



UNIVERZITET U NOVOM SADU
PRIRODNO-MATEMATIČKI
FAKULTET
DEPARTMAN ZA FIZIKU



Primena metode jednakog učešća na ostatak supernove G1.9+0.3

- diplomski rad -

Mentor: dr Tijana Prodanović
Kandidat: Varga Atila

Novi Sad, 2012

*Nauka nam ne obećava ni mir ni sreću, ona nam nudi samo istinu.
~ Le Bon*

Zahvalnica

Zahvaljujem se prof. dr Dejanu Uroševiću na zaista velikoj pomoći i korisnim sugestijama.
Hvala mentorki prof. dr Tijani Prodanović na ukazanom poverenju, podršci i korisnim savetima.
Hvala mojim prijateljima sa fizike i ne fizike.
Hvala roditeljima koji su zaista uvek bili uz mene.

Sadržaj

1. Uvod	4
2. Kratak istorijat	5
3. Radio – astronomija	5
3.1. Radio – teleskopi	6
3.1.1. Antena	7
3.1.2. Prijemnik	8
4. Spektri	10
5. Evolucija zvezda i supernovih	12
5.1. Podela supernovih	14
5.2. Podela ostatka supernovih	15
6. Otkriće SNR G1·9+0·3 i njegove osnovne karakteristike	16
6.1. Upoređivanje posmatranja na 1.49 GHz i 4.86 GHz	17
7. Podaci dobijeni iz posmatranja za SNR G1·9+0·3	17
7.1. Poređenje posmatranja iz 1985. i 2008.	18
7.2. Ekspanzija i struktura	19
7.3. Povećanje sjaja	21
8. Spektralni indeks za SNR G1·9+0·3	24
9. Račun jednakog učešća	25
10. Zaključak	29
11. Literatura	30
12. Kratka biografija	31

1. Uvod

Ljudsko oko, budući da je osetljivo samo na vidljivu svetlost, predstavlja ograničenje posmatranju nebeskih objekata i pojava. Osim toga, oblaci gasa u međuzvezdanom prostoru apsorbuju vidljivo i infracrveno zračenje, stoga veliki broj objekata je nemoguće posmatrati. Mnoge kosmičke pojave se ne mogu posmatrati u oblasti vidljivog zračenja, i zato je za njihovo proučavanje radio-astronomija od suštinskog značaja.

Radio-astronomija je grana astronomije koja proučava nebeske objekte kroz merenje osobina radio talasa koje posmatrani objekti zrače.

Radio-teleskopi funkcionišu u frekvencionom opsegu koji je istovetan sa talasnom dužinom dolazećih radio-talasa. Radio-talasi su oblik elektromagnetnog zračenja velikih talasnih dužina. Radio-talasi imaju talasne dužine od nekoliko milimetara do nekoliko metara.

Radio-astronomski instrumenti omogućavaju posmatranje objekata i pojava koji proizvode zračenje u opsegu radio-frekvencija na sledeći način: radio-teleskop skuplja i usmerava radio-talase iz astronomskih izvora, a zatim se primljeni signal u električnom obliku prosleđuje na dalju obradu pomoću računara.

Postoji mnogo kosmičkih objekata u kojima nastaje radio-zračenje npr.: komete, planete, zvezde, pulsari, ostaci supernovih, planetarne magline, kvazari itd.

U ovom radu se analizira najmlađi poznati galaktički ostatak supernove koji nosi oznaku G1·9+0·3. Starost ovog ostatka supernove je određena kombinovanjem podataka iz NASA's Chandra X-ray opservatorije i VLA radio-opservatorije.

Jedna od najupečatljivijih karakteristika ostatka supernove je jaka sinhrotronska emisija. Njihov sprektar u radio-području je uglavnom netermalni i može se dobro aproksimirati kao $S_\nu \propto \nu^{-\alpha}$ gde je S_ν gustina fluksa zračenja po jediničnom intervalu frekvencije ν , a α predstavlja spektralni indeks. Pored netermalne (sinhrotronsko zračenje) i moguće termalne emisije u radio-kontinuumu, ostaci supernove zrače termalne optičke linije kao i u X-kontinuumu (zakočno i sinhrotronsko zračenje).

Cilj ovog rada je da računom jednakog učešća odredimo vrednost magnetnog polja B_{\min} za minimalnu vrednost ukupne energije E_{\min}^{tot} , da se izračuna spektralni indeks pomoću vrednosti koje imamo na raspolaganju kao i sama analiza evolucije spektralnog indeksa.

2. Kratak istorijat

Prva detaljnija istraživanja radio-talasa izveo je Karl Guthe Jansky tokom 30-tih godina XX veka dok je radio kao elektroinženjer u Belovim telefonskim laboratorijama. On je pokušavao da pronađe izvor šuma koji je ometao prekoatlanske telefonske linije. Jansky je konstruisao veliku antenu koja je mogla da se rotira i usmerava u bilo koju tačku na horizontu. Pomoću ove antene, on je ustanovio da bez obzira u kom pravcu je usmeri čuje šum koji je polako menjao svoj intenzitet u pravilnim periodima od 23 časa i 56 minuta. Shvatio je da je u pitanju period koji predstavlja siderički dan¹, odnosno da je izvor šuma lociran van Zemlje. Daljim posmatranjem je otkrio da šum dostiže maksimalni intenzitet u trenutku kada je njegova antena usmerena ka centru galaksije. Zbog njegovog doprinosa radio-astronomiji, jedinica koja se koristi kao mera primljene gustine radio-fluksa je dobila ime Jansky (Jy), i ona iznosi:

$$1 \text{ Jy} = 10^{-26} \left[\text{Wm}^{-2}\text{Hz}^{-1} \right] \quad (1)$$

Ova otkrića je potvrdio Grote Reber 1938. godine nakon što je saznao za otkrića Jansky-og. Reber je odlučio da sazna više o prirodi ovih radio-izvora, pa je sam sagradio veću i precizniju antenu od one koju je koristio Jansky. Njegova antena se sastojala od paraboličnog tanjira prečnika oko 10 m, koja je fokusirala radio-talase u prijemnik koji je konstruisao sam Reber. Ovaj radio-teleskop je skoro identičan profesionalnim radio-teleskopima koji se danas koriste. Procvat radio-astronomije je usledio nakon Drugog svetskog rata, i to kroz napredak tehnologije radio-prijemnika, antena i upotrebe računara prilikom obrade podataka.

3. Radio-astronomija

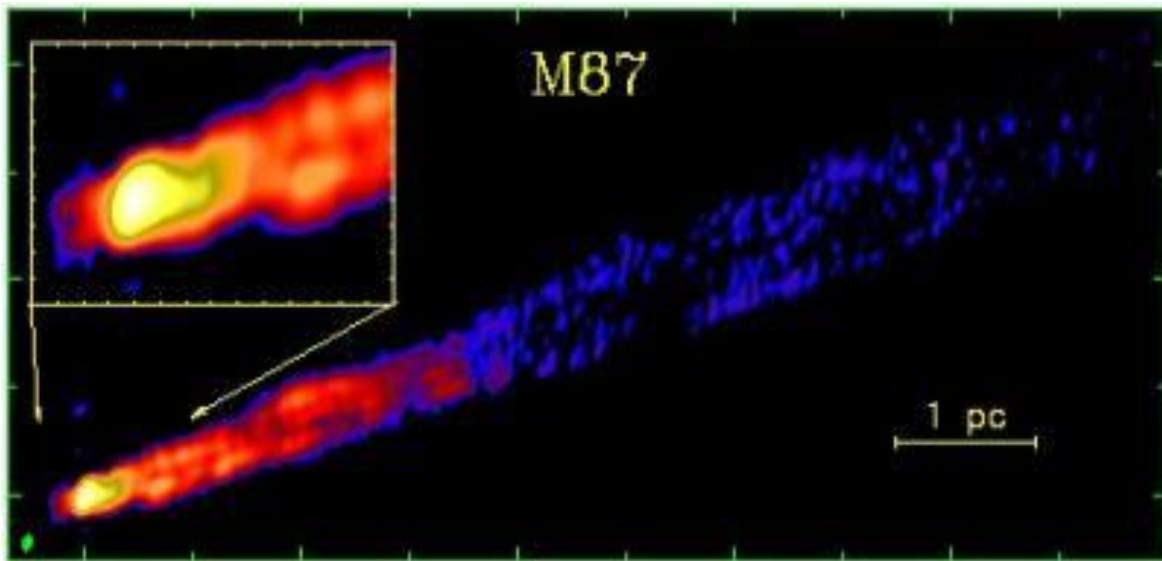
Iako stara tek oko osamdeset godina, otkrića u radio-astronomiji su podjednako značajna kao ona iz optičke astronomije. Primenom radio-teleskopa su otkrivene radio-galaksije, kvazari, kao i pozadinsko mikrotalaso zračenje koje sa temperaturom od 2,7 K predstavlja najraniju sliku Svemira. Radio-opseg obuhvata frekvencije od nekoliko desetina MHz, preko mikrotalasa, milimetarskih i submilimetarskih talasa, pa sve do terahercnog područja. Frekvencija posmatranja uslovljava tip i način konstrukcije instrumenta.

Logičan pristup posmatranja bi bio: usmeriti radio-teleskop u pravcu nekog nebeskog objekta i snimati signal koji dolazi iz tog pravca. Na taj način bi se dobila vremenska zavisnost neke veličine, pod uslovom da se parametri sistema ne menjaju u vremenu, ili da se ta promena može eliminisati kalibracijom. Time bi se mogla pratiti promena intenziteta zračenja Sunca ili npr. pulsara. U radio-astronomiji se najčešće koristi veličina koja karakteriše primljeno zračenje jednog elementa neba i naziva se sjaj. Sjaj se definiše kao primljena snaga na jedinici površine i frekvencija iz jediničnog prostornog ugla koji pomenuti element zauzima $\left[\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1} \right]$. Zračenje izvora se opisuje gustom fluksa izvora koji predstavlja snagu koju izvor izrači po jedinici frekvencije na jedinicu površine. Meri se jedinicom Jansky (1). Da bi se napravila slika nekog objekta potrebno ga je skenirati antenom, tačku po tačku. U tom slučaju dobija se mnogo više podataka o objektu (slika 1).

Slika objekta na radio-frekvencijama predstavlja raspodelu sjaja i izgleda sasvim drugačije od one u vidljivom opsegu. Na taj način se otkrivaju potpuno nove osobine objekta. Sasvim drugi

¹ Siderički dan je period rotacije planeta u odnosu na udaljene zvezde. Zemljin siderički dan je definisan kao vreme između dva prolaska prolećne tačke kroz meridijan i iznosi 23 sati 56 minuta i 4 sekunde.

pristup je posmatranje signala radio-izvora na različitim frekvencijama, odnosno snimanje spektra signala.



Slika 1 – M87 radio-galaksija, snimljena pomoću VLBA (Very Long Baseline Array) na 2 cm (<http://www.blogspan.org/blogs/astronomy-blog.html>)

3.1. Radio-teleskopi

Radio-teleskopi su najefikasniji kad su velikih dimenzija jer te dimenzije moraju da budu veće od talasne dužine zračenja, pošto teleskop po svojoj osnovnoj nameni služi da sakupi što je moguće više zračenja iz što je moguće užeg dela neba. Svi radio-teleskopi su reflektori. Sastoje se od refleksivne površine (antena) koja služi da sakupi što više radio-zračenja i pošalje ga u žižu gde se nalazi prijemnik. Atmosfera propušta zračenje kraćih talasnih dužina od približno 30 m (10 MHz). Zbog toga je neophodno da radio-teleskopi budu velikih dimenzija, naročito ako je potrebno posmatrati na niskim radio-frekvencijama. Difrakcija jako utiče na kvalitet radio-posmatranja. Difrakcija je interferencija sekundarnih talasa koja na kružnom otvoru stvara difrakcione prstenove. Najjači intenzitet ima krug u sredini, a svaki sledeći prsten je sve slabiji i slabiji. Pošto radio-teleskop na isti način prima zračenje kao što i sam zrači, on sam stvara difrakcionu sliku nezavisno od zračenja koje prima sa neba. Teleskop najviše zrači u pravcu svoje ose. Osa teleskopa je zamišljena linija koja spaja žižu sa centrom reflektora. Pojava difrakcije je glavni problem za radio-teleskope sa jednom antenom i ne može se izbeći ali se može smanjiti njen uticaj i to sa povećanjem dijametra reflektora. Međutim i dalje su prisutni problemi konstrukcije prirode.

