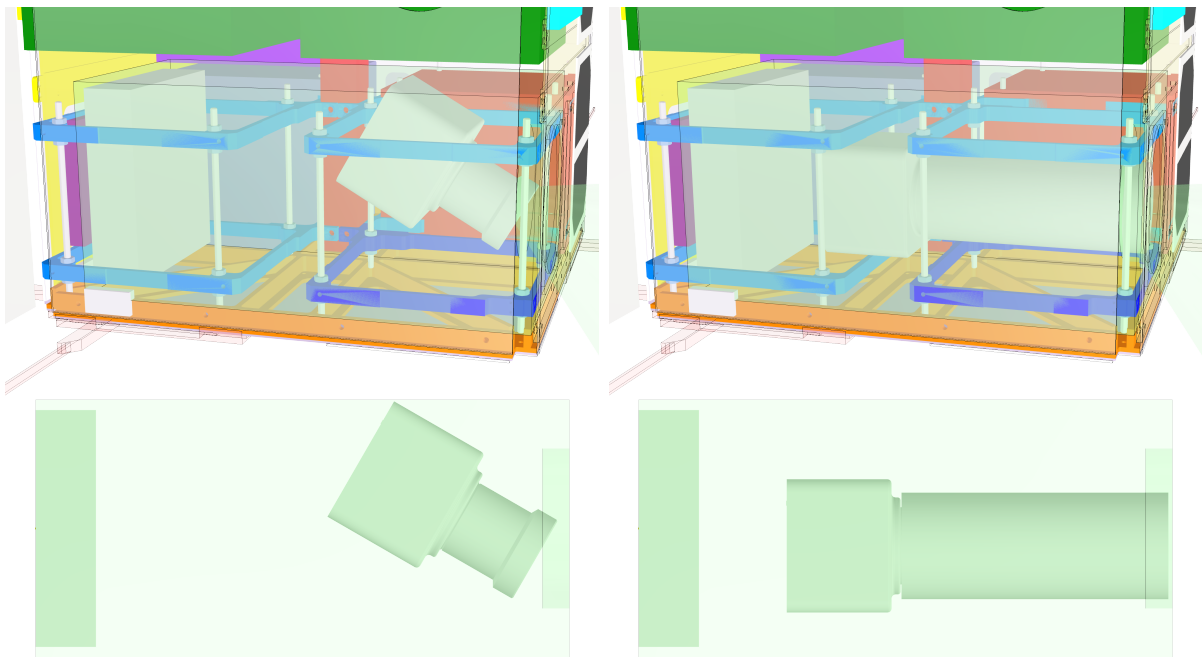
tentokrát nastavena jako požadavek v meritní funkci, byla zvolena hodnota 8 mm tak, aby zorné pole 60° pokrylo senzor kamery ARTCAM-487UV. Návrh obsahuje materiály MgF_2 , SiO_2 a CaF_2 (pouze druhá čočka).

3.3. VLASTNÍ ŘEŠENÍ OBJEKTIVU



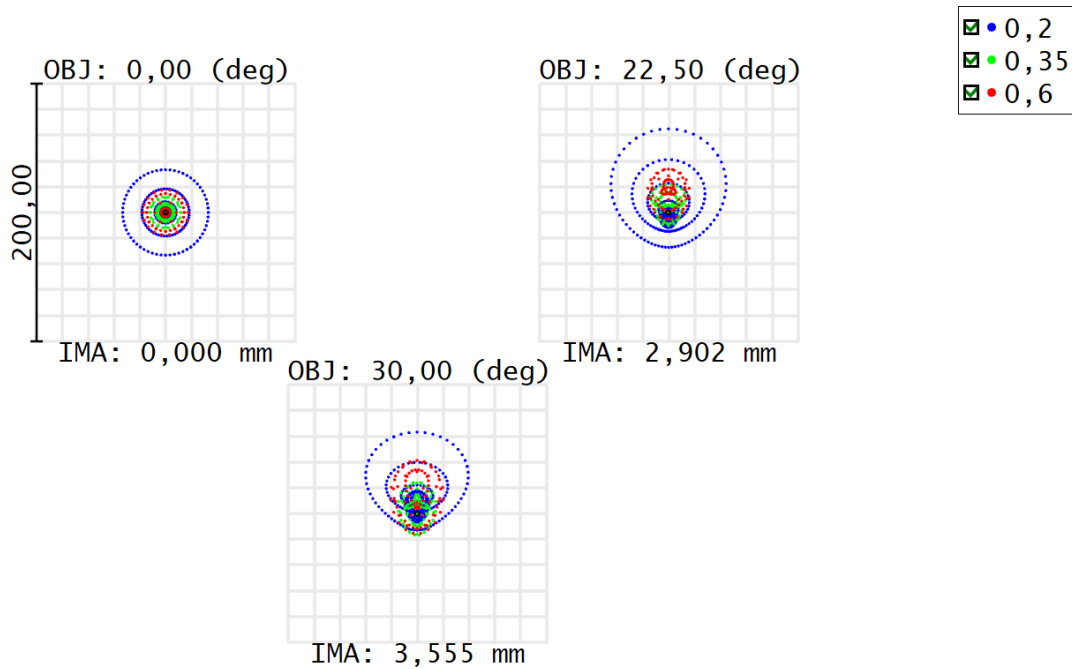
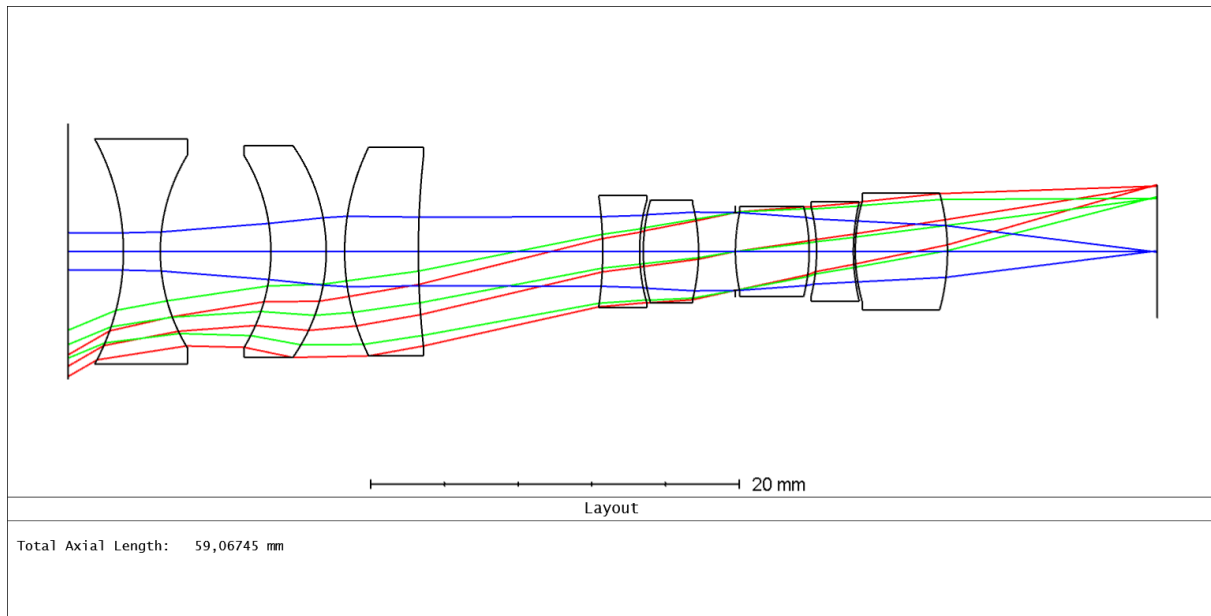
Obrázek 3.6: Přesnější návrh: Zobrazení spektra s mřížkou 500 mm^{-1} . Footprint diagram, PSF a spot diagramy při poloze předmětu ($5^\circ, -15^\circ$) analogicky s obrázkem 3.4.

