

MASARYKOVA UNIVERZITA V BRNĚ
Přírodovědecká fakulta

**Fotometrická kalibrácia
fotonásobiča**

BAKALÁRSKA PRÁCA

Brno 2006

Emília Kubalová

Anotácia

Táto práca sa zaoberá fotometriou za použitia fotonásobiča ako detektora. I keď je éra fotonásobičov už za nami, majú tieto nesporné výhody oproti novým detektorom – CCD kamerám. Ich vysoký pomer signál – šum je vlastnosťou oceňovanou najmä v diferenciálnej fotometrii premenných hviezd. Fotonásobiče majú svoju hodnotu i historickom zmysle, sú článkom medzi používaním fotografických dosiek a nových detektorov ako CCD kamery.

Cieľom mojej práce bolo zostaviť meraciu aparatúru s fotonásobičom ako detektorom a podpornú elektroniku, a pomocou niekoľkých vybraných štandardných hviezd prístroj nakalibrovať. Takéto zariadenie potom môže byť použité i pri diferenciálnej fotometrii.

Annotation

This paper deals with photoelectric photometry using a photomultiplier tube as a detector. Although photomultiplier tubes are not a mainstream detectors nowadays, they have certain benefits over the CCD cameras. Their quick response and high signal-to-noise ratio are of much use in astronomy, especially when dealing with differential photometry of variable stars.

My aim is to build an apparatus and supporting electronics and to do the calibration measurements on chosen standard stars. Such a calibrated device could be later used even for photoelectric photometry.

Prehlasujem, že som bakalársku prácu vypracovala samostatne, s použitím uvedenej literatúry a podľa metodických pokynov vedúceho bakalárskej práce.

Brno, 25.5.2006

Emília Kubalová

Chcela by som poďakovať vedúcemu bakalárskej práce Filipovi Hrochovi za pomoc a starosť v každú dennú, či nočnú hodinu, za technickú pomoc a spoločnosť pri pozorovaní, Tomášovi a Gabovi za spoločnosť pri pozorovaní a technické a vecné rady, Pauliemu za krásnu obrazovú prílohu, krstnému otcovi za všetky redukcie a šróby, Monike za prvú pomoc v \LaTeX u a rodičom, sestram a Ondrejovi za pevné nervy, povzbudenie a milé slovo, keď ho bolo najviac treba.

Obsah

Úvod	7
1 Fotonásobič, meracia aparátúra a elektronika	9
1.1 Fyzikálny popis a vlastnosti fotonásobiča	9
1.1.1 Fotokatóda	11
1.1.2 Sklenené okienko	13
1.1.3 Dynódy	13
1.2 Optická hlava	14
1.2.1 Optický hranol a okulár hlavy	14
1.2.2 Clonky	14
1.2.3 Fabryho šošovka	15
1.2.4 Filtre	15
1.3 Elektronika	15
1.3.1 Zdroj vysokého napätia	16
1.3.2 Päťica	16
1.3.3 Meracie zariadenie	17
2 Pozorovanie	18
2.1 Atmosférické javy	18
2.1.1 Extinkcia	19
2.1.2 Refrakcia	20
2.1.3 Scintilácia	20
2.2 Ďalekohľad	20
2.3 Štandardné fotometrické systémy	21
2.4 Pozorovanie	23
2.4.1 Výber objektu	23
2.4.2 Získavanie dát	24
2.4.3 Technické problémy	27

3 Spracovanie a analýza dát	31
3.1 Postup spracovania dát	31
3.2 Analýza dát	33
3.2.1 Extinkčné krivky, výsledky a diskusia	33
3.2.2 Rušivé vplyvy pri pozorovaní	40
4 Záver	42
Obrazová príloha	43
Literatúra	46

Úvod

Fotonásobič si musel na objavenie počkať do doby, kedy sa začala bežne používať elektrická energia, jeho predchodcovia tu však boli skôr. Priamym predkom fotonásobiča je fotobunka.

Prvé dokumentované pozorovanie so seléniovou fotobunkou uskutočnili Minchin, Monck, Fitzgerald a Wilson v roku 1892. Minchin fotobunku vylepšil a keď v roku 1895 namierili na Arcturus, získali osemmilimetrovú výchylku. A fotoelektrická fotometria začala písať svoje dejiny.

Ďalším posunom bola práca profesora Joela Stebbinsa, ktorý v roku 1907 vsadil na selén. Stebbins bol takisto prvý, kto použil chladenie na zlepšenie pomeru signál – šum.

I keď fotonásobič bol objavený v polovici tridsiatych rokov dvadsiateho storočia, ďalší výskum a výroba boli pozdržané vojnou a na rozšírenie do astronómie si počkal do roku 1946.

Vylepšením materiálov fotokatódy, skleneného okienka a dynód dosiahol fotonásobič kvantovú účinnosť 25% a zaradil sa medzi bežne používané a dôležité detektory v observatóriách po celom svete.¹

V dnešnej dobe sa už fotonásobiče používajú len pre špeciálne úlohy a do popredia vystúpili CCD kamery. V mojej práci sa vrátim k fotometrii prevádzanej pomocou fotonásobiča, zostavím si aparát a elektroniku a premeraním fotometrických štandardov v systéme UBV prístroj nakalibrujem.

V prvej kapitole rozoberiem fyzikálny popis fotonásobiča, princíp na ktorom tento detektor pracuje. Takisto opíšem všetky dôležité časti, z ktorých sa skladá a ich vlastnosti. Ďalej sa budem venovať optike a podpornej elektronike a popíšem schému ich zapojenia.

V druhej kapitole rozoberiem rôzne vplyvy na pozorovanie, popíšem ďalekohľad a štandardný fotometrický systém UBV, ktorý som použila na kalibráciu prístroja. Časť tejto kapitoly je vyhradená podrobnému popisu vybratých kalibračných objektov, pozorovacích nocí a postupu pozorovaní.

¹historický úvod má podklad v [4]

V neposlednom rade sú tu spomenuté technické problémy, s ktorými som sa pri svojej práci potýkala.

Tretia kapitola je venovaná spracovaniu zozbieraných dát, ich grafickej reprezentácii v extinkčných krivkách a sú takisto spomenuté rušivé elementy vyskytujúce sa pri pozorovaní.

V závere zhrniem všetky výsledky a budem sa venovať ich diskusii.

Kapitola 1

Fotonásobič, meracia aparátúra a elektronika

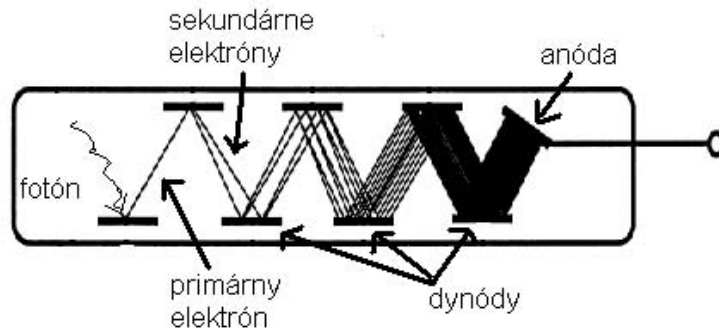
1.1 Fyzikálny popis a vlastnosti fotonásobiča

Fotonásobič je fyzikálny prístroj, ktorý je založený na princípe fotoelektrickej a sekundárnej emisie. Fotón zo zdroja dopadne na fotokatódu a jeho kinetická energia sa spotrebuje na vyrazenie elektrónu z materiálu. Tento elektrón je urýchľovaný elektrickým poľom a dopadá na prvú dynódu, z ktorej vyráža ďalšie, sekundárne elektróny, ktoré sú urýchľované k druhej dynóde a tak ďalej. Nakoniec prúd elektrónov dopadá na anódu, ktorá je spojená s čítačom pulzov a my detekujeme elektrický prúd – signál zdroja.

Platí vzťah $h\nu = w + E_k$, teda fotón dopadajúci na fotokatódu musí mať energiu $h\nu$ väčšiu ako je výstupná práca w materiálu fotokatódy, aby z nej mohol vyraziť elektrón s nenulovou počiatočnou kinetickou energiou E_k . Tento jav sa nazýva primárna emisia.

Medzi fotokatódou a prvou dynódou je vytvorené elektrické pole tak, aby bol primárny elektrón (elektróny vytvorené fotoelektrickou emisiou sú často nazývané fotoelektróny) urýchľovaný smerom k prvej dynóde. Na nej nastáva sekundárna emisia. Sekundárne fotoelektróny sú urýchľované poľom k druhej dynóde a tak ďalej.

Ak je kinetická energia primárnych elektrónov niekoľkonásobne vyššia ako výstupná práca materiálu dynódy, potom počet vyrazených elektrónov prevýši počet elektrónov dopadajúcich na ňu a nastáva lavínovitý efekt násobenia signálu medzi jednotlivými dynódami.



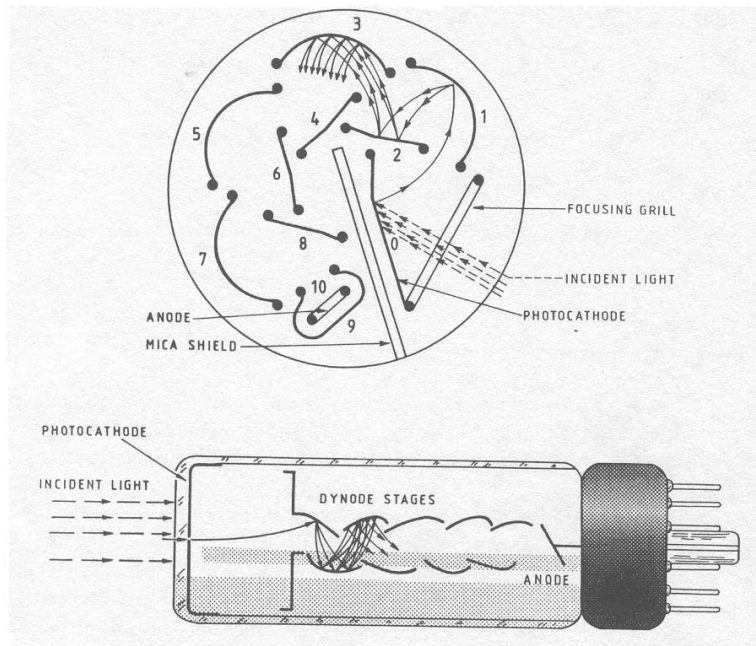
Obrázek 1.1. Primárna a sekundárna emisía. [10]

Elektrické pole medzi dynódami je nastavené tak, aby sa od katódy zvyšoval potenciál ku anóde, kde sa zaznamenáva výstupný zosilený signál (typický počet dynód je desať až štrnásť), výstupný signál A (= zisk) môže byť až miliónnásobne zosilený vstupný signál. Ak počet dynód je n a ak s je počet sekundárnych elektrónov na jeden primárny elektrón, potom môžeme zisk vypočítať ako $A = s^n$.

Požadované pole zaistíme napájaním anódy, pred ktorou je napäťový delič, ktorý zaistuje postupný nárast potenciálu cez jednotlivé dynódy.

Úrýchľovacie napätie musí byť značné, preto pri práci s fotonásobičom používame vysokonapäťové zdroje (potrebné napätie sa pohybuje okolo 1 až 2 kV). Je zrejmé, že takýmto spôsobom je možné zaznamenávať jednotlivé pulzy.

