

MASARYKOVA UNIVERZITA
PŘÍRODOVĚDECKÁ FAKULTA



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

STUDIUM JASU OBLOHY

PETR HORÁLEK

BRNO 2010

Prohlášení

Prohlašuji, že tato bakalářská práce je mým původním autorským dílem, které jsem vypracoval samostatně. Všechny zdroje, prameny a veškerou literaturu, co jsem při vypracování použil či z nich čerpal, v práci řádně cituji s uvedením úplného odkazu na příslušný zdroj.

V Brně dne:

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval několika lidem. Zejména Filipu Hrochovi, který měl se mnou tu trpělivost od začátku až do konce a za jeho rady i konstruktivní náměty v průběhu sepsání této bakalářské práce. Dále bych rád poděkoval Astronomické společnosti Pardubice, která v podstatě kvůli této práci zakoupila jasoměr SQM-L a zapůjčila mi jej na neomezeně dlouhou dobu. Nakonec bych rád poděkoval Eleně Lindišové a mojí sestře Tereze Horákové za dílčí pomoc při měření jasů nebe jasoměrem.

Anotace

Tato bakalářská práce je zaměřena na *studium jasu noční oblohy*, který roste s tzv. vzdušnou hmotou (tedy se zenitovou vzdáleností měřeného místa oblohy) a s úhlovou vzdáleností od světelných zdrojů. Zdrojem jasu oblohy je především rozptyl světla na částicích v zemské atmosféře, který pochází ze všemožných zdrojů počínajících přírodními (například Měsíc) a umělými konče. Ve městě jas oblohy značně vzrůstá, když je ovzduší kalnější, daleko od měst naopak klesá. Souvislý přehled změn jasu oblohy v závislosti na průzračnosti oblohy ovšem znám není. Cílem práce je seznámit se s metodami měření jasu oblohy a porovnat výsledky měření z různých lokalit.

Annotation

This thesis is focused on *studying of the night sky brightness*, which grows with the so-called airmass (ie, the zenith distance of the measured points of sky) and the angular distance from the light sources. The source of the sky brightness is mainly light scattering particles in the Earth's atmosphere, which come from all sorts of natural resources, beginning with natural (for example the Moon) and artificial ending. In the city, the sky brightness increases significantly when the air is turbid, far from towns on the contrary decreases. Coherent overview of the sky brightness changes depending on the clearness of sky is not known yet. The target of this bachelor's thesis is to understand methods of measuring the sky brightness and compare results from different locations.

Klíčová slova

Jas oblohy, extinkce, vzdušná hmota, mezní hvězdná velikost, světelné znečištění

Keywords

Sky brightness, extinction, air mass, limiting magnitude, light pollution

Obsah

1	Úvod	6
2	Metody detekce světla	7
2.1	CCD čip	7
2.2	Digitální fotoaparát	8
2.3	Formát FITS	8
3	Proč je obloha světlá	11
3.1	Jas oblohy a světelné znečištění	17
3.2	Rozptyl světla na částicích v atmosféře	18
3.3	Extinkce	19
4	Měření jasu oblohy	21
4.1	Bortleho stupnice	22
4.2	Měření jasoměrem	22
4.3	Měření ze získaného snímku	24
5	Vlastní měření	25
5.1	Měření jasu oblohy ze snímku	25
5.2	Měření jasu oblohy jasoměrem	29
5.3	Porovnání naměřených hodnot jasu oblohy ze snímku a z jasoměru	30
5.4	Měření jasu zodiakálního světla a oprava o atmosférickou extinkci	31
6	Závěr	36
	Zdroje a použitá literatura	37
	Dodatek	38

1 Úvod

Jas oblohy je astronomický pojem označující množství světla detekovaného z oblohy (ovzduší). Zpravidla vzniká rozptylem světla na částicích vzduchu. Rozptýlí-li se uměle vytvořené světlo, mluvíme o tzv. *světelném znečištění* (angl. *light pollution*).

Samotné studium jasu oblohy by se dalo ve zkratce rozdělit na dvě rozdílné otázky – co jej způsobuje a jak jej měřit. Tato bakalářská práce je zaměřená na oba tyto problémy. V první části se snaží stručně nastínit hlavní jevy (nejen) v zemské atmosféře vedoucí ke zvýšení jasu oblohy (rozptylové jevy), získat přehled činitelů ovlivňujících tyto jevy a fyzikálně je popsat. Ve druhé části je pak popsáno dvojím způsobem, jak jas oblohy měřit, a to analýzou snímku z digitálního fotoaparátu a pomocí přístroje zvaného jasoměr [6e].

2 Metody detekce světla

Astronomové odjakživa hledali způsob, jak detekovat a měřit množství světla. Tím nejznámějším a nejužívanějším detektorem světla je lidské oko. Oko je jedinečným nástrojem se zajímavými optickými funkcemi a následnými procesy detekce, ale je obtížné jej použít pro objektivní zpracování astronomického pozorování. Byly tedy hledány technická řešení a postupy, co by daly zpracovatelnou objektivní informaci z detekovaného světla.

S nástupem fotografie se v astronomii začaly hojně užívat fotografické desky, které se vkládaly do ohniska dalekohledů. Fotografických desek bylo nespočet druhů, odlišovaly se citlivou chemickou emulzí nanesenou na zpravidla skleněnou desku (například cínové, autochromové, bromostříbrné, kolodiové, s jodidem stříbrným apod.). Zdlouhavé chemické procesy vedoucí k vyvolání snímků a nedostačující citlivost desek však vedly k hledání nové technologie.

Na počátku 70. let 20. století přišel převrat jménem CCD čip, který využívá převodu dopadlých fotonů na elektrony, jejichž počet na políčku čipové matice dodává přímou informaci o světelné intenzitě. Ještě v 90. letech byly fotografické desky v astronomické komunitě užívané, ale dnes je CCD technika zcela dominujícím prvkem při detekování světla. A to nejen při astronomických pozorováních, nýbrž v běžně dostupných opticko-digitálních přístrojích, jako jsou digitální fotoaparáty, videokamery či dokonce mobilní telefony.

2.1 CCD čip

CCD (z anglické zkratky Charge-Couple Device, tj. přístroj s vázanými náboji) vynalezli v roce 1969 američtí vědci Willard Boyle a George E. Smith v Bellových laboratořích ve státě New Jersey v USA. Za svůj vynález byli právem po rekordních 40 letech odměněni Nobelovou cenou. Přitom sestrojení vynálezu, jak sami tvrdí, jim trvalo jen několik málo hodin.

CCD čip funguje na principu fotoefektu, při kterém dopadlý foton vybudí jeden z elektronů ze základního stavu do excitovaného. Při této interakci dodá fotonu elektronu energii o velikosti

$$E = \nu \cdot h, \quad (2.1)$$

kde v je kmitočet fotonu a h Planckova konstanta ($6.626 \cdot 10^{-34}$ J.s). V obecném principu se CCD čip skládá z elektrody a polovodiče ve tvaru malé destičky, která je členěna mřížkou (jednotlivé pixely). Elektroda je od polovodiče izolována tenkou vrstvou SiO_2 , jenž funguje jako dokonalý izolant bránící fotoefektem uvolněným elektronům uniknout pryč. Během doby, kdy je otevřená závěrka, se na polovodiči v jednotlivých pixelech v závislosti na dopadlých fotonech uvolňují elektrony (které se přichytávají na elektrodu) a vznikají tak kladné náboje. Po uzavření závěrky se na jednu z množiny elektrod nacházejících se v jednotlivých pixelech začne pozvolna zvyšovat napětí (v případě 3 elektrod na pixel jde o tzv. *trojfázový hodinový signál*), zatímco na druhé snižovat. Podobně se toto děje v dalších kombinacích elektrod, což vede k postupnému posouvání shluků elektronů k výstupnímu zesilovači, který tak zesílí malý proud dávající informaci o počtu nasbíraných elektronů a tedy i informaci o počtu dopadlých fotonů na jednotlivé pixely.

2.2 Digitální fotoaparát

Jak již bylo míněno, kromě astronomických CCD kamer se s čipem setkáme v digitálních fotoaparátech. Samotný čip však dává pouze černobílý snímek (resp. v odstínech šedi). Aby byl snímek barevný, používají se čipy, na jejichž pixelech jsou nanášeny barevné filtry. Nejznámější a nejužívanější je tzv. *bayerovské uspořádání barev RGB* (Red, červená, $\lambda = 630$ nm; Green, zelená, $\lambda = 530$ nm; Blue, modrá, $\lambda = 450$ nm). V tomto uspořádání jsou na jeden pixel v čtvercové matici 2×2 diagonálně dva zelené filtry a zbylé dvě políčka vyplňuje jeden modrý a jeden červený filtr. Tak se dosahuje většího přiblížení k vnímání barev u lidského oka, které je nejcitlivější za denního světla na žlutozelenou barvu (s maximem kolem $\lambda = 555$ nm). V digitálních fotoaparátech se ovšem setkáváme s konstrukčně poněkud odlišným CMOS čipem, jehož výhodou je především nižší spotřeba oproti CCD (nevýhodou ovšem například větší šum a menší citlivost). Čipy CMOS navíc ukládají barevný snímek v odlišné konfiguraci barevných filtrů, obecně v barvách XYZ. Navíc každý fotoaparát má ještě své vlastní barevné nastavení.

Aby bylo možné porovnávat fotometrické hodnoty snímků z digitálního fotoaparátu s daty pořízenými například družicí Hipparchos, je třeba pořízený snímek převést do zvoleného systému filtrů. V astronomii se užívá série tzv. *Johnsono-*

vých filtrů U, B, V, R (a dlouhovlnné I, J, K a L). Tyto filtry propouští světlo v úzkém pásmu vlnových délek s maximem v dané barvě (U, ultrafialová, maximum v $\lambda = 365$ nm; B, modrá, maximum v $\lambda = 440$ nm; V, žlutá, maximum v $\lambda = 545$ nm; R, červená, maximum v $\lambda = 700$ nm). Abychom získali snímek převedený do zvoleného Johnsonova filtru, musíme nejdříve snímek v barvách XYZ převést do RGB. K tomu poslouží například program DcRAW [22e]. Tento program zná a používá převodové matice z barev XYZ do RGB u všech dostupných digitálních fotoaparátů.

Vhodnou transformací z bayerovské matice RGB získáme snímek poskytující informaci právě v daném Johnsonově filtru. Transformaci lze provést následující maticí (Hroch, 2010):

$$\begin{pmatrix} B \\ V \\ R \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 4.9614 & 0.0966 & -0.0220 \\ 0.2931 & 1.4793 & 0.3486 \\ 0.9029 & 0.5135 & 0.8373 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix}. \quad (2.2)$$

Chceme-li tedy převod snímku například z digitálního fotoaparátu CANON EOS 30D (v této práci užívaném) z barev jeho barev XYZ do V filtru, uijeme následující vztah:

$$V = 0.013093 \cdot Z + 0.789019 \cdot X - 0.328110 \cdot Y. \quad (2.3)$$

Ze získaného upraveného snímku pak lze dále naměřená data porovnávat s fotometrickými daty ve V filtru.