Dále bylo snahou vytvořit návrh s větším zorným polem, který by nebyl v CubeSatu nakloněný. Jako počáteční stav posloužil návrh v [62], viz obrázek 3.10. Protože nebylo potřeba tak velkého zorného pole jako v tomto návrhu, byla odstraněna první čočka. Ohnisková vzdálenost byla v meritní funkci nastavena na 6 mm, nicméně se jí, zejména kvůli požadavku na poloměry povrchů, nepodařilo dosáhnout a výsledný systém tak má ohniskovou vzdálenost $f' = 8,2 \text{ mm}$ při $f/5,5$. Systém, navzdory optimalizaci materiálů, obsahuje pouze MgF_2 a SiO_2 . Systém byl optimalizován pro zobrazení pole 90° , které však při delší ohniskové vzdálenosti nepokrývá celý senzor kamery ARTCAM-487UV, ale odpovídá jeho okrajům. Oproti zkrácenému systému byla optimalizace jednodušší a tento systém má lepší zobrazení a rozlišení, viz obrázek 3.11 a 3.14.



Obrázek 3.7: Srovnání přibližných prostorových nároků – komerčního řešení (vlevo) a řešení s navrhovaným objektivem (vpravo). Objektiv je válec o průměru přibližně 40 mm a délce 100 mm – rozměry jsou zvoleny na základě rozměrů přesnějšího návrhu, viz obrázek 3.5. V levé části je kvádr představující přibližné rozměry elektroniky potřebné k obsluze kamery.

