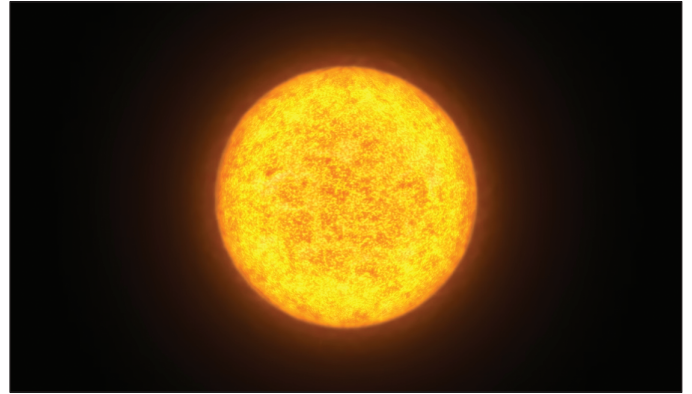
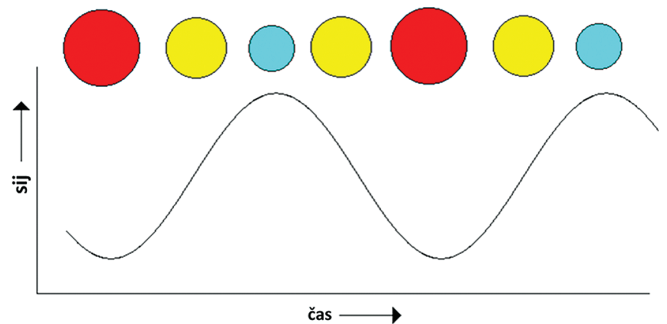


Najina raziskava kefeid tipa Delta Ščita s projektom GoChile

Ljudje so dolga tisočletja opazovali nebo 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 oziroma 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 utripanja pa naj bi bila povezana z njihovim izsevom. Želela sva dokazati to zvezo in z njeno pomočjo tudi sama izmeriti oddaljenost do nekaj kefeid. Tako se nama je porodila ideja, da bi lahko s pomočjo teleskopa izmerila periodo spremembe sija, prek nje izračunala izsev, hkrati pa bi izmerila, kako svetla je kefeida videti na Zemlji in na podlagi tega določiti njeno oddaljenost. Namen najine raziskave je tako bil preveriti zanesljivost kefeid kot standardnih svetilnikov za merjenje razdalj v vesolju, uspešno izračunati oddaljenost do petih kefeid ter dokazati povezavo med njihovo periodo in izsevom.



Tipična kefeida je zvezda v poznem obdobju svojega življenja, ko se zaradi nestabilnosti periodično krči in napihuje (vir: <https://esahubble.org/>).



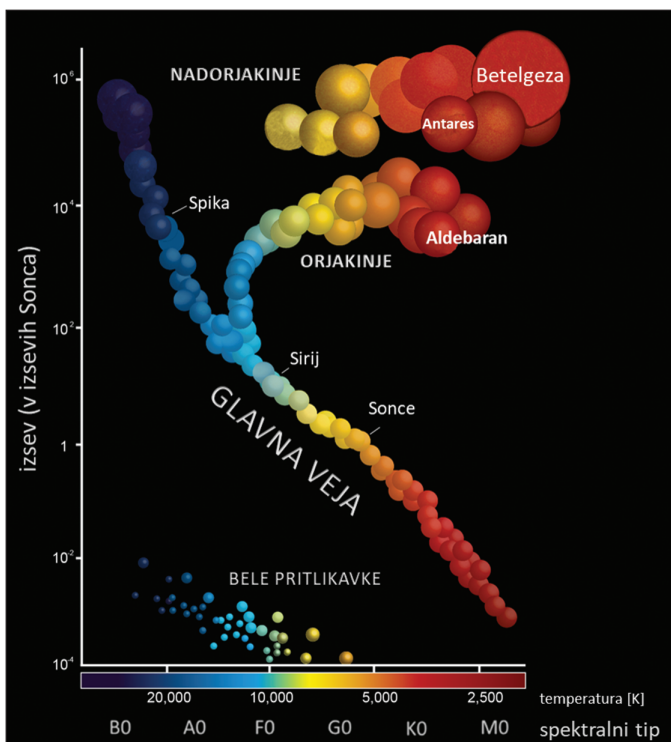
Shematski prikaz širjenja in krčenja ter posledično spreminjanja barve in sija kefeide v odvisnosti od časa (vir: http://abyss.uoregon.edu/~js/glossary/ceheid_variable.html).

