Rane faze nastanka zvijezda u maglici Rozeta

Dodig, Ivan

Undergraduate thesis / Završni rad

2023

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Split, Faculty of Science / Sveučilište u Splitu, Prirodoslovno-matematički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:166:843405

Rights / Prava: Attribution 4.0 International/Imenovanje 4.0 međunarodna

Download date / Datum preuzimanja: **2024-11-04**

Repository / Repozitorij:

Repository of Faculty of Science

zir.nsk.hr

UNIVERSITY OF SPLIT

dabar
DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

SVEUČILIŠTE U SPLITU

PRIRODOSLOVNO – MATEMATIČKI FAKULTET

Rane faze nastanka zvijezda u maglici Rozeta

ZAVRŠNI RAD

Ivan Dodig

Split, rujan 2023.

Temeljna dokumentacijska kartica

Sveučilište u Splitu
Prirodoslovno – matematički fakultet
Odjel za fiziku
Ruđera Boškovića 33, 21000 Split, Hrvatska

Završni rad

Rane faze nastanka zvijezda u maglici Rozeta

Ivan Dodig

Sveučilišni preddiplomski studij Matematika i fizika

Sažetak:
Zvijezde u nastanku su od izričite važnosti u proučavanju svemira te ćemo u ovom radu proučavati kompleks Rozetu koja je znanstvenicima odavno zanimljiva jer sadrži mnogo mladih zvijezda koje kriju mnoge tajne u nastajanju, za život kakav mi poznajemo, neophodnih izvora zračenja energije. Kompleks Rozeta se nalazi na udaljenosti od ~ 1.5 kpc od Zemlje, a procijenjena starost iznosi 1.6 ± 0.5 Myr. Za ovaj smo rad iskoristili podatke sa svemirskog teleskopa Spitzer te smo krenuli od kataloga s 18216 izvora zračenja te smo proučavanjem pozicija zvijezda na raznim boja-boja i boja-magnituda dijagramima identificirali 1304 mladih zvjezdanih objekata, od toga 141 mladih zvijezda klase I i 1163 mladih zvijezda klase II. Također smo zaključili kako je jugoistočni dio kompleksa mlađi od središnjeg dijela kompleksa, odnosno od skupa NGC 2244 koji se nalazi u samom središtu kompleksa Rozeta.

Ključne riječi: mlade zvijezde, nastanak zvijezda, maglica Rozeta, klasifikacija

Rad sadrži: 18 stranica, 14 slika, 0 tablica, 23 literaturnih navoda. Izvornik je na hrvatskom

Mentor: doc. dr. sc. Koraljka Mužić

Ocjenjivači: doc. dr. sc. Koraljka Mužić
doc. dr. sc. Marko Kovač
mag. phys. Tamara Rom

Rad prihvaćen: 13. 9. 2023.

Rad je pohranjen u knjižnici Prirodoslovno – matematičkog fakulteta, Sveučilišta u Splitu.

Basic documentation card

University of Split
Faculty of Science
Department of Physics
Ruđera Boškovića 33, 21000 Split, Croatia

Bachelor thesis

Early stages of star formation in the Rosette Nebula

Ivan Dodig

University undergraduate study programme Mathematics and Physics

Abstract:
Stars in the making are of extreme importance when studying the universe, so in this paper we will be looking into the Rosette Complex, which has been very interesting to the scientists for a long while because it contains numerous young stars which hide many secrets in the formation of sources of energy radiations that are necessary for life as we know it. Rosette Complex is located at a distance of ~ 1.5 kpc from Earth and the estimated age is 1.6 ± 0.5 Myr. For this paper the data from the Spitzer Space Telescope have been used and we started from the catalog with 18216 sources of radiation and by studying the position of stars on various color-color and color-magnitude diagrams, we have managed to identify 1304 young stellar objects, out of which 141 are young stars of Class I and 1163 young stars of Class II. We have also concluded that south-east region is younger than its central part, i.e. the cluster NGC 2244, which is located in the very centre of the Rosette Complex.

Keywords: young stars, formation of stars, Rosette Nebula, classification

Thesis consists of: 18 pages, 14 figures, 0 tables, 23 references. Original language: Croatian

Supervisor: Assist. Prof. Dr. Koraljka Mužić

Reviewers: Assist. Prof. Dr. Koraljka Mužić
Assist. Prof. Dr. Marko Kovač
Mag. Phys. Tamara Rom

Thesis accepted: September 13, 2023

Thesis is deposited in the library of the Faculty of Science, University of Split.

Sadržaj

1 UVOD 1

2 MLADE ZVIJEZDE 1

2.1. SKUPOVI ZVIJEZDA 1

2.2 STVARANJE ZVIJEZDA 2

2.3 KLASIFIKACIJA MLADIH ZVIJEZDA 5

3 HII PODRUČJA 6

4 KOMPLEKS ROZETA 6

5 TELESKOP SPITZER 7

6 OBRADA PODATAKA I REZULTATI 8

7 ZAKLJUČAK 16

8 LITERATURA 17

1 UVOD

Ljudi su od pamtivijeka bili znatiželjni pa su se postavljala mnoga egzistencijalna pitanja poput „Gdje se mi to nalazimo?“ i „Koja je svrha našeg postojanja?“. Za odgovor se na prvo pitanje krenulo od promatranja noćnoga neba. Ljudi su primijetili nekakve sjajne *točkice* na nebu. Te su *točkice* nazvane zvijezdama, a jedna od glavnih pitanja su bila što su te sjajne *točkice* i kako su one nastale. Anaksagora je još prije otprilike 2500 godina zaključio da su zvijezde na noćnom nebu ništa drugo nego sunca koja su *jako daleko* [1]. Od ranog djetinjstva nas uče da bez Sunca, na Zemlji ne bi bilo života. Bez Sunčeve energije biljke ne bi mogle raditi proces fotosinteze, temperatura na Zemlji ne bi bila pogodna za život, a također, bez Sunca, ne bismo imali svjetlost s pomoću koje proučavamo svijet oko sebe. Danas znamo da su zvijezde sferične nakupine plina i prašine koje procesom fuzije oslobađaju ogromne količine energije, a ta se energija manifestira u obliku svjetlosti i topline. Za potpunije razumijevanje tih zanimljivih, sjajnih nebeskih *točkica* treba proučiti i njihovo nastajanje za što su nam vrlo korisne mlade zvijezde koje ćemo, u ovom radu, pokušati prepoznati i klasificirati.

2 MLADE ZVIJEZDE

Zvijezde nastaju od međuzvjezdane tvari, čija masa, u našoj galaksiji, čini oko 1 % mase svih zvijezda u galaksiji [2]. Međuzvjezdana je tvar mješavina plina i prašine, gdje plin čini 99 % ukupne mase međuzvjezdane tvari, a temperatura je manja od 100K [2]. U plinu prevladava vodik, kojega je $\sim$ 70%, ostatak plina je uglavnom helij uz manji udio težih elemenata [3]. Mlade zvijezde uglavnom pronalazimo u skupinama kao posljedica fragmentacije međuzvjezdanoga oblaka u manje nakupine od kojih svaka može stvoriti jednu ili više zvijezda [3].

2.1. SKUPOVI ZVIJEZDA

Na slici 1 prikazana su dva tipa skupova zvijezda, prvi je *galaktički*, a drugi je *globularni*. Galaktički se skup još naziva i *otvorenim*. Naziv galaktički je dobio zbog svoje pripadnosti galaktičkom disku, a naziv otvoreni potječe od *otvorenoga* izgleda, odnosno većinu zvijezda možemo promatrati pojedinačno [2]. Obično sadrže manje od 1000 zvijezda i uzdužno su manji od 10 pc, a ponekad u otvorenim skupovima primjećujemo i pripadnu međuzvjezdanu tvar [2]. Globularni skupovi nazvani su globularni zbog sferičnog oblika i sadrže između 10^4 i 10^6 zvijezda, a veličina im je od 20 do 100 pc [2].

Slika 1. Prikaz otvorenog (lijevo) i globularnog skupa (desno). Preuzeto iz [4].

