

MASARYKOVA UNIVERZITA
Přírodovědecká fakulta

REKONSTRUKCE BAREV Z ČERNOBÍLÝCH
ASTRONOMICKÝCH SNÍMKŮ

Bakalářská práce

Jan Skalický

Brno 2006

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně s použitím literatury uvedené v závěru.

Jan Skalický
V Brně 22. května 2006

Chtěl bych poděkovat vedoucímu své bakalářské práce Mgr. Filipu Hrochovi, PhD. za neúnavnou pomoc při práci na tomto projektu a konzultaci všech problémů.

Obsah

Úvod	6
1 Barvy v astronomii, lidské oko, zobrazování pomocí CCD	7
1.1 Záření a barvy v astronomii	7
1.2 Oko, fyziologie vidění	9
1.3 Principy zobrazování CCD technikou	11
1.4 Použitá pozorovací technika, filtry	13
2 Příprava snímků v jednotlivých filtrech	14
2.1 Prostředí IRAF, CL skripty	14
2.2 Zpracování snímků ve filtru R	14
2.2.1 Dark frame	15
2.2.2 Flat field	15
2.2.3 Odstranění gradientu jasu pozadí	16
2.2.4 Skládání snímků	17
2.2.5 Vyjímky	18
3 Rekonstrukce barev, barevná syntéza	19
3.1 Teorie	19
3.1.1 Výstupní signál detektoru	19
3.1.2 White balancing	20
3.1.3 Aplikace na snímek objektu	21
3.1.4 Atmosférická extinkce	21
3.1.5 Barevná syntéza	22
3.2 Barevný snímek M27	23
3.2.1 Měření kalibračních hvězd	23
3.2.2 Určení vah filtrů	23
3.2.3 Příprava jednotlivých barevných kanálů	24
3.2.4 Vytvoření barevného obrázku	25
Závěr	27

Literatura	28
4 Přílohy	30
4.1 Použité kalibrační hvězdy	30
4.2 Měření kalibračních hvězd	31
4.3 Snímky v jednotlivých fázích zpracování	33
4.4 Zdrojové kódy CL skriptů	35

Typografická poznámka

V textu je použito několika druhů zvýraznění. Následuje jejich přehled

- *masterdark* - klíčová slova jsou vyznačena kurzívou a to pouze při svém prvním použití
- `remove_bg.c1` - strojopisem názvy skriptů, rutin, programů
- `http://www.astro.cz/~skalicky` - strojopisem také webové odkazy
- IMARITH - moduly systému IRAF, tzv. tasky, kapitálkami
- **m27_01R.fits** - polotučně názvy souborů

Úvod

Stejně jako další věci, které nás obklopují, nejsou astronomické objekty černobílé. Jejich světlo je jenom natolik slabé, že nedokáže podráždit světločivné buňky na sítnici našeho oka citlivé na barvy, a tak se nám černobílé zdají. Ale moderní CCD technika dokázala tuto bariéru překonat a my máme možnost spatřit vesmír v jeho plné kráse - barevný. Nicméně snímky, které se běžně pořizují jsou monochromatické. Jsou ale exponovány v ohraničených intervalech vlnových délek prostřednictvím barevných filtrů, takže pomocí jejich kombinace můžeme informaci o barvě objektu zpětně rekonstruovat.

Barevný „pohled na věc“ přináší oproti černobílému několik výhod. Mámeli informace z několika filtrů dohromady v jednom snímku, můžeme si lépe udělat představu o tom, odkud k nám přichází záření různých vlnových délek i o procesech, při kterých vzniká. Umožní tak snazší pochopení morfologie studovaného objektu. A v neposlední řadě mají barevné snímky vyšší estetickou hodnotu než černobílé, což se dá využít při popularizaci astronomie (press-release, APOD¹ a další). Cílem této práce je ukázat a realizovat postup, jakým se dá tato barevná rekonstrukce provést.

¹Astronomical Picture of the Day (<http://antwrp.gsfc.nasa.gov/apod/>), Astronomický snímek dne (<http://www.astro.cz/apod/>)

Kapitola 1

Barvy v astronomii, lidské oko, zobrazování pomocí CCD

1.1 Záření a barvy v astronomii

Všechny objekty vzdáleného vesmíru jsou od nás natolik daleko, že jediný způsob, jak se dozvědět něco o jejich stavbě a vývoji, je zkoumat informace, které nám přináší jejich světlo. Můžeme měřit jeho intenzitu, nebo ho rozložit na spektrum a zjišťovat kolik fotonů jednotlivých vlnových délek k nám přichází. To nám umožní zjistit, jakým způsobem záření v daném objektu vzniklo. Je zřejmé, že rozložení energie napříč spektrem určuje, jakou barvu bude daný objekt mít. V praxi se setkáváme s několika mechanismy vzniku záření.

Záření tepelného původu – S tímto mechanismem se v astrofyzice setkáváme velmi často. Pokud zahřejeme dostatečně hustý (aby mohlo docházet k interakci pomocí srážek) materiál na teplotu vyšší než absolutní nula, pak bude emitovat záření. To lze popsat modelem absolutně černého tělesa, tj. Planckovým zákonem. Pro tok záření $B_\nu(T)$ platí vztah

$$B_\nu(T) = 2\pi \frac{\nu^2}{c^2} \frac{h\nu}{e^{h\nu/kT} - 1}$$

Ve vztahu (1.1) je T termodynamická teplota, ν frekvence, c rychlost světla ve vakuu, h Planckova a k Boltzmanova konstanta. Rozložení energie ve spektru závisí tedy pouze na teplotě vyzařujícího objektu. Pomocí tohoto modelu lze přibližně popsat záření hvězd. V jejich spektrech pozorujeme sice také absorpční čáry, ale ty jejich celkový charakter nezmění. Celkové množství vyzářené energie roste s teplotou.

Chladné hvězdy mají maximum vyzařování v oblasti delších vlnových délek, horké hvězdy naopak vyzařují nejvíce na krátkých vlnových délkách. Podobná, spojitě probíhající spektra mají i galaxie, protože dominantními zdroji jejich záření jsou právě hvězdy, nebo mezihvězdný prach a plyn zářící odraženým světlem blízkých hvězd.

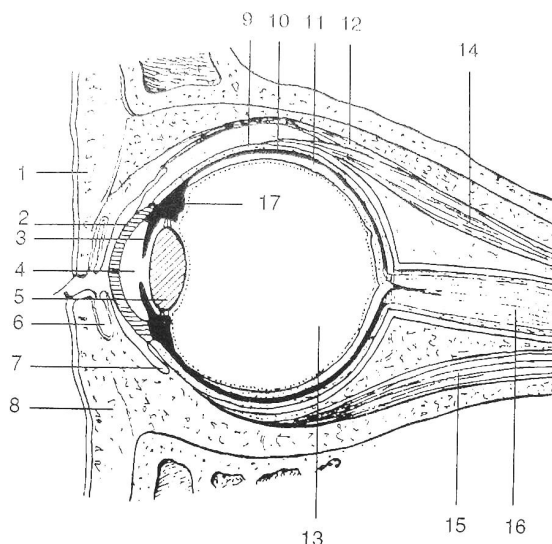
Rekombinace, deexcitace, fluorescence – Velké oblasti mezihvězdného plynu jsou často místem, kde probíhá intenzivní vznik nových hvězd. Ultrafialové záření těchto horkých mladých hvězd ionizuje okolní plyn (jde převážně o vodík, proto se tyto oblasti označují H II) a při rekombinaci těchto atomů jsou emitovány fotony různých vlnových délek. Přechody přímo do základního stavu jsou velmi málo pravděpodobné. Probíhá ale rekombinace pomocí přechodů z vyšších hladin na nižší. Ve spektru můžeme pozorovat celé série spektrálních čar. Ve viditelné oblasti se nachází Balmerova série, která dominuje ve spektrech těchto objektů (nejintenzivnější je čára $H\alpha$, která způsobuje charakteristickou červenou barvu H II oblastí). Balmerova série vzniká při přechodech elektronů z vyšších energetických hladin na hladinu druhou. Někdy také dochází ke kaskádovité deexcitaci, kdy je při každém přechodu elektronu na hladinu s nižší energií vyzářeno kvantum světla. Tomuto jevu se říká fluorescence.

Zakázané přechody – U některých druhů objektů (zejména u planetárních mlhovin) pozorujeme kromě výše popsáných emisních čar ještě tzv. zakázané čáry. Ty mohou vzniknout ve zředěném plynu, když jsou atomy excitovány srážkami s volnými elektrony. V těchto případech obsadí elektrony v obalu metastabilní stavy, na kterých mohou setrvat velmi dlouho. Přechod zpět na základní hladinu je velice nepravděpodobný (došlo by k porušení výběrových kvantových pravidel). Díky nízké koncentraci částic ale téměř nedochází k dalším srážkám, a tento zakázaný přechod se může realizovat.

