Pronalaženje *Blazhko* zvijezda izvan skupova zvijezda

Natjecanje iz astronomije 2024.

2. razred SŠ, jedan natjecatelj

[Sažetak Rada 4](#_Toc154744690)

[1 UVOD 5](#_Toc154744691)

[1.1 Motivacija i cilj 5](#_Toc154744692)

[1.2 Promjenjive zvijezde 6](#_Toc154744693)

[1.2.1 Tipovi promjenjivih zvijezda 6](#_Toc154744694)

[1.2.2 Mehanizam pulsiranja promjenjivih zvijezda 6](#_Toc154744695)

[1.2.3 Promatranje promjenjivih zvijezda - svjetlosne krivulje 6](#_Toc154744696)

[1.2.4 RR Lire zvijezde 8](#_Toc154744697)

[1.3 Blazhko efekt 8](#_Toc154744698)

[1.3.1 Značajke Blazhko efekta 8](#_Toc154744699)

[1.3.2 Dosadašnje spoznaje o efektu 8](#_Toc154744700)

[2 METODOLOGIJA 10](#_Toc154744701)

[2.1 Dohvat i priprema podataka 10](#_Toc154744702)

[2.2 Osnovna analiza podataka 11](#_Toc154744703)

[2.3 Selekcija RR Lyrae zvijezda 12](#_Toc154744704)

[2.3.1 Lomb-Scargle periodogram 12](#_Toc154744705)

[2.3.2 Selekcija po periodu i tipu krivulje 12](#_Toc154744706)

[2.4 Analiza RR Lyrae zvijezda 13](#_Toc154744707)

[2.4.1 Računanje preciznog perioda za RR Lyrae zvijezde 13](#_Toc154744708)

[2.4.2 Algoritam analize periodograma 13](#_Toc154744709)

[2.4.3 Računanje najboljeg *fita* za svjetlosnu krivulju 13](#_Toc154744710)

[2.4.4 Statističke metode analize *fita* svjetlosne krivulje 13](#_Toc154744711)

[2.4.5 Spremanje svih podataka 13](#_Toc154744712)

[2.5 Skupljanje kandidata za Blazhko zvijezde 14](#_Toc154744713)

[2.5.1 Filtriranje loših podataka 14](#_Toc154744714)

[2.5.2 Algoritam za prepoznavanje kandidata Blazhko zvijezda pomoću parametara 14](#_Toc154744715)

[2.6 Analiza Blazhko efekt kandidata 15](#_Toc154744716)

[2.6.1 Prikazivanje jedne faze RR Lyrae zvijezde 15](#_Toc154744717)

[2.6.2 Prikazivanje periodograma zvijezde 15](#_Toc154744718)

[2.6.3 Prikazivanje sezone promatranja zvijezde 15](#_Toc154744719)

[2.6.4 Prikazivanje podataka za svaku sezonu promatranja 15](#_Toc154744720)

[2.6.5 Stvaranje sučelja za identifikaciju Blazhko zvijezda 15](#_Toc154744721)

[2.6.6 Način provođenja identifikacije Blazhko zvijezda 16](#_Toc154744722)

[2.7 Pouzdanost u Blazhko zvijezde 16](#_Toc154744723)

[3 REZULTATI 17](#_Toc154744724)

[3.1 Osnovna analiza podataka 17](#_Toc154744725)

[3.2 Selekcija RR Lyrae zvijezda 17](#_Toc154744726)

[3.3 Analiza RR Lyrae zvijezda 17](#_Toc154744727)

[3.4 Potraga za Blazhko kandidatima 17](#_Toc154744728)

[3.5 Analiza Blazhko efekt kandidata 17](#_Toc154744729)

[3.6 Konačni katalog Blazhko zvijezda 17](#_Toc154744730)

[4 RASPRAVA I ZAKLJUČAK 18](#_Toc154744731)

[5 LITERATURA I IZVORI 19](#_Toc154744732)

[6 PRILOG - programi 20](#_Toc154744733)

# Sažetak Rada

# 1 UVOD

# 1.1 Motivacija i cilj

Zvijezdin sjaj ovisi o njenoj temperaturi i radijusu, no oni nisu konstantni. Sjaj zvijezde stalno se mijenja, uzrokovano termodinamičkim fluktuacijama zvijezde koja se stalno širi i skuplja. Iako je promjena svjetlosti tipična za sve zvijezde, one su često minimalne i teško primjetne. Ali, neke zvijezde drastično mijenjaju svoju magnitudu, fluktuiraju po amplitudi od 1 do 2 magnitude te ih zovemo promjenjive zvijezde. Promjenjive zvijezde su iznimno zanimljive te nam mogu mnogo informacija pridonijeti o strukturi galaksija, udaljenosti svemirskih objekata i dr. Poseban tip promjenjivih zvijezda su RR lire. RR Lire pokazuju jedan misteriozan efekt u astrofizici koji do dan danas nije objašnjen, a taj efekt je *Blazhko* efekt. Upravo zbog našeg minimalnog razumijevanja efekta te malog broja RR Lira koje prikazuju ovaj efekt, odlučila sam istražiti postojanje efekta kod RR Lira. Pronalaženjem novih Blazhko zvijezda s drugačijim svojstvima od dosadašnjih zvijezda pridodaje znanju o Blazhko efektu kako bi znanstvenici mogli otkriti nove informacije i možda dokučiti zašto je on prisutan te kako funkcionira.

