

# Konstrukcija CCD spektrografa i analiza Sunčevog spektra

Andrija Eršek

# Sadržaj

Uvod.....	3
1. Teorija.....	4
1.1 Spektar.....	4
1.2 Spektrometrija.....	6
1.3 Optički spektroskop.....	9
1.4 Sunčev spektar.....	11
2. Izvedba spektrografa i mjerenje.....	12
2.1 Izvedba.....	12
2.2 Software.....	15
2.3 Kalibracija spektrografa.....	16
Sunčev spektar.....	18
3. Analiza Sunčevog spektra.....	21
3.1 Sastav Sunca.....	21
3.2 Temperatura Sunca.....	22
3.3 Spektralni tip Sunca.....	22
Zaključak.....	24
Literatura.....	25
Životopis.....	26

## Uvod

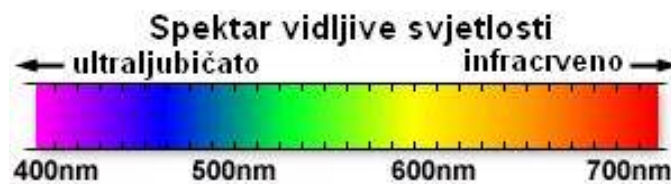
Sa spektroskopijom sam se upoznao na Ljetnoj školi prirodoslovlja održanoj prošlog ljeta u Višnjanu. Tamo smo imali izvanrednog mentora – dr. Željka Andreića. Rad u grupi dr. Željka Andreića me zainteresirao za spektralnu analizu.. Naučio sam mnogo o tom području i izradio svoj prvi spektroskop od komada kartona i isječka CD-a. Pošto me to područje fizike i astronomije vrlo zainteresiralo nakon povratka kući sam na internetu tražio još informacija o tome, te naišao na ideje o izradi CCD spektrografa od priručnih dijelova koji ne prelaze vrijednost od nekoliko stotina kuna. Pošto volim praktični rad, a poseban mi je izazov iz "ničeg" napraviti nešto, primio sam se posla, osmislio uređaj, prikupio dijelove i sastavio ga. Spektrograf je pokazao solidne rezultate, te sam ga odlučio iskoristiti kao dio rada za natjecanje iz astronomije. Drugi dio rada se odnosi na analizu spektra nama najbliže zvijezde i glavnog izvora energije – Sunca koji sam snimio tim spektrografom. Odlučio sam utvrditi kojim elementima pripadaju najizraženije linije Sunčevog spektra, te spektralni tip Sunca i njegovu temperaturu.

# 1. Teorija

## 1.1 Spektar

Pod spektrom se najčešće misli na spektar elektromagnetskog zračenja, tj. na funkciju koja daje intenzitet zračenja u ovisnosti o frekvenciji ili valnoj duljini zračenja. Eksperimentalno, spektar prikazuje intenzitet elektromagnetskog zračenja koje zrači neki izvor poredanog po rastućoj frekvenciji ili valnoj duljini. Elektromagnetsko zračenje obuhvaća valne duljine od  $10^{-15}$  do  $10^7$  m. Prema načinu postanka razlikujemo *emisijske* i *apsorpcijske* spektre.

Slika 1.1.  
kontinuirani spektar



Kontinuirani spektar je približno opisan Planckovim zakonom zračenja crnog tijela, gdje valna duljina maksimuma intenziteta zračenja ( $\lambda_{maks}$ ) omogućuje određivanje efektivne temperature tijela ( $T_{ef}$ ) pomoću Wienovog zakona:

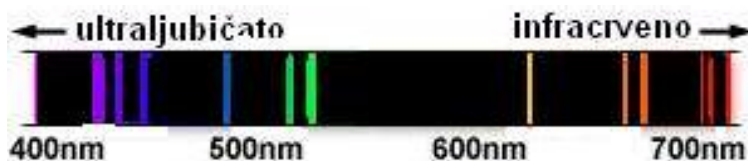
$$T_{ef} = \frac{2.897 \cdot 10^{-3} K \cdot m}{\lambda_{maks}} \quad (1.1)$$

Kontinuirani spektar zrače čvrsta tijela te gusti plinovi. Kod zračenja plinova u kontinuiranom spektru pojavljuju se apsorpcijske linije. Rijetki plinovi pri električnom pražnjenju zrače emisijski linijski spektar, tj. spektar se sastoji od svijetlih linija na točno određenim valnim duljinama. Ovu pojavu objašnjava kvantna fizika polazeći od pretpostavke da se elektromagnetsko zračenje prenosi fotonima, te da elektron, gibajući se u području oko jezgre atoma ne može primiti ili predati bilo koju količinu energije već samo one koje odgovaraju razlikama između dva energetska stanja. Pri prijelazu elektrona iz višeg u niže energetska stanje nastaje foton točno određene energije:

$$E = h\nu = E_v - E_n \quad \nu, n \in \mathbf{N} \quad (1.2)$$

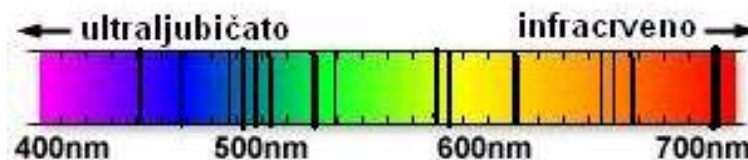
gdje je  $h$  Planckova konstanta čiji je iznos  $6.634 \cdot 10^{-34}$  J s,  $E$  je energija zračenja,  $\nu$  frekvencija elektromagnetskog zračenja, a  $E_v$  i  $E_n$  predstavljaju energije višeg i nižeg energetskeg nivoa. Budući da su energije  $E_v$  i  $E_n$  u atomima točno određene (kvantizirane), zračenje će biti emitirano samo na određenim valnim duljinama, što objašnjava nastanak svijetlih spektralnih linija rijetkih plinova pri električnom pražnjenju na točno određenim valnim duljinama.

Slika 1.2.  
emisijski spektar



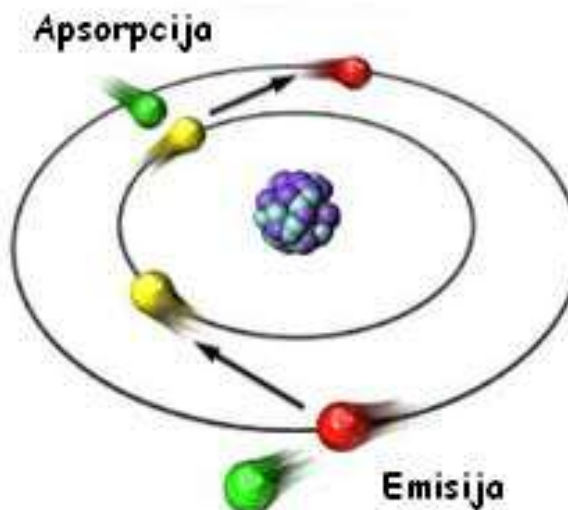
Apsorpcijski spektri opažaju se ako elektromagnetsko zračenje prolazi kroz određena sredstva (hladni rijetki plin) koja apsorbiraju zračenje određene valne duljine. Ako se takav spektar uspoređi sa spektrom zračenja koje emitira isti izvor, zapaziti će se da je intenzitet zračenja pojedinih valnih duljina znatno smanjen. To nastaje zbog toga što elektroni u atomima i molekulama kroz koje prolazi elektromagnetsko zračenje apsorbiraju zračenje određene valne duljina čije su energije jednake energiji prijelaza elektrona iz nižeg u viši energetski nivo. To je efekt suprotan nastanku emisijskog spektra rijetkog plina. Valne duljine koje sredstvo apsorbira iz emisijskog spektra izvora odgovaraju valnim duljinama koje bi ono samo emitiralo u usijanom stanju (Kirchoffov princip).

