



Srednja šola Slovenska Bistrica

Raziskovalna naloga

# Merjenje oddaljenosti kefeid tipa Delte Ščita

Raziskovalno področje: fizika in astronomija

Avtorja: Damjan Dovnik in Hana Brumec

Mentorja: mag. Marko Žigart in dr. Jure Japelj

Srednja šola Slovenska Bistrica, 2021/2022

## ZAHVALA

Iskreno se zahvaljujema najinima mentorjema, mag. Marku Žigartu in dr. Juretu Japlju, ki sta nama bila vedno na razpolago ob kakršnih koli nejasnostih, naju naučila rokovanja s teleskopom GoT1 ter skupaj z nama prebedela nekaj noči. Posebna zahvala gre tudi dr. Andreji Gomboc, ki nama je predstavila projekt GoChile. Prav tako se zahvaljujema tudi lektorici Vesni Sever, ki si je vzela čas za lektoriranje najine naloge.

## KAZALO VSEBINE

<b>1</b>	<b>UVOD.....</b>	<b>6</b>
<b>2</b>	<b>TEORETIČNI DEL .....</b>	<b>7</b>
2.1	O vesolju in zvezdah na splošno .....	7
2.1.1	Spektralni tipi zvezd .....	7
2.1.2	H-R diagram .....	8
2.2	Spremenljivke oziroma spremenljive zvezde .....	9
2.3	Keфеide.....	10
2.3.1	Odkritje povezave med periodo in izsevom keфеid.....	11
2.3.2	Spreminjanje sija keфеid .....	11
2.3.3	Keфеide tipa Delte Ščita .....	12
2.4	Izsev zvezde in gostota svetlobnega toka .....	13
2.5	Magnitude .....	13
2.5.1	Navidezna magnituda .....	13
2.5.2	Absolutna magnituda .....	13
<b>3</b>	<b>EKSPERIMENTALNI DEL.....</b>	<b>14</b>
3.1	Pripomočki in oprema .....	14
3.2	Izvedba eksperimentov .....	15
<b>4</b>	<b>REZULTATI IN RAZPRAVA.....</b>	<b>22</b>
<b>5</b>	<b>ZAKLJUČEK.....</b>	<b>29</b>
<b>6</b>	<b>VIRI IN LITERATURA.....</b>	<b>31</b>

## KAZALO SLIK

Slika 1: H-R diagram (prirejeno po <a href="https://www.schoolobservatory.org/learn/astro/stars/class/hrdiagram">https://www.schoolobservatory.org/learn/astro/stars/class/hrdiagram</a> ).....	8
Slika 2: Prikaz spremenljivk na H-R diagramu (prirejeno po <a href="https://universe-review.ca/f08-star08.htm">https://universe-review.ca/f08-star08.htm</a> ).....	10
Slika 3: Prikaz širjenja in krčenja ter spreminjanja barve in sija kefeide v odvisnosti od časa (prirejeno po <a href="http://abyss.uoregon.edu/~js/glossary/cepheid_variable.html">http://abyss.uoregon.edu/~js/glossary/cepheid_variable.html</a> ) .....	12
Slika 4: Teleskop GoT1 in njegova lokacija ( <a href="https://www.gochile.si/">https://www.gochile.si/</a> ) .....	14
Slika 5: Krmiljenje teleskopa GoT1 v programu Voyager .....	15
Slika 6: Posnetek kefeide V1162 Ori - negativ .....	16
Slika 7: Posnetek kefeide AG Pic - negativ .....	16
Slika 8: Posnetek kefeide TYC 5951-2804-1 - negativ .....	17
Slika 9: Posnetek kefeide ASAS J064635-1455.5 - negativ.....	17
Slika 10: Posnetek kefeide TYC 7636-1969-1 - negativ .....	17
Slika 11: Posnetek zaslona iz programa Astro Pixel Processor .....	19
Slika 12: Nastavitev območja branja svetlosti zvezde in svetlosti ozadja v programu AstrolmageJ .....	19
Slika 13: Graf radialne odvisnosti svetlosti .....	20
Slika 14: Izbira referenčnih zvezd v programu AstrolmageJ .....	21
Slika 15: Posnetek zaslona iz programa Logger Pro.....	21
Slika 16: Podatki o sinusni funkciji izpisani ob sinusoidi izrisani v programu Logger Pro .....	26

## KAZALO TABEL

Tabela 1: Spektralni tipi zvezd .....	7
Tabela 2: Opazovane kefeide, datumi opazovanj, koordinate in filtri.....	16
Tabela 3: Meritve, odčitane iz svetlobnih krivulj.....	26
Tabela 4: Ekstinkcija opazovanih kefeid.....	27
Tabela 5: Izračunane vrednosti.....	27

## KAZALO GRAFOV

Graf 1: Svetlobna krivulja kefeide V1162 Ori.....	24
Graf 2: Svetlobna krivulja kefeide AG Pic .....	24
Graf 3: Svetlobna krivulja kefeide TYC 5951-2804-1 .....	25
Graf 4: Svetlobna krivulja kefeide ASAS J064635-1455.5 .....	25
Graf 5: Svetlobna krivulja kefeide TYC 7636-1969-1 .....	26
Graf 6: Linearizacija povezave med periodo in pravo absolutno magnitudo kefeid.....	28

## POVZETEK

Za to raziskovalno nalogo sva se odločila, ker sva želela ugotoviti, kako lahko s pomočjo izmerjene periode in navideznega sija spremenljivih zvezd kefeid izmeriva njihovo oddaljenost od Zemlje ter s tem dokaževa, da obstaja povezava med njihovo periodo spreminjanja sija in izsevom oz. njihovim absolutnim sijem. Da bi dokazala to povezavo, sva s teleskopom posnela periode petih kefeid. Z računalniškim orodjem za fotometrijo sva iz posnetih fotografij pridobila potrebne podatke, za podrobnejšo določitev magnitud pa sva upoštevala tudi ekstinkcijo. Nato sva s pomočjo formule za izračun absolutnega sija kefeid preko njihove periode ter s pomočjo izmerjenega navideznega sija določila njihovo oddaljenost, ki se pri treh od petih kefeid od prave vrednosti, slednjo je preko paralakse izmeril satelit Gaia, razlikujejo za manj kot 10 %, pri eni izmed teh pa sva dobila celo identično razdaljo. S pomočjo dobljenih podatkov in linearizacije funkcije sva tako dokazala tudi samo povezavo med periodo in izsevom kefeid.

**Ključne besede:** kefeide, povezava med periodo in izsevom, merjenje oddaljenosti, magnituda

## ABSTRACT

We decided to do this research because we wanted to see how we could use the measured period and an apparent magnitude of variable Cepheid stars to measure their distance from Earth and thus prove that there is a connection between their period of changing brightness and their luminosity. To prove this connection, we used a telescope to record the periods of five Cepheids. Using some computer photometry tools, we extracted the necessary data from the images, and we also took extinction into account to determine the magnitudes in more detail. Then, using a formula to calculate the absolute brightness of the Cepheids over their periods and the measured apparent brightness, we determined their distances, which differs by less than 10% from three of the five Cepheid stars from the true value measured by the Gaia satellite via parallax, and for one of them we even obtained an identical distance. Using the data and the linearization of the function, we proved the relationship between the period and the Cepheid emission.

**Key words:** Cepheid star, distance measurement, period, luminosity, magnitude

## 1 UVOD

Ljudje so dolga tisočletja opazovali objekte na nebu in se spraševali, kako daleč sploh so te drobne lučke. Verjetno si njihove prave oddaljenosti ter razsežnosti prostora in časa okoli njih sploh niso znali predstavljati. Danes po zaslugi raznih metod merjenja oddaljenosti poznamo prave oddaljenosti teh lučk oz. zvezd. Tudi naju je zanimalo, kako lahko določimo razdaljo do nečesa, kar je tako zelo daleč. Slišala sva za zvezde, imenovane kefeide, ki naj bi periodično spreminjale svoj sij, njihova perioda spreminjanja sija pa naj bi bila povezana z njihovo maso in izsevom. Želela sva dokazati to zvezo in z njeno pomočjo tudi sama izmeriti oddaljenost kefeid. Tako se nama je porodila ideja, da bi lahko s pomočjo teleskopa izmerila periodo spremembe sija, preko nje izračunala izsev, hkrati pa bi izmerila, kako svetla je kefeida videti na Zemlji in na podlagi tega določiti njeno oddaljenost.

Glavni namen najine raziskovalne naloge je tako bil preveriti zanesljivost spremenljivih zvezd kefeid kot standardnih svetilnikov, uspešno izračunati njihovo oddaljenost ter dokazati povezavo med njihovo periodo spreminjanja sija in izsevom.

V teoretičnem delu bova podrobneje opisala spremenljive zvezde kefeide in njihov mehanizem širjenja in krčenja, hkrati pa bova predstavila tudi formule in zakonitosti, ki jih bova uporabila pri izračunih tekom raziskave.

V raziskovalnem delu bova predstavila potek najinega dela, med drugim delo s teleskopom, kalibracijo fotografij, fotometrijo s programom AstroImageJ ter izrisovanje grafov svetlobnih krivulj v programu Logger Pro.

V razdelku rezultatov in razprave bova predstavila računanje z napakami, analize grafov svetlobnih krivulj, pridobivanje podatkov iz njih, pa tudi sam izračun oddaljenosti kefeide s pomočjo teh podatkov. Dobljene podatke bova primerjala s pomočjo razdalje, ki jo je satelit Gaia izmeril preko druge metode merjenja oddaljenosti - paralakse.

V zaključku bova na kratko povzela bistvo raziskave, kaj sva odkrila, pokomentirala celotno delo ter predlagala izboljšave za nadaljnje delo.

## 2 TEORETIČNI DEL

### 2.1 O vesolju in zvezdah na splošno

Težko je opisati, kaj sploh je vesolje, vendar ga gotovo najbolje opiše znan citat Carla Sagana: »Vesolje je vse, kar je, je bilo ali kadarkoli bo.« Vesolje obsega ves prostor in čas ter vso snov in energijo v njem. Posledično vanj vključujemo tudi vse planete, galaksije, medgalaktični prostor in seveda tudi zvezde. V slednje sva se v najini raziskovalni nalogi tudi bolj poglobila.

Zvezda je sijoče nebesno telo, katere sij je posledica jedrske fuzije v njenem jedru. O lastnostih zvezd, na primer izsevu, temperaturi, velikosti in življenjskem ciklu, odloča predvsem njihova masa. Astronomi ocenjujejo, da je v vidnem Vesolju vsaj  $7 \cdot 10^{22}$  zvezd, od tega jih je le 300 milijard v naši galaksiji, Rimski cesti. Večina zvezd je starih med 1 milijardo in 10 milijardami let, mnoge od njih pa so še starejše. Njihova obseg in velikost se raztezata od majhnih nevronskih zvezd pa vse do nadorjakinj (na primer zvezda Betelgeza, ki je s premerom 617 milijonov kilometrov skoraj 1000-krat večja od Sonca). Zvezde se lahko gravitacijsko vežejo z drugimi zvezdami in tvorijo večzvezdja. Večje skupine zvezd imenujemo zvezdne kopice, ki jih delimo na dva tipa, in sicer na kroglaste in razsute. Zvezde se lahko vežejo tudi v galaksije, katere tipično sestavlja več kot 100 milijard zvezd (Dinwiddie idr., 2005).

