

UNIVERZA V LJUBLJANI
FAKULTETA ZA MATEMATIKO IN FIZIKO

HR DIAGRAM

RAZSUTE ZVEZDNE KOPICE M67

Opazovalni projekt pri predmetu Astronomija



Avtorji:

Suzana Jurečič
Manca Meglič
Anamarija Rebolj
Janez Štebe

Predmet:

Astronomija, pedagoška matematika

Mentor:

prof. dr. Andrej Čadež

Ljubljana, september 2007

1 TEORETIČNI UVOD

1.1 Hertzsprung –Russellov diagram

HR-diagram je graf, v katerem vsaka točka diagrama predstavlja zvezdo, ki smo ji izmerili izsev in površinsko temperaturo (oziroma smo ji določili barvo). Takšen graf sta prva vsak zase narisala danski astronom Hertzsprung in ameriški astronom Russell (okoli leta 1910).

Barva objekta je območje valovnih dolžin, pri katerih objekt seva največ energije. Sevanje pri zelo velikih in zelo majhnih valovnih dolžinah je vedno šibko, najmočnejše pa nekje vmes. Barvo objekta določa njegova temperatura.

Valovno dolžino objekta, sevalnost, energijski tok (fluks) in temperaturo povezujejo naslednje zveze:

$$[1] I_{\lambda}(T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1} \quad \text{Planckova funkcija}$$

$$[2] J = \sigma T^4 \quad \text{Stefanov zakon}$$

$$[3] \int_0^{\infty} F(\lambda) d\lambda = 1, \quad j = \int_0^{\infty} F(\lambda) I_{\lambda}(T) d\lambda$$

$$[4] B(\lambda) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1} \quad \text{Boltzmannova funkcija}$$

$$[5] B - V = -2.5 \log_{10} \frac{B(\lambda_B) \Delta \lambda_B}{B(\lambda_V) \Delta \lambda_V} + c_{B-V} \quad \text{barvni indeks B-V,}$$

Pri tem so potrebne konstante:

Stefanova konstanta: $\sigma = 5,670.400(40) \cdot 10^{-8} \text{ J s}^{-1} \text{ m}^{-2} \text{ K}^{-4}$

Planckova konstanta: $h = 6,6261 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$

Boltzmannova konstanta: $k = 1,380.650.3(24) \cdot 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$

Hitrost svetlobe: $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}$

Temperaturo in valovno dolžino, ki jo ima največ valov v emitiranem sevanju, povezuje

$$[6] \text{Wienov zakon: } \lambda_{\max} \cdot T = 2,89 \cdot 10^{-3} \text{ mK}$$

Spektralni razred	Barva	Temperatura(°C)	Primer
O	modra	25.000 – 40.000	
B	modra	11.000 – 25.000	
A	modro-bela	7.500 – 11.000	
F	belo-rumena	6.000 – 7.500	Sirij, Vega
G	rumena	5.000 – 6.000	Sonce
K	oranžna	3.500 – 5.000	
M	rdeča	3.000 – 3.500	Betelgeza, Antares

Tabela 1: Razdelitev zvezd glede na spektralni razred

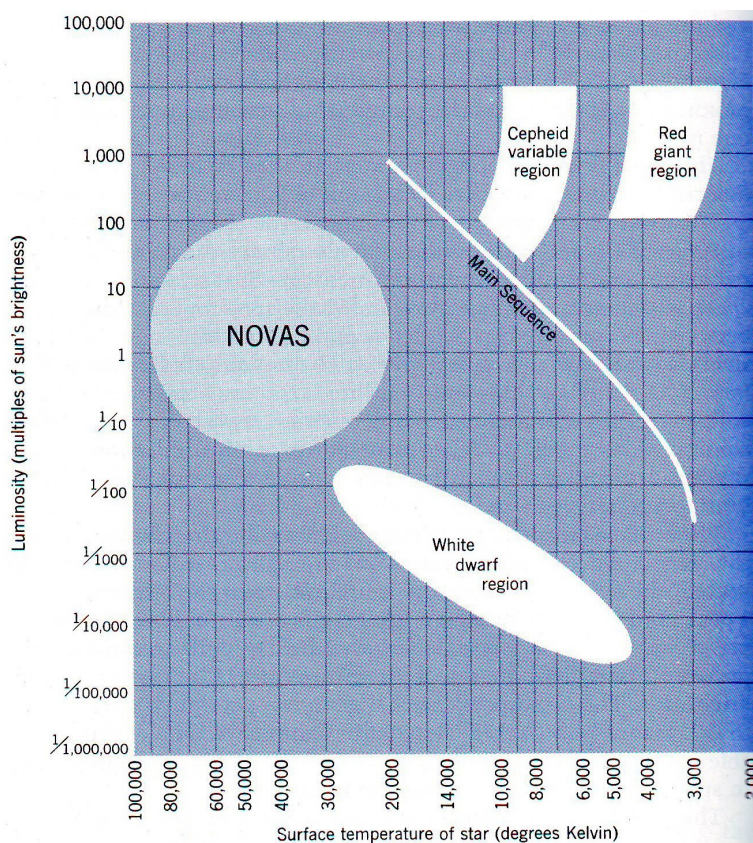
Sonce kot tipična zvezda tipa G večino energije seva v vidnem delu spektra. Bolj vroče zvezde sevajo večino energije v ultravijoličnem, hladnejše pa v infrardečem delu spektra. Višja ko je temperatura na zvezdi, večji je izsev.

Namesto izseva in površinske temperature lahko v HR diagram vnašamo vrednost barvnega indeksa B-V na abscisno os in vrednost navidezne vidne magnizude na ordinatno os (ekvivalenten diagram dobimo, če uporabljamo absolutne magnitude).