Samotný detektor — fotonásobič (photomultiplier tube — PMT) je sklenený valec. Za skleneným okienkom je umiestnená fotokatóda, vnútri plášťa sú jednotlivé dynódy. Jednotlivé prístroje sa delia na viac skupín a to na základe umiestnenia fotokatódy a podľa usporiadania dynód.



Obrázek 1.2. Vnútorné usporiadanie fotonásobiča. [9]

1.1.1 Fotokatóda

Fotonásobiče sa podľa fotokatódy delia na head-on PMT, kde je použitá polopriepustná fotokatóda, ktorá je umiestnená na čelnej strane valca niekoľko sto angstromov od skleneného okienka a side-on PMT, kde je nepriepustná fotokatóda umiestnená až niekoľko milimetrov vo valci za skleneným okienkom na bočnej strane valca.

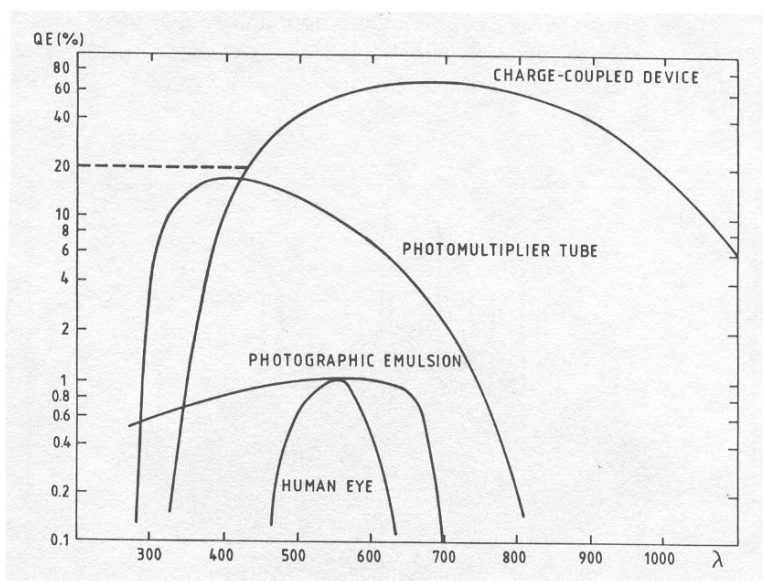
Fotóny dopadajúce na polopriepustnú fotokatódu prechodom cez ňu vyrazia fotoelektróny v smere svojho pohybu a tieto pokračujú k prvej dynóde. Nepriepustná fotokatóda je sklonená k okienku pod uhlom a fotóny vyrážajú elektróny len z povrchu fotokatódy a tieto sa odrazia späť a okamžite sú zachytené poľom prvej dynódy.

I keď sa fotonásobič používa ako detektor pre zachytávanie jednotlivých pulzov (a ideálny prístroj by to určite dosiahol), reálny fotonásobič nedokáže zaznamenať každý fotón. Pomerné množstvo zaznamenaných pulzov sa nazýva kvantová efektívnosť fotokatódy a úzko súvisí s materiálom fotokatódy.

Kvantová efektívnosť sa udáva v percentách, je rozdielna pre rôzne vlnové dĺžky, typická hodnota pre fotonásobiče je 25% vo viditeľnom svetle (to

znamená, že len každý štvrtý fotón vyrazí fotoelektrón). Prvé fotonásobiče mali kvantovú efektívitu 0,01%, výraznejšie sa začali používať, až keď sa im podarilo dosiahnuť hranicu pol percenta. Pre porovnanie účinnosť CCD kamery je 40% pri backside CCD a až 90% pri frontside CCD, naproti tomu efektívita ľudského oka je 1%.

Ďalšou vlastnosťou fotonásobiča, ktorá je ovplyvnená materiálom fotokatódy (a vlastnosťami skleneného okienka), je spektrálna citlivosť. Použitím vhodného materiálu je možné dostať fotonásobič citlivý na ktorúkoľvek oblasť žiarenia v intervale 300 až 1100 nm. Fotonásobiče používané na fotoelektrickú fotometriu sú najcitlivejšie v modrej oblasti.



Obrázek 1.3. Graf spektrálnej citlivosti jednotlivých detektorov. [9]

Základná fotokatóda je zlúčeninou cézia a antimónu, niekedy sa pridáva draslík na zníženie temného prúdu a zlepšenie citlivosti v modrej oblasti, obeťou tohto vylepšenia je však strata citlivosti v červenej oblasti. Iným typom fotokatód sú zlúčeniny gália a arzénu, prípadne ešte india. Tieto však majú vysoký temný prúd a malú aktívnu plochu, teda musia byť výdatne chladené a vyžadujú neustále pointovanie a presné navádzanie.

Neprijemnou vlastnosťou fotokatódy je termoemisia, to znamená vytváranie falošných pulzov. Elektróny nie sú vytvorené dopadom fotónu na katódu, ale zahrievaním fotokatódy získajú dostatočnú kinetickú energiu, aby mohli opustiť materiál. Prúd takýchto elektrónov sa nazýva temný prúd a je pre každý fotonásobič charakteristický. Je prítomný ako pri čítaní signálu, tak i v prípade, že do detektoru nedopadá žiadne svetlo. Hodnoty temného prúdu sa rádovo pohybujú v nanoampéroch, niektorí výrobcovia (Hamamatsu) dokonca deklamujú hodnoty v pikoampéroch.

Temný prúd samozrejme nezostáva počas merania konštantný, ale rastie s dobou pozorovania. Vplyv temného prúdu na meranie je možné znížiť chladením celej aparatury. Chladiť môžeme vodou (hrozia problémy s parou), suchým ľadom, alebo dokonca tekutým dusíkom.

Ďalšou chybou signálu je vlastný šum objektu (hviezdy). Takéto zmeny signálu sú však malé a skôr štatistického charakteru.

Citlivosť fotokatódy sa môže narušiť, alebo úplne zaniknúť v prípade, že je fotokatóda vystavená príliš silnému svetlu kým je fotonásobič pripojený k vysokému napätiu. Je preto veľmi dôležité dať dobrý pozor, aby takáto situácia nenastala. Na zabránenie preniknutia svetla na fotokatódu použijeme nepriepustný filter.

1.1.2 Sklenené okienko

Materiál skleneného okienka ovplyvňuje spektrálnu citlivosť fotonásobiča a určuje hranicu priepustnosti žiarenia zo strany ultrafialovej oblasti elektromagnetického spektra.

1.1.3 Dynódy

Podľa vnútorného usporiadania dynód rozlišujeme zapojenie kruhové, mriežkové, žalúziové etc. Typ vnútorného usporiadania fotonásobiča volíme pre každý účel zvlášť.

Najpoužívanejšie materiály dynód sú CsSb a pocéziované BeOCu. Väčšina fotonásobičov využívaných na poli astronómie má CsSb dynódy, ktoré majú väčší zisk ako BeOCu dynódy.

Detektor použitý v experimentálnej časti tejto práce je head-on type EMI 6256 S s polopriepustnou fotokatódou, vnútorné usporiadanie dynód je žalúziové.

1.2 Optická hlava

Skôr ako sa akýkoľvek signál dostane na fotokatódu, musí prejsť cez optickú hlavu, v ktorej je zabudovaných niekoľko dôležitých prvkov.

1.2.1 Optický hranol a okulár hlavy

Svetlo zo zdroja vstupuje z ďalekohľadu do optickej hlavy cez posuvný optický hranol. Tento slúži ako rázcestie medzi okulárom a fotonásobičom.

Okulár je tu veľmi dôležitým prvkom, slúži na kontrolu poľa, ktoré meriame. Dôležitosť tohto prvku si uvedomíme najmä vtedy, ak hľadáčik ďalekohľadu a okulár optickej hlavy nie sú z nejakého dôvodu presne zosené, alebo ak je zorné pole hľadáčika väčšie ako pole okuláru hlavy a teda nemôžeme na pointovanie používať hľadáčik hlavného ďalekohľadu.

1.2.2 Clonky

Svetlo ďalej prechádza clonkou, ktorá má odfiltrovať neželaný signál napríklad z veľmi blízkej hviezdy. Cloniek spravidla býva k dispozícii niekoľko veľkostí, ktoré sú vhodne usporiadané (najlepšia voľba je usporiadanie podľa polomeru) za sebou.

Ak je zvolený spôsob výmeny cloniek otočný kvet, kde ovládacím prvkom je nekonečná skrutka, potom akustické cvaknutie ako potvrdenie voľby je na nezaplatenie. Týmto spôsobom nie je možné odsledovať, ktorá clonka sa práve používa, máme však istotu, že je clonka správne založená.

Výber veľkosti clonky záleží na tom, či je ďalekohľad schopný udržať fotometrovanú hviezdu presne na jednom mieste počas doby merania. Ak je presnosť dostatočná, môžeme voliť malé clonky, aby sme odfiltrovali všetok nežiadúci signál. Ak čas jednotlivých meraní je dostatočne dlhý na to, aby nám hviezda oddriftovala (s predpokladom, že počas meranie nepointujeme) je vhodné voliť čo najväčšiu clonku a s prípadným prídavným signálom blízkej hviezdy sa vysporiadať vhodným spôsobom.

1.2.3 Fabryho šošovka

Fotokatóda je nanovrstva metalického materiálu, sú v nej však rôzne nehomogenity. Aby sa predišlo systematickej chybe, kedy by sme získali skreslený signál nejakou nehomogenitou, zavedieme svetlu do cesty nový optický člen. Je ním Fabryho šošovka — rozptylka, ktorá svetlo rozostří tak, že dopadá na celú plochu fotokatódy. Týmto krokom si zaistíme štatisticky správne výstupné hodnoty. V skutočnosti použijeme takéto šošovky dve. Jedna bude pred optickými filtermi (z rovnakého dôvodu, ako už bolo vysvetlené), a druhá konečne tesne pred fotokatódou.

1.2.4 Filtre

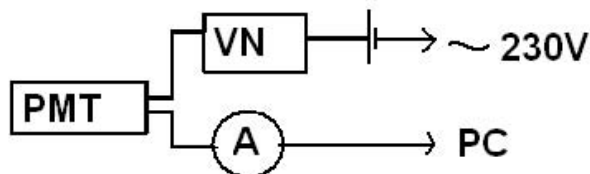
Fotoelektrická fotometria sa dá robiť viacerými spôsobmi. Buď nás zaujíma len celkový signál — biele svetlo, ktoré sa k nám z hviezdy dostáva, alebo využijeme fotometrické filtre a môžeme skúmať napríklad jasnosť hviezdy v tom ktorom filtri. Fotometrické filtre sa v optickej hlave nachádzajú medzi dvoma šošovkami.

Je výhodné umiestniť okrem filtrov a prázdneho okienka aj nepriepustný filter. Jednak nám presne určí začiatok sekvencie filtrov a takisto sa osvedčí v prípadoch, kedy budeme potrebovať použiť viac svetla a nebude výhodné vypínať vysokonapäťový zdroj.

1.3 Elektronika

Fotonásobič, akokoľvek dôležitá súčiastka, je len detektorom. Na to, aby sme s ním mohli pracovať, potrebujeme podpornú elektroniku. Tou je jednosmerný vysokonapäťový zdroj, ktorý zaistí potenciálový rozdiel na jednotlivých dynódach, striedavý zdroj napätia, meracie zariadenie a počítač, rovnako ako počítač ovládajúci samotný ďalekohľad.