Interferometrija je tehnika u kojoj se kombinuje više teleskopa sa ciljem povećanja rezolucije i dobijanja kvalitetnijih radio-slika. Elektronski se simulira efekat veoma velikog tanjira, koristeći signale sa mnogo manjih jednoantenskih radio-teleskopa. Koristeći prednost velikih talasnih dužina radio-talasa, detektori mogu da mere i fazu i intenzitet primljenog zračenja. Ako jedan par jednoantenskih teleskopa, prostorno razmaknutih, posmatra mali izvor, signal kombinovan iz antene osciluje u vremenu. To se dešava zbog Zemljine rotacije, jer kako Zemlja rotira, relativne faze signala primljene od strane ovih antena variraju, onako kako variraju razdaljine od izvora do svake antene. Razmak između antena interferometara određuje veličinu jasno vidljivog objekta. Ako izvor koji se posmatra na nebu pokriva mnogo manji ugao nego što je odnos posmatrane talasne dužine i dvostrukog rastojanja između antena, tada signal kombinovan iz antene osciluje u vremenu. Ovaj odnos se naziva rezolucija teleskopa. Sa povećanjem rastojanja između antena raste i rezolucija odnosno, opada najmanji ugao na nebu koji antena može jasno da razdvoji. Za proučavanje većih astronomskih struktura koriste se manje rezolucije. Interferometar daje

najbolje rezultate kada je njegova rezolucijska veličina bliska uglovnoj veličini samog objekta. Koristeći ne samo dve, već više antena u interferometarskom sistemu, dodatno se poboljšava efikasnost ovakvog radio-teleskopa.



Slika 2 – Very Large Array (VLA) - Socorro County, New Mexico, USA
(http://www.upv.es/antenas/Catalogo_fotos/radioastronomia/new_mexico3.htm)

VLA (Very Large Array - slika 2) je radio-opservatorija u Novom Meksiku. Niz se sastoji od 27 nezavisnih antena, svaka prečnika 25 metara i težine 209 tona. Raspoređene su u tri kraka u obliku slova Y. Svaki krak je dugačak po 21 kilometar i nalazi se na železničkim šinama po kojima radio-teleskopi mogu da se pomeraju čime se menja njihova zajednička apertura. Postoje četiri konfiguracije na VLA: A, B, C i D. Teleskopi VLA u A konfiguraciji se pomeraju do maksimuma, tako da simuliraju tanjir prečnika 36 km. Ova konfiguracija daje najveću rezoluciju. Prečnik opada sa prelazkom na B i dalje na C i D konfiguraciju. U D konfiguraciji prečnik je oko 0.6 km. Niže konfiguracije služe za proučavanje celokupne strukture posmatranog objekta.

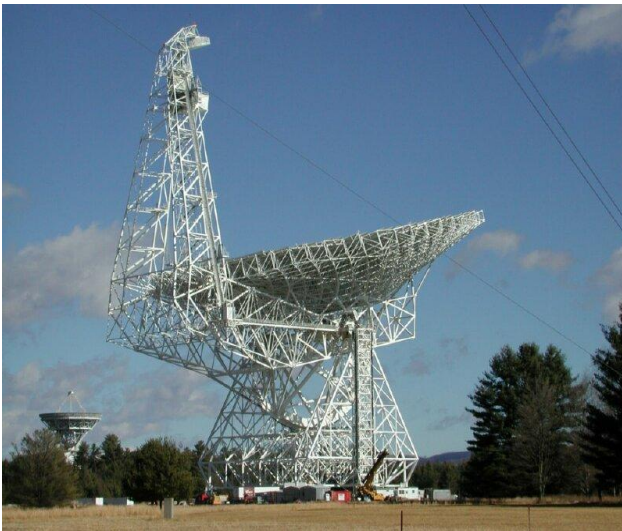
3.1.1. Antena

Talasna dužina radio-zračenja $\sim 10\text{m}$ je mnogo veća od talasne dužine vidljive svetlosti $380-740 \times 10^{-9}\text{m}$. Stoga da bi se postigla ugaona rezolucija koja se može porediti sa optičkom, radio-teleskop bi trebalo da ima i toliko puta veći prečnik antene. Naravno, ovo nije moguće izvesti koristeći jednu antenu, i to iz konstruktivnih razloga. Najveći, potpuno upravljivi pokretni radio-teleskop sa paraboličkim reflektorom, ima prečnik od oko 100 m (Green Bank i Effelsberg, slika 3-4).

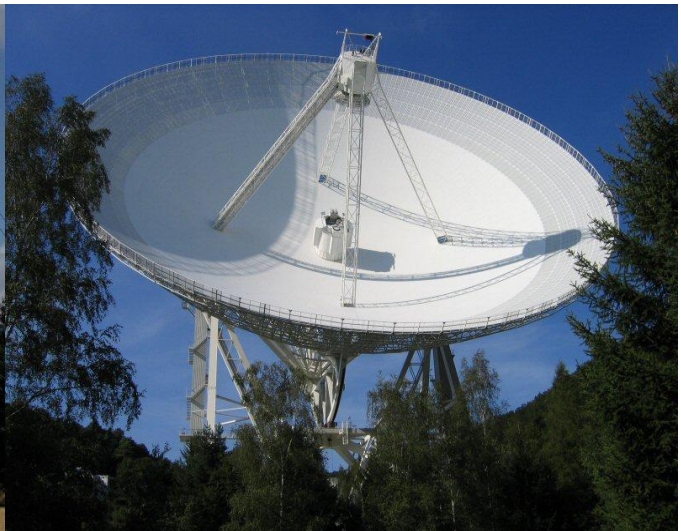
Arecibo (slika 5) teleskop je jednorefleksorski radio-teleskop sa sfernim reflektorom i prečnikom od oko 304 m. Fiksiran tanjir, pomera se prijemnik. Veličina reflektora i frekvencija na kojoj se posmatra određuju ugaonu rezoluciju radio-teleskopa, koja se može proceniti formulom:

$$\text{HPBW} = 1.22 \frac{\lambda}{D} \quad (2)$$

gde je HPBW² ugaona širina glavnog snopa antene u radijanima, D – prečnik a λ – talasna dužina. Pri konstrukciji radio-teleskopa uglavnom se prvo pravi reflektor, a ostavlja se mogućnost priključivanja više prijemnika na različitim frekvencijama. Problem se javlja sa povećanjem frekvencije, gde preciznost izrade teleskopa postavlja gornju granicu. Kombinovanjem više antena rezolucija se može dodatno povećati, i u tom slučaju mera ugaone rezolucije je rastojanje između antene (baseline), a princip rada je gore pomenuti interferometrijski (VLBI³ ili ALMA⁴ projekat).



Slika 3. Radio teleskop Green Bank, West Virginia
(<http://www.astronet.ru/db/xware/msg/apod/2002-03-11>)



Slika 4. Radio teleskop Effelsberg, Nemačka
(<http://www.cv.nrao.edu/course/astr534/RadioTelescopes.html>)

Drugi problem koji se javlja na višim frekvencijama jeste apsorpcija radio-talasa u atmosferi. Iz tog razloga se radio-teleskopi uglavnom postavljaju na većim nadmorskim visinama, a merenja se obavljaju zimi, kada je vazduh suv. Na istim frekvencijama na kojima zrače, atomi i molekuli apsorbuju zračenje. Zbog toga postoje frekvencioni opsezi na kojima atmosferski gasovi najmanje apsorbuju zračenje i nazivaju se atmosferski prozori. Na nižim frekvencijama ograničenje postavlja jonosfera, od koje se radio-talasi reflektuju.

3.1.2. Prijemnik

U slučaju radio-teleskopa, na antenu je priključen jedan ili više prijemnika. Često se koriste i radari koji uz prijemnik imaju i predajnik radio-signal. Prijemnik se po principu rada malo razlikuje od običnog satelitskog prijemnika za TV-signal. Najveća razlika, osim u opsegu frekvencije, je i u zahtevnoj osetljivosti, jer je radio-astronomski signal daleko slabijeg intenziteta. Signal tako malog intenziteta se utapa u sopstvenom šumu prijemnika i zbog toga je važno da šum generisan u prijemniku bude što manji. Upravo tu leži najveći izazov u konstrukciji radio-astronomskih prijemnika. Može se pokazati da je od elemenata prijemnika, po pitanju šuma, najkritičniji aktivni element – pojačavač, koji je najbliži anteni i to zajedno sa priključnim

² Half-Power Beam Width je uglovna širina snopa na polovini maksimalne snage.

³ Very Long Baseline Interferometry

⁴ Atacama Large Millimeter Array

vodovima i pasivnim komponentama između njega i antene. Najpovoljniji slučaj bi bio kada bi se pojačavač priključio direktno na antenu. Zbog toga je na satelitskoj anteni takozvani konvertor montiran direktno na držaču ispred paraboličnog ogledala. On sadrži jedan niskošumni pojačavač i konvertor signala, koji sa frekvencije satelitskog signala prebacuje na nižu frekvenciju, na kojoj se signal zatim koaksijalnim kablom prenosi do prijemnika. Kod termalnog zračenja je snaga šuma direktno srazmerna temperaturi tela, pa je korisno prijemnik hladiti, da bi imao manje šuma. Ovo se koristi i do te mere da se mnogi radio-astronomski prijemnici hlade u tečnom azotu $\sim 200^{\circ}\text{C}$ ili čak i tečnim helijumom $\sim 270^{\circ}\text{C}$. Razlog za prebacivanje signala na niže frekvencije je čisto tehničke prirode. Signal je jednostavnije a možda čak i jedino moguće obraditi ako je na nižoj frekvenciji, dok u nekim slučajevima pojedine komponente na dobijenoj frekvenciji signala ni ne postoje. Aktivni elementi pojačavača – tranzistori imaju dobre osobine samo do izvesnih frekvencija. Zbog toga se na višim frekvencijama na antenu direktno priključuje konvertor, a niskošumni pojačavač se izostavlja. TV signal se direktno obrađuje za prikazivanje na televizoru, što je moguće uraditi i sa kosmičkom signalom, ali u praksi to nije tako jednostavno.



Slika 5. Radio-teleskop Arecibo, Puerto Rico

([http://www.boston.com/news/nation/articles/2007/09/16/powerful telescope may be closed/](http://www.boston.com/news/nation/articles/2007/09/16/powerful_telescope_may_be_closed/))

Pošto se signal utopio u šum, nije ga moguće direktno izdvojiti - spektar bi izgledao kao spektar šuma (konstantan sa frekvencijom). Pošto je šum slučajan, a može imati pozitivne i negativne vrednosti u vremenu, sabiranjem uzoraka šuma, pozitivne i negativne vrednosti se poništavaju, a vremenom se ukupna amplituda šuma smanjuje u odnosu na signal. Signal je manje-više isti i stoga se njegove amplitude sabiraju. Na kraju računa izlazi da odnos signal-šum raste. Znači, da bi se signal filtrirao od šuma, potrebno je uzorke signala jednostavno sabirati dovoljno dugo vremena. Analizator spektra je laboratorijski uređaj koji, iako može da meri bilo koju

frekvenciju ima nedostatka u smislu osetljivosti. Priključuju se filteri koji propuštaju samo jedan opseg frekvencija, a ostale ekraniraju. Ovi filteri se ređaju jedan do drugog, od jedne do druge granice opsega, sve dok se ne pokrije celokupan spektar koji je od interesa. Ako je poželjno uočiti finije strukture u spektru, upotrebljavaju se užii filteri, a to dalje znači da je potreban veći broj filtera za isti opseg. Kvalitetan i uzak filter je skup, a dodatno se cena množi povećanjem broja filtera. Signal se može detektovati diodom, koja ima kvadratnu karakteristiku, što znači da je izlazni napon detektora direktno srazmeran kvadratu ulaznog napona, odnosno snazi signala. Zbog već pomenutog sopstvenog šuma prijemnika, detektori sadrže i dodatni element – integrator, koji sabira signal dovoljno vremena dok se ne postigne željena osetljivost.