Synchrotronová emise – S tímto mechanismem vzniku záření se setkáváme u objektů s výrazným magnetickým polem. Pokud se v takovém poli pohybují elektrony, pak je jejich dráha stáčena podél magnetických siločar Lorentzovou silou. Trajektorie těchto elektronů jsou šroubovice. Protože se jedná o zrychlený pohyb, musí při něm být emitovány fotony. V případě elektronů s malými rychlostmi vzniká monochromatické cyklotronové záření a elektrony pohybující se rychlostí blízkou rychlosti světla emitují spojitě rozdělené (v důsledku teorie relativity) záření synchrotronové.

1.2 Oko, fyziologie vidění

Abychom byli schopni pochopit vnímání barev, je nejdříve nutné popsat si alespoň zhruba stavbu lidského oka.

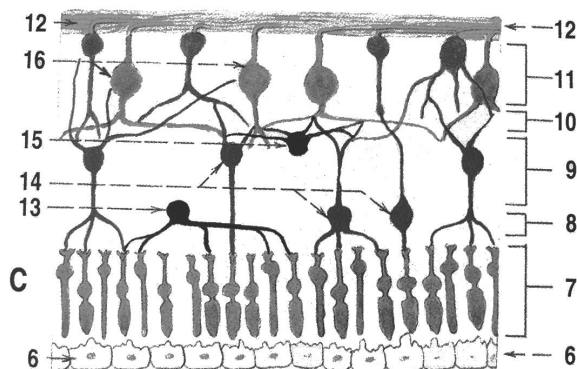


Obrázek 1.1: Stavba lidského oka (převzato z [12])

Jak je ukázáno na obr. 1.1, světlo vstupuje do oka přes rohovku-2 (*cornea*) a čočku-5 (*lens*). Před čočkou leží ještě duhovka-3 (*iris*), jejímž středovým otvorem, zornicí-4 (*pupilla*), prochází světlo k čočce. Duhovka dělí přední prostor oka na přední a zadní oční komoru. Na duhovku naléhá řasnaté těleso-17 (*corpus ciliare*). To produkuje komorovou tekutinu a na jeho výběžky se upíná čočka. Na povrchu oční koule (*bulbus oculi*) najdeme ještě cévnatku-10 (*choroidea*) a bělimu-9 (*sclera*), na níž se upínají okohybné svaly. Bělma a rohovka tvoří dohromady vazivovou vnější vrstvu oka a cévnatka, řasnaté těleso, duhovka a zornice cévnatou střední vrstvu oka. Uvnitř oční koule najdeme sklivec-13 (*corpus vitreum*) vyplňující zadní nitrooční prostor, již zmíněnou čočku a komorový mok (*humor aqueus*), který vyplňuje prostor před čočkou a duhovkou a mezi nimi.

Pro nás je ale zdaleka nejzajímavější nervová vnitřní část oka, sítnice-11 (*retina*), která zprostředkovává zrakový vjem (obrázek 1.2). Obsahuje světločivné a nervové buňky, které jsou uspořádané ve vrstvách. Nejbliže k vnějšímu povrchu oka leží vrstva světločivných buněk, která naléhá na pigmentový epitel (který tyto buňky vyživuje a zprostředkovává pro ně transport kyslíku).

Světločivné buňky jsou tzv. *první neurony sítnice*. Následují bipolární nervové buňky (*druhé neurony sítnice*) a nejbliže nitroočnímu povrchu sítnice nalezneme vrstvu gangliových buněk (*třetí neurony sítnice*), jejichž neurity se po nitroočním povrchu sítnice sbíhají do optického nervu.

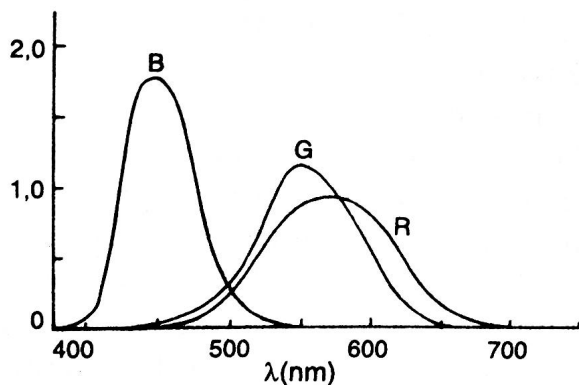


Obrázek 1.2: Jednotlivé vrstvy sítnice; 7-první neurony sítnice, 9-druhé neurony sítnice, 11-třetí neurony sítnice (převzato z [11], zjednodušený popis)

Na sítnici najdeme dva druhy buněk citlivých na světlo. Jsou to tyčinky, jejichž počet je cca. 120 milionů, a čípky, kterých je přibližně 6 až 7 milionů. Celkový počet receptorů je tedy okolo 126 milionů, ale vláken, ze kterých se skládá optický nerv vedoucí do mozku, je jen 100 milionů. Je tedy jasné, že informace z některých receptorů je již v sítnici předzpracována. Jen část čípků hlavně v blízkosti žluté skvrny (viz dále) je propojena s mozkem v poměru 1:1. Fakt, že v sítnici probíhá zpracování části nervových vzruchů, není až tak překvapující, když si uvědomíme, že sítnice není jen jednoduchý periferní smyslový orgán, ale přímo součástí centrálního nervstva (během embryonálního vývoje vzniká vychlípěním části mozkové tkáně).

Tyčinky obsahující barvivo purpur (*rhodopsin*) jsou citlivé už na malé podráždění, ale dokážou zprostředkovat jen černobílý vjem. Uplatňují se v noci při malých intenzitách osvětlení. Při větším podráždění jsou vyřazeny z provozu a jejich funkci přebírají čípky reagující až na větší intenzitu světla. Jejich nejvyšší koncentrace je ve žluté skvrně, kam míří i zorná osa oka. S rostoucí vzdáleností od ní jejich počet klesá. Žlutá skvrna umožňuje nejostřejší vidění. Na sítnici je ještě jedno specifické místo, a to vývod zrakového nervu. Je to tzv. slepá skvrna a jak už naznačuje název, buněk citlivých na světlo je zde minimum. Ta pro nás ale není důležitá. Barvivo čípků je *iodopsin* a existuje

tuje ve třech odlišných variantách. Každá z nich je citlivá na trochu odlišný rozsah vlnových délek. Složením těchto tří barev vzniká výsledný barevný vjem. Spektrální citlivost jednotlivých variant pigmentu čípků ukazuje graf na obrázku 1.3.



Obrázek 1.3: Spektrální citlivost jednotlivých variant barevného pigmentu čípků (zdroj [13])

Zajímavé je, že toto složení nemusí být vždy nutně součet, protože existují barvy, které lineární kombinací tří základních barev s kladnými koeficienty nezískáme. Problematika fyziologie barevného vidění je velmi zajímavá, ale přesahuje bohužel rámec této práce.

1.3 Principy zobrazování CCD technikou

Zkratka CCD (Charge-Coupled Devices) nese označení pro detekční zařízení, se kterými se dnes setkáváme na každém kroku. Pro účely záznamu obrazu v astronomii se používají zhruba od 70. let minulého století. Díky svým vlastnostem se k tomuto účelu velice hodí a v současnosti lepší detektory neexistují.

Pokud se podíváme do útrobu CCD kamery, dostaneme se k jejímu jádru – snímacímu čipu. Ten je tvořen křemíkovou destičkou s tenkou vrstvou SiO_2 , na níž nasedají elektrody. Ty mají pravoúhlý tvar a jsou uspořádány do matice. Na začátku expozice je na všechny tyto prvky přiveden kladný náboj. V okolí každé elektrody se v křemíkovém podkladu vytvoří potenciálové jámy. Při dopadu dostatečně energetického fotonu (rozdíl mezi valenčním a vodivostním pásem Si je 1,1 eV) dojde k uvolnění elektronu. Čím více

fotonů na detektor dopadne, tím více elektronů se uvolní. Jejich počet ale nesmí být tak velký, aby jejich celkový náboj překonal potenciálovou bariéru vytvořenou kladným elektrickým polem. Po ukončení expozice je změřen náboj jednotlivých prvků a převeden na elektronický signál v jednotkách ADU (Analog to Digital Unit).

