



UNIVERZITET U NOVOM SADU
PRIRODNO-MATEMATIČKI
FAKULTET
DEPARTMAN ZA FIZIKU



Problematika konstrukcije i izrada amaterskog spektrografa

Diplomski rad

Mentor: prof. dr Tijana Prodanović

Kandidat: Atila Gobor

Novi Sad, 2016.

Mogu proračunati kretanje nebeskih tela, ali ne i ljudsko ludilo.
— Isak Njutn.

Sadržaj:

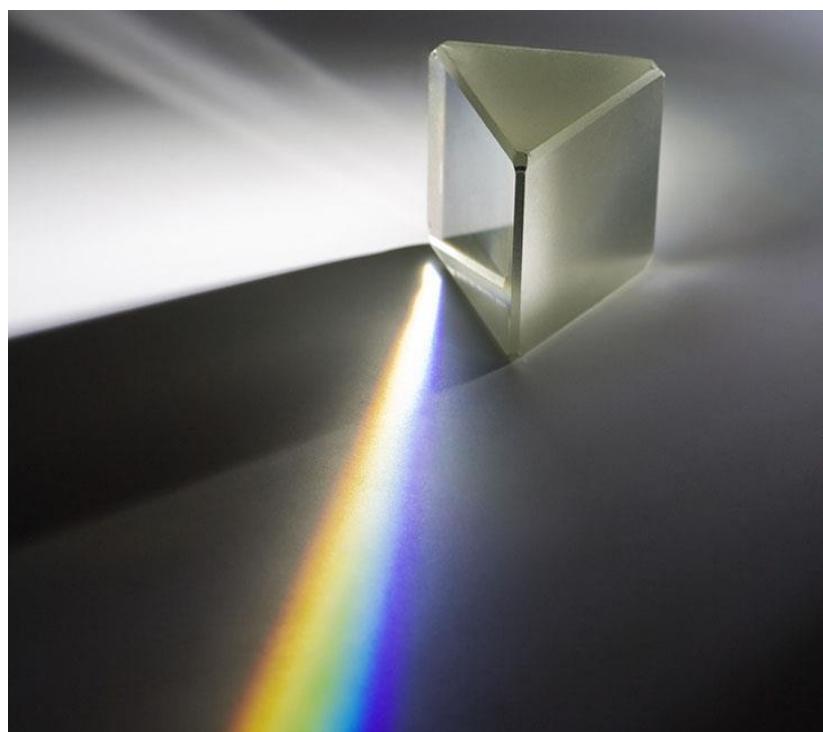
1. Uvod	4
2. Svetlost	7
3. Spektrograf	8
3.1. Prorez	8
3.2. Kolimator	9
3.3. Disperzionalni element – rešetka	9
3.4. Kamera	10
3.5. Detektor	11
3.6. CCD i CMOS	12
4. Dizajn	14
4.1. Teleskop	14
4.2. Prorez	15
4.3. Kolimator	18
4.4. Disperzionalni element	19
4.5. Kamera	20
4.6. Detektor	21
4.7. Kućište	22
5. Parametri spektrograфа	23
6. Konstrukcija	28
7. Greške, ograničenja i budući planovi	39
7.1. Težina i kompatibilnost	39
7.2. Orientacija kolimatore	40
7.3. Pivotna tačka spektrograфа	41
7.4. Udaljenost kamere od rešetke	42
7.5. CCD senzor	42
7.6. Kvalitetniji prorez	44
7.7. Montaža	44
7.8. Fotoaparat umesto CCD-a	45
8. Snimanje spektra, obrada i rezultati	46
9. Zaključak	53
10. Literatura	54

1. Uvod

Isaac Newton (4. januar 1643 - 31. mart 1727) je bio poznati engleski fizičar, matematičar, astronom, alhemičar i filozof, koji je za većinu ljudi verovatno jedna od najbitnijih ličnosti u istoriji nauke. Avgusta 1665. godine, na Stourbridge vašaru, Newton kupuje prizmu da istraži pojavu prelamanja svetlosti i da prouči neke eksperimente.

Newton je zatamnio svoju sobu i na zastoru je napravio jedan mali prorez kako bi ulazio samo uzan snop svetla. Postavio je prizmu u snop svetla i, naravno, na zidu su mu se prikazale dugine boje (crvena, narandžasta, žuta, zelena, plava, indigo i ljubičasta). Decenijama se smatralo da je bela svetlost "najčistiji" oblik energije u univerzumu, simbol "Božije moći". Newton je upravo tada dokazao da bela svetlost nije "čista". Svi su znali šta se dešava kada se bela svetlost pusti kroz prizmu, ali niko nije znao šta se dešava posle. Na primer, šta se dešava ako u spektar prizme dodate još jednu prizmu. Newton je pokazao da se boje spektra ne mogu dalje razbijati, odnosno da su elementarne. Izolovana crvena svetlost sa prve prizme se nije razložila u druge boje na drugoj prizmi. Bela boja je kompozitna - Newton je video da bela svetlost nije "čista", da je mešavina svih ostalih. Newton je tada opovrgnuo jedno od fundamentalnih verovanja ljudi njegovog vremena uz ponovljive demonstracione eksperimente.

Pre Newton-a, prizma je bila samo igračka. On je tog trenutka prizmu pretvorio u alat koji će promeniti način istraživanja sveta i svemira. 90% našeg znanja o svemiru i univerzumu potiče od prikupljanja svetla koje dolazi od zvezda, planeta, galaksija, i razdvajanja tog svetla u "elemente". Svetlost koja nam stiže sa ovih udaljenih objekata nam može otkriti hemijski sastav atmosfera planeta, sastav zvezda, može nam reći brzinu rotacije planeta, a sve to jer se Newton "igrao" sa bojama.



Slika 1. Prizma i efekat disperzije polihromatske svetlosti

Al-Farisi (puno ime: Kamāl al-Dīn al-Fārisī) i Thierry de Fribourg su još u 14. veku objasnili kako geometrija kapljice može da proizvede dugu, ali je Isac Newton mnogo kasnije, tek 1670. pretvorio to znanje u naučno rezonovanje i analizu spektra Sunca.

Između ostalog, Newton-ovi eksperimenti sa refrakcijom i prelamanjem svetla su pokazali da sočivo nikada neće dati čistu sliku bez interferencije. Po sredi je, zapravo, hromatska aberacija, optička mana, zbog koje se svetlost fokusira na različitim tačkama duž optičke ose sočiva. Zbog toga je i započeo rad na razvoju reflektorskih teleskopa.

Nakon Newton-a je usledila mala pauza u primeni prizme u nauci, sve do 1750. kada je Thomas Melvill (1726 - 1753) primetio da će dodavanjem zapaljivih alkoholnih pića u plamen sveće, prizma prikazati izraženu žutu liniju. Otprilike u isto doba je John Dollond (1706 – 1761), engleski optičar, otkrio da disperzija svetla nije ista kod svih stakala. Dollond je, na primer, dokazao da se kombinovanjem krunskog stakla i kristalnog stakla (olovno flint-staklo) pojava hromatske aberacije znatno umanjuje. Ovo je bio prvi dokaz da različiti tipovi stakla ne proizvode iste spekture.

Postoji jako malo dokaza i zabeleženih radova koji su se bavili spektrima, sve do 1700-tih kada je William Herschel (1738 – 1822) ubedio svog kolegu William-a Watson-a (1715 – 1787) da se posveti eksperimentima sa prizmom i posmatra spektre sjajnijih zvezda. 1797. godine su zabeleženi intenziteti i raspodela raznih boja u spektru, ali nije usledila nikakva dalja zainteresovanost za rad u tom domenu.

Josef von Fraunhofer (1787 - 1826) pristao je na izazov da izmeri disperziju stakla koje je sam proizvodio. U njegovo vreme je bilo veoma malo naučne analize kod proizvodnje stakla, jer je pravljenje stakla bilo umetnost, a ne nauka. On je pravio male prizme od raznih smeša stakala i svakoj je merio disperziju. Fraunhofer se ovako osigurao da mu svaka serija stakla u proizvodnji ispadne kako je on htio. Ovo znanje mu je dozvolilo da proizvodi najbolja sočiva tog vremena i njegovim velikim teleskopima su zavideli mnogi astronomi.

Kako bi unapredio svoj merni instrument, kojeg je nazvao "spektroskop", on je dodao prorez ispred kolimatorskog sočiva, što mu je dalo mnogo jasniju sliku spektra. On je takođe primetio da je spektar sunčeve svetlosti uvek imao tamne linije koje su stalno bile na istom mestu. Konačno, 1815. je zabeležio oko 324 linije, među kojima su jače izražene linije i dan danas zovu "Fraunhoferove linije". Iako on nije razumeo odakle potiču ove linije, našao im je korisnu primenu u svojim eksperimentima.

Za dalje unapređivanje spektralnih merenja, Fraunhofer je razvio difrakcionu rešetku. Rani primerci su bili napravljeni od veoma tanke žice namotane na ram. Spektri dobijeni sa ovim rešetkama su imali mnogo uniformniju skalu i bilo je mnogo laške meriti pozicije tamnih linija. Slobodno možemo reći da je Fraunhofer otac spektroskopije. On je izmislio i razvio spektroskop do te tačke da se mogao koristiti kao naučni instrument sa kojim se može posmatrati i meriti spektar.

Tek 1859. godine, Gustav Kirchhoff (1824 – 1887) i Robert Bunsen (1811 – 1899) konačno otkrivaju poreklo i rešavaju problem tamnih i svetlih linija u spektru. Njihovi eksperimenti su uverljivo pokazali da određeni hemijski elementi imaju svoje jedinstvene linije koje su u spektru

uvek na istom mestu. Kada je uspostavljena ova veza, mnogi hemičari su se posvetili pravljenju baze podataka sa linijama hemijskih elemenata.

Daljim radom i istraživanjima, Kirchoff je došao do tri zakona:

1. Usijana čvrsta tela, tečnosti ili gasovi na visokom pritisku proizvode kontinualan spektar.
2. Gas na visokoj temperaturi pri niskom pritisku proizvodi emisioni linijski spektar.
3. Gas na niskom pritisku ispred vrelog izvora kontinualnog zračenja daje spektar sa apsorpcionim linijama.

Sa ovim je konačno počela era konkretnih naučnih istraživanja u oblasti astrofizike. Publikacija Kirchoff-ovog i Robert Bunsen-ovog rada je privukla mnogo pažnje i uopšte je podigla svest o mogućnostima spektroskopa.

Auguste Comte je 1835. izjavio da ćemo jednog dana možda odrediti srednju temperaturu nebeskih tela, ali da će ostale informacije zauvek biti nedostupne. Pojava i implementacija spektroskopa u astronomskim istraživanjima je za relativno kratko vreme dokazala da Comte nije bio u pravu.

Naučni radovi i razni rezultati su počeli da se pojavljuju u sve većem broju. Angelo Secchi (1818 – 1878) je na vatikanskoj opservatoriji posmatrao spektre više od 4000 zvezda i razvio zvezdanu klasifikaciju koja se koristila narednih 50 godina. Edward Pickering (1846 – 1919) i njegov tim od preko 80 žena, među kojima su bile i Annie Jump Cannon, Henrietta Swan Leavitt i Antonia Maury, su na harvardskoj opservatoriji napravili katalog sa spektralnim pod-klasama zvezda. Tada je nastao i katalog sa poznatim: „W O B A F G K M“ oznakama čija se unapređena i dopunjena verzija koristi i danas.

Rad Henry-ja Rowland-a (1848 – 1901) oko usavršavanja difrakcionih rešetki, krajem 1882. godine, doneo je bitan pomak u proizvodnji istih. Velike difrakcione rešetke su polako izgurale upotrebu prizmi kod profesionalnih spektroskopa. Početak 19. veka je naznačio kraj "amaterskih" naučnih postignuća. Sve veći i veći teleskopi i veći spektroskopi su doneli bitne naučne rezultate koji su odredili pravac astrofizike u narednih 100 godina (Harrison, 2011).

2. Svetlost

Kao što znamo, naspram ostalih naučnih disciplina, astronomija je u dosta nezahvalnoj situaciji. Dok se mnoštvo naučnih oblasti oslanja na opipljive i ponovljive demonstracione eksperimente, astronomija se uglavnom bazira samo na posmatranjima. Sve što imamo na raspolaganju je delić svetlosti koji dolazi sa dalekih nebeskih tela, gde je svetlost nosilac informacije. Analizom svetlosti koja nam stiže sa ovih udaljenih objekata, možemo saznati nešto o njihovim fizičkim karakteristikama, kao što su hemijski sastav, temperatura, brzina kretanja i rotacije, itd.

Spektroskopija je naučna disciplina koja proučava interakciju elektromagnetskog zračenja i materije. Svetlost je elektromagnetni talas koji može da se prostire i u vakuumu jer predstavlja poremećaj u elektromagnetnom polju. Tri ključne osobine svih talasa, pa tako i svetlosti, su talasna dužina, frekvencija i brzina prostiranja.

Spektroskopija kao domen naučnog istraživanja igra veoma bitnu ulogu u astronomiji, ako ne i najbitniju. Uz pomoć nje smo u mogućnosti da dobijemo informacije o fizičkim uslovima na udaljenim nebeskim telima i u Vasioni.

Talasna dužina λ je rastojanje između dva maksimuma (ili minimuma) intenziteta i izražava se u jedinicama dužine. Frekvencija talasa v je broj maksimuma (ili minimuma) u vremenskom intervalu od jedne sekunde i izražava se u Hercima (oznaka: Hz). Brzina prostiranja talasa zavisi od sredine u kojoj se prostire, a kao referentnu sredinu uzimamo vakuum. To je ujedno i prema Ajnštajnovoj teoriji relativnosti maksimalna dozvoljena brzina koju je moguće dostići, a ona iznosi: $c = 300.000 \text{ km/s}$. To znači da su u slučaju svetlosti talasna dužina i frekvencija međusobno povezane: $\lambda v = c$.

Albert Ajnštajn (1879 – 1955) je 1905. godine predložio objašnjenje fotoelektričnog efekta preko apsorpcije zračenja u obliku fotona. Fotoni su čestice koje se mogu opisati kao elektromagnetni energetski paketi određene frekvencije. Primer fotona je svetlost, pored ostalih vidova elektromagnetnih talasa (radio talasa, infra-crvenog zračenja i sl.). Foton se zbog svojih osobina delom ponaša kao čestica, a delom kao talas, pa u nauci kažemo da svetlost poseduje dualnu, talasno-čestičnu prirodu. Osobine zbog kojih se foton ponaša kao čestica se manifestuju u fotoelektričnom efektu, dok su osobine zbog kojih ispoljava talasnu prirodu vidljive kroz difrakciju i interferenciju svetla.

Dakle, svetlost je elektromagnetni talas i obično se opisuje sa tri osobine: frekvencija v , talasna dužina λ i energija fotona E . Posmatrane frekvencije u oblasti astronomije idu od $2.4 \times 10^{23} \text{ Hz}$ pa sve do oko 1 kHz . Talasna dužina svetla je obrnuto proporcionalna frekvenciji, a vidljivu svetlost čini samo mali deo celokupnog spektra elektromagnetnog zračenja, i ona zahvata talasne dužine u opsegu od $380 - 750 \text{ nm}$. Energija elektromagnetnog talasa raste što joj je frekvencija veća, a čestična svojstva se sve više ispoljavaju što je talasna dužina manja.

$$\nu = \frac{c}{\lambda}, \quad f = \frac{E}{h}, \quad E = \frac{hc}{\lambda} \quad (1)$$

3. Spektrograf

Spektrometar je uređaj kojim se ispituju osobine i intenziteti komponenti elektromagnetskog spektra, a to su tipično talasna dužina, frekvencija i energija. U većini slučajeva se meri intenzitet svetla, ali možemo meriti i vrednosti drugih varijabli, kao na primer polarizaciju. U principu, spektrometar ne mora raditi samo u vidljivom delu elektromagnetskog spektra. Tipski se najčešće prave i koriste za merenje specifičanog dela elektromagnetskog spektra.

Spektroskop je uređaj uz pomoć kojeg možemo da razložimo svetlost po talasnim dužinama i posmatramo je golim okom, ali nam ne omogućava snimanje ili bilo koji vid merenja spektra.

Spektrograf je ono što nas u datom radu najviše zanima. To je instrument koji omogućava razlaganje elektromagnetskog zračenja po talasnoj dužini i frekvenciji, a ujedno i analizu spektra zračenja uz neki vid zapisa. Spektroografi se mogu koristiti za analizu vidljivog, infracrvenog i ultraljubičastog zračenja.

Iako postoji mnogo vrsta i modela spektrografa, osnovni elementi su kod svih isti. Oni dolaze u raznim oblicima i veličinama, baš kao i teleskopi, a svaki klasični spektrograf treba da ima: prorez, kolimator, disperzionalni element, kameru i detektor. Jedino je prorez komponenta čija se upotreba može preskočiti u zavisnosti od toga za šta će se spektrograf koristiti. Neki spektroografi su ciljno dizajnirani da budu efikasniji za, recimo, analizu spektra planeta, maglina, objekata dubokog neba, itd.

3.1. Prorez

Zašto je prorez toliko bitan? Spektralna slika koju projektuje sočivo kamere zapravo predstavlja oblik proresa na svakoj talasnoj dužini. Ovo je veoma bitno kod izvora koji nisu tačkasti i uveliko olakšava spektralnu analizu. Da nema proresa, spektar bi bio sačinjen od niza slika objekta, na različitim talasnim dužinama, koje bi se preklapale, što bi otežalo ili onemogućilo analizu spektra. Dakle, jedna od bitnijih uloga proresa je da eliminiše efekte koji potiču od veličine i oblika izvora kojeg analiziramo.

Dimenzijske i razmak od proresa variraju od instrumenta do instrumenta. Mogu biti fiksni, ali je najbolje kada spektrograf ima podesiv prorez. Optimalno je da prorez ima otvor od 20 do 50 μm , a prorez koji su tako uzani zahtevaju veoma preciznu izradu, te su veoma skupi. Međutim, glavni kriterijum dobrog proresa je da su mu noževi paralelni, glatki i tanki. U amaterskoj astronomskoj spektroskopiji se za prorez najčešće koriste obični, staromodni žileti brijača, koji inače daju veoma dobre rezultate (Harrison, 2011).

Veličina slike koja pada na prorez će zavisiti od teleskopa, tj. žižne daljine, kao i od uslova posmatranja. Odabir proresa takođe treba da zavisi i od teleskopa na kojem će se koristiti, razvojne moći kolimatorskog sočiva i osobina detektorskog čipa.

Jedan od najjednostavnijih načina za podešavanje proreza je uz pomoć lasera. Kada monohromatska svetlost prolazi kroz uzan otvor, dolazi do interferencije i na zaklonu možemo videti interferencione maksimume. Merenjem udaljenosti između interferacionih tačaka x i udaljenosti zida D , možemo izračunati otvor proreza preko sledeće formule:

$$S = 3D \cdot \lambda \cdot 10^{-3} / x \quad (2)$$

gde je:

λ – talasna dužina lasera (\AA),

S – otvor proreza,

D – udaljenost od zaklona,

x – udaljenost između prva dva interferaciona maksimuma.

3.2. Kolimator

Kolimator je optički element, koji može biti jedno sočivo ili sklop sočiva, a funkcija mu je da primi divergentnu svetlost koja dolazi sa proreza i da od nje napravi paralelan snop koji će biti dovoljno velik da osvetli disperzionalni element (prizmu, rešetku, grizmu itd.). To znači da je položaj svetlosti različitih talasnih dužina isključivo posledica razlaganja svetlosti na disperzionom elementu. Poželjno je da kolimator ima istu žižnu daljinu F kao i teleskop. Ako je žižna daljina kolimatore veća od teleskopske (na primer: F8 kolimator na F6 teleskopu), onda će veliki deo svetlosti promašiti disperzionalni element. Ako kolimator i teleskop nemaju dobar F-odnos, možemo dobiti nepotpuni kolimator ili drugi nepoželjni slučaj, kada imamo prepunjeno kolimator i gubimo zračenje, tj. informacije. Ako već nismo u mogućnosti da uparimo teleskop i kolimator, bolje je da imamo F8 kolimator na F10 teleskopu, jer tako nećemo gubiti informacije i imaćemo samo mali pad u rezoluciji.

Kolimator mora da ima opciju preciznog fokusiranja na prorez kako bi proizveo paralelni snop. Zato i prorez mora da se nalazi na optičkoj osi kolimatora i tačno u fokusu njegovog sočiva. Optički kvalitet kolimatora mora da bude dovoljno dobar da obezbedi oštru i neizobličenu projekciju proreza (Harrison, 2011).

3.3. Disperzionalni element - rešetka

Svaki spektrograf je dizajniran da razdvaja svetlost po talasnim dužinama i da ga raširi u "šarenu traku" koja se stručno naziva spektar, a taj fenomen razlaganja se zove disperzija. Disperziju vrši disperzionalni element kod kog prepoznajemo nekoliko vrsta, a neka najosnovnija podela bi bila na: prizmu, difrakcionu rešetku (refleksivnu ili transmisionu) i grizmu (*grating + prism*). Zadatak disperzionalnog elementa je da zračenje koje prima razloži na talasne dužine, tako da se različite talasne dužine projektuju na različitim mestima, tj. da proizvede spektar.