#### 2.1.1 Spektralni tipi zvezd

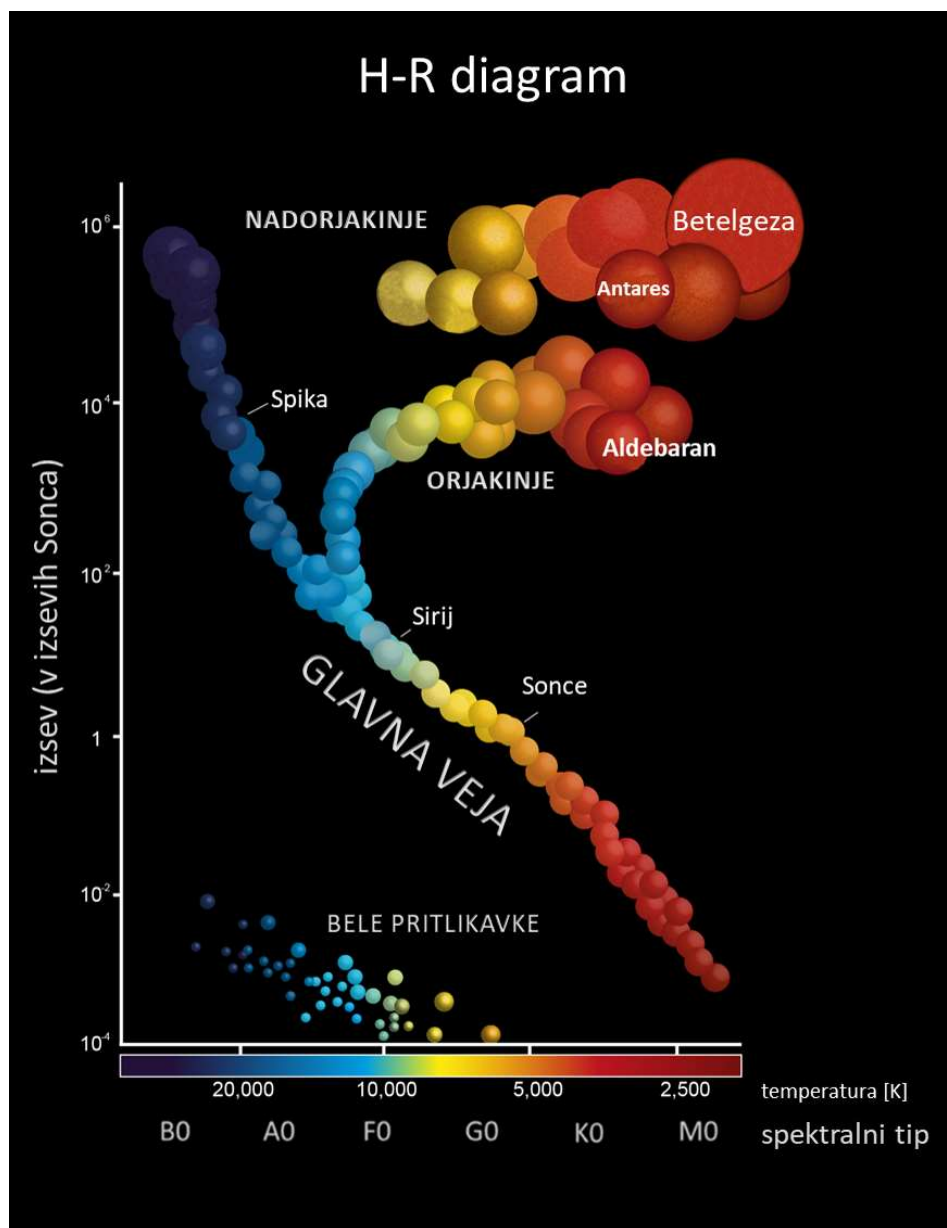
Zvezde razvrščamo na tipe na podlagi lastnosti njihovih spektrov. Če njihovo svetlobo razklonimo na spektre, so v njih vidne temne absorpcijske črte in svetle emisijske črte. Določeno zaporedje črt kaže, da je v fotosferi (zunanjem vidnem delu) zvezde določen element. Intenzivnost črt je odvisna prav od temperature fotosfere. V spektralni klasifikaciji je 7 glavnih spektralnih tipov, ki si sledijo od najbolj vročih zvezd tipa O, do najhladnejših, tipa M. Vsak izmed spektralnih tipov pa je razdeljen še na 10 podrazredov, ki jih označujemo s števili od 0 do 9 (Walker, 2017).

Tabela 1: Spektralni tipi zvezd

TIP	IZRAZITEJŠE SPEKTRALNE ČRTE	BARVA	POVRŠINSKA TEMPERATURA
O	He <sup>+</sup> , He, H, O <sup>2+</sup> , N <sup>2+</sup> , C <sup>2+</sup> , Si <sup>3+</sup>	modra	45 000 K
B	He, H, C <sup>+</sup> , O <sup>+</sup> , Fe <sup>2+</sup> , Mg <sup>2+</sup>	modro-bela	30 000 K
A	H, ionizirane kovine	bela	12 000 K
F	H, Ca <sup>+</sup> , Ti <sup>+</sup> , Fe <sup>+</sup>	rumeno-bela	8 000 K
G	Ca <sup>+</sup> , Fe, Ti, Mg, H	rumena	6 500 K
K	Ca <sup>+</sup> , H, nekatere molekule	oranžna	5 000 K
M	TiO, Ca, nekatere molekule	rdeča	3 500 K

### 2.1.2 H-R diagram

Med izsevom in temperaturo fotosfere zvezde je statistična povezava. Najbolje jo lahko ponazorimo s Hertzsprung-Russellovim (H-R) diagramom. Pri tem diagramu se na abscisni osi nahaja logaritem površinske temperature zvezde ali spektralni tip, na ordinatni osi pa logaritem izseva ali absolutna magnituda. Točke, ki na tem diagramu ustrezajo zvezdam, niso kaotično razporejene, temveč potekajo v vejah. Velika večina zvezd je razporejenih vzdolž veje, ki gre od leve zgoraj proti desni spodaj. To je glavna veja. V tej veji se s padajočo temperaturo zmanjšujeta tudi izsev in premer zvezd. Vzporedno z abscisno osjo so zgoraj razporejene tudi najsvetlejše zvezde (nadorjakinje), ki imajo vse približno enak izsev, vendar različno temperaturo. (Avsec in Prosen, 2006)



Slika 1: H-R diagram (prirejeno po <https://www.schoolsobservatory.org/learn/astro/stars/class/hrdiagram>)



## 2.2 Spremenljivke oziroma spremenljive zvezde

Spremenljivke so zvezde, ki spreminjajo svoj sij oziroma magnitudo. Zvezdni sij je namreč posledica jedrskih reakcij, katerih energijo vidimo kot svetlobo, ki niha oziroma »utripa« v različnih časovnih obdobjih (intervalih). Tako lahko spremenljivke naprej delimo glede na njihovo dolžino periode spreminjanja sija na:

- dolgo periodične (njihova perioda traja nad 50 dni),
- srednje periodične (njihova perioda traja od 25 do 50 dni),
- kratko periodične (njihova perioda traja od 1 do 25 dni) in
- ultrakratko periodične (njihova perioda traja manj kot 1 dan).

Seveda pa obstaja še veliko drugih kriterijev delitve spremenljivk. Meniva, da spodnja uvrstitev spremenljivk, ki je sicer nekoliko starejša, poda veliko več informacij za opazovalca. Spremenljivke so pri tej uvrstitvi razporejene glede na to, ali vzrok za spreminjanje sija tiči v sami zvezdi, ali pa ta spreminja sij zaradi zunanjih pogojev, ki nekoliko ovirajo (»senčijo«) njeno svetlobo na poti do Zemlje. Nadalje spremenljivke delimo na periodične in neperiodične, znotraj njih pa še na skupine in podskupine, poimenovane po značilnih predstavnicah.

Spodaj je prikazana razvrstitev tipov spremenljivk z nekaterimi skupinami, samih skupin pa je seveda še veliko več (»Society for Popular Astronomy«, 2022).

### a) EKSTRINZIČNE:

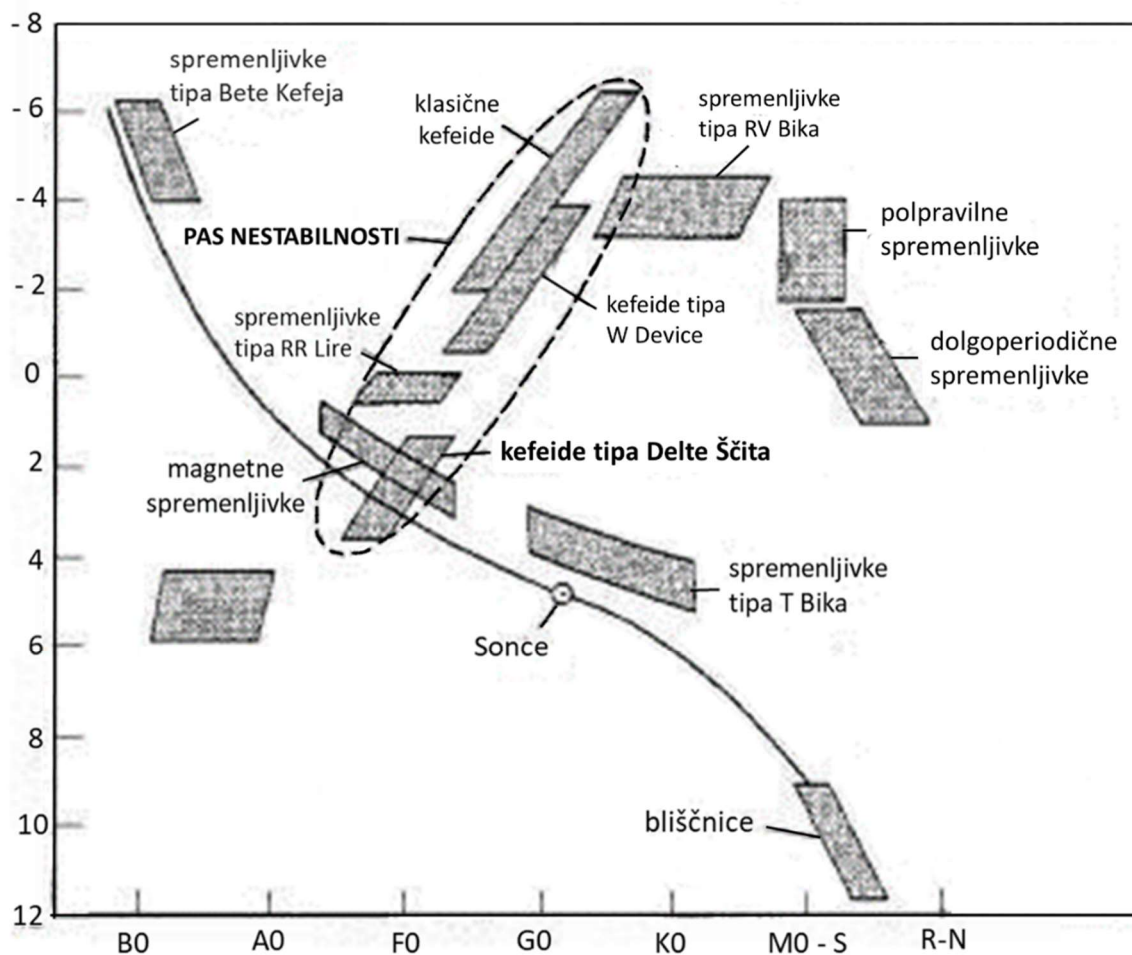
- prekrivalna dvozvezdja (tip Algola)
- vrteče spremenljivke (BY Zmaja)

### b) INTRINZIČNE:

- neperiodične:
  - nove
  - supernove
  - R Severne krone (Oblaki ogljika zatemnijo zvezdo, dokler jih ta ne odpihne stran.)
  - bliščnice (tip UV Kita - majhne zvezde glavne veje)
  - spremenljivke tipa T Bika (mlade zvezde pred fazo glavne veje)
- periodične:
  - kefeide
  - spremenljivke tipa RR Lire (Mehanizem je isti kot pri kefeidah.)
  - spremenljivke tipa Mire (rdeče orjakinje proti koncu življenjske dobe)

### 2.3 Kefeide

Kefeidne spremenljivke oziroma kefeide so rumene nadorjakinje v pozni stopnji razvoja. So zelo nestabilne zvezde, ki se periodično širijo in krčijo. Imenujejo se po zvezdi Alfredif (Delti Kefeja), katere spremenljivost je leta 1784 odkril John Goodricke. Poznamo več vrst kefeid, vsem pa je skupno to, da se na H-R diagramu nahajajo v pasu, ki se imenuje pas nestabilnosti. Slednji je na Sliki 2 prikazan s črtkano elipso. Gre za ene najpomembnejših vrst zvezd v vesolju, saj sta njihova perioda spremembe sija in izsev medsebojno povezana, kar pomeni, da jih lahko uporabimo kot standardne svetilnike za določevanje razdalj po vesolju (standardni svetilniki so objekti v vesolju, ki imajo znan izsev oz. ga lahko posredno ugotovimo ter s primerjavo izseva in gostote svetlobnega toka na Zemlji določimo njegovo oddaljenost), tako perioda kot izsev pa sta neposredno povezana z njihovo maso. Ta zveza med periodo in izsevom je astronomom dala možnost za merjenje večjih razdalj v vesolju. Kefeide so nam tako dale več pomembnih informacij o vesolju kot katerekoli druge vrste zvezd (Percy, 2007).