Slika 1.3  
apsorpcijski spektar



Kako su i emisijski i apsorpcijski spektri karakteristični za svaki atom i molekulu, oba se mogu koristiti za određivanje sastava nekog uzorka. Znanost koja se bavi proučavanjem spektara zove se spektrometrija.

Slika 1.4.  
shematski prikaz emisije  
i apsorpcije





Balmerove serije spektralnih linija. U svoj model Bohr unosi Planckovu ideju iz 1900. godine o diskontinuiranosti energetske stanja, čime je riješio problem kruženja elektrona oko jezgre. Dakle, kemijski element može apsorbirati ili emitirati elektromagnetsko zračenje (EMZ) samo one valne duljine čija energija odgovara razlici u energijama dozvoljenih energetske stanja atoma. Uspjeh Bohrovog modela dao je znanstvenu pozadinu spektrometrijskim opažanjima i omogućio njen razvoj u najvažnije oruđe analize strukture atoma i molekula.

S obzirom na valnu duljinu, odnosno pripadajuću energiju (frekvenciju ili valni broj) spektar EMZ je podjeljen na nekoliko područja (Tablica 1.1.).

Tablica 1.1. Područja EMZ i pripadajuće spektrometrijske tehnike

Spektralna područja	Valna duljina	Vrsta interakcija	Eksperimentalne tehnike
Područje $\gamma$ -zraka	0,005 - 1,4 Å	Nuklearni prijelazi	Mössbauerova spektrometrija
Područje rendgenskih zraka	0,1 - 100 Å	Prijelazi unutarnjih elektrona	Spektrometrija apsorpcije rendgenskih zraka
Ultraljubičasto područje	10 - 400 nm	Prijelazi vanjskih elektrona	UV-VIS; AAS
vidljivo područje	400 - 700 nm	Prijelazi vanjskih elektrona	UV-VIS; AAS
Infracrveno područje	700 nm - 1 mm	Vibracije	IR; Raman
Mikrovalno područje	1 mm - 1 dm	Rotacije	Spektrometrija mikrovalne apsorpcije
Radiovalno područje	> 1 dm	Promjena spina jezgre i elektrona	EPR; NMR

U ovom radu ću se ograničiti samo na spektrometriju u vidljivom i bliskom IR području (400 – 900 nm).

Spektrometrija ima vrlo široko područje primjene u mnogim znanostima. U kemiji se upotrebljava za kvantitativnu i kvalitativnu analizu. Čak je nekoliko kemijskih elemenata otkriveno spektrometrijskim metodama (helij, cezij, rubidij, galij, talij...). O velikoj osjetljivosti spektrometrijskih metoda govori činjenica da su rijetki izotopi nekih elemenata prvi put detektirani ovom metodom analize (deuterij, tricij, izotopi ugljika, dušika, kisika...). Spektrometrija daje važne podatke o elektronskom omotaču atoma i molekula, o prostornoj raspodjeli atoma u molekuli i o međuproduktima koji se stvaraju tokom kemijskih reakcija.

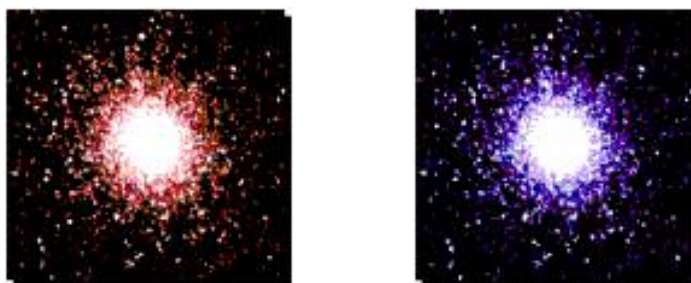
Astronomi pomoću spektrometrije mogu utvrditi točan sastav nebeskih tijela i neke podatke o fizičkim uvjetima koji vladaju na njima. Zahvaljujući spektrometriji se vrši klasifikacija zvjezdanih spektara, tj. određuje se tip zvijezde. Zvijezde se prema spektrima razvrstavaju na razrede (O, B, A, F, G, K, M). Osim sastava nebeskih tijela spektrometrija nam otkriva podatke o gibanju nebeskih tijela ili nekih njihovih dijelova pomoću Dopplerovog efekta. Tako je dokazano širenje svemira, gibanje Sunca u Galaksiji, određena brzina rotacije nekih zvijezda i sustava višestrukih zvijezda. Dopplerov efekt nastaje u slučaju postojanja relativnog gibanja izvora i opažača. Pritom se mijenja valna duljina zračenja izvora ( $\lambda_0 \rightarrow \lambda$ ), a mjerenjem promjene frekvencije može se odrediti relativna brzina izvora  $v$

$$\frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0} = \frac{v}{c} \quad (1.3)$$

Kada brzine postanu usporedive s brzinom svjetlosti potrebno je upotrijebiti formulu izvedenu iz specijalne teorije relativnosti

$$\frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0} = \sqrt{\frac{1 + \frac{v}{c}}{1 - \frac{v}{c}}} \quad (1.4)$$

Slika 1.6.  
crveni i plavi pomak



Metodama kvalitativne i kvantitativne spektroskopije se u biologiji i medicini određuje prisustvo pojedinih elemenata u biokemijskim spojevima, stanicama i tkivima. Struktura mnogih važnih bioloških spojeva kao npr. enzima i vitamina je određena spektroskopskom metodom. U kemijskoj analizi organskih spojeva i u

medicini se mnogo koristi spektroskopija nuklearnom magnetskom rezonancijom (NMR). Nuklearna magnetska rezonancijom pokazuje razliku energijskih razina magnetskog momenta jezgre. U NMR spektru frekvencija apsorbiranog zračenja ukazuje na okruženje vodikovih atoma, odnosno gustoću elektrona oko vodikove jezgre. U medicini je na osnovi NMR-a razvijena dijagnostička metoda trodimenzionalnog snimanja organizma bez štetnih posljedica – *magnetic resonance imaging*.