4. Spektri

Radio-talasi predstavljaju elektromagnetno zračenje velikih talasnih dužina. Talasne dužine radio-talasa se kreću u opsegu od 1 mm do 10^5 km. Radio-teleskopi skupljaju i usmeravaju signale iz radio-izvora, a zatim se primljeni signali u električnom obliku prosleđuju na dalju obradu pomoću računara. Postoji mnogo astrofizičkih objekata u kojima nastaje radio-zračenje npr.: komete, planete, zvezde, pulsari, ostaci supernovih, planetarne magline, kvazari itd.

Signal primljen radio-teleskopom se može okarakterisati amplitudom i fazom u zavisnosti od frekvencije (spektrum zračenja). Najčešće se snima samo spektar snage. Oblik spektra daje informaciju kakvim procesom je nastalo zračenje koje je primljeno, i prema tome spektri se dele na kontinualne (termalne i netermalne), linijske i kombinovane (složene) spektre.

Kontinualni spektar je ravnomerno raspodeljen po celom posmatranom opsegu frekvencija.

Mehanizmi zračenja se dele na termalne i netermalne. U prisustvu jakog magnetnog polja unutar termalno emitujućeg regiona gasa (npr. zvezde) dolazi do pojave Zeeman-ovog efekta⁵. Za razliku od termalnog, kod netermalnog zračenja magnetno polje je direktno odgovorno za nastanak zračenja. Kada se naelektrisana čestica kreće u magnetnom polju nastaje netermalno zračenje. Ako se naelektrisana čestica kreće sporo u odnosu na brzinu svetlosti, zračenje je ciklotronsko. Zračenje relativističkih čestica naziva se sinhrotronsko. Za slabija magnetna polja ono se detektuje u oblasti radio-talasa, dok se za jača magnetna polja može javiti i na kraćim talasnim dužinama. Stepenn polarizacije sinhrotronskog zračenja je visok. Magnetno polje može posredno da polarizuje i termalno optičko zračenje. Na putu ka posmatraču zračenje prelazi vrlo velika rastojanja kroz međuzvezdani prostor, koji je ispunjen prašinom i magnetnim poljem. Ako na putu od izvora do Zemlje signal koji se snima naiđe na oblak gasa, tada će zračenje koje prolazi kroz njega pobuditi neke atome tog gasa, pri čemu će biti utrošen neki od fotona. U tom slučaju posmatrač će videti manjak fotona u kontinuumu izvora (apsorpcioni spektar). Međutim, pobudeni atomi se moraju osloboditi te energije i vratiti u osnovno stanje. Doćiće do reemitovanja fotona koji su oduzeti od zračenja kontinuumu. Znači ako bi se posmatrao taj isti oblak video bi se emisijski spektar linija koji potiče od reemitovanih fotona.

Termalno zračenje emituju sva tela čija je temperatura iznad apsolutne nule, i to na svim talasnim dužinama. Intenzitet i raspodela termalnog zračenja zavise od temperature tela, i u idealnom slučaju (apsolutno crno telo) se poklapa sa Plankovim (Planck) zakonom zračenja. Rayleigh-Jeans-ova aproksimacija⁶, pokazuje da sjaj opada sa kvadratom talasne dužine.

$$B = 2kT \frac{1}{\lambda^2} \quad (3)$$

⁵ Zeeman-ov efekat je cepanje spektralne linije u magnetnom polju. Efekat nosi ime po njegovom pronalazaču, Holandskom fizičaru Pieter Zeeman-u.

⁶ Rayleigh-Jeans-ova aproksimacija pokušava da opiše spektralno zračenje elektromagnetnog zračenja na svim talasnim dužinama na datoj temperaturi apsolutno crnog tela.

U ovoj aproksimaciji sjaj B može biti predstavljen temperaturom T , i u tom slučaju se govori o temperaturi sjaja objekta, koja se najčešće razlikuje od stvarne temperature objekta. Termalno zračenje ima istu prirodu kao i termalni šum. Spektralni indeks ovakvog spektra iznosi $n = -2$ (predznak minus se javlja jer je intenzitet obrnuto proporcionalan kvadratu talasne dužine). Maksimum zračenja zavisi od temperature crnog tela i sa njenim porastom se pomera ka manjim talasnim dužinama (Vinov (Wien) zakon pomeranja):

$$\lambda_{\max} = \frac{b}{T} \quad (4)$$

gde je λ_{\max} maksimalna talasna dužina, T temperatura apsolutnog crnog tela a b je Vinova (Wien) konstanta koja iznosi $2.898 \times 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K}$.

Na primer, Sunčeva fotosfera ima temperaturu od 5600 K, a maksimum zračenja joj je u vidljivom delu spektra. Iz tog razloga, najvažniji radio-izvori u Univerzumu su objekti koji zrače kao crna tela. Izvori termalnog zračnog radio-zračenja u Svemiru su oblaci jonizovanog gasa, pretežno vodonika i helijuma. Konjska glava (slika 6.) je apsorpciona maglina i tu može da se detektuje zračenje crnog tela koje potiče od međuzvezdane prašine. Tamna maglina je veoma gust međuzvezdani oblak što apsorbuje svetlost, te je više informacija moguće dobiti posmatranjem u infracrvenom delu spektra.

Netermalno zračenje ima pozitivan spektralni indeks, što znači da se intenzitet zračenja povećava sa porastom talasne dužine. Ovo zračenje najčešće nastaje sinhrotronskim mehanizmom, i prvi put je uočeno u akceleratorima naelektrisanih čestica (sinhrotronima). U osnovi, pri svakom ubrzanom kretanju naelektrisane čestice generiše se zračenje. Ukoliko je brzina naelektrisane čestice nerelativistička ovo zračenje nazivamo ciklotronsko, dok za relativističke brzine govorimo o sinhrotronskom zračenju. Najvažniji izvori netermalnog zračenja su ostaci supernovih npr. dobro poznata Rak maglina ili Kasiopeja A. Posmatranjem kontinualnih spektara dobija se informacija o procesima koji se odvijaju u nebeskim objektima koje posmatramo.



Slika 6. Fotografija tamne magline Konjska glava u Orionu.

(<http://www.williamsclass.com/EighthScienceWork/AstronomyUniverseBeyond.htm>)

Linijsko zračenje bi u idealnom slučaju dalo liniju određenog intenziteta na samo jednoj frekvenciji. Ono je posledica prelaza atoma iz jednog u drugo energetska stanje i prema tome bi trebalo dati diskretan spektar. Poređenjem sa linijskim spektrima hemijskih elemenata snimljenim u zemaljskoj laboratoriji, može se izvući zaključak od kojih elemenata se sastoji posmatrani objekat. Takođe, merenje parametara linije (frekvencija, intenzitet, širina) daje nam informaciju o tome koliko dotičnog elementa ima na mestu posmatranja, kao i uslove u kojima se on nalazi (temperatura, pritisak, brzina i smer kretanja objekata).

Složeni spektri predstavljaju kombinaciju gore pomenutih vrsta spektara. To znači da na nižim frekvencijama dominira netermalno zračenje, dok na višim takođe dominira netermalno zračenje ali je veći uticaj termalnog zračenja. Spektrometri se razlikuju po konstrukciji s obzirom da postoji dva tipa spektra. U slučaju kontinualnih spektara, poželjno je snimiti što veći deo spektra, dok rezolucija po frekvencijama nije od presudnog značaja. Međutim, konstrukcija komponenata ne dozvoljava postizanje velike širine frekvencijskog opsega (širokopojasni prijemnik). Ukoliko se snima linijski spektar (po prirodi uzak) potrebno je veoma precizno podesiti frekvenciju a pošto se spektar veoma brzo menja sa frekvencijom potrebna je visoka frekvencijska rezolucija sa ciljem registrovanja fine strukture posmatrane linije. Takođe je moguće da se dve ili više linija nalaze veoma blizu jedna drugoj, pa bi se u slučaju male rezolucije te dve linije videle kao jedna.

5. Evolucija zvezda i supernovih

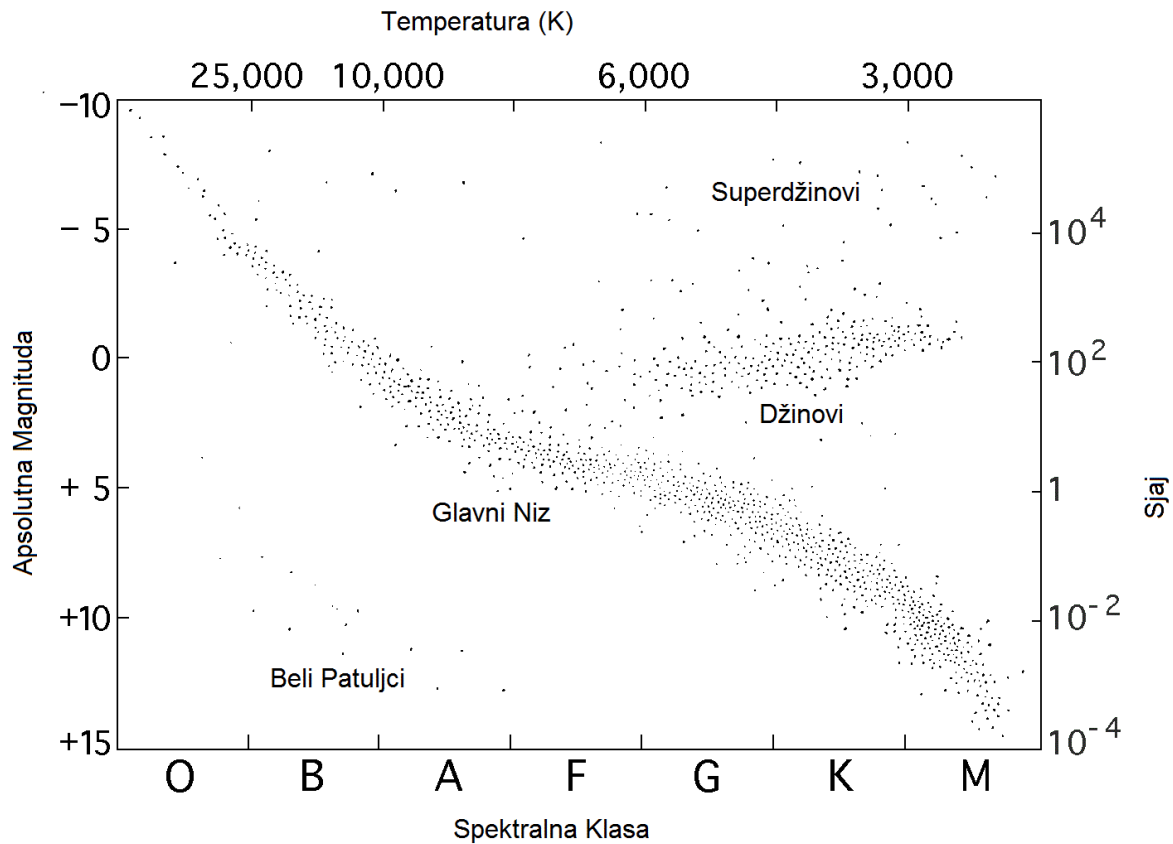
Osnovni empirijski podaci vezani za zvezde dobijaju se posredstvom merenja i analize njihovog relativnog kretanja i zračenja koje emituju. Sve zvezde, sem Sunca, zbog svoje zanemarljive ugaone veličine vide se kao tačkasti izvori. Zbog toga je, kada je o zračenju reč, moguće direktno meriti samo fluks zračenja u datom spektralnom intervalu u kojem je određena zvezdana veličina, i analizom spektara utvrditi tip i karakteristike spektra za datu zvezdu.

