

Određivanje osnovnih parametara otvorenog zvezdanog jata M41 II

Iz kataloga tačkastih svetlosnih izvora uzeti su fotometrijski podaci za jato M41, koji su filtrirani po sopstvenom kretanju. Uz pomoć tih podataka konstruisani su color-magnitude dijagrami kombinacijom V filtra sa B, R, J, H i K filtrima. Poređenjem tih dijagrama sa sintetičkim dijagramima konstruisanim za različite vrednosti parametara pomoću evolucionih modela, korišćenjem Downhill Simplex algoritma i pomoću bilinearne interpolacije tih modela određivani su parametri jata: metaličnosti, starosti, modula rastojanja i color excessa kod V-K indeksa boje. Rezultati se slažu sa očekivanim vrednostima, osim color excessa, koji je znatno viši od očekivanog.

Uvod

Zvezdana jata su skupovi zvezda koje potiču iz istog međuzvezdanog oblaka, u isto vreme počinju svoju evoluciju i drže se u grupi gravitacionim privlačenjem. Zbog toga imaju približno iste vrednosti parametara povezanih sa tokom evolucije tih zvezda, tako da se proučavanjem jata u celini može govoriti o parametrima jata. Stanje jata u njegovoj evoluciji se najbolje može pratiti kroz HR dijagram jata. Otvorena zvezdana jata su pogodna za istraživanje zbog relativno malog (u odnosu na globularna), ali dovoljnog broja zvezda. Jato M41 uzeto je za istraživanje jer je relativno bogato zvezdama u odnosu na druga otvorena jata. Ranije procenjena starost ovog jata je reda veličine 10^7 godina (Kucuk i Eryurt-Ezer 1988), dok se u novijim radovima dobijaju rezultati od približno $2 \cdot 10^8$ godina (npr. Harris *et al.* 1993). Rezultati određivanja udaljenosti pokazuju da je rastojanje ovog jata od Sunca približno 700 pc (Harris *et al.* 1993). Vrednost color excessa kod V-K indeksa boje u katalogu otvorenih jata iznosi 0.01 (Dias *et al.* 2002).

*Bojan Kološnjaji
(1988), Ruski Krstur,
JNA 126, učenik 4.
razreda Gimnazije
"Petro Kuzmjak" u
Ruskom Krsturu*

*MENTOR:
Igor Smolić, ISP*

U prethodnim radovima tražen je način da se parametri odrede analitički, da se odrede obrasci na osnovu vrednosti određenih tačaka, kao što su tačka odvajanja crvenih džinova sa glavnog niza (main sequence turn-off), tačka na spoju linija glavnog niza i belih patuljaka i sl., ili da se određuju parametri direktnim upoređivanjem glavnog niza na HR dijagramima sa glavnim nizom sintetičkih HR dijagrama iz nekih evolucionih modela, što je korišćeno samo kod određivanja starosti.

U mom prethodnom radu (Kološnjaji 2006) određivani su parametri korišćenjem potrage po mreži (gridsearch), gde su upoređivani color-magnitude (CM) dijagrami jata sa dijagramima iz evolucionih modela, gde je tražen CM dijagram iz evolucionih modela koji bi najviše odgovarao realnom CM dijagramu jata. Pikovi u distribuciji rezultata logaritma starosti jata dobijeni su na vrednostima od 8 i 8.4. Modul rastojanja jata određen je na 9.21-9.42 mag, a color excess (V-K) na 0.06-0.14 mag. Poređenja su rađena sa V na V-K CM dijagramima, sa zvezdama filtriranim po sopstvenom kretanju, po jednoj standardnoj devijaciji.

Cilj ovog rada je određivanje parametara otvorenog zvezdanog jata M41 – starosti, modula rastojanja, color excessa i metaličnosti unapređenom metodom u odnosu na prethodni rad. Unapređenje metoda bi se sastojalo u korišćenju fotometrijskih podataka iz više različitih filtera (BVRJHK), uvođenju novog parametra – metaličnosti, kao i odgovarajućih brzih statističkih algoritama koji bi podneli obradu velikog broja podataka u razumnom vremenu.

