



# MERJENJE RAZDALJ DO RAZSUTE KOPICE MELOTTE 71 PREK TREH METOD

PODROČJE: ASTRONOMIJA IN FIZIKA

Avtorici: Irena Nedeljković, Neja Pisk  
Mentor: dipl. ing. Vladimir Anžel  
Somentor: dr. Jure Japelj

# Zahvala

Iskreno se zahvaljujema najinima mentorjema, dipl. ing. Vladimirju Anželu in dr. Juretu Japlju. Slednjemu se še posebej zahvaljujema, ker nama je bil ves čas najinega raziskovanja na voljo za strokovno pomoč. Veliko naju je naučil in stalno je spremljal najino delo.

Zahvaljujema se tudi dr. Ireni Krapš Vodopivec, ki je lektorirala najino raziskovalno nalogo in prof. Danijeli Fabčič za pregled povzetka v angleščini.

# Kazalo vsebine

|   |    |
|---|----|
| Zahvala .....                                   | 2  |
| Kazalo vsebine .....                            | 3  |
| Kazalo slik .....                               | 4  |
| Povzetek .....                                  | 5  |
| 1. Uvod .....                                   | 6  |
| 2. Teoretični del.....                          | 7  |
| 2.1. Definiranje dolžine v vesolju .....        | 7  |
| 2.2. Zvezdne kopice .....                       | 7  |
| 2.3. Merjenje razdalj v vesolju.....            | 8  |
| 2.3.1. Paralaksa.....                           | 8  |
| 2.3.2. Spremenljive zvezde .....                | 9  |
| 2.3.3. HR diagram .....                         | 10 |
| 2.4. Magnitude .....                            | 12 |
| 3. Eksperimentalni del.....                     | 14 |
| 3.1. Opazovanje .....                           | 14 |
| 3.2. Fotometrija zvezd kopice .....             | 15 |
| 3.3. Fotometrija zvezd tipa Delta Scuti.....    | 20 |
| 4. Rezultati in razprava.....                   | 25 |
| 4.1. Razdalja iz HR diagrama .....              | 25 |
| 4.2. Razdalja iz paralakse.....                 | 25 |
| 4.3. Razdalja s pomočjo zvezd Delta Ščita ..... | 26 |
| 4.4. Primerjava razdalj.....                    | 27 |
| 5. Zaključek.....                               | 28 |
| 6. Viri in literatura .....                     | 29 |

## Kazalo slik

|  |  |    |
|--|--|----|
| Slika 1: Plejade (pridobljeno: <a href="https://lindicastrophotography.wordpress.com/2018/12/28/pleiades/">https://lindicastrophotography.wordpress.com/2018/12/28/pleiades/</a> )                     | 8  |    |
| Slika 2: Paralaksa (pridobljeno: <a href="http://www.andros.si/vesolje/slovar.html">http://www.andros.si/vesolje/slovar.html</a> )   | 9  |    |
| Slika 3: Povezava med spektralnim tipom zvezd, njihovo temperaturo ter bravo (pridobljeno: <a href="http://www2.arnes.si/~gljsentvid10/hrtex.html">http://www2.arnes.si/~gljsentvid10/hrtex.html</a> ) | 11   |    |
| Slika 4: HR-diagram (pridobljeno: <a href="http://www2.arnes.si/~gljsentvid10/hrtex.html">http://www2.arnes.si/~gljsentvid10/hrtex.html</a> )  | 11   |    |
| Slika 5: Program Voyager med opazovanjem   | 14   |    |
| Slika 6: Slika razsute kopice Melotte 71   | 15   |    |
| Slika 7: Najin izračun mag G v odvisnosti od mag G iz kataloga   | Slika 8: Najin izračun mag B v odvisnosti od mag B iz kataloga | 16 |
| Slika 9: HR-diagram z vsemi zvezdami   | 17   |    |
| Slika 10: Približan graf gibanja zvezd na sliki  | 17   |    |
| Slika 11: Gibanje zvezd po tem, ko sva jih omejili na manjši odsek   | 18   |    |
| Slika 12: HR-diagram po prvem izločanju  | 18   |    |
| Slika 13: Paralaksa še neizločenih zvezd   | 19   |    |
| Slika 14: Zvezde v omejenem območju  | 19   |    |
| Slika 15: HR-diagram po koncu izločanja  | 20   |    |
| Slika 16: Spremenljive zvezde V1, V2, V3 in V4   | 21   |    |
| Slika 17: AstroimageJ  | 22   |    |
| Slika 18: Svetlobna krivulja V1  | 23   |    |
| Slika 19: Svetlobna krivulja V3  | 23   |    |
| Slika 20: Svetlobna krivulja V4  | 24   |    |

## Kazalo tabel

|  |    |
|--|----|
| Tabela 1: Vrednosti period in njihovih napak   | 24 |
| Tabela 2: Vrednosti magnitud in njihovih napak | 26 |
| Tabela 3: Vrednosti razdalj in njihovih napak  | 26 |
| Tabela 4: Primerjava razdalj                   | 27 |

# Povzetek

V astronomiji obstaja veliko različnih načinov merjenja razdalj do objektov v vesolju. Razsutim kopicam, v katerih se nahaja več deset ali sto zvezd enake starosti, razdaljo lahko izmerimo prek študija barve in navideznega sija (oziroma HR-diagrama). Čeprav je metoda manj natančna od nekaterih drugih bolj specializiranih metod, je njena prednost v tem, da jo lahko uporabimo za prav vse kopice. V nalogi sva želeli preveriti natančnost merjenja razdalje prek HR-diagrama na primeru razsute kopice Melotte 71. Kopico sva dve noči opazovali s teleskopom GoChile, ki stoji na observatoriju El Sauce v Čilu. Z dolgo osvetlitvijo sva dobili posnetek, na katerem so prisotne tudi relativno temne zvezde kopice, zaporedje krajših posnetkov pa sva uporabili za iskanje zvezd s periodičnim spreminjanjem sija. Oddaljenost kopice sva izmerili na tri načine: prek HR-diagrama, s pomočjo treh spremenljivih zvezd tipa Delta Ščita (prek uporabe znane relacije med periodo in izsevom), ki so v tej kopici in s pomočjo paralakse zvezd v kopici, izmerjene s satelitom Gaia. V vseh primerih najdeva podobno oddaljenost, ki se giblje okoli razdalje 2.2 kpc. Opredelili sva zanesljivost merjenja s pomočjo HR-diagrama v primerjavi z drugima dvema metodama. Ugotovili sva, da so rezultati precej odvisni od nekaterih privzetih vrednosti iz katalogov (kot je medzvezdna ekstinkcija).

**Ključne besede:** merjenje razdalj, razsuta kopica, HR-diagram, paralaksa, spremenljive zvezde

## Abstract

There are many different methods for measuring distances between space objects in astronomy. The distance to open clusters which contain about ten to hundred stars of the same age can be measured by studying the spectral color and luminosity of these stars. This method is called the HR-diagram. Although the HR-diagram is not as accurate as other even more specialized methods, it can be used for all existing clusters.

The purpose of our research was to test the accuracy of the HR-diagram on the example of Melotte 71. For two nights we observed the cluster with the GoChile telescope located in El Sauce Observatory in Chile. Sequences with longer exposure periods were used to acquire darker stars of the cluster and sequences with shorter exposure periods were used for variable stars.

The distance to the cluster was measured in three ways: by the HR-diagram, by observing three Delta Scuti variables in Melotte 71 (using the known relation between the period and the luminosity) and with the cluster star's parallax, measured by the Gaia satellite. In all methods similar distances varying around 2.2pc were found.

By comparing the HR-diagram with the other two methods, we determined its reliability and discovered that the results are quite dependent on certain default values from catalogues such as the value of interstellar extinction.

**Key words:** measuring distances, open cluster, HR-diagram, parallax, variable stars

# 1. Uvod

Grki so bili prvi, ki so izmerili razdaljo do Sonca in Lune. Njihovi rezultati so se potrdili šele v 17. stoletju, ko se je astronomija začela hitreje razvijati. V 19. stoletju so izračunali prvo razdaljo s pomočjo paralakse, kar je bilo prvo uspešno merjenje katerekoli druge zvezde kot Sonce. Kmalu za tem so odkrili različne barvne spektre in sestavili HR-diagram, kar jim je pomagalo priti do novih možnosti izračuna razdalj. Nazadnje pa so odkrili še zvezde, ki spreminjajo svojo svetlost. Le tem so izmerili periodo spreminjanja navideznega sija in s temi podatki izračunali razdaljo. Danes v astronomiji obstaja tudi veliko drugih načinov merjenja razdalj, kot npr. radijsko merjenje, merjenje s pomočjo supernov, itd.

Midve sva kot tri tehnike merjenja uporabili merjenje s pomočjo paralakse, merjenje s pomočjo HR-diagrama ter merjenje s pomočjo spremenljivih zvezd. Kot najino nalogo sva si zadali, da dokaževa zanesljivost HR-diagrama pri merjenju razdalj do razsutih kopic. Natančnost metode sva primerjali z drugima dvema metodama.

V teoretičnem delu bova predstavili kopice in njihove podvrste, različne enote za razdalje v astronomiji in metode za merjenje razdalj v vesolju.

V eksperimentalnem delu bova opisali najino opazovanje, obdelavo slik ter postopek obdelave podatkov s programi TopCat, AstroimageJ in drugimi.

V rezultatih in razpravi bova predstavili najine izračune ter jih primerjali med sabo.

Na koncu pa bova v zaključku opisali še zaključno misel o najini nalogi.

## 2. Teoretični del

Razdalje v astronomiji so zelo pomembne [1]. Brez znane razdalje ne moremo izmeriti izseva objekta, velikosti kopice na nebu, itd. Šele prek znanih razdalj smo izvedeli, da je Osončje del Galaksije in da so v vesolju tudi druge galaksije.

### 2.1. Definiranje dolžine v vesolju

V astronomiji dolžine definiramo z različnimi enotami: v parsekih, astronomskih enotah ali svetlobnih letih.

**Astronomska enota** predstavlja povprečno razdaljo med Soncem in Zemljo in je definirana kot 149 597 870,7 km. Uporablja se predvsem za označevanje razdalj v našem Osončju.