3.3. VLASTNÍ ŘEŠENÍ OBJEKTIVU



Surface: IMA

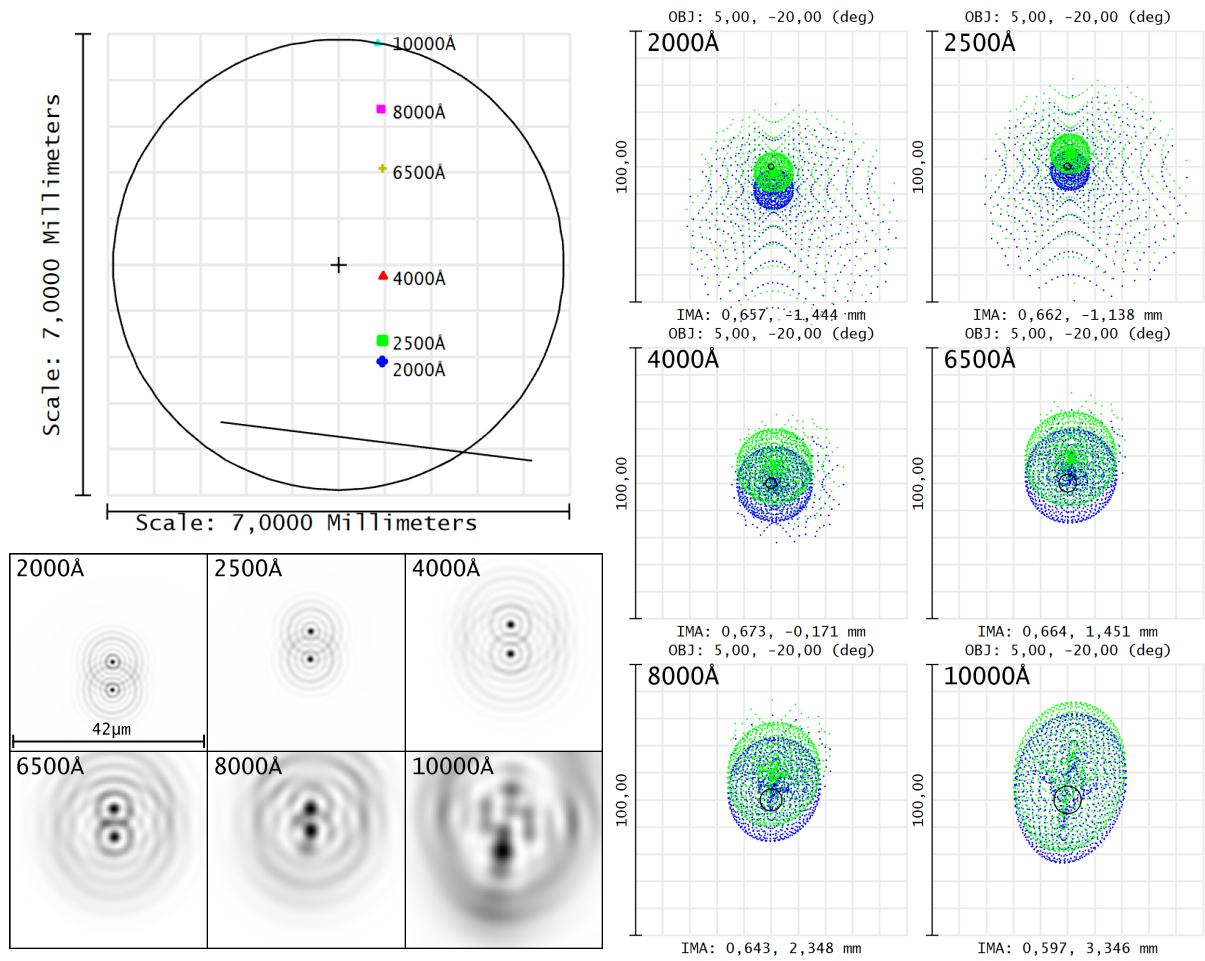
Spot Diagram

Units are μm . Airy Radius: 1,736 μm . Legend items refer to Wavelengths

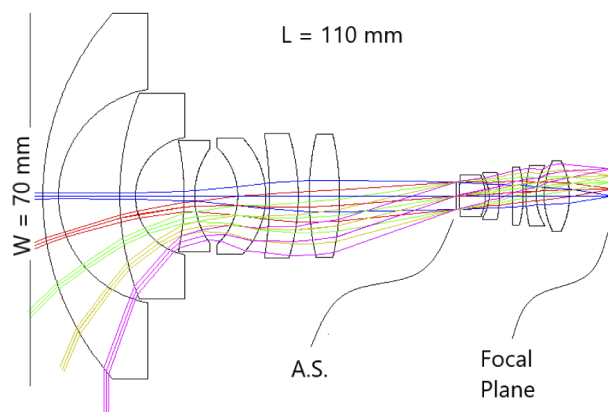
Field	:	1	2	3
RMS radius	:	14,888	21,276	21,287
GEO radius	:	33,226	65,011	63,271
Scale bar	:	200	Reference	: Chief Ray

Obrázek 3.8: Zkrácený návrh: Schéma optického návrhu a spot diagram. Velikost spotu je znatelně větší než Airyho disk.

3. NÁVRH SPEKTROMETRU

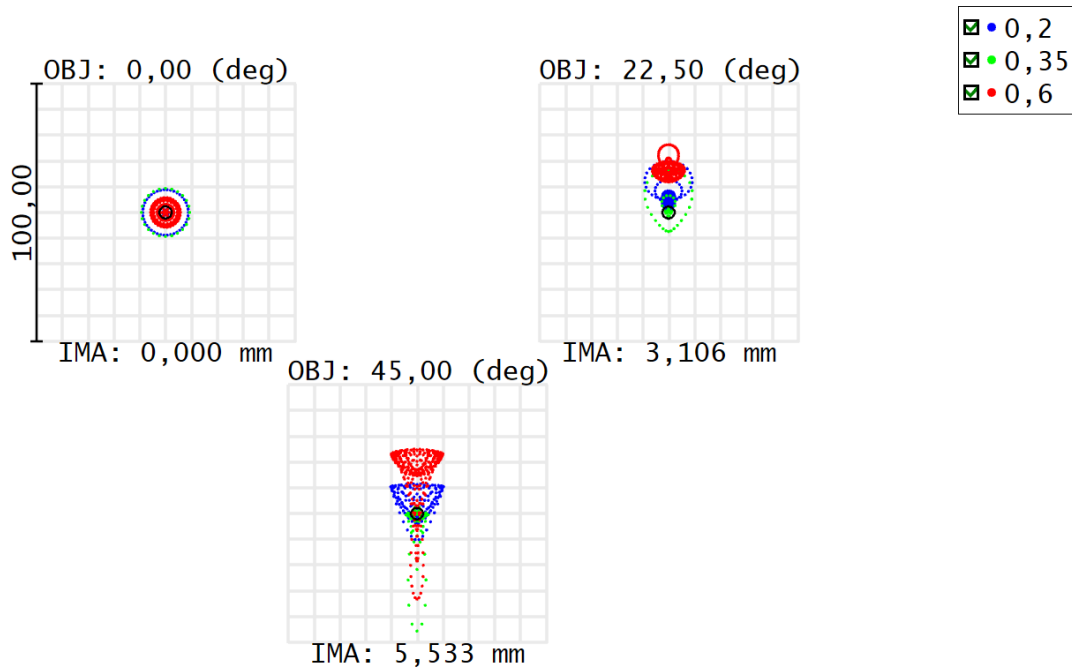
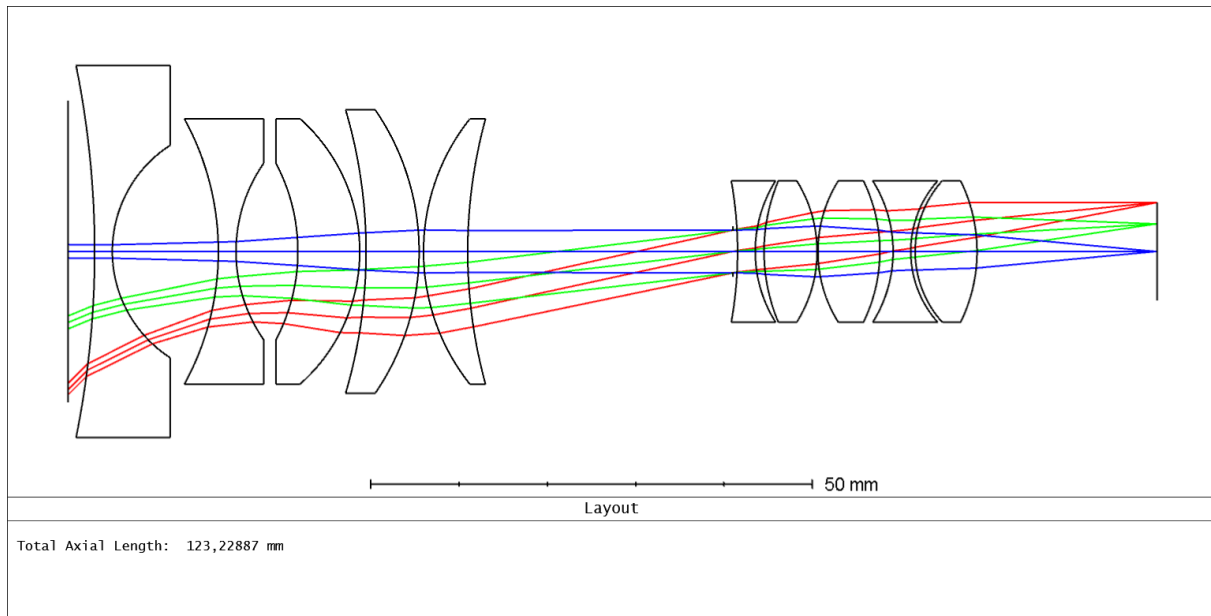


Obrázek 3.9: Zkrácený návrh: zobrazení spektra s mřížkou 800 mm^{-1} . Footprint diagram, PSF a spot diagramy při poloze předmětu ($5^\circ, -20^\circ$) analogicky s obrázky 3.4 a 3.6.