Metod

Fotometrijski podaci su uzeti iz kataloga NOMAD, uz filtriranje zvezda po sopstvenom kretanju po rektascenziji i deklinaciji, da bi bile otkrivene zvezde koje ne pripadaju jatu, a nalaze se u uzetom vidnom polju. Postupak filtriranja je isti kao i u mom prethodnom radu (Kološnjaji 2006). Za razliku od tog rada, gde su korišćeni fotometrijski podaci u filtrima V i K, u ovom radu su korišćeni svi dostupni filtri (BVRJHK). Isprogramiran je softver kojim se upoređuju CM dijagrami jata sa sintetičkim CM dijagramima iz evolucionih modela (Girardi *et al.* 2002), koji daju apsolutni sjaj zvezda ($M_{UBVRJHK}$) različitih masa, u različitim filtrima, za starosti od 10^7 do $10^{10.25}$ godina i za metaličnosti 0.008, 0.019, 0.04 i 0.07, uz uzimanje u obzir uticaja modula rastojanja i color excessa. Uticaj ekstinkcije i modula rastojanja je određen korišćenjem formula:

$$m_V - M_V = r + A_V \quad (1)$$

$$CI = m_V - m_N - E(V - N) \quad (2)$$

$$A_V = n \cdot E(V - N) \quad (3)$$

gde su m_V i m_N prividne magnitude u V i nekom od BRJHK filtara, M_V apsolutna magnituda u V filtru, CI indeks boje, A_V koeficijent ekstinkcije, a r modul rastojanja. Vrednost n je uzeta iz radova o međuzvezdanoj ekstinkciji (Johnson 1968).

Mereno je rastojanje svake tačke na sintetičkom CM dijagramu od svake pojedinačne tačke na dijagramu jata, u višedimenzionalnom euklidskom prostoru, gde su dimenzije bile apsolutna magnituda u V filtru i kolor indeksi V filtra sa ostalim filtrima, tako da je kao realno rastojanje tačaka uzeta suma kvadrata rastojanja po svakoj dimenziji. Za svaku tačku na CM dijagramu jata nađena je tačka s najmanjim rastojanjem na sintetičkom CM dijagramu. Medijan rastojanja najmanje udaljenih tačaka je uzet kao odstupanje sintetičkog dijagrama od CM dijagrama jata.

Za određivanje parametara po kojima su konstruisani CM dijagrami korišćen je Downhill Simplex, ili Nelder-Mead algoritam (Nelder i Mead 1964). Algoritam koristi n -dimenzionalni simpleks (geometrijsko telo sa n -dimenzija i $n+1$ temena), koji se kreće i transformiše po $n+1$ dimenzija, ka manjoj vrednosti po $n+1$ -toj dimenziji, da bi posle nekoliko koraka stigao do minimuma po $n+1$ -toj dimenziji. Taj algoritam primenjen je na problem određivanja parametara jata tako što je uzet simpleks sa četiri dimenzije, gde su dimenzije parametri jata, a peta dimenzija, po kojoj se kreće simpleks, je vrednost funkcije, tj. razlika sintetičkog i realnog CM dijagrama. Posle više koraka simpleks algoritma, taj simpleks bi trebao stići do minimuma funkcije i dimenzije temena sa najmanjom vrednošću funkcije bile bi uzete kao vrednosti parametara jata. Međutim, zbog toga što je ovde dostupna diskretna mreža vrednosti za logaritam starosti, sa ograničenim dimenzijama prostora po kojem bi se simpleks mogao kretati, bilo je potrebno koristiti izmenjeni simpleks metod.

