

Određivanje osnovnih parametara otvorenog zvezdanog jata M41

Uz pomoć rezultata fotometrije otvorenog jata M41 dobijenih iz kataloga tačkastih izvora svetlosti napravljen je dijagram veze color excess-a $V-K$ i apsolutne zvezdane veličine u K filtru (CM (color-magnitude) dijagram). Merena su odstupanja sintetičkih CM dijagrama koji su konstruisani uz pomoć modela zvezdane evolucije za različite kombinacije parametara: udaljenosti, color excess-a i starosti jata od realnog CM dijagrama jata. Korišćenjem algoritma koji generiše slučajne kombinacije fotometrijskih rezultata iz postojećih, dobijena je normalna raspodela vrednosti najboljih kombinacija vrednosti za svaki parametar. Iz tih raspodela su određeni starost, moduo rastojanja i color excess jata. Rezultati za starost i moduo rastojanja približno se poklapaju sa rezultatima drugih radova, dok je kod rezultata za color excess uočeno značajno odstupanje.

Uvod

Otvorena jata, i zvezdana jata uopšte, su grupe zvezda koje imaju približno jednaku starost i u približno isto vreme započinju svoju evoluciju, što omogućava određivanje parametara jata primenom statističkih metoda, tj. tretiranjem zvezda u jatu kao homogenog statističkog ansambla. Brzina evolucije zavisi od početne mase zvezda. Položaj jedne zvezde na Hertzsprung-Russel-ovom (HR) dijagramu ukazuje na njen stadijum u evoluciji, pa HR dijagram zvezdanog jata pokazuje koliko je evoluiralo jato kao celina. Na osnovu toga se po izgledu HR dijagrama može odrediti starost jata, kao i drugi astrofizički parametri. Otvoreno zvezdano jato M41 je jato srednje starosti, udaljeno oko 700 pc (Harris *et al.* 1993). Ovo jato sadrži relativno veliki broj zvezda u odnosu na druga otvorena jata i zato je odabrano za ovo istraživanje. Ranije procenjena starost je reda veličine 10^7 godina (Kucuk *et al.* 1988), dok se kao novija procena uzima $2 \cdot 10^8$ godina (Harris *et al.* 1993). U katalogu otvorenih jata je navedena vrednost parametra color excess (višak boje) od 0.01 (Dias *et al.* 2002).

Bojan Kološnjaji (1988), Ruski Krstur, JNA 126, učenik 3. razreda Gimnazije "Petro Kuzmjak" u Ruskom Krsturu

*MENTOR:
Nikola Božić, ISP*

Nova fotometrijska i astrometrijska merenja urađena u okviru misija Hipparcos i Tycho omogućavaju i preciznije određivanje parametara ovog jata.

Cilj ovog rada je određivanje starosti, modula rastojanja i color excess-a jata M41 korišćenjem novih fotometrijskih i astrometrijskih podataka, uz pomoć jedne vrste HR dijagrama – color-magnitude (CM) dijagrama, koji prikazuje zavisnost sjaja zvezde od indeksa boje. Rezultati su dobijeni korišćenjem modifikovanog metoda fitovanja CM dijagrama jata sintetičkim dijagramima.

Materijal i metode

Iz kataloga NOMAD (Zacharias *et al.* 2004), koji kombinuje podatke iz kataloga HIPPARCOS, TYCHO2, UCAC2, USBNO-B1.0 i servisa 2MASS, uzeti su podaci za sjaj zvezda u V (vizuelnom) i K (bliskom infracrvenom) filtru, kao i podaci o sopstvenom kretanju zvezda, u radijusu od 38 lučnih minuta. Za određivanje pripadnosti zvezda jatu konstruisani su histogrami iz kojih je određen interval sopstvenog kretanja po rektascenziji i deklinaciji koje jedna zvezda treba da ima da bi pripadala jatu. Pošto je raspodela broja zvezda po sopstvenom kretanju bliska Gausovoj, CM dijagram je urađen filtriranjem zvezda na nivoima poverenja 1σ , 2σ i 3σ . Vrednost standardne devijacije određena je korišćenjem MAD metoda (Ripley 1992), koji za vrednost devijacije daje:

$$0.6745 \cdot \sigma = \text{medijan } |x_i - \text{medijan izmerenih vrednosti}| \quad (1)$$

gde su vrednosti x_i vrednosti sopstvenog kretanja jata. Prednost ovog metoda je da su odstupanja od medijana robusnija karakteristika statistike jata nego definicioni izraz za standardnu devijaciju u kome figuriše srednja vrednost. Dobijeni pikovi na histogramu za jato M41 odgovaraju vrednostima sopstvenog kretanja jata navedenim u katalogu otvorenih jata (Dias *et al.* 2002). Sa tako pročišćenim podacima urađen je CM dijagram jata M41, sa prividnom magnitudom u V filtru (m_v) na y-osi, i razlikom prividne magnitude u V i K filtru ($V - K$) na x-osi. Napisan je program koji upoređuje tačke CM dijagrama jata sa tačkama sintetičkih CM dijagrama, konstruisanih iz jednog seta evolucionih modela iz literature (Girardi *et al.*, 2002), koji daju apsolutni sjaj zvezda ($M_{UBVRJHK}$) različitih masa u različitim filtrima za starost između 10^7 i $10^{10.25}$ godina, i kombinovanjem tih vrednosti sa vrednostima modula rastojanja ($m_v - M_v$) i color excess-a $E(V - K)$. Uticaj ekstinkcije određen je korišćenjem sledećih jednačina, koje daju vezu između ekstinkcije i prividne magnitude:

$$m_v - M_v = r + A \quad (2)$$

$$CI = m_v - m_k - E(V - K) \quad (3)$$

$$A_v = 1.12 \cdot E(V - K) \quad (4)$$

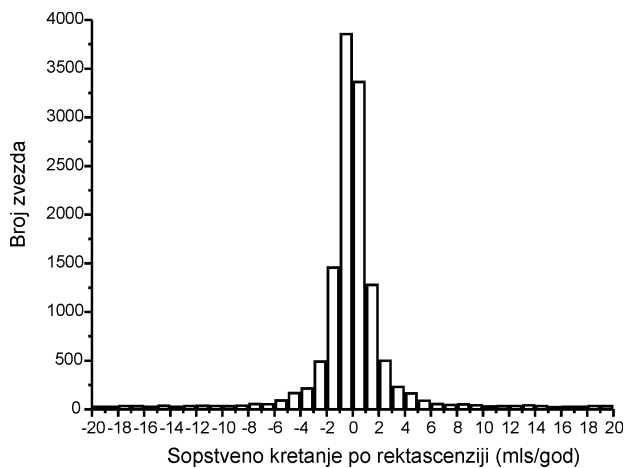
gde su m_v i m_k prividne magnitude u V i K filtru, M_v apsolutna magnituda u V filtru, CI indeks boje, A_v koeficijent ekstinkcije, a r moduo rastojanja. Mereno je rastojanje svake tačke na sintetičkom CM dijagramu od svake tačke na dijagramu jata. Za svaku tačku na dijagramu jata nađena je tačka s najmanjim rastojanjem na sintetičkom CM dijagramu. Medijan rastojanja najmanje udaljenih tačaka je uzet kao mera odstupanja sintetičkog CM dijagrama od CM dijagrama jata. Kombinacije vrednosti za koje konstruisani CM dijagram ima najmanji medijan odstupanja usvojene su kao kombinacije koje najbolje opisuju realni CM dijagram jata. Za dobijenje normalne raspodele, iz koje su potom određeni intervali vrednosti parametara, korišćen je statistički Bootstrap algoritam. Za posmatračke podatke uzete iz kataloga, generatorom slučajnih brojeva su dobijene tzv. bootstrap replikacije - uzorci posmatračkih podataka sa istim brojem zvezda kao i u originalnom uzorku, uz ponavljanje određenog broja zvezda. Sa tako dobijenih pet hiljada replikacija urađeni su CM dijagrami i izvršeno upoređivanje sa sintetičkim CM dijagramima. Tako je za svaku replikaciju određena kombinacija optimalnih vrednosti parametara. Određivanjem učestanosti pojavljivanja određenih vrednosti parametara u ovim optimalnim kombinacijama dobijena je normalna raspodela broja pojavljivanja tih vrednosti. Iz raspodele modula rastojanja i ekstinkcije izbačene su vrednosti koje prelaze granicu od 1 i 2, respektivno. U slučaju starosti, taj postupak nije mogao biti sproveden zbog izražene bimodalnosti raspodele. Za ovaj parametar, kao moguće tačne vrednosti uzete su vrednosti kojima odgovaraju pikovi u raspodeli. Međusobna nezavisnost razmatranih parametara (udaljenost, color excess i starost) ispitiva je pomoću Pearsonovog koeficijenta korelacije.

