
Dušan Vukadinović

Određivanje osnovnih parametara otvorenih jata Tr14 i Tr16

Procenjivani su osnovni parametri otvorenih jata Trumpler 14 (Tr14) i Trumpler 16 (Tr16): višak boje (eng. color-excess), moduo udaljenosti, starost i metaličnost jata. Ovi parametri su ocenjeni traženjem sintetičkog CM dijagrama (dobijenog variranjem početnih vrednosti mase i metaličnosti) koji se najbolje poklapa sa CM dijagramom jata, korišćenjem dva metoda: metoda najbližeg suseda (zasnovanog na minimizaciji sume kvadrata rastojanja na CM dijagramu), i metoda χ^2 minimizacije (zasnovan na minimizaciji sume razlika indeksa boje). Pomoću metoda najbližeg suseda dobijena je udaljenost jata koja je znatno veća nego što je očekivana vrednost. Udaljenost jata dobijena metodom χ^2 minimizacije približna je vrednostima datim u literaturi. Takođe, višak boje je za oba jata pri obema metodama veći od očekivane vrednosti. Starost jata dobijena metodom najbližeg suseda je u očekivanom intervalu (od 1 do 6 miliona godina) dok je primenom minimizacije starost znatno veća (od 10 do 20 miliona godina). Za metaličnost oba jata dobijen je značajno širok interval vrednosti i time ne može se tačno proceniti metaličnost oba jata. Metaličnost jata Tr14 se veoma dobro slaže sa vrednošću datoj u literaturi.

Uvod

Otvorena jata karakteriše mali broj zvezda (nekoliko stotina) i nepravilan oblik. Zbog male koncentracije zvezda dolazi do raspadanja jata nakon nekog vremena. Starost mladih otvorenih jata je nekoliko miliona godina, a starijih nekoliko stotina miliona godina (Vukićević-Karabin i

Atanacković 2010). Zvezde koje pripadaju jednom jatu nastale su u približno istom trenutku i sličnog su hemijskog sastava. Sa druge strane, zvezde koje sačinjavaju jato imaju različite mase. Masa zvezde određuje brzinu njene evolucije. U zavisnosti mase, zvezda će na HR dijagramu biti u različitim stadijumima evolucije. Poređenjem posmatranog HR dijagrama jata sa sintetičkim HR dijagramom možemo proceniti parametre datog jata. Sintetički HR dijagram predstavlja evolucionu put zvezde na HR dijagramu za datu vrednost mase i hemijskog sastava (detaljan opis je dat u odeljku o metodi). Ovo poređenje podrazumeva da se sve zvezde jata nalaze na istom rastojanju od Zemlje.

Osnovni parametri jata su: višak boje (eng. color-excess), moduo rastojanja, starost i metaličnost. Ove parametre moguće je proceniti sa CM (eng. Color-Magnitude) dijagrama jata. CM dijagram predstavlja jednu od varijanti HR dijagrama. Na apscisi CM dijagrama dat je indeks boje (eng. color index), dok je na ordinati data apsolutna ili prividna magnituda zvezde. Indeks boje računa se kao razlika prividne ili apsolutne magnituda zvezde u dva različita filtera. Tokom evolucije zvezde menja se njen indeks boje, kao i apsolutna magnituda.

Oblast CM dijagrama u kojoj se nalaze zvezde koje sagorevaju vodonik naziva se glavni niz. Zvezda najviše vremena provede na glavnom nizu, dok kasnije prelazi u fazu crvenog džina. Odlika mladih jata je da se najveći broj zvezda nalazi na glavnom nizu CM dijagrama jata.