Dok prizma za disperziju koristi efekat refrakcije, difrakciona rešetka koristi difrakciju. Difrakcija talasa je zapravo savijanje talasa (i mehaničkih i elektromagnetskih) oko neke prepreke. Ovaj efekat je najuočljiviji za talasne dužine koje su reda veličine prepreke. U kojoj meri će savijanje talasa biti izraženo oko prepreke, zavisiće od odnosa veličine prepreke (veličine proreza / zareza rešetke) i talasne dužine talasa.

Prilikom difrakcije dolazi do konstruktivne interferencije, kada se maksimum jednog talasa poklapa sa maksimumom drugog talasa i destruktivne interferencije, kada se maksimumi jednog talasa poklapaju sa minimumima drugog talasa. Talasi se sabiraju i poništavaju i tako dobijamo interferencione maksimume, odnosno minimume, koji se ponavljaju, a položaj određenog maksimuma ili minimuma će zavisiti od talasne dužine zračenja, kao i od osobina samog disperzionog elementa.

Najpopularniji disperzioni element, koji je dostupan amaterima, je difrakciona rešetka. Za profesionalne namene se uglavnom koriste refleksivne rešetke, jer na njima nema gubitaka zračenja, što nije slučaj sa difrakcionim rešetkama gde zračenje prolazi kroz neki sloj materijala i deo elektromagnetskog zračenja se apsorbuje ili čak odbija i rasipa.

Rešetke su dostupne sa različitim gustinama, od 150 do 2400 zareza (linija). Broj zareza se uglavnom označava samo sa brojem, što znači da rešetka ima dati broj zareza po jednom milimetru (1/mm). Na primer, rešetka sa 2400 zareza ima veliku moć razlaganja, a time ujedno i potencijalno veliku rezoluciju, ali će ta rešetka dati veoma široku sliku spektra. To znači da slika spektra neće celo stati u vidno polje kamere i biće neophodno slaganje nekoliko očitavanja da bi se zabeležio ceo spektar (Harrison, 2011).

3.4. Kamera

Otvor blende, tj. promer sočiva, treba da bude dovoljno velik da bi sakupio svu difraktovanu svetlost sa disperzionog elementa, a u našem slučaju sa rešetke. Veličina slike koja se projektuje na senzor tj. na CCD (*Charge-Coupled Device*) iznosi:

$$I_s = S \cdot F_2/F_1 \quad (3)$$

gde je S otvor proreza (μm), F_1 žična daljina kolimatora, a F_2 žična daljina kamere. Odnos F_2/F_1 je zapravo faktor uvećanja. U praksi bi ovo značilo da prorez kojem je otvor $50\mu\text{m}$, može da se projektuje na CCD kao slika širine $25\mu\text{m}$ ako se za kolimotor odabere sočivo duplo veće žične daljine od one koju ima kamera (primera radi: $F_1=200\text{mm}$, $F_2=100\text{mm}$). Sa ovim „trikom“ se može umanjiti efekat linearne disperzije, čime dobijamo kraći i jači (svetlijii) spektar. U zavisnosti od veličine piksela CCD-a, ovo čak može i poboljšati učinak spektroskopa. Poželjno je da sočivo kamere bude u mogućnosti da fokusira ceo spektar na CCD zbog lakoće rukovanja (Harrison, 2011).

Sa druge strane, fokusiranjem samo određenog dela spektra na senzor, može se postići veća spektralna rezolucija. Spektralna rezolucija je najmanja razlika talasnih dužina koja se može

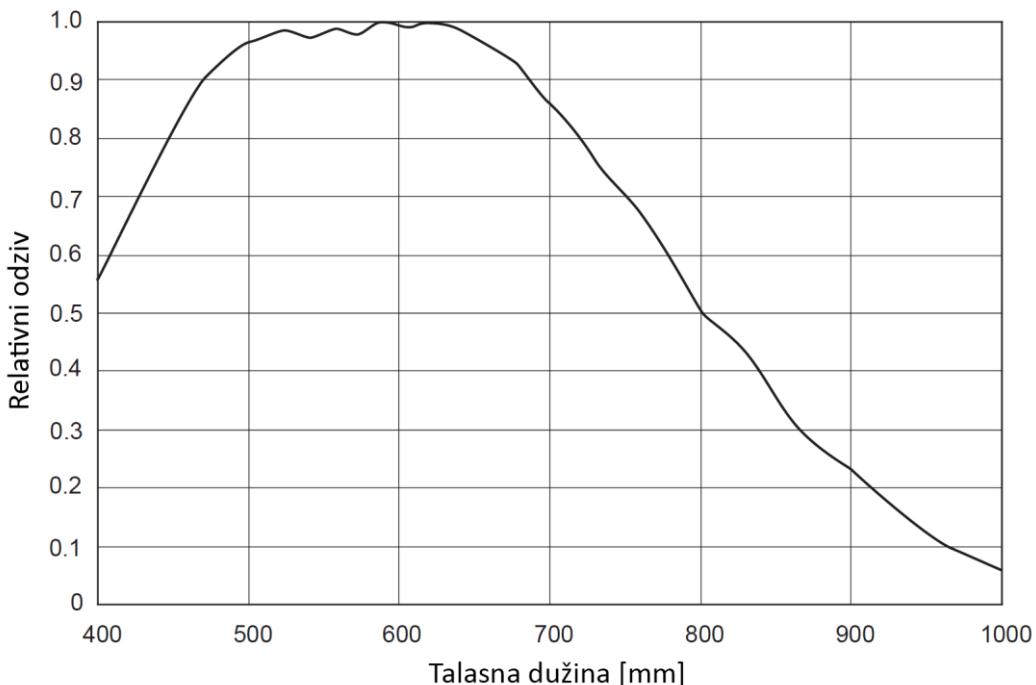
meriti, tj. najmanja razlika pri kojoj dve bliske talasne dužine vidimo razdvojeno. Da bi dve spektralne linije bile razdvojene, rastojanje između položaja centara ovih linija (maksimalan intenzitet linije), tj. razlika njihovih talasnih dužina, mora biti veća ili jednaka širini linije na polovini maksimuma intenziteta (Prodanović, 2008).

3.5. Detektor

U astronomiji postoje četiri glavne metode za upošljavanje CCD-a, a tu spadaju: snimanje (slikanje), astrometrija, fotometrija i spektroskopija. Mi ćemo se naravno baviti primenom CCD-a u spektroskopiji. Za namene snimanja spektra, najbitnije osobine nekog detektorskog čipa su:

- dimenzije čipa;
- veličina piksela;
- kvantna efikasnost;
- šum struje mraka.

Prve dve stavke se odnose na fizičke osobine senzora, tj. na njegovu veličinu. Dakle, veći senzor može da primi više informacija. Kvantna efikasnost predstavlja mogućnost senzora da signal upadnih fotona pretvori u merljivi električni signal. Kvantna efikasnost se u literaturi često označava sa η ili QE . Efikasnost čipa se često predstavlja i preko krive za relativni odziv. Primer jedne ovakve krive se može videti na slici 2. Većina senzora će imati manju osetljivost u infracrvenim i ultraljubičastim oblastima, dok će maksimum odziva biti negde u zelenom delu spektra.

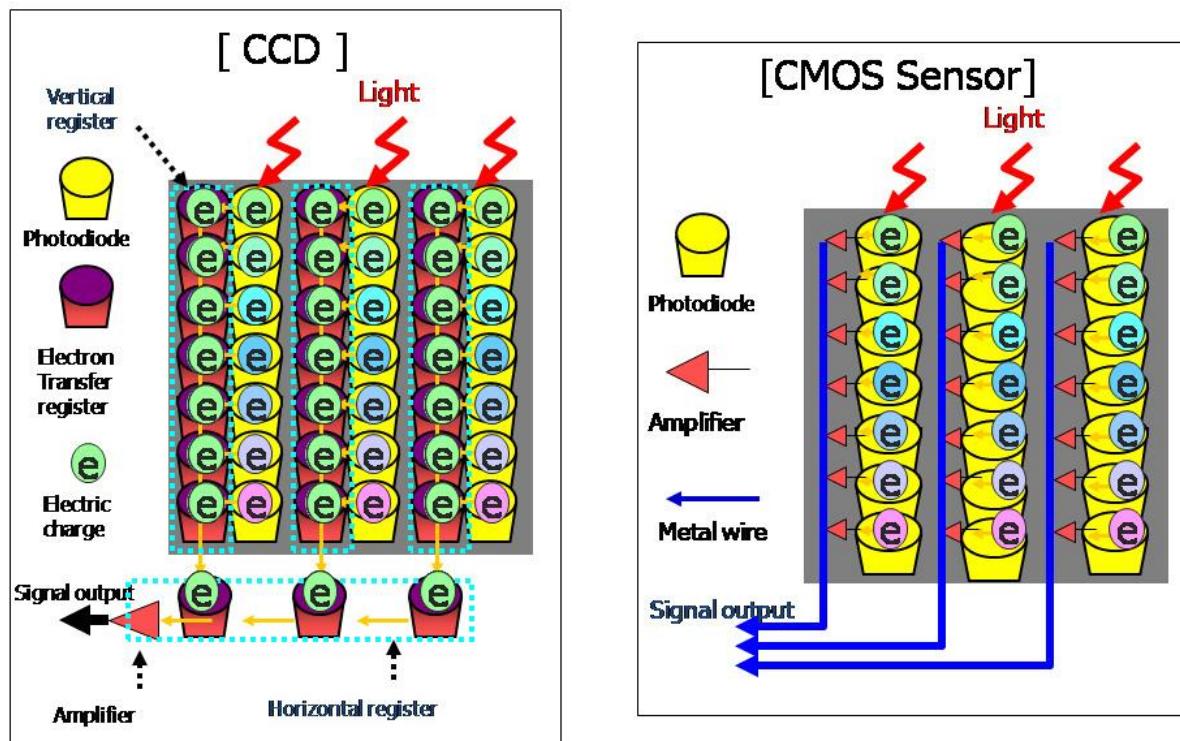


Slika 2: Primer relativne efikasnosti senzora u zavisnosti do talasne dužine

Veći senzorski čip će očigledno biti u prednosti jer u jednom trenutku može da registruje veći deo, ako ne i celokupan spektar. Da li će senzor biti u mogućnosti da snimi ceo spektar u jednoj slici će zavisiti od dimenzija čipa, veličine piksela, žižne daljine kamere, broja zareza na disperzionom elementu i posmatranog spektralnog reda.

3.6. CCD i CMOS

Glavne razlike između CMOS (Complementary Metal-Oxide Semiconductor) i CCD čipova su načini iščitavanja informacija sa piksela. CCD čip serijski prenosi električni signal svakog piksela, dok kod CMOS-a svaki piksel poseduje svoje kolo za iščitavanje signala.



Slika 3. Šematski prikaz funkcionisanja CCD i CMOS senzora
(preuzeto sa: <http://www.digitalbolex.com/global-shutter>)

Upošljavanje nekog digitalnog fotoaparata (CMOS čipa) umesto namenskog astronomskog CCD čipa može imati prednosti, ali i mane. Odabir jednog ili drugog tipa senzora dolazi uz dosta kompromisa koji su vezani za veličinu senzora, odnos signala i šuma, dinamički opseg i nama verovatno najbitniju stavku – cenu.

CMOS čipovi u komercijalnim DSLR fotoaparatima su uglavnom opremljeni sa infracrvenim i ultraljubičastim filterima. To znači da je njihovo "vidno polje" ograničeno na talasne dužine od 400 do 700nm, dakle veći deo opsega vidljivog svetla.

Treba spomenuti i razlike između CMOS čipova koji se korite u komercijalnim fotoaparatima i kamerama, i sCMOS čipova koji se koriste u naučne svrhe. Oznaka "s" stoji iza engleske reči "*scientific*", a razvoj tehnologije je, u poslednjih nekoliko godina, ovu vrstu senzora učinio adekvatnom alternativom u svetu nauke.

Postoje i komercijalne CMOS kamere koje su namenjenje astronomima amaterima, i to modeli sa cenom od 150 - 300 evra, koji bi bili pogodni i za spektroskopiju.

4. Dizajn

Dizajn spektrograфа o kome ће ovde biti reči, poprilično je staromoran, jer je i sama ideja o konstruisanju amaterskog spektrograфа stara nekoliko godina. Nakon par meseci izučavanja tuđih amaterskih spektrograфа po Internetu i sumiranja šta zapravo imamo na raspolaganju za naš spektrograf, doneta je i odluka za dizajn. Za konstrukciju je odabran lim debljine 1mm, a ostatak dizajna su diktirale komponente koje smo imali na raspolaganju. Inicijalni plan je bio da se koristi metalna konstrukcija u kombinaciji sa sitnjim delovima – nosačima, koji bi se izrađivali od aluminijuma.

4.1. Teleskop

Pre nego što se upustimo u konstrukciju spektrograфа, treba da spomenemo i teleskop koji smo koristili, jer izbor dizajna spektrograфа može da zavisi od tipa teleskopa na kom će se koristiti. U pitanju je teleskop Astronomskog društva Novi Sad (ADNOS), model Skywatcher AP 80/600 ED OTA, inače refraktorski teleskop, sa veoma kvalitetnom optikom.

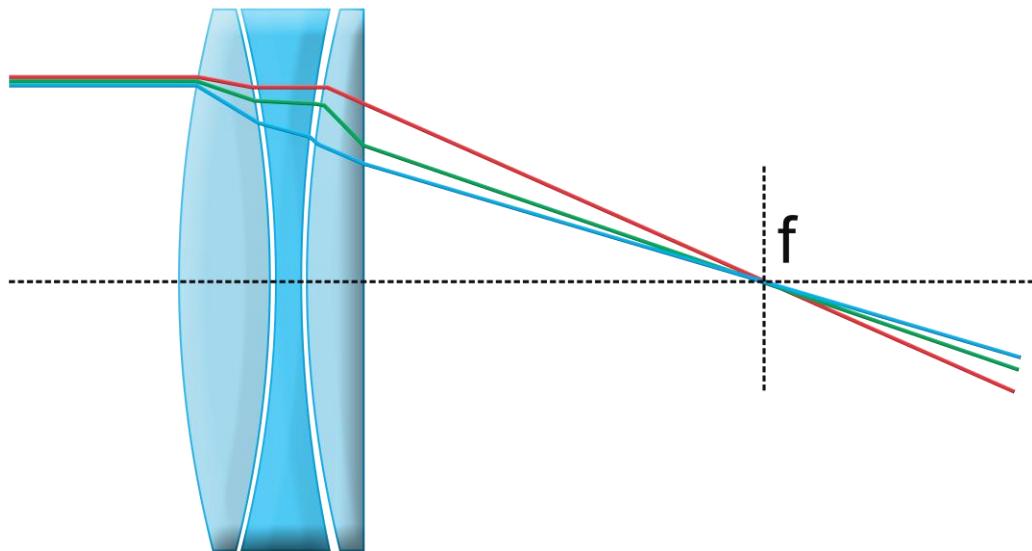


Slika 4. Skywatcher AP 80/600 ED OTA refraktorski teleskop

Ovaj refraktorski teleskop će nam pružiti veoma dobru prolaznost svetla, čak do 99,5% i to prvenstveno iz razloga što ima kvalitetne optičke elemente i nema sekundarno ogledalo koje zaklanja deo svetlosti. Sa prečnikom objektiva od 80mm, žižnom daljinom od 600mm i ED dubletom sočiva, ovaj teleskop nudi brz optički sistem sa svojim F/7.5 odnosom žiže i objektiva. "Dublet" znači da se koriste dva sočiva, a "ED" označava upotrebu FPL-53 ED "Extra Low Dispersion Glass" stakla, u prevodu, skoro uopšte nema hromatske aberacije.

Skywatcher koji nam je na raspolaganju je zapravo apohromat, što znači da efikasno otklanja hromatsku i sfernu aberaciju, a takvi optički sistemi se po pravilu sastoje od tri elementa.

Skywatcher AP 80/600 ED OTA, uz pomoć dva sočiva i specijalnih premaza na sočivima, postiže otklanjanje sferne i hromatske aberacije, te se ponaša kao apohromat.

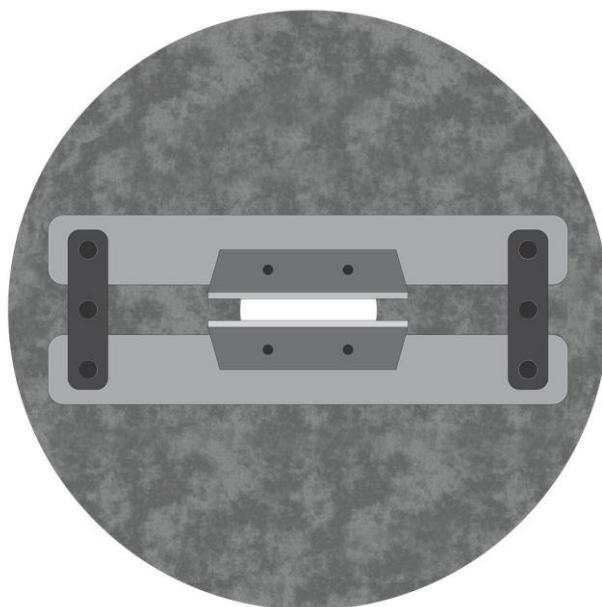


Slika 5. Uobičajena postavka apohromatskog sočiva

4.2. Prorez

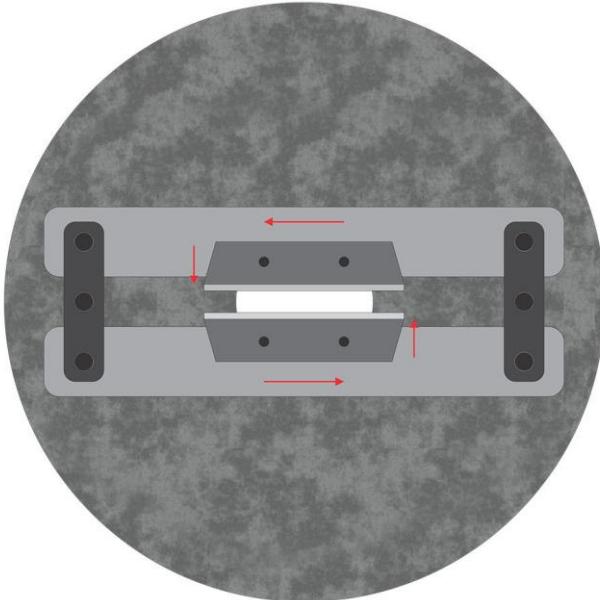
Prorez koji smo koristili na spektrografu, obezbedio nam je Janko Mravik iz AD Univerzuma (Astronomsko Društvo Bačka Palanka). Inače, izrada proreza je veoma delikatan i precizan posao, a kupovina profesionalnih proreza iziskuje budžet od par stotina evra. Prorez koji smo mi imali na raspolaganju koristi jednostavan sistem poluge za otvaranje i zatvaranje noževa, putem kojeg se vrši izolacija posmatranog objekta.

Slede jednostavne skice sistema po kojem funkcioniše prorez na našem spektrografu.



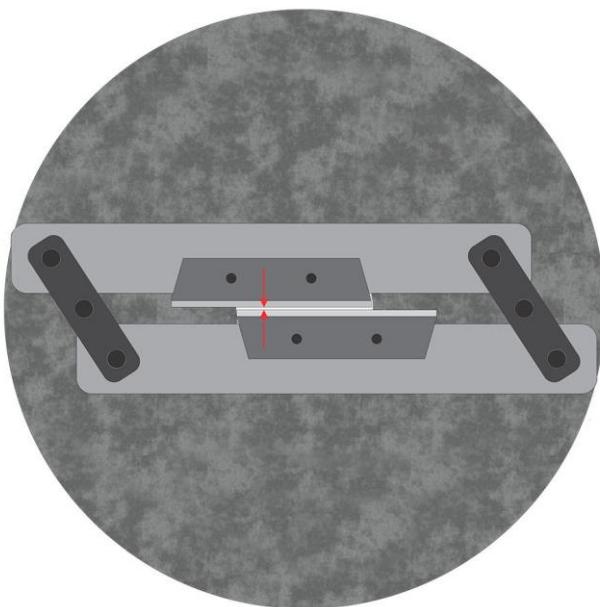
Slika 6. Skica upotrebljenog proreza u spektrografu

Sa kretanjem nosača (svetlo-sivi delovi) levo, odnosno desno, noževi se jednostavno približavaju jedan drugom i ostaju paralelni.