**Svetlobno leto** je razdalja, ki jo svetloba v vakuumu prepotuje v enem letu. 1 svetlobno leto je enako 63 241 astronomskih enot ali 3,26 parsekov.

**Parsek** je razdalja, pri kateri polmer Zemljine orbite predstavlja kot ene ločne sekunde. Je nasprotna vrednost paralakse v kotnih sekundah. En parsek je enak razdalji  $3,09 \times 10^{13}$  km.

### 2.2. Zvezdne kopice

Čeprav se nam ob pogledu v nebo zdi, da vsaka zvezda leži sama zase, se zvezde v resnici združujejo skupaj v kopice. Kopice delimo na dve vrsti, starejše so kroglaste kopice, v katerih so zelo stare združbe zvezd in je v njih skoraj toliko zvezd kot v manjši galaksiji, druge pa so razsute kopice, v katerih so mlajše zvezde.

V razsutih kopicah najdemo zvezde enakih starosti, ki so nastale iz istega oblaka prahu in plina. Tako je kemijska sestava zvezd v razsutih kopicah enaka, mase so pa zelo različne, kar se zgodi zaradi neenakomerne porazdelitve snovi v začetnem oblaku. Nastanejo v galaktični ravnini in niso gravitacijsko močne, zato je njihova življenjska doba kratka in kmalu razpadejo. Te kopice so zelo nesimetrične in so lahko velike od 5 do kar 75 svetlobnih let. Na spodnji sliki je prikazana najbolj znana razsuta kopica Plejade. [1]



Slika 1: Plejade (pridobljeno: <https://lindicastrophotography.wordpress.com/2018/12/28/pleiades/>)

## 2.3. Merjenje razdalj v vesolju

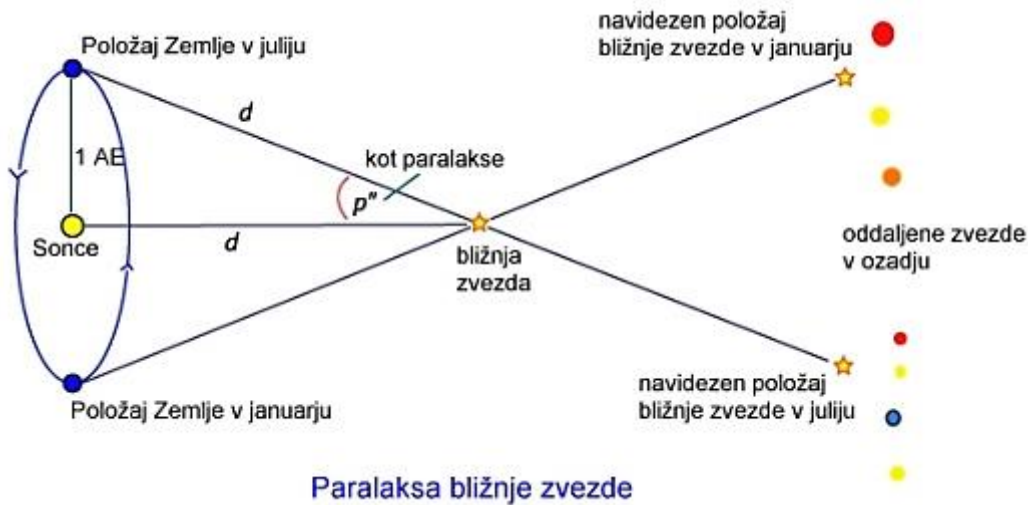
Razdalje v astronomiji merimo na različne načine. V tej nalogi sva razdalje do razsute kopice merili s pomočjo paralakse, spremenljivih zvezd in HR-diagrama. V nadaljevanju bova podrobno predstavili vse tri metode.

### 2.3.1. Paralaksa

Paralaksa je razlika kotov v smeri opazovanega telesa iz dveh ločenih točk opazovanja. Uporablja se za ugotavljanje oddaljenosti zvezde od Zemlje (geocentrična paralaksa) ali pa od Sonca (heliocentrična paralaksa). Položaja opazovalca in položaj opazovanega predmeta tvorita trikotnik, kot prikazano na sliki 2, če vemo, kako oddaljena sta položaja opazovalca in vemo smer predmeta iz vsake točke, lahko izmerimo oddaljenost nebesnega telesa. Bližje kot je telo, večji bo kot med prvim in drugim mestom telesa na nebu. Ta način merjenja razdalj se



uporablja predvsem za računanje oddaljenosti bližnjih zvezd oz. zvezd v naši galaksiji, saj je Zemljina orbita premajhna za računanje bolj oddaljenih teles [2].



Slika 2: Paralaksa (pridobljeno: <http://www.andros.si/vesolje/slovar.html>)

### 2.3.2. Spremenljive zvezde

Spremenljivke so zvezde, ki se jim spreminja sij. So orjakinje in svetijo tudi 1000 krat močneje kot naše Sonce. Glede na dolžine periode jih delimo na [3]:

- Ultrakratko periodične (manj kot en dan)
- Kratko periodične (1 – 25 dni)
- Srednje periodične (25 – 50 dni)
- Dolgo periodične (več kot 50 dni)

Glede na fizikalni mehanizem, ki povzroči spremembo sija, jih delimo na več različnih skupin, ki dobijo ime po vzorčni skupini. Tako poznamo:

- Ekstrinzične:
  - Prekrivalna ozvezdja (tipa Algola)
  - Vrteče spremenljivke (BY Zmaja)
- Intrinzične:
  - Neperiodične:
    - Supernove
    - Nove
    - Bliščnice (zvezde UV Kita)

- Spremenljivke tipa T Bika
- R Severne krone
- Periodične:
  - Kefeide (poznamo več tipov)
  - Spremenljive zvezde tipa RR Lire
  - Spremenljive zvezde tipa Mire

## Kefeide

Leta 1784 je Edward Pigott prvi zaznal spreminjanje sija zvezde Eta Orla. Ta zvezda je postala prva predstavnik razreda klasičnih kefeid. Nekaj mesecev kasneje pa je John Goodricke odkril spreminljivost delte Kefeja, ki je dala ime celotni skupini. Henrietta Swan Leavitt je leta 1908 odkrila zvezo med periodo spreminjanja sija in izsevom zvezde, leta 1912 pa to odkritje objavila skupaj z dodatnimi dokazi. Sedaj ločimo različne tipe kefeid, za vse velja prej omenjena zveza, umeritev pa je drugačna. Delimo jih na:

- Spremenljivke tipa delta Kefeja
- Spremenljivke tipa W Device
- Spremenljivke tipa BL Herkula
- Spremenljivke tipa RV Bika
- Spremenljivke tipa Delta Ščita.

Kefeide so zelo uporabne kot standardne svetilke pri merjenju razdalji v vesolju. Z njimi lahko merimo medgalaktične razdalje ter razdalje znotraj naše galaksije.

Spremenljivke tipa Delta Ščita:

So zvezde, katerih masa ustreza 1,0 do 2,5 sončnim masam in njihova perioda je v razponu 0,03 do 0,3 dneva. Delimo jih lahko na dve podvrsti, tiste z manjšimi spremembami v magnitudi, pod 0,1 in tiste z večjimi spremembami, nad 0,1 magnitude. Prav te zvezde z večjimi spremembami se večinoma uporabljajo za merjenje razdalj, saj imajo natančno definirano razmerje med obdobjem in svetilnostjo. [3]

### 2.3.3. HR-diagram

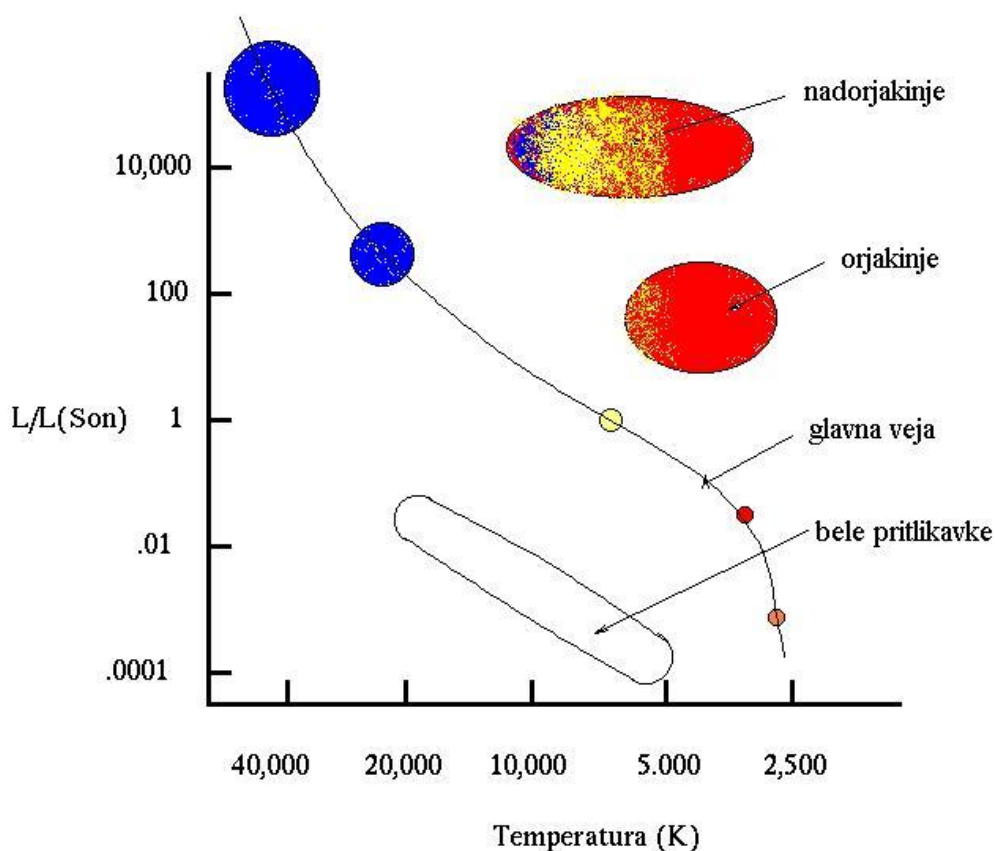
Hertzsprung-Russel diagram ali HR-diagram se uporablja za predstavitev raznolikosti zvezdnih vrst in razumevanje medsebojnih odnosov med različnimi skupinami zvezd. Graf predstavlja svetlost zvezde v primerjavi s spektralnim tipom, temperaturo zvezdne površine ali barvo zvezd (glej slika 3). Različne oblike obstajajo zaradi različnih metod preučevanja zvezd.

| Spektralni tip | Temperatura v Kelvin | Barva       | Kemijska sestava (spekter)  |
|----------------|----------------------|-------------|---|
| O              | 50000                | modra       | ioniziran helij, helij (s Ori-Mintaka)                              |
| B              | 25000                | modro bela  | ioniziran helij, helij, ioniziran kisik (Spika, Rigel)              |
| A              | 20000                | bela        | vodik (Sirij, Vega)   |
| F              | 14600                | belo rumena | nekaj vodika, ioniziran kalcij (Prokijon)                           |
| G              | 6000                 | rumena      | kovine (železo), ioniziran kalcij (Sonce, Kapela)                   |
| K              | 5100                 | oranžna     | nevtralne kovine, molekule (Arktur, Aldebaran)                      |
| M              | 3600                 | rdeča       | izrazit titanov oksid, nekaj kalcija, molekule (Antares, Betelgeza) |

OBAFGKM (Oh, Be A Fine Girl, Kiss Me.)