Izučavanje spektralnih karakteristika zvezda daje posebno bogatu informaciju o zvezdama. Prema tipu i karakteristikama spektra, zvezde su podeljene na spektralne klase. Spektralne klase se odlikuju prisustvom odnosno odsustvom karakterističnih linija (apsorpcionih i emisionih) u zvezdanim spektrima kao i različitim intenzitetima ovih linija. Temperatura je od važnog značaja pošto određuje stepen pobuđenja i jonizaciju atoma i molekula (hemijski sastav površinskog sloja zvezda ostaje praktično isti). Stoga se, kao pouzdan indikator temperature zvezde, može uzeti njena boja. Preko 90% svih zvezda se mogu svrstati u jedan od sedam glavnih tipova spektralne klase:

Spektralna klasa	Hemijski sastav	Boja zvezda
O	Linije jonizovanog helijuma (HeII)	Plave zvezde
B	Linije neutralnog helijuma (He)	Plavo – bele zvezde
A	Linije vodonika (H)	Bele zvezde
F	Manje linija vodonika + linije metala	Belo – žute zvezde
G	Linije metala	Žute zvezde (Sunce G2)
K	Pojačane linije metala (K, CaII, Fe, TiII)	Narandžaste zvezde
M	Linije molekula posebno TiO	Crvene zvezde

Tabela 1

Najveći značaj ima veza između apsolutnih zvezdanih veličina i spektralnih klasa zvezda, koju su na početku prošlog veka (1905 – 1914) uočili nezavisno jedan od drugoga danski astronom Ejnar Hercšprung (Ejnar Hertzsprung) i amerikanac Henri Noris Rasel (Henry Norris Russell). Zavisnost je prikazana na takozvanom HR dijagramu (slika 7).



Slika 7: HR dijagram stacionarnih zvezda poznatih apsolutnih veličina i spektralnih klasa

Svoju evoluciju zvezde započinju na glavnoj grani HR dijagrama. U zavisnosti od svoje mase zauzimaju mesto na glavnoj grani. U toku sagorevanja vodonika zvezda se pomera popreko kroz glavnu granu a vreme boravka isključivo zavisi od mase zvezde i dato je približnom relacijom:

$$t \approx 10^{10} \frac{M}{L} \approx \frac{10^{10}}{M^3} \quad (5)$$

gde je vreme t u godinama, ako je masa M u jedinicama mase Sunca. Zvezda završava svoj boravak na glavnoj grani kada sadržaj vodonika u jezgru opadne na oko 1%, posle čega se tempo evolucije zvezde značajno ubrzava. Posle silaska sa glavne grane HR dijagrama zvezde u zavisnosti od mase prolaze različite evolucione puteve koji vode ka crvenim džinovima ili superdžinovima. Supstanca jezgra predstavlja degenerisani gas elektrona ili jezgara produkta nuklearnih reakcija koje su se odigravale u toku evolucije zvezda. Odbacujući svoj omotač, rasejavanjem pod uticajem pritiska zračenja, ili eksplozivnim procesima koji su karakteristični za supernove⁷, jezgro zvezde postaje u zavisnosti od svoje mase beli patuljak (zvezde malih masa $M \leq 1.5M_{\odot}$) ili neutronska zvezda (zvezde velikih masa $M \geq 10M_{\odot}$).

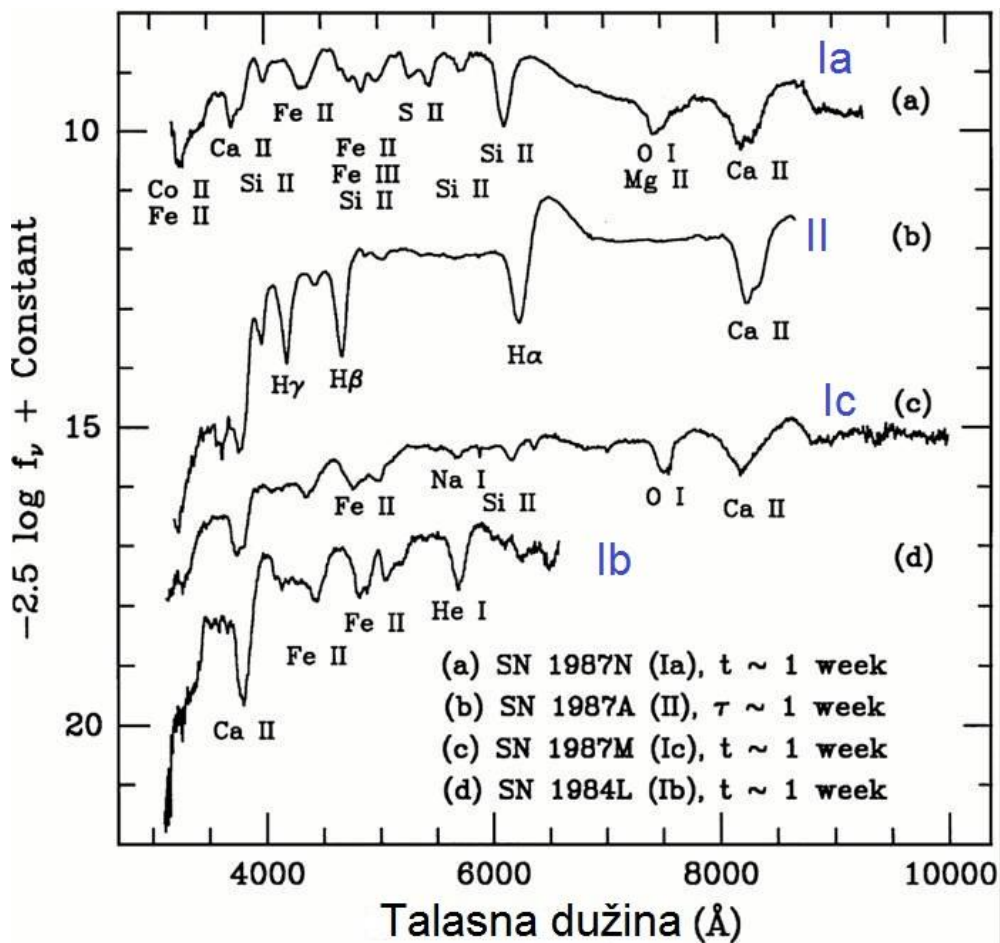
⁷ Supernove su izuzetno snažne eksplozije zvezda prilikom kojih se sjaj zvezde povećava 10^4 puta i dostiže apsolutnu magnitudu -17.

Završnu fazu evolucije masivnih zvezda čini eksplozija supernove, čiji je ostatak neutronska zvezda. Izračena energija supernove je $\sim 10^{51}$ erg, što je samo $\sim 1\%$ ukupne energije eksplozije supernove. Izbačeni materijal koji se širi nazivamo ostatak supernove (remnant). Ostatak supernove započinje svoj život onda kada se formira udarni talas. U ovom slučaju udarni talas nastaje u interakciji izbačenog materijala sa okolnom materijom i magnetnim poljem. Maksimalna masa stabilne neutronske zvezde, određena je karakterom sila između neutrona i drugih u jezgri prisutnih čestica i iznosi oko $2.4M_{\odot}$. U slučaju ostatka supernove sa $M > 2.4M_{\odot}$ došlo bi do kolapsa u kojem bi gravitacione sile dovele ovakvu situaciju do crne rupe.

5.1. Podela supernovih

Prva klasifikacija supernovih izvršena je na osnovu izgleda njihovih spektara u optičkom području. Na osnovu karakterističnih apsorpcionih i emisionih linija koje se javljaju u spektrima supernovih. Supernove delimo na (slika 8):

- Supernove tipa I – odsustvo linija vodonika.
 - Tip Ia – duboke apsorpcione linije silicijuma (Si II na 615 nm), odsustvo linija vodonika ali takođe odsustvo linija helijuma, kod starijih supernovih uočavamo i jake emisione linije gvožđa.
 - Tip Ib – izražene apsorpcione linije neutralnog helijuma pogotovo na 586,7 nm i odsustvo linija vodonika.
 - Tip Ic – odsustvo linija vodonika i silicijuma, linije helijuma ili odsutne ili vrlo slabe.
- Supernove tipa II – jake linije vodonika.



Slika 8: Spektri različitih tipova supernovih

Druga klasifikacija je način na koji zvezda eksplodira kao supernova. Postoje dva načina:

- Prvi način i tip je supernova do koje dolazi usled kolapsa jezgra masivnih zvezda $M \geq 10M_{\odot}$, to su supernove tipa II, Ib i Ic.
- Drugi način je eksplozija belog patuljka u tesnom dvojnem sistemu, to su supernove tipa Ia.

5.2. Podela ostataka supernovih

Najgrublja podela tipova ostataka supernovih je na ljuskaste (S tip) i kompozitne (C tip) (Weiler & Sramek 1988). Ljuskast tip karakteriše ljuska koja se najčešće veoma dobro vidi u radio-području kao posledica jake sinhrotronske emisije. Kompozitni ostaci supernovih predstavljaju kombinaciju ljuske i pleriona⁸ koji ispunjava centralni deo ostatka supernove $\alpha < 0.3$. Takođe, postoje i čisti plerioni kod kojih se ne vidi ljuska već samo plerion kao što je Rak maglina (slika 9 b.).

Finija podela (Weiler & Sramek 1988), na osnovu spektra zračenja. Razlikuju se četiri grupe:

- Balmer-dominantne (B ostaci supernovih $\alpha > 0.3$) karakteriše ljuska koja emituje Balmerove linije vodonika, a slaba je u emisiji OIII i SII. To su mladi ostaci supernovih koji su nastali od supernova tipa Ia. Javljaju se i kao ljuskasti i kao plerion-kompozitni.

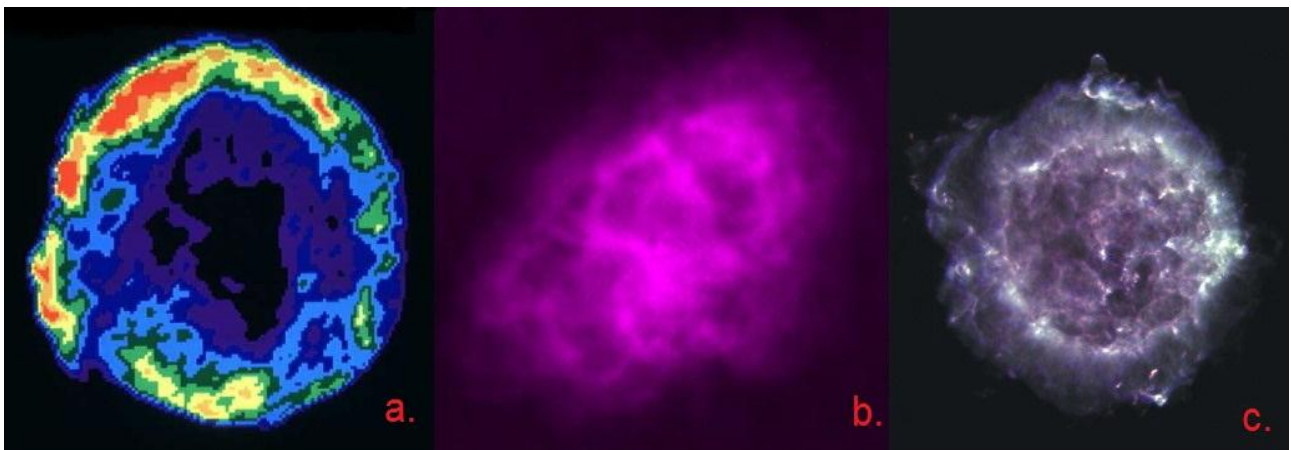
Na primer: Tycho (slika 9 a.).