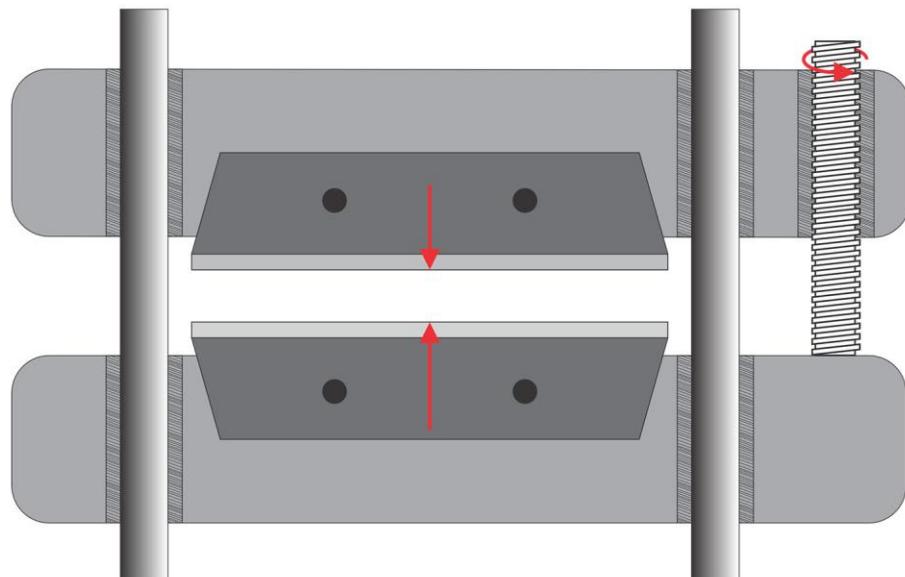
Slika 7. Skica zatvaranja noževa na prorezu

Iako je mehanizam dosta jednostavan, omogućava veoma fina podešavanja razmaka proreza.



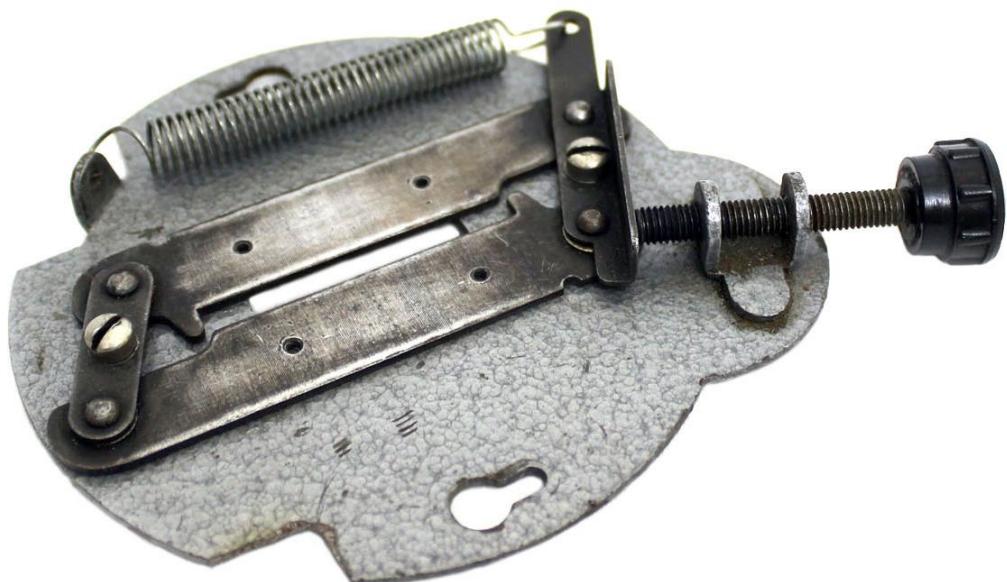
Slika 8. Skica skoro potpuno zatvorenog proreza

Izračunavanje širine proreza je veoma kompleksan i iscrpan posao, što je ujedno i mana ovakvog proreza. U slučaju linearног proreza (slika 9.), izračunavanje širine je mnogo lakše na osnovu gustine navoja preko kojeg se prerez otvara i zatvara. Svojeručna izrada linearног kliznog proreza je iz tehničkog aspekta mnogo izazovnija i komplikovanija, i zahteva precizne komponente.



Slika 9. Skica linearog proreza

Na sledećim fotografijama možete videti izgled proreza koji smo koristili. Tačnije, samo nosač i mehanizam bez noževa.



Slika 10. Nosač noževa i mehanizam proreza

Od esencijalnog je značaja da su oštice noževa paralelne i da su u istoj ravni. Takođe je bitno da orientacija proreza bude paralelna sa disperzionom osom. Ukoliko ovi uslovi nisu zadovoljeni, možemo očekivati razne vidove nepoželjnih smetnji u spektralnim linijama. Na sledećoj fotografiji su vidljivi montirani noževi na mehanizmu od proreza.



Slika 11. Noževi na spektrografu, otvoreni otprilike 0.3mm

U slučaju kada noževi nisu u istoj ravni, a zbog refleksije na njima, dešava se nepoželjno širenje spektralne linije na jednu stranu.

4.3. Kolimator

Naša postavka spektrograфа za kolimator koristi objektiv starog fotoaparata, a u pitanju je Carl Zeiss Biometar 2.8/80.

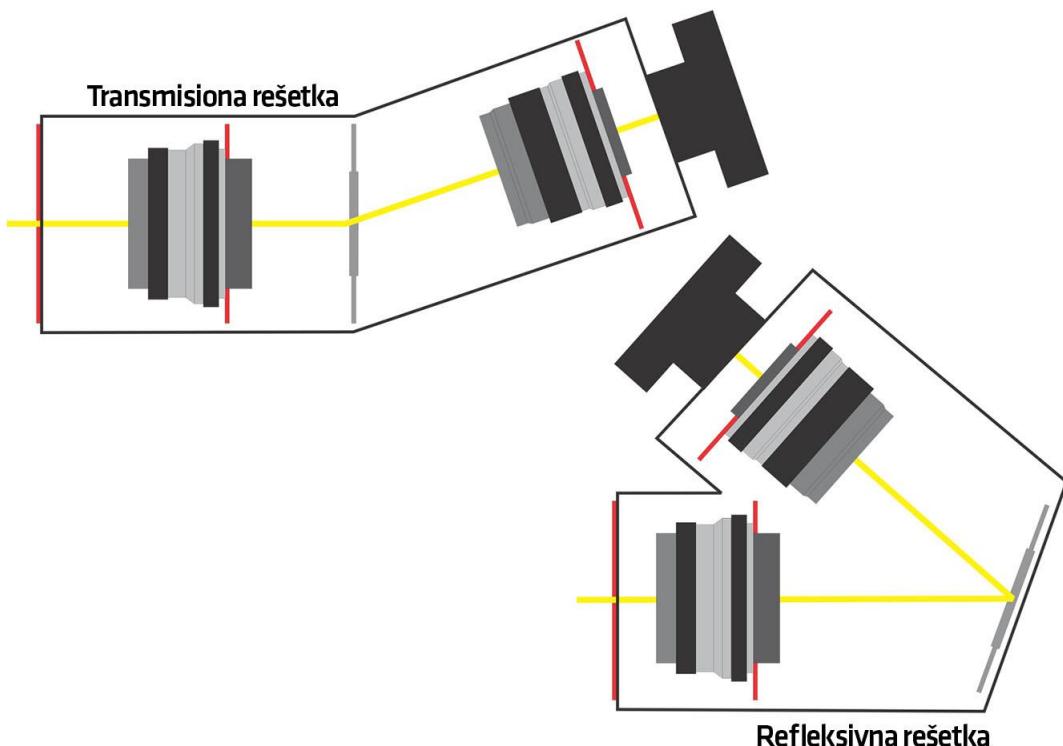


Slika 12. Objektiv koji je korišćen za kolimator

Bilo bi poželjno da umesto celog metalnog mehanizma i konstrukcije objektiva imamo samo sočivo u nosaču, što bi bilo znatno laganje. Sa druge strane, očekivali smo da preciznost izrade neće biti na najvišem nivou, pa će mogućnost fokusiranja putem objektiva biti veoma korisna.

4.4. Disperzioni element

Dostupnost i cena refleksionih rešetki su odgovorne što za naš prvi projekat koristimo najjednostavniju transmisionu rešetku. Refleksiona rešetka bi bila poželjnija, kako iz ugla efikasnosti, tako i iz ugla samih dimenzija spektrograфа, a transmisiona rešetka koju smo koristili ima 500 zareza po milimetru.



Slika 13. Prostorne prednosti refleksivnog disperzionog elementa

Pored toga što na refleksivnoj rešetki nema gubitaka, slika 13. veoma jasno pokazuje prednosti iz ugla dizajna i kompaktnosti spektrograфа. Korišćenjem refleksivne rešetke, spektrograf dobija zbijeniju konstrukciju i centar mase ostaje bliže teleskopu.

To znači da bi opterećenje na montaži, motorima za praćenje i samom teleskopu, bilo znatno manje. Druga prednost iz ugla izrade je da se refleksivna rešetka može lako okretati oko svoje ose, u slučaju da CCD nije dovoljno velik da snimi ceo spektar iz jednog puta.



Slika 14. Difrakciona rešetka u zaštitnoj kaseti

Dimenzije našeg disperzionog elementa, transmisione difrakcione rešetke, su 36mm po visini i 24mm po širini. Plastična kaseta je pogodna da zaštići rešetku od oštećenja i prljavštine, ali bi idealno bilo da za vreme snimanja spektra transmisiona rešetka bude gola, radi veće efikasnosti.

4.5. Kamera

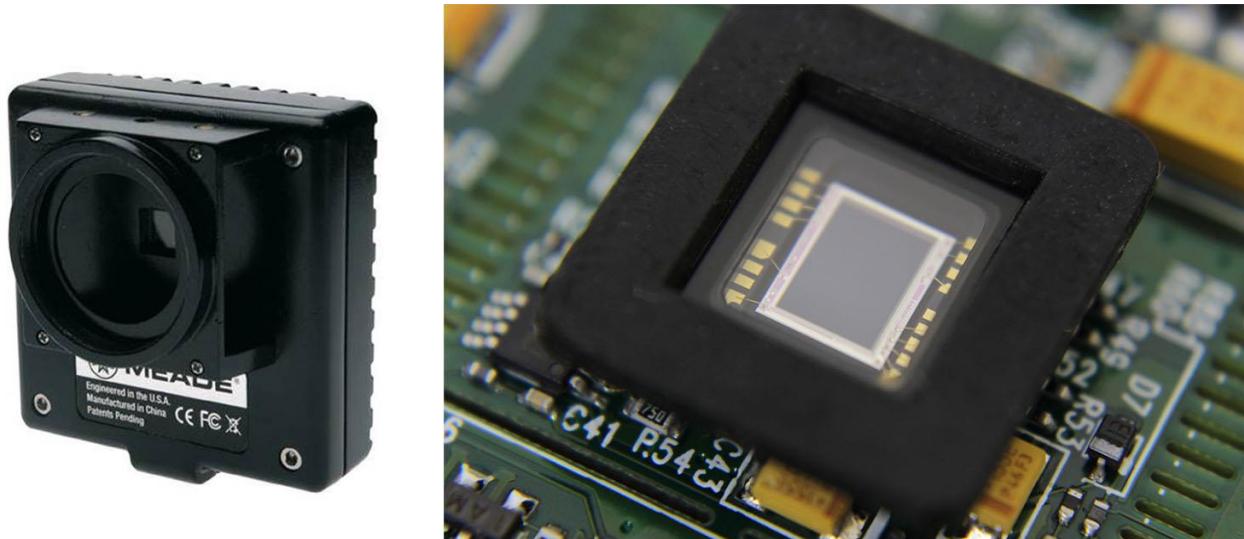
Kao element za fokusiranje spektra na detektor, opet će se koristiti objektiv od fotoaparata. Objektiv je oznake Helios 44M 2/58, široko rasprostranjeni model u regionu, koji se može naći na starim Zenit fotoaparatima. U ovom slučaju bi takođe bilo zgodnije da umesto masivnog objektiva koristimo samo sočivo, iako se ispostavilo da je opcija fokusiranja neophodna zbog greške u dizajnu našeg spektrografa.



Slika 15. Objektiv koji je korišćen za kameru

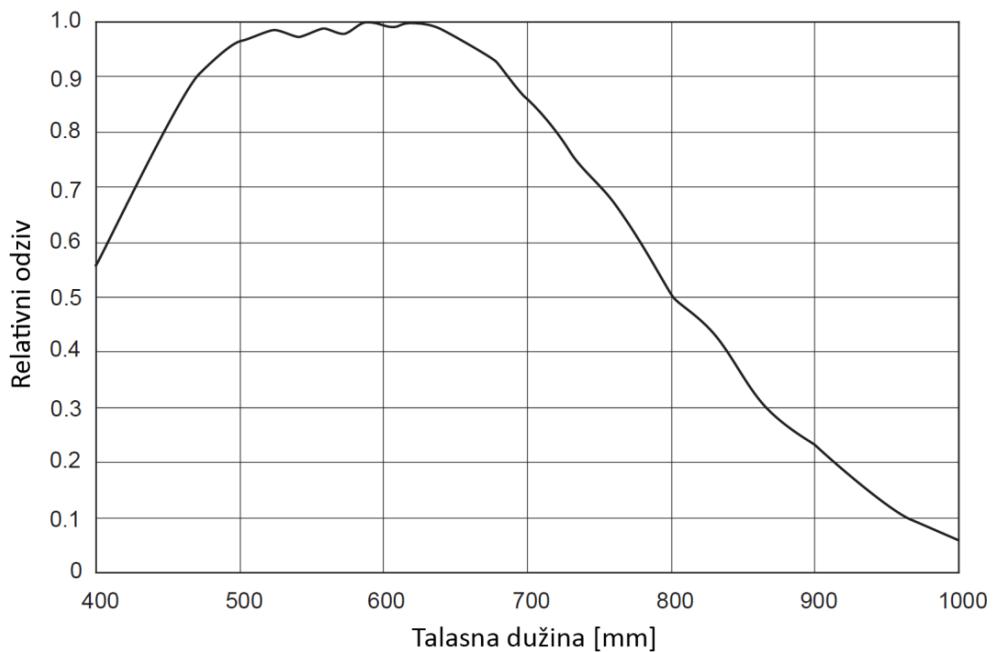
4.6. Detektor

Kao detektor smo koristili Meade Deep Sky Imager Pro, koji možda nije "poslednja reč tehnologije", ali je za naše "početničke" zahteve više nego dovoljan. Detektor primenjuje High Sensitivity Sony® ExView HAD™ monohromatski CCD senzor sa rezolucijom od 510 x 492 piksela.



Slika 16. Kućište Meade DSI Pro detektora (levo) i makro fotografija samog senzorskog čipa (desno)

Dimenzije jednog piksela su $9,6 \times 7,5$ mikrona (visina x širina). Čip koristi 16-bitnu A/D (analogno-digitalnu) konverziju, što mu daje solidan kontrast. Raspon minimalne i maksimalne ekspozicije ide od 1/10,000 sekunde ili do jednog sata. Tačna oznaka Sony CCD-a glasi: ICX254AL, na osnovu čega smo mogli potražiti detaljnije specifikacije samog senzora. Spomenućemo da CCD nema ugrađeni infracrveni filter, kao i njegovu osetljivost u vidu grafikona:

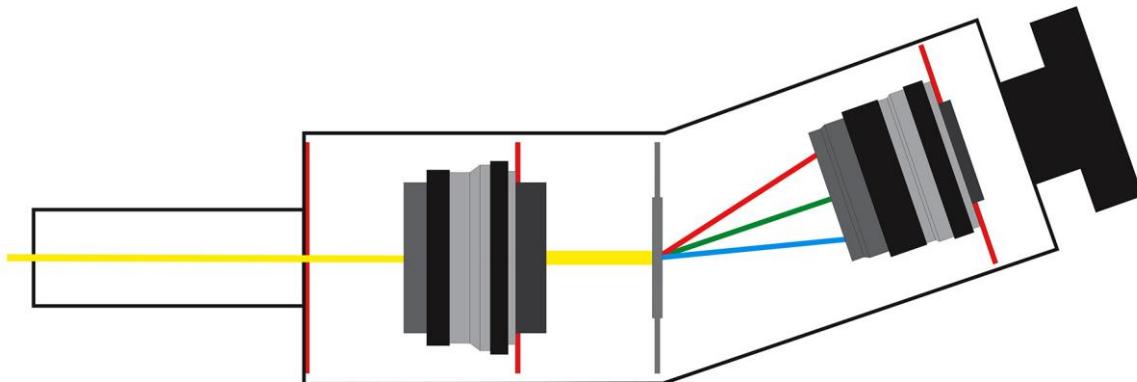


Slika 17. Relativna osetljivost ICX254AL senzora u zavisnosti od talasne dužine

CCD čip „vidi“ od 400nm pa naviše, i dostiže maksimum osetljivosti na oko 500nm u oblasti prelaska između zelene i plave boje. Treba imati na umu i da je Meade Deep Sky Imager Pro prvenstveno predviđen za astrofotografiju, a ne za upotrebu u sklopu spektrograфа. Pošto će nam slika spektra padati po dužini senzora, najviše ćemo se obazirati na broj piksela po dužini čipa $N=510$ i na širinu piksela po toj orientaciji $p=9.6\mu\text{m}$.

4.7. Kućište

Samo kućište je takođe bitan faktor u izradi spektrograфа. Njegova osnovna namena je da blokira svu moguću okolnu svetlost, tako da na senzor pada samo spektar posmatranog objekta. Pre same izrade i odabira materijala za kućište, napravljen je grub nacrt konstrukcije.



Slika 18. Skica dizajna celokupnog spektrograфа

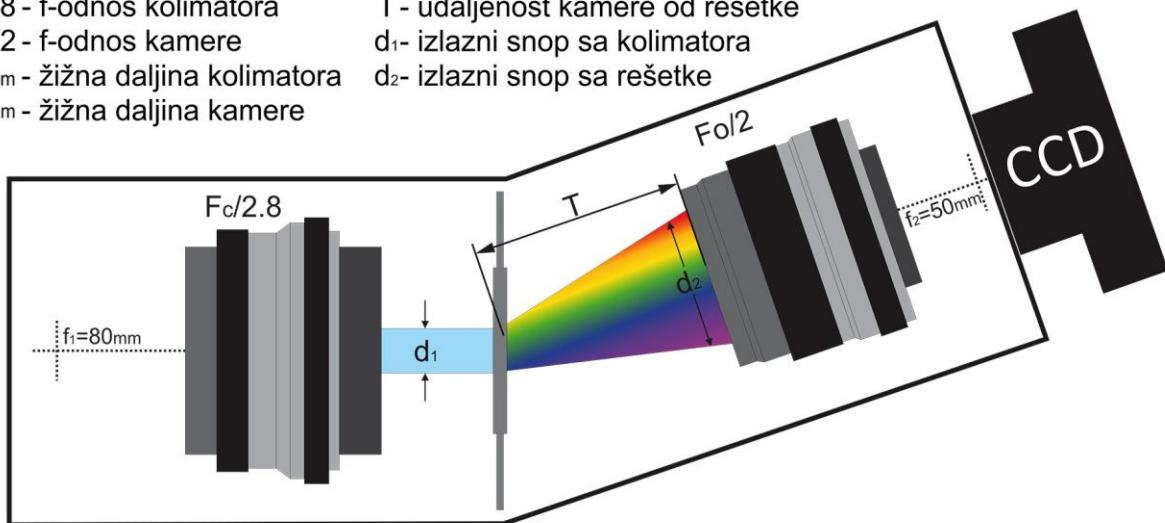
Upotrebom transmisione rešetke, koja ima 500 zareza po milimetru, spektar difraktovane svetlosti, tj. ugao difrakcije β možemo očekivati između uglova od 13° do 22° naspram ose upadne svetlosti. Ovo će od konstrukcije zahtevati da ima pivotnu tačku nakon disperzionog elementa, kako bi kamera mogla da skenira ceo spektar. Konstrukcija pivotnog sistema, koji bi bio precizan i stabilan za „listanje“ kroz spektar, bila je jedan od najvećih izazova tokom izrade spektrograфа.

5. Parametri spektrograфа

Pošto znamo osobine svih komponenti koje ćemo koristiti u spektrografu, možemo se posvetiti izračunavanju i analizi njegovih parametara. Dizajn spektrograфа i odabir komponenti su međusobno uslovljeni, te ćemo se u par navrata osvrnuti na to kako komponente utiču jedna na drugu. Da bismo se bolje snalazili sa proračunavanjem parametara spektrograфа, vizuelno smo označili njegove ključne elemente.

$F_c/2.8$ - f-odnos kolimatora
 $F_t/2$ - f-odnos kamere
 $f_1=80\text{mm}$ - žižna duljina kolimatora
 $f_2=50\text{mm}$ - žižna duljina kamere

T - udaljenost kamere od rešetke
 d_1 - izlazni snop sa kolimatora
 d_2 - izlazni snop sa rešetke



Slika 19. Skica spektrograфа sa oznakama komponenti

Prorez na spektrografu treba da je u fokusu teleskopa, a fokus našeg Skywatcher AP 80/600 teleskopa se najlakše određuje projekcijom slike Sunca ili Meseca na neki zaklon. Određivanje udaljenosti kolimatora od proresa se vrši tražiocem koji je fokusiran u beskonačnost. Gledanjem kroz tražioc i objektiv kolimatora, treba podešavati udaljenost proresa dok se ne dobije fokusirana slika samih noževa na prorezu. U našem slučaju, nosač kolimatora treba da je postavljen na 87,5mm od nosača proresa.