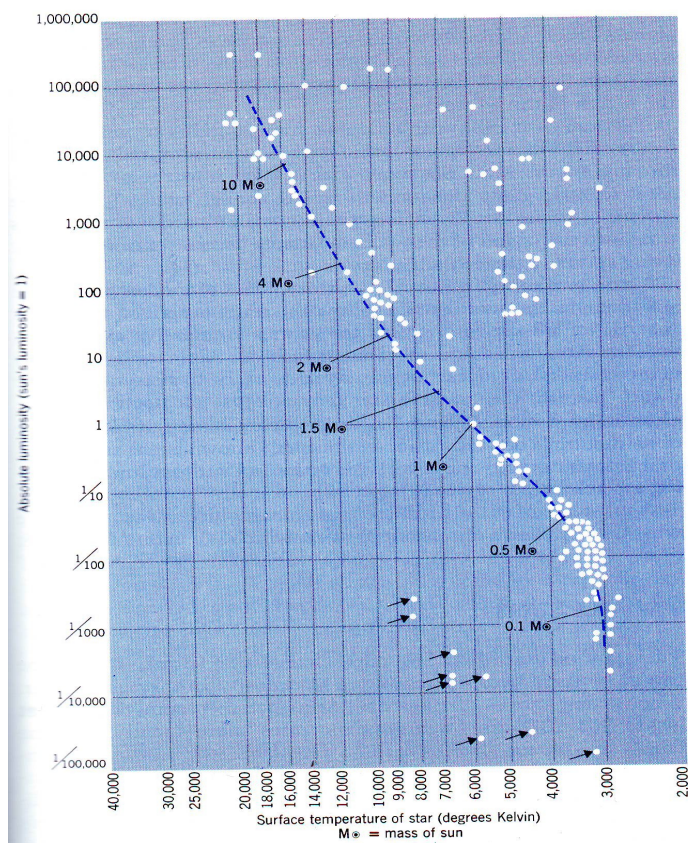
Večina zvezd (ok. 90 %) leži v HR-diagramu na *glavni veji* (the Main Sequence). Med njimi je največ *rdečih pritlikavk* in najmanj *modrih orjakinj*. Tudi Sonce leži na glavni veji. Razporeditev zvezd na glavni veji je odvisna samo od njihove mase: zvezde z večjo maso so bolj levo, tiste z manjšo pa bolj desno. Položaj, temperaturo in izsev zvezde na glavni veji določa izključno njena masa. Glavna veja je na obeh straneh zaključena, saj obstajata zgornja in spodnja meja za maso zvezde na glavni veji: $60 M_{\odot}$ in $1/30 M_{\odot}$. Večini zvezd na glavni veji se izsev spreminja zelo počasi.

Pod glavno vejo so *prtljikavke* (majhne, bele/oranžne/rdeče, goste, z majhnim izsevom), nad njo pa *orjakinje* (velike, rdeče/modre/bele, redke, z velikim izsevom) in kefeide (zvezde, ki periodično spreminjajo svoj izsev tudi za 30 %). *Nove* so zvezde, ki se jim izsev hitro poveča več desetisočkrat, potem pa slabi. Iz njih nastanejo bele prtljikavke. Supernovam pa se izsev pri izbruhu poveča za več stotisočkrat.

Vsaka zvezda v HR diagramu »prehodi« svojo razvojno pot, odvisno predvsem od svoje začetne mase. Če je $0.6 M_{\odot} < M < 1.4 M_{\odot}$, življenjska doba zvezde znaša okoli 10 milijard let. Večino časa preživi na glavni veji, nato pa se dvigne med rdeče orjakinje in konča kot bela prtljikavka pod glavno vejo. Če je $1.4 M_{\odot} < M < 4.2 M_{\odot}$, zvezda živi le kak milijon let. Večino življenja preživi na glavni veji, potem postane rdeča orjakinja in nato supernova, po eksploziji pa od nje ostane nevtronska zvezda. Če je $M > 4.2 M_{\odot}$, zvezda konča svoj razvoj kot črna luknja, ki pa ne seva v nobenem spektru in zato ni prisotna na HR.



Slika 1: Razporeditev zvezdnih tipov v HR-diagramu. (vir: Thompson, Jastrow)



Slika 2: Masa zvezd na glavni veji HR-diagrama. (vir: Thompson, Jastrow)

1.2 Zvezdne kopice

Večina zvezd se prosto giblje po vesolju. Nekatere pa so z gravitacijsko silo povezane v skupine, imenovane zvezdne kopice. V njih je lahko zelo malo zvezd, lahko pa tudi milijon. Zvezdne kopice delimo na razsute (odprte, galaktične) in kroglaste (globularne).



Lastnost\Vrsta	RAZSUTE KOPICE	KROGLASTE KOPICE
Oblika	zvezde so nametane brez reda	zvezde so razporejene v obliki krogle, gostijo se proti središču
Št. zvezd	več deset ali sto	več deset- ali stotisoč
vrsta zvezd	večinoma zvezde z glavne veje in nadorjakinje	večinoma zvezde z glavne veje in rdeče orjakinje, lahko tudi kefeide
Lega	galaktični disk	galaktični halo
Povezanost	gravitacija, lahko razpadejo	gravitacija, težje razpadejo
Velikost (premer)	nekaj pc	ok. 100 pc
Primer	M67 	M3 
starost	različna	stare

Tabela 2: Klasifikacija zvezdnih kopic

Zvezdna kopica nastane, ko se v oblaku snovi oblikujejo zvezde; ta proces lahko traja več milijonov let, kar pa je malo v primerjavi z življenjsko dobo povprečne zvezde. Zato rečemo kar, da so vse zvezde v kopici približno enako stare. Ker so tudi približno enako oddaljene, razlike med njimi izhajajo iz razlike v masi. Od mase pa so odvisne značilnosti in življenjska pot zvezd. Iz HR-diagrama zvezdne kopice lahko določimo tudi njeno starost. Če je bilo na začetku v kopici dovolj zvezd, npr. 100, so bile zastopane tudi različne mase. Vemo tudi, kako dolgo živijo zvezde z določeno maso (masivne zvezde živijo malo časa, manj masivne pa dolgo).

1.3 Odprta zvezdna kopica M67

Opazovali smo zvezdno kopico M67 (tudi NGC 2682), ki leži v smeri ozvezdja Rak. Ta kopica je ena najstarejših znanih odprtih kopic. Leta 1779 jo je odkril Johann Gottfried Koehler, naslednje leto pa neodvisno od njega še Charles Messier.