Trumpler 14 (Tr14) i Trumpler 16 (Tr16) su mlada otvorena mlada jata koja se nalaze na južnoj nebeskoj polusferi u maglini η Carina (NGC 3372). Hur i saradnici (2012) odredili su moduo rastojanja do jata Tr 14 i Tr 16 koji je jednak za

Dušan Vukadinović (1994), Niš, Ljička 9, učenik 4. razreda Gimnazije „Svetozar Marković” u Nišu

MENTOR: Ivan Milić, Astronomska Opservatorija Beograd

oba jata i iznosi $\mu = 12.3 \pm 0.2$. Takođe, procenili su da je višak boje (color-excess) oba jata 0.36 i starost između 1 i 3 miliona godina. Tapia i saradnici (2003) procenili su starost ova dva jata na između 1 i 6 miliona godina. U radu Paunzena i saradnika (2010) za metaličnost jata Tr14 dobijena je vrednost koja je približna Sunčevoj metaličnosti od 0.02.

Cilj ovog rada je da se procene osnovni parametri jata Trumpler 14 i Trumpler 16: višak boje, moduo udaljenosti, starost i metaličnost. Ovi parametri procenjeni su poređenjem CM dijagrama jata sa sintetičkim CM dijagramima. Za mere odstupanja ovih CM dijagrama iskorišćene su dve metode: metod najbližeg suseda i χ^2 minimizacija.

Metod

Sintetički CM dijagrami

Početni uslovi za zvezdu koja evoluira su njena masa i hemijski sastav. Iz ovih ulaznih parametara mogu se proceniti apsolutna magnituda i indeks boje zvezde u svakom trenutku njene evolucije. Na osnovu ovih vrednosti konstruisani su sintetički CM dijagrami (eng. stellar isochrones).

Lejeune i Schaerer (2001) konstruisali su sintetičke CM dijagrame za različite početne mase: $0.8 - 120 M_{\odot}$ (M_{\odot} – masa Sunca) i metaličnosti: $0.001 - 0.1$. Iz ovih početnih uslova dobijen je interval starosti sintetičkih CM dijagrama od milion do 16 milijardi godina. U našem radu korišćeni su sintetički CM dijagrami za ceo interval metaličnosti i za starost u intervalu 1-32 miliona godina.

Parametri jata

Osnovni parametri jata su moduo rastojanja (μ), višak boje ($E(B-V)$), metaličnost (Z) i starost ($\log t$). Indeks boje dat je razlikom magnituda zvezde u dva različita filtera. U ovom radu indeks boje dat je kao razlika magnituda zvezde u B i V filteru. Usled prolaska svetlosti kroz međuzvezdanu sredinu dolazi do njenog apsorbovanja. Parametar koji opisuje promenu magnitude usled apsorbovanja svetlosti naziva se ekstinkcija, A . Svetlost većih talasnih dužina biće manje

apsorbovana nego svetlost manjih talasnih dužina (Vukićević-Karabin i Atanacković 2010). Odnosno, postoji različita ekstinkcija u B i V filteru (A_B i A_V , respektivno). Usled ekstinkcije dolazi do promene indeksa boje posmatrane zvezde. Promena indeksa boje predstavlja razliku ekstinkcije u B i V filteru. Ova promena indeksa boje naziva se višak boje i data je jednačinom:

$$E(B-V) = A_B - A_V = (B-V)_p - (B-V)_s$$

gde je $(B-V)_p$ posmatrani, a $(B-V)_s$ stvarni indeks boje. Za udaljenije objekte parametar viška boje ima veću vrednost.

Moduo rastojanja je parametar koji predstavlja razliku prividne i apsolutne magnitude zvezde i ekstinkcije u istom filteru (V filter u ovom radu) i dat je jednačinom (1). V filter je standardan filter koji se koristi za određivanje modula rastojanja. Moduo rastojanja μ povezan je sa rastojanjem od posmatrača, r , kao:

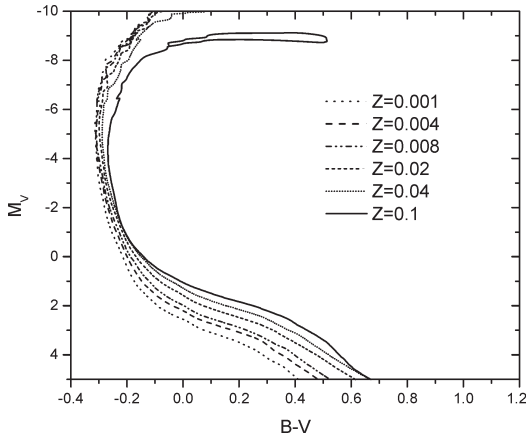
$$\mu = 5 \log r - 5 = (m_v - M_v) - A_v \quad (1)$$