Teleskop u upotrebi ima prečnik objektiva od 80mm i žižnu duljinu od 600mm, što znači da ima odnos žiže i objektiva od $F/7.5$. Kolimator treba da bude dovoljno velik da propusti svu svetlost koja dolazi sa teleskopa, a to će biti zadovoljeno ako je F odnos kolimatora F_c manji od F odnosa teleskopa F_t .

$$F_c < F_t \quad (4)$$

U našem slučaju, taj uslov je i više nego zadovoljen sa $F_c/2.8 < F_t/7.5$.

Širinu izlaznog snopa d_1 iz kolimatora će nam dati odnos žižnih duljina kolimatorskog objektiva f_1 i teleskopa f_t , pomnožen sa prečnikom objektiva teleskopa D .

$$d_1 = D \frac{f_1}{f_t} = 80\text{mm} \frac{80\text{mm}}{600\text{mm}} \quad (5)$$

Naš Skywatcher refraktorski teleskop i kolimatorski 2.8/80 objektiv, daće izlazni snop širine 10,67mm. Ovo je relativno uzan snop i kolimator sa žičnom daljinom od, recimo, 160mm bi bio bolji izbor, jer bi nam dao duplo širi snop svetla. Pošto znamo da je naš snop svetla 10,67mm, treba da se postaramo da disperzionalni element bude bar toliki ili veći. Pošto je naša rešetka 36x24mm, zadovoljen je i taj uslov.

Transmisiona rešetka sa 500 zareza po milimetru će prvi spektralni red za talasnu dužinu $\lambda_1 = 4500\text{\AA}$ dati pod uglom od $\beta_1 = 13,00^\circ$, dok će za $\lambda_2 = 7500\text{\AA}$ biti na $\beta_2 = 22,02^\circ$. Ovo je moguće izračunati uz pomoć jednačine za transmisionu rešetku, ukoliko znamo da je za našu rešetku $d = 1/500\text{mm}$:

$$\sin \beta = n\lambda/d \quad (6)$$

gde je β ugao difrakcije, a n označava posmatrani spektralni red.

Odnos žične duljine kolimatora f_1 i kamere f_2 , f-odnos teleskopa F_t , broja piksela N , širine piksela p i udaljenosti kamere od rešetke T , odrediće minimalni dozvoljeni prečnik kamere d_2 , sa kojim bismo izbegli gubitke na objektivu:

$$d_2 = \cos \beta \frac{f_1}{F_t} + \frac{T \cdot p \cdot N}{f_2} \quad (7)$$

U postavci ovog spektrograфа, nosač kamere se nalazi na razmaku od 115mm od disperzionog elementa, što znači da je prvo sočivo objektiva kamere na $T=65\text{mm}$.

$$\begin{aligned} d_2 &= \cos 16^\circ \frac{80}{7.5} + \frac{65 \cdot 0.0096 \cdot 510}{50} \\ d_2 &= \cos 16^\circ \cdot 10.67 + 6.36 \\ d_2 &= 16.61\text{mm} \end{aligned} \quad (8)$$

Računanjem za ugao difrakcije od 16° sa talasnom dužinom od 550nm, dolazimo do zaključka da je u ovom slučaju izlazni snop sa disperzionog elementa širok 16,61mm. To je ujedno i minimalni dozvoljeni prečnik objektiva od kamere d_2 . Kako bi se u potpunosti izbeglo vinjetiranje, tj. slabljenje slike u spoljašnjim delovima sočiva kamere, treba da bude zadovoljen i sledeći uslov:

$$F_o < \frac{f_2}{d_2} \quad (9)$$

$$2 < 3.01$$

što je takođe postignuto.

Spektralna disperzija ρ predstavlja koliko će angstrema padati na jedan piksel senzora, a ona će, pre svega, zavisiti od veličine piksela p na senzoru, ugla disperzije β , broja zareza na rešetki m i žižne daljine kamere f_2 , i to kao:

$$\rho = \frac{p \cdot \cos \beta}{m \cdot f_2} \quad (10)$$

$$\rho = \frac{0.0096 \cdot \cos 16^\circ}{500 \cdot 50} = 3.69 \text{Å/pixel}$$

Do toga koliki deo spektra zapravo možemo da vidimo, tj. koliki deo spektra pada na CCD, dolazimo preko sledeće jednačine:

$$\lambda_{1,2} = \lambda_0 \pm \frac{N \cdot \rho}{2} \quad (11)$$

$$\lambda_{1,2} = 5500 \text{Å} \pm \frac{510 \cdot 3.69}{2}$$

koja nam za λ_1 daje vrednost od 4559Å, a za λ_2 6440Å. Iz toga možemo izračunati da nam na CCD čip u jednom „kadru“ pada opseg od 1881Å, odnosno 188nm.

Rezolucija spektrografa se može opisati i pomoću veličine koja se naziva razdvojna moć R i ona se može izraziti preko formule:

$$R = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} \quad (12)$$

Osetljivost i kvalitet spektralnog uređaja karakteriše se spektralnom rezolucijom. Spektralna rezolucija $\Delta\lambda$ je najmanja razlika talasnih dužina koja se može meriti, tj. najmanja razlika pri kojoj bi se dve bliske talasne dužine, odnosno linije videle razdvojeno. Da bi dve spektralne linije bile razdvojene, rastojanje između maksimalnih intenziteta linija (razlika njihovih talasnih dužina) mora biti veća ili jednaka širini linije na polovini maksimuma intenziteta (Prodanović, 2008). Korišćenjem parametara spektrograфа koji su nam na raspolaganju, možemo izračunati razdvojnu moć R u slučaju posmatranja zvezde i to na sledeći način:

$$R = \frac{r \cdot f_2}{FWHM_t} \sin \beta \quad (13)$$

gde r predstavlja anamorfni faktor, optičkog sistema, dok je $FWHM_t$ širina slike zvezde na polovini maksimuma njenog intenziteta. Anamorfni faktor predstavlja količinu izobličenja koju projektovana slika doživi nakon prolaska kroz optički sistem.

$$r = \frac{\cos \alpha}{\cos \beta} \quad (14)$$

$$r = 1.04$$

Anamorfni faktor zavisi od upadnog ugla α , što je karakteristika za refleksione rešetke, te je u našem slučaju skoro pa zanemarljiv, dok $FWHM_t$ možemo izračunati na sledeći način:

$$FWHM_t^2 = \left(\frac{r \cdot f_2}{f_1} \right)^2 \cdot (\phi^2 \cdot f_t^2 + FWHM_c^2) + FWHM_o^2 + FWHM_d^2 + p^2 \quad (15)$$

gde ϕ predstavlja optički kvalitet neba, odnosno veličinu vidljivog diska lika zvezde (eng. *seeing*), $FWHM_c$ i $FWHM_o$ opisuju širinu na polovini maksimuma intenziteta slike tačkastog izvora u beskonačnosti, posmatrano kroz kolimator, odnosno kameru, dok je $FWHM_d$ širina na polovini maksimuma intenziteta difrakcionog limita po funkciji širenja tačke. Funkcija širenja tačke, skraćeno FŠT (eng. *Point spread function*, PSF) je matematički opis za širenje slike tačke kroz optički sistem. Funkcija širenja tačke je obično data za ravan poprečnog preseka polja slike tačke na mestu najboljeg fokusa (preuzeto sa: sr.wikipedia.org/sr-el/Функција_ширења_тачке).

Za naše objektive ne znamo $FWHM$, ali se za standardne foto-objektive obično uzimaju vrednosti $FWHM_c=10\mu\text{m}$ i $FWHM_o=15\mu\text{m}$.

$$FWHM_d = \lambda \frac{f_2}{d_2} \quad (16)$$

$FWHM_d$ je u našem slučaju $1.8\mu\text{m}$. Za normalne uslove posmatranja možemo uzeti da je $\phi=3''$ i čisto radi poređenja, planinske opservatorije u dobrih uslovima imaju $\phi=0.4''$. Usled posmatranja iz naseljenog mesta i malo dužih ekspozicija, za naše proračune ćemo uzeti da je $\phi=4''$ (2×10^{-5} rd). Odatle možemo izračunati:

$$\begin{aligned} FWHM_t^2 &= \left(\frac{1.04 \cdot 50}{80} \right)^2 \cdot ((2 \times 10^{-5} \cdot 600)^2 + 0.010^2) + 0.015^2 + 0.002^2 + 0.0096^2 \\ FWHM_t^2 &= 4.2425 \cdot 10^{-4} \\ FWHM_t &= 0.02059 \sim 20.59\mu\text{m} \end{aligned} \quad (17)$$

Pošto nam je sada poznata širina lika zvezde na polovini maksimuma njenog intenziteta $FWHM_t$, možemo izračunati teoretsku rezoluciju spektrograфа preko jednačine 13:

$$\begin{aligned} R &= \frac{1.04 \cdot 50}{0.02059} \sin 16^\circ \\ R &= 696 \end{aligned} \quad (18)$$

$$\Delta\lambda = 7\text{\AA}$$

Prema proračunima teoretske razdvojne moći, naš spektrograf sa $R=696$ spada u opseg niske rezolucije ($10 < R < 1000$). Naravno, usled nesavršenosti komponenti, razdvojna moć našeg amaterskog spektrograфа je bez sumnje manja od izračunate teoretske (preuzeto sa: www.astrosurf.com/buil/us/stage/calcul/design_us).

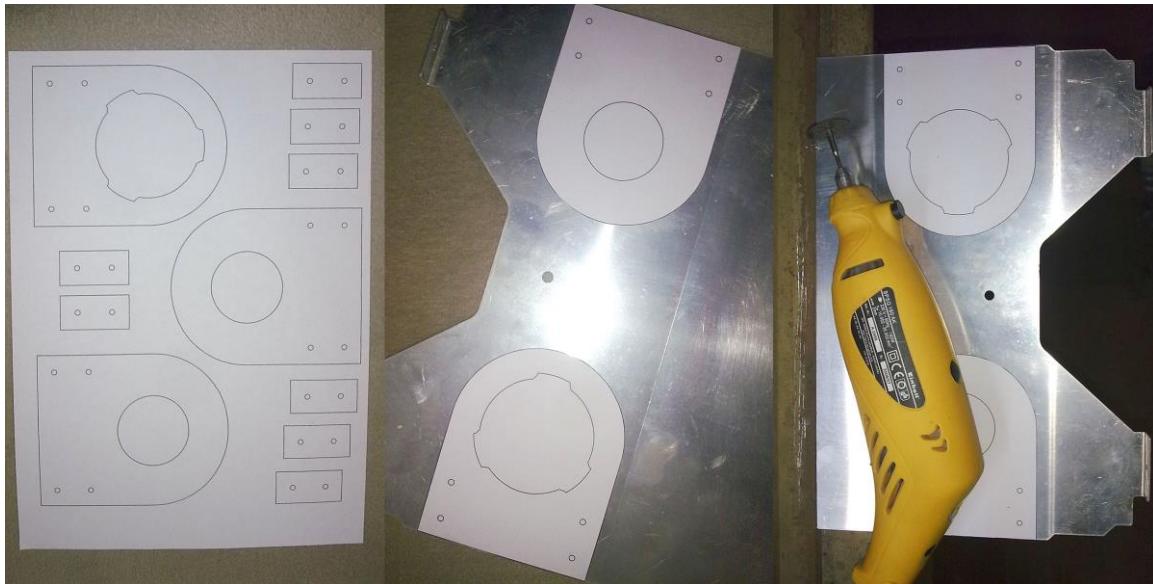
Za proračunavanje osnovnih parametara spektrografa, na raspolaganju su i različite verzije automatizovanih Excel tabela. Neke od njih čak idu i mnogo dublje u problematiku i u obzir uzimaju ekspoziciju, kvantnu efikasnost CCD-a, posmatranu zvezdu, itd.

SIMSPEC V4.0 english version, by Ken Harrison , original version by Christian Buil		Latest Revision: Apr.12
Enter data in highlighted cells		
Telescope		Spectrograph
Diameter (D) :	80 mm	Collimator
Focal length (f) :	600 mm	Collimator-Focal length (f1) : 80 mm
F/D (F#) :	7.5	Collimator-Required Focal ratio (Fc) : 7.5
Central obstruction (e) :	0.1	Collimator-Minimum diameter (d1) : 10.7 mm
Telescope throughput (To) :	0.95	Resolution of Collimation lens-FWHMo : 15 microns
Seeing/ Atmosphere		Camera
Seeing (ϕ) :	3 "	pixel size (p) : 9.6 microns
Atmospheric transmission (Ta) :	0.75	number of X pixels(Nx) : 510
Sky magnitude (mag/arc sec 2) :	16	quantum efficiency (η) : 54 %
Star size at focus (FWHM) :	8.7 microns	Read noise (RON) : 7 e-/pixel
NOTES: See www.astrosurf.org/buil/us/spe2/hresol1.htm www.astrosurf.org/buil/us/stage/calcul/design_us.htm (explanatory notes and worked example)		Dark noise (Nd) : 0.1 e-/s/pixel
		Binning, X axis (fx) : 1
		Binning, Y axis (fy) : 1
		Sampling Factor : 2.00
SUMMARY		Exposure
Resolving power R	4304	Subs, exposure time (ts) : 300 secs
Spectral resolution	1.36 Å	number of subframes (n) : 12
Wavelength range	1852 Å	Total exposure time (t) : 3600 secs
Grating-Lines/ mm	500	Spectrum size/ spread
Grating-Diffraction order	1	Height of Spectrum (n) : 12 pixel
Slit width	20 microns	Target Star
Target Mag.	12.0	Magnitude (m) : 12
Signal/Noise (SNR)	17	Effective temperature (Te) : 10800 K
		Bolometric Correction (BC) : -0.4
Other Results		SNR
Angle of incidence (α) :	0.00 °	Signal/Noise (SNR) : 17
Angle of diffraction (β) :	19.00	Limiting Mag
Anamorphic factor (r) :	1.06 microns	Limiting Mag (Bowen-mod) : 13.82
diffraction limit grating, FWHMd :	4.00 microns	
Slit/ image width on CCD, FWHM _t :	4.00	
Throughput efficiency		SNR Calculations
Transmission efficiency- guide system:	1	Number of photons (E) : 1.39E-02 photons/cm 2 /s/Å
Transmission efficiency- Littrow mirror:	1	Sky background(Ed) : 3.49E-04 photons/cm 2 /s/Å/ arc sec
Transmission efficiency-Collimator lens (To) :	0.92	Final Efficiency (R) : 0.19 %
Transmission efficiency-Camera lens (Tc) :	0.92	Useful signal (Nm) : 1732 e-/pixel
Transmission efficiency-Grating (Tg) :	0.6	Background noise (Ns) : 1579 e-/pixel
Entrance slit transmission(Tf) :	0.98	Noise(σ) : 104 e-
Total Transmission of Spectrograph (Ts) :	0.50	Signal/Noise by interval $\Delta\lambda$: 10 e-/pixel
		Noise from Signal : 58
		Noise from Electronics : 84 e-/pixel

Slika 20. Primer Excel tabele za izračunavanje parametara spektrograфа
(preuzeto sa: <http://www.astrosurf.com/buil/us/compute/compute.htm>)

6. Konstrukcija

Sa grubim nacrtom i dizajnom smo već upoznati, a radovi su počeli od odabira materijala. Za izradu nosača elemenata je odabran aluminijum zbog lakoće obrade. Najlakši način da se neki oblik prenese na materijal je štampanjem dizajna na samolepljivi beli A4 papir.



Slika 21. Priprema materijala za nosače ključnih elemenata

Alati koji su korišćeni za izradu nosača komponenti su uglavnom bili bušilica, testera za metal i čeona brusilica.



Slika 22. Izrada nosača za objektive kolimatora i kamere

Za oba objektiva je iskorišćen njihov fabrički način montiranja na sam nosač. Objektiv kolimatora se uvrće u pripremljene žlebove, a objektiv kamere se fiksira uz pomoć prstena sa suprotne strane nosača.



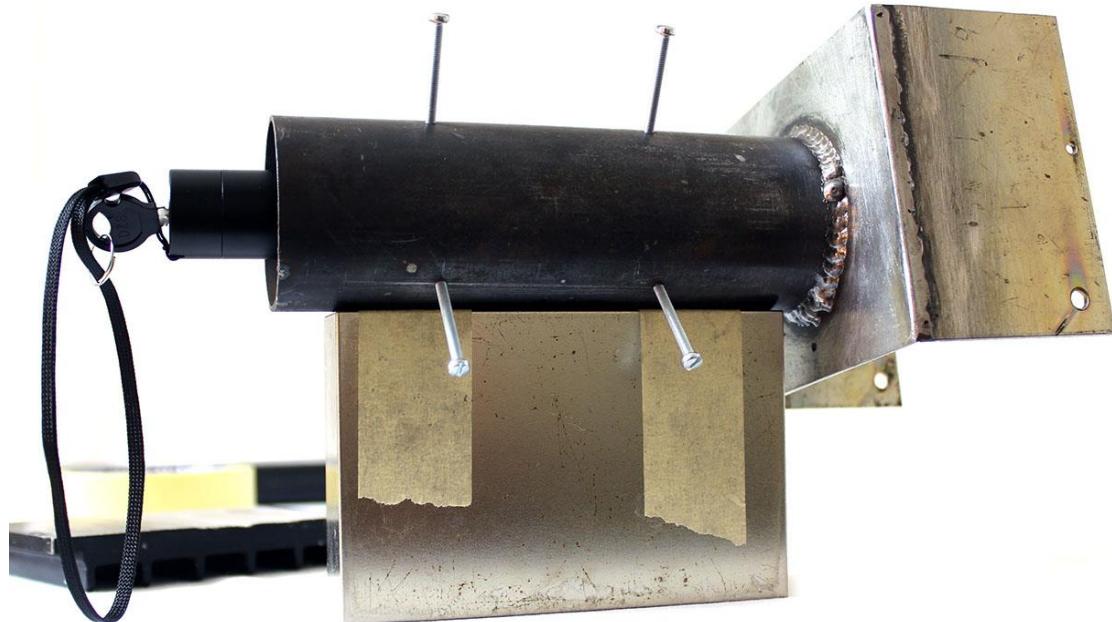
Slika 23. Pripremljeni nosači za sve ključne komponente

Umesto korišćenja matica, navoj je direktno urezan u nosače, kako bi broj labavih i pokretnih delova bio sведен na minimum. Sledeća komponenta za izradu je bio nosač celog spektrograфа sa delom koji ulazi u teleskop – fokuserom. Otvor na teleskopu je prečnika 50mm, a pukom slučajnosti je i standardna cev od auspuha prečnika 50mm, te smo nju i iskoristili.



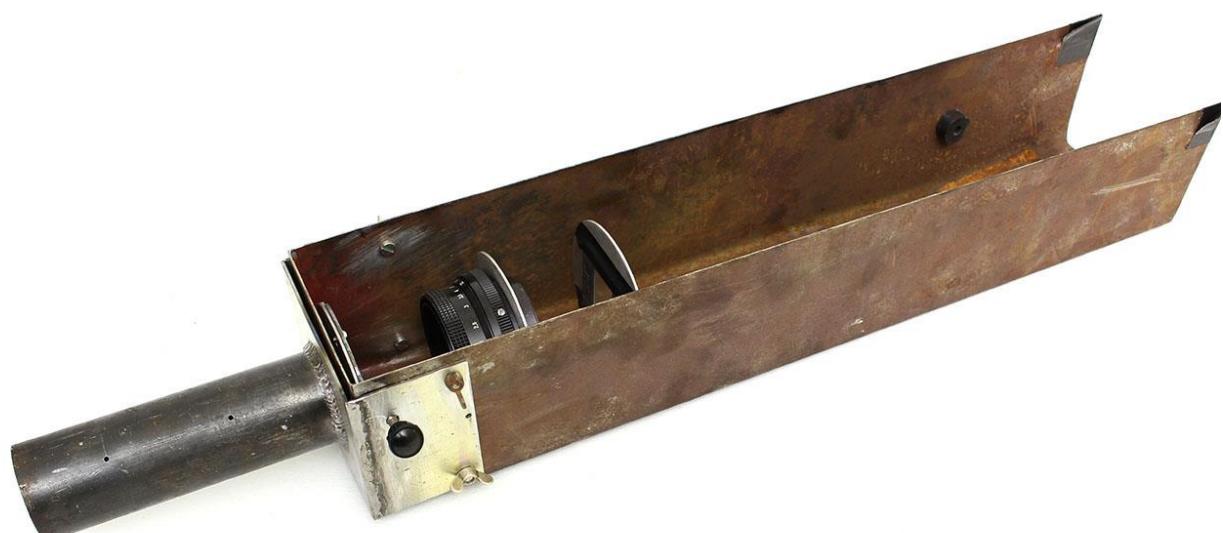
Slika 24. Nosač kućišta spektrograфа koji ulazi u fokuser teleskopa

Kako bismo mogli izvesti centriranje celog spektrograфа, tako da se poklapa sa optičkom osom teleskopa, montažnu cev smo izbušili na 6 mesta. U ove male rupe je urezan M3 navoj preko kojeg smo centririrali laser koji predstavlja optičku osu teleskopa.



