

Astronomska fotometrija za početnike


Verzija: 1.0 (draft 0.1)
fotometrija.advega.hr

Veljača 2025.

Astronomsko društvo Vega



DRAFT 2025.1

Astronomska fotometrija za početnike © 2025 by Astronomsko društvo Vega is licensed under Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International. 

To view a copy of this license, visit <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Sažetak

Fotometrija je jedna od temeljnih astronomskih metoda pomoću koje istražujemo Svemir. U svojoj osnovi, astronomska fotometrija se svodi na mjerenje svjetlosti koja iz nebeskih objekata dolazi do nas. Analizom takvih mjerenja otkrivamo razna svojstva zvijezda, galaksija i drugih astronomskih tijela.

Ovaj priručnik namijenjen je učenicima, nastavnicima, mentorima i entuzijastima, i ima za cilj pružiti upute kako napraviti prve najjednostavnije korake u fotometriji. Pritom je za početak dovoljno imati samo fotoaparatus, što je uobičajena oprema u školama. Mogućnosti se dodatno proširuju ako se posjeduje teleskop s praćenjem vrtnje neba, ili uz to i astronomska kamera.

Iako je razina sadržaja pogodna za srednjoškolce i studente, priručnik će biti koristan i mentorima za rad s osnovnoškolcima. Pretpostavka je da čitatelj nema veliko poznavanje astronomije, pa se stoga u prvom dijelu priručnika prolazi kroz osnovne teorijske koncepte relevantne za fotometriju. Zatim su opisane upute kako koristiti fotoaparatus za snimanje neba i prikupljanje podataka, kao i kako obraditi slike u astronomskim programima, uključujući i upute kako napraviti fotometrijska mjerenja. U zadnjem dijelu priručnika dajemo niz praktičnih primjera fotometrijskih projekata koji se mogu odraditi koristeći znanja i tehnike opisane u ovom priručniku.

Autori:

Ovaj priručnik nastao je kao dio edukacijskih aktivnosti Astronomskog društva Vega iz Čakovca. Na izradi ovog priručnika radili su dr.sc. Dejan Vinković (kao autor i koordinator projekta, AD Vega) i Zoran Novak (autor, AD Vega). Svojim aktivnostima doprinijeli su i ...

27-02-2025
DRAFT 0.1

Sadržaj

1	Uvod	1
1.1	Što je to astronomska fotometrija	1
1.2	Kome je ovo namijenjeno i kako se snaći	2
1.2.1	Primjena u osnovnoj školi: 5 i 6 razred	3
1.2.2	Primjena u osnovnoj školi: 7 i 8 razred	3
1.2.3	Primjena u srednjoj školi	4
2	Početni pojmovi	5
2.1	Potencija, logaritam, magnituda, indeks boje, medijan i srednja vrijednost	5
2.1.1	Potencije	5
2.1.2	Logaritmi	6
2.1.3	Magnitude	9
2.1.4	Indeks boje	11
2.1.5	Srednja vrijednost i medijan	12
2.2	Što je to digitalna slika	12
2.2.1	Što je to FITS (ili FIT ili FTS) format	14
2.3	Zašto zvijezde nisu točke (što je to PSF)	15
2.4	Važnost filtera u astronomiji	17
2.4.1	Bayerova matrica	17
2.4.2	Astronomske filtere	20
2.4.3	Povezanost filtera i fizikalnih procesa	21
2.5	Utjecaj atmosfere na mjerenja sjaja zvijezda	22
2.6	Uvod u teoriju pogreške mjerenja	25
2.6.1	Tipovi pogrešaka	25
2.6.2	Izračun pogreške višestrukih mjerenja	26
2.6.3	Izračun pogreške pogrešaka mjerenja	27
2.6.4	Posredna mjerenja (propagacija pogreške)	27
2.6.5	Fotometrijska pogreška mjerenja sjaja zvijezde	28
3	Snimanje neba	31
3.1	Prvi korak: snimanje fotoaparatom bez teleskopa i bez praćenja neba	31
3.2	Prvi korak: snimanje fotoaparatom kroz teleskop	34
3.3	Konverzija RGB slike u FITS format	34
3.3.1	Konverzija pomoću aplikacije ASTAP	35
3.4	Upotreba astronomske filtere	35
4	Fotometrija	37
4.1	Jednostavna fotometrija - prvi koraci	37
4.1.1	Jednostavna fotometrija u programu SAOImageDS9	38
4.2	Problem saturacije zvijezda (upoznajte offset, ISO i gain)	41
4.3	Naprednija fotometrija: korekcija nepravilnosti na slici	43
4.3.1	Instalacija i podešavanje programa IRIS	44
4.3.2	Konverzija sirovog formata u FITS pomoću aplikacije IRIS	44
4.3.3	Priprema sirovih slika za daljnju obradu	45
4.3.4	Korekcija na offset (bias frame)	46
4.3.5	Korekcija na termalni šum (Dark frame)	47
4.3.6	Korekcija na nejednolikosti po površini slike (Flat field)	49

4.3.7	Korigiranje "vrućih" piksela	51
4.3.8	Korekcija astronomske slike za potrebe fotometrije	51
5	Primjeri praktičnih projekata	53
	Popis literature	55

DRAFT 2025.1

Uvod

Cilj ovog priručnika je omogućiti prve praktične znanstvene korake u astronomiji kod učenika, nastavnika, studenata, i općenito entuzijasta.

1.1 Što je to astronomska fotometrija

Ukoliko vas privlači bavljenje astronomijom, možete joj se posvetiti iz dva jednako uzbudljiva smjera: estetsko-umjetnički, gdje savladavate tehnike kojima težite stvoriti što upečatljivije snimke svemirskih ljepota, ili znanstveno-analitički, gdje vaše oko ili kameru tretirate kao mjerni instrument i težite vještinama analize podataka koje tako prikupite.

Ukoliko vas intrigira zakoračiti u ovu drugu skupinu, onda je dobar prvi korak upoznavanje s astronomsom fotometrijom. Fotometrija se bavi mjerenjem količine svjetla koje dolazi do oka, a astronomska verzija toga je mjerenje svjetla pomoću instrumenata poput današnjih digitalnih kamera.

Strogo govoreći, cilj vam je izmjeriti gustoću toka zračenja (astronomi to na engleskom nazivaju *flux density* ili jednostavno samo *flux*), tj. energiju koja prolazi kroz jedinicu površine u jedinici vremena (W/m^2 , u hrvatskom ćete pronaći i nazive *ozračenje* ili *iradijancija*). Drugim riječima, interesira vas koliko je energije prikupio piksel kamere tijekom vremena trajanja prikupljanja svjetla na senzoru (ekspozicija, tj. fotografi bi rekli tijekom „brzine zatvarača“). Primijetite da koristimo izraze *svjetlo* i *zračenje*: u biti, radi se o jednom te istom, ali pod svjetlo mislit ćemo prvenstveno na oku vidljivo zračenje, a pod zračenje mislimo na općenito bilo koju valnu dužinu (tj., energiju) fotona.

Tu se odmah susrećemo s prvom ključnom razlikom između umjetničke i analitičke fotografije svemira. Ako vam je cilj stvoriti što ljepšu sliku, onda ćete raznim tehnikama proizvoljno mijenjati vrijednosti piksela ne bi li uspjeli istaknuti detalje koji vas zanimaju. To onda zovemo astrofotografija. Ali ako vas zanima koristiti kameru kao mjerni instrument, onda je imperativ očitati stvarne vrijednosti piksela, bez estetskih manipulacija, ne bi li dobili informaciju o količini svjetla koje je pristiglo iz svemirskog izvora kojeg proučavamo (npr. neke zvijezde).

Fotometrija se u biti svodi na zbrajanje vrijednosti u pikselima (najmanjim dijelovima slike) koje je osvijetlila zvijezda. Velik problem je međutim da vrijednosti koje piksel ima ne dolaze samo od sjaja zvijezde. Te dodatne doprinose nazivamo šum i izvori su raznoliki.

Velik doprinos dolazi od toga što samo nebo, tj. atmosfera, svijetli, posebice ako snimate s neke lokacije koja ima osjetno svjetlosno onečišćenje. Razni zemaljski izvori svjetla raspršuju se u atmosferi i stvaraju pozadinski sjaj neba kojeg zvijezda ili galaksija mora nadjačati svojim sjajem da ju uopće i vidite. Ali čak i savršeno tamno nebo ima neki sjaj, samo što je puno manji pa ćete stoga imati i više vidljivih zvijezda na vašoj slici.

Uz to, i sama kamera stvara vlastiti šum, što možete detektirati ako zatvorite objektiv poklopcem i okinete fotografiju iste ekspozicije kao i kad ste snimali nebo. Takva tamna fotografija neće imati vrijednosti nula u pikselima, čemu je uzrok sama kamera.

Uz sve to, dodatni problem je što sav taj šum varira od slike do slike. Šum može imati i strukturu ako dolazi od prašine na senzoru ili objektivu, a i sam objektiv ili teleskop stvara nejednoliko osvjtljavanje senzora kamere. Postoji čitava znanost iza toga što i kako se sve generira šum i nepravilnosti na slici. U ovom priručniku ćemo se zadovoljiti jednostavnijim metodama uklanjanja šuma i korigiranja slika. Time smo prihvatili i veću grešku mjerenja, ali to će biti dovoljno dobro za započeti se baviti fotometrijom.

1.2 Kome je ovo namijenjeno i kako se snaći

Kao sa svim novim stvarima, najvažnije i najteže je uložiti početni trud i vrijeme. To vrijedi i s ovim priručnikom. Cilj je omogućiti prve, vrlo jednostavne korake u astronomsku fotometriju, sa što manje komplikacija. Priručnik pruža nekoliko početničkih razina znanja fotometrije, što je dovoljno za izvođenje mnoštva zabavnih opažачkih projekata iz astronomije.

Priručnik je pisan s idejom da ga mogu pratiti srednjoškolci, mentori, i astronomski entuzijasti bez bitnog predznanja iz astronomije. Kroz uvodna poglavlja čitatelj se može upoznati s potrebnim minimalnim znanjima, ali isto tako nastavnici i mentori mogu koristiti priručnik u svojem radu s osnovnoškolcima. Praktični primjeri idu od vrlo jednostavnih, zamišljenih kao prvi koraci u fotometriju, pa do zahtjevnijih, gdje se upuštamo u prava mala znanstvena istraživanja.

Ako se netko nakon ovog priručnika odluči upustiti još dublje u problematiku i precizniju fotometriju, postoje priručnici organizacije The American Association of Variable Star Observers (AAVSO) koji su bili i početni korak u izradi našeg priručnika. Za takve napredne astronome preporučamo njihove priručnike The AAVSO DSLR Observing Manual¹ ako snimate nebo fotoaparatom [5] ili (posebno detaljan) AAVSO Guide to CCD/CMOS Photometry² ako snimate astro-kamerom [6].

Osnovni preduvjeti za korištenje našeg priručnika su:

- Minimalna prethodna znanja astronomije: fotometrija je alat za proučavanje Svemira, tako da o puno novih stvari o astronomiji možete učiti i u hodu;
- Minimalna oprema: dovoljno je za početak imati fotoaparat, što škole uglavnom danas imaju;
- Teleskop nije nužan, ali je koristan: teleskop vam otvara više mogućnosti za zahtjevniju fotometriju, ali to opet ovisi o tome ima li teleskop praćenje, a nakon toga imate li možda i astro-kameru;
- Osnove matematike: astronomi rade s magnitudama, koje su u biti logaritamska funkcija, tako da to morate savladati (iako kod osnovnoškolaca se mogu napraviti vježbe gdje se ne ulazi u pojam magnitude i logaritma).

¹<https://www.aavso.org/dslr-camera-photometry-guide>

²<https://www.aavso.org/ccd-camera-photometry-guide>

- Korištenje računala: priručnik daje detaljne upute koje programe koristiti i kako u njima napraviti mjerenja. To je dovoljno za početak, jer se s time mogu raditi i napredni astronomski projekti. A ako ste vični programiranju onda vam se otvaraju i dodatne mogućnosti.

1.2.1 Primjena u osnovnoj školi: 5 i 6 razred

Kod osnovnoškolaca je pretpostavka da se ovim priručnikom služe nastavnici ili mentori koji rade s učenicima. Najvažnije je u tom slučaju procijeniti što od teorijskog predznanja treba izbjegavati jer bi bilo konceptualno prezahtjevni. Na primjer, *kod osnovnoškolaca izbjegavajte logaritme, što onda znači i magnitude*. Fotometriju zadržite na vrijednostima sume piksela bez da nakon toga uzimate logaritam i pretvarate to u magnitude.

Naš prijedlog redoslijeda tema za početni rad s učenicima ovog uzrasta temelji se na pretpostavci da će učenici koristiti fotoaparata:

poglavlje	tema	ilustracija
2.2	Što je to digitalna slika	Slika 2.6
-	Kako izgleda zvijezda na slici	Slika 2.7
2.4.1	Bayerova RGB matrica	Slike 2.9, 2.10
2.6.1	Tipovi pogrešaka	-
3.1	Snimanje fotoaparatom bez teleskopa i bez praćenja neba	Slike 3.1-3.5
3.3.1	Konverzija u FITS format	-
2.1.5	Što je to srednja vrijednost i medijan	-
4.1.1	Jednostavna fotometrija u programu SAOImageDS9	Silke 4.1,4.2

1.2.2 Primjena u osnovnoj školi: 7 i 8 razred

Kod starijih osnovnoškolaca proširujemo teme koje su spomenute za uzrast 5. i 6. razreda. Sada već važnu ulogu počinju igrati matematičke vještine kod učenika. Fotometrija u svojoj osnovi je zapravo primijenjena matematika, i raspon tema koje se mogu sada raditi ovisi o tome koliko su učenici sposobni savladati razine koje nadilaze uobičajena školska predznanja.

Predlažemo pokušati sa slijedećim temama (oznaka "Ekstra" označava dodatne naprednije teme):

poglavlje	tema	ilustracija
2.2	Što je to digitalna slika	Slika 2.6
-	Kako izgleda zvijezda na slici	Slika 2.7
2.3	Ekstra: Zašto zvijezde nisu točke	-
2.4.1	Bayerova RGB matrica	Slike 2.9, 2.10
2.4	Ekstra: Važnost filtera u astronomiji	Slike 2.11-2.13
2.6.1	Tipovi pogrešaka	-
2.6.2,2.6.3,2.6.5	Ekstra: Izračuni pogrešaka fotometrije	-
3.1	Snimanje fotoaparatom bez teleskopa	Slike 3.1-3.5

	i bez praćenja neba	
3.3.1	Konverzija u FITS format	-
2.1.5	Što je to srednja vrijednost i medijan	-
4.1.1	Jednostavna fotometrija u programu SAOImageDS9	Slike 4.1,4.2
4.2	Extra: Problem saturacije piksela	Slike 4.3-4.4

1.2.3 Primjena u srednjoj školi

Glavni iskorak kod srednjoškolaca je da se mogu koristiti logaritmi (a time i magnitude). Iako se u nastavi matematike logaritmi obrađuju tek sredinom srednje škole, neće biti problem da i učenici na početku srednje škole savladaju koncept logaritama u poglavlju 2.1.2. Time čitav priručnik postaje pogodan za srednjoškolce, ali je pitanje kojim redoslijedom obrađivati ovako opširan sadržaj.

Naša preporuka je slijedeća:

- krenete s osnovnim redoslijedom previđenim za 7. i 8. razred osnovne škole,
- nakon toga odradite sadržaje označene kao "ekstra" u tom popisu tema,
- zatim proširujte aktivnosti i na ostale sadržaje u ovom priručniku,
- posebnu pažnju posvetite izračunima pogreške u poglavlju 2.6,
- nakon savladavanja osnova fotometrije, krenite na naprednije teme kroz poglavlje 4.3.

Početni pojmovi

Prije nego krenemo s fotometrijom moramo biti sigurni da razumijemo osnovne pojmove i matematiku koja se pritom koristi.

Za napraviti prve korake u fotometriji nije potrebno vrlo napredno znanje iz astronomije ili matematike. Ali s nekim osnovnim pojmovima se morate upoznati. Svi su jednostavni i mogu ih savladati i osnovnoškolci. Naravno, sve ima i svoje kompliciranije verzije, pa je stoga uvijek moguće "zaroniti" puno dublje u fiziku i matematiku svakog pojma s kojim se susretnete. Međutim, cilj ovog priručnika je da vam omogući prve osnovne korake.

2.1 Potencija, logaritam, magnituda, indeks boje, medijan i srednja vrijednost

Astronomija se temeljni na nekoliko ključnih matematičkih pojmova bez kojih se ne može raditi fotometrija. Ako vam nisu poznati, lako ćete ih naučiti jer nisu teški. Ako neka vježba u ovom priručniku traži dodatnu matematiku koja nije samo logaritam, magnituda, medijan ili srednja vrijednost, objasniti ćemo je unutar te vježbe.

2.1.1 Potencije

Prvo krećemo od potencija koje su skraćeni zapis umnoška istih brojeva. Na primjer, ako broj x množimo n puta sa samim sobom koristiti ćemo zapis x na n -tu potenciju:

$$x^n = \underbrace{x \cdot x \cdot x \dots x \cdot x \cdot x}_{n \text{ faktora}} \quad (2.1)$$

gdje broj x zovemo bazom (eng. base), a n eksponentom (eng. exponent, index, power) potencije. S ovakvim zapisom vjerojatno ste se susreli kod pisanja velikih brojeva gdje koristimo bazu 10, poput:

$$\begin{aligned} 10^{-9} &= 0.000\,000\,001 = 0.1 \cdot 0.1 \cdot 0.1 \cdot 0.1 \cdot 0.1 \cdot 0.1 \cdot 0.1 \cdot 0.1 \cdot 0.1 \\ 10^{-2} &= 0.01 = 0.1 \cdot 0.1 \\ 10^{-1} &= 0.1 \\ 10^0 &= 1 \\ 10^1 &= 10 \\ 10^2 &= 100 = 10 \cdot 10 \\ 10^9 &= 1\,000\,000\,000 = 10 \cdot 10 \cdot 10 \cdot 10 \cdot 10 \cdot 10 \cdot 10 \cdot 10 \cdot 10 \end{aligned} \quad (2.2)$$

Inverznu operaciju potenciji zovemo *korijen*. Recimo kvadratni korijen, $\sqrt[2]{100} = \sqrt[2]{10 \cdot 10} = \sqrt[2]{10^2} = 10$. Ili kubni (tj. treći) korijen, $\sqrt[3]{1000} = \sqrt[3]{10 \cdot 10 \cdot 10} = \sqrt[3]{10^3} = 10$. Pritom kvadratni korijen pišemo uglavnom na pojednostavljen način $\sqrt{} = \sqrt[2]{}$ jer je jako često u upotrebi. Primijetite sada poveznicu s potencijama na ovom primjeru: $\sqrt[3]{1\,000\,000\,000} = \sqrt[3]{10^9} = \sqrt[3]{1000 \cdot 1000 \cdot 1000} = \sqrt[3]{1000^3} = 1000 = 10^3 = 10^{9/3}$. Ovo nam sugerira da možemo pisati $\sqrt[3]{x} = x^{1/3}$.

Evo i općenitih pravila koja vrijede za potencije:

$$\begin{aligned} \sqrt[n]{x} &= x^{1/n} \\ (x^n)^m &= x^{n \cdot m} \\ x^{-n} &= \frac{1}{x^n} \\ x^n \cdot x^m &= x^{n+m} \\ \frac{x^n}{x^m} &= x^{n-m} \\ x^0 &= 1 \end{aligned} \tag{2.3}$$

Međutim, potencije ne moraju imati samo cijele brojeve za bazu i eksponent. Evo primjera nekih općenitih potencija:

$$\begin{aligned} 10^{0.5} &= 10^{1/2} = \sqrt{10} = 3.16227766017... \\ 100^{0.2} &= 100^{1/5} = \sqrt[5]{100} = 10^{2/5} = 2.51188643151... \\ 100^{-0.2} &= 10^{-2/5} = \frac{1}{10^{2/5}} = 0.39810717055... \\ 1.5^{2.5} &= 2.75567596063... \\ 10^\pi &= 1385.45573137... \\ \pi^{-2} &= 0.10132118364... \\ \pi^\pi &= 36.4621596072... \end{aligned} \tag{2.4}$$

2.1.2 Logaritmi

Što ako za neku bazu znamo rezultat potenciranja, ali ne znamo koji je bio eksponent? Recimo, ako vas netko pita koji je eksponent potreban da bi koristeći bazu 10 dobili broj 1000, znate odmah da je to 3 jer je $10^3 = 1000$. Matematički to onda zapisujemo kao *logaritam s bazom 10*:

$$\log_{10} 1000 = \log_{10} 10^3 = 3$$

ili općenito ako za neku bazu x vrijedi $y = x^n$ onda je logaritam definiran kao:

$$\log_x y = \log_x (x^n) = n \tag{2.5}$$

x	y	$\log x$	$\log y$
0.001	1	-3	0
0.01	2	-2	0.301029996
0.1	4	-1	0.602059991
1	8	0	0.903089987
10	16	1	1.204119983
100	32	2	1.505149978
1000	64	3	1.806179974

Tablica 2.1: Primjer varijabli x i y koje imaju veliki raspon vrijednosti.

Evo nekih primjera logaritama koristeći primjere potencija iz jednadžbi 2.2 i 2.4:

$$\begin{aligned}
 \log_{10} 0.000\,000\,001 &= -9 \\
 \log_{10} 100 &= 2 \\
 \log_{10} 3.16227766017 &\approx 0.5 \\
 \log_{100} 0.39810717055 &\approx -0.2 \\
 \log_{1.5} 2.75567596063 &\approx 2.5 \\
 \log_{\pi} 0.10132118364 &\approx -2 \\
 \log_{\pi} 36.4621596072 &\approx \pi
 \end{aligned} \tag{2.6}$$

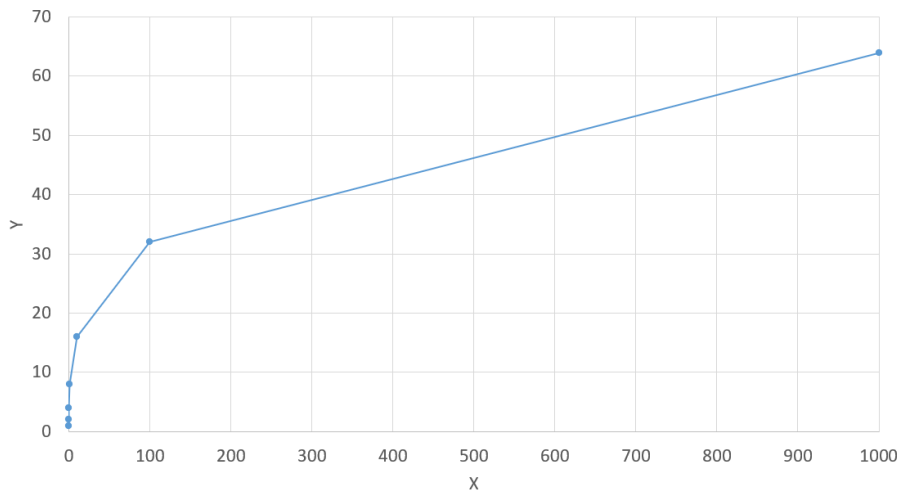
Budući da je u praksi baza 10 najčešće u upotrebi, uobičajeno je pisati takve logaritme bez oznake baze, tj. $\log_{10} = \log$. Uz to, u svijetu prirodnih znanosti pojavljuje se često baza s brojem e , koji je konstanta (kao što je i broj π konstanta) koja iznosi $e = 2.71828182846\dots$ Logaritam s bazom e zove se *prirodni logaritam* i označava kao $\log_e = \ln$.

