

MASARYKOVA UNIVERZITA

Přírodovědecká fakulta

Ústav teoretické fyziky a astrofyziky



BAKALÁRSKA PRÁCA

Fotometrická kalibrácia detektorov veľmi nízkych svetelných tokov

Michal Almáši

Brno 2011

Prehlasujem, že som svoju bakalársku prácu vypracoval samostatne a výhradne s použitím citovaných a uvedených prameňov. Súhlasím so zapožičiavaním a zverejňovaním práce.

V Brne dňa

Michal Almáši

.....

Podakovanie

Touto cestou by som chcel poďakovať vedúcemu mojej práce Filipovi Hrochovi za odbornú pomoc a za konštruktívne vedenie, môjmu konzultantovi Jeníkovi Hollanovi za cenné rady a zapožičanie meracích prístrojov a Filipovi Münzovi za technické zabezpečenie. Moja veľká vďaka patrí aj Honzovi Páralovi, Lucii Almášiovej, Štefanovi Novosadovi a všetkým ďalším, ktorí so mnou ochotne spolupracovali pri písaní mojej bakalárskej práce.

Abstrakt

Základom práce je meranie vhodných kalibračných zdrojov svetla s vybranými prístrojmi ako jasomer, digitálny fotoaparát, luxmeter a fotovoltaiický článok; precízne spracovanie a porovnanie výsledkov s meraniami počas skutočných atmosférických podmienok. Táto práca popisuje pozitívne aj negatívne vplyvy na citlivosť prístrojov pri rôznej teplote, úrovniach jasů alebo uhle otočenia od zdroja svetla. Zároveň sa zameriava na testovanie ich vlastností pri stmievaní a meraní jasů nočnej oblohy. Čiastkovým cieľom práce bolo zistiť vplyv jasnosti Mesiaca na kvalitu pozorovaní hviezdnej oblohy.

Kľúčové slová:

fotometrická kalibrácia, SQM, digitálny fotoaparát, luxmeter, fotovoltaiický článok

Abstract

The basis of the work is measuring of suitable calibration light sources with selected photometric devices such as Sky Quality Meter, Lux Meter, digital camera and solar panel; accurate treatment and comparison of results with measurements during real atmospheric conditions. This work describes positive and negative influences on detectors' sensitivity in different temperature, intensity of brightness or directional angle from light sources. Simultaneously it aims to test their properties during darkfall and measuring of night sky brightness. Partial goal of the work was to analyze influence of the Moon brightness on the quality of observation of the night sky.

Key words:

photometric calibration, SQM, digital camera, Lux Meter, solar panel

Obsah

1. Úvod	6
2. Fotometrická kalibrácia	7
2.1 Základné fotometrické veličiny	8
2.1.1 Svetelná energia	8
2.1.2 Svetelný tok	8
2.1.3 Svietivosť	9
2.1.4 Intenzita osvetlenia	10
2.1.5 Jas	11
2.2 Ľudské oko a jeho vlastnosti	13
2.2.1 Typy videnia	13
2.2.2 Spektrálna citlivosť oka	14
2.3 Kalibračné zdroje svetla	16
3. Detektory nízkych svetelných tokov	18
3.1 Polovodičové štruktúry	19
3.1.1 Vlastný a prímesový polovo dič	19
3.1.2 P - N prechod	20
3.1.3 Fotoelektrický jav	22
3.2 Digitálny fotoaparát	23
3.2.1 Nábojovo viazané štruktúry	23
3.2.2 Zachovanie, čítanie a prenos informácie	24
3.2.3 Citlivosť a účinnosť CCD	27
3.2.4 Šum v CCD kamerách	27
3.2.5 Farebné systémy	28
3.2.6 Formáty snímkov	28
3.3 Luxmeter	31
3.3.1 Princíp činnosti a vlastnosti	31
3.3.2 Citlivosť a účinnosť luxmetra	32
3.3.3 Chyby luxmetra	33
3.4 Sky Quality Meter	34
3.4.1 Princíp činnosti a vlastnosti	35
3.4.2 Citlivosť a účinnosť SQM	35
3.4.3 Chyby merania	36
3.5 Fotovoltaický článok	38
3.5.1 Princíp činnosti a vlastnosti	38
3.5.2 Citlivosť a účinnosť fotočlánku	39
3.5.3 Chyby merania	42

4. Praktická fotometrická kalibrácia	43
4.1 Meranie smerovej charakteristiky	43
4.1.1 Smerová charakteristika detektorov	44
4.2 Meranie teplotnej závislosti	47
4.2.1 Teplotná závislosť detektorov	48
4.3 Meranie premenlivej jasnosti	52
4.3.1 Citlivosť detektorov na zmenu jasnosti	52
4.4 Vplyv Mesiaca na pozorovanie	54
4.4.1 Citlivosť detektorov pri splne	54
4.5 Meranie jasnu neba fotoaparátom	57
4.5.1 Porovnanie všetkých detektorov	58
5. Záverečné zhrnutie	60
Použitá literatúra	62
Použitá obrazová literatúra	63

Kapitola 1

Úvod

Jedna zo základných úloh astronomickej fotometrie spočíva v kalibrácii detektorov nízkych svetelných tokov v oblastiach viditeľnej časti spektra s prihliadnutím na spektrálnu citlivosť ľudského oka. Takto kalibrované detektory môžu mať rozsiahle aplikácie v osvetľovacej technike alebo v environmentálnych štúdiách tzv. svetelného znečistenia apod. Cieľom práce bolo vyhodnotenie a vzájomné porovnanie citlivosti detektorov používaných na astronomické účely. Aby boli podmienky pre všetky detektory rovnaké a vždy sa menila iba jedna z nich, jednotlivé detektory sa najprv skúšobne merali a kalibrovali na niekoľkých svetelných zdrojoch a následne sa porovnávala ich citlivosť pri skutočných atmosférických podmienkach.

V druhej kapitole tejto práce som uviedol základné fotometrické veličiny a jednotky, popísal som vlastnosti ľudského oka ako základného detektora svetla a opísal som vlastnosti kalibračných zdrojov, ktoré boli používané pri meraniach.

V tretej kapitole som uviedol fyzikálny princíp, stavbu, frekvenčné obmedzenia, spektrálnu citlivosť a účinnosť jednotlivých detektorov pri rôznych podmienkach. Objasnil som fotoelektrický jav a vlastnosti polovodičových snímačov, na základe ktorých fungujú všetky kalibrované detektory.

V štvrtej kapitole som popísal metódy meraní, zmeral som smerové a teplotné charakteristiky pre každý detektor a pomocou takto skalibrovaných prístrojov som skúmal jas hviezdnej oblohy javy ako napríklad stmievanie alebo vplyv Mesiaca na kvalitu pozorovania.

V piatej záverečnej kapitole som zhrnul pozitívne aj negatívne vlastnosti každého prístroja, moje skúsenosti pri meraniach a uviedol som niekoľko nápadov na hlbšiu analýzu prístrojov na meranie nízkych svetelných tokov a ich presnej kalibrácie, ktoré by sa mohli v budúcnosti realizovať.

Kapitola 2

Fotometrická kalibrácia

Úlohou astronomickej fotometrie je merať množstvo žiarenia z určitého zdroja elektromagnetického vlnenia a vyhodnocovať koľko energie tento zdroj vyžaruje v určitom intervale vlnových dĺžok. Z objektov, ktoré svietia, sa energia uvoľňuje po presných množstvách, kvantách, pričom sa vytvorí elektromagnetická vlna (zvaná tiež fotón) a pri jej zachytení sa v detektore pohltí zase len presne vymedzená hodnota energie.

Pokiaľ sa teda medzi nami a meraným objektom šíri vlna s frekvenciou ν alebo odpovedajúcou vlnovou dĺžkou λ , ideálny detektor potom zachytí energiu danú vzťahom:

$$e = h\nu = h\frac{c}{\lambda}, \quad (2.1)$$

kde h je Planckova konštanta a c je rýchlosť svetla vo vákuu. Pri ideálnych podmienkach stratí zdroj rovnakú hodnotu energie. Tento vzťah je vyjadrením Planckovho zákona vyžarovania. [1]

Na meranie energie nesenej elektromagnetickou vlnou zvyčajne využívame detektory, ktoré merajú vo fotometrických veličinách a jednotkách, alebo u ktorých sme schopní množstvo pohltenej energie na tieto veličiny prepočítať. Kalibrácia detektorov spočíva hlavne v porovnaní rôznych parametrov, ktoré najviac ovplyvňujú výsledok merania. Citlivosť jednotlivých detektorov sa zrejme líši, ak ich používame pri rôznej teplote, prostredí, vzdialenosti a uhle natočenia od osi, v ktorej sa nachádza zdroj svetla. Navyše niektoré detektory majú pred svojím snímačom filtre alebo korekčné členy, ktoré upravujú ich citlivosť vzhľadom na zrkové vnímanie svetla.

2.1 Základné fotometrické veličiny

Fotometrické veličiny sa obmedzujú len na viditeľnú časť elektromagnetického spektra a sú historicky staršie než rádiometrické veličiny, ktoré už popisujú celé spektrum vlnenia. Fotometrické veličiny sú definované podľa citlivosti ľudského oka, tým pádom sú závislé na farebnom zložení a samozrejme aj spektre skúmaného žiarenia.

Medzi základné fotometrické veličiny patrí okrem svetelnej energie aj svietivosť, ktorá vypovedá o vlastnostiach zdroja svetla, svetelný tok, ktorý sa vzťahuje na prenos svetla priestorom a osvetlenie určujúce účinky svetla pri jeho dopade na povrch telesa [2].

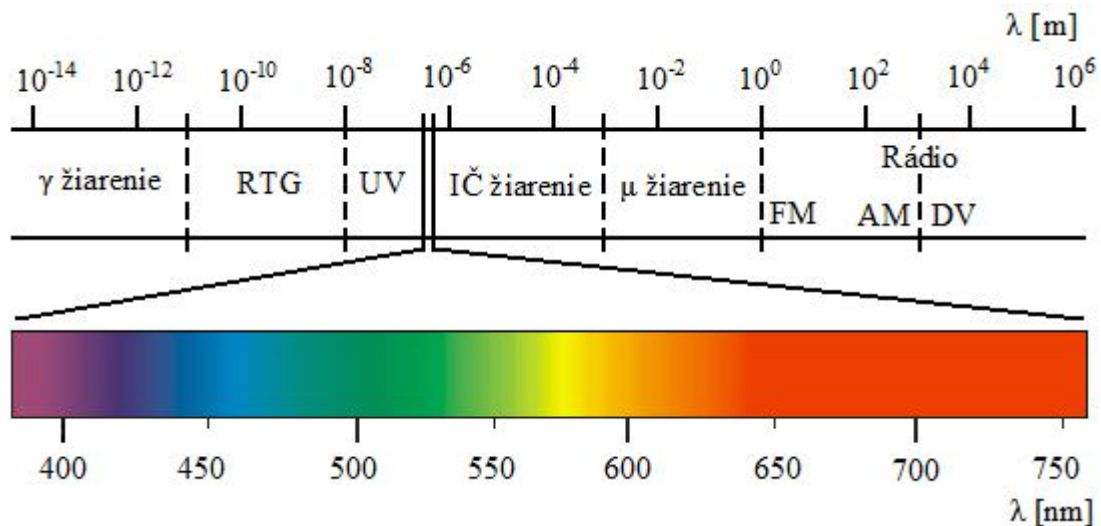
2.1.1 Svetelná energia

Energia žiarenia (žiarivá energia) je rádiometrická veličina, ktorú do svojho okolia vyžaruje zdroj vo všetkých oblastiach spektra. Z obrázku 2.1 môžeme vidieť, že z celkovej žiarivej energie elektromagnetického vlnenia je človek schopný zachytiť zrakom iba určitú časť spektra, vlnové dĺžky v rozsahu 380 nm až 760 nm, ktorá prislúcha viditeľnému žiareniu (svetlu). Táto časť sa označuje svetelná energia, zaraďuje sa medzi fotometrické veličiny a je definovaná ako časový integrál žiarivého toku (cez mnoho periód):

$$Q = \int_0^t \Phi dt . \quad (2.2)$$

Základnou jednotkou svetelnej energie je joul, ďalšie používané jednotky sú elektrónvolt alebo lumen-sekunda [3]:

$$[J] = [eV] = [\text{lm} \cdot \text{s}] .$$



Obr. 2.1: Spektrum elektromagnetického vlnenia s vyznačenou viditeľnou oblasťou

2.1.2 Svetelný tok

Zo zdroja svetla vychádza na všetky strany prúd žiarivej energie. Množstvo Φ_e tejto energie prechádzajúce nejakou plochou za jednotku času sa nazýva žiarivý tok touto plochou. Výkon

žiarivej energie zhodnotený podľa svetelného vnemu, ktorý vyvoláva, nazývame svetelný tok a značíme ho Φ . Svetelný tok teda charakterizuje intenzitu zrkovného vnemu normálneho oka vyvolaného žiarivým tokom Φ_e .

Hlavná jednotka (jeden) lúmen je definovaný ako svetelný tok vyžarovaný bodovým zdrojom, ktorého svietivosť je vo všetkých smeroch 1 kandela, do priestorového uhla 1 steradián¹. Pre lúmen, ktorý patrí medzi jednotky sústavy SI, teda platí:

$$1 \text{ lm} = 1 \text{ cd} \cdot \text{sr} .$$

Lúmen môže byť tiež definovaný ako svetelný tok, ktorý vysiela absolútne čierne teleso pri teplote tuhúcej platiny ($T = 2042 \text{ K}$), cez plochu s veľkosťou $S = 1/60\pi \text{ cm}^2 = 5,305 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^2$. Pre vedecké a praktické účely je lúmen realizovaný etalónmi elektrických žiaroviek, ktoré sú kalibrované vo svetových fotometrických laboratóriách podľa prototypu čierneho žiaríča. [4]

2.1.3 Svietivosť

Nech je $d\Phi$ svetelný tok, ktorý vysiela bodový zdroj svetla do kužela priestorového uhla $d\Omega$ steradiánov. Svietivosť zdroja v smere osi kužela, v závislosti na uhle α podľa obrázka 2.2, popisuje množstvo svetelného toku vyslaného do jednotkového priestorového uhla a je definovaná ako pomer toku $d\Phi$ a uhla $d\Omega$:

$$I_\alpha = \frac{d\Phi}{d\Omega} . \quad (2.3)$$

Obecne je svietivosť zdroja v rôznych smeroch rôzna. Pre izotropný zdroj, ktorého svietivosť je vo všetkých smeroch rovnaká, píšeme:

$$I = \frac{\Phi}{\Omega} ,$$

z čoho vyplýva
$$\Phi = I \Omega , \quad (2.4)$$

takže pre celkový tok vyžarovaný izotropným zdrojom svietivosti I do celého priestoru platí vzťah:

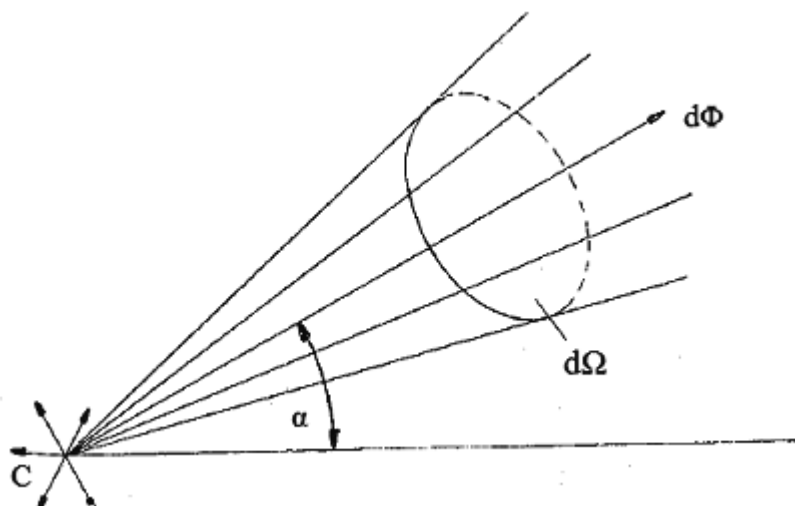
$$\Phi = 4\pi I \quad (2.5)$$

Jednotkou svietivosti je kandela, definovaná ako intenzita svetla (svietivosť) v danom smere zo zdroja, ktorý vyžaruje monochromatické žiarenie o frekvencii $540 \cdot 10^{12} \text{ Hz}$ a má žiarivú intenzitu (žiarivosť) v tomto smere $1/683 \text{ W}$ na 1 steradián [5]:

$$[\text{cd}] = [\text{W} / \text{sr}] .$$

Kandela ako jediná fotometrická jednotka patrí medzi sedem základných jednotiek Medzinárodnej sústavy jednotiek. Všetky ostatné fotometrické veličiny sa odvodzujú práve od kandelu.

¹ Steradián je vymedzený plášťom kužela, ktorého vrchol je v strede gule s polomerom $r = 1$ a ktorý na tejto guli vytína jednotkovú plochu. Plný priestorový uhol je 4π steradiánov.



Obr. 2.2: K definícii svietivosti [o1]

2.1.4 Intenzita osvetlenia

Intenzita osvetlenia (osvetlenie) je fotometrická veličina definovaná ako podiel svetelného toku Φ dopadajúceho na určitú osvetlenú plochu S :

$$E = \frac{d\Phi}{dS} . \quad (2.6)$$

Nech C je bodový zdroj osvetlenia, dS je osvetľovaná ploška, r je sprievodič vedený od zdroja k stredu plošky a α uhol sprievodiča s normálou plošky, potom je priestorový uhol $d\Omega$ daný vzorcom:

$$d\Omega = \frac{dS \cos \alpha}{r^2} . \quad (2.7)$$

Podľa vzorca (2.4) môžeme písať:

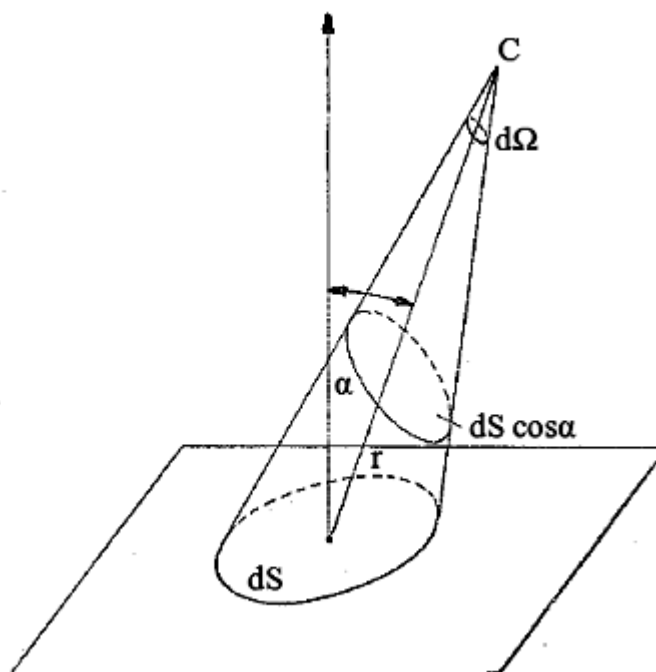
$$d\Phi = I_{\alpha} \frac{dS \cos \alpha}{r^2} \quad (2.8)$$

a takto vyjadrený tok môžeme dosadiť do vzorca (2.5), aby sme dostali vzťah pre osvetlenie podľa obrázka 2.3. V prípade bodového zdroja so svietivosťou I a žiareníu dopadajúcom pod uhlom α k normále plochy vo vzdialenosti r od zdroja platí vzťah [4]:

$$E = \frac{I}{r^2} \cos \alpha . \quad (2.9)$$

Osvetlenosť teda klesá vo vákuu (približne aj vo vzduchu) so štvorcem vzdialenosti a je závislá aj na uhle dopadu α - intenzita osvetlenia je tým slabšia, čím šikmejšie lúče dopadajú. Jednotka osvetlenosti lux vyjadruje plošnú hustotu dopadajúceho svetelného toku, čo je vlastne intenzita osvetlenia spôsobená svetelným tokom 1 lúmen dopadajúcim na plochu 1 m² bez ohľadu na odrazivosť tejto plochy [6]:

$$[\text{lx}] = [\text{lm} / \text{m}^2] .$$



Obr. 2.3: Intenzita osvetlenia [o1]

2.1.5 Jas

Predpokladáme zdroj svetla konečných rozmerov podľa obrázka 2.3. Malá plôška zdroja vysiela tok Φ do celého polpriestoru, t.j. do priestorového uhla 2π steradiánov. Svetelný tok do uhla $d\Omega$ bude potom $d\Phi$ a jas plôšky v určitom smere je definovaný vzťahom:

$$L_\alpha = \frac{d\Phi}{S \cos \alpha d\Omega} . \quad (2.10)$$

Použitím vzťahu (2.3) pre svietivosť môžeme jas vyjadriť nasledovne:

$$L_\alpha = \frac{I_\alpha}{S \cos \alpha} . \quad (2.11)$$

Keďže je $S \cos \alpha$ veľkosť plôšky premietnutej na rovinu kolmú k smere α , jas je číselne rovný svietivosti pripadajúcej na plošnú jednotku zdanlivej plochy zdroja. Pokusy ukazujú, že sa pri niektorých svietiacich telesách mení svietivosť podľa Lambertovho zákona:

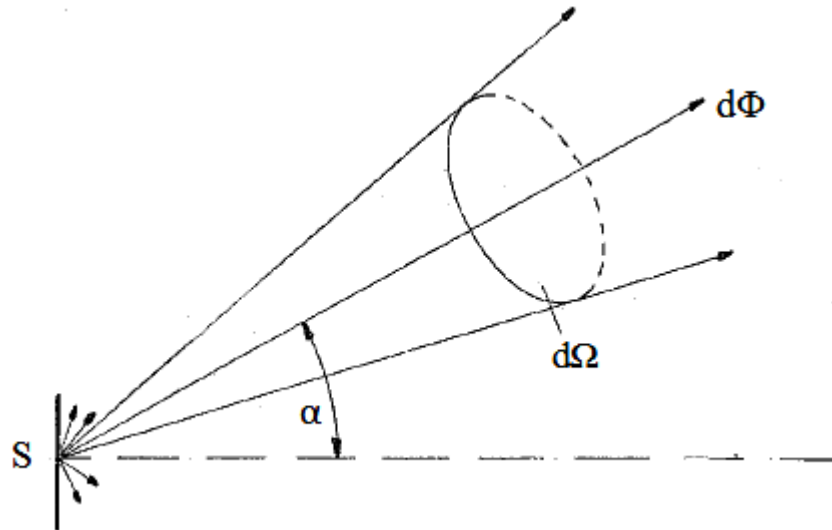
$$I_\alpha = I_n \cos \alpha , \quad (2.12)$$

kde I_n je svietivosť v smere normály. Takéto telesá nazývame kosínusové žiariče. Pre kosínusový žiarič bude mať vzorec (2.10) nasledovný tvar [4]:

$$L_\alpha = \frac{I_n}{S} = L . \quad (2.13)$$

Uvedený vzťah vyjadruje, že jas je konštantný vo všetkých smeroch a takýto kosínusový (Lambertovský) žiarič s konštantnou teplotou na povrchu nebude javiť žiadne okrajové stemnenie. Absolútne čierne teleso je zdroj žiarenia, ktorého jas nezávisí na orientácii

žiariacej plochy. Ak si ale prehládame obraz Slnka premietnutého ďalekohľadom na tienidlo, zistíme, že Slnko kosínusový žiarič rozhodne nie je, pretože jas slnečného kotúča sa smerom k okrajom znižuje. Okrajové stmernenie Slnka je spôsobené tým, že žiarenie z centra kotúča a z jeho okrajov k nám prichádza z rôznej geometrickej hĺbky slnečnej fotosféry. [7]



Obr. 2.4: K definícii jasu [o1]

Meranie intenzity svetla sa ďalej opiera o experimentálne zistený fakt, že signál i detektora (fotoprúd, fotonapätie) je úmerný štvorci amplitúdy elektromagnetickej vlny E_0 , ploche detektora S a spektrálnej citlivosti $c(\lambda)$, čiže platí nasledujúce vyjadrenie:

$$i \sim c(\lambda) \cdot S \cdot \langle E_0^2 \rangle . \quad (2.14)$$

Všetky detektory teda merajú strednú časovú veľkosť intenzity toku elektromagnetickej energie za integračnú dobu detektora a nie okamžitú intenzitu. Integračná doba oka je približne 0,1 s, pre fotodetektory sa pohybuje v rozmedzí 10^{-3} s až 10^{-6} s. Prístroje využívajú poznatky kvantovej fyziky, podľa ktorej je signál úmerný toku absorbovaných fotónov v detektore svetla. Fakt, že nevieme zmerať okamžitú intenzitu svetla, súvisí s koherenčnými vlastnosťami svetla. [8]

Koherencia je schopnosť zväzku elektromagnetickeho žiarenia interferovať po prejdení určitej vzdialenosti alebo uplynutí určitého času. Je podmienená zachovaním presnej frekvencie a fázy na danom úseku. [9] Obyčajné svetlo má spojité spektrum, ktoré obsahuje súbor spektrálnych čiar, je nepolarizované, žiari do všetkých smerov, jeho časová koherencia je malá (koherenčná dĺžka $\delta \sim \lambda - 100\lambda$) a má veľmi malú priestorovú koherenciu.

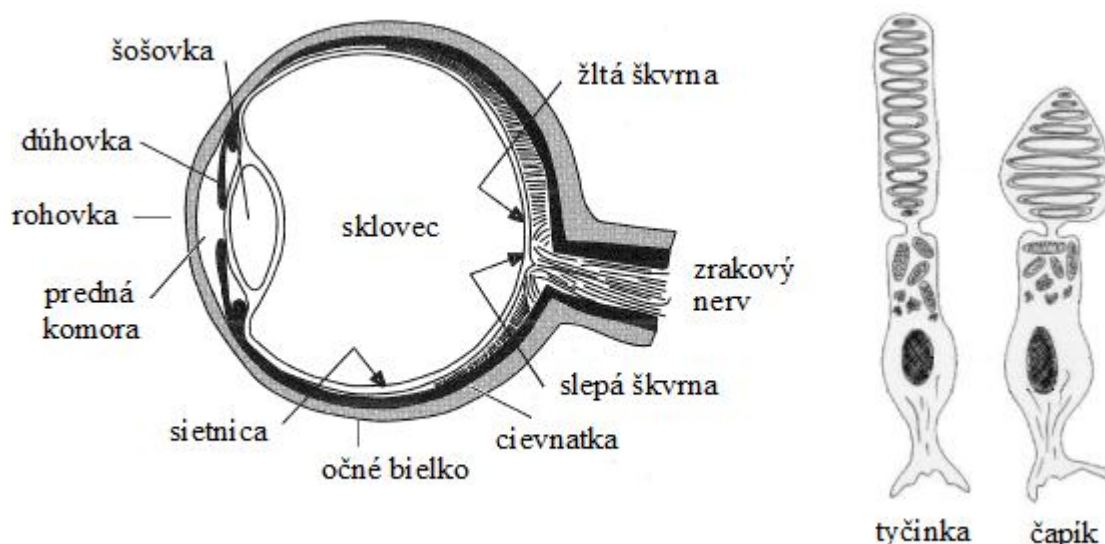
2.2 Ľudské oko a jeho vlastnosti

Najstarším a zároveň najpoužívanejším detektorom viditeľného svetla je ľudské oko, v ktorom optickou a fotochemickou cestou vzniká obraz vonkajšieho sveta. Podľa obrázka 2.5 je ľudské oko guľovitý orgán s priemerom asi 24 mm, ktorý je chránený kosteným obalom očnice. Stena oka je tvorená tromi vrstvami - vonkajšia je bielko, ktoré sa v prednej časti oka mení v priehľadnú rohovku, stredná vrstva živnatka prechádza vpredu v dúhovku a vnútorná vrstva je tvorená sietnicou. Dúhovka má vo svojom strede zornicu s premenlivým priemerom, ktorá reguluje množstvo svetla dopadajúceho do oka a plní tak funkciu clony.