Slika 1.7.  
NMR slika ljudskog mozga

### 1.3 Optički spektroskop

Spektroskop je instrument za dobivanje i ispitivanje spektra. Ako se spektar registrira fotografskim putem na tzv. spektrogramu, onda se instrument naziva spektrograf. Također postoje i spektroskopi kod kojih je detektor svjetlosti neki objektivni instrument (foto ćelija, foto otpornik, CCD čip). Oni se koriste i u spektroskopiji u vidljivom području, ali najčešće izvan vidljivog područja.

Glavni dijelovi spektroskopa su:

- pukotina
- disperzijski sustav (prizma ili optička rešetka)
- optički sustav za dobivanje spektralnih linija
- detektor zračenja

Spektralna linija je monokromatska slika pukotine. Osobine dobivenih spektralnih linija u velikoj mjeri ovise o točnosti kojom je izrađena pukotina odnosno kojom se preciznošću može podesiti. Kod kvalitetnijih instrumenata širina pukotine se može podesiti između 0,005 i 1 mm. Rubovi pukotine moraju biti ravni, međusobno strogo paralelni i moraju ležati u istoj ravnini.

Kolimator osvjetljava disperzijski sustav paralelnim snopom svjetlosti (snop svjetlosti pri prolasku kroz pukotinu postaje divergentan, pa ga se mora učiniti paralelnim).



Slika 1.8 shema optičkog spektrografa

Disperzijski sustav je staklena prizma ili optička rešetka. Prizma razdvaja svjetlost na valne duljine na osnovu različitog indeksa loma svjetlosti različitih valnih duljina. Optička rešetka razdvaja svjetlost na valne duljine na osnovu valnih svojstava svjetlosti, odnosno interferencijom zraka koje se razlikuju za jednak optički put, koji je jednak višekratniku valne duljine:

$$\sin \alpha = \frac{k\lambda}{d} \quad (1.5)$$

gdje je  $\lambda$  valna duljina svjetlosti,  $d$  konstanta rešetke,  $\alpha$  kut disperzije, a  $k$  red spektra. Za razliku od prizme, optička rešetka ima linearan raspored valnih duljina.

Nakon prolaska kroz disperzijski sustav snop svjetlosti se fokusira da bi se dobila oštra slika pukotine. To se ostvaruje lećama i konkavnim zrcalima. Ako se spektar promatra vizualno onda se za promatranje upotrebljava okular koji povećava 3 do 10 puta. Ovaj se okular ugrađuje u isti tubus s objektivom. Radi očitavanja vrijednosti može se pomicati okularni tubus i postaviti pod odgovarajući kut u odnosu na disperzijski sustav. Također se može pomicati i disperzijski sustav s istom svrhom.

Disperzija spektroskopa pokazuje kako se razlaže svjetlost prema valnim duljinama. Ona se kvantitativno može izraziti kao kutna ili linearna disperzija. Kutna disperzija ( $\Delta\phi/\Delta\lambda$ ) je mjera promjene kuta ( $\Delta\phi$ ) pri promjeni njegove valne duljine za  $\Delta\lambda$ . U praksi se češće koristi linearna disperzija ( $\Delta l/\Delta\lambda$ ), koja pokazuje razmak  $\Delta l$  između dvije linije bliskih valnih duljina na ekranu gdje je dobiven spektar.

Razlučivost spektroskopa je njegova osobina da se dvije bliske linije vide odvojeno. Razlučivost se kvantitativno izražava količnikom  $\Delta\lambda/\lambda$ . Obzirom da je svaka linija u spektru slika uske ulazne pukotine, ona se dobije u obliku difrakcijske slike. Dvije spektralne linije istog intenziteta su razdvojene ako difrakcijski minimum jedne pada na maksimum druge (Rayleighov kriterij).

Disperzija određuje mjesto u spektru gdje će se nalaziti svjetlost određene valne duljine, a razlučivost pokazuje u kojoj će mjeri ona biti razdvojena od druge bliske linije.

## 1.4 Sunčev spektar

Jedino nam Sunčevo zračenje govori nešto o stanjima i pojavama na Suncu. Rastavljena na spektar, Sunčeva svjetlost nam daje saznanje o materiji koja se nalazi na Suncu. Teleskop ne dopire dalje od Sunčeve površine, koja se zove fotosfera. Iz užarene unutrašnjosti, čija je temperatura mnogo viša nego na površini, zračenje izbija van. Pri tom nastaje apsorpcijski spektar s Fraunhoferovim linijama. Određeno je preko 20 000 linija tog spektra. Iz njihovog intenziteta možemo izvesti zaključke o tome koliko se atoma određenog elementa nalazi u jedinici volumena, a iz valne duljine i o kemijskom elementu koji apsorbira svjetlost. Tako je utvrđeno kako na Suncu postoji čak 57 elemenata periodnog sustava, ali nema osnove da nema i drugih elemenata, samo su možda zastupljeni u toliko malim koncentracijama da ih se ne može utvrditi.

Kako se Sunčeva svjetlost apsorbira i u Zemljinoj atmosferi, moglo bi se zaključiti da analiza Sunčevog spektra nije točna. Ali apsorpcijske linije koje uzrokuje Zemljina atmosfera se mogu razlikovati od Sunčevih time što im je intenzitet veći kad je Sunce bliže horizontu.

Spektar u unutrašnjosti Sunca je kontinuiran. Kvant zračenja emitiran je i apsorbiran prilikom sudara elektrona i iona (zakočno zračenje), ili se raspršuje na slobodnom elektronu, tj. mijenja smjer. Zračenje se ne prenosi izravno iz središta Sunca prema van, već u mnogobrojnom nizu emisija, apsorpcija i raspršenja i pritom mu se povećava valna duljina. Zbog toga što su temperature u središtu Sunca više, spektar ima maksimum u rendgenskom području; prema van valna duljina maksimuma sve više raste dok ne prijeđe u vidljivo područje. Do nas dopire svjetlost iz Sunčeve atmosfere. Dublji slojevi nam ostaju neprozirni, a prvi proziran sloj je fotosfera. Sunčeva atmosfera se sastoji od fotosfere, kromosfere i korone. Prolaskom svjetlosti kroz te slojeve dolazi do apsorpcije svjetlosti pojedinih valnih duljina te nastaju Fraunhoferove linije.

Kad se prilikom pomračenja Sunca Mjesec nađe ispred Sunčeva diska, tada od Sunčevog diska ostane u trenutku prije potpune pomračenja samo vrlo uzak svjetleći srp, tako da je u nekoliko sekundi prije pomračenja Sunčeva svjetlost zaklonjena izuzev svjetlećih slojeva Sunčeve atmosfere. Tada se odjednom pokazuje, umjesto dosadašnjeg apsorpcijskog spektra, jedan emisijski spektar, tzv. spektar trenutnog bljeska ("fleš" spektar, eng. flash = bljesak). Plinovi zbog kojih su se do sad pojavljivale Fraunhoferove linije postaju toliko užareni da i sami svijetle, te su sad postali svjetlosni izvori.