Matematičke operacije s logaritmima slijede neka pravila:

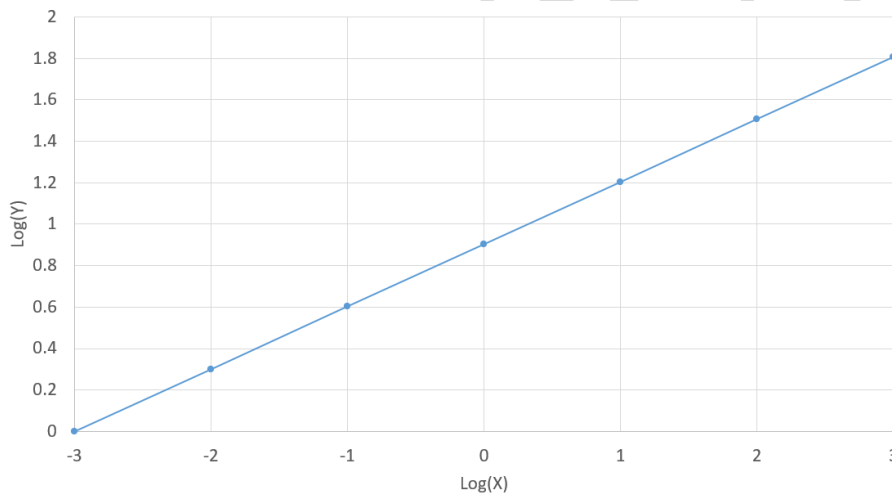
$$\begin{aligned}
 \log_x 1 &= 0 \\
 \log_x x &= 1 \\
 \log_x (y \cdot z) &= \log_x y + \log_x z \\
 \log_x \left(\frac{y}{z}\right) &= \log_x y - \log_x z \\
 \log_x y^z &= z \log_x y \\
 \log_x y &= \frac{1}{\log_y x} \\
 \log_x y &= \frac{\log_z y}{\log_z x} \quad (\text{prelazak na novu bazu})
 \end{aligned} \tag{2.7}$$

Zašto nam je logaritam važan? Zato što je svemir prepun primjera gigantskih razlika u fizikalnim veličinama: udaljenostima između zvijezda i galaksija, sjaju svemirskih objekata i njihovoj masi, itd. Stoga se pojavljuje problem kako baratati takvim skalama u praksi, poput prikazivanja na grafikonu.

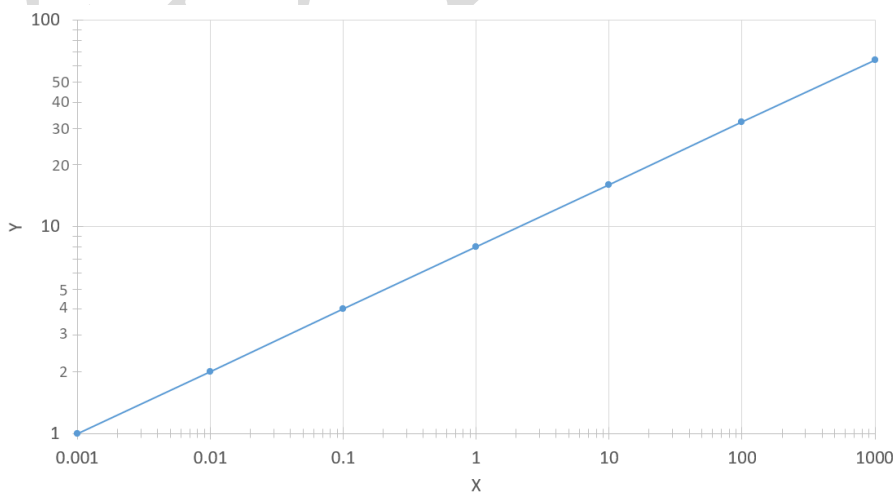
Pogledajmo to na primjeru izmišljenih veličina x i y čije su vrijednosti izlistane u tablici 2.1. Slika 2.1 prikazuje kako izgleda grafikon ako se koriste uobičajene koordinatne osi. Zbog velikih razlika u vrijednostima, točke na grafu su uglavnom stisnute u maleni prostor



Slika 2.1: Grafički prikaz odnosa između varijabli x i y iz tablice 2.1. Grafikon koristi obične linearne koordinate osi.



Slika 2.2: Grafički prikaz odnosa između $\log x$ i $\log y$ iz tablice 2.1. Grafikon koristi obične linearne koordinate osi.



Slika 2.3: Grafički prikaz odnosa između varijabli x i y iz tablice 2.1. Grafikon koristi logaritamske koordinate osi.

grafikona. Međutim, ako umjesto x i y grafički prikažemo $\log x$ i $\log y$, vidimo jako lijep graf koji prikazuje odnos i između vrlo malenih i između vrlo velikih vrijednosti od x i y (vidi sliku 2.2. Ali možda sada niste zadovoljni jer na koordinatnim osima su vrijednosti eksponenta broja 10 (jer log služi za izračun tog eksponenta). Ako želite i dalje vidjeti kolike su vrijednosti x i y na osima, a da pritom ne gubite i predivno svojstvo logaritma, onda možete koordinate osi prikazati na logaritamskoj skali. Kako to izgleda prikazano je na slici 2.3.

U astronomiji je uobičajeno koristi logaritamske skale, pa je stoga važno se na njih naviknuti. Uostalom, jedinica za sjaj je *magnituda* (vidi iduće poglavlje 2.1.3), koja je u stvari logaritam sjaja zvijezda ili galaksija. Zato je logaritam sastavni dio fotometrije.

2.1.3 Magnitude

Tijekom gotovo čitave svoje povijesti ljudi su noćno nebo promatrali samo očima. Čak i kada se pojavio teleskop prije oko 400 godina s Galileovim prvim promatranjima, i dalje je sve bilo samo s očima. Tek pojavom fotografije u 19. stoljeću promatranja svemira mogla su se prenijeti na instrumente. Ali do tada astronomija se već temeljila na sustavu određivanja sjaja zvijezda kroz ono kako to vidi ljudsko oko, tj. mozak. A ljudska percepcija svjetla je u biti gotovo pa logaritamska.

Stoga je u modernoj astronomiji uveden sustav mjerenja sjaja zvijezda u *magnitudama* koje su definirane na način da razlika od jedne magnitude odgovara omjeru sjaja zvijezda od $100^{1/5} = \sqrt[5]{100} = 10^{2/5}$. Drugim riječima, ako zvijezde A i B imaju sjaj F_A i F_B , a magnitude m_A i m_B , tada vrijedi:

$$\frac{F_A}{F_B} = \left(10^{2/5}\right)^{m_B - m_A} = 10^{(m_B - m_A)/2.5} \quad (2.8)$$

Ako sada primijenimo logaritam na lijevu i desnu stranu jednadžbe i koristimo pravila iz jednadžbi 2.7, dobijemo općenito pravilo za magnitude koju moramo zapamtiti:

$$m_A - m_B = -2.5 \log \frac{F_A}{F_B} \quad (2.9)$$

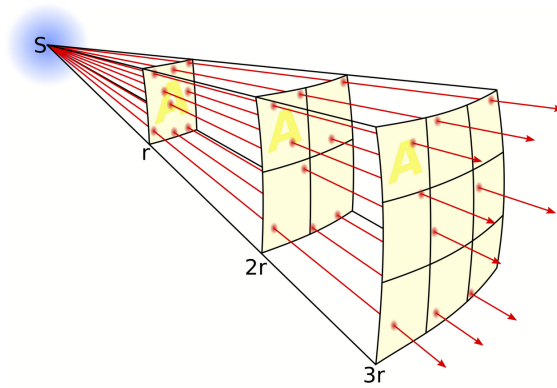
Iz ove jednadžbe uočavamo dva važna svojstva magnituda:

- ako je zvijezda B 100 puta sjajnije od zvijezde A, onda je razlika njihovih magnituda $m_A - m_B = 5$ (jer je $\log(1/100) = -2$),
- što je zvijezda sjajnije, to je njezina magnituda manja.

Kada mjerimo sjaj mi u stvari mjerimo gustoću toka zračenja (eng. *flux density*), tj. koliko energije je prošlo kroz površinu našeg senzora unutar nekog vremena i u nekom rasponu valnih dužina svjetlosti na koje je senzor osjetljiv. Stoga je mjerna jedinica¹ gustoće toka zračenja W/m^2 . Kada kažemo *sjaj zvijezde* mislimo na tu veličinu.

Primijetite da kod magnituda imamo slobodu definirati što je to nulta magnituda. Ako definiramo vrijednost gustoće toka zračenja F_0 za koji je magnituda nula, onda govorimo

¹Ako nas zanima spektar zvijezde onda nam treba gustoća toka zračenja po valnoj dužini (mjereno recimo u μm) ili frekvenciji (mjereno u Hz) svjetlosti, pa je mjerna jedinica $W/(m^2 \mu m)$ ili $W/(m^2 Hz)$.



Slika 2.4: Svjetlost koja se širi iz jedne točke u svim smjerovima prati zakon opadanja gustoće toka zračenja s kvadratom udaljenosti jer površina kroz koji prolazi ista količina energija raste s kvadratom udaljenosti. Preuzeto iz https://en.wikipedia.org/wiki/Inverse-square_law.

o *prividnoj magnitudi* zvijezde kojoj je gustoća toka zračenja F :

$$m = -2.5 \log \frac{F}{F_0} \quad (2.10)$$

Na žalost, realnost života astronoma je povećana konfuzija oko toga kolika je vrijednost F_0 . Svaki instrument ima svoju posebnu osjetljivost na razne valne dužine (boje) svjetlosti. Stoga su astronomi uveli neke standardne filtere kojima je zadatak da u senzore proпустe točno definirani raspon boja kako bi F_0 mjereno različitim kamerama i teleskopima imao istu vrijednost. Usprkos tome, precizna fotometrija zahtjeva da se kameru i filtere "kalibrira" na standardne zvijezde, tj. da se uspoređi poznata magnituda tih zvijezda s magnitudama koje daje kamera. O filterima pišemo više u poglavlju 2.4. Ako pak smo u mogućnosti da zbrojimo energiju izračenu po svim valnim dužinama, od UV do radio područja (iako u praksi najviše dolazi iz nekog uskog raspona valnih dužina, poput vidljivih boja svjetla), tada to nazivamo *bolometrijska magnituda*. Ali s time se u ovim početnim koracima fotometrije nećete susresti.

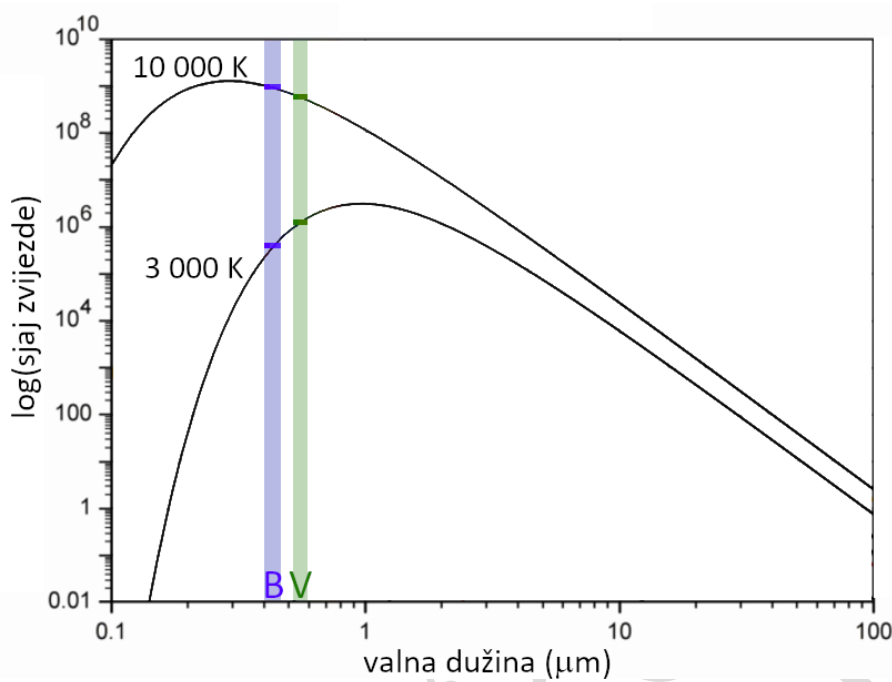
Kada za zvijezdu kažemo da ima neku magnitudu, bez navođenja detalja o filteru, onda se vjerojatno misli na tzv. *vidljivu magnitudu* koja je u stvari mjerena kroz standardni Johnson V filter (najpopularniji filter koji pokriva zelene nijanse i djelomično žute; vidi poglavlje 2.4). Recimo, Sunce ima magnitudu -26.8, puni Mjesec ima -12.5, a zvijezda Sirius -1.5.

Očito da je Sunce puno sjajnije zvijezda na nebu od Sirusa jer nam je i puno bliže. Ako želimo uspoređivati stvarni sjaj zvijezda pomoću magnituda, onda moramo mjeriti njihov sjaj na istim udaljenostima. Astronomi su zato uveli koncept *apsolutne magnituda* kod koje su sve zvijezde postavljene na udaljenost od 10 pc (parseka²) od nas.

Budući da mi ne možemo putovati po svemiru za dolaziti na te udaljenosti od zvijezda, koristimo svojstvo svjetlosti da gustoća toka zračenja opada s kvadratom udaljenosti (vidi sliku 2.4). To znači da za zvijezdu koja ima sjaj F i udaljenost d od nas, a sjaj F_{10} na udaljenosti od 10 pc, vrijedi

$$\frac{F}{F_{10}} = \left(\frac{10 \text{ pc}}{d} \right)^2 \quad (2.11)$$

²1 parsek (pc) = 3.261598 svjetlosnih godina



Slika 2.5: Vruća i hladnija zvijezda osjetno se razlikuju u obliku svoje krivulje količine zračenja po valnim dužinama. Ako im mjerimo sjaj kroz B i V filter, uočiti ćemo da vruća zvijezda ima sjaj $F_B > F_V$ dok hladnija ima $F_B < F_V$. Zato je indeks boje (vidi jednadžbu 2.13) vruće zvijezde $(B - V) < 0$, a hladnije zvijezde $(B - V) > 0$.

Ako sada logaritmiziramo lijevu i desnu stranu jednadžbe, te primijenimo definiciju magnitude iz formule 2.10, kao i pravila za logaritme iz jednadžbi 2.7, dobijemo

$$m - M = 5 \log \frac{d}{10 \text{ pc}} \quad (2.12)$$

gdje je m prividna, a M apsolutna magnituda zvijezde. Vrijednost M nam je sada od velike važnosti jer je povezana s ukupno izračenom energijom zvijezde na način da se zvijezde mogu uspoređivati. Drugim riječima, M je čudan način zapisa ukupno izračene energije zvijezde.

2.1.4 Indeks boje

Čak i ako ne znamo apsolutnu magnitudu zvijezde, možemo nešto zaključiti o njoj samo iz fotometrije kroz različite filtere. Najpoznatiji takav primjer je usporedba magnituda izmjerenih kroz Johnson B i V filter (vidi poglavlje 2.4). B filter pokriva uglavnom plavo-ljubičasti dio spektra, dok V filter propušta uglavnom zeleno-žute boje. Ako izmjerimo B magnitudu m_B i V magnitudu m_V za zvijezdu koja ima sjaj F_B u području B filtera i F_V u području kojeg pokriva V filter, onda je indeks boje $(B - V)$ definiran kao

$$(B - V) = m_B - m_V = -2.5 \log \frac{F_B}{F_V} \quad (2.13)$$

Na primjeru iz slike 2.5 možemo vidjeti zašto je takav indeks boje povezan s temperaturom zvijezde. Općenito pravilo je da manji indeks boje znači veću temperaturu.

2.1.5 Srednja vrijednost i medijan

Kod fotometrije baratamo s mnoštvom brojeva koji su zapisani kao vrijednosti piksela slike (vidi poglavlje 2.2 o tome što je to digitalna slika). Stoga se uvijek susrećemo s problemom kako usrednjiti te vrijednosti. Prvi način je *srednja vrijednost* (eng. average, mean). Ako imamo N piksela, gdje je vrijednost n -tog piksela x_n , onda je srednja vrijednost definirana kao

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_{N-2} + x_{N-1} + x_N}{N} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N x_n \quad (2.14)$$

Na primjer, ako imamo 7 brojeva $x = (2, 6, 10, 10, 11, 13, 32)$, onda je njihov zbroj 84, a srednja vrijednost 12.

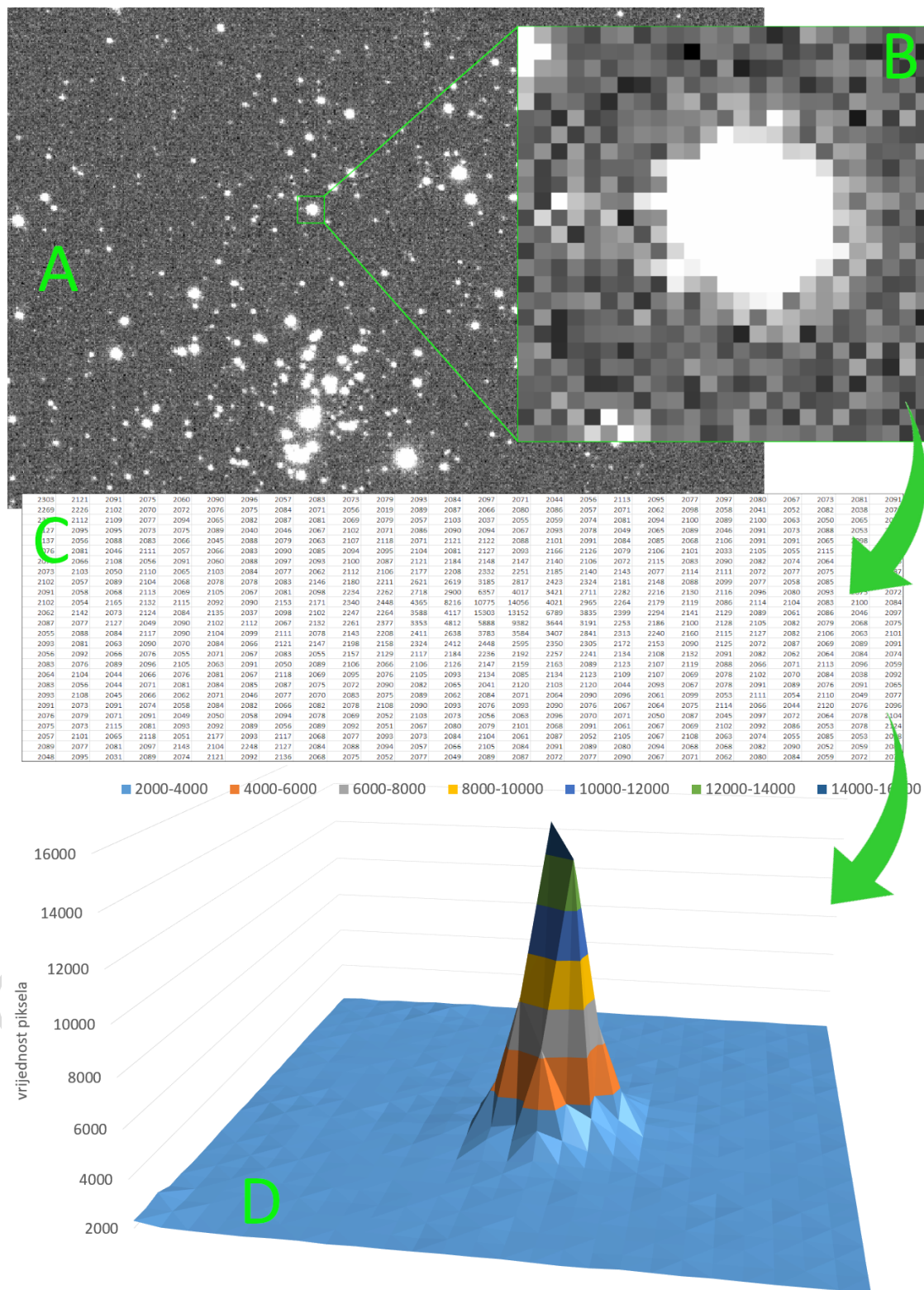
Drugi način se naziva *medijan* (eng. median) i koristimo drugačiji pristup. Prvo brojeve poredamo po veličini, a onda odaberemo broj poredan u sredini kao medijan. Recimo, u prethodnom primjeru medijan je 10 jer ima 3 vrijednosti manje od ili jednake 10 i 3 veće od ili jednake 10. Ako baratamo s parnim brojem piksela, onda uzimamo sredinu između dvije vrijednosti pozicionirane u sredini po veličini. Na primjer, ako imamo 8 brojeva $x = (2, 6, 10, 10, 11, 13, 32, 40)$, medijan je $(10+11)/2=10.5$.

Primijetimo kako se srednja vrijednost i medijan razlikuju. Ta razlika postaje jako važna u fotometriji kada imamo nerazumno velike vrijednosti u pojedinim pikselima jer su takvi pikseli pokvareni, tj. ne reagiraju ispravno na podražaj svjetlom (tzv. vrući pikseli). Srednja vrijednost je jako osjetljiva na takve pojedinačne ekstremne vrijednosti, dok ih medijan ignorira. Na primjer, uzmimo da jedan od 7 piksela ima jako veliku vrijednost $x = (2, 6, 10, 10, 11, 13, 1019)$. Zbroj je sada 1071, a srednja vrijednost 153. Za razliku od toga medijan se nije promijenio - i dalje je 10.

2.2 Što je to digitalna slika

Iako pojam digitalne slike može biti dosta širok, nas zanima onaj najčešći i najjednostavniji oblik gdje se misli na brojčani prikaz dvodimenzionalne slike na način da se ona podijeli na mnoštvo malenih elemenata koje zovemo *pikseli*. Svaki piksel ima svoj položaj po visini i širini slike, te brojčanu vrijednost koja odgovara intenzitetu svjetla koje dolazi iz tog sitnog komadića slike. Na slici 2.6 prikazan je primjer kako izgleda zvijezda na digitalnoj slici.

U stvari, digitalna slika nije ništa drugo nego li velika tablica brojeva. Širinu i visinu tablice nazivamo rezolucija, i govori nam na koliko smo piksela podijelili sliku. U astronomiji piksel igra važnu ulogu jer predstavlja sitnu površinu neba, te je stoga najmanji detektor svjetla unutar kamere kojom mjerimo sjaj neba. Digitalna kamera ima senzor koji se sastoji od mnoštva sitnih detektora svjetla i svaki od tih detektora odgovara jednom pikselu. Kada se očitaju vrijednosti u svim pikselima dobije se digitalna slika. U upotrebi su dva tipa takvih senzora: CCD (Charge-Coupled Device) i CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductors). CMOS je prevladao na tržištu tako da vjerojatno vaša kamera ima CMOS. Razlike su u načinu kako funkcioniraju njihovi elektronički sklopovi, ali za naše potrebe fotometrije na ovoj razini te razlike su nebitne.



Slika 2.6: Astronomska digitalna slika neba (A) sastoji se od piksela, koje možemo zamisliti kao sitne kvadratiće koji prikupljaju svjetlo iz svog malog komadića neba. Zvijezda prekrivena pikselima (B) je područje u kojem su pikseli prikupili više svjetla. U memoriji računala pikseli su zapisani kao niz brojeva, po redcima i stupcima (C). Fotometrija se bavi statistikom tih zapisanih brojeva koji predstavljaju izmjerene vrijednosti svjetla neba. Stoga sliku zvijezde možemo prikazati i kao 3D graf (D) gdje iz ravnine koju predstavlja nebo izranjaju vrijednosti piksela. U ovom prikazanom primjeru nebo ima sjaj od oko 2000, uglavnom zbog svjetlosnog onečišćenja neba i signala kojeg stvarna sam senzor bez obzira na nebo. Iz tog pozadinskog sjaja neba izvire poput planine zvijezda koja ima maksimalnu vrijednost 15303.

Svjetlo zvijezde dovoljno sjajne da se vidi na slici pada na više od jednog piksela istovremeno (vidi poglavlje 2.3 o tome zašto zvijezde nisu točka). Zato su zvijezde mali, ali sjajni "otoci" svjetla na mračnoj pozadini neba (vidi sliku 2.6). Budući da nam je u fotometriji cilj izmjeriti sjaj zvijezde, baviti ćemo se u stvari sa statistikom brojeva zapisanih u pikselima koje pokriva zvijezda u usporedbi s pikselima oko zvijezde.