Slika 3: Povezava med spektralnim tipom zvezd, njihovo temperaturo ter bravo (pridobljeno: <http://www2.arnes.si/~gljsentvid10/hrtex.html>)

HR-diagram na splošno deli zvezde v štiri različne skupine: nadorjakinje, orjakinje, zvezde glavne veje ter bele pritlikavke, kot prikazano na sliki 4.



Slika 4: HR diagram (pridobljeno: <http://www2.arnes.si/~gljsentvid10/hrtex.html>)

### Zvezde glavne veje:

Zvezde na glavni veji so povezane skupaj. To, da njihov spektralni tip sega od O do M, pove, da imajo vse te zvezde nekaj skupnega. Na podlagi Sonca in nekaterih drugih zvezd so ugotovili, da jih povezuje pretvorba vodika v helij. Ta pretvorba se namreč dogaja znotraj vseh zvezd na glavni veji.

### Orjakinje:

Na glavni veji najdemo zvezde, ki spadajo pod spektralni tip G. Pod tem spektrom pa najdemo tudi zelo svetlejše zvezde. To so orjakinje. Te zvezde so hladnejše in bolj rdeče kot ostale.

### Nadorjakinje:

Zvezde, katerih velikost lahko primerjamo z 310-kratno velikostjo Sonca, njihov spekter pa ostane znotraj G, imenujemo nadorjakinje.

### Bele pritlikavke:

To so zvezde, ki so zelo majhne, a zelo goste. Zaradi njihove velikosti in barve, te zvezde proizvedejo več modre barve kot rdeče, jih vidimo kot bele zvezde ter posledično imenujemo bele pritlikavke.

Absolutno magnitudo lahko izmerimo le bližnjim zvezdam, katerim lahko določimo paralakso, saj se lahko njihova navidezna magnituda glede na razdaljo pretvori v absolutno magnitudo. Za raziskovanje bolj oddaljenih zvezd, ki lahko niso tako svetle, moramo uporabiti kopico ali meglico zvezd. Tam namreč najdemo več zvezd, od močnejših do šibkejših, ki se nam razporedijo po glavni veji. Tiste zvezde, ki so bolj skupaj, pomeni, da imajo enako absolutno magnitudo. Tako njihovo absolutno magnitudo primerjamo z navidezno magnitudo in pridemo do razdalje do kopice. Z znano razdaljo pa se lahko izračuna tudi absolutne magnitude drugih zvezd na tem diagramu. To pove, da HR-diagram ni le uporaben za prikaz zvezd, ampak lahko z njim tudi pridobimo informacije o drugih zvezdah [4].

## 2.4. Magnitude

Magnituda predstavlja svetlost zvezde ali drugega nebesnega telesa. Manjša, kot je magnituda, svetlejši objekt predstavlja. Na začetku so zvezde delili v šest razredov glede na magnitudo, leta 1850 pa je Norman Robert Pogson predlagal nov sistem za merjenje magnitud. Ena magnituda naj bi predstavljala 2,512-kratno svetlost. To pomeni, da je zvezda z magnitudo 4, 2,512-krat svetlejša kot ista z magnitudo 5. Danes v astronomiji uporabljamo absolutno in navidezno magnitudo.

**Navidezna magnituda** ( $m$ ) predstavlja navidezni sij opazovane zvezde. Definirana je kot razmerje med gostoto svetlobnega toka z zvezde  $j$  in gostoto svetlobnega toka  $j_0$  referenčne zvezde. Tako lahko magnitudo zvezde izmerimo tako, da primerjamo navidezno magnitudo s prej izmerjenimi magnitudami referenčnih zvezd. Navidezno magnitudo podamo kot:

$$m = m_0 - 2,5 \log j/j_0,$$

kjer  $m_0$  predstavlja navidezno magnitudo referenčne zvezde.

**Absolutna magnituda** ( $M$ ) predstavlja svetlost zvezde, opazovane z oddaljenosti 10 parsekov. S pomočjo absolutne magnitude lahko med seboj primerjamo zvezde, česar pri navidezni magnitudi ne moremo, saj ne vemo razlike med tem, kar vidimo, in pravo svetlostjo zvezde.

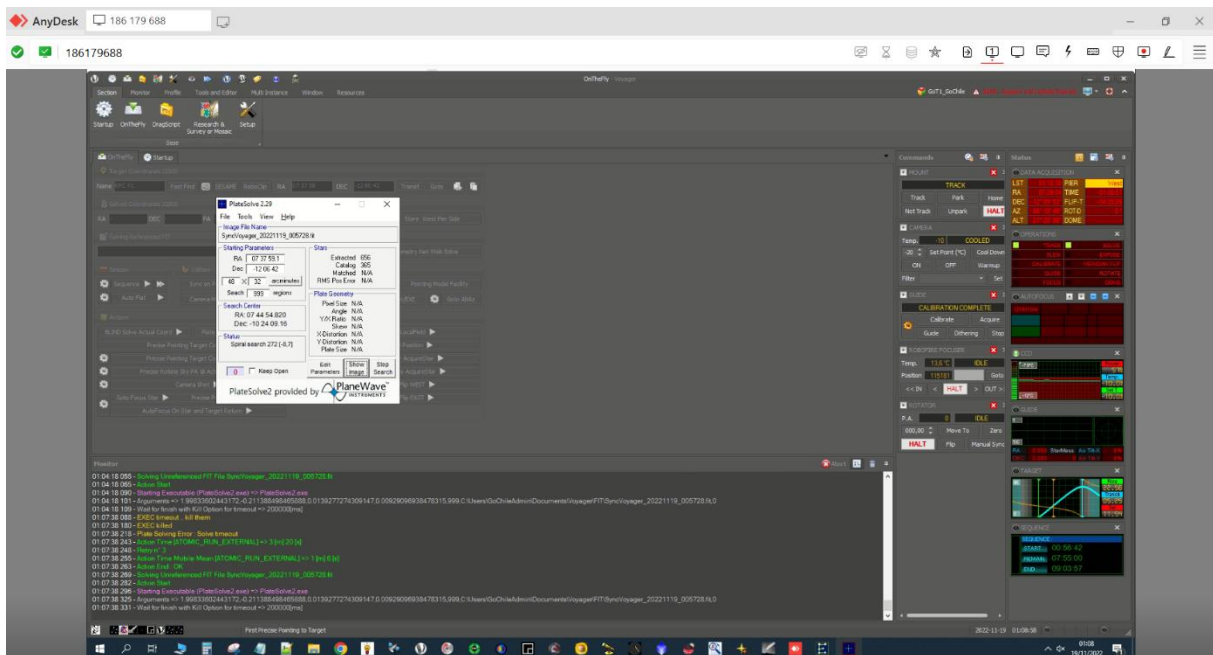
Povezava med absolutno in navidezno magnitudo, kjer  $M$  predstavlja absolutno magnitudo,  $m$  navidezno magnitudo in  $d$  razdaljo v parsekih:

$$M = m - 5 \times \log 10(d) + 5$$

# 3. Eksperimentalni del

## 3.1. Opazovanje

Opazovanje je bilo izvedeno s 400 milimetrskim zrcalnim teleskopom GoT1, namenjenim za opazovanje temnejših objektov ter raziskovanju meglic, galaksij in zvezd. Teleskop se nahaja v Čilu na koordinatah 30.4725 S, 70.7631 W in nadmorski višini 1560 metrov. Teleskop se upravlja na daljavo preko računalnika Vega, opazovanje pa se izvaja s pomočjo programa Voyager, ki je prikazan na sliki 5.



Slika 5: Program Voyager med opazovanjem

Pred opazovanjem sva si na spletni strani *Object Visibility* [5] ogledali, kdaj je objekt viden na nebu. Razsuta kopica Melotte 71 se nahaja v smeri ozvezdja Krma na koordinatah  $\alpha = 07\ 37\ 31$  in  $\delta = -12\ 03\ 54$ . Najina naloga je sestavljena iz dveh delov, za kar sva morali izvesti dve ločeni opazovanji. Za izris HR-diagrama sva kopicico opazovali v širokopasovnih filterih LRGB. V vsakem filteru sva posneli 25 fotografij s posamezno osvetlitvijo 30 s. Opazovanje sva izvedli 23. 11. 2022 med 3:30 in 7:30 po srednjeevropskem času. Za študij zvezd tipa Delta Scuti sva isto polje opazovali 18. 12. 2022 med 3:30 in 9:00 uro. Tokrat sva opazovali zgolj v filteru G. Naredili sva 250 fotografij s posamezno osvetlitvijo 60 s.