spremembe sija in izsev medsebojno povezana, kar pomeni, da jih lahko uporabimo kot standardne svetilnike za določevanje razdalj v vesolju (standardni svetilniki so tisti objekti, ki imajo znan izsev oziroma ga lahko posredno ugotovimo ter s primerjavo izseva in gostote svetlobnega toka na Zemlji določimo njihove oddaljenosti), 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 R. J. *Understanding variable stars*. Cambridge: Cambridge University Press, 2007).

Kljub temu, da se kefeidam 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 oziroma helijevo jedro). To pomeni, da bo bolj zgoščena in vroča plazma ioniziranega 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

OSNOVNE LASTNOSTI KEFEID

Kefeidne spremenljivke oziroma kefeide so rumene nadorjakinje v pozni stopnji svojega razvoja. So nestabilne zvezde, ki se periodično širijo in krčijo. Ime so dobile po zvezdi Delti Kefeja, katere spremenljivost je leta 1784 odkril John Goodricke. Poznamo več vrst kefeid, vsem pa je skupno to, da se na Hertzsprung-Russellovem (H-R) diagramu nahajajo v pasu, ki se imenuje območje nestabilnosti. Gre za ene najpomembnejših vrst zvezd v vesolju, saj sta njihova perioda



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

bodo močno segrele in povečani tlak jih bo odpihnil navzven. Pri razširjanju se zunanja plast ohladi in tlak pade, elektroni pa se takrat vežejo na helijeve atome in pri tem še dodatno sevajo svetlobo. Zaradi spremembe temperature se kefeidi spremenijo tudi barva, posledično pa se ji spremeni tudi spektralni tip. Ker se plast razširja, se ta ne bo ustavila v ravnovesju, kjer tlak ravno uravnaveša gravitacijsko silo, temveč se bo širila naprej. Tako se bodo plasti ustavile šele takrat, ko bo gravitacijska sila močno presežala tlak plazme in zvezda se bo zaradi tega začela krčiti, kar bo povzročilo močno segrevanje plasti. To je vzrok za periodično nihanje velikosti kefeide (Percy R. J. *Understanding variable stars*. Cambridge: Cambridge University Press, 2007).

Vse kefeide, ki sva jih opazovala, so bile tipa Delte Ščita. Kefeide tega tipa so pulzirajoče spremenljivke spektralnega razreda 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 podaljškem nestabilnega pasu kefeid, ki prečka gosto poseljeno glavno vejo H-R diagrama (Percy R. J. *Understanding variable stars*. Cambridge: Cambridge University Press, 2007).