Podporná elektronika použitá v prípade fotoelektrickej fotometrie je zapojená podľa nasledovnej schémy: napájací zdroj nízkeho napätia → vysokonapäťový zdroj (VN) → vstup fotonásobiča (PMT), výstup fotonásobiča → multimeter → počítač.



Obrázek 1.4. Schéma zapojenia.

Pri samotnom zapájaní je treba dbať na to, aby boli oba zdroje vypnuté a napájací kábel zdroja nízkeho napätia bol odpojený od siete. Zapnutie aparatury potom nasleduje zapojením napájacieho kábla do siete, zapnutím napájacieho zdroja nízkeho napätia a nakoniec zapnutím vysokonapäťového zdroja.

1.3.1 Zdroj vysokého napätia

Ako už bolo spomenuté, fotonásobič je potrebné napájať vysokým napätím. Meranie si vyžaduje zdroj v rozsahu 1-2 kV. Vysokonapäťový jednosmerný zdroj obyčajne býva napájaný striedavým zdrojom malého napätia.

Práca s vysokým napätím vyžaduje opatrnosť a disciplinovanosť. Všetky časti obvodu, kde by mohlo dôjsť k vodivému kontaktu je potrebné zaizolovať, kontrolu zapojenia prístrojov nikdy nerobíme pod prúdom. Takisto všetky zmeny, výmeny a manuálne zásahy do zapojenia robíme až po vypnutí oboch zdrojov.

Vysokonapäťový zdroj potrebuje čas, aby sa stabilizoval. Je preto výhodné zapojiť celú aparaturu o nejaký čas skôr, ako začneme s vlastným meraním. Získame za to stabilnejší výstupný signál a teda lepší vstup pre spracovanie a analýzu dát.

1.3.2 Päťica

Päťica je rozhranie, ktorým pripojíme fotonásobič jednak ku vysokonapäťovému zdroju a jednak ku výstupnému meraciemu zariadeniu. Päťica má tvar medzikružia, v ktorom je 14 jamiek pre 14 konektorov — nožičiek dynód. Jednotlivé jamky sú poprepájané vhodnými odpormi, ktoré slúžia ako napäťový delič. Päťica je spojená so spodným krytom fotonásobiča, na

ktorý sú vyvedené dva konektory. Vstupný konektor je napájaný vysokým napätím a na výstupe je pripojené meracia zariadenie.

1.3.3 Meracie zariadenie

Ako meracie zariadenie je možné použiť napríklad multimeter pripojiteľný k počítaču. Multimeter zachytáva signál v podobe anódového prúdu, tento prevádza na digitálny signál a posiela počítaču. Ovládací program zapisuje dáta spolu s časovým údajom, priebežne vykresľuje závislosť anódového prúdu na čase a umožňuje tieto dáta vyexportovať vo vhodnom formáte pre ďalšie spracovanie.

Je výhodné mať meracie zariadenie s nastaviteľnou integračnou dobou. Integračná doba je čas, po ktorý sa zbiera signál, výstup, ktorý vidíme, je priemernou hodnotou nazbieraných pulzov.

Pozn: pre niektoré časti tejto kapitoly boli podkladom zdroje [1] a [11].

Kapitola 2

Pozorovanie

V tejto kapitole postupne rozoberiem vplyv zemskej atmosféry na pozorovanie, popíšem štandardný systém UBV, v ktorom som prevádzala kalibráciu zostaveného fotometrického systému a nakoniec sa budem venovať popisu výberu pozorovaných objektov a napozorovaných nocí. Zvláštnu podkapitolu som vyhradila technickým problémom, s ktorými som sa v experimentálnej časti tejto práce stretla.

Fotoelektrická fotometria je veľmi citlivá na všetky atmosférické javy. Na výstupných hodnotách je okamžite vidieť akúkoľvek odchýlku od ideálneho stavu, okom neviditeľné cirry i prelietavajúce lietadlá. Výber vhodných objektov pre pozorovanie musí brať na zreteľ možnosti ďalekohľadu, geografickú a fyzickú polohu observatória. Navyše je pozorovanie obmedzené napríklad fázami Mesiaca (prechod cez Mesiac v splne fotonásobičom pod napätím takmer dokonale zaručí poškodenie fotokatódy), výškou objektu na obzore (nízko nad obzorom sa negatívne prejavuje extinkcia).

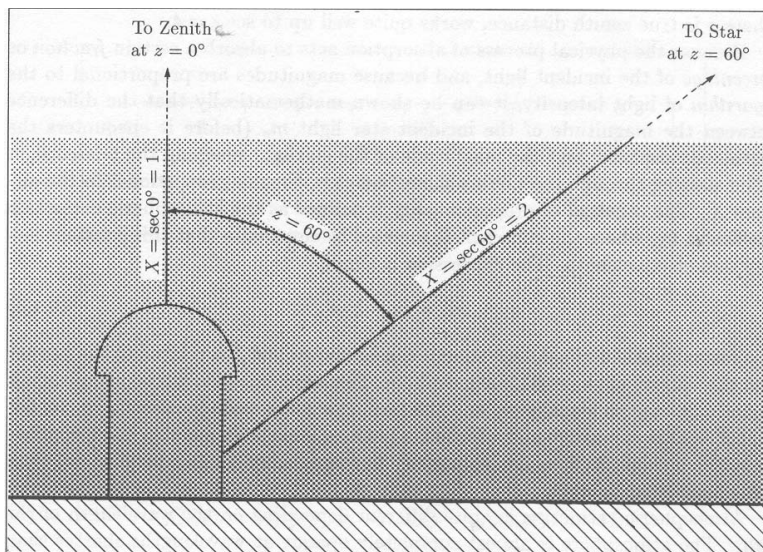
2.1 Atmosférické javy

Svetlo hviezd, ako ho vnímame zo Zeme, sa líši od svetla, ktoré zachytávajú družice. Je mihotavé, zoslabené a vôbec nie bodové. Rozoberiem len tri najdôležitejšie javy (extinkcia, refrakcia a scintilácia), ktoré svetlo na jeho ceste atmosférou ovplyvňujú. Treba však mať na pamäti, že sa uplatňuje aj disperzia (rozklad bieleho svetla na jednotlivé vlnové dĺžky) ako v atmosfére, tak v ďalekohľade a difrakcia (ohyb svetla) na objektíve, ktorých následkom hviezdy vidíme ako kotúčik namiesto bodového zdroja.

2.1.1 Extinkcia

Žiarivý tok, ktorý dopadá do ďalekohľadu a je zaznamenaný meracím zariadením, je pôvodné svetlo hviezdy zoslabené zemskou atmosférou vplyvom rozptylu svetla na časticiach vzduchu ako aj atmosférickou absorpciou. Zoslabenie je spôsobené atmosférickou extinkciou a jeho mierou je extinkčný koeficient k_λ . Vezmeme do úvahy zoslabenie svetla hviezdy veľkosti m_0 prechodom atmosférou a fakt, že výsledná pozorovaná hviezdna veľkosť m je úmerná množstvu vzdušnej hmoty X , ktorou svetlo letelo. Vzťah, ktorý popisuje extinkčnú krivku, je $m_0 = m - Xk_\lambda$.

Na výpočet vzdušnej hmoty X a lepšiu predstavu situácie použijeme nasledujúci obrázok.



Obrázek 2.1. Rovinný model atmosféry. [1]

Z obrázku sa ponúka sekantová aproximácia $X = \sec z$, kde z je určené vzťahom $\sec z = (\sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \cos h)^{-1}$, kde ϕ je pozorovateľova zemepisná šírka, δ je deklinácia hviezdy a h je hodinový uhol hviezdy. Kým prvé dve súradnice je získať pomerne rýchle a ľahké, hodinový uhol je treba pre každú polohu hviezdy spočítať. Urobí sa tak použitím vŕahu $\omega = \alpha + h$, kde ω označuje hviezdny čas a α rektascenziu hviezdy.

Sekantová aproximácia je založená na modeli rovinnej atmosféry. Nepočíta sa v ňom so zakrivením zemského povrchu, a preto je pre väčšie hodnoty $\sec z$ je nevyhovujúca. Táto aproximácia však dala za vznik jednoduchému vzorcu, $X = \sec z[1 - 0.0012(\sec^2 z - 1)]$, ktorý vyhovuje veľmi dobre až do hodnoty $\sec z = 4$, čo predstavuje deklináciu hviezdy $\delta \approx 15^\circ$.

Je zrejmé, že k_λ bude nadobúdať najmenšie hodnoty v zenite a narastať bude úmerne zenitovej vzdialenosti. V blízkosti obzoru je z tohoto dôvodu pozorovanie menej jasných hviezd obtiažne.

Pozorovacie podmienky sa menia z noci na noc, preto je potrebné určiť extinkčný koeficient k_λ pre každú noc samostatne.

2.1.2 Refrakcia

Refrakcia, lámanie svetla, je fyzikálny jav, pri ktorom svetlo dopadajúce šikmo na rozhranie dvoch prostredí sa láme a pri tom mení svoj smer. Refrakcia je tým väčšia, čím je smer dopadu lúča šikmejší a rozdiel hustoty prostredí väčší. Je teda zrejmé, že refrakcia na hviezdu v zenite pôsobiť nebude a naopak, obraz hviezdy na obzore sa môže vplyvom refrakcie odchyľovať od pôvodného smeru lúčov až o $35'$.

Vďaka refrakcii môžeme napríklad vidieť slnko dotýkať sa obzoru v čase, kedy už je fyzicky pod ním.

2.1.3 Scintilácia

Scintilácia, alebo mihotanie, blikanie zdroja je výsledkom prechodu svetla cez nehomogénne prostredie zemskej atmosféry. Ide vlastne o zmeny jasnosti hviezdy spôsobené turbulentným prúdením buniek vzduchových častíc vo vrchných vrstvách atmosféry. Tieto bunky rôznej hustoty sa chovajú ako malé slabé šošovky, rozostávajúce alebo naopak fokusujúce svetlo zachytávané ďalekohľadom.

2.2 Ďalekohľad

Pre fotoelektrickú fotometriu je výhodné mať veľký ďalekohľad, pretože potrebujeme zozbierať čo najviac svetla. Najlepším riešením je, ak je ďalekohľad používaný výhradne na tento účel, predíde sa mnohým problémom a komplikáciám, ktoré vznikajú pri výmene detektorov.

Ja som pracovala s ďalekohľadom Ústavu teoretické fyziky a astrofyziky Přírodovědecké fakulty Masarykovy univerzity. Je to reflektor na paralaktickej montáži s priemerom zrkadla 62cm a ohniskovou vzdialenosťou 2,78m.

Jeho primárnym detektorom, s ktorým pracovali ostatní študenti, je CCD kamera umiestnená v Newtonovom ohnisku. Do tohto ohniska je umiestnený i fotonásobič, takže detektory bolo treba relatívne často vymieňať, čo pre mňa každýkrát znamenalo zaoštrovanie a znovunastavenie celého meracieho zariadenia, pri ktorých sa vždy vyskytli technické problémy a ich riešením sa značne skrátala doba merania.