Za dúhovkou je ďalej uložená šošovka, ktorá je pomocou jemných vlákien schopná meniť svoju optickú mohutnosť a tým zaostríť na rôzne vzdialenosti predmetov. Táto vlastnosť oka sa volá akomodácia a postupom veku človeka sa môže znižovať. Vnútroočný priestor za šošovkou je vyplnený priehľadnou rôsolovitou hmotou zvanou sklovec. Vnútrotnú vrstvu očnej steny tvorí svetlocitlivá vrstva oka zvaná sietnica, na ktorej sa nachádza žltá škvrna. V tomto mieste je oblasť najostrejšieho videnia, pretože sa tu nachádza najviac fotocitlivých receptorov. Oko sa teda vždy snaží premietnuť vnímaný obraz do žltej škvrny. Žltá škvrna zároveň sprostredkováva farebné videnie.

Pri vytváraní obrazu musí svetelný lúč prejsť na svojej ceste k sietnici štyrmi optickými prostrediami. Sú to rohovka, komorová voda, šošovka a sklovec a každé z nich má odlišné optické vlastnosti, ktoré ovplyvňujú chod lúča.

Samotná sietnica ako svetlocitlivá vrstva oka má dokonalú schopnosť sa automaticky prispôbovať intenzite dopadajúceho svetla. Z funkčného hľadiska je veľmi podobná fotografickej emulzii na filme alebo citlivej detekčnej vrstve v televíznej kamere. Vlastnými svetlocitlivými elementmi sietnice sú tyčinky a čapíky. Ich rozloženie v sietnici nie je pravidelné.



Obr. 2.5: Vľavo schematický rez okom, vpravo svetlocitlivé receptory [o2]

2.2.1 Typy videnia

Tyčinky sú receptorové bunky dlhého valcovitého tvaru určené pre vnímanie svetelných podnetov za nízkych hladín osvetlenia. Umožňujú nefarebné videnie, aktivujú sa za šera a majú rozhodujúcu úlohu pri adaptácii oka na tmu. Táto adaptácia je výrazne pomalšia, až za 40 - 60 minút dosiahne svoje maximum. Tyčinky zabezpečujú skotopické (nočné) videnie, ktoré celkom prevláda pri jase nižšom ako $10^{-3} \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$.

Čapíky sú fotoreceptory určené na rozlišovanie farieb a detailné videnie tvarov pri vyšších hladinách osvetlenia. Ich tvar je širší a kratší ako u tyčiniek a uplatňujú sa pri adaptácii oka na svetlo. Ľudské oko sa na svetlo adaptuje pomerne rýchlo, maximum dosiahne a 20 - 60 sekúnd. Čapíky zabezpečujú fotopické (denné) videnie, ktoré nastupuje pri jase vyššom ako $10^2 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$. Schematický rez tyčinkami a čapíkmi je na obrázku 2.5.

2.2.2 Spektrálna citlivosť oka

Spektrálna citlivosť sietnice nie rovnaká v celom rozsahu viditeľného spektra a navyiac závisí aj na druhu videnia. Pri fotopickom videní je maximum citlivosti oka pri vlnovej dĺžke $\lambda = 555 \text{ nm}$. Ak budeme znižovať intenzitu svetla, fotopické videnie prejde do skotopického videnia a maximum citlivosti sa posunie ku kratším vlnovým dĺžkam, až k hodnote $\lambda = 507 \text{ nm}$. Tento posun sa volá Purkyňov jav.

Keďže každé ľudské oko má individuálne anatomické a optické odchýlky, švédsky lekár Alva Gullstrand vytvoril model priemerného zdravého oka, ktorý sa využíva na výpočty a má presne definované vlastnosti aj spektrálnu citlivosť, ktorá sa riadi funkciou V_λ . [10] Takto zavedená funkcia $V(\lambda)$ odpovedá priebehu zložky $y(\lambda)$ vyrovnávacej funkcie YXZ, ktorú som podrobnejšie rozobral v kapitole 3.2.5.

Žiarenie s rôznymi vlnovými dĺžkami teda vyvoláva v oku rôzny zrkový vnem. Pomer svetelného toku Φ k odpovedajúcemu žiarivému toku Φ_e nazývame účinnosť žiarenia:

$$K = \frac{\Phi}{\Phi_e} . \quad (2.15)$$

Ak je K_λ svetelná účinnosť žiarenia pre jednofarebné žiarenie ľubovoľnej vlnovej dĺžky a K_m je najväčšia svetelná účinnosť žiarenia pre danú vlnovú dĺžku λ , môžeme zaviesť *pomernú svetelnú účinnosť žiarenia*, model citlivosti oka, pre ktorý platí:

$$V_\lambda = \frac{K_\lambda}{K_m} . \quad (2.16)$$

Podľa funkcie $V(\lambda)$ na obrázku 2.6 sa kalibrujú spektrálne citlivosti všetkých detektorov, ktoré majú merať vo fotometrických veličinách. Pre maximálnu svetelnú účinnosť žiarenia vychádza $K = 680 \text{ lm/W}$, čiže pri vlnovej dĺžke $\lambda = 555 \text{ nm}$ platí:

$$1 \text{ W} = 680 \text{ lm} \quad \text{alebo} \quad 1 \text{ lm} = 14,7 \cdot 10^{-4} \text{ W}$$

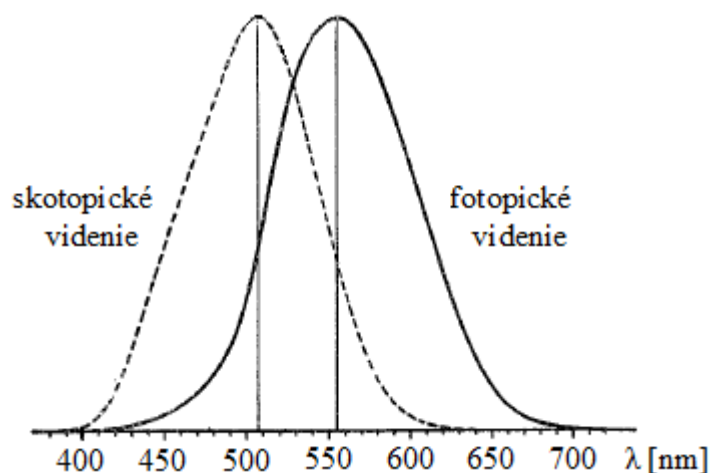
Veličina $0,00147 \text{ W/lm}$ sa nazýva minimálny mechanický ekvivalent svetla. [11]

Tabuľka 2.1 udáva hodnoty pomernej svetelnej účinnosti žiarenia V_λ pre vlnové dĺžky rastúce po 20 nm. V tabuľke sú pre ilustráciu vyznačené 4 vlnové dĺžky s rozdielom 100 nm, kde je vidieť aký intenzívny vnem vyvolávajú v ľudskom oku. Je zrejmé, že napríklad svetelný tok červeného svetla s $\lambda = 660$ nm musí byť viac ako 16-krát väčší ako svetelný tok (tou istou plochou) žltozeleného svetla s $\lambda = 560$ nm, aby boli vyvolané rovnaké intenzity zrkového vnemu. [4]

Tabuľka 2.1

λ [nm]	$V(\lambda)$	λ [nm]	$V(\lambda)$
400	0,0004	580	0,870
420	0,0040	600	0,631
440	0,023	620	0,381
460	0,060	640	0,175
480	0,139	660	0,061
500	0,323	680	0,017
520	0,710	700	0,004
540	0,954	720	0,00105
555	1,000	740	0,00025
560	0,995	760	0,00006

Na obrázku 2.6 sú krivky citlivosti ľudského oka spracované podľa tabuľky 2.1. Purkyňov jav spôsobuje posun maximálneho vnemu svetla pri zmene z fotopického do skotopického videnia.



Obr. 2.6: Krivky citlivosti ľudského oka [o1]

2.3 Kalibračné zdroje svetla

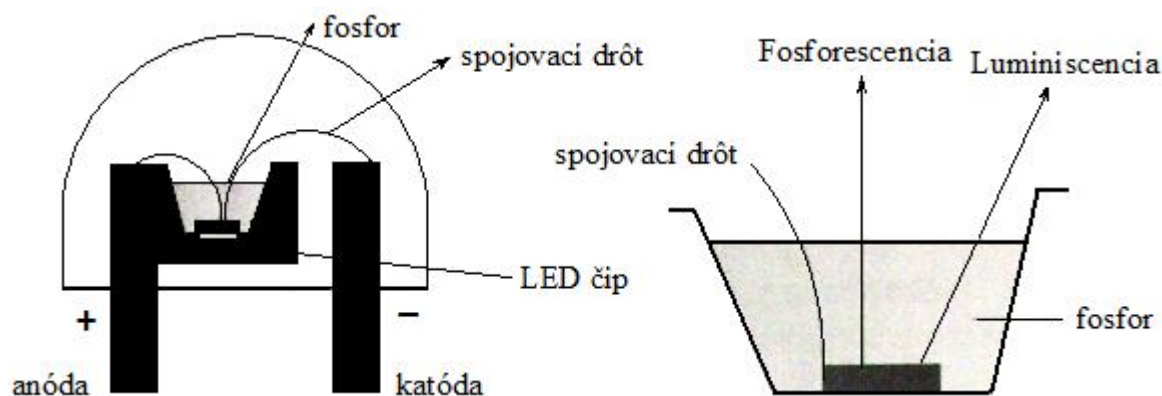
Na experimenty s detektormi a kalibráciu budeme potrebovať vhodné, konštantné zdroje osvetlenia, u ktorých sa v čase nemení množstvo vyžiarenej svetelnej energie. Najvhodnejším zdrojom svetla je sviečka. Podľa svietivosti jednej štandardnej parafinovej sviečky sa v minulosti zaviedla fotometrická jednotka kandela, ktorá dnes patrí medzi základné jednotky SI.

Sviečky sú jednoduché zdroje svetla, ktoré sa používajú od staroveku po dnešok a až do objavy petroleja a elektriny to boli najdôležitejšie umelé svetelné zdroje. Horenie sviečky spôsobuje premenu chemickej energie viazanej v jej tuhom tele na svetelnú energiu. Valcovité telo sviečky je vyrobené z horľavého parafínu, ktorý sa získava pri destilácii ropy. Parafín je zmes pevných uhľovodíkov, jeho bod topenia sa pohybuje medzi 42°C a 65°C, bod varu je zhruba 300°C. [12]

Uprostred tela sviečky je vložený horľavý knôt vyrobený z rastlinného textilného materiálu. Horiaci knôt nasáva z tela sviečky parafín, ktorý sa teplom plameňa taví. Na povrchu knôtu sa potom parafín odparuje a horí, čím sa sviečka postupne skrakuje. Štandardná sviečka horí spravidla rýchlosťou 0,1g/min, do priestoru vyžaruje svetelný tok 1 lúmen.

Plameň sviečky je zdola modrý, bohatý na kyslík, rozkladajú sa tu uhľovodíkové molekuly z parafínu a tvorí sa vodná para a oxid uhličitý. Vyššie sa nachádzajú oranžovo-hnedá a žltá zóna, kde sa tvoria častice uhlíka - sadze. Pri stúpaní sa postupne zahrievajú na 1000°C a vznietia sa až neďaleko vrcholu plameňa v žltej oblasti, kde vzniká teplota okolo 1200°C. Najteplejšia časť plameňa je slabý vonkajší modrý okraj, niekedy nazývaný závoj, ktorý typicky dosahuje teplotu 1400 °C. [13] Pri horení vzniknutých uhľíkových sadzí sa emituje celé spektrum viditeľného svetla. Keďže sadze patria medzi pevné látky, sviečka má vďaka nim spojité spektrum vyžarovania.

Ďalším vhodným zdrojom môže byť elektroluminiscenčná dióda, označovaná skratkou LED (Light Emitting Diode), ktorá sa v posledných časoch využíva v rôznych oblastiach osvetľovacej techniky. LED dióda je elektronická súčiastka ktorá generuje svetelné žiarenie, ak týmto polovodičovým prvkom prechádza prúd. Dióda obsahuje prechod P-N, rozhranie prímiesových polovodičov s nadbytočným elektrónmi (typ N) alebo dierami (typ P), ktorý prepúšťa prúd iba v jedinom priepustnom smere a vyžaruje veľmi úzke spektrum žiarenia. Bližšie vlastnosti polovodičov budú rozobrané v nasledujúcej kapitole.



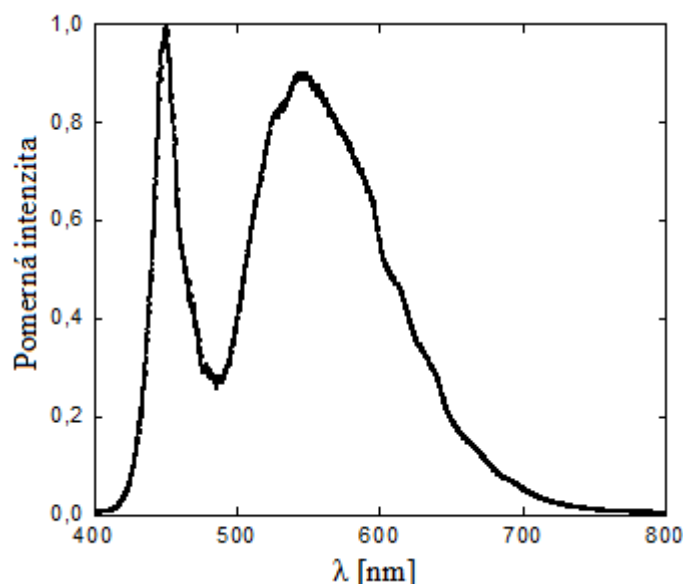
Obr. 2.7: Vľavo štruktúra LED diódy, vpravo detail na LED čip, [o3]

Prierez štruktúry LED diódy je naznačený na obrázku 2.7. Katóda obsahuje malý žliabok s luminofórom, je spojená s anódou veľmi tenkým vodičom a celý tento čip je zaliaty v priehľadnom materiáli.

V súčasnosti existujú diódy emitujúce žiarenie od ultrafialového, cez viditeľné až po infračervené pásma. LED diódou sa nedá priamo emitovať biele svetlo, pretože biela nepatrí medzi základné farby. Biele diódy sa môžu vytvoriť spojením troch čipov do jedného puzdra tak, aby sa ich zmiešaním vytvorila biela farba. Ďalším spôsobom je použitie čipu, ktorý sa vo vnútri puzdra ošetrí vrstvou aktívnej hmoty - luminofóru, ktorý čiastočne pretransformuje žiarenie na iné vlnové dĺžky. Samotný čip generujúci svetlo je uložený v reflektorovom žliabku a býva zapuzdrený fosforom. Žiarenie vo viditeľnej oblasti vyžiarené z polovodiča býva modrej farby. Časť svetla je distribuovaná k pozorovateľovi a časť krátkovlnných fotónov je absorbovaná v priestore fosforovej vrstvy a znova emitovaná s väčšou vlnovou dĺžkou v žltom spektre. Výsledné biele svetlo je teda zložené z luminiscencie modrého svetla a fosforencie žltého svetla. Niektoré typy bielych LED emitujú ultrafialové žiarenie, ktoré je priamo na čipe transformované luminofórom na biele svetlo. [14]

Spektrum diódy, ktorú som používal najmä pri meraní tepelných závislostí, je na obrázku 2.8. Spektrum bolo zmerané pomocou optickej sondy, najvyššie hodnoty sa nachádzajú na vlnovej dĺžke 449,5 nm (fluorescencia) a 545,7 nm (luminiscencia).

Aby bola dosiahnutá konštantná svietivosť diódy, musí byť napojená na stabilizovaný zdroj jednosmerného napätia. Svetelná LED dióda, ktorú som používal na merania, bola napojená štandardným kondenzátorovým adaptérom s nastaviteľným napätím a polaritou.



Obr.2.8: Spektrum vyžarovania LED diódy

Kapitola 3

Detektory nízkych svetelných tokov

Medzi najbežnejšie detektory viditeľného spektra žiarenia s nízkou intenzitou, ktoré sa využívajú na astronomické a fyzikálne merania, patrí v súčasnosti digitálny fotoaparát, luxmeter, Sky Quality Meter (SQM) a fotovoltaiický článok.

Všetky tieto meracie prístroje sú založené na princípe premeny dopadajúceho žiarenia na ekvivalentné množstvo elektrického náboja. Luxmeter a SQM sú schopné spočítať množstvo náboja a zobrazit' priamo na svojom displeji hodnotu určitej fotometrickej veličiny. V prípade fotoaparátu je potrebné jednotlivé snímky fotometricky spracovať, aby sme dostali podrobné informácie o množstve a umiestnení náboja, ktorý potom môžeme prepočítať na fyzikálne jednotky. Pri fotovoltaiickom článku je najvýhodnejšie merať generované fotonapätie alebo fotoprúd.

Všetky tieto detektory sú tvorené polovodičovými vrstvami citlivými na svetlo, na ktoré sa zvyčajne umiestňujú rôzne korekčné filtre alebo ochranné prvky. Aby sme pochopili fyzikálny princíp týchto prístrojov, musíme využit' niektoré poznatky z kvantovej fyziky, pomocou ktorej popíšeme vlastnosti samotných polovodičových snímačov v prístrojoch na meranie nízkych svetelných tokov.

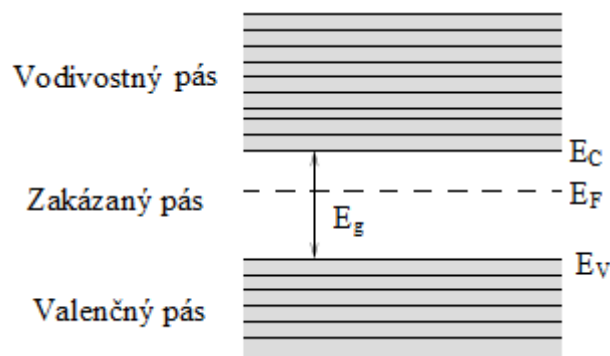
3.1 Polovodičové štruktúry

Polovodič je pevná látka, ktorá sa svojimi elektrickými vlastnosťami pohybuje niekde medzi izolantmi a vodičmi. Polovodiče v predminulom storočí spôsobili veľký rozmach elektro-techniky, o objasnenie ich výborných vlastností sa zaslúžili najmä Thomas Seebeck, Michael Faraday a Werner von Siemens.

Všeobecne sú atómy v pevných látkach viazané v kryštalickej mriežke s rôznym usporiadaním. Na jadrá atómov sú viazané elektróny s určitou väzbovou energiou, ktorú musíme dodať na uvoľnenie elektrónu. Smerom od jadra sú elektróny viazané stále menšou silou, elektróny s najnižšou väzbovou energiou sa nazývajú valenčné. Uvoľnenie a pohyb elektrónov v mriežke je vlastne podstata elektrickej vodivosti látky. Pauliho vylučovací princíp spôsobuje, že jednotlivé elektróny nemôžu byť v rovnakom energetickom stave, čím sa vytvárajú určité pásy s veľkým počtom energiových hladín. Keďže elektrón môže prijať iba diskrétno množstvo energie, susedné pásy oddeľuje medzera, ktorú voláme zakázaný pás.

Keď sa elektrón odtrhne od jadra, opustí valenčný pás, preskočí cez pásmo zakázaných energií až do čiastočne obsadeného vodivostného pásu a začne sa pohybovať v látke. Pri kovoch vedúcich prúd je šírka zakázaných energií nulová, čo znamená, že valenčný a vodivostný pás sa prekrývajú. Izolanty nevedú prúd, pretože majú zakázaný pás tak široký, že ho elektróny prakticky nedokážu prekonať. Polovodiče so strednou šírkou zakázaného pásu sa navonok chovajú ako izolanty, ale znižovaním teploty (klesá rezistivita polovodiča) a dodaním energie môžu elektróny ľahko preskočiť do vodivostného pásu. [15]

Na obrázku 3.1 sú zobrazené posledné dva energiové pásy polovodičov. E_V je najvyššia energia valenčného pásu, E_F je Fermiho hladina - pravdepodobnosť obsadenia vodivostného pásu elektrónmi, E_C najnižšia energia vodivostného pásu a E_g je šírka zakázaného pásu.



Obr. 3.1: Pásová schéma polovodiča [o4]

3.1.1 Vlastný a prímesový polovodič

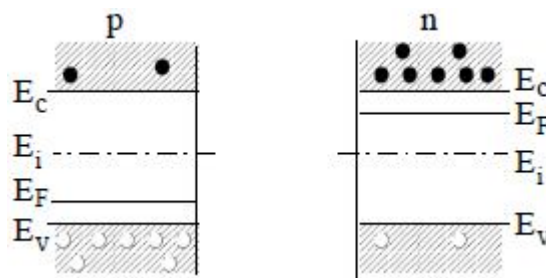
Vlastný polovodič je tvorený čistým kremíkom alebo germániom a môže viesť elektrický prúd vplyvom tepelnej alebo svetelnej energie. Vtedy začnú atómy v kryštalickej mriežke tepelne kmitať, porušia sa niektoré kovalentné väzby a voľné elektróny sa začnú neusporiadane pohybovať priestorom medzi atómami. Po excitovaných, záporne nabitých elektrónoch ostanú vo valenčnom páse kladné diery, pričom platí podmienka elektrickej neutrality,

t.j. vlastná koncentrácia elektrónov a dier je rovnaká. V polovodiči neustále prebieha proces generácie voľných elektrónov, ktoré môžu zase rekombinovať s inými dierami. Tento dej, preskakovanie elektrónov z diery do diery, sa môže na rôznych miestach v látke viackrát opakovať, čím vzniká vlastná vodivosť polovodiča.

Voľné elektróny a diery tiež vzniknú, ak do polovodiča zabudujeme elektricky aktívne atómy zvané prímеси. Do čistého kremíku so štyrmi valenčnými elektrónmi v atóme zabudujeme prvok s piatimi valenčnými elektrónmi a vznikne tak prímesový polovodič typu N. Najčastejšie sa ako donor (darca), používa päťmocný fosfor, antimón alebo arzén. Štyri valenčné elektróny donora sa naviažu k atómu kremíka a piaty elektrón sa môže uvoľniť z väzby a voľne sa pohybovať priestorom kryštálovej mriežky. Tieto voľné elektróny od donora so svojím záporným (negatívnym) nábojom sprostredkujú nevlastnú elektrónovú vodivosť typu N.

Kremík môžeme dotovať aj prvkom s tromi valenčnými elektrónmi (bór, hliník, gálium a indium), ktorému hovoríme akceptor (príjemca). Pri použití trojmocného prvku chýba jeden elektrón k tomu, aby sa mohla vytvoriť kovalentná väzba zo štyroch dvojíc elektrónov. Toto voľné miesto po chýbajúcom elektróne sa chová ako defektný elektrón a nazýva sa diera. Pozitívne diery prímesového atómu spôsobujú nevlastnú dierovú vodivosť polovodiča typu P.

Ak na prímesový polovodič priložíme zdroj napätia, voľné elektróny budú preskakovať do dier smerom od záporného pólu zdroja ku kladnému a diery sa budú pohybovať v opačnom smere. [16]



Obr. 3.2: Pásová schéma polovodičov typu P a N [o4]

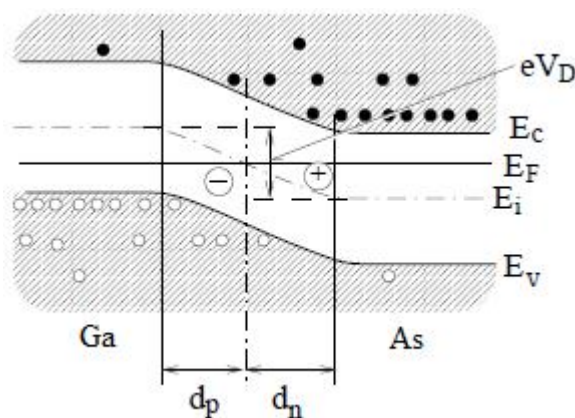
3.1.2 P-N prechod

Pravdepodobnosť, že hladina s energiou E je obsadená elektrónom, je vyjadrená Fermi-Diracovou rozdeľovacou funkciou:

$$f(E) = \frac{1}{1 + e^{\frac{E-E_F}{kT}}}, \quad (3.1)$$

kde k je Boltzmannova konštanta, T je teplota, E_F je Fermiho hladina s 50% pravdepodobnosťou obsadenia elektrónom. Pri polovodičoch typu P leží Fermiho hladina blízko vodivostného pásu, nad jeho hornou hranicou maximálnej valenčnej energie E_V , pri polovodiči typu N leží Fermiho hladina v blízkosti vodivostného pásu pod úrovňou E_C , t.j. minimálnej energie vodivostného pásu. Šírka zakázaného pásu E_g je potom daná rozdielom E_C a E_V .

Z polovodičov typu P a N môžeme vytvoriť prechod PN, ktorý je znázornený na obrázku 3.3, kde je základný kryštál germánium, oblasť P je dotovaná gáliom (Ga), oblasť N zase arzénom (As). Prechodová vrstva tvorená tenkou vrstvou d_p+d_n je vyznačená zvislými čiarami, prechod medzi oboma oblasťami je strmý, koncentrácia donorov a akceptorov sa mení skokom.



Obr. 3.3: Pásová schéma PN prechodu [o4]

V kryštáli polovodiča o vodivosti N leží Fermiho hladina vyššie ako v kryštáli s vodivosťou P. V kryštáli s PN prechodom v termodynamicknej rovnováhe musí byť Fermiho hladina všade v rovnakej výške. To sa dosiahne tým, že časť elektrónov prejde z oblasti N do P, rovnaký počet dier prechádza z oblasti P do N. Náboje, ktoré prešli a náboje od ionizovaných donorov a akceptorov tvoria oblasť priestorového náboja.

Vplyvom priestorového náboja prímеси potom vzniká elektrické pole, ktoré má taký smer, že zabraňuje ďalšiemu difúznemu toku. Rovnováha vznikne vtedy, keď vnútorné elektrické pole bude tak silné, že ním vyvolaný driftový prúd elektrónov a dier práve vykompenzuje rovnako veľký difúzny prúd elektrónov a dier v opačnom smere. To znamená, že Fermiho hladiny sa vyrovnajú a v polovodiči sa vytvorí potenciálový val šírky $(d_p + d_n)$ a výšky $e \cdot V_D$, kde V_D je difúzne napätie a e je elementárny náboj.

Ak pripojíme na prechod vonkajšie napätie U kladným pólom k P a záporným k N, prechod bude pólovaný v priepustnom smere. Výška bariéry sa zmenší, diery budú injektované z oblasti P do N a elektróny z N do oblasti P, čím sa vytvorí prúd. Pri opačnom (závernom) pólovaní prechodu dôjde k zväčšeniu bariéry a prúd prechádzajúci PN prechodom sa znižuje. Celkový prúd, ktorý preteká prechodom, je súčtom prúdu dier a elektrónov a pre jeho veľkosť môžeme odvodiť vzťah:

$$I = I_0 \left(e^{\frac{eU}{kT}} - 1 \right) = I_0 \left(e^{\frac{U}{U_T}} - 1 \right), \quad (3.2)$$

kde I_0 je saturačný prúd prechodom v závernom smere nazývaný tiež zbytkový prúd a U_T je teplotné napätie. Pri teplote $T = 300$ K má U_T hodnotu 26 mV. Pri pólovaní PN v závernom smere sa vytvorí v blízkom okolí prechodu oblasť bez nosičov náboja a spolu s vodivými oblasťami potom predstavuje kondenzátor, ktorého kapacita sa mení s hrúbkou vyprázdnenej vrstvy.