Slika 25. Proces centriranja lasera i optičke ose spektrograфа

Laserom smo gađali fiksnu metu, dok smo ceo nosač okretali. Laser smo podešavali sve dok okretanjem nosača nije prestao da menja položaj naspram fiksne mete.



Slika 26. Prvi korak izrade kućišta spektrograфа

Laser je igrao ključnu ulogu u izradi spektrograфа, a bez njega bi idealno ravnjanje komponenti prema optičkoj osi teleskopa bilo veoma težak zadatak. Koristili smo komercijalno dostupan laser, talasne dužine \sim 532nm i snage <100 mW. Ovakav laser se često koristi u astronomske potrebe kao "nebeski pokazivač". Tek nakon što je laser bio podešen, mogli smo se posvetiti izradi ostatka kućišta.



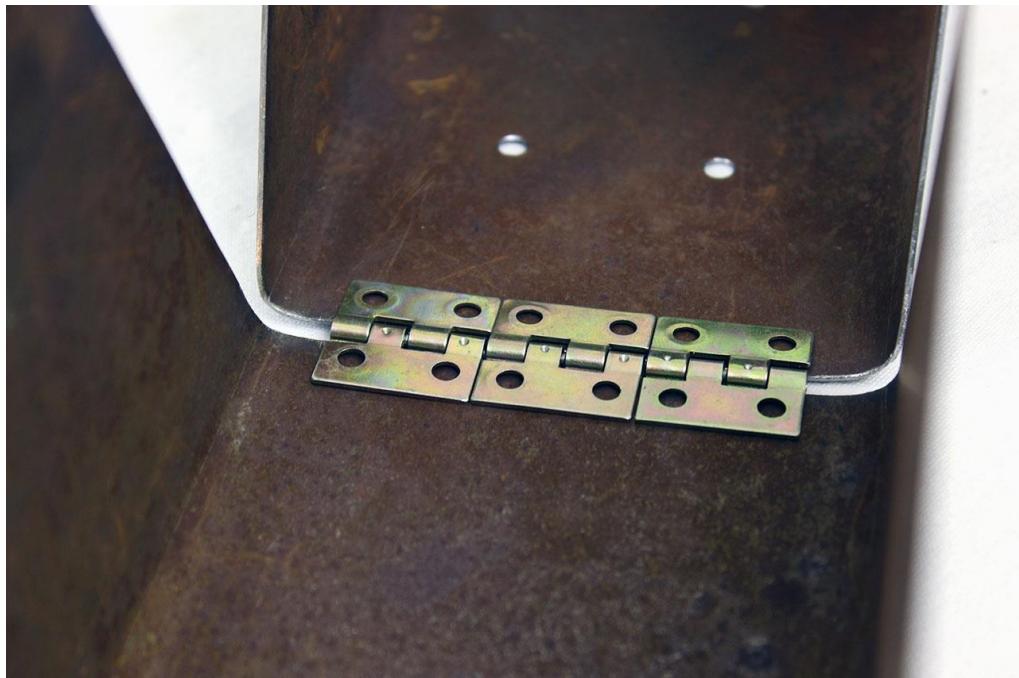
Slika 27. Slaganje komponenti prema optičkoj osi

Celokupna konstrukcija spektrograфа je izrađena od lima debljine 1mm. Lim je savijen u "U" oblik, sa jednakim stranicama visine \sim 10cm. Kućište je predviđeno da ima poseban poklopac koji se lako skida, radi fokusiranja objektiva i održavanja komponenti.



Slika 28. Prvi korak implementiranja pivotne tačke

Nakon određivanja pozicije proreza, kolimatora i disperzionog elementa, trebalo je odabrati pivotnu tačku spektrograфа. Izbor pivotne tačke i šarki koje će biti u upotrebi, nije bio uspešan iz prvog pokušaja. Šarke koje su prvi put odabране su bile labave i svaka je zahtevala po četiri šrafa, što bi zahtevalo dodatne labave tačke.



Slika 29. Inicijalni odabir šarki za pivotnu tačku

Na svu sreću, ostalo je dovoljno materijala da se deo sa greškom jednostavno odseče. Prilikom odsecanja viška lima, pivotna tačka spektrograфа je približena skroz do nosača rešetke.



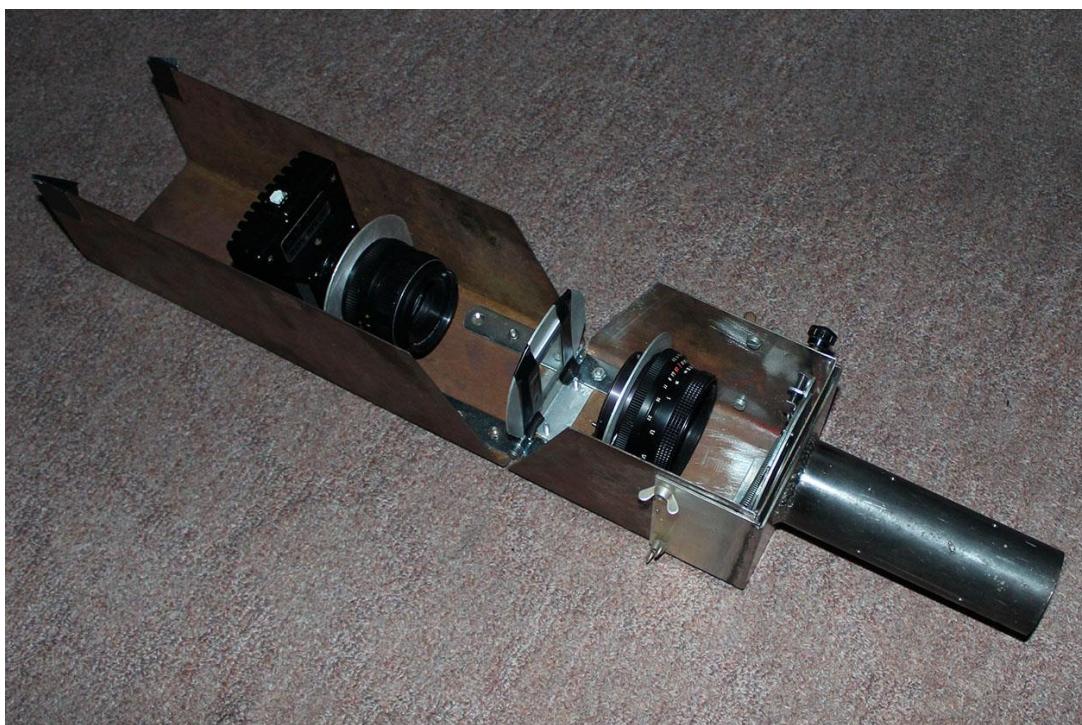
Slika 30. Korekcija greške odabira pivotne tačke

Male šarke su zamenjene mnogo jačim šarkama, koje su imale znatno manje lufta, te je konstrukcija spektrograфа tekla glatko. Sledеćа stavka je bila određivanje udaljenosti CCD-a od kamere, a najlakši način za određivanje ove udaljenosti je upotreba tražioca koji je fokusiran u beskonačnost. Gledanjem kroz tražioc i objektiv kamere, trebali smo podešavati udaljenost CCD-a dok ne dobijemo fokusiranu sliku samog CCD čipa.



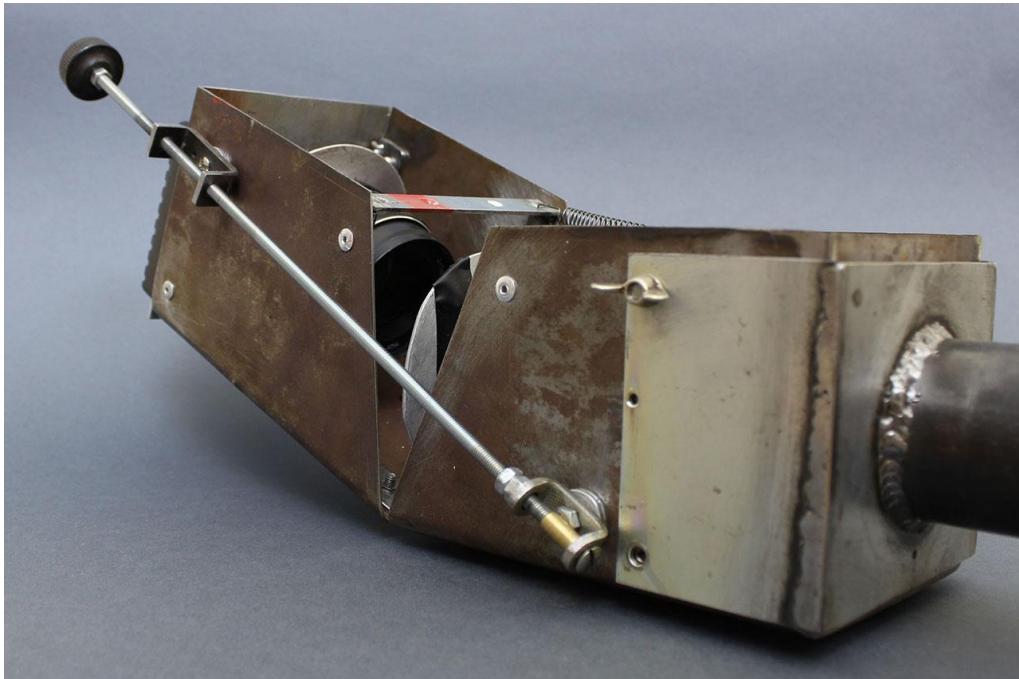
Slika 31. Određivanje udaljenosti kamere od CCD-a

Spektrograf je polako poprimao svoj finalni oblik i ostalo je još samo da se reši mehanizam koji će podešavati ugao kamere i CCD-a naspram prednjeg dela konstrukcije. Ovo nije bio lak zadatak, ali smo ipak uspeli da proizvedemo prihvatljivo rešenje.



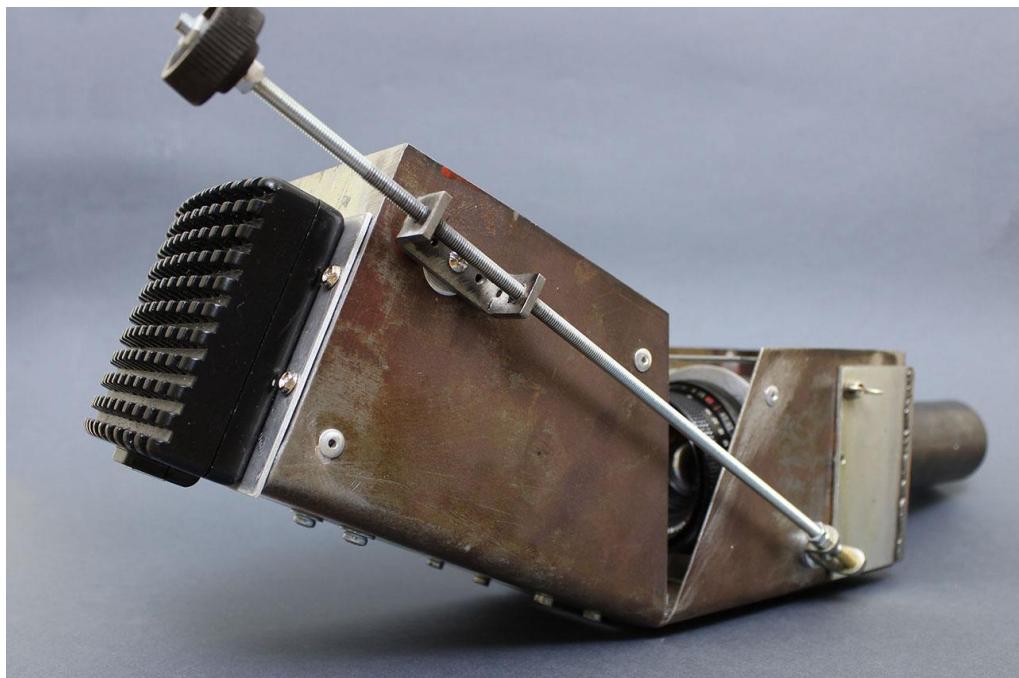
Slika 32. Spektrograf blizu svoje konačne forme

Rešenje se našlo u vidu navojne šipke od 6mm. Razmatrana je upotreba i tanje i deblje navojne šipke, ali se ispostavilo da je M6 šipka ponudila idealan balans između čvrstine i gustine navoja. Previše debela najvojna šipka bi bespotrebno dodala na težini cele aparature, dok bi tanka navojna šipka imala previše gust navoj i lako bi se savijala.



Slika 33. Prikaz sistema podešavanja ugla spektrografa

Navojna šipka je fiksirana na prednjem delu kućišta, kao i na zadnjem delu gde se nalaze kamera i CCD. Šipka se na prednjem delu slobodno vrti preko posebnog ležaja (specijalno napravljenog za ovu svrhu), dok je na zadnjem nosaču urezan navoj.



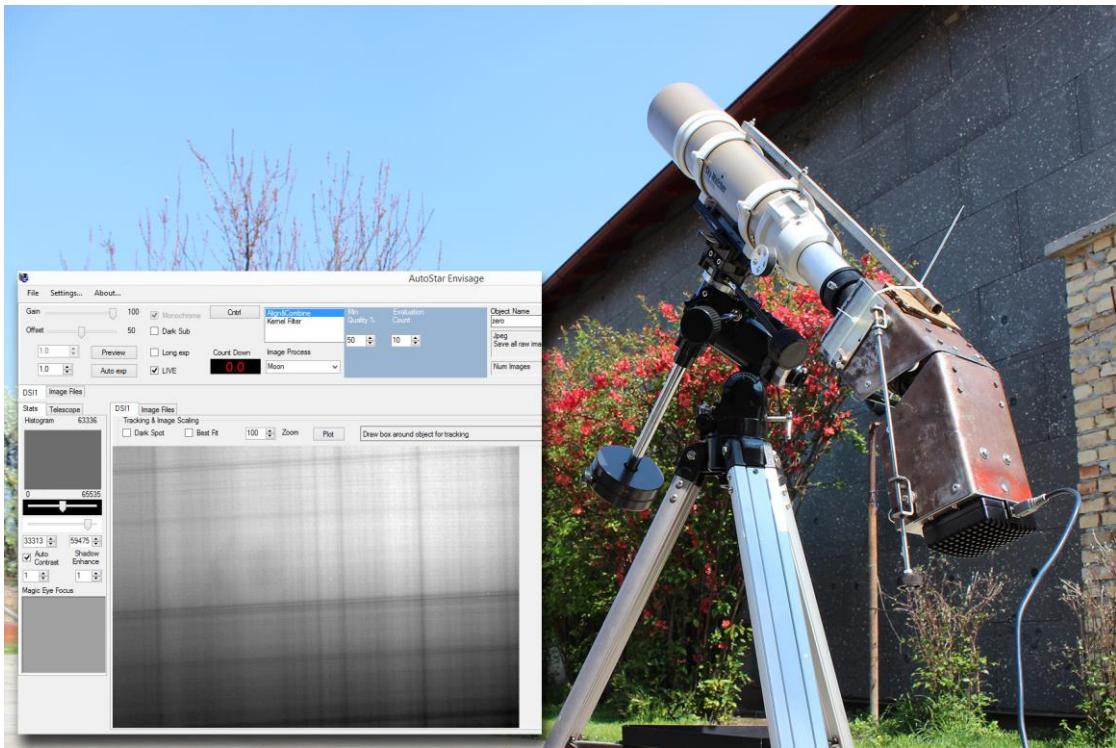
Slika 34. Prikaz sistema podešavanja ugla spektrografa

Upravo ovaj navoj i celokupni mehanizam dozvoljavaju da se ugao spektrograфа podešava i da kućište stoji čvrsto pod odabranim uglom.



Slika 35. Konačni dizajn spektrograфа

Čim smo utvrdili da mehanizam radi kako treba, spektrograf je izašao na svoju prvu “test-vožnju” kada smo po prvi put snimili deo spektra atmosfere.

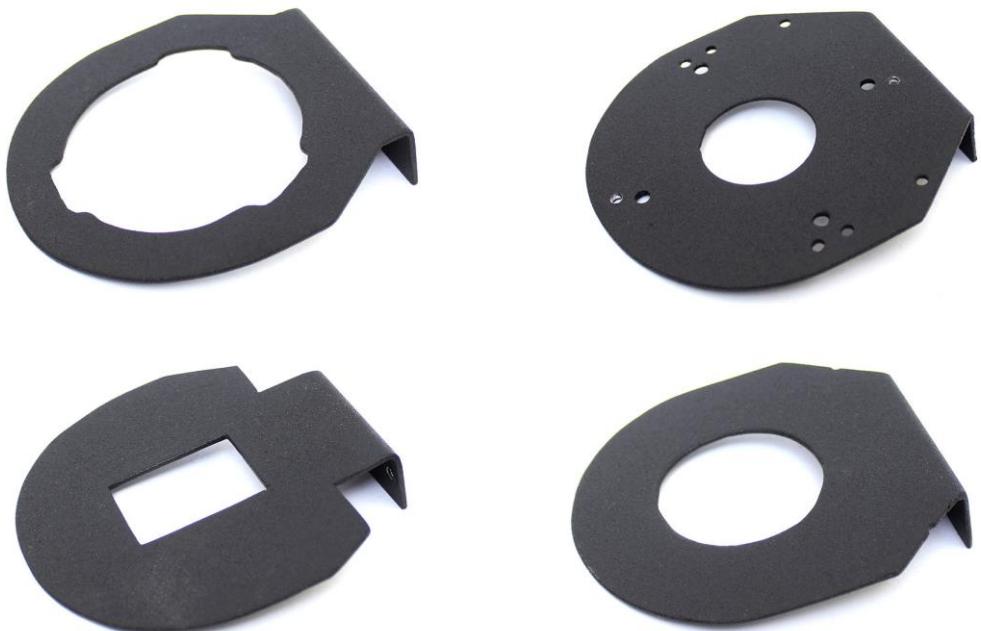


Slika 36. Prvo probno snimanje spektra neba

Jedan od finalnih koraka u izradi ovog spektrograфа je bila plastifikacija delova u mat crnu boju. Mat crna boja nije tu samo radi estetike, već je bitna kako bi se refleksije unutar spektrograфа svele na minimum.



Slike 37. i 38. Svi delovi spektrografa nakon plastifikacije, spremni za finalno sklapanje



Ono što se usput pojavilo kao izazov je bio problem izolacije svetlosti na centralnom delu, gde se kućište savija. Rešenje smo našli u vidu crnog hamer papira, savijenog u "harmoniku", i dve tanke plastike koje preklapaju jedna drugu. Nakon rešavanja par problema tokom izrade, na kraju se možemo pohvaliti i finalnim proizvodom.



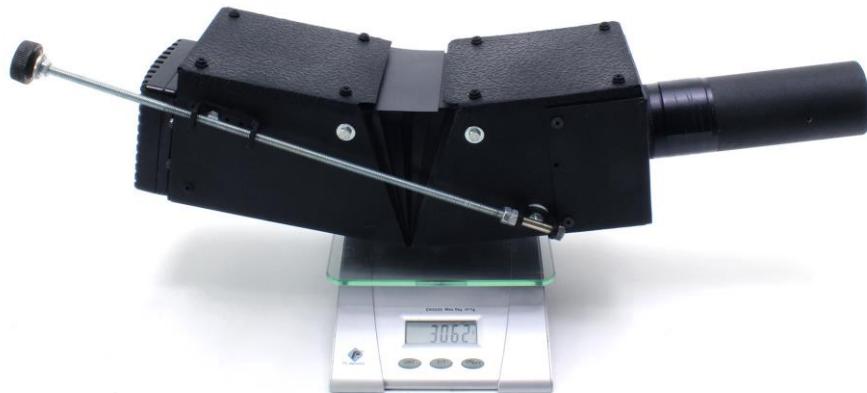
Slika 39. Finalni izgled spektrografa

Spektrograf je dobio i svoje specijalne magnetne poklopce koji se brzo skidaju, a u isto vreme ne mogu lako da spadnu.



Slika 40. Demonstracija magnetnih poklopaca

Pošto je aparatura dosta teška, razmotrili smo izradu zajedničkog nosača, preko kojeg bi se teleskop i spektrograf zajedno postavljali na montažu.



Slike 41. i 42. Merenje težine teleskopa i spektrograфа radi projektovanja zajedničkog nosačа

Naime, sam teleskop je težak 3181g, dok je spektrograf težak 3062g, te su po težini u skoro savršenom balansu. Zajednički metalni nosač je neophodan jer je spektrograf dosta zbijeniji, dok teleskop pri vrhu ima samo štitnik, koji nema skoro nikakvu značajnu težinu.



Slike 43. Zajednički nosač za teleskop i spektrograf

7. Greške, ograničenja i budući planovi

7.1. Težina i kompatibilnost

Sam spektrograf je težak 3 kg i ako to uporedimo sa težinom teleskopa od 3,1 kg, onda možemo uočiti potencijalni problem. Doduše, ovo može predstavljati problem samo zbog kompatibilnosti sa reflektorskim teleskopima. Sam fokuser na nekom reflektorskom teleskopu vrlo verovatno ne bi podneo takvo opterećenje bez nekog dodatnog držača. Drugi problem koji donosi težak spektrograf je potreba za kvalitetnom montažom i dobrim balansiranjem, kako bi motor za praćenje radio bez opterećenja.