2.3 Štandardné fotometrické systémy

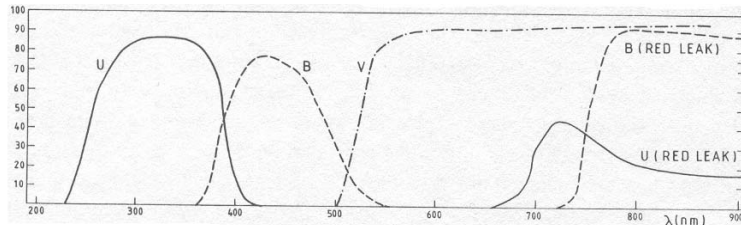
Fotometrických systémov je v astronómii relatívne veľa, preto je myšlienka štandardného systému veľmi dôležitá pre jednotnú reprezentáciu výsledkov. Tieto systémy sa vo všeobecnosti delia na širokopásmové (Wide Band Systems), stredne a úzkopásmové systémy (Intermediate and Narrow Band Systems). Najpoužívanejším širokopásmovým systémom je UBV, nazývaný aj Johnsonov systém. Tento fotometrický systém je postavený na znalosti tzv. fotometrických štandardov (= hviezdne veľkosti niekoľkých veľmi stabilných a jasných hviezdnych zdrojov vo filtroch U – ultraviolet, B – blue, V – visual).

Parametre jednotlivých filtrov sú uvedené v nasledujúcej tabuľke, kde λ je efektívna vlnová dĺžka a $\delta\lambda$ je šírka pásma.

	$\lambda [\mu m]$	$\Delta\lambda [\mu m]$
U	0.365	0.068
B	0.440	0.098
V	0.548	0.089
R	0.700	0.22

Fotonásonič ako detektor je najcitlivejší v modrej oblasti, naopak je najmenej citlivý vo filtri R – blízke infračervené žiarenie. Filter V zodpovedá citlivosti ľudského oka, kým signál získaný bez použitia filtra je z integrálneho oboru, teda svetlo je zachytené vo všetkých vlnových dĺžkach, v ktorých daná hviezda vyžaruje.

Pre lepšiu predstavu nasleduje graf spektrálnej citlivosti jednotlivých filtrov fotometrického systému UBV:



Obrázek 2.2. Graf spektrálnej citlivosti jednotlivých filtrov. [9]

Systém UBV počítal s desiatimi tzv. primárnymi štandardnými hviezdami, časom však bolo nutné zoznam rozšíriť i o menej jasné hviezdy, takzvané doplnkové štandardy, ktoré dnes čítajú niekoľko sto ďalších hviezd. Rozšírenie nastalo i v oblasti filtrov smerom k infračervenej oblasti, i keď vo fotoelektrickej fotometrii sa toto rozšírenie príliš nepoužíva pre nízku kvantovú účinnosť fotokatódy v infračervenej oblasti. Pomocou systému UBV môže každý skalibrovať vlastný detektor. Výsledky, ktoré potom detektorom získa, budú zrozumiteľné a reprodukovateľné. Pri meraní parametrov žiarenia hviezdy v systéme UBV je možné takisto určovanie farebného indexu hviezdy (B–V).

Pri kalibrácii je veľmi vhodné vybrať si kalibračnú(é) hviezdu(y) z fotometrických štandardov a nie ľubovoľne, mohlo by sa totiž stať, že by sa kalibrovalo za použitia premennej hviezdy. Ak by však nastala situácia, že najvhodnejšou hviezdou na kalibráciu by napr. z geografického hľadiska bola premenná hviezda, je potreba zvážiť, či je možné prístrojom jej premennosť zmerať. Ak sa premennosť hviezdy pohybuje v rádoch stotín magnitúdy, chyba kalibrácie vplyvom premennosti kalibračnej hviezdy môže byť dokonca menšia, ako chyba vnesená technickou nepresnosťou meracej aparatúry.

Na kalibráciu zostaveného fotometrického systému som použila Johnsonov systém rozšírený o filter R (z dôvodu dokázania nízkej kvantovej účinnosti fotonásobiča v infračervenej oblasti) a takisto bolo zaradené aj prázdne okienko (integrálny obor).

2.4 Pozorovanie

2.4.1 Výber objektu

V práci som celkovo premeriavala tri hviezdy, a to Regulus – α Leo, Arcturus – α Boo, Vega – α Lyr. Regulus bol vybraný z doplnkových štandardov ako kalibračná hviezda, Arcturus a Vega boli vybrané neskôr podľa polohy a jasnosti.

Regulus

Regulus ($\alpha = 10^{\text{h}}08^{\text{min}}22.31^{\text{s}}, \delta = +11^{\circ}58'01.9''$)¹ je hviezda spektrálneho typu B7V, hviezdnej veľkosti 1,34 mag. Je najjasnejšou hviezdou v súhvezdí Leva, v období apríl - máj, kedy bola pozorovaná, kulminuje pred zotmením a klesá k západu.

Arcturus

Arcturus ($\alpha = 14^{\text{h}}15^{\text{min}}39.67^{\text{s}}, \delta = +19^{\circ}10'56.7''$) je najjasnejšou hviezdou v súhvezdí Pastiera a treťou najjasnejšou hviezdou nočnej oblohy. Je to červený obor veľkosti 0 mag spektrálneho typu K1.5III podozrivý z premennosti.

Výhodou Arctura je jeho pohyb po nočnej oblohe v čase medzi 21:00 a 24:00 UT v noci, pretože je blízko kulminačného bodu vysoko na oblohe, takže sa natolko neprejaví svetelné znečistenie.

Nevýhodnou bola kombinácia počasia a fáz Mesiaca počas obdobia merania. Počas dvoch nocí bol Mesiak v poslednej štvrti a tretia noc bola s Mesiacom v prvej štvrti, a ani jedna z nich nemala dobré pozorovacie podmienky z hľadiska oblačnosti.

Vega

Vega ($\alpha = 18^{\text{h}}36^{\text{min}}56.34^{\text{s}}, \delta = +38^{\circ}47'01.3''$) je premenná hviezda spektrálneho typu A0. Je najjasnejšou hviezdou súhvezdia Lýry (hviezda nultej magnitúdy) a piatou najjasnejšou hviezdou oblohy. V máji súhvezdie Lýry stúpa z východnej časti oblohy nízko nad obzorom, takže je možné merať žiarivý tok hviezdy a získať pekný priebeh extinkčnej krivky, ktorá zachytí veľký rozsah vzdušnej hmoty.

Premennosť hviezdy tu nie je na prekážku, pretože ako už bolo spomenuté vyššie, zmena hviezdnej veľkosti Vegy sa pohybuje v stotinách magnitúdy,

¹všetky uvádzané súradnice sú z databázy Aladin a sú vztiahnuté k ekvinokciu J2000.0

a takúto zmenu nebolo možné zaznamenať z viacerých dôvodov. Po prvé, ani v jednu pozorovaciu noc neboli podmienky umožňujúce takúto presnosť, takisto zavážia presnosť meracieho prístroja, stabilita zdroja a chyby pointovania.

Vega je takisto dobrým objektom aj z pohľadu spektrálneho typu, keďže fotometrický systém UBV bol vytvorený tak, aby hviezdy spektrálneho typu A0 na hlavnej postupnosti mali indexy (B-V) a (U-B) rovné nule.

Jedinou nevýhodou tejto voľby je fakt, že súhvezdie Lýry vychádza nad mestom, takže obloha v okolí hviezdy bola znečistená mestským osvetlením.

2.4.2 Získavanie dát

Po zapojení aparatury podľa obr.1.4 a ustálení vysokonapäťového zdroja sa môže začať so samotným meraním. Cieľom je získať hodnotu svetelného toku zvolenej hviezdy I_h v nejakých jednotkách (napríklad prúd, napätie na fotonásobiči, alebo počet zaznamenaných pulzov), rovnako treba zmerať signál pozadia I_p , aby sme mohli určiť čistý signál hviezdy. Je výhodné uvedomiť si, že pokiaľ nemeníme hodnotu napätia, ktorým je fotonásobič napájaný, ani nemeníme clonku, všetky efekty (napríklad temný prúd) sa prejavujú rovnako pri získavaní signálu hviezdy ako aj pozadia a v konečnom dôsledku sa odčítajú.

Po tom, ako sa rozhodneme, či budeme kalibrovať fotonásobič pre fotometrický systém, alebo budeme pracovať bez filtra, si zvolíme sekvenciu krokov. Pre kalibráciu bez filtra budeme jednoducho postupovať

$$I_h, I_p, I_h, \dots$$

pre kalibráciu napríklad systému UBV môžeme zvoliť variantu

$$I_{h_U}, I_{p_U}, I_{h_B}, I_{p_B}, I_{h_V}, I_{p_V} \dots$$

alebo naopak

$$I_{h_U}, I_{h_B}, I_{h_V}, I_{p_U}, I_{p_B}, I_{p_V} \dots$$

Prvý postup by bol korektnejší z hľadiska chyby merania, pretože pozorovacie podmienky sa menia relatívne rýchlo a v ideálnom prípade by sa malo pozadie odčítavať v tom istom čase, ako signál hviezdy. Keďže je však toto nemožné, potom prístup hviezda, pozadie, hviezda je najideálnejší.

Na druhej strane prechádzanie medzi hviezdou a pozadím po každej výmene filtra je veľmi zdĺhavé a často neúmerne predlži meranie. Z tohoto hľadiska je výhodnejšie pracovať podľa druhej sekvencie. Rozdiely medzi

získaním korešpondujúcich hodnôt signálov sú síce niekoľkominútové (2-4 min, záleží na počte filtrov a šikovnosti pozorovateľa), ale týmto spôsobom je možné celkovo získať viac dát.

Treba si ešte ujasniť, čo sa pokladá za hodnotu pozadia. Vo všeobecnosti by to mala byť hodnota signálu v blízkosti hviezdy tak, aby zahŕňala všetky prípadné vedľajšie zdroje nežiadúceho signálu (teda napríklad súputníka malej hviezdnej veľkosti, rovnaké množstvo mesačného svetla, atď). Takýto prípad samozrejme nastane málokedy. Prakticky je možné napríklad určiť si pozadie ako miesto s jednou (ktoroukoľvek) súradnicou líšiaca sa o vhodnú hodnotu a prechádzať medzi týmito dvomi pozíciami pomocou softvéru ovládajúceho ďalekohľad.

Sekvencia v mojej práci bola z technických dôvodov volená ako

$$I_{h_V}, I_{h_B}, I_{h_U}, I_{h_{volne}}, I_{h_{volne}}, I_{h_R}, I_{p_V}, I_{p_B}, I_{p_U}, I_{p_{volne}}, I_{p_{volne}}, I_{p_R} \dots$$

Premeriavala som hviezdu aj v infračervenom filtri, aby som ukázala nízku citlivosť fotokatódy pre túto oblasť a zaradila som do stredu sekvencie dve voľné políčka bez filtrov ako kontrolu správneho prechádzania medzi filtermi.

Samotné meranie prebehlo počas ôsmich nocí v mesiacoch apríl a máj roku 2006. Časový údaj pre každú pozorovaciu noc udáva buď čistý čas merania pre noci, kedy sa pozorovalo, alebo celkový čas strávený oživovaním aparatúry pre noci, kedy z technických dôvodov nebolo možné pozorovať.