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

$$M_v = (-2.94 \pm 0,06) \cdot \log(P/1 \text{ dan}) - (1,34 \pm 0,06)$$

PROJEKT GOCHILE

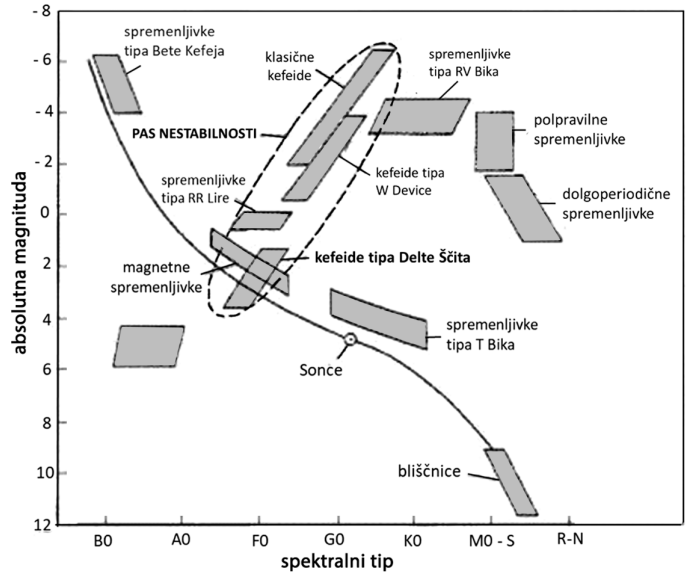
Velik del najine raziskovalne naloge so predstavljala opazovanja. Pri opazovanju oziroma fotografiranju kefeid sva uporabila reflektor GoT1 tipa Ritchey-Chrétien, nameščen na ekvatorialni montaži ONE50. Premer njegovega objektivna znaša 400 milimetrov, kar omogoča podrobno raziskovanje galaksij, meglic, 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.

FOTOGRAFIRANJE IN MERITVE

Za začetek najine raziskave sva morala najprej sestaviti seznam kefeid, ki bi 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 nama je ponudil več kefeid, med katerimi sva izbrala tiste, ki so se v času opazovanja nahajale na nebu v Čilu, ki imajo dovolj veliko amplitudo, da jo zaznava s teleskopom, ter dovolj kratko periodo nihanja sija, da jo posnema v eni noči.

Ko sva sestavila seznam možnih kefeid za opazovanje, sva izbrala pet najprimernejših in se lotila opazovanja. Teleskop sva uporabljala tako, da sva se prek 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 in s kamero ASI6200MM Pro v primarnem gorišču. Ekspozicije posameznih posnetkov so bile



Prikaz vseh tipov spremenljivk na H-R diagramu (vir: <https://uni-verse-review.ca/Fo8-staro8.htm>)

dolge 30 sekund. Vse kefeide razen AG Pic (AG Pictoris, AG Slikarja) sva snemala v zelenem filteru, za le-to pa sva zaradi polne lune in njene svetlosti morala uporabiti rdeč filter, saj Luna odbija izredno malo svetlobe v rdečem delu spektra.

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 razmeroma 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 v programu Astro Pixel Processor s pomočjo kalibracijskih fotografij, posnetih s teleskopom.

Na skalibriranih slikah sva nato izbrala vsaj pet referenčnih zvezd, torej zvezd, katerih sij sva poznala in ki se jim navidezna magnituda ne spreminja. Referenčne zvezde sva poiskala tako, da sva program AstroImageJ, 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 prek koordinat poiskala podatke za navidezno magnitudo referenčnih zvezd v posameznem filteru v spletnem katalogu Simbad (<http://simbad.u-strasbg.fr/simbad/>). Ko sva izbrala referenčne zvezde, sva se lotila pridobivanja podatkov. V program AstroImageJ sva najprej uvozila sekvenco posnetkov in odprla prvi posnetek iz sekvence.

Uporabila sva funkcijo z imenom *perform multi-aperture photometry*. S pomočjo te funkcije sva izbrala zvezdo, ki ji 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. Tako sva dobila podatke o periodi in spreminjanju navidezne magnitudo za vse najine kefeide. Te podatke sva 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 fotografije v sekundah, na ordinatno os pa navidezno magnitudo.