2.3 Formát FITS

Dnes již hojně rozšířený formát FITS (zkratka z angl. „Flexible Image Transport System“) byl vytvořen astronomy v roce 1979 a standardizován o 2 roky později. Podobně jako jiné bezztrátové formáty obsahuje hlavičku s informacemi o snímku. V případě FITS jde především o tyto hodnoty:

BITPIX	rozsah dat od 0 do 2^{BITPIX}
NAXIS	počet dimenzí snímku
NAXISn	počty pixelů jednotlivých os
EXPTIME	expoziční doba v sekundách
DATE-OBS	datum a čas začátku expozice
FILTER	použitý filtr

OBJECT snímaný objekt
[X, Y] XFACTOR binnig

Pořízená data ve snímku jsou uložena v tabulce formátu dvojdimenzionální matice. Políčka v tabulce, tzv. *pixels*, obsahují číselnou informaci úměrnou intenzitě dopadnutého záření. Další informace o formátu lze najít na [1e].

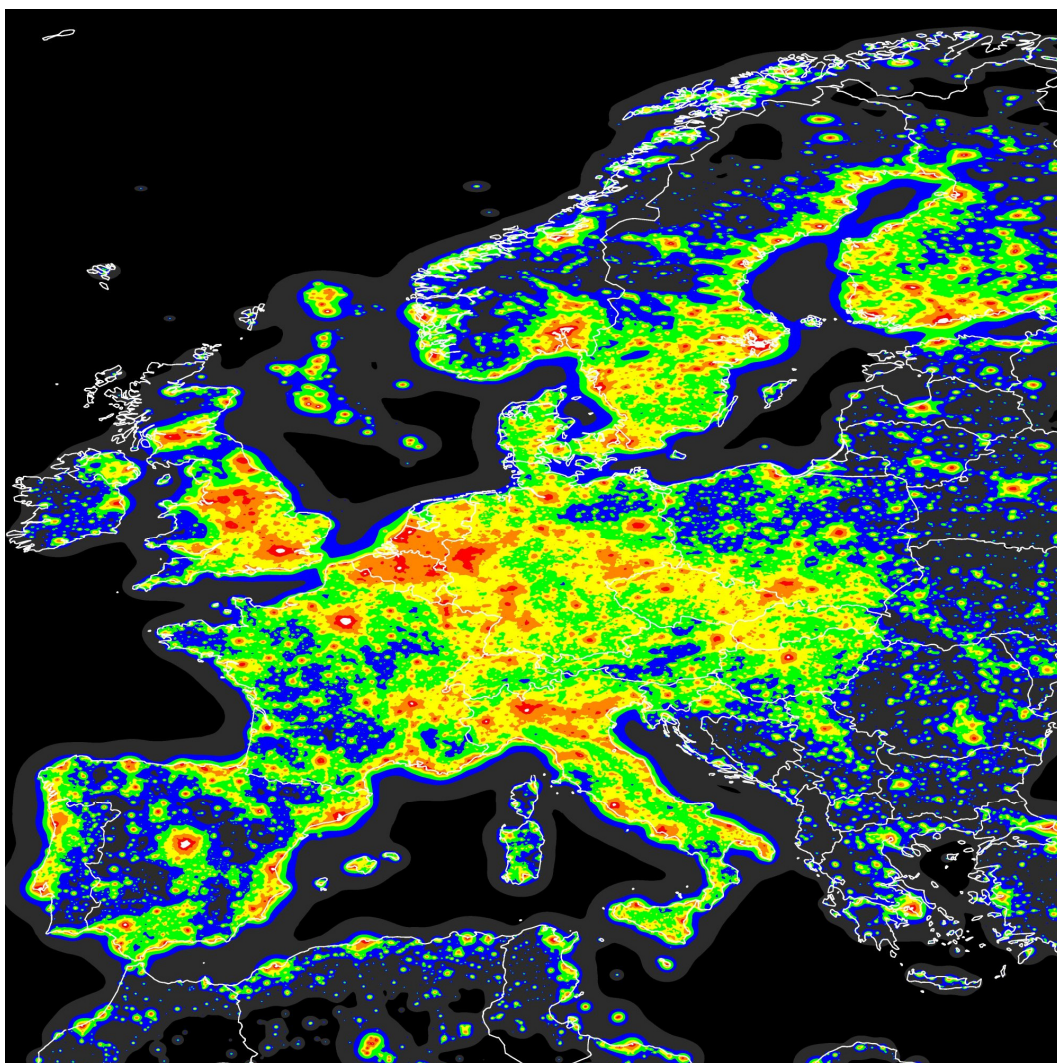
3 Proč je obloha světlá?

To, že jasnou noční oblohu nikdy neuvidíme (či spíš nenafotografujeme) úplně tmavou, má hned několik příčin. Tyto příčiny můžeme kategoricky odlišovat podle vlivu člověka, tedy jedná-li se o umělé či přírodní zdroje navyšující jas oblohy. Dále se pak můžeme zabývat tím, zda jde o proces v zemské atmosféře, či už nad její vrchní hranicí.

Umělé zdroje navyšující jas oblohy

Tou v současnosti nejdiskutovanější příčinou jasu oblohy navýšeného oproti přírodním poměrům je vliv přemíry umělého osvětlení (nejen) v městských aglomeracích. V této souvislosti se setkáváme s termínem *světelné znečištění*. Jedná se o rozptyl uměle vytvořeného světla na částicích v atmosféře, jejichž počet je navíc mnohonásobně navýšen v aglomeracích díky průmyslové činnosti. Obecně lze říct, že světelné znečištění způsobuje světlo od všech přímých i nepřímých umělých zdrojů světla, což vede k navýšení jasu oblohy kvůli rozptylu na částicích v atmosféře. Na konferenci o světelném znečištění, která proběhla od 28. do 30. září 2007 na pardubické hvězdárně, bylo uznáno, že hlavním problémem vedoucím k nárůstu světelného znečištění, a tudíž do velké míry i jasu oblohy, je *rušivé světlo*. Jde o přímé umělé světlo emitované do horního poloprostoru, tedy k obloze. Za existenci světelného znečištění totiž můžeme vinit i to uměle vytvořené světlo, které se odráží například od sněhu či lesklých silnic, tedy od ploch, kam má umělé osvětlení svítit správně (a proto jej eliminovat nelze). Dokonce i vy můžete být zdrojem světelného znečištění, pokud například půjdete v noci s rozsvícenou baterkou v ruce.

Světelné znečištění nelze zcela eliminovat, ale můžeme jej omezit odstraněním rušivého světla, a to tím, že budeme svítit účelněji – tedy v žádném případě přímým světlem do horního poloprostoru). Otázkou světelného znečištění se dnes zabývá nejen astronomická komunita (které přirozeně brání přemíra umělého světla k pozorování oblohy), ale i ekologové (nadbytek světelného znečištění přímo ohrožuje některé noční živočichy) a ekonomové (plýtvání energie neúčelným osvětlováním se samozřejmě odráží na financích).



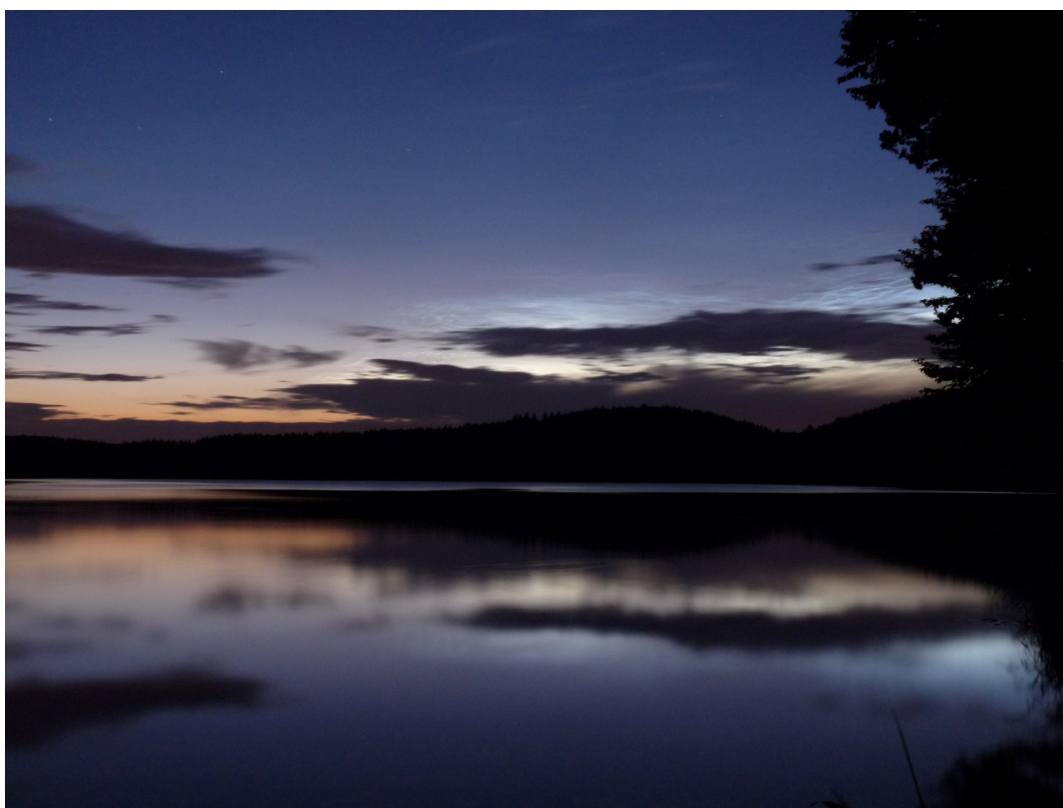
Obrázek 3.1: Rozložení intenzity vyzářeného do vesmíru na území evropského kontinentu. Barvy značí poměr mezi jasem uměle osvětlené a přírodní oblohy (přičemž jas přírodní oblohy se pohybuje v hodnotách $22.0 - 22.5 \text{ mag/arcsec}^2$), a to následovně: <0.11 černá, $0.11 - 0.33$ modrá, $0.33 - 1.00$ zelená, $1.00 - 3.00$ žlutá, $3.00 - 9.00$ oranžová, >9.00 červená a bílá. Z těchto poměrových hodnot lze přímo odvodit jas oblohy v mag/arcsec^2 . Foto a kredit: AF, DMSP [2e].

Přírodní zdroje navyšující jas oblohy

K jasů oblohy však přispívá i sama příroda. Největším nepřítelem astronomů je přirozeně *Měsíc*. Ten je sice asi o 14 magnitud slabší než Slunce, ale i tak k nám odráží dost slunečního světla. Ukázalo se, že úplňkový Měsíc nacházející se vy-

soko nad obzorem (v našich zeměpisných šířkách v zimních měsících) navyšuje jas oblohy obdobně jako umělé osvětlení v centru velkých měst.

Bezprostředně se zemskou atmosférou (a tudíž i jasem oblohy) souvisí *nautický soumrak*. Jedná se o období, kdy se Slunce nachází od 6° do 12° pod obzorem. V té době ještě stále nasvěcuje buďto přímo nebo lomem vrchní vrstvy zemské atmosféry, která světlo rozptyluje. V našich zeměpisných šířkách nastává období zvané *nautická noc*, při níž nautický soumrak vládne i během místní půlnoci a tudíž obloha není v žádném okamžiku noci dostatečně tmavá. Toto období trvá každý rok přibližně od 31. května do 12. července (pro Prahu).