Po koncu vsakega opazovanja sva posneli še kalibracijske posnetke (t.i. *dark*, *bias* in *flat* posnetke). Vse posnete slike sva kalibrirali s pomočjo programa *AstroPixelProcessor*, nato pa sva jih prenesli na svoj računalnik za nadaljnjo obdelavo.

## 3.2. Fotometrija zvezd kopice

Za fotometrijo kopice sva najprej pregledali vse slike in najboljše izmed njih v programu DeepSkyStacker zložili skupaj, tako da sva dobili eno sliko z dolgo osvetlitvijo za vsak filter LRGB. Te slike sva na koncu uporabili tudi za končno fotografijo, prikazano spodaj, na sliki 6. S programom ASTAP sva vsaki sliki poiskali astrometrično rešitev. Slike so bile nato pripravljene za naslednji korak: merjenje navideznega sija zvezd. Sij sva merili le na slikah, posnetih s filtri B in G.



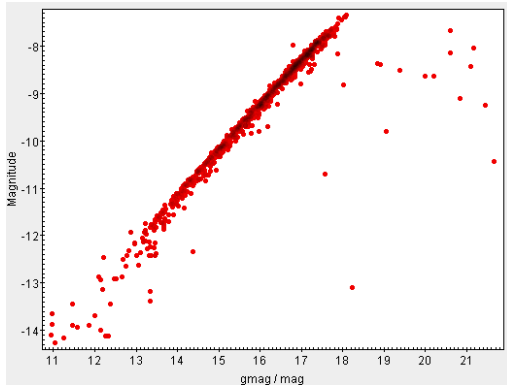
*Slika 6: Slika razsute kopice Melotte 71*

Slike z astrometrično rešitvijo sva odprli v programu Aperture Photometry Tool oz. APT. Nastavili sva velikost okrogle aperture za merjenje signala zvezd. Ker je na polju veliko zvezd, ozadja nisva merili s posameznimi aperturami, ampak sva izmerili povprečno vrednost signala ozadja in predpostavili, da se ta na polju ne spreminja. Da bi program pravilno izračunal napake, sva mu morali podati še vrednost pretvorbe med elektroni in izpisanim signalom (t.i. gain, vrednost je 0.247).

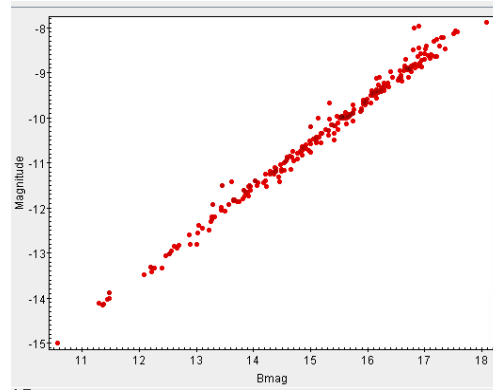
Navidezni sij sva želeli izmeriti vsem zvezdam. Z APT-jem sva najprej poiskali vse zvezde na sliki, kjer je program za sliko v filtru B našel 3400 zvezd, v filtru G pa 3817 zvezd, nato pa sva avtomatično vsem zvezdam izmerili instrumentalno magnitudo in njeno napako. Končni rezultat je bila tabela vseh zvezd, njihovih položajev in instrumentalnih magnitud. Postopek sva ponovili za vsak filter posebej.

V naslednjem koraku sva morali poiskati zero point (ZP), da pretvoriva instrumentalne magnitudo v navidezne. Najino tabelo zvezd sva primerjali z zvezdnim katalogom, ki vsebuje

informacije o magnitudah zvezd na sliki. To sva naredili s programom TopCat. Meritve zvezd s slike, posnete s filtroma B, sva primerjali s katalogom APASS DR9 [6], tiste v filtru G pa s katalogom PanSTARRS – DR1 [7]. Program primerja položaje zvezd iz naše tabele in tistih v katalogih in jih poveže. Rezultat je nova tabela z združenimi informacijami. Za vsak filter sva narisali graf, kjer sva na x-os vnesli vrednosti magnitud iz kataloga, na y-os pa vrednosti najinih izmerjenih instrumentalnih magnitud (Sliki 7 in 8).



Slika 7: Najin izračun mag G v odvisnosti od mag G iz kataloga



Slika 8: Najin izračun mag B v odvisnosti od mag B iz kataloga

Linearna vrednost med zvezdami pomeni, da lahko z eno samo vrednostjo pretvoriva med obema vrednostma. To je željeni ZP. Za izračun ZP sva v tabeli naredili nov stolpec podatkov, kjer sva izračunali razliko med magnitudo zvezd v spletnem katalogu in najinem. Srednja vrednost razlik magnitud je ZP najine slike. Vrednosti za oba filtra sta:

ZP(B): 25,56

ZP(G): 25,32

Instrumentalnim magnitudam sva prišteli izmerjene ZP in dobili navidezne magnitudo.

Upoštevati sva morali še en popravek. Zaradi medzvezdnega prahu med nami in kopico se del svetlobe zvezd izgubi. Temu pravimo ekstinkcija. Poiskali sva meritve ekstinkcije za najino smer neba [8]. Vrednosti ekstinkcije (v enotah magnitude) v filterih B in G sta:

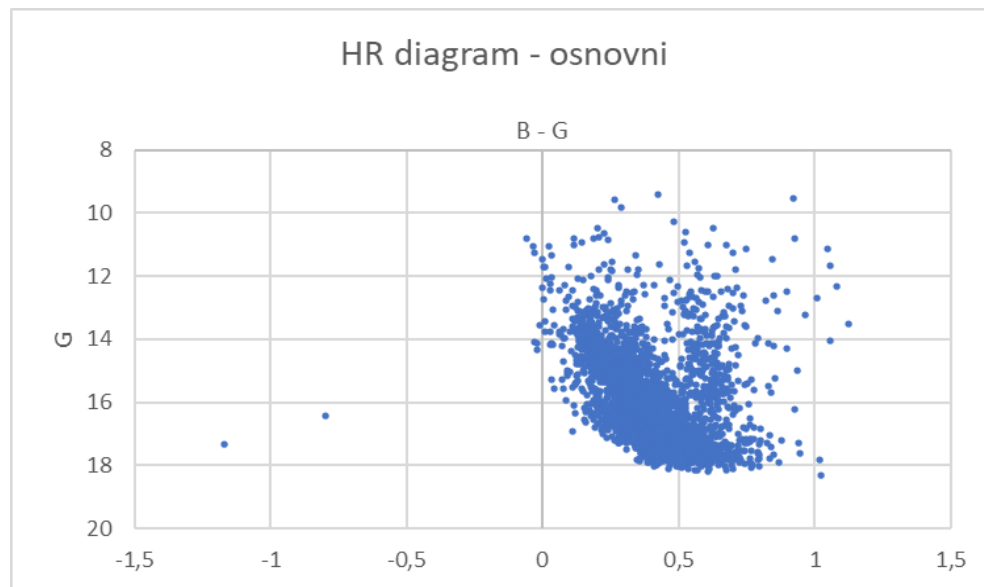
A\_G: 0,40

A\_B: 0,44

Ekstinkcijo sva odšteli od navideznih magnitud. Sedaj sva lahko narisali HR-diagram. Na sliki 9 je HR-diagram za vseh 3214 zvezd v najini tabeli. Na x osi je nanešana razlika B in G magnitud, na y osi pa magnituda G. Takoj opazimo, da na diagramu ni vidne izrazite glavne veje. Razlog je v tem, da so v najini tabeli zvezde, ki so del kopice, in zvezde, ki v kopico ne spadajo. Najina naslednja naloga je bila, da med vsemi zvezdami poiščeva le zvezde kopice. Pomagali sva si s

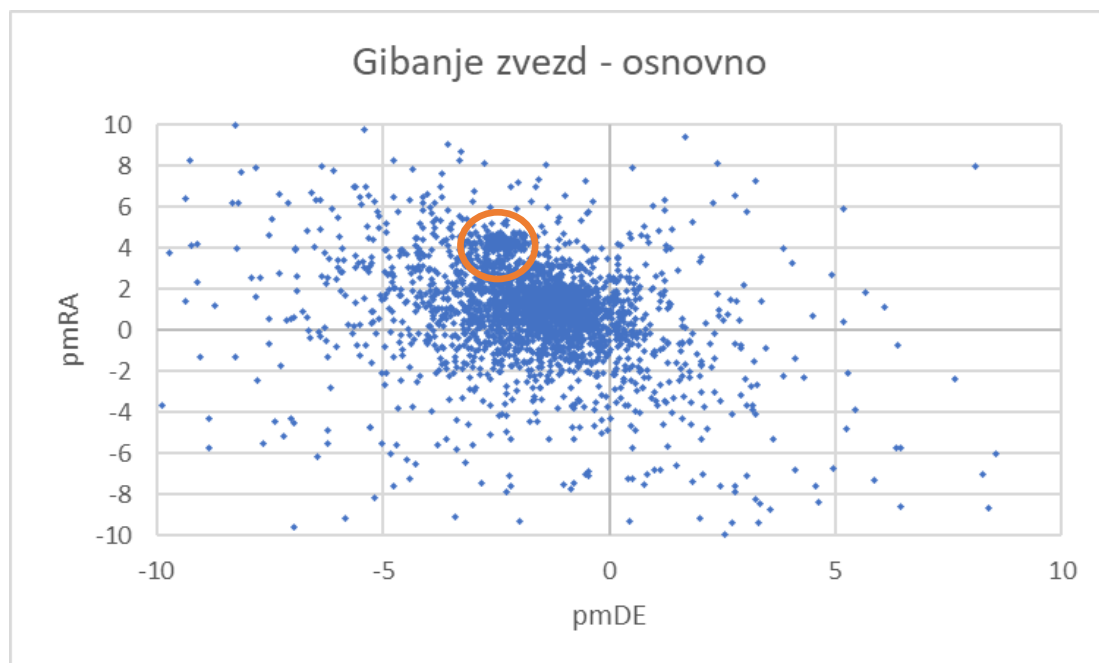


katalogom satelita Gaia [9]. Ta katalog vsebuje natančne položaje, paralakse in hitrosti gibanja okoli dveh milijard zvezd, med njimi tudi zvezd kopice Melotte 71.



