

---

*Dimitrije Radojević*

# Korelacija prostorne distribucije i starosti YSO-a u okolini FIR petlje GIRL G212-11

---

*Analizirana je međusobna povezanost prostorne raspodele i približne starosti mladih zvezdanih objekata (YSO – Young Stellar Object) u neposrednoj blizini FIR (Far InfraRed) petlje GIRL (Galactic InfraRed Loop) G212-11. Na rezultatima, do kojih se došlo obradom podataka iz nekoliko kataloga tačkastih izvora, može se uočiti određena uslovljenost položaja YSO-a u zavisnosti od starosti objekta, odnosno njegove klase. Zaključeno je da je ta povezanost, kao i karakterističan oblik G212-11, posledica jakih zvezdanih vetrova ili nekog kataklizmičkog događaja koji se odigrao blizu centra petlje, a potom postepeno širio, indukujući stvaranje novih zvezda na svom putu.*

---

## Uvod

Međuzvezdana materija (MZM) se, najvećim delom, sastoji od gasa, tačnije od vodonika i helijuma, koji može biti u atomskom (neutralnom ili jonizovanom) ili u molekularnom stanju, sa dodatkom male količine težih elemenata. Ostalih nekoliko procenata ukupne mase MZM čini kosmička prašina, sa česticama prečnika do nekoliko stotina angstrema, pretežno ugljeničnog ili silicijumskog sastava. Burni kosmički događaji, poput supernovih ili jakih zvezdanih vetrova, mogu imati značajan uticaj na strukturu hladne međuzvezdane materije na velikoj skali. Ova struktura nije homogena, već sadrži veliki broj lukova, petlji, filamenata, mehura i šupljina (duplji), pa se često opisuje sunderastom, odnosno penastom strukturom (*Cosmic Bubble Bath*, Brand i Zealey 1975, prema: Nikolić 2001). Koks i Smit (Cox i Smith 1974, prema Nikolić 2001) su pokazali da eksplozije supernovih u uniformnom medijumu mogu rezultovati morfologijom švajcarskog sira hladne, difuzne MZM, u kom slučaju bi se topli koronalni gas nalazio u novonastalim mehurima. Ovakav mehanizam je ugrađen u model koji su napravili MekKi i Ostriker (McKee i Ostriker

---

*Dimitrije Radojević  
(1989), Užice,  
Toplička 15/20, učenik  
3. razreda Užičke  
gimnazije*

*MENTOR:  
dr Silvana Nikolić,  
Astronomska  
opservatorija, Beograd*

1977, prema: Nikolić 2001) i koji predviđa rađanje nove generacije zvezda u kompresovanom medijumu duž zidova mehurova. Poznato je da se mlade zvezde rađaju u molekularnim oblacima gasa (HII regioni), a smatra se da se prvobitan proces lokalne akumulacije i zgušnjavanja gasa indukuje spolja.

Neke od formacija koje ulaze u strukturu MZM sadrže gas koji je nešto topliji od okoline i koji zrači u FIR (*Far InfraRed*) domenu. Većina ovakvih "FIR petlji" (koje se još nazivaju i GIRL – *Galactic InfraRed Loop*) su elipsoidnog oblika, protežu se od nekoliko desetina do nekoliko stotina parseka u prečniku i uglavnom nastaju kao rezultat udarnih talasa obližnje supernove, jakih zvezdanih vetrova masivnih zvezda (Tenorio-Tagle i Bodenheimer 1988, prema: Nikolić 2001), ili sudara oblaka gasa iz haloa Galaksije sa MZM galaktičkog diska. Katalogizaciju galaktičkih FIR petlji izvršili su Kis i saradnici (Kiss *et al.* 2004) i Kenjveš i saradnici (Könyves *et al.* 2007), što je rezultovalo katalogom petlji u sva četiri galaktička kvadranta (CFIRLG – *Catalogue of Far-InfraRed Loops in the Galaxy*).

Sama činjenica da petlje zrače u FIR domenu ukazuje na turbulentno kretanje gasa, što sugerise da je u toj oblasti veća verovatnoća indukovanog rađanja zvezda. Uzimajući u obzir ove pretpostavke, kao i sam oblik petlji, može se pretpostaviti da u petljama postoji nekakav privilegovani pravac prostiranja indukovanja rađanja zvezda, odnosno da se može uočiti zavisnost između starosti obližnjih, novonastalih mladih zvezdanih objekata (YSO – *Young Stellar Object*) i njihovog položaja u odnosu na petlju.

U ovom radu je ova hipoteza ispitana na primeru FIR petlje GIRL G212-11.

## Metod

### Klasifikacija mladih zvezdanih objekata

Standardna teorija nastanka zvezda analitički je razvijena krajem osamdesetih godina prošlog veka. Po teoriji, tokom svoje evolucije protozvezda prolazi kroz više faza, od kojih se svaka odlikuje specifičnom fenomenološkom slikom. Spektar protozvezde u IR domenu uveliko zavisi od prirode i količine materijala (gas a i prašine) koji je okružuje, odnosno od etape njene evolucije (Lada 1999). Po klasifikaciji koju su prvobitno izvršili Lada i Wilking (Lada & Wilking 1984), a dopunili Andre i saradnici (Andre *et al.* 1993), YSO-i se, prema fazi evolucije, dele na četiri klase. Redni brojevi ovih klasa opadaju od evoluciono najstarijih (klasa III i II) do najmladih (klasa I i 0).