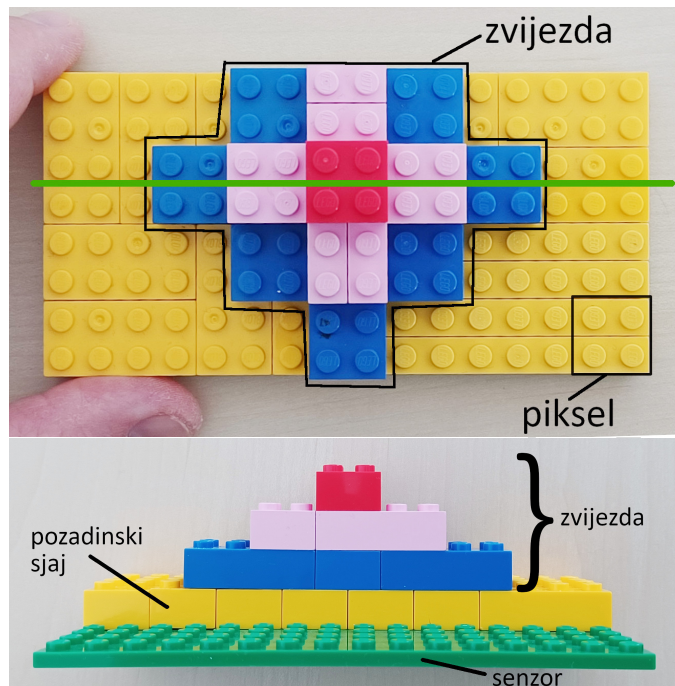
Piksel sam za sebe je detektor koji reagira na svjetlo vrlo širokog raspona boja, od vidljivih do nevidljivih (UV i infracrveno). Stoga se ispred piksela stavljaju filteri koji propuštaju samo neki specifični raspon boja. U poglavlju 2.4 opisujemo ulogu tih filtera u fotometriji. Ako koristite fotoaparatus onda vam se slika sprema u memoriju na način da svaki piksel ima zapisana tri broja. Oni su posljedica posebne vrste filtera kojeg zovemo Bayerova matrica, postavljenog na sam senzor kamere. O tome možete detaljnije pročitati u poglavlju 2.4.1. Te tri vrijednosti se na ekranu monitora onda prikazuju kao crvena, zelena i plava boja. Budući da fotometriju ne možemo raditi s takvim zapisom slike, u uputama za fotometriju biti će i dio o tome kako sliku s tri broja u pikselima pretvoriti u tri slike sa samo jednim brojem u pikselima.

2.2.1 Što je to FITS (ili FIT ili FTS) format

Budući da su slike u stvari velika tablica brojeva, postoji razni načini kako tu tablicu zapisati na disk računala ili memorijsku karticu. Recimo da slika ima 5184 redaka i 3456 stupaca. To je gotovo 18 milijuna piksela (rekli bi da je to kamera od 18 megapixel-a). Još ako moramo zapisati tri broja po pikselu, to postaje velika količina podataka. U svakodnevnoj primjeni želi se smanjiti taj zapis (to nazivamo *kompresija slike*), pa su izmišljeni razni matematički trikovi kojima se to postiže. Dijelimo ih u dvije skupine: kompresije koje ne gube ništa od podataka o pikselima (eng. *lossless compression*), i kompresije koje djelomično izmjenju vrijednosti nekih piksela i tako degradiraju kvalitetu slike, ali postižu osjetno manju veličinu zapisa (eng. *lossy compression*).

Za fotometriju je krucijalno do se ne koriste zapisi slike koji mijenjaju vrijednosti piksela. Stoga ako koristite fotoaparatus morate aktivirati spremanje slike u sirovom formatu (npr., .CR2 za Canon, .NEF za Nikon). Nipošto u .JPG jer se tim formatom gube informacije o točnom sjaju piksela! Fotometriju je uobičajeno raditi u astronomskim programima koji traže da je vaša slika u FITS formatu (ponekad se naziva i FIT ili FTS), koji se standardno koristi u astronomiji. Ako imate astro-kameru (specifične kamere predviđene za astronomiju) onda vam slika može automatski biti spremljena u FITS formatu. Ako koristite fotoaparatus, onda ćete sirovi format kasnije pretvoriti u FITS format (uputa kako to napraviti nalazi se u poglavlju 3.3).

Naziv FITS dolazi od *Flexible Image Transport System* i puno je više od običnog zapisa slike. U biti to je način zapisa znanstvenih podataka koji niti ne moraju biti u obliku slike. Može sadržavati više slika odjednom ili tablice s više od dvije dimenzije. Također sadrži tekstualni dio koji se naziva *header* u kojem se zapisuju razni podaci relevantni astronomima kod analize tih podataka, poput točnog vremena i lokacije gdje je slika napravljena, na kakvom teleskopu i koja su optička svojstva teleskopa, kako izgleda nebeski koordinatni sustav na dijelu neba koji je pokriven tom slikom, itd. Naravno, svi ti podaci se ne upisuju ako ih vi niste podesili da se upišu, ali ako koristite neku FITS sliku napravljenu na profesionalnoj opservatoriji, možete očekivati mnoštvo upisanih podataka.



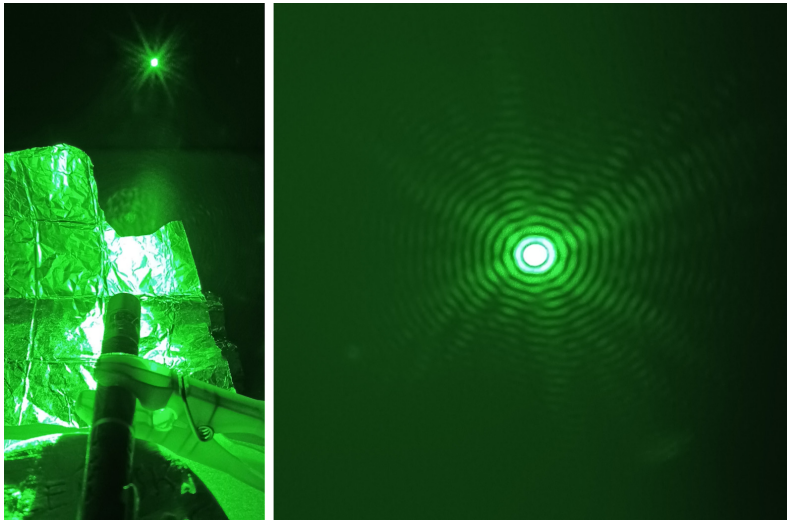
Slika 2.7: LEGO senzor: Zamislimo da je LEGO pločica senzor koji skuplja svjetlo. Senzor se sastoji od piksela u kojima se podižu LEGO kockice kao svjetlo pada na njih (gornja slika). Ali senzor ima sloj kockica i na mjestima gdje bi trebao biti mrak. To zovemo pozadinskim sjajem i uzrok je ili sama elektronika senzora ili sjaj neba. Iznad pozadinskog sjaja uzdiže se LEGO zvijezda od svjetla prikupljenog sa zvijezde. Ako prerežemo ovu LEGO sliku uzduž horizontalne zelene linije, ugledat ćemo profil sjaja zvijezde (donja slika). Kada bi maknuli pozadinski sjaj ostao bi samo sjaj zvijezde i njezin oblik se naziva PSF.

2.3 Zašto zvijezde nisu točke (što je to PSF)

Zvijezde se nalaze toliko daleko da je njihova veličina na nebu točka kada ih snimamo kamerom. To bi značilo da čitava zvijezda može stati u jedan jedini piksel. Ali to se nikada ne dešava - zvijezde su uvijek neka fleka na slici (vidi sliku 2.7). Tome ime više razloga.

- Glavni izvor mrljanja točke je naša atmosfera. Svjetlo zvijezde prolazi kroz mnoštvo slojeva različitih temperatura i gustoća. U atmosferi uvijek ima gibanja zraka, nekad jača nekad slabija. To zovemo turbulencija i dešava se čak i kod najmirnijeg i najljepšeg neba za promatranje. I kao što voda zakrene smjer svjetlosne zrake, tako i atmosfera mijenja smjer putanje svjetla, iako puno manje nego voda. Jačina tog efekta mijenjanja smjera ovisi o temperaturi i gustoći zraka, a turbulencija neprestano mijenja te vrijednosti na raznim mjestima po putanji svjetla koje nam dolazi od zvijezde. Tu pojavu ste sigurno vidjeli iznad vrućeg asfalta ljeti, kada prizor uz samu površinu migolji zbog gibanja vrućeg zraka. Konačni rezultat nama na tlu je zvijezda kao mrlja koja titra u sjaju i neprestano se deformira. Taj efekt zovemo *seeing* i glavni je limitirajući faktor teleskopima u razlučivosti sitnih detalja na nebu.

Uz to atmosfera i raspršuje svjetlo, što pojačava mrljanje slike. To je izrazito vidljivo kada u zraku ima puno vlage koja se kondenzira u sumaglicu vrlo sitnih kapljica. Efekt raspršenja na njima je jači za kraće valne dužine, pa će nam tako mrlja u plavoj boji biti veća nego u crvenoj. Naravno, efekt se pojačava što je duži put svjetla kroz atmosferu, pa



Slika 2.8: Svjetlo lasera koje prolazi kroz sitnu rupicu na alu-foliji ne ostavlja na zidu istu takvu malu točkicu, nego se pretvara u veliku valovitu mrlju. Razlog tome je valna priroda svjetla, gdje možemo zamisliti da svjetlo iz rupice izlazi kao valovi koji se onda šire. Ovaj fenomen nazivamo difrakcija svjetlosti. Iako je otvor teleskopa velika rupa, svejedno dolazi do difrakcije, i valovi su onda vrlo sitni, no svejedno postoje. Zato čak i svemirski teleskopi vide zvijezde kao mrlje.

je zato bitan i kut gledanja u odnosu na zenit (točka točno iznad naše glave). Budući da atmosfera apsorbira i raspršuje svjetlo, u poglavlju 2.5 opisujemo i kakav to ima utjecaj na fotometriju jer se time gubi dio svjetla zvijezde. Stoga se velike profesionalne opservatorije ciljano grade na velikim visinama sa suhom i rjeđom atmosferom kako bi se smanjio efekt seeinga.

Ako snimate bez praćenja, ili vam teleskop nema dobro uštimano praćenje, zvijezde će dodatno imati deformaciju u smjeru gibanja neba. Za fotometriju to ne mora biti problem ako je deformacija malena jer nas samo zanima uključiti svo pristiglo svjetlo u izračun ukupnog sjaja.

Ali postoji i situacija kada ne želite da vam je slika zvijezde sitna mrlja. Naime, pikseli u kameri imaju limit koliko najviše svjetla mogu detektirati. Iznad tog limita pokazivati će uvijek istu vrijednost. To se zove saturacija piksela i upropastit će vam fotometriju jer nećete znati koliki je točno sjaj zvijezde. Zato ako je zvijezda jako sjajna, radije se slika malo defokusira, tj. namjerno se senzor pomakne izvan fokusa. Time se sjajna zvijezda pretvori u veću mrlju i u piksele će padati manje svijetla od dopuštenog maksimuma. O tome govorimo u poglavlju 4.2 jer će vam se vjerojatno pojaviti kao problem ako snimate bez praćenja vrtnje neba.

Pomislili bi nakon ovoga da se slanjem teleskopa u svemir rješavamo svih tih problema i zvijezde će postati točka. No ni tada nam to ne uspijeva zbog valne prirode svjetla. Na slici 2.8 prikazan je eksperiment u kojem laser obasjava vrlo sitnu rupicu. Na zidu se umjesto male stine točkice vidi velika valovita mrlja s izraženim koncentričnim kružnicama koje zovemo *Airy prstenovi*. Razlog tome je što svjetlo iz rupice izlazi kao val koji se onda širi na putu do zida. Taj efekt se zove *difrakcija* i dešava se i na teleskopu. Otvor teleskopa je tada rupa kroz koju ulazi svjetlo kao val. Mrlja koja se tada stvara iz točkastog zvjezdanog izvora je vrlo mala, ali vidljiva na pikselima kamere. To ima za posljedicu i da se dvije

vrlo bliske zvijezde stoje u jednu mrlju i ne možemo ih razlučiti kao odvojene objekte. Time nam difrakcija stvara i teorijski limit na razlučivost teleskopa bez obzira na to koliko kvalitetnu kameru visoke rezolucije imali.

Svi ti procesi kojima se točka pretvara u mrlju mogu se zapisati kao jedna matematička operacija koja točku pomnoži s oblikom mrlje. Da bi mogli to napraviti potrebna nam je funkcija, tj. izgled tog geometrijskog oblika, kojom opisujemo deformaciju slike. Naziv za taj oblik je *point spread function*, ili skraćeno PSF. U praksi se pronalazi tako da se izmjeri oblik niza zvijezda različitog sjaja na slici i pronađe matematička formula koja najbolje opisuje izmjerene oblike. PSF nam može biti jako koristan kada želimo fotometrirati dvije zvijezde čije se mrlje preklapaju, jer možemo svakoj od zvijezda pridružiti PSF, tj. geometrijski oblik, i tako izračunati koliki udio u ukupnom izmjenenom sjaju pripada kojoj zvijezdi.

2.4 Važnost filtera u astronomiji

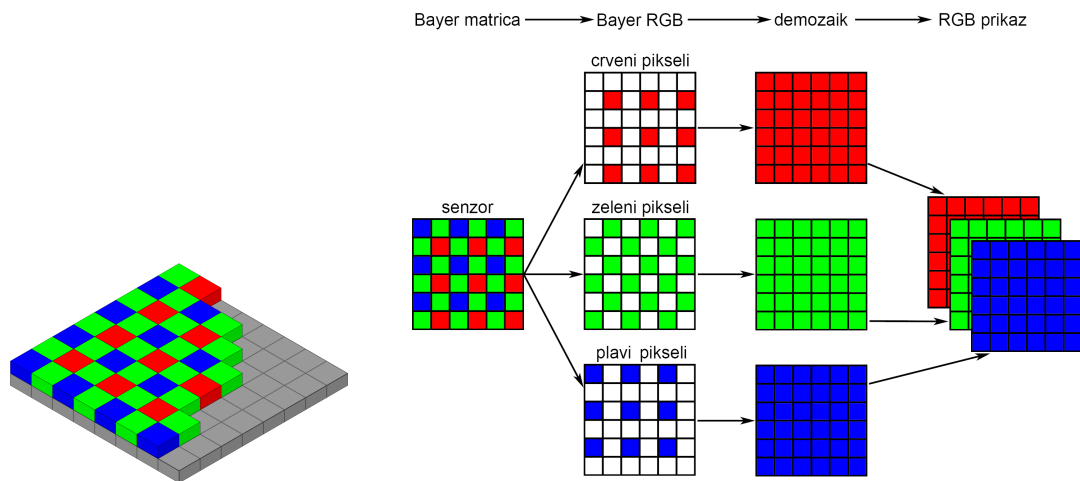
Budući da je svrha mjerenja sjaja zvijezda povezivanje tih podataka s fizikalnim procesima koji se odvijaju na i oko zvijezde, vrlo je važno znati koji to točno dio spektra (tj. duge koju bi stvorilo svjetlo sa zvijezde) mjerimo pomoću naših slika. Boje spektra se filtriraju na dva načina.

Svjetlo prvo prolazi kroz filter. Kod fotoaparata to je Bayerova matrica koja se sastoji od tri filtera postavljenih na same piksele čipa kamere, poznatih kako crveni (R), zeleni (G) i plavi (B). Kod astronomskih kamera koristimo filtere kao dodatak kameri kako bi ograničili raspon boja koje snimamo kamerom. Moguće je snimati i bez filtera, ali to pokušajmo izbjeći jer nam korištenje filtera daje znanstveno vrijednije rezultate.

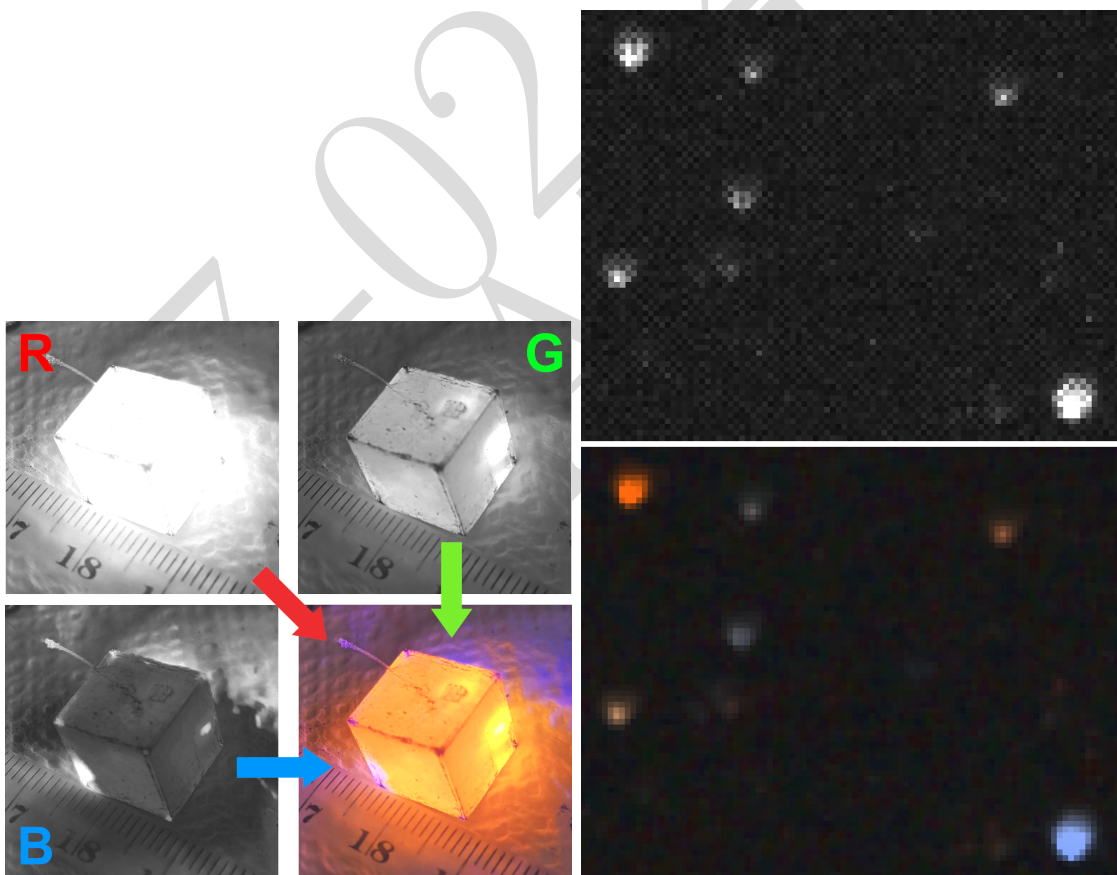
Drugi odabir boja dolazi od same osjetljivosti čipa, tj. senzora. Detekcija se odvija tako da svjetlo pobuđuje elektrone u pojedinim pikselima čipa. Ali taj proces funkcionira samo za neki raspon boja, ovisno o materijalu od kojeg je čip načinjen. Profesionalni astronomi koriste filtere i senzore kojima su pažljivo izmjerili propusnost i osjetljivost. Mi to nemamo, osim ako prilikom kupnje opreme nismo dobili i te podatke. Ali možemo fotometrijom posebnih, tzv. standardnih zvijezda izmjeriti u kakvom su odnosu magnitude dobivene našom opremom s poznatim magnitudama standardnih zvijezda.

2.4.1 Bayerova matrica

Jeste li se zapitali kako ekran vašeg mobitela ili televizora uspijeva prikazati sve moguće dugine boje? Radi se o iluziji, tj. triku gdje monitor tri zapisane vrijednosti digitalne slike prikazuje u tzv. RGB sustavu: crvena (R), zelena (G) i plava (B). Mozak pogrešno interpretira RGB kombinaciju kao boju koja u stvari na monitoru na postoji. Recimo, kombinaciju zelene i crvene na ekranu mozak pogrešno smatra žutom bojom. Stoga je žuta boja na ekranu iluzija, za razliku od žute boje u dugi na nebu koja stvarno postoji.



Slika 2.9: Lijevo: Skica Bayerove RGB matrice postavljene na piksele senzora. Desno: Postupak demosaika gdje se iz tri slike različitih boja spajaju u jednu sliku gdje svaki piksel ima tri vrijednosti (RGB). Preuzeto iz <http://dias.library.tuc.gr/view/manf/25161> (Savvas Tsengelidis, Diploma Thesis, Technical University of Crete, 2006).



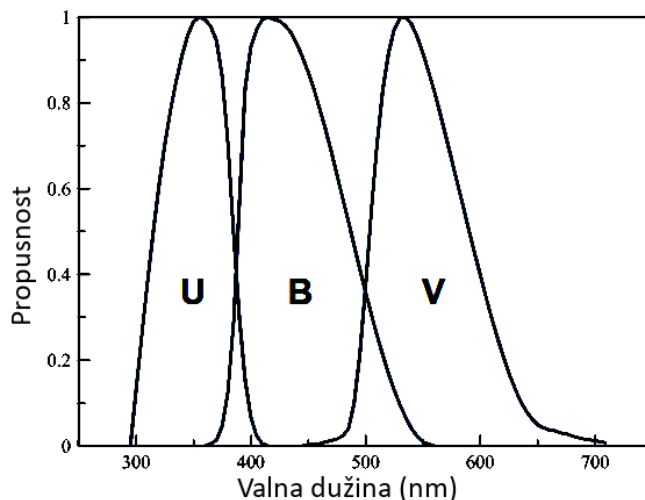
Slika 2.10: Primjeri kako izgledaju slike prije i nakon demosaika Bayerove matrice. Lijevo: Kombiniranjem crvene, zelene i plave slike dobivamo sliku u rasponu svih boja. Desno: Na sirovoj slici zvijezda fotoaparatom vide se razlike između piksela zbog Bayerove matrice. Postupkom demosaika (vidi poglavlje 3.3) stvara se RGB slika u boji.

Senzoru u vašem fotoaparatu je omogućeno da "vidi" crvenu, zelenu i plavu boju zahvaljujući filteru kojeg je još 1976. godine razvio Bryce Bayer iz tvrtke Kodak. Taj mozaik filter nazivamo Bayerova matrica, a može se označavati i sa oznakom CFA (Color Filter Array). Nalazi se iznad senzora fotoaparata i pokriva senzor na način da svakom pikselu pripada jedna od RGB boja (vidi sliku 2.9 lijevo). Može biti raspoređena u različitim uzorcima, a trenutno se najviše koristi uzorak 2x2 piksela. To znači da je polje od četiri piksela pokriveno s dva zelena filtera, jednim crvenim i jednim plavim. Zelene filteri su dvostruko zastupljeniji jer je ljudsko oko najosjetljivije na zelenu boju, što pridonosi boljoj reprodukciji detalja i oštine na slikama.

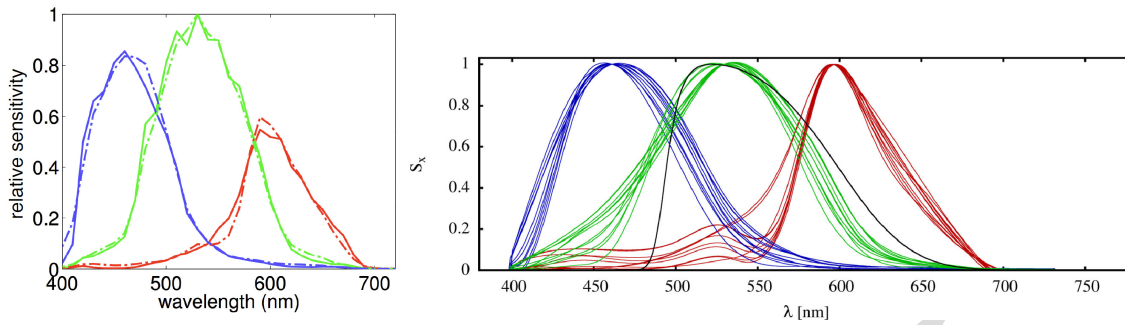
Kada svjetlost uđe u objektiv kamere³, na putu do senzora ona prolazi kroz Bayerovu matricu, koja filtrira svjetlost prema bojama, odnosno prema valnim dužinama koje odgovaraju svakom filteru. Svaki piksel senzora registrira svjetlost koja je prošla kroz određeni filter – crveni, zeleni ili plavi. Budući da nijedan piksel samostalno ne može "vidjeti" cijelu sliku, potrebno je kombinirati podatke kako bi se stvorila potpuna slika u boji (vidi sliku 2.9 desno). Taj proces nazivamo demosaik i koristi sofisticirane algoritme za rekonstrukciju cjelovite slike na temelju intenziteta svjetlosti koje je svaki piksel skupio. Uz naziv demosaik koriste se i nazivi debayer i CFA interpolacija.

Na taj način smo rekonstruirali sliku i kod jednoličnih površina to je uglavnom precizno (vidi sliku 2.10 lijevo), no ukoliko na slici imamo oštih prelaza (poput zvijezda na crnoj pozadini noćnog neba - vidi sliku 2.10 desno) tu dolazi do gubitka detalja i oštine. Uz to, u uvjetima slabog osvjetljenja može pojačati šum, osobito u tamnijim dijelovima slike. Takav gubitak detalja kod fotografiranja za obiteljski album u potpunosti je zanemariv, no ukoliko digitalni fotoaparat koristimo u znanstvene svrhe onda nam gubitak detalja značajno može otežati ili čak onemogućiti kvalitetno istraživanje. Zato je većina znanstvenih instrumenata (poput astronomske kamere) monokromatska (bez Bayerove matrice), a željeni filter se stavlja ispred kamere tako da cijeli senzor snima kroz isti filter.