Ciljevi ovog praktičnog rada su:

* Istražiti promjenjive zvijezde te kako funkcioniraju
* Razumjeti dosadašnje spoznaje o Blazhko efektu i kako ga prepoznati
* Dohvatiti i pripremiti svjetlosne krivulje RR Lira zvijezda iz dviju različitih baza podataka s ~10 godina razlike u vremenu promatranja
* Analizirati periode, *fitove* i periodograme RR Lira i odabrati kandidate za *Blazhko* zvijezde
* Vizualno analizirati kandidate, zatim odrediti konačni katalog *Blazhko* zvijezda

# 1.2 Promjenjive zvijezde

### 1.2.1 Tipovi promjenjivih zvijezda

**Promjenjive zvijezde** su zvijezde čiji se sjaj, odnosno magnituda mijenja. Postoji više razloga zašto zvijezde mijenjaju svoj sjaj, stoga ih dijelimo na *intrinzične i ekstrinzične promjenjive zvijezde.* Intrinzično promjenjive zvijezde su one čiji mehanizam za mijenjanje sjaja funkcionira zbog fizičkih procesa unutar same zvijezde. Ekstrinzične promjenjive zvijezde mijenjaju svoj sjaj zbog vanjskih utjecaja, kao npr. ekliptične binarne zvijezde, zvjezdane pjege, promjena oblika zvijezde zbog gravitacijskih ili magnetskih utjecaja.

Sukladno tome, dijelimo intrinzične promjenjive zvijezde na **pulsirajuće, kataklizmičke, eruptivne promjenjive zvijezde i na mlade zvjezdane objekte.** U ovome radu se fokusiramo na *pulsirajuće promjenjive zvijezde.*

Ima mnogo vrsta pulsirajućih promjenjivih zvijezda te su samo neke od njih **RR Lire**, *Cefeide, W Virginis, RV Tauri, Delta Scuti, Sx Phoenicis* zvijezde, a od zvijezda s dugim periodom su *Mira i djelomično-promjenjive zvijezde*.

### 1.2.2 Pulsirajuće promjenjive zvijezde

Život jedne zvijezde ovisi o hidrostatskom ekvilibriju, gdje se tlak plinova unutar zvijezde stalno sukobljava sa gravitacijom prouzročenom masom zvijezde. Dokle god su ove dvije sile izjednačene, zvijezda ostaje stabilna. Kod pulsirajućih promjenjivih zvijezda, granica ravnoteže se ciklično pomiče u korist tlaka ili gravitacije, no nikada previše da ne bi došlo do urušavanja zvijezde. Pulsirajuća zvijezda ciklično mijenja svoj volumen, što mijenja boju, temperaturu i magnitudu zvijezde.

Zvijezda je većinski napravljena od 2 plina, vodika i helija. Unutar zvijezde, temperature su izrazito visoke što omogućuje različite konfiguracije elektrona u atomima vodika i helija, ovisno gdje se nalaze. Budući da zvijezda mora povećati i smanjiti svoj volumen, neki sloj zvijezde mora povećavati svoj volumen i smanjivati ga koji gura ostale vanjske slojeve unutrašnjosti zvijezde da mijenjaju svoju veličinu. Možemo pretpostaviti da se u ovom sloju nalazi plin koji se ponaša kao *idealan plin.* Idealni plinovi ponašaju se po idućem zakonu:

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | 1) |

Gdje je *P* tlak plina, *n* je gustoća čestica odnosno broj čestica po jedinici volumena, *k* je Boltzmannova konstanta, a *T* je temperatura u Kelvinima. Plin u našem sloju je ograničen ostalim slojevima zvijezda, stoga kada se tlak plina povisuje, gustoća čestica plina i temperatura se također povećavaju.

Unutar jezgre, termonuklearni procesi spajaju jezgre vodikovih atoma, oslobađajući energiju u obliku fotona, koji onda putuju kroz slojeve zvijezde sve do površine. Količina emitiranih fotona određuje magnitudu, odnosno sjaj zvijezde. Fotoni će ujedno morati proći kroz dotičan sloj zvjezdane unutrašnjosti, a parametar koji određuje koliki udio fotona će proći je **neprozirnost plina.** Što je veća neprozirnost, to će fotoni teže prolaziti kroz sloj plina. Također, što je veća temperatura to je manja neprozirnost. Neprozirnost plina teško je modelirati, no idući model prikazuje trend smanjenja neprozirnosti s povećanjem temperature te se može aproksimirati jednadžbom 2.

A graph of a function

Description automatically generated

Slika 1: ovisnost neprozirnosti plina o temperature (aproksimativan model) [9]

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | 2) |

Uočavamo da prema aproksimativnom *Kramerovom zakonu o neprozirnosti plina*, da neprozirnost ovisi mnogo više o temperaturi nego li o gustoći plina. Zapažanje ukazuje da mora postojati poseban sloj unutar promjenjivih zvijezda gdje se znatno mijenja gustoća, a ne temperatura kako bi se neprozirnost dovoljno promijenila za oscilaciju sloja te pulsiranje zvijezde.

No, unutar zvijezde ne postoje samo neutralni atomi vodika i helija. Jedinstvena okolina unutrašnjosti zvijezde omogućava negativnu ionizaciju vodika, koji mnogo više međudjeluje sa fotonima, zaustavljajući prodor fotona kroz sloj zvijezde.

A diagram of a hydrogen molecule

Description automatically generatedA diagram of a molecule

Description automatically generated

Slika 2: prikaz interakcije fotona i atoma i [7]

Zbog svih razloga i procesa navedenih iznad, oscilacija volumena promjenjivih zvijezda, a s time i magnitude odvija se na sljedeći način:

1. Gornji slojevi zvijezde zbog utjecaja gravitacije djeluju velikom silom usmjerenom prema središtu, volumen zvijezde se smanjuje,
2. Zbog ovog pritiska na dotičan sloj, vodikovi (i helijevi) atomi prolaze kroz proces ionizacije, što znatno povećava gustoću sloja, ali ne temperaturu budući da ionizacija koristi energiju te se neprozirnost plina povećava,
3. Povećanjem neprozirnosti fotoni iz jezgre ne mogu jednako efikasno putovati do površine zvijezde, smanjujući ukupnu svjetlost zvijezde, odnosno sjaj je najniži u ciklusu,
4. Velika količina fotona koji ne prolaze kroz dotičan sloj su energični te pritisak i temperatura počinju se povećavati od dotičnog, ali i slojeva ispod,
5. Povećanje pritiska i temperature pobjeđuje silu gravitacije i povećava ukupan volumen zvijezde, gurajući dotičan sloj prema površini,
6. Plin dolazi do novog područja zvijezde i deionizira se, što smanji neprozirnost na standardnu vrijednost te zbog povećanja i volumena i emitirane svjetlosti sjaj je u maksimalan u ciklusu,
7. Sloj se ponovno vraća na staru lokaciju zbog nedostatka pritiska koji djeluje na sloj te gravitacija opet kreće djelovati na dotičan sloj,
8. Proces se ponavlja od koraka 1.