CCD Čip zaznamenává fotony s energiemi od 1,1 eV (cca. 1100 nm). Omezení v krátkovlnné oblasti je přibližně 950 nm a je dáno tím, že se od povrchu křemíku začne záření kratších vlnových délek účinně odrážet.

Výstupní signál, který měříme, je souhrnem několika efektů, které je nutné vzít při zpracování v potaz.

Signál zdroje – Určit tok záření pozorovaného objektu je cílem celého procesu analýzy snímku. Můžeme ho měřit nepřímo pomocí měření signálu ze zdroje detekovaného za určitou integrační dobu. Nejdříve ale musíme odstranit ostatní vlivy a zdroje šumu.

Bias – CCD kamery bývají nastavené tak, aby dávaly nenulový výstup i v případě, že čip žádný foton nezachytí. To zabraňuje případné podtečení signálu (záporná hodnota na výstupu), které by mohlo vzniknout v důsledku digitalizace nulového signálu.

Temný proud – V polovodičovém křemíkovém substrátu se vlivem tepelného pohybu samovolně generují páry elektron-díra. Jejich počet je přímo úměrný integrační době detektoru. K redukci tohoto jevu se CCD kamery chladí na nízkou teplotu. Úplně se temný proud sice odstranit nepodaří, ale počítá se s ním v průběhu dalšího zpracování (viz 2.2.1).

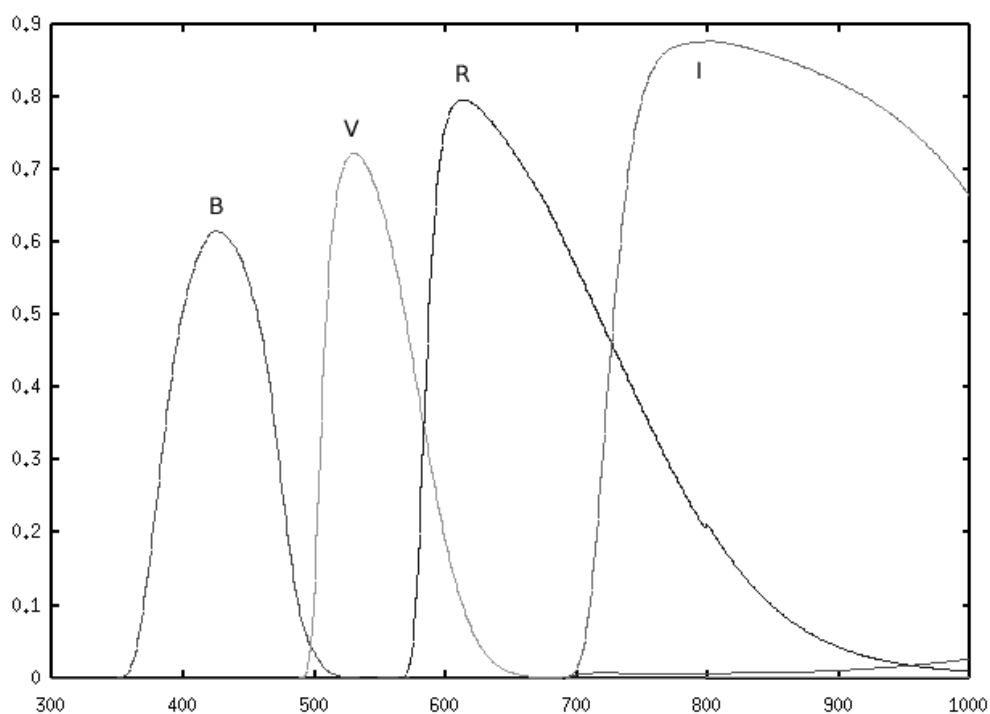
Vyčítací šum – Jde o chyby které vznikají při přesunu signálu mezi pixely během jeho čtení a šum, spojený s předáváním náboje jednotlivých pixelů do zesilovače před digitalizací výstupu.

Digitalizační šum – Tento šum vzniká jako důsledek převodu elektrického signálu do digitální podoby.

Rozdílná citlivost pixelů – Ačkoliv jsou na uniformitu pixelů CCD kamer používaných v astronomii kladeny velké nároky, nikdy se nepodaří vyrobit čip, jehož pixely by měly identickou citlivost. Je proto nutné informaci z každého pixelu korigovat podle jeho citlivosti (odkazují na 2.2.2).

1.4 Použitá pozorovací technika, filtry

Všechna pozorování uvedená v práci jsem provedl na univerzitní pozorovatelně na MonteBoo pomocí 62-cm reflektoru s ohniskovou vzdáleností 2,78 m. Dalekohled je osazen CCD kamerou SBIG ST-8 (čip KAF-1600). Rozměr zorného pole je $17,0' \times 11,3'$ a rozlišení $0,68''$ na pixel.



Obrázek 1.4: Spektrální citlivost použitých filtrů (zdroj [16])

Kamera je vybavena systémem barevných filtrů B, V, R, I (Kron-Cousins) vyrobených v optické vývojové dílně AV ČR. Křivky jejich spektrální citlivosti jsou na obrázku 1.4. Podrobný popis filtrů najdete v [16].

Kapitola 2

Příprava snímků v jednotlivých filtrech

2.1 Prostředí IRAF, CL skripty

Pro práci s pořízenými daty jsem zvolil prostředí IRAF¹. To nabízí širokou škálu nástrojů pro analýzu a zpracování snímků, úplnou uživatelskou kontrolu nad činností jednotlivých procedur a dobře fungující skriptovací jazyk CL (Command Language). Systém IRAF používá většina profesionálních astronomických pracovišť na celém světě včetně Astronomického ústavu Akademie věd České republiky a Ústavu teoretické fyziky a astrofyziky MU v Brně.

Právě možnost skriptování je velkou výhodou, protože jsem často zpracovával desítky snímků. Podrobné informace o jazyce CL a jeho konstrukcích jsou uvedeny v literatuře ([3], [4], [5], [6], [7]). Všechny použité skripty jsou součástí přílohy.

2.2 Zpracování snímků ve filtru R

Jako referenční snímky pro vysvětlení postupu zpracování jsem vybral expozice planetární mlhoviny M 27 Činka v souhvězdí Lištičky (filtr R). Ty jsme pořídili s F. Hrochem na observatoři MonteBoo 19. 10. 2005. Rozměry snímků jsou 510x340 pixelů.

¹Interactive Reduction and Analysis Facility (<http://iraf.noao.edu/>)

2.2.1 Dark frame

První krok při zpracování CCD snímku je korekce na temný proud. Ačkoliv je CCD čip chlazen na nízkou teplotu, tak se nepodaří úplně eliminovat termální šum a tedy i termální emisi elektronů uvnitř čipu. Ta je lineárně závislá na integračním čase detektoru. Pro každou použitou expoziční dobu se proto během pozorovací noci pořídí také několik *darkframe* snímků, čili snímků bez otevření závěrky. Z nich se potom vytvoří aritmetický průměr, tzv. *masterdark* a ten se odečte od každého snímku. Tím se tepelný šum odstraní. Tento postup výpočtu *masterdark* snímku ovšem není příliš robustní. V případě, že na čip během expozice temných snímků dopadne částice kosmického záření, může dojít ke zkreslení výsledného průměru. Hodí se tedy použít i jiné, robustnější metody (medián, a další viz [10]).

Program *mdark*, který je nainstalovaný na univerzitní observatoři, vytváří z jednotlivých *darkframů* *masterdark* a *darkbat* pak provede jeho odečtení od vědeckých snímků. Další možností je použití dvou skriptů, které jsem napsal k tomuto účelu. První z nich *master_dark.cl* generuje *masterdark* snímek z jednotlivých *darkframů* (aritmetickým průměrem). Skript *dark_flat.cl* pak *masterdark* odečítá a provádí i následující korekci – *flat field*.