Uvedené vzťahy platia len pre prúd vlastným prechodom. Ak chceme vyjadriť prúd celým kryštálom polovodiča s prechodom PN, musíme brať do úvahy aj odpor R_S materiálu polovodičovych častí prechodu a odpor prívodov k nim.

Podobné vlastnosti ako má PN prechod má aj prechod kov - polovodič. Pri kontakte obidvoch častí sa objaví záporný povrchový náboj tvorený elektrónmi, ktoré sa zachytili na kryštálových nedokonalostiach polovodiča. Záporný náboj tlačí voľne pohyblivé elektróny dovnútra, čím vzniká podobná vyprázdnená vrstva ako pri PN prechode. Na vrstve kov - polovodič môže nastať aj usmernenie, pretože sa dá polarizovať v priepustnom aj závernom smere. [17]

3.1.3 Fotoelektrický jav

Princíp činnosti všetkých detektorov, ktorými sa budem zaoberať v tejto práci, je založený na využívaní fotoelektrického javu. Teoretický fyzik Albert Einstein v roku 1905 ako prvý podal uspokojivý výklad fotoelektrického javu a v roku 1921 za neho získal Nobelovu cenu za fyziku. Einstein rozšíril Planckov predpoklad kvantovania energií podľa vzorca (2.1) pri emisii aj na pohlcovanie (absorpciu) svetla:

$$W = h \nu = W_{kin} + A_V , \quad (3.3)$$

kde $h\nu$ je energia absorbovaného kvantu po uvoľnení jedného elektrónu z atómu, $A_V = h \cdot \nu_0$ je výstupná práca, hodnota energie nutná k tomu aby sa uvoľnil elektrón z mriežky polovodiča a $W_{kin} = mv^2/2$ je kinetická energia uvoľneného elektrónu.

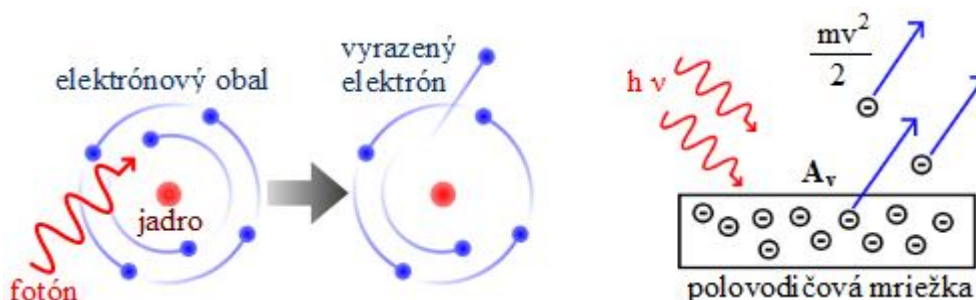
Slovne sa dá fotoelektrický jav popísať nasledovne: Žiarenie dopadajúce na povrch polovodiča sa skladá z kvánt s energiou $h\nu$. Po absorpcii v povrchu telesa sa časť energie využije na prekonanie príťažlivých síl pútajúcich elektróny v atómoch. Zvyšná energia absorbovaných kvánt sa premení na kinetickú energiu vyrazených elektrónov a je daná vzťahom:

$$W_{kin} = \frac{mv^2}{2} = h\nu - h\nu_0 = h(\nu - \nu_0) . \quad (3.4)$$

Hodnota ν_0 je medzný kmitočet, čo znamená, že ak má nastať (vonkajší) fotoelektrický jav, dopadajúce kvantum musí mať energiu $h\nu$ väčšiu ako je hodnota výstupnej práce $h\nu_0$. Pre odpovedajúcu medznú vlnovú dĺžku teda bude platiť vzťah:

$$\lambda_0 = \frac{c}{\nu_0} , \quad (3.5)$$

kde c je rýchlosť šírenia svetla vo vákuu. Uvoľnený elektrón môže prekonať potenciálovú bariéru pri povrchu a opustiť kryštalovú mriežku materiálu, vtedy sa jedná o fotoemisiu alebo vonkajší fotoelektrický jav. Ak energia dopadajúceho fotónu na fotoemisiu nepostačuje, ale stačí k vzniku voľného elektrónu, tak v kryštáli polovodiča ostane tento elektrón ako voľne pohyblivý náboj. Vtedy ide o vnútorný fotoelektrický jav. Podľa toho či fotón interagoval s atómom kryštálovej mriežky, donorovým alebo akceptorovým atómom, vznikne pár elektrón - diera, voľný elektrón alebo voľná diera. V homogénnom polovodiči sa vnútorný fotoefekt prejavuje rastom vodivosti polovodiča, čiže fotovodivosťou. V nehomogénnom polovodiči, v ktorom sú potenciálové bariéry, vytvára vnútorný fotoefekt potenciálové rozdiely - vzniká fotovoltaický jav. [11]



Obr. 3.4: Fotoelektrický jav na jednom atóme a v polovodiči [o5]

3.2 Digitálny fotoaparát

Digitálne fotoaparáty, ktoré môžeme využívať aj na astronomické účely, vychádzajú z konštrukcie klasického filmového fotoaparátu, v ktorom sa cez objektív osvetľovala filmová vrstva. Osvietením filmu počas určitej expozičnej doby došlo chemickými procesmi k sčerneniu filmu, vznikla negatívny snímok, ktorý sa musel vyvolávať na fotopapier alebo diapozitívy.

Digitálny fotoaparát ale premieta snímaný obraz na plochu polovodičového senzora. Táto svetlocitlivá plocha je pri drahších kamerách realizovaná nábojovo viazanou štruktúrou - CCD čipom (Charge-Coupled Device) a u digitálnych fotoaparátov rýchlejším a dostupnejším integrovaným obvodom CMOS (Complementari Metal Oxide Semiconductor). Obidva čipy sú tvorené samostatnými bunkami, pixelmi, ktoré sú schopné dopadnuté kvantum svetla previesť na elektrický signál a uložiť v podobe viazanej náboja. Využíva sa tu fotoelektrický jav, ktorý spôsobí, že fotóny s určitou energiou dopadajúce na polovodič generujú nosiče náboja, ktoré ale v tomto prípade neodtekajú okamžite do vonkajšieho obvodu, ale sú izolované v jednotlivých pixeloch, ktoré fungujú ako nábojové zásobníky.

Zjednodušený prierez digitálneho fotoaparátu, ktorý používa na prenos obrazu na čip využíva systém zrkadlo - matnica - hranol. Počas expozície čipu dopadajú fotóny cez otvorenú uzávierku v objektíve fotoaparátu zo snímanej scény na čip a po zatvorení uzávierky sú generované fotonáboje postupne odvádzané z nábojových zásobníkov. Získaný signál sa zmeria špeciálnym zosilňovačom pre každý jednotlivý pixel a následne sa prevedie analógovo-digitálnym (AD) prevodníkom do binárneho kódu. Vzniknutý dátový prúd je pomocou mikroprocesora prevedený do niektorého grafického formátu používaného pre záznam obrazových dát. Aby sme ale pochopili výhody digitálneho fotoaparátu oproti klasickému filmu, musíme sa pozrieť na vznik, stavbu a fyzikálny princíp týchto čipov. [18]



Obr. 3.5: Prierez digitálnym fotoaparátom [o6]

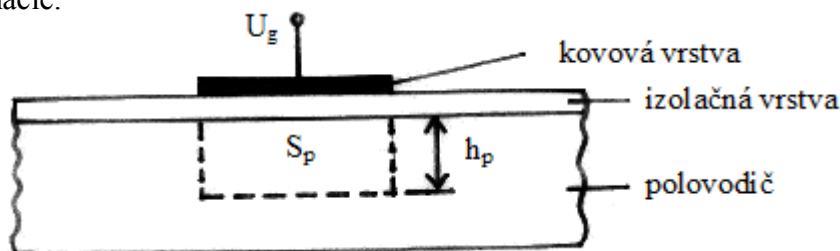
3.2.1 Nábojovo-viazané štruktúry

V šesťdesiatych rokoch minulého storočia pracovala skupina fyzikálnych elektronikov v Bellových laboratóriách na vývoji magnetických bublinových pamätí a zdokonalení vidikonových trubíc pre videotelefón a polovodičovej technológii MOS. Na základe týchto technológií pracovníci Willard S. Boyle a George E. Smith v roku 1969 vynali nábojovo viazané súčiastky - prvky CCD, za čo dostali v roku 2009 Nobelovu cenu. [19]

Nábojovo viazaný prvok CCD je tvorený radou jednoduchých štruktúr MIS (kov, dielektrikum a polovodič), vytvorených na spoločnej polovodičovej doštičke. Jednotlivé kovové elektródy sa spočiatku usporadúvali iba lineárne, dnes sa využíva usporiadanie do pravidelnej matice, čo umožňuje dvojrozmerný obraz. Takáto samotná štruktúra je veľmi citlivá a nemá žiadne zosilňovacie schopnosti, ale je schopná elektrický náboj zachovávať v čase a premiestňovať ho v priestore.

Základná stavebná časť CCD čipu je znázornená na obrázku 3.6. Fyzikálny princíp činnosti prvkov CCD spočíva v nahromadení minoritných nosičov náboja v potenciálových minimách (jamách) vytvorených v polovodiči pripojením napätia na kovovú elektródu. Veľkosť zhlukov zachytených nábojov je úmerná vonkajšej svetelnej informácii. Z toho vyplýva, že každý CCD a CMOS čip, ktorý sa využíva na snímanie obrazu, musí byť pripojený na zdroj napätia U_g , ktorý spôsobí vytvorenie potenciálových bariér. Hĺbka takto vzniknutej potenciálovej jamy h_p je úmerná veľkosti polarizačného napätia U_g , jej prierez S_p a objem závisí od tvaru kovovej elektródy.

Pre činnosť CCD sú charakteristické 3 režimy práce. Režim zachovania zhlukov náboja (nábojových balíkov) ako užitočnej informácie, režim prenosu informácie a režim čítania a obnovovania informácie.



Obr. 3.6: Štruktúra elementárneho prechodu CCD [o7]

3.2.2 Zachovanie, prenos a čítanie informácie

V režime zachovania je nábojovo viazaná štruktúra ekvivalentná s vlastnosťami jednoduchého kondenzátora s dielektrikom. Ak pripojíme na kovovú elektródu akumulčné napätie s hodnotou U_g , vznikne v polovodiči pod elektródou nerovnovážny stav. Povrchový potenciál, ktorý charakterizuje mieru zakrivenia pásiem, čiže hĺbku potenciálovej jamy, má tesne po zapnutí maximálnu hodnotu.

Po zavedení informácie (zhluku dier v polovodiči N), sa ich kladným nábojom odtieni polovodičový substrát od vplyvu poľa, čo vedie k rozdeleniu napätia: časť napätia, ktorá je na dielektrickej vrstve sa zvýši, zatiaľ čo povrchový potenciál sa zníži a šírka ochudobnenej oblasti sa zmenší. Za určitý čas sa potenciálová jama naplní až do nasýtenia tepelne generovanými dierami a pri povrchu vytvára stacionárnu inverznú vrstvu. Veľkosť povrchového potenciálu φ_s na obrázku 3.7 zníži až na potenciál odpovedajúci inverzii povrchu.

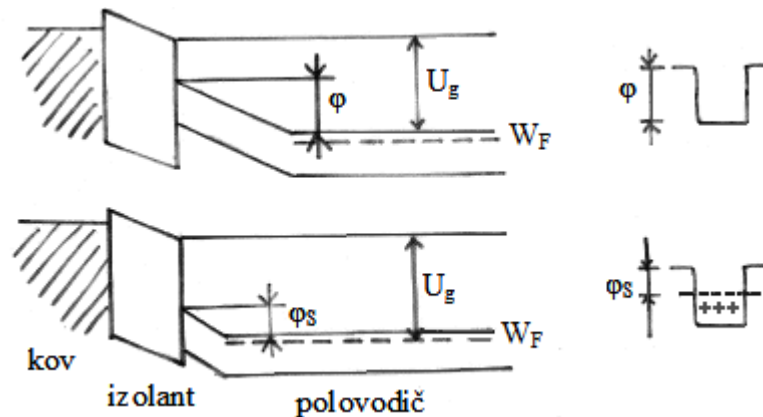
V nestacionárnom stave je povrchový potenciál φ závislý od napätia na hradle U_G , od plošnej hustoty náboja Q_p a od elektro-fyzikálnych vlastností dielektrika a polovodiča podľa vzťahu:

$$\varphi = \frac{U_G - \frac{Q_p}{C_i}}{1 + \kappa}, \quad (3.6)$$

kde κ je linearizačný koeficient polovodičového čipu (0,1; 0,2) a C_i je kapacita izolačnej vrstvy na jednotku plochy. Maximálnu hustotu náboja Q_p v potenciálovej jame pri danom U_g určíme zo vzťahu:

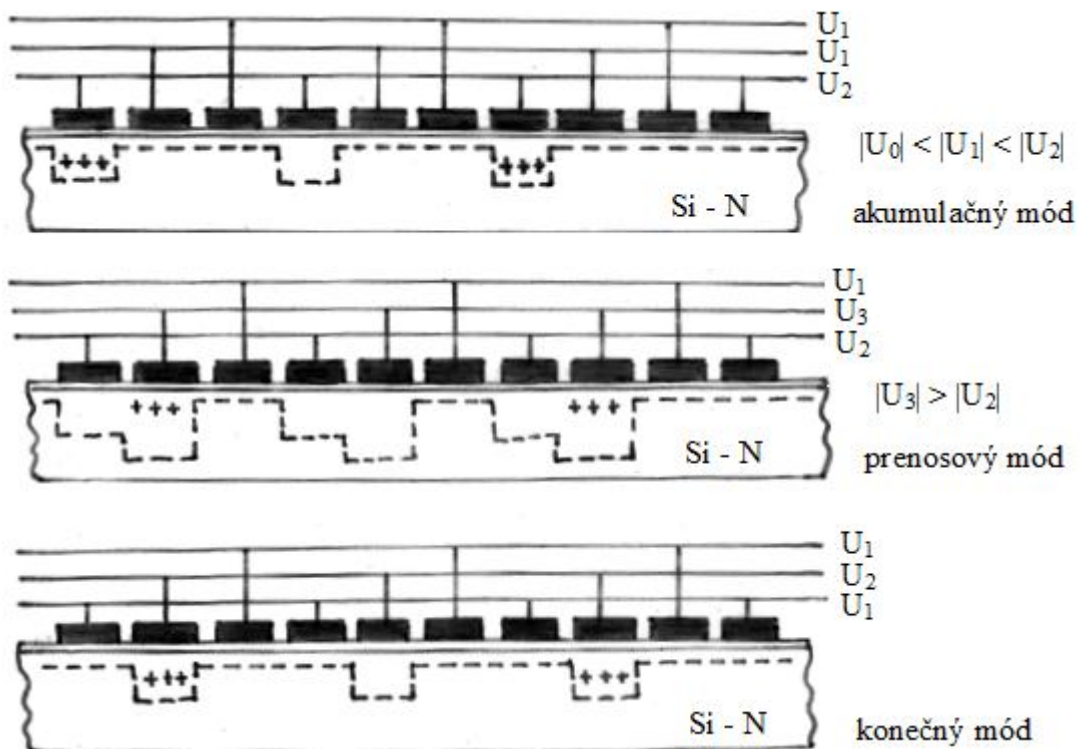
$$Q_{p,m} = C_i(U_g - U_0) \quad (3.7)$$

kde U_0 je minimálne napätie na hradle, pri ktorom oblasť pri povrchu polovodiča prechádza do stavu inverznej vodivosti. Jej hodnota sa rádovo pohybuje $Q_p = 10^{-3} \text{ Cm}^{-3}$.



Obr. 3.7: Povrchový potenciál bez náboja (hore) a po privedení náboja (dole) [o7]

Dynamika prenosu náboja pracuje najčastejšie na princípe trojfázového posuvného registra, ktorý je zobrazený na obrázku 3.7. V tomto obvode je každá tretia elektróda pripojená k zdroju hodinových pulzov. Na prenos informácie je potrebná trojica elektród, ktorá tvorí elementárnu bunku.



Obr. 3.8: Prenos náboja v CCD [o7]

V prvej časti je prvok v akumuláčnom móde, elektródy 1,4,7 sú vo východiskovom stave na napätí $U_G = -U_2$, ktoré zachováva náboj. Na ostatných elektródach je napätie $-U_1$, ktorého hodnota sa volí o málo väčšia ako prahové napätie U_0 preto, aby pri povrchu bola ochudobnená vrstva, t.j. s minimálnym množstvom majoritných nosičov náboja. Predpokladajme, že informácia je v tvare zhlukov nábojov, ktoré sú v potenciálových jamách 1 a 7, v jame 4 náboj nie je.

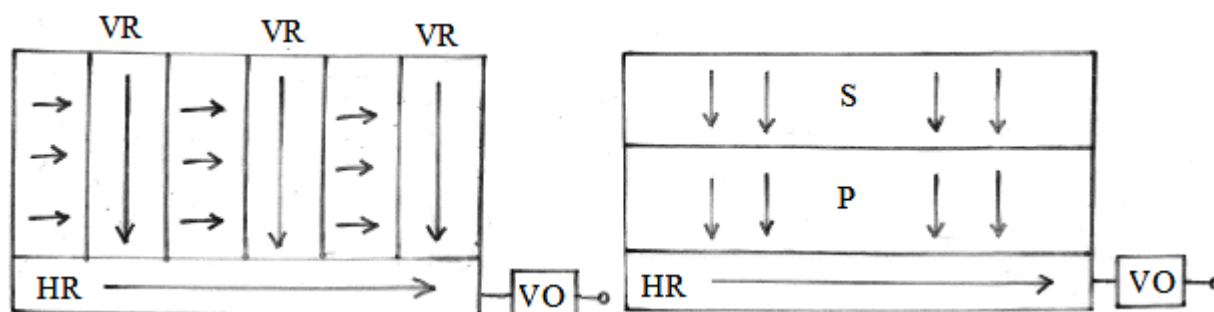
V ďalšom takte zmeníme napätie na každej druhej elektróde danej trojice (bunky) na hodnotu $-U_3$, zníži sa pod nimi potenciálové minimum a nastáva prelievanie nábojových balíkov od štruktúry 1 a 7 k štruktúre 2 a 8. V tomto prípade hovoríme o prenosovom móde činnosti.

Keď sa v tretej fáze činnosti na elektródach objaví napätie U_1 a U_2 , nastáva fáza posunutia o jednu pozíciu a prvok je pripravený na ďalšiu sekvenciu impulzov. Vhodnou voľbou hodinových impulzov môžeme nábojové balíky posúvať zľava doprava.

Pre obvody CCD sú dôležité aj členy zabezpečujúce výstup informácie (čítanie) a ďalej členy, ktoré obnovujú informáciu, pretože môže byť skreslená následkom niekoľkých desiatok prenosov (regenerácia). Spôsoby čítania informácie z registra CCD sú založené na premene množstva náboja na adekvátne zmeny výstupného napätia.

Rozoznávame niekoľko základných spôsobov čítania informácie. Patrí medzi ne odsávanie náboja prechodom PN, registrácia zmien kapacity hradla v závislosti na veľkosti lokalizovaného náboja, registrácia zmien povrchového potenciálu odpojeným, tzv. plávajúcim hradlom alebo pomocou plávajúcej difúznej oblasti, ktorá sa pred začiatkom prenosu náboja nabíja cez tranzistor MOS na napätie U .

Z lineárnych CCD prvkov môžeme skladať obrazové snímače. Základom je matica zostavená z fotocitlivých prvkov, ktorá môže zabezpečovať medziriadkový prenos (line transfer) alebo snímkový prenos (frame transfer). Na obrázku 3.9 je paralelne s každým fotocitlivým stĺpcom (horizontálny register HR) prenosový vertikálny register VR a každý z nich ústi do výstupného obvodu VO, kde sa signál postupne vyčítava.



Obr. 3.9: Vľavo medziriadkový prenos, vpravo snímkový prenos [o7]

CCD prvky sa výborne uplatnili ako detektory žiarenia pevnej fázy, najmä v astronómii sa využívajú pre ich obrovskú citlivosť na dopadajúce žiarenie a výborný prenos zhlukov nábojov priamo v samotnom prvku. Dopadajúci svetelný tok generuje v potenciálových jamách polovodiča zhluky nábojov veľkosťou úmerných dopadajúcemu osvetleniu. Po uplynutí doby akumulácie sa v štruktúre CCD objaví obraz pozostávajúci zo zhlukov náboja ako nositeľov informácie snímaného obrazu. Po prenose a transformácii tejto informácie sa na výstupe CCD objaví postupnosť impulzov, ktorých obalová krivka predstavuje zodpovedajúci signál. Samozrejme aj CCD štruktúry majú svoje technické obmedzenia a k vlastnostiam ideálneho detektora sa iba približujú.

3.2.3 Citlivosť a účinnosť CCD

Fotoelektrická citlivosť CCD je ovplyvnená absorpčným koeficientom α , ktorý charakterizuje pohlcovanie fotónov za súčasného vzniku páru elektrón - diera. Počet fotónov na jednotku plochy sa exponenciálne znižuje s narastajúcou hĺbkou x polovodiča :

$$N_f(x) = N_{f0} \exp(-\alpha x) , \quad (3.8)$$

kde N_{f0} je plošná hustota dopadajúcich fotónov. Absorpčný koeficient prudko klesá so znižovaním vlnovej dĺžky dopadajúceho žiarenia. Z tohto dôvodu je obmedzená oblasť vlnových dĺžok, pri ktorej dochádza k účinnej premene svetelného toku na informačný náboj. Túto oblasť nazývame spektrálnu citlivosť CCD, obmedzenie z hornej aj dolnej časti je dané šírkou pásma zakázaných energií polovodiča. Z dolnej hranice je navyše citlivosť obmedzená silným pohlcovaním fotónov pri povrchu polovodiča, kde prebieha intenzívna rekombinácia nosičov náboja generovaných žiarením. [19]

Keby bola CCD štruktúra citlivá len na fotóny jednej vlnovej dĺžky, bola by kvantová účinnosť q_e daná pomerom počtu dopadnutých fotónov N_f a počtu detekovaných fotoelektrónov N , na jednotku plochy v priebehu jednotkového časového intervalu:

$$q_e = \frac{N}{N_f} . \quad (3.9)$$

Kvantová účinnosť vlastne udáva, koľko fotónov musí dopadnúť na pixel, aby kamera zachytila jeden fotoelektrón, pre reálne detektory platí $q_e < 1$. Tým, že bežný CCD čip odpovedajúci fotometrickým systémom, s príslušným filtrom, má citlivosť vo väčšom intervale vlnových dĺžok, tak aj kvantová účinnosť $q_e(\lambda)$ čipu je funkciou vlnovej dĺžky λ (energie). Účinnosť sa navyše skladá aj z priepustnosti filtru. Ak označíme závislosť priepustnosti filtru na vlnovej dĺžke $f(\lambda)$, potom pre jednu zvolenú λ môžeme napísať nasledujúci vzťah medzi počtom dopadnutých fotónov a fotoelektrónov:

$$\left. \frac{N}{N_f} \right|_{\lambda} = q_e(\lambda) f(\lambda) . \quad (3.10)$$

Celková dopadajúca energia v spektre daného CCD čipu sa potom získa sčítaním všetkých príspevkov z jednotlivých vlnových dĺžok podľa vzorca [1]:

$$E = \int_0^{\infty} q_e(\lambda) f(\lambda) \frac{hc}{\lambda^2} d\lambda . \quad (3.11)$$

3.2.4 Šum v CCD kamerách

Šum je všeobecne náhodná a nežiaduca zmena signálu. V nábojovo viazaných štruktúrach môžeme rozdeliť do dvoch skupín. Prvou sú šumy súvisiace s procesom príjmu obrazu (biely šum v toku dopadajúcich fotónov) a druhú skupinu tvorí fluktuácia náboja pozadia. Biely šum fotónov sa je daný vzťahom:

$$N_{fot} = \sqrt{N_{int}} = \sqrt{H_{int} q_e t_{int} S_f} , \quad (3.12)$$

kde N_{int} je celkový počet nosičov nahromadený za dobu integrácie t_{int} fotocitlivým článkom s plochou S_f . H_{int} je počet fotónov dopadajúcich bez fotónov odrazených a q_e je kvantová účinnosť kamery. Šum súvisiaci s nábojom pozadia závisí od spôsobu akým je náboj do štruktúry zavedený. Ak dochádza k nahromadeniu náboja vplyvom tepelnej generácie, potom jeho fluktuácie sú charakterizované bielym šumom. Ak je náboj pozadia zavádzaný elektricky cez PN prechod, potom pre šum platí vzťah:

$$N_p = \frac{1}{e} \sqrt{kTC_j} , \quad (3.13)$$

kde T je teplota, k je Boltz. konštanta a C_j je účinná kapacita potenciálovej jamy. Medzi šumy ktoré vznikajú pri prenose informácie patrí šum spôsobený neúplným prenosom náboja, šum vplyvom teploty a šum zapríčinený zachycovaním nosičov v rýchlych povrchových stavoch. [20]

Početnosť generovaných fotoelektrónov je všeobecne náhodná veličina, ktorá sa riadi Poissonovým rozdelením, pričom štandardná neistota merania je rovná druhej mocnine z nameranej hodnoty N . Pre štandardnú odchýlku teda platí vzťah:

$$\delta N = \sqrt{N} . \quad (3.14)$$

3.2.5 Farebné systémy

Ľudské oko vníma danú farbu objektu pomocou čapíkov, ktoré kombinujú svetlo z červenej, zelenej a modrej časti spektra. Bežná CCD kamera poskytuje iba čiernobiely obraz, kde množstvo bielej farby lineárne stúpa s intenzitou osvetlenia za jednotku času. Na snímkoch môžeme tak môžeme zmerať jasnosť rôznych objektov, ale nezistíme nič o priebehu spektra. K tomu, aby sme dostali približný priebeh spektra, musíme získať čiernobiele snímky z niekoľkých filtrov a z nich vytvoriť farebný obrázok. Filtre sú optické členy prepúšťajúce len určitý rozsah vlnových dĺžok.