Parametar koji predstavlja populaciju zvezda koje čine jato je metaličnost. Na metaličnost jata utiče samo pozicija jata u odnosu na galaktički centar (Friel 1995). Jata koja su bliža galaktičkom centru bi trebala imati veću metaličnost nego ona jata koja se nalaze na obodu galaksije. Na slici 1 predstavljeni su sintetički CM dijagrami starosti $\log t = 65$ gde je interval metaličnosti od 0.001 do 0.1. Sintetički CM dijagrami koji imaju veću metaličnost teže tome da se deo grane crvenih džinova (deo iznad glavnog niza jata) poravnava sa apscisom. Sa većom metaličnošću zvezde teže da ranije napuste glavni niz.

Starost jata predstavlja vreme koje je proteklo od nastanka zvezda u jatu do sadašnjeg trenutka i ovde je data u logaritamskom obliku.

Fitovanje glavnog niza je poređenje glavnog niza jata čiji se parametri procenjuju i glavnog niza nekog drugog jata čije parametre od ranije znamo. Kao poredbeno jato u ovom radu korišćeni su sintetički CM dijagrami. Prilikom poređenja CM dijagrama jata i sintetičkih CM dijagrama korišćene su dve metode: metod najbližeg suseda i minimizacija.

Metod najbližeg suseda. Za svaku tačku sa CM dijagrama jata pronađena je najbliža tačka sa sintetičkog CM dijagrama. Suma kvadrata naj-



Slika 1. Sintetički CM dijagrami starosti i metaličnosti u intervalu od 0.001 do 0.1. Poređenja radi, Sunčeva metaličnost je 0.02.

Figure 1. On this graph we presented differences between stellar isochrones for age and for different metallicity. Solar metallicity is 0.02.

manjih rastojanja predstavlja meru odstupanja ova dva CM dijagrama.

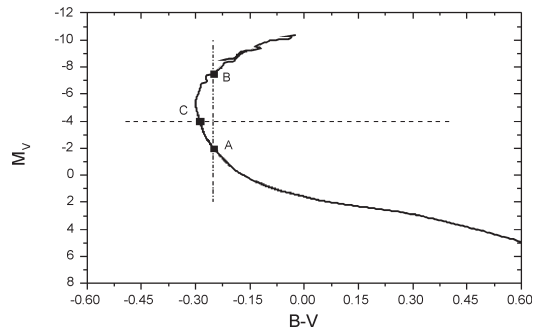
χ^2 minimizacija. Vrednost distanci računata je samo po indeksu boje kao:

$$\chi^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{(B_i - V_i)_{\text{jato}} - (B_i - V_i)_{\text{model}}}{\Delta BV_i} \quad (2)$$

gde N predstavlja broj tačaka na CM dijagramu, $(B_i - V_i)_{\text{jato}}$ je indeks boje zvezda u jatu, ΔBV_i greška indeksa boje i $(B_i - V_i)_{\text{model}}$ indeks boje zvezde na sintetičkom CM dijagramu (Hur *et al.* 2012).

Kako bi se odredio χ^2 potrebno je naći tačku sa sintetičkog CM dijagrama koja ima istu vrednost apsolutne magnitute kao razmatrana tačka na CM dijagramu jata. Zbog toga je potrebno izvršiti linearnu interpolaciju između svake dve susedne tačke sintetičkog CM dijagrama. Ovime se ne pravi velika greška zbog toga što su susedne tačke sintetičkog CM dijagrama veoma blizu.