Obrázek 3.10: Optický návrh objektivu typu rybí oko, který byl využit jako počáteční stav při optimalizaci návrhu se širším zorným polem. Převzato z [62].

3.3. VLASTNÍ ŘEŠENÍ OBJEKTIVU



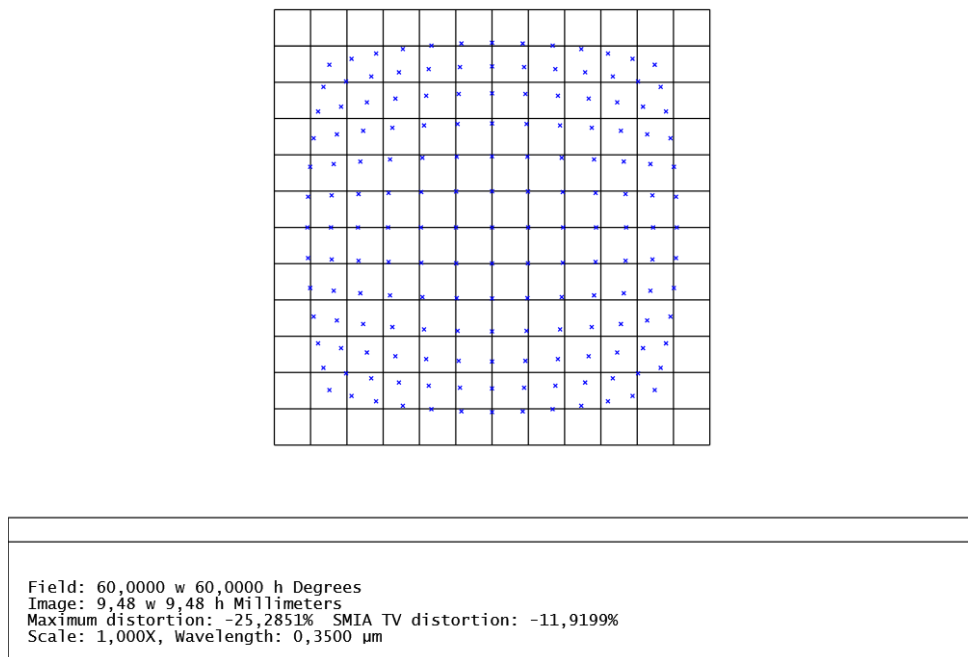
Surface: IMA

Spot Diagram

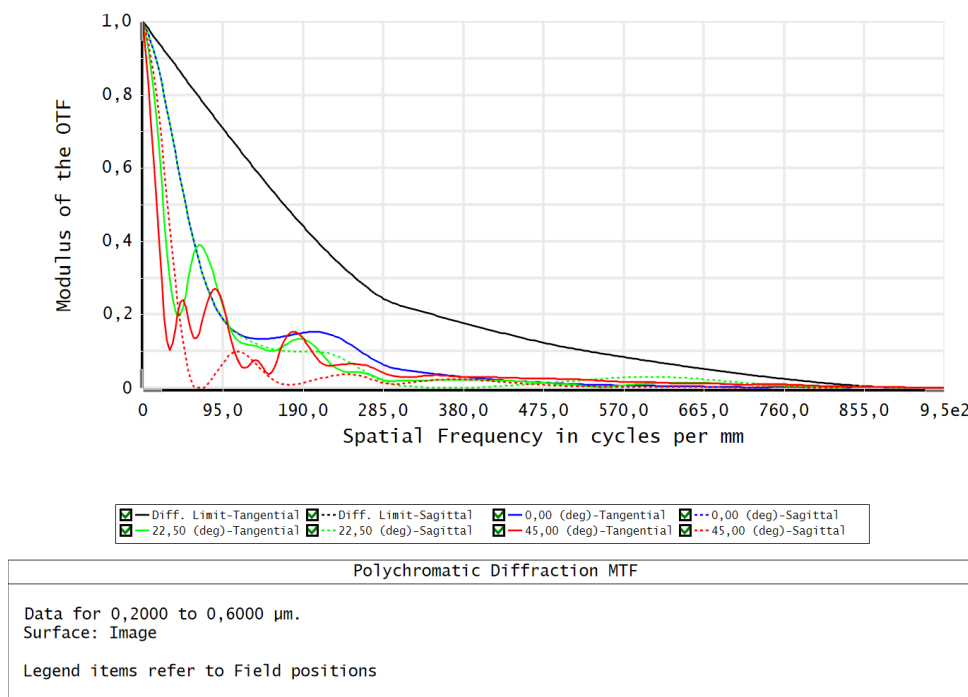
Units are μm . Airy Radius: 2,336 μm . Legend items refer to Wavelengths

Field	:	1	2	3
RMS radius	:	4,620	14,195	16,915
GEO radius	:	9,362	26,323	45,686
Scale bar	:	100	Reference	: Chief Ray

Obrázek 3.11: Návrh se širším zorným polem: Schéma optického systému (nahore) a spot diagram (dole), kde můžeme vidět příčnou barevnou vadu.