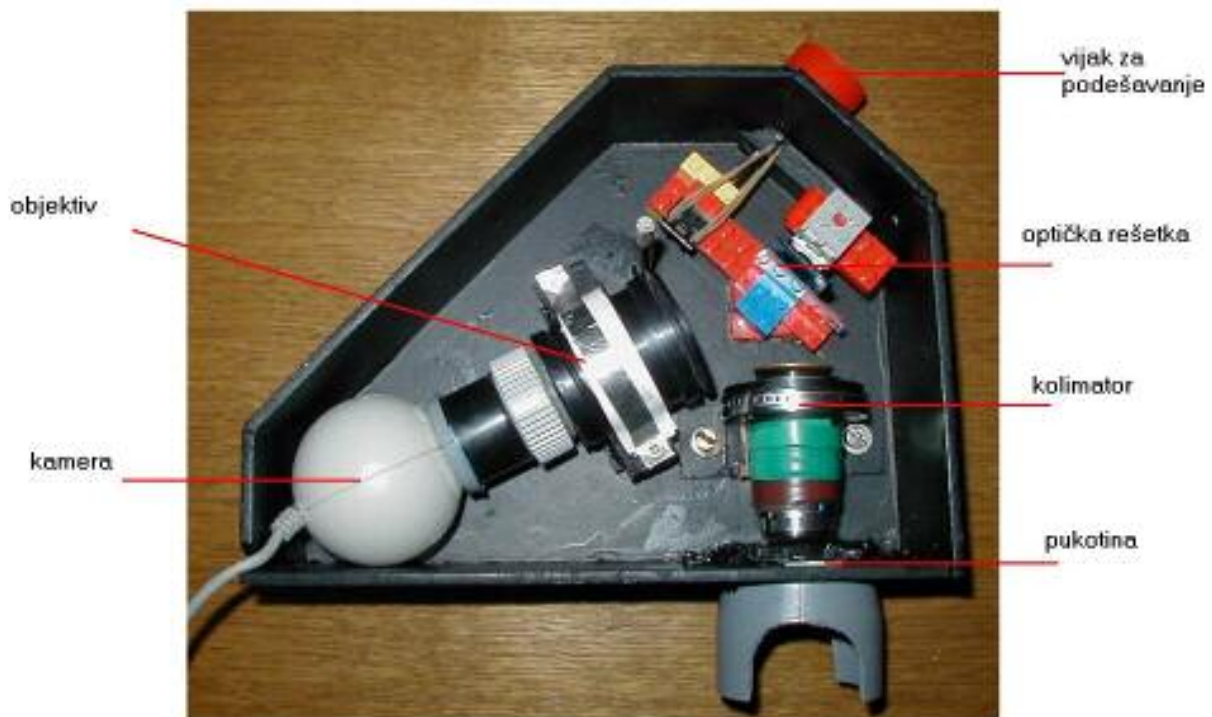
Slika 1.9.  
Sunčeva korona za vrijeme pomračenja

## 2. Izvedba spektrografa i mjerenje

### 2.1 Izvedba

Kad sam se odlučio posvetiti izradi spektrografa postavio sam nekoliko konstrukcijskih kriterija: uređaj bi trebao davati što veću razlučivost, biti malen i lagan da bi se mogao montirati na teleskop, te biti jeftin.

Pri konstrukciji sam se oslonio na dijelove i materijal koji sam imao kod kuće. Kao CCD kamera služi Connectix QuickCam Color 2, web kamera stara gotovo 6 godina, kao difrakcijska rešetka korišten je isječak CD-a, pukotina je napravljena od dvije britvice, kolimator je objektiv starog pokvarenog fotoaparata kojem je dodana jedna divergentna leću kako bi se povećala žarišnu daljinu, a objektiv kamere je objektiv sa starog dijaprojektora. Kao stalak za difrakcijsku rešetku su poslužile LEGO kocke, a cijeli uređaj je složen u kutiji od lesonita koju sam sam izradio.



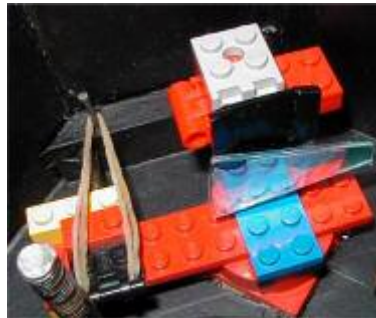
Slika 2.1. CCD spektrograf

Pukotinu sam sastavio od dvije britvice postavljene na minimalni razmak i zalijepljene na komadić kartona. Kao kolimator sam najprije upotrijebio objektiv žarišne daljine 45 mm, ali nisam bio zadovoljan oštrinom slike, činilo se kao da je pukotina preširoka, a ja ju nisam mogu više suziti. Potom sam ispred objektivu dodao divergentnu leću  $f = 72$  mm (Barlowljeva leća od jednog jako lošeg teleskopa) te dobio kolimator žarišne duljine oko 70 mm, a dugačak jednako kao onaj od 45 mm.

Nosač difrakcijske rešetke sam sastavio od LEGO kockica tako da rešetku mogu pomicati i naginjati u svim smjerovima. Pošto kamera ne može obuhvatiti cijeli

spektar odjednom sastavio sam precizno pomicanje rešetke oko vertikalne osi pomoću vijka i elastične gumice. Kao difrakcijsku rešetku sam upotrijebio isječak sjajnog *no-name* CD-R-a.

Slika 2.2.  
difrakcijska rešetka



Kamera je razlučivosti  $640 \times 480$  pixela, a CCD čip ima dimenzije  $4.8 \times 3.6$  mm. Veličina pixela je oko  $7.5 \mu\text{m}$ . S kamere sam izvadio originalni objektiv i IR filter koji blokira infracrveni dio spektra na koji je kamera osobito osjetljiva. Na kameru sam potom montirao objektiv od dijaprojektora žarišne daljine 90 mm, f 2.8 koji sam spojio na kameru plastičnim navojem za gumeno crijevo što mi je omogućilo precizno izoštravanje slike jednostavnim zavrtnjem odnosno odvrtnjem objektiv. Time sam dobio kameru optičke razlučivosti od  $17''$  po pixelu, što uz optičku rešetku  $d = 1.5 \cdot 10^{-6}$  m daje disperziju od oko  $1.25 \text{ \AA}/\text{pixelu}$ .

Slika 2.3.  
kamera



Kolimator, kameru i objektiv sam montirao na pomične nosače kako bi cijeli uređaj mogao što preciznije podesiti. Kućište sam izradio od lesonita debljine 4 mm i obojao ga mat crnim lakom kako bi spriječio refleksije parazitskog svjetla. Kućište je dimenzija  $230 \times 170 \times 80$  mm, a cijeli uređaj teži oko 750 grama tako da se bez problema može montirati na svaki teleskop.