Na slici 2 prikazan je sintetički CM dijagram starosti $\log t = 6.5$ i metaličnosti $Z = 0.02$. Za jednu vrednost indeksa boje na sintetičkom CM dijagramu postoje dve tačke (A i B) sa različitim vrednošću magnitute. Zbog ovoga je potrebno naći uslov za izbor tačke kojom će se predstaviti



Slika 2. Sintetički CM dijagram starosti $\log t = 6.5$ i metaličnosti 0.02.

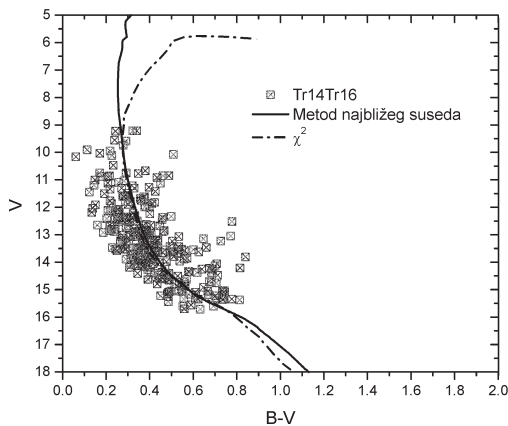
Figure 2. Stellar isochrone with age $\log t = 6.5$ and metallicity 0.02.

odstupanje sintetičkog CM dijagrama od CM dijagrama jata. Međutim, ukoliko posmatramo jednu vrednost V magnitute, postoji samo jedna tačka na sintetičkom CM dijagramu (tačka C, slika 2) sa jedinstvenom vrednošću indeksa boje. Ovim postupkom, odstupanje sintetičkog CM dijagrama od CM dijagrama jata karakterisano je jedinstvenom vrednošću.

Iz rada Hura i saradnika (2012) preuzeti su posmatrani indeks boje ($B - V$), magnituda u V filteru, m_V , i greška za indeks boje ΔBV zvezda u jatima Tr14 i Tr16. Cudworth i saradnici (1993) odredili su verovatnoću pripadnosti svake zvezde jatu na osnovu višegodišnjeg posmatranja sopstvenog kretanja zvezda. U prethodnom radu (Hur *et al.* 2012), sve zvezde čija je verovatnoća pripadnosti jatu veća od 0.7 predstavljene su kao zvezde jata. U našem radu uzete su zvezde čija je verovatnoća pripadnosti veća od 0.75 kako bi se sa što većom sigurnošću izbegle zvezde koje ne pripadaju jatu. Ukoliko bi se uzele veće verovatnoće pripadnosti, broj zvezda jata bio bi manji. Manji broj zvezda onemogućio bi tačno procenjivanje parametara jata.

Rezultati i diskusija

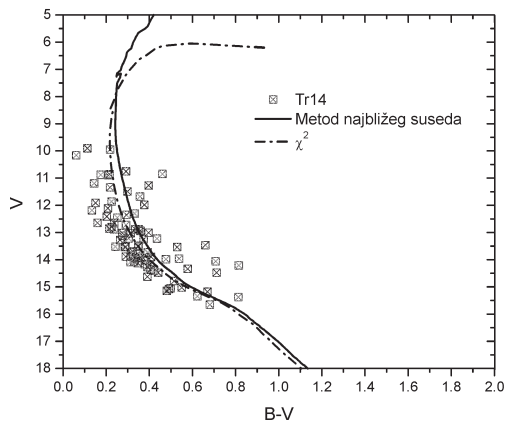
Traženjem sintetičkog CM dijagrama koji se najbolje poklapa sa CM dijagramom jata procenjeni su osnovni parametri jata. Poređenje ovih CM dijagrama vršeno je metodom najbližeg suseda i χ^2 minimizacijom. Na slici 3 prikazan je



Slika 3. CM dijagram oba jata, Tr14 i Tr16, i sintetički CM dijagrami koji najbolje fituje data jata pod pretpostavkom da oni čine jednu grupu zvezda. U tabeli 1 i 2 dati su parametri ovih sintetičkih CM dijagrama.