Slika 9: HR diagram z vsemi zvezdami

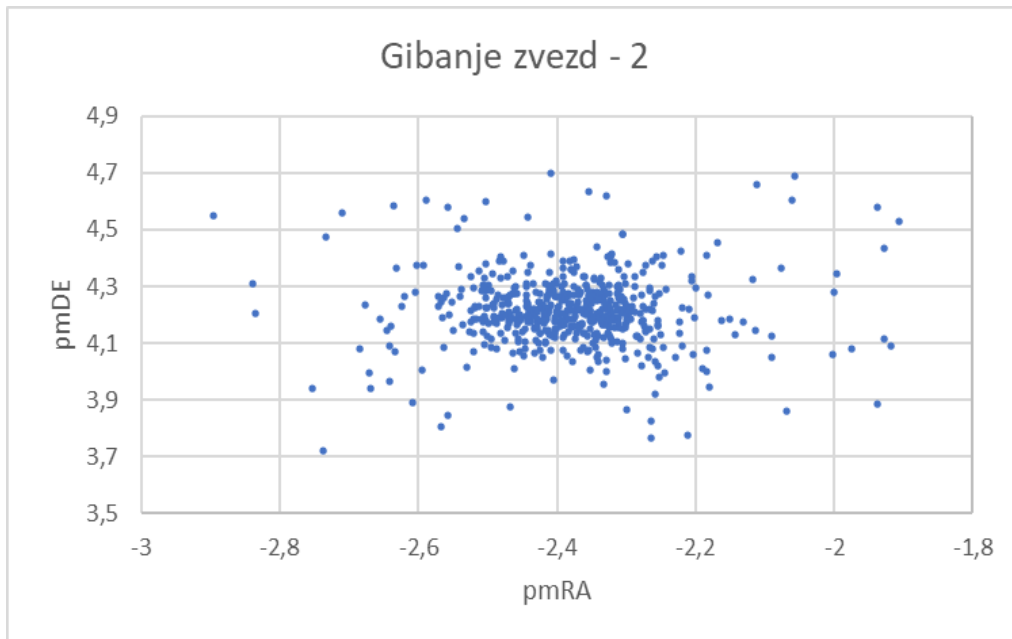
V prvem koraku izločanja zvezd, ki ne spadajo v najino kopico, sva v programu Excel odprli dokument z vrednostmi najine tabele in podatki satelita Gaia ter naredili graf, kjer sva primerjali lastno gibanje zvezd (slika 10). Vrednosti so podane v enotah mili kotne sekunde na leto.



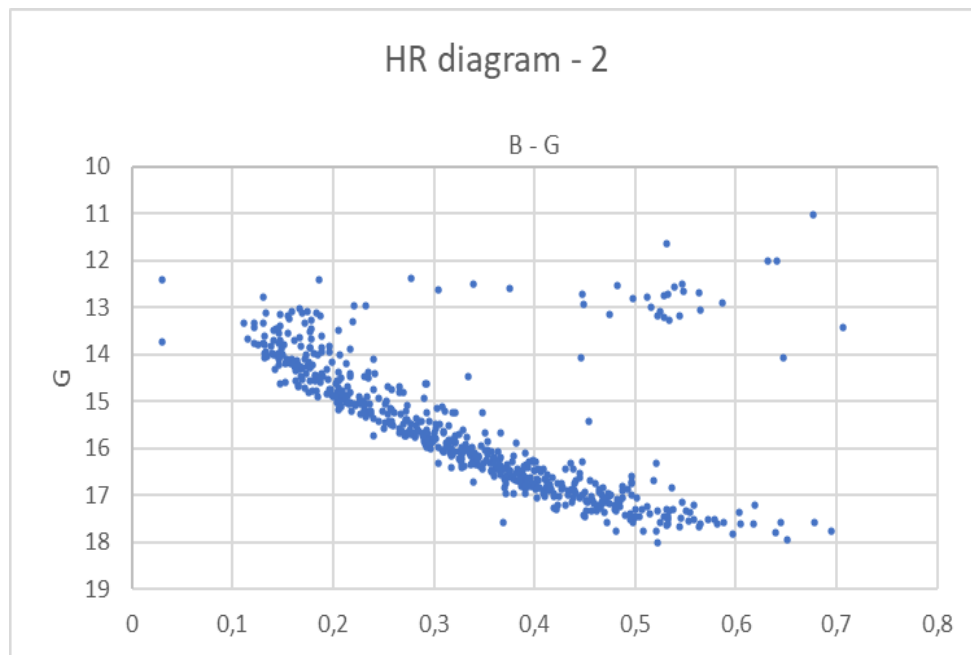
Slika 10: Približan graf gibanja zvezd na sliki

V manjši točki na tem grafu je bila vidna zgostitev zvezd. To nama je povedalo, da je na tistem delu več zvezd skupaj in nakazalo, da se tam nahajajo zvezde najine meglice. Tako sva vrednost

omejili  $-2,9 < \text{pmRA} < -1,9$  ter  $3,7 < \text{pmDE} < 4,7$  (slika 11). Potem sva narisali nov HR-diagram s 598 zvezdami v tem odseku (slika 12).



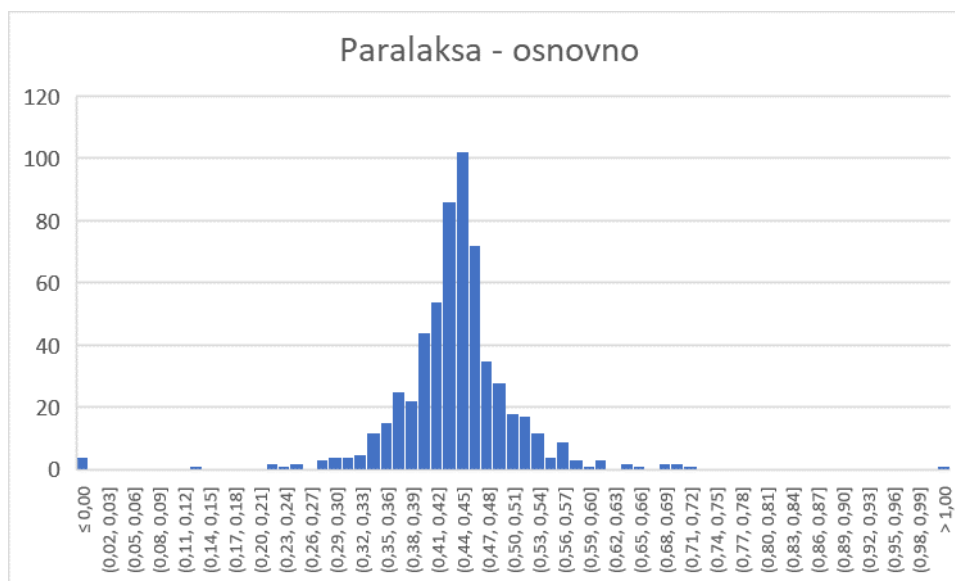
Slika 11: Gibanje zvezd po tem, ko sva jih omejili na manjši odsek



Slika 12: HR diagram po prvem izločanju

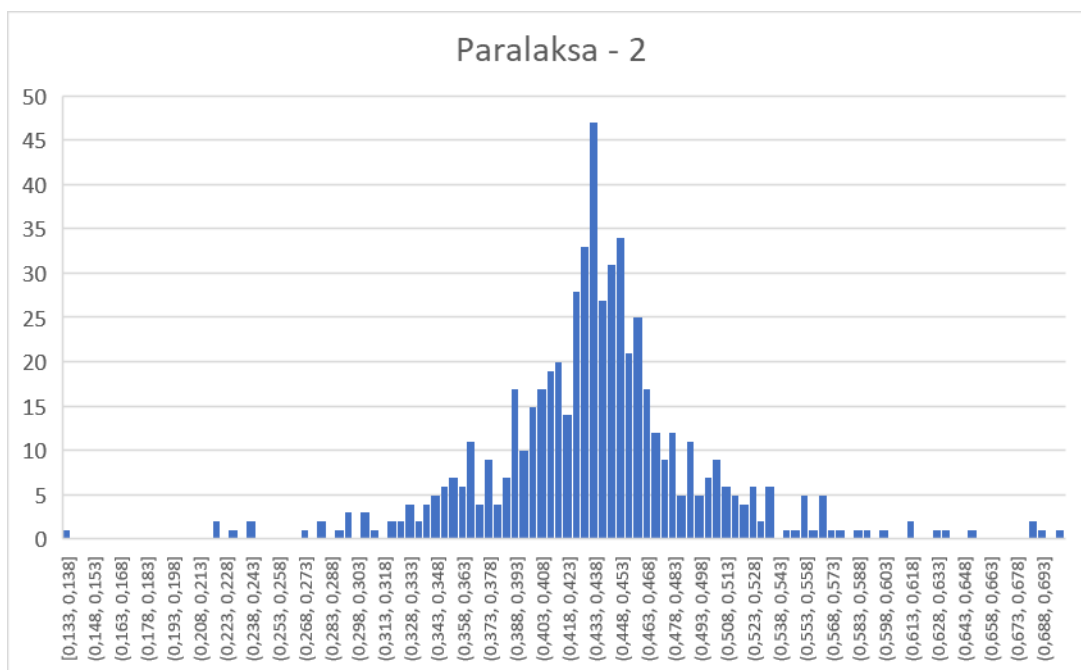
Diagram že izgleda bolje. Temu je sledila izločitev zvezd s pomočjo paralakse, saj sva na grafu za gibanje zvezd opazovali le gibanje v RA- in DE-smereh, torej gibanje v ravnini. Še vedno bi se na grafu lahko nahajale zvezde, ki se sicer gibljejo s podobnimi hitrostmi po nebu, a so na

povsem drugi razdalji kot kopica. Z zvezdami, ki so ostale po prvem izločanju, sva narisali histogram paralaks (slika 13) ter izračunali srednjo vrednost in standardno deviacijo.