ANALIZA PODATKOV

V nadaljevanju raziskave sva se posvetila analizi podatkov z grafov svetlobnih krivulj. S pomočjo teh krivulj sva dobila vse potrebno za

nadaljnje izračune. 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 $f(x) = A \cdot \sin(B \cdot x + C) + D$. Ta podatek sva 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 (Δ_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 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 je uporaba filtrov spremenila vizualno magnitudo kefeid, ki sva jo potrebovala za izračun oddaljenosti, sva s filtrom izmerjeno navidezno magnitudo morala pretvoriti v vizualno. 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 sija v zelenem filtru zmanjša za 0,08 magnitude, kar pomeni, da sva morala ta podatek prišteti k izmerjeni magnitudi v zelenem filtru. Ker ostale kefeide nimajo znanega spektralnega tipa, sva spremembo magnitude določila na sledeč način. Ker so vse vrste kefeid tipa Delta ščita podobnega spektralnega tipa, sva tudi za ostale kefeide, posnete v zelenem filtru, vzela vrednost 0,08 magnitude z dodano absolutno napako 0,03 magnitude, saj lahko pri kefeidah tipa Delta ščita pride do približno tolikšnih odstopanj v spremembi magnitude v zelenem filtru zaradi različnih spektralnih tipov. Pri zvezdi AG Pic sva morala zaradi pomanjkanja podatkov o silih referenčnih zvezd v rdečem filtru uporabiti podatke za vizualno magnitudo s predpostavko, da je razlika referenčnih zvezd med vizualnimi magnitudami in magnitudami v rdečem filtru konstantna.

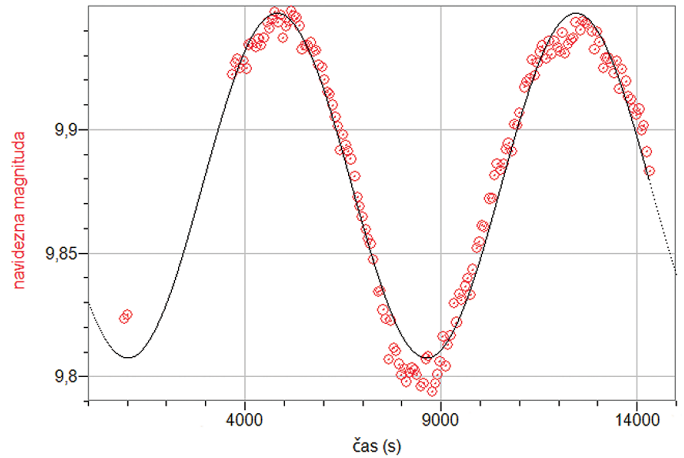
Med raziskovalno nalogo pa sva naletela še na eno težavo. Ker je med zvezdami in Zemljo veliko medzvezdnega plina in prahu, se svetloba, ki potuje od zvezde do Zemlje, na njih delno absorbira in sipa. Posledično se del svetlobe na poti do Zemlje izgubi. Temu pojavu pravimo ekstinkcija. Ekstinkcija se meri v magnitudah in je odvisna tako od količine prahu in plina 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 nas prispe več rdeče svetlobe, ki ima daljšo valovno dolžino, pa tudi sij oziroma magnituda same zvezde se zmanjša. Navidezna magnituda zvezd, ki sva jo izmerila s teleskopom, zato ni bila povsem točna, zaradi česar sva morala ekstinkcijo, če sva hotela pravilno izračunati oddaljenost kefeid, tudi upoštevati.

Ekstinkcijo za opazovane kefeide sva dobila s pomočjo dveh kart 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 teh kart dobila s pomočjo za ta namen napisanega programa.