Uzeto je deset simpleksa koji su se paralelno kretali kroz prostor i, nakon što je sa svakim simpleksom odrađeno sto koraka algoritma, temena dobijenih simpleksa su opet povezana po slučajno generisanom rasporedu i s tim simpleksima su ponovo odrađeni koraci algoritma. Urađeno je hiljadu takvih ponavljanja, da bi simpleksi stigli što bliže apsolutnom minimumu. Da ne bi bilo problema sa diskretnom mrežom vrednosti parametara logaritma starosti i metaličnosti, urađena je bilinearna interpolacija između dve najbliže dostupne vrednosti tih parametara kod svakog izračunavanja vrednosti funkcije.

Zbog pretpostavljenog postojanja korelacije metaličnosti i starosti i radi poređenja rezultata, takode je urađeno i hiljadu ponavljanja simpleksa sa fiksiranom metaličnošću, gde je uzeta vrednost metaličnosti od 0.019, u skladu sa radovima gde je ta vrednost određivana drugim metodama (Kucuk i Eryurt-Ezer 1988, Cox 1954). Da bi bila dobijena raspodela uz pomoć koje bi bilo moguće tačno odrediti intervale vrednosti parametara,

korišćen je statistički Bootstrap algoritam. Od posmatračkih podataka dobijenih iz kataloga generatorom slučajnih brojeva dobijene su tzv. bootstrap replikacije, uzorci posmatračkih podataka sa istim brojem zvezda kao i u originalnom uzorku, uz ponavljanje nekih zvezda. Sa tako dobijenim replikacijama urađeni su CM dijagrami i odrađen je postupak upoređivanja sa sintetičkim CM dijagramima. Tako je za svaku replikaciju određena kombinacija vrednosti parametara koja joj najviše odgovara. Određivanjem učestalosti pojavljivanja određenih vrednosti parametara u tim najboljim kombinacijama dobijena je normalna raspodela broja pojavljivanja tih vrednosti. Iz te raspodele su kao rezultati uzete vrednosti parametara u okviru jedne i dve standardne devijacije.

Rezultati

Na graficima 1.1, 1.2 i 1.3 (slika 1) prikazane su raspodele vrednosti parametara po intervalima dobijene bootstrap algoritmom za fiksnu metaličnost. Grafici 2.1, 2.2 i 2.3 pokazuju raspodele za promenljivu metaličnost. Grafici su konstruisani radi procene oblika raspodele i mogućnosti tačnog određivanja parametara.

Iz ovih grafika se može uočiti da su raspodele približno Gausove, ali da se javljaju i lokalni maksimumi, što otežava tačnu procenu vrednosti parametara.

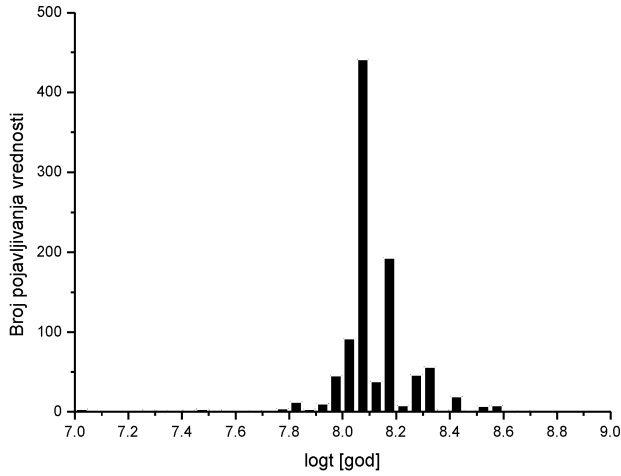
U tabeli 1 prikazani su intervali vrednosti parametara dobijeni iz raspodele prikazanih na graficima.