Rektastenžija: $\alpha = 8\text{h } 51\text{m } 18\text{s}$

Deklinacija: $\delta = 11^\circ 48' 00''$

Oddaljenost: 2700 svetlobnih let (po Webda: 908 pc)

Starost: 4 milijarde let

M67 ima okoli 500 zvezd, od tega jih je okoli 100 na glavni veji podobnih Soncu. V kopici je tudi okoli 150 pritlikavk in okoli 30 nenavadno vročih modrih zvezd nepojasnjenega izvora, imenovanih »blue stragglers«. Zanimivo je, da glavna veja ne vsebuje zelo vročih svetlo modrih zvezd (spektralni tipi F, A, B, O).



Slika 3: Rdeča pika označuje lego kopice M67 na nebu (Vir: Google Earth)

2 OPAZOVANJE

Za opazovan objekt smo si izbrali razsuto kopico M 67, ki je najstarejša znana kopica in eden izmed največkrat opazovanih objektov na nebu. Opazovanja smo 10. aprila 2007 opravili na astronomsko-geofizikalnem observatoriju Golovec.

Uporabljali smo teleskop Vega. Z enim računalnikom smo krmilili teleskop, z drugim pa CCD-kamero. Ob pomoči g. Bojana Dintinjane smo s CCD-kamero kopico posneli z vidnim (V) in modrim (B) filtrom. Z opazovanjem smo imeli nekaj težav, saj se je nebo med opazovanjem pooblačilo, pokvaril pa se je tudi motor, ki skrbi za obračanje barvnih filtrov na kameri. Kljub vsemu nam je uspelo posneti 4 slike v vidnem (s časom izpostavljenosti 60, 30 in 20 sekund) in 4 v modrem filtru (180, 90 in 60 sekund).

Najprej smo ugotovili, kakšno je stanje teleskopa:

tx status

Vključili smo sledenje:

tx track on

Potem smo teleskop obrnili v smeri M67:

tx point 08:51:18 11:48:0

Da bi bil šum čim manjši, smo ohladili kamero z 18° na -20°.

Vključili smo tudi premik s kupolo:

tx dome on

Najprej smo nastavili filter V:

filter init

filter set V

Nato smo izostrili teleskop, t.j. določili naustreznejšo goriščno razdaljo (8.63 mm).

Naredili smo več posnetkov z različnimi izpostavljenostmi (v nadaljevanju: t_{exp}). Pri krajši ekspoziciji ($t_{\text{exp}}=30$ s) smo dobili le svetlejše zvezde. Pri daljši ekspoziciji ($t_{\text{exp}}=60$ s) smo videli manj svetle zvezde, svetlejše pa so bile presvetle, zato meritev zanje nismo mogli opraviti. Naredili smo še posnetke v B filtru. V teh primerih so bile izpostavljenosti daljše. Paziti smo morali še na šum, ki narašča linearno s časom. Zato smo slikali tudi temo, da bi to napako lahko čim bolje upoštevali. K napaki je prispevala tudi različna občutljivost celic na CCD-kameri.

Pridobljeni podatki našega opazovanja so dostopni na <http://astro.ago.uni-lj.si/podatki/V2007-04-10/>.



Slika 4: Pogled v nočno nebo skozi odprto kupolo astronomskega observatorija na Golovcu (10.april 2007)



Slika 4: Kopica M67 v vidnem filtru (posneto 10. april 2007), $t_{\text{exp}}=60$ s, originalna velikost 2049×2049 px

3 OBDELAVA PODATKOV

S pomočjo programskega paketa IRAF smo posnetke, pridobljene s CCD kamero, grafično obdelali. Za obdelavo smo si izbrali naslednje posnetke:

- (i) posnetek v vidnem ($t_{\text{exp}}=60$ s) in posnetek v modrem filtru ($t_{\text{exp}}=180$ s)
- (ii) posnetek v vidnem ($t_{\text{exp}}=20$ s) in posnetek v modrem filtru ($t_{\text{exp}}=60$ s).

Slike, posnete z daljšim ekspozicijskim časom, so natančnejše. V daljši časovni enoti na enoto kamere pade več fotonov, zato dobimo natančnejše povprečje zaznanih fotonov na časovno enoto. Zato smo za glavne podatke izbrali tiste, ki smo jih dobili iz prvega para posnetkov kopice. Zaradi ekspozicijskega časa (180 oz. 60 s) so bile svetlejšje zvezde na posnetku presvetljene, podatki o magnitudi pa neuporabni. Zato smo podatke dopolnili s podatki, pridobljenimi iz drugega para posnetkov s krajšim ekspozicijskim časom (60 oz. 20 s).

Najprej smo od posnetkov kopice »odšteli« dark in bias. S tem smo zmanjšali napako zaradi šuma CCD kamere in termičnega šuma.

Najprej smo obravnavali par (i) posnetkov z najdaljšim ekspozicijskim časom, in sicer 60-sekundni posnetek v vidni svetlobi ter 180-sekundni posnetek v modrem filtru, nato pa še par (ii) s krajšima ekspozicijskima časoma (20 sekund v vidni svetlobi in 30 sekund v modrem filtru).

Preden smo z ukazom *daofind* »poiskali« zvezde na posnetku, smo z ukazom *datapars* nastavili parametre, ki so odvisni od v posnetku vsebovanih podatkov. Nanašajo se na karakteristike šuma, rang linearnosti detektorja in opazovalne razmere.

Parameter σ ocenjuje standardni odklon slikovnih točk ozadja, t.j. neba. Algoritem funkcije *daofind* to vrednost uporabi za določanje praga med zvezdo in ozadjem. Nastavili smo vrednost 22 za posnetek v vidni in 33 za posnetek v modri svetlobi.

Datamin in *datamax* parametra definirata rang uporabnih podatkov. *Datamin* določa minimalno vrednost števila uporabnih pikslov, *datamax* pa maksimalno. Nastavili smo vrednost 100 pri parametru *datamin* in 50.000 pri parametru *datamax*.