Rezultati

Na graficima na slikama 1 i 2 prikazani su histogrami broja zvezda u zavisnosti od vrednosti sopstvenog kretanja po rektascenziji i deklinaciji. Grafik na slici 3 prikazuje sopstveno kretanje zvezda u uzetom vidnom polju, a na grafiku 4 prikazan je CM dijagram jata sa zvezdama filtriranim po 1σ , 2σ i 3σ , kao i primer sintetičkog dijagrama iz evolucionih modela.

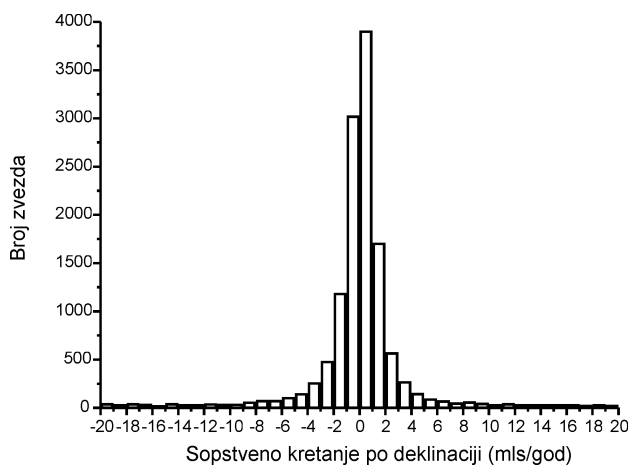
Grafici na slikama 5, 6 i 7 prikazuju rezultate dobijene korišćenjem Bootstrap algoritma.

U tabeli 1 prikazani su krajni rezultati sa intervalima vrednosti modula rastojanja i color excess-a određenim za različite statističke kriterijume (zvezde filtrirane po 1σ , 2σ i 3σ).



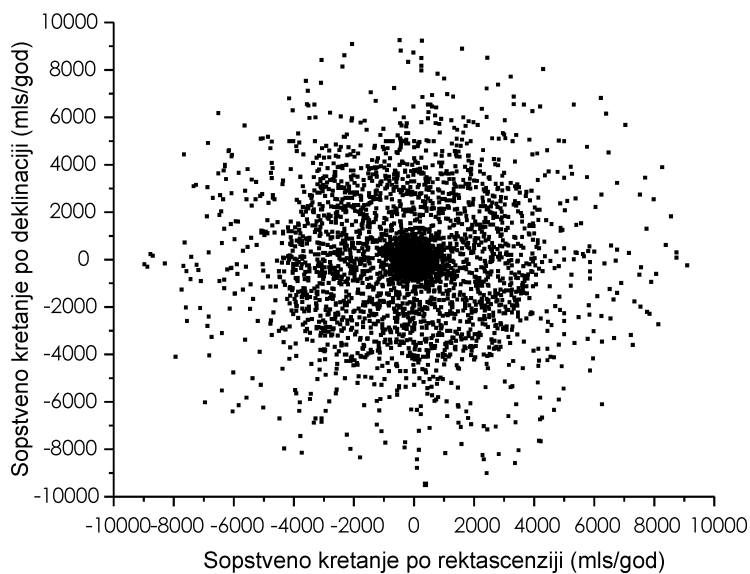
Slika 1.
Histogram za sopstveno kretanje zvezda po rektascenziji (u mililučnim sekundama po godini)