Slika 2: Prikaz spremenljivk na H-R diagramu (prirejeno po <https://universe-review.ca/F08-star08.htm>)

Keфеidne spremenljivke delimo na več tipov:

- spremenljivke tipa Delte Keфеja (klasične keфеide)
- spremenljivke tipa W Device (keфеide tipa II)
- spremenljivke tipa BL Herkula (keфеide tipa II)
- spremenljivke tipa RV Bika (keфеide tipa II)
- spremenljivke tipa Delte Ščita (pritlikave keфеide)

### 2.3.1 Odkritje povezave med periodo in izsevom keфеid

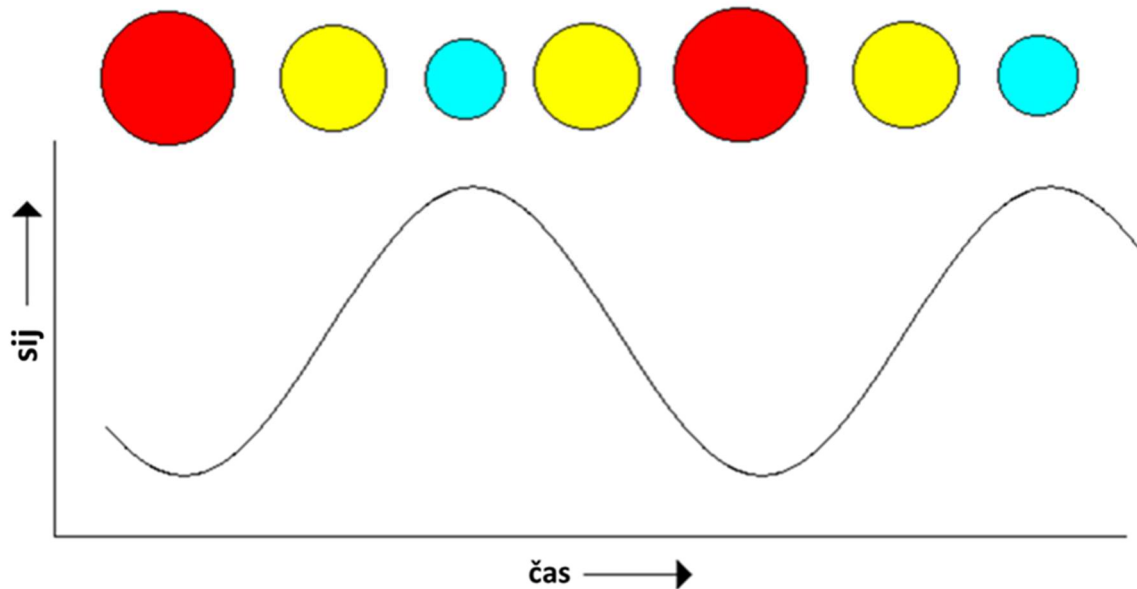
Oseba, ki je odkrila povezavo med periodo in izsevom keфеid, je bila ameriška astronomka Henrietta Swan Leavitt. Povezavo je odkrila leta 1921 pri preučevanju zvezd v Magellanovih oblakih. Primerjala je nekaj sto fotografij Magellanovih oblakov, na katerih je odkrila več tisoč spremenljivk, med njimi pa so bile seveda tudi keфеide. Ugotovila je, da te kažejo nekakšen vzorec periode spreminjanja sija. To periodo je natančno določila skupaj z navideznim povprečnim sijem teh spremenljivk. Tako je odkrila zakon, po katerem je absolutni sij ter velikost keфеid in s tem njihov navidezni sij na Zemlji, odvisen od periode spremembe jakosti njihovega sija. Na ta način lahko še danes določamo oddaljenosti posameznih keфеid, posledično pa tudi zvezdnih kopic, meglic in celo galaksij v primeru, da se v njih nahajajo keфеide. Leta 1923 je Edwin Hubble prav s pomočjo te zveze dokazal, da Andromedina galaksija ni del naše galaksije Rimske ceste («The Harvard Gazette», 2018).

### 2.3.2 Spreminjanje sija keфеid

Čeprav poznamo več vrst keфеid, je njihov mehanizem pulziranja v grobem enak, prav tako pa enak mehanizem najdemo tudi pri spremenljivkah tipa RR Lire.

Kljub temu, da se keфеidam med procesom širjenja in krčenja spreminja sij, se v tem procesu pravzaprav bolj kot izsev spreminja količina svetlobe, ki se prebije do površja zvezde. Ključno vlogo v tem procesu ima obnašanje ioniziranega helija. Enkrat ioniziran helij (helij brez enega elektrona) namreč prepušča več svetlobe kot dvakrat ioniziran helij (helij brez obeh elektronov oz. helijeva plazma). To pomeni, da bo bolj zgoščena in vroča plazma helija manj prepustna za svetlobo kot hladnejša, saj vsebuje več dvakrat ioniziranega helija. Tako se veliko svetlobe absorbira v plazmi, kar še dodatno povečuje njeno temperaturo in tlak. Zaradi tega se majhne motnje v velikosti zvezde ojačijo. Če se zunanje plasti malo skrčijo, se bodo močno segrele in povečani tlak jih bo odpihnil navzven. Pri razširjanju se zunanja plast ohladi in tlak pade (elektroni se vežejo na helijeve atome in pri tem še dodatno sevajo svetlobo). Zaradi spremembe temperature se keфеidi spremeni tudi barva, posledično pa se ji spremeni tudi spektralni tip. Ker se plast razširja, se ta ne bo ustavila v ravnovesju, kjer tlak ravno uravnoveša gravitacijsko silo, temveč se bo širila naprej. Tako se bodo plasti ustavile šele takrat, ko bo gravitacijska sila močno presegala tlak plazme in zvezda se bo zaradi tega začela krčiti, kar bo

povzročilo močno segrevanje plasti. Zaradi tega pride do nihanja velikosti zvezde. Nihanje pa bi se zaradi energijskih izgub počasi ustavilo. Seveda bi mnogi pomislili na energijske izgube, ki bi celoten proces počasi ustavile, ampak do tega ne pride, saj plast v najbolj skrčeni fazi zaradi povečane absorpcije svetlobe iz notranjosti zvezde dobi dodaten potisk navzven, kar pomeni, da se nihanje v velikosti zvezde ne ustavi, temveč stabilizira (Percy, 2007).



Slika 3: Prikaz širjenja in krčenja ter spreminjanja barve in sija kefeide v odvisnosti od časa (prirejeno po [http://abyss.uoregon.edu/~js/glossary/cepheid\\_variable.html](http://abyss.uoregon.edu/~js/glossary/cepheid_variable.html))

### 2.3.3 Kefeide tipa Delte Ščita

Vse kefeide, ki sva jih opazovala, so bile tipa Delte Ščita. Kefeide tega tipa so pulzirajoče spremenljivke spektralnega tipa A in F, s kratkimi periodami in na splošno majhnimi amplitudami. So najštevilčnejše pulzirajoče spremenljivke med svetlimi zvezdami. Njihove periode običajno znašajo od 0,02 do 0,3 dneva. Ležijo v spodnjem podaljšku nestabilnega pasu Kefeid, ki prečka gosto poseljeno glavno vejo (Percy, 2007).

Zvezo med absolutno vizualno magnitudo ( $M_v$ ) in periodo ( $P$ ) kefeid tipa Delte Ščita opisuje Enačba 1 (Ziaali idr., 2019):

$$M_v = (-2.94 \pm 0.06) \cdot \log \frac{P}{1 \text{ dan}} - (1.34 \pm 0.06) \quad (1)$$

## 2.4 Izsev zvezde in gostota svetlobnega toka

Izsev zvezde je oddana oziroma izsevana svetloba ali svetlobna moč zvezde. Ta nam pove, koliko svetlobe oziroma energije zvezda izseva (odda) v sekundi. Označimo ga s črko  $P$  ali  $L$ , njegova enota pa je enota za moč vat ( $W = J \cdot s^{-1}$ ).

Gostota svetlobnega toka ( $j$ ) je povezana z izsevom zvezde in oddaljenosti od le-te. Pomeni, koliko energije pade na neko površino v določenem času. Izračunamo jo tako, da moč, ki prihaja z zvezde, delimo s površino, na katero se ta razporedi. Ker je površina, na katero se moč porazdeli, sferična, jo obravnavamo kot površino krogle. Tako lahko gostoto svetlobnega toka na določeni razdalji od zvezde izračunamo po formuli  $j = L \cdot S^{-1} = L \cdot (4\pi r^2)^{-1}$ . Njena enota je tako vat na kvadratni meter (Avsec in Prosen, 2006).

## 2.5 Magnitude

### 2.5.1 Navidezna magnituda

Navidezna magnituda oziroma navidezni sij ( $m$ ) nebesnega telesa je povezan z gostoto energijskega toka ( $i$ ), ki prihaja z nebesnega telesa na Zemljo. Astronomi v starem veku so razporedili vse zvezde, vidne s prostim očesom po siju v 6 razredov tako, da so imele najsvetlejše zvezde magnitudo 1, tiste komaj vidne pa 6. Ta razdelitev je bila le ocena sija zvezd. Kasneje so astronomi z meritvami gostot svetlobnih tokov zvezd ugotovili, da nebesna telesa prve magnitude pošiljajo na Zemljo približno 100 krat več svetlobe kot zvezde šeste magnitude oziroma imajo 100 krat večjo gostoto svetlobnega toka. Da bi stara razdelitev zvezd po siju ostala v uporabi, so morali magnitude zvezd drugače definirati. Tako sta sija oziroma magnitudi dveh zvezd  $m_1$  in  $m_2$  ter gostoti svetlobnega toka  $j_1$  in  $j_2$ , ki ga ti dve zvezdi pošiljata na Zemljo, opisani z enačbo 2 (Avsec in Prosen, 2006).

$$m_1 - m_2 = -2,5 \cdot \log \frac{j_1}{j_2} \quad (2)$$

### 2.5.2 Absolutna magnituda

Absolutna magnituda oziroma absolutni sij ( $M$ ) nekega nebesnega telesa je definiran kot navidezna magnituda tega nebesnega telesa, gledanega z razdalje 10 parsekov. Parsek (pc) je razdalja, s katere vidimo 1 astronomsko enoto (a. e.) oziroma povprečno razdaljo med Zemljo in Soncem (ki je približno  $1,50 \cdot 10^8$  km) pod kotom ene ločne sekunde (") in tako parsek znaša okoli  $3,09 \cdot 10^{13}$  km oziroma 3,26 svetlobnih let. S pomočjo absolutne magnitude imamo vpogled v dejanski sij teles in jih lahko tako primerjamo med seboj po dejanski svetlosti oziroma izsevu (Avsec in Prosen, 2006). Formulo za izračun absolutne magnitude preko navidezne magnitude prikazuje Enačba 3, kjer je  $M$  absolutna magnituda,  $m$  navidezna magnituda,  $d$  pa oddaljenost nebesnega telesa v parsekih.

$$M = m - 5 \cdot \log \frac{d}{1 \text{ pc}} + 5 \quad (3)$$

### 3 EKSPERIMENTALNI DEL

#### 3.1 Pripomočki in oprema

Velik del najine raziskovalne naloge so predstavljala opazovanja. Pri opazovanju oziroma fotografiranju kefeid sva uporabila reflektor GoT1 tipa Ritchey-Chrétien. Na teleskop je nameščena dovršena ekvatorialna montaža ONE50, premer njegovega objektiva pa znaša 400 mm, kar omogoča podrobno raziskovanje galaksij, meglic, zvezdnih kopic in seveda samih zvezd. Na teleskop je pritrjena CMOS kamera ASI6200MM Pro.

Teleskop se nahaja v Čilu, na jugu puščave Atacama na  $30^{\circ} 27'$  južne geografske širine ter  $70^{\circ} 45'$  zahodne geografske dolžine na nadmorski višini 1560 metrov, v kraju z morda najboljšimi opazovalnimi razmerami na svetu, kjer stojijo tudi veliki svetovni observatoriji. Observatorij in vsa opazovalna oprema so popolnoma avtomatizirani in omogočajo enostavno upravljanje iz Slovenije. Uporabljala sva ga kot del projekta GoChile. To je izobraževalni, nekomercialni projekt, ki ga vodita Univerza v Novi Gorici in astronomska revija Spika, sam projekt pa omogoča uporabo omenjenega teleskopa tako profesionalnim kot amaterskim astronomom.

Pri opazovanju s teleskopom GoT1 sva imela na razpolago tudi več vrst filtrov. Filtri so namenjeni izboljšanju slike v teleskopu ter opazovanju v določenem delu spektra svetlobe. To so steklene ploščice, ki jih pritrdimo na okular oziroma pred kamero. Narejeni so tako, da prepuščajo samo določene barve, zaradi česar je z njimi mogoče zmanjšati vplive svetlobnega onesnaženja ter poudariti kontrast in specifične barve.



Slika 4: Teleskop GoT1 in njegova lokacija (<https://www.gochile.si/>)

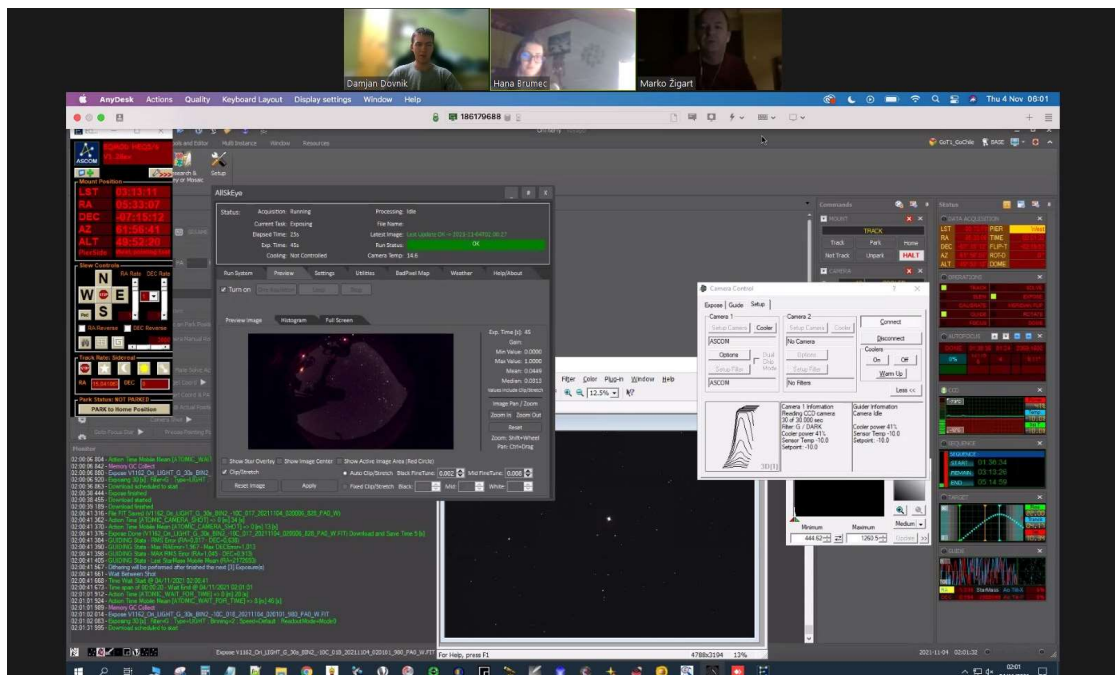


Pri raziskavi sva si pomagala z različnimi računalniškimi programi. Poleg programa Voyager za vodenje teleskopa sva potrebovala še program Astro Pixel Processor za kalibracijo fotografij, AstroImageJ za analizo fotografij, Microsoft Excel, v katerem sva odprla dobljene podatke ter Logger Pro, v katerem sva podatke obdelala.