### 1.2.3 Povezanost perioda i oscilacije slojeva promjenjivih zvijezda

Najvažniji dio analize promjenjivih zvijezda je **period oscilacije njihovih unutrašnjih slojeva**. On određuje oblik svjetlosne krivulje, tip zvijezde te prisutnost efekata vezanih za promjenjive zvijezde.

Pulsiranje zvijezda ciklična je pojava, gdje zvijezda stalno povećava i smanjuje svoj volumen, u redovitom periodu. Možemo interpretirati pulsiranje zvijezde kao **val** s određenim periodom, frekvencijom i amplitudom. Val koji modelira pulsiranje promjenjivih zvijezda ne kreće se po prostoru već je **stojni val**. Možemo ovaj val smjestiti unutar cijevi gdje je jedna strana zatvorena, a druga otvorena. Najjednostavniji stojni val jest val u **osnovnom tonu,** gdje poprima maksimalnu valnu duljinu. Osnovan ton možemo modelirati tako što jedan kraj stojnog vala učvrstimo za zatvoren kraj cijevi te on titra tako što mu vrh dotakne sam rub otvorenog dijela cijevi.

Najjednostavniji način pulsiranja iliti titranja promjenjive zvijezde jest u **osnovnom tonu titranja**, gdje čitava zvijezda povećava i smanjuje svoj volumen. Model cijevi možemo aplicirati i na zvijezdu, gdje je radijus zvijezde jednak duljini cijevi, zatvoreni kraj je jezgra, a otvoreni kraj je sam rub zvijezde. Slika ispod prikazuje model cijevi i titranja zvijezde.

A diagram of a mathematical equation

Description automatically generated

Slika 3: model cijevi sa stojnim valovima unutar promjenjive zvijezde

Gledajući osnovan ton, možemo vidjeti da njegova valna duljina je zapravo 4 puta veća od samog radijusa zvijezde, što će rezultirati malom frekvencijom i velikim periodom. No, zvijezda može i kompliciranije pulsirati, tako što postoje samo neki slojevi unutar zvijezde koji pulsiraju, stvarajući stojne valove u prvom, drugom, trećem itd. tonovima. Što zvijezda ima viši ton, valna duljina postaje sve kraća te period postaje sve kraći, što uočavamo u stvarnim promjenjivim zvijezdama. U ovom praktičnom radu proces izračunavanja perioda traži frekvencije tonova pulsiranja zvijezde, a iz frekvencije se lako izračuna period.

### 1.2.4 Svjetlosne krivulje

Promjenjive zvijezde promatramo optičkim teleskopima koji se mogu nalaziti na zemlji ili u svemiru te oni mjere svjetlost odnosno magnitudu zvijezde u svakom promatranju. Ne mogu promatrati noću te ne mogu promatrati istu zvijezdu neprestano, stoga postoje određene sezone promatranja koje se ponavljaju godinama. Vrstu podatka koju prikupljamo za promjenjive zvijezde zove se **svjetlosna krivulja**, jer ona prikazuje promjenu svijetlosti zvijezde u odnosu na proteklo vrijeme.

Oblik svjetlosne krivulje ovisi o periodu te o vrsti zvijezde, stoga će svaka vrsta zvijezde imati različitu krivulju ovisno o njenim obilježjima, ali i načinu pulsiranja.

Izračunom perioda možemo *prikazati jedan ciklus promjenjive zvijezde*. Slika 4 prikazuje ukupnu svjetlosnu krivulju za jednu zvijezdu iz podataka korištenih u ovome radu te prikaz jednog ciklusa pulsiranja.

A graph of a graph of a graph

Description automatically generated with medium confidence

Slika 4: primjer ukupne svjetlosne krivulje i jednog ciklusa

### 1.2.5 RR Lire zvijezde

RR Lire su vrsta starih pulsirajućih promjenjivih zvijezda, koje najčešće pronalazimo u kuglastim skupovima zvijezda. Imaju vrlo kratke periode, od 0.05 do 1.2 dana te ovisno o tipu RR Lire, opseg perioda varira te promjenu magnitude od 0.3 do 2 magnitude. Kada bismo pogledali HR dijagram, RR Lire zauzimaju vrlo mali i uzak prostor dijagrama, što ih čini lakšom za selektirati po boji, temperaturi i magnitudi. One su bijeli divovi spektralnog tipa A. Mali opseg magnituda ih čini odličnim za određivanje udaljenosti u galaksiji, stoga ih zovemo „standardne svijeće“ za računanje udaljenosti. RR Lire mogu pulsirati u jednom od 3 načina: osnovnim tonom, prvim tonom, i osnovnim i prvim tonom.

#### 1.2.4.1 RRAB tip

RRAB tip zvijezda je najčešća varijanta RR Lira zvijezda. One pulsiraju osnovnim tonom, što znači da imaju dulje periode od ostalih tipova, od 0.3 do 1.2 dana. Karakteristike njihovih svjetlosnih krivulja jest nagli rast i pad magnitude, kao što je prikazano na slici ispod.

A graph of a graph of a graph

Description automatically generated with medium confidence

Slika 5: svjetlosna krivulja RRAB tipa [1]

#### 1.2.4.2 RRC tip

RRC zvijezde imaju simetričnu svjetlosnu krivulju koja nalikuje na sinusoidu. Imaju vrlo kratak period, od 0.2 do 0.5 dana, zato što pulsiraju u prvome tonu. Također, imaju malu promjenu magnitude za razliku od RRAB tipa.