³Ako se radi o običnom fotoaparatu vjerojatno ima ubačen i jedan dodatni filter ispred čipa kamere kojim se smanjuje utjecaj crvene boje i nevidljive infracrvene boje. Pripazite na to ako radite neku astronomsku analizu propusnosti filtera u fotoaparatu.



Slika 2.11: Propusnost Johnsonovog UBV sistema filtera. Slika preuzeta iz https://en.wikipedia.org/wiki/UBV_photometric_system.



Slika 2.12: Lijevo: Spektralna osjetljivost fotoaparata Canon 60D. Osjetljivost je kombinacija propusnosti Bayerove matrice (tj. Bayerovih RGB filtera na pikselima senzora) i osjetljivosti samog senzora. Slika preuzeta iz [8]. Desno: Tipične RGB krivulje osjetljivosti raznih digitalnih fotoaparata (plave, zelene, i crvene linije) u usporedbi sa standardnim V filterom (crna linija). Slika preuzeta iz [9]. Primjere osjetljivosti raznih tipova fotoaparata možete potražiti u [10].

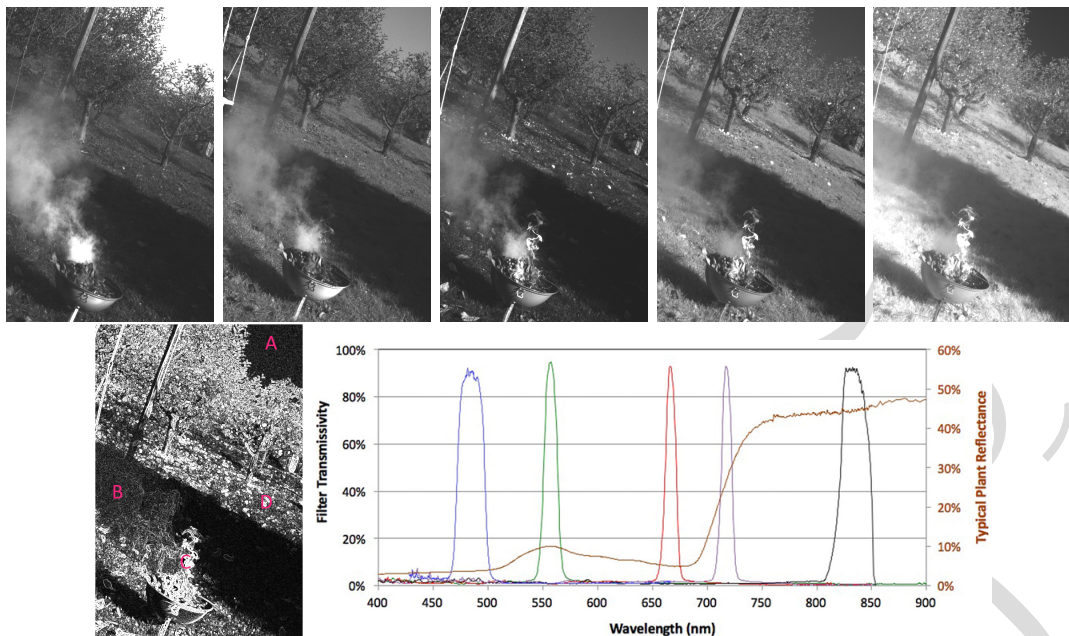
2.4.2 Astronomski filteri

Astronomске kamere nemaju ugrađene filtere, nego im je spektralni limit zadan samom osjetljivošću senzora. To znači veliki raspon boja - čitav vidljiv raspon boja (od oko 380 nm do oko 740 nm), pa do bliskog (oku nevidljivog) infracrvenog (do oko 1 000 nm), ali i ponešto nevidljivog UV (kraćeg od 380 nm). Ako je cilj detekcija objekata, poput asteroida, koji mogu imati jako slabi sjaj, onda je korisno imati tako veliki raspon osjetljivosti ne bi li se skupilo što više svjetla. Ali ako nas zanimaju svojstva objekata koje promatramo, onda su nam potrebni filteri kojima selektiramo neki dio spektra.

Filtera ima raznih, što zbog toga što im je svrha izdvojiti različite dijelove spektra povezanih s nekim fizikalnim svojstvima nebeskih objekata, što zbog razlika u materijalima od kojih su napravljeni (nekonzistentnost između različitih proizvođača), što zbog povijesnih razloga jer se udomaćilo koristiti neki sustav filtera. Tako je najpoznatiji i najpopularniji Johnson-Morganov (skraćeno samo Johnsonov) UVB sustav filtera koji je bio prvi standardizirani filter (uveden ranih 1950-ih). Pokriva UV boje kroz U filter, plavo kroz B, i "vidljiv" dio kroz V (zapravo zeleno-žute boje). Magnituda zvijezda u tom V filteru je ono što je uobičajeno navoditi kao magnitudu zvijezde (recimo u programu Stellarium su magnituda zvijezda zapravo V magnituda). Slika 2.11 prikazuje propusnost UVB filtera po valnim dužinama spektra. Kasnije su dodani i filteri R (crvene boje) i I (nevidljive infracrvene boje od oko 750 nm do 900 nm ili 1100 nm), ali tu je već konfuzija jer postoje dvije varijante RI filtera.

U ovom uvodnom opisu nećemo ulaziti dublje u tematiku filtera⁴, ali spomenimo još kako izgledaju RGB filteri iz Bayerove matrice na sensorima fotoaparata (vidi prethodno poglavlje 2.4.1). Slika 2.12 prikazuje propusnost takvih RGB filtera i odmah možete primijetiti raznolikost krivulja. Problem je u tome da različiti tipovi fotoaparata imaju različita svojstva sloja Bayerove matrice koji se stavlja na piksele senzora. To znači da fotometrija na slikama istih zvijezda, ali slikana različitim fotoaparatima, može rezultirati razlikama u izmjerenim magnitudama. Međutim, zanimljiva je usporedba G filtera sa standardnim V filterom. Postoji poprilično preklapanje. U prvoj praktičnoj vježbi fotometrije istražujemo upravo to svojstvo sličnosti magnituda kroz G filter fotoaparata i V magnituda iz

⁴Popis raznih filtera u astronomiji i podaci za njihove krivulje propusnosti: <http://svo2.cab.inta-csic.es/svo/theory/fps3/index.php>



Slika 2.13: Primjeri slika dobivenih kamerom Micasense RedEdge koja se sastoji od 5 manjih kamera, svaka sa svojim zasebnim filterom. Propusnost pojedinih filtera prikazana je na grafikonu u donjem desnom kutu. Slike u gornjem redu su poredane istim redoslijedom kao i filteri na grafikonu. Donja lijeva slika prikazuje slovima četiri područja, označena s A, B, C i D, koja su opisana u tekstu poglavlja 2.4.3. Filteri imaju propusnost centriranu na valne dužine (s lijeva na desno) 475 nm (plavi), 560 nm (zeleni), 668 nm (crveni), 717 nm (crveni rub nevidljivosti), 840 nm (nevidljivi infracrveni). Izvor podataka za grafikon: <http://www.micasense.com>.

literature (vidi poglavlje ??).

2.4.3 Povezanost filtera i fizikalnih procesa

Pažljivim biranjem filtera astronomi mogu poput detektiva raspetljati tajne koje skrivaju svemirski objekti. Razlog leži u tome što interakcije svjetla i tvari ovise o frekvenciji (tj. energiji), odnosno valnoj dužini, svjetla. Rezultat tih interakcija mi gledamo teleskopom i mjerimo kamerom, ali pomoću filtera selektiramo različite aspekte tih interakcija. Iz poznate fizike tih interakcija zatim istražujemo kako naša mjerenja uklopiti u razne moguće scenarije kojima bi objasnili izmjerene vrijednosti.

Kao primjer pogledajte pojedinačne slike prikazane na slici 2.13. Načinjene su posebnom kamerom za daljinska istraživanja svojstava biljaka u poljoprivredi. Radi se o kameri koja zapravo ima 5 malih kamera od kojih svaka na sebi ima drugačiji filter. Grafikon prikazuje koje valne dužine su pokrivene sa svakom pojedinačnom malom kamerom. Uočite sada kako se ponašaju slijedeća područja na slikama:

- Područje A: nebo. Primijetite da nebo postaje tamnije na slikama kako se povećava njihova valna dužina. Najsajnije je u plavom području, zbog čega i doživljavamo nebo kao plavo. Proces koji stvara ovakvu ovisnost svjetla neba o valnoj dužini je Rayleighovo raspršenje sunčevog svjetla na molekulama zraka. Isti proces odvija se i u svemiru kada se svjetlo zvijezda raspršuje na plinu i vrlo sitnoj prašini u prostoru

između zvijezda. Primjer toga je plavičasta maglica u koju su uronjene zvijezde u skupu Plejade.

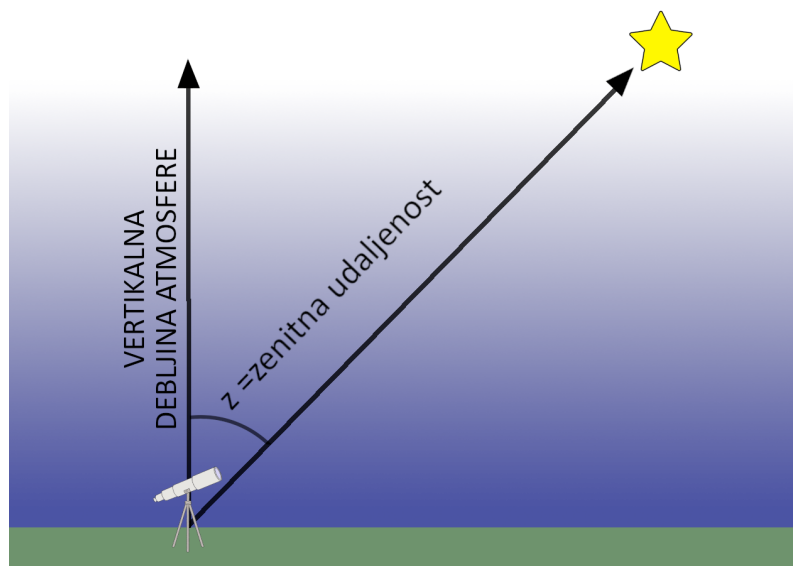
- Područje B: dim. Dim u svakodnevnom životu su čestice veličine od oko $1 \mu\text{m}$. Svjetlo valnih dužina manjih od veličine prašine biti će vrlo efikasno apsorbirano i raspršeno. Zbog toga je dim na "plavoj" slici gotovo neproziran. Ako pak je valna dužina slična ili veća od veličine čestica, efikasnost apsorpcije i raspršenja jako opada. Stoga je dim na "infracrvenoj" slici gotovo nevidljiv. To je razlog zašto su infracrvene kamere korisne vatrogascima koji se moraju probiti kroz gusti dim. A isto to svojstvo astronomi rado koriste u izučavanju svemirske prašine oko zvijezda ili u međuzvjezdanom prostoru. Slikama kroz različite filtere se tako može odrediti i veličina svemirske prašine.
- Područje C: vatra. Kada zapalite roštilj, vatra ima temperaturu od oko $1\ 200$ - $1\ 500^\circ\text{C}$ (oko $1\ 500$ - $1\ 800\ \text{K}$). Na tim temperaturama plin u plamenu stvara svjetlo, ali primijetite jaku ovisnost intenziteta tog svjetla na slikama različitih valnih dužina. Na "plavoj" slici plamen je nevidljiv jer gotovo da uopće ne emitira svjetlo tih valnih dužina. S druge strane, na "infracrvenoj" slici plamen ima intenzivan sjaj. To je još jedan razlog zašto su infracrvene kamere korisne vatrogascima. Zvijezde su puno toplije od tog plamena, ali svaka temperatura ima svoju ovisnost o bojama svjetla. Sunce, recimo, ima površinsku temperaturu od oko $5\ 800\ \text{K}$ i sjaji najintenzivnije u vidljivim bojama, dok Sirius ima temperaturu od oko $10\ 000\ \text{K}$ i najsajjniji je u nevidljivom ultraljubičastom području boja. U poglavlju 2.1.4 opisali smo kako fotometrijom u dvije različite boje možemo izračunati tzv. indeks boje, koji je direktno povezan s temperaturom zvijezde.
- Područje D: trava. Korisnost ovakvih multispektralnih kamera u poljoprivredi leži u svojstvu klorofila u biljkama da sjaje intenzivno u infracrvenim valnim dužinama od oko 750 - $1000\ \text{nm}$. Kada su biljke pod stresom (suša, bolest, itd.) opada im taj sjaj. Razne molekule i atomi u svemiru također imaju neka svoja specifična područja valnih dužina na kojima intenzivno emitiraju ili apsorbiraju svjetlo. Koristeći filtere koji propuštaju svjetlo specifično za određene molekule ili atome, astronomi mogu mapirati njihovu raspodjelu u maglicama i otkrivati što se u maglici dešava.

Ovo je samo dio stvari koje vam se otkrivaju jednom kada uronite u astrofiziku fotometrije. U ovom priručniku pokušat ćemo vam olakšati prve korake u fotometriju, pa ćemo se stoga držati jednostavnih primjera i ne ulaziti pređuboko u teoriju koja objašnjava pojedine rezultate fotometrijskih vježbi u poglavlju 5.

2.5 Utjecaj atmosfere na mjerenja sjaja zvijezda

U poglavlju 2.3 opisali smo već probleme koje stvara atmosfera kod fotometrije na način da deformira sliku zvijezde. Ta vrsta problema stvara oscilacije u izmjerenoj magnitudi, tj. sjaj zvijezde "titra" zbog turbulencija u atmosferi. Ali atmosfera uz to i apsorbira i raspršuje svjetlo koje putuje kroz nju, što znači da sjaj zvijezde koji mjerimo na površini Zemlje nije isti kao i sjaj koji bi vidjeli iz orbite, tj. izvan atmosfere.

Opadanje sjaja zvijezde zbog apsorpcije i raspršenja svjetla u zemljinoj atmosferi zovemo *atmosferska ekstinkcija* i predstavlja težak problem ako želimo precizna mjerenja. Atmosfera nema svugdje jednaku debljinu, a debljina ovisi i o kutu gledanja (vidi sliku



Slika 2.14: Atmosfera apsorbira i raspršuje svjetlo koje prolazi kroz nju. Zato nije isto ako promatramo zvijezdu direktno u zenitu ili pod nekim kutom z od zenita.

z	0°	5°	10°	15°	20°	25°	30°	35°
$X(z)$	1.00	1.00	1.02	1.04	1.06	1.10	1.16	1.22
z	40°	45°	50°	55°	60°	65°	70°	
$X(z)$	1.31	1.41	1.56	1.74	2.00	2.37	2.92	

Tablica 2.2: Približne vrijednosti debljine atmosfere X za različite kutove zenitne udaljenosti z sukladno jednadžbi 2.16

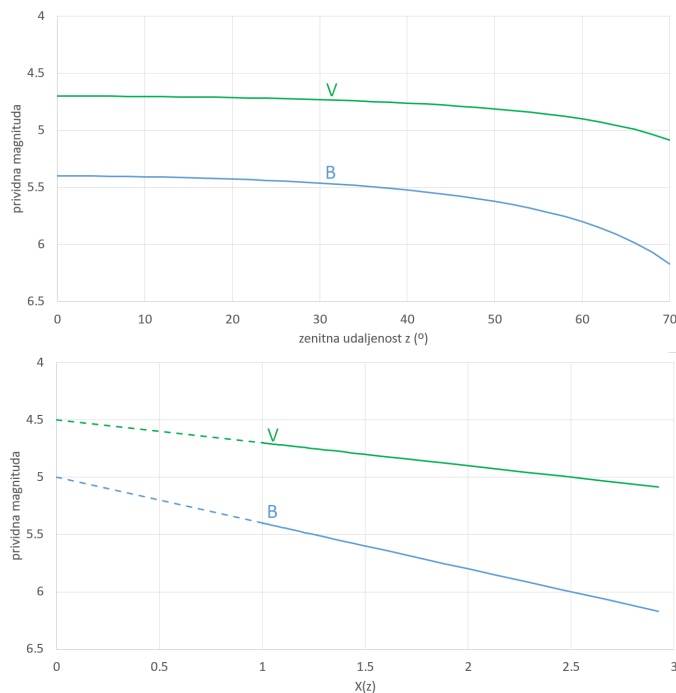
2.14). Uz to, gustoća i sastav atmosfere opada s visinom što komplicira izračun njezinog utjecaja na proizvoljni kut gledanja. Nadmorska visina i vremenski uvjeti, posebice količina vlage u zraku, mogu isto dramatično utjecati na opadanje sjaja zvijezde.

Najlakši način da se ovaj problem zaobiđe je da pronađemo neku standardnu zvijezdu u neposrednoj blizini naše zvijezde koju mjerimo⁵. Tada izmjerimo magnitudu standardne zvijezde i usporedimo s vrijednosti iz literature⁶. Tu razliku u magnitudi onda primijenimo i na našu zvijezdu i tako korigiramo utjecaj atmosfere.

Na žalost, odmah uočavamo problem: naša mjerenja moraju koristiti isti sustav filtera i osjetljivosti kamere kao i mjerenja iz literature. To nije često slučaj, pogotovo ako ste tek krenuli u fotometriju i koristite samo fotoaparatus. Iduće što možete napraviti je da zabilježite izmjerene magnitudo standardnih zvijezda i vaših zvijezda koje proučavate, te koji je bio njihov položaj na nebu. To je onda koristan podatak ako recimo pratite varijabilnost zvijezda jer tada samo morate korigirati magnitudu za vrijednost kojom držite standardnu zvijezdu uvijek istog sjaja. A i netko tko bolje razumije osjetljivost vašeg fotoaparatusa može iskoristiti te podatke da napravi potrebnu korekciju.

⁵Najlakše ih je pronaći pomoću AAVSO Star Plotter: <https://apps.aavso.org/vsp/>

⁶Još bolje ako imamo nekoliko zvijezda pa izračunamo srednju vrijednost razlika naših magnituda i onih iz literature.



Slika 2.15: Teoretski primjer promjene prividne magnituda zbog utjecaja atmosferske ekstinkcije po jednadžbi 2.15. Gornji graf prikazuje ovisnost o zenitnoj udaljenosti, a donji o debljini atmosfere (eng. air mass) uz aproksimaciju iz jednadžbe 2.16. Ovisnost za B magnitudu je $m_0=5.0$ i $k=0.4$, a za V magnitudu $m_0=4.5$ i $k=0.2$.

Jedino što dalje preostaje je raditi korekciju matematički pomoću formule

$$m = m_0 + k X(z) \quad (2.15)$$

gdje je m izmjerena magnituda, m_0 je magnituda prije ulaska svjetla u atmosferu, k je koeficijent atmosferske ekstinkcije, a X je debljina zemljine atmosfere (eng. air mass) gdje je vrijednost $X=1$ kada gledamo točno u zenit. X očito ovisi o kutu z između zenita i smjera naše zvijezde kojeg zovemo *zenitna udaljenost* (vidi sliku 2.14).

Ako smo izmjerili m i znamo vrijednosti k i $X(z)$, tada možemo izračunati korigiranu magnitudu m_0 . Ali kako saznati te vrijednosti? Na razini preciznosti fotometrije koju ciljamo u ovom priručniku možemo koristiti najjednostavniju aproksimaciju

$$X(z) = \frac{1}{\cos z} \quad (2.16)$$

(upoznajte se s funkcijom kosinusa ako planirate koristiti ovu formulu), uz dodatno pravilo da radimo mjerenja što bliže zenitu, te svakako izbjeći mjerenja niže od 30° iznad horizonta (tj. za $z > 60^\circ$). U tablici 2.2 možete vidjeti neke vrijednosti za $X(z)$ koristeći ovu formulu.

Daleko veći problem je koeficijent ekstinkcije k jer on ovisi o trenutnom stanju atmosfere i o filteru kojeg koristimo. Efekt atmosfere je izraženiji za kraće valne dužine. Na primjer, k će biti veći za B filter nego za V filter. Jedini način da odredimo k je da tijekom noći mjerimo magnitudu standardne zvijezde koja će proći blizu zenitu i onda kroz mjerenja provući pravac sukladno jednadžbi 2.15, gdje će m_0 i k biti nepoznati parametri pravca. Na slici 2.15 prikazan je primjer kako bi takva ovisnost izmjerene prividne magnitude ovisila o zenitnoj udaljenosti i debljini atmosfere.

2.6 Uvod u teoriju pogreške mjerenja

Ne postoji savršeno točno mjerenje jer mjerenja uvijek dolaze s nekom pogreškom. U znanosti je iznimno važno komunicirati kolika je ta pogreška mjerenja, ali to nije uvijek lako odrediti jer izvori pogrešaka su različiti i često skriveni od našeg pogleda. Stoga je kod zahtjevnijih metoda mjerenja i/ili kompleksnijih mjernih instrumenata potrebno pravo znanstveno istraživanje ne bi li se razotkrili svi izvori pogrešaka i razvio matematički opis kojim se te pogreške mogu izračunati u praksi.

Fotometrija je upravo takva disciplina koja je i metodički i instrumentalno zahtjevna za pravilno tretiranje pogreške mjerenja. To međutim ne znači da nemamo načina kako se nositi s time na nekom približnom nivou koji je dovoljno dobar za shvatiti koja mjerenja su pouzdanija od drugih i koliko. Za početak istaknuti ćemo glavno pravilo kojim se morate voditi:

Čak i odokativna procjena pogreške bolja je od rezultata kojem niste pridružili nikakvu pogrešku.

Recimo, ako koristite ravnalo iz svoje pernice i izmjerite da je nešto široko 11 mm, kolika je pogreška mjerenja? Možda ste čuli za savjet da ponavljate mjerenja pa izračunate srednju vrijednost. Međutim, vama je rezultat svaki puta 11 mm. Je li onda pogreška 0 mm? Naravno da nije. Pogreška je u ovom slučaju određena time koliko sitne detalje možete pouzdano izmjeriti. Odokativno možete procijeniti da vjerojatno ne griješite više od ± 1 mm, jer to je debljina crtice od 1 mm na ravnalu.

2.6.1 Tipovi pogrešaka

Pogreške se može podijeliti u tri skupine po načine kako nastaju:

- **Grube pogreške** (eng. gross errors): Realnost života je da nam se ponekad desi propust i poneko mjerenje krivo pročitamo ili krivo zapišemo ili nepažljivo odradimo. Tako izmjerena vrijednost može se drastično razlikovati od ostalih koje smo napravili. A možda se i desilo u tom trenutku nešto neočekivano kod tog mjerenja i izbacilo ga iz redovnih vrijednosti. Recimo, kod fotometrije se može desiti da nam zvijezda sjedi na pokvarenom pikselu ili je na tom mjestu udarila kozmička zraka u senzor. To je razlog zašto se kod precizne fotometrije koristi više od jedne slike istog dijela neba, ako i pažljivo prati ispravnosti svih piksela. Jer ponekad nije do grube pogreške nego se nešto čudno desilo sa zvijezdom, ali moramo biti u to uvjereni budući da je praksa grube pogreške maknuti iz daljnje analize.
- **Slučajne pogreške** (eng. random errors): Uobičajeno je imati potpuno slučajne i nepredvidljive promjene u eksperimentalnim uvjetima, što dovodi do neprestanih slučajnih promjena u rezultatima mjerenja. Kod fotometrije znamo da nam atmosfera neprestano stvara promjene u sjaju zvijezde, o čemu smo već ranije govorili u poglavlju 2.3. Ali i u samoj kameri neprestano dolazi do fluktuacija u osjetljivosti, kao i slučajnih emisija elektrona u pikselima senzora (tzv. termalni elektroni) koji

se onda pogrešno broje kao doprinos od apsorbiranog svjetla. Ako je neki proces sasvim slučajan onda ga se može matematički opisati i pretvoriti u procjenu pogreške. Višestruko ponavljanje mjerenja služi upravo tome da se odredi raspon takvih slučajnih pogrešaka.