Kažemo da je skup zvijezda *gravitacijski vezan* ako je gravitacijska sila između zvijezda dovoljno jaka da drži skup na okupu [2]. Zvijezde se kreću unutar skupa i kada dvije zvijezde prođu blizu jedna druge, utjecat će na gibanje jedna drugoj. Impuls i energija će se promijeniti, ali nakon mnogo *sudara*[1], distribucija brzina će postići ravnotežno stanje. Kada je skup u ravnotežnom stanju, kažemo da je *dinamički opušten* [2].

U dinamički opuštenom sustavu vrijedi *virijalni teorem* [2]. Virijalni teorem daje nam vezu kinetičke i potencijalne energije:

$$0 = 2\langle \mathrm{K} \rangle + \langle \mathrm{U} \rangle \qquad (1),$$

gdje ⟨⟩ predstavlja vremenski prosjek dane veličine.

Za bilo koji sustav vrijedi:

$$E = K + U \qquad (2).$$

Sada, za sustav gdje vrijedi virijalni teorem, iz (1) i (2) slijedi:

$$E = \frac{\langle U \rangle}{2} \qquad (3).$$

2.2 STVARANJE ZVIJEZDA

Spomenuli smo da zvijezde nastaju od međuzvjezdane tvari, koja čini međuzvjezdane oblake. Potencijalna energija unutar sferičnog, uniformnog oblaka je:

$$U = -\frac{3}{5}\frac{GM^2}{R} \qquad (4),$$

gdje je G gravitacijska konstanta, M predstavlja masu oblaka, a R polumjer oblaka.

Kinetičku energiju povezujemo s temperaturom sustava na sljedeći način:

[1] Zvijezde se u stvarnosti ne sudaraju tako da se površine zaista dotaknu. Kažemo da se sudar dogodio kada zvijezde prođu dovoljno blizu jedna drugoj da gravitacijski efekti dođu do izražaja [2].

$$K = \frac{3}{2} NkT \quad (5),$$

gdje *N* predstavlja broj čestica, k je Boltzmannova konstanta, a T temperatura oblaka.

Gravitacijsko privlačenje među svim česticama koje čine oblak, drži oblak na okupu. Ako sile koje drže oblak na okupu prevladavaju sile koje ga nastoje odvojiti, onda kažemo da je oblak gravitacijski vezan, a uvjet za gravitacijsko vezivanje je taj da je ukupna energija negativna [2]. Uz pretpostavku da sve čestice imaju masu *m*, broj čestica možemo zapisati kao $N = \frac{M}{m}$ te iz (2), (4) i (5) dobivamo:

$$\frac{3}{5} \frac{GM^2}{R} \geq \frac{3}{2} \frac{M}{m} kT \quad (6).$$

Sada, dijeljenjem obiju strana s GM te množenjem s $\frac{5}{3}$ dobivamo:

$$\frac{M}{R} \geq \frac{5}{2} \frac{kT}{Gm} \quad (7).$$

Kako masa i radijus oblaka nisu neovisni, već su povezani s gustoćom oblaka,

$$\rho = \frac{M}{\frac{4}{3}\pi R^3} \quad (8),$$

jednadžbu (7) možemo koristiti da pronađemo minimalni radijus s fiksnim ρ, m i T za kojeg će oblak biti gravitacijski vezan. Taj minimalni radijus nazivamo *Jeansovom duljinom*. Tražimo graničnu vrijednost radijusa za koju će oblak biti gravitacijski vezan pa ćemo kombiniranjem izraza (7) i (8) te promjenom nejednakosti u jednakost i stavljajući $R \equiv R_J$ dobivamo:

$$R_J = \left(\frac{15kT}{8\pi Gm\rho}\right)^{\frac{1}{2}} \cong \left(\frac{kT}{Gm\rho}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (9).$$

Također iz relacija (7) i (8) te ponovno, promjenom nejednakosti u jednakost, možemo odrediti minimalnu masu oblaka radijusa R_J za koju će oblak biti vezan uz konstante ρ, m i T. Tu minimalnu masu nazivamo Jeansovom masom. Dobivamo:

$$M_J = \frac{4\pi}{3}\left(\frac{kT}{Gm\rho}\right)^{\frac{3}{2}} \rho \cong 4\left(\frac{kT}{Gm}\right)^{\frac{3}{2}} \rho^{\frac{-1}{2}} \quad (10).$$

Dakle, masa oblaka M_c mora biti veća od pripadne Jeansove mase M_J da bi oblak bio gravitacijski vezan.

Ukoliko je masa oblaka veća od Jeansove mase, čestice će krenuti slobodno padati prema središtu oblaka, tj. reći ćemo da se oblak *urušava*, a nas sada zanima vrijeme potrebno za urušavanje oblaka. Zamislimo česticu mase m na udaljenosti r_0 od središta oblaka početnog radijusa R i mase M_0 koja slobodno pada. Izoliramo li dio oblaka za koji vrijedi $r < r_0$, masa tog dijela oblaka će biti:

$$M = M_0 \frac{r_0^3}{R^3} \tag{11}.$$

Čestica će ubrzavati prema središtu, a njezina je kinetička energija ništa drugo već razlika potencijalnih energija u danom trenutku.

$$K = \frac{1}{2} m \left(\frac{dr}{dt}\right)^2 = GMm\left(\frac{1}{r} - \frac{1}{r_0}\right) \tag{12}.$$

Iz prethodnog izraza dobivamo diferencijalnu jednadžbu prvoga reda:

$$\frac{dr}{dt} = -\left(2GM\left(\frac{1}{r_0} - \frac{1}{r}\right)\right)^{\frac{1}{2}} \tag{13}.$$

Rješavanjem pripadne diferencijalne jednadžbe dobivamo:

$$\int_0^{t_{ff}} dt = -\int_{r_0}^{0} \left(2GM\left(\frac{1}{r} - \frac{1}{r_0}\right)\right)^{\frac{-1}{2}} dr \tag{14}.$$

Uzmemo li supstituciju $r = xr_0$ dobivamo:

$$t_{ff} = \int_0^1 \left(2GM\left(\frac{1}{r_0 x} - \frac{1}{r_0}\right)\right)^{\frac{-1}{2}} r_0 dx \tag{15}$$

$$= \left(\frac{{r_0}^3}{2GM}\right)^{\frac{1}{2}} \int_0^1 \left(\frac{x}{1-x}\right)^{\frac{1}{2}} dx \tag{16}.$$

Vrijedi $\int_0^1 \left(\frac{x}{1-x}\right)^{\frac{1}{2}} dx = \frac{\pi}{2}$ pa kombiniranjem izraza za gustoću (8) te izraza (11) i (16) dobivamo:

$$t_{ff} = \left(\frac{3\pi}{32G\rho}\right)^{\frac{1}{2}} \tag{17}.$$

Primijetimo da vrijeme slobodnog pada čestice ne ovisi o početnoj udaljenosti čestice u odnosu na središte oblaka već samo o gustoći oblaka. Urušavanjem oblaka se povećava njegova gustoća, a time se i smanjuje vrijeme slobodnog pada čestice. Zato relaciju (17) možemo shvatiti kao gornju granicu vremena potrebnog da se oblak uruši.

U stvarnosti, oblaci međuzvjezdane tvari nisu uniformni. Oblak će biti gušći u središtu, a to za posljedicu ostavlja da će materijal bliže središtu oblaka imati manje vrijeme slobodnog pada u odnosu na materijal bliže rubu [2]. Također, stvarni se oblaci obično rotiraju i kada dođe do urušavanja oblaka, polumjer se tog oblaka smanjuje što dovodi do sve brže rotacije oblaka zbog zakona očuvanja kutne količine gibanja [2]. Također, rotacija može dovesti do

prestanka urušavanja oblaka okomito na os rotacije, odnosno može rezultirati stvaranjem diska oko zvijezde, koji nazivamo protoplanetarnim diskom [2].