- Ostaci supernovih bogati kiseonikom (O ostaci supernovih), nalaze se blizu HII regiona i nastali su eksplozijama masivnih zvezda. Emituju jake linije kiseonika, a u radio-domenu imaju $\alpha > 0.3$. Ovi ostaci supernovih se šire u okolini kojom dominira materija izbačena zvezdanim vetrom a ne međuzvezdanom materijom. Javljaju se i kao ljuskasti i kao plerion-kompozitni.

Naprimera: Cassiopeia A (slika 9 c.).

- Plerion-kompozitni ostaci supernovih sastoje se od kompaktnog centralnog objekta i magline ili ljuske koje obavijaju taj plerion.

- Evoluirane ostatke supernovih odlikuje spor udarni talas i nepravilna, nepotpuna ljuska. Sve prethodne tri vrste mladih ostataka postaju evoluirani. Spektralni indeks im je sličan O i B ostacima supernovih a zračenje potiče od interkacije udarnog talasa sa međuzvezdanom materijom.

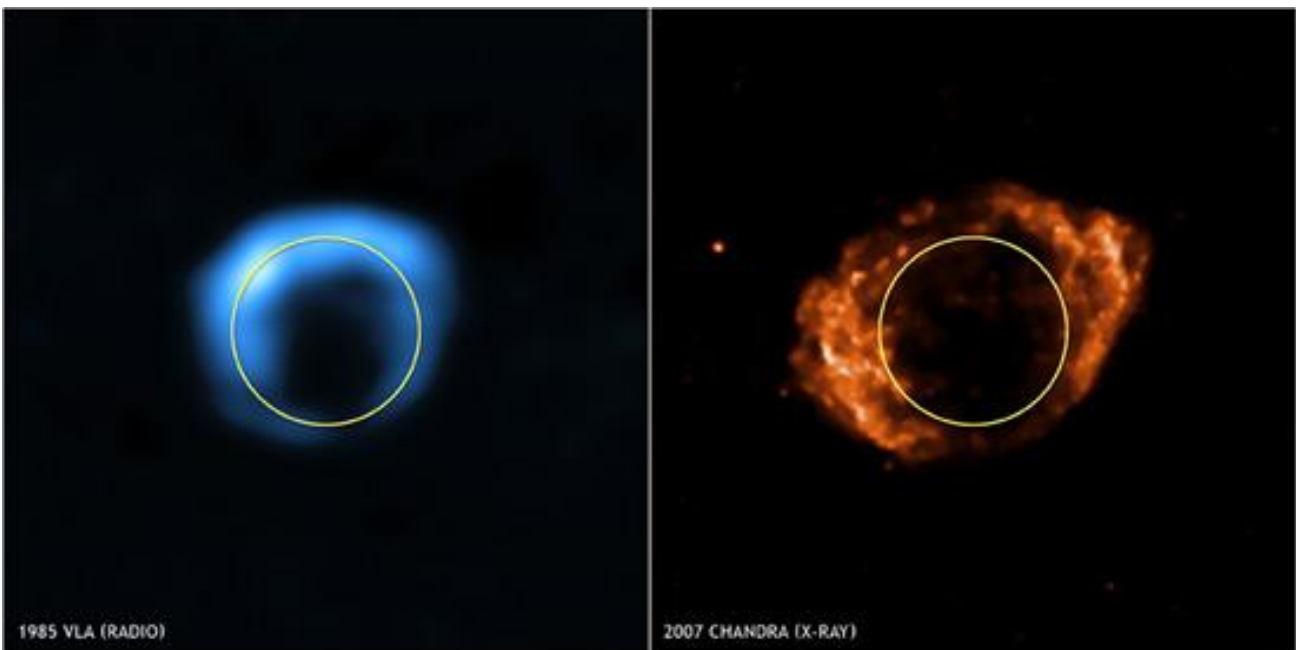


Slika 9: a. Tycho (<http://www.solstation.com/x-objects/tycho-s.htm>), b. Rak maglina (<http://science.hq.nasa.gov/skyspy/html/targets/m1rad.html>), c. Cassiopeia A (<http://www.wolaver.org/space/casa.htm>). Ostaci supernovih posmatrani u radio-području.

⁸ Plerion je kompaktna celina koja predstavlja sinhrotronsku maglinu nastalu udarima pulsarskog vetra.

6. Otkriće SNR G1·9+0·3 i njegove osnovne karakteristike

Eksplodije supernovih u našoj galaksiji su retki događaji. Poslednja eksplozija u Mlečnom putu poznata kao Kasiopeja A, dogodila se 1680 godine. Teoretičari kao što su Berg i Taman (Van der Bergh & Tamman 1991) predviđaju najmanje tri velike eksplozije u svakom veku – i to zvezda mase veće od osam Sunčevih masa. U poslednjih 2000 godina zna se za manje od 10 ovakvih događaja u našoj galaksiji, a po teoretičarima trebalo bi da ih je bar šest puta više. Ovaj očigledni deficit motivisao je više grupa astronoma u Americi, Evropi i Australiji da istraže taj problem. Ukupan broj poznatih eksplozija supernovih i njihovih ostataka u Mlečnom putu iznosi oko 300. Prosečan „život“ jednog ostatka supernove isnosi oko 30000 godina, a neki ostaci prežive i više od 100000 godina, što zavisi od sredine (okoline) u kojoj se eksplozija desila. Pre nekoliko godina, grupa astronoma okupljena oko profesora Stefana Rejnoldsa (Stephen Reynolds) sa North Carolina State University-a pronašla je novi ostatak supernove u neposrednoj blizini našeg Galaktičkog centra koji je kasnije dobio oznaku G1·9+0·3. Za ovaj ostatak se znalo još od sredine 1984. ali niko nije bio siguran u starost ovog mladog objekta. SNR G1·9+0·3 je identifikovan od strane Grina i Gula (Green i Gull 1984) na osnovu posmatranja vršenih sa VLA. Uglovni prečnik ovog ostatka je oko 1 arcmin što ga svrstava među uglovno najmanje ostatke u našoj Galaksiji. Iako njegova udaljenost nije bila poznata za vreme otkrića, bilo je očigledno da je u pitanju mlad SNR, zbog njegove stvarne veličine. G1·9+0·3 je jedan od retkih mladih ali udaljenih supernovih.

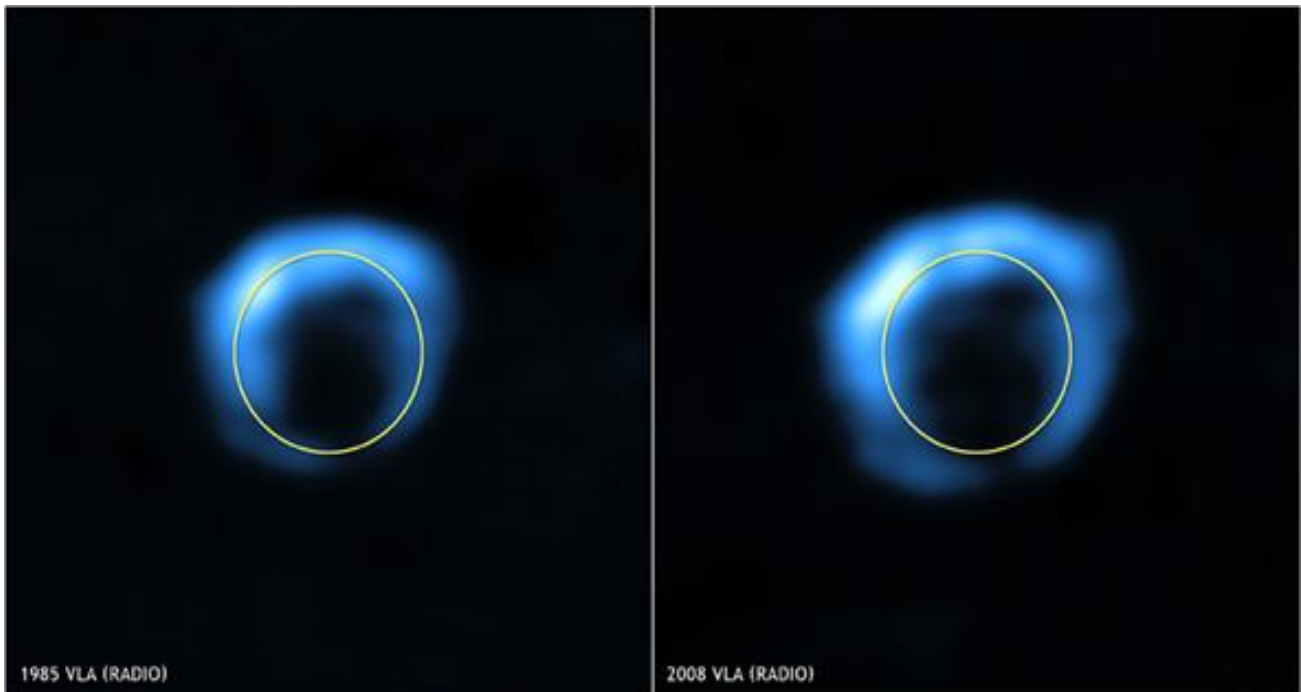


Slika 10 – Upoređenje 1985 Radio sa 2007 X-ray
(<http://chandra.harvard.edu/photo/2008/g19/media/>)

Profesor Reynolds (Reynolds) koristio je podatke sa Čandra (Chandra) opservatorije (u X-području) i utvrdio da je ovaj veoma neobičan objekat u stvari ostatak eksplozije koja se, po njemu, desila pre 140-150 godina. Pored toga, i VLA radio-posmatranja su pokazala i drugu stranu ove eksplozije. Iako je isti mehanizam (netermalni ili sinhrotronski) odgovoran za oblike ovog objekta, on je veoma različitog izgleda u X i radio-području na osnovu podataka dobijenih sa VLA (slika 10).

U određivanju starosti ovog ostatka postoje različite teorije. Sama ekspanzija ovog ostataka supernove između dva VLA radio posmatranja iz 1985. i 2008. indiciraju da je on ipak nešto malo stariji (oko 200 godina), što i dalje čini ovaj objekat najmlađim u svojoj klasi. Ovaj ostatak je

udaljen oko 8 kpc. Stoga činjenica da se pomenuti SNR nalazi blizu gusto naseljenog centra Mlečnog puta implicira na poteškoće u dobijanju dovoljno podataka.



Slika 11 – Upoređenje 1985 Radio vs 2008 Radio
<http://chandra.harvard.edu/photo/2008/g19/media/>

Ostaci supernove zrače dominantno netermalno u radio-domenu. Ostaci supernovih imaju nezanemarljiv i izuzetno važan uticaj na međuzvezdanu materiju zbog toga što su bogati težim elementima i oslobađaju znatne količine energije tokom eksplozije. Udarni talasi koji nastaju u eksploziji supernove zagrevaju i oblikuju međuzvezdanu materiju, te kompresuju magnetno polje i ubrzavaju kosmičke zrake. Izgled ljuske kružnog oblika je često narušen interakcijom sa međuzvezdanom materijom koja neravnomerno raspoređena u okolini ostatka. Dakle, ostaci supernovih diktiraju ponašanje, sastav, morfologiju i evoluciju međuzvezdane materije, a isto tako je evolucija istih zavisna od okruženja u kojem se nalaze.