Preko ukaza *daofind* smo na paru posnetkov (i) določili koordinate 459 zvezd, ki so ustrezale določenim parametrom, in njihove »magnitudo«. Na paru (ii) pa smo preko istega ukaza poiskali 232 zvezd s pripadajočimi podatki.

Potem smo preko ukaza *phot* izvedli fotometrijo posnetkov na tekstovni datoteki .coo, ki jo je zgeneriral ukaz *daofind*. Dobili smo novo tekstovno datoteko .mag z zajetimi podatki o zvezdah. Program je pri tem na podlagi nastavljenih parametrov sam izločil tiste podatke, ki so pripadale »presvetljenim« zvezdam.

Tabelo meritev smo uredili z ukazom *psort*, z ukazom *pdump* pa smo izločili odvečne stolpce podatkov (ohranili smo stolpce id, x, y, mag).

Sliki, posneti v vidnem in modrem spektru, nista bili povsem poravnani, zato je bilo potrebno najti transformacijo med enimi in drugimi koordinatami, t.j. ustrezno rotacijsko matriko in vektor translacije v koordinatnih smereh. Povezavo med koordinatami smo dobili s pomočjo ukaza *match*. Kot rezultat smo dobili dve tekstovni datoteki, v katerih so bili podatki o

magnitudah poravnani. Iz obeh smo sedaj sestavili novo datoteko, ki vsebuje podatke o magnitudah B in V, ter izračunali barvni indeks B-V.

Da bi dobili prave podatke o magnitudah, je bilo potrebno izvesti še kalibracijo. V spletnem katalogu zvezdnih kopic Webda dunajske univerze (<http://www.univie.ac.at/webda>) poiskali podatke o posameznih zvezdah v opazovani kopici in interaktivni posnetek kopice. Na obeh slikah smo locirali isto skupino zvezd in tako smo lahko primerjali znane podatke z našimi. Na ta način smo prišli do željenega premika, da so naši podatki sovpadli z že znanimi.

Zaporedna številka zvezde		Podatki v katalogu		Podatki meritev			Translacija	
Posnetek	Katalog	V	B-V	V	B	B-V	V	B-V
255	83	13,24	0,605	17,27	17,31	0,04	4,03	0,565
266	1018	15,08	0,92	18,85	19,17	0,32	3,77	0,6
209	72	12,40	0,985	16,15	16,50	0,35	3,75	0,635

Tabela 3: Kalibracija podatkov na osnovi slik posnetih v vidnem ($t_{\text{exp}} = 60$ s) in modrem filtru ($t_{\text{exp}} = 180$ s)

4 REZULTATI

Ko smo imeli vse potrebne podatke, smo HR-diagram narisali kot graf s pomočjo programa Matlab.

Oznaka:

Par (i) - posnetek v vidnem ($t_{\text{exp}}=60$ s) in posnetek v modrem filtru ($t_{\text{exp}}=180$ s)

Par (ii) - posnetek v vidnem ($t_{\text{exp}}=20$ s) in posnetek v modrem filtru ($t_{\text{exp}}=60$ s)

Nekalibrirani podatki so prikazani v spodnjem grafu.

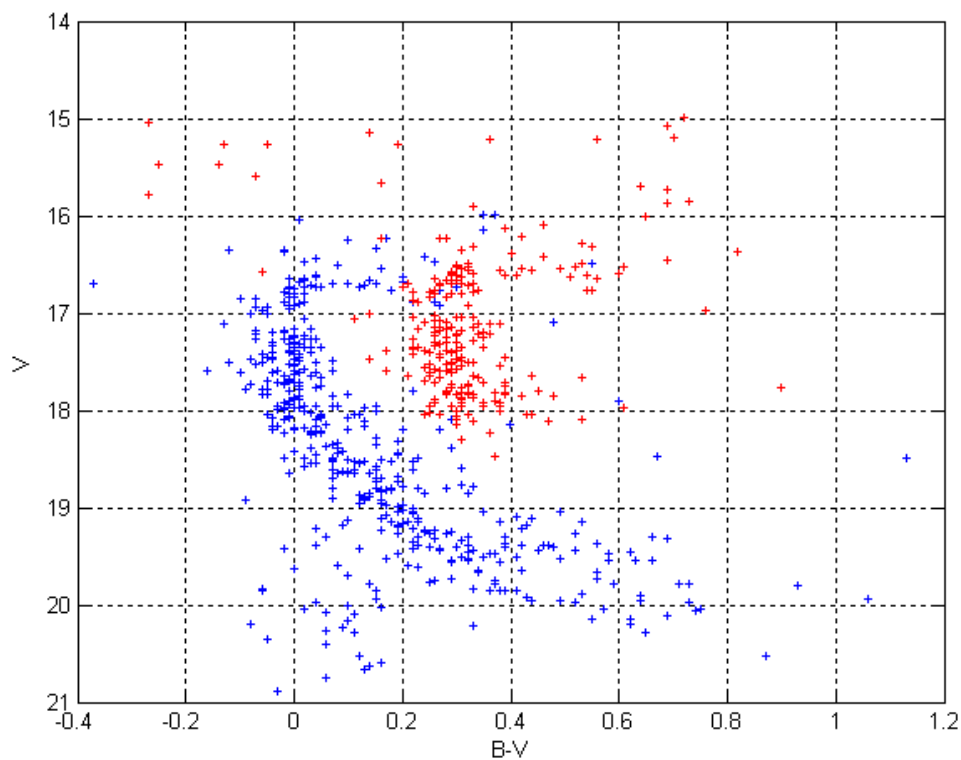


Diagram 1: Nekalibriran HR-diagram zvezdne kopice M67 na podatkov parov (i) in (ii)

Po zgoraj opisanem postopku kalibracije »popravljen« podatke para (i) o barvnem indeksu (B-V) in navidezni magnitudi v vidnem spektru (V) prikažemo v spodnjem diagramu:

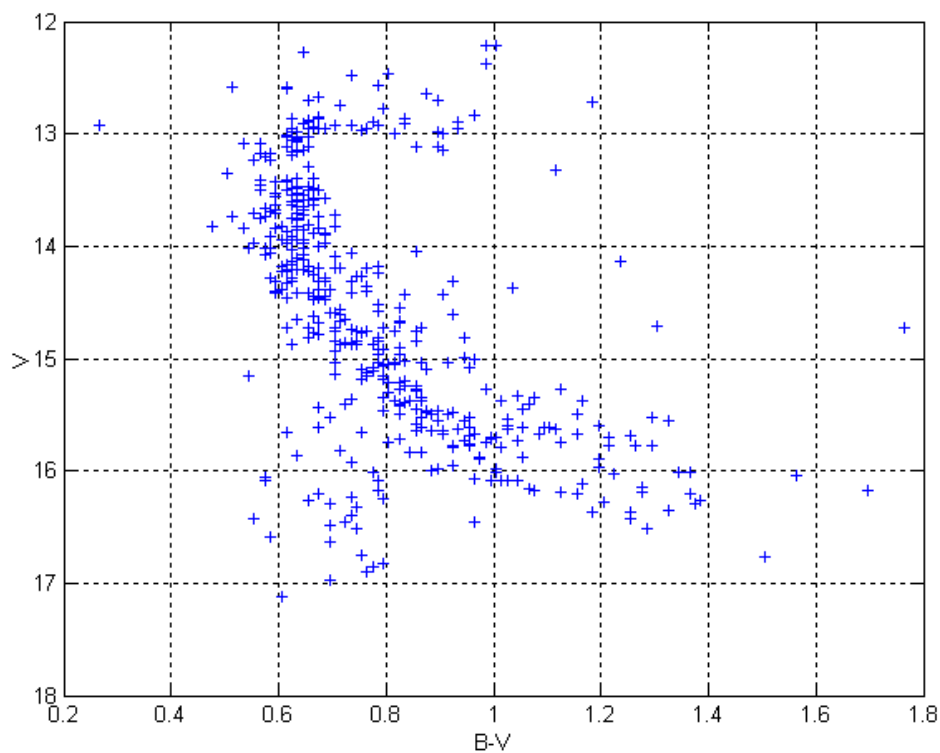


Diagram 2: Kalibriran HR-diagram zvezdne kopice M67 na osnovi podatkov para (i)

Nato smo upodobili še analogno kalibrirane podatke 232 zvezd, pridobljenih preko fotometrije posnetkov v paru (ii).

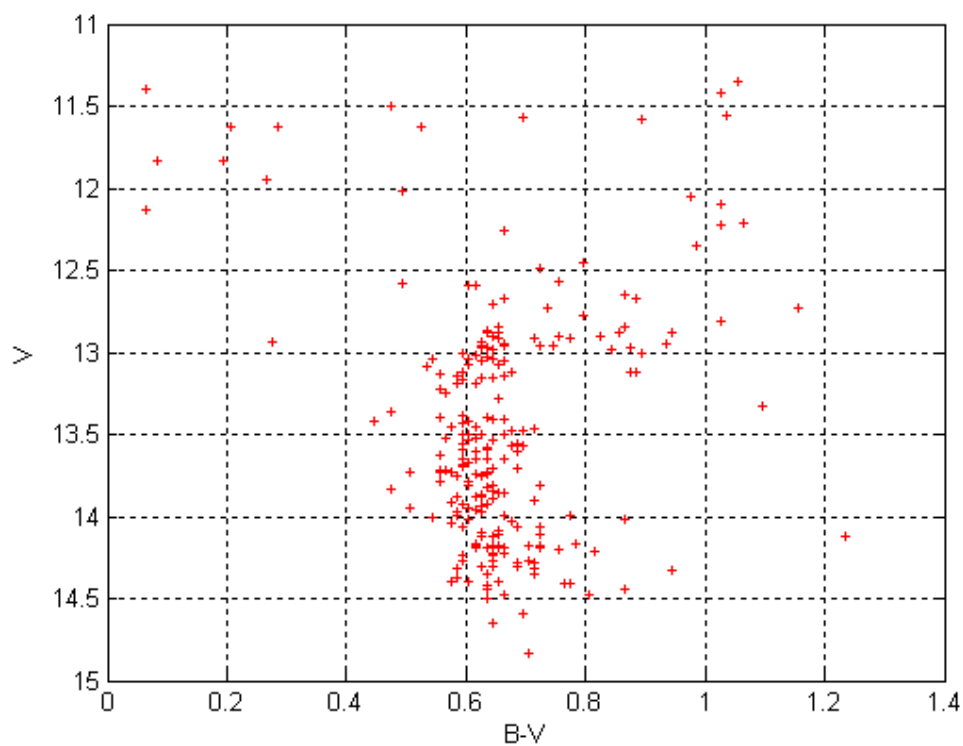


Diagram 3: HR-diagram zvezdne kopice M67 na osnovi podatkov para (ii)

Iz grafa je razvidno, da Diagram 3 prikazuje tudi zvezde z nižjo vidno magnitudo. Med njimi je tudi nekaj takih, ki so bile na prvi sliki presvetljene. Zato smo želeli oba diagrama združiti, da bi dobili natančnejši diagram tako s svetlejšimi kot tudi s temnejšimi zvezdami.