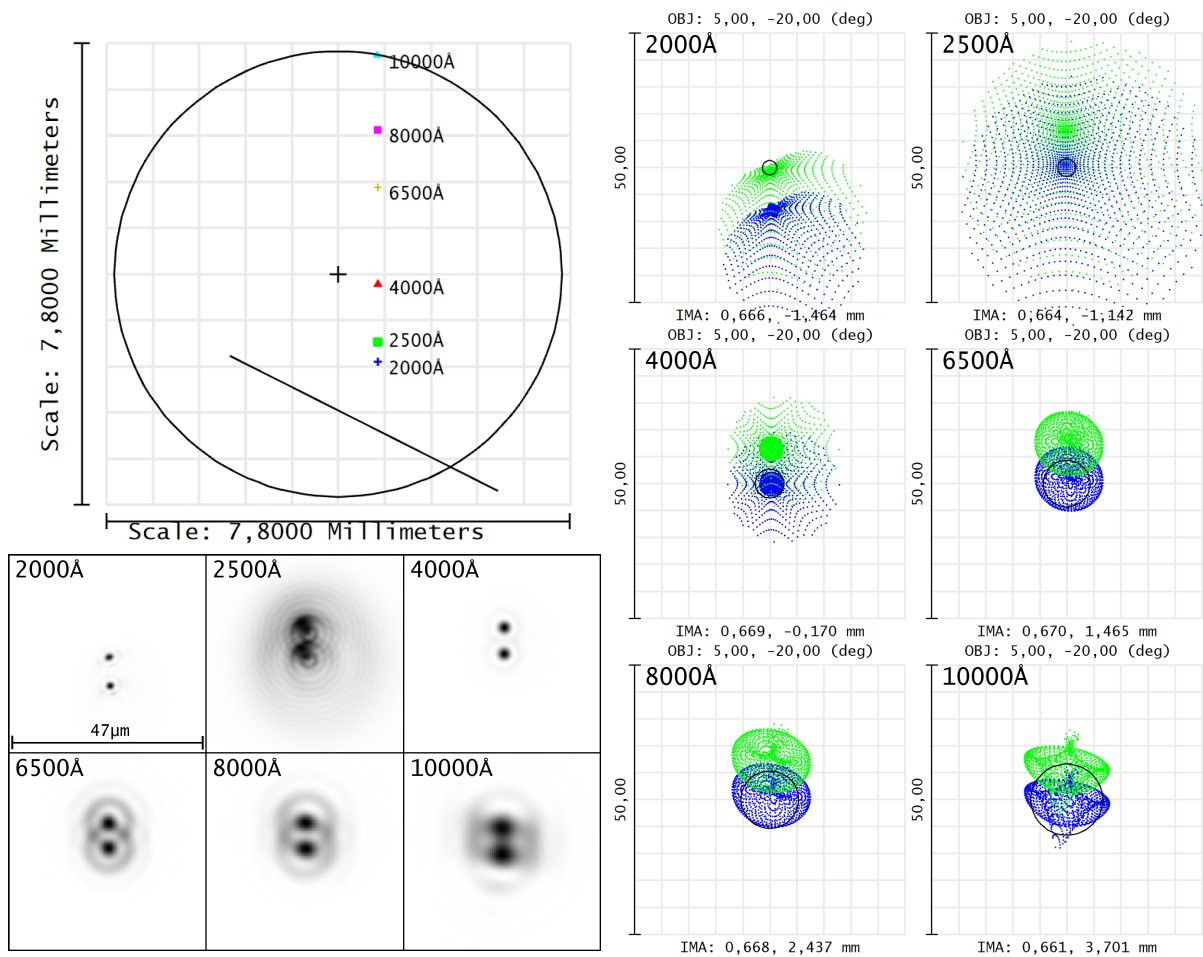


Obrázek 3.12: Návrh se širším zorným polem: Poměrně velké soudkové zkreslení, pro velká zorná pole je však relativně obtížné toto optimalizovat. V případě zkráceného návrhu dochází k velmi podobnému zkreslení/distorzi.



Obrázek 3.13: Návrh se širším zorným polem: Funkce přenosu kontrastu. Černě je znázorněn difrakční limit, teoreticky je tedy ještě prostor pro zlepšení.

3.3. VLASTNÍ ŘEŠENÍ OBJEKTIVU



Obrázek 3.14: Návrh se širším zorným polem: Zobrazení spektra s mřížkou 800 mm^{-1} . Fotoprint diagram, PSF a spot diagramy při poloze předmětu ($5^\circ, -20^\circ$) analogicky s obrázky 3.4, 3.6 a 3.9. Při poloze předmětu ve středu zorného pole by se, při použití stejné difrakční mřížky ve stejné orientaci, do zorného pole nevešly vlnové délky větší než asi 6000 \AA .

Tabulka 3.7: Zkrácený návrh.

poloměr/mm	tloušťka/mm	materiál
-12,708	2,000	MGF2
10,000	6,000	
-10,000	3,000	CAF2
-10,000	1,000	
12,922	4,000	C-79-80
48,086	10,000	
-20,907	2,000	C79-80
10,032	0,200	
10,000	3,000	MGF2
-10,536	2,000	
	0,000	
10,000	4,000	MGF2
-10,000	0,400	
-10,000	2,000	C79-80
11,640	0,100	
10,000	5,000	MGF2
-12,000	11,367	

Tabulka 3.8: Návrh s větším zorným polem.

poloměr/mm	tloušťka/mm	materiál
-106,017	2,000	MGF2
14,269	12,000	
-31,157	2,000	MGF2
17,436	7,000	
-21,246	7,000	MGF2
-20,000	0,720	
-56,413	6,000	MGF2
-28,278	0,500	
24,029	5,000	C79-80
56,683	30,000	
	0,540	
-45,161	2,000	C79-80
15,000	1,000	
20,526	6,000	MGF2
-15,000	0,100	
15,000	7,000	MGF2
-18,097	1,500	
-15,000	2,000	C79-80
12,000	0,500	
11,957	7,000	MGF2
-18,105	20,369	

Závěr

Bakalářská práce popisuje tvorbu optického návrhu teleskopu kombinovaného se spektrometrem určeného k spektrální analýze meteorů a výběrem komponent. Návrh byl tvořen pro umístění do CubeSatu velikosti 2U (10 mm × 10 mm × 20 mm) a pozorování od ultrafialové až po blízkou infračervenou oblast (od 2 000 Å až do zhruba 10 000 Å). Takový přístroj má potenciál přinést významné poznatky v oblasti studia meziplanetární hmoty. V rámci této práce bylo postupně vytvořeno několik optických návrhů, přičemž cílem bylo splnit požadované nároky kladené na systém, zejména velikost zorného pole a spektrální rozlišení.