- **Sistemske pogreške** (eng. systematic errors): Ovaj tip pogrešaka sustavno mijenja rezultat. Možemo ih lakše razumjeti ako ih podijelimo u podskupine po tome gdje nastaju:
 - Okolišne pogreške: Vanjski okolišni utjecaji mogu stvoriti uvjete u kojima dolazi do pomaka u mjerenim vrijednostima. Recimo, ako je došlo do osjetne promjene temperature, a mi smo prikupili podatke za korekciju pozadinskog šuma na staroj temperaturi. Atmosferska ekstinkcija koju opisujemo u poglavlju 2.5 također je taj tip pogreške.
 - Opažачke pogreške: Ponekad se desi da sustavno očitavamo krive vrijednosti. Recimo, zabunimo se koji filter je u upotrebi kod fotometrije.
 - Instrumentalne pogreške: U situacijama kada nam instrument kojim mjerimo nije ispravan ili ga je potrebno redovito podešavati, pojavljivati će se sustavna pogreška u očitavanju mjerenja. Recimo kada interni sat u kameri kasni i vremena na slikama su pogrešna.
- Sistemske pogreške su najčešće podmukle i teško dokučive, ali ako ih uspijemo shvatiti tada se često mogu matematički ispraviti.

2.6.2 Izračun pogreške višestrukih mjerenja

Budući da se grube pogreške lako uočavaju, a sistemske teško, u praksi se prvenstveno fokusiramo na slučajne pogreške. Kako bi procijenili kolika su ta slučajna odstupanja, uobičajeno je ponavljati mjerenja i izračunati koliki je prosjek i pripadna pogreška.

Recimo da imamo N mjerenja, gdje pojedinačna mjerenja obilježimo kao $x_1, x_2, x_3, \dots, x_N$. Najbolju procjenu točne vrijednosti dobijemo tako da uzmemo srednju vrijednost (vidi također poglavlje 2.1.5 i jednadžbu 2.14)

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N x_n \quad (2.17)$$

Pritom obratite pažnju ako neka vrijednost mjerenja jako odskoče jer možda se radi o gruboj pogrešci koju je bolje izbaciti iz izračuna (ali ako pišete neki stručni rad ili radnju za natjecanja, i niste otkrili razlog iza grube pogreške, onda takve grube pogreške spomenite i navedite zašto smatrate da se radi o grubim pogreškama!).

Pogrešku mjerenja označit ćemo Δx i ako baratamo s malo mjerenja (recimo manje od 5), onda samo izračunamo najveće odstupanje od srednje vrijednosti⁷. Ako imamo nešto više mjerenja, tada pogrešku računamo kao

$$\Delta x = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N (x_n - \bar{x})^2}{N(N-1)}} \quad (2.18)$$

⁷Na primjer, ako su mjerenja bila 4,5,1,6, onda je $\bar{x} = 4$, najveće odstupanje je -3, pa je rezultat 4 ± 3 .

	A	B	C	D	E	F
	Redni broj					
1	mjerenja	mjerenje				
2	1	55	Srednja vrijednost:			
3	2	39	46.8571 =AVERAGE(B2:B8)			
4	3	41				
5	4	48	Greška mjerenja:			
6	5	51	2.12052 =STDEV.S(B2:B8)/SQRT(7)			
7	6	45				
8	7	49				
9						

Slika 2.16: Primjer izračuna pogreške mjerenja koristeći Excel. U ovom primjeru radi se o 7 mjerenja. Naredba AVERAGE računa srednju vrijednost, a STDEV.S je tzv. standardna devijacija (ili standardno odstupanje) koje je potrebno podijeliti s korijenom broja mjerenja, gdje je $\text{SQRT}(7)=\sqrt{7}$. Pripazite na zaokruživanje decimala: konačni rezultat je 47 ± 2 .

To se naziva *standardna pogreška aritmetičke sredine*⁸ (eng. standard error on the mean).

Konačni rezultat mjerenja prezentiramo kao $\bar{x} \pm \Delta x$. Kako bi si olakšali ovaj izračun možete koristiti naredbe u Excelu koje to automatski izračunaju (vidi sliku 2.16).

2.6.3 Izračun pogreške pogrešaka mjerenja

Primijetite da u prethodnom slučaju u poglavlju 2.6.2 pojedinačna mjerenja nisu imala pridruženu pogrešku mjerenja. A u fotometriji ćete se naći upravo u situaciji gdje svako mjerenje sjaja zvijezde F_n ima svoju fotometrijsku pogrešku ΔF_n . Ako na taj način ponavljate mjerenja sjaja zvijezde, i želite sada izračunati prosječni sjaj \bar{F} i pripadnu pogrešku, koristite slijedeće jednadžbe:

$$\bar{F} = \frac{\sum_{n=1}^N \frac{F_n}{(\Delta F_n)^2}}{\sum_{n=1}^N \frac{1}{(\Delta F_n)^2}} \quad \Delta F = \sqrt{\frac{1}{\sum_{n=1}^N \frac{1}{(\Delta F_n)^2}}} \quad (2.19)$$

Konačni rezultat mjerenja opet prezentiramo kao $\bar{F} \pm \Delta F$, a u idućem poglavlju 2.6.4 je uputa kako to pretvoriti u magnitudu s pripadnom pogreškom. Ovaj rezultat iz jednadžbi 2.19 naziva se još i težinska ili ponderirana aritmetička sredina (eng. weighted mean).

Za lakše razumijevanje, pogledajmo jedan primjer. Recimo da imamo tri mjerenja sjaja zvijezde: 100 ± 20 , 90 ± 25 i 110 ± 30 . Kombinirani ukupni rezultat je:

$$\bar{F} = \frac{\frac{100}{20^2} + \frac{90}{25^2} + \frac{110}{30^2}}{\frac{1}{20^2} + \frac{1}{25^2} + \frac{1}{30^2}} = 99 \quad \Delta F = \sqrt{\frac{1}{\frac{1}{20^2} + \frac{1}{25^2} + \frac{1}{30^2}}} = 14$$

2.6.4 Posredna mjerenja (propagacija pogreške)

Često nas zapravo zanima neka veličina kojoj su mjerenja samo ulazni podatak. Recimo, kod fotometrije su to magnituda ili pak indeks boje kojima je kao ulaz mjerenje sjaja

⁸Pritom pogreška svakog pojedinačnog mjerenja x_n iznosi $\sqrt{N} \cdot \Delta x$.

piksela na slici. U takvim situacijama pogrešku konačne veličine potrebno je ispravno propagirati.

Magnituda je definirana kao logaritam izmjerenog sjaja zvijezde (vidi jednadžbu 2.10) $m = -2.5 \log F$. Ako je sjaj izmjeren kao $F = \bar{F} \pm \Delta F$, tada je jedan način propagiranja pogreške izračun magnitude za $\bar{F} + \Delta F$ i za $\bar{F} - \Delta F$ u odnosu na srednju magnitudu \bar{m} :

$$\begin{aligned}\bar{m} &= -2.5 \log(\bar{F}) \\ \Delta m^+ &= -2.5 \log(\bar{F} - \Delta F) - \bar{m} \\ \Delta m^- &= \bar{m} + 2.5 \log(\bar{F} + \Delta F) \\ m &= \bar{m} \begin{matrix} +\Delta m^+ \\ -\Delta m^- \end{matrix} \end{aligned} \quad (2.20)$$

Ovaj čudan zapis pogreške dolazi od toga što nije nužno zadovoljeno da su ta dva odstupanja Δm^+ i Δm^- jednaka. Na primjer, ako je $\bar{F} = 100$ i $\Delta F = 30$, onda je $\bar{m} = -5.0$, $\Delta m^+ = 0.4$ i $\Delta m^- = 0.3$, pa rezultat pišemo⁹ kao $m = -5.0 \begin{matrix} +0.4 \\ -0.3 \end{matrix}$.

Kod indeksa boje imamo dodanu komplikaciju jer rezultat ovisi o dva različita mjerenja magnitude: $(B - V) = m_B - m_V$ (vidi jednadžbu 2.13). Ako magnitude imaju svoje pogreške Δm_B i Δm_V , tada pogreška indeksa boje Δ_{B-V} iznosi

$$\Delta_{B-V} = \sqrt{(\Delta m_B)^2 + (\Delta m_V)^2} \quad (2.21)$$

Možda ćete naići i na problem propagacije pogreške kod produkta $z = x \cdot y$ ili omjera $z = x/y$ izmjerenih vrijednosti. Pogreška rezultata je tada

$$\Delta z = z \cdot \sqrt{\left(\frac{\Delta x}{x}\right)^2 + \left(\frac{\Delta y}{y}\right)^2} \quad (2.22)$$

2.6.5 Fotometrijska pogreška mjerenja sjaja zvijezde

Fotometrija ima kompliciranu strukturu pogreške mjerenja, zbog čega u ovom uvodu ne možemo ulaziti preduboko u detalje. Isto tako bi za pravilan izračun te pogreške trebalo izmjeriti i osjetljivost senzora kamere, što nadilazi naš plan uvoda u fotometriju. Analiza pogreške mjerenja vrlo je važan dio astronomije i često nezaobilazan dio u znanstvenim radovima. Stoga ćemo ovdje primijeniti pojednostavljenu metodu, ali ako vas zanima ući dublje u problematiku izvora pogreške i kako se s time nositi možete krenuti od [1, 7]. Ako radite s fotoaparatom posebno se pozabavite problematikom utjecaja ISO vrijednosti [5], za koju ćete već u prvoj vježbi fotometrije u poglavlju ?? vidjeti kako ima velik utjecaj na rezultat.

Osnovna svih analiza slučajnih pogrešaka mjerenja temelji se na izračunu omjera signala i šuma (eng. signal-to-noise ratio, S/N). Cilj nam je uvijek postići što veću S/N vrijednost jer time smo sigurniji u točnost izmjerene vrijednosti signala. Stoga se bavimo pitanjem što je sve izvor šuma, tj. što sve utječe na pojavu slučajne pogreške. Budući da fotometrijom prikupljamo svjetlo koje dolazi od nebeskog objekta (zvijezda, galaksija, itd.), prvi izvor pogreške su slučajnosti u dolasku fotona svjetla do naše kamere. Iako je

⁹Primjetite pravilo zaokruživanja pogreške jer izračun daje $\Delta m^+ = 0.3872\dots$ i $\Delta m^- = 0.2848\dots$

u prosjeku to neki stalni broj fotona u dužoj jedinici vremena, vremenski razmak između njihovih pojedinačnih dolazaka je slučajan¹⁰. Ako izmjerimo da je sa zvijezde stiglo F fotona, onda je zbog te slučajnosti statistička pogreška

$$\Delta F = \sqrt{F} \quad (2.23)$$

Ovdje je važno primijetiti da govorimo o broju *fotona*, a ne vrijednosti piksela koju ste očitali na slici u vašem računalu. Da bi pikselu bila pridružena neka brojčana vrijednost, prvo je određeni broj fotona morao pobuditi elektron u pikselu senzora, a zatim je elektronika kamere morala ukupni broj pobuđenih elektrona pretvoriti u neku brojku koja se zapisuje u memoriju vaše kamere (ili računala). Kako bi pojednostavili izračun pogreške, izbjegnute ćemo analizu svih tih koraka i zadovoljiti se aproksimacijom da je F broj koji očitavate iz piksela vaše slike u računalu.

Jednadžba 2.23 nam sugerira važan trend kod analize pogreške. Primijetite da što je objekt sjajniji, time je F veći, a šum (tj. pogreška) relativno manji (npr. za $F=100$ je $\Delta F=10$ što je 10% od F , ali za $F=1\,000\,000$ je $\Delta F=1\,000$ što je samo 0.1% od F). Na žalost, u astronomiji se bavimo mjerenjem sićušnih točkica svjetla na nebu i malene vrijednosti F su nam sastavni dio života.

Drugi važan trend vidljiv je ako sjaj zapišemo kao neki konstantan broj fotona u sekundi f pomnoženo s vremenom ekspozicije t (vrijeme tijekom kojeg prikupljamo svjetlo): $F = f \cdot t$. Primijetite da sjaj raste linearno s dužinom ekspozicije ($F \sim t$), ali pogreška raste *sporije* od toga ($\Delta F \sim \sqrt{t}$). Zbog toga nam greška opada s dužom ekspozicijom.

Na našu žalost, priča o fotometrijskim pogreškama tu tek počinje. Pogledajte sada sliku 2.17. Pikseli na slikama neba uvijek osim svjetla svemirskih objekata imaju i pozadinski šum. Znači, čak i na mjestima gdje bi trebala vrijednost piksela biti nula, nikada neće biti nula. Razlog tome je višestruk: pikseli su izloženi svjetlu neba, poneki elektroni spontano budu pobuđeni bez obzira na upadno svjetlo, a i sama elektronika namjerno pridoda elektrone prilikom čitanja vrijednosti piksela sa senzora (vidi poglavlje 4.2).

Kako bi si olakšali uvodne korake u fotometriju, prvo ćemo raditi na način da uopće ne uvodimo korekcije slike kojima bi adresirali sve te probleme u izračunu pogreške. Umjesto toga, jednostavno ćemo izmjeriti vrijednost sjaja piksela na mjestima gdje nema zvijezda (kako se to radi opisujemo u poglavlju 4.1, pa će ovi koraci biti jasniji kada krenete raditi svoju prvu fotometriju). Za to ćemo koristiti n_0 piksela, a prosječna vrijednost (još bolje medijan) će im biti F_0 . Zvijezda pak pokriva površinu od n_* piksela koji zbrojeno daju vrijednost F .

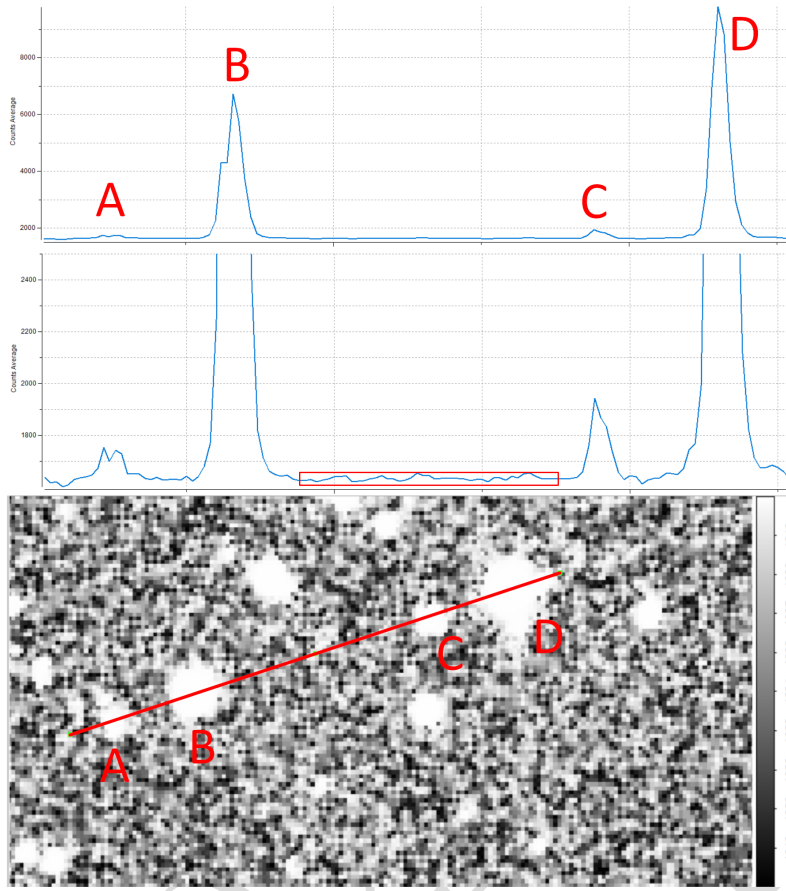
Izmjereni sjaj zvijezde F_* u takvoj jednostavnoj fotometriji je

$$F_* = F - n_* F_0 \quad (2.24)$$

a pripadna pogreška

$$\Delta F_* = \sqrt{F_* + n_* \left(1 + \frac{n_*}{n_0}\right) F_0} \quad (2.25)$$

¹⁰Za one koji žele znati više: matematički se to opisuje Poissonovom raspodjelom.



Slika 2.17: Primjer sjaja piksela kod zvijezda vrlo različitog sjaja. Gornja dva grafa prate vrijednosti piksela uzduž linije prikazane na donjoj slici. Linija prelazi preko četiri zvijezde, označene A, B, C i D. Na najgornjem grafikonu vidi se kako su zvijezde B i D puno sjajnije od A i C. Isto tako, na tom grafikonu sjaj neba izgleda kao ravna crta. Ali na drugom grafikonu je y-os podešena da prikazuje raspon vrijednosti bliže sjaju neba. Šada se vidi da su A i C osjetno sjajnije od sjaja neba, ali i da neba nema svugdje isti sjaj nego je podložno slučajnim varijacijama u mjerenju (područje istaknuto pravokutnikom).

Primijetite da je za smanjenje pogreške preporučljivo koristiti puno više piksela za određivanje sjaja neba nego li piksela za mjerenje sjaja zvijezde, kako bi dobili $n_*/n_0 \ll 1$. Također, ako je zvijezda jako sjajna onda pogreška teži prijašnjem rješenju $\Delta F_* = \sqrt{F_*}$.

Ukoliko se upustimo u osnovne korake korekcije slike (vidi poglavlje 4.3), tada ulazimo i u komponente izvora šuma. Pogreška u tom slučaju postaje

$$\Delta F_* = \sqrt{F_* + n_* \left(1 + \frac{n_*}{n_0}\right) (F_{sky} + F_{dark} + F_R^2)} \quad (2.26)$$

gdje su F_{sky} sjaj neba, F_{dark} sjaj tamnih slika (eng. dark frame, slike sa zatvorenim otvorom kamere), a F_R sjaj uzrokovan elektronikom kamere prilikom čitanja slike sa senzora. S detaljima ovih komponenti šuma baviti ćemo se u poglavljima o koracima fotometrije. I tu ćemo sada stati s daljnjim produbljivanjem teme fotometrijskog šuma.

Snimanje neba

Iako na Internetu možemo pronaći mnoštvo astronomskih slika neba vrhunske kvalitete, već obrađene i spremne za fotometriju, ništa ne može zamijeniti iskustvo vlastitog snimanja neba i učenja kroz praksu na vlastitim greškama.

Astronomsku fotometriju radimo na digitalnim snimkama noćnog neba. Što je snimka kvalitetnija, to je i fotometrija preciznija. Problemi leže u tome što postoje i razni izvori neželjenog šuma u signalu. Stoga se, osim tehnike snimanja samog neba, mogu odraditi i koraci prikupljanja posebnih vrsta slika kojima je za cilj ublažavanje utjecaja šuma na fotometrijsku pogrešku. Bez obzira na to, prvi koraci u snimanju neba za najjednostavniju fotometriju nisu teški i samo traže odlučnost da se upustite u ovu avanturu.

3.1 Prvi korak: snimanje fotoaparatom bez teleskopa i bez praćenja neba

Ukoliko radite s astro-kamerom, možete preskočiti ovo poglavlje i krenuti na fotometriju vaših FITS slika. Ako pak radite s fotoaparatom evo nekoliko ključnih uputa kako snimati noćno nebo pomoću objektivna na fotoaparatu (preporuka je koristiti objektiv do maksimalno 135 mm):

1. Ako koristite fotoaparat, poput DSLR kamera, onda morate na njemu aktivirati spremanje slike u sirovom formatu (npr., .CR2 za Canon, .NEF za Nikon). Nipošto u .JPG jer se tim formatom gube informacije o točnom sjaju piksela! Taj ćete sirovi format kasnije pretvoriti u FITS format. Ukoliko vam fotoaparat nudi i opciju rezolucije, odaberite maksimalan broj piksela, tj. maksimalnu veličinu slike.
2. Stavite način rada fotoaparata na ručno podešavanje (oznaka „M“, vidi sliku 3.1).
3. Stavite ISO za početak na 400 do 800. Kasnije možete varirati ISO i promatrati kako utječe na sliku. Veliki ISO će lako prikazati i sam sjaj neba, ali pritom raste i šum stvoren u samoj kameri, što može stvoriti problem kod fotometrije. A najveći problem velikog ISO-a je saturacija vrijednosti piksela sjajnih zvijezda, o čemu više govorimo u poglavlju 4.2. Konačni ISO biti će rezultat vašeg eksperimentiranja ne bi li se postigao kompromis između onog što želite vidjeti na slici i količine šuma i saturacije koje ste voljni tolerirati (vidi sliku 3.2).
4. Ekspozicija ovisi o objektivu kojeg koristite: broj 300 podijelite sa žarišnom duljinom objektivna i dobili ste maksimalnu vrijednost ekspozicije. Na primjer, objektiv od 50 mm omogućuje ekspozicije do 6 sekundi. Sve duže od toga izazvat će izdužene zvijezde zbog vrtnje neba. Možete se igrati različitim ekspozicijama i sami se uvjeriti što je najbolji odabir (vidi sliku 3.2).
5. Maksimalno otvorite blendu na objektivu, tj. postavite F-broj na minimalnu vrijednost (vidi sliku 3.2).
6. Isključite automatski fokus i stabilizaciju slike (vidi sliku 3.3).



Slika 3.1: Aktiviranje ručnog načina rada, prebacivanjem prekidača na oznaku "M".



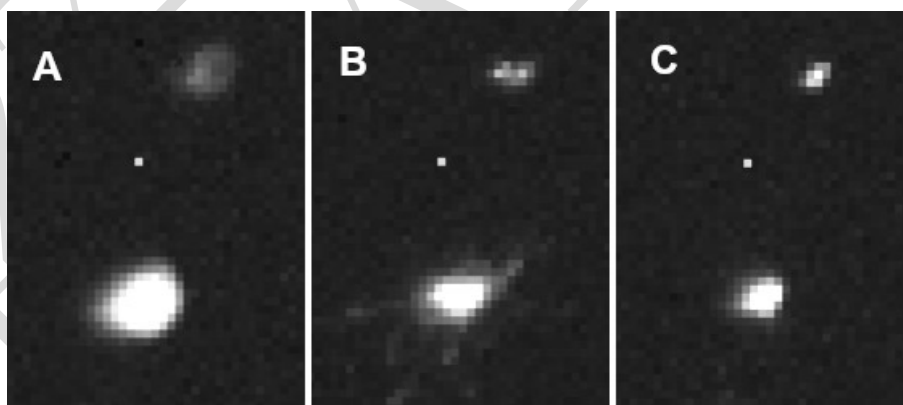
Slika 3.2: Izbornik fotoaparata, gdje se mogu pratiti vrijednosti ekspozicije, blende i ISO vrijednosti.



Slika 3.3: Isključivanje automatskog fokusa i stabilizacije slike ovisi o vrsti objektivu kojeg koristite. Za isključiti automatsko fokusiranje objektivu, prekidač s AF (auto fokus) prebacite na MF (manual fokus). Kod nekih objektivu oznake mogu biti samo A i M, a M opet znači "manual fokus". Stabilizaciju nemaju svi objektivu. Ako vaš objektiv ima stabilizaciju, prekidač stavite na OFF.



Slika 3.4: Za podešavanje fokusa koristite oznake za udaljenost koje se nalaze na objektivu. Prsten za fokus okrenite na beskonačno (slike lijevo), a zatim ga za vrlo sitan pomak okrenite u suprotnom smjeru (slike desno). Kod jeftinih objektivu postoji mogućnost da nisu upisane oznake za udaljenost. U tom slučaju kako bi prsten za fokus postavili na beskonačno, okrenite ga skroz ulijevo.



Slika 3.5: A: Slika nije u fokusu i zvijezde su previše razmrljane. B: Fotoaparat se tresao tijekom trajanja ekspozicije. C: Zvijezde su u fokusu (malo su izdužene jer nema praćenja vrtnje neba). Primijetite „vrući piksel“ na svim slikama – svijetli piksel koji dolazi zbog greške na kameri i predstavlja neželjeni šum kojeg se treba paziti kod fotometrije.

7. Podesite prsten objektiva za fokus na beskonačnost, i zatim ga za *vrlo sitan* pomak okrenite u suprotnom smjeru (vidi sliku 3.4).
8. U praksi vjerojatno vam zvijezde neće biti odmah u fokusu. Stoga na prvim probnim fotografijama pogledajte možete li laganim pomacima prstena fokusa dobiti da vam zvijezde budu još sitnije (manjeg promjera) na slici (vidi sliku 3.5).

Isprobavanje raznih kombinacija ISO vrijednosti i dužine ekspozicije je ključno za postizanje kvalitetne slike. Ako radite sa sjajnijim zvijezdama, trebati će vam i defokus (obratite pažnju na poglavlje 4.2) tako da zvijezda ima promjer od 8-10 piksela. Ako želite precizniju fotometriju, onda napravite nekoliko uzastopnih snimaka zvijezde i zatim usrednjite rezultate fotometrije. Stoga samo strpljivo i pažljivo, a najbolji uvod je da isprobate primjere u poglavlju 5. Vremenom ćete skupiti iskustva kako podesiti vašu kameru na optimalan način.