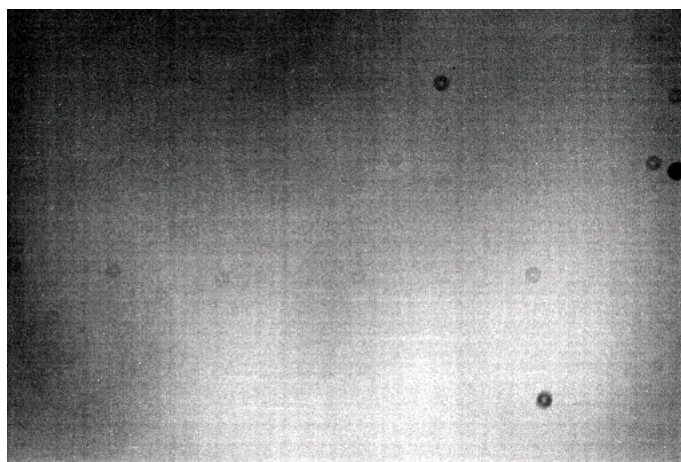


Obrázek 2.1: *Masterdark* snímek, expozice 60s (zobrazeno inverzně)

2.2.2 Flat field

Cílem tohoto procesu je eliminovat důsledky rozdílů v citlivostech jednotlivých pixelů snímacího čipu. V každém filtru se pořídí několik snímků rovno-

měrně osvětlené plochy. Nejčastěji se za tímto účelem používá obloha před svítáním nebo za soumraku. Další možností je bílý papír osvětlený rozptýleným světlem. Z těchto snímků se pak vytvoří *masterflat* snímek (program *aflat*, odkazují opět na [10]). Tím se pak každý snímek podělí. To obstarává rutina *flatbat* na počítači v univerzitní pozorovatelně. Flat field korekci zajistí i zmíněný skript *dark_flat.c1*. Flat fieldy je nutné pořizovat nejméně jednou za měsíc a při každé manipulaci s CCD kamerou.



Obrázek 2.2: *Masterflat* pro filtr R

2.2.3 Odstranění gradientu jasu pozadí

Po těchto základních korekcích můžeme začít se snímkem pracovat. V důsledku světelného znečištění a případného svitu Měsíce nemusí být pozadí snímku zcela tmavé (obrázek 4.1). Lze na něm vypořádat nerovnoměrně rozložený jas. Ten je potřeba odstranit, aby vynikly jemné detaily struktury slabých objektů. Pro další zpracování potřebujeme, aby pozadí snímku bylo konstantní.

Odstranění těchto gradientů provádí skript *remove.bg.c1*. Ten pro snímky vytvoří mapu pozadí. Každý pixel nahradí mediánem (což je dostatečně robustní metoda) z pixelů v jeho okolí definovaném clonkou. Ta může mít buď pravoúhlý nebo kruhový (eliptický) tvar a libovolnou velikost. Kruhová clonka není příliš vhodná z důvodu časté kruhové (nebo obecně centrální) symetrie objektů na snímku, které v ideálním případě nesmí ovlivnit výslednou

hodnotu mediánu, čili pixelu na mapě pozadí. Proto musíme také vhodně zvolit velikost clonky (která bude obecně jiná pro různé objekty). Při zpracování ukázkových snímků jsem zvolil velikost mediánové clonky 251x251 pixelů.

Následuje vydělení každého snímku mapou jeho pozadí. Hodnoty pixelů pak skript přeškáluje podle děleného snímku. Jako vstup pro tento skript jsou vědecké snímky (např. **m27_01R.fits**) a jejich seznam, soubor **list**. Na výstupu pak dvojice souborů - mapa pozadí **bg_m27_01R.fits** a korigovaný snímek **bgc_m27_01R.fits**. Snímek po vyrovnání pozadí je na obrázku 4.2.



Obrázek 2.3: Mapa pozadí

2.2.4 Skládání snímků

Dalším krokem při práci se snímky je jejich složení. Protože šum v datech má náhodné rozložení, tak po složení více snímků dojde k jeho vyhlazení. Na výsledné expozici pak vyniknou i detaily, které byly v dílčích expozicích ztraceny v šumu. Zároveň pozadí je na složeném snímku rovnoměrné. Složené snímky v jednotlivých filtrech jsou pak vstupem pro přípravu barevného snímku.

Jednotlivé snímky ale není možné složit bez úpravy. Nejdříve je nutné zjistit posuny jednotlivých snímků vůči referenčnímu a o ty je pak opravit (tzv. registrace). Registraci snímků se věnuje [8]. IRAF pro tento účel nabízí task XREGISTER. Proces zjištění offsetů, jejich výpis i posunutí provádí skript **reg.c1**. Používá korelace snímku (I) s referenčním (R) pomocí konvoluce. Hledá extrém funkce X pro zvolený interval možných posunů Δ_i, Δ_j

v osách x a y .

$$X = \frac{\sum_{i=1}^{N_x} \sum_{j=1}^{N_y} (I_{i+\Delta i, j+\Delta j} - \bar{I}) \cdot (R_{i,j} - \bar{R})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{N_x} \sum_{j=1}^{N_y} (I_{i+\Delta i, j+\Delta j} - \bar{I})^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^{N_x} \sum_{j=1}^{N_y} (R_{i,j} - \bar{R})^2}}$$

kde

$$\bar{I} = \sum_{i=1}^{N_x} \sum_{j=1}^{N_y} \frac{I_{i+\Delta i, j+\Delta j}}{N_x \cdot N_y}$$

$$\bar{R} = \sum_{i=1}^{N_x} \sum_{j=1}^{N_y} \frac{R_{i,j}}{N_x \cdot N_y}$$

Korelaci provádí skript na definované oblasti snímku o rozměrech N_x, N_y . V případě, že je oblastí více (tato možnost existuje), tak výsledné posuny jsou aritmetickým průměrem posunů v jednotlivých oblastech. Na vstupu čte skript seznam snímků pro registraci **list** (ten je nutné vytvořit znovu, protože v některých případech se neprovádí vyhlazení pozadí). První položka v seznamu slouží jako referenční snímek a na jeho výstupu najdeme opět dva soubory a to textový soubor **shift_bgc_m27_01R.fits.txt** a posunutý snímek **xreg_bgc_m27_01R.fits**.

Vlastní složení expozic obstará **combine_r.cl** pracující s již existujícím seznamem, jehož výsledkem je součet (přesněji aritmetický průměr) **sumR.fits**.

2.2.5 Vyjímky

Použitá CCD kamera je v modré oblasti velmi málo citlivá. Snímky ve filtru B jsou tedy velmi zašuměné. V jejich případě jsem vynechal odstranění gradientu jasu pozadí, protože nepřinášelo žádný užitek. Při použití kamery zcitlivělé v modré oblasti bych volil standardní postup.

Kapitola 3

Rekonstrukce barev, barevná syntéza

3.1 Teorie

Následující výpočetní postup jsem s drobnými úpravami převzal z [1].

3.1.1 Výstupní signál detektoru

Hodnota výstupního signálu z CCD detektoru je dána vztahem

$$S = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} F(\lambda)A(\lambda)T(\lambda)Q(\lambda)gt \, d\lambda \quad (3.1)$$

kde $F(\lambda)$ je světelný tok ze zdroje, $A(\lambda)$ propustnost atmosféry, $T(\lambda)$ propustnost filtru, $Q(\lambda)$ propustnost optiky a účinnost detektoru, g zisk v $e^- \cdot \text{ADU}^{-1}$ a t integrační doba.

Pro potřeby barevné kalibrace je nutné tento vztah zjednodušit a převést do barevného systému RGB, který se snaží napodobit citlivosti pigmentů v oku člověka. V našem případě je rozklad světla do tohoto barevného systému umožněn trojicí filtrů R, V, B. Pokud budeme integrovat vztah (3.1) v rámci každého filtru zvlášť, obdržíme

$$S = F_R T_R A_R Q_R + F_G T_G A_G Q_G + F_B T_B A_B Q_B \quad (3.2)$$

Pro ideální filtry platí následující relace

$$R \begin{cases} T_R = 1 \\ T_G = 0 \\ T_B = 0 \end{cases} \quad G \begin{cases} T_R = 0 \\ T_G = 1 \\ T_B = 0 \end{cases} \quad B \begin{cases} T_R = 0 \\ T_G = 0 \\ T_B = 1 \end{cases}$$

Signál v jednotlivých filtrech pak můžeme přepsat při započítání pozadí oblohy následujícím způsobem

$$\begin{aligned} S_R &= F_R T_R A_R Q_R + B_R \\ S_G &= F_G T_G A_G Q_G + B_G \\ S_B &= F_B T_B A_B Q_B + B_B \end{aligned} \quad (3.3)$$

B_R, B_G, B_B jsou hodnoty pozadí pro jednotlivé filtry. Podařilo se tedy separovat výstupy z jednotlivých filtrů. Dále potřebujeme, aby výstupní signál byl úměrný pouze světelnému toku ze zdroje $S_i = f(F_i)|_{i=R,G,B}$, musíme tedy odstranit ostatní efekty, které ho ovlivňují.

3.1.2 White balancing

Pro nalezení správného vyvážení barev se používá snímkování nějakého referenčního objektu, jehož barvu známe. V astronomii se za standard pro bílou barvu používají hvězdy stejného spektrálního typu jako Slunce, tedy G2V. Proměření světelného toku, který od nich v jednotlivých filtrech detekujeme nám umožní zkalibrovat naši pozorovací soustavu dalekohled-filtry-CCD kamera.