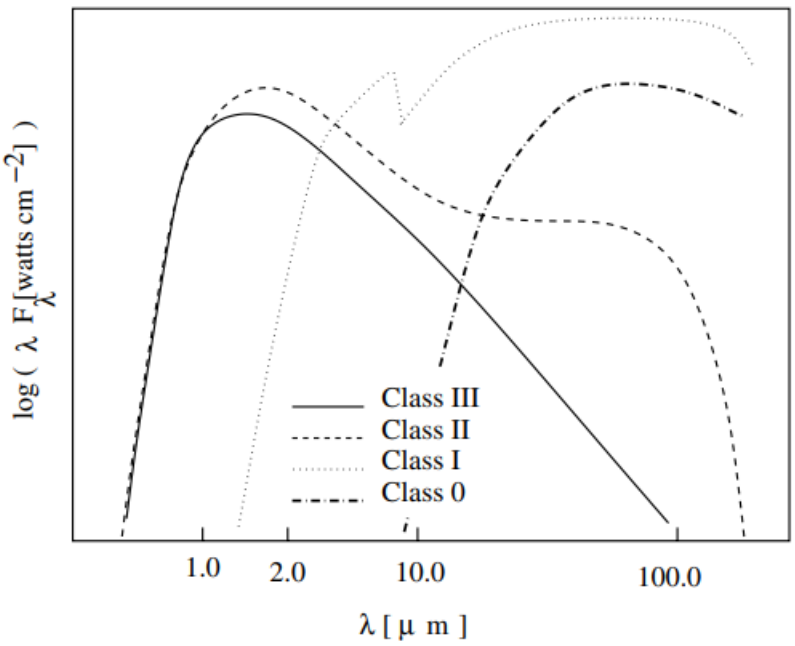
2.3 KLASIFIKACIJA MLADIH ZVIJEZDA

Mlade zvjezdane objekte *(*eng. *young stellar objects)* dijelimo na četiri klase. C. Lada je promatranjem spektralne distribucije energije, odnosno promatranjem koliko se energije emitira pri različitim valnim duljinama, uočio tri klase mladih zvijezda [5]. Kvantitativno klase razlikujemo tako da računamo *spektralni indeks* α kao:

$$\alpha = \frac{dlog(\lambda F_\lambda)}{dlog(\lambda)} \tag{18}$$

između 2.2 i 25 μm gdje je λF_λ intenzitet zračenja pri valnoj duljini λ. Na slici 2 vidimo ovisnost logaritamske vrijednosti inenziteta zračenja u odnosu na logaritamsku vrijednost valne duljine.

Za zvijezde koje pripadaju *klasi I* vrijedi $\alpha > 0$, za zvijezde koje pripadaju *klasi II* vrijedi $0 > \alpha > -2$, a za zvijezde *klase III* vrijedi $\alpha < -2$. Godine 1993. otkriveni su izvori zračenja koji se nisu mogli detektirati na valnim duljinama kraćim od 25 μm te su oni kasnije dodani kao četvrta klasa u Ladinu klasifikaciju mladih zvjezdanih objekata kao *klasa 0* [5, 6].



Slika 2. Prikaz spektralne distribucije za različite klase mladih zvijezda. Preuzeto iz [5].

Zvijezde koje pripadaju klasi 0 su najmlađe i još su omotane međuzvjezdanom tvari te ih je upravo zato teško promatrati, a stare su između 10^4 i 10^5 godina [5]. Zvijezde klase I su malo razvijenije, dob im je $\sim 10^5$ godina, ali i dalje su okružene znatnom količinom

međuzvjezdane tvari, a snažno emitiraju u infracrvenom dijelu spektra kao i zvijezde koje pripadaju klasi 0, što i vidimo na slici 2. Razlog tome je što zvijezde same po sebi emitiraju zračenje kao crna tijela te se većina energije izrači u optičkom dijelu spektra, a zvijezde klase 0 i klase 1 su okružene plinom i prašinom koji apsorbiraju vidljivi dio spektra. Također, sama zvijezda prenosi toplinu na okolnu prašinu što rezultira viškom zračenja u infracrvenom dijelu spektra. Zvijezde klase II često asociramo sa zvijezdama koje imaju protoplanetarni disk te emitiraju puno manji višak zračenja pri višim valnim duljinama u odnosu na zvijezde klase I, a procijenjena starost im je između 10^6 i 10^7 godina [5]. Zvijezde klase III su mlade zvijezde koje ne okružuje nikakva značajnija količina okolnog plina i prašine.

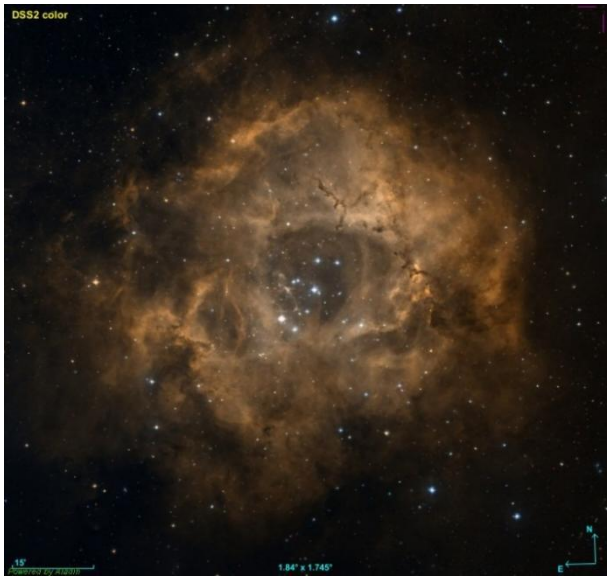
3 HII PODRUČJA

HII oblaci su nam važni jer ih često pronalazimo u područjima gdje se stvaraju nove zvijezde. Masivne zvijezde zrače fotone koji imaju dovoljno veliku energiju da ioniziraju okolni vodik i kada se većina vodika ionizira to područje nazivamo *HII područje* [2]. Nakon nekog vremena postigne se stanje ravnoteže, odnosno izjednači se broj ionizacija i rekombinacija. Masivne zvijezde uglavnom pronalazimo u manjim skupinama pa se razna HII područja preklapaju, a onda u konačnici pronalazimo jedno veliko HII područje. Unutar HII područja je gotovo sav vodik ioniziran, ali se na rubu događa nagla promjena, od gotovo sasvim ioniziranog plina do gotovo sasvim neutralnog plina [2]. Teoretske razloge zašto je tomu tako prvi je pokazao švedski astrofizičar, Bengt Stromgren, a njemu u čast HII područja često nazivamo *Stromgrenove sfere* [2]. HII područja su ograničena zbog jednog od dva razloga, prvi slučaj je da je oblak veći od dosega ionizirajućih fotona, a u drugom slučaju je cijeli oblak ioniziran te na rubu HII područja ionizirajuće zračenje i dalje traje, ali je, nakon ruba HII područja, gustoća oblaka premalena da uopće možemo reći da oblak u tom dijelu postoji te se ionizirajuće zračenje nastavlja slobodno širiti [2]. Temperature unutar HII područja dosta su visoke, $\sim 10^4$ K, što rezultira visokim tlakom unutar područja, a zbog visokog se tlaka HII područje širi, čak i nakon postizanja ravnoteže, a tako stišće okolni oblak što može biti okidač za stvaranje novih zvijezda [2].

4 KOMPLEKS ROZETA

Na slici 3 vidimo kompleks Rozetu (l = 207.0, b = -2.1) [7] koja se nalazi u zviježđu Jednoroga te je poznata kao područje gdje pronalazimo veliki broj zvijezda u nastanku. Kompleks se sastoji od različitih skupova među kojima je i mladi otvoreni skup NGC 2244 koji se nalazi u središtu kompleksa. Kompleks sadrži značajan broj masivnih O i B tipova zvijezda koje zrače energijom koja je dovoljna da se vodik ionizira te zato nalazimo veliko HII područje, a pokazano je da je maglica Rozeta ionizacijski ograničena Stromgrenova sfera. Iako nalazimo veliko HII područje, većina zvijezda unutar kompleksa nije nastala zbog kompresije oblaka čiji bi okidač bilo HII područje [8]. Dodajmo i kako u radu [9] navode da nema nikakvih dokaza da je HII područje okidač za stvaranje zvijezda unutar kompleksa osim za skup NGC 2244.