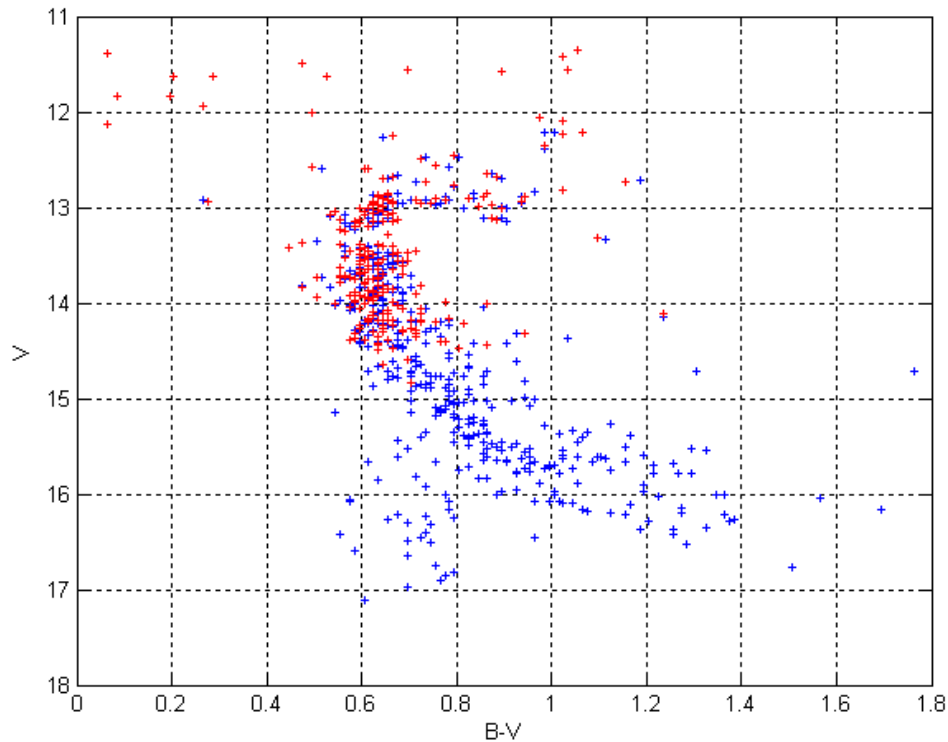


Diagram 4: HR-diagram zvezdne kopice M67 na osnovi podatkov parov (i) in (ii)

Iz zgornjega Diagrama 4 je razvidno, da podatki zvezd z magnitudo višjo od 12.22 iz para (ii) sovpadajo s podatki zvezd iz para (i). nastopajo v parih, zato smo zmanjšali mejno magnitudo. Zato smo v zadnji fazi upoštevali le 26 zvezd iz območja $[11, 12.22] \times [0, 1.2]$, kjer jih v prvi meritvi sploh nismo dobili, podatke o ostalih 206 podvojenih zvezdah iz obdelave posnetkov (ii) pa smo zavrgli.

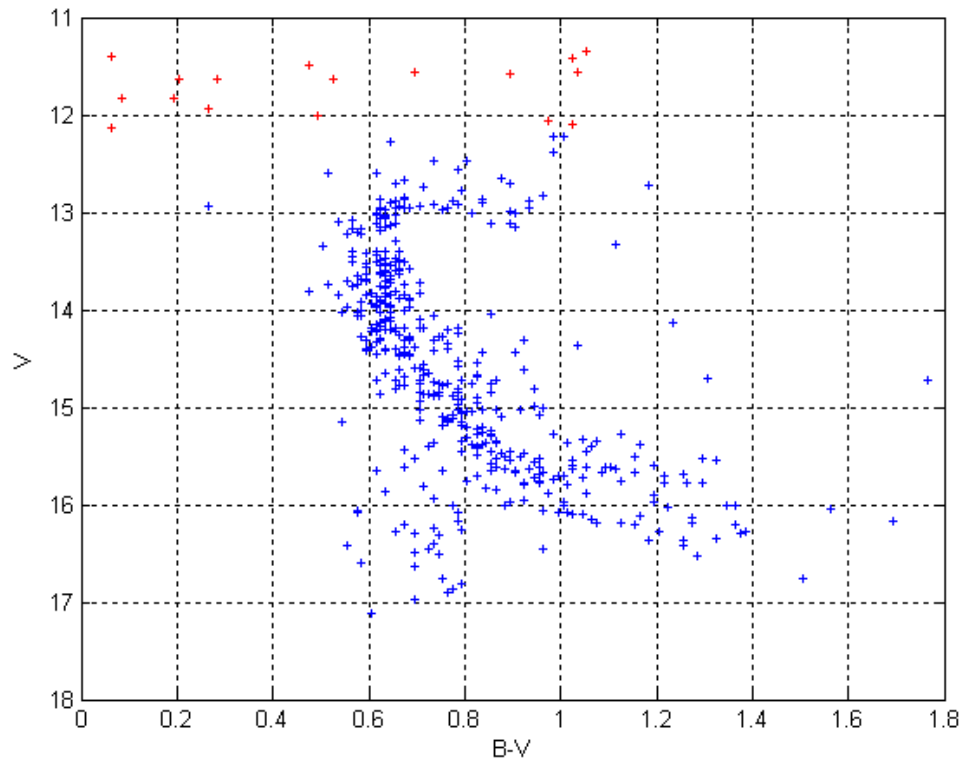
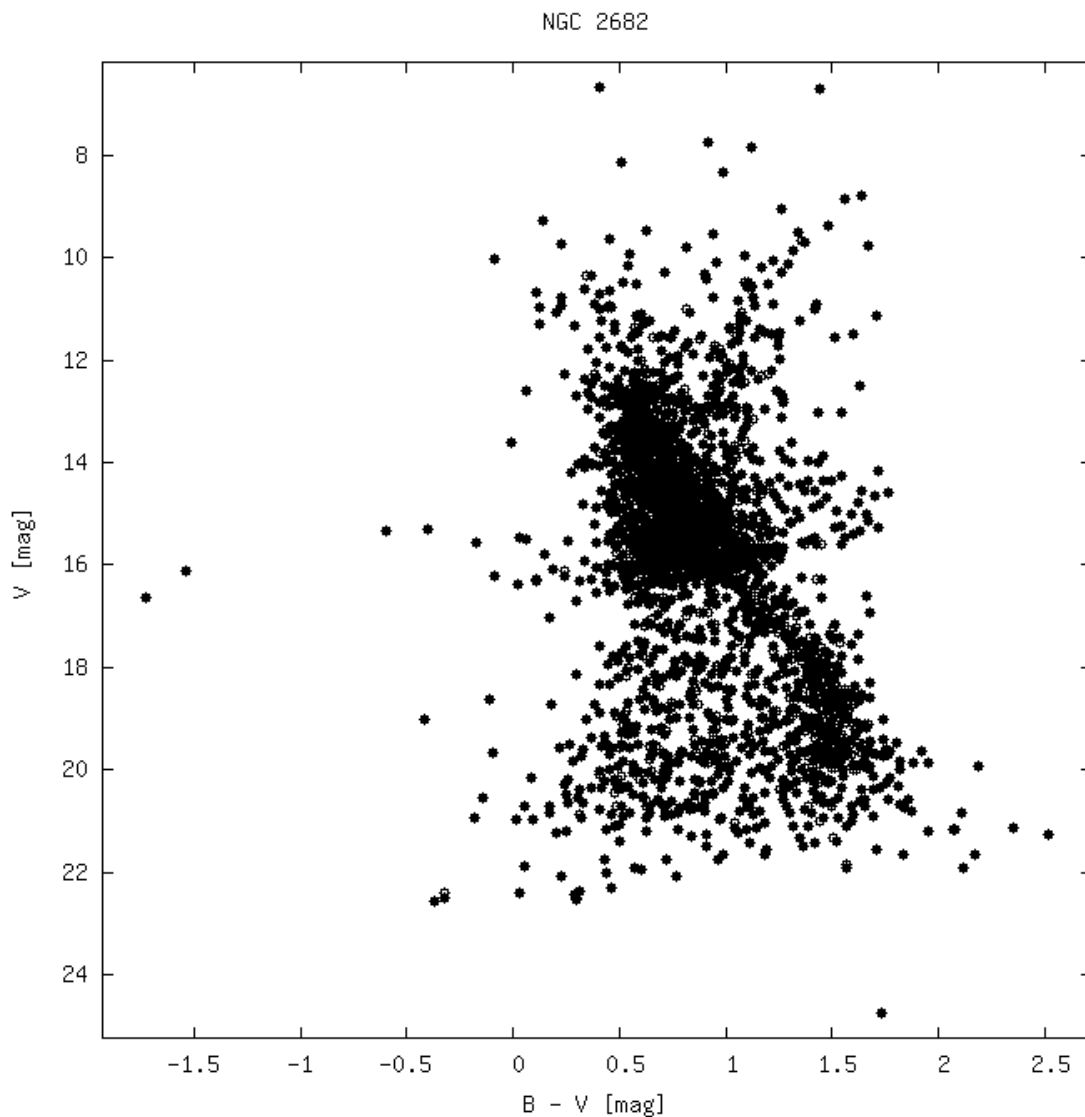