Obrázek 3.2: *Velmi výrazná noční svítící oblaka nad hladinou Sečské přehrady v průběhu nautického soumraku 13. července 2009 ve 21^h 37^m UT. Slabá načervenalá záře vlevo patří rozptylu slunečního světla na prachových částicích vyvržených sopkou Saryčev na Kurilských ostrovech. Foto: Petr Horálek.*

V tomto období také vrcholí sezóna tzv. *nočních svítících oblaků* (NLC, z angl. NoctiLucent Clouds). Jde o stříbřitá mezoférická oblaka ve výškách kolem 85 km nad zemí nasvícená během nautických nocí Sluncem. Jsou-li NLC výrazná,

mohou být pozorovatelná prakticky celou noc nízko nad severním obzorem. Nejvýraznější jsou při soumraku a rozbřesku, kdy Slunce pod obzorem stoupá a nasvětluje tak úhlově výše položené vrstvy NLC. Příčina jejich vzniku není doposud zcela objasněna, nicméně jejich četnost velmi dobře koreluje se sluneční aktivitou (v minimu aktivity se v mezoféře nízká teplota ustálí a umožňuje tak vznik NLC). Spekuluje se, že za výskytem NLC stojí člověk, neboť jejich první pozorování se datují krátce po průmyslové revoluci. Odpovídá tomu i fakt, že NLC se často vyskytují po startech raketoplánů, při kterých se může led v mezoférických výškách lépe spojovat a rozrůstat na částicích uvolněných při hoření pohonných paliv (převzato z [3e] a [4e]). NLC jsou tak do jisté míry spíše umělým zdrojem navýšení jasů oblohy.

Mnohem slabším přispěvatelem k jasům oblohy je jev anglicky zvaný *airglow*. Jde o přirozené záření svrchních vrstev atmosféry vznikající ve výškách kolem 80 km nad zemským povrchem. Příčinou záření je excitace fotonů v atomech kyslíku (na vlnových délkách 557.7 nm, 630.0 nm a 636.4 nm) nebo molekulách dusíku, a to volnými elektrony (pocházejícími především ze slunečního větru) zachycenými v siločarách zemské magnetosféry. Airglow lze pozorovat pouhými očima jen v místech s naprosto přírodní oblohou neovlivněnou světelným znečištěním (například ve vysokohorských lokalitách v Chile), a to jako slabé světlo na obzoru. Vysoko nad obzorem jej lze zachytit výhradně fotograficky.

O něco výraznějším, ale již ne atmosférickým zdrojem jasů oblohy je *zodiakální světlo*. Způsobuje jej rozptyl slunečního světla na částicích meziplanetární hmoty rozprostřených v rovině ekliptiky (kam se nám na obloze promítají zvířetníková neboli zodiakální souhvězdí, odtud tedy název). Průměry částic se pohybují kolem 0.001 – 0.1 mm. Díky tomu na nich dochází k tzv. *Tyndallovu rozptylu* [21e], při kterém se svazek paprsků procházející nehomogenní látkou složenou z částic větších než vlnová délka světla stává pozorovatelný v podobě kužele. Svazek rozptýleného světla má tvar kužele s vrcholem v místě, kde světlo vchází do nehomogenního prostředí. Intenzita Tyndallova rozptylu je dána vztahem

$$I = I_0 e^{-\tau}, \quad (3.1)$$

kde I je intenzita prošlého záření, I_0 je intenzita dopadajícího záření a τ je optická tloušťka (veličina udávající míru zeslabení světla při jeho průchodu jednotkovou délkou určitého prostředí). Koeficient τ je bezrozměrný a lze jej spočítat z rovnice

$$\tau = \sigma \int_0^h n ds = \sigma N_d, \quad (3.2)$$

kde N_d značí počet částic obsažených ve sloupci orientovaném ve směru pozorovatele o ploše základny 1 m^2 a výšce h . Řeckým písmenem σ je pak označen účinný průřez částice



Obrázek 3.3: Zodiakální světlo vystupující z horizontálně položené Mléčné dráhy u vysokohorské observatoře La Silla v Chile. Výsledný snímek byl vytvořen složením pěti snímků o expozičních $t_{exp} = 30 \text{ s}$ získaných fotoaparátem CANON EOS 30D 19. listopadu 2009 v $1^h 37^m$ UT při citlivosti $ISO = 3200 \text{ ASA}$. Už sama délka expozič dokazuje kvalitu tamní oblohy. Foto: Tomáš Henych.

Z pozorování spektra zodiakálního světla bylo zjištěno, že záření z něj pocházející je prakticky totožné se slunečním. Zodiakální světlo je z našich zeměpisných šířek patrné jako slabý světelný kužel vystupující pod úhlem až 60° vůči obzoru (kolem jarní rovnodennosti po západu Slunce, na podzim zase před východem Slunce – tehdy svírá ekliptika s obzorem největší úhel). Za velmi dobrých podmínek lze pak spatřit tzv. *zodiakální most* spojující východní a západní zodiakální kužely a přímo v opozici se Sluncem se dá spatřit tzv. *zodiakální protisvit* (německy *Gegenschein*), kde jsou částice nasvíceny vůči pozorovateli zpříma podob-

ně jako Měsíc v úplňku a odráží proto nejvíce světla právě k oku pozorovatele. Část zodiakálního světla lze také pozorovat při úplném zatmění Slunce. Jednak jako pokračování sluneční koróny (tzv. *F koróna*) a jednak jako jakési halo kolem ztemnělého slunečního kotouče.



Obrázek 3.4: *Zodiakální most a protisvit nad jižní vysokohorské observatoři Paranal v Chile. Jasný objekt na obzoru je otevřená hvězdokupa Plejády a mlhavý eliptický útvar v levé dolní části snímku (nad kopulemi) je galaxie M31 v Andromedě. Foto: Yuri Betelski.*



Obrázek 3.5: Výrazné halo kolem ztemnělého Slunce při zatmění v březnu roku 2006 částečně náležící do celkové struktury zodiakálního světla (podstatná většina rozptýleného světla pochází z přímého osvětlení zemské atmosféry sluneční fotosférou). Toto halo bylo bez větších obtíží pozorovatelné i pouhými očima a velmi výrazné ve světelných binokulárech. Foto a kredit: Miloslav Druckmüller a Peter Aniol.

3.1 Jas oblohy a světelné znečištění

Jas oblohy je veličina, která se nám podává informaci o součtu všech výše zmíněných zdrojů světla. Jak vyplývá z výše uvedeného, noční obloha i za těch nejpřísnějších opatření stále vykazuje přírodní jas. Problémem dnešní doby je tedy především správně definovat unesitelnou míru rozptylu uměle vytvořeného světla na prachových i jiných částicích v atmosféře a omezit ji s ohledem na ochranu přírodní oblohy. Měření jasu oblohy je podrobně rozebráno v bodě 4.

3.2 Rozptyl světla na částicích v atmosféře

Největší měrou se za jas oblohy zasazuje rozptyl světla na částicích. Pakliže si částice představíme jako objekty s účinným průřezem σ , můžeme na nich uvažovat trojí druh rozptylu.

Pokud jde o prachové částice, jejichž rozměry (míněno účinný průřez) přesahují vlnové délky viditelného světla, uplatňuje se tu *Mieův rozptyl*. Závislost účinného průřezů částic na vlnové délce světla je u Mieova rozptylu dána přibližným vztahem

$$\sigma \sim \frac{1}{\lambda}. \quad (3.4)$$

Z tohoto vztahu, rovnice (3.1) a rovnice (3.2) vyplývá, že intenzita rozptýleného záření je

$$I = I_0 e^{-N/\lambda}. \quad (3.5)$$

Budeme-li však uvažovat částice s účinným průřezem menším, nežli je vlnová délka světla, intenzita rozptýleného záření bude na vlnové délce záviset mnohem silněji než v předchozím případě – účinný průřez částice bude nepřímo úměrný čtvrté mocnině vlnové délky λ .

$$\sigma \sim \frac{1}{\lambda^4} \quad (3.6)$$

$$I = I_0 e^{-N/\lambda^4} \quad (3.7)$$

Jde o rozptyl vysvětlený britským fyzikem Johnem W. Rayleighem v roce 1899, nazvaný později *Rayleighův rozptyl*. S tímto druhem rozptylu se setkáváme každý den při blankytné obloze. Právě její zabarvení je způsobené Rayleighovým rozptylem, neboť shluky molekul nejvíce rozptylují krátkovlnnou (modrou) část viditelného slunečního světla. Tento rozptyl nám také umožňuje každodenní scénérii v podobě soumrakových barev, jejichž sled od obzoru odpovídá rostoucí vlnové délce rozptýleného světla.

S třetím druhem rozptylu se setkáváme na částicích, jejichž účinný průřez je mnohem menší než vlnová délka světla (například volné elektrony). Jde o tzv. *Thompsonův rozptyl* a jeho velikost na vlnové délce nezávisí. S tímto druhem rozptylu se můžeme setkat například ve sluneční koróně, kde dochází k rozptylu svět-

la z fotosféry především na volných elektronech (s čímž se v zemské atmosféře za běžných podmínek nesetkáme).

Zejména první dva druhy rozptylu jsou totiž v přímé korelaci s *extinkcí* (neboli zeslabením světla) hvězd nevysoko nad obzorem. Čím je totiž ve vzdušném sloupci, kterým prochází světlo z nějaké hvězdy, více částic, tím větší se dá očekávat zeslabení pozorované hvězdy. Zároveň lze předpokládat i větší jas pozorované části oblohy, kde se hvězda nachází, a to v důsledku rozptylu světla pocházejícího „zespod“ (tedy například z městských aglomerací, které svou průmyslovou činností ještě více dopují atmosféru především prachovými částicemi). Korelaci jasu oblohy s extinkcí je ovšem třeba brát jen s nadhledem, neboť v dané pozorovací lokalitě hrají velkou roli i aktuální pozorovací podmínky (tzv. *seeing*) či další jevy bezprostředně související s aktuálním a lokálním stavem ovzduší.

3.3 Extinkce

Jak bylo několikrát zmíněno v předchozích kapitolách, s narůstajícím jasnem oblohy souvisí i atmosférická extinkce. Jde o zeslabení světla přicházejícího z hvězd přes zemskou atmosféru. Světlo je zeslabeno rozptylem na částicích v atmosféře, přičemž extinkce je různá pro různé vlnové délky. Čím je vlnová délka kratší (např. pro modré hvězdy), tím je extinkce větší. Závislost mezi hvězdnou velikostí $m(c,z)$, kde c je barva hvězdy a z je její zenitová vzdálenost, a hvězdnou velikostí neztlumenou zemskou atmosférou $m_0(c)$ známe jako *extinkční přímku*:

$$m(c, z) = m_0(c) + k(c)X(z), \quad (3.8)$$

kde k je tzv. *extinkční koeficient* pro danou barvu vyjádřený v magnitudách a X je *vzdušná hmota* v dané zenitové vzdálenosti. Extinkční koeficient lze získat i z grafického proložení, položíme-li do závislosti pozorovanou hvězdnou velikost a vzdušnou hmotu (viz kapitola 5.4).