U klasu III i klasu II spadaju zvezde koje još nisu stigle na glavni niz HR dijagrama (*PMS – pre-main sequence stars*), tačnije, slabe T Tauri i klasične T Tauri zvezde, redom. Slabe T Tauri zvezde imaju spektar crnog tela, čiji oblik katkad ukazuje na postojanje optički prozračnog akrecionog diska jako male mase, i čija je starost procenjena na  $2-3 \times 10^7$  godina. Klasične T Tauri zvezde su nešto mlađe ( $0.5 - 3 \times 10^6$  godina) i odlikuju se širim spektrom i ekscesosom zračenja na većim talasnim dužinama, što je jasan indikator postojanja akrecionog diska. Klasa I je karakteristična po brojnim apsorpcionim linijama i daleko većim viškom zračenja u IR domenu, dok je širina spektra slična kao kod prethodne klase. Starost ovakvih objekata je reda veličine  $10^5$  godina. Klasa 0 predstavlja evoluciono najmlađu klasu čija je starost reda  $10^4$  godina, sa jakim submilimetarskim zračenjem, što sugeriše postojanje masivne cirkumstelarne strukture. Poslednje dve klase su često „utopljene” u molekularnim oblacima u kojima su nastali.

Bitno je naglasiti da se ova klasifikacija može primeniti samo na objekte relativno male mase (reda veličine mase Sunca) zbog toga što se masivnije zvezde već tokom faze akrecije nalaze ili u neposrednoj blizini ili na samom glavnom nizu HR dijagrama (Shu *et al.* 1987, prema: Nikolić 2001).

Ukoliko se klase mladih zvezdanih objekata poređaju po starosti pripadnika, dobija se potpuna evoluciona staza jednog YSO-a: klasa 0 → klasa I → klasa II → klasa III. Uzimajući u obzir činjenicu da različiti oblici spektra zračenja, karakteristični za svaku klasu, potiču od različitih količina luminoznog, cirkumstelarnog omotača gasa i prašine oko jezgra, može se pretpostaviti da evolucioni put zapravo prati smanjivanje mase ovog omotača usled njegove akrecije i kasnije disipacije (Lada 1987).

Proučavanje mladih zvezdanih objekata se uglavnom zasniva na analizi infracrvenog dela spektra zračenja izvora. Smatra se da najveći doprinos luminoznosti mladih YSO-a, čije je zgusnuto jezgro obmotano pomenutim sfernim omotačem (nekoliko puta masivnijim od jezgra), obezbeđuje upravo akrecija materije koja iz omotača „pada” ka jezgru, zračeći u infracrvenom domenu. Tokom kasnijih evolutivnih faza, kada je omotač manje-više istrošen, višak IR zračenja potiče iz cirkumstelarnog diska, zagrevanog od strane mlade zvezde u centru (Adams *et al.* 1987).

Kao što je objašnjeno, svaka klasa se odlikuje specifičnim karakteristikama spektra. Radi lakše klasifikacije, uvedeno je nekoliko kriterijuma prema čijoj se vrednosti može odrediti klasa YSO-a. U ovom radu korišćeni su *spektralni indeks* i *bolometrijska temperatura*.

Spektralni indeks nekog izvora zapravo predstavlja nagib određenog dela SED (*spectral energy distribution*) krive, odnosno krive zračenja tog tela. Definisana je na intervalu  $\lambda$  od 1 do 100  $\mu\text{m}$ , i to na sledeći način:

$$\alpha = \frac{d \log(\lambda F_\lambda)}{d \log \lambda} \quad (1)$$

gde je  $F_\lambda$  monohromatski fluks zračenja na talasnoj dužini  $\lambda$ . Vrednosti spektralnog indeksa  $\alpha < -1.5$  su karakteristične za klasu III, vrednosti  $-1.5 \leq \alpha < 0$  za klasu II i  $\alpha \geq 0$  za klasu I. Klasa 0 se teško može odvojiti preko vrednosti spektralnog indeksa zbog toga što se maksimum intenziteta zračenja takvih objekata nalazi daleko u submilimetarskom domenu, što prevazilazi interval na kome je ovakav spektralni indeks definisan.

Bolometrijska temperatura je ona temperatura koju ima crno telo iste srednje frekvencije kao posmatrani spektar mladog zvezdanog objekta (Chen *et al.* 1995; Myers *et al.* 1998):

$$T_{\text{bol}} = 125 \times 10^{-11} \bar{\nu} \text{ [K} \cdot \text{Hz}^{-1}] \quad (2)$$

gde je  $\bar{\nu}$  srednja frekvencija posmatranog spektra, koja je definisana (Ladd *et al.* 1991) kao:

$$\bar{\nu} = \frac{\int_0^{\nu_{\text{max}}} \nu F_\nu d\nu}{\int_0^{\nu_{\text{max}}} F_\nu d\nu} \quad (3)$$

gde je  $\nu_{\text{max}}$  najveća frekvencija na kojoj je detektovan fluks, a  $F_\nu$  monohromatski fluks na frekvenciji  $\nu$ . Međutim, kako jednačina 3 zahteva ekstrapolaciju obe funkcije  $f_1(\nu) = \nu F_\nu$  i  $f_2(\nu) = F_\nu$ , a priroda podataka korišćenih u ovom radu je takva da je maksimalan broj detektovanih flukseva zračenja nekog izvora iznosio  $n = 11$  (što ne bi rezultovalo dovoljnom preciznošću ekstrapolacije), jednostavno je računata površina ispod grafika dobijenog neposrednim spajanjem tačaka:

$$\bar{\nu} = \frac{\sum_{i=0}^{n-1} (\nu_{i+1} - \nu_i)(\nu_{i+1} F_{\nu_{i+1}} + \nu_i F_{\nu_i})}{\sum_{i=0}^{n-1} (\nu_{i+1} - \nu_i)(F_{\nu_{i+1}} + F_{\nu_i})} \quad (4)$$

Vrednosti bolometrijske temperature objekata klase III su  $T_{\text{bol}} \geq 2800 \text{ K}$ , klase II  $650 \text{ K} \leq T_{\text{bol}} < 2800 \text{ K}$ , klase I  $70 \text{ K} \leq T_{\text{bol}} < 650 \text{ K}$  i  $T_{\text{bol}} < 70 \text{ K}$  za klasu 0.

U ovom radu je kao primarni kriterijum klasifikacije YSO-a korišćen spektralni indeks između  $2.2 \mu\text{m}$  (K) i  $25 \mu\text{m}$ . Vrednost bolometrijske temperature je potom korišćena za diferencijaciju klase 0 i klase I.