V polovici minulého storočia preto zaviedli H. L. Johnson a W. W. Morgan fotometrický systém UBV na základe pozorovaní niekoľko vybraných hviezd fotonásobičom cez presne definované filtre. Neskôr bol systém rozšírený o ďalšie filtre mimo viditeľnú oblasť, až do súčasnej podoby systému UBVR. Filtre tohto systému boli navrhnuté tak, aby pokryli základné charakteristiky bežných hviezd a citlivosti používaných zariadení. U má polohu Balmerovho skoku, B odpovedá maximálnej citlivosti fotografickej emulzie, V ako vizuálny filter odpovedá citlivosti ľudského oka, R citlivosti CCD kamery a I odpovedá infračervenej oblasti elektromagnetického spektra. [1]

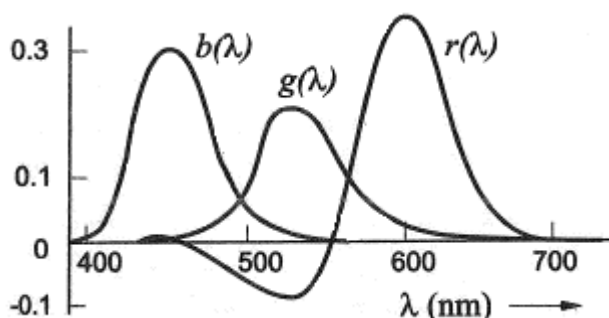
CCD alebo CMOS čip v digitálnych fotoaparátoch má v každom pixeli naparenú vrstvu farebných filtrov, ktoré reprezentujú základné farby v systéme RGB. Pomocou nich a príslušného softvéru vo fotoaparáte sa škáluje farebný obraz blízky skutočnosti. Každý pixel je rozdelený na 4 polia, diagonálne sú umiestnené dva zelené filtre (G) a vo zvyšných poliach je jeden červený (R) a jeden modrý filter (B).

Každý fotoaparát môže mať inú citlivosť jednotlivých filtrov, rôznym spôsobom môže vyhodnocovať dopadajúce žiarenie, celková citlivosť a účinnosť každého čipu sa môže líšiť aj vplyvom starnutia. Aby bolo možné rôzne farebné svetlo merať a vyjadrovať bez ohľadu na subjektivitu ľudského vnímania, bol v roku 1931 vytvorený medzinárodný štandard základných farieb, ktorého súčasťou je tzv. chromatický diagram CIE (Commission

Internationale de l'Éclairage, v preklade Medzinárodná komisia pre osvetlenie). V tomto štandarde sa predpokladá, že každú farbu je možné definovať váženým súčtom troch primárnych farieb, ktoré sú vyžarované monochromatickými zdrojmi svetla s vlnovými dĺžkami $R = 700$ nm, $G = 541,1$ nm a $B = 435,8$ nm. Ľubovoľná monochromatická farba je potom určená vzťahom:

$$C = rR + gG + bB , \quad (3.15)$$

kde $r(\lambda)$, $g(\lambda)$, $b(\lambda)$ sú farebné vyrovnávacie funkcie s priebehom na obrázku (3.10), ktoré boli stanovené pomocou kolorimetrických experimentov (na ľud'och).



Obr. 3.10: Vyrovnávacia funkcia CIE 1931 [o2]

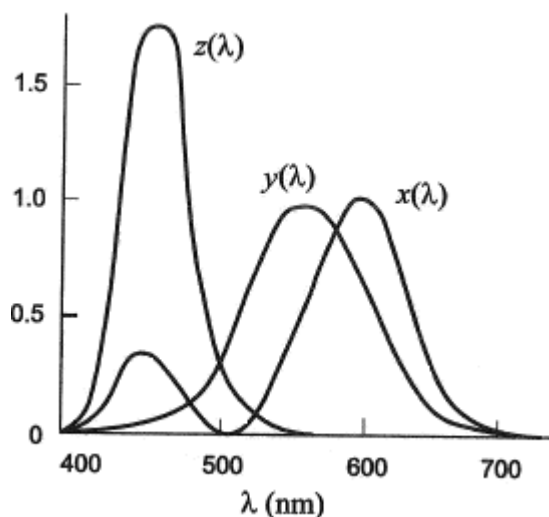
Na normu CIE 1931 nadviazali umelé farebné vyrovnávacie funkcie s priebehom podľa obrázku 3.11. Každá farba so svojim spektrálnym rozložením je vyjadrená pomocou týchto funkcií vyjadrená váhami X, Y, Z získanými zo vzťahov:

$$\begin{aligned} X &= k \int_{\lambda} P(\lambda)x(\lambda) d\lambda \\ Y &= k \int_{\lambda} P(\lambda)y(\lambda) d\lambda \\ Z &= k \int_{\lambda} P(\lambda)z(\lambda) d\lambda , \end{aligned} \quad (3.16)$$

kde k je konštanta, ktorá pre objekty s vlastným vyžarovaním má hodnotu $k = 680$ a $P(\lambda)$ je spektrálne rozloženie energie. Po prevedení trojice X, Y, Z do normalizovaného tvaru získame farebné súradnice:

$$x = \frac{X}{X + Y + Z} , \quad y = \frac{Y}{X + Y + Z} , \quad z = \frac{Z}{X + Y + Z} . \quad (3.17)$$

Všetky farby môžeme reprezentovať súradnicami x, y v dvojrozmernom diagrame. Pretože platí, že $x + y + z = 1$, stačia k úplnému určení farby iba súradnice x, y doplnené o hodnotu jasovej zložky Y . Pomocou jasovej zložky Y môžeme taktiež rekonštruovať pôvodné hodnoty váh X, Y, Z . [21]



Obr. 3.11: Vyrovnávacia funkcia YXZ [o2]

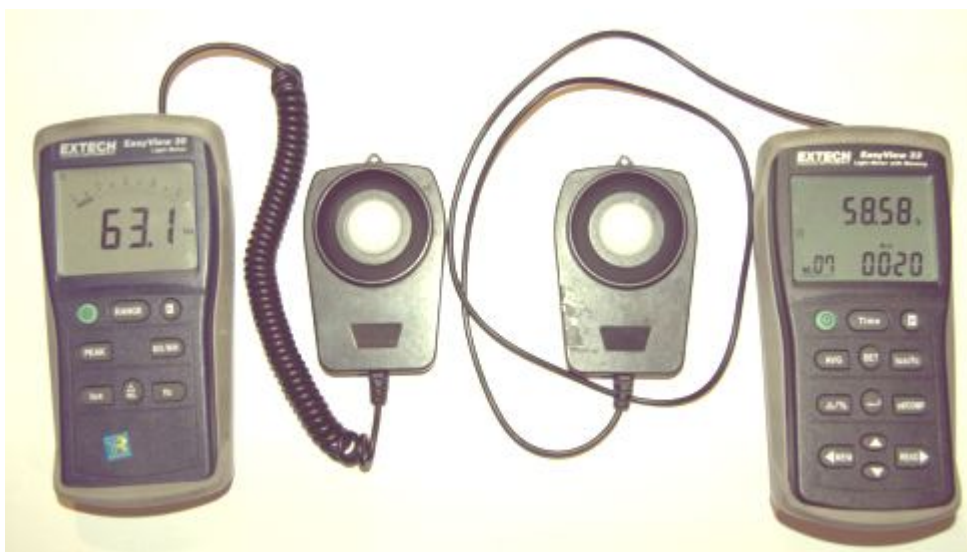
3.2.6. Formáty snímkov

Všeobecne sa snímky z fotoaparátu ukladajú v rôznych obrazových formátoch, pri snímaní hviezdnej oblohy je najlepšie zvoliť raw formát, ktorý sa následne prevedie pomocou funkcie YXZ do obrazového formátu FITS (Flexible Image Transport System). FITS formát je jednotne používaný formát, ktorý využívajú všetky astronomické programy na spracovávanie fotografií. Tento formát môže mať veľa podôb, ale vždy obsahuje hlavičku a samotné dáta.

Hlavička obsahuje niekoľko dôležitých údajov o obrázku, ako počet dimenzií (NAXIS), počet pixelov v jednotlivých osiach (NAXISn), dátum a čas začiatku expozície (DATE-OBS), expozičný čas v sekundách (EXPTIME), názov pozorovaného objektu (OBJECT), použitý filter (FILTER) a binning ([X,Y]XFACTOR), ktorý popisuje združovanie susedných pixelov do skupín po 2x2 alebo 3x3 pixeloch. Po hlavičke nasledujú dáta (vlastný snímok), ktoré sú v obrázku uložené ako tabuľka (matica). Jednotlivé čísla v tabuľke sú vlastne pixely a ich hodnoty sú úmerné dopadnutému žiareniu. Polohu pixelov označujeme pomocou celočíselných horizontálnych a vertikálnych súradníc. [1]

3.3 Luxmeter

Luxmeter je prístroj na meranie intenzity osvetlenia pozostávajúci z fotoelektrického snímača a elektroniky s displejom na vyhodnocovanie meraní. Snímač je schovaný v robustnom plastovom obale a kvôli ľahšej manipulácii je vodičom pripojený ku krabičke, v ktorej sa nachádzajú ovládacie tlačidlá, elektronické obvody, napájanie 9V batériou a displej na zobrazenie meraných hodnôt. Na obrázku 3.12 sú dva luxmetre od firmy Extech Instruments, ktoré som používal pri meraní. Vľavo sa nachádza starší model EasyView Light Meter 30, vpravo je novší model Easyview 33.



Obr. 3.12: Luxmetre používané pri meraniach

3.3.1 Princíp činnosti a vlastnosti

Dopadajúce žiarenie prechádza cez kosínusový nadstavec až na plochu kremíkovej fotodiódy. Tento fotoelektrický snímač prevádza dopadajúce elektromagnetické vlnenie vo viditeľnej oblasti spektra na elektrický signál. Využíva pritom vonkajší alebo vnútorný fotoelektrický jav popísaný v kapitole 3.1.3. Najčastejšie sa používajú analógové luxmetre so selénovým fotočlánkom alebo digitálne luxmetre s kremíkovým fotočlánkom.

Elektronika v luxmetri je schopná prepočítať detekované kvantum svetla na jednotku osvetlenia lux. Ak poznáme presnú vzdialenosť prístroja od zdroja, niektoré luxmetre dokážu premieňať signál na svietivosť v kandelách, prípadne na tzv. kandelostopy (foot-candle).

Samotná fotodióda v luxmetri by ale nebola vhodný na meranie osvetlenia, pretože by sa výsledky meraní nepribližovali zrakovému vnemu. Preto sa na snímač pridáva korekčný filter, ktorý zohľadňuje okrem fyzikálnych vlastností svetelných podnetov aj základné charakteristiky a funkcie zraku. Luxmeter bez odpovedajúceho korekčného členu, ktorý prepúšťa iba určitý rozsah vlnových dĺžok, by sa pre meranie vôbec nemal používať [22].

Na fotoelektrický snímač luxmetra sa ešte zvyčajne pripevňuje kosínusový nadstavec, ktorý je so snímačom pevne spojený alebo odnímateľný. Toto zariadenie slúži na zachytávanie žiarenia zo všetkých smerov nad meranou plochou a jeho vyhodnotenie podľa kosínusu uhla dopadu na meranú plochu.

3.3.2 Citlivosť a účinnosť luxmetra

Spektrálna citlivosť fotodiódy je upravená podľa krivky citlivosti ľudského oka pri fotopickom videní, podľa normy CIE. Citlivosť na žiarenie mimo rozsahu 380 až 780 nm je potlačená korekčným filtrom. Základný rozsah bežného luxmetra býva od 0 do 10^6 luxov, s prepínateľným alebo automatickým škálovaním hodnôt. V Tabuľke 3.1 sú uvedené jednotlivé rozsahy a najmenšie hodnoty, ktoré sú schopné zachytiť použité luxmetre, na obrázku 3.13 je spektrálna citlivosť luxmetra.

Veľkosť fotoprúdu je lineárne závislá na množstve dopadnutého svetla, preto sa ako detektor žiarenia v luxmetri využíva práve fotodióda. Pomocou tranzistorov sa fotoprúd zosilní a následne prepočíta na hodnoty zobrazované na displeji luxmetra. Fotodióda je polovodičový prvok, u ktorého sa môže vyskytovať tzv. temný prúd. Jedná sa zväčša o nízky, ale nežiaduci prúd pri nulovom osvetlení diódy, ktorý vzniká tepelným pohybom fotoelektrónov. Luxmeter preto ešte obsahuje korekčný člen (ripple function - šumová funkcia), ktorý eliminuje vplyv temného prúdu fotodiódy, resp. „zablúdené fotóny“ z primárneho zdroja osvetlenia.

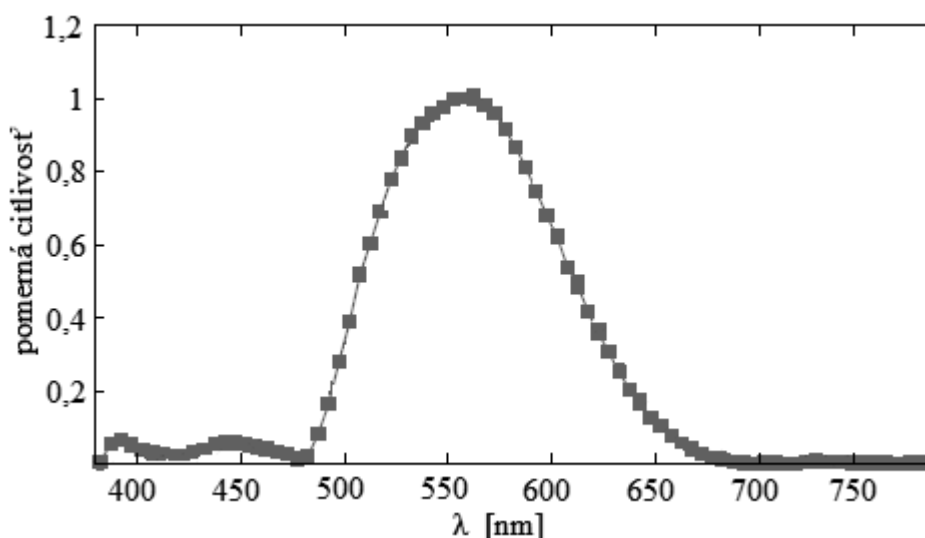
Tabuľka 3.1

rozsah [lux]	99,99	999,9	9999	99990	999900
rozlíšenie [lux]	0,01	0,1	1	10	100

Účinnosť luxmetra je tiež odvodená od pomernej spektrálnej svetelnej účinnosti žiarenia, ktorá je definovaná ako podiel žiarivých tokov pri vlnových dĺžkach λ_M a λ . Za daných podmienok vyvoláva v ľudskom oku určitý vnem. Pre účinnosť luxmetra teda platí vzťah:

$$\eta(\lambda) = \frac{\Phi(\lambda_M)}{\Phi(\lambda)}, \quad (3.18)$$

kde $\lambda_M = 555$ nm je vlnová dĺžka, pri ktorej je spektrálna citlivosť ľudského oka maximálna.



Obr. 3.13: Spektrálna citlivosť luxmetra [o7]

3.3.3 Chyby luxmetra

Meranie luxmetrom je zaťažené viacerými chybami. Vzniká jednak spektrálna chyba luxmetra, pretože zdroje žiarenia sú väčšinou s iným spektrálnym zložením, ako je žiarenie normalizovaného zdroja, (žiarenie absolútne čierneho telesa pri teplote 2855,56 K), ktorým sa luxmetre kalibrujú. Spektrálna chyba tiež môže vzniknúť nedokonalým spektrálnym prispôbením fotodiódy na funkciu $V(\lambda)$, t.j. krivka spektrálnej citlivosti sa môže líšiť od funkcie $V(\lambda)$ alebo môže byť fotodióda citlivá na ultrafialové alebo infračervené žiarenie mimo viditeľného svetla.

Pri dopade žiarenia na fotodiódu pod obecným uhlom α vzniká odchýlka od merania pri kolmom dopade. V dôsledku nedokonalosti kosínusového nadstavca môže vznikáť smerová chyba, t.j. odchýlka od kosínusového priebehu. Polovodičová fotodióda je navyše citlivá aj na zmenu teploty, čo luxmeter odstraňuje započítaním teplotného koeficientu do výslednej hodnoty zobrazenej na displeji. Koeficient je rovnako zaťažený určitou relatívnou chybou. Prístroj môže vykazovať aj krátkodobú časovú nestabilitu (únavu), ktorá úzko súvisí s možnosťou opakovania merania počas určitej doby. Pri luxmetri s ručne prepínateľným rozsahom sa môže objaviť aj chyba pri zmene rozsahu. [23]

V tabuľke 3.2 sú výrobcom udávané hodnoty relatívnych chýb luxmetrov. Rýchlosť vyčítavania signálu z fotodiódy je 5krát za sekundu, odporúčané podmienky na meranie je teplota -10 až 40 °C a relatívna vlhkosť nižšej ako 80% RH.

Tabuľka 3.2

ukazovateľ	relatívna chyba
smerová chyba	$\leq 6,0\%$
spektrálna chyba	$\leq 2,0\%$
teplotná chyba	$\pm 0,1\% / ^\circ\text{C}$
chyba pri zmene rozsahu	$\pm 0,5\%$

Všeobecne je absolútna chyba jedného merania luxmetrom zložená z viacerých vyššie uvedených zložiek a v prípade luxmetrov, s ktorými som meral, je daná vzorcom [24]:

$$\delta = \pm(3\%rdg + 5 \text{ digits}) , \quad (3.19)$$

kde *rdg* predstavuje zmeranú hodnotu a *digits* je počet jednotiek na poslednom desatinnom mieste pri danom rozsahu.

3.4 Sky Quality Meter

Sky Quality Meter (SQM) je prístroj na okamžité meranie jasnosti oblohy, určený najmä pre astronómov. Za posledných pár rokov vzniklo niekoľko rôznych druhov jasomerov. Prvé, SQM prístroje mali široké zorné pole a nameraná hodnota sa zobrazovala na jednoduchom displeji hneď vedľa snímača. Nasledovalo SQM-L s úzkym zorným poľom, samotný obal sa zmenšil a display sa presunul na hornú stranu krabičky, mimo snímača. Ani jeden prístroj nedokázal namerané hodnoty ukladať. Túto požiadavku splnilo až SQM-LE s ethernetovým pripojením, SQM-LU s USB výstupom a SQM-RS s RS232 konektorom na 9-pinový kábel. Posledné tri menované SQM majú úzke zorné pole a dokážu priebežne vyčítavať hodnoty, ktoré sa môžu cez ich výstup zaznamenávať do počítača. Počas meraní som mal k dispozícii 4 SQM - L prístroje, ktoré sú na obrázku 3.14.



Obr. 3.14: Sky Quality Metre od firmy Unihedron

3.4.1 Princíp činnosti a vlastnosti

Hlavnou časťou prístroja je svetlocitlivý senzor TSL237S, ktorý sa skladá z kremíkovej fotodiódy a prevodníka z fotoprúdu na frekvenciu. Vo fotodióde prebieha fotoelektrický jav, vzniká fotoprúd, ktorý následne spracováva prevodník založený na báze jednoduchej CMOS štruktúry. Výstupný signál zo senzora tvoria obdĺžnikové kmity s frekvenciou úmernou intenzite žiarenia, ktoré detekovala fotodióda. Digitálny výstupný signál zo senzora potom spracováva mikrokontroler alebo ďalší logický okruh na konečnú hodnotu, ktorá sa zobrazí na displeji. Samotný senzor je ešte pokrytý korekčným filtrom HOYA CM-500 a je uložený v priehľadnom puzdre, ktoré sa skladá zo všesmerových integračných šošoviek.

Jasnosť číslcového LED displeja má dve automatické nastavenia, prístroj je napájaný 9V batériou a po každom prečítaní hodnoty sa sám vypne. Jednotlivá dĺžka merania sa môže meniť, pod oblohou v obývanej oblasti je výsledok zobrazený takmer okamžite, pri bezmesačnej noci ďaleko od civilizácie môže trvať až minútu, než SQM dokončí meranie.

Jasomer ďalej obsahuje korekčný člen (senzor) na teplotu, aby boli eliminované jej vplyvy na fotodiódu a mikrokontroler. Odporúčaná pracovná teplota by sa mala pohybovať v rozsahu od -25° po 70° C. SQM pri prvom stlačení tlačidla zobrazí nameranú hodnotu, pri druhom stlačení zobrazí teplotu prístroja v $^{\circ}$ C alebo $^{\circ}$ F a prípadne model a výrobné číslo.

Astronómovia vyjadrujú jasnosť zdroja žiarenia pomocou hviezdnej veľkosti vyjadrovanej v jednotkách zvaných magnitúdy. Hviezdna veľkosť m je logaritmická veličina zviazaná s príslušnou jasnosťou j prostredníctvom Pogsonovej rovnice, ktorú sformuloval v roku 1857 [7]:

$$m = -2,5 \log \left(\frac{j}{j_0} \right), \quad (3.20)$$

kde j_0 je referenčná jasnosť, ktorú má zdroj s hviezdou veľkosťou $m = 0$ mag.

SQM zobrazuje neranú jasnosť hviezdnej oblohy v logaritmických jednotkách - magnitúda na štvorcovú uhlovú sekundu - mag/arcsec². Veľká zmena jasnosti oblohy predstavuje malý číselný skok, rozdiel jednej magnitúdy je definovaný nasledovne:

$$\Delta m = 1 \text{ mag/arcsec}^2 = 100^{\frac{1}{5}} N, \quad (3.21)$$

kde N je počet prijatých fotónov. Zníženie jasnosti o 5 mag/arcsec² predstavuje 100krát menej zachytených fotónov. Prístroj nie je schopný merať v iných jednotkách, ale na prevod zobrazeného merania na jednotky definované v SI existuje vzťah [25]:

$$10,8 \cdot 10^4 \cdot 10^{(-0,4 \cdot [\text{mag/arcsec}^2])} \approx [\text{cd/m}^2]. \quad (3.22)$$

3.4.2 Citlivosť a účinnosť SQM

SQM je citlivý len na oblasť viditeľného svetla, pretože pred vlastným senzorom (fotodiódou) je filter, ktorý neprepúšťa infračervené žiarenie. Na obrázku 3.15 je priebeh spektrálnej citlivosti fotodiódy a priepustnosti filtra. Najvyššia spektrálna citlivosť celého senzora je pri vlnovej dĺžke $\lambda = 524$ nm. V tabuľke 3.3 sú uvedené niektoré výstupné parametre charakterizujúce prevodník. Dôležitý je najmä rozsah frekvencií, na ktoré dokáže prevodník premieňať prúd z fotodiódy, škálovanie podľa úrovni jasu. Prevodník má rovnako potlačenú citlivosť na tzv. temnú frekvenciu, ktorá vzniká pri nulovom jase, rovnako citlivosť fotodiódy je zaťažená určitým temným prúdom.

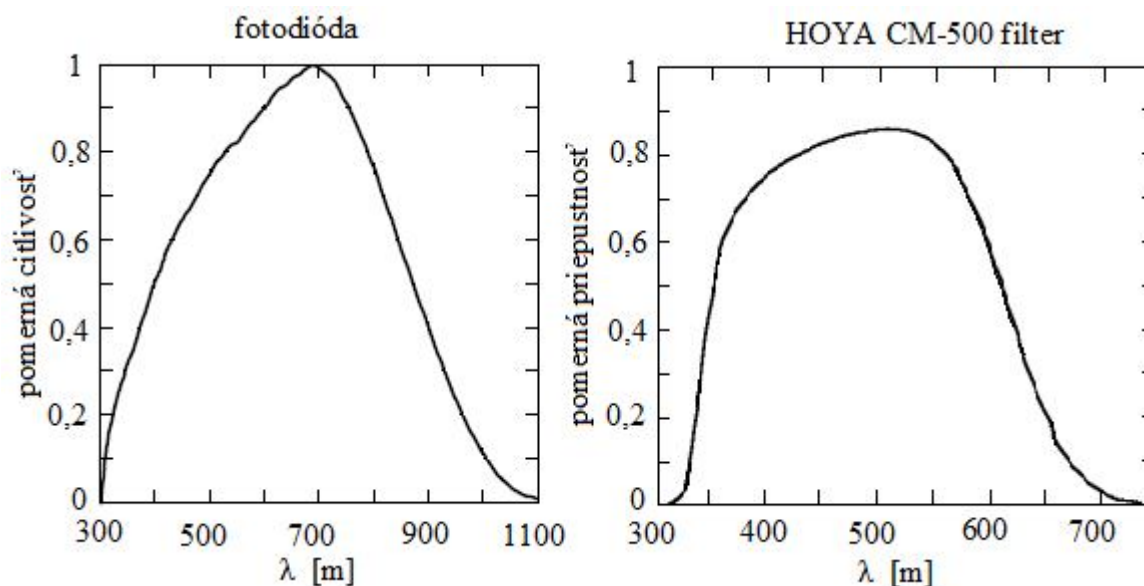
Smerová citlivosť prístroja na bodový zdroj je približne 19°, mimo osi, v ktorej sa nachádza senzor, je citlivosť 10krát nižšia. Bodový zdroj 20° a 40° od osi je registrovaný ako o 3, respektíve 5 magnitúd slabší. Pološírka polovičného maxima uhlovej citlivosti je 20°. SQM nemeria jasnosť oblohy bodovo, ale vyhodnocuje svetlo zo širšieho poľa hviezdnej oblohy, jeho efektívny priestorový uhol je $\alpha = 1,532$ steradiánov, teda pomerne úzky kužeľ.

Tabuľka 3.3 [26]

ukazovateľ	podmienky	hodnota	jednotka
výstupná frekvencia	jas $L = 21,8 \mu\text{W/m}^2$	40-60	kHz
škálovanie výstupnej frekvencie		2,3	kHz/ ($\mu\text{W/m}^2$)
maximálna prevádzková frekvencia		500-1000	kHz
temná frekvencia	jas = 0 W/m ²	0-2	Hz
frekvenčná nelinearita	f = 0 Hz - 10 kHz	±1	% drg

SQM má veľmi veľký rozsah, vďaka ktorému je schopný merať jasnosť hviezdnej oblohy veľmi presne. Prístroj je veľmi citlivý za tmavých podmienok, ale na dennom svetle túto schopnosť stráca, vysoký jas spôsobí saturáciu snímača, čo sa indikuje aj na displeji. Pre zmysluplné merania by nemalo na senzor dopadať priame slnečné svetlo, pretože sa môže nevratne poškodiť. SQM musí byť namierený do zenitu, aby meranie nebolo ovplyvnené zdrojmi svetla pri horizonte. Obloha je aj kvôli svetelnému znečisteniu najtemnejšia práve v zenite.

Na výsledok môže mať vplyv aj počasie, pretože SQM je pomerne jednoduché zariadenie, ktoré predpokladá meranie iba počas výbornej viditeľnosti a oblohy bez mrakov. Výsledky ďalej môže ovplyvniť aj zodiakálne (zvieratníkové) svetlo, ktoré vzniká pri odraze slnečných lúčov od medziplanetárnych prachových zrníek rozptýlených v slnečnej sústave pozdĺž ekliptiky. Zodiakálne svetlo má kužeľovitý tvar, najsvetlejšie časti sú blízko horizontu, smerom k zenitu sa objavujú stále tmavšie oblasti. Práve tmavé oblasti by mohli pozmeniť hodnoty jasmerania v zenite o 1 až 2%. Prístroj má úzky kužeľ citlivosti, čiže najsvetlejšie (horizontálne) časti zodiakálneho svetla do neho nepadnú. Samozrejme vysoká úroveň jasmerania vypovedá aj o veľkom svetelnom znečistení v danej oblasti.



Obr. 3.15: Citlivosť fotodiódy a priepustnosť filtra v SQM [o8]

3.4.3 Chyby merania

Každý SQM je kalibrovaný podľa vzorového jasomeru, ktorý zaviedol Národný inštitút štandardov a technológií NIST (National Institute of Standards and Technology). Napriek tomu sa môže byť rozdiel v nulovej pozícii (žiadne osvetlenie) medzi jednotlivými kalibrovanými jasomermi typicky 0,1 mag/arcsec².

Systematické chyby môžu vychádzať zo zlého nasmerovania prístroja na oblohu, pretože je potrebné vždy merať v oblohy smere a prípadne vyberať tie časti oblohy, kde sa nenachádzajú jasnejšie hviezdy alebo planéty.