Pod pojmem *vzdušná hmota* se skrývá relativní výška vzdušného sloupce, kterým přichází světlo z pozorované hvězdy, vztažená k výšce sloupce v zenitu. Jde tedy o bezrozměrnou veličinu. Pakliže by Země byla rovinná plocha, jak se mnozí ještě ve středověku domnívali, byla by vzdušná hmota nepřímo úměrná kosinu zenitové vzdálenosti. My ale musíme počítat s tím, že u obzoru se silně projevívá zakřivení Země (a tudíž i atmosféry) a ke spočtení vzdušné hmoty je třeba užít přesnější vztah (obecně platný především pro $z < 85^\circ$):

$$X = \frac{1}{\cos z} \left[1 - 0.0012 \left(\frac{1}{\cos^2 z} - 1 \right) \right]. \quad (3.9)$$

Extinkční koeficient k udává, o kolik magnitud bylo světlo hvězdy zeslabeno při průchodu zemskou atmosférou v dané barvě v zenitu. Je-li např. $k = 0.3$, znamená to, že světlo bylo zeslabeno v zenitu o 30 %.

Předpokládá se, že zastoupení všech částic s různým účinným průřezem je stejné. V praxi tomu ovšem tak není a vlastnosti extinkce se tak mohou lišit právě v i závislosti na tom, kde se měření provádí a jak moc je tato oblast postižena například průmyslovou činností. Odborněji lze na problém nahlížet tak, že různé částice rozptylují světlo různě, jak bylo popsáno v předchozí kapitole. Nerovnoměrnost jejich zastoupení pak silně ovlivňuje okamžitou extinkci v daném místě.

4 Měření jasu oblohy

Informace o jasu oblohy se v dnešní době získává dvěma způsoby. První z nich je tzv. *mezní hvězdná velikost (MHV)* nebo též nekorektně užívaná *limitní magnituda*. MHV udává hvězdnou velikost v **magnitudách**, jakou jsme ještě na dané obloze schopni pozorovat pouhýma očima. Už z tohoto popisu je jasné, že jde o velmi subjektivní a do vysoké míry pro statistické měření nepoužitelnou veličinu, neboť i při sebelepším procesu jejího měření je silně odvislá na vlastnostech oka pozorovatele (či pozorovatelů). MHV se získává zpravidla dvěma metodami – *přímou* a tzv. *trojúhelníkovou*. Přímá metoda je okamžitá – pozorovatel sleduje danou část oblohy (pokud možno dál od roviny Mléčné dráhy) a zakreslí či zapamatuje si polohu podle něj nejslabší jím viditelné hvězdy. Později z dostupných katalogů zjistí její hvězdnou velikost. Trojúhelníková metoda je poněkud preciznější – pozorovatel se zaměří na obloze na standardizované oblasti ohraničené většinou třemi hvězdami (proto „trojúhelníková“ metoda) a počítá hvězdy mezi nimi. Z tabulek dostupných například na webu organizace IMO [5e] pak zjistí hodnotu MHV odpovídající počtu napočítaných hvězd. Metoda určování jasu oblohy pomocí MHV je rozšířená (ba dokonce vyžadovaná) při pozorování meteorických rojů, kde statistika počítající zenitové frekvence rojů zahrnuje i vlastnosti oka pozorovatele a zpřesňuje tak výsledky pozorování o nemálo procent.

MHV byla především mezi amatérskými astronomy takřka první na ráně k určování kvality noční oblohy. Vznikla tak i proslulá *Bortleho stupnice* popisující v devítistupňové škále kvalitu oblohy ze schopnosti pozorovatele spatřit ty či ony objekty na obloze. Nedávala však možnost navazujícího serióznějšího zpracování a byla tak spíše informativního charakteru.

Mnohem sofistikovanější metody určují jas oblohy je v **mag/arcsec²**. Jde o logaritmickou jednotku úměrnou počtu fotonů k nám přicházejících z čtvereční úhlové vteřiny na zvoleném místě oblohy. Rozdíl jedné mag/arcsec² je definován jako $n \cdot (100)^{1/5}$ přijatých fotonů, kde n je počet fotonů přijatý za určitou dobu, která je pro daná měření stejná. V praxi to znamená, že je-li například přírodní obloha slabší o 5 mag/arcsec² než městská, přichází z ní o dva řády fotonů méně [1].

Nespornou výsadou této jednotky je, že jde o relativní jednotku, která je zpravidla vztažená k hvězdné velikosti nějaké zvolené hvězdy na obloze. U hvězd známe například jejich *barevný index*, svítivost či další fotometrické veličiny a ty lze

díky této jednotce pomocí patřičných vztahů aplikovat i na jas oblohy. Můžeme tak jas oblohy například vyjádřit v jednotkách SI, a to pomocí vztahu (uvedeného v uživatelském návodu k jasoměru SQM-L [1])

$$L = 10.8 \cdot 10^4 \cdot 10^{(-0.4\mu)}, \quad (4.1)$$

kde L je jas v $[\text{cd}/\text{m}^2]$ a μ jas oblohy v $[\text{mag}/\text{arcsec}^2]$. Lze také objevit jistou korelaci mezi jasnem oblohy a *extinkcí* v závislosti na výšce dané hvězdy nad obzorem. V dnešní době je na českém trhu možné zakoupit *jasoměr*, pomocí něhož lze zjistit jas oblohy s přesností větší než 10 %.

4.1 Bortleho stupnice

V roce 2001 publikoval americký amatérský astronom a výborný pozorovatel komet John E. Bortle v únorovém čísle věhlasného amerického astronomického časopisu *Sky and Telescope* [19e] devítistupňovou škálu popisující jas oblohy v závislosti na světelném znečištění. Vycházel přitom z napozorované *mezní hvězdné velikosti* v nadhlavníku. Tato škála je dnes velmi hojně užívaná amatérskými astronomy k popisu svých pozorovacích podmínek. Čím jsou podmínky horší, tím je Bortleho stupeň vyšší a obloha je světlejší.

Jakkoliv byla Bortleho stupnice ve svých počátcích pouze diskutabilní a subjektivní škálou, snaží se dnes astronomové jednotlivé stupně ztotožnit s exaktnějším měřením jasu oblohy udávaném v jednotkách $\text{mag}/\text{arcsec}^2$. Detailní popis Bortleho stupnice najdete v dodatku na konci práce.

4.2 Měření jasoměrem

Jasoměr nebo také též *Sky Quality Meter (SQM; přel. měřič kvality oblohy)* je přístroj určený k měření jasu oblohy v jednotkách $\text{mag}/\text{arcsec}^2$. V přístroji je důmyslná optická soustava vymežující prostorový úhel Ω a fokusující světlo z měřené části oblohy na fotočlánek. Tento fotočlánek vyhodnocuje intenzitu osvětlení I_n , která je úměrná světelnému toku dopadajícího z měřené oblasti oblohy. Fotočlánek pak generuje fotoproud I_f , který následně vyhodnocuje kalibrovaný galvanoměr a hodnoty převádí do žádané jednotky $\text{mag}/\text{arcsec}^2$. Střední jas L plochy vymezené prostorovým úhlem Ω je dán vztahem

$$L = \frac{I_n}{\Omega}. \quad (4.2)$$

Běžně narazíme na dva typy jasoměrů – bodový a integrační. V prvním případě jasoměr měří jen velmi malý zorný úhel oblohy v řádu několika úhlových minut. Integrační jasoměry vyhodnocují signál z širšího zorného pole o průměru v řádu několika (až několika desítek) stupňů.

Při měření jasoměrem za účelem statistického zpracování se postupuje tak, že se z daného místa změří po sobě několik hodnot jasu oblohy M_i (nejlépe 11 hodnot, přičemž první hodnota se do následného zpracování nezapočítává z důvodu změny teploty přístroje během startu, která ovlivňuje správný výsledek někdy i o více než 20 % - viz [1]). Je třeba ovšem dávat pozor na přesnost směru měření (zabírat stále stejnou část oblohy) a také je nutné zvolit tu část oblohy, na níž zrovna neleží jedna či více jasných hvězd nebo planet (týká se to především jasoměrů se zorným úhlem větším než 10°). Také je nezbytné se vyvarovat měření v oblasti poblíž korun stromů – taková měření pak mohou být silně podhodnocená. Ze získaných hodnot spočteme aritmetický průměr dle vztahu

$$\bar{\mu} = \frac{\sum_{i=1}^n \mu_i}{n}, \quad (4.3)$$

kde n je počet měření. Následně u každého měření získáme střední kvadratickou odchylku σ_i , a to pomocí jednoduchého vztahu

$$\sigma_i = (\bar{\mu} - \mu_i)^2. \quad (4.4)$$

Z těchto hodnot lze pak snadno spočítat nejistotu měření, případně relativní odchylku v procentech. Odchylka měření se získá pomocí vztahu

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \sigma_i}{n(n-1)}}. \quad (4.5)$$

Získané hodnoty a výše uvedené výpočty nám pak dávají výsledek jasu oblohy i s nejistotou měření

$$\mu = \bar{\mu} \pm \bar{\sigma}. \quad (4.6)$$

Jasoměry, které se k nám dostávají na trh (viz [6e]), disponují přesností měření lepší než 10 %. Při tomto statistickém měření (samozřejmě v závislosti na dynamice změn lokálních podmínek) lze naměřit jas oblohy s přesností až 7 %. V praxi to znamená, že jas oblohy získaný z údajů naměřených jasoměrem může být přesnější než 0.1 mag/arcsec^2 . Je třeba ještě poznamenat, že jasoměry jsou záměrně citlivé jen na viditelné světlo (před senzorem je zpravidla umístěn IR filtr [16e]).



Obrázek 4.1: Jasoměr UNIHEDRON SQM-L v akci. Zdroj: *Lettherebenight.com*.

4.3 Měření ze získaného snímku

Zevrubnější analýzu a také rozložení jasů v různých místech oblohy lze získat ze širokoúhlého snímku pořízeného digitálním fotoaparátem. Pakliže snímek řádně „ošetříme“ (odečtením *dark fieldu* a *flat fieldu*) a převedeme do formátu FITS, lze z něj z poloh a magnitud vybraných hvězd na snímku poměrně dobře spočít nejen jas oblohy, ale například i rozložení jasů v předem zvolených místech zodiakálního světla či Mléčné dráhy. Podrobněji je procedura popsána v kapitole 5.1.

5 Vlastní měření

Ve vlastním měření jsem si vytyčil čtyři cíle. Prvním z nich je praktické testování měření jasů oblohy pomocí snímku nebe z digitálního fotoaparátu v Johnsonově V filtru [6]. Toto měření jsem provedl pro různé lokality.

Druhým cílem bylo naměřit jas oblohy jasoměrem SQM-L taktéž pro různé lokality, a to včetně určení nejistot měření. Všechna měření probíhala za bezoblačné oblohy na vhodně zvolené oblasti nebe.

Třetím cílem pak bylo tato měření porovnat a určit míru spolehlivosti obou měření, resp. vyhodnotit jejich výhody a nevýhody.