8.4/9.4.2006

21:00-00:00 UT – Regulus

Mesiac bol počas tejto noci tri dni za prvou štvrtou, jasná obloha, žiadne cirry, vynikajúci seeing.

Počas tohto prvého skúšobného merania bola celá aparatúra funkčná až na výmenník filtrov, kde nebolo nemožné identifikovať používaný filter, ani jeho polohu voči násobiču. Dáta z tejto noci neboli v práci použité, poslúžili však ako feedback pre posúdenie funkčnosti aparatúry. Pokus zmerať temný prúd skončil na $< 0.0 \mu A$.

20.4/21.4.2006

19:00-00:00 UT

V túto noc boli pozorovacie podmienky výborné. Mesiacu chýbal jeden deň do poslednej štvrte a bolo úplne jasno.

Nastali však problémy s aparatúrou, ktorých príčina nebola odhalená a z tejto noci nie sú žiadne napozorované dáta.

21.4/22.4.2006

20:00-00:00 UT – Regulus, Arcturus

Mesiac bol počas tejto noci v poslednej štvrti, celkovo však boli podmienky horšie ako predchádzajúcu noc. Postupné narastanie oblačnosti ukončilo meranie relatívne skoro, konečne sa však podarilo získať výsledky.

Aparatúra bola funkčná ihneď po zapojení a teda príčina nefunkčnosti z predošlej noci zostala utajená. Výmenník filtrov zostal nefunkčný, meranie prebehlo teda len v jednom filtri pre každú hviezdu (Regulus bol premeraný cez voľné okienko, Arcturus vo filtri V).

22.4/23.4.2006

21:30-01:20 UT – Arcturus

Túto noc bol Mesiac jeden deň za poslednou štvrtou a pozorovacie podmienky boli o trochu lepšie ako predchádzajúcu noc, ale nedosahovali kvalitu noci 20.4/21.4.2006. Ku koncu merania sa znovu začala sťahovať oblačnosť a ukončila pozorovanie.

Bola to posledná noc, kedy ešte nefungoval výmenník filtrov a tentokrát bol Arcturus premeraný najprv cez voľné okienko a následne vo filtri B.

4.5.2006

00:00-01:00 UT – Arcturus

Mesiac sa znovu nachádzal v prvej štvrti a po počiatkovej slabej oblačnosti nastala jasná noc.

Vyskytol sa problém so zdrojom nízkeho napätia (12V) a bola nutná výmena za druhý(15V) zdroj. Po zvládnutí technických problémov bol už Regulus príliš nízko nad obzorom, nasledovalo teda meranie Arctura. Výmenník filtrov bol už v tom čase funkčný, bolo teda možné premeranie Arctura vo všetkých filtroch fotometrického systému UBV(R).

10.5/11.5.2006

19:00-23:00 UT

Táto veľmi jasná noc bola najkrajšia za posledné dva mesiace, a rozhodne najfotometrickejšia v súbore pozorovaných nocí. Malou chybou bol Mesiac, ktorému chýbali len dva dni do splnu.

Nečakane však nastali problémy s aparatúrou a podarilo sa namerať len jedinú sériu Vegy, sériu pozadia už nebolo možné získať – objavila som stu-

dený spoj na výstupnom konektore fotonásobiča, chybu, ktorú nebolo možné odstrániť ešte v danú noc. Výsledky z tejto noci nemohli byť spracované.

11.5/12.5.2006

20:20-22:20 UT – Vega

Mesiacu zostával jeden deň do splnu a celkové podmienky boli značne zhoršené oproti predchádzajúcej noci. Pribúdala nízka lokálna oblačnosť a od 23:00 hodiny nastalo rapidne zhoršenie, ktorého následkom nie je možné spracovať výsledky získané po 24:00.

Na výstup fotonásobiča bol vyrobený nový konektor, ku koncu merania však pribúdali výpadky signálu, pravdepodobne nastala opätovná strata kontaktu, konektor bol na druhý deň opravený. Pridali sa problémy i so softvérom meracieho zariadenia a operačným systémom.

12.5/13.5.2006

20:30-00:30 UT – Vega

V poslednú pozorovaciu noc bol Mesiac v splne, jasnú oblohu kazili len veľký jas Mesiaca a občasné slabé cirry. Jas Mesiaca znásobený jasom oblohy mesta vytvorili relatívne jasné pozadie hviezdy a napomohli identifikácii cirrovitej oblačnosti, ktorú by bez svetla nebolo možné spozorovať.

Konektor na výstupe sa podarilo opraviť a ovládací softvér takisto spolupracoval bez najmenších problémov. Túto noc bolo meranie ukončené len kvôli nevýhodnej pozícii fotometra na ďalekohľade počas kulminácie hviezdy.

2.4.3 Technické problémy

Žiadne pozorovanie sa zrejme nezaobíde bez menších, či väčších technických problémov. V odskúšanom a osvedčenom systéme, ktorý beží dlhý čas, sú už väčšinou tie najväčšie muchy vychytané, a menšie problémy, ktoré sa môžu vyskytnúť, sú väčšinou dobre známe a všetci užívatelia vedia, ako s nimi naložiť a napraviť ich. Pri zostavovaní nového systému sa však problémy predvídať nedajú a vyskytujú sa kumulatívne, takže je niekedy ťažké identifikovať chybnú súčiastku alebo krok, ktoré problém spôsobujú.

Zdroj nízkeho napätia

Počas piatej noci som zaznamenala problém so zdrojom nízkeho napätia. Keďže celá aparátúra zostávala aj mimo meraní v kupole, prepokladanou príčinou nefunkčnosti bola vysoká vlhkosť vzduchu a po výmene zdroja

za nový boli učené opatrenia na zabránenie opakovaného výskytu tohto problému uchovávaním zdroja mimo kupoly.

Ďalšou menšou závadou bol fakt, že dvanásťvoltový zdroj použitý počas prvých štyroch nocí, bol mäkkým zdrojom napätia, to znamená, že nezaťažený síce dáva dobrých 12V, no pri zaťažení vysokonapäťovým zdrojom jeho napätie klesne. Na túto chybu sa prišlo ihneď po začatí merania s novým zdrojom, kedy sa výstupné hodnoty približne strojnásobili. Premeranie oboch zdrojov napätia ukázalo nasledujúce rozdiely vstupného napätia pre fotonásobič:

V_v	V_{12}	V_{15}
500V	389	471
1000V	772	947
1500V	1098	1398
2000V	1253	1544
2500V	1256	1560

kde V_v značí napätie nastavené na vysokonapäťovom zdroji, V_{12} skutočné napätie namerané na výstupe vysokonapäťového zdroja napájaného dvanásťvoltovým zdrojom a V_{15} skutočné napätie namerané na výstupe vysokonapäťového zdroja napájaného pätnásťvoltovým zdrojom. Pri každom meraní sa používalo nastavenie 1500V na vysokonapäťovom zdroji, čo bol dobrý kompromis medzi požiadavkou vysokého napätia a lineárnosťou zdroja.

Výmenník filtrov

Problém s výmenníkom filtrov bol identifikovaný ihneď na začiatku práce, jeho riešenie však na seba nechalo čakať dlhšie. Výmenník je tvaru kvetu, kde je v pozícii lupiekov šesť kruhových okienok s filtrami. Výmenník je uchytený v strede, aby sa ním mohlo voľne otáčať. Obvod kvetu je ozubené koliesko, ktorého protikoliesko je súčasťou otočného šróbu. Tento teda prevádza svoj pohyb na otáčanie kvetu.

Tento spôsob výmeny filtrov už napovedá, čo bude problémom. Jednak nie je spôsob, ktorým by sa určilo, ktorý filter je práve používaný a ani sa nedá zaručiť, že je filter správne nasadený (môže nastať situácia, kedy sa stojí medzi dvoma filtrami, alebo filter zostane čiastočne vysunutý a zvyšok priechodu zaujme kovová vsádka filtra).

Možnými riešeniami by boli napríklad krokový motorček, alebo drôtená spúšť, obe tieto možnosti však predpokladajú zabudovaný element, ktorý by slúžil ako kontrola správnej polohy filtra.

Riešenie, ktoré sa nakoniec realizovalo, bolo veľmi jednoduché, ale ako sa ukázalo aj účinné. Otočný šrób sa vysústružil s veľkým polomerom hlavičky, takže sa mohla na optickej hlave označiť základná poloha, a potom na šróbe všetky ostatné polohy filtrov. Ide zhruba o štvorpätinové otočenie šróbu z nulovej polohy do každého ďalšieho filtra. Sekvencia pre základný pohyb je V, B, U, voľné, voľné, R v smere hodinových ručičiek, potom v protismere naspäť R, voľné, voľné, U, B, V. Zradnou sa môže stať situácia, kedy sa otočenie šróbu robí príliš rýchlo, takže sa nakoniec nedá zistiť, koľkokrát bolo so šróbom pootočené.

Výstupný konektor na fotonásobiči

Na výstupný konektor na fotonásobiči nebolo možné zohnať protikus, meranie teda zo začiatku prebiehalo s dvoma vodičmi vedúcimi z meracieho prístroja upevnenými na výstupnom konektore krokodýlkami. Počas piatej noci sa však pracovalo s ďalekohľadom v takej polohe, že krokodýlky nemali dobrý kontakt a meranie bolo úplne nemožné. Keďže protikus ku výstupnému konektoru zohnať možné nebolo, musela sa celá časť nahradiť novým kusom. Priemer tohto bol približne o 2 mm väčší ako priemer starého kusu, takže po pripájkovaní konektor aj s koaxiálnym káblom visia von z päťice.

Vodiče

Počas jednotlivých meraní bolo treba postupne povymieňať všetky vodiče použité v aparátúre, ktoré sa z nevysvetliteľných príčin jeden po druhom stávali nepoužiteľnými.

Merací prístroj

Problém s meracím prístrojom sa vyskytol dvakrát, najprv pri zostavovaní aparátúry a potom počas siedmej noci.

Problém pri zostavovaní aparátúry spočíval v tom, že po zapojení obvodu (obr.1.4) ešte s fotonásobičom nepripojeným k ďalekohľadu, výsledný signál na meracom prístroji bol $0\mu A$. Ako prvú som vylúčila chybu v meracom prístroji použitím iného prístroja. Nasledovalo premeranie všetkých súčiastok tj. zdroj malého napätia, vysokonapäťový zdroj, päťica fotonásobiča (so všetkými štrnástimi odpormi), i všetky vodiče. Kontrola a výmena fotonásobiča, päťice ani vodičov problém nevyriešili, bola teda niekoľkokrát prekontrolovaná schéma a samotné zapojenie. Príčinou sa nakoniec ukázala byť pretavená ampérová poistka na oboch meracích prístrojoch.

Počas siedmej noci merací prístroj hodnoty síce ukazoval, ale neposielal ich do počítača. Táto chyba bola jednoducho odstránená výmenou batérie prístroja, ovládací softvér však túto situáciu nezvládol a aj naďalej odmietal komunikáciu s meracím prístrojom.

Pozn: pre niektoré časti tejto kapitoly boli podkladom zdroje [1] a [4].

Kapitola 3

Spracovanie a analýza dát

V tejto kapitole sa budem venovať postupu prípravy dát a ich spracovaniu, ukázaná bude grafická reprezentácia extinkčných kriviek a uvedené budú dôležité výsledky, ktorých diskusii venujem predposlednú časť tejto kapitoly. Na záver spomeniem niektoré efekty ovplyvňujúce meranie ako také, a ich vplyv na konečné výsledky.