## Podaci i katalogi

Podaci korišćeni u ovom radi su preuzeti iz *online* kataloga tačkastih izvora. Radi što veće preciznosti, korišćeno je više različitih kataloga, tačnije IRAS PSC, 2MASS PSC i MSX. Ovi katalogi pružaju informacije o zračenju na više talasnih dužina i međusobno se dopunjuju, pružajući kompletniju sliku spektra zračenja tačkastih izvora u IR domenu, što je od suštinske važnosti za proučavanje mladih zvezdanih objekata.

IRAS PSC (Infrared Astronomical Satellite Catalogs 1988) nudi flukseve zračenja na 12, 25, 60 i 100  $\mu\text{m}$ . Iako ima najlošiju prostornu rezoluciju, zajedno sa 2MASS-om je korišćen kao primarni katalog, što znači da su podaci iz ta dva kataloga korišćeni za računanje vrednosti spektralnog indeksa.

2MASS PSC (Cutri *et al.* 2003) pruža informacije o zračenju, tačnije magnitude, na J, H i K opsezima (1.25, 1.65 i 2.17 mikrona, redom), ima najbolju prostornu rezoluciju, a samim tim sadrži i najviše izvora. Takođe je primarni katalog.

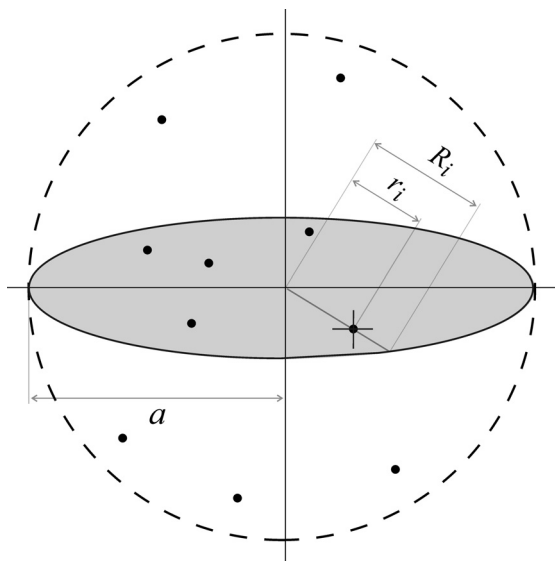
MSX (Egan *et al.* 2003) je korišćen kao dopunski katalog i sadrži flukseve zračenja na A, C, D i E opsezima (8.28, 12.13, 14.65, 21.3 mikrona, redom) koji upotpunjuju spektar dobijen spajanjem podataka iz 2MASS i IRAS kataloga.

## Selekcija izvora

Postoji nekoliko nivoa selekcije kroz koje su izvori u katalogima morali proći kako bi se koristili u finalnoj analizi. Selekcija je vršena radi što veće preciznosti i verodostojnosti krajnjih podataka.

Prva selekcija je izvršena prilikom povezivanja podataka iz sva tri kataloga. Naime, kako se ukupan broj tačkastih izvora koji svaki katalog sadrži uveliko razlikuje zbog različite prostorne rezolucije i različite pokrivenosti neba, postoji određena verovatnoća da neki izvor detektovan u jednom katalogu ne bude pronađen u ostala dva. Kako su 2MASS i IRAS primarni katalogi, iz čijih se fluksa računa spektralni indeks, svaki izvor koji je prošao ovaj nivo selekcije *morao je biti detektovan* u oba ova kataloga.

Poseban problem predstavlja drastična razlika u prostornoj rezoluciji IRAS i 2MASS kataloga, o čemu govori i činjenica da potonji sadrži skoro 2000 puta više izvora od prvog. Ukoliko se u obzir uzme prosečna prostorna greška IRAS kataloga, tačnije prosečna duža poluosu  $2\sigma$  elipse prostorne greške, od desetak lučnih sekundi, i uporedi sa prosečnom dužom poluosom  $\sigma$  elipse prostorne greške 2MASS kataloga od jedne desetinke lučne sekunde, jasno je da će za isti radijus pretrage, na istom delu neba, 2MASS katalog vratiti veći broj rezultata nego IRAS. Odavde



Slika 1.  
 Ilustracija problema  
 prostorne  
 korespondencije nekog  
 izvora u IRAS-u sa  
 izvorima u ostala dva  
 kataloga

Figure 1.  
 The problem of spatial  
 correspondence between  
 a sample source in  
 IRAS catalog and  
 sources found in two  
 other catalogs

se lako može zaključiti da se za jedan izvor u IRAS-u ne može sa apsolutnom sigurnošću naći (odabrati) fizički isti, tj. prostorno korespondentan izvor u 2MASS-u, ukoliko se barata samo sa podacima iz kataloga.

U ovu svrhu razvijen je algoritam koji za jedan izvor u IRAS katalogu odabira izvor koji je statistički najverovatniji, odnosno fizički isti, u ostalim katalogima. Početni korak je slanje upita 2MASS i MSX katalogima (kružna pretraga) sa koordinatama izvora u IRAS-u (centar pretrage) i pomenutom dužom poluosom  $2\sigma$  elipse prostorne greške (radijus pretrage).

Uopšten prikaz ovog problema nalazi se na slici 1. Crne tačke predstavljaju rezultate pretrage 2MASS ili MSX kataloga. Opseg pretrage je predstavljen krugom isprekidane linije poluprečnika  $a$ , koji je ekvivalentan dužoj poluosi  $2\sigma$  elipse prostorne greške (siva).  $R_i$  je dužina ose elipse na kojoj se nalazi  $i$ -ti izvor, a  $r_i$  je rastojanje između  $i$ -tog izvora i centra kruga, tj. izvora u IRAS katalogu.