3.2 Prvi korak: snimanje fotoaparatom kroz teleskop

Ako koristite fotoaparat na teleskopu, uvjet je da imate i uključeno praćenje, te koristite slijedeće korake:

1. Stavite način rada fotoaparata na ručno podešavanje (oznaka „M“, vidi sliku 3.1).
2. Stavite ISO za početak na 400 do 800, i pratite upute kao i za objektiv (poglavljje 3.1).
3. Ekspozicija sada nema ograničenja zbog vrtnje neba. Ograničeni smo samo pozadinskim sjajem neba koji na slici postaje sve sjajniji kako ekspozicija raste.
4. Fokusiranje je identično kao kod objektiva (točka 8 u poglavlju 3.1), jedino što sada nemate prsten fokusa na objektivu nego koristite fokuser na teleskopu.

I ovdje će vam izazov biti ISO, dužina ekspozicije i defokus. Ali zbog praćenja možete probati se približiti cilju da vam je ISO što manji (ISO100), ekspozicija barem 15 sekundi, i defokus takav da zvijezda pokrije barem 8-10 piksela kako bi demosaik (debayer) proces bio uspješan (vidi poglavlje 4.2). Isto tako, preporučljivo je radi postizanja preciznije fotometrije napraviti nekoliko uzastopnih snimaka zvijezde tako da je malčice na drugačijem mjestu na svakoj slici, i onda usrednjiti rezultate fotometrije.

3.3 Konverzija RGB slike u FITS format

Ako koristite astronomsku kameru onda ovaj korak možete preskočiti jer će vam slika biti automatski pohranjena u FITS formatu. Ali fotoaparatom ste dobili slike u nekom njihovom sirovom formatu (npr., .CR2 za Canon, .NEF za Nikon), dok nama treba FITS format. Stoga treba napraviti konverziju iz sirovog u FITS format. Dodatni problem je što fotoaparat sadrži crvene, zelene i plave piksele (vidi poglavlje 2.4.1). To znači da sada kod konverzije u FITS format trebamo stvoriti tri FITS slike, za svaku boju zasebno, koristeći neki demosaik algoritam (vidi sliku 2.9). To se može napraviti raznim aplikacijama (oprez: morate biti sigurni da vam aplikacija nije „pametna“ pa je automatski poremetila vrijednosti piksela da slika bude ljepša).

Ovdje dajemo primjer kako to napraviti u besplatnoj aplikaciji ASTAP na najjednostavniji način, dok u poglavlju 4.3.2 opisujemo kako konvertirati pomoću aplikacije IRIS, a u poglavlju ?? kako pristupiti sirovim pikselima u Python-u. Nakon što savladate početne korake u fotometriji koristeći ASTAP, IRIS će biti bolji izbor za konverziju. U poglavlju ?? se zato bavimo i opisom kako se rezultat može razlikovati ovisno o metodi konverzije u FITS.

3.3.1 Konverzija pomoću aplikacije ASTAP

Ako ćete za fotometriju koristiti program SAOImageDS9 (vidi poglavlje 4.1.1), onda je ovo zgodan način kreiranja FITS slike koja će u sebi imati razdvojene RGB kanale, što će program DS9 prepoznati. U tu svrhu instalirajte besplatni program ASTAP: <http://www.hnsky.org/astap> (mi smo ovdje koristili verziju 2024.05.24). Koraci u programu su:

- Učitajte svoju sirovu sliku u program.
- Odaberite *Tools*→*De-mosaic Bayer matrix*.
- Zatim odaberite *File*→*Save as FITS file*.

Kreirana FITS slika imati će u sebi zapisanu svaku boju zasebno, što ćete primijetiti tek kada krenete u analizu te FITS slike. Budući da demozaik konverzija neće nužno biti zadovoljavajuće precizna, preporučljivo je napraviti nekoliko uzastopnih snimaka zvijezde tako da je malčice na drugačijem mjestu na svakoj slici. Isto tako je za demozaik bolje imati malo defokusiranu zvijezdu, da pokrije 8-10 piksela. Konačni rezultat je usrednjena vrijednost izmjenjenog sjaja iz pojedinih slika.

3.4 Upotreba astronomskih filtera

Filteri su izuzetno važan alat u astronomiji. Oni omogućuju izoliranje specifičnih valnih dužina svjetlosti, te time otkrivaju detalje koji bi inače bili izgubljeni u šumu neželjenog svjetla. Profesionalni astronomi koriste izuzetno široku paletu filtera kako bi mjerenjima otkrili astrofizička svojstva nekog objekata, dok astronomi amateri filtere koriste kod vizualnog promatranja ili snimanja nebeskih objekata. U poglavlju 2.4 opisali smo koja je važnost filtera u astronomiji, kako su već ugrađeni u fotoaparate, i kako mjerenja pomoću filtera povežemo s fizikalnim procesima u Svemiru.

Ovdje ćemo se osvrnuti na neke praktične elemente korištenja filtera u amaterskoj astronomiji, posebice ako ciljate na astrofotografiju, ali su vam upotrebljivi i ako želite raditi fotometriju. Glavni ciljevi kod korištenja filtera biti će vam smanjiti utjecaj svjetlosnog onečišćenja, poboljšati odnos signala i šuma, postići što veći kontrast i oštrinu, te što više naglasiti strukture na objektima koji se promatraju ili snimaju. Filteri dolaze u različitim veličinama, od 1.25" (31,7 mm) do 2" (50,8 mm), ili kao "unmounted" filteri (samo staklo bez okvira) za profesionalne kamere. Pojednostavljeno, filtere možemo svrstati u dvije kategorije. Prva su planetarni ili kolor filteri. Ovo je apsorpcijski tip filtera što znači da blokiraju svjetlo tako da ga apsorbiraju. Proizvođači u ponudi imaju cijeli niz boja, a ovisno o boji, ovi filteri ističu specifične značajke na planetima. Drugi tip su refleksijski,



Slika 3.6: Kotač sa filterima za astronomsku kameru (foto: Jasmin Dolamić)

a kao što ime sugerira, blokiraju svjetlo tako što reflektiraju neželjenu valnu dužinu. U tu kategoriju ulaze filteri za astrofotografiju, te za vizualno promatranje objekata dubokog svemira. Refleksijski se filteri mogu dodatno podijeliti u podkategorije:

- *Filteri za smanjenje svjetlosnog onečišćenja:* Radi se o filterima dizajniranim za blokiranje specifičnih valnih dužina svjetlosti koje emitiraju umjetni izvori svjetlosti, poput natrijevih i živinih lampi. Ovakvih je lampi sve manje jer ih mijenjaju LED lampe. Nažalost LED emitira u jako širokom spektru, pa ga je teže filtrirati. Popularni primjeri su UHC (Ultra High Contrast) i CLS (City Light Suppression) filteri.
- *Širokopojasni filteri (RGB i LRGB):* Ovi su filteri neizostavan dio svake monokromatske kamere. Svaki filter propušta spektar u određenoj valnoj dužini, a omogućuju stvaranje kolor fotografija kombinacijom crvene, zelene i plave svjetlosti.
- *Uskopojasni filteri:* NB (narrow band) filteri propuštaju samo vrlo uski raspon valnih dužina svjetlosti, što je idealno za snimanje emisijskih maglica i analizu kemijskog sastava objekta kojeg snimamo. Tipični predstavnici uskopojasnih filtera su H-alfa ($H\alpha$) koji propušta svjetlost vodika na 656.3 nm, često se koristi za crveno svjetlo u maglicama. O-III koji detektira dvostruko ionizirani kisik na 495.9 i 500.7 nm, vidljiv kao plavo-zelena boja u emisijskim maglicama, te S-II sa fokusom na sumpor na 671.6 nm. Kombinacija ovih filtera koristi se u astrofotografiji za stvaranje tzv. "Hubble palete".

Od navedenih se filtera za vizualno promatranje koriste filteri za smanjenje svjetlosnog onečišćenja i O-III filter, na kolor kamerama (fotoaparati ili RGB astro-kamera) koristi se također neka od opcija UHC ili CLS filtera, dok na monokromatskim kamerama (astro-kamerama) koristimo širokopojasne i uskopojasne filtere. U teoriji, moguće je i na kolor kamerama koristiti uskopojasne filtere, no zbog Bayerove matrice koju te kamere koriste (vidi poglavlje 2.4.1), dolazi do velikog pada osjetljivosti pa se prednosti tih filtera ne mogu u potpunosti iskoristiti. Zato ako želimo dobiti sliku s boljim kontrastom i s više detalja moramo koristiti monokromatsku kameru. Nažalost, korištenje takve kamere zahtijeva višestruke ekspozicije (svaki filter se snima zasebno) što povećava složenost procesa snimanja i obrade, a i osjetno produžuje vrijeme snimanja.

Fotometrija

Nakon što su napravljene snimke neba kreće astronomska fotometrija. Osnovna ideja je izmjeriti koliko svjetla koje dolazi iz svemirskog objekta je detektirala kamera, a da se pritom oduzmu svi drugi doprinosi koji sa svemirom nemaju veze.

Da ponovimo, cilj astronomske fotometrije je izmjeriti gustoću toka zračenja (astronomi to na engleskom nazivaju *flux density* ili jednostavno samo *flux*), tj. energiju koja prolazi kroz jedinicu površine u jedinici vremena (W/m^2). Drugim riječima, interesira nas koliko je energije prikupio piksel kamere tijekom vremena trajanja prikupljanja svjetla na senzoru (ekspozicije, tj. „brzine zatvarača“).

Današnji senzori su čipovi koji na svjetlo reagiraju linearno, što znači da duplo više svjetla znači i duplo veća vrijednost piksela. To vrijedi tako dugo dok pikseli ne saturiraju, tj. dosegnu najveću svoju vrijednost. Dakle, ako imamo zvijezdu koja nije saturirala piksele, fotometrija bi se mogla svesti na zbrajanje vrijednosti u pikselima pokrivenim sjajem zvijezde.

Na žalost, glavni problem u tome je što vrijednosti koje piksel ima ne dolaze samo od sjaja zvijezde nego i samo nebo (atmosfera) ima svoj sjaj, a i u samom senzoru stvara se signal nevezan sa svjetlom zvijezde. Te doprinos nazivamo šum i može jako zagorčati naš fotometrijski život. Dodatna komplikacija su neravnomjernosti u osvjetljavanju površine čipa, što dolazi zbog same optike objektiva kamere (ili teleskopa), ali i zbog čestica prašine koje su možda sjele na sam čip (a da ne govorimo i o drugim problemima poput rošenja leće zbog kondenzacije vlage).

4.1 Jednostavna fotometrija - prvi koraci

Ali ajmo mi polako, prvo samo s najjednostavnijim pristupom. Glavni izvor šuma koji ne možemo nikako zaobići je sjaj neba. Posebice ako snimate s neke lokacije koja ima osjetno svjetlosno onečišćenje. Krenut ćemo s metodom koja ne uključuje mnoštvo koraka za micanje šuma, nego ćemo samo procijeniti sjaj neba i oduzeti ga od sjaja zvijezde. Time ćemo možda imati grešku mjerenja i po par desetaka posto, ali za početak nam je to sasvim dovoljno za započeti se baviti fotometrijom. Pritom je dobro se držati upute da se ne snimaju zvijezde koje su niže od oko 30° iznad horizonta, kako bi izbjegli jači utjecaj atmosfere (jer što je zvijezda niže prema horizontu, to je duži put kroz atmosferu).

U ovom početnom pristupu doprinos šuma mjerimo na najjednostavniji način koristeći neposrednu okolinu zvijezde i onda ga oduzimamo od izmjenog sjaja zvijezde. Pritom je važno da zvijezda koju mjerimo nije saturirana, tj. da ekspozicija nije bila predugačka za njen sjaj. U tom slučaju vrijednosti piksela dosegnu maksimum koji dozvoljava kamera, a mi ostajemo bez informacije koliko je stvarno zvijezda sjajna.

Budući da ne koristimo kalibrirani senzor (kod kojih izmjerene vrijednosti znamo kako pretvoriti u W/m^2), ovakvom fotometrijom možemo samo mjeriti koliko su zvijezde međusobno sjajnije jedna od druge u području osjetljivosti vaše kamere (tzv. *diferencijalna fotometrija*). Ako prva zvijezda ima sjaj S_1 na vašoj slici, a druga sjaj S_2 , onda možemo definirati razliku u njihovim magnitudama:

$$m_1 - m_2 = -2.5 \log \frac{S_1}{S_2}. \quad (4.1)$$

Nama je cilj izmjeriti sjaj S_1 i S_2 u proizvoljnoj skali (koja se pokrati jer se sjaj S_1 dijeli sa sjajem S_2). To je najlakše postići na način da se naprosto zbroje vrijednosti piksela koje pokriva zvijezda, ali tako da se pritom oduzme vrijednost pozadinskog šuma. U tu svrhu prikazat ćemo tehniku *aperturne fotometrije*, gdje se zvijezda i njezina okolina mjere unutar koncentričnih kružnica (apertura).

Važno je napomenuti da astronomi koriste posebni tip zapisa slika, pod nazivom FITS, opisan u poglavlju 2.2.1. U poglavlju 3.3 dajemo upute kako sliku dobivenu fotoaparatom pretvoriti u FITS. Pritom treba imati na umu da će fotoaparat stvoriti RGB sliku, koja prelaskom u FITS se pretvara u tri zasebne slike: crvenu, zelenu i plavu. Pritom su sve tri zajedno zapisane u jedan FITS dokument s kojim sada radimo. Ako koristite astrokameru, posebno dizajniranu kameru za astronomiju, onda odmah imate zapis slike u FITS formatu.

4.1.1 Jednostavna fotometrija u programu SAOImageDS9

Ima raznih astronomskih programa koji omogućuju fotometriju, ali kroz praksu nam se za sada pokazao program SAOImageDS9 vrlo lagan za korištene kod početnika: <https://sites.google.com/cfa.harvard.edu/saoimageds9>

Postupak u programu DS9 je slijedeći:

1. Učitajte FITS sliku koju ste kreirali: *File*→*Open*. Pritom obratite pažnju:
 - ako vam slika ili folder u kojem držite vašu sliku ima neko naše slovo (ččđžš), DS9 će odbijati otvoriti sliku.
 - ovisno o tome kako ste kreirali FITS sliku, moguće da je kod konverzije iz sirovog formata u FITS došlo do izokretanja slike po vertikalnoj osi. Pripazite na to ako radite usporedbu s položajima zvijezda (npr. u Stellariumu).
2. Ako želite provjeriti podatke o tome kada je slika napravljena, koja je bila dužina ekspozicije, ISO vrijednost, tip kamere, i slično, kliknite: *File*→*Header*. Fotoaparat je zabilježio te podatke u zaglavlje (eng. header) slike i ti podaci su sačuvani kod konverzije u FITS.
3. Ako ste koristili fotoaparat, pojaviti će se dodatni prozor pod nazivom *Cube*. Nemojte ga zatvoriti, vrlo je važan: omogućuje prebacivanje između crvene (1), zelene (2), i plave (3) slike klikom na *Next* (vidi sliku 4.1). Ako ga slučajno zatvorite, možete ga natrag otvoriti pomoću: *Frame*→*Cube*.
4. Prvo si trebate odabrati kako obojati sliku kako bi uopće vidjeli što je na njoj. Za to je potrebno kliknuti *scale* i onda odaberite nešto iz ponuđenih mogućnosti (*log* često dobro funkcionira, a kombinacija *z-scale* i *histogram* će vam uvijek pokazati ima li nečeg na slici). Zgodno je odabrati i ručno podešavanje: *Scale*→*Scale_Parameters*.

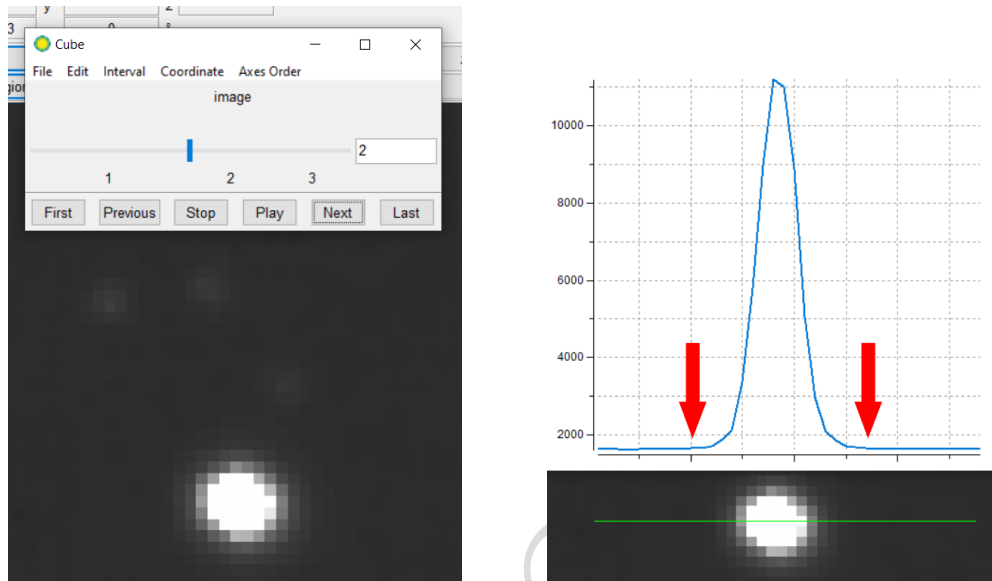
Otvorit će vam se prozor u kojem je iscrtan histogram vrijednosti svih piksela na slici. Preko histograma iscrtane su crvena i zelena linija koje možete uhvatiti mišem i micati. To su granice za paletu boja. (Dodatno u meniju pod *color* možete odabrati i neku lijepu paletu boja, ali preporučamo da zadržite *gray*.)

5. Pomoću srednje tipke miša možete kontrolirati povećanje slike. Ili kliknite na *zoom* pa odaberite neko povećanje.
6. Kada znate koju zvijezdu želite fotometrirati, postavlja se pitanje koliko je ona zapravo velika na slici. Tamna pozadina može zavarati, što se vidi iz primjera na slici 4.1, gdje su prikazane vrijednosti piksela uzduž (zelene) linije koja presijeca zvijezdu. Crvenim strelicama su označeni položaji gdje možemo biti sigurni da se sjaj zvijezde stopio s pozadinom. Imajte to na umu u slijedećim koracima fotometrije.
7. Mjerenja sjaja piksela moguće je jedino ako ste prvo aktivirali: *Edit*→*Region*.
8. Sada odaberite krug unutar kojeg ćete zbrojiti sve vrijednosti piksela. U meniju prvo selektirajte: *Region*→*Shape*→*Circle*. Zatim, kliknite na zvijezdu i razvucite dovoljno velik krug oko nje da ste sigurni kako je unutar njega svo svjetlo koje dopire sa zvijezde (vidi sliku 4.2). Krug se može selektirati klikom miša i onda micati ako ga niste dovoljno dobro pozicionirali. Ako ga želite obrisati, prvo ga selektirajte, a onda kliknite: *Region*→*Delete_Selection*.
9. Kliknite dva puta na krug, ili odaberite *Region*→*Get_Information*. Pojavit će se prozorčić u kojem pišu koordinate centra kruga i njegov radijus.
10. Na tom prozorčiću odaberite: *Analysis*→*Statistics*. Sada se otvara novi prozorčić u kojem je ispisana statistika piksela unutar kruga. Zapišite si vrijednosti *sum* (zbroj vrijednosti svih piksela) i *npix* (koliko piksela je unutar kruga).
11. Sada nam treba pozadinski sjaj neba. Odaberite: *Region*→*Shape*→*Annulus*. Zatim kliknite na sliku i razvucite prsten koji se pojavi. Pomaknite te ga na poziciju sa središtem na zvijezdi¹, te mu podesite debljinu i veličinu da prsten bude izvan područja zvijezde i da, ako je ikako moguće, nema drugih zvijezda unutra prstena (vidi sliku 4.2).
12. Kliknite dva puta na prsten ili odaberite *Region*→*Get_Information*. Pojavit će se prozorčić u kojem pišu koordinate centra prstena i njegovi radijusi.
13. Na tom prozorčiću odaberite: *Analysis*→*Statistics*. Sada se otvara novi prozorčić u kojem je ispisana statistika piksela unutar prstena. Zapišite si vrijednost *median* – to je medijan vrijednost piksela koji su unutra prstena. Zabilježite i broj piksela, trebat će vam za izračun pogreške.
14. Sada imamo sve vrijednosti za izračun sjaja *S* te zvijezde sukladno jednadžbi 2.24:

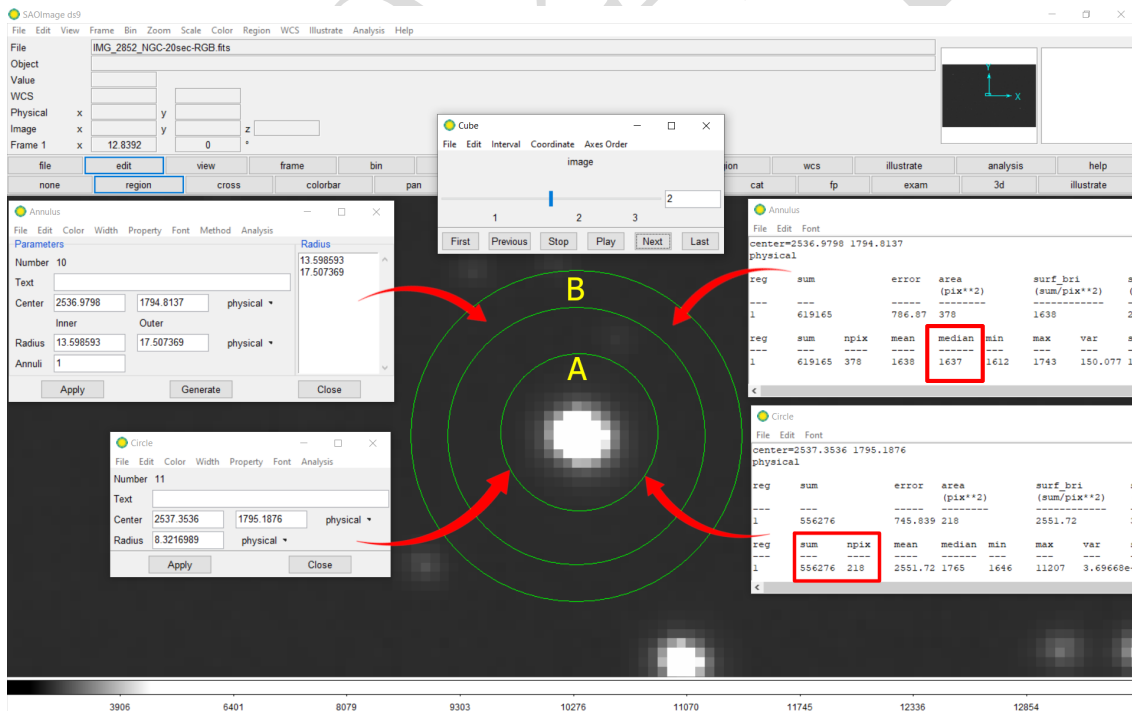
$$S = \text{sum} - \text{median} * \text{npix}$$
 Izraženo u magnitudama to je: $m = -2.5 \log(S)$. Pripadnu pogrešku računajte u ovoj jednostavnoj verziji fotometrije pomoću jednadžbe 2.25.

Ukoliko želite te vrijednosti izmjeriti u svakoj od RGB slika, dovoljno je samo u prozorčiću „Cube“ klikati „next“ i vrijednosti u svim drugim prozorima će se automatski mijenjati same. Sada ste spremni koristiti fotometriju za vaše astronomske avanture.

¹Kada ovako imate prsten preko prije iscrtanog kruga, neće moći selektirati krug. Taj problem možete riješiti tako da selektirate prsten i onda ga prebacite „iza“ kruga pomoću: *Region*→*Move_to_Back*.



Slika 4.1: Lijevo: Prozor „Cube“ omogućuje odabir slike u crvenom (1), zelenom (2) ili plavom (3) području. Desno: Izgled zvijezde može zavarati. Prava veličina zvijezde je područje gdje se sjaj izdiže iznad pozadinskog sjaja neba.