3.1 Postup spracovania dát

Spracovanie dát môže prebehnúť až po predpripravení jednotlivých súborov hodnôt. Predpríprava spočíva v rozsekaní súborov s nameranými dátami na súbory obsahujúce dáta len v jednotlivých filtroch a vyradenie dát, ktoré boli získané počas výmeny jednotlivých filtrov.

Takéto súbory s hodnotami hviezdy sa potom nechajú prejsť programom, ktorý zintegruje dobu merania na desať sekúnd z pôvodnej jednej sekundy (slúži na vyhladenie nerovností hodnôt), naopak hodnoty so signálom pozadia sa priemerujú pre celú dĺžku trvania jedného merania (samozrejme len v jednom filtri).

Poslednou úpravou je potom odčítanie signálu pozadia od každej korešpondujúcej hodnoty zintegrovaného signálu hviezdy.

Súbor predpripravených dát jednej série hviezdy (kompletná séria filtrov) môže vyzerat' napríklad takto:

$I_h [\mu A]$	t [UT]
2.42	00:31:25
2.56	00:31:35
6.34	00:30:54
6.18	00:31:04
10.9	00:31:49
11.1	00:31:59
.	.
.	.

K dispozícii je teda informácia o žiarivom toku hviezdy v inštrumentálnych jednotkách a časový údaj tohto toku. Časový údaj nám udáva presnú pozíciu telesa na nočnej oblohe. Pomocou tejto informácie je možné vypočítať hodinový uhol objektu, ktorý je potrebné poznať pre výpočet vzdušnej hmoty. Pre výpočet hodinového uhlu potrebujeme poznať hviezdny čas (prepočet slnečného času na hviezdny čas je popísaný v mnohých knižkách, rovnako ako aj v astronomickej ročenke [3], ktorá obsahuje aj dôležité informácie pre jeho výpočet pre každý deň v danom roku). Je dôležité zapamätať si, že pokiaľ sa pracuje s hviezdny časom, prevod z miestneho (slnečného) času na UT je nevyhnutný.

Prevod hodnoty žiarivého toku hviezdy z inštrumentálnych jednotiek na magnitúdy nie je možné urobiť inak, ako použitím Pogsonovej rovnice $m_{obs} = -2.5 \log I$. V nej m_{obs} je pozorovaná inštrumentálna hviezdna veľkosť a I je signál hviezdy, ktorý bude v sebe uchovávať informáciu o napätí dodávanom vysokonapäťovým zdrojom. Toto číslo takisto charakterizuje konkrétny fotonásobič, na ktorom sa kalibrácia prevádza, preto spolu s výmenou detektora za iný je potrebné znovu zopakovať kalibráciu.

Pozorovaná inštrumentálna hviezdna veľkosť m_{obs} je takisto zahrnutá do vzťahu, ktorý udáva súvislosť medzi extinkčným koeficientom a inštrumentálnou hviezdou veľkosťou (odsek 2.1.1). Spojením týchto dvoch závislostí vznikne vzťah, ktorý som použila pre lineárnu regresiu vynesenej závislosti inštrumentálnej hviezdnej veľkosti na vzdušnej hmote, $y = ax + b$, kde x je vzdušná hmota a y inštrumentálna hviezdna veľkosť dá a extinkčný koeficient a b inštrumentálna hviezdna veľkosť. Rozdiel inštrumentálnej a katalógovej hviezdnej veľkosti je kalibračná konštanta.

Kalibráciou sa myslí premeranie fotometrickej štandardy, ktorej hviezdnu veľkosť poznáme, určenie hodnoty extinkčného koeficientu pre danú noc a

určenie kalibračnej konštanty. Získanie týchto údajov umožňuje potom premeranie akejkoľvek hviezdy a určenie jej hviezdnej veľkosti v danom filtri.

Pozn: pre niektoré časti tejto kapitoly boli podkladom zdroje [1] a [2].

3.2 Analýza dát

Zo všetkých spracovaných extinkčných kriviek som vybrala nasledujúcich šesť. V prvých štyroch som sa snažila o výber najfotometrickejších dát, piata krivka zastupuje krivky, ktoré nie sú vhodné na finálne spracovanie z dôvodu zlých pozorovacích podmienok, ktoré znehodnotili meranie a nakoniec posledná šiesta krivka ilustruje náhodné javy, ktoré sa pri fotometrii môžu vyskytnúť. Zvyšné krivky získané počas jednotlivých meraní patria výhradne do tej istej kategórie, ako piata krivka.

3.2.1 Extinkčné krivky, výsledky a diskusia

krivka 1

4.5.2006

Arcturus

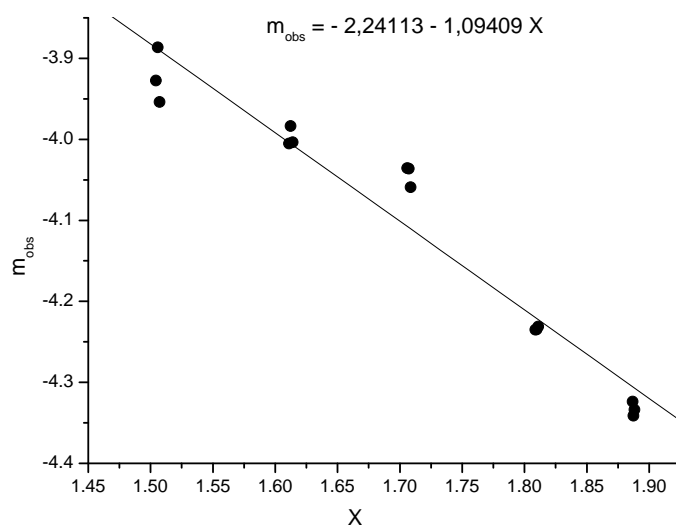
Filter V

Po spracovaní meraní je vidno, že noc 4.5.2006 bola najlepšia zo súboru nocí, kedy sa podarilo získať dáta. Jasná a čistá obloha bez okom viditeľných i neviditeľných cirrov bola výborným podkladom pre meranie Arctura.

Jednotlivé body v grafe majú jednoznačnú tendenciu, mínusom je jedine slabé pokrytie rozsahu vzdušnej hmoty, nakoľko pozorovanie bolo z technických príčin možné len po obmedzenú dobu.

Extinkčný koeficient k_λ vo filtri V bol určený ako (1.09 ± 0.08) a inštrumentálna pozorovaná hviezdna veľkosť Arctura (-2.24 ± 0.13) mag. Na katalógovú hviezdnu veľkosť $m = -0.04$ mag ho prevedieme spolu s určením kalibračnej konštanty ($m_k = 2.20 \pm 0.13$) mag.

Hodnota extinkčného koeficientu je relatívne veľká, považujem to však skôr za reálny výsledok ako chybu merania, nakoľko jednotlivé hodnoty dobre súhlasia s preloženou priamkou. Kalibračná konštanta určuje rozdiel medzi vypočítanou inštrumentálnou hviezdou veľkosťou a katalógovou hodnotou, tento prepočet je potrebné urobiť za účelom zosúhlasenia kalibrácie so štandardným systémom UBV.



Obrázek 3.1. 4.5.2006 Arcturus vo filtri V

krivka 2

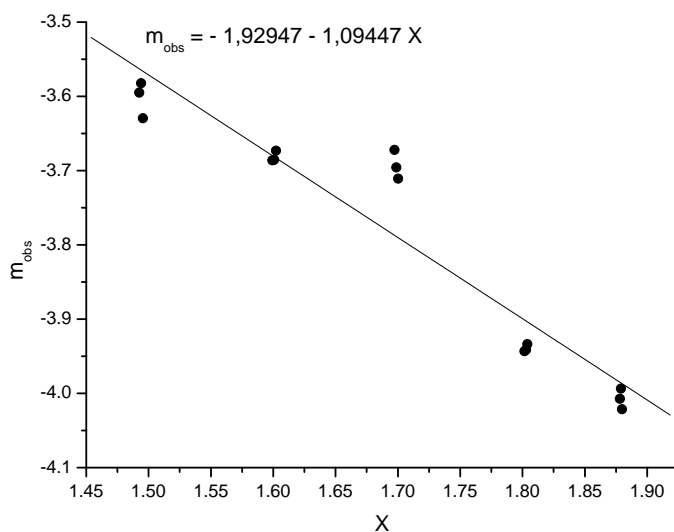
4.5.2006

Arcturus

Filter B

Extinkčný koeficient k_λ vo filtri B bol určený ako (1.09 ± 0.10) a inštrumentálna pozorovaná hviezdna veľkosť Arctura (-1.93 ± 0.18) mag. Na katalógovú hviezdnu veľkosť $m = 1.19$ mag ho prevedieme spolu s určením kalibračnej konštanty ($m_k = 3.10 \pm 0.16$) mag.

Extinkcia prejavujúca sa rozdielne v rôznych častiach spektra vykazuje rôzne extinkčné koeficienty v každom filtri systému UBV. Určenie koeficientu na rovnakú hodnotu v oboch filtroch, V i B, $k_\lambda = 1.09$ je v tomto prípade náhodné. Rovnako môže zavážiť fakt, že som zanedbala závislosť extinkčného koeficientu v modrom obore na farbe hviezdy. Toto zanedbanie však plynie z dôvodu nedostatku vhodných dát (kalibráciu je potrebné robiť v jednu noc na dvoch hviezdach s rozdielnym farebným indexom, ale žiadna z nocí, počas ktorých som robila meranie za týmto účelom nebola kvôli nepriaznivým pozorovacím podmienkam vhodná na spracovanie).



Obrázek 3.2. 4.5.2006 Arcturus vo filtri B

krivka 3

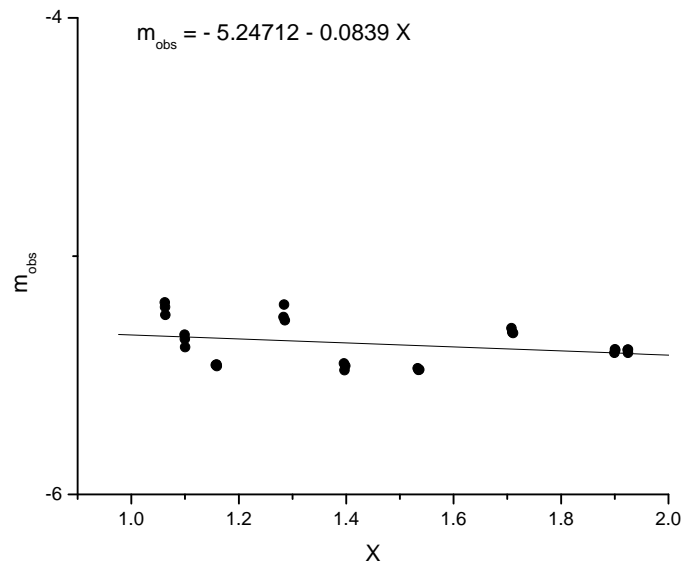
12/13.5.2006

Vega

Filter V

Táto noc bola druhou najlepšou pozorovacou nocou, počas ktorej sa podarilo nazbierať dáta. Vo viditeľnom obore je vidno veľmi dobrý súhlas nameraných hodnôt s lineárnou regresiou, ktorá bola na spracovanie výsledkov použitá. Celková tendencia krivky je správna, myslím si však, že extinkčný koeficient je podhodnotený.