### 3.2 Izvedba eksperimentov

Za začetek najine raziskave sva najprej morala sestaviti seznam kefeid, ki sva jih opazovala. Za ta namen sva uporabila spletni katalog Vizier (<http://vizier.u-strasbg.fr/>), kamor sva vnesla okvirne podatke o zvezdah, ki sva jih želela opazovati. Katalog pa nama je ponudil več kefeid, med katerimi sva izbrala tiste, ki so se v času opazovanja nahajale na nebu v Čilu in ki imajo dovolj veliko amplitudo, da jo zaznava, ter dovolj kratko periodo, da jo posnameva v eni noči. Ko sva sestavila seznam možnih kefeid za opazovanje, sva izbrala 5 najprimernejših in se lotila opazovanja. Teleskop sva uporabljala tako, da sva se preko aplikacije AnyDesk povezala z računalnikom v Čilu, s katerim sva upravljala s teleskopom. S pomočjo raznih programov, kamor sva vnesla podatke za filter, kamero ter nebesne koordinate, sva nastavila sekvenco opazovanja. Samo opazovanje je bilo v nadaljevanju popolnoma avtomatizirano.

Vse kefeide sva posnela s teleskopom GoT1 na ekvatorialni montaži s kamero ASI6200MM Pro v primarnem gorišču. Ekspozicije posnetkov so bile 30 sekund. Vse kefeide razen AG Pic sva snemala v G (zelenem) filtru, za le-to pa sva zaradi polne Lune in njene svetlosti morala uporabiti R (rdeč) filter, saj Luna odbija izredno malo svetlobe v rdečem delu spektra.

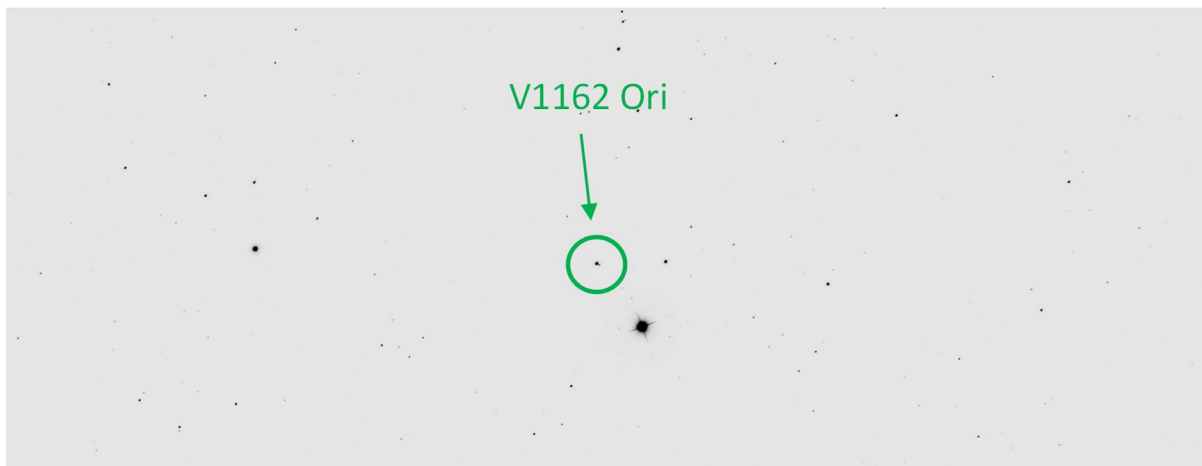


Slika 5: Krmiljenje teleskopa GoT1 v programu Voyager

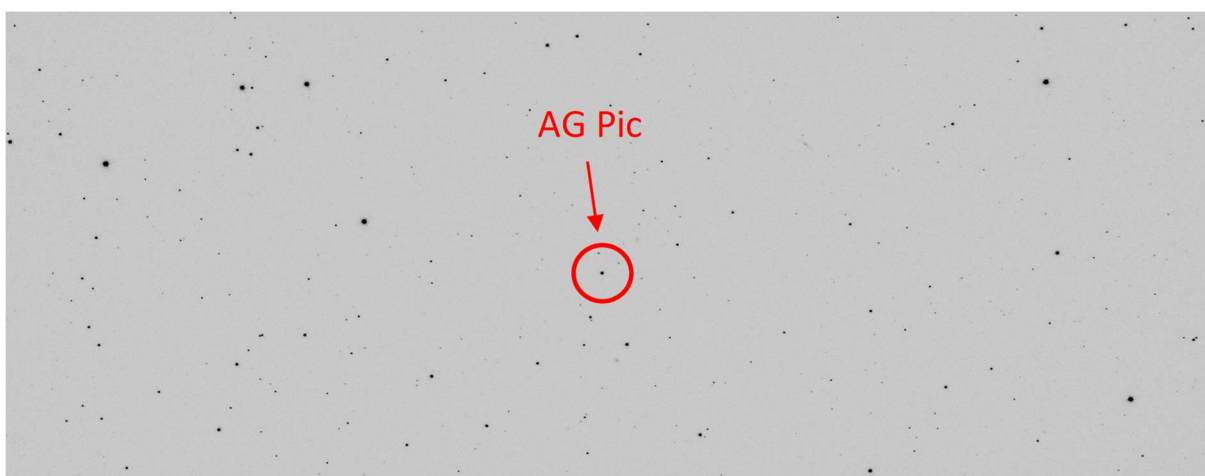
V Tabeli 2 so navedene vse kefeide, ki sva jih opazovala. Ob vsaki kefeidi je naveden datum opazovanja, njihove nebesne koordinate (rektascenzija (RA) in deklinacija (Dec)) ter filter, v katerem so bile opazovane.

Tabela 2: Opazovane kefeide, datumi opazovanj, koordinate in filtri

<b>Kefeida:</b>	<b>Datum</b>	<b>RA (J2000)</b>	<b>Dec (J2000)</b>	<b>Filter</b>
V1162 Ori	4. 11. 2021	5 h 32 min 1,99 s	-7 ° 15 ' 24,66 "	G
AG Pic	22. 12. 2021	5 h 35 min 12,10 s	-58 ° 01 ' 8,46 "	R
TYC 5951-2804-1	8. 1. 2022	6 h 24 min 42,86 s	-18 ° 16 ' 42,92 "	G
ASAS J064635-1455.5	11. 1. 2022	6 h 46 min 35,06 s	-14 ° 55 ' 28,35 "	G
TYC 7636-1969-1	11. 1. 2022	6 h 59 min 54,83 s	-42 ° 01 ' 15,12 "	G

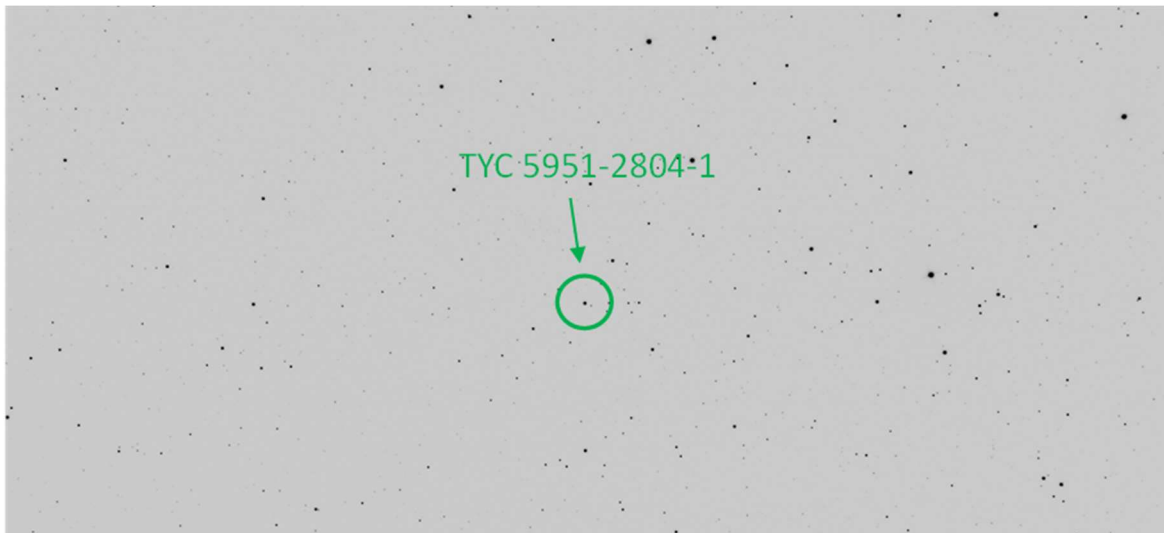


Slika 6: Posnetek kefeide V1162 Ori – negativ

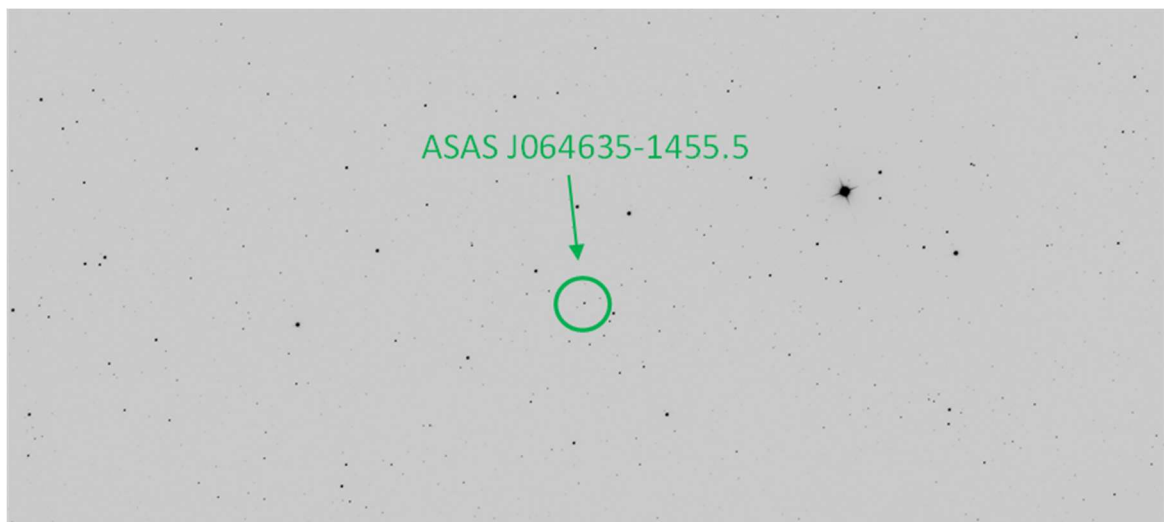


Slika 7: Posnetek kefeide AG Pic – negativ

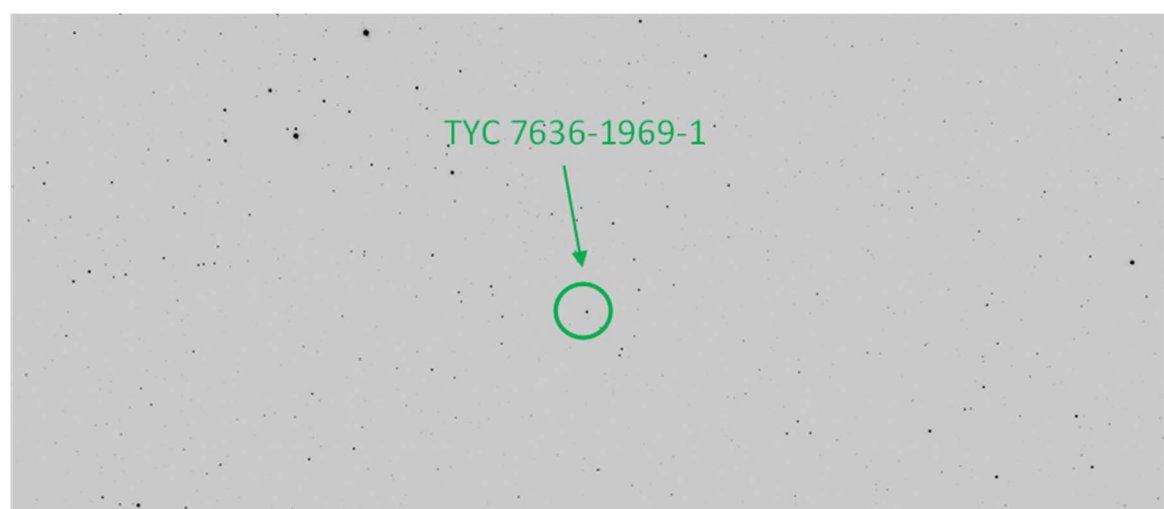




Slika 8: Posnetek kefeide TYC 5951-2804-1 – negativ



Slika 9: Posnetek kefeide ASAS J064635-1455.5 – negativ



Slika 10: Posnetek kefeide TYC 7636-1969-1 – negativ

Dobljene fotografije kefeid je bilo najprej potrebno skalibrirati. Kalibracija fotografij je v bistvu povečanje razmerja med prejetim signalom in šumom, ki ga prejme teleskop oziroma kamera. Ker sva pri fotografiranju kefeid uporabljala relativno dolge ekspozicije, se je zaradi tega povečal tudi šum. Da bi lahko s fotografij kefeid v nadaljevanju raziskave pridobila čim bolj natančne podatke, sva morala z njih odstraniti šum. To sva storila s pomočjo kalibracijskih fotografij, posnetih s teleskopom. Uporabila sva tri tipe kalibracijskih fotografij oz. posnetkov.