A graph of a line

Description automatically generated with medium confidence

Slika 6: svjetlosna krivulja RRC tipa [1]

#### 1.2.4.3 RRD tip

RRD su posebne zato što pulsiraju i u osnovnom i u prvom tonu te imaju zato 2 perioda, prvi period osnovnog tona koji je najčešće 0.7 dana, dok za prvi ton je otprilike 0.5 dana. Svjetlosna krivulja nastaje spajanjem pulsiranja u oba tona.

A graph of a phase

Description automatically generated

Slika 7: spajanje svjetlosnih krivulja RRD tipa [1]

# 1.3 Blazhko efekt

Blazhko efekt je poznati efekt u astrofizici koji se pojavljuje kod promjenjivih zvijezda, posebno kod RR Lira. Zvijezde koje su Blazhko zvijezde pokazuju **modulaciju svjetlosne krivulje**, odnosno periodično mijenjanje oblika svjetlosti, a mijenjanjem oblika mijenja se i amplituda i period. Uzrok Blazhko efekta te kako točno funkcionira nije još poznato te postoje mnoge potencijalne teorije koje pokušavaju objasniti efekt. Slike ispod prikazuju svjetlosne krivulje Blazhko efekta.

A graph of a function

Description automatically generatedA graph of a graph showing a number of numbers

Description automatically generated with medium confidence

Slika 4: prikaz Blazhko efekta kod RR Lira

No, iako je Blazhko efekt neobjašnjiv dosada, postoji jedan efekt u fizici s kojim možemo usporediti Blazhko efekt teorijski.

Standardan val u fizici možemo opisati idućom formulom:

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | 3) |

Gdje je amplituda, frekvencija vala i je vrijeme. Ako bismo uzeli 2 vala sa malom razlikom u frekvenciji i zbrojili njihove vrijednosti te aplicirali trigonometrijsku jednakost zbrajanja 2 sinusa 2 kuta:

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|  |  | 4) | |
|  |  | 5) |

Dobili bismo iduću jednadžbu:

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | 6) |

Budući da su obje frekvencije vrlo slične u vrijednosti, možemo prvu zagradu interpretirati kao , a drugu kao , odnosno prosječnu frekvenciju. Budući da je promjena u frekvenciji mnogo manja od prosječne frekvencije, ona će stvarati oscilaciju amplitude sinusoide. Razlog zašto se stvara modulacija amplitude jest kada zbrajamo valove, njihove vrijednosti će se eventualno poklapati (iako imaju različite frekvencije) te međusobno poništiti budući da je jedna vrijednost negativna, a druga pozitivna. Slike ispod prikazuju modulaciju valova preko različitih perioda vremena:

A graph of a graph showing a number of different colored lines

Description automatically generated with medium confidence

Slika 5: interferencija valova pri malom period promatranja

A graph showing a number of different colors

Description automatically generated with medium confidence

Slika 6: interferencija valova pri duljem period promatranja, modulacija amplitude je vidljiva

A blue and pink waves

Description automatically generated

Slika 7: modulacija amplitude preko punog perioda promatranja, dolazi do izražaja

# 2 METODOLOGIJA

## 2.1 Dohvat i priprema podataka

Za uspješnu analizu RR Lira u potrazi za Blazhko efektom, potrebno je razmatrati svjetlosne krivulje iste zvijezde u drugačijem vremenskom razdoblju. Zato u ovom praktičnom radu koristim 2 baze podataka: **LINEAR** i **ZTF**, kako bih mogla uspoređivati parametre zvijezda s vremenskim razmakom od otprilike 10 godina. U ovom praktičnom radu koristim sljedeće materijale:

* Računalo s pristupom internetu
* Web stranicu GitHub
* Programski jezik Python
* Programski paket Quarto
* Jupyter notebooks – Anaconda okolina

### 2.1.1 **LINEAR** podaci

**LINEAR** set podataka (Lincon Near-Earth Asteroid Research) sadrži 7010 svjetlosnih krivulja periodičnih promjenjivih zvijezda. Iako je izvorna misija ovog istraživanja bila pronaći asteroide, naknadno se promatrao značajan dio neba, uključujući sjaj raznih promjenjivih zvijezda. **LINEAR** istraživanje provedeno je s 2 teleskopa na lokaciji u Novom Meksiku. Dva su teleskopa ekvatorijalno postavljena tipa GEODSS, gdje je svaki teleskop označen kao *L1* i *L2*. Promatrali su široki dio vidljivog spektra i bliski infracrveni spektar.

Proces čišćenja podataka prije analize sadržavao je sljedeće postupke:

1. Uklanjanje šuma koje stvara kamera
2. Uklanjanje umjetnih linija i gradijenata zbog različite osjetljivosti piksela
3. Oduzimanje pozadinskog svjetla pomoću Poissonove statistike

Nakon čišćenja podataka, morali su biti astrometrijski ponovno kalibrirani, odnosno znanstvenici au morali osigurati da koordinate objekata u podacima odgovaraju drugom istraživanju, poput SDSS-a. Od svih podataka, 7% je imalo lošu astrometriju (koordinate nisu odgovarale) pa su ih znanstvenici uklonili iz skupa podataka. Ostali podaci imali su 1-2% pogreške u astrometriji.

Idući korak bio je ponovno kalibriranje fotometrije, odnosno filteri i svjetlosni izvori morali su biti ponovno kalibrirani kako bi odgovarali SDSS podacima. Ispravci su se odnosili na pogreške CCD kamere, ispravljanje magnituda objekata u podacima i ispravljanje podcijenjenih pogrešaka magnitude. Pošto je kalibracija odrađena, podaci su grupirani u različite kategorije, uključujući kategoriju promjenjivih zvijezda. Iako izvorni skup podataka ima 5 milijardi objekata, od njih samo 7010 su potvrđene periodične promjenjive zvijezde. Znanstvenici su naknadno analizirali promjenjivi dio skupa podataka kategorizirajući krivulje svjetlosti, izračunavajući njihove periode te izvodeći zaključke iz prethodnih faktora.