6.1. Upoređivanje posmatranja na 1.49 GHz i 4.86 GHz

Skorašnja radio-posmatranja ovog Galaktičkog ostatka supernove su izvršena na 4.86 GHz sa VLA i upoređeni su rezultati sa ranijim posmatranjima na 1.49 GHz koji ima uporedivu rezoluciju $10 \times 4 \text{ arcsec}^2$. Ovo pokazuje da se radio-emisija od ovog supernova ostatka značajno proširila, za nekih ~15% za poslednje 23 godine, sa spoljašnjim prečnikom od $\approx 92 \text{ arcsec}$. Ovakvo širenje dokazuje da je G1·9+0·3 najmlađi Galaktički ostatak supernovih dosada otkriven, odnosno samo nekih ~150 godina starosti. Skorašnja posmatranja na nižim frekvencijama od 1.43 GHz su takođe razmatrana a integrisana gustina fluksa iz ovih rezultata i rezultati posmatranja sa 4.86 GHz su upoređena sa ranijim podacima. Ovo ukazuje na povećanje integralne gustine fluksa G1·9+0·3 koje datira od nedavno.

7. Podaci dobijeni iz posmatranja za SNR G1·9+0·3

Publikovano je nekoliko posmatranja ostatka G1·9+0·3 pomoću VLA na 4.9 GHz i 1.5 GHz (Green & Gull 1984).

Skorašnja Čandra (Chandra) posmatranja su otkrila da je G1·9+0·3 jedan od retkih ostataka koji zrači u X-području, i gde dominira sinhrotronsko zračenje umesto termalnog.

U daljem tekstu će se predstaviti skorašnja radio-posmatranja (Green & Reynolds 2008) pomoću VLA koja se mogu uporediti sa starijim posmatranjima na sličnoj rezoluciji ali na drugim frekvencijama, sa ciljem određivanja vrednosti magnetnog polja B i ukupne energije E_{\min}^{tot} .

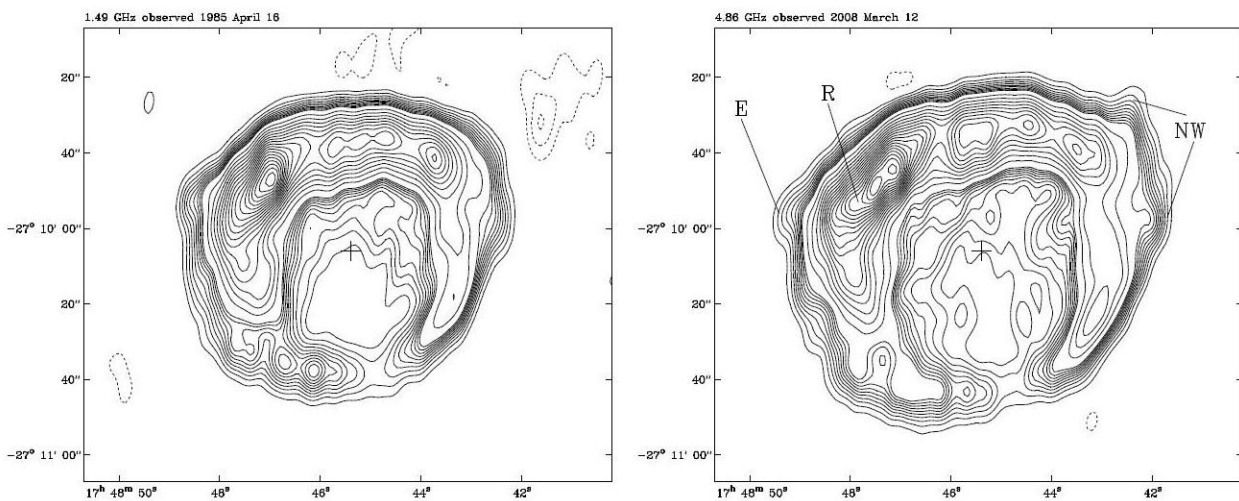
7.1. Poređenje posmatranja iz 1985. i 2008.

G1·9+0·3 je 2008. godine bio posmatran sa VLA (slika 2) na 4.86 GHz u C konfiguraciji. Ako se isti izvor posmatra u sve četiri konfiguracije, moglo bi se sakupiti mnogo više informacija. Rezolucija ovih posmatranja približno se poklapa sa posmatranjima koja su urađena 1985. godine na 1.49 GHz u B konfiguraciji.

	Posmatranja iz 1985	Posmatranja iz 2008
Datum	16.04.1985	12.03.2008
Konfiguracija	B	C
Frekvencija	1.49 GHz	4.86 GHz
Ekspozicija	25 min	29 min
Primarna kalibracija	3C286	3C286
Dobijena gustina fluksa	14.70 Jy	7.49 Jy
Sekundarna kalibracija	B1829-106	J1751-251
Dobijena gustina fluksa	0.927 Jy	0.569 Jy

Tabela 2 – Podaci preuzeti iz Grin i Reynolds 2008 (Green & Reynolds 2008)

Nova posmatranja su obrađena pomoću standardnih tehnika u AIPS⁹. Podaci koji su bili oštećeni su označeni, skala fluksa je bila kalibrisana na osnovu posmatranja korišćenjem 3C286. Ranija posmatranja na 1.49 GHz su takođe prerađena. Iako je dužina ekspozicije G1·9+0·3 slično u oba slučaja, detalji uv pokrivanja su različiti, zbog razlike zvezdanog vremena, nedostatka nekih antena i označavanja oštećenih podataka. Prema tome, sintetisani snopovi su malo drugačiji.



Slika 12 – Levo: 1.49 GHz iz 1985. Desno: 4.86 GHz iz 2008 (Green & Reynolds 2008).

Za ispitivanje širenja napravljene su slike sa istom rezolucijom radi upoređivanja (slika 12). Poziciono poravnavanje ovih slika je bilo postignuto pomoću prividne pozicije zbijenog izvora koji je otprilike 1.4 arcmin prema severu od centra ostatka supernove. Mora se naglasiti da ranija

⁹ Astronomical Image Processing System

posmatranja na 1.49 GHz najverovatnije nemaju dovoljno informacija da potpuno odrede zračenje sa G1·9+0·3.

Za posmatranja na 4.86 GHz u C konfiguraciji najveća ugaona veličina dobro snimljena sa punom sintezom je 5 lučnih minuta – pošto C konfiguracija nema iste razmere kao B konfiguracija ali ima bolju pokrivenost.

Zbog datih problema sa nedostatkom zračenja velikih razmera u posmatranjima na 1.49 GHz, takođe je urađeno i nekoliko kratkih posmatranja G1·9+0·3 na 1.43 GHz u istom posmatračkom delu kao kada je posmatrano na 4.86 GHz, sa ciljem provere vremenske varijacije u gustini fluksa G1·9+0·3. Ova provera se sastojala od dva kratka (~4 min) skeniranja G1·9+0·3, zajedno sa graničnim kalibracijskim posmatranjem 3C286 da bi se namestila skala krajnje gustine fluksa (sa pretpostavljenom gustinom fluksa od 14.7 Jy), i približnom sekundarnom kalibracijom J1751-253. Rezultati ovih merenja i posmatranja će se razmatrati u daljim delovima rada.

7.2. Ekspanzija i struktura

Na slici 12 se vidi da postoji širenje ostatka G1·9+0·3 u radio-području između 1985. i 2008. godine. Da bi se odredilo, napravljen je radijalni profil zračenja obe slike (slika 13), usrednjen po svim uglovima, od centra koji je prilagođen da maksimizuje vrh radijalnog profila iz 2008. Ova pozicija je na $17^{\text{h}}48^{\text{m}}45^{\text{s}}.4, -27^{\circ}10'06''$, J2000.0, što je blizu geometrijskog centra ostatka supernove. Ponovno skeniranje radijalnog profila iz 1985. ukazuje na prosečno širenje od 15% između 1985. i 2008. $0.65\%/god$. Širenje je nagnuto prema očekivano sjajnijoj strani ostatka supernove (severna i severoistočna strana).

Ovaj rezultat potvrđuje da je potrebno određeno širenje da bi se poklopile granice sa rezultatima dobijenim X-posmatranjima. Ako pretpostavimo slobodno širenje, to bi ukazivalo na starost od 150 godina za G1·9+0·3, što onda predstavlja najmlađi poznati Galaktiči ostatak supernove. Pretpostavlja se da je ostatak supernove tokom ovih godina menjao brzinu širenja. Veoma velika apsorpcija X-zraka ukazuje na to da G1·9+0·3 relativno blizu centru Galaksije. Ako se uzme udaljenost od 8.5 kpc, starost od ≤ 150 godina i spoljašnji radio prečnik od 92 arcsec to odgovara brzini širenja od $\geq 12000 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ (Green & Reynolds 2008).

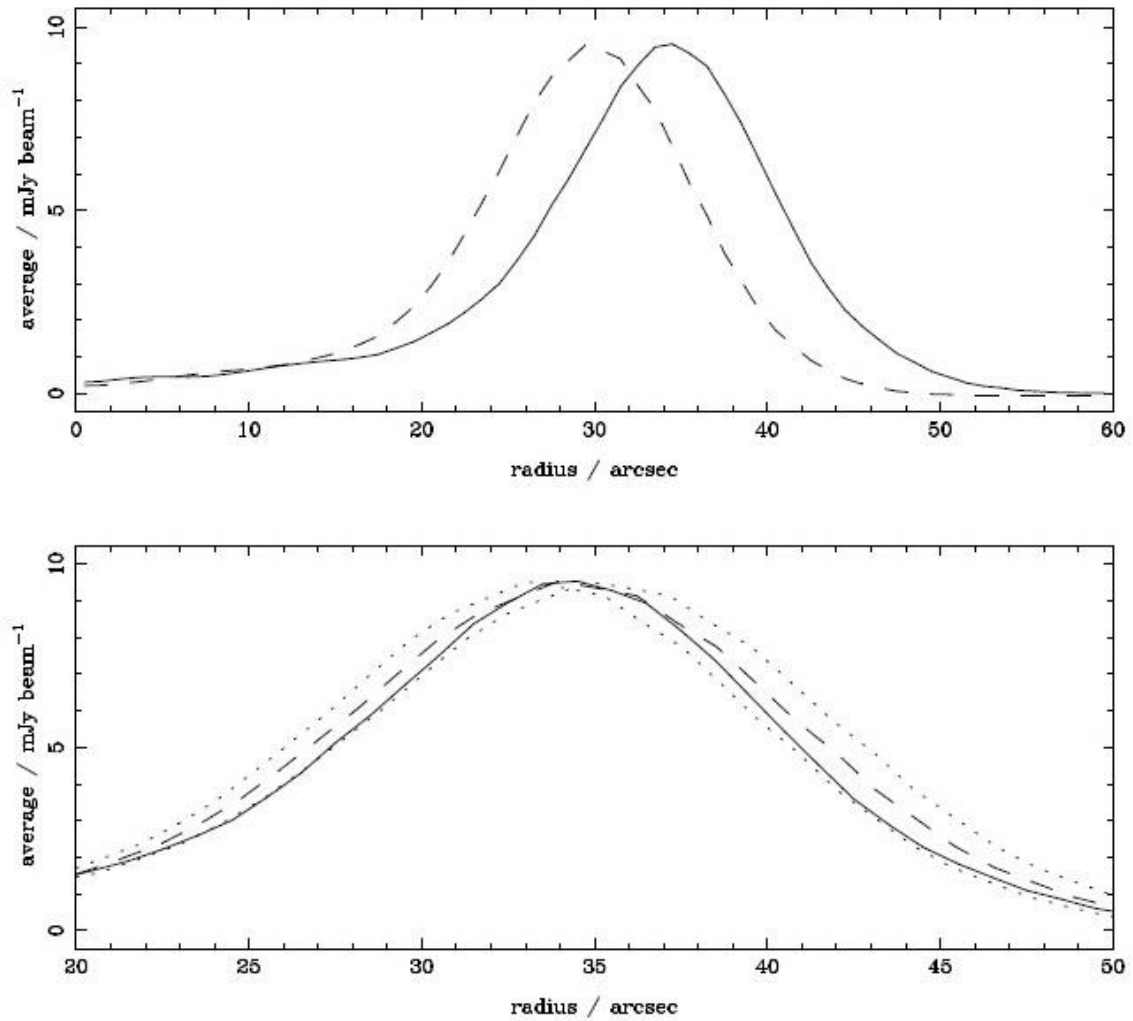
Tumačenje radijalnih profila na jednostavan način pomoću radijalnog skaliranja je problematično zbog različitih efekata:

1. Uv pokrivenost ovih posmatranja se razlikuje, kao što je već napomenuto, i posmatranje na 1.49 GHz ne može baš najbolje da detektuje zračenje na maloj skali.