Za svaki rezultat pretrage (izvor) koji se nalazi unutar osenčene elipse računa se gustina verovatnoće Gausove raspodele po formuli:

$$P_i = \frac{1}{\sigma_i \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{r_i^2}{2\sigma_i^2}} \quad (5)$$

gde je  $P_i$  gustina verovatnoće za  $i$ -ti izvor, a  $\sigma_i = R_i/2$  standardna devijacija za osu na kojoj leži  $i$ -ti izvor. Izvor sa najvećom gustinom verovatnoće predstavlja najbolji izbor, odnosno, smatra se prostorno korespondentnim, te ga algoritam povezuje sa početnim IRAS izvorom.

Algoritam za povezivanje, budući da je prvi put korišćen u ovom radu, bio je testiran na nekoliko primera, uključujući Venu i jedan objekat

ispitan u radu Kuna i saradnika (Kun *et al.* 2001). U oba slučaja su katalogi bili dobro povezani, budući da su SED-ovi konstruisani na osnovu povezanih fotometrijskih podataka bili identični očekivanima. Međutim, iako je statistički opravdan, to nikako ne znači da je ovaj metod povezivanja podataka apsolutno tačan i precizan. Ovo se može reflektovati na konačne rezultate ukoliko se analizira mali broj izvora, što u ovom radu nije slučaj.

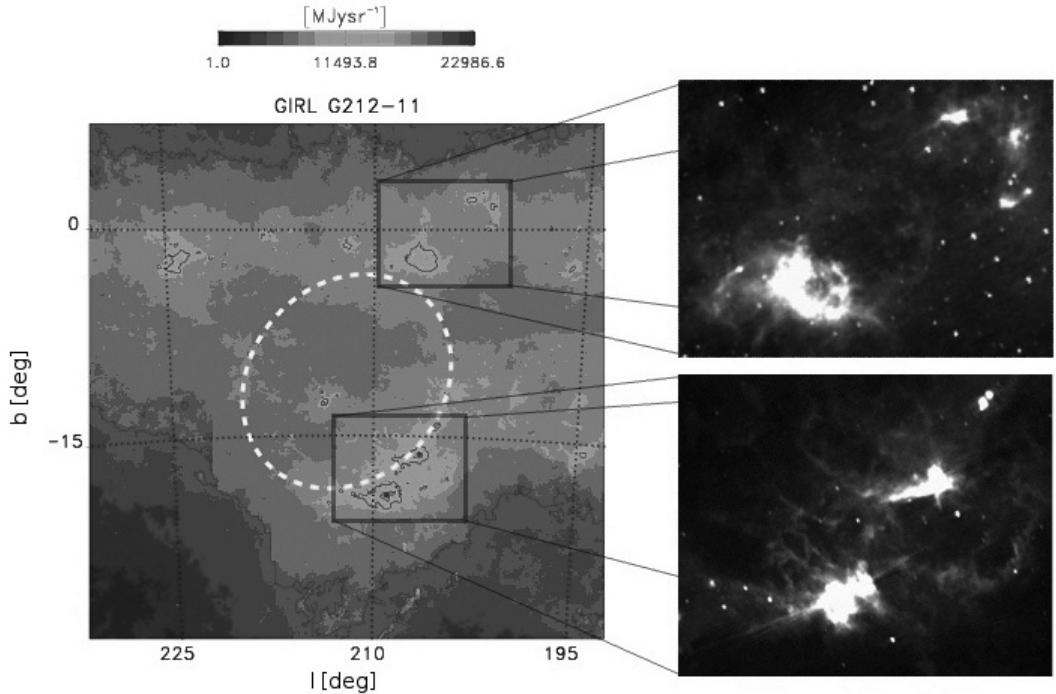
Sledeći nivo selekcije se ticao kvaliteta fluksa zračenja dobijenih iz kataloga. Kvalitet fluksa na 2.2 i 25  $\mu\text{m}$  je jako bitan faktor koji određuje preciznost vrednosti spektralnog indeksa. Shodno tome, odbačeni su svi izvori čiji kvalitet fluksa (ili magnitude, u slučaju 2MASS-a) na pomenutim talasnim dužinama nije bio zadovoljavajući. Indikatori kvaliteta fluksa se razlikuju od kataloga do kataloga, i uglavnom se u dokumentaciji navode opširna uputstva o tome kako izdvojiti verodostojne podatke i na koje indikatore treba obratiti pažnju. Kako se u ovom radu za analizu koristio ogroman broj izvora, gde nema potrebe za izdvajanje samo onih apsolutno „čistih“, izvršene su prilično grube, ali, po mišljenju autora, sasvim dovoljne i efikasne provere kvaliteta podataka, o čemu govori i činjenica da ovaj korak selekcije prolazi samo oko petina prvobitnog broja izvora.

Što se tiče IRAS kataloga, izvor je zadovoljavao proveru za vrednosti fotometrijskog kvaliteta fluksa na 25 mikrona  $f_{qual_{25}} \geq 2$ . Indikator kvaliteta podataka u 2MASS katalogu je nešto drugačijeg formata (*rld\_flg*), te su dozvoljene vrednosti treće cifre indikatora (kvalitet K opsega) bile sve *osim* 0, 4, 6 i 9.

Finalni nivo selekcije se sastojao u odstranivanju irelevantnih zvezda poznog spektralnog tipa, odnosno zvezda koje se već nalaze na glavnom nizu HR dijagrama, iz uzorka. Svi izvori sa vrednošću spektralnog indeksa  $\alpha \leq -2$  bili su odbačeni. Kako granica između mladih objekata klase III i zvezda na glavnom nizu zna biti jako difuzna, u ovom koraku selekcije su finalni podaci ograničeni na one objekte za koje se sa velikom sigurnošću može reći da su PMS, odnosno protozvezde.