Već je pomenuto da bi upotreba refleksione rešetke znatno umanjila dimenzije spektrograфа. VIS refleksiona rešetka, optimizovana za vidljivi deo spektra, sa 1200 zareza i dimenzija 12.5x25mm, košta oko 100 evra. To i nije neka nedostigna cifra, a upotreba jednog takvog disperzionog elementa bi imala brojne prednosti naspram transmisione rešetke. Prelazak na refleksionu rešetku bi zahtevao kompletan redizajn spektrograфа, tj. novo kućište, što sa znanjem koje sada već posedujemo ne predstavlja nikakav problem.

1200 Grooves/mm, 12.5 x 25mm, VIS Holographic Grating



Stock No. #43-215

Availability: **IN STOCK**

\$107.50

1 - 10 for \$107.50
11 - 25 for \$96.00
26 or more [Request Quote](#)

Quantity:

ADD TO CART

Specifications

Dimensions (mm) 12.5 x 25.0

Dimensional Tolerance (mm) ±0.5

Groove Density (grooves/mm) 1200

Thickness (mm) 9.5

Wavelength VIS

Wavelength Range (nm) 400 - 700

Coating Bare Aluminum

Absolute Diffraction Efficiency (%) 45 - 65

Substrate Float Glass

Type Reflective Diffraction Grating

Construction Holographic Grating

RoHS Compliant

Slika 44. Specifikacije potencijalne Edmund Optics VIS refleksione rešetke

Od trenutka kada je ovaj spektrograf zamišljen, dizajniran i izrađen, pa do danas, naučili smo dosta o drugim materijalima i bržim načinima izrade delova. Sada na raspolaganju imamo pristupačni pleksiglas koji je krut, jeftin i lakši od čelika. Spektrograf i sve njegove delove možemo detaljno dizajnirati na računaru, a zatim se sve to seče laserom i to s milimetarskom preciznošću. Postoji veliki broj firmi koje vrše uslužno sečenje pleksiglasa, što je takođe olakšavajuća okolnost za sve nove projekte. Lasersko sečenje metala je takođe komercijalizovano i dostupno je svima, u raznim preduzećima.

7.2. Orientacija kolimatora

Potkrala nam se i jedna greška u vezi orientacije kolimatorskog objektiva. Problem nije ozbiljan, ali radi poštovanja optičkog sistema, fokuserski deo objektiva treba da je okrenut ka prorezu. Problem se može lako korigovati, ali više nagnjemo ka izradi potpuno novog, lakšeg spektrograфа.

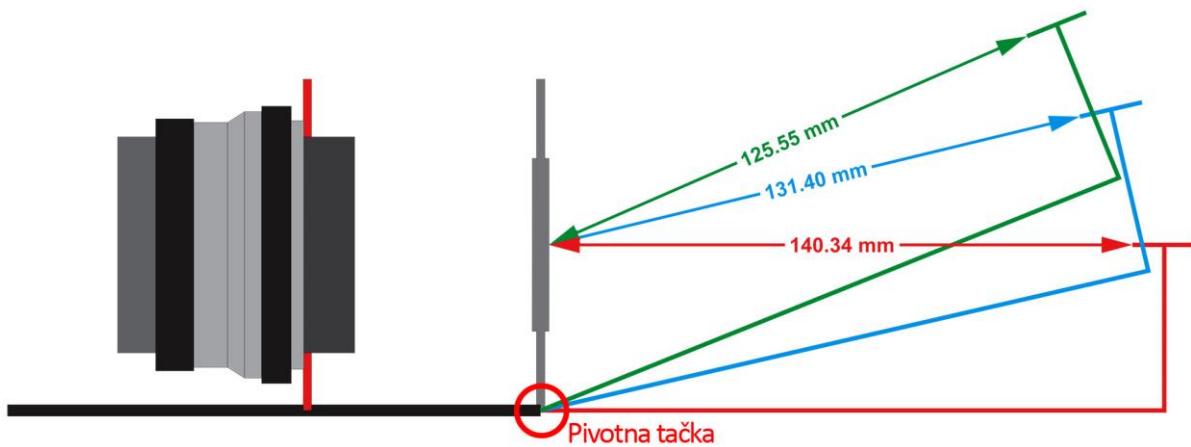


Slika 45. Pogrešno orijentisan objektiv od kolimatora

Za sve buduće projekte bi svakako trebalo uzeti u obzir da se objektiv fotoaparata zameni jednim kolimatorskim sočivom, radi smanjenja težine i dimenzija aparature. Takođe bi bilo odlično i poželjno da kolimator ima veću žižnu daljinu, u cilju bolje iskorišćenosti rešetke. Već smo spomenuli da bi kolimator sa žižnom daljinom od 160mm, umesto 80mm, dao duplo širi izlazni snop od: 21,33mm umesto 10,76mm.

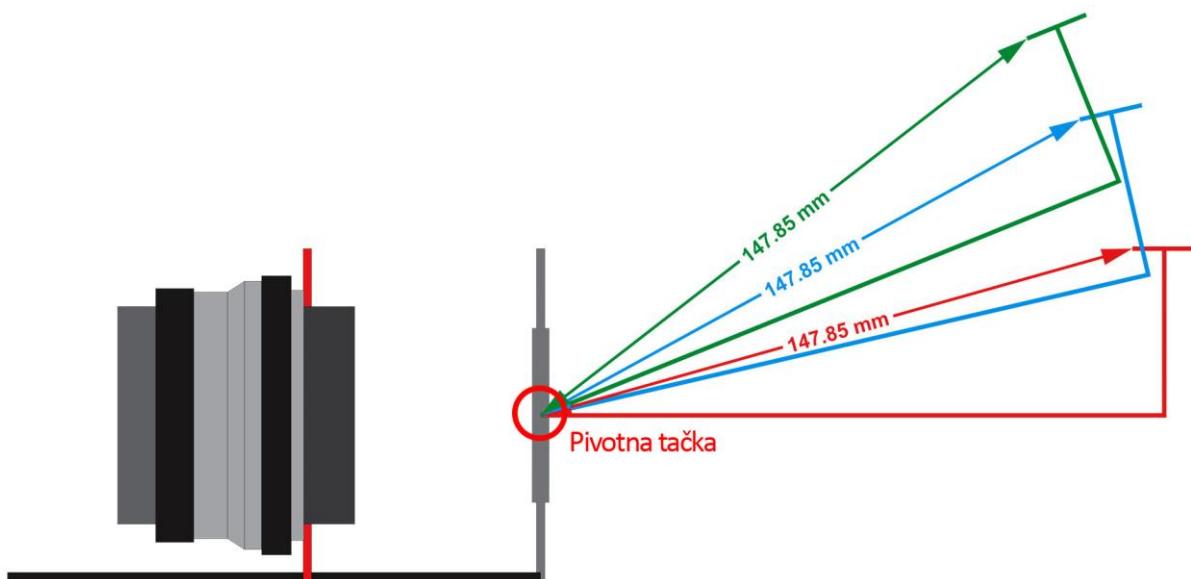
7.3. Pivotna tačka spektrograфа

Druga greška koju treba da spomenemo je da osa savijanja spektrograфа nije u centru disperzije ose.



Slika 46. Greška u načinu ugaonog pomeranja kamere i CCD-a

Naime, pivotna tačka je udaljena od centra disperzije ose, pa pomeranjem ugla spektrograфа, kamera neće uvek biti na istoj udaljenosti. Ovo sa sobom povlači male varijacije u fokusu, kada se pomera ugao kamere i CCD-a. Iz primera gde su korišćene približne mere spektrograфа, vidimo da se pomeranjem kamere od 13° pa do 22° , gde je teoretski kraj prvog spektralnog reda, kamera i CCD približe za 6mm.

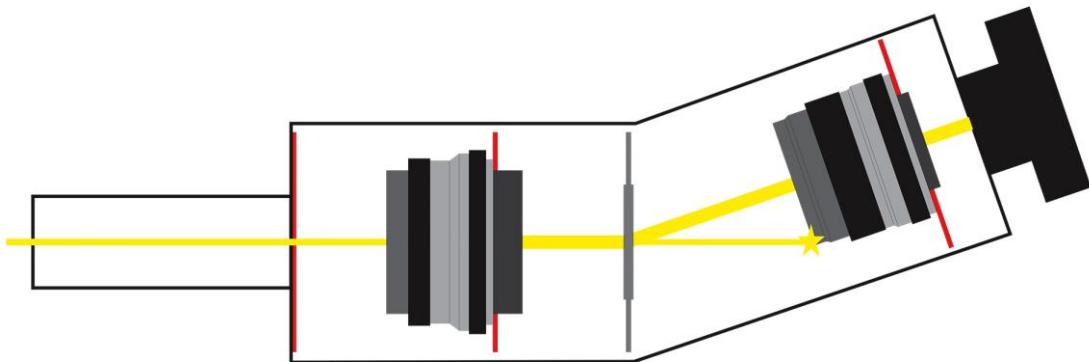


Slika 47. Skica mesta gde bi trebala da se nalazi pivotna tačka

Da je tačka savijanja u centru disperzije ose, kamera i CCD bi se uvek nalazili na istoj udaljenosti od rešetke.

7.4. Udaljenost kamere od rešetke

Po pravilu, kamera treba da bude što bliže disperzionom elementu, dok sa druge strane postoji ograničenje za minimalnu udaljenost. Problem koji se ovde javlja u slučaju jakih izvora, kao na primer Sunca ili Meseca, je što prilikom pokušaja snimanja manjih difrakcionih uglova, nulti spektralni red udara u ivicu kamere i stvara refleksije koje onemogućavaju beleženje spektra.



Slika 48. Grafički prikaz problema nultog reda

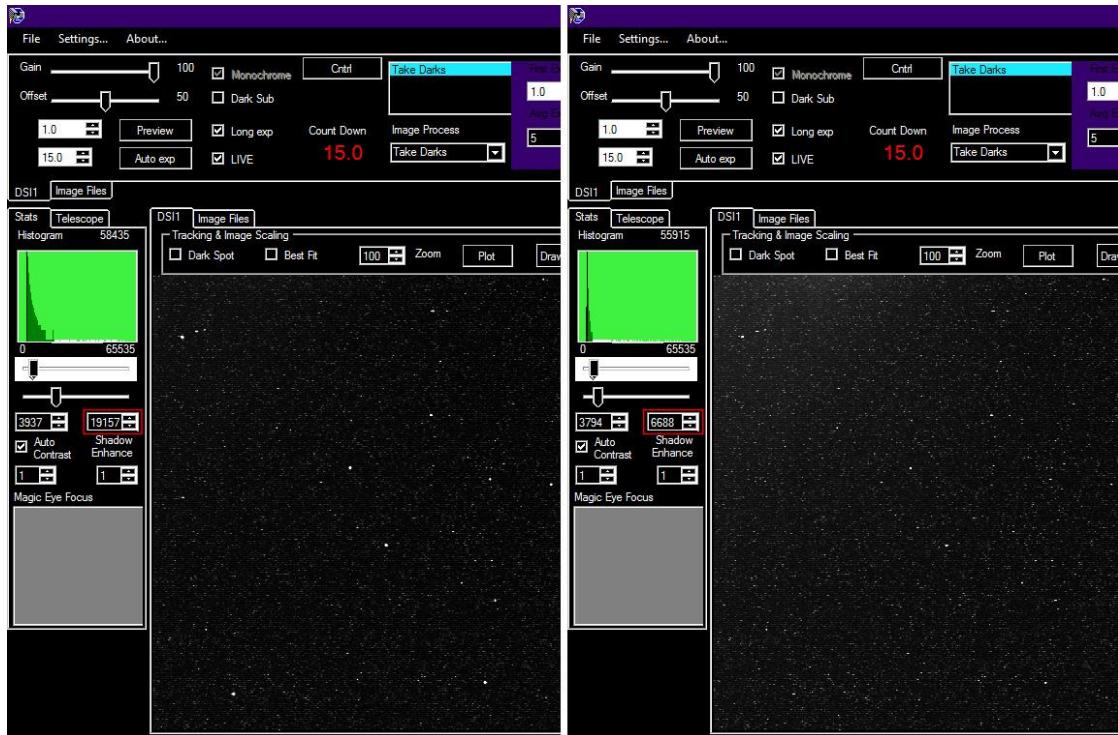
7.5. CCD senzor

Pored same činjenice da je CCD senzor dosta malih dimenzija (510x492px), deo problema potiče i od termalnog šuma. Meade Deep Sky Imager Pro ima svoje aluminijumsko kućište, sa rebrima koji su predviđeni za hlađenje, ali to jednostavno nije dovoljno za rešavanje šuma. Za vreme snimanja spektra zvezda, na otvorenom, kao prvu pomoć smo pri ruci imali komprimovani vazduh u spreju.



Slika 49. Komprimovani vazduh u spreju je pogodan za hlađenje CCD čipa

Jednostavnim okretanjem spreja sa vazduhom naglavačke, i prskanjem direktno u CCD, njegovu temperaturu možemo spustiti za 5-10°C. Iz spreja će cureti kompresovana tečnost i putem adijabatske ekspanzije možemo ohladiti CCD znatno ispod ambijentalne temperature. Koliko zapravo znači hlađenje možemo videti na iščitavanju signala kada CCD nije izložen svetlosti (*dark frame*).



Slika 50. Očitavanje šuma bez hlađenja (levo) i sa hlađenjem (desno)

Preko AutoStar Envisage softvera, sa kojim kontrolišemo CCD, možemo uporediti iščitavanja za *dark frame* snimke sa ekspozicijom od 15 sekundi, sa i bez hlađenja. Nije teško doneti zaključak ako uporedimo šum sa CCD-a bez hlađenja sa očitavanjem signala od 19157 ADU, naspram termalnog signala od 6688 ADU, kada se CCD hlađi sprejom kompresovanog vazduha. ADU (*Analog to Digital Units*) predstavlja konverziju prikupljenih fotona na senzoru u digitalnu jedinicu.

Ovo, međutim, nije idealno rešenje jer hlađenje ovim putem ima kratkotrajne efekte i aluminijumsko kućište CCD-a dosta brzo poprimi ambijentalnu temperaturu. Prskanjem iz spreja lako možemo previše ohladiti CCD, pa onda i kondenzacija može stvoriti problem oko elektronike.

Buduće rešenje koje imamo u vidu je upotreba Peltier jedinice za hlađenje senzora. Peltier je termoelektrično rešenje, često zvano i "Peltier termalna pumpa", a radi na jednostavnom principu odvlačenja toplote sa jedne strane na drugu. Dakle, jedna strana Peltiera bude hladna, a druga strana topla. Meade Deep Sky Imager Pro se lako može prepraviti u svrhe funkcionisanja sa konstantnim Peltier hladnjakom. Ovakva dorada CDD-a bi nam donela stabilnu i konstantnu redukciju termalnog šuma, što je veoma bitno prilikom dužih ekspozicija.

7.6. Kvalitetniji prorez

Iako prorez ne igra neku bitnu ulogu, tj. ne koristi se prilikom snimanja spektra zvezda, unapređenje kvaliteta proreza nije na odmet. Za sledeći projekat spektrograфа smo zato već kupili kvalitetniju alternativu.



Slika 51. Prorez sa linearnim pomeranjem noža

Ovaj prorez ima samo jedan pokretni nož, dok je drugi statičan, ali to ne predstavlja nikakav problem. Brojni izvori navode da je linearni prorez sa jednim statičnim nožem isto toliko efikasan kao i bilo koji drugi, te da je jedino kvalitet samih noževa bitan faktor.

7.7. Montaža

Najslabija tačka ovog spektrograфа je zapravo praćenje koje smo u datom trenutku imali na raspolaganju.



Slika 52. Jedini motor za praćenje na rektascenziji

Montaža koju smo koristili prilikom snimanja zvezda ima praćenje samo po rektascenziji. Praćenje po samo jednoj osi zahteva savršeno useveravanje. Bez obzira što smo se trudili oko useveravanja, ekspozicija od 15 sekundi je najviše što smo mogli koristiti, a da ne dođe do primetnog razmazivanja spektra.

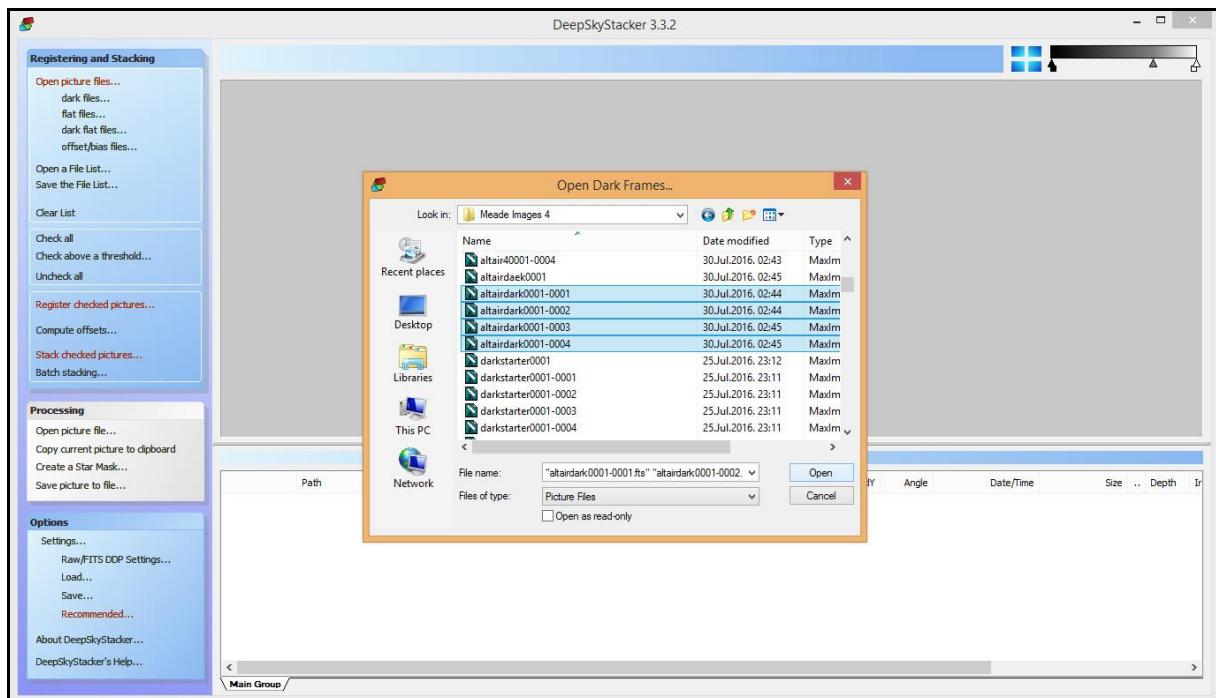
7.8. Fotoaparat umesto CCD-a

Upotreba nekog digitalnog fotoaparata, umesto trenutnog CCD čipa, zvuči kao fantastična ideja, jer je veličina senzora, na Canon 600D apratu na primer, 223x149mm i na toj površini broji 5184×3456 piksela, naspram Meade Deep Sky Imager Pro CCD-a, koji je veličine 6x5mm i broji 510x492 piksela. Sve to zvuči veoma primamljivo, ali treba uzeti u obzir da komercijalni čipovi imaju ugrađene UV i IR filtere, što opseg potencijalnog spektra ograničava na 400 do 700nm. U tom delu spektra bismo mogli ostvariti visoku rezoluciju, ali pre ulaganja u upotrebu DSLR aparata u svrhe spektrografije, treba razmotriti potencijalne načine na koje možemo iskoristiti taj opseg.

8. Snimanje spektra, obrada i rezultati

Do rezultata možemo doći samo uz pomoć adekvatne obrade snimljenog spektra. Sam proces snimanja i obrade podataka spektra se može smatrati zasebnom disciplinom. Pošto je ovaj rad već dosta opširan, na metode i osnove analize spektra ćemo se samo grubo osvrnuti.