Figure 1.
Histogram of proper motions for right ascension, in milliarcseconds per year



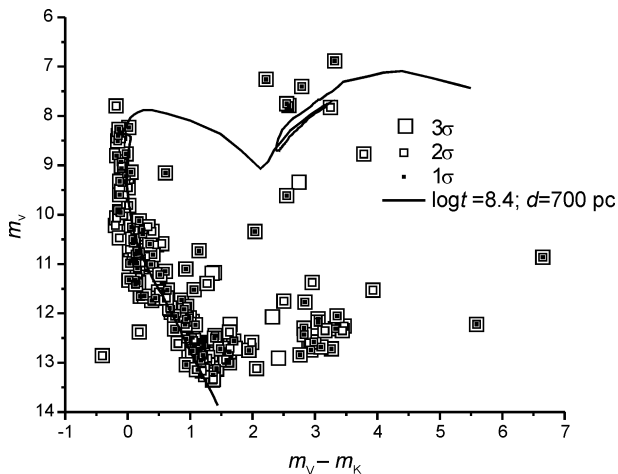
Slika 2.
Histogram za sopstveno kretanje zvezda po deklinaciji (u mililučnim sekundama po godini)

Figure 2.
Histogram of proper motions for declination, in milliarcseconds per year



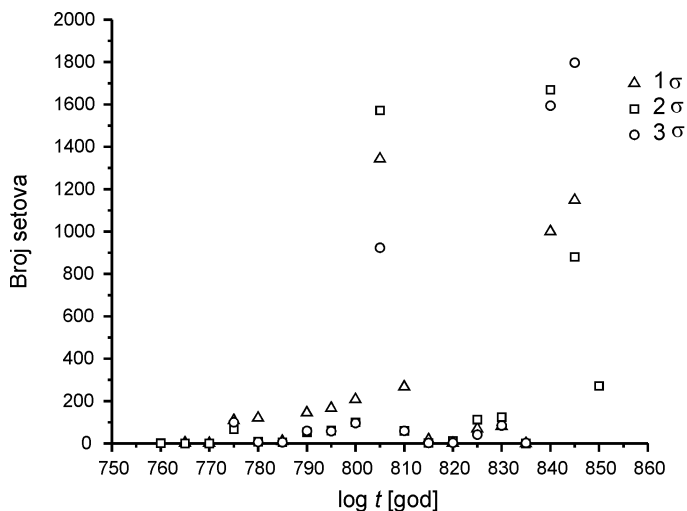
Slika 3.
Prikaz sopstvenog kretanja zvezda u vidnom polju u radijusu od 38' od centra jata M41

Figure 3.
A view of proper motions of stars in field of view of 38 arcsec from the center of the cluster



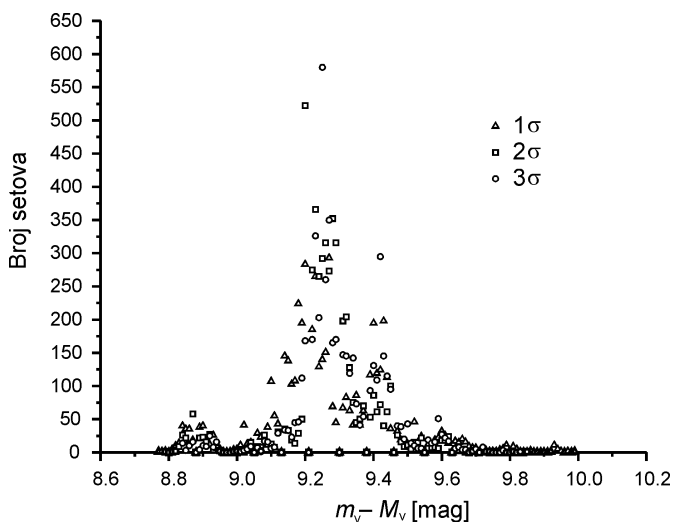
Grafik 4.
CM dijagram jata M41 i sintetički dijagram za logaritam starosti 8.4 i udaljenost 700 pc (očekivane vrednosti)