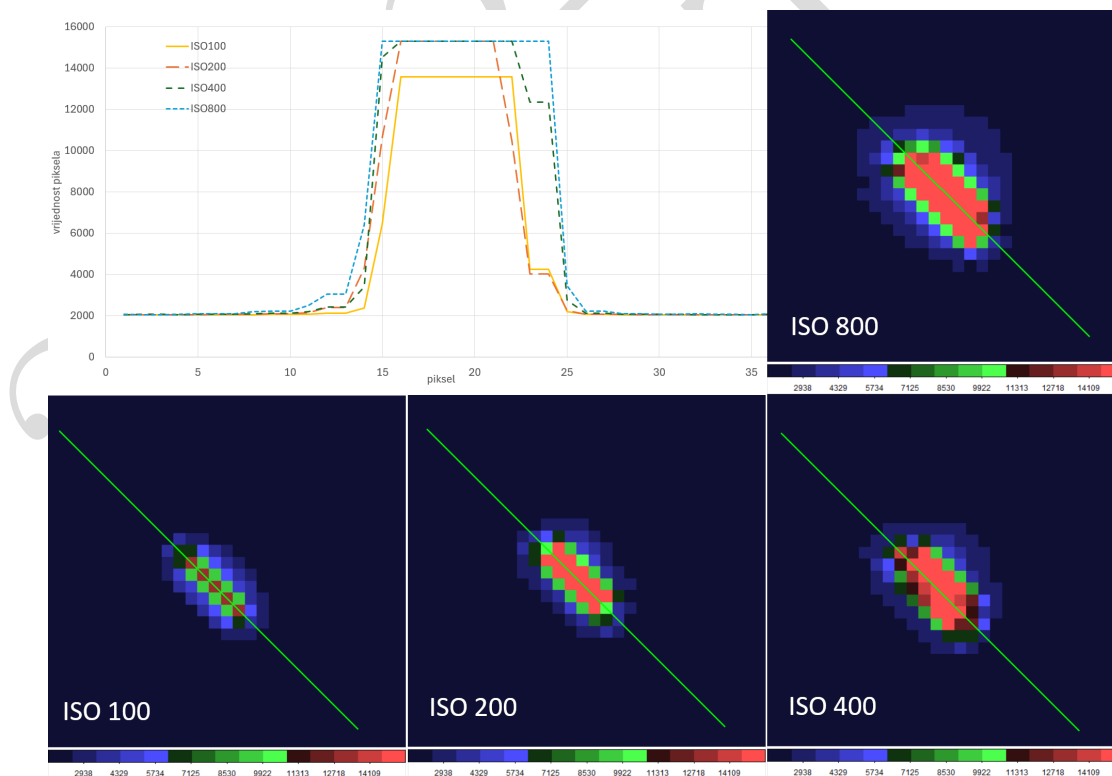
Slika 4.2: Aperturna fotometrija koristi kružnice za označavanje područja unutar kojeg se analiziraju vrijednosti piksela. „A“ je disk koji pokriva sve piksele kojima sjaju doprinosi zvijezda, a „B“ je prsten koji nam služi za određivanje pozadinskog sjaja neba.

4.2 Problem saturacije zvijezda (upoznajte offset, ISO i gain)

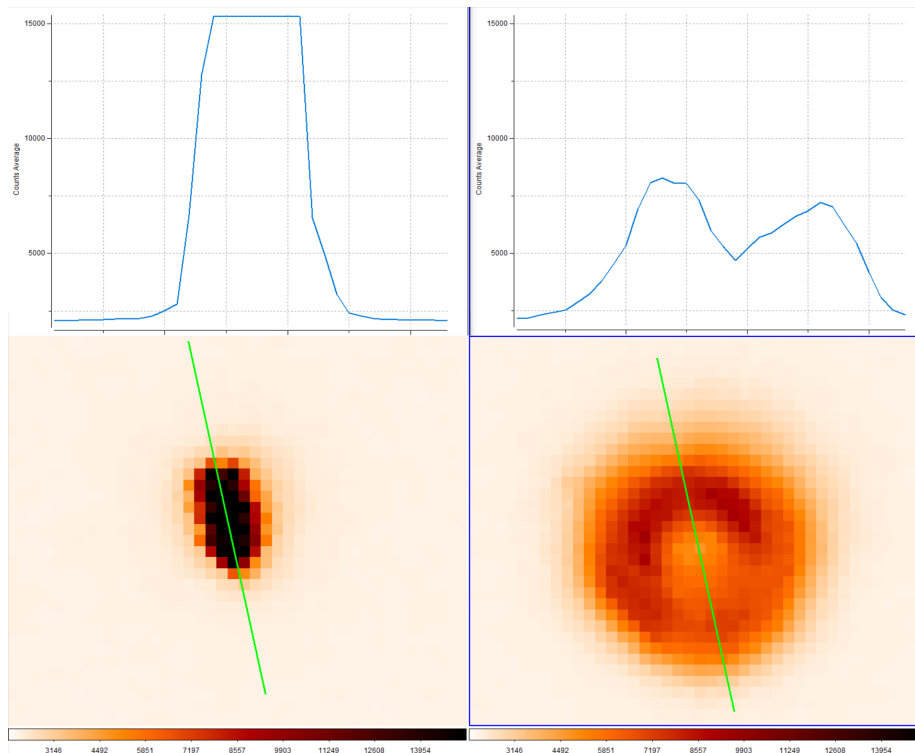
Ovisno o tome koju kameru koristite, i kakav objektiv ili teleskop, prije ili kasnije suočiti ćete se s problemom saturacije piksela sjajnih zvijezda. To je situacija kada vam kamera izgubi sposobnost prikazati točne vrijednosti najsjajnijih piksela jer su prikupili previše elektrona (tj. svjetla).

Ako imate kameru uz praćenje vrtnje neba, tada želite što dužu ekspoziciju ne bi li pojačali signal iznad šuma (vidi poglavlje 2.6.5), te da izbjegnute efekte seeinga (brza titranja sjaja zvijezde zbog atmosfere, vidi poglavlje 2.3). Bilo bi dobro da je ekspozicija barem 15 sekundi, a maksimalno moguće trajanje će vam odrediti sjaj neba i kvaliteta praćenja. Ako je ta kamera fotoaparat, tada koristite ISO100 (ovdje ćemo objasniti zašto). Na žalost, ovako dugačke ekspozicije neminovno vode u saturaciju sjajnijih zvijezda.

Ako nemate praćenje neba, nego samo fotoaparat usmjeren prema nebu, tada ne možete koristiti dugačku ekspoziciju (jer se zvijezde izdužuju na slici), zbog čega će nedostajati prikupljenog svjetla za napraviti fotometriju. Stoga ste prisiljeni podizati ISO vrijednost na fotoaparatu, ne bi li povećali vrijednosti piksela da uopće nešto vidite. ISO800 i više tada nisu neuobičajeni, no tako veliki ISO vrlo lako saturira čak i ne jako sjajne zvijezde (vidi sliku 4.3).



Slika 4.3: Primjer saturirane zvijezde. Snimka je napravljena fotoaparatom bez praćenja i s ekspozicijom od 4 sekunde, pa je zvijezda izdužena zbog vrtnje neba. Grafikon prikazuje sjaj zvijezde uzduž linije označene na slikama. Slike su različitih ISO vrijednosti i samo kod ISO100 nije došlo do saturacije. To se vidi po tome što su profili sjaja u grafikonu svi istog maksimuma kod ISO200, ISO400 i ISO800, a samo je kod ISO100 maksimum manji. Sjaj piksela na slikama je obojan (*Color*→*color* u DS9) stepeničastom bojom da se lakše uoče promjene u sjaju (vidi sliku 2.7 kao primjer stepeničastih boja vrijednosti sjaja).

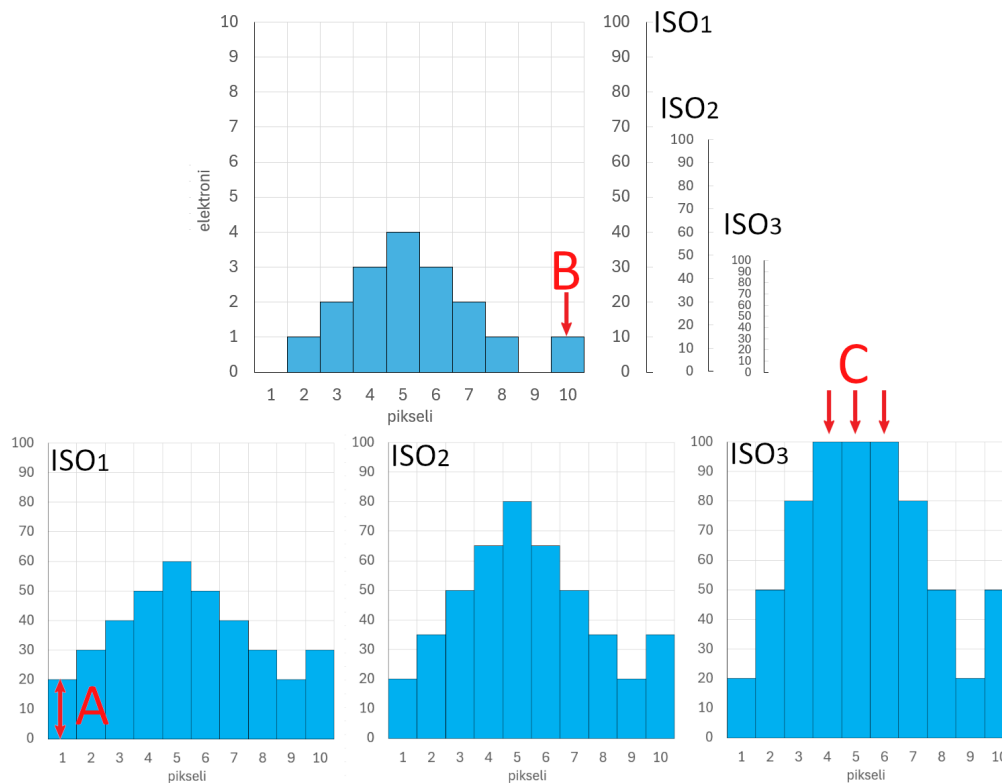


Slika 4.4: Usporedba fokusirane (lijevo) i defokusirane (desno) sjajne zvijezde. Gornji grafovi pokazuju vrijednosti piksela uzduž linije označene na slikama ispod grafova. Zvijezda na fokusiranoj slici je saturirala, tj. na najsjajnije piksele je palo više svjetla nego što pikseli mogu prikazati. Ali kada se slika defokusira, svjetlo se razbaca na više susjednih piksela i zvijezda više nije saturirana.

Izlaz iz te situacije je lagani defokus objektiva ili teleskopa (tj. fokusera na teleskopu). Prednost defokusiranja je da se svjetlo zvijezde razlijeva na više piksela pa nije koncentrirano na mali broj piksela (vidi sliku 4.4). Time se izbjegne velik broj elektrona u pojedinom pikselu i zvijezda ne saturira. Uz to, ako koristite fotoaparat, proces pretvaranja slike u RGB kanale (demozaik, vidi poglavlje 2.4.1) je točniji ako zvijezda pokriva veći broj piksela. Preporučljivo je da zvijezdu "razmažete" na promjer od 8-10 piksela.

Na žalost, defokusiranje vodi i svom problemu, a to je nestanak manje sjajnih zvijezda kojima se defokusirano svjetlo stopi sa sjajem neba. To nas prisiljava onda na duže ekspozicije (ako imate praćenje) ili veći ISO (ako imate fotoaparat). Zašto se ISO (tj. gain ako imate astromameru) pojavljuje kao bitan faktor kod fotoaparata ilustrirano je na slici 4.5. ISO ili gain u biti samo promijeni skalu kojom broj elektrona u pikselima pretvaramo u vrijednost piksela na digitalnoj slici. Pritom morate znati i da kamere dodaju i neku konstantnu vrijednost svim pikselima, koju nazivamo offset. Razlog je u tome što nisu svi pikseli jednako osjetljivi i dodavanjem offset-a se osiguravamo da su u svim pikselima pozitivne vrijednosti.

No, bez obzira na sve ove finese, prvi koraci u učenju fotometrije mogu se raditi običnim fotoaparatom bez praćenja i s jednostavnim postavkama. Treba krenuti kroz jednostavne primjere i tako usvojiti važne osnovne tehnike fotometrije. U tome će vam pomoći vježbe u poglavlju 5, a među njima je i vježba iz poglavlja ?? koja daje praktičan primjer utjecaja defokusiranja na fotometriju.



Slika 4.5: Karikirani opis funkcioniranja ISO skale i offset-a (ako imate fotoapararat), tj. gain-a i offset-a (ako imate astrokameru). Senzor kamere pretvara svjetlo u elektrone zarobljene unutar piksela. Gornji graf pokazuje primjer 10 piksela koji su skupili svjetlo zvijezde, ali i jedan elektron šuma koji nema veze sa zvijezdom (označeno s B). Elektronika kamere pretvara te elektrone u neku brojčanu vrijednost u digitalnoj slici, a ISO (ili gain) nam služi da podesimo skalu kojom će se napraviti pretvorba. To ne znači da je senzor osjetljiviji s većim ISO, nego da samo se drugačije brojčano prikazuju iznosi prikupljenih elektrona. Tri skale, za tri ISO (tj. gain) vrijednosti ($ISO_1 < ISO_2 < ISO_3$) prikazane su uz gornji graf. Donja tri grafa prikazuju vrijednosti piksela na slici. Offset je vrijednost dodana u svaki piksel, pa vrijednost pozadine bez elektrona nije nula (označeno s A). Problemi nastaju kod veće ISO vrijednosti kada se ne mogu prikazati najsjajniji pikseli jer digitalna slika ima neku svoju maksimalnu vrijednost. Takvi pikseli su u saturaciji (označeno sa C) i iz njih ne možemo odrediti koliko je točno palo svjetla u piksele. Primijetite kako s većim ISO (tj. gain) raste i vrijednost šuma na slici u odnosu na pozadinu.

4.3 Naprednija fotometrija: korekcija nepravilnosti na slici

Znanstvena astronomija je nemoguća ako se dobro ne poznaje ponašanje opreme i senzora kojima se prikupljaju podaci. Stoga je vrlo korisno nakon jednostavnih prvih koraka u fotometriji krenuti u smjeru prikupljanja kvalitetnijih podataka opremom koju imate. Osnovni korak u takvoj naprednijoj fotometriji je postupak korigiranja slika ne bi li se reducirao šum i ispravile nepravilnosti na slici. Nemojte se iznenaditi ako ćete daleko više vremena provesti u prikupljanju korektivnih slika nego li u promatranju vašeg astronomskog cilja na nebu.

U tu svrhu koristiti ćemo program IRIS koji ima ugrađene procedure za takve korekcije. U svakom koraku trebati će napraviti serijal korektivnih slika. Za početak napraviti ćete ih samo jednom i koristiti ih i ubuduće. Naprednija fotometrija pak traži da se barem neke od tih korektivnih slika rade iznova kada i sama opažачka slika neba.

U ovim uputama slijedimo zapravo priručnik od AAVSO-a [4], koji se temelji na uputama za procesiranje astronomskih slika u IRIS-u [2, 3].

4.3.1 Instalacija i podešavanje programa IRIS

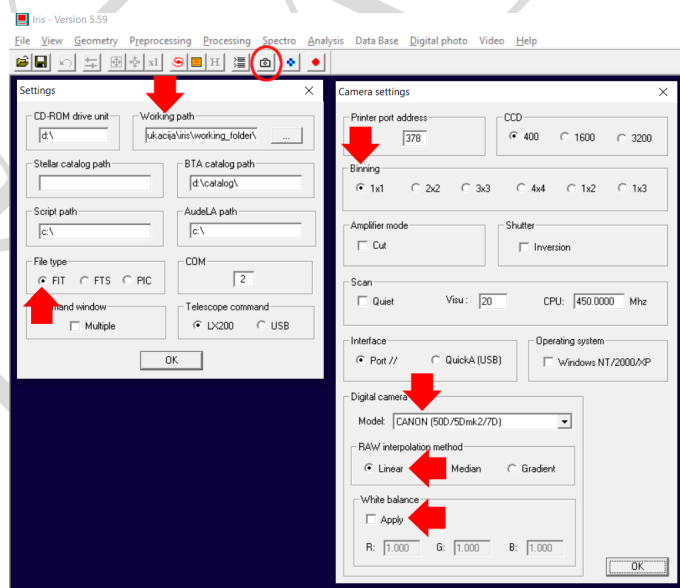
Kako bi koristili IRIS, potrebno ga je instalirati s ove adrese: <http://www.astrosurf.com/buil/iris-software.html> (mi smo ovdje koristili verziju 5.59). **Ako koristite fotoaparata, primijetite uputu da treba skinuti i datoteku *libdcraw.zip* koja je potrebna za prepoznavanje različitih formata slika.** Zatim podesite slijedeće:

- IRIS sve svoje operacije izvodi na slikama u unaprijed definiranom folderu. Stoga si otvorite jedan radni folder u koji ćete prebaciti slike koje ćete obrađivati. Zatim pokrenite IRIS i odaberite *File*→*Settings*. Otvoriti će se prozorčić u kojem je postavite *File Type*=*FIT* i *Working path* podesite na radni folder koji ste otvorili u ovu svrhu (vidi sliku 4.6). Kad ste završili kliknite OK.

4.3.2 Konverzija sirovog formata u FITS pomoću aplikacije IRIS

Ako koristite fotoaparata onda je potrebno IRIS podesiti da zna kako konvertirati vaše sirove slike u FITS format. Slijedite ove korake:

- Prebacite sirovu sliku koju je potrebno konvertirati u FITS u radni folder kako je opisano u prethodnom poglavlju 4.3.1.
- Zatim kliknite na ikonu koja je zaokružena na slici 4.6. Tako se otvara prozor za podešavanje parametara vaše kamere. Prvo odaberite model kamere (moгуće da vaša nije na popisu pa treba odabrati neku najslіčniju. Recimo, za naš Canon EOS 60D odabrali smo opciju u kojoj je 50D). Taj korak je važan je se time definira i



Slika 4.6: Podešavanje parametara programa IRIS potrebnih za konverziju fotografskih slika u FITS format. Lijevi prozor (Settings) otvara se pomoću *File*→*Settings*. Desni prozor (Camera settings) otvara se klikanjem ikone koja je zaokružena na slici.

izgled Bayerove matrice. Zatim još podesite *Binning* na 1x1, *interpolation method* na *linear*, i provjerite da je isključen *white balance*. Sve je to označeno na slici 4.6. Kad ste završili kliknite OK.

- Sada pomoću *File*→*Load* otvorite vašu fotografiju (u našem slučaju to je Canonov .CR2 format slike).
- Zatim spremite sliku u FITS formatu pomoću *File*→*Save*, gdje pod *Save as type* odaberite *FITS Files*.

Ovdje opisanom konverzijom koristite demozaik (debayer) metodu koju ste odabrali pod *interpolation method*.

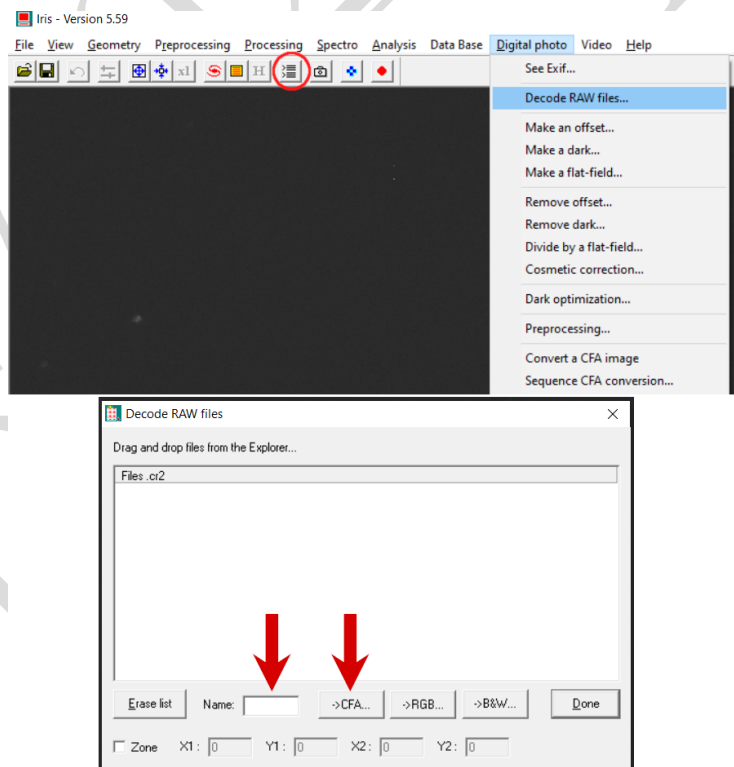
4.3.3 Priprema sirovih slika za daljnju obradu

Ukoliko imate astrokameru kojom ste automatski prilikom snimanja dobili FITS slike:

- Prebacite FITS sliku u radni folder od IRIS-a i, ako već nije, promijenite ekstenziju iz *.fits* u *.fit*. Zatim dodajte broj 1 na kraj imena. Ukoliko imate više slika koje želite istovremeno obraditi, stavite im redne brojeve na kraj imena. Na primjer *slika-1.fit*, *slika-2.fit*, itd.

Ukoliko imate fotoaparat onda vaše sirove slike (npr., .CR2 za Canon, .NEF za Nikon) treba prvo dekodirati iz sirovog RGB formata u FITS format. Stoga pratite ove korake:

- Ako već niste, podesite parametre vaše kamere kroz prozor za podešavanje kako je



Slika 4.7: Opcija dekodiranja sirovih RGB slika dobivenih fotoaparatom u FITS slike koje će proći korekcijsko procesiranje. Crvenim krugom označena je ikonica koja otvara prozor za tekstualni unos naredbi u IRIS (sve operacije koje izvodi IRIS mogu se napisati i u obliku programske skripte)

opisano u prethodnom poglavlju 4.3.2.

- Odaberite u IRIS-u opciju *Digital photo* → *Decode RAW files* (vidi sliku 4.7). Vjerojatno će vam IRIS nestati s ekrana u tom trenutku jer se automatski smanji, pa ga samo vratite natrag na ekran. Pojaviti će se prozor naziva *Decode RAW files* za dekodiranje slika u FITS.
- Selektirajte mišem svoje sirove slike i povucite ih u prozor za dekodiranje.
- U polje *Name* upišite kako će vam se zvati dekodirana slika (recimo "slika-"). Ako konvertirate više slika, nazivu će biti pridodani redni brojevi (npr., *slika-1.fit*, *slika-2.fit*, itd.).
- Kliknite na "->CFA" i pričekajte da završi dekodiranje. Kada je gotovo, kliknite na *Done*.

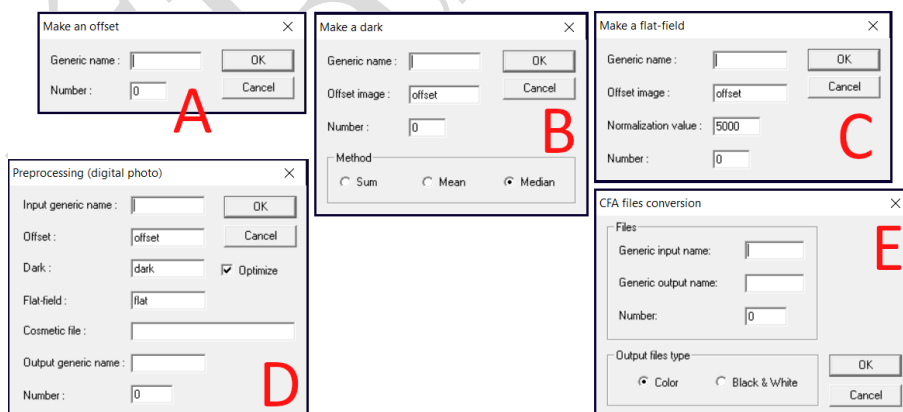
Na kraju ovog prvog koraka u radnom folderu IRIS-a biti će *.fit* slike spremne za daljnju obradu.