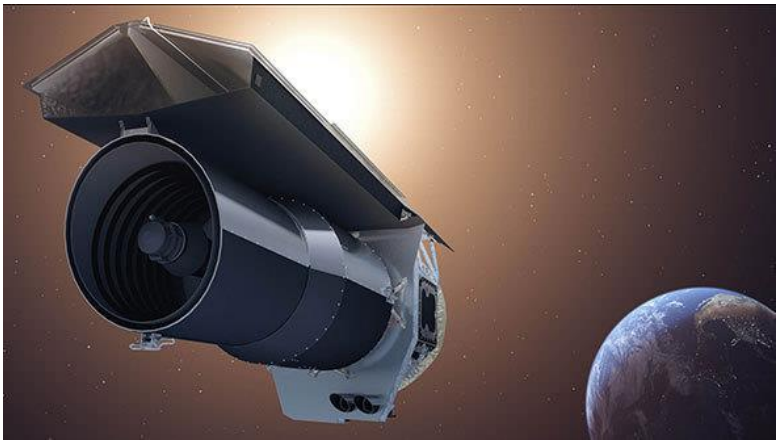
Starost skupa, ujedno i cijelog kompleksa je 1.6 ± 0.5 Myr, prosječna udaljenost kompleksa iznosi 1489 ± 37 pc, dok je prosječna udaljenost 1440 ± 32 pc do skupa NGC 2244 [10], a ukupna masa kompleksa $\approx 1.6 \text{ x } 10^5$ $M_\odot$, gdje $M_\odot$ predstavlja masu Sunca, a tok zračenja maglice iznosi $5 \text{ x } 10^{-11}$ W m^{-2} [7].



Slika 3. Kompleks Rozeta. Preuzeto iz [11].

5 TELESKOP SPITZER

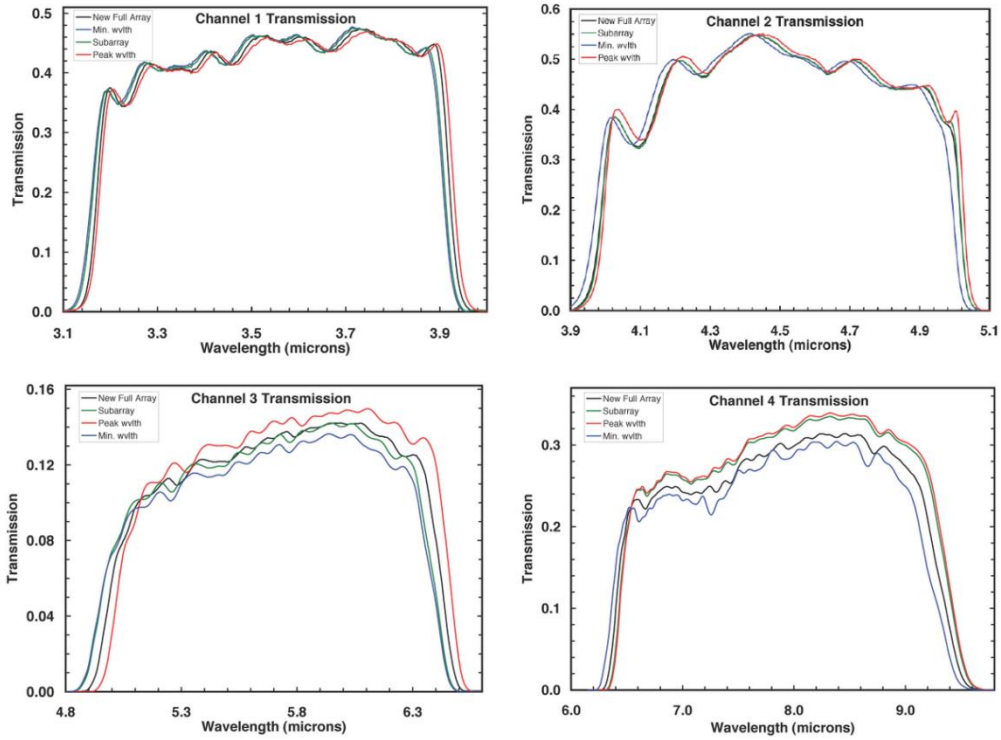
Cilj ovoga rada će nam biti identificiranje različitih klasa mladih zvjezdanih objekata u kompleksu Rozeta. Koristit ćemo se fotometrijskim podacima sa svemirskog teleskopa Spitzer kojeg vidimo prikazanog na slici 4.



Slika 4. Svemirski teleskop Spitzer. Preuzeto iz [12].

Iz svemira nam na Zemlju stalno dolaze razne informacije o samom svemiru, ali dio zračenja iz infracrvenog dijela spektra, na Zemlji, nije jednostavno mjeriti. Dio zračenja blokira

atmosfera, ali je također, većina stvari na Zemlji, a i u atmosferi pri približno sobnim temperaturama, a tijela pri sobnim temperaturama maksimum zračenja ostvaruju upravo u infracrvenom dijelu spektra što nam posljedično ostavlja pozadinu koje se jako teško riješiti. Svemirski teleskop Spitzer nam je u 17 godina rada prikupio mnogo informacija iz infracrvenog dijela spektra iako mu je misija originalno trebala trajati samo dvije i pol godine. Kako je infracrveno zračenje primarno zračenje topline, teleskop mora biti ohlađen na temperaturu približnoj apsolutnoj nuli da vlastita toplina teleskopa ne bi utjecala na mjerenja. Teleskop je dobio ime u čast američkog fizičara Lymana Spitzera, a misija mu je krenula 2003. godine [12]. The Infrared Array Camera (IRAC) jedan je od tri Spitzerova instrumenta. IRAC je kamera koja detektira zračenja u kratkovalnom i srednjevalnom infracrvenom području, preciznije između 3.6 i 8 μm. IRAC je kamera s četiri kanala, tj. postoje četiri detektora zračenja koja u isto vrijeme mjere zračenje pri različitim valnim duljinama, točnije pri 3.6, 4.5, 5.8 i 8.0 μm [13]. Naravno, kada kažemo pri tim valnim duljinama, mislimo na blagi raspon valnih duljina uokolo navedenih valnih duljina, kao što i vidimo na slici 5.



Slika 5. Prikaz transmisije zračenja različitih kanala kamere IRAC za određene valne duljine. Preuzeto iz [14].

6 OBRADA PODATAKA I REZULTATI

Za potrebe ovoga rada uzimamo podatke iz četiri kataloga u kojima su podaci prikupljeni iz različitih Spitzerovih IRAC kanala. Detaljnije informacije o samom setu podataka se mogu pročitati iz [15]. U svakom pojedinom katalogu imamo podatke o nebeskim koordinatama

(RA i Dec) detektiranih objekata te podatke o prividnom sjaju i pripadajućoj pogrešci mjerenja. Pomoću softvera *TOPCAT* [16] kataloge spajamo u jedan. Prvo *spajamo* dva kataloga u jedan. Za iste[2] pozicije izvora zadržavamo podatke o nebeskim koordinatama iz kataloga gdje su prikazani podaci o sjaju pri valnoj duljini od 3.6 μm, a dodajemo podatke o sjaju i pripadnoj pogrešci iz oba kataloga. Na isti način tom katalogu dodajemo i podatke iz preostala dva kataloga. Sada kada imamo katalog s nebeskim koordinatama i prividnom sjaju i greškama istih iz sva četiri kanala, odbacujemo sve izvore koji imaju grešku u mjerenju prividnog sjaja veću od 0.2 mag u bilo kojem od četiri filtera. Također, neki izvori imaju podatke o sjaju iz samo nekih filtera, a mi ćemo u ovom radu koristiti samo one koji imaju podatke iz sva četiri filtera. Na ovaj način smo dobili katalog s ukupno 18216 izvora zračenja.

Cilj ovoga rada je odrediti koji su izvori zračenja mladi zvjezdani objekti, a zatim i odrediti koji od njih pripadaju klasi I, a koji klasi II. Za dobiti pouzdane podatke moramo prvo ukloniti kontaminirajuće izvore zračenja poput galaksija koje stvaraju zvijezde pošto takve galaksije sadrže mnogo *PAH* molekula (eng. *Polycyclic Aromatic Hydrocarbon*) koje *jako sjaje* pri valnim duljinama od 5.8 i 8.0 μm [17]. PAH molekule nalazimo da najviše sjaje na rubovima HII područja [18].