Slika 2.4.  
sklopljen uređaj



Uz spektroskop sam sastavio i mali teleskop, od leće za naočale dioptrije +1.5 i plastične cijevi za odvod, za projekciju Sunca na pukotinu. Cijeli uređaj sam montirao na mali drveni stalak. Minimalno računalo za korištenje ovog CCD spektrografa je Pentium 90 s instaliranim Windows 95 operacijskim sustavom.

Slika 2.5.  
spektroskop spojen  
na teleskop



## 2.2 Software

Od softwera sam uglavnom koristio besplatne programe dostupne putem interneta:

*Astro-QuickCam* – program za CCD astrofotografiju

*Paint Shop pro* – program za crtanje i obradu fotografija

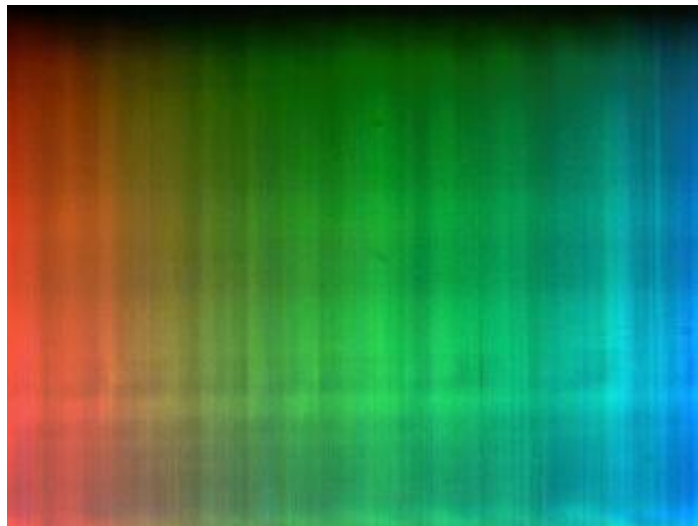
*SAOImage ds9* – program za obradu snimki spektra

*Microsoft Excel* – tablični kalkulator

*Microcal Origin* – program za grafički prikaz podataka

### *Astro-QuickCam*

*Astro-QuickCam* je besplatan program za astrofotografiju s QuickCam kamerama. Ima solidan broj mogućnosti, između ostalog oduzimanje *dark frameova* u letu i kombiniranje slika. Koristio sam ga kao sučelje za komunikaciju s kamerom i za snimanje spektara.



Slika 2.6.  
"sirova" slika

### *Paint Shop pro*

*Paint Shop pro* je vrlo kvalitetan *trial* program za obradu digitalnih slika. Nakon što sam snimio cijeli spektar spojio sam pomoću Paint Shopa sve te slike u jednu. Time sam dobio cijeli spektar prikazan na jednoj slici. Kod spajanja nisam koristio cijelu visinu početnih snimaka, već sam sa svake izrezao najboljih 100 piksela. Kao rezultat sam dobio sliku  $4000 \times 100$  piksela. Tu sliku sam obradio filterima (*unsharp mask* i slično), podesio svjetlinu i kontrast, te podesio nivoe nekih boja da se ne bi izgubile prilikom prebacivanja u crno bijelu sliku koja se analizira s programom *SAOImage ds9*.

### *SAOImage ds9*

*SAOImage* je besplatan program za obradu spektara jako bogat mogućnostima. Koristio sam samo jednu njegovu funkciju, *projection*, pomoću koje je moguće dobiti

grafički i tablični prikaz intenziteta piksela u ovisnosti o  $x$  koordinati piksela i uz uprosječivanje po  $y$  osi. Ovaj program grafičke podatke (obrađene slike spektra) pretvara u tekstualno numeričke koji se vrlo lako mogu obrađivati matematičkim postupcima.

Potom se vrši obrada numeričkih podataka u tabličnom kalkulatoru, te se dobije kalibracijska krivulja ili točne vrijednosti valnih duljina pojedinih linija nepoznatog spektra.

### *Microcal Origin*

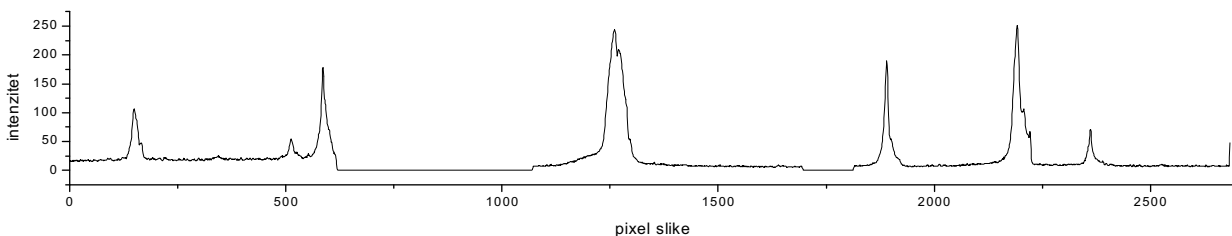
*Microcal Origin* je *demo* program za grafički prikaz tabličnih vrijednosti. U njega se vrlo lako prenose podaci iz Microsoft Excela, te ih kvalitetno grafički prikazuje. Program ima mogućnost linearizacije grafa i određivanja njegovih parametara te standardne devijacije metodom najmanjih kvadrata.

## 2.3 Kalibracija spektrografa te određivanje disperzije i razlučivosti spektra

Za kalibraciju spektroskopa sam upotrijebio helijevu žarulju koja daje 8 lako uočljivih linija u vidljivom i bliskom infracrvenom području (slika 2.7).



Slika 2.7. slika helijevega spektra

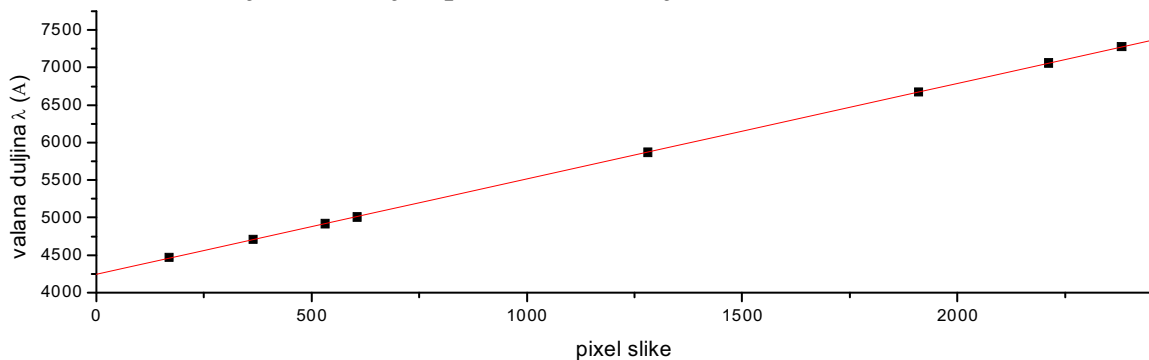


Slika 2.8. grafički prikaz helijevega spektra

Položaj linije (pixel)	Valna duljina (Å)	Naziv linije
2382	7280	He I
2212	7060	He I
1910	6670	He I
1281	5870	He I
606	5010	He I
532	4920	He I
364	4710	He I
169	4470	He I