Hodnoty, ktoré udáva senzor v SQM, sú ovplyvnené teplotou. V prístroji je umiestnený teplotný detektor, ktorý kompenzuje závislosť fotodiódy a mikrokontrolera na teplote. Pri prvom meraní však býva svetlocitlivý senzor chladnejší ako pri ďalších meraniach, pretože sa mierne zahrieva dodaným prúdom z napájania. Prvé meranie môže byť niekedy odlišné, s priebežnou zmenou teploty prístroja behom štartu môže byť prvá hodnota vyššia než tie nasledujúce. Pre presnejší výsledok sa odporúča urobiť viacero meraní za sebou s tým, že prvá hodnota sa vylúči.

Prístroje môžu ďalej vykazovať smerové chyby, spôsobené nedokonalosťou systému šošoviek pred senzorom. Rovnako mikrokontroler nemusí mať dokonale potlačený vplyv na temnú frekvenciu. Navyše sa u neho sa objavuje aj frekvenčná nelinearita, približne 1% z hodnoty frekvencie.

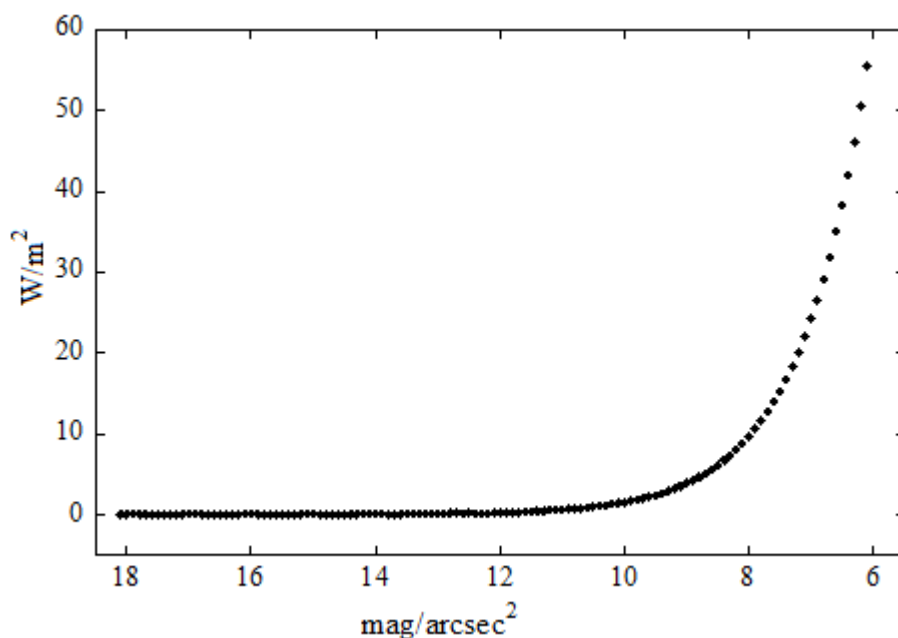
Jas oblohy môžeme pomocou SQM určiť s presnosťou lepšou ako $\pm 10\%$, čiže podľa vzorca (3.15) môžeme písať [27]:

$$m = -2,5 \cdot \log\left(\frac{j + 0,1 \cdot j_0}{j_0}\right) = -2,5 \cdot \log\left(\frac{j}{j_0} + 0,1\right) . \quad (3.23)$$

Takto zadefinovaná krajná chyba ($\pm 0,10 \text{ mag/arcsec}^2$) platí podľa výrobcov pre všetky zmerané výsledky zároveň a nezohľadňuje číselnú hodnotu jasu, ako je tomu napríklad pri luxmetri. Na presnejšie určenie chyby je preto potrebné urobiť viac meraní za sebou, hodnotu jasu určiť z aritmetického priemeru a neistotu merania určiť štatisticky, rovnako ako pri fotočlánku v kapitole 3.4.3.

Najväčšia absolútna chyba ktorú udáva výrobca, $0,1 \text{ mag/arcsec}^2$ pre všetky hodnoty sa mi javí definovanosťou nepresne. SQM meria v pomerných logaritmických jednotkách, čo sa musí prejavíť aj na chybe merania. Vyniesol som preto podľa vzorca (3.22) množstvo svetelnej energie, ktoré zodpovedalo vždy zmene o $0,1 \text{ mag/arcsec}^2$ na displeji SQM, t.j rozdiel medzi 6 - 6,1; 6,1 - 6,2 atď. Z grafu na obrázku 3.15 je vidieť, že do desiatej mag/nitúdy sa množstvo energie nemení a potom sa prejaví exponenciálne stúpanie.

Najmenšia hodnota, ktorá sa mi podarila namerať v takmer zatemnenej miestnosti, bola 23,5 a najvyššia hodnota počas zamračeného dňa bol približne 6 mag/arcsec^2 , čo odpovedá rosahu $0,00006$ až $629,5 \text{ mW/m}^2$, čo je rádovo 10^8 .



Obr. 3.16: Množstvo energie, ktoré odpovedá zmene na displeji o $0,1 \text{ mag/arcsec}^2$

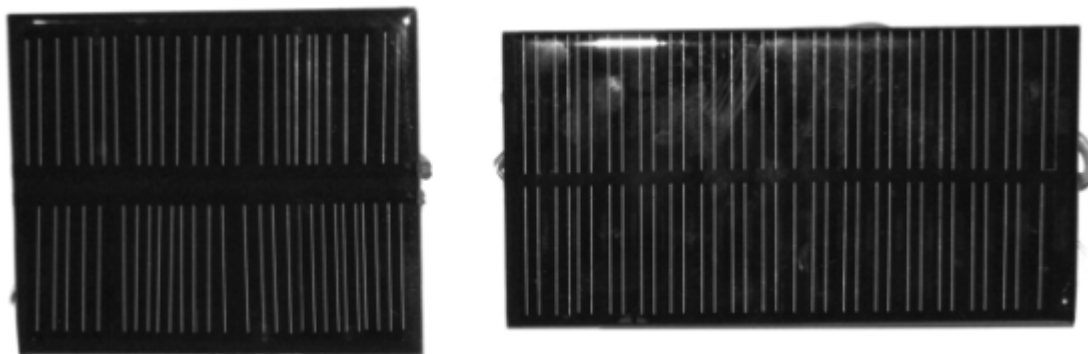
3.5 Fotovoltaický článok

Vznik a vývoj fotovoltaických článkov súvisí s fotovoltaickým javom, ktorý objavil v roku 1839 francúzsky fyzik Alexandre E. Becquerel. Všimol si, že pôsobením slnečného žiarenia na materiály s určitými elektrochemickými konfiguráciami vzniká v obvode elektrický prúd. Vznikla teda myšlienka, že elektrická energia by sa týmto spôsobom mohla začať vyrábať nehlučne, bez akýchkoľvek pohyblivých súčastí a bez vedľajších produktov. [28]

Ale prvý solárny článok skonštruoval až v roku 1884 americký vynálezca Charles Fritts zo seleniového polovodiča potiahnutý tenkou vrstvičkou zlata a dosiahol účinnosť v premene svetla na elektrinu približne 1%. Solárne články s takou nízkou účinnosťou sa používali až do roku 1960 ako svetelné senzory pre určovanie času expozície snímky vo fotoaparátach.

Kremíkové fotovoltaické články boli ďalej zdokonaľované v Bellových Laboratóriách v USA až do 50. rokov minulého storočia a prvýkrát boli solárne moduly ako zdroje elektriny využité na orbitálnej družici Vanguard 1 v roku 1958. K výrobe elektrickej energie v pozemských podmienkach sa ale začali používať až od druhej polovice 80. rokov.

Vývoj pokračoval ďalej a súčasný fotovoltaický článok je vlastne tenká svetlocitlivá polovodičová doštička z kremíku a ďalších prímiesových prvkov s rozmermi približne 10×10cm. Jednotlivé články sa sériovo-paralelným spôsobom zapojujú do väčších fotovoltaických panelov, ktoré sú uchytené v pevnej hliníkovej konštrukcii pod solárnym vysoko-priepustým sklom. Celý systém vytvorí solárnu elektráreň, ktorá sa potom usadzuje do vhodných konštrukcií kotvených do strešnej krytiny budovy, prípadne na prírodný terén. [29] Samostatné články sa môžu využívať aj ako pomerne citlivé fotodetektory. Na obrázku 3.17 sú články od firmy Conrad, vľavo s označením 191347-UO a vpravo 191334-UO, ktoré som mal k dispozícii.



Obr. 3.17: Fotovoltaické články

3.5.1 Princíp činnosti a vlastnosti

Fotovoltaický článok využíva fotovoltaický jav, resp. fotolektrický jav popísaný v kapitole 3.1.3. Konštrukcia panelov je veľmi jednoduchá, na kremíkovej doske sú v dvoch radoch naparené veľmi tenké svetlocitlivé vrstvy, ktoré sú vzájomne sériovo spojené a zaliate v anti-reflexnej vrstve. Pri dopade slnečného žiarenia sa generuje v polovodičovej vrstve fotoprúd, ktorého veľkosť závisí od množstva dopadajúceho žiarenia.

K fotočlánkom môžeme pripojiť ampérmeter alebo voltmeter. V tabuľke 3.4 sú výrobcom uvedené základné parametre oboch fotočlánkov, medzi ktoré patrí najmä maximálna veľkosť napätia U_{max} a I_{max} a prúdu, ktorý je fotočlánok schopný dodať.

Ak prechádza elektromagnetická vlna rozhraním oddeľujúcim dve prostredia s rôznymi optickými parametrami, dochádza k na rozhraní k odrazu. Najjednoduchší prípad nastáva, keď žiarenie prechádza vzduchom ($n = 1, \kappa = 0$) a dopadá kolmo na povrch polovodiča. V tomto prípade je odrazivosť daná vzťahom:

$$R = \frac{(n - 1)^2 + \kappa^2}{(n + 1)^2 + \kappa^2}, \quad (3.24)$$

kde n je index lomu polovodiča a κ je index jeho absorpcie súvisiaci s absorpčným koeficientom α podľa vzťahu $\kappa = \alpha \frac{\lambda}{4\pi}$, kde λ je vlnová dĺžka žiarenia. Zo vzťahu (3.24) vyplýva, že z rastom absorpcie rastie aj odrazivosť a pre $\kappa \gg 1$ nastáva takmer úplný odraz. Je preto zrejmé, že ak dochádza v niektorej oblasti spektra vo fotočlánku k silnej absorpcii žiarenia, bude táto látka rovnako silno žiarenie aj odrážať. Index lomu n má u najznámejších fotočlánkov hodnotu $n \approx \langle 3; 4 \rangle$ a odrazivosť dosahuje hodnoty $R = (0,3; 0,4)$. Pri zhotovovaní fotodetekčných štruktúr je potrebné odrazivosť podstatne znížiť, aby sa dosiahlo vyššej energetickej účinnosti fotodetekčných prvkov. Za týmto účelom sa povrch fotočlánkov pokrýva špeciálnou antireflexnou vrstvou, ktorá má vhodne zvolený index lomu a vhodnú hrúbku. [30]

Tabuľka 3.4

fotočlánok	rozmery [cm]	aktívna plocha S [cm ²]	napätie U_{max} [V]	prúd I_{max} [mA]	výkon [W]
191347-UO	9,0 x 7,0	63	18	40	0,72
191334-UO	12,5 x 6,5	81,3	9	109	0,98

3.5.2 Citlivosť a účinnosť fotočlánku

Citlivosť fotočlánku patrí medzi najdôležitejšie parametre a udáva sa ako pomer hodnoty fotoprúdu I_f alebo fotonapätia U_f k danej veľkosti žiarivého toku Φ pri určitej vlnovej dĺžke λ . Statická (integrálna) prúdová citlivosť je definovaná vzťahom:

$$S_I(\lambda) = \frac{I_f}{\Phi_\lambda}. \quad (3.25)$$

Rozmer prúdovej citlivosti je [A·W⁻¹] alebo [A·lm⁻¹]. Napät'ová integrálna citlivosť je analogicky definovaná vzťahom:

$$S_U(\lambda) = \frac{U_f}{\Phi_\lambda}. \quad (3.26)$$

Rozmer napät'ovej citlivosti je [V·W⁻¹] alebo [V·lm⁻¹]. Napriek tomu, že vhodnejšie by bolo merať prúdovú citlivosť, v praxi sa realizuje menej náročné meranie napät'ovej citlivosti. Najčastejšie je zvolená maximálna hodnota vlnovej dĺžky λ_{max} , pri ktorej ešte nastane foto-efekt, tj. bude generovaný pár elektrón - diera, a to je v prípade:

$$\lambda_{max} = \frac{h c}{e} \frac{1}{\Delta W_Z} = 1,24 \cdot 10^{-6} \cdot \Delta W_Z \quad [\text{m}] , \quad (3.27)$$

kde h je Plackova konštanta, c je rýchlosť svetla vo vákuu, e je elementárny náboj a ΔW_Z šírka oblastí zakázaných energií. V tabuľke 3.5 sú uvedené hodnoty ΔW_Z pre rôzne polovodiče.

Klasický solárny panel má úplne odlišný priebeh spektrálnej citlivosti ako je citlivosť ľudského oka (funkcia $V(\lambda)$), pretože neobsahuje žiadny filter ani korekčný člen.

Tabuľka 3.5

typ polovodiča	Si	Ge	GaAsP	Se (hexagon)	Te	PbS	CdS	GaSb	InSb
ΔW_Z [eV]	1,12	0,65	1,8	1,74	0,35	0,39	2,4	0,7	0,18

Priebeh spektrálnej citlivosti $S(\lambda)$ je ovplyvnený viacerými faktormi. Smerom ku kratším vlnovým dĺžkam je to pozitívny vplyv nárazovej ionizácie (veľká energia fotónov) a negatívny vplyv absorpcie materiálu, z ktorého sú zhotovené fotočlánky. Smerom k väčším vlnovým dĺžkam ovplyvňuje citlivosť nedostatočná energia dopadajúcich fotónov ($E_f = h\nu$). Každý reálny fotočlánok sa teda bude vyznačovať maximom citlivosti, ktoré bude klesať pri nižších aj vyšších hodnotách vlnových dĺžok, pričom časť pre $\lambda < \lambda_{max}$ klesá výrazne pozvoľnejšie ako časť charakteristiky pre $\lambda > \lambda_{max}$.

Účinnosť premeny dopadajúceho množstva svetla na fotovoltaiický článok na elektrickú energiu je najdôležitejším parametrom článku. Na celkovú účinnosť má vplyv niekoľko parametrov ako čistota povrchu, uhol dopadu a reflektivita povrchu - kvôli veľkému rozdielu indexov lomu na rozhraní vzduch - polovodič je potrebné použiť prispôbovaciú antireflexnú vrstvu alebo sústavu vrstiev.

Ďalším problémom je pomerne úzka oblasť absorpcie žiarenia. Nosiče nábojov generované mimo oblasť priestorového náboja PN prechodu spolu rekombinujú a spôsobujú nežiaduce straty fotoprúdu. Preto musí byť PN prechod umiestnený čo najbližšie povrchu a musí byť čo najširší. Absorpčné spektrum u polovodičov je pomerne úzke, t.j. časť dopadajúcich fotónov prejdú polovodičom a časť je absorbovaná, avšak na generáciu elektrón-dierového páru sa využije len časť ich energie, zvyšok sa mení na teplo. Pre zvýšenie účinnosti sa používa sústava vrstiev rôznych kompozitných polovodičov s rôznou šírkou zakázaného pásma, teda s viacerými PN prechodmi nad sebou.

Pomer počtu generovaných nosičov k celkovému počtu absorbovaných kvánt (fotónov) sa je kvantová účinnosť fotočlánku a platí pre ňu vzťah:

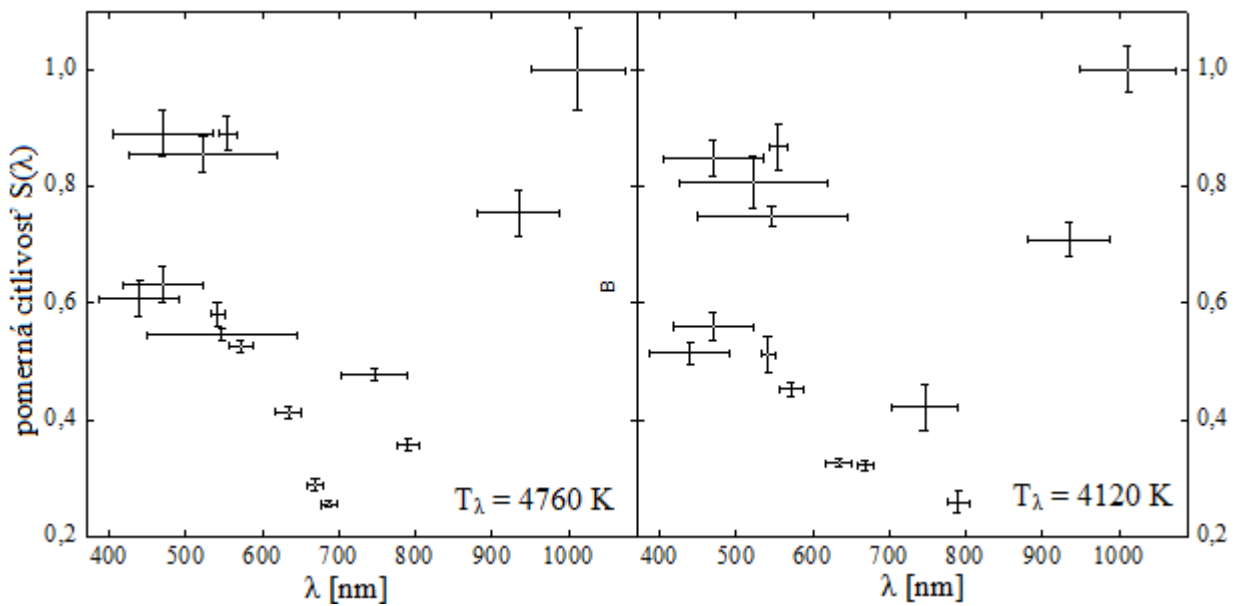
$$\eta = \frac{N_{gen}}{N_{dop}} \leq 1 . \quad (3.28)$$

Ak predpokladáme, že jeden absorbovaný fotón uvoľní iba jeden elektrón, môžeme stanoviť vzťah pre kvantovú účinnosť v tvare:

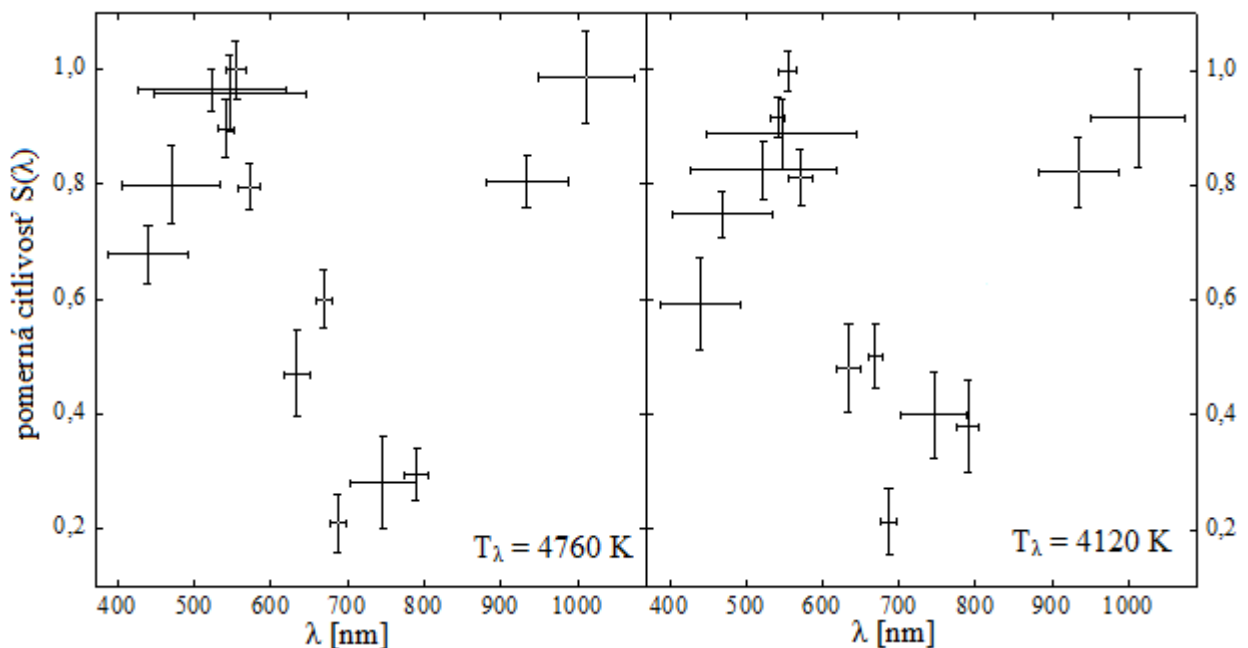
$$\eta = \frac{\frac{I_f}{e} dt}{\frac{\Phi_\lambda}{h\nu} dt} = \frac{I_f}{\Phi_\lambda} \frac{h c}{e \lambda} = S_\lambda \frac{h c}{e \lambda} . \quad (3.29)$$

Z tohto vzťahu je zrejmé, že kvantová účinnosť je priamo úmerne závislá na spektrálnej citlivosti S_λ a nepriamo úmerne závislá na vlnovej dĺžke λ . Pre zníženie nežiaducej rekombinácie nosičov sa v praxi používajú čisté monokryštalické polovodiče. [11]

Na obrázkoch 3.18 a 3.19 je spektrálna citlivosť oboch fotočlánkov, ktorú som zmeral pomocou halogénovej lampy s dvomi rôznymi intenzitami osvetlenia, pred ktorú som vkladal rôzne farebné filtre. Lampa mala pri vyššej intenzite spektrálnu teplotu vyžarovania 4760 K, pri nižšej intenzite 4120 K. Pomocou zmeraných priepustností filtrov som zisťoval odozvu fotočlánkov (úroveň napätia) a hodnoty som prepočítal na pomernú citlivosť fotočlánku na rôzne vlnové dĺžky. Musel som zohľadniť rôzne ekvivalentné šírky priepustností filtrov, preto sú hodnoty dané v rámci intervalu vlnovej dĺžky.



Obr. 3.18: Spektrálna citlivosť fotočlánku 191347-UO pri 2 intenzitách osvetlenia



Obr. 3.19: Spektrálna citlivosť fotočlánku 191334-UO pri 2 intenzitách osvetlenia

Z grafov je vidieť, že obidva fotočlánky sú najcitlivejšie vo viditeľnej oblasti, pri vlnových dĺžkach od 450 do 600 nm podobne ako ľudské oko, a potom v infračervenej oblasti okolo 1000 nm. Pri meraní som mal k dispozícii obmedzený počet filtrov, navyše mali rozdielne ekvivalentné šírky a výšku maxima a nepokrývali celé spektrum rovnomerne, takže spektrálna charakteristika je veľmi približná.

3.5.3 Chyby merania

Keďže je fotočlánok polovodičová štruktúra, generované napätie a prúd sú silne závislé na teplote. Pri nižšej teplote veľkosť fotoprúdu stúpa, naopak so zvyšujúcou teplotou sa znižuje. Fotočlánky sú najcitlivejšie počas merania rovinatej osvetlenosti pri kolmom dopade žiarenia, pri šikmom dopadajúcom žiarení je osvetlenosť úmerná kosínusu uhla dopadu. Obvyklá smerová odchýlka od tohto priebehu je spôsobená čiastočným zrkadlovým odrazom, alebo zníženou priepustnosťou hornej vrstvy. Fotočlánok je ďalej zaťažovaný temným prúdom pri nulovom osvetlení, preto je potrebné vždy korigovať hodnoty o tieto veľkosť temného prúdu.

Najjednoduchší spôsob ako určiť chyby pri meraní s fotočlánkom je vypočítať chyby pomocou štatistiky využitím Gaussovho normálneho rozdelenia. Výslednú hodnotu z fotočlánku dostaneme ako aritmetický priemer všetkých hodnôt súboru:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad , \quad (3.30)$$

kde n je počet hodnôt v študovanom súbore. Odhad chyby pre celý súbor hodnôt potom môžeme určiť podľa vzorca:

$$\overline{\delta x} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}} \quad . \quad (3.31)$$

Nakoniec môžeme výsledok zapísať v nasledujúcom tvare:

$$X = (\bar{x} \pm \overline{\delta x}) \quad . \quad (3.32)$$

Kapitola 4

Praktická fotometrická kalibrácia

Táto praktická časť bakalárskej práce si kladie za cieľ oboznámiť sa so základnými vlastnosťami prístrojov, ktoré sa používajú na jednoduché a rýchle meranie množstva svetelného toku a dajú sa využiť aj na meranie jasov hviezdnej oblohy alebo niektorých atmosférických javov. Na kalibráciu a porovnanie som zostavil niekoľko pokusov a následne som si detektory vyskúšal pri rôznych podmienkach.

Každý prístroj zobrazoval hodnotu výstupného signálu v iných jednotkách, takže pre vzájomné porovnanie ich citlivostí som musel získané hodnoty prepočítať podľa definícií jednotiek opísaných v kapitole 2.1.

Je potrebné zmieniť, že väčšina meraní bola relatívneho charakteru, pretože vo viacerých prípadoch nebolo možné zistiť prevodné konštanty, ktoré by viedli k absolútnemu kalibrovaniu. Napriek tomu jednoduché relatívne kalibrácie poskytujú uspokojivé výsledky a dajú pomerne slušne využiť v praxi.

4.1 Meranie smerovej charakteristiky

Pri meraní závislosti detektorov na uhle otočenia som nadviazal na merania P. Cinzana (2005), ktorý sa zaoberal fotometriou hviezdnej oblohy pomocou SQM. Cinzano pri určovaní smerovej charakteristiky prístrojov využíval približne 2 m dlhú temnú komoru v tvare kvádra, ktorú potiahol tmavým saténom kvôli eliminácii odrazov svetla. Do komory umiestnil kalibrovateľný zdroj svetla a na uhlovej hlave meral smerové charakteristiky jednotlivých SQM.

Pri vlastnom meraní smerových charakteristík prístrojov som využil kruhovú podstavu kopule hvezdárne Masarykovej univerzity v Brne ($49^{\circ} 12' 15,89''$ $16^{\circ} 35' 0,52''$). Steny kopule sa potiahli čiernou matnou látkou, ktorá mala tlmiť odrazy svetla z kalibračného zdroja -

sviečky. Ako sa neskôr ukázalo, podlaha sa nemusela poťahovať čiernou látkou, pretože rozdiely hodnôt pri zakrytej a nezakrytej podlahe boli menšie ako samotné chyby meraní. Odrazy svetla od podlahy sme teda mohli zanedbať. Steny boli zakryté látkou približne do výšky dvoch metrov, čo nebolo optimálne kvôli odrazom z horného polpriestoru, ale vzhľadom k tvaru kopule jediné riešenie.

Jednotlivé detektory boli postupne pripevnené na stojan s uhlovým otočným držiakom, ktorý bol justovaný pomocou vodováhy. V 0° na otočnom držiaku boli prístroje umiestnené presne v kolmom smere na zdroj svetla a v rovnakej výške ako bola sviečka. Pre každý detektor sa musela opakovane premerať správna výška a orientácia voči šíreniu svetla zo zdroja. Otáčaním uhlovej hlavy po 5° v oboch smeroch od kolmého priemetu (0°), v rozsahu od -90° do 90° , som dostal smerové charakteristiky pre všetky detektory. Zdroj svetla aj detektory boli umiestnené vo výške 55 cm a vzdialené od seba 1 m.