Posledním úkolem je získat snímek zodiakálního světla z lokality s temnou oblohou, z něhož se dá vyjistit nejen jas oblohy, ale i rozložení jasů oblohy v místě výskytu zodiakálního světla. Opravou o atmosférickou extinkci se pak dá zjistit rozložení skutečného jasů zodiakálního světla ve zvoleném filtru.

5.1 Měření jasů oblohy ze snímku

Nejprve bylo třeba získat snímek korigovaný o flat field a dark frame. Oba dva procesy jsem provedl jednoduchým odečtením patřičných snímků od základního snímku ve formátu FITS v programu IRIS [7e]. Dále bylo třeba zjistit měřítko snímku. K němu se došlo zjištěním úhlových a pixelových vzdáleností několika zvolených hvězd na snímku. Úhlová vzdálenost byla zjištěna tzv. *sférické kosinovy věty*

$$v[\text{rad}] = \arccos[\sin \delta_1 \cdot \sin \delta_2 + \cos \delta_1 \cdot \cos \delta_2 \cdot \cos(\alpha_2 - \alpha_1)], \quad (5.1)$$

kde δ vyjadřuje deklinaci hvězdy a α její rektascenzi (vzdálenost v radiánech je pak třeba přepočítat na obloukové vteřiny). Pixelová vzdálenost se pak získala z hodnot udávajících polohu vybraných hvězd v souřadnicích x a y na snímku. Vzdálenost v pixelech se tedy získala jako

$$v[\text{px}] = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2}. \quad (5.2)$$

Z těchto dvou hodnot získaných pro několik zvolených hvězd jsem podílem vzdálenosti ve vteřinách a v pixelech spočetl měřítko snímku Q vyjádřené v jednotkách ["/px].

Takto jsem pak postupoval u každé hvězdy, v jejímž okolí jsem určoval jas zodiacálního světla. Nutno ještě podotknout, že jsem pro usnadnění vybíral hvězdy které mají *B-V index* blízký nule.

Samotný jas oblohy v okolí zvolené hvězdy (tudíž ve zvolené výšce nad obzorem) jsem získal poměrně jednoduchou cestou. Nejprve jsem v programu IRIS zjistil hodnotu signálu I z hvězdy v ADU dopadajícího na plochu S (vyjádřenou v px^2) vhodně zvolené clonky (po několika pokusech jsem ustanovil nejvhodnější průměr clonky $r = 6 \text{ px}$, obsah $S = 113 \text{ px}$). Dále jsem pak zjistil hodnotu signálu I_{obl} v ADU pro část oblohy ležící bezprostředně u zvolené hvězdy (a pokud možno neobsahující fotografické stopy žádných dalších hvězd). Při známé hvězdné velikosti dané hvězdy (m_{hv}) a poměru jasů I v ADU pro hvězdu (I_{hv}) i pozadí (I_{obl}) stačilo použít známý Pogsonův vztah

$$m_{\text{obl}} = 2.5 \cdot \log \frac{I_{\text{hv}}}{I_{\text{obl}}} + m_{\text{hv}}. \quad (5.3)$$

Tento vztah mi dal hodnotu udávající v podstatě hvězdnou velikost oblohy na zvolené plošce. Na převod do jednotkové plochy mag/arcsec^2 mi pak posloužilo již známé měřítko snímku Q , kterým jsem při opětovném dosazení do Pogsonova vztahu vynásobil plochu clonky S a spočetl tak jas oblohy právě na požadovaný prostorový úhel $\Omega = 1 \text{ arcsec}^2$. Pro pořádek vztah uvádím:

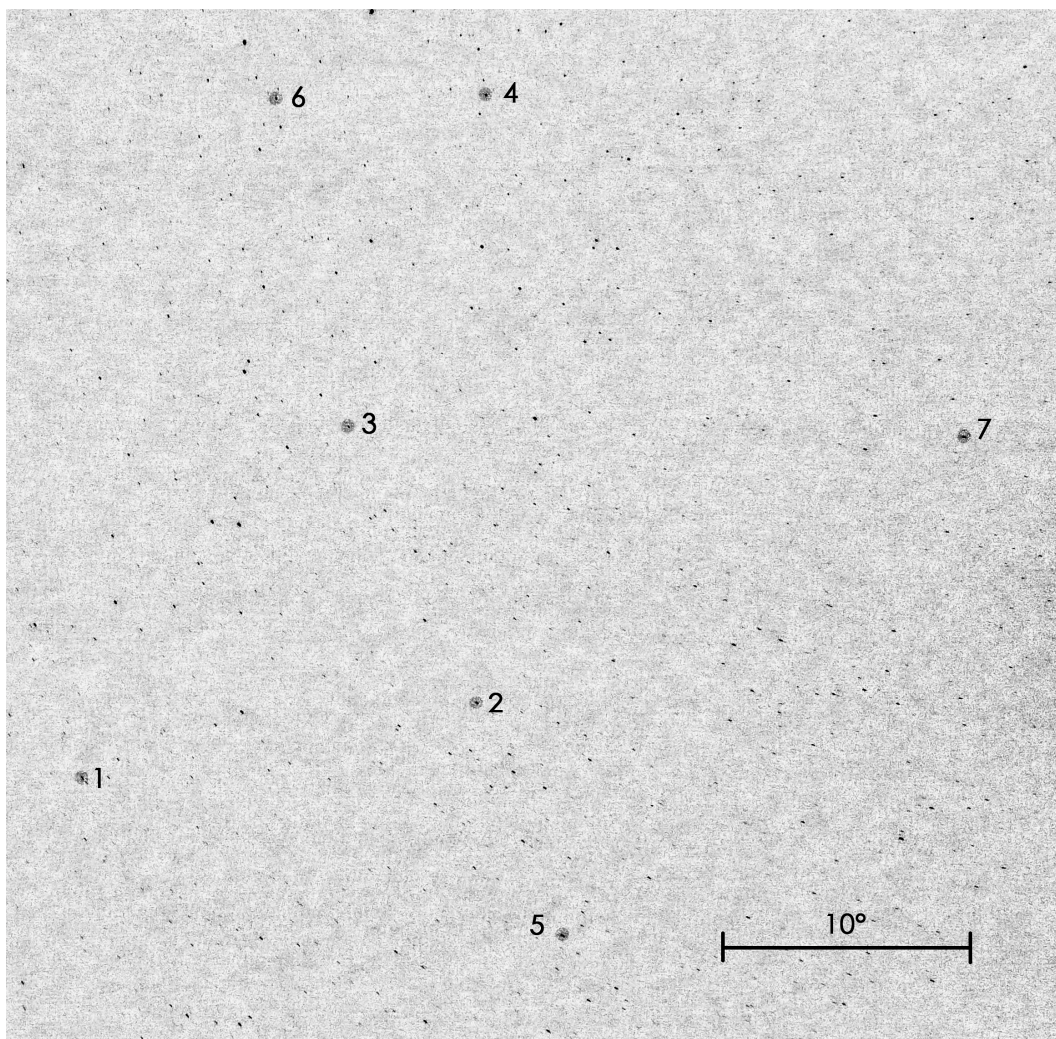
$$m_{\text{obl},Q} = 2.5 \cdot \log(Q^2 \cdot S) + m_{\text{obl}}. \quad (5.4)$$

Posledním důležitým úkonem bylo určit nejistotu měření. Ta byla určena pomocí zákona šíření chyb, neboť je známa nejistota měření měřítka δQ a nejistota měření jasů oblohy $\delta m_{\text{obl},Q}$, tedy

$$\delta = \sqrt{(\delta m_{\text{obl},Q})^2 + \left(\frac{2}{Q \cdot \ln 10}\right)^2 \cdot (\delta Q)^2} \quad (5.5)$$

K analýze jsem užil tří širokouhlých snímků pořízených přes objektiv typu „rybí oko“ z nadhlavníkové oblasti ze tří různých lokalit zvolených k demonstraci různé míry vlivu světelného znečištění na jas oblohy. Všechny tři snímky byly opraveny o dark frame a flat field a převedeny do formátu FITS při současné transformaci do V filtru. Všechny snímky (kromě posledního) byly rovněž pořízeny za bezoblačné a bezměsíčné noci.

Jelikož vždy měření proběhlo na přelomu března a dubna v první polovině noci, nebylo třeba pro každý snímek volit jiné srovnávací hvězdy. Vytipoval jsem si proto sedm hvězd, u nichž jsem si následně vyzjistil jejich polohy v rektascenzi a deklinaci a hvězdnou velikost ve filtru V_{Hipp} pořízenou družicí Hipparchos [8e]. Tato hvězdná velikost se od té standardní v Johnsonově V filtru poněkud liší, ale v rámci přesnosti měření se dá odchylka zanedbat.



Obrázek 5.1: Rozložení hvězdy vybraných k měření jasů oblohy v nadhlavníku v oblasti souhvězdí Rysa.

Číslo	Hvězda	B-V	Spektrální třída	RA [°]	DE [°]	Hvězdná velikost, V [mag]
1	TYC 2489-2141	0,051	A2Vnn	128,683	36,420	5,76
2	TYC 3412-2662	-0,001	A0III n	116,017	50,434	5,32
3	TYC 3805-1879	0,034	A2V	136,002	54,284	5,74
4	TYC 4150-1302	-0,052	A0sp	156,033	65,566	4,93
5	TYC 3391-2640	0,027	A2Vn	104,405	45,094	4,90
6	TYC 3826-1075	-0,038	A0Vs	160,931	57,199	5,78
7	TYC 4345-2051	0,025	A0Vn	94,712	69,320	4,76

Tabulka 5.1: Hvězdy vybrané k měření jasů oblohy v nadhlavníku.

První lokalita, ve které probíhalo měření, se nachází asi 1 km severně od jihomoravské víscky **Lančov** (u Vranova nad Dyjí) s GPS souřadnicemi polohy měření 48° 55' 5.1" severní šířky a 15° 46' 4.1" východní délky. Tato lokalita je význačná svou mimořádně tmavou oblohou, na které se mi bohužel nenaskytlo více možností k měření. Zpracovaný snímek byl pořízen Filipem Hrochem 21. března 2009 v 19^h 42^m 1^s UT fotoaparátem CANON EOS 30D (s clonou $f/2.8$, ohniskem $f = 15.0$ mm, citlivostí $ISO = 1600$ ASA a expozicí $t_{\text{exp}} = 30$ s). Pro tuto lokalitu mi vyšel jas oblohy v zenitu $\mu = (21.72 \pm 0.09)$ mag/arcsec².