Tabela 1. Konačni rezultati vrednosti parametara

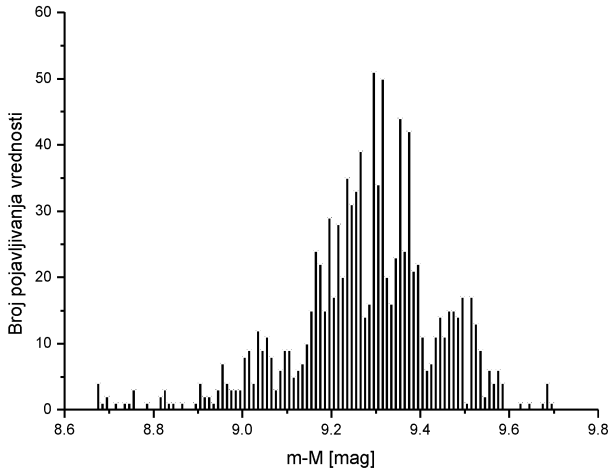
Parametar	promenljiva metaličnost			fiksna metaličnost		
	medijan	interval poverenja		medijan	interval poverenja	
		68.3%	95.4%		68.3%	95.4%
$\log t$ [god]	8.1	8.05–8.2	7.9–8.35	8.1	8.0–8.2	7.85–8.4
$m - M$ [mag]	9.27	9.12–9.4	8.94–9.53	9.29	9.14–9.43	8.89–9.54
$E(V - K)$ [mag]	0.23	0.14–0.29	0.07–0.36	0.22	0.12–0.28	0.03–0.37

Dobijena vrednost metaličnosti je približna Sunčevoj ($[Fe/H] = 0$) u 96% bootstrap replikacija. Greška kod metaličnosti nije značajna, jer je simpleks u skoro svim slučajevima nalazio minimum u navedenoj vrednosti.

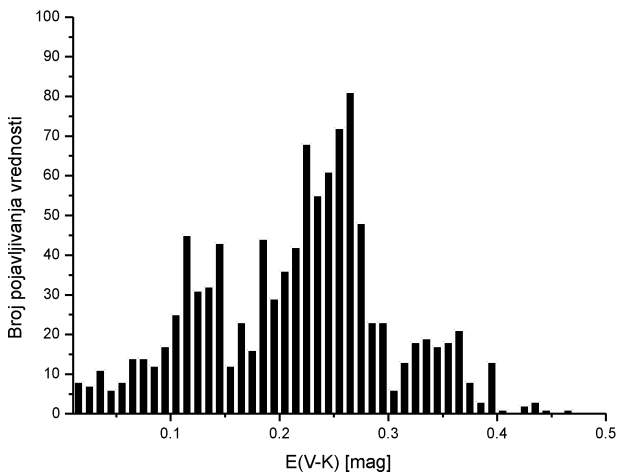
Da bi se odredio uticaj korelacije na rezultate, određeni su linearni koeficijenti korelacije za sve parove parametara. Rezultati su prikazani u tabeli 2.