Figure 3. CM diagram of clusters Tr14 and Tr16 when we assumed these two clusters present one group of stars because of the parameters similarity. Also, we showed stellar isochrones which best fit our clusters. Parameters of these isochrones are given in table 1 and 2.

CM dijagram konstruisan na osnovu zvezda iz oba jata (Tr14 i Tr16). Takođe, predstavljeni su i sintetički CM dijagrami koji najbolje opisuju dati CM dijagram. Zvezde jata Tr14 i Tr16 „spojene” su u jednu grupaciju zbog sličnosti parametara



Slika 4. CM dijagram jata Tr14 i sintetičkih CM dijagrama koji najbolje opisuju dato jato. Parametri sintetičkih CM dijagrama koji su predstavljeni na grafiku se nalaze u tabeli 1 i 2.

Figure 4. CM diagram of cluster Tr14 and stellar isochrones which best fit our cluster. Parameters of these stellar isochrones are given in table 1 and 2.

procenjenih u prethodnim radovima (Hur *et al.* 2012). Na slikama 4 i 5 prikazani su pojedinačni CM dijagrami jata Tr14 i Tr16 kao i sintetički CM dijagrami koji najbolje opisuju ova dva jata.

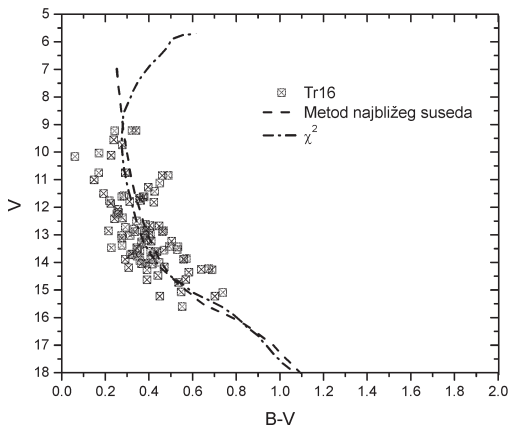
U radu Hura i saradnika (2012) dobijena je vrednost modula rastojanja oba jata od 12.3 i višak boje od 0.36. U istom radu starost ova dva jata procenjena je od 1 do 3 miliona godina, dok

Tabela 1. Procenjeni parametri sintetičkih CM dijagrama za svako jato pojedinačno i kada zvezde jata Tr14 i Tr16 čine jednu grupu koristeći metod najbližeg suseda.

	μ	$E(B-V)$	$\log t$	Z
Tr14 + Tr16	13.3	0.56	6.40	0.02
Tr14	13.00	0.52	6.80	0.02
Tr16	13.15	0.59	6.00	0.008

Tabela 2. Parametri sintetičkih CM dijagrama za svako jato pojedinačno i kada je pretpostavljeno da Tr14 i Tr16 predstavljaju jednu grupu zvezda. Modeli su dobijeni primenom minimizacije.

	μ	$E(B-V)$	$\log t$	Z
Tr14 + Tr16	12.2	0.54	7.3	0.001
Tr14	13.2	0.47	7.0	0.04
Tr16	12.15	0.54	7.3	0.001



Slika 5. CM dijagram jata Tr16 i sintetičkih CM dijagrama koji najbolje opisuju dato jato predstavljene su na gornjem grafiku. Parametri sintetičkih CM dijagrama dati su u tabeli 1 i 2.

Figure 5. CM diagram of cluster Tr16 and stellar isochrones which best fit the cluster. Parameters of this stellar isochrone are given in table 1 and 2.

je u radu Tapia i saradnika (2002) starost procenjena na intervalu od 1 do 6 miliona godina. Za metaličnost jata Tr14 dobijena je vrednost od 0.02 (Paunzen *et al.* 2010). U našem radu metaličnost oba jata procenjena je na intervalu od 0.001 do 0.04 (tabela 1 i 2). Za metaličnost jata Tr14 primenom metode najbližeg suseda dobijena je vrednost koja se poklapa sa vrednošću datoj u radu Paunzen *et al.* (2010).