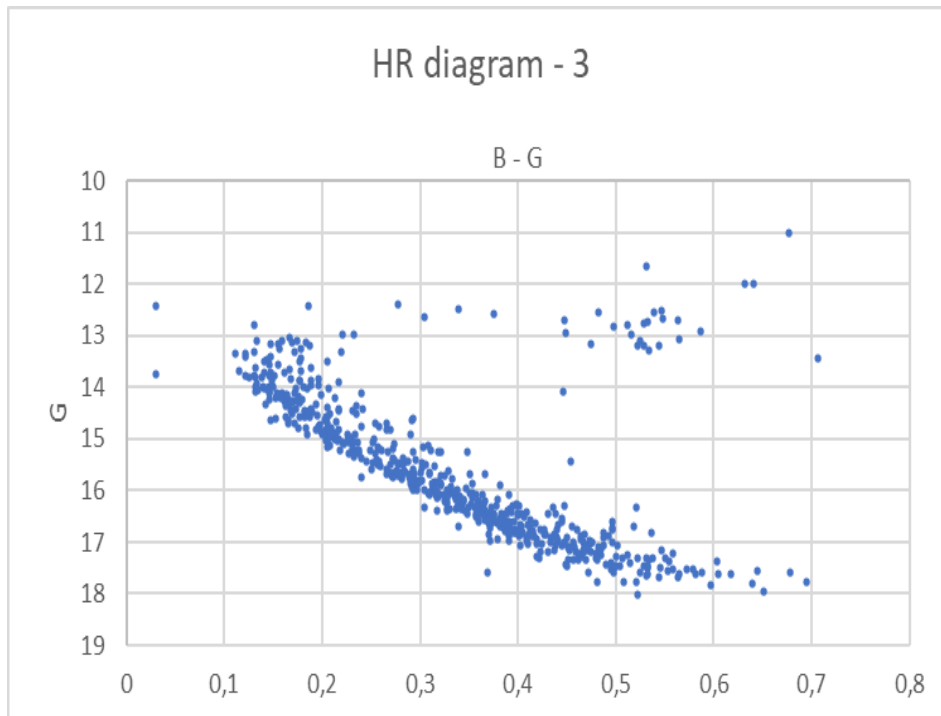
Slika 13: Paralaksa še neizločenih zvezd

Za srednjo vrednost sva dobili podatek 0,43, standardno deviacijo pa 0,12. Zvezde, ki so od srednje vrednosti odstopale za več kot trikratno vrednost standardne deviacije, sva izločili (slika 14).



Slika 14: Zvezde v omejenem območju

Končni HR-diagram nama je prikazoval vrednosti v najinem obsegu gibanja zvezd ter paralaksi in je vseboval 395 zvezd (slika 15).



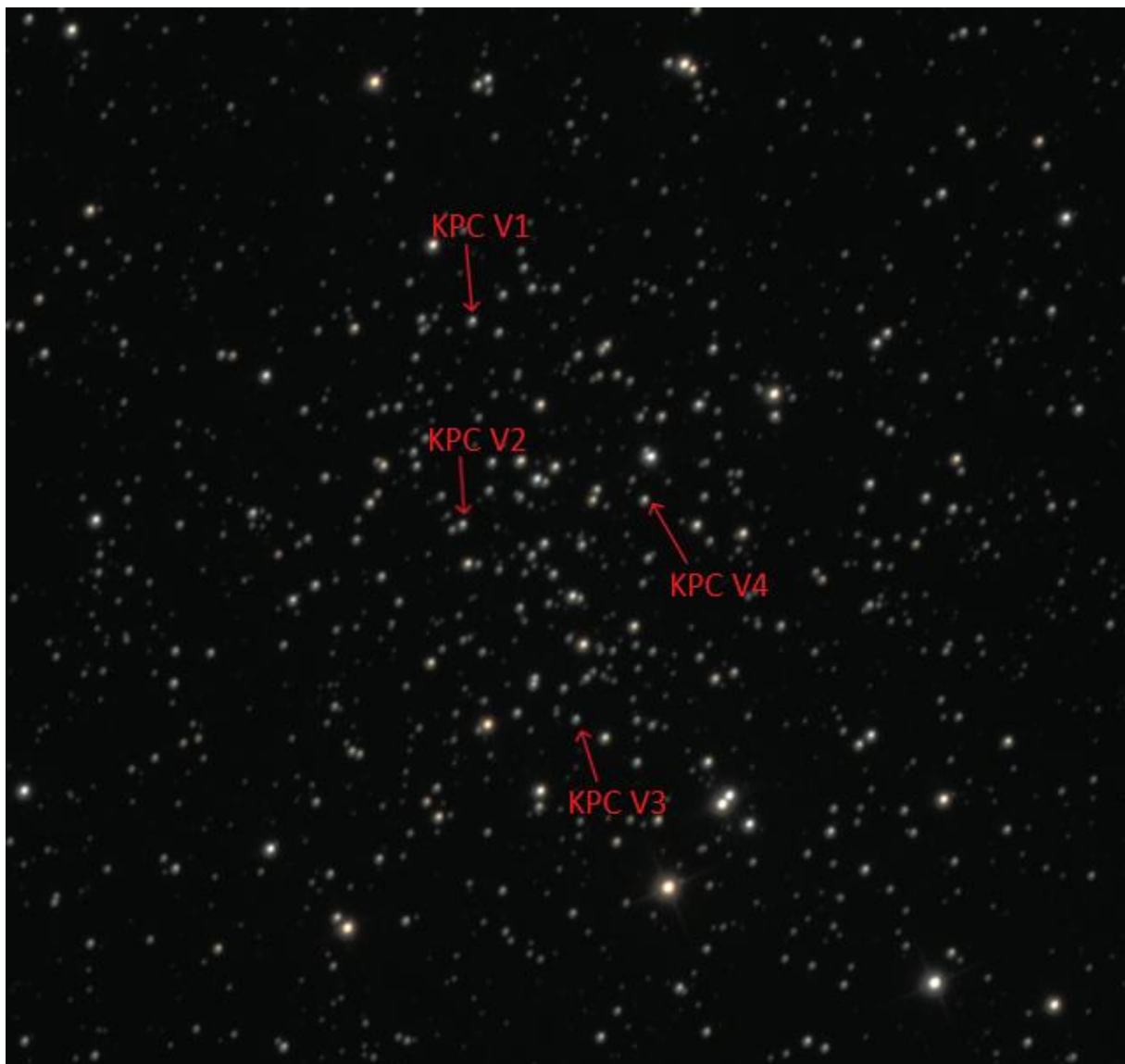
Slika 15: HR diagram po koncu izločanja

### 3.3. Fotometrija zvezd tipa Delta Ščita

Eden izmed načinov, ki sva jih izbrali za merjenje razdalje do kopic, je bil tudi prek opazovanja zvezd tipa Delta Ščita. Melotte 71 vsebuje vsaj štiri zvezde tega tipa [10], poimenovane KPC V1, KPC V2, KPC V3 in KPC V4. Najina naloga je bila, da izmeriva periodo spreminjanja navideznega sija vseh štirih zvezd, kar nama bo pomagalo pri meritvi razdalje.

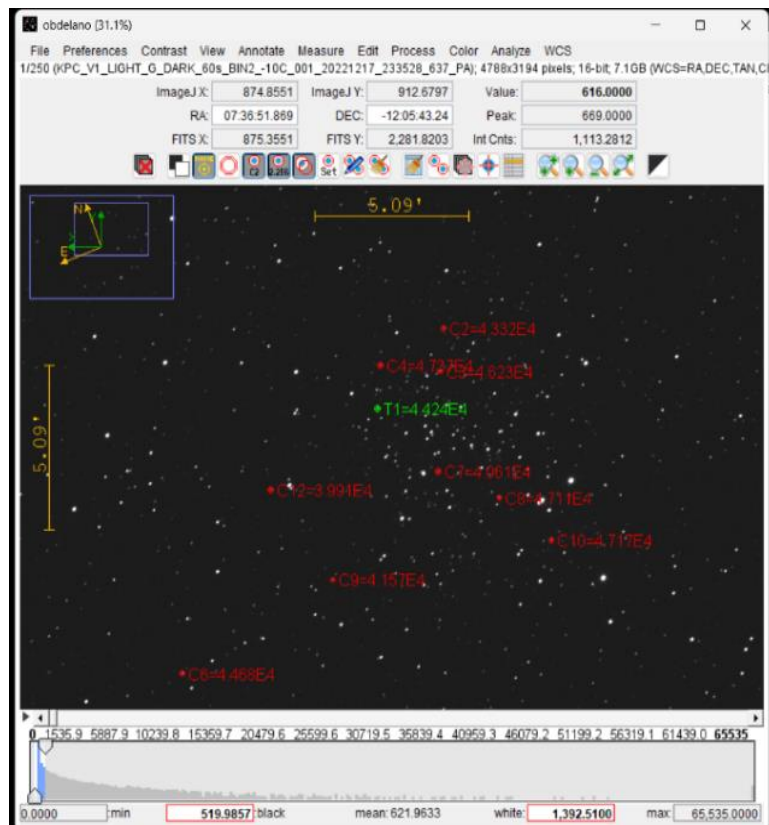
Opazovanje sva opravili v filtru G, ker je najbolj podoben klasičnemu filtru V, s katerim so običajno narejena opazovanja. Relacija med periodo in izsevom za zvezde Delta Ščita, ki jo bomo uporabili za merjenje razdalje, je prav tako merjena za klasičen V filter.

Kalibriranim slikam sva najprej poiskali astrometrične rešitve s programom ASTAP. Fotometrijo oziroma meritev navideznega sija sva naredili v programu AstrolmageJ [11]. Vse slike sva naložili v program. Na prvi sliki sva poiskali zvezde KPC V1, KPC V2, KPC V3 in KPC V4, prikazane na sliki 16.