Jako druhou jsem si zvolil lokalitu na okraji Železných hor, na vyvýšenině asi 1 km západně od břehů **Sečské přehrady** (Ústupky) s GPS souřadnicemi polohy měření 49° 49' 31.2" severní šířky a 15° 39' 39.9" východní délky a nadmořskou výškou 560 m. Lokalitu jsem si vybral především z důvodu velkého rozsahu podmínek. Jasoměrem (viz další kapitola) jsem nejvyšší naměřený jas oblohy během práce naměřil $\mu = (20.95 \pm 0.01)$ mag/arcsec², nejnižší $\mu = (21.34 \pm 0.01)$ mag/arcsec² (při bezměsíčné jasné obloze). Tento rozsah byl způsoben především rozdílnými atmosférickými podmínkami za výrazného přispění rušivého světla a průmyslové činnosti nedalekých měst. Na ZSZ leží Čáslav (21.7 km od místa měření; 10 tisíc obyvatel), na JJZ Havlíčkův Brod (25.0 km od místa měření; 24 tisíc obyvatel) a na SSV Chrudim (16.8 km od místa měření; 23 tisíc obyvatel) a Pardubice (24.3 km od místa měření; 90 tisíc obyvatel). Z místa pozorování je odkrytý obzor přibližně od jihu k severozápadu. Lokalita zároveň leží v CHKO Železné hory a jako taková je průmyslově nečinná (vyjma lesního a vodního hospodářství, což na jas oblohy pochopitelně markantní vliv nemá). Dá se tedy za velmi dobrých povětrnostních podmínek pozorovat poměrně temná obloha, naopak při přechodu nevýrazných oblak smogu se podmínky rapidně horší. Vyhod-

nocený snímek jsem pořídil 5. dubna 2010 ve 20^h 2^m 37^s UT fotoaparátem Panasonic DMC-FZ28 (s clonou $f/3.2$, ohniskem $f = 4.8$ mm, citlivostí 1600 ASA a expozicí $t_{\text{exp}} = 40$ s). Jas oblohy mi vyšel $\mu = (21.3 \pm 0.1) \text{ mag/arcsec}^2$. Stejného výsledku jsem dosáhl při pozorování o den později ve 20^h 29^m 25^s UT.

Třetím pozorovacím stanovištěm pak byla vydlážděná plocha před univerzitní observatoří MonteBoo na Kraví hoře v **Brně** s GPS souřadnicemi měření 49° 12' 14.62" severní šířky a 16° 35' 2.11" východní délky. Oblast leží jen 2 km severozápadně od centra Brna, což ji přirozeně činí velmi postiženou světelným znečištěním. Snímek, který jsem z této lokality zpracovával, byl pořízen fotoaparátem CANON EOS 30D 18. března 2009 v 19^h 59^m 47^s UT (s clonou $f/3.5$, ohniskem $f = 18$ mm, citlivostí 1600 ASA a expozicí $t_{\text{exp}} = 25$ s). Výsledný jas oblohy byl poněkud nadhodnocen přecházející oblačností, vyšel $\mu = (17.6 \pm 0.2) \text{ mag/arcsec}^2$. Druhé měření proběhlo v následujícím roce 9. března ve 20^h 14^m 16^s UT za bezoblačného počasí stejným přístrojem a stejným nastavením (odlišná byla pouze clona $f/2.8$ a expoziční čas $t_{\text{exp}} = 20.7$ s). Při tomto měření jas oblohy v nadhlavníku dosahoval hodnoty $\mu = (18.7 \pm 0.2) \text{ mag/arcsec}^2$.

5.2 Měření jasu oblohy jasoměrem

Díky Astronomické společnosti Pardubice jsem měl možnost měřit jas oblohy zapůjčeným jasoměrem SQM-L, který měří jas oblohy ve zorném poli $\sim 20^\circ$. Spektrální citlivost tohoto jasoměru je poněkud odlišná od spektrální citlivosti lidského oka v noci a neodpovídá ani průběhu V filtru. Jasoměr je výrazně citlivý na sodíkový dublet (viz [9e]) s vlnovými délkami $\lambda = 589.0$ nm a $\lambda = 589.6$ nm, ve kterých ve městech září vysokotlaké výbojky, což má za následek nadhodnocení výsledku měření jasu oblohy ve městě.

Postup při měření jasoměrem byl podrobně popsán v kapitole 4.2. První měření jsem prováděl 21. února 2010 v 0^h 50^m UT v **Pardubicích**, a to na střeše pardubické hvězdárny s GPS souřadnicemi 50° 1' 32.19" severní šířky a 15° 46' 1.36" východní délky (asi 1.5 km jihozápadně od centra města). Pardubice jsou zajímavým místem pro sledování jasu oblohy z toho důvodu, že zde Služby města Pardubic provádí postupnou výměnu lamp, a to za účelem úspornějšího osvětlení. Většina vyměněných lamp nesvítí do horního poloprostoru a za dobrých podmínek tak lze oproti době před čtyřmi lety spatřit i Mléčnou dráhu. Jas oblohy mi vyšel $\mu = (18.98 \pm 0.01) \text{ mag/arcsec}^2$. Výsledek je však velmi podhodnocen fak-

tem, že toho dne byla slabá inverze, která i v nadhlavníku rozptylovala světlo ze sodíkových výbojek, na něž je jasoměr citlivý. Důkazem je druhé měření, které proběhlo 17. dubna 2010 ve v 20^h 43^m UT. Tehdy byla obloha zcela bezoblačná a dohlednost přes 90 km (ze střechy hvězdárny byla bez potíží pozorovatelná Sněžka). Jas oblohy byl $\mu = (19.41 \pm 0.02) \text{ mag/arcsec}^2$.

Dále jsem jas oblohy proměřoval na již popsané lokalitě **Ústupky u Sečské přehrady**, kde jsem naměřil 5. dubna v 19^h 50^m UT jas oblohy $\mu = (21.32 \pm 0.01) \text{ mag/arcsec}^2$ a o den později za ještě lepších povětrnostních podmínek, 6. dubna ve 20^h 26^m UT jsem došel k hodnotě $\mu = (21.34 \pm 0.01) \text{ mag/arcsec}^2$. Zmapováním jasu oblohy nad zvolenými místy nejen v České republice pomocí jasoměru se zabývá projekt českých amatérských astronomů SkyQuality.com [10e].

5.3 Porovnání naměřených hodnot jasu oblohy ze snímku a z jasoměru

Samozřejmě se nabízí porovnání hodnot jasu nebe získaných ze stejné lokality ve stejnou dobu oběma metodami (ze snímku digitálního fotoaparátu a z měření jasoměrem. Toto srovnání umožňuje měření ze 5. a 6. dubna 2010 z Ústpek u Sečské přehrady. Ze snímku pro oba dny vyšla hodnota $\mu = (21.3 \pm 0.1) \text{ mag/arcsec}^2$ a měření jasoměrem udává pro 5. dubna $\mu = (21.32 \pm 0.01) \text{ mag/arcsec}^2$ a pro 6. dubna $\mu = (21.34 \pm 0.01) \text{ mag/arcsec}^2$. Obě hodnoty naměřené jasoměrem ještě spadají do chyby měření ze snímku z digitálního fotoaparátu. Je samozřejmě výzvou pro budoucí badatele zjistit, nakolik se může lišit měření jasoměrem od měření ze snímku v přesvícených aglomeracích, kde i v nadhlavníku dochází k velkému rozptylu světla ze sodíkových výbojek (což není případ Ústpek), na které je jasoměr citlivý.

5.4 Měření jasu zodiakálního světla a oprava o atmosférickou extinkci

K pozorování byla vybrána lokalita **Lančov** u Vranova nad Dyjí (detailnější popis je v kapitole 5.1). Zpracovaný snímek byl pořízen Filipem Hrochem 21. března 2009 v 19^h 42^m 1^s UT fotoaparátem CANON EOS 30D (s clonou $f/2.8$, ohniskem $f = 15.0 \text{ mm}$, citlivostí $ISO = 1600 \text{ ASA}$ a expozicí $t_{\text{exp}} = 30 \text{ s}$). K zevrubné analý-

ze snímku za účelem zjištění rozložení jasu oblohy v zodiakálním světle se došlo stejnými kroky jako u určení jasu nebe popsány v kapitole 5.1.

Ještě než jsem přešel k nejpodstatnější části tohoto oddílu, čímž je samotné zjišťování rozložení jasu zodiakálního světla, bylo třeba určit výšku zvolených hvězd nad obzorem. K tomu bylo zapotřebí znát hvězdný čas t pořízení snímku (spočtený z UT pomocí [11e]), souřadnice α , δ hvězdy, zeměpisnou šířku φ a zeměpisnou délku λ pozorovacího stanoviště. Výšku hvězdy na obzorem h jsem pak spočetl pomocí transformačního vztahu

$$h = \arccos[\sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos(t - \alpha + \lambda)]. \quad (5.6)$$

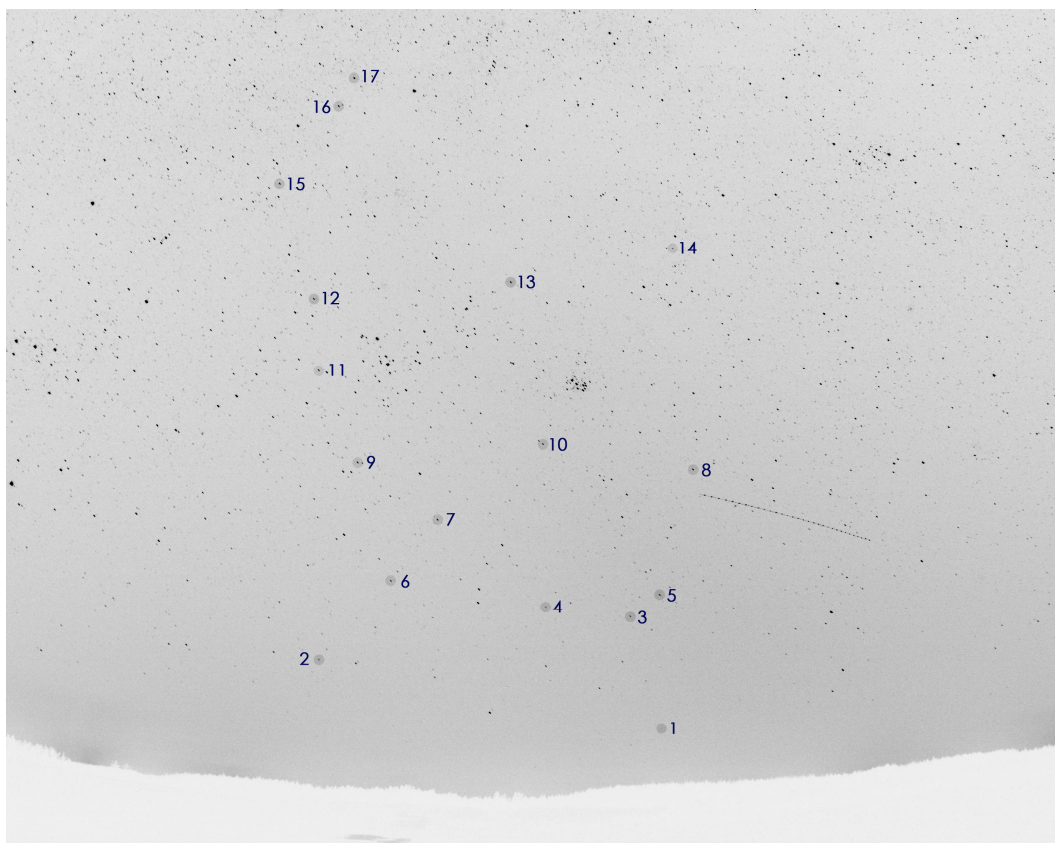
Hvězda	Číslo na snímku	Spektrální třída	B-V [mag]	Hvězd. velikost [mag]	Jas oblohy [mag/arcsec ²]	h [°]
TYC 635-692	1	B7IV	-0.10	5.50	20,38	5.16
TYC 4717-1350	2	B7V	-0.10	5.30	20,30	9.26
TYC 1224-1521	3	B7V	-0.09	5.50	20,63	12.82
TYC 651-1506	4	B8V	-0.06	6.00	20,93	13.57
TYC 1223-1987	5	B6V	-0.06	5.30	20,56	14.22
TYC 71-1224	6	B3V	-0.12	5.90	20,57	14.95
TYC 661-1403	7	B3V	-0.13	5.00	20,60	19.20
TYC 1787-1187	8	B7Vn	-0.02	5.50	20,84	22.45
TYC 671-912	9	B9Vn	-0.10	5.20	20,79	22.63
TYC 1243-946	10	B9Vn	-0.01	5.70	20,99	24.49
TYC 690-1548	11	B8IV	-0.12	5.50	21,12	28.36
TYC 1280-1437	12	B9V	-0.08	5.80	21,23	33.22
TYC 1820-1416	13	B9V	-0.05	5.40	21,08	35.26
TYC 2365-1420	14	B1.5V	-0.06	5.50	21,14	37.20
TYC 1300-2224	15	B5V	-0.10	5.30	21,17	40.12
TYC 1861-2149	16	B2.5IV	-0.09	5.40	21,00	45.94
TYC 1865-2865	17	B3IV	-0.04	5.20	20,98	47.60

Tabulka 5.2: Rozložení jasu oblohy v zodiakálním světle na obrázku 5.2.