Diagram 5: Končni HR-diagram razsute zvezdne kopice M67

5 KOMENTAR ZBRANIH PODATKOV

Preko opazovanj in fotometrične obdelave para svojih posnetkov z »najdaljšim« (t.j. $t_{\text{exp}}(\text{V})=60$ s, $t_{\text{exp}}(\text{B})=180$ s) in in »najkrajšim« ($t_{\text{exp}}(\text{V})=20$ s, $t_{\text{exp}}(\text{B})=60$ s) časom izpostavljenosti smo pridobili podatke o 485 zvezdah razsute zvezdne kopice M 67. V spletnem katalogu galaktičnih zvezdnih kopic Webda je vpisanih kar 9301 različnih zvezd te kopice, katerih podatki o barvnem indeksu B-V in magnitudi V v vidnem spektru so prikazani na spodnjem HR diagramu.



Slika 5: HR-diagram kopice M67 iz kataloga WEBDA

Iz opazovalnih podatkov smo pridobili 485 različnih zvezd na magnitudnem območju $[0, 1.8] \times [11, 18.5]$, zvezde Webdinega kataloga pa pripadajo območju $[-0.75, 2.52] \times [6.65, 24.75]$.

Glede na znane podatke o M 67 v katalogu Webda lahko analiziramo tip zvezd, prikazanih v diagramu 3.

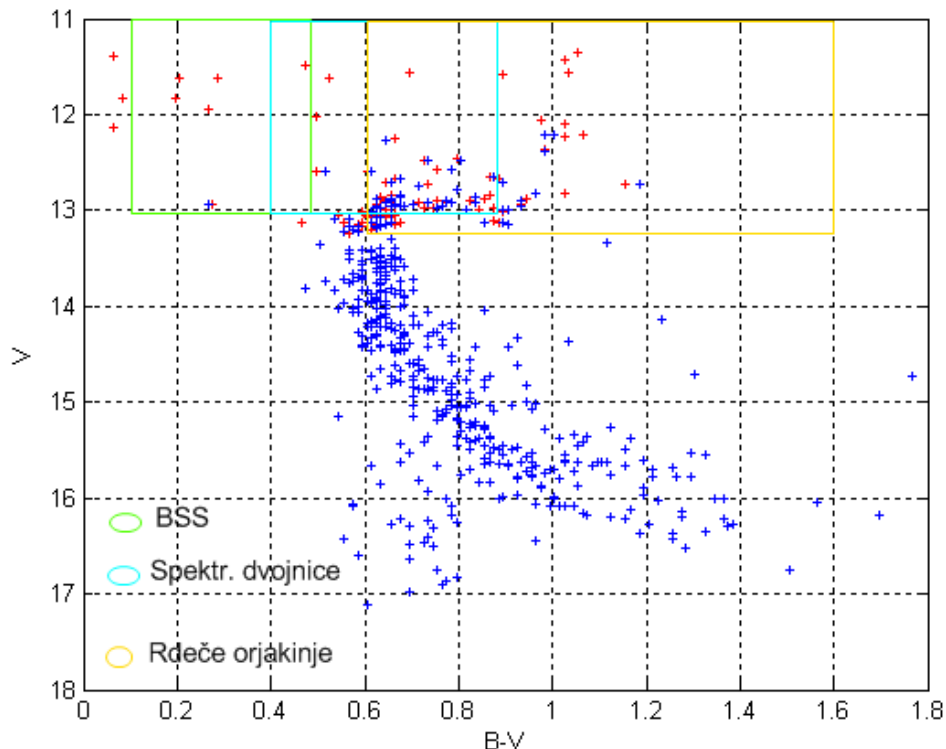
Svetlejšje zvezde z V magnitudo med 6 in 11 smo izgubili med obdelavo zaradi saturacije. Lahko pa bi jih zajeli preko dodatnih posnetkov s krajšim ekspozicijskim časom (pod 20 s oz. 30 s). Podobno bi s podaljšanjem ekspozicijskega časa lahko zajeli tudi več temnejših zvezd z V magnitudo med 17 in 23.