#### **Fotografije temnega polja (dark frames)**

S to vrsto kalibracijskih fotografij sva odpravila šum, ki je nastal zaradi občutljivosti CMOS kamere. CMOS kamera deluje na podlagi prehajanja atomov v vzbujeno stanje s pomočjo absorbiranih fotonov. Čeprav je bila kamera ohlajena na  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ , je bila ta temperatura še vedno nad absolutno ničlo in so atomi lahko v vzbujeno stanje prešli tudi sami od sebe. Za odpravo te napake sva uporabila posnetek temnega polja, ki je nastal na ta način, da se je ob fotografiranju kalibracijskih fotografij uporabil filter, ki ne prepušča nobene svetlobe. Ekspozicija je morala biti tako dolga kot pri fotografiranju zvezd (v najinem primeru 30 s).

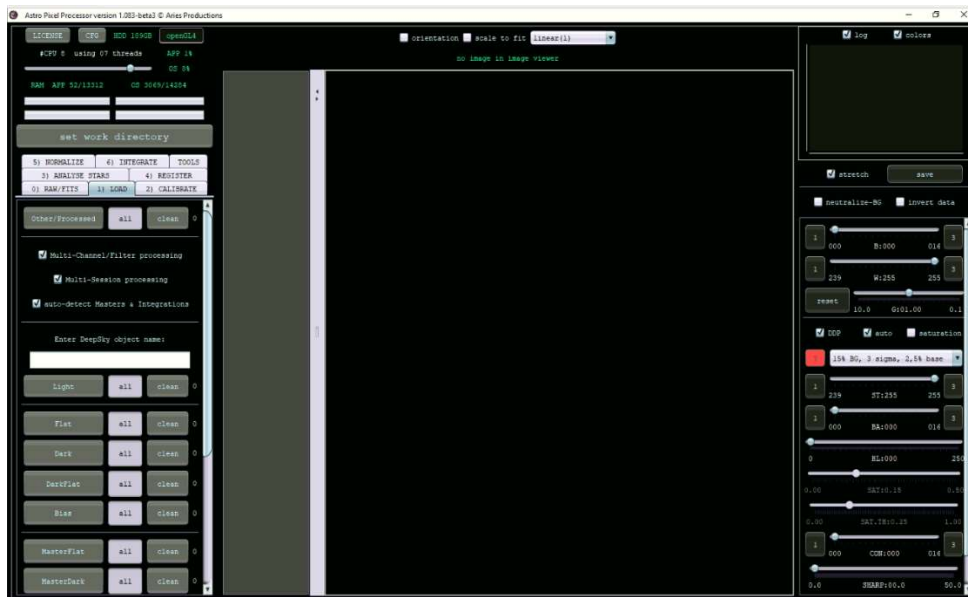
#### **Fotografije pristranskega polja (bias frames)**

S pomočjo teh kalibracijskih fotografij sva odpravila šum, ki ga ustvarja kamera. Ko električni tok teče skozi senzor za snemanje fotografij, se zaradi njega ustvari določena količina šuma. Za odpravo te vrste šuma se uporablja fotografija pristranskega polja. Ta kalibracijska fotografija je bila posneta pod enakimi pogoji kot fotografija temnega polja, vendar je bila zanjo uporabljena minimalna ekspozicija (okoli 0,05 s).

#### **Fotografije ravnega polja (flat frames)**

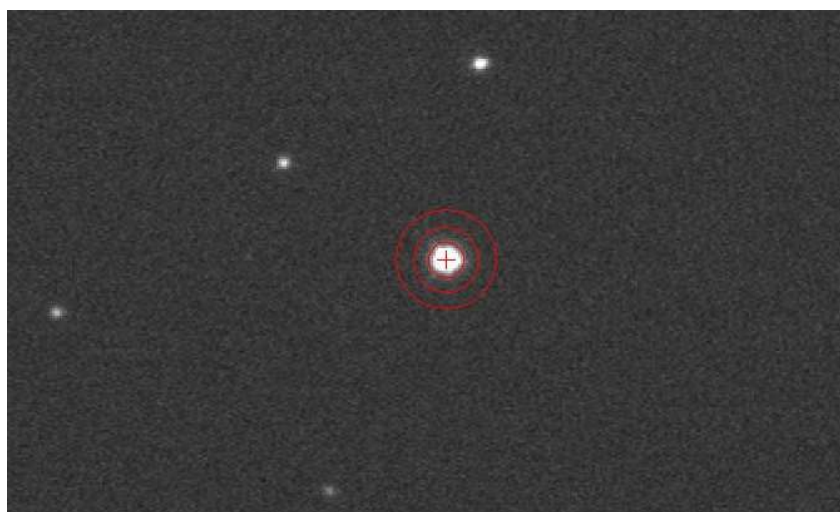
S pomočjo te vrste kalibracijskih fotografij sva odpravila šum, ki je nastal zaradi delcev prahu oziroma umazanije, ki se je nahajala na kameri, čeprav v zelo malih količinah. Za odpravo te napake je moral biti kalibracijski posnetek narejen takrat, ko je bilo nebo enakomerno osvetljeno (zjutraj ali zvečer).

Šum sva s fotografij odpravila na ta način, da sva vse posnetke kefeid naložila v program Astro Pixel Processor, kamor sva vnesla tudi 15 kalibracijskih posnetkov vsakega tipa in na podlagi le-teh, nama je program odpravil šum s fotografij.

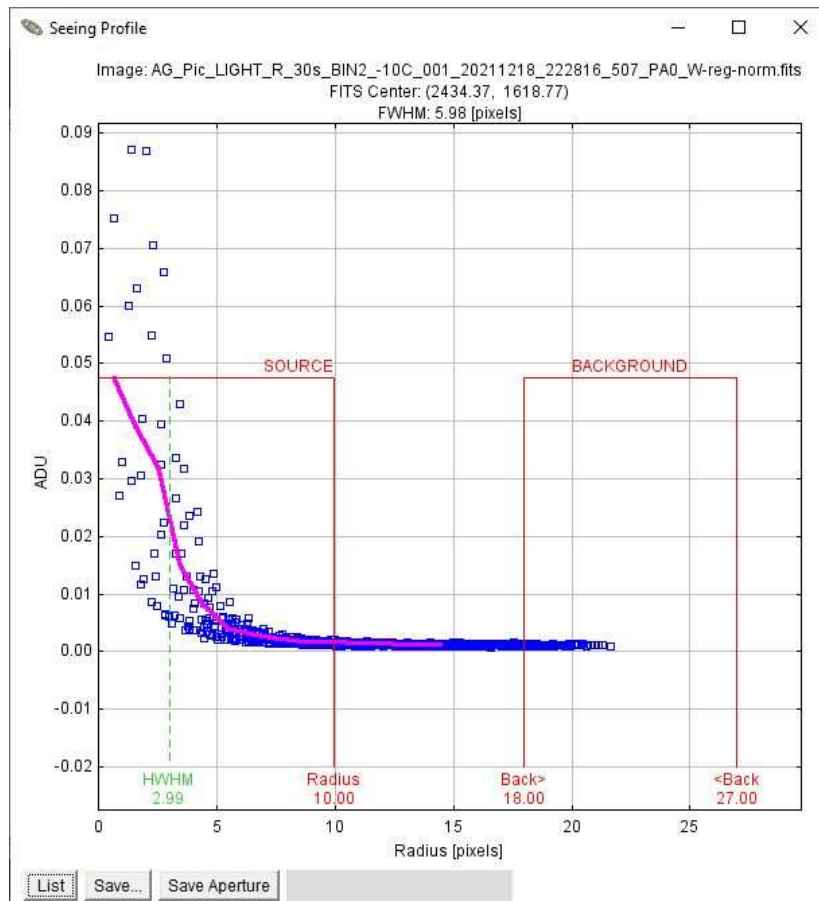


Slika 11: Posnetek zaslona iz programa Astro Pixel Processor

S skalibriranih slik sva nato izbrala minimalno 5 referenčnih zvezd, torej zvezd, katerih navidezno magnitudo sva poznala in katerim se navidezna magnituda ni spreminjala. Referenčne zvezde sva poiskala tako, da sva program AstrolmageJ, s katerim sva analizirala najine posnetke, povezala s spletno stranjo Nova Astrometry.net in sva na ta način dobila nebesne koordinate (deklinacijo in rektascenzijo) referenčnih zvezd, ki sva jih izbrala. Nato sva preko nebesnih koordinat poiskala podatke za navidezno magnitudo referenčnih zvezd v posameznem filtru v spletnem katalogu Simbad (<http://simbad.u-strasbg.fr/simbad/>). Ko sva izbrala referenčne zvezde, sva se lotila pridobivanja podatkov. V program AstrolmageJ sva najprej uvozila sekvenco posnetkov in odprla prvi posnetek iz sekvence. Na tem posnetku sva najprej pridobila in shranila graf radialne odvisnosti svetlosti zvezde (to je služilo za nastavitvev območij, kjer se je brala svetlost zvezde (radius) ter svetlost ozadja (annulus).

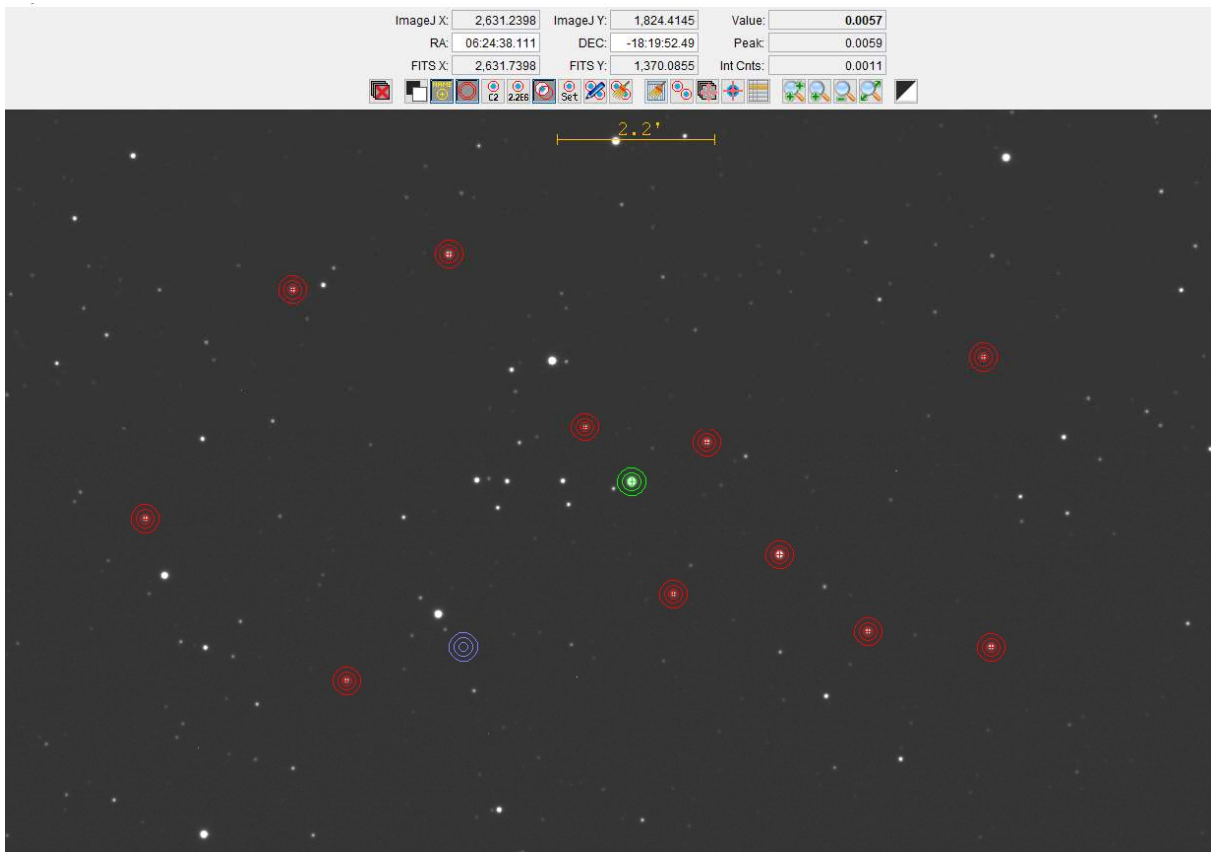


Slika 12: Nastavitev območja branja svetlosti zvezde in svetlosti ozadja v programu AstrolmageJ