Extinkčný koeficient k_λ vo filtri V bol určený na (0.08 ± 0.05) a inštrumentálna pozorovaná hviezdna veľkosť Vegy (-5.25 ± 0.08) mag. Na katalógovú hviezdnu veľkosť $m = 0.03$ mag ho prevedieme spolu s určením kalibračnej konštanty ($m_k = 5.28 \pm 0.08$) mag.



Obrázek 3.3. 12/13.5.2006 Vega vo filtri V

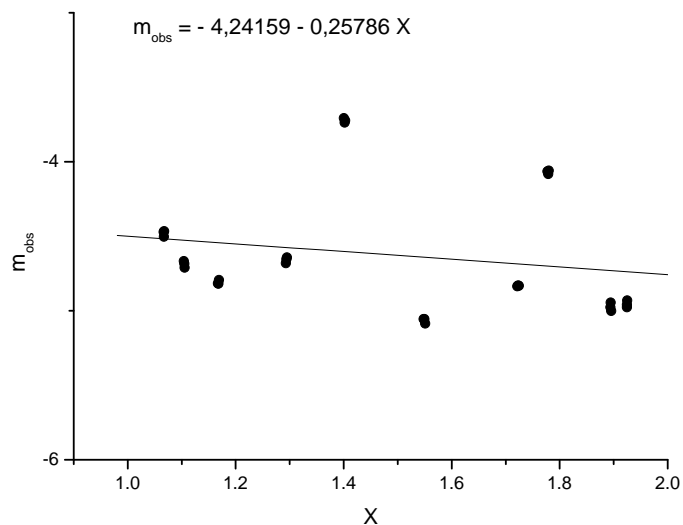
krivka 4

12/13.5.2006

Vega

Filter U

Pozorovanie v ultrafialovej oblasti bolo už o dosť slabšie, ako vo viditeľnom obore, hodnoty majú relatívne veľký rozptyl a hodnovernosť tohoto merania je veľmi ľahko spochybniteľná (inštrumentálna pozorovaná hviezdna veľkosť $m_{obs} = (-4.24 \pm 0.37)$ mag je síce rozumná, no extinkčný koeficient $k_{\lambda} = (0.26 \pm 0.24)$ mag je určený s chybou viac ako deväťdesiat percent). Tendencia hodnôt vôbec nie je jednoznačná, v strede sa rozptyl zväčšuje, ku koncu merania sa hodnoty znova vracajú k pomyselnej správnej extinkčnej krivke, čo by ukazovalo na striedavú oblačnosť – nepriehľadnosť v ultrafialovej oblasti. Takisto svoj podiel na horších pozorovaniach podmienkach a teda aj výsledkoch v túto noc mal Mesiac, ktorý sa nachádzal v splne.



Obrázek 3.4. 12/13.5.2006 Vega vo filtri U

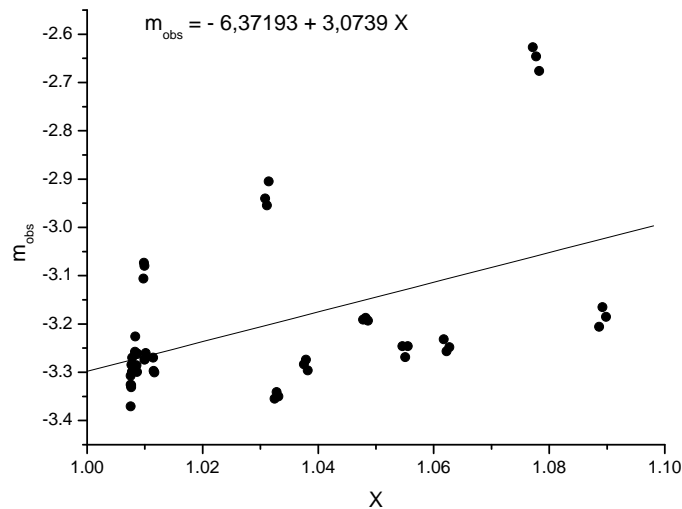
krivka 5

21/22.4.2006

Regulus

Filter voľné

Táto noc rozhodne nebola už na prvý pohľad vhodná na fotoelektrickú fotometriu, okom viditeľná oblačnosť znemožňovala namerať zmysluplné dáta. Extinkčná krivka Regula nemôže byť vyhodnotená z dvoch príčin: jednak je vidieť, že hodnoty sú príliš zašumené (zrejme boli prítomné i okom neviditeľné cirry, ktoré kazili podmienky v čase, kedy viditeľná oblačnosť ustúpila a prevádzala som meranie) a takisto trend krivky je úplne nesprávny. Pozorovaná inštrumentálna hviezdna veľkosť bola z extinkčnej krivky určená ako (-6.37 ± 0.88) mag. Extinkčný koeficient podľa tohto merania je záporné číslo (-3.07 ± 0.85) mag, teda extinkcia by musela byť javom zosilujúcim a nie zoslabujúcim svetelný signál hviezdy, čo je nezmysel. Podľa popisu noci (viď 2.4.2) môžeme usudzovať, že veľký rozptyl a nesprávny trend krivka získala kvôli narastajúcej oblačnosti.



Obrázek 3.5. 21/22.4.2006 Regulus v integrálnom obore

krivka 6

12/13.5.2006

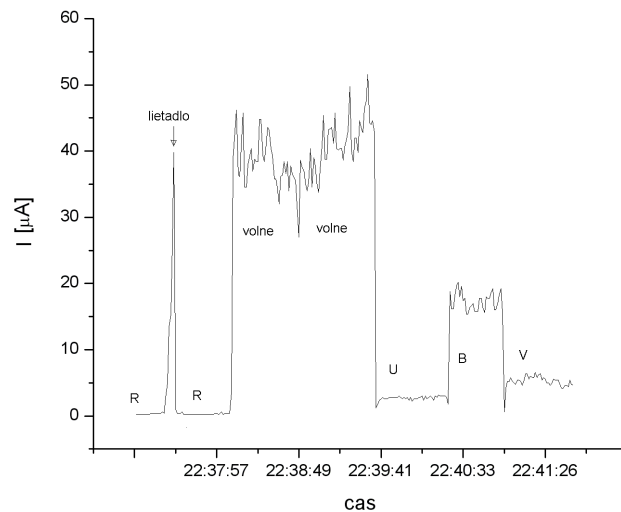
pozadie Vegy

Filter R, voľné, voľné, U, B, V

Táto krivka na rozdiel od predchádzajúcich nie je krivkou žiadnej hviezdy, je to nasnímané pozadie hviezdy Vega z noci 12/13.5.2006 vo všetkých filtroch. Už na prvý pohľad je zrejmé, že vo filtri R sa niečo udialo.

Signál z obvyklej hodnoty $0.4 \mu A$ vystúpil na hodnotu $40.0 \mu A$ a znovu sa vrátil na pôvodné hodnoty asi v priebehu piatich sekúnd. Pík nie je ostrý (čo by zodpovedalo hot pixelu), ale má gaussovský priebeh, čo značí, že počas zbierania signálu oblohy cez snímané pole preletel objekt, ktorého vyžarovanie v blízkej infračervenej oblasti je naozaj veľmi značné. V porovnaní s obvyklou hodnotou Vegy vo filtri R, $2 \mu A$, je zrejmé, že príčinou prudkého nárastu signálu nemohla byť žiadna hviezda (v okolí hviezdy nie je žiaden iný silný objekt žiarenia).

Možným vysvetlením (a tiež tým, ku ktorému sa prikláňam) je prelet lietadla cez fotometrované pole.



Obrázek 3.6. 12/13.5.2006 pole pozadia Vegy

3.2.2 Rušivé vplyvy pri pozorovaní

Zvyšné krivky získané počas jednotlivých meraní patria výhradne do tej istej kategórie, ako piata krivka. Ich výpovedná hodnota nie je vysoká, čo sa týka samotného premeriavaného objektu, dajú sa z nich však vyvodiť dôležité závery ohľadom výberu pozorovacích nocí.

Vo všetkých grafoch je prítomný veľký rozptyl hodnôt. Keďže ide vlastne o extinkčné krivky, mali by tieto byť lineárne klesajúce, to sa však z niektorých nedá vôbec vypozorovať. Takéto zašumenie merania môže byť spôsobené tromi faktormi: fáza Mesiaca, oblačnosť, lokalita observatória. Budem sa každému faktoru venovať postupne v nasledujúcich odsekoch.

Mesiac

Mesačné fázy majú na fotometriu veľký vplyv. Osvetlenie oblohy sa počas merania mení nerovnomerne tak rýchlo, ako sa Mesiac pohybuje po nočnej oblohe. Počas zbierania signálu tieto zmeny spôsobujú nárast alebo pokles signálu (v dôsledku relatívneho pohybu Mesiaca a objektu) a zmena nie je v žiadnom časovom okamihu rovnaká. Chyby sa dopúšťame najmä pri spracovaní merania odčítaním hodnôt pozadia objektu od signálu objektu, ktorý má v skutočnosti už iné hodnoty pozadia. Získavame mylný obraz o situácii: jasnosť hviezd je nadhodnotená alebo podhodnotená.

Obláčnosť

Fotoelektrická fotometria, ak od nej očakávame hodnotné výsledky, by sa mala prevádzať len za jasného počasia, to znamená bez prítomnosti oblačnosti. Problémom v tejto požiadavke sa ukazuje napríklad nedostatok jasných nocí v mieste pozorovania, alebo neschopnosť označiť danú noc za jasnú.

Nedostatok jasných nocí je problém, s ktorým sa po postavení hvezdárne už nedá nič robiť, jediným spôsobom, ako získať aspoň nejaké dáta, je využiť každú vhodnú noc za každú cenu.

Jasná noc (zhoduje sa s definíciou fotometrickej noci) je noc, kedy nevidíme žiadnu oblačnosť, nie sú prítomné okom neviditeľné cirry (toto je ťažko zaručiť pohľadom na oblohu) a Mesiac je pokiaľ možno čo najbližšie k novu. Problém môže nastať pri bezmesačnej noci, kedy vizuálne okom zhodnotíme oblohu ako fotometrickú, a po celonočnom meraní pri svitaní zistíme, že obloha je potiahnutá zákalom a namerané dáta môžeme rovno vymazať.

Cirrovitá oblačnosť spôsobuje meniaci sa signál objektu, ktorý sa zoslabuje pri priamom prechode chumáčov oblaku popred objekt, alebo zosilňuje v prípade lokálneho okna v oblaku. Naopak pri zbieraní signálu pozadia

prechod oblaku môže spôsobiť niekoľkonásobný nárast a lokálne okno pokles hodnôt. Keďže zbieranie signálu objektu a pozadia sa líši zhruba o tri minúty, je zrejmé, že oba budú postihnuté inak vplyvom oblačnosti. Problém nastane pri spracovaní, kde sa od vyintegrovaného signálu objektu odčítajú hodnoty pozadia. Môže sa stať, že od jasnej hviezdy odčítame mrak, alebo naopak, od zamračenej hviezdy odčítame jasné pozadie. Situácia, kedy sú oba signály zaznamenané za jasných podmienok, je ideálna a žiadúca.