Za izvor vrijedi da je PAH galaksija ako za njega vrijede svi sljedeći uvjeti:

$$[4.5] - [5.8] < \frac{1.05}{1.2}([5.8] - [8.0] - 1) \quad (19),$$

$$[4.5] - [5.8] < 1.05 \quad (20),$$

$$[5.8] - [8.0] > 1 \quad (21),$$

$$[4.5] > 11.5 \quad (22).$$

Također, ako za izvor vrijede svi idući uvjeti, smatramo ga PAH galaksijom te ga eliminiramo iz daljnje obrade [17].

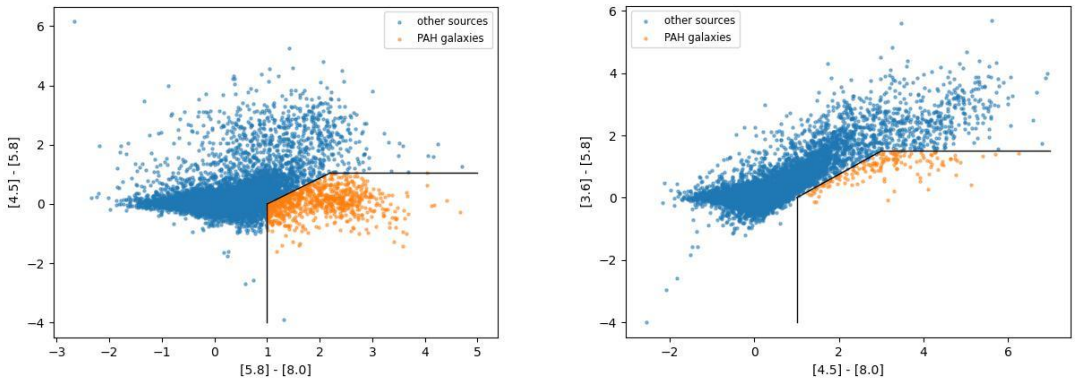
$$[3.6] - [5.8] < \frac{1.5}{2}([4.5] - [8.0] - 1) \quad (23),$$

$$[3.6] - [5.8] < 1.5 \quad (24),$$

$$[4.5] - [8.0] > 1 \quad (25),$$

gdje nam [3.6], [4.5], [5.8] i [8.0] predstavljaju prividan sjaj izvora pri 3.6, 4.5, 5.8 i 8.0 μm. Prethodne uvjete možemo predstaviti grafom kao na slici 6.

[2] Zapravo često za isti nebeski objekt u različitim katalozima imamo različita mjerenja nebeskih koordinata, ali smo dopuštali maksimalnu razliku u položaju objekta do 2 arcsec da bismo određeni izvor smatrali istim u različitim katalozima.



Slika 6. Dva boja-boja dijagrama gdje nam narančaste točke prikazuju PAH galaksije koje odbacujemo iz daljnje analize. (Na desnom grafu nisu prikazani izvori koji su izbačeni s lijevoga grafa.) Crne linije nam predstavljaju uvjete iz [17], ali ih na grafu, ne možemo sve prikazati, poput uvjeta (22). Zato pronalazimo izvore poput izvora na lijevom grafu s najnižom [4.5] - [5.8] vrijednošću koji su unutar linija, ali ih ne odbacujemo jer ne ispunjavaju sve uvjete da bi ih smatrali PAH galaksijom.

Na ovaj smo način iz daljnje obrade eliminirali ukupno 882 izvora zračenja.

Idući izvori zračenja koje odbacujemo su *aktivne galaktičke jezgre*, u daljnjem tekstu, *AGN izvori* (eng. *Active Galactic Nuclei*). AGN izvori su najsjajniji stalni izvori zračenja u svemiru, a zračenje je posljedica transfera mase na središnju crnu rupu [19]. Za AGN izvor će vrijediti svi od idućih uvjeta:

$$[4.5] - [8.0] > 0.5 \quad (26),$$

$$[4.5] > 13.5 + \frac{[4.5] - [8.0] - 2.3}{0.4} \quad (27),$$

$$[4.5] > 13.5 \quad (28).$$

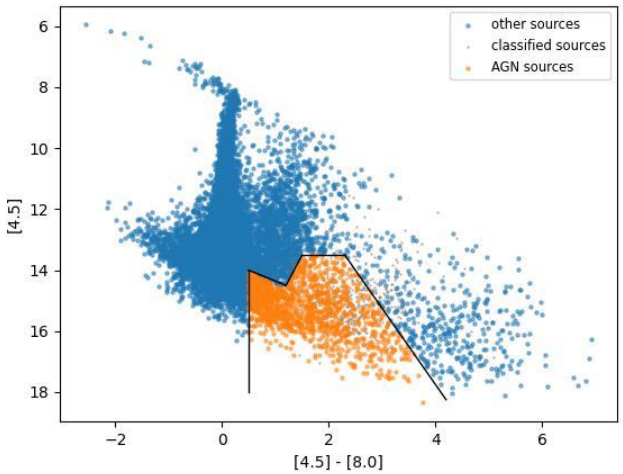
Također, osim ta tri uvjeta, za izvor mora vrijediti bilo koji od idućih uvjeta da bi za njega rekli da je AGN izvor [17]:

$$[4.5] > 13.5 + [4.5] - [8.0] \quad (29),$$

$$[4.5] > 14.5 - \frac{[4.5] - [8.0] - 1.2}{0.3} \quad (30),$$

$$[4.5] > 14.5 \quad (31).$$

Na slici 7 imamo prikazan boja-magnituda dijagram gdje vidimo prikazane prethodne uvjete. Na ovaj smo način detektirali i uklonili 1344 AGN izvora kontaminacije.



Slika 7. Dijagram boja-magnituda. Narančaste točke predstavljaju AGN izvore, sive točkice predstavljaju izvore koje smo već ranije odbacili, a plave točkice predstavljaju izvore koje zadržavamo.

Na slici 8 vidimo prikazane uvjete za eliminaciju izvora gdje dominira ili emisija šok-valova ili su izvori kontaminirani PAH molekulama. *Šok-val* je vrsta širenja poremećaja koja se događa kada se unutar medija događa nekakva nagla promjena poput promjene tlaka, temperature ili gustoće medija. Šok-valovi su u astrofizici česta pojava, opažamo ih kod supernovi ili kod formiranja mladih zvijezda. U astronomiji, *emisija šoka* podrazumijeva otpuštanje energije zbog šok-valova koji putuju kroz medij čime griju okolni plin i prašinu što rezultira emitiranjem energije. Iz [17] uzimamo uvjete od kojih svi moraju vrijediti da bismo za izvor mogli reći da je u pitanju emisija šoka:

$$[3.6] - [4.5] > \frac{1.2}{0.55}([4.5] - [5.8] - 0.3) + 0.8 \quad (32),$$

$$[4.5] - [5.8] \leqslant 0.85 \quad (33),$$

$$[3.6] - [4.5] > 1.05 \quad (34).$$

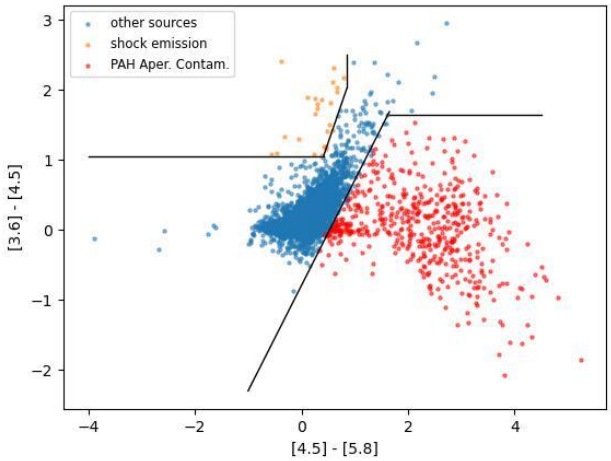
Izvore zračenja koji su kontaminirani PAH molekulama uklanjamo jer emisija PAH-a interferira s emisijom samog izvora što rezultira nepreciznim mjerenjem. Također, iz [17] uzimamo uvjete da bismo uklonili izvore kontaminirane PAH molekulama:

$$[3.6] - [4.5] - \sigma_2 \leqslant 1.4\big(([4.5] - [5.8]) + \sigma_1 - 0.7\big) + 0.15 \quad (35),$$

$$[3.6] - [4.5] - \sigma_2 \leqslant 1.65 \quad (36),$$

gdje je $\sigma_1 = \left([[4.5]]^2 + [[5.8]]^2\right)^{\frac{1}{2}}$, a $\sigma_2 = \left([[3.6]]^2 + [[4.5]]^2\right)^{\frac{1}{2}}$, gdje [[x]] predstavlja pogrešku u mjerenju prividnog sjaja pri valnoj duljini od x μm.