**LINEAR** podaci nalaze se unutar Python modula *AstroML*, kao već obrađen i pripremljen skup podataka od 7010 periodičnih promjenjivih zvijezda. **LINEAR** podatke učitavam na sljedeći način:

|  |
| --- |
| **from** astroML.datasets **import** fetch\_LINEAR\_sample  dataL = fetch\_LINEAR\_sample(data\_home='../inputs') |

Podatke spremam u lokalnu mapu zvanu inputs. **LINEAR** podaci strukturirani su unutar Python array objekta, odnosno multi-dimenzionalne liste. Struktura **LINEAR** je sljedeća:

1. dataL je objekt AstroML.datasets i sadrži sljedeće:
   1. dataL.ids popis je svih ID-ova zvijezda, gdje je ID identifikacijski broj zvijezde, svaka ima jedinstveni broj
   2. dataL.get\_light\_curve() je funkcija koja pristupa podacima za određeni ID krivulje svjetlosti. Svaka krivulja svjetlosti je array objekt gdje je svaki stupac **vrijeme**, **magnituda** i **pogreška** **magnitude**. Kako bi se dobio niz za svaki stupac, originalni niz mora biti transponiran – svaki stupac podataka pretvara se u zasebnu listu
2. dataL.targets sadrži sve metapodatke za svaku svjetlosnu krivulju, npr. rektascenciju, deklinaciju, itd.

### 2.1.2 Selekcija RR Lira iz **LINEAR** podataka

Kako bih preuzela ZTF parove LINEAR zvijezdama, prvo je potrebno selektirati sve RR Lire iz skupa LINEAR podataka. dataL.targets ne sadrži dovoljno podataka kako bi se LINEAR zvijezde selektirale, stoga je potrebno koristiti drugu bazu podataka, LINEAR geneva, koja je zapravo tablica informacija o LINEAR zvijezdama koje imaju klasifikaciju svjetlosne krivulje.

Prvi korak je preuzimanje geneva baze podataka te selekcija LINEAR ID-ova iz tablice za koje imam podatke u LINEAR skupu zvijezda:

|  |
| --- |
| **def** **select\_good\_LINEAR**(LDATA):  '''  Ova funkcija selektira LINEAR IDove iz Geneva baze podataka koji su prisutni u LINEAR skupu podataka.  Argumenti:  LDATA = LINEAR podaci  '''  # ----------------------  IDs = [x **for** x **in** LDATA.ids] # stvaranje liste IDova  # PREUZIMANJE GENEVA BAZE PODATAKA  #------------  dataPeriods = fetch\_LINEAR\_geneva()  dataPeriods = pd.DataFrame(dataPeriods) # prebacivanje u DataFrame oblik podataka za lakše korištenje  ID\_orig = list(dataPeriods['LINEARobjectID'].to\_numpy()) # stvaranje liste Geneva IDova  LINEAR\_data = pd.DataFrame(())# priprema prazne tablice za selektirane LINEAR zvijezde  **for** id **in** ID\_orig: # za svaku GENEVA zvijezdu  **if** id **in** IDs:# ako je ID prisutan i u LINEAR skupu  index = ID\_orig.index(id) # spremi indeks gdje je pronađen ID  row = pd.DataFrame(dataPeriods.iloc[[int(index)]]) # selektiraj red GENEVA tablice  # spoji red sa početnom LINEAR\_data tablicom  LINEAR\_data = pd.concat([LINEAR\_data, row.reset\_index(drop=**True**)], ignore\_index=**True**, axis=0)  **return** LINEAR\_data # spremi gotovu tablicu sa svim selektiranim GENEVA IDovima  LINEAR\_periods = select\_good\_LINEAR(dataL)  print(LINEAR\_periods.shape)  LINEAR\_periods.head() |
|  |

Nakon izvršenja programa, tablica izgleda ovako:

A screenshot of a graph

Description automatically generated

Gdje su značenja stupaca sljedeća:

1. **ra** – rektascencija
2. **dec** – deklinacija
3. **ug** – UG indeks boje (Ultraviolet – Green ili Ultraljubičasto – Zeleno)
4. **gi** – GI indeks boje (Green – Infrared ili Zeleno – Infracrveno)
5. **iK** - ?
6. **JK** - ?
7. **logP** – logaritam perioda zvijezde
8. **Ampl** – amplituda promjene sjaja
9. **Skew** – asimetričnost vrijednosti magnituda svjetlosnih krivulja [13]
10. **Kurt** – kurtozija vrijednosti magnituda svjetlosnih krivulja [13]
11. **magMed** – medijan vrijednosti magnituda svjetlosnih krivulja
12. **nObs –** broj promatranja po krivulji
13. **LCtype –** klasifikacija svjetlosne krivulje
14. **LINEARobjectID –** ID LINEAR objekta

Kako bih uspješno selektirala RR Lire, iz tablice iznad potrebni su mi stupci gi, LCtype i LINEARobjectID. Budući da RR Lire okupiraju vrlo mali dio HR dijagrama, mogu se uspješno selektirati po boji, pogotovo preko gi filtera zato što razlika između sjaja preko zelenog i infracrvenog filtera u rasponu od -0.5 do 0.4 iskazuje temperaturu od 6000K do 75000K, što je tipična temperatura za RR Lire. LCtype 1 ili 2 ukazuju na RRAB i RRC tip RR Lire, stoga je i klasifikacija krivulje potrebna.

|  |
| --- |
| Lrrlyr = LINEAR\_periods[(LINEAR\_periods['gi']>-0.5)&(LINEAR\_periods['gi']<0.4)&(LINEAR\_periods['LCtype']>0)&(LINEAR\_periods['LCtype']<3)] # selekcija RR Lira  Lrrlyr = Lrrlyr.reset\_index(drop=**True**) # resetiraj indeks  Lrrlyr.to\_csv('../outputs/Lrrlyr\_unprocessed.csv',index=**False**) |

Pomoću prethodno objašnjene analize, selektirano je sveukupno 2941 RR Lira. Idući korak je pronalaženje ZTF parova RR Lirama.