1.1



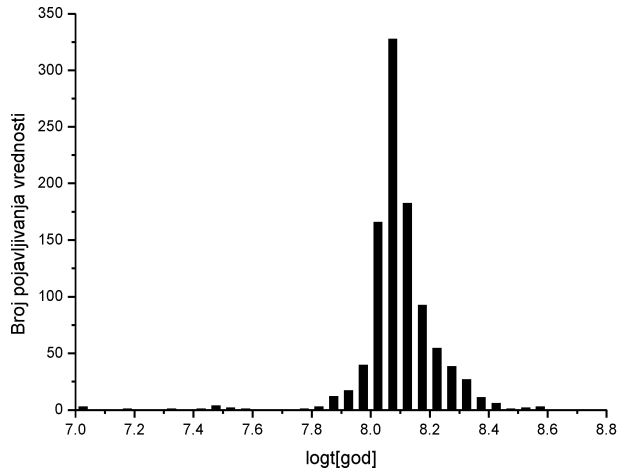
1.2



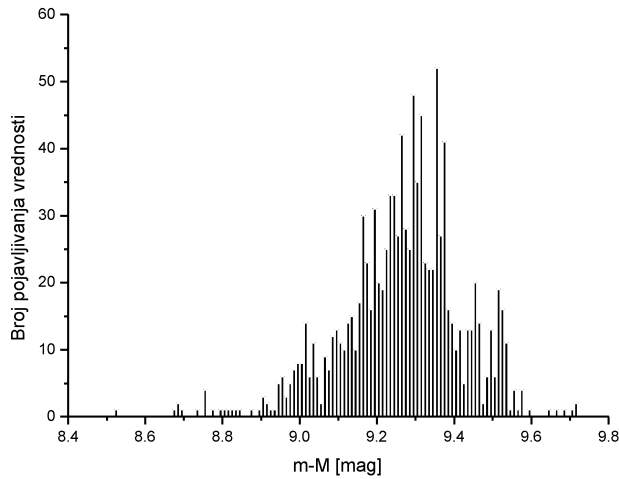
1.3

Slika 1.
 Raspodele vrednosti
 parametara za fiksnu
 metaličnost
 1.1 Raspodela
 vrednosti $\log t$
 1.2. Raspodela
 vrednosti modula
 rastojanja
 1.3. Raspodela
 vrednosti V-K color
 excessa

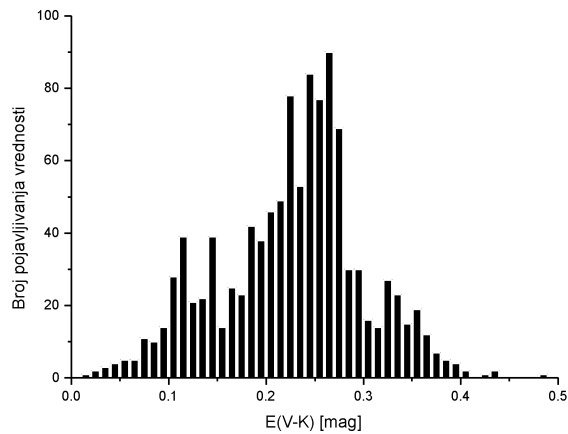
Figure 1.
 Distribution of
 parameter values for
 fixed metallicity
 1.1. Distribution of
 $\log t$
 1.2. Distribution of
 distance modulus
 1.3. Distribution of
 V-K color excess



2.1



2.2



2.3

Slika 2.
 Raspodele vrednosti parametara za promenljivu metaličnost
 2.1 Raspodela vrednosti $\log t$
 2.2. Raspodela vrednosti modula rastojanja
 2.3. Raspodela vrednosti V-K color excessa

Figure 2.
 Distribution of parameter values for variable metallicity
 2.1. Distribution of $\log t$
 2.2. Distribution of distance modulus
 2.3. Distribution of V-K color excess

Tabela 2. Prikaz međusobne korelacije parametara

	$\log t$	$m - M$	$E(V - K)$	Fe/H
$\log t$	1	- 0.33915	- 0.55766	- 0.10031
$m - M$	- 0.33915	1	0.39515	0.194836
$E(V - K)$	- 0.55766	0.39515	1	- 0.20445
Fe/H	- 0.10031	0.194836	- 0.20445	1

Diskusija

Dobijeni interval vrednosti logaritma starosti je blizu rezultatima novijih radova (npr. $t = 2 \cdot 10^8$ godina kod Harris *et al.* 1993), a znatno je viša u odnosu na starije radove ($t = 10^7$ godina kod Kucuk i Eryurt-Ezer 1988). Vrednosti modula rastojanja se uklapaju sa prethodnim rezultatima (700 pc kod Harris *et al.* 1993). Međutim, kod dobijenih vrednosti uočljivo je da je vrednost color excessa izuzetno visoka. Dobijeni interval je znatno viši nego što je očekivano na osnovu rezultata rada drugih autora (Dias *et al.* 2002 – $E(V - K) = 0.01$). Rezultati dobijeni za sve parametre se slažu sa vrednostima dobijenim u mom prošlogodišnjem radu. Kod metaličnosti rezultati su takođe približni očekivanim na osnovu rezultata Diasa i saradnika, gde je dato da je metaličnost jata približna Sunčevoj. Metaličnost jata je određena sa neočekivanom preciznošću. Ta preciznost odudara od preciznosti kod određivanja ostalih parametara, čemu uzrok može da bude problem sa algoritmom.