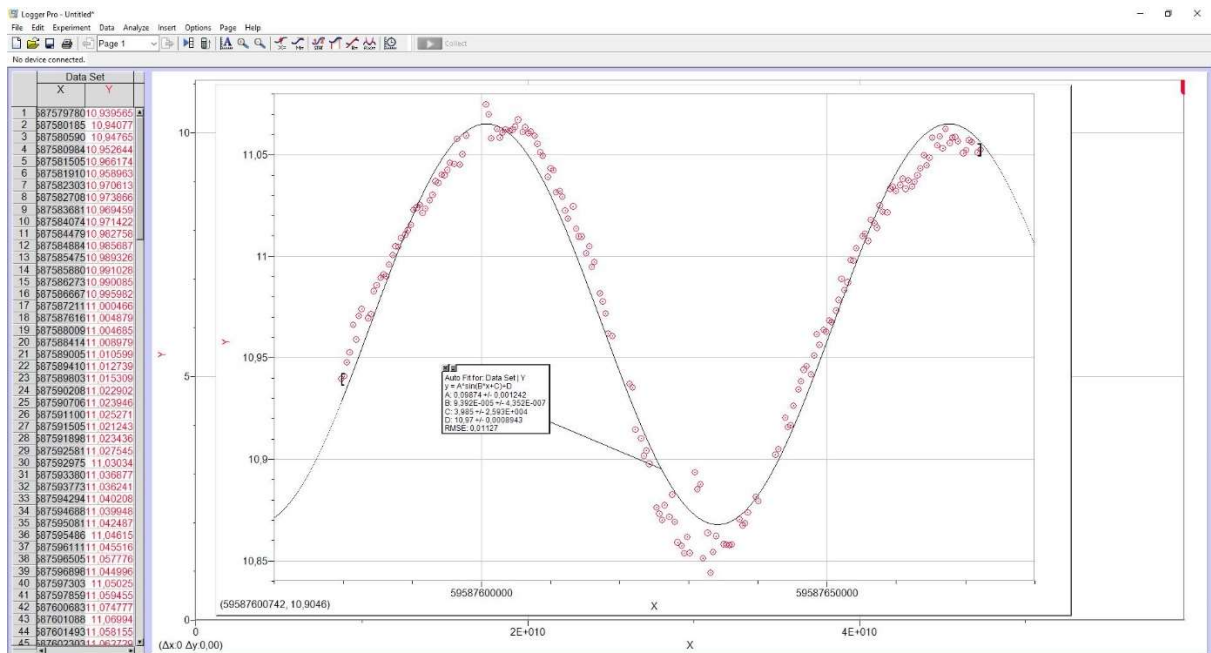


Slika 13: Graf radialne odvisnosti svetlosti

Nato sva v prej omenjenem programu uporabila funkcijo z imenom »perform multi-aperture photometry«. S pomočjo te funkcije sva izbrala zvezdo, kateri naj program izmeri spremembo sija (kefeido) ter zvezde, glede na katere naj to spremembo sija izmeri (referenčne zvezde). Zanje sva vnesla podatke o njihovih navidezni magnitudah. S pomočjo programa AstrolmageJ sva tako dobila podatke o periodi in spreminjanju navidezne magnitudo za vse najine kefeide. Te podatke sva tako najprej odprla v Microsoft Exelu in jih prenesla v program Logger Pro, ki je na podlagi meritev izrisal svetlobne krivulje vseh kefeid (navidezno magnitudo, v odvisnosti od časa). Na abscisno os grafov sva nanese čas nastanka fotografij po julijanskem datumu v sekundah, na ordinatno os pa navidezno magnitudo.



Slika 14: Izbira referenčnih zvezd v programu Astrolmage



Slika 15: Posnetek zaslona programa Logger Pro

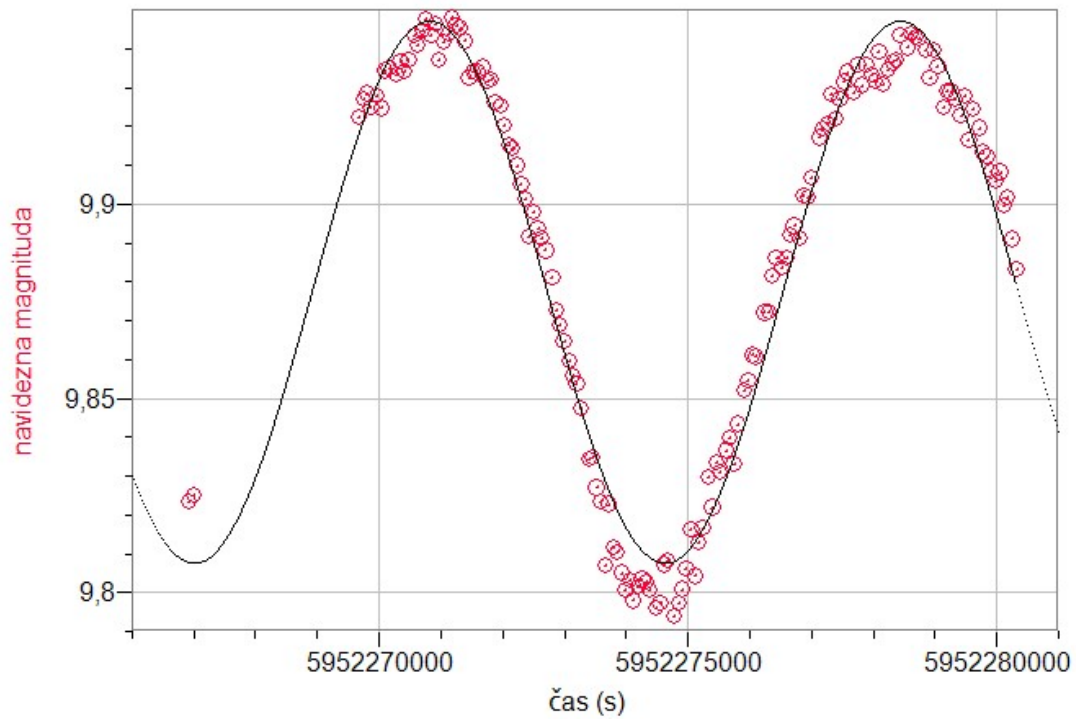
## 4 REZULTATI IN RAZPRAVA

Pri najinih meritvah in rezultatih izračunov, ki sledijo v tem delu, sva navajala napake vrednosti. S pomočjo izračunanih napak sva lahko prikazala, za koliko lahko vrednosti meritev oz. izračunov odstopajo od izmerjene oz. izračunane vrednosti. Same napake meritev nama je avtomatično določil program za fotometrijo, ali pa sva jo ocenila z grafom. Napake rezultatov izračunov pa sva v nadaljevanju naloge izračunala na sledeč način:

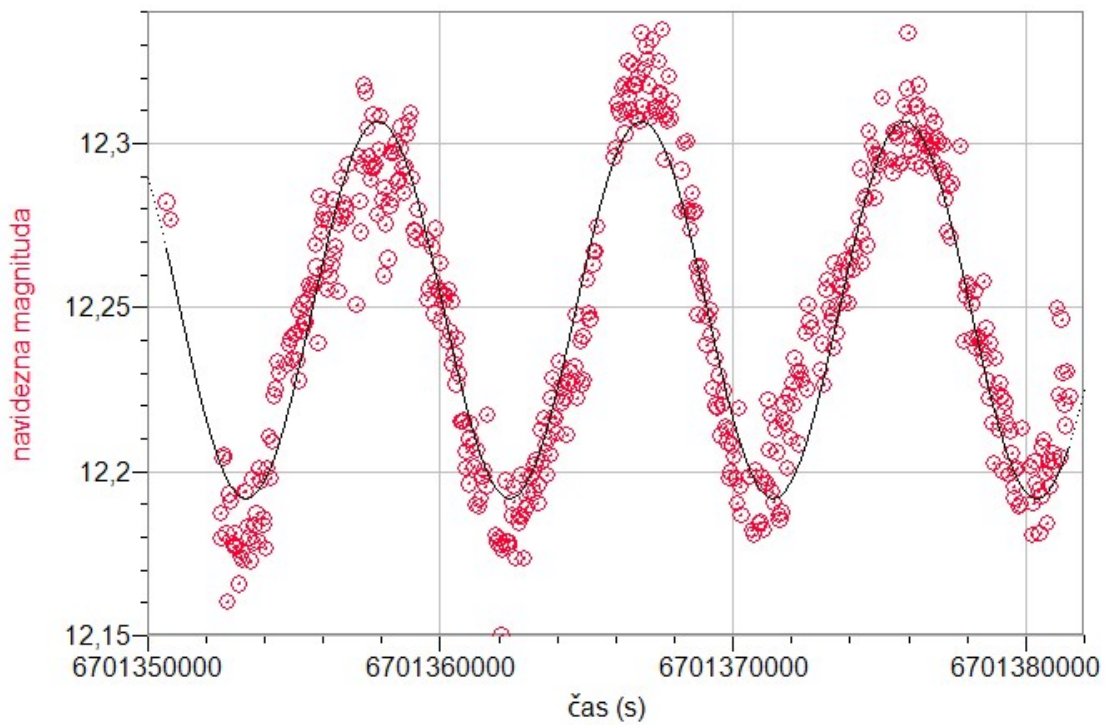
- a) Ob vsaki meritvi ali rezultatu sva navedla absolutno napako. S to vrsto napake opišemo razpon možnih vrednosti okrog izmerjene oz. izračunane vrednosti. Zapišemo jo lahko kot  $a \pm da$ , kjer je  $a$  podatek oz. rezultat,  $da$  pa absolutna napaka, ki pripada temu podatku oz. rezultatu. V primeru, da seštevamo ali odštevamo vrednosti, se seštevajo tudi absolutne napake.
- b) V primeru množenja ali deljenja pa absolutnih napak ne moremo seštevati. V tem primeru se seštevajo relativne napake. Relativna napaka je razmerje med absolutno napako in izmerjeno oz. izračunano vrednostjo. Zapišemo jo lahko kot  $a (1 \pm d)$ , kjer je  $a$  podatek oz. rezultat,  $d$  pa relativna napaka, ki pripada temu podatku oz. rezultatu. Relativno napako lahko pretvorimo v absolutno tako, da jo pomnožimo s podatkom. V primeru množenja ali deljenja se, kot je bilo že omenjeno, relativne napake seštevajo, v primeru potenciranja oz. korenjenja, pa se relativna napaka pomnoži z eksponentom.
- c) V primeru, da je napaka v eksponentu, absolutno napako izračunamo na sledeč način: če imamo potenco npr.  $10^{a \pm da}$  absolutno napako izračunamo po formuli  $10^a \cdot \ln 10 \cdot da$ , kjer je  $a$  podatek,  $da$  absolutna napaka, ki pripada temu podatku,  $\ln 10$  pa naravni logaritem števila 10.
- d) V primeru, da se podatek z napako nahaja v logaritmantu, absolutno napako najlažje določimo tako, da izračunamo razliko zgornje in spodnje vrednosti meje in vse skupaj delimo z 2. Tako absolutno napako iz logaritma npr.  $\log(a \pm da)$  določimo po formuli  $(\log(a + da) - \log(a - da)) : 2$ , kjer je  $a$  podatek,  $da$  pa absolutna napaka, ki pripada temu podatku.

V nadaljevanju raziskave sva se posvetila analizi podatkov z grafom svetlobnih krivulj. S pomočjo teh krivulj sva dobila potrebne podatke za nadaljnje izračune. Ker sva predpostavila, da kefeide svoj sij spreminjajo po sinusni funkciji  $f(x) = A \cdot \sin(B \cdot x + C) + D$ , sva tudi ta podatek vstavila v Logger Pro, program pa nama je na dobljene svetlobne krivulje izrisal najboljše približke sinusoide, ob krivulji pa izpisal podatke (to je bilo mogoče le na treh od petih krivulj, saj sta grafa dveh izmed njih preveč odstopala sinusoidi in sva z njiju podatke ocenila ročno). Na naslednjih straneh so prikazani izrisani grafi svetlobnih krivulj kefeid in njim prilegajoče se sinusoide.