Tablica 2.1. tablica uočenih helijevih linija

Slika 2.9. kalibracijska krivulja i parametri krivulje



$$\lambda = d \cdot \text{pixel} + b$$

$$d = (1,28 \pm 0,0025) \text{ \AA/pixelu}$$

$$b = (4255 \pm 12) \text{ \AA}$$

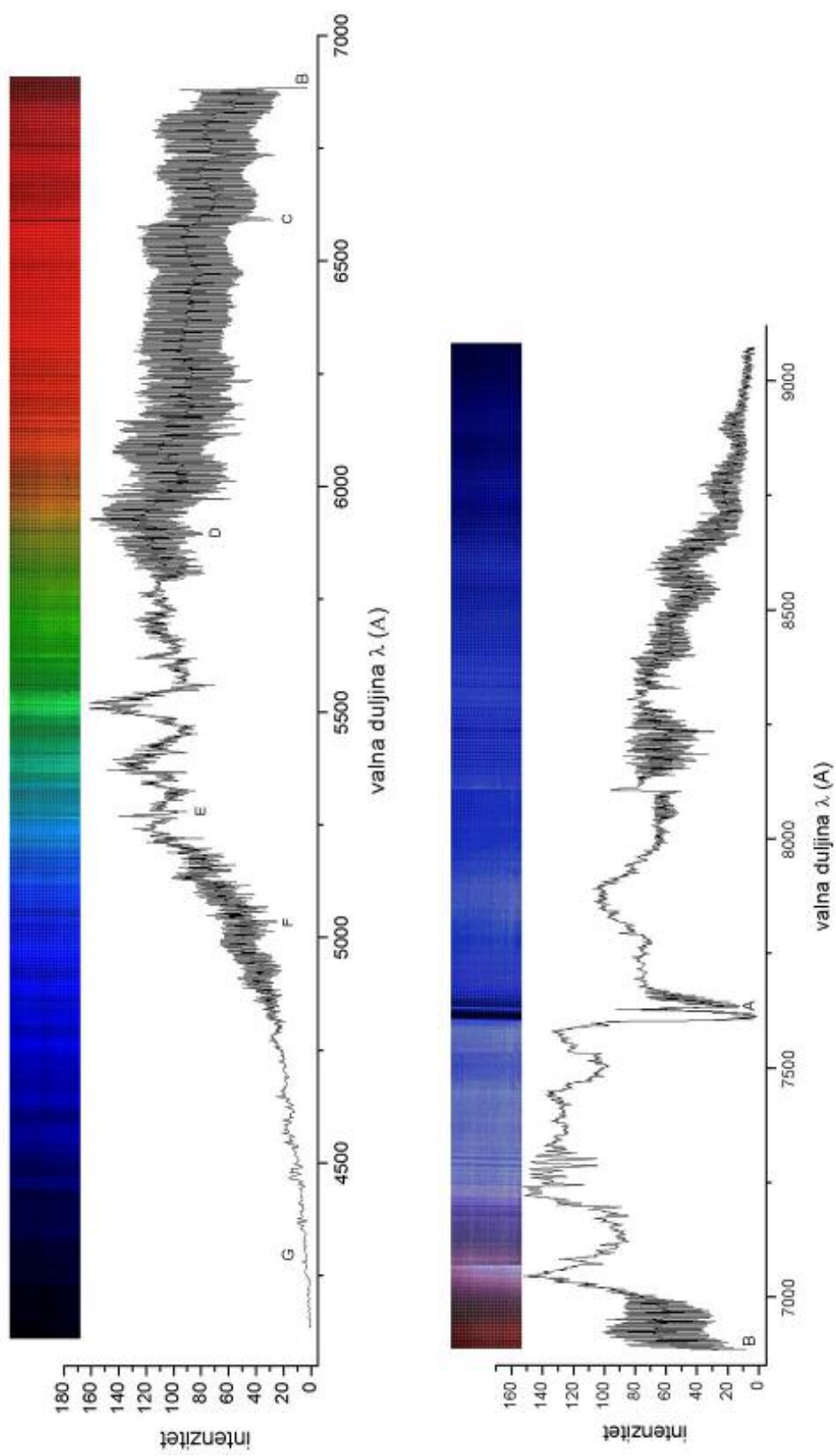
Slika 2.9. prikazuje kalibracijsku krivulju koja omogućuje izračunavanje valnih duljina u nepoznatom spektru, u ovom slučaju spektru Sunca. Uočljivo je dobivanje gotovo savršenog pravca. To je rezultat korištenja optičke rešetke kao disperznog sredstva i potpuno digitalno očitavanje i obrada podataka što isključuje pogreške prilikom mjerenja i očitavanja, već nam ostaje samo pogreška instrumenta koja je minimalna. Koeficijent smjera ovog pravca je jednak linearnoj disperziji spektra i iznosi:

$$(1,28 \pm 0,0025) \text{ \AA/pixelu} \quad (2.1)$$

Određen je metodom najmanjih kvadrata u programu *Microcal Origin*.

Osim velike disperzije postignuta je i relativno velika spektralna razlučivost – u spektru je moguće razlikovati linije koje su razmaknute za manje od 10 Å. To doduše nisam mogao odrediti na ovom spektru, već mi je za to poslužio spektar Sunca koji sam nešto detaljnije analizirao.

Slika 3.1. Sunčev spektar



### 3. Analiza Sunčevog spektra

#### 3.1. Sastav Sunca

Ovim spektrografom sam snimio spektar Sunca u području između 413 i 907 nm (slika 3.1.). U tom intervalu sam uočio više od stotinu apsorpcijskih linija. Ipak ne mogu reći da sam snimio dovoljno kvalitetan spektar da bi iz njega mogao odrediti točan sastav Sunca, već sam izdvojio pedesetak najizraženijih dobivenih linija i usporedio ih s katalogom Sunčevog spektra. Za određivanje sastava na osnovu snimljenog spektra potrebno je snimiti spektar minimalne razlučivosti oko 0,01 Å (svojim spektrografom sam postigao razlučivost oko 10 Å). Za takvu analizu su potrebni uređaji koje imaju samo neke solarne zvezdarnice i dovoljno vremena za analizu dobivenog spektra, pošto ga je potrebno usporediti sa spektrom svih poznatih elemenata. Također ne mogu tvrditi da je ovo samo Sunčev spektar jer i atmosfera apsorbira dio zračenja, a plinovi u atmosferi dodaju svoje linije u spektar.