Figure 4.
CM diagram of the cluster M41 and the synthetic diagram for the logarithm of age 8.4 and distance 700 pc (expected values)



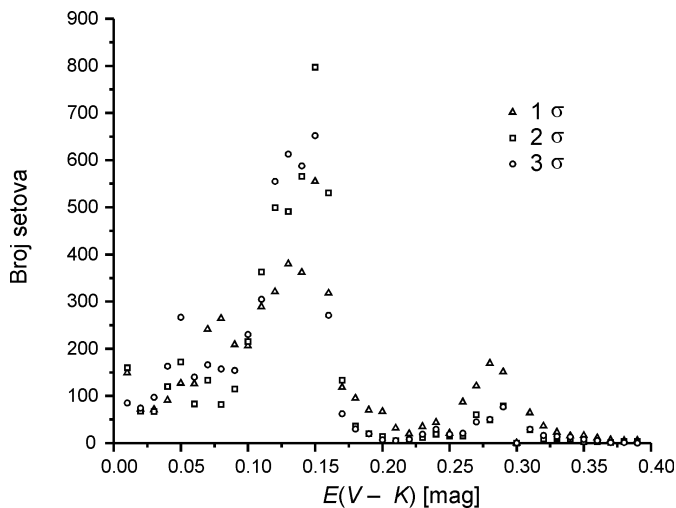
Slika 5.
Broj kombinacija sa najmanjim odstupanjem po logaritmu starosti

Figure 5.
Number of combinations with the minimal deviation of the logarithm of age



Slika 6.
Broj kombinacija sa najmanjim odstupanjem po modulu rastojanja

Figure 6.
Number of combinations with the minimal deviation of the distance modulus



Slika 7.
Broj kombinacija sa najmanjim odstupanjem po color excess-u

Figure 7.
Number of combinations with the minimal deviation of the color excess

Tabela 1. Usvojene vrednosti za modul rastojanja i color excess

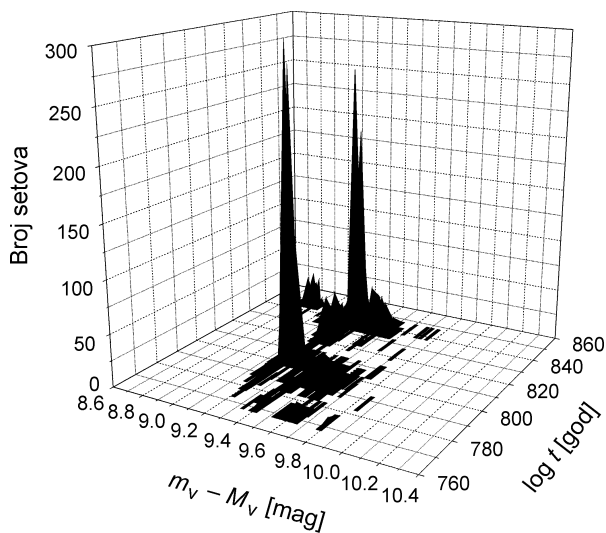
	moduo rastojanja [mag]	color excess [mag]
68.3% vrednosti (1σ)		
1	9.13–9.42	0.06–0.22
2	9.2–9.35	0.06–0.15
3	9.21–9.42	0.06–0.14
95% vrednosti (3σ)		
1	8.86–9.65	0–0.3
2	8.87–9.53	0–0.28
3	9.03–9.59	0.01–0.28

Pošto se za starost u raspodeli jasno izdvaja više pikova, ti pikovi su usvojeni kao konačni rezultati. Za raspodelu vrednosti kod zvezda filtriranih i po 1σ , a i po 2σ i 3σ se ti pikovi nalaze kod vrednosti logaritma starosti 8 i 8.35-8.4.

U tabeli 2 prikazane su vrednosti koeficijenta korelacije među parametrima konstruisanjem grafika zavisnosti parametara i linearnim fitom.