Glavna veja je v dobljenem HR diagramu jasno vidna, vidne pa so tudi modre in rdeče orjakinje v zgornjem delu nad glavno vejo ter pritlikavke pod njo.

Rdeče orjakinje se po podatkih iz Webde nahajajo na območju $[0.59, 1.67] \times [7.85, 13.15]$. To pomeni, da so vidne tudi v našem diagramu. Podatke najsvetlejših izmed njih pa smo dobili prav z obdelavo para posnetkov (ii).

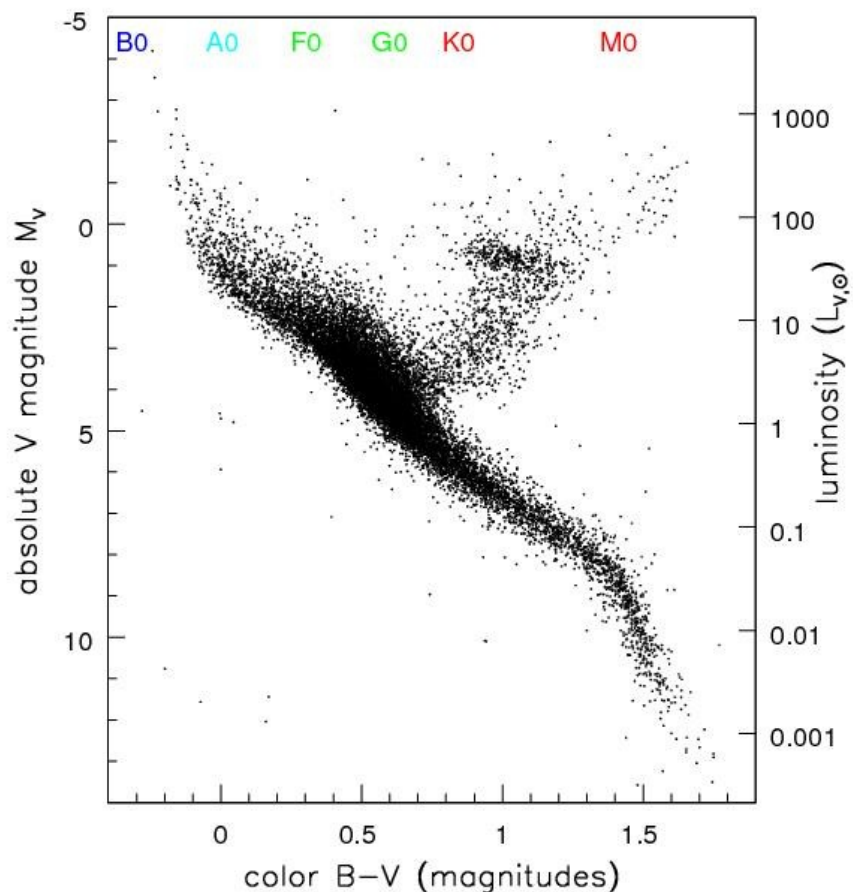
Na območju $[0.4, 0.9] \times [10, 13.1]$ se nahaja glavnina spektralnih dvojnic te kopice.

Zgostitev vročih in svetlih modrih zvezd, imenovanih »blue stragglers« (oznaka: BSS), ki se v zvezdnih kopicah nahajajo blizu jedra, v HR diagramu najdemo na območju $[0.10, 0.48] \times [10.68, 11.28]$. V našem HR diagramu se nahajajo v skrajnem levem zgornjem kotu.



Slika 6: Razporeditev različnih tipov zvezd v HR-diagramu kopice M 67

Na podlagi dobljenih podatkov lahko izračunamo oddaljenost kopice M 67, saj imajo vsi HR-diagrami pri istem barvnem indeksu enako absolutno magnitudo. S pomočjo tega dejstva lahko iz znanega HR-diagrama dobimo absolutno magnitudo za poljuben HR-diagram. To uporabimo tudi v našem primeru, kjer si pomagamo s **Hipparcosovim HR-diagramom**.



Slika 7: HR-diagram zvezd na podlagi meritev satelita Hipparchos

Izberemo barvni indeks 0.8 in odčitamo povprečno absolutno vizualno magnitudo $M = 5.5$ na Hipparcosovem HR-diagramu, na našem diagramu pa povprečno navidezno vizualno magnitudo $m = 15$. Torej lahko po formuli

$$M = m - 5 \log \frac{d}{d_0}, \text{ kjer je } d_0 = 10 \text{ pc, izračunamo oceno za oddaljenost kopice M67.}$$

Opravimo račun:

$$M=5.5, m=15, d_0 = 10 \text{ pc}$$

$$d = d_0 \cdot 10^{(m-M)/5} = 10 \text{ pc} \cdot 10^{(15-5.5)/5} \approx 795 \text{ pc} \approx 2600 \text{ svetlobnih let}$$

Po naši oceni je kopica M 67 oddaljena približno 2600 svetlobnih let (po podatkih iz kataloga pa okoli 2700 sv.let).

6 VIRI IN LITERATURA

1. Robert Jastrow, Malcolm H. Thompson: Astronomy: fundamentals and frontiers (1984)
2. France Avsec: Astronomija (1975)
3. Messier 67: <http://seds.org/messier/m/m067.html>
4. Messier 67: http://en.wikipedia.org/wiki/Messier_67
5. Katalog zvezdnih kopice Webda:
http://www.univie.ac.at/webda/cgi-bin/ocl_page.cgi?dirname=ngc2682
6. Blue stragglers: <http://www.solstation.com/x-objects/bluestrag.htm>
7. IRAF Help Pages: <http://iraf.noao.edu/iraf-help.html>

7 VSEBINA

1 Teoretični uvod.....	2
1.1 Hertzsprung –Russellov diagram.....	2
1.2 Zvezdne kopice.....	5
1.3 Odprta zvezdna kopica M67.....	6
2 Opazovanje.....	7
3 Obdelava podatkov	9
4 REZULTATI	11
5 Komentar Zbranih Podatkov.....	15
6 VIRI IN LITERATURA.....	18
7 Vsebina.....	18