V bakalářské práci je vypracována řešerše teleskopů kombinovaných se spektrometry, které slouží výhradně pro spektrální analýzu meteorů. V řešerši jsou zahrnuty přístroje používané v rámci pozemních pozorovacích sítí v různých částech světa.

Praktická část nejprve obsahuje průzkum možnosti realizace návrhu s využitím komerčně dostupných kamer a objektivů. Bylo zjištěno, že na trhu existuje poměrně malá nabídka vyhovujících komponent. Z nalezených komponent pak byla jako nejlepší možnost vybrána kamera ARTCAM-487UV s 6mm, nebo 12mm objektivem.

V práci jsou poté prezentovány postupně tři fáze optického návrhu. Nejprve byl vytvořen předběžný návrh, jehož úkolem bylo demonstrovat potřebnou složitost pro dosažení požadovaných parametrů, především počet optických prvků a jejich materiál. Návrh ($f/5,4$, $f' = 31$ mm) uvažuje zorné pole o velikosti 60° a obsahuje osm prvků z materiálů SiO_2 a MgF_2 .

V další části byl vytvořen přesnější optický návrh s ohledem na přibližná výrobní omezení a nedostupnost vhodných kamer s velkým senzorem. Byl vytvořen návrh s kratší ohniskovou délkou ($f/3$, $f' = 12$ mm) a zorným polem 44° složený z deseti prvků (SiO_2 , MgF_2 a CaF_2).

Následně byly vytvořeny dva optické návrhy navazující na předcházející přesnější návrh. V prvním ($f/4,5$, $f' = 8,4$ mm, zorné pole 60°) bylo snahou zkrácení potřebné délky a zjištěním zhoršení parametrů při takovém omezení. Druhý návrh ($f/5,5$, $f' = 8,2$ mm, zorné pole $60^\circ \times 60^\circ$) vznikl se záměrem o další zlepšení zobrazení a zvětšení zorného pole, oproti zkrácenému návrhu má lepší rozlišení a jeví se jako perspektivnější.

V této práci byl tvořen optický návrh požadovaného družicového přístroje, proces jeho vývoje však není u konce a žádá si ještě mnoho další práce.

Literatura

1. CEPLECHA, Zdeněk; BOROVIČKA, Jiří; ELFORD, W. Graham; REVELLE, Douglas O.; HAWKES, Robert L.; PORUBČAN, Vladimír; ŠIMEK, Miloš. Meteor Phenomena and Bodies. *Space Science Reviews*. 1998, vol. 84, no. 3, pp. 327–471. ISSN 1572-9672.
2. *Definitions of terms in meteor astronomy* [online]. 2017 [cit. 2022-01-29]. Dostupné z: https://www.iau.org/static/science/scientific_bodies/commissions/f1/meteordefinitions_approved.pdf.
3. BOROVIČKA, J. About the definition of meteoroid, asteroid, and related terms. *WGN, Journal of the International Meteor Organization*. 2016, roč. 44, s. 31–34. ISSN 1016-3115.
4. *Meteory a meteorické roje* [online] [cit. 2022-01-29]. Dostupné z: <https://www.astro.cz/na-obloze/meteory-a-meteoricke-roje.html>.
5. RENDTEL, Jürgen. *Handbook for Photographic Meteor Observations*. Utrecht: International Meteor Organization, 2002. ISBN 2-87355-002-3.
6. BOROVIČKA, J. Photographic spectra of fireballs. In: *Proceedings of the International Meteor Conference*. Egmond, 2016, s. 34–38. ISBN 978-2-87355-030-1.
7. MILLMAN, Peter M. One Hundred and Fifteen Years of Meteor Spectroscopy. *Symposium - International Astronomical Union*. 1980, vol. 90, pp. 121–128. ISSN 0074-1809.
8. RYABOVA, Galina O.; ASHER, David J.; CAMPBELL-BROWN, Margaret D. (ed.). *Meteoroids: Sources of Meteors on Earth and Beyond*. Cambridge: Cambridge University Press, 2019. Cambridge Planetary Science. ISBN 978-1-108-42671-8.
9. *METEOR ISS Meteor Observation Project* [online] [cit. 2022-01-29]. Dostupné z: <http://www.perc.it-chiba.ac.jp/en/projects/meteor>.
10. CARBARY, J. F.; MORRISON, D.; ROMICK, G. J.; YEE, J. H. Spectrum of a Leonid meteor from 110 to 860 nm. *Advances in Space Research*. 2004, vol. 33, no. 9, pp. 1455–1458. ISSN 0273-1177.
11. CHEN, Hongru; RAMBAUX, Nicolas; VAUBAILLON, Jérémie. Accuracy of meteor positioning from space- and ground-based observations. *Astronomy & Astrophysics*. 2020, vol. 642, p. L11. ISSN 0004-6361, ISSN 1432-0746.
12. VOJÁČEK, V.; BOROVIČKA, J.; KOTEN, P.; SPURNÝ, P.; ŠTORK, R. Catalogue of representative meteor spectra. *Astronomy & Astrophysics*. 2015, vol. 580, A67. ISSN 0004-6361, ISSN 1432-0746.
13. SPURNÝ, Pavel; SHRBENÝ, Lukáš; BOROVIČKA, Jiří; KOTEN, Pavel; VOJÁČEK, Vlastimil; ŠTORK, Rostislav. Bright Perseid fireball with exceptional beginning height of 170 km observed by different techniques. *Astronomy & Astrophysics*. 2014, vol. 563, A64. ISSN 0004-6361, ISSN 1432-0746.
14. JENNISKENS, P. Quantitative meteor spectroscopy: Elemental abundances. *Advances in Space Research*. 2007, vol. 39, no. 4, pp. 491–512. ISSN 0273-1177.