Sa slike 3 se može primetiti da se dobijeni sintetički CM dijagrami (u celom intervalu variranih metaličnosti i starosti) međusobno ne razlikuju na delu glavnog niza. Veliko odstupanje između ovih modela primećuje se u delu posle glavnog niza jata. Koristeći metod najbližeg suseda procenjena starost jata Tr14 i Tr16 je u očekivanom intervalu (Hur *et al.* 2012, Tapia *et al.* 2003), dok je starost procenjena χ^2 minimizacijom znatno veća. Kod primene metode najbližeg suseda, moglo se desiti da je najbliži sused tačke u gornjem delu CM dijagrama jata neka od tačaka iz faze crvenog džina. Posledica ovoga je manja vrednost starosti jata.

Na slici 1 prikazani su sintetički CM dijagrami za različite metaličnosti (od 0.0001 do 0.1)

i starost $\log t = 65$. Sa slike se primećuje da se glavni niz sintetičkog CM dijagrama pomera ka manjim vrednostima V magnitude. Posledica ovog pomeranja glavnog niza je veća vrednost modula rastojanja jata. Što je metaličnost jata veća time će i moduo rastojanja jata biti veći. Takođe, sintetički CM dijagram je za veće vrednosti metaličnosti pomeren i ka većim vrednostima indeksa boje ($B - V$). Posledica ovoga je veća vrednost viška boje jata. Iz ovoga možemo zaključiti da metaličnost jata značajno utiče na procenjene parametre modula rastojanja i viška boje jata.

Dobijena vrednost viška boje za sve tri grupe približno je ista, ali se razlikuje od vrednosti date u literaturi (Hur *et al.* 2012). Sa slika 3, 4 i 5 se može videti da je veća gustina zvezda upravo sa leve strane sintetičkog CM dijagrama. Iz ovoga možemo zaključiti da bi sintetički CM dijagrami trebali imati manje vrednosti viška boje.

Zaključak

U radu su procenjeni su osnovni parametri otvorenih jata Trumpler 14 (Tr14) i Trumpler 16 (Tr16): višak boje, moduo rastojanja, starost i metaličnost. Rezultati su dobijeni poređenjem CM dijagrama jata sa sintetičkim CM dijagramom na dva načina: metodom najbližeg suseda i metodom χ^2 minimizacije. Metod najbližeg suseda baziran je na minimizaciji sume kvadrata rastojanja između tačaka sa CM dijagrama jata i sintetičkog CM dijagrama. Kod metoda minimizacije minimizirana je suma razlika indeksa boje zvezda.

Metod najbližeg suseda pokazao se kao dobar metod pri proceni metaličnosti i starosti jata. Primenom ovog metoda procenjena je starost oba jata na intervalu od 1 do 6 miliona godina, što se veoma dobro poklapa sa vrednostima datim u literaturi (Hur *et al.* 2012; Tapia *et al.* 2003). Metaličnost jata procenjena je na intervalu od 0.008 do 0.02. Međutim, ovaj metod se nije pokazao kao pogodan pri proceni modula udaljenosti i viška boje.

Moduo udaljenosti jata Tr14 i Tr16 procenjen je u očekivanom intervalu (12.3 ± 0.2) primenom χ^2 minimizacije. Veća vrednost modula udaljenosti procenjena je za jato Tr14. Razlika modula udaljenosti jata od očekivanih vrednosti može se

objasniti uticajem metaličnosti na oblik CM dijagrama.

Višak boje je za oba jata pri obema metodama veći od očekivane vrednosti. Dobijena veća vrednost viška boje može se objasniti razućenošću tačaka na CM dijagramu jata. Pošto su tačke razućenije, bilo bi potrebno svakoj zvezdi (tački) dodeliti dodatnu vrednost viška boja kako bi se uticaj prašine i gasa na sjaj zvezde eliminisao, što nije korišćeno u ovom radu. Takođe, zvezde koje se nalaze van glavnog niza uticale su na pomeranje sintetičkog CM dijagrama ka većim vrednostima indeksa boje. Posledica ovog pomeranja je veća vrednost viška boje jata.