## GIRL G212-11

GIRL G212-11 je kataloški naziv petlje ispitane u ovom radu. Ona je izabrana zbog više razloga. Usled njenih ogromnih dimenzija (prosečna duža poluosa fitovanih elipsi petlji u CFIRLG katalogu je oko dva do tri stepena) nije bilo problema sa malom količinom konačnih, upotrebljivih podataka iz kataloga tačkastih izvora. Udaljenost do ove petlje je jako dobro procenjena i izračunata je na osnovu čak 5 objekata fizički povezanih sa petljom, čija je udaljenost dobro poznata. Takođe, zidovi, odnosno granice, ove petlje su jako dobro definisani u odnosu na njenu unutrašnjost, što se lako može uočiti na slici 2. Površinska mapa zračenja



Slika 2. Površinska mapa intenziteta (F)IR zračenja petlje GIRL G212-11

Figure 2. FIR surface intensity map of GIRL G212-11

je preuzeta iz kataloga FIR petlji u I, III i IV galaktičkom kvadrantu (Könyves *et al.* 2007). U uokvirenim regionima zida petlje u gornjem i donjem desnom uglu mogu se primetiti oblasti povišene IR aktivnosti. Na uvećanim prikazima tih regiona sa desne strane se jasno vide oblaci gasa u kojima se, po svoj prilici, formiraju mlade zvezde (slike iz *IRAS Sky Survey Atlas-a*).

Najbitnije karakteristike GIRL G212-11 date su u tabeli 1, gde su  $l_c$  i  $l_b$  galaktičke koordinate centra petlje,  $a_c$  duža poluosa fitovane elipse petlje,  $a_w$  duža poluosa elipse koja sadrži zid petlje,  $D$  udaljenost do petlje, a  $x$  i  $y$  realne dimenzije petlje po dužini i širini. Podaci su preuzeti iz kataloga FIR petlji u I, III i IV galaktičkom kvadrantu (Könyves *et al.* 2007).

Tabela 1. Podaci o petlji GIRL G212-11

$l_c$ [deg]	$l_b$ [deg]	$a_c$ [deg]	$a_w$ [deg]	$D$ [kpc]	$x$ [kpc]	$y$ [kpc]
212.0	-11.0	8.4	11.1	0.5	0.148	0.125



Kada se govori o fizičkoj povezanosti ispitane petlje i izvora dobijenih iz kataloga, treba obratiti pažnju na sledeće. Projekcija FIR petlje na nebesku sferu je zapravo elipsa. Katalogi tačkastih izvora kao rezultat daju fotometrijske podatke *svih* objekata na zatom delu neba, što znači da će u rezultatima pretrage sigurno biti i onih izvora koji nemaju nikakve fizičke veze sa petljom, tj. nalaze se fizički bliže (ispred), odnosno dalje (iza) od petlje. Uzimajući u obzir uzorak od nekoliko hiljada izvora, ne postoji način na koji bi se takvi objekti mogli odbaciti, pre svega zbog toga što ne postoje nikakvi indikatori o njihovoj udaljenosti. Međutim, može se pretpostaviti da će većinu ovakvog „šuma“ činiti zvezde kasnijeg spektralnog tipa, odnosno oni objekti sa jako niskim vrednostima spektralnog indeksa, za koje, kao što je objašnjeno, već postoji kriterijum selekcije.

## Automatizacija procesa

Kompletan proces pretrage kataloga, selekcije i katalogizacije izvora morao je biti automatizovan zbog ogromne količine podataka koju je trebalo obraditi u ovom radu. U tu svrhu je napisana skripta u programskom jeziku Python koja je povezala sve pomenute etape obrade, mnogostruko ubrzavajući i olakšavajući dobijanje konačnih rezultata. Ručni rad je sveden na tu meru da su morale da se unesu samo koordinate i radijus pretrage kako bi program počeo sa radom.

## Rezultati i diskusija

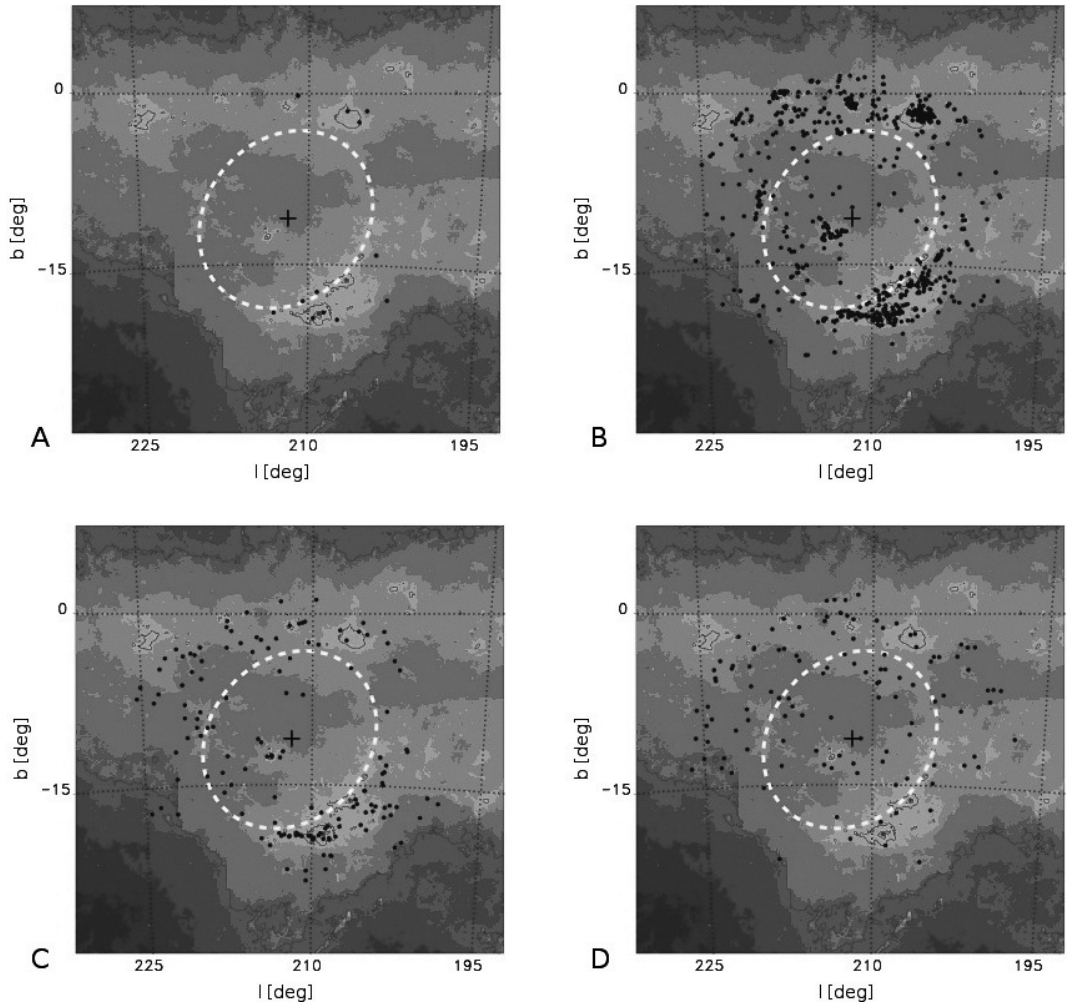
Izvršena je pretraga dela neba na kome se nalazi G212-11, sa centrom pretrage u centru petlje, u sva tri kataloga tačkastih izvora, i to sa radijusom pretrage nešto većim no duža poluosa elipse sa zidom petlje (12.5 stepeni).