LITERATURA

15. JENNISKENS, Peter; TEDESCO, Ed; MURTHY, Jayant; LAUX, Christophe; PRICE, Stephen. Spaceborne ultraviolet 251–384 nm spectroscopy of a meteor during the 1997 Leonid shower. *Meteoritics & Planetary Science*. 2010, roč. 37, s. 1071–1078.
16. SMITH, Warren J. *Modern optical engineering: the design of optical systems*. 4th ed. New York: McGraw Hill, 2008. ISBN 978-0-07-147687-4.
17. GROSS, Herbert (ed.). *Handbook of Optical Systems, Volume 1: Fundamentals of Technical Optics*. 1st ed. Weinheim: Wiley-VCH, 2005. ISBN 978-3-527-40377-6.
18. SCHRÖDER, Gottfried. *Technická optika*. Přel. BERGER, Zdeněk. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1981.
19. GROSS, Herbert; ZÜGGE, Hannfried; PESCHKA, Martin; BLECHINGER, Fritz (eds.). *Handbook of Optical Systems, Volume 3: Aberration Theory and Correction of Optical Systems*. 1st ed. Weinheim: Wiley-VCH, 2007. ISBN 978-3-527-40379-0.
20. GROSS, Herbert; BLECHINGER, Fritz; ACHTNER, Bertram (eds.). *Handbook of Optical Systems, Volume 4: Survey of Optical Instruments*. 1st ed. Weinheim: Wiley-VCH, 2008. ISBN 978-3-527-40380-6.
21. POLYANSKIY, Mikhail N. *Refractive index database* [online] [cit. 2022-04-25]. Dostupné z: <https://refractiveindex.info>.
22. JAMES, John. *Spectrograph Design Fundamentals*. Cambridge: Cambridge University Press, 2007. ISBN 978-0-521-86463-3.
23. SINGER, Wolfgang; TOTZECK, Michael; GROSS, Herbert (eds.). *Handbook of Optical Systems, Volume 2: Physical Image Formation*. 1st ed. Weinheim: Wiley-VCH, 2005. ISBN 978-3-527-40378-3.
24. DUBS, Martin; SCHLATTER, Peter. A practical method for the analysis of meteor spectra. *WGN, Journal of the International Meteor Organization*. 2015, roč. 43, s. 94–101. ISSN 1016-3115.
25. DUBS, Martin; MAEDA, Koji. Calibration of meteor spectra. In: *Proceedings of the International Meteor Conference*. Egmond, 2016, s. 1–4. ISBN 978-2-87355-030-1.
26. *Rolling vs Global Shutter* [online] [cit. 2022-04-27]. Dostupné z: <https://www.photometrics.com/learn/advanced-imaging/rolling-vs-global-shutter>.
27. MADIEDO, José M. Automated systems for the analysis of meteor spectra: The SMART Project. *Planetary and Space Science*. 2017, vol. 143, pp. 238–244. ISSN 0032-0633.
28. JENNISKENS, P.; GURAL, P.; BERDEU, A. CAMSS: A spectroscopic survey of meteoroid elemental abundances. In: Poznań, 2013, s. 117–124. ISBN 978-2-87355-025-7.
29. RUDAWSKA, Regina; TÓTH, Juraj; KALMANČOK, Dušan; ZIGO, Pavol; MATLOVIČ, Pavol. Meteor spectra from AMOS video system. *Planetary and Space Science*. 2016, vol. 123, pp. 25–32. ISSN 0032-0633.
30. MATLOVIČ, Pavol; TÓTH, Juraj; RUDAWSKA, Regina; KORNOŠ, Leonard; PISARČÍKOVÁ, Adriana. Spectral and orbital survey of medium-sized meteoroids. *Astronomy & Astrophysics*. 2019, vol. 629, A71. ISSN 0004-6361, ISSN 1432-0746.

31. MAEDA, K.; FUJIWARA, Y. Meteor spectra using high definition video camera. In: *Proceedings of the International Meteor Conference*. Egmond, 2016, s. 167–170. ISBN 978-2-87355-030-1.
32. WARD, Bill. Meteor spectroscopy during the 2015 Quadrantids. *WGN, Journal of the International Meteor Organization*. 2015, roč. 43, s. 102–105. ISSN 1016-3115.
33. KOUKAL, Jakub; GORKOVA, Sylvie; SRBA, Jiří; FERUS, Martin; CIVIŠ, S.; PIETRO, Carlos. Meteor spectra in the EDMOND database. In: *Proceedings of the International Meteor Conference*. Mistelbach, 2015, s. 149–154. ISBN 978-2-87355-029-5.
34. MCASSEY, Edward; VAHADAT, Vahid; LEMUNYAN, Greg; RENDA, George. Thermal Management of a Fast UV Slitless Spectrometer for a Meteor Research Experiment. In: *Proceedings of HT2005*. 2005.
35. NUTH, Joseph A.; LOWRANCE, John L.; RENDA, George; CARRUTHERS, George R. Fast UV slitless spectrometer for meteor research. In: *Ultraviolet Atmospheric and Space Remote Sensing: Methods and Instrumentation II*. SPIE, 1999, sv. 3818, s. 108–124.
36. *ARTRAY.INC* [online] [cit. 2022-01-10]. Dostupné z: <http://www.artray.us/>.
37. *EHD Products: UV Sensitive CMOS Cameras* [online] [cit. 2021-12-31]. Dostupné z: https://www.ehd.de/products/specialapplications/UV_Enhanced_Cameras.html.
38. *GO-5000M-USB-1 | E-shop komponent pro strojové vidění* [online] [cit. 2021-12-20]. Dostupné z: <https://eshop.atesystem.cz/d/844468/go-5000m-usb>.
39. *JAI GO-5000M-USB-UV* [online] [cit. 2021-12-20]. Dostupné z: <https://www.stemmer-imaging.com/en/products/jai-go-5000m-usb-2/>.
40. *JAI GO-5000M-USB-UV USB3.0 UV/B&W camera e2v Lince5M UV Sensor w/no Microlense* [online] [cit. 2021-12-20]. Dostupné z: <https://www.1stvision.com/cameras/models/JAI/GO-5000M-USB-UV>.
41. *GO-5000M-PGE* [online] [cit. 2021-12-30]. Dostupné z: <https://www.radwell.co.uk/en-GB/Buy/JAI/JAI/GO-5000M-PGE/>.
42. *UV Camera MV4-D1280U-H01-GT | Photonfocus AG* [online] [cit. 2022-01-09]. Dostupné z: <https://www.photonfocus.com/products/camerafinder/camera/mv4-d1280u-h01-gt/>.
43. *QHY42 Pro - QHYCCD Scientific Cameras - Gsense400 sCMOS* [online]. 2021-05-10 [cit. 2022-01-09]. Dostupné z: <https://www.qhyccd.com/qhy42pro/>.
44. *QHY 42 PRO Scientific CMOS Serie (various versions available)* [online] [cit. 2022-01-09]. Dostupné z: <https://www.baader-planetarium.com/en/qhy-42-pro-scientific-cmos-serie.html>.
45. *PCO: pco.ultraviolet* [online] [cit. 2022-01-09]. Dostupné z: <https://www.pco.de/scientific-cameras/pcoultraviolet/>.
46. *PCO: pco.edge 4.2 bi UV* [online] [cit. 2022-01-09]. Dostupné z: <https://www.pco.de/scientific-cameras/pcoedge-42-bi-uv/>.