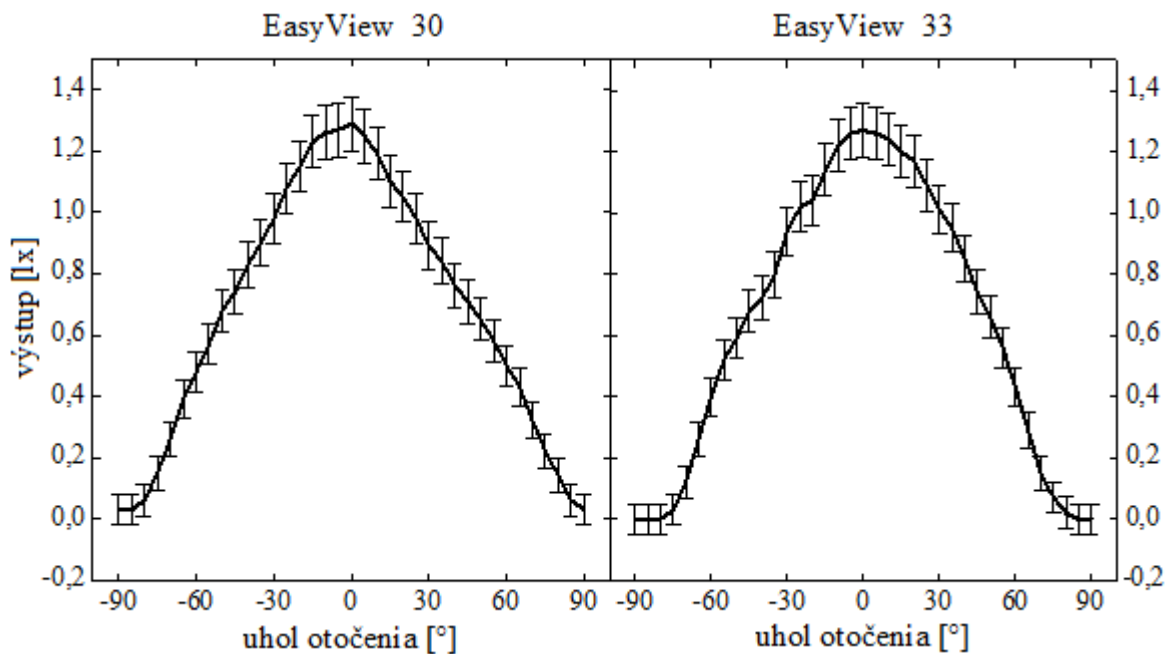
Sviečka bola výborným konštantným zdrojom osvetlenia, jej svietivosť sa takmer nemenila, čo potvrdilo opakovanie meraní v rovnakom uhle otočenia. Väčší problém bolo zachovať rovnakú výšku zdroja a detektora, pretože sviečka sa horením skracovala.



Obr. 4.1: Meranie smerovej charakteristiky luxmetra

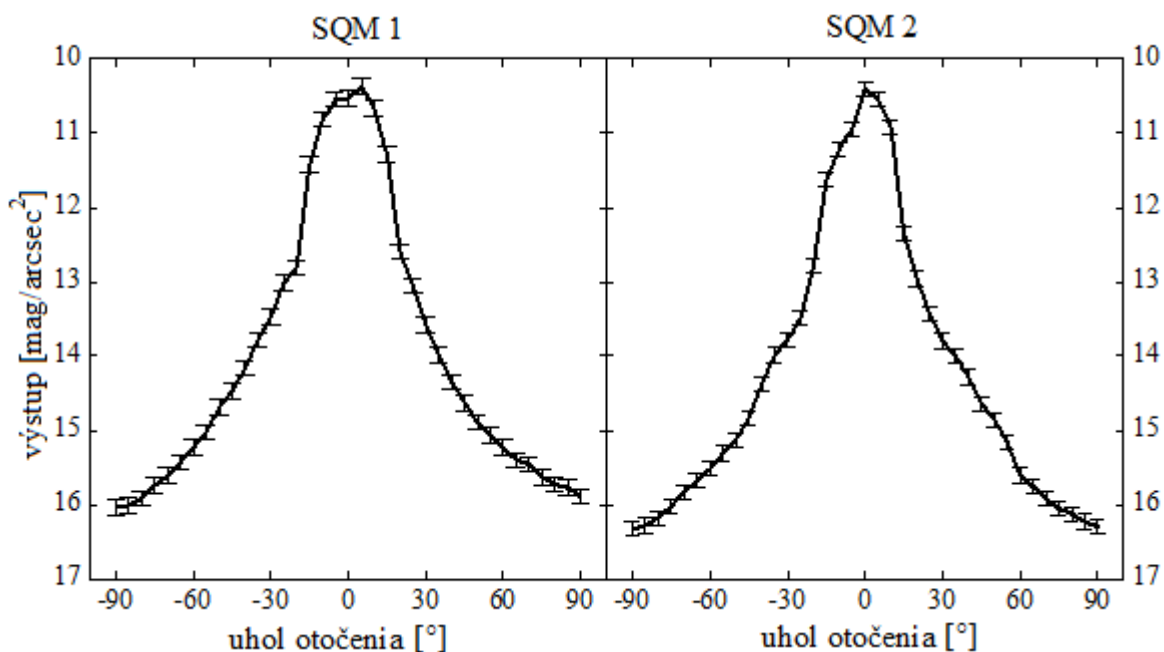
4.1.1 Smerové charakteristiky detektorov

Smerová charakteristika luxmetrov je pomerne široká a približne odpovedá kosínusovému priebehu. Na obrázku 4.2 je vidieť, že starší typ luxmetra (EasyView 30) má výraznejší nesymetrický priebeh ako novší luxmeter, čo môže spôsobovať najmä kosínusový nadstavca, ktorý je vždy zaťažený smerovou chybou. Novší model EV 33 má plnú šírku polovičného maxima väčšiu približne o 15° a jeho nadstavec lepšie kopíruje kosínusový priebeh citlivosti na dopadajúce svetlo. Maximálna citlivosť oboch luxmetrov je v rámci chyby rovnaká, čo platí aj pri kolmom natočení od sviečky.

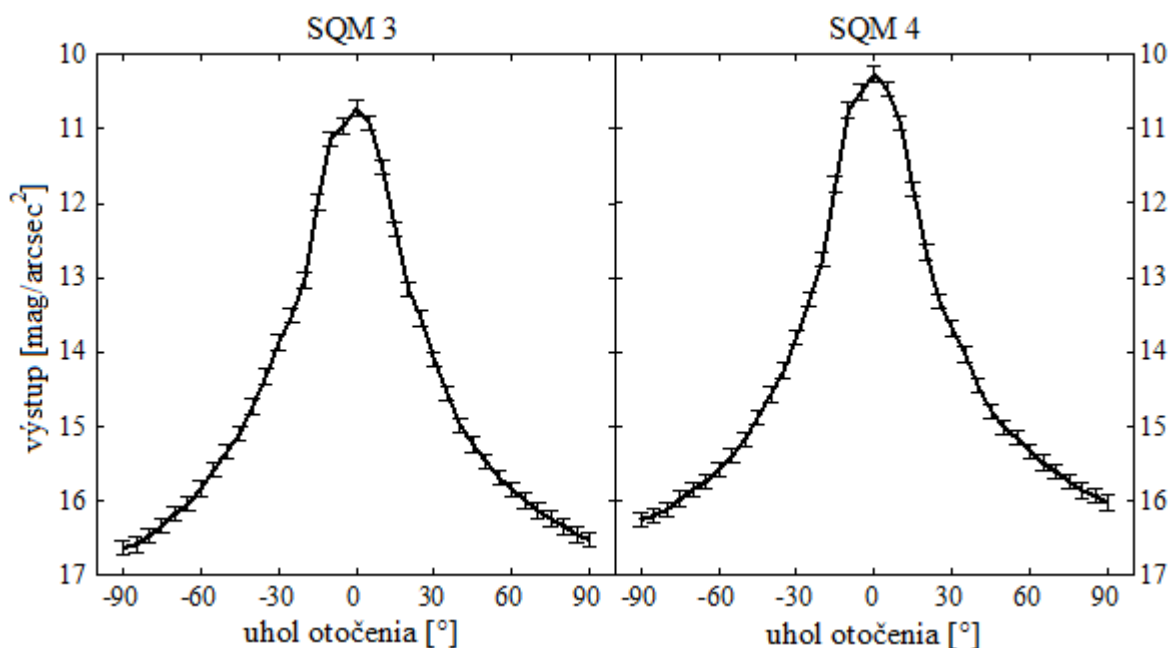


Obr. 4.2: Smerové charakteristiky luxmetrov

Sky Quality Metre majú podľa obrázkov 4.4 a 4.5 veľmi úzku smerovú charakteristiku a ich hodnoty v 0° a 90° od osi šírenia svetla sa vzájomne líšia aj o polovicu magnitúdy. Znamená to, že SQM síce môže merať na stotiny presne, ale každý jeden kus môže byť absolútne kalibrovaný s rozdielom až o desatiny magnitúdy. Ich závislosť na uhle otočenia je nesymetrická a to viac ako u fotočlánkov alebo luxmetrov.

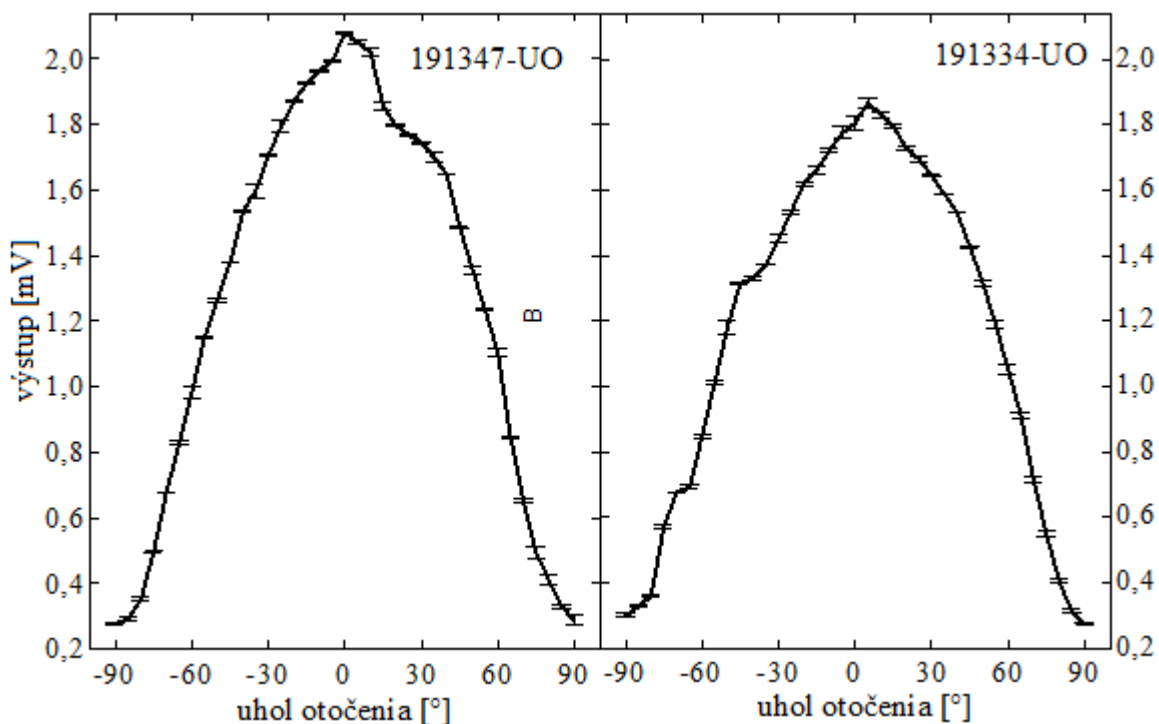


Obr. 4.3: Smerové charakteristiky SQM



Obr. 4.4: Obr. 4.3: Smerové charakteristiky SQM

Fotočlánky pri zmene uhlu prejavovali pomalšiu odozvu ako luxmetre, napätie sa vždy pozvoľne zvyšovalo (znižovalo) a až po minúte začalo kolísať iba v rámci chyby merania. Porovnával som dva fotočlánky s celkom odlišným výkonom aj plochou, takže ich smerové charakteristiky sa najviac odlišujú práve v maximálnej hodnote. Výkonnejší fotočlánok mal o viac ako 10% vyššiu citlivosť, čo predstavovalo asi 0,2 V. Plná šírka polovičného maxima bola približne rovnaká, z grafov na obrázku 4.5 je vidieť, že fotočlánky majú dosť široký záber. Meranie prebiehalo pri teplote 10,5 až 11 °C.



Obr.4.5: Smerové charakteristiky fotočlánkov

V tabuľke 4.1 sú zobrazené citlivosti v priamom a kolmom smere šírenia svetla. Šírka polovičného maxima uhlovej citlivosti všetkých detektorov bola určená z grafov, pri SQM sú hodnoty iba orientačné, pretože $\text{mag}/\text{arcsec}^2$ je pomerná logaritmická jednotka, ktorá závisí na výške maximálnej hodnoty (v uhle 0°) a tie sa od seba líšili aj o $0,4 \text{ mag}/\text{arcsec}^2$.

Tabuľka 4.1

detektor	typ	uhol otočenia			šírka polovičného maxima
		-90°	0°	90°	
luxmeter [lx]	EV 30	$0,03 \pm 0,05$	$1,29 \pm 0,09$	$0,03 \pm 0,05$	$104,2^\circ$
	EV 33	$0,00 \pm 0,05$	$1,27 \pm 0,09$	$0,00 \pm 0,05$	$118,1^\circ$
fotočlánok [V]	191347-UO	$0,28 \pm 0,01$	$2,08 \pm 0,01$	$0,29 \pm 0,01$	$128,5^\circ$
	191334-UO	$0,30 \pm 0,01$	$1,87 \pm 0,02$	$0,27 \pm 0,01$	$129,8^\circ$
SQM [mag/ arcsec ²]	1	$16,0 \pm 0,1$	$10,4 \pm 0,1$	$15,9 \pm 0,1$	$\sim 34^\circ$
	2	$16,3 \pm 0,1$	$10,4 \pm 0,1$	$16,3 \pm 0,1$	$\sim 30^\circ$
	3	$16,6 \pm 0,1$	$10,7 \pm 0,1$	$16,5 \pm 0,1$	$\sim 39^\circ$
	4	$16,3 \pm 0,1$	$10,3 \pm 0,1$	$16,0 \pm 0,1$	$\sim 29^\circ$

4.2 Meranie teplotnej závislosti

Cieľom týchto meraní bolo zistiť akým spôsobom vplyva teplota okolia na citlivosť prístrojov s polovodičovými snímačmi. Fotočlánok, prípadne CCD čip vo fotoaparáte budú ako polovodičové štruktúry zrejme najvýraznejšie závisieť na teplote, pretože ostatné prístroje obsahujú teplotný korekčný člen. Samozrejme aj tento člen je nedokonalý a je zaťažený určitou chybou.

Po viacerých pokusoch vznikla jednoduchá aparátúra na meranie teplotnej citlivosti. Na steny krabice bola nalepená hrubá vrstva tepelne izolačného polystyrénu natretého čiernou matnou farbou, aby sa čo najviac zamedzilo odrazom od stien. V užšej časti bola umiestnená LED dióda, ktorá slúžila ako zdroj svetla a v širšej časti boli upevňované jednotlivé detektory.

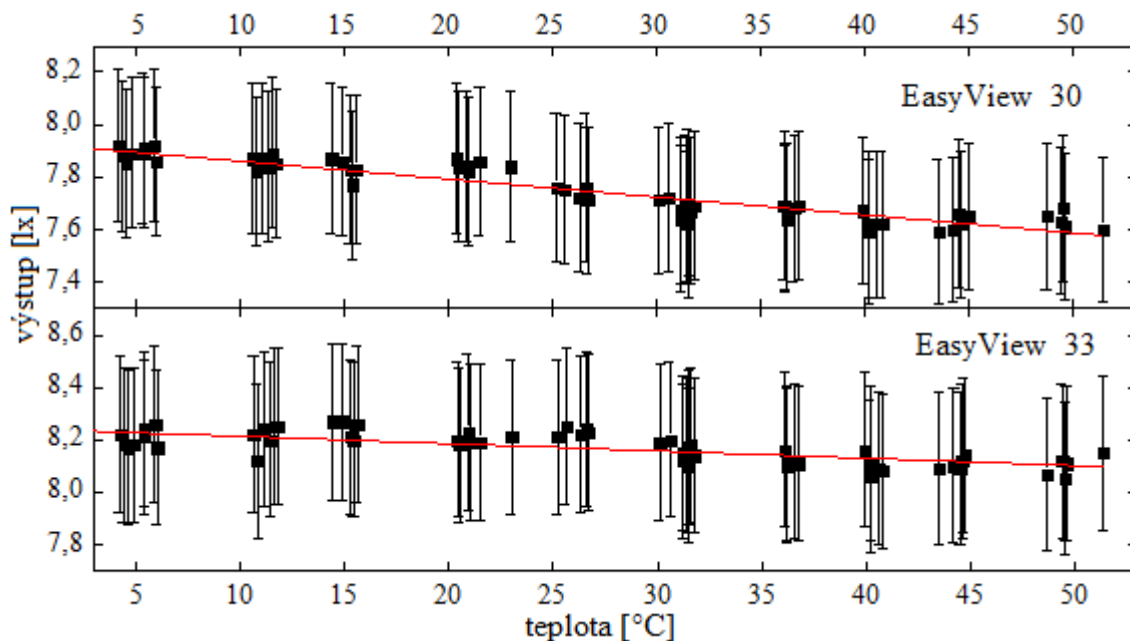
K širšej časti krabice bola pripevnená trubica, cez ktorú sa do krabice vhaňal horúci vzduch z ohrievača. Ventilátor v ohrievači zabezpečil neustálu cirkuláciu vzduchu vo vnútri a tým aj lepšie rozloženie tepla. Rôzna teplota v aparátúre sa zabezpečila odsúvaním ohrievača od trubice alebo prepínaním termostatu. Aparátúra s vloženými prístrojmi sa zakaždým musela dostať do stavu približnej termodynamickej rovnováhy, kedy sa už teplota vo vnútri takmer nemenila. Nízke teploty sa docielili tak, že sa meranie realizovalo počas chladných nocí, so zapnutým ventilátorom, alebo sa ku fotočlánkom zo zadnej strany prikladal hrubý kváder hliníku vychladený na mínusové teploty. Jednotlivé merania trvali zhruba dve až tri hodiny, pretože pri každej meranej teplote trvalo 10 až 15 minút, kým sa ustálila na nejakej hodnote. Jedine fotočlánky som mohol vyhriať ohrievačom a nechať chladnúť, pretože výborne reagovali na pomalú zmenu teploty. Rovnaký postup som zvolil pri chladení hliníkom. Teplotu v izolovanej sústave som meral pomocou odporového článku s digitálnym teplomerom.

4.2.1 Teplotná závislosť detektorov

Teplotná závislosť oboch luxmetrov je podľa obrázku 4.6 minimálna, pohybuje sa v rámci chyby prístrojov. Znamená to, že luxmetry majú dobrý korekčný člen na teplotu. Klesajúca citlivosť s narastajúcou teplotou môže mať príčinu v polovodičovom snímači. Z grafov na obrázku 4.6 je ale vidieť, že starší luxmeter (EV 30) má takmer dvakrát väčšiu citlivosť na teplotu, čo môže byť spôsobené menej nekvalitným alebo iným korekčným členom ako je v EV 33, prípadne starnutím luxmetra. V tabuľke 4.2 sú zobrazené zmeny citlivosti detektorov pri osvetlení diódou, ktoré boli získané lineárnou regresiou nameraných dát.

Tabuľka 4.2

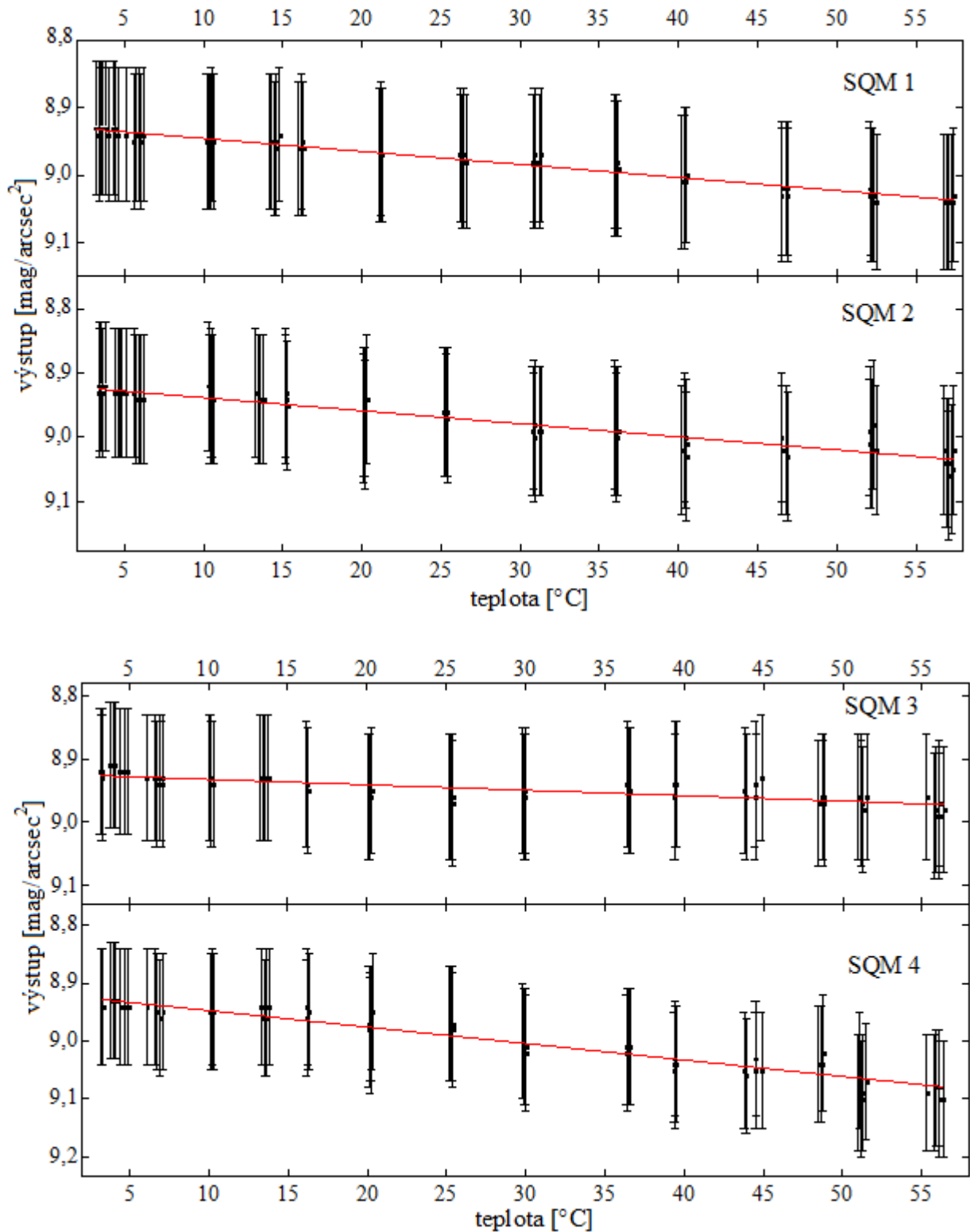
detektor	typ	zmena teploty		
		$\delta t = 1 \text{ }^\circ\text{C}$	$\delta t = 10 \text{ }^\circ\text{C}$	$\delta t = 50 \text{ }^\circ\text{C}$
luxmeter [lx]	EV 30	$(6,8 \pm 0,3) \cdot 10^{-3}$	$0,068 \pm 0,003$	$0,34 \pm 0,02$
	EX 33	$(2,8 \pm 0,3) \cdot 10^{-3}$	$0,028 \pm 0,003$	$0,14 \pm 0,02$
SQM [mag/arcsec ²]	1	$(1,94 \pm 0,04) \cdot 10^{-3}$	$0,019 \pm 0,001$	$0,095 \pm 0,005$
	2	$(2,03 \pm 0,08) \cdot 10^{-3}$	$0,020 \pm 0,001$	$0,101 \pm 0,004$
	3	$(0,86 \pm 0,07) \cdot 10^{-3}$	$0,008 \pm 0,001$	$0,043 \pm 0,004$
	4	$(2,85 \pm 0,09) \cdot 10^{-3}$	$0,029 \pm 0,001$	$0,143 \pm 0,005$
fotočlánok [mV]	191347-UO	$9,5 \pm 0,1$	95 ± 1	475 ± 5
	191334-UO	$5,41 \pm 0,05$	$54,1 \pm 0,5$	271 ± 3



Obr. 4.6: Teplotná závislosť luxmetrov

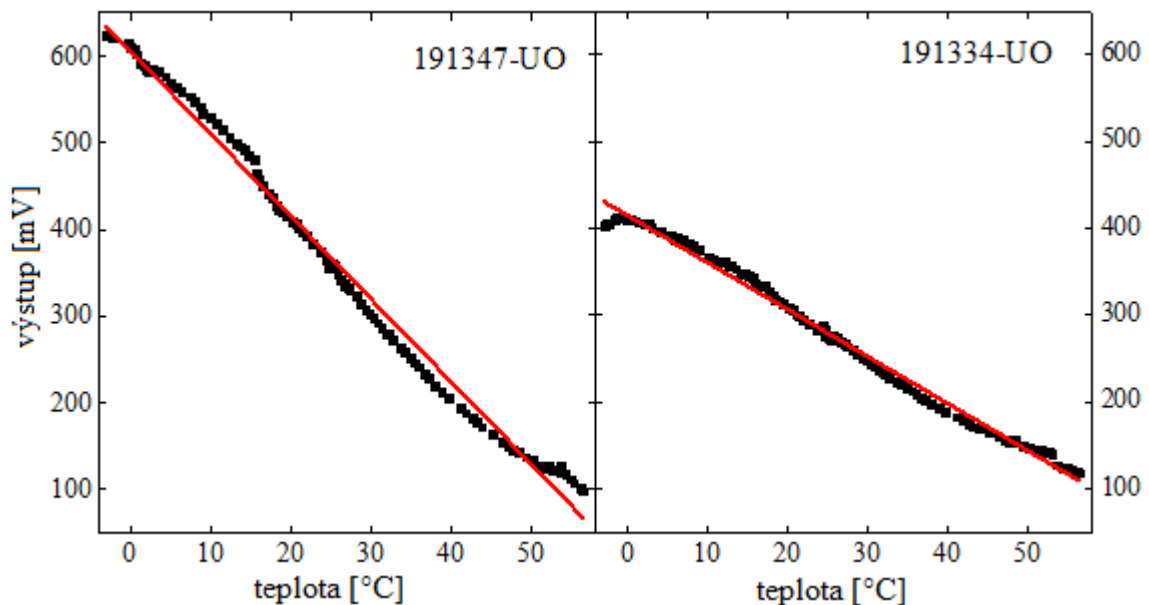
Pri všetkých štyroch SQM klesá ich citlivosť rôzne, čo je vidieť z grafov na obrázku 4.7. Mierny pokles pri vyšších teplotách môže zase spôsobovať polovodičová fotodióda v jasomeroch. Najväčšia zmena signálu bola pri SQM 4, o takmer 3 tisíciny mag/arcsec² na 1 °C,

najmenej citlivý bol SQM 3 s hodnotou menej ako tisícina na 1 °C. Pri poklese teploty o 10 °C sa úroveň signálu z každého jasomeru líšia rádovo v stotínach, čo je oproti krajnej chybe prístroja (0,1 mag/arcsec²) zanedbateľné. Ak by sme ale merali jas oblohy za väčších teplotných rozdielov, napríklad v lete a v zime, môžu sa hodnoty líšiť rádovo v desatinách magnitudy na uhlovú sekundu.