Nakon selekcije rezultata, na osnovu dostupnih flukseva zračenja su računane vrednosti spektralnog indeksa i bolometrijske temperature za svaki objekat, a potom je vršena klasifikacija YSO-a.

Ukupno je nađeno 117 objekata klase III, 146 objekata klase II, 625 objekata klase I i 13 objekata klase 0. Na slici 3. se može videti prostorna raspodela objekata sve 4 klase u petlji ponaosob, gde svaka crna tačka označava jedan objekat.

Sa ovih rezultata se lako uočava prostorna povezanost klasa 0, I, i II, čiji su pripadnici zajedno grupisani oko regiona povišene IR aktivnosti (slika 2). Raspodela evoluciono najstarije klase, klase III, je manje-više homogena.

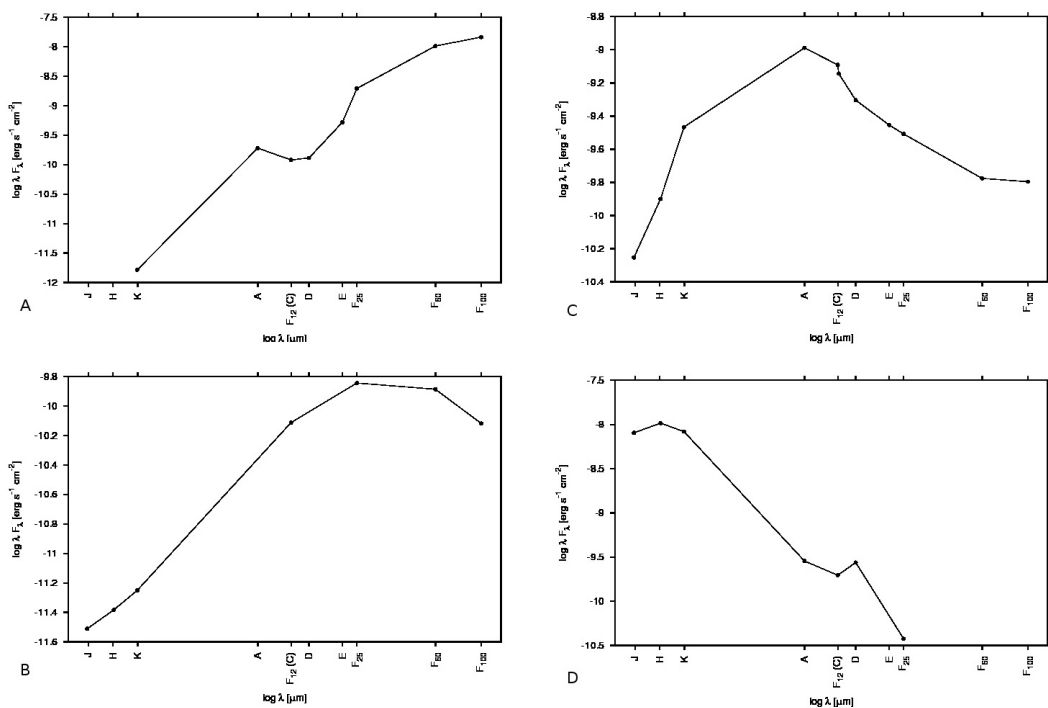
Takođe su, u demonstrativne svrhe, konstruisani SED-ovi za po jednog pripadnika sve četiri klase (slika 4). Lako se može uočiti da se



Slika 3. Konačni rezultati pretrage, selekcije i klasifikacije mladih zvezdanih objekata u i oko petlje. Predstavljena je prostorna raspodela pripadnika sve četiri klase YSO-a: klasa 0 (A), klasa I (B), klasa II (C) i klasa III (D).

Figure 3. Final results of search, selection and classification of young stellar objects within the loop and its vicinity. The picture represents spatial distribution of members of four YSO classes: class 0 (A), class I (B), class II (C) and class III (D)

maksimum zračenja pomera u levo što je objekat stariji, odnosno bliži glavnom nizu. Vrednosti spektralnog indeksa i bolometrijske temperature za svaki objekat, redom, odozgo na dole iznose:  $a_0 = 2.89 \pm 0.4$ ,  $T_0 = 69 \pm 19$  K,  $\alpha_I = 13 \pm 0.2$ ,  $T_I = 207 \pm 35$  K,  $\alpha_{II} = -0.04 \pm 0.01$ ,  $T_{II} = 492 \pm 44$  K,  $\alpha_{III} = -2.2 \pm 0.6$ ,  $T_{III} = 1950 \pm 20$  K.