### 2.1.2 **ZTF** podaci

*Zwicky Transient Facility* iliti ZTF je optičko istraživanje koje koristi Palomar 48-inčni Schmidtov teleskop za promatranje čitavog neba sjeverne hemisfere u 3 različita filtera: „*g“* odnosno zeleno (*engl. green*), „*r“* odnosno crveno*(engl. red)* i „*i“* odnosno infracrveno*(engl. infrared)*. Promatra nebo od listopada 2017. godine. Teleskop ima vrlo veliko vidno polje te onda ima sposobnost primanja mnogo podataka. Svi podaci koje ZTF prikupi pohranjuju se u IPAC, kojem se može pristupiti putem IRSA.

Podaci su obrađeni tako da svaki piksel ima prosječno 5 bitova, a iako je proces povećao šum neba za 1%, greška je zanemariva. ZTF je uspio promatrati **prijelazne objekte,** supernove koje se nalaze u drugim galaksijama, a ZTF istraživanje promatralo je njihove krivulje svjetlosti. Promatrao je i neutrine i događaje povezani s gravitacijskim valovima tepokazalo se da bi znanstvenici mogli koristiti ZTF u budućnosti za promatranje sličnih događaja i pojava. Na kraju, promatrao je i promjenjive objekte što uključuje promjenjive zvijezde, ali i krivulje svjetlosti asteroida. Svjetlosne krivulje u ZTF skupu podataka nadograđene su svakih nekoliko mjeseci, a pohranjene su u HDF5 datotekama za svako polje promatranja. ZTF sadrži krivulje svjetlosti mnogih vrsta objekata, a neke od najznačajnijih vrsta su Be zvijezde, RR Lira zvijezde, krivulje svjetlosti NEO, Asteroida i aktivnost Kometa i Kentaura.

#### 2.1.2.1 Dohvat LINEAR koordinata

ZTF parove LINEAR zvijezdama tražimo pomoću **ra i dec** koordinata (rektascencije i deklinacije), tako što pretražujemo bazu podataka ZTF-a i tražimo podatke za zvijezde koje se nalaze kod dotičnih koordinata unutar malog radijusa. Iduća funkcija opisuje proces:

**def** **getZTFlightcurve**(ra, dec, radius=3.0):

'''

Ova funkcija koristi se koordinatama LINEAR zvijezde kako bi pronašla tu istu zvijezdu u ZTF podacima.

Argumenti:

ra(float): rektascenzija

da(float): deklinacija

radius(float): radijus područja potrage na nebu

'''

**try**:

lcq = lightcurve.LCQuery() # stvaranje ztfquery objekta za potragu neba

res = lcq.from\_position(ra, dec, radius) # traženje u podacima prema rektascenziji, deklinaciji i radijusu

# Selekcija samo podataka za vrijeme, magnitude, greške u magnitudi, filter te catflag

ZTFdata = res.data[['mjd', 'mag', 'magerr', 'catflags', 'filtercode']]

# Brisanje očitih lažnih točaka

ZTFdata = ZTFdata.loc[ZTFdata['catflags'] < 32768]

**except**:

# Ako nema podataka, spremi praznu tablicu

ZTFdata = pd.DataFrame(())

**return** ZTFdata

Funkcija stvara ztfquery objekt, koji je dio Python modula ztfquery, poseban modul ZTF-a. Preko ovog objekta, traži se područje neba s određenim radijusom koje odgovara unesenim koordinatama. Pošto je pronađena zvijezda, preuzeti su stupci podataka s vremenom, magnitudom, greškom magnitude, catflagom te filterom. **(objasni catflag**) Zatim se brišu očite lažne točke. Ako program nije uspio pronaći par LINEAR ID-u, sprema se prazna tablica podataka.

Zatim, pomoću iduće funkcije, tražimo parove za sve LINEAR RR Lire zvijezde:

**if** os.path.isfile(NAME): # ako ova datoteka postoji

ZTF\_data\_lc = np.load(NAME, allow\_pickle=**True**) # učitaj podatke

**else**:

Lids = Lrrlyr['ID'].to\_numpy()

rectascension = Lrrlyr['ra'].to\_numpy() # lista svih rektascenzija

declination = Lrrlyr['dec'].to\_numpy() # lista svih deklinacija

ZTF\_data\_lc = [] # postavljanje prazne liste koja će se ispuniti podacima

**for** i **in** tqdm(range(len(Lids))):

Lid = Lids[i] # određujemo svaki LINEAR ID

ra = rectascension[i] # pronalazimo dotičnu rektascenziju

dec = declination[i] # pronalazimo dotičnu deklinaciju

ZTFdata = getZTFlightcurve(ra, dec) # koristeći prethodnu funkciju, tražimo ZTF podatke

ZTF\_data\_lc.append((Lid, ZTFdata)) # spremamo ZTF podatke za dotičnu zvijezdu

# spremamo podatke na računalo

**if** i%10==0:

ZTF\_data\_lca = np.array(ZTF\_data\_lc, dtype=object)

np.save("../outputs/ZTF\_dataset\_"+end+".npy", ZTF\_data\_lca, allow\_pickle=**True**)

ZTF\_data\_lca = np.array(ZTF\_data\_lc, dtype=object)

np.save("../outputs/ZTF\_dataset\_"+end+".npy", ZTF\_data\_lca, allow\_pickle=**True**)

Pomoću petlje iznad, prolazim kroz sve selektirane RR Lire i tražim njihove ZTF parove. Nakon pripreme i dohvata podataka, možemo provesti osnovnu statističku analizu podataka.