2. Posmatranja na različitim frekvencijama, tako da bi bilo koja promena u spektralnom indeksu u bilo kom delu ostatka izazvala relativnu promenu u zračenju između epoha (npr. promena spektralnog indeksa od 0,05 bi odgovarala promeni gustine fluksa od 6% između 1.49 i 4.86 GHz).

3. Postoje stvarne promene u zračenju tokom 23 godine posmatranja, te promene koje su vidljive ne potiču samo od širenja. Sa slike 12 vide se promene u obliku i gustini fluksa radio-zračenja između 1985. i 2008. Ovo se posebno primećuje na severozapadu, gde se očigledno vidi produžetak sa spoljašnje svetlije ivice ostatka (slika 12).

Postoji mala indikacija širenja i na slici iz 1985. ali manje izražena nego na snimku iz 2008. Istočni deo ostatka takođe dokazuje slabo širenje posebno na snimku iz 2008, ali na mnogo manjem opsegu azimuta nego na prethodno pomenutom severozapadnom širenju. Linija grebena zračenja na severoistoku se očigledno razlikuje kroz epohe pošto je konkavna (prema centru ostatka) na slici 1985, ali malo konveksna na snimku iz 2008. (označeno sa R). Ako se snimak dobro pregleda i očisti, onda ovo očigledno pokazuje na blago istočno proširenje, koje odgovara severnoj ivici X-zračenja sa spoljašnje strane glavne ivice. Takođe, maksimum svetlog grebena se menja između dve epohe (npr. maksimum na severoistoku iz 1985. se razdvojio na dva maksimuma na snimku iz 2008.).

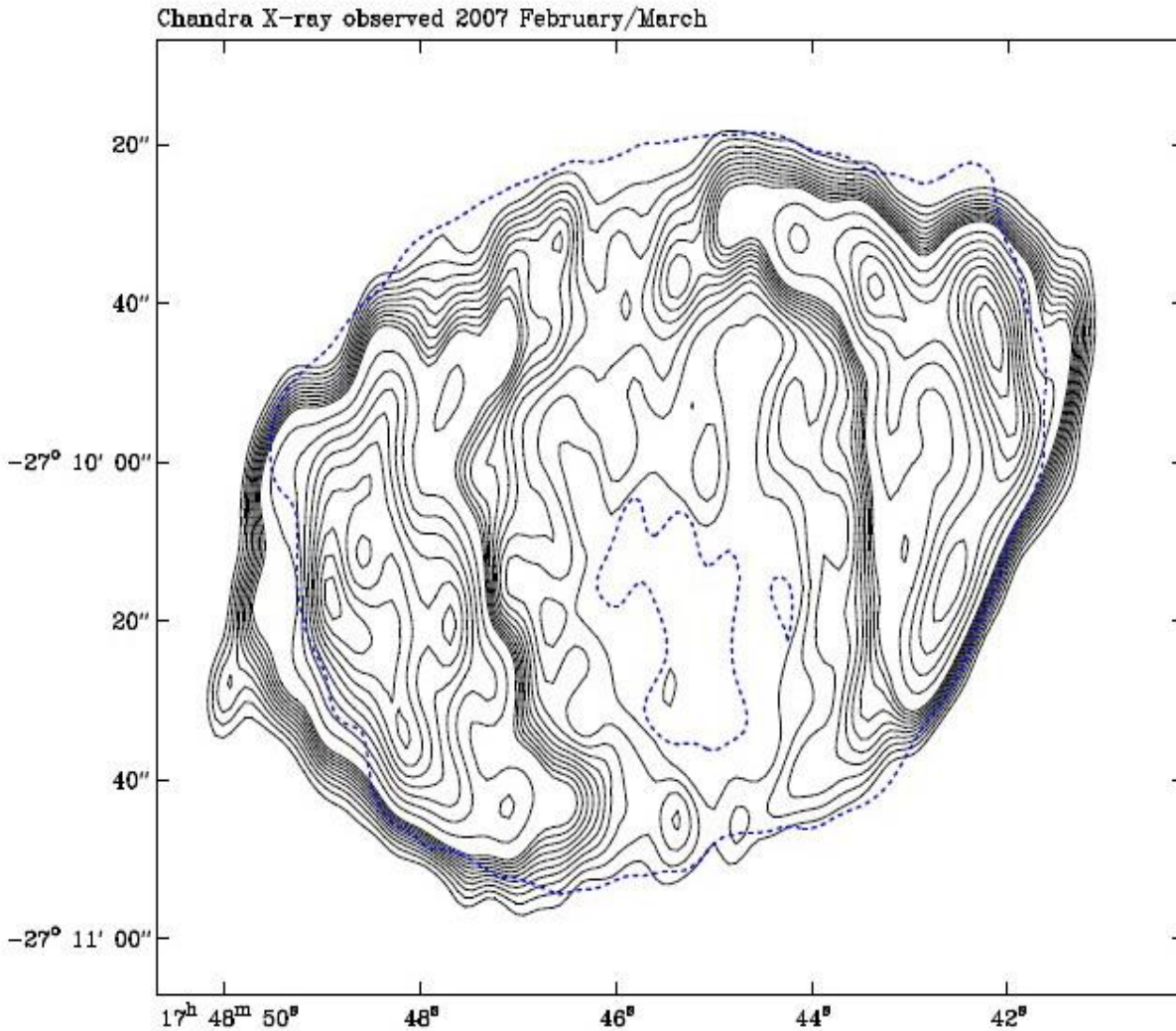


Slika 13 – Gornja slika: radijalni profili radio emisije za G1·9+0·3, isprekidana linija je iz 1985. dok je puna linija iz 2008. godine. Donja slika: skaliran profil iz 1985. proširenjem od 12% (tačkasta kriva), 15% (isprekidna linija) i 18% (tačkasta kriva), (Green & Reynolds 2008).

Na slikama 12 i 14 vide se upečatljive razlike između ukupne strukture G1·9+0·3 na radio i X talasnim dužinama, što može ukazivati na razlike u stopama ubrzanja čestica ili efikasnosti na različitim položajima. Iako je kontura ostatka skoro kružna u radio-talasima, sjajnost na radio-frekvencijama varira znatno u azimutu (severoistočna ivica je oko 50 puta sjajnija od najslabijeg zračenja na jugu). Ako bi se koristio lokalni gradijent gustine da se objasni ova velika razlika u sjajnosti, onda više nije očigledno zašto ostatak održava ovakav kružni oblik.

Sa druge strane, X-zračenje ostatka pokazuje bipolarnu strukturu, najsjajniji je u istočnoj i zapadnoj oblasti, što ukazuje na jako magnetno polje koje je potrebno za efikasno ubrzanje čestica koje su odgovorne za X-zračenje. Najsjajnije zračenje u istočnoj i delimično u severozapadnoj oblasti odgovara relativno slabom radio-zračenju.

U severozapadnom regionu ovo je spoljašnji nastavak koji se vidi na radio snimku iz 2008. koji verovatno odgovara regionu koji obuhvata spoljašnji udar sa najvećom brzinom.



Slika 14 – X-posmatranja Čandra (Chandra) teleskopom. Kontura sa izprekidanom plavom linijom je 4.86-GHz radio slika iz 2008. godine (slika 11). (Green & Reynolds 2008)

7.3. Povećanje sjaja

Pošto je G1·9+0·3 mlad ostatak supernove, očigledno je zapitati se kako se gustina radio-fluksa menja sa vremenom. Tabela 3 pokazuje dostupne vrednosti gustine fluksa G1·9+0·3 u literaturi. Ova posmatranja su napravljena raznovrsnim instrumentima i rezolucijama, ali gustina fluksa nije na konzistentnim skalama, što pravi poteškoće pri poređenju. Ipak, postoji dokaz da se gustina fluksa G1·9+0·3 povećavala tokom poslednjih nekoliko decenija.

Kombinovanje integrisane gustine fluksa iz novih posmatranja na 1.45 GHz i 4.86 GHz daje spektralni indeks α za radio emisiju G1·9+0·3 (gustina fluksa je proporcionalna frekvenciji kao $S \propto \nu^{-\alpha}$) od 0.62 ± 0.06 (Green & Reynolds 2008). Greška u ovom spektralnom indeksu koristi 5% varijacije u pojedinim gustinama fluksa, ne uključujući bilo koju moguću sistematsku neodređenost relativne skale posmatranja gustine fluksa.

Gustina radio fluksa za G1·9+0·3				
ν / MHz	S / Jy	ΔS / Jy	Vreme posmatranja	Referenca
332	2,84	0,10	1986-1989	LaRosa et al (2000)
408	1,18	0,07	1969-1971	Clark & Crawford (1974)
843	1,0	0,05	1985-1991	Gray (1994a)
843	0,986	0,031	1997-2007	Murphy et al. (2007)
1400	0,748	0,038	1993-1996	Condon et al (1998)
1425	0,935	0,047	2008	D.A. Green & S.P. Reynolds (2008)
2695	0,440	0,044	1981-1984	Reich et al (1984)
4850	0,236	0,016	1990	Griffith et al (1994)
4860	0,437	0,022	2008	D.A. Green & S.P. Reynolds (2008)
4875	0,20	0,05	1974-1975	Altenhoff et al. (1979)
5000	0,20	0,03	1975	Caswell et al. (1975)

Tabela 3 – Tabela preuzeta iz Grin & Reynolds 2008 (Green & Reynolds 2008) sadrži dostupna merenja gustine fluksa SNR G1·9+0·3 ostatka. Istim bojama su označene grupe godina (epohe) za koje su u daljem radu posebno računati spektralni indeksi.

Radio-posmatranja supernovih pokazuje povećanje sjaja tokom vremena (do nekih godinu dana nakon eksplozije supernove) zbog smanjivanja neprozračnosti. Nakon toga, radio supernove pokazuju stabilno opadanje zračenja.