Slika 4. Primeri SED krivih konstruisanih iz fotometrijskih podataka iz kataloga tačkastih izvora za pripadnike sve četiri klase: levo gore klasa 0 (A), levo dole klasa I (B), desno gore klasa II (C) i desno dole klasa III (D).

Figure 4. Several examples of SEDs, constructed using photometric data from point source catalogs, representing YSO class, namely, class 0 (A), class I (B), class II (C) and class III (D)

Pri tumačenju dobijenih rezultata moraju se naglasiti dve stvari. Prvo, mali broj pripadnika klase 0 je posledica toga što je granica između klase 0 i klase I jako difuzna, što u fizičkom, što u teorijskom smislu. Jedini način za njihovo sigurno diferenciranje je detaljna analiza SED-ova za svaki izvor, sa akcentom na submilimetarskom domenu. U ovom radu je, kao što je pomenuto, za odvajanje ove dve klase korišćena bolometrijska temperatura. Međutim, kod većine izvora se javljaju velike greške u vrednosti  $T_{bol}$ , koja proizilazi iz relativno malog broja monohromatskih fluksa (od 2 do 11) korišćenih za računanje srednje frekvencije zračenja (jednačina 4). Ovo se najbolje može primetiti na slici 4, gde može da se vidi kako, u pojedinim slučajevima, vrednosti spektralnog indeksa i bolometrijske temperature nisu konzistentne, odnosno ne uklapaju se u istu klasu. Priroda ove greške je takva da će vrlo mali broj objekata zadovoljavati uslov  $T_{bol} < 70$  K. Međutim, sa sigurnošću se može reći da, iako neosporno postoji više objekata klase 0 koji su „utopljeni“ u klasi I, svih

13 detektovanih pripadnika nulte klase ima jako nisku bolometrijsku temperaturu i da je veoma verovatno da svi oni zaista pripadaju najmlađim zvezdanim objektima na tom delu neba.

Drugo, može se lako uočiti da uniformnost raspodele objekata raste s njihovom starošću, što je najuočljivije kod klase III. Objašnjenje za ovo najverovatnije leži u tome da su zvezde koje nemaju fizičke veze sa petljom, odnosno one koje sačinjavaju pomenuti „šum“, pogrešno procenjene kao slabe T Tauri zvezde, u kom slučaju korišćena granica od  $\alpha \leq -2$  očigledno nije dovoljna za filtraciju zvezda kasnijeg spektralnog tipa.

Što se tiče same prostorne raspodele, primećuje se da su mladi objekti klasa 0 i I grupisani u *istim oblastima*, koje se jako dobro poklapaju sa istaknutim regionima uvećane IR aktivnosti koji se vide na slici 2. Ovo jasno pokazuje da se radi o ogromnim molekularnim oblaci-ma u kojima se formiraju mlade zvezde. Činjenica da se te formacije nalaze u samim zidovima petlje sugerise da su oblaci oblikovani od strane supersoničnog udarnog talasa ili zvezdanog vetra. Slična grupacija objekata može da se uoči i u regionu blizu centra petlje, gde se, ukoliko je postavljena hipoteza tačna, ne bi trebali nalaziti jako mladi objekti. Ova činjenica se može objasniti samim fizičkim oblikom petlje, koja, očigledno, niti je savršeno elipsoidna niti savršeno perpendikularna u odnosu na pravac posmatranja. Uzimajući u obzir intenzitet zračenja ovog regiona, može se pretpostaviti da se on nalazi na površini petlje koja nam je fizički najdalja, ili, pak, najbliža.

Na slikama se takođe može primetiti i nedostatak protozvezda u „mirnim“ oblastima petlje sa slabom IR aktivnošću, što je još jedan dokaz da su mladi YSO-i po pravilu vezani za svoje roditeljske molekularne oblake. Jako mali deo ukupnog broja objekata klase I se nalazi u petlji. Šta više, nijedna protozvezda klase 0 se ne nalazi duboko unutar petlje.

Dok se kod pripadnika klase II još može uočiti grupisanje oko molekularnih oblaka, raspored objekata klase III očigledno nemaju nekakvu pravilnost. Međutim, može se videti da klasa III postoji u oblastima unutar petlje u kojima se slabo pojavljuju mladi objekti, što potencijalno ukazuje da je to mesto na kome je udarni talas stvoren, ili mesto na kome se nalaze masivne OB zvezde koje su „oduvale“ gas i prašinu oko sebe, sprečavajući dalje formiranje protozvezda u toj oblasti i ostavljajući samo one (relativno) najstarije mlade zvezde klase III.

## Zaključak

Na osnovu karakteristične raspodele mladih zvezdanih objekata klasa 0, I i II, njihovog grupisanja u regionima povišene IR aktivnosti, koje su identifikovane kao ogromni molekularni oblaci, kao i nedostatka istih objekata u unutrašnjosti petlje zaključeno je da postoji međusobna

povezanost između starosti i položaja mladih zvezdanih objekata u FIR petljama.

Prisustvo klase III u „mirmim“ oblastima unutar petlje takođe sugeriše mesto nastanka udarnog talasa ili položaj grupacije mladih OB zvezda jakih zvezdanih vetrova, koje slabo zrače u IR domenu te se ne vide na površinskoj mapi intenziteta zračenja petlje.

Klase 0 i I se, po pravilu, nalaze u istim regionima, uronjene u roditeljske molekularne oblake, dok se klasa II može naći u njihovoj blizini, na obodima oblaka, gde je gasni omotač oko jezgra manje-više istrošen. Raspodela klase III je skoro homogena. Smatra se da veći broj detektovanih slabih T Tauri zvezda zapravo čine zvezde na glavnom nizu, koje su pogrešno procenjene kao objekti klase III, za šta je zaslužan loš kriterijum za odbacivanje ovakvih objekata.

Algoritam za povezivanje kataloga, koji je ovde korišćen prvi put, odlično se pokazao u radu sa ogromnim uzorkom izvora, gde je greška koju može da izazove relativno mala.