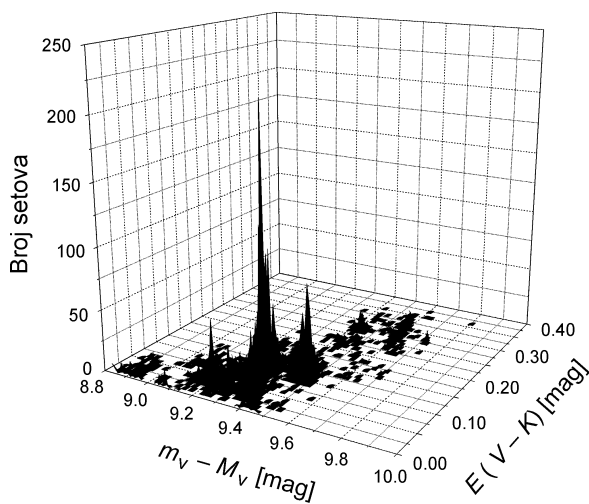
Tabela 2. Prikaz koeficijenata korelacije logaritma starosti ($\log t$) sa drugim parametrima i korelacije modula rastojanja i color excess-a

	1σ	2σ	3σ
$\log t$ / modul rastojanja	-0.27751	-0.22953	-0.2093
$\log t$ / color excess	-0.74957	-0.68797	-0.66758
mod. rast. / col. excess	0.58503	0.54432	0.52262



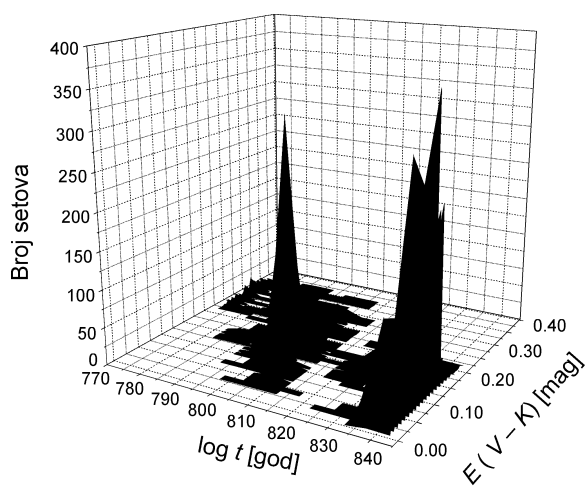
Slika 8.
Broj setova po različitim parovima vrednosti logaritma starosti i modula rastojanja

Figure 8.
Number of sets for different pairs of values of logarithm of age and distance modulus



Slika 9.
Broj setova po različitim parovima vrednosti color excess-a i modula rastojanja

Figure 9.
Number of sets for different pairs of values of color excess and distance modulus



Slika 10.
Broj setova po različitim parovima vrednosti color excess-a i logaritma starosti

Figure 10.
Number of sets for different pairs of values of color excess and logarithm of age

Na graficima na slikama 8, 9 i 10 prikazana je učestalost setova po različitim parovima vrednosti parametara. Grafici su urađeni na osnovu rezultata dobijenih za zvezde filtriranih po 3σ .

Diskusija

Korišćen metod poređenja CM dijagrama je sličan metodu koji je korišćen i u najnovijim istraživanjima (Kharchenko *et al.* 2005), ali se tu određuje starost kao aritmetička sredina starosti zvezda pripadnica jata. U tim istraživanjima su starosti određene korišćenjem podataka za sjaj zvezda za koje postoji najmanje 90%-na verovatnoća da pripadaju jatu, tako da je uzet u obzir mali procenat zvezda. Tako postoji veća sigurnost da su izabrane zvezde stvarno pripadnice jata, ali se izostavlja veliki broj zvezda pripadnica jata koje bi mogle značajno da utiču na rezultate.

Rezultati za starost (oba pika) i modul rastojanja se približno poklapaju sa rezultatima novijih radova, a kod rezultata za color excess postoji značajno odstupanje. Kod vrednosti color excess-a postoji velika greška, što dovodi u pitanje pouzdanost rezultata. U normalnoj raspodeli vrednosti za starost dobijena su dva pika koja imaju približno istu vrednost na y-osi, tako da nije moguće odrediti jednu vrednost za starost.