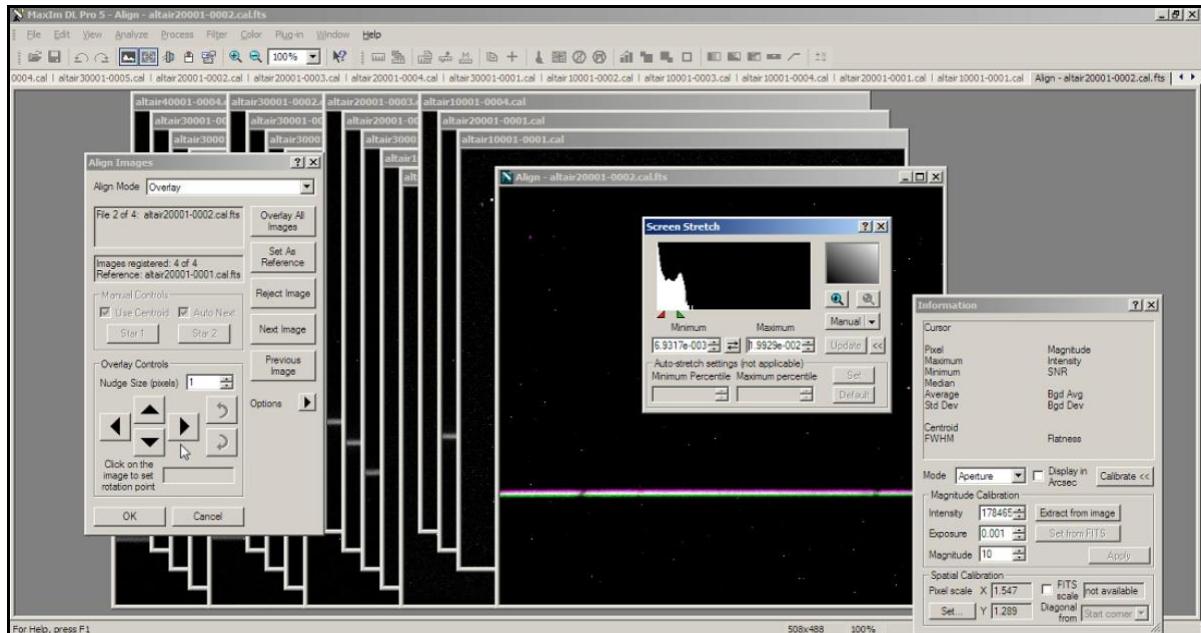
Kompletan proces beleženja i obrade spektra se svodi na četiri glavna koraka. Prvi korak je snimanje samog spektra objekta sa ekspozicijama od par minuta, na primer 10 ili više. Duže ekspozicije se mogu zameniti sa snimanjem i slaganjem, tzv. "stekovanjem" kraćih ekspozicija, kako bi se dobio dovoljno jak signal za obradu. Drugi korak je snimanje "bias" slika koje se beleže sa najkraćom ekspozicijom CCD-a i zatvorenim spektrografom. Ovaj "bias" snimak predstavlja sam električni šum koji se stvara na CCD čipu i ne zavisi od ekspozicije i ambijentalne temperature. U principu, "bias" snimak je dovoljno uraditi samo jednom za dati CCD, ali se za svaki slučaj uvek može ponoviti pred novo snimanje. Sledеći korak je snimanje "dark" frejmova, što se takođe vrši sa zatvorenim spektrografom, ali se oni snimaju sa istom ekspozicijom sa kojom su se snimali i spektri. "Dark" snimke je idealno raditi neposredno nakon snimanja spektra, jer šum koji se zabeleži ovoga puta zavisi od dužine ekspozicije i ambijentalne temperature. Ono što bi se uporedo trebalo raditi sa svakim snimkom spektra je uzimanje "flat" snimaka. "Flat" se snima kratkotrajnim ekspozicijama kada je CCD uniformno osvetljen, kako bi se prikazala prljavština na optici, vinjetiranje, problematični pikseli i relativni odziv samog čipa. Za snimanje "flat"-a se koristi neki izvor svetla koji ima kontinualni spektar bez emisionih ili apsorpcionih linija. Mi nismo bili u mogućnosti da snimimo "flat"-ove, jer još nismo razvili sistem sa kojim bismo na licu mesta mogli uniformno osvetliti CCD nakon svakog snimka spektra. Neophodno je snimiti "flat" nakon svake promene u optičkom sistemu spektrografa, dakle prilikom pomeranja ugla kamere i CCD-a. Kako bismo snimili ceo spektar, morali bismo snimiti novi "flat", te smo zbog datih komplikacija obradu radili bez "flat" snimaka.



Slika 53. DeepSkyStacker 3.3.2 softver

Sabiranje snimaka spektra i oduzimanje šuma preko "dark", "bias" i "flat" snimaka, može se raditi automatizovano, preko raznih softvera koji se često koriste i za astrofotografiju. Jedan od tih programa, koji smo mi koristili pri obradi, je DeepSkyStacker v3.3.2 koji je besplatan za preuzimanje (<http://deepskystacker.free.fr>).

Zbog dosta loših uslova snimanja, koji prevashodno potiču od montaže i praćenja koje nam je bilo na raspolaganju, a i same činjenice da na CCD ne staje ceo spektar, sledi mukotrпno ručno spajanje spektara preko *MaxIm DL Pro 5* softvera.



Slika 54. MaxIm DL Pro 5 i proces spajanja spektara

Sirovi spektri zvezda koji su spojeni iz četiri snimka izgledaju ovako:



Slika 55. Neobrađen snimak spektra Alkaid, B3 V zvezde



Slika 56. Neobrađen snimak spektra Altair, A7 V zvezde

Ovakvi sirovi spektri se obično razvuku po visini, kako bi se dobio uniformniji signal i kako bi njihova dalja obrada bila lakša. Ovaj postupak se može uraditi preko softvera Iris v5.59, veoma popularnog i besplatnog programa za obradu astrofotografija i spektara.

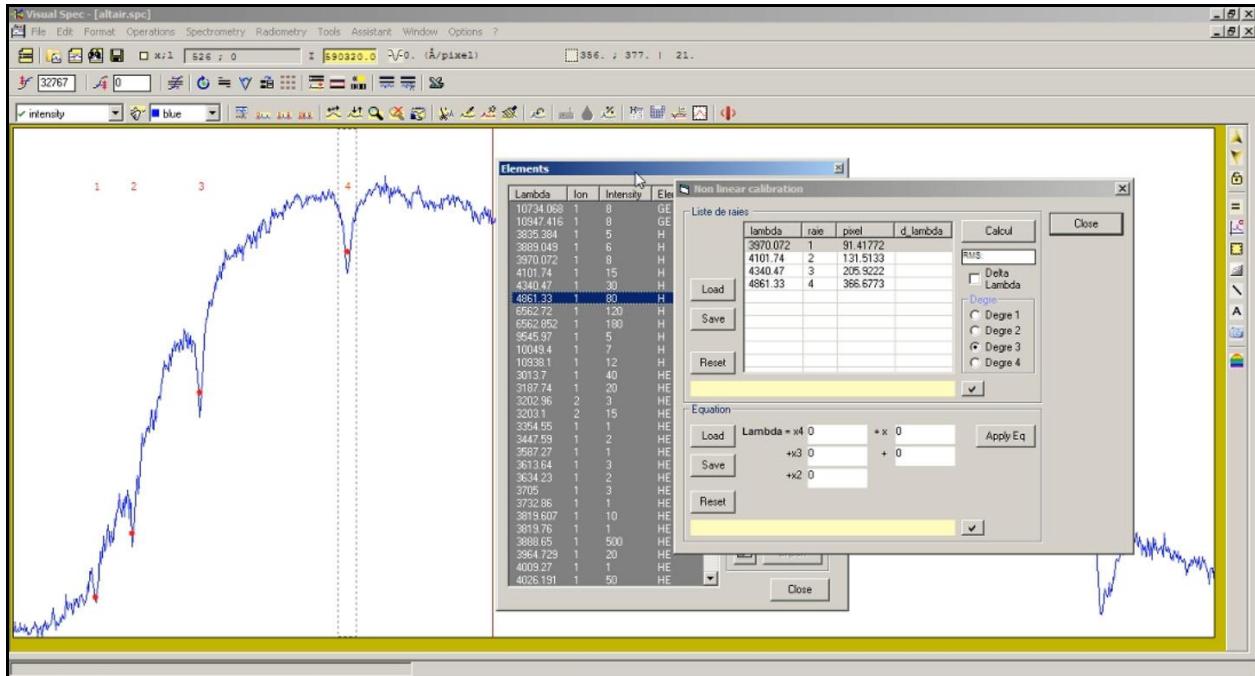


Slika 57. Prošireni spektar po visini Alkaid, B3 V zvezde



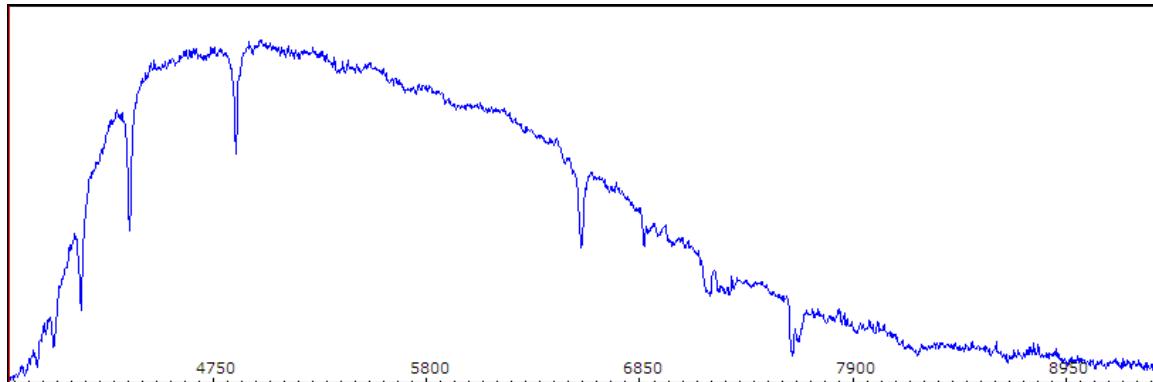
Slika 58. Prošireni spektar po visini Altair, A7 V zvezde

Sledeći korak je pretvaranje sirovih snimaka spektara u profil, a mi smo to vršili preko još jednog besplatnog softvera, Visual Spec (<http://www.astrosurf.com/vdesnoux/>), programa specifične namene za obradu spektara.

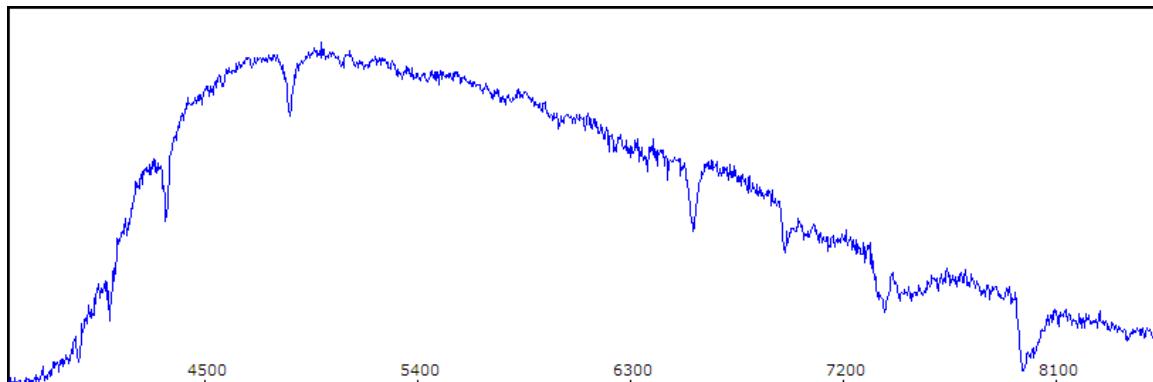


Slika 59. Obrada i kalibracija spektra u Visual Spec softveru

Naši obrađeni i kalibrirani spektri izgledaju ovako:

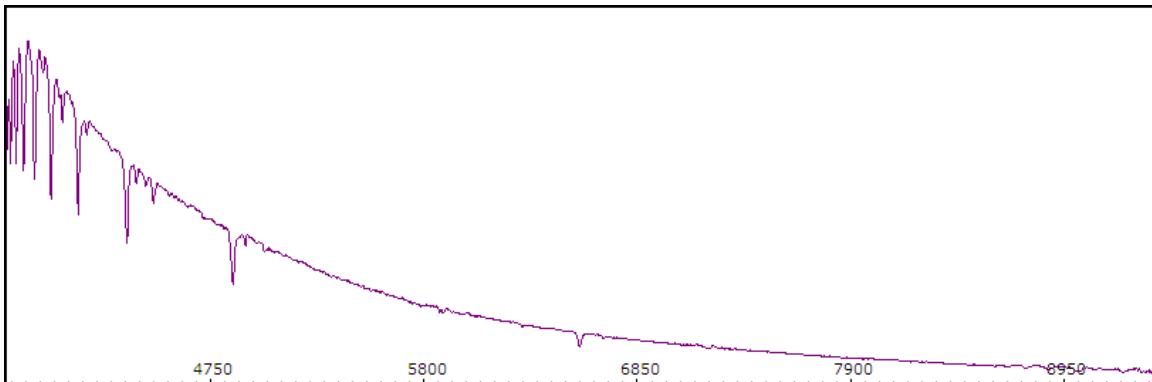


Slika 59. Profil neobrađenog spektra Alkaid, B3 V zvezde

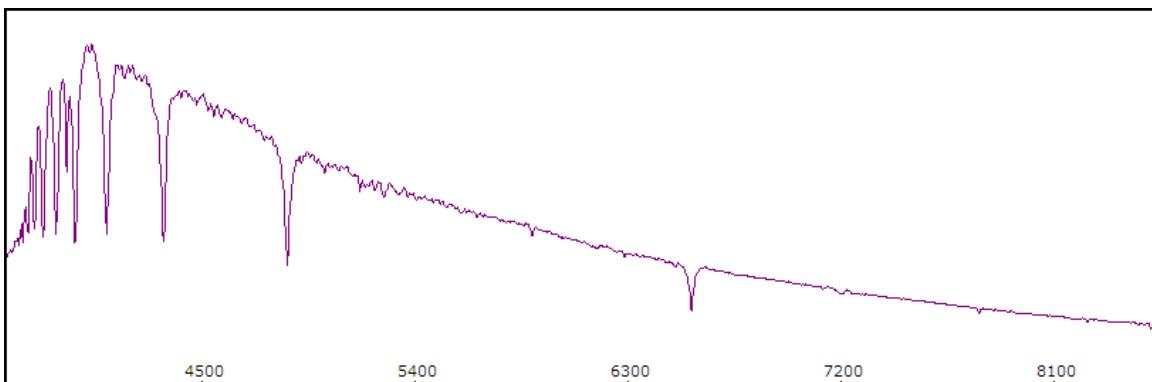


Slika 60. Profil neobrađenog spektra Altair, A7 V zvezde

Visual Spec sadrži datoteku spektralnih linija preko kojih možemo kalibrirati sirove spektre. U slučaju ove dve zvezde, to su bile Balmerove linije vodonika na: 385,5nm; 388,9nm; 397,0nm; H δ 410,2nm; H γ 434,0nm; H β 486,1nm; H α 656,3nm. Dobijeni profili spektara se i dalje mogu smatrati sirovim, a ono što još treba da uradimo je da normalizujemo profil prema relativnoj osetljivosti CCD-a i celog optičkog sistema korišćenog spektrograфа. Jedan od načina da to uradimo je da intenzitete sirovih spektara podelimo sa kataloškim spektrom tipa zvezde čiji spektar obrađujemo.

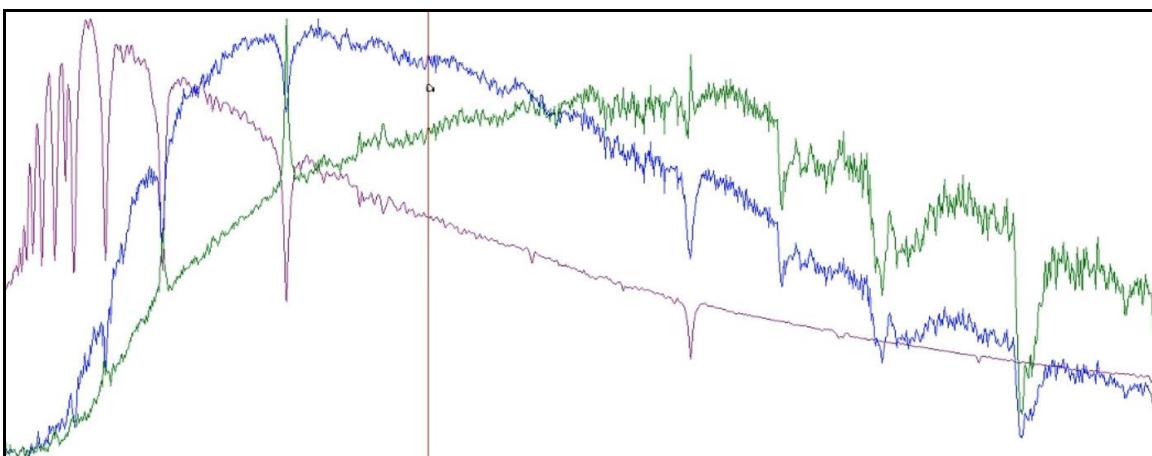


Slika 61. Kataloški spektar B3 V zvezde



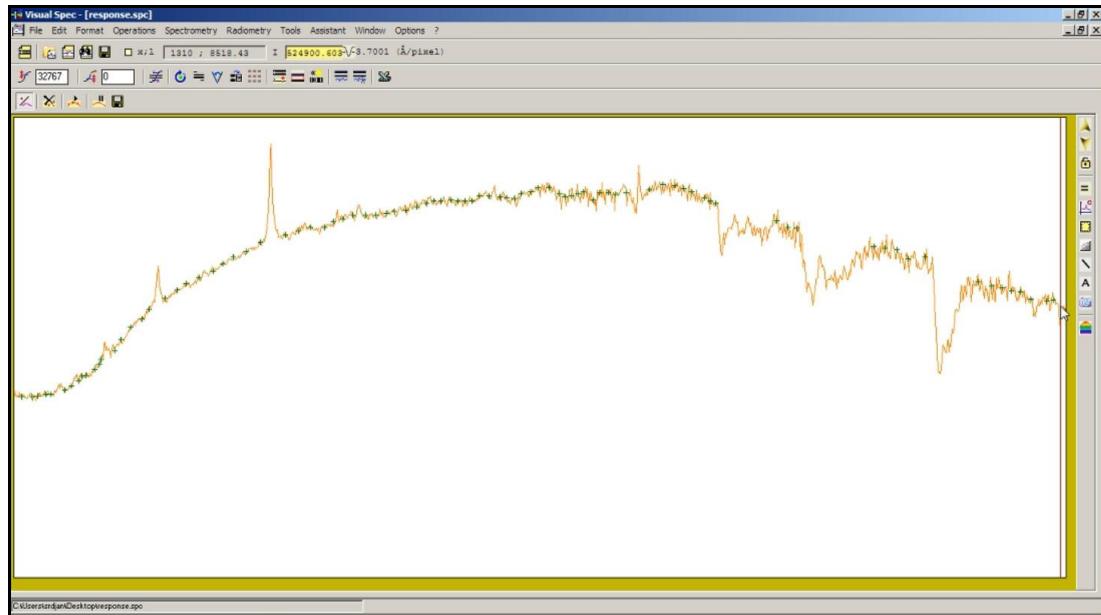
Slika 62. Kataloški spektar A7 V zvezde

Deljenjem profila sirovog spektra sa kataloškim profilom tipa posmatrane zvezde dobijamo grafikon koji treba da predstavlja relativni odziv našeg spektrograфа naspram talasne dužine.

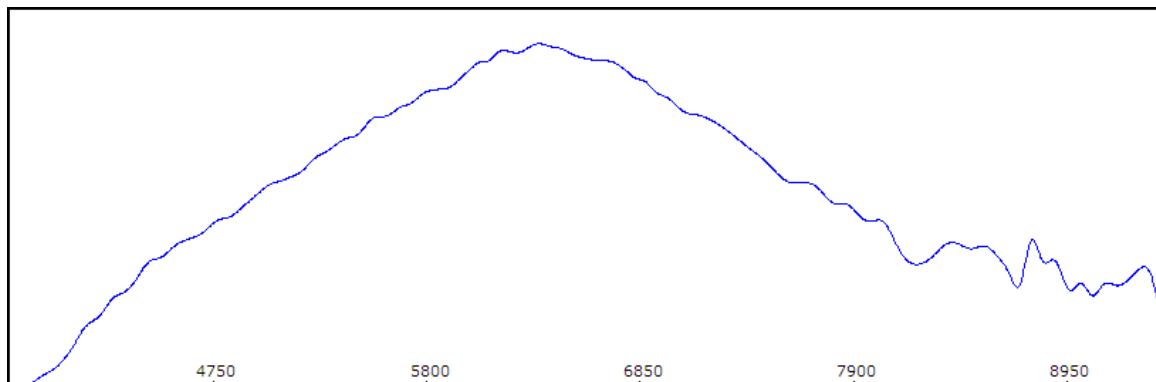


Slika 63. Upoređivanje sirovog spektra (plava), kataloškog profila (ljubičasta) i rezultat njihovog deljenja (zeleni)

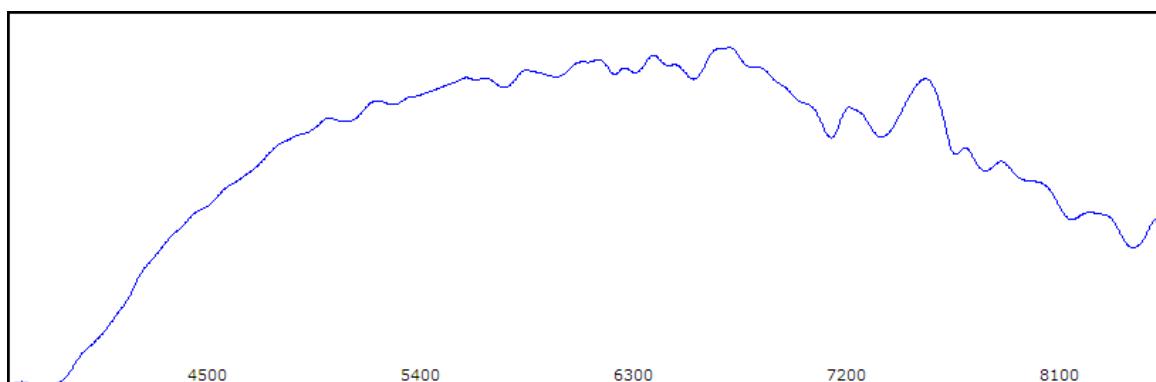
Na prethodnoj slici se na primeru može videti profil našeg sirovog spektra Altaira, označenog plavom bojom, dok je kataloški spektar A7 V zvezde označen ljubičastom. Kada podelimo profil sirovog spektra sa kataloškim profilom zvezde, dobijamo profil zelene boje. Fitovanjem ovog profila dobijamo relativnu osetljivost našeg spektrograфа na osnovу optičког sistema i CCD-a.