Na ovaj smo način uklonili iz daljnje obrade 25 izvora emisije šoka i 500 izvora s kontaminacijom PAH molekula.



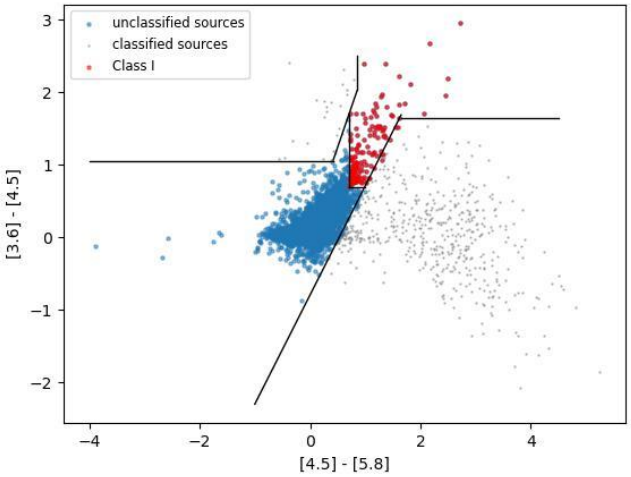
Slika 8. Boja-boja dijagram. Crvene točkice predstavljaju izvore kontaminirane PAH molekulama, žute predstavljaju emisiju šoka, a plave točkice predstavljaju izvore koje zadržavamo. Na grafu nisu prikazani već ranije odbačeni izvori.

Idući korak nam je odabrati članove klase I iz Ladine klasifikacije mladih zvjezdanih objekata. Izvore za koje vrijede idući uvjeti smatramo članovima klase I [6, 17, 20]:

$$[4.5] - [5.8] > 0.7 \quad (36),$$

$$[3.6] - [4.5] > 0.7 \quad (37).$$

Na slici 9 vidimo prikazane prethodne uvjete te smo na ovaj način identificirali 141 pripadnika klase I.



Slika 9. Boja-boja dijagram. Crvene točke predstavljaju pripadnike klase 1, sive točkice su izbačeni izvori kontaminacije s prethodnog grafa, a plave točkice još nisu identificirane.

Još nam je preostalo odabrati članove klase II. Izvore za koje vrijede idući uvjeti smatramo zvijezdama klase II [17, 20]:

$$[4.5] - [8.0] - \sigma_3 > 0.5 \quad (37),$$

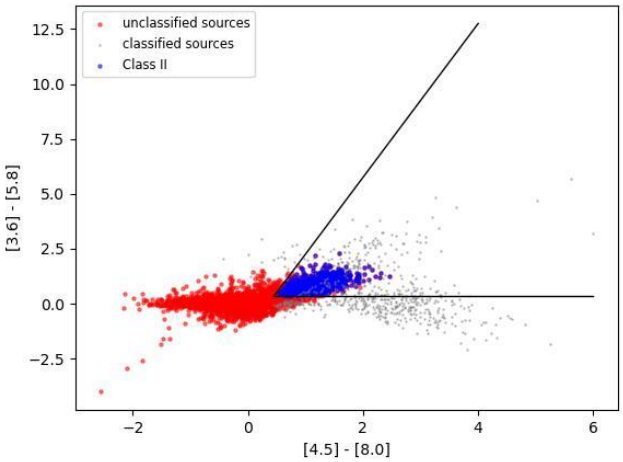
$$[3.6] - [5.8] - \sigma_4 > 1.65 \quad (38),$$

$$[3.6] - [5.8] + \sigma_4 \leqslant 3.5([4.5] - [8.0] - \sigma_3) + 0.5 \quad (39),$$

$$[3.6] - [4.5] - \sigma_2 > 0.15 \quad (40),$$

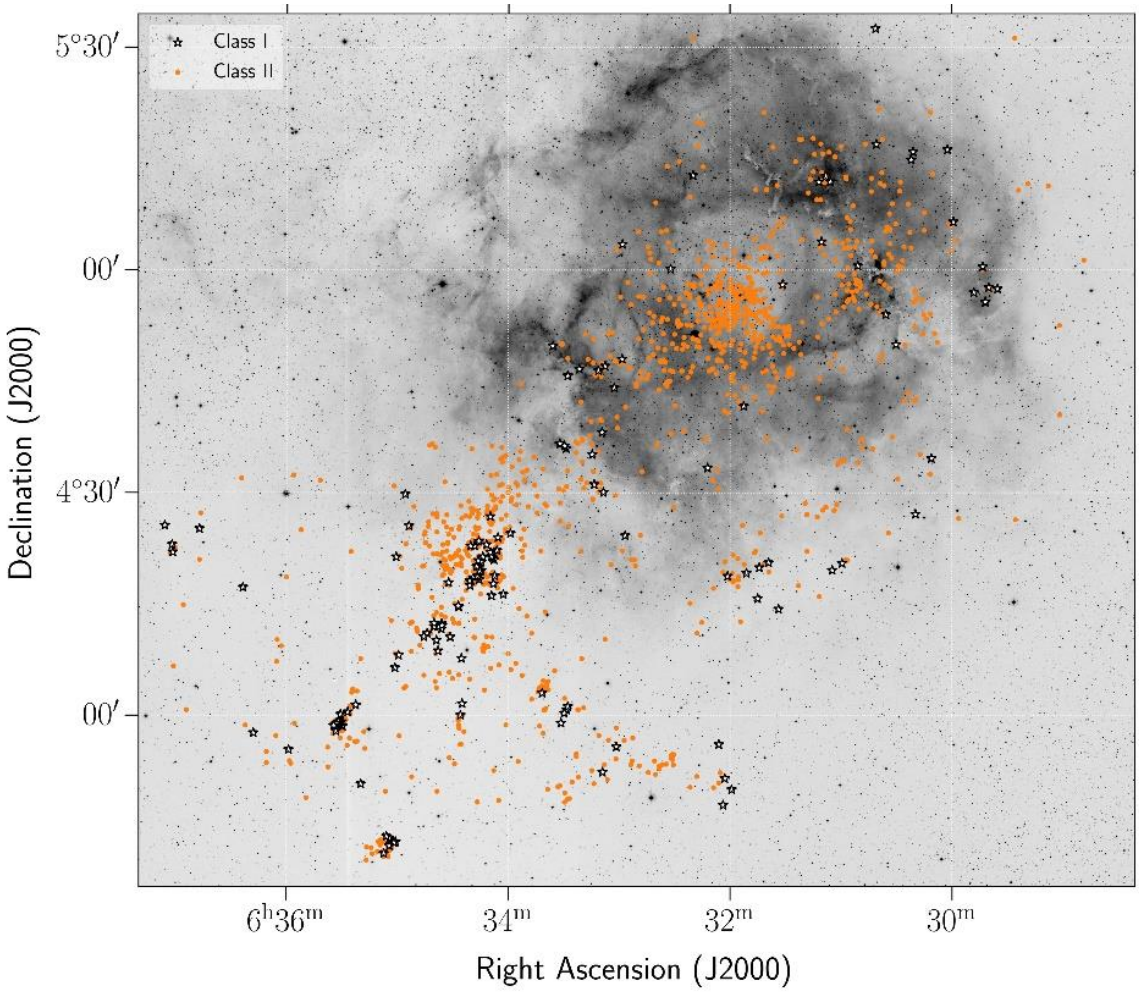
gdje je $\sigma_3 = \left([[4.5]]^2 + [[8.0]]^2\right)^{\frac{1}{2}}$, a $\sigma_4 = \left([[3.6]]^2 + [[5.8]]^2\right)^{\frac{1}{2}}$.