*Slika 16: Spremenljive zvezde V1, V2, V3 in V4*

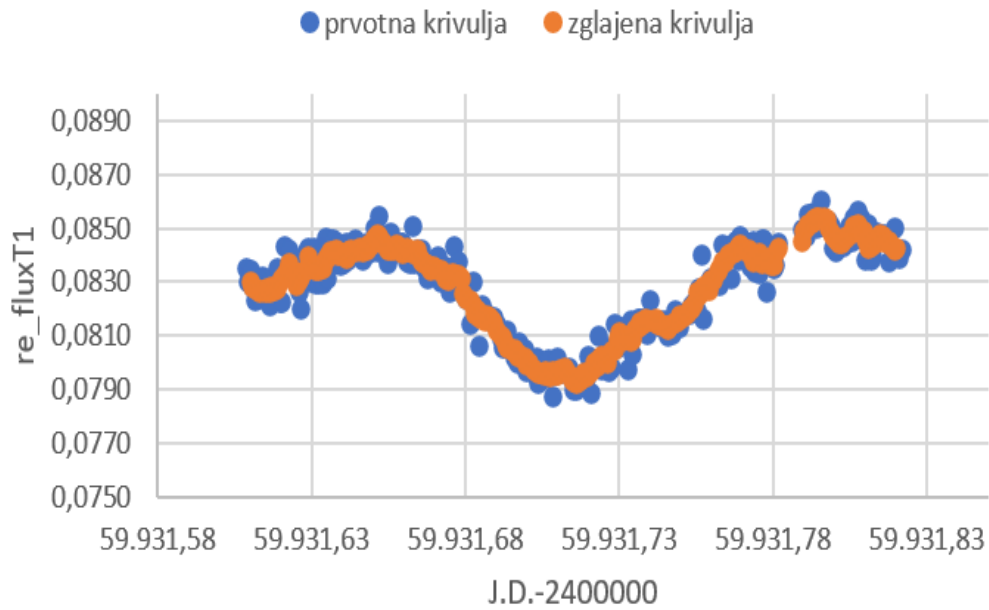
Izbrali sva še nekaj drugih zvezd v polju, ki so služile kot primerjalne zvezde. Program (prikazan na sliki 17) je na vseh slikah avtomatično izmeril navidezni sij zvezd Delta Ščita relativno na primerjalne zvezde. Postopek sva ponovili za vsako zvezdo posebej.



Slika 17: AstroimageJ

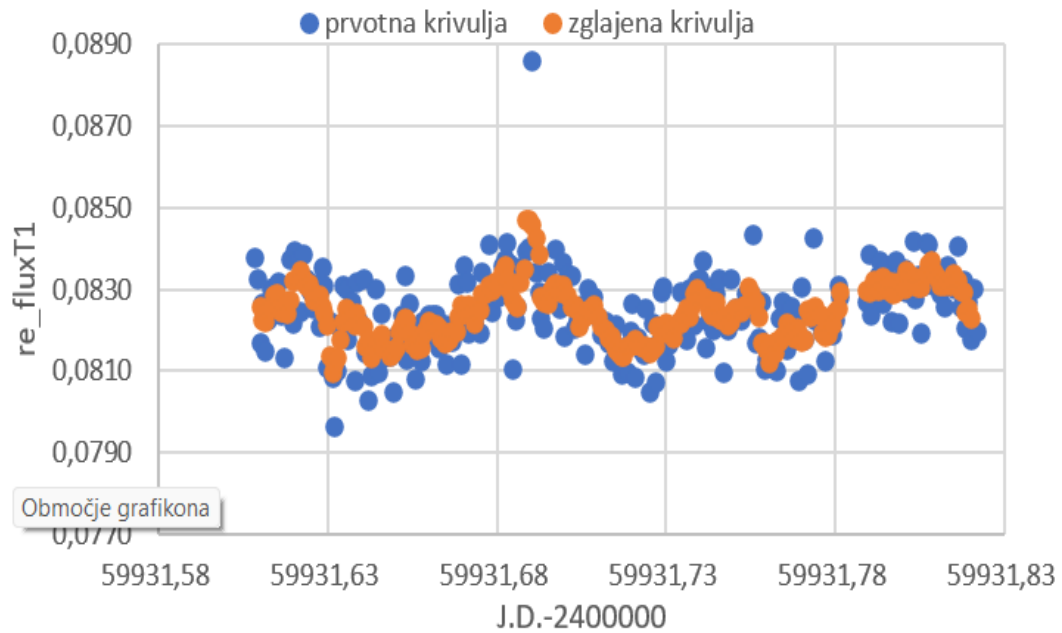
Dobili sva štiri svetlobne krivulje. S pomočjo svetlobnih krivulj je bilo možno določiti, pri katerih zvezdah je viden periodičen signal in posledično, katere zvezde lahko uporabiva za nadaljevanje raziskave. Za primerne so se izkazale svetlobne krivulje zvezd KPC V1, KPC V3 in KPC V4 (prikazane na slikah od 18 do 20), medtem ko pri KPC V2 sva opazili spreminjanje sija, a nisva mogli z gotovostjo ugotoviti, ali je signal periodičen (perioda je verjetno daljša od časa opazovanja).

## Svetlobna krivulja V1



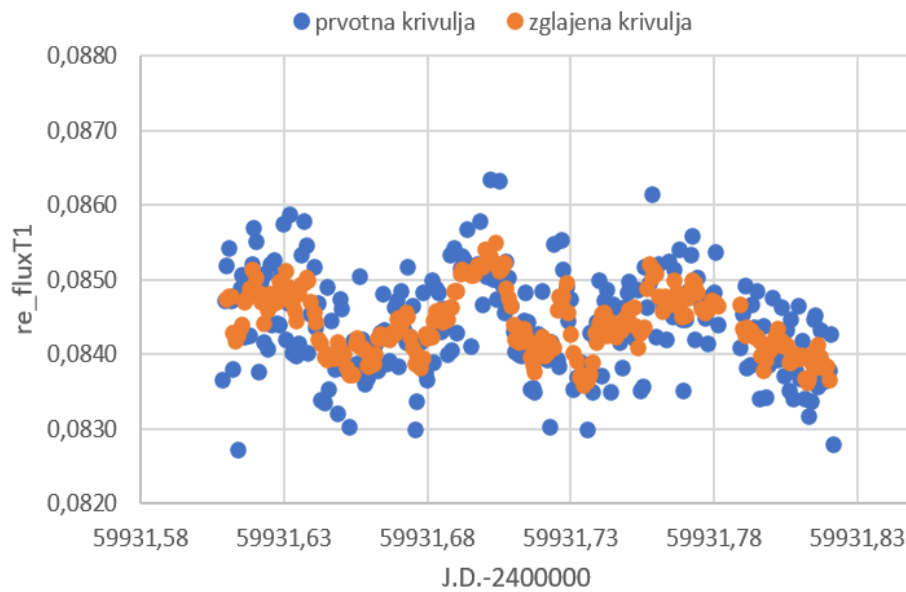
Slika 18: Svetlobna krivulja V1

## Svetlobna krivulja V3



Slika 19: Svetlobna krivulja V3

## Svetlobna krivulja V4



Slika 20: Svetlobna krivulja V4

V tabelah sta naju za vsako zvezdo zanimala predvsem čas in relativni navidezni sij. Da bi lažje izmerili periodo, sva najprej zgladili krivulje z uporabo gibajočega povprečja treh točk, kar sva naredili v za to pripravljenem programu.

Graf sva naredili zato, da sva iz njega lahko odčitali točke za izračun periode. Točke sva odčitali iz dveh vrhov v grafu in periodo izračunali kot razliko abscis točk.

Po izmerjenih periodah sva ocenili še napako meritve položaja vrha tako, da sva izračunali povprečno vrednost časa in od tega odšteli vrednost časa za našo izbrano točko na prvem vrhu in nato še na drugem vrhu. Tako sva dobili odstopanje od povprečne vrednosti na obeh vrhovih. Nato sva korenili vsoto kvadratov dobljenih napak vrhov in na ta način izračunali končno napako merjenja.

| IME ZVEZDE | PERIODA | NAPAKA        |
|------------|---------|---------------|
| KPC V1     | 3,43h   | 0,168h =10min |
| KPC V3     | 1,7h    | 0,168h =10min |
| KPC V4     | 1,7h    | 0,54h =32min  |

Tabela 1: Vrednosti period in njihovih napak



## 4. Rezultati in razprava

Sedaj sva lahko izmerili razdalje do kopice na tri načine: prek HR-diagrama, paralaks zvezd, ki jih je izmeril satelit Gaia, in s pomočjo zvezd Delta Ščita.

### 4.1. Razdalja iz HR diagrama

Tako sva imeli HR-diagram z zvezdami v najini kopici, s katerim sva računali po enačbi:

$$M = m - 5 \times \log_{10}(d) + 5,$$

kjer  $M$  predstavlja absolutno magnitudo,  $m$  predstavlja navidezno magnitudo (v našem primeru magnitudo  $G$ ) in  $d$  predstavlja razdaljo v parsekih. Na HR-diagramu sva poiskali referenčno točko, za katero poznavamo barvo in absolutno magnitudo. Za referenco sva si vzeli Sonce, ki ima izmerjene absolutne magnitude [12]:

$$M_B = 5,44$$

$$M_V = 4,81$$

Barva Sonca je torej  $B - V = 0,63$ . Filter  $V$  je podoben našemu filtru  $G$ , zato sva privzeli, da sta kar enaka.

Na najinem diagramu sva poiskali zvezde znotraj intervala  $0,58 < B - V < 0,68$  (vzeli sva samo zvezde, ki ležijo na glavni veji) ter pogledali njihove navidezne magnitude. V tem intervalu sva dobili 15 zvezd, s katerimi sva zatem izračunali razdaljo za vsako posebej in kot končni rezultat dobili povprečje vseh teh razdalji, kar je bilo:

$$3709 \text{ parsekov.}$$

Napako sva izračunali kot standardno deviacijo izračunanih razdalj od te vrednosti, kar je 277 parsekov.

### 4.2. Razdalja iz paralakse

Razdaljo s pomočjo paralakse pa sva izračunali kot:

$$d [\text{pc}] = 1/p [\text{arcsec}],$$

kjer  $d$  predstavlja razdaljo v parsekih,  $p$  pa paralakso v arcsec. Upoštevali sva, da so vrednosti paralakse v katalogu podane v mili kotnih sekundah. Kot  $p$  sva vzeli srednjo vrednost histograma in dobili rezultat:

2341 parsekov.