Jak je patrné z tabulky 5.2, jas zodiakálního světla se ve svých nejjasnějších partiích (nízko nad obzorem) pohybuje kolem 20.4 mag/arcsec². To je hodnota přibližně 6× nižší, než jas oblohy na nejtemnějších místech Země (například v Chile), ale tolikrát vyšší než na běžné městské obloze (například v Brně jsem naměřil jasoměrem v zenitové oblasti oblohy nejvyšší hodnotu 19.14 mag/arcsec²,

pro Pardubice byla tato hodnota $20.23 \text{ mag/arcsec}^2$, obojí s chybou ne větší jak $0.04 \text{ mag/arcsec}^2$).

Na snímku nejvyšší hodnota jasu oblohy dosahovala $21.23 \text{ mag/arcsec}^2$, což koresponduje s předpoklady o kvalitě oblohy v této lokalitě a činí tak toto pozorovací místo jedním z nejtmavších v České republice.



Obrázek 5.2: Rozložení vybraných hvězd při analýze jasu zodiakálního světla.

Mě ovšem zajímalo, jaký je skutečný jas zodiakálního světla ve vybraných místech na snímku 5.2, tedy opravím-li hodnoty o mezihvězdnou extinkci. Ke zjištění bylo třeba určit pozorovaný jas vybraných hvězd a vzdušnou hmotu při jejich výšce nad obzorem. Zenitovou vzdálenost, z níž se dle vztahu (5.6) vypočte vzdušná hmotu, bylo třeba opravit o *atmosférickou refrakci*. Při tomto jevu se vlivem lomu světla v zemské atmosféře jeví objekty vně zemskou atmosféru o něco výše nad obzorem, než jsou ve skutečnosti. Nejvíce to postihuje objekty ve výšce mezi 0° - 10° nad obzorem. Refrakce je závislá na vlnové délce světla (nejvíce postihuje

krátkovlnnou část viditelného záření), teplotě a tlaku vzduchu, nicméně dá se zobecnit přibližný vztah (převzato z [20e])

$$R = 57'' \operatorname{tg}(z) - \frac{0.55'' \sin(z)}{\cos^2(z)}, \quad (5.7)$$

kde z je pozorovaná zenitová vzdálenost objektu. Tento vztah platí pro zenitovou vzdálenost $90^\circ < z < 80^\circ$ a největší hodnoty nabývá u obzoru (kolem $34'$). Pro zenitovou vzdálenost menší jak 80° se zlomek blíží k nule a refrakční vztah získává jednodušší formu

$$R = 57'' \operatorname{tg}(z). \quad (5.8)$$

Pozorovanou hvězdnou velikost $m_0(c, z)$ jsem pak získal Pogsonovou rovnicí při znalosti intenzity I_{obl} jasu nebe v ADU, hodnoty pozadí na snímku I_{poz} , znalosti intenzity I_{hv} jasu hvězdy v ADU a skutečné hvězdné velikosti hvězdy m_{hv} . Hvězdné velikosti jsou uváděny pro V filtr. Hodnoty intenzit jsem opět vyzjistil v programu IRIS [číslo]. Užitý vztah vypadá takto:

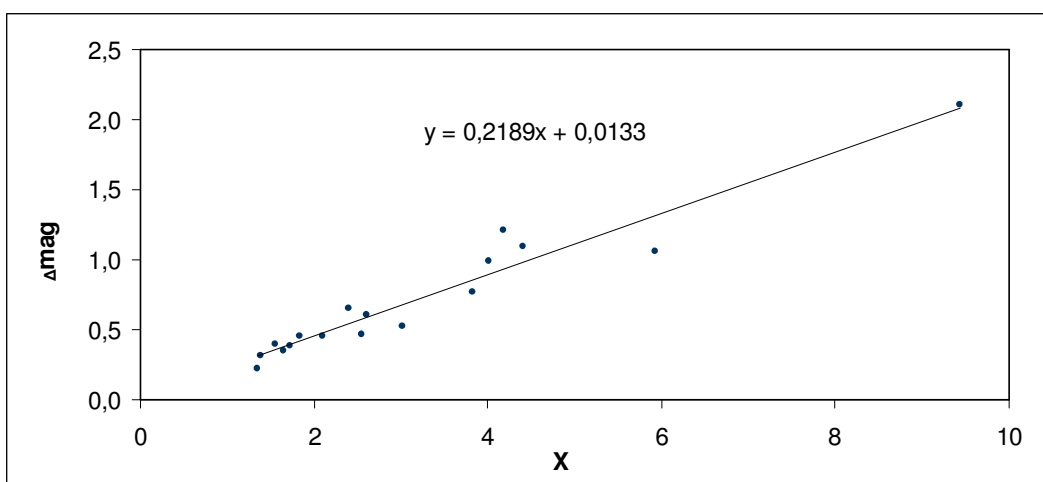
$$m_0(c, z) = -2.5 \log \left(\frac{I_{\text{hv}} - I_{\text{obl}} - I_{\text{poz}}}{I_{\text{hv}} - I_{\text{poz}}} \right) - m_{\text{hv}}. \quad (5.9)$$

Ke zjištění extinkčního koeficientu k jsem pak došel graficky. Stačilo pro zvolené hvězdy spočítat vzdušnou hmotu X (při znalosti zenitové vzdálenosti hvězdy spočtené pro čas měření z jejích souřadnic a následném odečtení refrakce) a rozdíl skutečné a pozorované hvězdné velikosti Δmag . Analýzu jsem prováděl ve snímku v B filtru, kde je extinkce patrnější (na kratších vlnových délkách se extinkce projevuje nejvíce). Vynesená závislost má lineární charakter v souladu s rovnicí (3.8) a konstanta k je hledaný extinkční koeficient.

Z proložení a za použití programu Gnuplot [23e] jsem zjistil i chybu měření.

a	0.219	± 0.014
b	0.013	± 0.007

Se získaným extinkčním koeficientem jsem pak už snadno získal pomocí rovnice (5.6) zeslabení hvězd Δmag_k (a tudíž i zodiakálního světla). Odečtením zeslabení od jasu oblohy z rovnice (5.3) a následným převodem do $mag/arcsec^2$ (5.4) jsem získal hledaný jas zodiakálního světla neovlivněný atmosférickou extinkcí v B filtru.



Graf 5.1: Extinkční koeficient.

Pro přehlednost jsem si ještě vyjádřil souřadnice hvězd tak, aby byly vztaženy k ekliptice (podél níž je zodiakální světlo rozloženo) a k úhlové vzdálenosti od Slunce. Spočetl jsem tedy ekliptikární šířku použitých hvězd dle souřadnicově transformačního vztahu

$$\beta = \arcsin(-\sin \varepsilon \cos \delta \sin \alpha + \cos \varepsilon \sin \delta), \quad (5.11)$$

kde α a δ jsou souřadnice hvězdy a ε sklon zemské osy vůči ekliptice ($\varepsilon = 23.45^\circ$). Úhlová vzdálenost hvězd od Slunce ζ (jehož polohu jsem si zjistil v [2]) byla spočtena dle vztahu (5.1). Výsledky jsou shrnuty v následující tabulce.

Hvězda	Číslo	ζ [°]	β [°]	Výška n. obz. [°]	Refrakce [°]	X	Δmag_k [mag]	Jas zod. sv. [mag/arcsec ²]
TYC 635-692	1	36,21	-3,56	5,05	0,16	9,43	2,06	18,35
TYC 4717-1350	2	54,94	-20,42	9,16	0,09	5,94	1,30	19,03
TYC 1224-1521	3	43,64	-1,30	12,71	0,07	4,42	0,97	19,69
TYC 651-1506	4	47,46	-5,69	13,46	0,06	4,19	0,92	20,04
TYC 1223-1987	5	43,83	1,13	14,11	0,06	4,01	0,88	19,71
TYC 71-1224	6	55,36	-13,47	14,85	0,06	3,82	0,84	19,76
TYC 661-1403	7	56,46	-8,65	19,10	0,04	3,02	0,66	19,97
TYC 1787-1187	8	50,08	7,52	22,34	0,04	2,61	0,57	20,29
TYC 671-912	9	63,28	-11,14	22,85	0,04	2,55	0,56	20,26
TYC 1243-946	10	56,53	0,01	24,38	0,03	2,41	0,53	20,49
TYC 690-1548	11	69,18	-9,89	28,27	0,03	2,10	0,46	20,68
TYC 1280-1437	12	73,21	-7,54	32,92	0,02	1,83	0,40	20,85

TYC 1820-1416	13	66,86	4,01	35,15	0,02	1,73	0,38	20,73
TYC 2365-1420	14	63,89	14,35	37,08	0,02	1,65	0,36	20,81
TYC 1300-2224	15	80,88	-5,26	40,03	0,02	1,55	0,34	20,86
TYC 1861-2149	16	83,08	0,71	45,85	0,02	1,39	0,30	20,72
TYC 1865-2865	17	84,12	2,53	47,86	0,01	1,35	0,29	20,71

Tabulka 5.3: *Rozložení jasů zodiakálního světla opraveného o atmosférickou extinkci (a refrakci u obzoru).*

Jak je patrné, v úhlové vzdálenosti 36° od Slunce nabývá jas zodiakálního světla hodnot, díky kterým bychom si jej mohli všimnout i ve městech. Městská obloha má však vlivem vysoké koncentrace částic u obzoru velkou extinkci a právě tento neduh nám znemožňuje zodiakální světlo z města spatřit a zapříčiňuje mnohem vyšší jas oblohy než v místech s přírodně tmavým nebem.