Korišćen metod je sličan ranijim radovima drugih autora, u smislu da je korišćen HR dijagram, tj. CM-dijagram kao njegova varijanta. Međutim, ovaj metod je specifičan po tome kako su određeni rezultati koristeći taj dijagram. Ovim metodom dobijene su raspodele vrednosti parametara na osnovu kojih je bilo moguće tačno odrediti grešku za sve parametre. Međutim, određivanje svih parametara jednim algoritmom dovelo je do mogućnosti korelacije parametara. Rezultati ispitivanja korelacije pokazuju da je korelacija među parametrima značajna, posebno korelacija starosti sa color excessom i modulom rastojanja. Nije pokazana značajna korelacija između logaritma starosti i metaličnosti, koja je bila očekivana, jer zvezde sa višom vrednošću metaličnosti brže evoluiraju. Raspodele rezultata dobijenih fiksiranjem metaličnosti se po obliku ne razlikuju značajno od raspodela dobijenih za promenljivu metaličnost. Korišćeni Downhill Simplex algoritam koristi manje procesorskog vremena nego algoritam potrage po mreži, a daje zadovoljavajuće rezultate. Zato je ovaj algoritam pogodan za korišćenje i kod određivanja parametara većih otvorenih jata, kao i globularnih jata.

Zaključak

U ovom radu su izračunati starost, modul rastojanja, V-K color excess i metaličnost jata M41. Korišćeni metod doveo je do rezultata približnih očekivanim, sa izuzetkom color excessa, gde su dobijene nerealno visoke vrednosti. Korišćenje fotometrijskih podataka od filtra na svim dostupnim talasnim dužinama doprinosi tačnosti rezultata. Uočen je uticaj korelacije među vrednostima parametara. Potrebno je unaprediti metod da bi se taj uticaj smanjio.

Zahvalnost. Zahvaljujem se mladim saradnicima Goranu Rakiću na pomoći u programiranju i Marku Simonoviću na pomoći oko Simplex algoritma.

Literatura

- Cox A. N. 1954. *Astrophysical Journal*, **119**: 188
- Dias W. S., Alessi B. S., Moitinho A., Lepine J. R. D. 2002. Optically visible open clusters and Candidates. *Astronomy and Astrophysics*, **389**: 871D.
- Girardi L., Bertelli, G., Bressan A., Chiosi C., Groenewegen M. A. T., Marigo P., Salasnich, B., Weiss A. 2002. Theoretical isochrones in several photometric systems. *Astronomy and Astrophysics*, **391**: 195.
- Harris G., Fitzgerald, P. V., Mehta S., Reed B. 1993. NGC 2287 – An important intermediate-age open cluster. *Astronomical Journal*, **106**: 4.
- Johnson H. L. 1968. *Stars and Stellar Systems*. Chicago: University of Chicago Press
- Kološnjaji B. 2006. Određivanje osnovnih parametara otvorenog zvezdanog jata M41. *Petničke sveske*, **61**: 5
- Kucuk I., Eryurt-Ezer D. 1988. Age determination of the open cluster NGC 2287 (M41). *Astrophysical Supplement Series*, **147**: 137.
- Nelder J. A., Mead R. 1964. Simplex method for function minimisation. *Computer Journal*, **7**: 308.

Bojan Kološnjaji

Determining Basic Stellar Parameters of the Open Cluster M41 II

Photometric data for the M41 cluster were taken from a point source catalogue and this data was filtered by the stellar proper motion. Color-magnitude diagrams were made with this data for the combination of the V filter with B, R, J, H, and K filters. By comparing these diagrams with the synthetic diagrams made for the variable parameters from evolutionary models, using the Downhill Simplex algorithm and bilinear interpolation for these models cluster parameters were determined: metallicity, age, distance modulus and V-K color excess. The results are similar to the expected values, except for color excess, which is a lot higher than expected.