Tukaj sva tudi napako računali s pomočjo standardne deviacije in dobili rezultat 420.

### 4.3. Razdalja s pomočjo zvezd Delta Ščita

Najprej sva morali izračunati navidezne magnitudo, ki sva jih dobili iz instrumentalnih magnitud tako, da sva jim prišteli ZP zelenega filtra  $ZP(G) = 25,32$  mag. Nato sva od njih morali odšteti še ekstinkcijo (0.4 mag v filtru G) in tako sva dobili navidezne magnitudo. Potrebovali sva še absolutne magnitudo, ki sva jih dobili prek enačbe [13], ki opisuje povezavo med periodo P in izsevom periodičnih zvezd:

$$M = -2.94 \log P - 1.34$$

| IME ZVEZDE | INSTRUMENTALNA MAGNITUDA | NAVIDEZNA MAGNITUDA | ABSOLUTNA MAGNITUDA |
|------------|--------------------------|---------------------|---------------------|
| KPC V1     | $-11,658 \pm 0,01$       | $13,262 \pm 0,05$   | $1,14 \pm 0,07$     |
| KPC V3     | $-10,92 \pm 0,01$        | $14 \pm 0,05$       | $2,11 \pm 0,07$     |
| KPC V4     | $-11,59 \pm 0,01$        | $13,33 \pm 0,05$    | $2,02 \pm 0,07$     |

Tabela 2: Vrednosti magnitud in njihovih napak

Iz povezave med navidezno in absolutno magnitudo (referenca na enačbo, zapisane v teoretičnem delu) sva izrazili razdaljo  $d$  in jo izračunali do posamezne zvezde.

Potem sva morali določiti še napako pri merjenju razdalj s pomočjo naslednje enačbe:

$$\Delta d = \frac{d}{5} \cdot \ln 10 \cdot \Delta M$$

V njej je  $\Delta M$  napaka absolutne magnitudo. Kvadrat napake absolutne magnitudo je enak vsoti kvadratov napake navidezni magnitud, ki je 0,05 mag in napake absolutni magnitud iz relacije med periodo in izsevom, ki je enaka 0,07 mag. Tako dobimo, da je napaka absolutne magnitud za vse tri zvezde enaka 0.09 mag.

Tako sva dobili naslednje rezultate.

| IME ZVEZDE | RAZDALJA | NAPAKA |
|------------|----------|--------|
| KPC V1     | 2654,6pc | 110pc  |
| KPC V3     | 2387,8pc | 99pc   |
| KPC V4     | 1828pc   | 76pc   |

Tabela 3: Vrednosti razdalj in njihovih napak

## 4.4. Primerjava razdalj

Po koncu eksperimentalnega dela oziroma po izračunih sva dobili rezultate vrednosti razdalj vseh treh metod, ki sva jih združili v tabelo, da sva jih lahko primerjali med sabo.

| METODA             |        | RAZDALJA | NAPAKA |
|--------------------|--------|----------|--------|
| HR-diagram         |        | 3709pc   | 277pc  |
| Paralaksa          |        | 2341pc   | 420pc  |
| Zvezde Delta Ščita | KPC V1 | 2654,6pc | 110pc  |
|                    | KPC V3 | 2387,8pc | 99pc   |
|                    | KPC V4 | 1828pc   | 76pc   |

Tabela 4: Primerjava razdalj

Izračunane vrednosti se, kot je bilo pričakovano, med seboj razlikujejo. Ugotoviti sva morali, kaj povzroča razlike med meritvami. Vedeli sva, da na meritve vpliva veliko dejavnikov. Nekateri dejavniki predstavljajo prednosti, drugi pa pomanjkljivosti.

Največjo težavo predstavlja ekstinkcija. Različni zemljevidi ekstinkcije v smeri kopice Melotte 71 dajo različne vrednosti. Midve sva uporabili vrednosti 3D zemljevida [8], ki je bil ustvarjen pred kratkim. Če bi vzeli starejši 2D zemljevid [14], bi bila ekstinkcija dvakrat večja. V tem primeru bi bila razdalja, izmerjena s HR-diagramom, okoli 2800 pc, kar je bližje vrednosti, ki sva jo izmerili s pomočjo paralakse. Slednja ni odvisna od ekstinkcije in je zato najboljša metoda merjenja razdalje. Večja ekstinkcija bi sicer zmanjšala vrednosti razdalje, izmerjene s pomočjo zvezd Delta Ščita.

Pri merjenju razdalj z zvezdami tipa Delta Ščita moramo razumeti, da relacija med izsevom in periodo ni tako močna kot za klasične kefeide. V populaciji zvezd tipa Delta Ščita je prisotna kar precejšnja razsutost okoli relacije [13]. Ni torej presenetljivo, da tri zvezde dajo tako različne rezultate.

Filtri teleskopa GoChile se razlikujejo od klasičnih filtrov, s katerimi so bile izmerjene magnitude Sonca in zvezd v katalogih, s katerimi sva primerjali najine rezultate. Popravkov zaradi te razlike nisva upoštevali, a to ne bi smelo močno vlivati na rezultate.

Spoznali sva, da sva tudi s pomočjo zvezd Delta ščita KPC V1 in KPC V3 dobili podobno vrednost razdalje kot s paralakso in sklepali, da mora biti dejanska razdalja nekje vmes med temi vrednostmi ter da je tudi ta način določanja razdalje zanesljiv.

## 5. Zaključek

Razdaljo do kopice Melotte 71 sva merili na tri različne načine. Želeli sva ugotoviti zanesljivost HR-diagrama nasproti zanesljivosti merjenja prek paralakse in zvezd tipa Delta Ščita. Da bi to lahko raziskali, sva opravili več opazovanj na daljavo tako, da sva se prek računalnika povezali s slovenskim teleskopom v Čilu.

Najine slike sva najprej kalibrirali, potem pa ločeno naredili fotometrijo meglice ter fotometrijo zvezd tipa Delta Ščita. Pri računanju razdalje preko HR-diagrama so bile za nadaljnje delo ključne koordinate zvezd v kopici, ki sva jih združili s podatki teleskopa Gaia ter ob pomoči le teh izločili zvezde, ki niso spadale v najino kopico. To je bila prva težava. Brez podatkov satelita Gaia bi bilo zvezde, ki ne spadajo v najino kopico zelo težko izločiti. Končne podatke o paralaksi in končen HR-diagram sva nato uporabili za nadaljnje izračune oddaljenosti. Zvezdam tipa Delta Ščita pa sva naredili grafe spreminjanja sija ter iz njega pridobili potrebne podatke za dokončen izračun razdalje.

Ugotovili sva, da prek različnih metod dobiva nekoliko različne razdalje. Rezultati prek paralakse in spremenljivk so si med sabo zelo podobni, kar podpira zanesljivost teh dveh metod. Razdalja prek HR diagrama pa odstopa, kar bi lahko popravili z natančnejšimi podatki o ekstinkciji ter s podatki filtrov, ki so enaki filtrom najinega teleskopa.

Čeprav je merjenje preko HR-diagrama edina metoda za merjenje razdalj od objektov, ki so zelo blizu in vse do zelo oddaljenih drugih galaksij, je za njeno uporabo in natančnost potrebno zelo veliko podatkov. Ti podatki pa morajo biti natančni in izmerjeni s teleskopi, ki uporabljajo podobno opremo kot tisti, na katerih se pridobiva slike in kasneje podatke o kopici, saj lahko drugače rezultati zelo hitro odstopajo.

Najina naloga pokaže, kako težko je meriti razdalje do razsutih kopic. Predvsem se je izkazala nezanesljivost HR-diagrama oziroma odstopanje razdalje izračunane prek HR-diagrama od drugih metod. Tudi razdalja zvezde KPC V4 odstopa, a ne toliko kot razdalja prek HR-diagrama. Ti rezultati nam pokažejo, da je v najinem primeru najzanesljivejša razdalja izmerjena prek paralakse. Za oddaljene kopice, katerih zvezde pa nimajo izmerjenih paralaks satelita Gaia (ali pa imajo paralakse veliko napako), je pomembno, da razdaljo računamo na različne načine. Ko prek različnih metod dobimo podobne vrednosti, vemo, da smo izmerili pravo razdaljo.

V merjenje razdalj kopic bi dobili še boljši vpogled, če bi na podoben način analizirali več kopic različnih starosti na različnih razdaljah. Pri ekstinkciji bi lahko uporabili različne vrednosti in ugotovili, kateri viri so bolj zanesljivi za nadaljnje računanje. Dobro bi bilo tudi uporabiti druge metode merjenja, saj sva midve uporabili le tri, obstajajo pa še druge, ki bi lahko bile zanesljivejše. Zato bi bilo za natančnejše rezultate potrebno še veliko dela.

## 6. Viri in literautura

[1] Guštin A., Kambič B., Vesolje. Ljubljana: Mladinska knjiga – 2008

[2] Kaj Aa. Strand, parallax, 2023

<https://www.britannica.com/science/parallax>

[3] Spremenljive zvezde

<http://astro.sentvid.org/predavanja/spremenljivke.html>

[4] Course Hero, 2023, Hertzsprung Russell Diagram

<https://www.cliffsnotes.com/study-guides/astronomy/the-hertzsprung-russell-diagram/hertzsprung-russell-diagram-the-basics>

[5] <http://catserver.ing.iac.es/staralt/>

[6] Henden in drugi, 2016

<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2016yCat.2336....0H/abstract>

[7] Chambers in drugi, 2016

<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2016arXiv161205560C/abstract>

[8] Green in drugi, 2019, ApJ

<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2019ApJ...887...93G/abstract>

[9] Gaia Collaboration, 2022

<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2022arXiv220800211G/abstract>

[10] Kim in drugi, 1999, A&A

<https://articles.adsabs.harvard.edu/pdf/1999A%26A...348..795K>

[11] Collins in drugi, 2017, AJ

<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2017AJ....153...77C/abstract>

[12] C. N. A. Willmer, 2018, The Astrophysical Journal

<https://iopscience.iop.org/article/10.3847/1538-4365/aabfdf>

[13] Ziaali in drugi, 2019, MNRAS

<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2019MNRAS.486.4348Z/abstract>