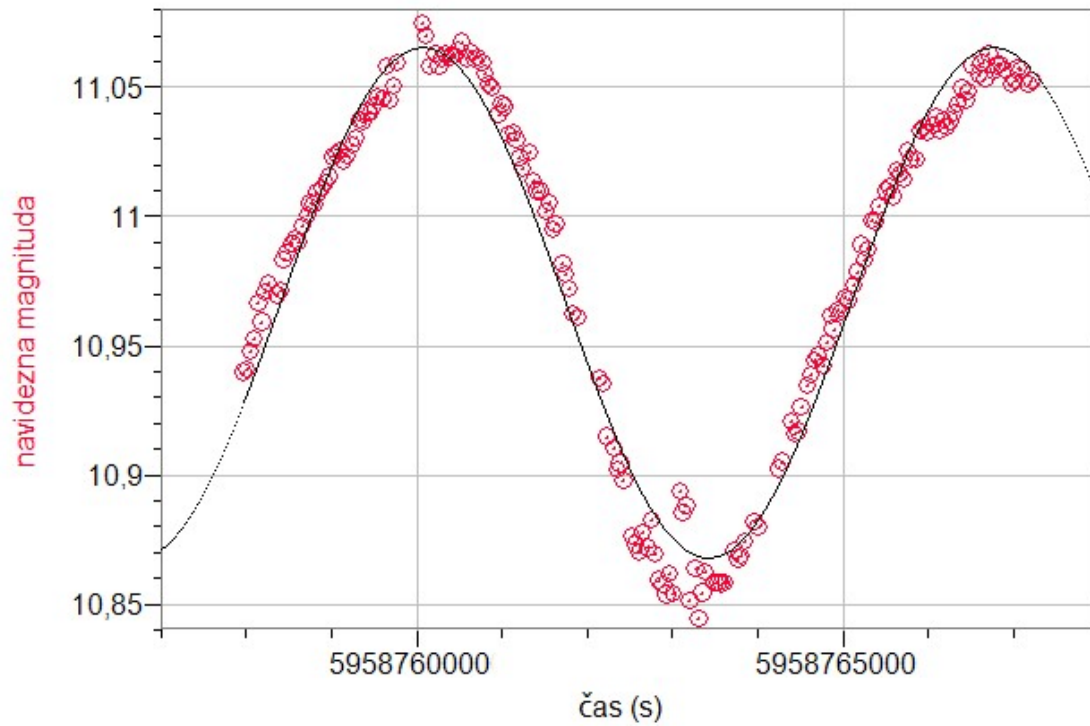




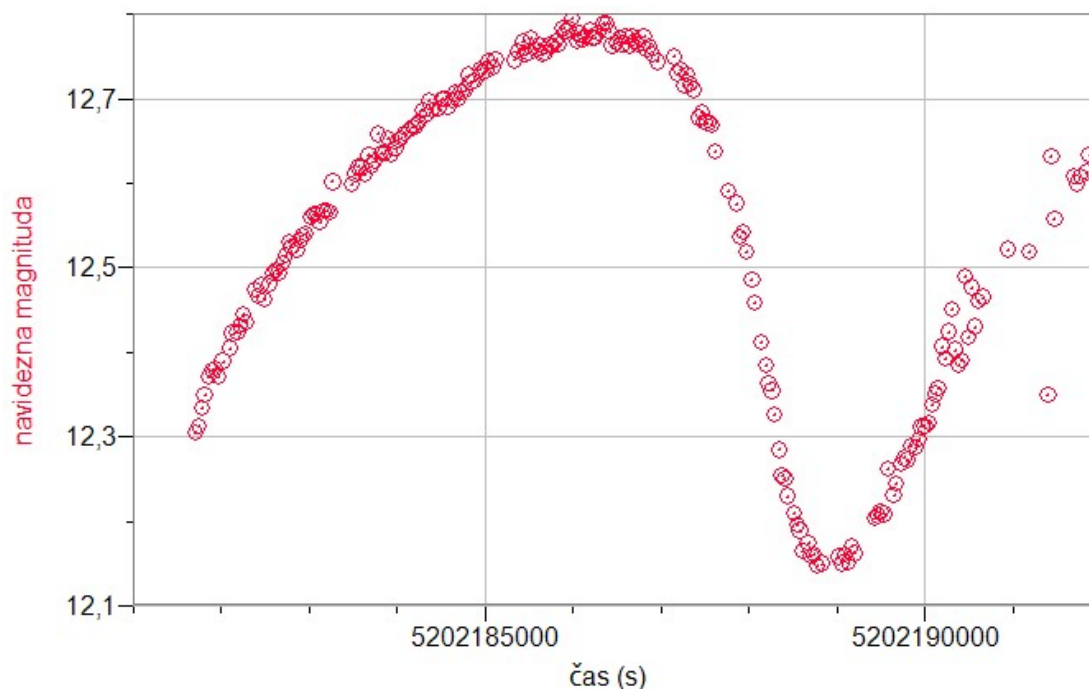
Graf 1: Svetlobna krivulja kefeide V1162 Ori



Graf 2: Svetlobna krivulja kefeide AG Pic

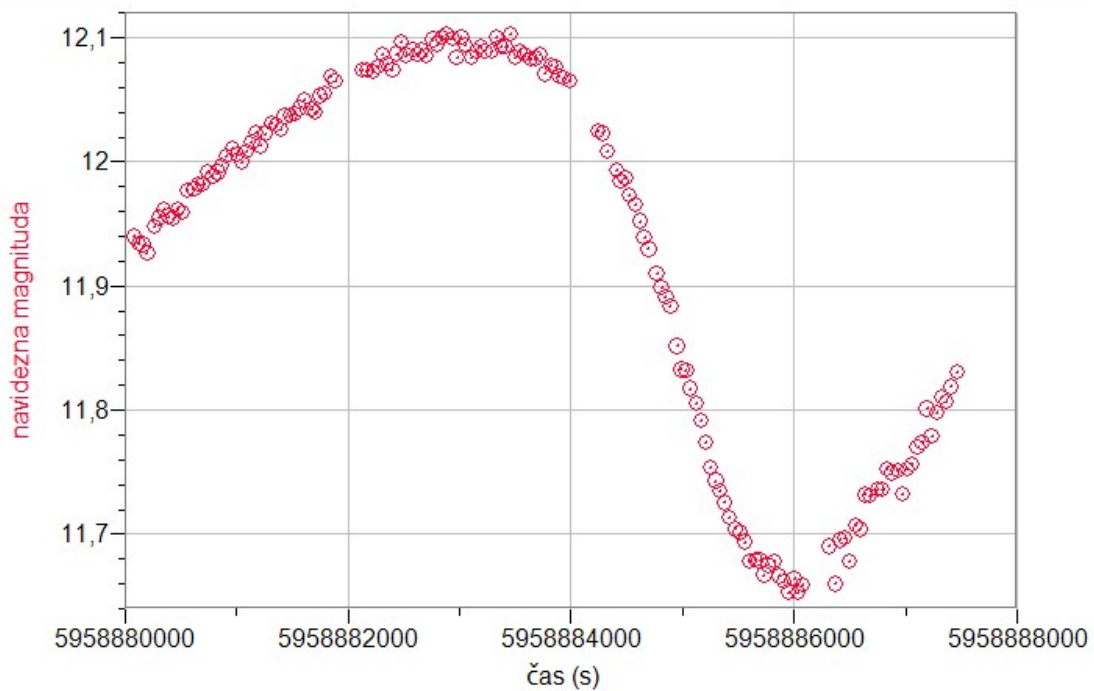


Graf 3: Svetlobna krivulja kefeide TYC 5951-2804-1



Graf 4: Svetlobna krivulja kefeide ASAS J064635-1455.5





Graf 5: Svetlobna krivulja kefeide TYC 7636-1969-1

Kot je razvidno z grafom, so bile svetlobne krivulje kefeid V1162 Ori, AG Pic in TYC 5951-2804-1 skoraj popolne sinusoide, kar pomeni, da nihajo po sinusni funkciji  $f(x) = A \cdot \sin(B \cdot x + C) + D$ , zaradi česar sva ta podatek vnesla v program Logger Pro, ki nama je vrnil podatke o njihovih periodah in povprečni navidezni magnitudi, saj je v najinem primeru  $A$  predstavljal amplitudo ( $\Delta m$ ),  $B$  kotno hitrost periode ( $2\pi/P$ ),  $D$  pa povprečno navidezno magnitudo kefeide ( $m$ ). Svetlobni krivulji kefeid ASAS J064635-1455.5 in TYC 7636-1969-1 sva morala obdelati ročno, tako da sva s pomočjo svinčnika in geometrijskega trikotnika ocenila njihovo periodo, povprečno navidezno magnitudo pa sva določila v programu Microsoft Exel, kjer sva uporabila podatke za eno periodo, ki sva jo posnela.

Ker se je v filtrih spremenila vizualna magnituda kefeid, ki sva jo potrebovala za izračun oddaljenosti, sva izmerjeno navidezno magnitudo v filtru morala pretvoriti vanjo. Sprememba navidezne magnitude v določenem filtru ( $m_p$ ) je odvisna od spektralnega tipa zvezde. Na žalost ima le kefeida V1162 Ori znan spektralni tip. Pri njej se vrednost magnitude v G filtru zmanjša za 0,08 magnitude, kar pomeni, da sva morala ta podatek prišteti k izmerjeni magnitudi v G filtru. Ker ostale kefeide nimajo znanega spektralnega tipa, sva spremembo magnitude določila na sledeč način. Ker so vse vrste kefeid tipa Delte Ščita podobnega spektralnega tipa, sva tudi za ostale kefeide posnete v G filtru vzela vrednost 0,08 magnitude z dodano absolutno napako 0,03 magnitude, saj lahko pri kefeidah tipa Delte Ščita pride do približno tolikšnih odstopanj v spremembi magnitude v G filtru zaradi različnih spektralnih tipov. Pri zvezdi AG Pic sva morala zaradi pomanjkanja podatkov o magnitudah referenčnih zvezd v R filtru uporabiti podatke za vizualno magnitudo s predpostavko, da je razlika referenčnih zvezd med vizualnimi magnitudami in magnitudami v R filtru konstantna.

```

Auto Fitfor: Data Set | navidezna magnituda
m = A*sin(B*t+C)+D
A: 0,05741 +/- 0,0008913
B: 0,0006981 +/- 2,032E-006
C: 0,8426 +/- 1,362E+004
D: 12,25 +/- 0,0006545
RMSE: 0,01427
    
```

Slika16: Podatki o sinusni funkciji, izpisani ob sinusoidi, izrisani v programu Logger Pro

Podatke o periodi ( $P$ ) in povprečni vizualni magnitudi ( $m_v = m_i + m_p$ , kjer je  $m_i$  izmerjena magnituda v določenem filtru,  $m_p$  pa popravek, s katerim sva le-to pretvorila v vizualno magnitudo), ki sva jih pridobila iz svetlobnih krivulj, sva vstavila v Tabela 3. Za meritve iz grafov, ki sva jih obdelala ročno, sva napako ocenila z grafa.

Tabela 3: Meritve, odčitane iz svetlobnih krivulj

<b>Keфеida</b>	<b><math>P</math> [h]</b>	<b><math>m_v</math></b>
V1162 Ori	$2,12 \pm 0,01$	9,96
AG Pic	$2,500 \pm 0,007$	12,25
TYC 5951-2804-1	$1,858 \pm 0,003$	$11,05 \pm 0,03$
ASAS J064635-1455.5	$2,300 \pm 0,004$	$12,64 \pm 0,03$
TYC 7636-1969-1	$2,220 \pm 0,003$	$12,00 \pm 0,03$

Med raziskovalno nalogo pa sva naletela še na en problem. Ker je med zvezdami in Zemljo veliko medzvezdnega plina in prahu, se svetloba, ki potuje od zvezde do Zemlje, na njih delno absorbira in sipa. Posledično se del svetlobe na poti do Zemlje izgubi. Temu pojavu pravimo ekstinkcija. Ekstinkcija se meri v magnitudah in je odvisna tako od količine prahu med zvezdo in Zemljo, kot tudi od spektralnega tipa zvezde, saj se svetloba krajših valovnih dolžin sipa bolj kot svetloba daljših valovnih dolžin, torej bo drugačna v vsakem filtru. Zaradi ekstinkcije se zato spremeni barva zvezde, ki jo vidimo na Zemlji, saj do zemlje prispe več rdeče svetlobe, ki ima daljšo valovno dolžino, pa tudi sij oziroma magnituda same zvezde.

Navidezna magnituda zvezd, ki sva jo izmerila s teleskopom, zato ni bila povsem točna, zaradi česar sva jo morala, če sva hotela pravilno izračunati oddaljenost kefeid, tudi upoštevati.

Ekstinkcijo opazovanih kefeid sva dobila s pomočjo dveh zemljevidov ekstinkcije, ki se nahajata na spletnih straneh <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2019ApJ...887...93G/abstract> ter <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2011ApJ...737..103S/abstract>. Ekstinkcijo sva iz zemljevida dobila s pomočjo za ta namen napisanega programa. Za zvezde, ki imajo deklinacijo nad  $-30^\circ$ , sva uporabila 3D zemljevid ekstinkcije, za ostale pa 2D zemljevid (tukaj se napake ne ve).