Slika 64. Fitovanje profila u Visual Spec-u za relativnu osetljivost spektrograфа



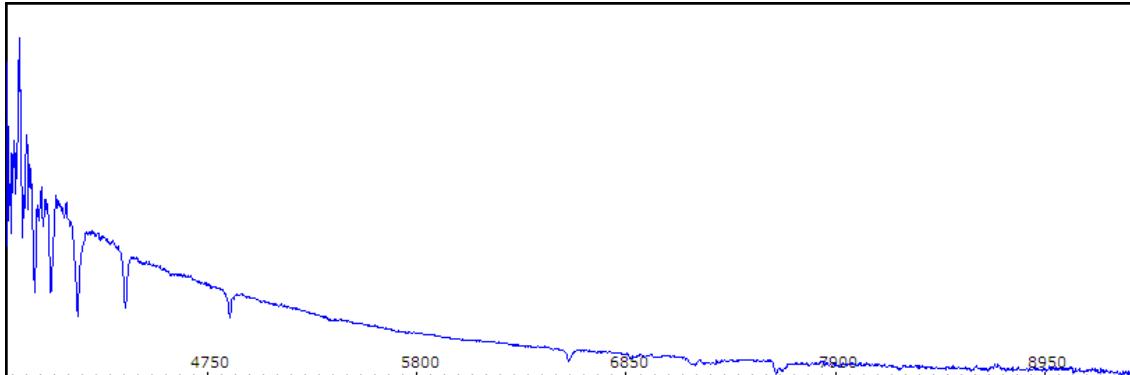
Slika 65. Fitovana kriva osetljivosti spektrograфа za spektar Alkaid, B3 V zvezde



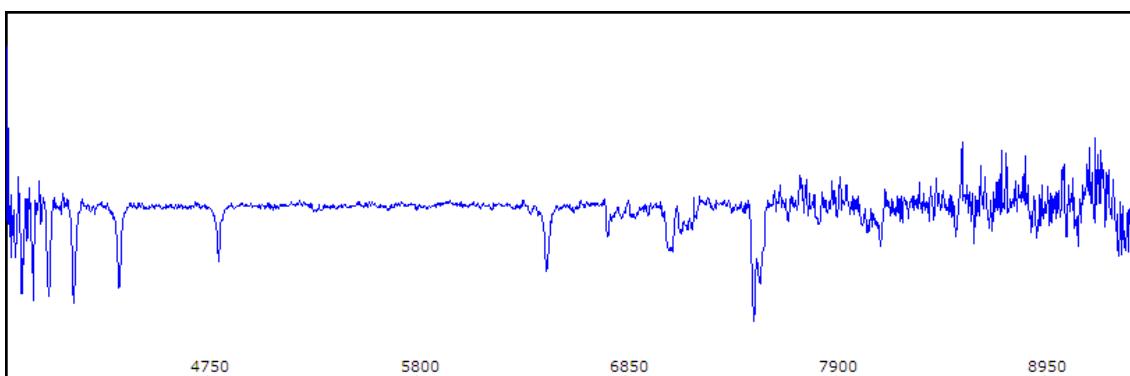
Slika 66. Fitovana kriva osetljivosti spektrograфа za spektar Altair, A7 V zvezde

Možemo videti da se ovi fitovi dosta slažu sa grafikonom za relativnu osetljivost CCD-a (slika 17).

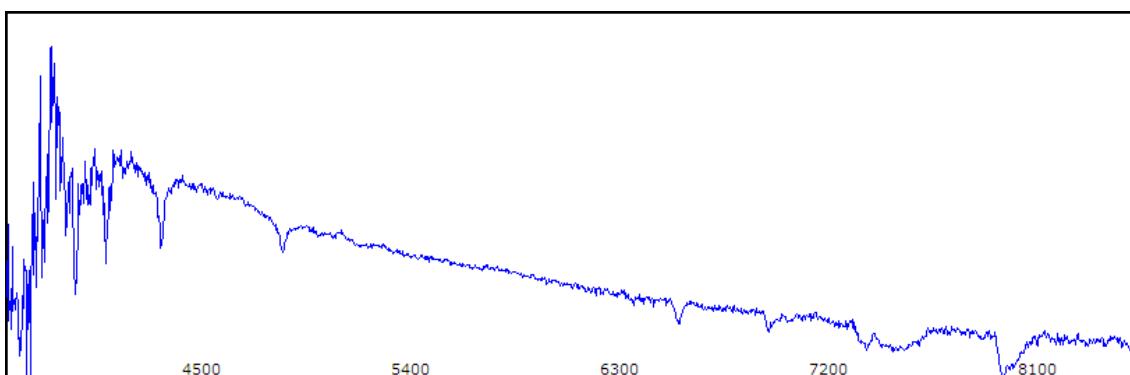
Ponovo, preko Visual Spec softvera, deljenjem sirovog snimka spektra sa krivom koju smo dobili za relativnu osetljivost spektrografa, dobijamo konačni profil, tj. potpuno obrađeni spektar.



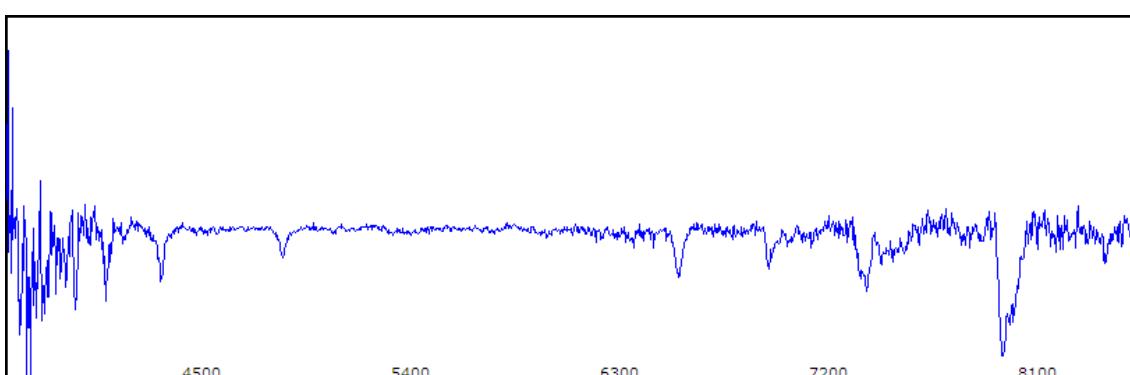
Slika 67. Obrađeni spektar Alkaid, B3 V zvezde



Slika 68. Normalizovani spektar Alkaid, B3 V zvezde

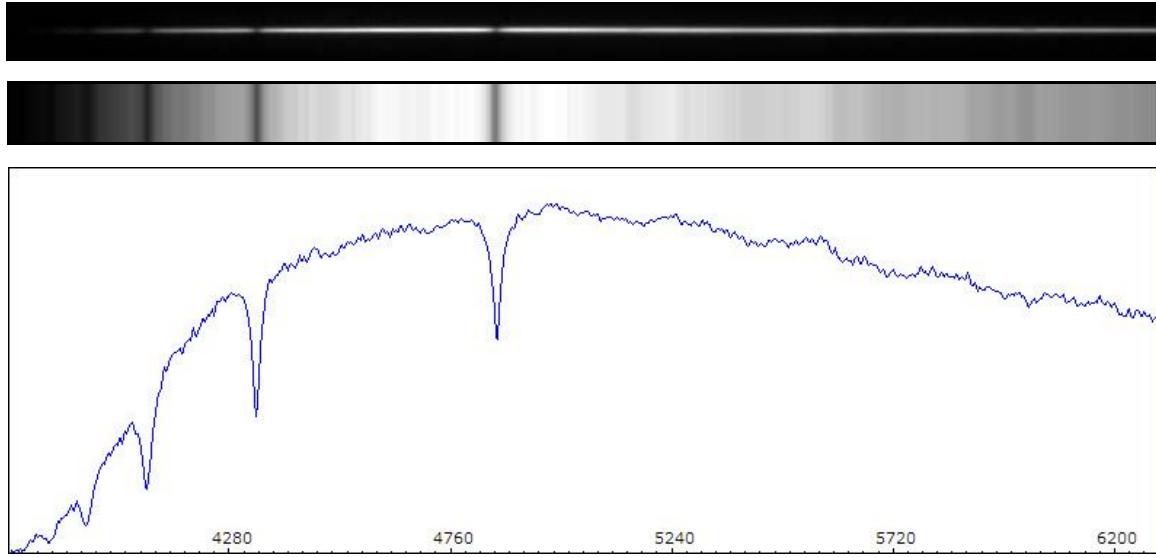


Slika 69. Obrađeni spektar Altair, A7 V zvezde

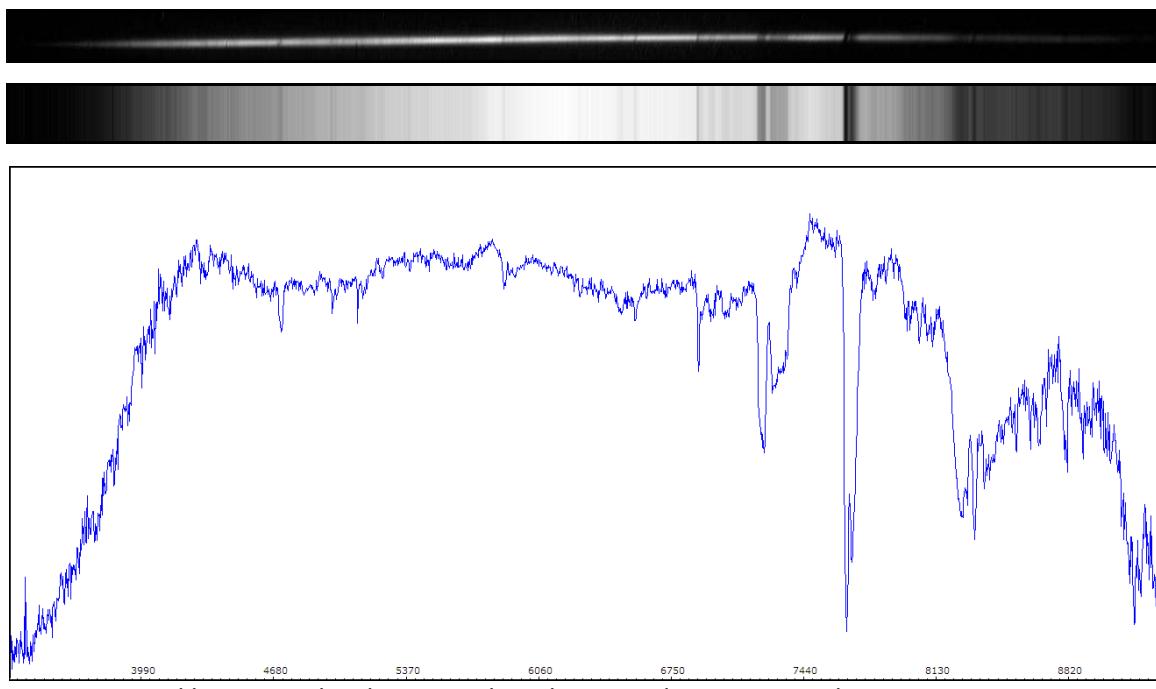


Slika 70. Normalizovani spektar Altair, A7 V zvezde

Uz nešto manje uspeha smo snimili i delove spektara još dve zvezde, ali njih nismo obrađivali do kraja.



Slika 71. Neobrađeni snimak spektra Vega, A0Va zvezde



Slika 72. Neobrađeni snimak spektra Kapela, Aa K0III – Ab G1III sistema

Iako je Kapela šesta najsjajnija zvezda na nebu, ona je zapravo sistem od četiri zvezde, tj. dva binarna para. Pošto smo bili ograničeni slabim praćenjem, koje nam dozvoljava samo kratkotrajne ekspozicije, to je otprilike sve što smo bili u mogućnosti da uradimo, što se tiče spektara zvezda.

9. Zaključak

Iako smo bili ograničeni opremom i finansijama, ovaj projekat izrade amaterskog spektrograфа mnogima može poslužiti kao smernica za upoznavanje sa spektroskopijom u praksi. Tokom izrade smo naučili dosta toga, iz mnoštva izvora, pogotovo neke stvari koje se ne mogu pronaći u domaćoj literaturi ili na našem jeziku.

Možemo biti skromni i izjaviti da su naši rezultati, ako uzmemo u obzir date uslove, odlični. Za bilo kakvo ozbiljno snimanje spektra su potrebne ekspozicije od nekoliko minuta, dok smo mi bili ograničeni na 15-30 sekundi. Takođe se možemo pohvaliti da smo, sa našim dosta ograničenim znanjem o obradi snimljenih spektara, uspeli proizvesti rezultate i profile koji liče na kataloške spekture zvezda.



Slika 73. Montirani spektrograf na Skywatcher AP 80/600 ED OTA teleskopu

Ono što konačno možemo zaključiti je da ovaj projekat za nas predstavlja ogroman korak unapred, dok smo u isto vreme otvorili vrata i nekim novim saznanjima. Saznali smo da se spektroskopija ne sastoji samo od „proreza, kolimatora, rešetke, kamere i senzora“, već da stvari idu mnogo dublje i da smo mi samo zagrebali po površini ove tematike. Izrada spektrograфа je samo jedan vrh koji smo osvojili, a sledeći izazov je da u potpunosti savladamo tehnike snimanja i obrade spektra.

10. Literatura

Harrison, K. M. (2011). *Astronomical Spectroscopy for Amateurs*. Springer Science & Business Media.

Prodanović, T. (2008). *Skripta iz predmeta spektroskopija vasione*. Prirodno matematički fakultet, Univerzitet u Novom Sadu, Novi Sad.

Buil, C. (English translation: Steve Dearden). *Theoretical Parameters for the Design of a "Classical" Spectrograph*: www.astrosurf.com/buil/us/stage/calcul/design_us

Wikipedia: sr.wikipedia.org/sr-el/Функција_ширења_тачке

Atila Gobor
Petefi Šandora 8.
Temerin
Srbija
Tel: 066 / 90-41-266
email: atila.gobor@pcaxe.com



Rođen sam u Novom Sadu, 4. juna 1983. godine, a osnovnu školu „Kokai Imre“ sam završio u Temerinu. Srednju školu sam pohađao u Novom Sadu – Elektrotehnička škola „Mihajlo Pupin“, gde 2002. godine dobijam diplomu RTV tehničara. Nakon završetka srednje škole upisujem Visoku poslovnu školu strukovnih studija, ali je napuštam nakon prvog semestra jer se nisam pronašao u tome. Godine 2004. upisujem akademske studije na smeru Astronomija sa astrofizikom, na Prirodno-matematičkom fakultetu, Univerziteta u Novom Sadu.

U više navrata sam volontirao na manifestacijama „Noć Muzeja“ i „Noć Istraživača“, a učestvovao sam i u realizaciji radionica na četiri novosadska Festivala Nauke.

Pohađao sam i Drugu letnju školu astronomije („The second summer school in astronomy“) u trajanju od 29.09. do 01.10.2008. godine, kao i Treću internacionalnu školu astronomije („The third international school in astronomy“) u periodu od 29.06. do 01.07.2010, koje su održavane na Matematičkom fakultetu, Univerziteta u Beogradu. Pored toga sam od 21. do 25. maja 2013. pohađao Školu fizike visokih energija u Sarajevu („Sarajevo School of High Energy Physics“ – SSHEP 2013).

Tečno znanje pisanja, čitanja i konverzacije posedujem iz tri jezika: srpskog, mađarskog i engleskog, s tim da mi je mađarski maternji jezik. Nemački jezik koristim na početnom nivou.

Sebe smatram veoma vrednom i radnom osobom koja ima talenat za organizaciju i rešavanje problema na kreativan način. Veoma sam pedantan i volim u potpunosti da se posvetim onome što radim. U poslednjih nekoliko godina sam na domaćim prostorima stekao reputaciju uticajne YouTube ličnosti i eksperta za računare, zahvaljujući angažovanosti na IT portalu PCAXE, gde pišem i snimam edukativne video materijale i recenzije u oblasti informacionih tehnologija.

UNIVERZITET U NOVOM SADU
PRIRODNO-MATEMATIČKI FAKULTET

KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA

Redni broj:

RBR

Identifikacioni broj:

IBR

Tip dokumentacije:

TD

Tip zapisa:

TZ

Vrsta rada:

VR

Autor: Atila Gobor

AU

Mentor: Prof dr. Tijana Prodanović

MN

Naslov rada: Problematika konstrukcije i izrada amaterskog spektrografa

NR

Jezik publikacije: srpski (latinica)

JP

Jezik izvoda: srpski/engleski

JI

Zemlja publikovanja: Republika Srbija

ZP

Uže geografsko područje: Vojvodina

UGP

Godina: 2016

GO

Izdavač: Autorski reprint

IZ

Mesto i adresa: Prirodno-matematički fakultet, Trg Dositeja Obradovića 4, Novi Sad

MA

Fizički opis rada: broj poglavlja / strana / lit. citata / slika / formula

FO

10/58/12/7/73/18

Naučna oblast: Fizika

NO

Naučna disciplina: Astrofizika

ND

Predmetna odrednica/ ključne reči: Spektrograf, konstrukcija, izrada, obrada, spektar, snimanje

PO

UDK

Čuva se: Biblioteka departmana za fiziku, PMF-a u Novom Sadu

ČU

Važna napomena: nema

VN

Izvod: Prikazan je proračun parametara spektrograфа, njegova konstrukcija i obrada zabeleženih rezultata.

IZ

Datum prihvatanja teme od NN veća: 05.09.2016.

DP

Datum odbrane: 26.09.2016.

DO

Članovi komisije: Prof. dr Tijana Prodanović, dr Dušan Mrđa, dr Igor Savić

KO

Predsednik: Prof. dr Dušan Mrđa

član: Prof. dr Tijana Prodanović

član: Prof. dr Igor Savić

UNIVERSITY OF NOVI SAD
FACULTY OF SCIENCE AND MATHEMATICS

KEY WORDS DOCUMENTATION

Accession number:

ANO

Identification number:

INO

Document type:

DT

Monograph publication

Type of record:

TR

Textual printed material

Content code:

CC

Final paper

Author:

AU

Atila Gobor

Mentor/comentor:

MN

Phd. Tijana Prodanović

Title:

TI

Construction and making of an amateur spectrograph

Language of text:

LT

Serbian (Latin)

Language of abstract:

LA

English

Country of publication:

CP

Republic of Serbia

Locality of publication:

LP

Vojvodina

Publication year:

PY

2016

Publisher:

PU

Author's reprint

Publication place:

PP

Faculty of Science and Mathematics, Trg Dositeja Obradovića 4, Novi Sad

Physical description:

PD

Number of chapters / pages / quotes / pictures / formulas

10/58/12/7/73/18

Scientific field:

SF

Physics

Scientific discipline:

SD

Astrophysics

Subject/ Key words:

SKW

Spectrograph, construction, making, data analysis, spectrum, obtaining

UC

Holding data:

Library of Department of Physics, Faculty of Science and Mathematics,

HD

Novi Sad

Note:

none

N

Abstract:

The calculation of the spectrograph parameters is shown, along with its construction and the analysis of the acquired data.

AB

Accepted by the Scientific Board:

05.09.2016.

ASB

Defended on:

26.09.2016.

DE

Thesis defend board:

Prof. dr Tijana Prodanović, dr Dušan Mrđa, dr Igor Savić

DB

President:

Prof. dr Dušan Mrđa

Member:

Prof. dr Tijana Prodanović

Member:

Prof. dr Igor Savić

Veliko hvala:

Urošu Meštriću – za predloge i novi prorez za naredni spektrograf;

Janku Mraviku – za prorez koji smo koristili u spektrografu;

Božidaru Vujičiću – za difrakcionu rešetku;

Černak Norbertu – za zavarivanje metalnih delova;

Žani Radošević – za lektorisanje rada;

Astronomskom Društvu Novi Sad ADNOS – za teleskop, CCD i svu ostalu prateću opremu;

Srđanu Šibaliću – za predloge, teorijsku pomoć, snimanje spektara i obradu podataka;

Tijani Prodanović – za njeno neizmerno strpljenje dok je čekala završetak rada. ☺