Kombinacijom pomenutih metoda najverovatnije bi se mogli preciznije proceniti parametri jata. Metod najbližeg suseda mogao bi da se iskoristi za poređenje CM dijagrama jata i sintetičkog CM dijagrama u fazi crvenih džinova. S druge strane, primenom χ^2 minimizacije možemo porediti glavne nizove CM dijagrama jata i sintetičkih CM dijagrama.

Zahvalnost. Autor bi hteo da se zahvali na pomoći: mentoru rada, Ivanu Miliću i stručnom saradniku IS Petnica, koji je svojim idejama doprineo izradi ovog rada i koji je predložio da se ispituju dve različite metode. Takođe, autor bi se zahvali i na komentarima rukovodioca seminara astronomije u Istraživačkoj stanici Petnica, Andreju Obuljenu.

Literatura

- Cudworth K. M., Martin S. C., DeGioia-Eastwood K. 1993. Proper motions, membership, and photometry of open clusters near eta Carinae. *The Astronomical Journal*, **105**: 5.
- Friel E. D. 1995. The old open clusters of the Milky Way. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, **33**: 381.
- Hur H., Sung H., Bessell M. S. 2012. Distance and the initial mass function of young open clusters in η Carina nebula: Tr14 and Tr16. *The Astronomical Journal*, **143**: 41.
- Lejeune T., Schaerer D. 2001. Database of Geneva stellar evolution tracks and isochrones

for (UBV)_J(RI)_C JHKLL'M, HST-WFPC2, Geneva and Washington photometric system. *Astronomy & Astrophysics*, **366**: 538.

Tapia M., Roth M., Vazquez R. A., Feinstein A. 2003. Imaging study of NGC 3372, the Carina nebula – I. UBVR_IJHK photometry of Tr14, Tr15, Tr16 and Car I. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, **339**: 44.

Paunzen E., Heiter U., Netopil M., Soubiran C. 2010. On the metallicity of open clusters I. Photometry. *Astronomy & Astrophysics*, manuscript no. 14131.

Vukićević-Karabin M., Atanacković O. 2010. *Opšta astrofizika*. Beograd: Zavod za udžbenike

Dušan Vukadinović

Determining Basic Parameters of Open Clusters Tr14 and Tr16

The aim of this project is to determine the basic parameters of open cluster Trumpler 14 (Tr14) and Trumpler 16 (Tr16): color excess, distance modulus, age and metallicity. These parameters were estimated from the best match of stellar isochrones and the CM diagram of clusters. The measure for matching stellar isochrones and CM diagrams was determined in two ways. The nearest neighbor method presents the sum of square distance between the nearest points from the cluster CM diagram and stellar isochrones. The second method is χ^2 minimization, where displacement was determined using the color index.

Figure 3 shows the CM diagram of clusters Tr14 and Tr16 and stellar isochrones which best fit this CM diagram. Stars from these two clusters are grouped together because of the similarity of parameters in previous papers (Hur *et al.* 2012). On figures 4 and 5 CM diagrams of clusters Tr14 and Tr16 with stellar isochrones which best fit these diagrams are presented.

Using the nearest neighbor method the age of clusters was estimated in the interval from 1 to 6

million years. This interval matches well the interval of age given in the work of Hur *et al.* (2012) and Tapia *et al.* (2003). Metallicity was estimated in the interval from 0.008 to 0.02. Using the nearest neighbor method proved as an adequate method for estimating metallicity and the age of the cluster. However, this method is not adequate for estimating distance modulus and color excess. With χ^2 minimization the distance modulus was estimated in the expected interval (12 ± 0.2). A greater value of the distance modulus was estimated for Tr14. The difference in the estimated distance modulus can be explained by the effect of metallicity in the CM diagram. Based on Figure 1 we can conclude that for greater values of metallicity stellar isochrones are shifted towards smaller values of V magnitudes. The consequences of this shift are greater values of the distance modulus. 