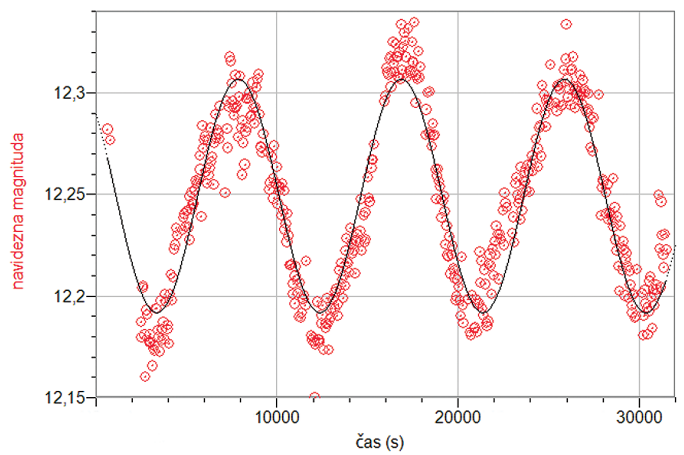
Zdaj sva imela vse potrebne podatke za določanje oddaljenosti teh petih kefeid. Izračunala sva jih na sledeč način. S pomočjo enačbe za izračun absolutne vizualne magnitude (M_v) kefeid tipa Delta ščita prek periode (P) sva M_v izračunala za vsako posebej. Nato sva izračunano absolutno in izmerjeno navidezno vizualno magnitudo, popravke za le-to v posameznem filtru ter dobljeno ekstinkcijo vstavila v spodnjo enačbo in izračunala oddaljenost kefeide (d):

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

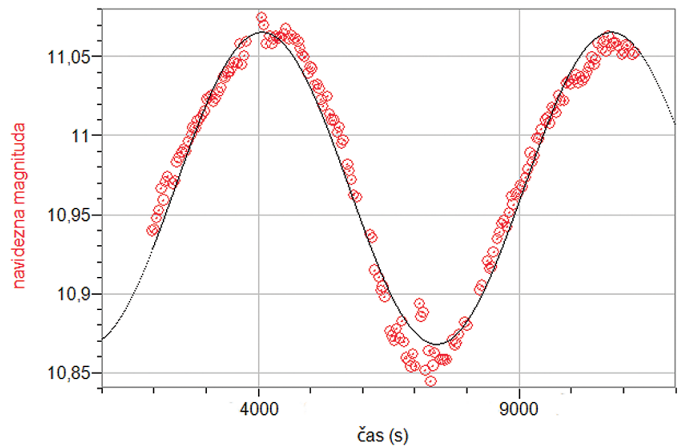
Za primer lahko vzamemo izračun oddaljenosti za kefeido AG Pic. Če upoštevamo prvo in ekvivalentno preoblikovano drugo enačbo, potem velja:



Svetlobna krivulja kefeide V1162 Ori



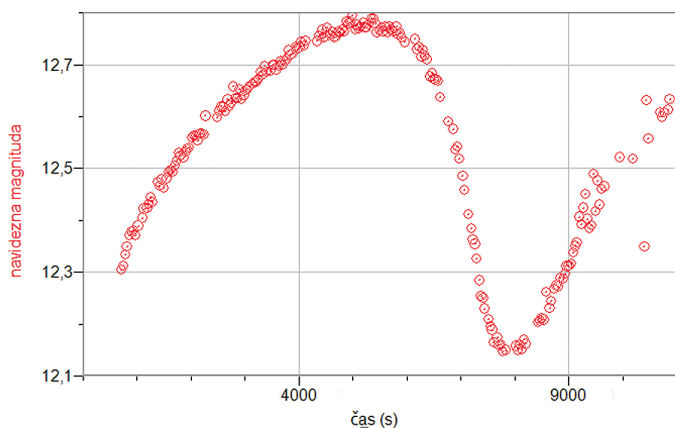
Svetlobna krivulja kefeide AG Pic



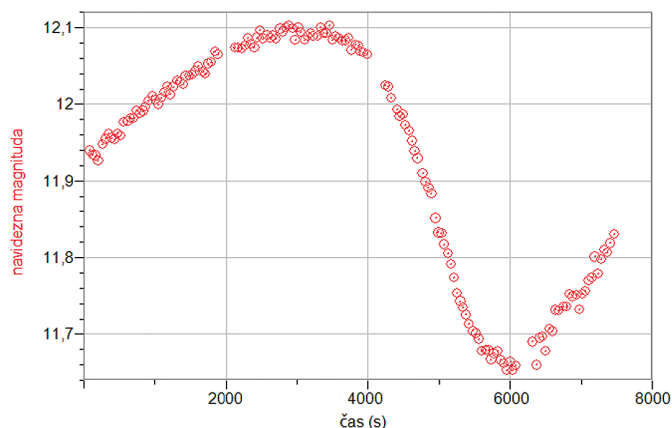
Svetlobna krivulja kefeide TYC 5951-2804-1

$$M_v = (-2,94 \pm 0,06) \cdot \log \frac{(0,1042 \pm 0,0003)\text{dneva}}{1\text{dan}} - (1,34 \pm 0,06) = 1,55 \pm 0,12$$