Slika 10 prikazuje prethodne uvjete kojima smo klasificirali 1163 izvora zračenja kao zvijezde klase II.



Slika 10. Dijagram boja-boja. Sive točkice predstavljaju već klasificirane objekte, crvene točkice predstavljaju neklasificirane objekte, a plave točkice predstavljaju zvijezde klase II.

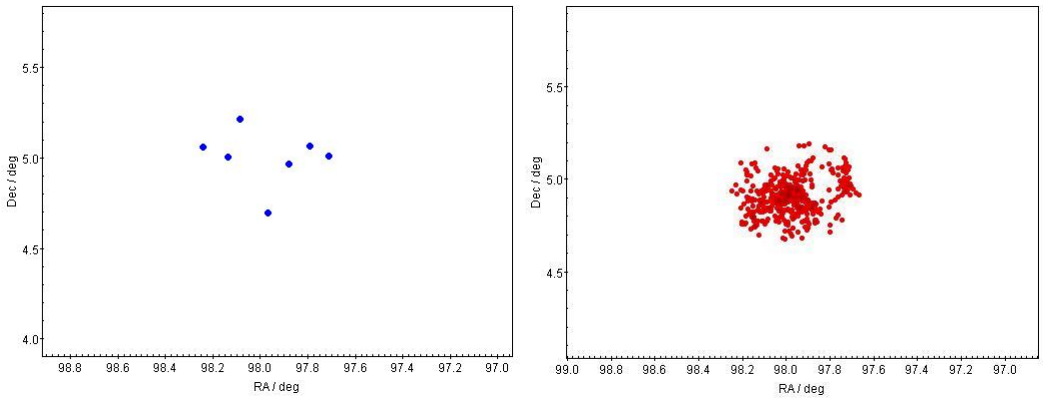
Na slici 11 vidimo prikaz kompleksa Rozeta s označenim pripadnicima klase I, odnosno klase II. Uočavamo dvije velike aglomeracije zvijezda, jedna vezana za skup NGC 2244, a druga za područje jugoistočno od skupa NGC 2244. Primijetimo kako je značajan postotak zvijezda klase I smješten izvan skupa NGC 2244, a kako unutar skupa NGC 2244 nalazimo veliki broj zvijezda klase II.



Slika 11. Kompleks Rozeta. Bijele zvjezdice s crnim obrubom predstavljaju zvijezde klase I, a narančaste točkice zvijezde klase II.

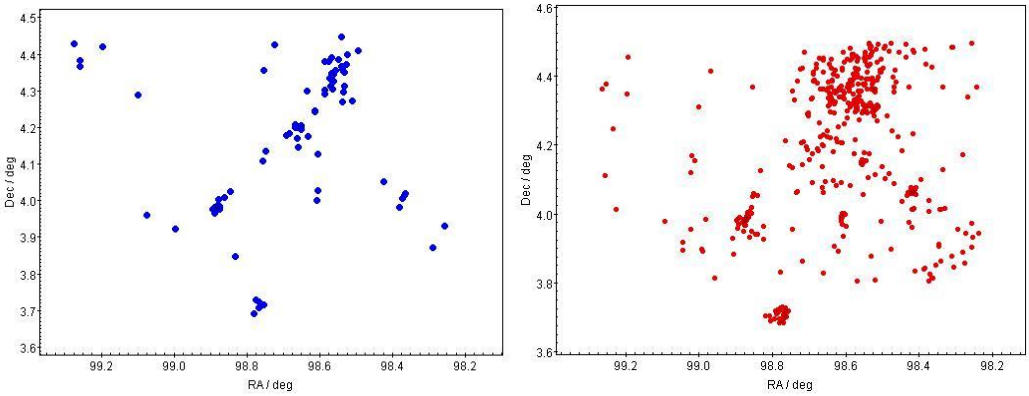
Ukupan omjer zvijezda klase I u odnosu na zvijezde klase II je približno 0.12. U radu iz 2008. godine, [8] su odredili 70 izvora zračenja klase I, 458 izvora zračenja klase II te 23 izvora koji su na rubu između zvijezda klase I i klase II što daje omjer od približno 0.15, a u radu iz 2007. godine [21] su promatrali područje dimenzija 30' x 30' uokolo središta skupa NGC 2244 te su identificirali 25 zvijezda koje pripadaju klasi I te 337 zvijezda klase II što daje približno omjer od 0.07. Iako možda na prvi pogled ovi omjeri izgledaju prilično različito, trebamo uzeti u obzir i količinu podataka, odnosno trebamo uzeti u obzir i statističku metodu [22] koja nam govori o nivou pouzdanosti računanja omjera. Ukoliko želimo reći da je naš omjer pouzdan 99%, moramo reći da se on nalazi negdje između 0.099 i 0.148. Također za podatke iz rada [8] vrijedi da su pouzdani 99 % ako je omjer zvijezda klase I u odnosu na klasu II između 0.115 i 0.201, a za rezultate iz rada [21] je taj omjer za isti nivo pouzdanosti u intervalu od 0.045 i 0.12. Prethodne intervale smo dobili uz pomoć [23]. Očito se sva tri intervala preklapaju između 0.11 i 0.12 pa možemo slobodno reći da se naši rezultati podudaraju s ranijim radovima. Već smo prokomentirali kako sa slike 11 uočavamo dvije veće aglomeracije zvijezda. Sada ćemo izolirati navedene aglomeracije te proučiti omjere pripadnike klase I u odnosu na pripadnike klase II u samo ta dva dijela kompleksa.

Na slici 12 vidimo prikazane članove klase I i klase II unutar skupa NGC 2244. Promatrani su članovi unutar radijusa od 18 arcmin uokolo središta skupa NGC 2244 (RA, Dec) = (06:31:57, +04:54).



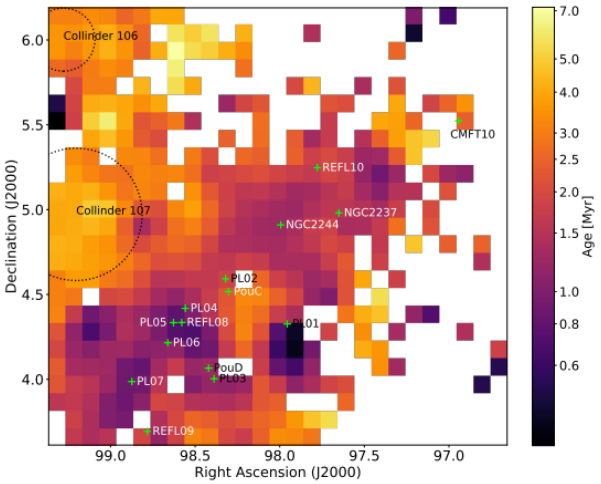
Slika 12. Zvijezde klase I (plave točkice) i zvijezde klase II (crvene točkice) unutar skupa NGC 2244.

Na ovaj smo način dobili 7 pripadnika klase I i 416 pripadnika klase II unutar skupa NGC 2244 što daje omjer classI/classII od 0.017. Isti postupak ponavljamo za područje jugoistočno od skupa NGC 2244. Za jugoistočno područje smo odabrali *pravokutno* područje, sve *južno* od RA = 4:30 te sve *istočno* od Dec = 06:33. Na slici 13 vidimo prikazane članove klase I, odnosno klase II u jugoistočnom dijelu kompleksa.



Slika 13. Prikaz izvora zračenja klase I (plave točkice) te izvora klase II (crvene točkice) u području jugoistočnom od skupa NGC 2244.