Z hľadiska výberu vhodných pozorovacích nocí musíme však oblačnosť a fázy Mesiaca zhodnotiť spolu, pretože kým i za splnu možno za určitých podmienok získať dáta s veľkou výpovednou hodnotou, a za slabej cirrovitej oblačnosti by sme dokázali vystihnúť čas, kedy nemerať, spojením týchto dvoch nepriaznivých okolností sa pre pozorovanie vytvoria úplne nevhodné podmienky.

Počas zbierania dát pre túto prácu som mala celkovo tri fotometrické noci (počas dvoch nefungovala aparátúra, treťou bola noc 4.5.2006), ďalšie dve noci mali zhoršené podmienky, ale niektoré dáta sú reprezentovateľné. Tri noci boli absolútne nevyhovujúce, boli kombináciou veľkého Mesiaca a slabej oblačnosti a hodnoty sú priveľmi rozptýlené a po spracovaní nedávajú požadované výsledky.

Lokalita – poloha observatória

Poloha observatória je dôležitá z hľadiska polohy voči mestu, či inému zdroju veľkého svetelného znečistenia. Svetelný smog je jedným z najnepriaznivejších faktorov, ktoré ovplyvňujú fotometriu, ak už je však observatórium postavené, s týmto problémom je treba zmieriť sa a snažiť sa o riešenie iným spôsobom. Tým je napríklad vhodná voľba objektov, a to síce pozorovanie objektov nachádzajúcich sa na menej znečistených častiach oblohy.

V mojom prípade Arcturus a Regulus boli dobrou voľbou, oba sa nachádzajú nad časťou mesta, ktorá toľko netrpí svetelným smogom, navyše Arcturus sa vždy nachádzal vysoko na oblohe v blízkosti svojho kulminačného bodu.

Oproti tomu Vega je hviezda, ktorá na jar vychádza nad severovýchodným obzorom, je teda priamo nad mestom, najviac znečistenou časťou oblohy. V jej prípade bolo cieľom získať extinkčnú krivku hviezdy pre čo najväčší možný rozsah vzdušnej hmoty a pre tento cieľ bola Vega najvhodnejším objektom: zvečera vychádza relatívne nízko nad obzorom a rýchlo stúpa.

Kapitola 4

Záver

V teoretickej časti tejto práce som popísala princípy a vlastnosti fotonásobiča i všetkých prvkov použitých v meracej aparátúre.

V praktickej časti tejto práce som zostavila aparátúru pre meranie (viď obrazová príloha) fotoelektrickej fotometrie a počas ôsmich nocí som premerala tri vybrané hviezdy.

Počas spracovania dát získaných počas pozorovacích nocí som vybrala najvhodnejšie dáta a pomocou extinkčných kriviek som určila extinkčné koeficienty pre dané noci v jednotlivých filtroch a takisto som určila kalibračné konštanty premeraných hviezd v jednotlivých filtroch.

Kalibráciu ako takú (skalibrovanie inštrumentálneho systému so štandardným systémom UBV) nebolo možné uskutočniť z viacerých dôvodov. Hlavným problémom bol nedostatok fotometrických nocí. Pridelený pozorovací čas v období apríl – máj 2006 bol využitý naplno, jasných nocí však bolo málo a z nich fungovala aparátúra len v ďalšej malej časti. Oblačnosť komplikovala meranie po celý čas. Kým okom viditeľné mraky bolo možné vidieť a zastaviť na potrebný čas meranie, okom neviditeľné cirry som objavila vždy až pri vyhodnocovaní nameraných dát, kedy už bolo neskoro na akýkoľvek počin.

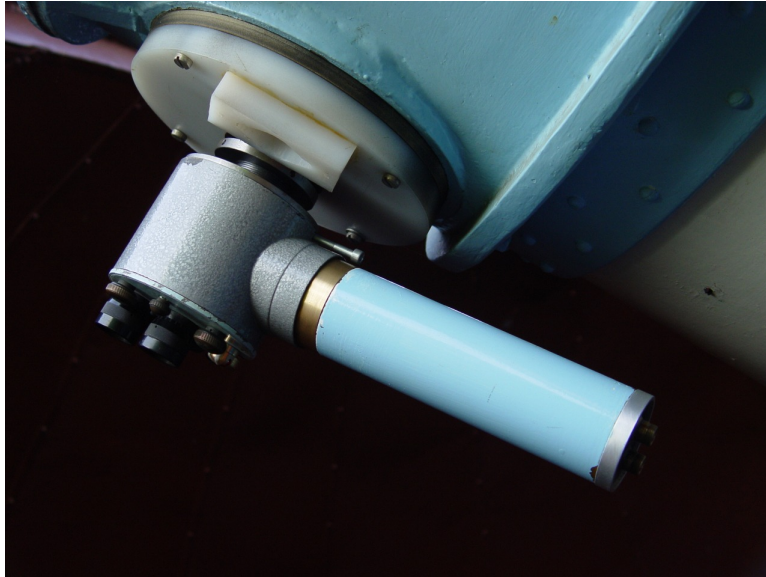
Ďalším problémom bola kolízia fotometrických nocí s veľkým Mesiacom (za novu bolo vždy oblačno, jasná obloha bola vždy okolo splnu Mesiaca). Jas Mesiaca osvetľoval pole nerovnomerne a svojím pohybom vnášal do merania ďalšiu chybu. Najhoršou kombináciou však boli dve noci s Mesiacom v tretej štvrti s občasnou oblačnosťou a ako sa neskôr ukázalo, aj s cirrovitou oblačnosťou. Z týchto dvoch nocí nemohli byť spracované vôbec žiadne dáta.

V neposlednom rade hrala veľkú úlohu pozícia observatória voči mestu. Svetelný smog mesta Brna sa odrazil hlavne na extinkčných krivkách Vegy.

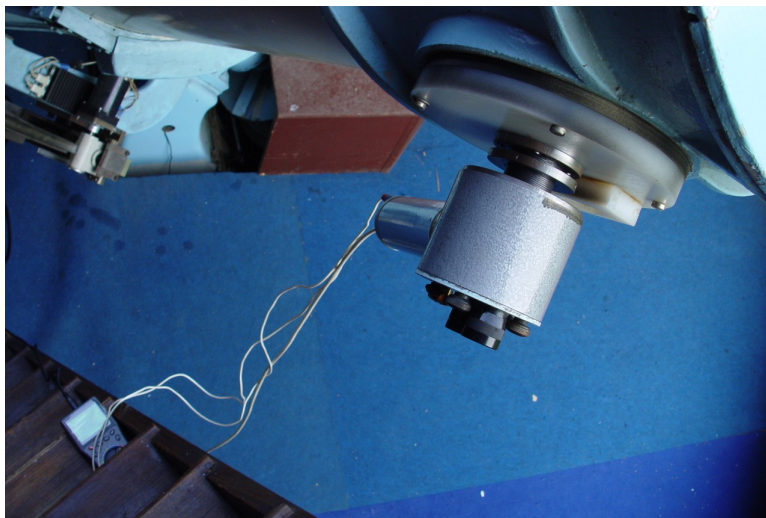
Obrazová príloha



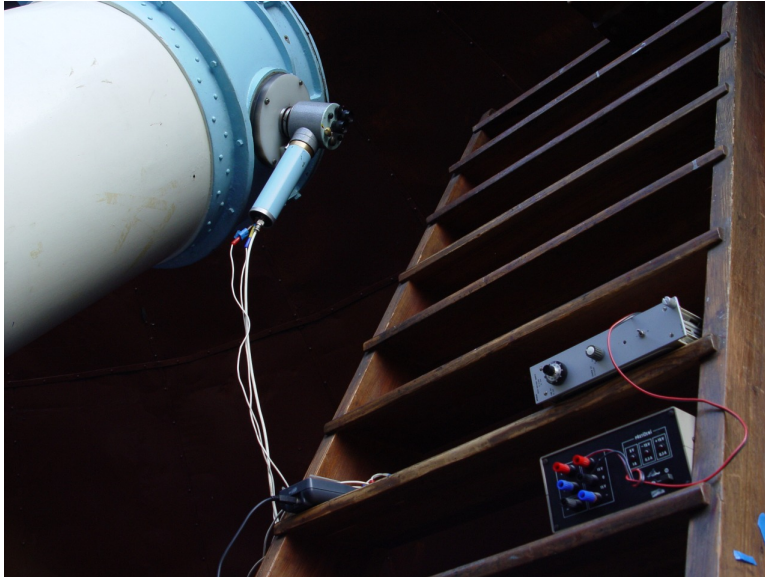
Obrázek 4.1. Optická hlava a fotonásobič v Newtonovom ohnisku



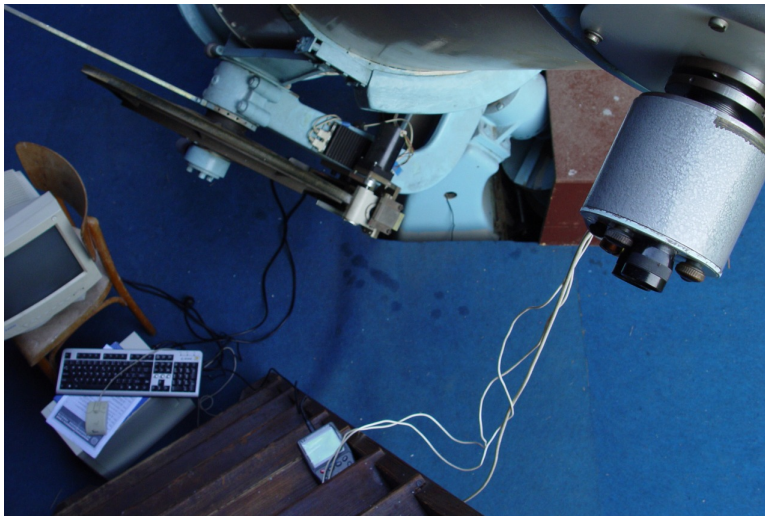
Obrázek 4.2. Optická hlava a fotonásobič



Obrázek 4.3. Optická hlava, fotonásobič a multimeter



Obrázek 4.4. Optická hlava, fotonásobič, multimeter a zdroje



Obrázek 4.5. Optická hlava, fotonásobič, multimeter a počítač

Literatúra

- [1] Hall, Douglas S., Genet, Russel M. *Photoelectric photometry of variable stars*. Richmond, 1988
- [2] Wolf, M., a kol. *Astronomická příručka*. Praha, Academia 1992
- [3] Příhoda, a kol. *Hvězdářská ročenka 2006*. Hvězdárna a planetárium hl. m. Prahy a Astronomický ústav AV ČR Praha 2005
- [4] Kleczek, J. *Velká encyklopedie vesmíru*. Praha, Academia 2002
- [5] Hacar, B. *Úvod do obecné astronomie*. Praha, Státní pedagogické nakladatelství 1963
- [6] Široký, J., Široká, M. *Základy astronomie v příkladech*. Praha, Státní pedagogické nakladatelství 1972
- [7] Mikulášek, Z. *Obecná astronomie*. studijný materiál
- [8] Vanýsek, V. *Základy astronomie a astrofyziky*. Praha, Academia 1980
- [9] Sterken, Chr., Manfroid, J. *Astronomical Photometry*. Dordrecht, Kluwer Academic Publishers 1992
- [10] Tesař, C. *Praktikum 3*. studijný materiál
- [11] <http://www.hamamatsu.com>
- [12] <http://simbad.u-strasbg.fr>