## 2.2 Osnovna analiza podataka

Osnovnom analizom LINEAR i ZTF podataka uočavamo da LINEAR ima, kada bismo zbrojili broj mjerenja u svakoj svjetlosnoj krivulji RR Lira, 733550 mjerenja, dok ZTF parovi imaju 1423997 mjerenja. Mnogo veći broj mjerenja kod ZTF podataka je prisutan zbog strukture ZTF podataka: sadrži mjerenja u više filtera, točnije 3 filtera. Stoga, crveni filter ima 1772818 mjerenja, 1423997 mjerenja u zelenom i 337132 mjerenja u infracrvenom filteru. Iz idućeg grafa možemo vidjeti distribuciju mjerenja po svjetlosnoj krivulji za LINEAR zvijezde.

A graph of a number of people

Description automatically generated

Graf 1: distribucija mjerenja kod LINEAR RR Lira

Uočavamo da većina zvijezda ima malo iznad 200 mjerenja po krivulji, s uzastopnim porastom u brojnosti za otprilike 500 mjerenja po krivulji. Zapažanje je vrlo pozitivno, budući da za kasniju analizu potrebne su nam LINEAR zvijezde sa više od 250 mjerenja po krivulji za pouzdanu analizu. Idući dijagram prikazuje distribuciju mjerenja za sve ZTF filtere:

A graph of a number of different colored lines

Description automatically generated with medium confidence

Graf 2: distribucija mjerenja kod ZTF RR Lira

Vidimo da distribucije svih filtera imaju sličan oblik, međutim infracrveni grafikon ima manji raspon x-osi. Zeleni filtar najviše zvijezda ima broj mjerenja manje od otprilike 100 promatranja te otprilike 400-500 promatranja. Vrlo slična situacija je s crvenim filtrom, s nešto višim brojem opažanja, otprilike 500-600. Infracrveni filtar ima najmanji broj točaka, s većinom zvijezda ispod otprilike 50 promatranja te 100 točaka.

Drugi osnovan aspekt samih svjetlosnih krivulja je duljina promatranja dotične zvijezde. Zvijezda nije promatrana čitavo vrijeme, nego u kraćim sezonama ili u intervalima od jedne noći, budući da se ne promatra tokom dana. Iduća 2 dijagrama prikazuju razliku u vremenskom razdoblju promatranja kod LINEAR i ZTF parova:

A graph with numbers and lines

Description automatically generated

Graf 3: distribucija vremenskih perioda LINEAR zvijezda

A graph of a graph

Description automatically generated with medium confidence

Graf 4: distribucija vremenskih perioda ZTF zvijezda po filterima

Uočavamo kako kod LINEAR zvijezda, većina zvijezda ima od 1900 do 2000 dana vremenski period promatranja. Slična je situacija i kod ZTF zvijezda, no vidimo da postoji mnogo zvijezda sa izrazito kratkim periodom promatranja ili gdje je period jednak 0. Zapažanje perioda jednakim 0 objašnjavamo činjenicom da ne postoji ZTF par za svaku LINEAR zvijezdu, stoga ni neće imati vrijeme promatranja.

A diagram of a star

Description automatically generated with medium confidence

Graf 8: prostorna distribucija RR Lira po galaksiji

Možemo vidjeti kako RRAB i RRC nisu grupirane u posebna područja nego su ravnomjerno raspršene po nebu te da se sve zvijezde nalaze na galaktičkoj širini višoj od 30º. Zapažanje pokazuje da zvijezde se ne nalaze u nekom posebnom skupu ni prema središtu galaksije.

## 2.4 Analiza RR Lira

Nakon što smo pripremili sve LINEAR i ZTF parove zvijezda, potrebno ih je detaljno analizirati za iduću fazu praktičnog rada. Analiza uključuje precizno računanje perioda i LINEAR i ZTF podataka za dotičnu zvijezdu, analizirati produkt računanja perioda odnosno periodogram i računanje vrijednosti chi2 te *fit* za svaku svjetlosnu krivulju. Čitav kod za analizu RR Lira možete pronaći u prilogu, ovdje je kvalitativno objašnjen postupak i teorija.

### 2.4.1 Računanje preciznog perioda za RR Lira

U matematičkom smislu, svjetlosna krivulja je skup točaka u koordinatnom sustavu. Period je veličina koja određuje oblik ovih točaka u skupu, odnosno što je period veći izduženija je krivulja, a što je manji uža je krivulja. Pod „krivulja“ mislim na liniju koju bismo nacrtali povezujući sve točke svjetlosne krivulje kao aproksimacija njenog oblika, odnosno ***fit*** svjetlosne krivulje.

Kada bismo imali neke točke pozicionirane unutar koordinatnog sustava i htjeli bismo povući liniju koja najbolje spaja sve točke, prvo bismo nacrtali ravnu liniju. Linearna funkcija je najgrublja aproksimacija podataka te ih najčešće ne opisuje na najprecizniji način. Koristeći idući polinom po veličini, kvadratnu funkciju, možda bismo mogli bolje opisati točke. Ako koristimo kubnu funkciju ili polinom 4., 5. ili čak 6. stupnja, možemo još bolje opisati podatke i imati točniji *fit*.

Svjetlosnu krivulju također možemo prikazati kao set podataka ovisnim o vremenu, odnosno promjenu sjaja o vremenu možemo opisati valovima. Najjednostavniji matematički val jest *sinusoida.* Što više sinusoida spajamo zajedno, možemo postići kompleksniji val što je analogno procesu povećanja stupnja polinoma za što bolji *fit*.