Obr.4.7: Teplotná závislosť Sky Quality Metrov 1 až 4

Fotočlánky sú preukázateľne najviac závislé na teplote, pretože pri obidvoch vychádzal lineárny priebeh citlivosti. Pri dióde, ktorú som použil, mal fotočlánok s väčším výkonom takmer dvakrát väčšiu citlivosť na teplotu, t.j. pri zvýšení o 1 °C mal 191347-OU úroveň napätia menšiu zhruba o 10 mV a 191334-OU asi o 5 mV. Toto ale vôbec nemusí platiť pri iných intenzitách osvetlenia, pretože fotočlánky budú zrejme závisieť na oboch parametroch súčasne. Na ich úplnú charakteristiku by sa teda musel spraviť dvojdimenziálny graf, kde by na osiach x,y boli osvetlenie a teplota a na osi z úroveň signálu z fotočlánkov. To predpokladá zdroj svetla, kde by sa dala lineárne meniť jeho intenzita pri určitej teplote prostredia, ktorú by sme tiež potrebovali meniť. Keby sa vhodne zvolili rozsahy teploty a osvetlenia, podľa toho, aké javy by sme chceli fotočlánkom merať, vznikol by graf, z ktorého by sa jednoznačne dala určiť korekcia na teplotu. Z technických príčin sa ale takéto meranie nedalo realizovať.



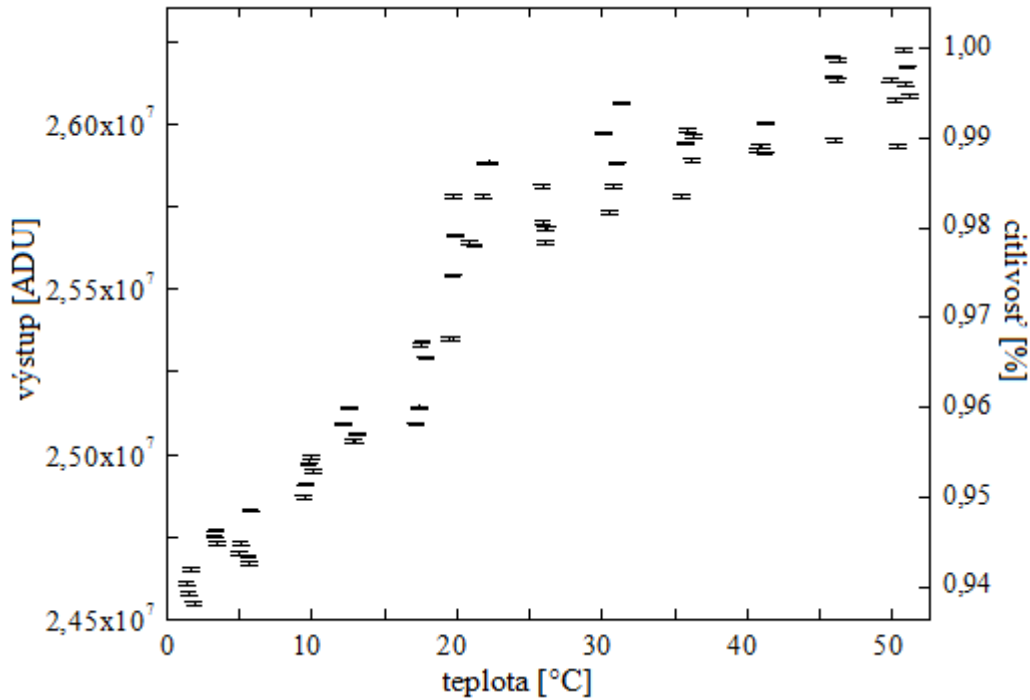
Obr. 4.8: Teplotná závislosť fotočlánkov

Digitálny fotoaparát musel byť vyhrievaný najdlhšie, pretože sa muselo vyhriať (chladiť) celé telo vrátane čipu, ktorý je v ňom schovaný. Napriek tomu sa nedá s istotou určiť, či ustálená teplota na povrchu fotoaparátu bola rovnaká ako teplota CMOS čipu.

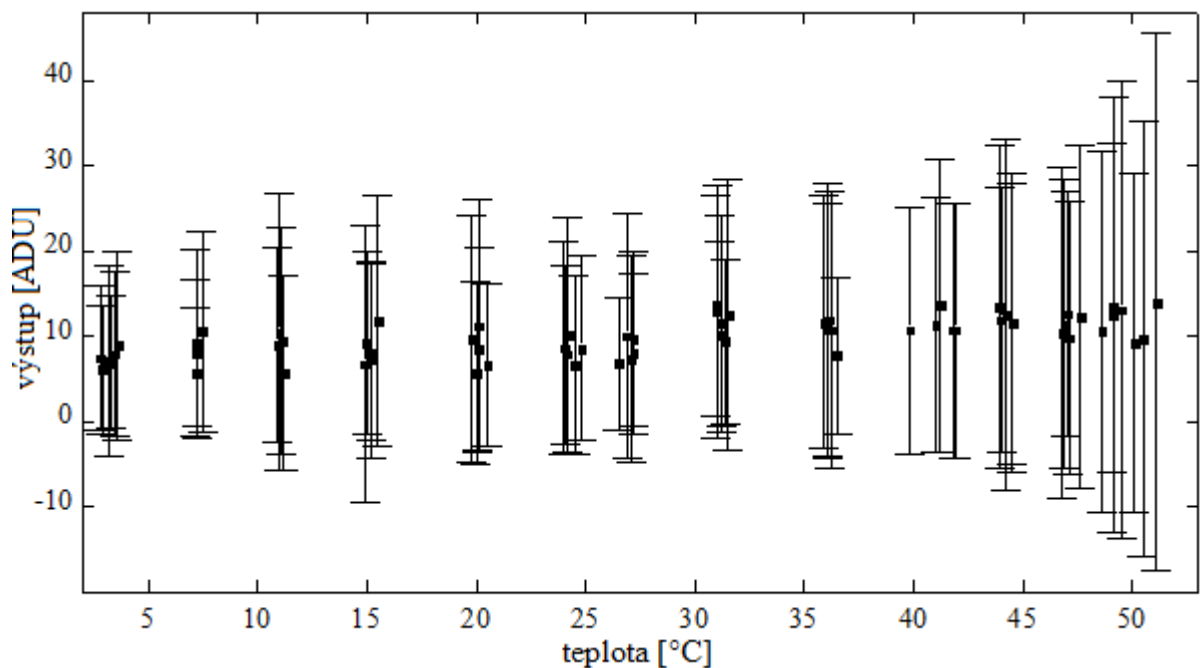
Jednotlivé snímky boli opravené o temný snímok a prevedené z formátu RAW do FITS pomocou funkcie YXZ podľa zložky Y. Takto upravené snímky som vyhodnocoval v programe IRAF, ktorý dokáže sčítať signál v jednotkách ADU vo zvolenej clone. V tomto prípade bol polomer clony $R = 30$ pixelov, pretože dióda mala na fotkách väčší polomer. Zvýšenie výstupnej hodnoty ADU v obrázku o jednotku udáva tzv. gain (zisk), ktorý popisuje vzťah medzi dopadnutými fotónmi a vzniknutými fotoelektrónmi v čipe. Pri CCD kamerách sa gain uvádza ako jeden zo základných parametrov, ale pri digitálnom fotoaparáte jeho absolútnu hodnotu nepoznáme. Jediný parameter popisujúci citlivosť čipu je ISO, ktoré síce môžeme meniť priamo počas fotenia, ale ani tu nepoznáme jeho absolútnu hodnotu a tým sa nedá jednoznačne prepočítať množstvo ADU na tok žiarenia, napríklad v jednotkách $W \cdot m^{-2}$.

Na obrázku 4.9 je teplotná závislosť fotoaparátu Canon EOS 60D so širokouhlým objektívom (rybím okom) s ohniskovou vzdialenosťou 15 mm. Súčty z cloniek osvetlených

pixelov sa rádovo pohybovali v desiatkach miliónov jednotiek (countov/ADU). Súčty mimo osvetlené časti obrázkov (pozadie a šum) sa pohybovali rádovo v tisícoch ADU, čo odpovedalo chybám hodnôt z osvetlenej časti. Na pravej zvislej osi grafu 4.9 je vynesená pomerná citlivosť v závislosti na teplote, maximálna hodnota zodpovedá 100%. Pri zmene teploty o $\delta t = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ môžeme vidieť rozdiel v hodnotách približne o 6%. Z obrázku je zrejmé, že s rastúcou teplotou sa citlivosť zvyšuje.



Obr. 4.9: Teplotná závislosť fotoaparátu (Canon EOS 60D)



Obr. 4.10 Závislosť šumu CMOS čipu na teplote (expozícia 20 s, polomer 30 pixelov)

Aby som zistil ako teplota prostredia ovplyvňuje šum CMOS čipu vo fotoaparáte, spravil som temné snímky so zavretým objektívom (darkframy) pri rôznej teplote a v programe IRAF som zisťoval priemernú hodnotu signálu (mean) a jej štandardnú odchýlku (stdev). Výsledok zorazuje graf na obrázku 4.10. Maximálna úroveň signálu v jednom pixeli sa pohybovala okolo 100 ADU a minimálna bola rovná 0. Zatiaľ čo priemerná hodnota signálu stúpala minimálne, štandardná odchýlka s teplotou výrazne narastala. Fakt, že pri vysokých teplotách bol veľký roptyl úrovni signálu, vypovedá o určitom tepelnom šume, ktorý môže ovplyvňovať kvalitu snímok. Z tohto dôvodu sa musia CCD kamery namontované na astronomických ďalekohadoch chladieť až na mínusové teploty.

4.3 Meranie premenlivej jasnosti

Pri kalibrácii svetelných detektorov bolo potrebné zistiť ich citlivosť na rôznu intenzitu osvetlenia. Keďže som nemal k dispozícii kalibrovaný zdroj svetla, u ktorého sa dá lineárne meniť svietivosť, využil som prirodzený pokles jasu hviezdnej oblohy počas súmraku.

Súmrak je prechodné obdobie medzi dňom a nocou spôsobené rotáciou Zeme, ktoré nastáva od západu Slnka za horizont, kedy sú osvetlené už len vyššie vrstvy atmosféry. Rayleighovo rozptyl svetla na časticách v atmosfére počas súmraku spôsobí načervenalú farbu oblohy, pretože svetlo sa k nám dostáva cez hrubšiu vzduchovú hmotu, ktorá pohltí kratšie vlnové dĺžky. Atmosféra ešte spôsobuje ohyb svetla, takže slnečný kotúč vidíme sploštený a v okamihu pozorovaného západu Slnka je v skutočnosti už celý kotúč nižšie o $0,5^\circ$.

Toto obdobie šera v našich zemepisných šírkach trvá približne 1,5h, v rovníkových oblastiach iba niekoľko minút, pretože uhol medzi dráhou Slnka a horizontom sa so zemepisnou šírkou mení. Občiansky súmrak trvá od západu slnečného kotúča až do jeho polohy 6° pod horizontom, po ňom nadejde nautický súmrak, kedy je Slnko 12° pod obzorom a astronomický súmrak trvá do prechodu Slnka 18° pod horizont.

4.3.1 Citlivosť detektorov na zmenu jasu

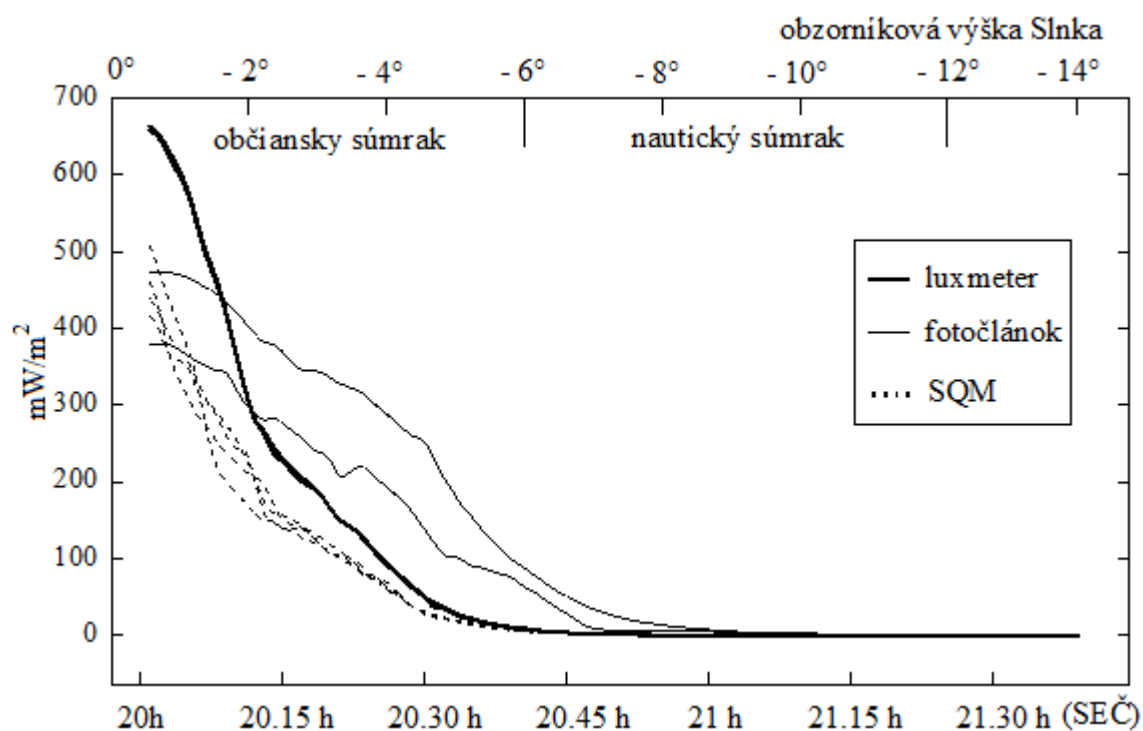
Graf na obrázku 4.11 ukazuje, ako jednotlivé prístroje reagovali na premenlivú jasnosť oblohy počas súmraku. Meranie som realizoval 2. mája 2011 v Brne na Kravej hore ($49^\circ 12' 14.62''$ N a $16^\circ 35' 2.11''$ E). Západ Slnka nastal 19.57h SEČ, občiansky súmrak skončil 20.40h, nautický 21.25h a astronomický súmrak skončil o 22.19h.

Hodnoty z luxmetra a SQM sa odčítavali približne po 1 minúte, hodnoty z fotočlánkov takmer neustále. Výstupné signály som prepočítal na jednotky W/m^2 , aby sa priebeh ich citlivosti dal porovnať. Fotočlánky sa museli nakalibrovať nielen pomocou sviečky, ale aj podľa luxmetrov pri vyššej intenzite žiarenia, tým že som na dennom svetle postupne zakrýval luxmetre aj fotočlánky a koreloval ich odozvu. Nebolo to ideálne, ale najjednoduchšie riešenie. Napätie fotočlánkov som ďalej musel opraviť o teplotu a temný prúd.

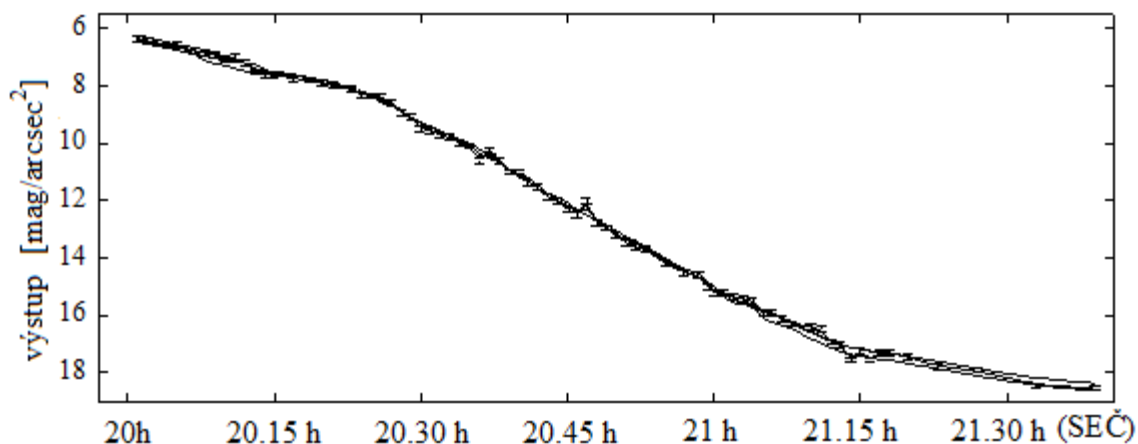
Pri meraní jasu oblohy počas súmraku sa výrazne prejavilo, že SQM merajú v pomerných logaritmických jednotkách, čo som už rozoberal v kapitole. Rozdiel medzi 6,5 a 6,1 mag/arcsec² odpovedal podľa vzorca (3.22) energii $38 \text{ mW}/m^2$, zatiaľ čo rozdiel medzi

17 a 17,1 mag/arcsec² bol ekvivalentný 0,002 mW/m². Preto majú všetky 4 SQM exponenciálny charakter, ale pri vyššom jase sa od seba podstatne líšia, SQM 1 a SQM 3 až o 80 mW/m². Ak vynesiem závislosť v pôvodných logaritmických jednotkách (mag/arcsec²), priebeh citlivosti na stmievanie je ako na obrázku 4.12. SQM je teda prístroj určený výlučne na meranie jasů nočnej hviezdnej oblohy, pretože pri vyšších intenzitách jasů meria vďaka logaritmickému škálovaniu veľmi nepresne.

Citlivosť oboch luxmetrov mala exponenciálny priebeh a ich hodnoty sa takmer nelíšili. Preto v grafe obidve krivky pre luxmetre splývajú. Približne po hodine ukazovali obidva luxmetre nulové hodnoty (pri rozsahu 0,01 lx), čo znamená, že ich citlivosť je posunutá vyššie ako zvyšné detektory.



Obr. 4.11: Citlivosť detektorov pri stmievaní



Obr. 4.12: Citlivosť všetkých SQM na stmievanie

Kalibrácia fotočlánkov na jednotky mW/m^2 bola síce veľmi približná, ale aj tak ich citlivosť klesala až do konca občianskeho súmraku takmer lineárne. Fotočlánok s vyšším výkonom (191347-UO) bol počas prvej hodiny po západe Slnka citlivejší na rovnaké úrovne jasu ako približne o $100 \text{ mW}/\text{m}^2$ fotočlánok 191334-UO. Vtedy už klesli ich hodnoty voči začiatku o viac ako polovicu. V tabuľke 4.3 sú hodnoty dosiahnutého maxima a minima citlivostí všetkých prístrojov a časový interval, kedy klesla odozva jednotlivých detektorov na polovičnú hodnotu.

Tabuľka 4.3

detektor	typ	citlivosť S max		citlivosť S min		čas polov. odozvy [min]
		výstupná jednotka	mW/m^2	výstupná jednotka	mW/m^2	
luxmeter [lx]	EV 30	453 ± 14	663 ± 20	0	0	11
	EV 33	450 ± 13	659 ± 18	0	0	10,5
fotočlánok [V]	191347-UO	$5,98 \pm 0,09$	473 ± 15	$0,008 \pm 0,001$	$0,633 \pm 0,09$	31,5
	191334-UO	$4,78 \pm 0,08$	378 ± 14	$0,008 \pm 0,001$	$0,63 \pm 0,09$	26,5
SQM [mag/arcsec ²]	1	$6,34 \pm 0,10$	$460 + 38$	$18,37 \pm 0,1$	$0,007 + 0,001$	10
	2	$6,45 \pm 0,10$	$415 + 29$	$18,37 \pm 0,10$	$0,007 \pm 0,001$	12
	3	$6,23 \pm 0,10$	509 ± 45	$18,62 \pm 0,10$	$0,006 \pm 0,001$	7,5
	4	$6,39 \pm 0,10$	439 ± 30	$18,53 \pm 0,10$	$0,006 \pm 0,001$	12

4.4 Vplyv Mesiaca na pozorovanie

Čiastkovým cieľom tejto práce bolo zistiť akým spôsobom môže ovplyvňovať Mesiac, prirodzená družica Zeme, kvalitu hviezdnej oblohy. Mesiac počas svojho jedného obehu okolo Zeme (synodický mesiac) vystrieda 4 fázy, počas ktorých pozorujeme rôzne osvetlené časti jeho kotúča. V prvej štvrti jeho osvetlený tvar dorastá až do druhej štvrti (spln), v tretej fáze z jeho osvetlenej časti ubúda (cúva) až do poslednej štvrti (nov), kedy je Slnkom osvetlená jeho odvrátená časť. Na obrázku 4.13 sú spracované dáta z celonočného merania jasu oblohy v zenite na hvezdárni Vyškov ($+49^{\circ}16'24.19''\text{N}$, $16^{\circ} 59' 46.27''\text{E}$) počas splnu Mesiaca 16. apríla 2011. Túto lokalitu som si vybral práve pre menšie svetelné znečistenie ako je v Brne. Počas celej noci som zaznamenával hodnoty v intervale 10 minút.

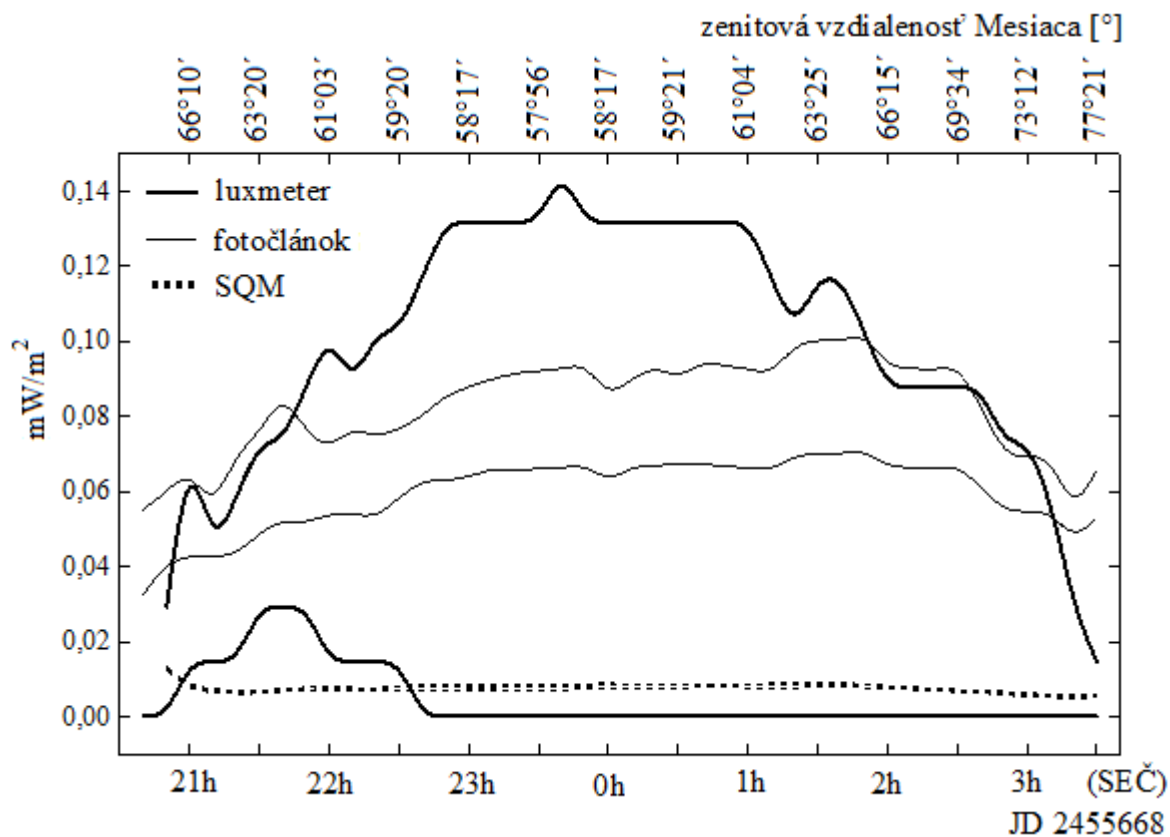
4.4.1 Citlivosť detektorov pri splne

Najvýraznejšiu zmenu $0,13 \text{ mW}/\text{m}^2$ zaznamenal luxmeter EA30, novší model EA 30 začal po dvoch hodinách ukazovať 0 luxov, čo mohlo byť spôsobené aj zimou, pretože teplota počas noci klesla až na -3°C . Luxmeter ukazoval najvyššiu hodnotu ($0,09 \pm 0,05$) lx práve keď sa Mesiac nachádzal najbližšie zenitu. Z tohto čísla môžeme vidieť, že pri takom malom osvetlení je chyba luxmetra oproti meranej hodnote veľmi veľká.

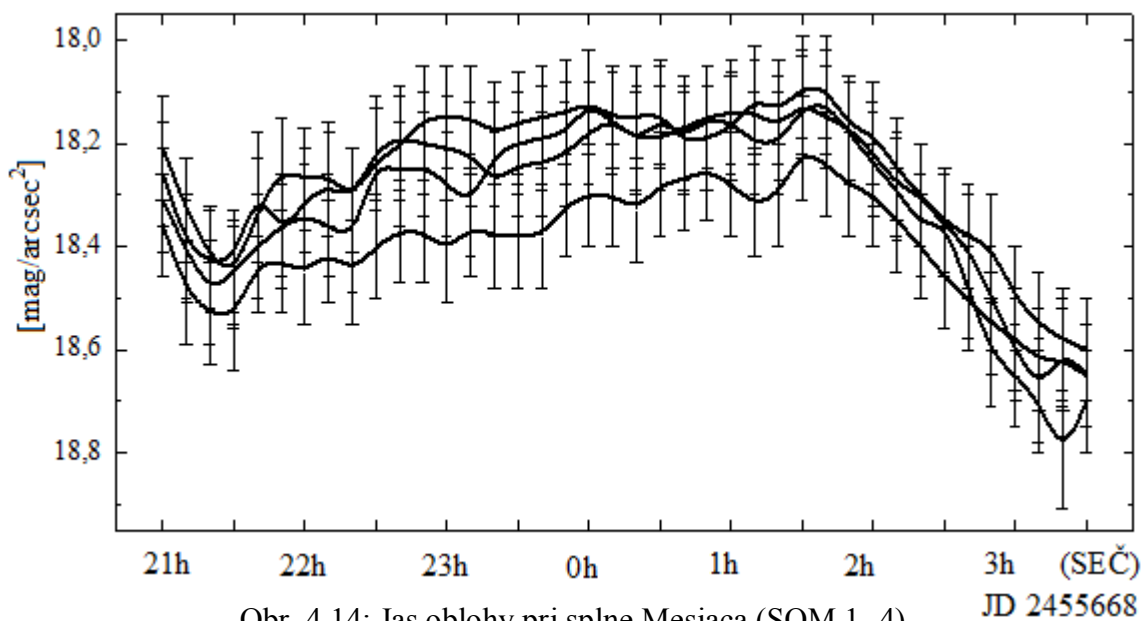
Všetky SQM ukazovali v priebehu noci veľmi podobné hodnoty v rozmedzí od 18,2 do $18,7 \text{ mag}/\text{arcsec}^2$, čo odpovedá $8,3 \cdot 10^{-3}$ až $5,2 \cdot 10^{-3} \text{ mW}/\text{m}^2$. Prístroje mali zrejme takú nízku odozvu preto, že majú úzku smerovú charakteristiku a pri meraní v zenite sa Mesiac sa ani raz nedostal do ich záberu. Na obrázku 4.14 sú preto zobrazené samostatne aj s chybami meraní.