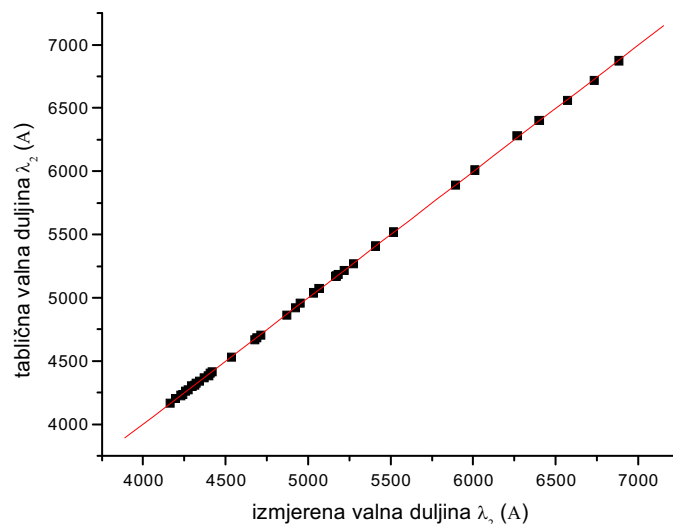
Tablica 3.1.

očitan val. duljina (Å)	tablična valna duljina (Å)	naziv linije	element
4163	4167		Mg I
4198	4202		Fe I
4230	4227	g	Ca I
4240	4236		Fe I
4257	4260		Fe I
4272	4272		Fe I
4296	4301		Fe I
4313	4308	G	Fe I i Ca I
4323	4325		Fe I
4342	4340	f	H I
4370	4365		Fe
4396	4383	e	Fe I
4406	4405		Fe I
4417	4415		Fe I
4535	4528		Fe I
4676	4668	d	Fe I
4689	4686		He II
4715	4703		Mg I
4872	4861	F	H I
4925	4920		Fe I
4954	4958	c	Fe I
5034	5039		Fe I

5068	5075		Ni I
5169	5167		Mg I
5171	5173	b	Mg I
5181	5184	b	Mg I
5219	5217		Cr I
5277	5270	E	Fe I
5410	5408		Cr I
5516	5520		Ti I
5895	5890, 5896	D	Na I
6011	6009		Mg I
6268	6282	a	O <sub>2</sub>
6400	6401		Fe I
6571	6563	C	H I
6733	6720		Ca I
6884	68867 – 6884	B	O <sub>2</sub>
7603 - 7652	7594 – 7621	A	O <sub>2</sub>

Vidljivo je da većina linija u spektru pripada metalima (željezu, kalciju, magneziju, niklu i kromu). Vodikove linije su jako izražene, a helijevih gotovo nema. To nije zato jer možda nema helija na Suncu, već zbog temperature i veličine Sunca te linije nisu dovoljno izražene. Također su uočljive linije molekula O<sub>2</sub> koje su posljedica prolaska sunčeve svjetlosti kroz Zemljinu atmosferu. Graf 3.2 prikazuje odnos očitane i tablične valne duljine, tj. preciznost mjerenja.

Slika 3.2.  
provjera kalibracije  
spektroskopa



$$\lambda_2 = A \cdot \lambda_1 + B$$

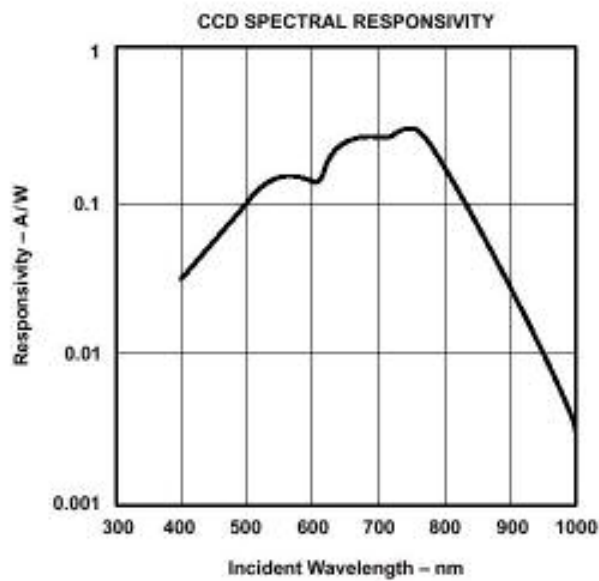
$$A = 0,9992 \pm 0,0013$$

$$B = (1,93693 \pm 6,50917) \text{ \AA}$$

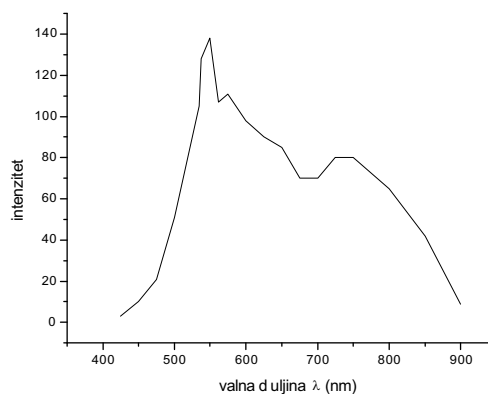
## 3.2 Temperatura Sunca

Za određivanje temperature na površini Sunca možemo koristiti Wienov zakon zračenja crnog tijela (formula 2.1) pod pretpostavkom, koja zapravo ne odgovara potpuno stvarnosti, da Sunce zrači kao crno tijelo.

Da bi se moglo odrediti u kojem se dijelu spektra nalazi maksimum zračenja mora najprije snimljeni spektar kalibrirati prema osjetljivosti CCD čipa kamere na svjetlost različitih valnih duljina.

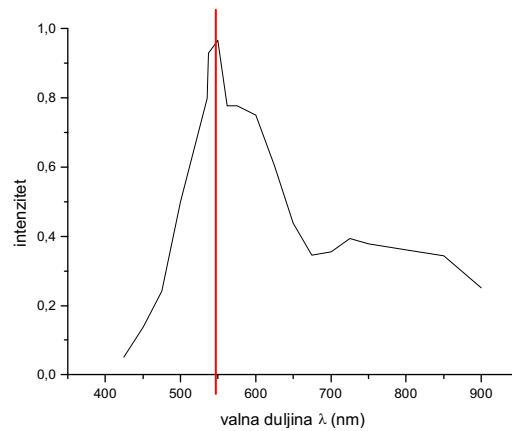


Slika 3.2. graf osjetljivost kamere



Slika 3.3. pojednostavljena snimka Sunčevog spektra

Graf 3.3 prikazuje pojednostavljenu snimku sunčevog spektra koja nakon kalibracije prema osjetljivosti kamere izgleda ovako:

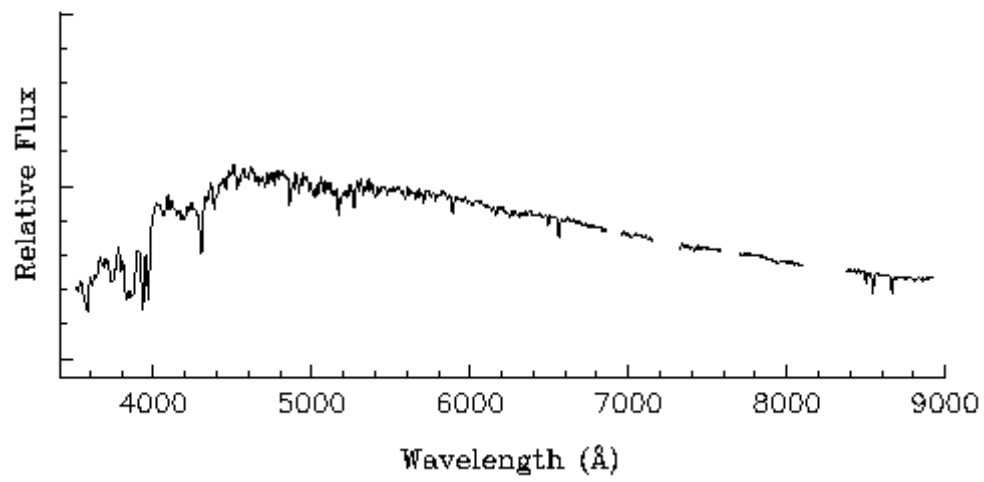


Slika 3.4.  
raspodjela intenziteta  
zračenja prema valnim  
duljinama

Jasno je uočljivo da se maksimum zračenja nalazi na oko 550 nm, što po Wienovu zakonu daje efektivnu temperaturu od 5270 K. Točnija mjerenja efektivne temperature Sunca daju vrijednost od 5780 K. Usporedi li se to sa izmjerenom temperaturom vidi se da relativna pogreška iznosi 8,8%.

### 3.3 Spektralni tip Sunca

Spektri zvijezda se razvrstavaju u razrede koji su određeni tako da uzimaju u obzir pojavu spektralnih linija i uvjete pobuđivanja. Razredi simbolično označavaju bitna svojstva složenog fizičkog stanja. Najbrojnije su zvijezde razreda O, B, A, F, G, K i M. Razredi se dijele u 10 podrazreda. Za svaki razred je specifična određena temperatura zvijezde i spektralne linije koje ne ovise toliko o zastupljenosti elemenata, već o temperaturi onog dijela atmosfere u kojem nastaju spektralne linije. Analizom Sunčevog spektra uočio sam da su vrlo izražene linije kalcija i željeza, a helijeve linije su gotovo neprimjetne, dok su vodikove linije također jake. Uz izračunatu temperaturu između 5000 i 6000 K i ovakav raspored najizraženijih linija možemo zaključiti da Sunce pripada G spektralnom razredu.



Slika 3.5. spektar zvijezde G razreda

## Zaključak

Snimanjem Sunčevog spektra i njegovom analizom sam saznao mnogo podataka o nama najbližoj zvijezdi Suncu. Izmjerio sam temperaturu na površini Sunca uz odstupanje od 8,8% i potvrdio prisutnost 7 elemenata na Suncu. Također sam se dosjetio i još nekim mogućnostima mog spektrografa. Moguće ga je upotrijebiti kao spektroheliograf (uređaj za snimanje Sunca u jednoj valnoj duljini) uz adekvatnu programsku podršku. Također je ovim uređajem moguće snimati i spektar drugih zvijezda uz korištenje druge kamere koja ima mogućnost beskonačne ekspozicije (npr. QuickCam B/W ili Philips Vesta 680 SC1). Da bi se povećala kvaliteta spektra potrebno je ugraditi kvalitetniju difrakcijsku rešetku. Spektroskop ima široku mogućnost primjene osim u astronomiji i u kemiji i fizici, prvenstveno u obrazovne svrhe. Također sam uvidio da se relativno jednostavno i za malo novca može napraviti vrlo precizan mjerni uređaj široke primjene.

## Literatura

- [1] Vujnović, Vladis : "Astronomija 2",  
Školska knjiga, Zagreb 1994.
- [2] Krsnik, Rudolf : "Fizika 4",
- [3] Enciklopedija leksikografskog zavoda Jugoslavije, 7. svezak  
Jugoslavenski leksikografski zavod, Zagreb 1964.
- [4] Holt, Rinehart, Winston : "Exploration of the Universe",  
University of California 1964.

### Internet:

<http://hpd.botanic.hr/kem/knjiga/spektri.htm>  
autori: dr. sc. Srećko Kirin i dr. sc. Goran Štefanić

<http://jagor.srce.hr/~dsvilko/japetic/black/ATM-s2.html>  
autor Domjan Svilko

<http://hpd.botanic.hr/ast/praktik/sunce/spektrograf.htm>  
autor: dr.sc. Bojan Vršnak

<http://hpd.botanic.hr/ast/praktik/sunce/realizir/spektsun.htm>  
autor: Slaven Crnković

<http://www.astro.washington.edu/labs/clearinghouse/labs/Solarspec/sunspec.html>  
autor: University of Washington

### Izvori slika:

Slike u 1. poglavlju su preuzete iz materijala za Ljetnu školu prirodoslovlja, Višnjan 2001.

Slike u 2. poglavlju su snimljene u mom stanu digitalnim fotoaparatom.

Snimke spektara u 2. i 3. poglavlju su snimljene sastavljenim CCD spektrografom.

Svi grafovi su crtani u programu Microcal Origin.

### Software:

Astro-QuickCam (verzija 1.08), autor Jean Paul Godgard, 1999.

SAOImage ds9 (verzija 2.1b4), autor William Joye

Microcal Origin (verzija 6.0), Microcal software inc. 1991.-1999.

Paint Shop pro (verzija 7.01), Jacs software inc.,1991.-2001.

Microsoft Excel (dio paketa Office 2000), Microsoft corporation, 1985.-1999.

SpektroHelioGraf (verzija 1.00), autor Krešimir Puljić, 2002.

## Životopis

Rođen sam 4.12.1983. u Zagrebu. Živim u Bistri gdje sam pohađao osnovnu školu. Nakon završene osnovne škole sam se upisao u X. gimnaziju u Zagrebu. Sada pohađam 4. razred X. gimnazije, prirodoslovno-matematički smjer. Nakon mature planiram upisati Fakultet elektrotehnike i računarstva. Od 4. razreda osnovne škole redovito sudjelujem na natjecanjima iz prirodoslovlja. Do sada sam 4 puta sudjelovao na državnom natjecanju iz fizike i 5 puta iz kemije. Do sada nisam sudjelovao na natjecanju iz astronomije, a poticaj većem zanimanju za astronomiju mi je bio posjet Zvezdarnici Hvar i boravak na Ljetnoj školi prirodoslovlja u Višnjanu tijekom prošlog ljeta.