Změříme tedy signál od referenční hvězdy, který k nám v jednotlivých filtrech přichází. K tomu použijeme aperturní fotometrii (implementováno v IRAFu včetně odečtení pozadí, task IMEXAMINE).

$$\begin{aligned} S_{R,G2V} &= F_{R,G2V} A_R T_R Q_R \\ S_{G,G2V} &= F_{G,G2V} A_G T_G Q_G \\ S_{B,G2V} &= F_{B,G2V} A_B T_B Q_B \end{aligned} \quad (3.4)$$

Dále určíme, ve kterém filtru je signál maximální

$$S_{MAX} = \max \begin{cases} S_{R,G2V} \\ S_{G,G2V} \\ S_{B,G2V} \end{cases} \quad (3.5)$$

a definujeme váhy jednotlivých filtrů

$$\begin{aligned} W_R &= \frac{S_{R,G2V}}{S_{MAX}} \\ W_G &= \frac{S_{G,G2V}}{S_{MAX}} \\ W_B &= \frac{S_{B,G2V}}{S_{MAX}} \end{aligned} \quad (3.6)$$

3.1.3 Aplikace na snímek objektu

Teď se můžeme pustit do zpracování snímku pozorovaného objektu. Předpokládám je, že máme data opět ve filtrech R, G, B, tj. hodnoty S_R , S_G , S_B . Tyto hodnoty opravíme pomocí vah jednotlivých filtrů

$$\begin{aligned} S'_R &= \frac{S_R}{W_R} \\ S'_G &= \frac{S_G}{W_G} \\ S'_B &= \frac{S_B}{W_B} \end{aligned} \quad (3.7)$$

Snímky jsou teď připravené pro vlastní barevnou syntézu.

3.1.4 Atmosférická extinkce

V postupu uvedeném výše není zahrnuta korekce na barevnou extinkci. Ta má na svědomí zeslabení světla, které k nám přichází od zdroje v důsledku jeho průchodu zemskou atmosférou. Čím je objekt níž nad obzorem (tj. s rostoucí zenitovou vzdáleností), tím tlustší vzdušnou hmotou musí světlo projít a tím více je tedy pohlceno. To by samo o sobě nevadilo, kdyby bylo záření všech vlnových délek pohlcováno stejně. Extinkce pro jednotlivé barvy liší. Rozdíly ale nejsou velké, proto není nezbytně nutné tento efekt vzít do úvahy.

Extinkce se projevuje při pozorování kalibračních hvězd a tedy i při určení vah jednotlivých filtrů. Od hodnot signálu $S_{R,G2V}$, $S_{G,G2V}$, $S_{B,G2V}$ přejdeme k hodnotám $S'_{R,G2V}$, $S'_{G,G2V}$, $S'_{B,G2V}$

$$\left. \begin{array}{l} S_{R,G2V} \\ S_{G,G2V} \\ S_{B,G2V} \end{array} \right\} \implies \left\{ \begin{array}{l} S'_{R,G2V} = S_{R,G2V}/A_R \\ S'_{G,G2V} = S_{G,G2V}/A_G \\ S'_{B,G2V} = S_{B,G2V}/A_B \end{array} \right. \quad (3.8)$$

Členy A_R , A_G , A_B v rovnicích (3.8) opravují vliv atmosférické extinkce ve filtrech R, G, B

$$\begin{aligned} A_R &= 10^{-0,4k_R(\sec Z_{G2V}-1)} \\ A_G &= 10^{-0,4k_G(\sec Z_{G2V}-1)} \\ A_B &= 10^{-0,4k_B(\sec Z_{G2V}-1)} \end{aligned} \quad (3.9)$$

kde k_R , k_G , k_B jsou extinkční koeficienty (pro ně můžeme použít přibližné hodnoty pro dané pozorovací stanoviště) a Z_{G2V} zenitová vzdálenost kalibrační hvězdy v čase pozorování. Další postup je shodný s postupem uvedeným

v předchozí části.

Atmosférická extinkce se samozřejmě projeví i při pořizování vědeckých snímků. I zde je nutné její zeslabení vzít v potaz. Rovnice (3.7) se se změní tak, že kromě vah filtrů se v nich objeví i extinkční členy A_R , A_G , A_B .

$$\begin{aligned} S'_R &= \frac{S_R}{A_R W_R} \\ S'_G &= \frac{S_G}{A_G W_G} \\ S'_B &= \frac{S_B}{A_B W_B} \end{aligned} \quad (3.10)$$

V následujících vztazích je Z zenitová vzdálenost objektu v době pořízení snímků.

$$\begin{aligned} A_R &= 10^{-0,4k_R(\sec Z-1)} \\ A_G &= 10^{-0,4k_G(\sec Z-1)} \\ A_B &= 10^{-0,4k_B(\sec Z-1)} \end{aligned} \quad (3.11)$$

3.1.5 Barevná syntéza

Nyní se můžeme pustit do vlastního skládání barev. Pro každý filtr vytvoříme 8-bitový barevný kanál tak, že hodnota jeho pixelů bude ležet v intervalu $[0, 255]$.

$$\left. \begin{array}{l} S'_{R,SKY} \\ S'_{G,SKY} \\ S'_{B,SKY} \end{array} \right\} \text{ hodnoty pozadí korigovaných snímků}$$

$$\left. \begin{array}{l} S'_{R,MAX} \\ S'_{G,MAX} \\ S'_{B,MAX} \end{array} \right\} \text{ hodnoty nejjasnějšího pixelu}$$

Nyní určíme nejvyšší rozsah maximum-pozadí

$$R_{RGB} = \max \left\{ \begin{array}{l} S'_{R,MAX} - S'_{R,SKY} \\ S'_{G,MAX} - S'_{G,SKY} \\ S'_{B,MAX} - S'_{B,SKY} \end{array} \right. \quad (3.12)$$

A vytvoříme jednotlivé barevné kanály

$$\begin{aligned}
D_R &= 255 \left(\frac{S'_R - S'_{R,SKY}}{R_{RGB} - S'_{R,SKY}} \right)^{1/\gamma} \\
D_G &= 255 \left(\frac{S'_G - S'_{G,SKY}}{R_{RGB} - S'_{G,SKY}} \right)^{1/\gamma} \\
D_B &= 255 \left(\frac{S'_B - S'_{B,SKY}}{R_{RGB} - S'_{B,SKY}} \right)^{1/\gamma}
\end{aligned} \tag{3.13}$$

Musíme ještě ošetřit případy, kdy je čítenel výrazů záporný, tím, že ho položíme roven nule

$$\begin{aligned}
S'_R - S'_{R,SKY} < 0 &\Rightarrow S'_R - S'_{R,SKY} \equiv 0 \\
S'_G - S'_{G,SKY} < 0 &\Rightarrow S'_G - S'_{G,SKY} \equiv 0 \\
S'_B - S'_{B,SKY} < 0 &\Rightarrow S'_B - S'_{B,SKY} \equiv 0
\end{aligned} \tag{3.14}$$

Konstanta γ popisuje nelineární vztah mezi hodnotou pixelu odeslanou na zobrazovací zařízení a jeho výstupem. Její hodnota pro monitor počítače se volí $\gamma=1,8$.

3.2 Barevný snímek M27

3.2.1 Měření kalibračních hvězd

Ze seznamu kalibračních hvězd spektrálního typu podobného Slunci (viz [1]) jsem vybral 5 (jsou uvedeny v přílohách) a během dvou nocí (7. března a 19. dubna 2006) pořídil jejich snímky v oborech B, V a R. Celkem jsem získal 96 měření pro určení vah jednotlivých filtrů. Měření toků od kalibračních hvězd v IRAFu obstarává IMEXAMINE, který sčítá hodnoty pixelů v kruhové clonce a automaticky odečítá hodnotu pozadí. Hodnoty naměřených toků jsou shrnuty v tabulkách v sekci Přílohy.

Vliv barevné extinkce je vhodné zanedbat. Hodnoty extinkčních koeficientů pro použitou sadu filtrů přesně neznáme a hlavně jsou rozdílné pro různé pozorovací noci. Dá se rovněž předpokládat, že rozdíly v extinkci pro jednotlivé filtry nebudou hrát významnou roli.