6 Závěr

Během práce na tomto díle jsem se seznámil se základními „činiteli“ navyšujícími jas oblohy, zejména pak s pojmem světelné znečištění, který se dnes skloňuje v mnoha zemích v souvislosti s globálními problémy. Samotné světelné znečištění ovšem není tím hlavním nepřítelem, neboť světelné znečištění představuje rozptyl světla umělého osvětlení, a to nejen přímého, ale i odraženého. Tím pravým problémem je rušivé světlo, tedy uměle vytvořené světlo přímo emitované do horního poloprostoru. Snížení světelného znečištění tedy vyžaduje především eliminaci rušivého světla.

Během vlastního měření jsem se zabýval na dvěma možnými způsoby, jak změřit jas oblohy, a to z digitální fotografie a pomocí přístroje zvaného jasoměr. Výhodou první metody je, že si pozorovatel může snadno zvolit, v jakém fotometrickém filtru chce měření provádět. Nejistota samotného výsledku je ovšem oproti měření jasoměrem přibližně o řád větší. Též jsem došel k závěru, že obě metody podávají vcelku totožné výsledky, nicméně rozhodně by si tato teze zasloužila ještě hlubší a rozsáhlejší analýzu (více pozorování na několika lokalitách různě postižených světelným znečištěním, důslednější analýza chyb). Bohužel jsem (především pro málo jasných nocí i málo volného času) nebyl schopen pořídit rozsáhlejší řadu měření umožňujících hlubší analýzu vedoucí například ke zjištění vlivu povětrnostních podmínek na jas oblohy v dané lokalitě či vlastnostem vzdušné hmoty za různých podmínek.

Nakonec jsem se okrajově zaměřil na zodiakální světlo a určil jsem rozložení jeho jasu ve V filtru. Při zohlednění vlivu atmosférické extinkce jsem si uvědomil, že skutečný jas zodiakálního světla by umožnil tento jev pozorovat i ve městech, ale právě tam vzdušná hmota u obzoru obsahuje nejvyšší koncentraci částic, která vede k navýšení jasu oblohy u obzoru nikoliv zodiakálním světlem, ale rozptylem umělého světla. Prakticky jsem tedy ověřil důvod, proč není zodiakální světlo z měst pozorovatelné.

Závěrem bych chtěl dodat, že tato bakalářská práce si nekladla za cíl ani tak hlubší analýzu problémů okolo tématu jasu oblohy, jako spíše vytvoření jakéhosi přehledného návodu, jak jas oblohy studovat, na co se zaměřit a jakým způsobem, co všechno si pod pojmem *jas oblohy* představit a nakolik lze s narůstajícím jasem oblohy vlivem světelného znečištění bojovat.

Zdroje a použitá literatura

Literatura

- [1] Uživatelský návod k jasoměru SQM-L firmy Unihedron
- [2] Příhoda, P. a kol., 2008, *Hvězdářská ročenka 2009*
- [3] Kleczek, J., 2002, *Velká encyklopedie vesmíru*
- [4] Hroch, F., 2006, *Astronomické praktikum*
- [5] Mikulášek, Z., Krtička, J., 2005, *Základy fyziky hvězd*, 357-358
- [6] Bednář, J., 1989, *Pozoruhodné jevy v atmosféře*
- [7] Johnson, H. L., Morgan, W. W., 1953, *Fundamental stellar photometry for standards of spectral type on the revised system of the Yerkes spectral atlas*, The Astrophysical Journal, vol. 117, 313-352

Elektronické zdroje

- [1e] <http://www.fits.gsfc.nasa.gov>
- [2e] <http://www.lightpollution.it/dmsp/artbri.html>
- [3e] <http://www.newswise.com/articles/view/553688/>
- [4e] <http://ukazy.astro.cz/nlc.php>
- [5e] <http://www.imo.net/visual/major/observation/lm>
- [6e] <http://www.supra-dalekohledy.cz/dalekohledy/ostatni.html>
- [7e] <http://www.astrosurf.com/buil/us/iris/iris.htm>
- [8e] <http://simbad.u-strasbg.fr/simbad/sim-fid>
- [9e] <http://unihedron.com/projects/darksky/hcm500.htm>
- [10e] <http://www.skyquality.com>
- [11e] <http://www.csgnetwork.com/siderealjuliantimecalc.html>
- [12e] <http://ccd.mii.cz>
- [13e] <http://www.sbig.com>
- [14e] <http://www.fotoroman.cz>
- [15e] <http://www.nitelite.eu/observing/bortle.htm>
- [16e] <http://www.unihedron.com/projects/darksky/faqsqm.php>
- [17e] <http://www.kof.zcu.cz/st/dp/hosnedl/html/astronom.html>
- [18e] <http://aix-lin.upol.cz/~milde/Sirenichyb.pdf>
- [19e] <http://www.skyandtelescope.com>
- [20e] <http://www.kof.zcu.cz/st/dp/hosnedl/html/astronom.html>
- [21e] <http://www.cord.edu>
- [22e] <http://www.cybercom.net/~dcoffin/dcraw>
- [23e] <http://www.gnuplot.info>

Dodatek

Stupně Bortleho stupnice (převzato z [15e])

Stupeň	Stručný popis	Detailní popis
9	Obloha uvnitř velkoměsta MHV: < 4.0 mag Jas oblohy: < 17.5 mag/arcsec ²	Celá obloha je jasně osvětlená a to i v zenitu. Mnoho hvězd tvořících známá souhvězdí je neviditelných a některá slabší souhvězdí jako Rak nebo Ryby nejsou vidět vůbec. Kromě Plejád není pouhým okem viditelný žádný Messierův objekt. Jediné nebeské objekty, které nabízí pěkný pohled v dalekohledu jsou Měsíc, planety a několik nejjasnějších hvězdokup (pokud je vůbec najdete).
8	Městská obloha MHV: ~ 4.5 mag Jas oblohy: ~ 18.0 mag/arcsec ²	Obloha září šedobílou nebo oranžovou barvou, novinové titulky jsou bez problémů čitelné i bez zdroje světla. M31 a M44 jsou sotva viditelné zkušeným pozorovatelům za dobré noci a pouze jasné Messierovy objekty jsou dosažitelné středně velkým dalekohledem. Některé z hvězd známých souhvězdí jsou obtížně viditelné nebo úplně chybí.
7	Příměstská/městská obloha MHV: ~ 5 mag Jas oblohy: ~ 19.0 mag/arcsec ²	Celé nebe má mlhavý, šedivý nádech. Silné zdroje umělého světla jsou patrné ve všech směrech. Mléčná dráha je téměř nebo úplně neviditelná. M31 a M44 mohou být spatřeny pouhým okem, ale jsou velmi nenápadné. Mraky jsou jasně nasvícené. I ve středně velkém dalekohledu jsou jasné Messierovy objekty pouze vybledlé stíny své skutečné podoby.

6	<p>Světlá příměstská obloha</p> <p>MHV: ~ 5.5 mag Jas oblohy: ~ 20.0 mag/arcsec²</p>	<p>Žádné známky zvířetníkového světla nejsou patrné, ani za nejlepších nocí. Náznaky Mléčné dráhy jsou zřejmé pouze poblíž zenitu. Obloha do výšky 35 stupňů nad horizont má světlý šedobílý nádech. Mraky kdekoliv na nebi se jeví poměrně jasně nasvícené. Nemáte problém vidět okuláry a ostatní příslušenství odložené na stole. M33 není viditelná bez pomoci triedru a M31 je jen málo nápadná prostým okem.</p>
5	<p>Příměstská obloha</p> <p>MHV: 5.5 – 6 mag Jas oblohy: ~ 20.8 mag/arcsec²</p>	<p>Jenom náznaky zvířetníkového světla jsou vidět za nejlepších jarních a podzimních nocí. Mléčná dráha je velmi slabá či úplně neviditelná poblíž obzoru a i vysoko nad hlavou se zdá vybledlá. Zdroje umělého světla jsou viditelné ve většině směrů a na většině míst oblohy se mraky jeví znatelně světlejší než samotné nebe.</p>
4	<p>Venkovská/příměstská obloha</p> <p>MHV: 6 – 6.5 mag Jas oblohy: ~ 21.3 mag/arcsec²</p>	<p>Nápadné "čepice" světelného znečištění jsou vidět nad sídly v mnoha směrech. Zvířetníkové světlo je zřetelné, ale za soumraku či úsvitu nedosahuje ani poloviny cesty od horizontu k zenitu. Mléčná dráha vysoko nad obzorem je působivá, ale kromě nejvýraznější struktury postrádá detaily. M33 je obtížně viditelná bočním pohledem a jen pokud je výše než 50 stupňů nad obzorem. Mraky ve směrech zdrojů světla jsou nasvícené, ale jen mírně a přímo nad hlavou zůstávají tmavé. Váš dalekohled je i z dálky viditelný.</p>
3	<p>Venkovská obloha</p> <p>MHV: 6.5 – 7 mag Jas oblohy: ~ 21.5 mag/arcsec²</p>	<p>Známky světelného znečištění jsou viditelné podél obzoru. Mraky mohou být slabě nasvícené nad nejjasnějšími místy u horizontu, ale nad hlavou jsou tmavé. Mléčná dráha je bohatá a strukturovaná a kulové hvězdokupy jako M4, M5, M15 a M22 jsou</p>

všechny zřetelně viditelné pouhým okem. M33 je snadno viditelná bočním pohledem. Zvířetníkové světlo je velmi výrazné na jaře a na podzim, kdy po soumraku a před úsvitem dosahuje do výšky 60 stupňů nad obzor a může být slabě patrná i jeho barva. Váš dalekohled je z deseti metrů sotva vidět.

2 Skutečně tmavá obloha

MHV: 7 – 7.5 mag
Jas oblohy: ~ 21.6 mag/ arcsec²

Airglow (velmi slabé, přirozené záření svrchních vrstev naší atmosféry) může být slabě patrné podél obzoru a M33 je nápadná a snadno viditelná. Letní Mléčná dráha má při pohledu volným okem velmi bohatou strukturu a její nejjasnější části vypadají v obyčejném triedru jako marmor. Zvířetníkové světlo po soumraku a před úsvitem je tak jasné, že může vrhat slabé stíny a jeho barva se může jevit zřetelně žlutější než modrobílá Mléčná dráha. Mraky kdekoliv na obloze vypadají jako černé díry ve hvězdném pozadí. Svůj dalekohled vidíte jenom neurčitě, pokud se nepromítá na pozadí oblohy. Mnoho Messierových kulových hvězdokup je zřetelně viditelných pouhým okem.

1 Vynikající skutečně tmavá obloha

MHV: > 7.5 mag
Jas oblohy: > 21.7 mag/ arcsec²

Zvířetníkové světlo, protisvit a zodiakální pás jsou viditelné. Zvířetníkové světlo „bije“ do očí a zodiakální pás se táhne přes celou oblohu. M33 je velmi nápadná a může být viditelná i přímým pohledem. Mléčná dráha v oblasti Štíra a Střelce je tak jasná, že na zem vrhá zřetelné mlhavé stíny. MHV volným okem se pohybuje až mezi 7,5 – 8 mag (!), přítomnost Jupitera a Venuše na obloze může působit rušivě. *Airglow* je zřetelné podél horizontu. Tohle je pro pozorovatele skutečná Nirvána!