Tabela 4: Ekstinkcija opazovanih kefeid

Kefeida	Ekstinkcija	Filter
V1162 Ori	$0.30 \pm 0.01$	G
AG Pic	0.19	V
TYC 5951-2804-1	$0.39 \pm 0.01$	G
ASAS J064635-1455.5	$1.26 \pm 0.02$	G
TYC 7636-1969-1	0.33	G

Zdaj sva imela vse potrebne podatke za izračun oddaljenosti teh kefeid. Oddaljenost kefeid sva izračunala na sledeč način. S pomočjo Enačbe 1 sva preko periode za vsako posebej določila njihovo absolutno vizualno magnitudo. Nato sva izračunano absolutno in dobljeno navidezno vizualno magnitudo vstavila v Enačbo 3 in na ta način izračunala oddaljenost.

Za primer lahko vzamemo izračun oddaljenosti za kefeido AG Pic. Če upoštevamo Enačbo 1 in ekvivalentno preoblikovano Enačbo 3, potem velja:

$$M_v = (-2.94 \pm 0.06) \cdot \log \frac{(0,1042 \pm 0,0003) \text{ dneva}}{1 \text{ dan}} - (1.34 \pm 0.06) = 1,55 \pm 0,12$$

$$d = 10^{\frac{M_v - m_i - m_p + m_e - 5}{5}} \cdot 1 \text{ pc} = 10^{\frac{(1,55 \pm 0,12) - 12,25 + 0,19 - 5}{5}} \cdot 1 \text{ pc} = 1265 \pm 70 \text{ pc}$$

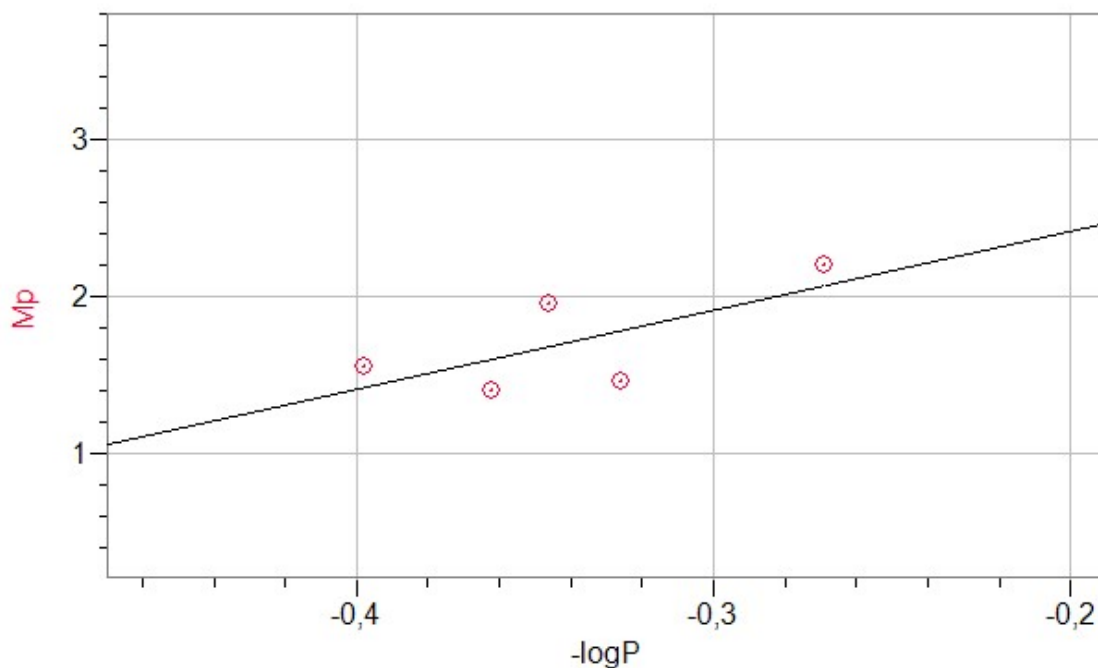
Na enak način sva izračunala tudi absolutno magnitudo ter oddaljenost ostalih kefeid. V Tabeli 5 so prikazani rezultati izračunov absolutne magnitude ( $M_i$ ), ki sva jih dobila iz podatkov iz Tabele 2 preko enačbe 1 ter rezultati izračuna oddaljenosti ( $d_i$ ) preko enačbe 3. V enem izmed stolpcev je navedena tudi prava oddaljenost kefeid ( $d_p$ ), ki jo je s pomočjo paralakse izmeril satelit Gaia, same podatke pa sva našla v spletnem katalogu Vizier.

Tabela 5: Izračunane vrednosti

Kefeida	$M_i$	$d_i$ [pc]	$d_p$ [pc]
V1162 Ori	$1,76 \pm 0,13$	$380 \pm 24$	$439 \pm 5$
AG Pic	$1,55 \pm 0,12$	$1265 \pm 70$	$1192 \pm 15$
TYC 5951-2804-1	$1,93 \pm 0,13$	$557 \pm 44$	$557 \pm 7$
ASAS J064635-1455.5	$1,65 \pm 0,12$	$883 \pm 69$	$1085 \pm 19$
TYC 7636-1969-1	$1,70 \pm 0,12$	$986 \pm 68$	$944 \pm 10$

Kot je razvidno iz Tabele 5, so izračunane razdalje zelo podobne tistim, ki jih je izmeril satelit Gaia. Odstopanja izračunane oddaljenosti od izmerjene so tako relativno majhna, saj je odstopanje vseh petih izračunanih razdalj manjše od 20 %, od tega je pri treh odstopanje manjše od 10 %, pri eni izmed teh – kefeidi TYC 5951-2804-1 pa sva dobila celo identično razdaljo, kar je prvi dokaz za povezavo med periodo in izsevom (ali absolutno magnitudo) kefeid.

Ko sva imela na razpolago tako podatke, ki sva jih izmerila oziroma izračunala, kot tudi vrednosti iz kataloga Vizier, ki jih je izmeril satelit Gaia, sva lahko zvezo med periodo in izsevom preverila tudi s pomočjo linearizacije (postopek, s katerim se nelinearni sistem aproksimira z linearnim matematičnim modelom). Linearizacijo sva predstavila s pomočjo Grafa 6. Na abscisno os sva vnesla negativni desetiški logaritem periode v urah ( $-\log P$ ), na ordinatno os pa pravo absolutno magnitudo ( $M_p$ ), ki sva jo dobila preko podatkov iz Vizierja. Kot je razvidno iz Grafa 6, sta količini, ki sva ju vnašala vanj, linearno povezani (čeprav meritve malenkostno odstopajo od idealne vrednosti), kar je še drugi dokaz za povezavo med periodo in izsevom kefeid.



Graf 6: Linearizacija povezave med periodo in pravo absolutno magnitudo kefeid

## 5 ZAKLJUČEK

Namen najine raziskovalne naloge je bil preveriti zanesljivost kefeid kot standardnih svetilnikov za merjenje razdalj v vesolju, uspešno izračunati oddaljenost petih kefeid ter dokazati povezavo med njihovo periodo in izsevom. Natanko to sva tudi storila. Med raziskovanjem sva razširila svoje znanje astronomije, predvsem znanja o kefeidah in njihovem delovanju. Prav tako sva kot prva izmed dijakov opazovala s teleskopom GoT1 in z njim uspešno posnela periode petih kefeid tipa Delte Ščita.

S pomočjo kalibracije sva uspešno odpravila šum z nastalih posnetkov, nato pa sva z računalniškimi programi za fotometrijo izmerila periodo posnetih kefeid, z upoštevanjem navidezne magnitude referenčnih zvezd pa sva določila tudi njihovo povprečno navidezno magnitudo. S pomočjo zveze med periodo in izsevom kefeid tipa Delte Ščita sva izračunala njihovo absolutno magnitudo, s pomočjo zveze med absolutno in navidezno magnitudo ter upoštevanjem absorpcije svetlobe zaradi medzvezdnega plina in prahu oziroma ekstinkcije pa sva uspešno določila tudi njihovo oddaljenost.

Dobljeni rezultati so dokaj realni, saj sva se zelo približala pravi oddaljenosti opazovanih kefeid, ki jih je s pomočjo paralakse izmeril satelit Gaia. Vse izračunane vrednosti se od te izmerjene vrednosti razlikujejo za manj kot 20 %, od tega se pri treh razlikuje za manj kot 10 %, pri eni izmed njih - kefeidi TYC 5951-2804-1, pa sva dobila celo identično oddaljenost. Čeprav sva pri vseh kefeidah določila napako, sta kljub temu dve kefeidi izven intervala prave oddaljenosti. Napake so seveda verjetno posledica tega, da sva v večini primerov izmerila le po eno periodo kefeid, saj bi jih za bolj natančne meritve morala posneti precej več. Odstopanja so lahko tudi posledica tega, da zveza med periodo in izsevom, čeprav je zelo natančna, ne velja popolnoma, poleg tega pa so se le-ta lahko pojavila tudi zaradi zaokroževanja vmesnih rezultatov. Kljub temu sva z najinimi rezultati izpolnila namen raziskovalne naloge, saj sva s pomočjo zveze med periodo in izsevom kefeid relativno natančno izmerila njihove razdalje, samo zvezo pa še dodatno potrdila z linearizacijo. Čeprav graf zaradi približka linearne povezave dokazuje prej omenjeno zvezo, bi bilo potrebno v raziskavo vključiti veliko več kefeid, saj je razporeditev točk na grafu pri tako majhnem številu meritev lahko povsem naključna. Kljub temu sva s pomočjo formul za izračun oddaljenosti zelo natančno določila oddaljenost, s čimer dokazujeva zanesljivost kefeid kot standardnih svetilnikov pri merjenju velikih razdalj v vesolju.

Čeprav sva izračunane oddaljenosti kefeid primerjala z oddaljenostmi, ki jih je preko paralakse izmeril satelit Gaia, se izkaže, da je ta metoda pri merjenju velikih razdalj v vesolju neuporabna, saj je premik na medzvezdnem ozadju, na katerem le-ta temelji, zaradi prevelike razdalje premajhen. Astronomi se merjenja razdalj s pomočjo standardnih svetilnikov, kot so kefeide, poslužujejo prav zaradi zanesljivosti na velikih razdaljah. Seveda imajo tudi kefeide svoje meje, saj jih z instrumenti, ki jih imamo na Zemlji, na razdaljah, večjih od 100 milijonov svetlobnih let, ne moremo videti oziroma razločiti zaradi prenizke ločljivosti zemeljskih teleskopov. Zaradi tega se profesionalni astronomi poslužujejo meritev s pomočjo drugih standardnih svetilnikov, kot

so izjemno svetle supernove tipa Ia ali pa meritev s pomočjo Hubblovega zakona in Dopplerjevega pojava (v tem primeru rdečega premika), ki je posledica širjenja vesolja. Kljub temu so kefeide, kot sva tekom raziskave tudi dokazala, zanesljiv standardni svetilnik za merjenje razdalj po vesolju, kar med drugim nakazuje tudi dejstvo, da so nam dale toliko informacij o razdaljah v vesolju kot nobena druga vrsta zvezd, zaradi česar se tovrstnega merjenja razdalje ne poslužujejo le amaterski, temveč tudi profesionalni astronomi, ki lahko s pomočjo izredno zmogljivih teleskopov z veliko ločljivostjo zaznajo tudi bolj oddaljene kefeide. Najino raziskovanje pa se tu seveda še ni končalo, temveč šele začelo. Vsekakor so se nama med opazovanji porodile nove ideje raziskovanj, med drugim bi lahko v prihodnosti zvezo med periodo in izsevom preverila tudi z drugimi vrstami kefeid, prav tako pa bi lahko z malo sreče za določevanje razdalj poskusila uporabiti še druge vrste standardnih svetilnikov.

## 6 VIRI IN LITERATURA

- Avsec F., Prosen M. *Astronomija*. Ljubljana: DMFA - založništvo, 2006.
- Percy R. J. *Understanding variable stars*. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- Walker Richard. *Spectral Atlas for Amateur Astronomers: A Guide to the Spectra of Astronomical Objects and Terrestrial Light Sources*. Cambridge: Cambridge University Press, 2017.
- Dinwiddie P. et al. *Universe: The Definitive Visual Guide*. London: Dorling Kindersley, 2005.
- A 3D Dust Map Based on Gaia, Pan-STARRS 1, and 2MASS. 2022 [online]. astrophysics data system. Pridobljeno 3. 2. 2022 na spletnem naslovu: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2019ApJ...887...93G/abstract>.
- Dustmaps documentation. 2022 [online]. Dustmaps. Pridobljeno 3. 2. 2022 na spletnem naslovu: <https://dustmaps.readthedocs.io/en/latest/index.html>.
- Variable stars overview. 2022. [online]. Society for Popular Astronomy. Pridobljeno 5. 1. 2022 na spletnem naslovu: [https://www.popastro.com/main\\_spa1/variablestar/variable-stars-overview/](https://www.popastro.com/main_spa1/variablestar/variable-stars-overview/).
- Henrietta Swan Leavitt. 2018 [online]. The Harvard Gazette. Pridobljeno 5. 1. 2022 na spletnem naslovu: <https://news.harvard.edu/gazette/story/2018/07/henrietta-swan-leavitts-research-transformed-astronomy/>.
- Ziaali E., Bedding T., Murphy S., Van Reeth T., Hey D. 2019. The period–luminosity relation for  $\delta$  Scuti stars using Gaia DR2 parallaxes. Pridobljeno 3. 2. 2022 na spletnem naslovu: <https://arxiv.org/pdf/1904.08101.pdf>.