LITERATURA

47. *PCO: pco.panda 4.2 bi UV* [online] [cit. 2022-01-09]. Dostupné z: <https://www.pco.de/scientific-cameras/pcopanda-42-bi-uv/>.
48. *Ultraviolet Lens Assemblies* [online] [cit. 2021-12-20]. Dostupné z: https://www.universeoptics.com/uvlens_assemblies/.
49. *F2.8/25mm - Ricoh International B.V.* [Online] [cit. 2021-12-29]. Dostupné z: <https://www.ricoh-iosd.eu/en/product/FL-BC2528-VGUV/UV-Lenses.html>.
50. *UV Lens | FA Lens | Industrial Products | Ricoh* [online] [cit. 2021-12-20]. Dostupné z: https://industry.ricoh.com/en/fa_camera_lens/lens/uv/#anc01.
51. *FL-BC2528-VGUV Ricoh Lens 1" 25mm* [online] [cit. 2021-12-29]. Dostupné z: <https://aegoptics.com/product/fl-bc2528-vguv-ricoh-lens-1-25mm/>.
52. *UV2528B-UV Quartz Lens Assemblies* [online] [cit. 2021-12-20]. Dostupné z: <https://www.universeoptics.com/product/uv2528b-ultraviolet-quartz-lens-assemblies/>.
53. *UV2528B f=25mm UV Objektiv - EHD imaging GmbH (B2B Online-Shop)* [online] [cit. 2022-01-06]. Dostupné z: <https://www.ehd-imaging.de/p/uv2528b-f-25mm-uv-objektiv>.
54. *UV1628CM-UV Quartz Lens Assemblies* [online] [cit. 2021-12-20]. Dostupné z: <https://www.universeoptics.com/product/uv1628cm-ultraviolet-quartz-lens-assemblies/>.
55. *UV1628CM f=16mm UV Objektiv - EHD imaging GmbH (B2B Online-Shop)* [online] [cit. 2022-01-06]. Dostupné z: <https://www.ehd-imaging.de/p/uv1628cm-f-16mm-uv-objektiv>.
56. *UV1228CM-UV Quartz Lens Assemblies* [online] [cit. 2021-12-20]. Dostupné z: <https://www.universeoptics.com/product/uv1228cm-ultraviolet-quartz-lens-assemblies/>.
57. *UV1228CM f=12mm UV Objektiv - EHD imaging GmbH (B2B Online-Shop)* [online] [cit. 2022-01-06]. Dostupné z: <https://www.ehd-imaging.de/p/uv1228cm-f-12mm-uv-objektiv>.
58. *UV0928CM-UV Quartz Lens Assemblies* [online] [cit. 2021-12-20]. Dostupné z: <https://www.universeoptics.com/product/uv0928cm-ultraviolet-quartz-lens-assemblies/>.
59. *UV0928CM2 f=9mm UV Objektiv - EHD imaging GmbH (B2B Online-Shop)* [online] [cit. 2022-01-06]. Dostupné z: <https://www.ehd-imaging.de/p/uv0928cm2-f-9mm-uv-objektiv>.
60. *UV0635BCM-UV Quartz Lens Assemblies* [online] [cit. 2021-12-20]. Dostupné z: <https://www.universeoptics.com/product/uv0635bcm-ultraviolet-quartz-lens-assemblies/>.
61. *UV0635BCM f=6mm UV Objektiv - EHD imaging GmbH (B2B Online-Shop)* [online] [cit. 2022-01-06]. Dostupné z: <https://www.ehd-imaging.de/p/uv0635bcm-f-6mm-uv-objektiv>.
62. PERNECHELE, Claudio; CONSOLARO, Luca; JONES, Geraint H.; BRYDON, George; DEPPO, Vania Da. Telecentric F-theta fisheye lens for space applications. *OSA Continuum*. 2021, vol. 4, no. 3, pp. 783–789. ISSN 2578-7519.

Seznam použitých zkratek a symbolů

UV	ultraviolet (ultrafialová oblast)
NIR	near-infrared (blízká infračervená oblast)
LIBS	Laser-induced breakdown spectroscopy (spektrometrie laserem buzeného plazmatu)
CAMS	Cameras for Allsky Meteor Surveillance
SPMN	The Spanish Meteor Network
EDMOND	The European Video Meteor Observation Network
SMART	Spectroscopy of Meteoroids in the Atmosphere by means of Robotic Technologies
AMOS	All-Sky Meteor Orbit System
DAFO	Digital Autonomous Fireball Observatories
ISS	International Space Station
MSX	Midcourse Space Experiment
PSF	Point Spread Function
MTF	Modulation Transfer Function
CCD	Charged-coupled device
CMOS	Complementary Metal–Oxide–Semiconductor
α	odklon paprsku od optické osy
f'	ohnisková vzdálenost (obrazová)
a	předmětová vzdálenost
a'	obrazová vzdálenost
n	index lomu
λ	vlnová délka
ν	Abbého číslo
F	Fraunhoferova čára F
d	Fraunhoferova čára d
C	Fraunhoferova čára C
K	kontrast
I	intenzita
r_{rms}	rms poloměr spotu
r_{P}	poloměr Petzvalovy plochy
V	zkreslení obrazu
y	poloha obrazového bodu
$f/\#$	clonové číslo
D	průměr vstupní pupily
Z	poloměr Airyho disku
\mathbb{Z}	množina celých čísel
N	hustota vrypů
g	mřížkový parametr
ϑ_0	úhel dopadu
ϑ	úhel odklonu
m	difrakční řád
ε	úhel odklonu roviny dopadu
w	poloviční úhel zorného pole