4.3.4 Korekcija na offset (bias frame)

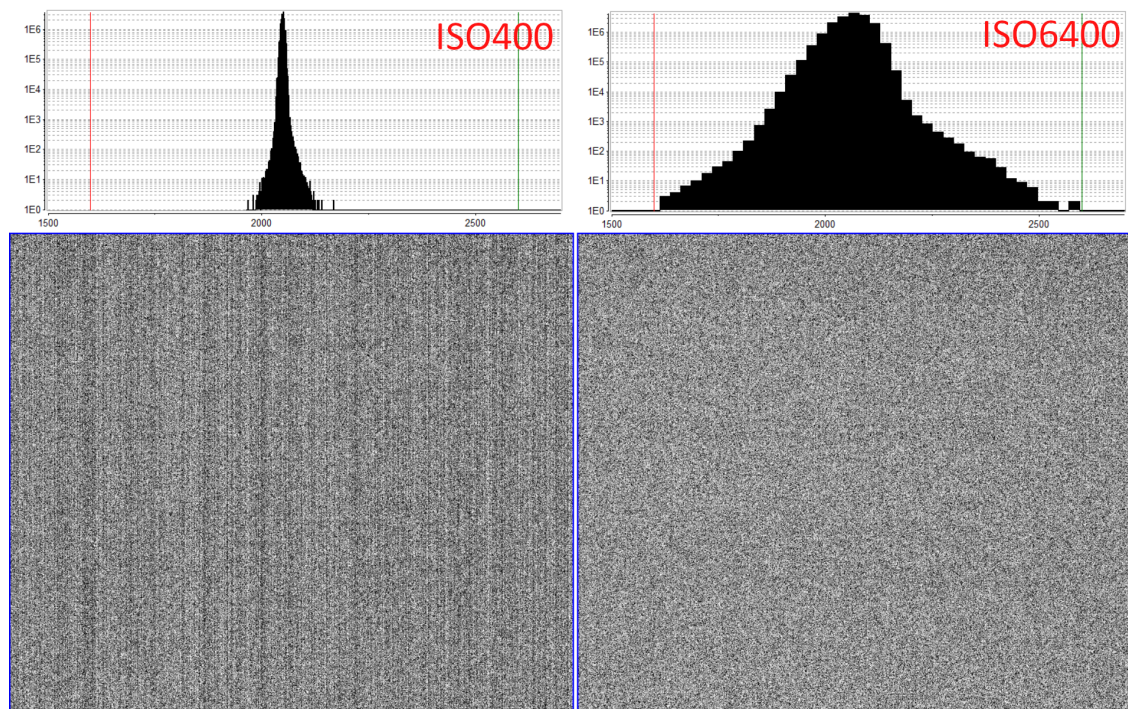
Na slici 4.5 opisali smo osnovni koncept kako offset (ponekad se naziva *bias*) i ISO na fotoaparatu (tj. gain na astrokameri) utječu na sliku. U praksi smo suočeni s problemom da se pikseli na senzoru međusobno malo razlikuju u osjetljivosti na offset. Uz to, proces očitavanja vrijednosti piksela može unijeti dodatni mali, ali mjerljiv šum. Sliku koja izmjeri offset (*bias*) i takav šum po pikselima zovemo *bias frame* i nije teško je napraviti.

Ideja iza korektivnog bias frame-a je da se napravi slika u totalnom mraku s ekspozicijom od nula sekundi. To bi značilo da su jedino offset i šum elektronike vidljivi na slici. U praksi slijedite ove korake:

- Za svaku kombinaciju offset-a i ISO (gain) treba napraviti zasebni bias frame (ako imate fotoaparat onda vam je offset fiksiran i trebate samo mijenjati ISO) sukladno ovim uputama.
- Pokrijte, tj. zatvorite, otvor objektivu ili teleskopa i napravite sliku od nula sekundi ekspozicije (ili s najkraćom dostupnom). Napravite barem desetak takvih slika (ili još više - veći broj slika rezultirati će kvalitetnijim bias frame-om)



Slika 4.8: Prozori u IRIS koji se otvore prilikom raznih koraka obrade slika: A = priprema bias frame-a, B = priprema dark frame-a, C = priprema flat field-a, D = primjena korekcijskih slika, E = završna konverzija natrag u RGB sliku ako radimo s fotoaparatom.



Slika 4.9: Primjer bias frame-ova za dvije različite ISO vrijednosti (ili dvije gain vrijednosti kod astro kamere). Histogrami pokazuju raspodjelu vrijednosti piksela gdje se jasno vidi kako veći ISO jako povećava prikaz razlika između piksela.

- Sukladno uputama u poglavlju 4.3.3 pripremite te slike za idući korak, tako da slike budu u *.fit* formatu i s rednim brojevima (npr. *slika-1.fit*, *slika-2.fit*, itd.).
- Kliknite na *Digital photo* → *Make an offset* i otvoriti će vam se mali prozorčić kako je prikazano na slici 4.8.
- Pod *Generic name* unesite naziv vaših pripremljenih offset slika iz prethodnog koraka (npr. "*slika-*"). Pod *Number* upišite koliko ih ima. Kliknite OK.
- Kada procesiranje završi, bias frame će vam se prikazati na ekranu. Sada kliknite na *File* → *Save* i snimite bias frame (recimo s imenom "*master-bias.fit*") u radni IRIS folder.

Na slici 4.9 prikaz je dva bias frame-a koji se razlikuju po ISO (tj. gain) vrijednosti. Jasno se vidi kao veći ISO povećava širinu distribucije vrijednosti piksela oko offset vrijednosti. Takvi bias frame-ovi se mogu koristiti duže vremena, iako u stvarnosti iz noći u noć dolazi do sitnih promjena u svojstvima piksela. Stoga barem svakih nekoliko mjeseci napravite novi bias frame.

4.3.5 Korekcija na termalni šum (Dark frame)

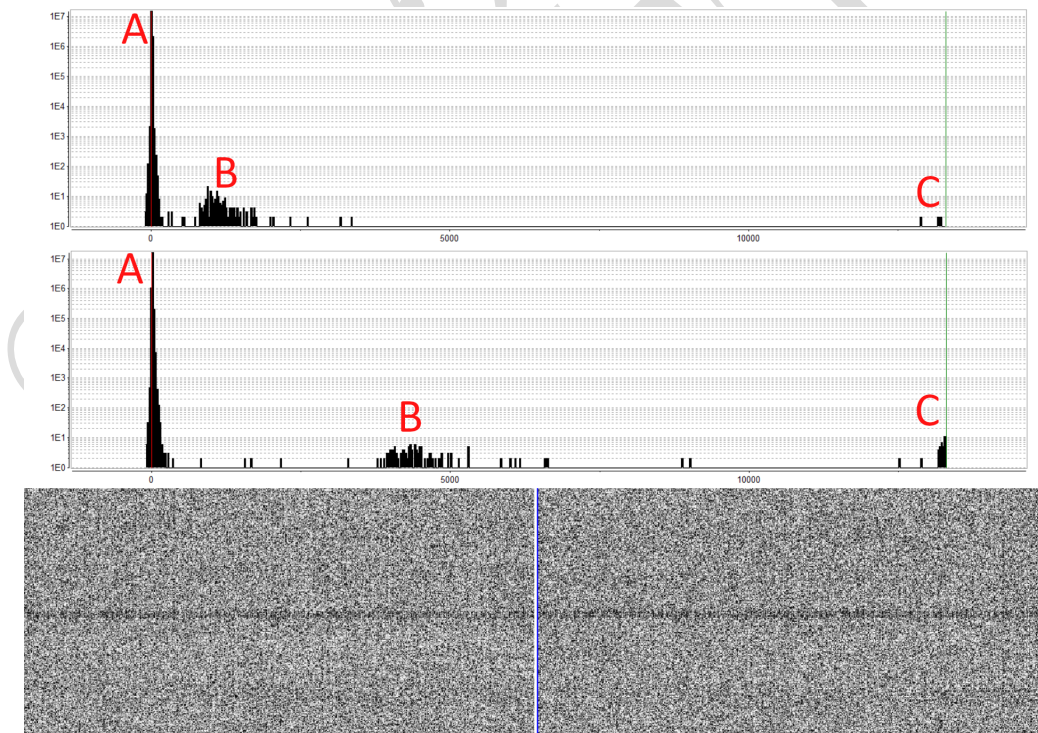
Elektroni se u pikselima senzora kamere mogu pojaviti spontano, bez izloženosti svjetlu. Takvi elektroni stvaraju lažni signal kojeg nazivamo termalnim šumom jer taj efekt slučajnih elektrona raste s temperaturom. Stoga astro kamere imaju hlađenje, ne bi li se šum smanjio. Termalni šum raste i s dužinom ekspozicije jer što duže čekamo to je veća vjerojatnost da će se pojaviti slučajni elektron.

Pojava termalnih elektrona slučajan događaj, pa stoga ne možemo precizno takav šum maknuti, ali mu možemo predvidljivo smanjiti utjecaj na naša mjerenja. Naime, taj šum je podložan predvidljivoj statistici za pojedini piksel ako je broj termalnih elektrona velik. Dark frame služi tome da izmjeri kolika je vjerojatnost da se takav šum pojavio na pikselima kamere.

Budući da je ta statistika osjetljiva na temperaturu, koja pak jako ovisi o okolišnim uvjetima (grijanje okolnim zrakom i zagrijanom elektronikom unutar kamere), dark frame bi se u pravilu trebao raditi svaki puta iznova kada i snimanje neba. Međutim, možemo si malo olakšati posao ako dark frame zanemarimo u slučaju kratkih ekspozicija. Ili ako koristimo unaprijed pripremljeni dark frame za neku kombinaciju offseta, gain-a (ISO-a), i temperature senzora (ove parametre kontroliramo kod astro kamera, dok kod fotoaparata nemamo kontrolu temperature pa je teže)

IRIS program u postupku korekcija slika uvijek traži i dark frame, pa ako ga želimo zanemariti onda moramo napraviti "lažni" dark frame u kojem neće biti ničeg, samo nule. Postupak je sljedeći:

- Otvori neki bias frame u IRIS-u (*File*→*Open*). Ta slika nam samo služi da lažni dark frame ima isti format kao i naše slike.
- Otvorite prozor za pisanje tekstualnih naredbi (vidi na slici 4.7 crvenim krugom označeno gdje kliknuti).



Slika 4.10: Primjer dark frame-ova napravljenih fotoaparatom u frižideru (temperatura blizu 0°C) i na sobnoj temperaturi (oko 25°C). Ekspozicija je 30 sekundi, a ISO400. Na samim slikama okom ne vidimo razliku, ali kada se naprave histogrami vrijednosti piksela vidi se razlika između hladnog (gornji grafikon) i toplog (donji grafikon). Slovom A označena su mala odstupanja od nule zbog slučajnih razlika u pikselima koje bias frame nije eliminirao. B označava termalni šum kojeg ciljamo s dark frame-ovima. C su "vrući" (problematični) pikseli koji su blizu maksimalne vrijednosti.

- Upišite naredbu:
FILL 0
Time smo čitavu sliku napunili nulama.
- Sada kliknite na *File*→*Save* i snimite lažni dark frame (recimo s imenom "*master-dark-lazni.fit*") u radni IRIS folder.

Taj lažni dark frame možete iskoristiti kada god želite izbjegnuti korekciju na dark frame. Pravi dark frame izrađuje se od tamnih slika na slijedeći način:

- Prilikom snimanja neba napravite barem deset tamnih slika (po mogućnosti barem pet prije i barem pet nakon snimki neba) na način da ne mijenjate postavke kamere (dakle, isti offset, ISO/gain, ekspozicija, temperatura) ali pokrijete, tj. zatvorite, otvor objektiva ili teleskopa da ne ulazi svjetlo.
- Sukladno uputama u poglavlju 4.3.3 pripremite te tamne slike za idući korak, tako da slike budu u *.fit* formatu i s rednim brojevima (npr. *slika-1.fit*, *slika-2.fit*, itd.).
- Kliknite na *Digital photo*→*Make a dark* i otvoriti će vam se mali prozorčić kako je prikazano na slici 4.8.
- Pod *Generic name* unesite naziv vaših pripremljenih tamnih slika iz prethodnog koraka (npr. "*slika-*"). Pod *Number* upišite koliko ih ima. Pod *Offset image* unesite naziv bias frame-a kojeg ste pripremili za isti ovakav offset i gain (kod astro kamere) ili ovakav ISO (kod fotoaparata). Pod *Method* odaberite *median*. Kliknite OK.
- Kada procesiranje završi, dark frame će vam se prikazati na ekranu. Sada kliknite na *File*→*Save* i snimite dark frame (recimo s imenom "*master-dark.fit*") u radni IRIS folder.

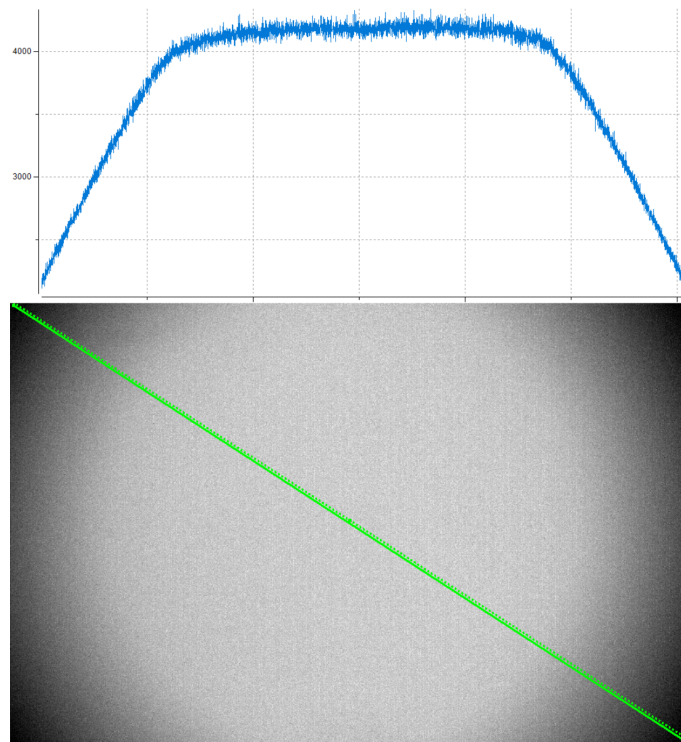
Na slici 4.10 možete vidjeti primjer kako se razlikuje dark frame ohlađenog i toplog fotoaparata. S povećanjem temperature podižu se i vrijednosti termalnih piksela. Ali kao što smo spomenuli, ako su ekspozicije kratke (nekoliko sekundi), termalnog šuma neće biti puno pa se može koristiti lažni dark frame.

4.3.6 Korekcija na nejednolikosti po površini slike (Flat field)

Ovo je vjerojatno najvažnija korekcija, a bavi se otklanjanjem nepravilnosti u prikupljanju svjetla po površini senzora. Kada snimamo nebo očekujemo da je nebitno na koji dio površine senzora pada svjetlo jer su svi pikseli ravnopravni. Ali u praksi to nije tako, iz više razloga: pikseli su različite osjetljivosti, prašina na senzoru deformira sliku, vinjeting (tamniji rubovi slike) zbog optičkih svojstava objektiva ili teleskopske optike, itd.

Korekcija na te nepravilnosti ima jednostavnu logiku: ako napravimo sliku koja ime sve piksele jednako osvijetljene, tada bi razlike u njihovim vrijednostima trebale odražavati takve nepravilnosti. Tu sliku zovemo flat field. Nakon toga trebamo podijeliti (skalirati) naše slike s flat field slikom i time ćemo sve piksele dovesti na istu skalu osjetljivosti.

Na žalost, postići jednoliko osvijetljenje čitavog senzora nije jednostavno. Štoviše, napraviti flat field koji će ujedno imati i jednolikost po čitavom spektru boja je nemoguće postići. U praksi najjednostavnije približno rješenje je slikanje svijetlog neba. Odaberite trenutak kada je Sunce taman zašlo ali nebo je još uvijek vrlo sjajno i bez zvijezda. Stavite kratku ekspoziciju, osjetno manje od sekunde (ali dovoljno dugačku da su vrijednosti piksela velike, a da ne saturiraju) i nizak ISO (gain), te napravite barem desetak snimaka



Slika 4.11: Primjer flat field slike. Grafikon prikazuje vrijednosti uzduž linije označene na slici.

u zenit. Ako imate fotoaparata, možete se i vrtiti tako da orijentacija slike u zenitu nije uvijek ista. Zatim slijedite ove korake:

- Sukladno uputama u poglavlju 4.3.3 pripremite slike svijetlog neba za idući korak, tako da slike budu u *.fit* formatu i s rednim brojevima (npr. *slika-1.fit*, *slika-2.fit*, itd.).
- Kliknite na *Digital photo* → *Make a flat-field* i otvoriti će vam se mali prozorčić kako je prikazano na slici 4.8.
- Pod *Generic name* unesite naziv vaših pripremljenih slika svijetlog neba iz prethodnog koraka (npr. "*slika-*"). Pod *Number* upišite koliko ih ima. Pod *Offset image* unesite naziv bias frame-a kojeg ste pripremili za isti ovakav offset i gain (kod astro kamere) ili ovakav ISO (kod fotoaparata). *Normalization value* je vrijednost koju će flat field pikseli imati u prosjeku. Unesite neku vrijednost od nekoliko tisuća (npr. 5000). Kliknite OK.
- (Napomena: Primijetite da ne koristimo korekciju na dark frame jer je ekspozicija vrlo kratka. Ako radite flat field s dužim ekspozicijama, morate napraviti i dark frame korekciju)
- Kada procesiranje završi, otvorite prozor za pisanje tekstualnih naredbi (vidi na slici 4.7 crvenim krugom označeno gdje kliknuti). Upišite naredbu: `GREY_FLAT`
To osigurava da je flat field iste skale po sva tri RGB kanala.
- Konačna flat field slika prikazana je na ekranu. Sada kliknite na *File* → *Save* i snimite flat field (recimo s imenom "*master-flat.fit*") u radni IRIS folder.

Slika 4.11 prikazuje jedan primjer flat field slike gdje je vrlo izražen efekt vinjetinga.

4.3.7 Korigiranje "vrućih" piksela

Neki pikseli su defektni, što znači da ne reagiraju ispravno na svjetlosni podražaj. Zovemo ih vrući pikseli jer pokazuju velike vrijednosti čak i na dark frame kada nema svjetla. Za očekivati je da će vremenom broj takvih piksela rasti kako sve više koristimo kameru. Isto tako, ako podignemo ISO (gain) možemo očekivati da im se broj poveća. IRIS može napraviti korekciju na način da promjeni vrijednost takvih piksela koristeći susjedne piksele. Ali zato treba prvo napraviti popis "vrućih" piksela.

Ovu korekciju za početak možete preskočiti, ali kada se uigrate u izradi dark frame-ova možete si pripremiti i nju. Koraci su slijedeći:

- Otvorite u DS9 dark frame koji ste napravili za potrebe korekcije vaših slika. Kliknite *Scale*→*min max*, a zatim na *Scale*→*Scale parameters*. Otvoriti će vam se histogram poput onih prikazanih na slici 4.10.
- Obratite pažnju na vruće piksele označene na slici 4.10. Oni će biti blizu maksimuma. Na x-osi histograma su vrijednosti piksela. Odaberite neku vrijednost koja je manja od vrućih piksela, a veća od termalnog šuma. Vrući pikseli biti će svi iznad te vrijednosti.
- Pokrenite IRIS i učitajte pomoću (*File*→*Open*) taj dark frame.
- Otvorite prozor za pisanje tekstualnih naredbi (vidi na slici 4.7 crvenim krugom označeno gdje kliknuti).
- Upišite naredbu:
`FIND_HOT vrucipikseli Nhot`
gdje je *Nhot* broj koji smo odabrali u prošlom koraku, a *vrucipikseli* je naziv datoteke u koju će biti zapisane koordinate svih piksela sjajnijih od *Nhot*. Nalaziti će su u IRIS-om radnom folderu i možete je otvoriti kao običan tekst.

Ovaj popis vrućih piksela koristiti ćemo kod korekcije astronomske slike neba.

4.3.8 Korekcija astronomske slike za potrebe fotometrije

Konačno smo spremni napraviti korekcije astronomske slike neba kako bi poboljšali preciznost fotometrije. Pratite slijedeće korake:

- Sukladno uputama u poglavlju 4.3.3 pripremite svoje astronomske slike za idući korak tako da slike budu u *.fit* formatu i s rednim brojevima (npr. *slika-1.fit*, *slika-2.fit*, itd.).
- Kliknite na *Digital photo*→*Preprocessing* i otvoriti će vam se mali prozorčić kako je prikazano na slici 4.8.
- Sada je potrebno ispuniti sadržaj kućica:
 - Pod *Input generic name* unesite naziv vaših pripremljenih astronomskih slika iz prethodnog koraka (npr. "*slika-*").
 - Pod *Number* upišite koliko slika imate.
 - Pod *Output generic name* unesite naziv korigiranih slika koje će se kreirati (npr. "*slika-korigirana-*").
 - Pod *Offset* unesite naziv bias frame-a kojeg ste pripremili.
 - Pod *Dark* unesite naziv dark frame-a kojeg ste pripremili.
 - Pod *Flat-field* unesite naziv flat field slike koju ste pripremili.

- Ako imate i popis vrućih piksela, unesite naziv datoteke u *Cosmetic file* (ostavite prazno ako nemate).
- Kućica *Optimize* mora biti isključena (prazna).

Pazite da koristite korekcijske slike koje po vrijednostima za offset, ISO (gain), i ekspoziciju odgovaraju vašim astronomskim slikama.

Ako imate astro kameru postupak je gotov i za fotometriju koristite slike pod nazivom kojeg ste naveli u *Output generic name*. Ako su vam slike napravljene fotoaparatom, onda ih treba pretvoriti natrag u RGB slike na slijedeći način:

- Kliknite na *Digital photo* → *Sequence CFA conversion* i otvoriti će vam se mali prozorčić kako je prikazano na slici 4.8.
- Pod *Generic input name* unesite naziv korigiranih slika iz prethodnog koraka (npr. "slika-korigirana-"). Pod *Number* upišite koliko slika imate. Pod *Generic output name* unesite naziv koji će imati korigirane slike konvertirane u RGB format (npr. "slika-korigirana-rgb-"). Pod *Output type* odaberite *Color*. Kliknite OK.

Konačne korigirane slike zapisane u RGB FITS formatu pod nazivom kojeg ste naveli u *Output generic name* pronaći ćete u IRIS-ovom radnom folderu. Na njima radite fotometrijska mjerenja.

Primjeri praktičnih projekata

Primjeri projekata koji se mogu raditi koristeći znanja iz ovog priručnika.

Ovisno o razini prakse koju imate s fotometrijom, ovdje su primjeri vježbi koje možete odraditi. Svaka vježba dolazi sa slikama za preuzimanje s web-stranice ovog priručnika:

.....

DRAFT 2025.1

27-01-2025
DRAFT 0.1

Popis literature

- [1] AAVSO Guide to Photometric Uncertainty. The American Association of Variable Star Observers, <https://www.aavso.org/sites/default/files/publications/Uncertainty-V9.pdf>
- [2] Iris tutorial: Make b&w master frames. http://www.astrosurf.com/buil/iris/tutorial2/doc91_us.htm, accessed: 2024-12-25
- [3] Iris tutorial: Preprocessing of digital slr camera images. http://www.astrosurf.com/buil/iris/tutorial3/doc13_us.htm, accessed: 2024-12-25
- [4] The AAVSO DSLR Observing Manual, Supplemental Information, Photometry Software Calibration and Photometry Tutorials, version 1.0. The American Association of Variable Star Observers (2016), <https://www.aavso.org/ccd-camera-photometry-guide>
- [5] The AAVSO DSLR Observing Manual, version 1.4. The American Association of Variable Star Observers (2016), <https://www.aavso.org/dslr-camera-photometry-guide>
- [6] AAVSO Guide to CCD/CMOS Photometry, version 1.0. The American Association of Variable Star Observers (July 2022), <https://www.aavso.org/ccd-camera-photometry-guide>
- [7] Howell, S.B.: Handbook of CCD Astronomy. Cambridge Observing Handbooks for Research Astronomers, Cambridge University Press, 2 edn. (2006)
- [8] Jiang, J., Liu, D., Gu, J., Süssstrunk, S.: What is the space of spectral sensitivity functions for digital color cameras? In: 2013 IEEE Workshop on Applications of Computer Vision (WACV). pp. 168–179 (2013), <https://doi.org/10.1109/WACV.2013.6475015>, (arXiv <https://www.gujinwei.org/research/camspec/camspec.pdf>)
- [9] Kolláth, Z., Cool, A., Jechow, A., Kolláth, K., Száz, D., Tong, K.P.: Introducing the dark sky unit for multi-spectral measurement of the night sky quality with commercial digital cameras. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer* **253**, 107162 (2020), <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022407319309653>
- [10] Solomatov, G., Akkaynak, D.: Spectral sensitivity estimation without a camera. In: 2023 IEEE International Conference on Computational Photography (ICCP). pp. 1–12 (2023), <https://doi.org/10.1109/ICCP56744.2023.10233713>, (arXiv <https://arxiv.org/abs/2304.11549>)

27-02-2025
DRAFT 0.1