3.2.2 Určení vah filtrů

Pro každé kalibrační pole jsem určil hodnoty vah jednotlivých filtrů a jejich směrodatné odchylky, ze kterých jsem vypočítal jejich statistické váhy. Vý-

sledné hodnoty W_R , W_G , W_B jsou váženým průměrem těchto dílčích hodnot (uvádím i jejich směrodatnou odchylku).

$$W_R=1,000\pm 0,000$$

$$W_G=0,397\pm 0,016$$

$$W_B=0,074\pm 0,018$$

3.2.3 Příprava jednotlivých barevných kanálů

V každém z filtrů R, V, B jsem měl k dispozici snímek M27 složený z 20 dílčích expozic. Nejdříve je nutné tyto tři snímky posunout, aby je bylo možné po úpravách složit. Princip registrace se shoduje s postupem u jednotlivých barev. Pro tento účel slouží skript `reg_sum.c1`. Na jeho vstupu jsou tři snímky a jejich seznam. První položka seznamu je použita jako referenční snímek. Je tedy vhodné, aby to byl snímek ve filtru R, protože je nejméně zašuměný. Z výsledných snímků se potom tvoří jednotlivé barevné kanály. V případě, že by snímky v různých filtrech měly různou expoziční dobu, bylo by nutné je touto dobou vydělit.

První krok je aplikace vztahů (3.7) na jednotlivé snímky. Následuje zjištění hodnot $S'_{R,SKY}$, $S'_{G,SKY}$, $S'_{B,SKY}$ a $S'_{R,MAX}$, $S'_{G,MAX}$, $S'_{B,MAX}$. K tomu je vhodný task `IMSTATISTICS`. Jako pozadí jsem použil vždy hodnotu minimálního pixelu. Tím se rovněž zajistí, že po jeho odečtení nebude výsledná hodnota žádného pixelu záporná, tj.

$$S'_R - S'_{R,SKY} \geq 0$$

$$S'_G - S'_{G,SKY} \geq 0$$

$$S'_B - S'_{B,SKY} \geq 0$$

Další manipulaci se snímky zajišťuje již dříve zmíněný `IMARITH`. Postup sleduje myšlenku nastíněnou v teoretické části. Jedinou výjimkou je absence γ -korekce. Výsledkem jsou tři snímky s hodnotami pixelů v rozmezí $[0, 255]$, které jsou připraveny pro vlastní složení do barevného snímku.

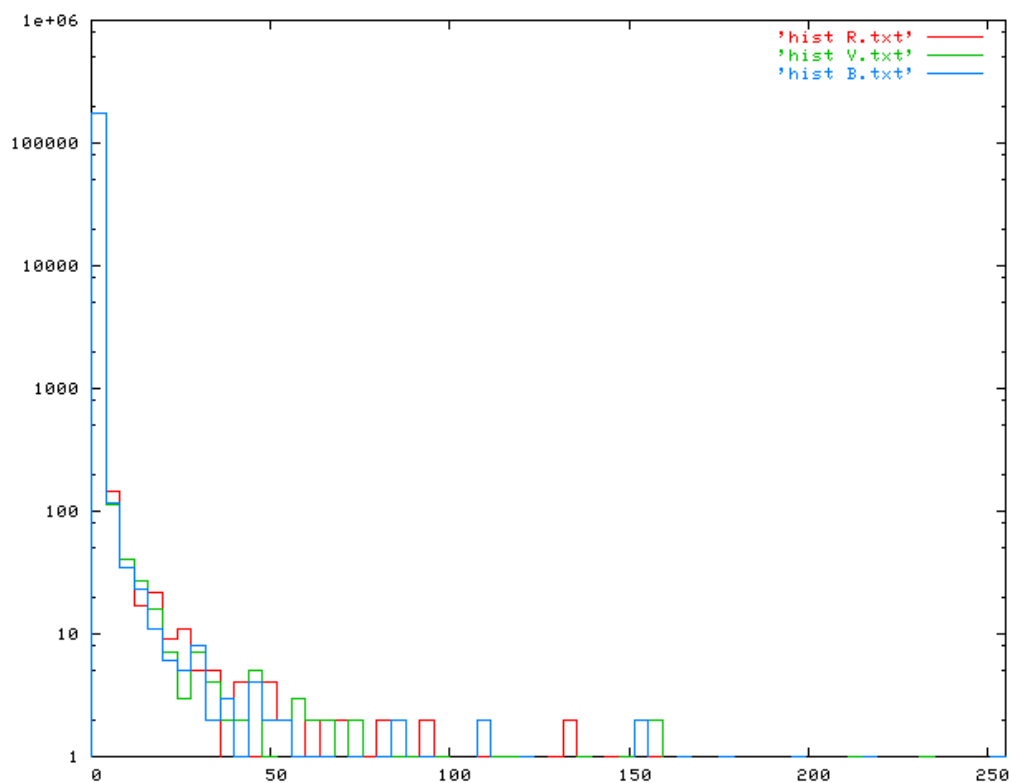
V následující tabulce najdete údaje použité pro výpočet barevných kanálů zjištěné pomocí analýzy snímků v jednotlivých barvách po aplikaci vah filtrů. Hodnota R_{RGB} je maximum rozsahu $MAX - SKY$, v tomto případě tedy 99 500.

Filtr	MAX	$MIN(SKY)$	$MAX - SKY$	$R_{RGB} - SKY$
B	100 791	1 291	99 500	98 209
V	90 830	2 511	88 319	96 989
R	65 684	2 083	63 601	97 417

3.2.4 Vytvoření barevného obrázku

K tomuto finálnímu kroku jsem použil program SAOImage DS9¹. Ten dokáže načíst tři soubory (**R.fits**, **V.fits**, **B.fits**) jako barevné kanály a zobrazit na výstupu v režimu RGB. Výsledek je pak možné exportovat do několika grafických formátů.

Problém ale nastal se škálováním barev. Hodnoty pixelů jednotlivých barevných kanálů sice leží v potřebném intervalu, ale maximálních hodnot dosahují pouze středy nejjasnějších hvězd na snímku. Hodnoty pixelů vlastní mlhoviny jsou mnohem nižší a pohybují se v řádech desetín až jednotek ADU. Situaci dokresluje následující obrázek.



Obrázek 3.1: Histogramy hodnot pixelů pro kanály R, G, B (na ose x je vynesena intenzita, na y logaritmus počtu pixelů)

Je tedy jasné, že při standardním škálování budou na snímku vidět jen nejjasnější hvězdy, zatímco ty slabší a mlhovina, která je hlavním objektem,

¹<http://hea-www.harvard.edu/RD/ds9/>

budou tmavé. Z tohoto důvodu se někdy používá logaritmické zobrazení, nebo se hodnoty pixelů modifikují pomocí jiné funkce (nazývá se *stretch function*, viz např [14]). Tyto postupy jsem ale volit nechtěl. Místo toho jsem využil možnost ručního oškálování barev, které program `SAOImage DS9` také umožňuje. Nejjasnější pixely mlhoviny nepřesahují hodnotu 1,5 ADU (v žádné barvě), proto jsem barevný rozsah nastavil právě mezi hodnoty 0 a 1,5. Jasnější pixely mají tedy na výstupu stejnou hodnotu jako horní limit, tj. 255. Je to vhodný kompromis umožňující kvalitní zobrazení mlhoviny na snímku. Výsledný obrázek (formát PNG) je součástí příloh.

Závěr

V úvodní části práce jsem se věnoval mechanismům vzniku záření a jejich výskytu u jednotlivých druhů vesmírných objektů. Dále jsem popsal princip barevného vidění a způsob detekce záření pomocí CCD techniky.

V praktické části jsem ukázal a realizoval postup (použitelný pro jakoukoliv soustavu dalekohled-CCD-filtry), jakým lze připravit ze snímků ve spektrálních oborech R, V, B barevný obrázek pozorovaného objektu. Implementoval jsem ho pomocí CL skriptů v systému IRAF. Během dvou nocí (7. března, 19. dubna 2006) jsem na observatoři MonteBoo provedl měření na kalibraci barevných filtrů použitého dalekohledu. Funkčnost celého postupu jsem předvedl na snímcích planetární mlhoviny M27 pořízených 19. 10. 2005.

Všechny použité skripty budou k dispozici ke stažení na internetové adrese <http://www.astro.cz/~skalicky/barvy>. Postupně se zde objeví i galerie barevných snímků kosmických objektů a materiály týkající se méj další práce na tomto tématu.