Zato za računanje perioda promjenjivih zvijezda koristimo metodu koja se zove engl. Lomb-Scargle metoda. Ona se bazira na matematičkom Fourier nizu te uspješno radi za podatke koji nisu ravnomjerno raspoređeni po x-osi (razlike između svake 2 točke nisu jednake). Fourier transformacija uzima svjetlosnu krivulju, testira različite frekvencije sinusoida koja je građena od jednostavnijih sinusoida i određuje je li dotična frekvencija zbilja najbolji *fit* za podatke. Kvantificiranjem je li *fit* dobar postižemo veličinu zvanom *uspješnost fita ili hi-kvadrat*. Kada bismo nacrtali graf svake frekvencije i koliko se uspješno slaže sa dotičnom svjetlosnom krivuljom, dobili bismo njen **periodogram**, koji je važan za daljnju analizu. Frekvencija sa najvećom vrijednošću moći bira se kao najbolja frekvencija za dotičnu svjetlosnu krivulju te je period recipročna vrijednost frekvencije.

### 2.4.2 Algoritam analize periodograma

Izračunom perioda, produkt je periodogram koji je izrazito važan za analizu Blazhko efekta. Prisjetivši se interferencije valova s modulacijom amplitude, koja vrlo dobro prikazuje Blazhko efekt, možemo aplicirati izračun perioda na simulaciju svjetlosne krivulje.

### 2.4.3 Računanje najboljeg *fita* za svjetlosnu krivulju

Osim analize perioda i periodograma, potrebno je analizirati koliko dobro taj period opisuje svjetlosnu krivulju. Statistička vrijednost koja govori koliko dobro neki *fit* odgovara skupu podataka zove se hi-kvadrat te je opisana idućom formulom:

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | 7) |

Gdje je hi-kvadrat, promatrana varijabla odnosno vrijednost (magnituda svjetlosne krivulje) te je očekivana vrijednost varijable, odnosno *fit* svjetlosne krivulje. Što je veći hi-kvadrat, to je period lošija aproksimacija oblika krivulje, a što je manji onda je period dobra aproksimacija oblika krivulje. Što se tiče analize Blazhko zvijezda, najbitnija je vrijednost hi-kvadrata za **prosječni period** i LINEAR i ZTF podataka za istu zvijezdu. Ako ne dolazi do Blazhko efekta, periodi će ostati vrlo bliski te će prosječan period vrlo dobro opisivati i LINEAR i ZTF podatke. Ali, ako dolazi do Blazhko efekta onda periodi neće ostati slični te prosječan period neće dobro opisivati i LINEAR i ZTF podatke, rezultirajući u visoku vrijednost hi-kvadrata.

Koristeći sve prethodno objašnjene metode, analiziram svih 2941 parova LINEAR i ZTF zvijezda, gdje računam sve dotične parametre samo za parove gdje LINEAR podaci imaju više od 250 promatranja. Nakon analize, potrebno je malo počistiti podatke od zvijezda koje imaju premalo promatranja ili nemaju podatke. Granica za ZTF količinu podataka je 40. Nakon rezanja broja zvijezda ostalo je samo 1703 s dovoljnom količinom podataka. Idući korak je odrediti konačne brojeve decimala svih izračunatih vrijednosti. Odredila sam da svi periodi imaju 6 decimala, hi-kvadrat vrijednosti 1 decimalu, amplitude 2 decimale te Blazhko parametri imaju 4 decimale.

## 2.5 Selekcija kandidata za Blazhko zvijezde

Nakon analize RR Lira, potrebno je birati zvijezde koje su potencijalno Blazhko zvijezde. Stvaram algoritam koji sistematično određuje dobre zvijezde za Blazhko efekt na sljedeći način:

1. **Odbacivanje loših podataka:** postoje zvijezde koje imaju izrazito visoku amplitudu (koja je nemoguća) ili vrlo visoke vrijednosti hi-kvadrata koje ukazuju na vrlo loše podatke. Stoga, zvijezde koje imaju amplitudu veću od 2 magnitude, hi-kvadrat vrijednost veću od 9 ili nerealni period koji je veći od 4, ne uzimam u obzir,
2. **Periodogram zvijezde:** ako su svi kriteriji zadovoljeni vezani za pokazatelje Blazhko efekta preko periodograma, zvijezda je automatski Blazhko kandidat. Kriteriji su:
   1. ne smije postojati dnevni alias perioda (objasni ovo)

## 2.6 Analiza Blazhko efekt kandidata

## 2.7 Pouzdanost u Blazhko zvijezde

# 3 REZULTATI

## 3.1 Analiza RR Lyrae zvijezda

## 3.2 Potraga za Blazhko kandidatima

## 3.3 Analiza Blazhko efekt kandidata

## 3.4 Konačni katalog Blazhko zvijezda

# 4 RASPRAVA I ZAKLJUČAK

# 5 LITERATURA I IZVORI

1. <https://ogle.astrouw.edu.pl/atlas/RR_Lyr.html>
2. <https://www.aanda.org/articles/aa/full_html/2018/12/aa33514-18/aa33514-18.html>
3. <http://faculty.washington.edu/ivezic/Publications/203458.web.pdf>
4. <http://spiff.rit.edu/classes/phys370/lectures/mags/mags.html>
5. <http://spiff.rit.edu/classes/phys370/lectures/pulse_ii/pulse_ii.html>
6. <http://spiff.rit.edu/classes/phys370/lectures/pulse_i/pulse_i.html>
7. <http://spiff.rit.edu/classes/ladder/lectures/varstars/varstars.html#pulse>
8. <https://web.physics.ucsb.edu/~jatila/LambdaLabs/Globulars/HRdiagramlab_JKV.pdf>
9. <https://articles.adsabs.harvard.edu//full/1992ApJS...79..507R/0000512.000.html>
10. <https://astronomy.swin.edu.au/cosmos/h/hertzsprung-russell+diagram>
11. <http://www.phys.unsw.edu.au/jw/uncertainty.html>
12. <https://phys.libretexts.org/Courses/University_of_California_Davis/UCD%3A_Physics_7C_-_General_Physics/8%3A_Waves/8.6%3A_Beats>
13. <https://hrcak.srce.hr/file/175513>

# 6 PRILOG – programi

|  |
| --- |
|  |