U jugoistočnom dijelu kompleksa smo identificirali 84 izvora zračenja karakterističnim zvijezdama klase I te 443 izvora zračenja karakterističnim zvijezdama klase II što nam daje omjer od 0.19. Kako su zvijezde klase I mlađe od zvijezda klase II [5], možemo zaključiti iz prethodna dva omjera da je srednja dob područja jugoistočno od skupa NGC 2244 manja od srednje dobi samog skupa NGC 2244 što je u skladu s ranijim radovima [8, 9, 10]. Srednja dob skupa NGC 2244 je 1.3 ± 0.4 Myr, a jugoistočnog dijela 1.0 ± 0.4 Myr [10]. Na slici 14 vidimo prikaz srednje dobi kao funkciju pozicije na nebu. Sa slike možemo uočiti da je jugoistočni dio kompleksa mlađi od samog središta što nam govori da se stvaranje novih zvijezda više ne odvija u središtu kompleksa, već na njegovim rubovima.



Slika 14. Prikaz srednje dobi kompleksa Rozeta. Preuzeto iz [10].

7 ZAKLJUČAK

Zvijezde nastaju urušavanjem međuzvjezdanih oblaka koji su načinjeni od međuzvjezdane tvari. Do urušavanja oblaka će doći ukoliko su zadovoljeni određeni uvjeti poput minimalne mase oblaka koja je potrebna da se isti uruši. Kako su novoformirane zvijezde i dalje okružene znatnom količinom međuzvjezdane tvari, one ne zrače poput već formiranih zvijezda koje zrače približno kao crna tijela. Mlade zvijezde emitiraju višak zračenja u infracrvenom dijelu spektra i ovisno o spektralnoj distribuciji energije, mlade zvijezde dijelimo u četiri klase. U ovom radu smo upotrijebili podatke sa svemirskog teleskopa Spitzer te smo promatrali kompleks Rozetu koja je poznata kao područje nastanka zvijezda. Proučavanjem raznih boja-boja te boja-magnituda dijagrama smo uspješno identificirali 1304 mlade zvijezde od čega 141 pripadnika mladih zvijezda klase I, a 1163 zvijezde klasificiramo kao zvijezde klase II. Također, promatrajući omjer zvijezda klase I i klase II u različitim dijelovima Rozete, došli smo do zaključka da je jugoistočni dio kompleksa mlađi od samog središta što implicira da se stvaranje zvijezda unutar kompleksa ne odvija u središtu već na njegovim rubovima.

8 LITERATURA

[1] Stanford Solar Center

URL:http://solarcenter.stanford.edu/FAQ/Qsunasstar.html#:~:text=The%20first%20person%20we%20know,was%20Anaxagoras%2C%20around%20450%20BC (20.5.2023.)

[2] Mark L. Kutner: *Astronomy: A Physical Perspective*, Cambridge University Press, 2003.

[3] Bradley W. Carroll, Dale A. Ostlie: *An Introduction to Modern Astrophysics*, Pearson New International Edition, 2014.

[4] Astronomy, URL:https://astronomy.com/magazine/ask-astro/2019/06/what-is-the-difference-between-a-globular-star-cluster-and-an-open-star-cluster (1.4.2023.)

[5] Norbert S. Schulz*: From Dust to Stars*, Praxis Publishing Ltd, Chichester, UK, 2005

[6] C.J. Lada, B.A. Wilking: *The nature of the embedded population in the rho Ophiuchi dark cloud : mid-infrared observations*, Astrophysical Journal, Vol. 287, p. 610-621, 1984.

DOI: https://doi.org/10.1086/162719 (11.5.2023.)

[7] Carlos G. Roman-Zuniga, Elizabeth A. Lada: *Star Formation in the Rosette Complex*, Astronomical Society of the Pacific, 2008.

URL**:** https://arxiv.org/abs/0810.0931v1

[8] C.J. Poulton, T.P. Robitaille, J.S. Greaves, I.A. Bonnell, J.P.Williams, M.H. Heyer: *A Spitzer survey of young stellar objects in the Rosette Molecular Cloud*, Mon. Not. R. Astron. Soc. 384, 1249–1262, 2008.

DOI: https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2007.12556.x (6.2.2023.)

[9] L. Cambresy, G. Marton, O. Feher, L.V. Toth, N. Schneider*: Young stellar clusters in the Rosette molecular cloud. Arguments against triggered star formation*, A&A 557, A29, 2013.

DOI: https://doi.org/10.1051/0004-6361/201321235 (6.2.2023.)

[10] K. Mužić, V. Almendros-Abad, H. Bouy, K. Kubiak, K. Peña Ramírez, A. Krone-Martins, A. Moitinho, M. Conceição*: Stellar population of the Rosette Nebula and NGC 2244: Application of the probabilistic random forest*, A&A 668, A19, 2022.

DOI: https://doi.org/10.1051/0004-6361/202243659 (6.2.2023.)

[11] Aladin Sky Atlas

[12] Center for Astrophysics Harvard & Smithsonian

URL:https://pweb.cfa.harvard.edu/facilities-technology/telescopes-instruments/spitzer-space-telescope (28.4.2023.)

[13] Spitzer Space Telescope

URL:https://www.spitzer.caltech.edu/mission/the-infrared-array-camera-irac#:~:text=The%20Infrared%20Array%20Camera%20(IRAC)%20was%20one%20of%20Spitzer's%20three,%2Dmillionth%20of%20a%20meter (28.4.2023.)

[14] IRSA, URL: https://irsa.ipac.caltech.edu/data/SPITZER/docs/irac/iracinstrumenthandbook/6/

[15] V. Almendros-Abad, K. Mužić, H. Bouy, A. Bayo, A. Scholz, K. Peña, Ramirez, A. Moitinho, K. Kubiak, R. Schöedel, R. Barač, P. Brčić, J. Ascenso, R. Jayawardhana: *Spectroscopic substellar initial mass function of NGC 2244*, A&A 677, A26, 2023.

DOI: https://doi.org/10.1051/0004-6361/202346237 (12.9.2023.)

[16] TOPCAT

URL: https://www.star.bris.ac.uk/~mbt/topcat/ (7.5.2023.)

[17] R. A. Gutermuth, S. T. Megeath, P. C. Myers L. E. Allen, J. L. Pipher, G. G. Fazio: *A Spitzer survey of young stellar clusters within one kiloparsec of the Sun: Cluster core extraction and basic structural analysis*, The Astrophysical Journal Supplement Series, 184:18–83, 2009.

DOI: https://doi.org/10.1088/0067-0049/184/1/18 (6.2.2023.)

[18] Seong Jin Kim, Woong-Seob Jeong, Tomotsugu Goto, Hyung Mok Lee, Hyunjin Shim, Chris Pearson, Myungshin I M, Hideo Matsuhara , Hyunjong Seo, Tetsuya Hashimoto, Minjin Kim, Chia-Ying Chiang, Laia Barrufet, Maria del Carmen Campos Varillas*: Characteristics of mid-infrared PAH emission from star-forming galaxies selected at 250 μm in the North Ecliptic Pole field*, Publ. Astron. Soc. Japan, 2019.

[19] ISDC

URL: https://www.isdc.unige.ch/~ricci/Website/Active_Galactic_Nuclei.html (10.5.2023.)

[20] "R. A. Gutermuth, S. T. Megeath, P. C. Myers L. E. Allen, J. L. Pipher, G. G. Fazio: *ERRATUM „A Spitzer survey of young stellar clusters within one kiloparsec of the Sun: Cluster core extraction and basic structural analysis*, The Astrophysical Journal Supplement Series, 189:352, 2010.

DOI: https://doi.org/0.1088/0067-0049/189/2/352 (6.2.2023.)

[21] Zoltan Balog, James Muzerolle, G. H. Rieke, Kate Y. L. Su, Eric T. Young: *Spitzer / IRAC-MIPS Survey of NGC 2244: Protostellar disk survival in the vicinity of hot stars*, The Astrophysical Journal, 660:1532Y1540, 2007.

URL: https://arxiv.org/abs/astro-ph/0701741 (6.2.2023.)

[22] Wikipedia, Binomial proportion confidence interval

URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Binomial_proportion_confidence_interval (11.5.2023.)

[23] Epitools, URL: https://epitools.ausvet.com.au/ciproportion (11.5.2023.)