Literatura

- [1] Berry, R., Burnell, J., The Handbook of Astronomical Image Processing, Willmann-Bell, Inc., 2000
- [2] Mikulášek, Z., Krtička, J., Základy fyziky hvězd (skripta), 2005
- [3] Barnes, J., A Beginner's Guide to Using IRAF, 1993
(<http://iraf.noao.edu/iraf/ftp/pub/beguide.ps.Z>)
- [4] Anderson, E., An Introductory Guide to IRAF Scripts, 1989
(<http://iraf.noao.edu/iraf/ftp/iraf/docs/script.ps.Z>)
- [5] Shames, P., Tody, D., A User's Introduction to the IRAF Command Language, 1986
(<http://iraf.noao.edu/iraf/ftp/iraf/docs/cluser.ps.Z>)
- [6] Downey, E., Tody, D., Jacoby, G. H., CL Programmers Manual, 1982
(<http://iraf.noao.edu/iraf/ftp/iraf/docs/clman.ps.Z>)
- [7] Shames, P., Tody, D., Named External Parametes Sets in the CL, 1986
(<http://iraf.noao.edu/iraf/ftp/iraf/docs/pset.ps.Z>)
- [8] Wells, L. A., Rectifying and Registering Images Using Iraf, 1994
(<http://iraf.noao.edu/iraf/ftp/iraf/docs/reg.ps.Z>)
- [9] Wells, L. A., Bell, J. D., Cleaning Images of Bad Pixels and Cosmic Rays Using IRAF, 1994
(<http://iraf.noao.edu/iraf/ftp/iraf/docs/clean.ps.Z>)
- [10] Hroch, F., osobní sdělení, 2006
- [11] Čihák, R., Anatomie 3, Grada Publishing, 2004
- [12] Jelínek, J., Zicháček, V., Biologie pro gymnázia, Olomouc, 2000
- [13] Feynman, R. P., Leighton, R. B., Sands, M., Feynmanovy přednášky z fyziky 1, Fragment, 2000

- [14] Lupton, R., Preparing Red-Green-Blue (RGB) Images from CCD Data, astro-ph/0312483, 2003
- [15] Vanýsek, V., Základy astronomie a astrofyziky, Academia, 1980
- [16] Hornoch, K., Hroch, F., Spektrální charakteristiky filtrů (zpráva pro VOD AV ČR)

Kapitola 4

Přílohy

4.1 Použité kalibrační hvězdy

Tabulka obsahuje hvězdy¹, pomocí kterých jsem prováděl barevnou kalibraci.

Hvězda	α_{2000}	δ_{2000}	m_v	Spektrum	Souhv.
Rubin 149B	07 24 18	-00 33 07	12,64	G	CMi
SA 101-329	09 56 19	-00 26 28	11,99	G7	Sex
SA 102-1081	10 57 04	-00 13 12	9,90	G5	Leo
SA 102-370	10 56 34	-01 10 40	11,23	G2	Leo
SA 103-487	11 55 11	-00 23 38	11,87	G5	Vir

¹Vybrány ze seznamu doporučených hvězd uvedených v [1]

4.2 Měření kalibračních hvězd

Hvězda	Filtr	Signál (ADU)	Datum	Expozice (s)
Rubin 149B	R	26 306	7. března. 2006	60
Rubin 149B	R	31 661	7. března. 2006	60
Rubin 149B	R	32 306	7. března. 2006	60
Rubin 149B	R	31 676	7. března. 2006	60
Rubin 149B	R	28 414	7. března. 2006	60
Rubin 149B	R	26 863	7. března. 2006	60
Rubin 149B	R	30 028	7. března. 2006	60
Rubin 149B	V	12 621	7. března. 2006	60
Rubin 149B	V	10 385	7. března. 2006	60
Rubin 149B	V	11 742	7. března. 2006	60
Rubin 149B	V	5 920	7. března. 2006	60
Rubin 149B	V	8 522	7. března. 2006	60
Rubin 149B	V	10 407	7. března. 2006	60
Rubin 149B	V	7 913	7. března. 2006	60
Rubin 149B	B	2 412	7. března. 2006	90
Rubin 149B	B	4 744	7. března. 2006	90
Rubin 149B	B	4 050	7. března. 2006	90
Rubin 149B	B	2 026	7. března. 2006	90
Rubin 149B	B	1 802	7. března. 2006	90
Rubin 149B	B	3 913	7. března. 2006	90
SA 102-1081	R	157 487	7. března. 2006	20
SA 102-1081	R	162 137	7. března. 2006	20
SA 102-1081	R	164 396	7. března. 2006	20
SA 102-1081	R	162 178	7. března. 2006	20
SA 102-1081	V	65 895	7. března. 2006	20
SA 102-1081	V	65 689	7. března. 2006	20
SA 102-1081	V	67 861	7. března. 2006	20
SA 102-1081	V	66 801	7. března. 2006	20
SA 102-1081	V	65 953	7. března. 2006	20
SA 102-1081	B	36 051	7. března. 2006	60
SA 102-1081	B	36 975	7. března. 2006	60
SA 102-1081	B	36 794	7. března. 2006	60
SA 102-1081	B	35 388	7. března. 2006	60
SA 102-1081	B	36 039	7. března. 2006	60
SA 101-329	R	60 526	19. dubna. 2006	60
SA 101-329	R	61 191	19. dubna. 2006	60
SA 101-329	R	60 422	19. dubna. 2006	60
SA 101-329	R	58 758	19. dubna. 2006	60
SA 101-329	R	56 469	19. dubna. 2006	60
SA 101-329	R	60 213	19. dubna. 2006	60
SA 101-329	R	57 139	19. dubna. 2006	60
SA 101-329	V	21 961	19. dubna. 2006	60
SA 101-329	V	23 381	19. dubna. 2006	60
SA 101-329	V	22 814	19. dubna. 2006	60
SA 101-329	V	22 259	19. dubna. 2006	60
SA 101-329	V	22 716	19. dubna. 2006	60
SA 101-329	V	21 990	19. dubna. 2006	60
SA 101-329	V	21 876	19. dubna. 2006	60
SA 101-329	B	8 307	19. dubna. 2006	90
SA 101-329	B	8 729	19. dubna. 2006	90
SA 101-329	B	8 659	19. dubna. 2006	90
SA 101-329	B	8 631	19. dubna. 2006	90
SA 101-329	B	8 329	19. dubna. 2006	90
SA 101-329	B	8 561	19. dubna. 2006	90
SA 101-329	B	8 251	19. dubna. 2006	90

Hvězda	Filtr	Signál (ADU)	Datum	Expozice (s)
SA 102-370	R	113 684	19. dubna. 2006	60
SA 102-370	R	115 891	19. dubna. 2006	60
SA 102-370	R	113 376	19. dubna. 2006	60
SA 102-370	R	122 585	19. dubna. 2006	60
SA 102-370	R	122 351	19. dubna. 2006	60
SA 102-370	R	123 696	19. dubna. 2006	60
SA 102-370	V	8 251	19. dubna. 2006	60
SA 102-370	V	8 251	19. dubna. 2006	60
SA 102-370	V	8 251	19. dubna. 2006	60
SA 102-370	V	8 251	19. dubna. 2006	60
SA 102-370	V	8 251	19. dubna. 2006	60
SA 102-370	V	8 251	19. dubna. 2006	60
SA 102-370	V	8 251	19. dubna. 2006	60
SA 102-370	V	8 251	19. dubna. 2006	60
SA 102-370	B	8 251	19. dubna. 2006	90
SA 102-370	B	8 251	19. dubna. 2006	90
SA 102-370	B	8 251	19. dubna. 2006	90
SA 102-370	B	8 251	19. dubna. 2006	90
SA 102-370	B	8 251	19. dubna. 2006	90
SA 102-370	B	8 251	19. dubna. 2006	90
SA 102-370	B	8 251	19. dubna. 2006	90
SA 102-370	B	8 251	19. dubna. 2006	90
SA 103-487	R	70 061	19. dubna. 2006	60
SA 103-487	R	67 002	19. dubna. 2006	60
SA 103-487	R	65 778	19. dubna. 2006	60
SA 103-487	R	67 008	19. dubna. 2006	60
SA 103-487	R	69 895	19. dubna. 2006	60
SA 103-487	R	72 264	19. dubna. 2006	60
SA 103-487	R	72 173	19. dubna. 2006	60
SA 103-487	V	26 845	19. dubna. 2006	60
SA 103-487	V	25 152	19. dubna. 2006	60
SA 103-487	V	26 162	19. dubna. 2006	60
SA 103-487	V	25 058	19. dubna. 2006	60
SA 103-487	V	27 105	19. dubna. 2006	60
SA 103-487	V	27 474	19. dubna. 2006	60
SA 103-487	V	28 333	19. dubna. 2006	60
SA 103-487	B	9 857	19. dubna. 2006	90
SA 103-487	B	9 914	19. dubna. 2006	90
SA 103-487	B	10 150	19. dubna. 2006	90
SA 103-487	B	9 518	19. dubna. 2006	90
SA 103-487	B	9 997	19. dubna. 2006	90
SA 103-487	B	10 314	19. dubna. 2006	90
SA 103-487	B	11 403	19. dubna. 2006	90