Na enak način sva izračunala tudi absolutno magnitudo ter oddaljenost ostalih kefeid. V tabeli so prikazani rezultati izračunov absolutne magnitude (M_i), ki sva jih dobila iz izmerjenih podatkov prek prve enačbe ter rezultati izračuna oddaljenosti (d_i) prek druge enačbe. V zadnjem stolpcu je navedena tudi prava oddaljenost kefeid (d_p), ki jo je s pomočjo paralakse izmeril astrometrični satelit Gaia, same podatke pa sva našla v spletnem katalogu VizieR.



Svetlobna krivulja kefeide ASAS J064635-1455.5



Svetlobna krivulja kefeide TYC 7636-1969-1

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

kefeida	datum opazovanja	rek. (J2000) h m s	dek. ° ' "	M_i (m)	d_i (parsek)	d_p (parsek)
V1162 Ori	04.11. 2021	05 32 01,99	-07 15 24,66	$1,76 \pm 0,13$	380 ± 24	439 ± 5
AG Pic	22.12. 2021	05 35 12,10	-58 01 8,46	$1,55 \pm 0,12$	1265 ± 70	1192 ± 15
TYC 5951-2804-1	08.01. 2022	06 24 42,86	-18 16 42,92	$1,93 \pm 0,13$	557 ± 44	557 ± 7
ASAS J064635-1455.5	11.01. 2022	06 46 35,06	-14 55 28,35	$1,65 \pm 0,12$	883 ± 69	1085 ± 19
TYC 7636-1969-1	11.01. 2022	06 59 54,83	-42 01 15,12	$1,70 \pm 0,12$	986 ± 68	944 ± 10

Med raziskovanjem sva razširila svoje znanje astronomije, predvsem znanje o kefeidah in njihovem delovanju. Prav tako sva kot prva od dijakov opazovala s teleskopom GoT1 in z njim uspešno posnela periode petih kefeid tipa Delta Ščita, izračunala njihovo oddaljenost in s tem dokazala še povezavo med njihovo periodo in izsevom ter tako izpolnila namen najine raziskave. Tekom naloge sva se še dodatno

navdušila nad astronomijo, saj je v vesolju še toliko stvari, ki jih moramo odkriti. Kot je nekoč rekel Carl Sagan: »*Vesolje je vse, kar je, je bilo ali kadarkoli bo.*« Prav zaradi tega dejstva je še toliko bolj zanimivo raziskovati njegove razsežnosti, tudi s tovrstnimi raziskavami.

Damjan Dovnik in Hana Brumec

Damjan Dovnik in Hana Brumec sva dijaka 3. letnika gimnazijskega programa na Srednji šoli Slovenska Bistrica. Opisano raziskavo sva delala pod mentorstvom mag. Marka Žigarta in dr. Jureta Japlja s pomočjo projekta GoChile, v sklopu katerega sva tudi uporabljala teleskop GoT1, ki je bil ključen za celotno raziskavo. Raziskavo sva predstavila tudi na državnem srečanju mladih raziskovalcev Slovenije, kjer je prejela zlato priznanje ter osvojila 2. mesto.



DEEPSKYDAD.COM

oprema za astrofotografijo



AF1 avtofokuser
USB
109€



AF2 avtofokuser
USB, Wifi, daljinec, temperaturni senzor
140€



AF2 RedCat komplet
Celovita rešitev za avtofokuseranje
200€



DC HUB 2
Razdelilnik za napajanje vaše opreme
50€