Unapređenjem metoda potrebno je eliminisati jedan od pikova i dobiti tačan rezultat. Rezultati bi mogli da se provere testirajući jato sa više setova modela i upoređujući rezultate. Takođe, u korišćenim modelima nisu uzeti u obzir beli patuljci, koji bi, uz korišćenje modela koji ima podatke i za tu vrstu zvezda, sigurno uticali na dobijenu starost. Ono što je problematično, a što se vidi na CM dijagramu jata, je grana crvenih džinova i superdžinova, gde postoje zvezde koje po apsolutnoj magnitudi značajno odstupaju od zvezda iz evolucionih modela. Za te zvezde potrebno je ispitati razlog tog odstupanja, koji može biti postojanje značajne, možda periodične promene sjaja, ili pak netačnost uzetih rezultata fotometrijskih merenja. Koeficijenti korelacije u tabeli 2 su statistički značajni. Koeficijent je posebno visok kod korelacije logaritma starosti i color excess-a. Ovakom visoku visoku korelaciju takođe je potrebno otkloniti unapređenjem metoda.

Zaključak

U ovom radu su izračunati starost, modul rastojanja i color excess jata M41. Dobijeni rezultati se približno poklapaju sa vrednostima drugih autora. Međutim, postoje indikatori, kao što su pojedine zvezde na CM dijagramu, kao i korelacija među parametrima, koji pokazuju da metod treba unaprediti da bi se došlo do još pouzdanijih rezultata. Unošenjem više pos-

matračkih podataka i više različitih modela takođe bi se dobilo na pouzdanosti.

Zahvalnost. Zahvaljujem se rukovodiocu seminara astronomije u IS Petnica i mentoru, Nikoli Božiću, i svim saradnicima na pomoći i savetima oko projekta. Posebno se zahvaljujem Igoru Smoliću na pomoći oko kataloga, fotometrijskih i astrometrijskih podataka i bootstrap algoritma, Marku Simonoviću na idejama oko metoda upoređivanja CM dijagrama i Goranu Rakiću na pomoći u programiranju.

Literatura

- Bertelli G., Bressan A., Chiosi C., Fagotto F., Nasi E. 1994. Theoretical isochrones from models with new radiative opacities. *A&A Suppl. Ser.*, **106**: 2752.
- Dias W. S., Alessi B. S., Moitinho A., Lepine J. R. D. 2002. Optically visible open clusters and Candidates. *A&A*, **389**: 871D3.
- 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. *A&A* **391**: 1954.
- Harris G., Fitzgerald P. V., Mehta S., Reed B., 1993. NGC 2287 – An important intermediate-age open cluster. *AJ*, **106**: 45.
- Kharchenko N., Piskunov A., Roser S., Schilbach E., Scholz R. 2005. Astrophysical Parameters of Galactic Open Clusters, *A&A*, **438**: 3, 11636.
- Kucuk I., Eryurt-Ezer D. 1988. Age determination of the open cluster NGC 2287 (M41), *ApSS*, **147**: 1377.
- 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 systems. *A&A*, **366**: 5388.
- Ripley B. 1992. Robust Statistics9Zacharias N., Monet D. G., Levine S. E., Urban S. E., Gaume R., Wycoff G. L. 2004. NOMAD Catalog. *Bulletin of the American Astronomical Society*, **36**: 141

Bojan Kološnjaji

Determining Basic Parameters of the Open Stellar Cluster M41

With the results of photometry for the open cluster M41, which were taken from a point source catalogue, a K to VK color-magnitude diagram was made. By measuring the deviation of synthetic color-magnitude diagrams made for the different combinations of parameters: distance, color excess and the logarithm of age of the cluster from the real diagram using

one set of stellar evolutionary models, the combination with the least deviation was determined. An algorithm that generates random combinations of photometric results from the existing ones was used to get a normal distribution of values of the least deviation for each parameter. That way intervals of values were determined for the logarithm of age, distance modulus and the color excess of the cluster. Results for the age and the distance modulus are similar to the values seen in recent works, but a significant deviation is noticed in the results for color excess.