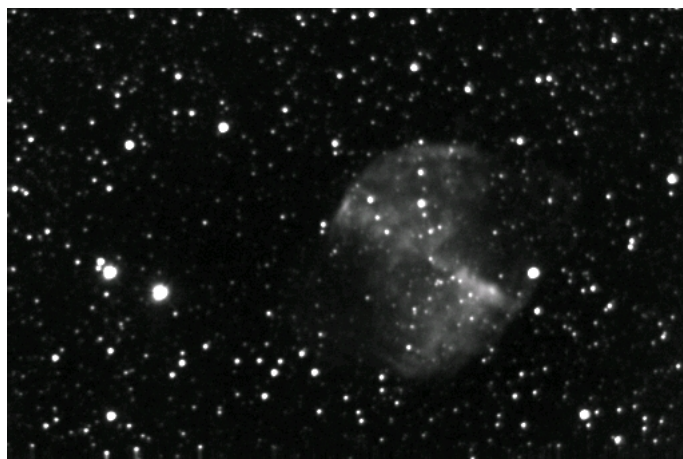
4.3 Snímky v jednotlivých fázích zpracování



Obrázek 4.1: Snímek M27 (filtr R)



Obrázek 4.2: Snímek M27 s vyhlazeným pozadím (filtr R)



Obrázek 4.3: Složenina 20 dílčích expozic (filtr R)



Obrázek 4.4: Výsledný barevný snímek

4.4 Zdrojové kódy CL skriptů

master_dark.cl

```
# MASTER_DARK.CL - CL script for composition of dark-frames into a master-dark
# (Jan Skalicky, skalicky@physics.muni.cz, last modified December 13 2005)

string dark_input

delete ("list", ver-, >& "dev$null")
files *.fits > list
list = "list"

i = 1

while (fscan (list, dark_input) !=EOF)
{
  if (i == 1)
  {
    imarith (dark_input,
             "+", 0, "master_dark.fits", title="", divzero=0., hparams="",
             pixtype="", calctype="", verbose=no, noact=no)
  }
  if (i > 1)
  {
    imrename ("master_dark.fits",
              "master_dark_.fits", verbose=yes)

    imarith ("master_dark_.fits",
             "+", dark_input, "master_dark.fits", title="", divzero=0., hparams="",
             pixtype="", calctype="", verbose=no, noact=no)

    delete ("master_dark_.fits", ver-, >& "dev$null")
  }
  i = i + 1
}

j = i -1

imrename ("master_dark.fits",
          "master_dark_.fits", verbose=yes)

imarith ("master_dark_.fits",
         "/", j, "master_dark.fits", title="", divzero=0., hparams="",
         pixtype="", calctype="", verbose=no, noact=no)

delete ("master_dark_.fits", ver-, >& "dev$null")
```

dark_flat_r.cl

```
# DARK_FLAT_R.CL - CL script for dark-frame and flat-field correction
# (Jan Skalicky, skalicky@physics.muni.cz, last modified November 23 2005)

string df_in
string df_out
string df_out_

list = "list"

while (fscan (list, df_in) !=EOF)
{
  df_out = "d" // df_in
  df_out_ = "f" // df_out

  imarith (df_in,
  "-", "master_dark.fits", df_out, title="", divzero=0., hparams="",
  pixtype="", calctype="", verbose=no, noact=no)

  delete (df_in, ver-, >& "dev$null")

  imdivide (df_out,
  "flat_R.fits", df_out_, title="*", constant=0.,
  rescale="numerator", mean="1", verbose=no)

  delete (df_out, ver-, >& "dev$null")

  imrename (df_out_,
  df_in, verbose=yes)

  delete (df_out_, ver-, >& "dev$null")
}

delete ("list", ver-, >& "dev$null")
```

remove_bg.cl

```
# REMOVE_BG.CL - CL script for removing background gradient from deep-sky images
# (Jan Skalicky, skalicky@physics.muni.cz, last modified November 23 2005)
```

```
string fmedian_in #
string fmedian_out #
string imdivide_in #
string imdivide_bg #
string imdivide_out #
```

```
delete ("list", ver-, >& "dev$null")
files *.fits > list
list = "list"
```

```
while (fscan (list, fmedian_in) !=EOF)
{
fmedian_out = "bg_" // fmedian_in
imdivide_in = fmedian_in
imdivide_bg = fmedian_out
imdivide_out = "bgc_" // fmedian_in
```

```
fmedian (fmedian_in,
fmedian_out, 251, 251, hmin=-32768, hmax=32767, zmin=INDEF, zmax=INDEF,
zloreject=INDEF, zhireject=INDEF, unmap=yes, boundary="nearest", constant=0.,
verbose=yes)
```

```
imdivide (imdivide_in,
imdivide_bg, imdivide_out, title="*", constant=0.,
rescale="numerator", mean="1", verbose=no)
```

```
}
```

```
delete ("list", ver-, >& "dev$null")
```

reg.cl

```
# REG.CL - CL script for subpixel-precision comparison and registration of CCD frames before combining
# (Jan Skalicky, skalicky@physics.muni.cz, last modified November 27 2005)
```

```
string xreg_input
string xreg_output
string xreg_shift
string sum_input
string xreg
struct *list_

list_ = "list"
list = "list"

i = 1
while (fscan (list_, xreg_input) !=EOF)
{
  if (i ==1) xreg = xreg_input
  i = i + 1
}

while (fscan (list, xreg_input) !=EOF)
{
  xreg_output = "xreg_" // xreg_input
  xreg_shift = "shift_" // xreg_input // ".txt"

  xregister (xreg_input,
xreg, "[1:510,1:340]", xreg_shift, output=xreg_output,
databasefmt=yes, append=no, records="", coords="", xlag=0, ylag=0, dxlag=0,
dylag=0, background="none", border=INDEF, loreject=INDEF, hireject=INDEF,
apodize=0., filter="none", correlation="discrete", xwindow=31, ywindow=31,
function="centroid", xcbx=15, ycbx=15, interp_type="linear",
boundary_typ="nearest", constant=0., interactive=no, verbose=yes,
graphics="stdgraph", display="stdimage", gcommands="", icommands="")

}
```

combine_r.cl

```
# COMBINE_R.CL - CL script for subpixel-precision composition of CCD-R frames
# (Jan Skalicky, skalicky@physics.muni.cz, last modified November 26 2005)
```

```
string sum_input
string xreg_input

list = "list"
i = 1
while (fscan (list, xreg_input) !=EOF)
{
    sum_input = "xreg_" // xreg_input
    if (i == 1)
    {
        imarith (sum_input,
            "+", 0, "sumR.fits", title="", divzero=0., hparams="",
            pixtype="", calctype="", verbose=no, noact=no)
    }
    if (i > 1)
    {
        imrename ("sumR.fits",
            "sumR_.fits", verbose=yes)

        imarith ("sumR_.fits",
            "+", sum_input, "sumR.fits", title="", divzero=0., hparams="",
            pixtype="", calctype="", verbose=no, noact=no)

        delete ("sumR_.fits", ver-, >& "dev$null")
    }
    i = i + 1
}
imarith ("sumR.fits",
"/", i, "sumR.fits", title="", divzero=0., hparams="",
pixtype="", calctype="", verbose=no, noact=no)
```


reg_sum.cl

```
# REG_SUM.CL - CL script for subpixel-precision comparison and registration of composite CCD frames in individual pa
# (Jan Skalicky, skalicky@physics.muni.cz, last modified November 27 2005)
```

```
string xreg_input
string xreg_output
string xreg_shift
string sum_input
string sum
struct *list_

list_ = "list"
list = "list"

i = 1
while (fscan (list_, xreg_input) !=EOF)
{
    if (i ==1) sum = xreg_input
    i = i + 1
}

while (fscan (list, xreg_input) !=EOF)
{
    xreg_output = "xreg_" // xreg_input
    xreg_shift = "shift_" // xreg_input // ".txt"

    xregister (xreg_input,
sum, "[1:220,1:340]", xreg_shift, output=xreg_output,
databasefmt=yes, append=no, records="", coords="", xlag=0, ylag=0, dxlag=0,
dylag=0, background="none", border=INDEF, loreject=INDEF, hireject=INDEF,
apodize=0., filter="none", correlation="discrete", xwindow=31, ywindow=31,
function="centroid", xcbx=15, ycbx=15, interp_type="linear",
boundary_typ="nearest", constant=0., interactive=no, verbose=yes,
graphics="stdgraph", display="stdimage", gcommands="", icommands="")

}
```