Mesiac počas svojho pohybu po oblohe dokázal zvýšiť jas neba o viac ako $0,5 \text{ mag/arcsec}^2$.

Fotočlánky, ktoré som skorigoval na teplotu, sa svojou citlivosťou pohybujú niekde medzi SQM a luxmetrami, od $0,03$ do $0,08 \text{ mW/m}^2$. Výkonnejší fotočlánok mal opäť o $0,02 \text{ mW/m}^2$ väčšiu odozvu, približne. Fotočlánky zaznamenávali napätie v rozsahu $0,01$ až $0,04 \text{ V}$.



Obr. 4.13: Jas oblohy počas jednej noci pri splne Mesiaca

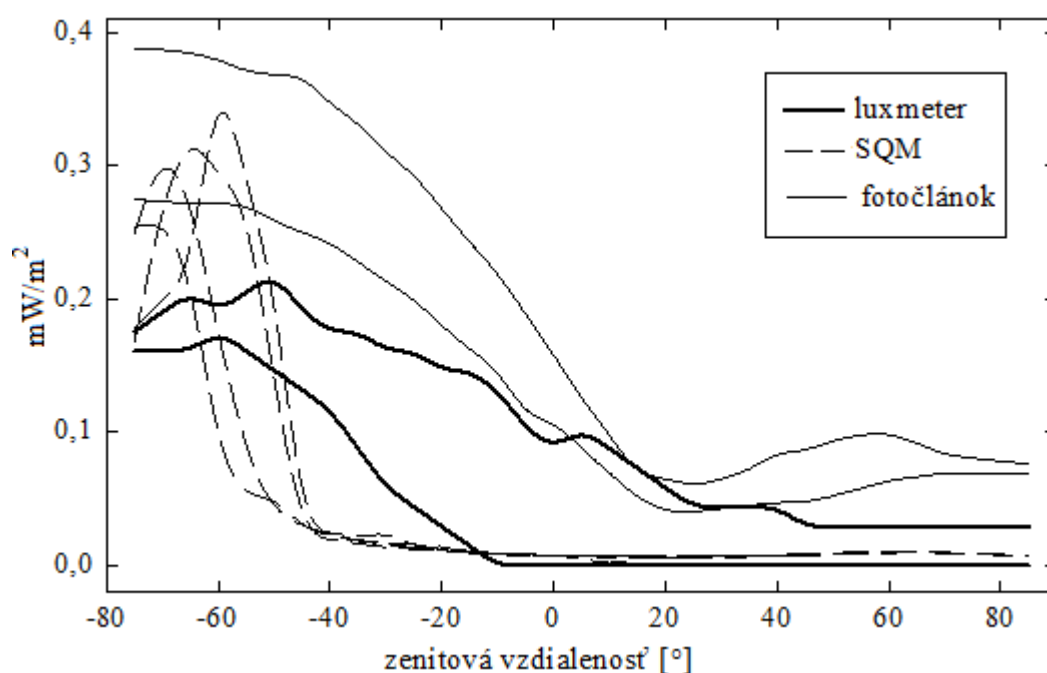


Obr. 4.14: Jas oblohy pri splne Mesiaca (SQM 1- 4)

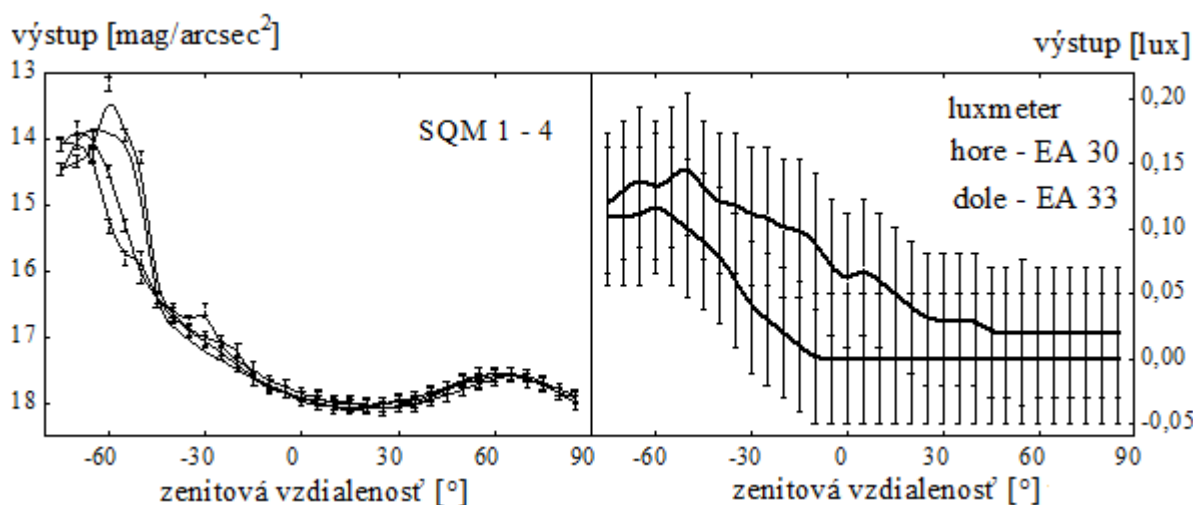
Ďalej som skúmal jas oblohy v rôznej zenitovej vzdialenosti. Vybral som si azimut, ktorý prechádzal priamo cez mesačný kotúč. Mesiac má uhlový priemer približne $32'$ a počas splny

výrazne osvetlí hviezdnu oblohu. Meral som 17. apríla 2011 v čase, keď bola zenitová vzdialenosť Mesiaca najmenšia, približne -57° .

Na obrázku 4.15 vidíme zaznamenané citlivosti detektorov. SQM so svojou úzkou smerovou charakteristikou majú v oblasti, kde sa nachádzal Mesiac, výrazný skok v jasnosti, ktorý rýchlo klesol pri zenitovej vzdialenosti -40° . Fotočlánky namerali najvyššie hodnoty v kolmom smere na polohu Mesiaca, ktoré klesali až do minima v $+20^\circ$, čo znamená, že obloha vtedy nebola najtmavšia v zenite. Vo vzdialenosti $+40^\circ$ od zenitu sa na oblohe začal prejavovať protisvit Mesiaca. Horná čiara patrí fotočlánku 191347-UO. Starší luxmeter EV 30 dokázal meral takmer lineárny pokles jasu až do $+40^\circ$ od zenitu, druhý model EV 33 sa dostal na nulu pri -10° . Ani jeden luxmeter namerlal zvýšenie jasu v oblasti 40° až 60° . Na obrázku 4.16 sú priebehy citlivosti prístrojov v pôvodných jednotkách, pri SQM si môže všimnúť že boli tiež schopné namerať protisvit Mesiaca na oblohe, čo luxmetre nezachytili.



Obr. 4.15: Jas neba počas splnu v závislosti na zenitovej vzdialenosti



Obr. 4.16: Jas neba počas splnu meraný SQM a luxmetrami

4.5 Meranie jasu neba fotoaparátom

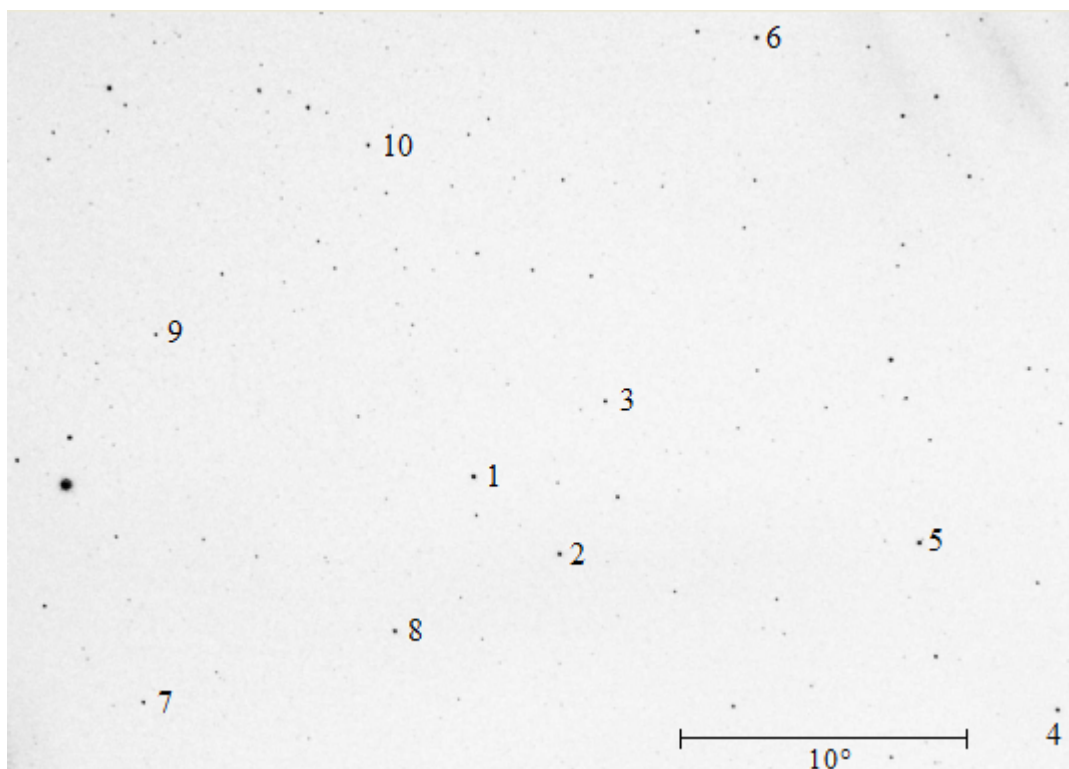
Jas hviezdnej oblohy sa dá vyhodnocovať aj pomocou digitálneho fotoaparátu pomerne jednoduchou, ale trochu zdĺhavou cestou. Celooblohové snímky s fotoaparátom Canon EOS 60D so širokouhlým objektívom (expozícia 20s, ISO 1600 a clona 2,8) som spravil 5 mája na Kravej hore neďaleko Hvezdárne a planetária Mikuláše Koperníka v Brne. Na obrázku 4.17 je rozloženie hviezd, ktoré som použil na výpočet jasu neba.

Zo fotografií upravených o darkframe a prevedených z formátu RAW do FITS som pomocou programu IRAF získaval toky svetla v jednotkách ADU od vybraných hviezd, ktoré su v tabuľke 4.4. Počítal som s hviezdami v súhvezdí Draka, prípadne Labute a Herkula, ktoré sa nachádzali v zenite. V tesnej blízkosti každej hviezdy som odčítal množstvo ADU v clonke, kde nebol žiadny objekt.

Používal som clonku s polomerom $r = 6$ pix a obsahom $S = 113$ pix. Keď som poznal súčty dopadnutých svetelných tokov v ADU, mohol som ich porovnať s hviezdnyimi veľkosťami vybraných hviezd, ktoré som zistil pomocou katalógov na stránkach Astronomickej databázy Simbad [31]. Pomocou Pogsonovho vzťahu pre výpočet hviezdnej veľkosti som určil jasnosť m_o hviezdnej oblohy:

$$m_o = 2.5 \cdot \log \frac{I_h}{I_o} + m_h , \quad (4.1)$$

kde I_h je tok svetla od danej hviezdy v ADU, m_h hviezdna veľkosť hviezdy a I_o je množstvo signálu z clonky bez hviezd.



Obr. 4.17: Výrez z celooblohového snímku s vybranými hviezdami na výpočet neba

Tabuľka 4.4

Číslo	Hviezda		Rektascenzia	Deklinácia	Spektrálny typ	Hv. veľkosť [mag]
1	γ Dra	HIP 87833	17h56m36,4s	51°29'19,9''	K5 III	2,23
2	β Dra	HIP 85670	17h30m26s	52°18'05''	G2 III	2,79
3	ξ Dra	HIP 87585	17h53m31,9s	56°52'22,5''	K2 III	3,74
4	ι Dra	HIP 75458	15h24m55,8m	58°57'57,9''	K2 III	3,31
5	η Dra	HIP 80331	16h23m59,5s	61°29'19''	G8 III	2,74
6	δ Dra	HIP 94376	19h12m33,5s	67°39'42,2''	G9 III	3,08
7	θ Her	HIP 87808	17h56m15,2	37°15'02,0''	K1 II var	3,85
8	ι Her	HIP 86414	17h39m27,9s	46°00'22,8''	B3V_SB	3,80
9	13 Lyr	HIP 92862	18h55m20,1s	43°56'46,9''	M5 III var	4,20
10	κ Cyg	HIP 94779	19h17m6,3s	53°22'07,6''	K0 III	3,80

Na to, aby sa dal určiť jas neba na jednotkovú plochu a nielen na danú clonku, musel som prepočítať zistené hodnoty na jednotky mag/arcsec². Využil som teda známe polohy hviezd udané pomocou súradníc rektascenzie a deklinácie a ďalej polohu hviezd na mojich snímkoch v pixeloch, aby som vytvoril som prevodný vzťah medzi pixelovými vzdialenosťami hviezd a ich vzdialenosti danej v rovníkových súradniciach - mierku snímku. Vzdialenosť vybraných hviezd na snímkoch som určil jednoduchou Pytagorovou vetou:

$$d = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2} , \quad (4.2)$$

kde x_1, x_2 a y_1, y_2 sú polohy hviezd v pixeloch. Na vzdialenosť hviezd na oblohe som zistil pomocou sférickej kosínusovej vety:

$$D = \arccos[\sin \delta_1 \cdot \sin \delta_2 + \cos \delta_1 \cdot \cos \delta_2 \cdot \cos(\alpha_2 - \alpha_1)] . \quad (4.3)$$

Pomerom uhlovej a pixelovej vzdialenosti hviezd som dostal mierku snímkov v jednotkách [arcsec/pix]. Do Pogsonovho vzťahu som dosadil mierku C , ktorú som vynásobil plochou clony S v pixeloch a dostal som jas neba vzťahnutý na jednu uhlovú sekundu:

$$m = 2,5 \cdot \log(C^2 \cdot S) + m_o . \quad (4.4)$$

4.5.1 Porovnanie všetkých detektorov

V tabuľke 4.5 je jas neba určený pomocou snímkov z digitálneho fotoaparátu a orientačné porovnanie s hodnotami z ostatných detektorov. SQM udáva jas neba priamo v mag/arcsec², signál z luxmetra a fotočlánku bol na magnitúdy na štvorcové sekundy prevedený tak, že bol signál najprv prepočítaný na mW/m² a cd/m² a následne dosadený do numerického prepočtu vzťahu (3.22).

Tabuľka 4.5

detektor	typ	jas neba [mag/arcsec ²]
digitálny fotoaparát	Canon EOS 60D	17,52 ± 0,07
SQM	1	18,14 ± 0,01
	2	18,25 ± 0,02
	3	18,11 ± 0,02
	4	18,16 ± 0,01
luxmeter	EV 30	11,9
	EV33	13,5
fotočlánok	191347-UO	13,2
	191334-UO	15,6

Vyššie hodnoty jasů zmerané digitálnym fotoaparátom môžu byť spôsobené tým, že obloha nebola počas fotenia dokonale jasná, premenlivo sa vyskytovali jemné cirrové mraky, ktoré rozfúkaval vietor. Hodnoty z SQM sa približne zhodujú, okrem SQM 3, ktorý dlhodobo ukazuje podhodnotené výsledky, čo znamená že sa prístroje medzi sebou môžu líšiť.

Porovnanie jasů s luxmetrom a fotočlánkom je veľmi orientačné, pretože luxmeter je určený na vyššie úrovne osvetlenia a pri numerickom prepočte na mag/arcsec² môžu vzniknúť väčšie odchýlky, navyše fotočlánok nemá kalibráciu pomocou presného svetelného zdroja. Okrem toho som použil prepočet, vzorec na jednotkovú plochu, pričom luxmeter aj fotočlánok má oveľa širšiu smerovú charakteristiku ako SQM.

Chyby meraní sa pri digitálnom fotoapáte určil pomocou zákona šírenia chýb, pretože jas neba bola nepriamo určená veličina, pri ktorej sme poznali štandardnú odchýlku priamo zmeranej veličiny m_o a takisto neistotu určenia mierky snímku. Na meranie jasů oblohy s SQM som použil štatistické vyhodnotenie, ktoré bolo presnejšie ako chyba určená výrobcom.

Kapitola 5

Závěrečné zhrnutie

V závěre práce můžeme skonštatovať niekoľko zaujímavých vlastností prístrojov na meranie nízkych svetelných tokov. Smerové charakteristiky fotočlánkov a luxmetrov sú pomerne široké, čo vypovedá o veľkom uhle, z ktorého detekujú žiarenie. SQM majú veľmi úzku smerovú charakteristiku, čo je výhodné práve pri meraní jasú oblohy v zenite, pretože do ich uhla detekcie nezasahujú mraky alebo svetelné znečistenie. O smerovej charakteristike fotoaparátu sa nedá hovoriť, pretože jeho čip zložený z množstva nábojovo viazaných buniek, ktoré zachytáva dopadnuté žiarenie. Navyše pri fotení hviezdnej oblohy sa často používa širokouhlý objektív, ktorý určuje uhlovú závislosť.

Zmeraním teplotných závislosti som zistil, že luxmetre aj SQM majú relatívne dobre skorigované snímače na rôznu teplotu. Pri digitálnom fotoaparáte vznikla minimálna závislosť na teplote, väčším problémom pri vyššej teplote je šum na čipe spôsobený tepelným pohybom nosičov náboja v polovodičovej vrstve. Signál z fotočlánkov bol v rozmedzí -5 až 50° C lineárne závislý na teplote, so zvyšujúcou sa teplotou sa jeho výstupné napätie znižovalo, čo odpovedá vlastnostiam polovodičov. Pri každom meraní bolo potrebné aplikovať korekciu jeho signálu na teplotu a navyše odčítovať temné napätie.

Pri meraní súmraku sa medzi jednotlivými prístrojmi prejavili výrazné rozdiely. Najväčší rozdiel bol tesne po západe slnka, kde bol medzi fotočlánkami a luxmetrami rozdiel až 300 mW/m^2 . Luxmeter a SQM mali exponenciálnu citlivosť počas stmievania, zatiaľ čo signál z fotočlánkov zvolna klesal.

Pri celonočnom meraní jasú oblohy počas splnu Mesiaca sa tiež prejavili rozdiely v citlivostiach prístrojov. Obidva luxmetre mali najmenšie rozlíšenie $0,01$ luxu, čo je menej ako $0,1 \text{ mW/m}^2$. Výrazné vlnky v grafe 4.13 sú spôsobené tým, že luxmetre merali takmer na kraji ich citlivosti. Fotočlánky mali posunuté maximum približne o 5° oproti luxmetrom, čo mohla spôsobiť uhlová závislosť fotočlánkov, resp. veľmi široká smerová charakteristika. Pri SQM bol rozdiel počas celej noci iba o niekoľko desiatín mag/arcsec^2 , čo v prepočte na

jednotky mW/m^2 znamenalo absolútne minimálne zmeny. Citlivosť SQM sa v tomto prípade minimálne líšila aj medzi sebou. S podobnými charakteristikami sa stretneme pri meraní rozptylu mesačného svetla v atmosfére Zeme, kde sa SQM s malým smerovým uhlom podstatne líšia od luxmetrov a fotočlánkov.

Aj posledné vyhodnotené meranie jasu oblohy v Brne všetkými 4 detektormi vychádzalo odlišne. Samotné SQM sa od seba líšili o desatinu mag/arcsec^2 , čo odpovedá chybe, ktorú uvádza výrobca. Na výpočet magnitúdy oblohy sa pri digitálnom fotoaparáte a SQM používala iná metóda a zároveň majú prístroje zrejme odlišnú spektrálnu citlivosť, čo má za následok rozdiel asi $0,5 \text{ mag/arcsec}^2$.

Hodnota z luxmetra a fotočlánku sa výrazne odlišovala od výsledkov z fotoaparátu alebo SQM. Môže to byť dané tým, že na detektory nedopadá tok žiarenia z plochy jednej štvorcovej uhlovej sekundy, ale zo širokého priestorového uhla. Tým pádom je veľmi ťažké určiť prepočet na jednotkový priestorový uhol.

Hlavným prínosom mojej práce spočíval v priamom porovnaní bežne používaných detektorov nízkych tokov svetla. Ďalej som zistil, že SQM majú veľké chyby pri vyšších intenzitách osvetlenia, zároveň som zistil, že výrobca neudáva žiadny relevantný výpočet chýb meraní, ktorý by započítaval aj systematické chyby fotodiódy a frekvenčného prevodníka v SQM. Overil som, že všetky detektory sú dobre korigované na teplotu, čo je jedným z dôležitých parametrov pri polovodičových prístrojov. Ďalej som zistil, že Mesiac môže ovplyvňovať v priebehu noci jas oblohy v zenite o niekoľko desiatín mag/arcsec^2 , čo sa prejaví aj na kvalite pozorovania.

Pri fotočlánkoch by bolo vhodné spraviť presnú kalibráciu na teplotu a intenzitu osvetlenia, z čoho by mohol vzniknúť dvojdimenzionálny graf, ktorý by presne určoval citlivosť fotočlánku za rôznu úroveň jasu pri rôznej teplote. Bolo by veľmi užitočné do budúcnosti presnejšie nakalibrovať fotočlánky a využívať ich na meranie jasu oblohy, pretože aj pri jednoduchých korekciách bola ich citlivosť porovnateľná so sofistikovanými, odskúšanými a presne nakalibrovanými prístrojmi.

Kalibrácia detektorov nízkych tokov svetla je veľmi zaujímavá téma, avšak plná rôznych úskalí. Napriek tomu tieto prístroje svojim prevedením, kvalitou, citlivosťou a jednoduchou manipuláciou určite stoja za pozornosť a hlbšiu analýzu aj v budúcnosti.

Použitá literatura

- [1] HROCH, Filip. *Astronomické praktikum*. Brno 2006.
- [2] <http://fyzika.jreichl.com/index.php?page=535&sekce=browse>, 4.3.2011.
- [3] http://cs.wikipedia.org/wiki/Světelná_energie/Vlastnosti, 14.3.2011.
- [4] HAVELKA, Bedřich; KEPRT, Engelbert; HANSA, Miloš. *Spektrální analýza 1*. Praha : ČSAV, 1057.
- [5] <http://cs.wikipedia.org/wiki/Kandela>, 14.3.2011.
- [6] http://sk.wikipedia.org/wiki/Lux_jednotka_29, 14.3.2011.
- [7] MIKULÁŠEK, Zdeněk; KRTIČKA, Jiří: *Základy fyziky hvězd*. Brno 2005.
- [8] <http://www.physics.muni.cz/~kubena/PDF/Modmetv78.pdf>, 16.3.2011.
- [9] <http://sk.wikipedia.org/wiki/Koherencia>, 16.3.2011.
- [10] HRAZDIRA, Ivo; MORNSTEIN, Vojtěch. *Lékařská biofyzika a přístrojová technika*, Brno 2001, ISBN 80-902896-1-4.
- [11] LYSENKO, Vladimír. *Detektory pro bezdotykové měření teplot*. Praha : BEN, 2005. ISBN 80-7300-180-2.
- [12] <http://cs.wikipedia.org/wiki/Parafín>, 20.3.2011.
- [13] <http://osvieckach.webnode.sk/news/farba-plamena-sviecky>, 20.3.2011.
- [14] ŠEFČÍKOVÁ, Margita. *Svetelná technika*. Košice : Equilibria, 2008. ISBN 978-80-89284-22-1.
- [15] <http://cs.wikipedia.org/wiki/Polovodič>, 25.3.2011.
- [16] <http://sk.wikipedia.org/wiki/Polovodič>, 25.3.2011.
- [17] ONDRÁČEK, Zdeněk. *Elektronika pro fyziky*. Brno 1998.
- [18] http://cs.wikipedia.org/wiki/Digitální_fotoaparát, 28.3.2011.
- [19] SMITH, George E. Vynález a počáteční historie CCD : Nobelovská přednáška. *Československý časopis pro fyziku 1*. Praha 2011. ISSN 0009-0700.
- [20] KLOCOK, Lubomír. *Využitie vlastnosti nábojovo viazaných štruktúr CCD pre astronomické výskumy*. Tatranská Lomnica, 1986. Dizertační práce. Slovenská vysoká škola technická.
- [21] ŽÁRA, Jiří, et al. *Moderní počítačová grafika*. Praha : Computer Press, 2004. ISBN 8025104540.
- [22] <http://physedu.science.upjs.sk/degro/pokus/explux/ExpLuxOsv.pdf>, 4.4.2011
- [23] Slovenská republika. *Zbierka zákonov SR č. 133/2001 : Príloha č. 57 k vyhláške č. 133/2001*. s. 1525 - 1528.
- [24] <http://www.extech.com/instruments/product.asp?catid=10&prodid=63>, 6.4.2011.
- [25] Uživatelský návod k jasomeru SQM-L firmy Unihedron.
- [26] <http://www.taosinc.com/productdetails.aspx?ID=35>, 10.4.2011.
- [27] <http://unihedron.com/projects/darksky/faq.php>, 10.4.2011.
- [28] <http://www.solarenergy.sk/sk/stranka/fotovoltaika>, 15.4.2011.
- [29] <http://www.ceskestavby.cz/clanky/fotovoltaicke-panely-energetika-6466.html>, 15.4.2011.
- [30] MACHÁČ, Jan; MIŠEK, Ján. *Fotodetektory pro optické sdělovací systémy*. Praha : Academia, 1989. ISBN 80-200-0140-9.
- [31] <http://simbad.u-strasbg.fr/simbad/>

Použitá obrazová literatura

- [o1] HAVELKA, Bedřich; KEPRT, Engelbert; HANSA, Miloš: *Spektrální analyza 1*. Praha : ČSAV, 1057.
- [o2] ŽÁRA, Jiří, et al. *Moderní počítačová grafika*. Praha : Computer Press, 2004.
ISBN 8025104540
http://www.zelenyzakal.sk/images/Zeleny_zakal/sensitive_organ.jpg, 20.3.2011
- [o3] ŠEFČÍKOVÁ, Margita. *Svetelná technika*. Košice : Equilibria, 2008.
ISBN 978-80-89284-22-1
- [o4] TESAŘ, Ctibor; TRUNEC, David; ONDRÁČEK, Zdeněk. *Fyzikální praktikum III*. Brno 2002.
- [o5] <http://sunenergyfacts.com/2008/01/solar-energy-fact-3/>, 22.3.2011
- [o6] <http://www.ephoto.sk/fotoskola/clanky/vyber-fotoaparatu/mirrorless-fotoaparaty/>, 2.4.2001
- [o7] KLOCOK, Ľubomír. *Využitie vlastností nábojovo viazaných štruktúr CCD pre astronomické výskumy*. Tatranská Lomnica, 1986. Dizertační práce. Slovenská vysoká škola technická.
- [o8] <http://unihedron.com/projects/darksky/hcm500.htm>, 10.4.2011
<http://unihedron.com/projects/darksky/faq.php>, 10.4.2011