Kod velikog broja izvora vrednost bolometrijske temperature izračunata je jako neprecizno zbog malog broja podataka o njihovom zračenju. Međutim, po autorovom mišljenju, izbegavanjem ekstrapolacije funkcija u jednačini 3 postignut je bolji rezultat nego što bi se inače dobio na taj način.

Kako je kao kriterijum za klasifikovanje čak 3 klase korišćen spektralni indeks, pri čemu je zanemarivana bolometrijska temperatura objekata, kombinovanim rezultatima klasifikacije bi se možda mogao postići drugačiji rezultat, mada autor sumnja da bi razlike u izvedenim zaključcima bile velike.

Sledeći korak u ovom istraživanju može predstavljati ispitivanje više manjih FIR petlji, jer autor takođe pretpostavlja da veličina petlje može biti povezana s njenom starošću, što bi rezultovalo drugačijom prostornom raspodelom mladih zvezdanih objekata u njoj.

**Zahvalnost.** Autor bi hteo da se zahvali sledećim osobama, kojima pripisuje veliku zaslugu za pomoć i motivaciju pri realizaciji ovog rada: Ivanu Miliću, mlađem saradniku u ISP, Petru Kostiću, mlađem saradniku u ISP, Nikoli Đorđeviću i Kristini Savić, mladim kolegama u ISP, i Nikoli Božiću, rukovodiocu programa astronomije u ISP.

---

## Literatura

Adams F. C., Lada C. J., Shu F. H. 1987. Spectral evolution of young stellar objects. *ApJ*, **312**: 788.

André, P., Ward-Thompson, D., Barsony, M. 1993. Submillimeter continuum observations of Rho Ophiuchi A - The candidate protostar VLA 1623 and prestellar clumps. *ApJ*, **406**: 122

- André P. 1995. Low-Mass Protostars and Protostellar Stages. *Astrophysics and Space Science*, **224**: 29.
- Chen H., Myers P. C., Ladd E. F., Wood D. O. S. 1995. Bolometric temperature and young stars in the Taurus and Ophiuchus complexes, *ApJ*, **445**: 377.
- Cutri R. M., Skrutskie M. F., van Dyk S. *et al.* 2003. *2MASS All-Sky Catalog of Point Sources*. University of Massachusetts and Infrared Processing and Analysis Center
- Egan M. P., Kraemer K. E. *et al.* 2003. The Midcourse Space Experiment Point Source Catalog Version 2.3 (MSX6C Infrared Point Source Catalog), Air Force Research Laboratory Technical Report AFRL-VS-TR-2003-1589
- Infrared Astronomical Satellite Catalogs. 1988. The Point Source Catalog, version 2.0, NASA RP-1190
- Kiss Cs., Moór A., Tóth L. V. 2004. Far-infrared Loops in the 2nd Galactic Quadrant. *A&A*, **418**: 131.
- Könyves V., Kiss Cs., Moór A., Kiss Z., Tóth L. V. 2007. Catalogue of far-infrared loops in the Galaxy. *A&A*, **463**: 1227. Online katalog na adresi <http://kisag.konkoly.hu/CFIRLG/>
- Kun M., Aoyama H., Yoshikawa N., Kawamura A., Yonekura Y., Onishi T., Fukui Y. 2001. Study of Molecular Clouds and Star Formation in the Region of IC 2118. *Publications of the Astronomical Society of Japan*, **53**: 1063
- Lada C. J. 1987. Star formation – From OB associations to protostars. U *Star forming origins – Proceedings of the Symposium, Tokyo, Japan, Nov. 11-15. 1985*. Dordrecht: D. Reidel Publishing Co., str. 1-17.
- Lada C. J., Wilking B. A. 1984. The nature of the embedded population in the Rho Ophiuchi dark cloud – Mid-infrared observations. *ApJ*, **287**: 610
- Ladd E. F., Adams F. C., Casey S., Davidson J. A., Fuller G. A., Harper D. A., Myers D. A., Padman R. 1991. Far-Infrared and Submillimeter-wavelength Observations of Star-Forming Dense Cores I. Spectra. *Astrophysics Journal*, **306**: 203.
- Myers, P. C., Adams, F. C., Chen, H., Schaff, E., 1998. Evolution of the Bolometric Temperature and Luminosity of Young Stellar Objects. *ApJ*, **492**: 703
- Nikolić S. Ž001. Molekulski oblaci u Oblasti Cefeja. Doktorska disertacija. Matematički fakultet Univerziteta u Beogradu, Studentski trg, 16, Beograd
- Wilking, B. A., Lada, C. J., Young, E. T., 1989. IRAS observations of the Rho Ophiuchi infrared cluster – Spectral energy distributions and luminosity function. *ApJ*, **340**: 823

## Correlation Between Spatial Distribution and the Age of YSOs in the Vicinity of FIR Loop GIRL G212-11

The structure of diffuse interstellar medium on a large scale contains a large number of bubbles (cavities) filled with hot coronal gas. Since these regions are best observed in far-infrared (FIR), they have conveniently been named FIR loops, or GIRLs (Galactic InfraRed Loop). The fact that they contain heated, turbulent gas indicates increased star formation activity in that area. Considering this, as well as the characteristic ellipsoidal shape of most loops, it is assumed that the age of young stellar objects (YSOs) in close vicinity of the loop and their relative positions to the loop may be connected in some way. This assumption is investigated in the case of GIRL G212-11. Photometric data of a great number of infrared sources, collected from several online point source catalogs, has been analyzed in order to determine the age of YSOs. The results confirm the hypothesis, clearly showing expected grouping of very young objects ( $\sim 10^5$  yrs) along the loop walls. These areas exactly match the areas of increased IR activity observed on infrared images of the loop. Moreover, it is concluded that the source of energy that shaped the loop and heated the gas, causing it to move, expand and trigger star formation on its way, must have been some sort of violent event (supernova, gamma-ray burst) that happened in the past in the loop center, or it may simply be a result of strong solar winds from massive, nearby stars.