Predviđanja povećanja sjaja se mogu napraviti samo na osnovu teorije o ubrzanju čestica i uticaja magnetnog polja. Širenje radio-izvora sa vremenom se pokorava stepenom zakonom. Promena veličine ostatka se povinuje stepenom zakonu gde je nezavisna promenljiva vreme. Iz tako definisanog modela može da se izračuna gustina energije relativističkih čestica, magnetno polje a

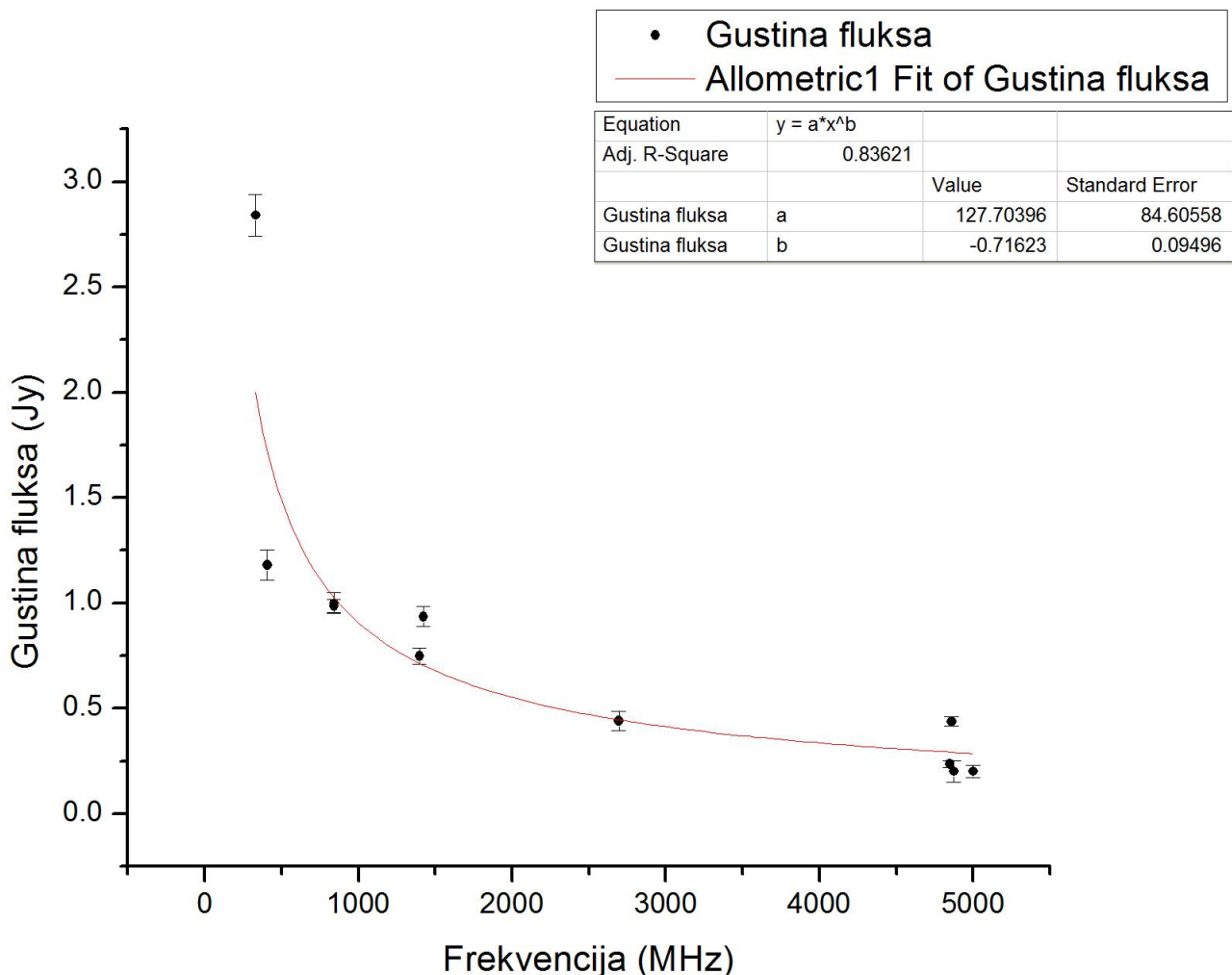
stoga i sinhrotronska luminoznost. Posle formiranja povratnog udarnog talasa gotovo svi modeli ukazuju na smanjenje sjaja sa vremenom.

Dok ostala objašnjenja ne budu odbačena, najprirodnije objašnjenje je da se sa efikasnošću kojom udarni talas predaje energiju relativističkim elektronima i magnetno polje mora povećavati sa vremenom.

8. Spektralni indeks za SNR G1·9+0·3

Spektralni indeks koji su Grin i Reynolds (Green & Reynolds 2008) dobili iznosi $\alpha=0.62$ a dobijen je pomoću samo dva merenja koja su oni izvršili. Pošto već imamo na raspolaganju više merenja (tabela 3) iz raznih godina, iskoristićemo sve dostupne podatke da odredimo spektralni indeks koji ćemo koristiti u daljem računu.

Korišćenjem vrednosti iz tabele 3 dobijamo sledeći grafikon (Grafikon 1) koji nam predstavlja funkciju gustine fluksa od frekvencije što zavisi od spektralnog indeksa koji nam je nepoznat.

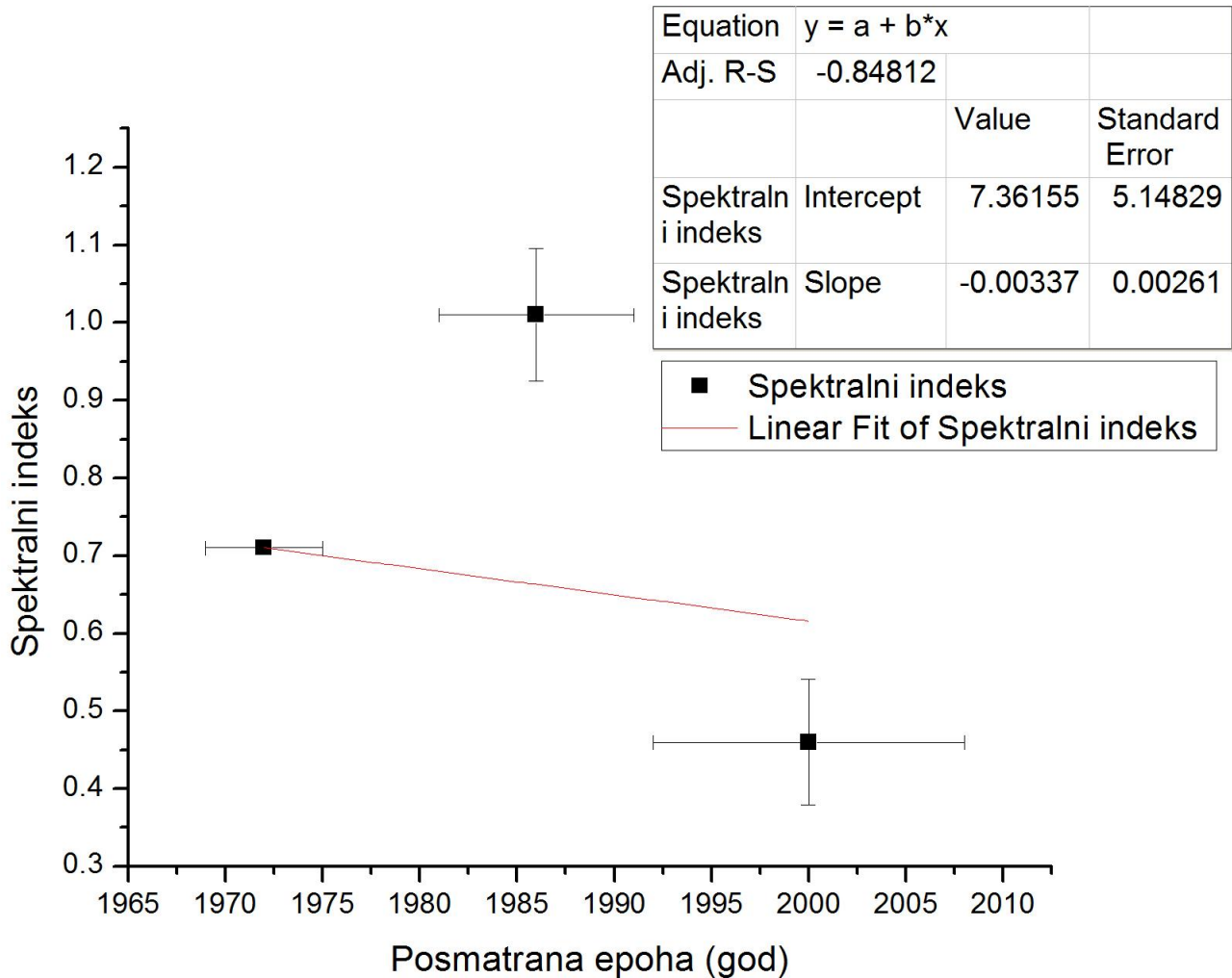


Grafikon 1

Za izradu grafikona je korišćen OriginPro 8. Da bismo utvrdili vrednost spektralnog indeksa primenjujemo nelinearan fit oblika $S = C \cdot \nu^\alpha$. Posle fitovanja dobijamo da spektralni indeks na osnovu svih merenja (Tabele 3) iznosi $\alpha=0.72$ (Grafikon 1).

Ova vrednost spektralnog indeksa dobijena je uz pretpostavku da je spektralni indeks konstantan tokom vremena. Međutim, u pitanju je mlad ostatak supernove i njegov spektralni

indeks bi trebalo da raste sa vremenom (Bell 2011). Obzirom da su nam dostupna merenja izvršena tokom četiri decenije, sledeće što želimo je da proverimo da li i kako se spektralni indeks ovog ostatka menja sa vremenom. Sva merenja smo grupisali u 3 epohe date u tabeli 3 i označene različitim bojama, žutom bojom označena su posmatranja obavljena u preiodu od 1969-1975 godine, zelenom od 1981-1991 godine dok narandžastom 1993-2008 godine. Posle ove podele za svaku epohu posebno je izračunat spektralni indeks na isti način kao na Grafikonu 1, i dobijene vrednosti spektralnog indeksa za ove tri epohe predstavili smo na Grafikonu 2, u cilju analize njegove evolucije. Međutim, kao što se vidi iz Grafikona 2 statistika je mala a greške su nam velike, i trend rasta sa ovim podacima ne može da se potvrdi.



Grafikon 2 – Spektralni indeks po epohama

9. Račun jednakog učešća

Najčešće korišćen način za određivanje vrednosti jačine magnetnog polja iz radio-sinhrotornske emisije je računom jednakog učešća tj. korišćenjem pretpostavke približno podjednakog učinka energije kosmičkih zraka i magnetnog polja. Ovaj metod, koji je ekvivalentan metodu minimuma energije, je detaljno prezentovao Paholjčik (Pacholczyk 1970.)

Odličan rezime o računom jednakog učešća nalazi se u knjizi Urošević i Milogradov-Turin iz 2007 godine. Ovde će, uglavnom, biti pomenuto samo ono najvažnije za dalju diskusiju.

Minimalna vrednost ukupne energije, neophodna za pokretanje sinhrotronskog mehanizma, se može odrediti iz posmatračkih podataka u slučaju približno jednakog učešća energije relativističkih čestica i energije magnetnog polja (Urošević i Milogradov-Turin 2007).

Mi ćemo odrediti minimalnu vrednost ukupne energije koja bi obezbedila da se sinhrotronskim mehanizmom stvori dovoljno zračenja da bi izvor uopšte bio detektovan. Ukupnu energiju i magnetno polje ćemo izraziti preko luminoznosti koja se dobija preko veličina koje se mogu dobiti iz posmatranja (Tabela 4).

SNR - G1.9+0.3	
Podaci: Grin (Green 2009)	
http://www.mrao.cam.ac.uk/surveys/snrs/snrs.G1.9+0.3.html	
Frekvencija	$\nu = 1 \text{ GHz}$
Gustina fluksa	$S_\nu = 0.6 \text{ Jy}$
Spektralni indeks	$\alpha = 0.72$
Udaljenost	$d = 8.5 \text{ kpc}$
Odnos energije sadržane u teškim česticama i energije sadržane u elektronima	$k = 40$
Opseg zračenja	$\nu_{1-2} = 10^7 - 10^{11} \text{ Hz}$
Dijametar	$D = 3.8 \text{ pc}$
Radijus	$r = 1.9 \text{ pc}$
Deo zapremine ostatka koji je zahvaćeno ljskom	$\phi = 0.25$

Tabela 4 – Veličine dobijene posmatranjima.

Koristeći parametre iz Tabele 4 i metodom jednakog učešća (Pacholczyk 1970) odredićemo vrednost magnetnog polja za minimalnu vrednost ukupne energije:

$$B = 4.5^{2/7} \cdot 1+k^{2/7} \cdot C_{12}^{2/7} \alpha \cdot \phi^{-2/7} \cdot r^{-6/7} \cdot L^{2/7} \quad 10 \quad (6)$$

$$E_{\min}^{\text{tot}} = C_{13} \alpha \cdot 1+k^{4/7} \cdot \phi^{3/7} \cdot r^{9/7} \cdot L^{4/7} \quad (7)$$

L – luminoznost¹¹

$C_{12} \alpha$ i $C_{13} \alpha$ – konstante koji se određuju iz tabele (Pacholczyk 1970.).

Pošto nam nisu tačno poznati unutrašnji i spoljašnji prečnik ljske koristimo $\phi = 0.25$. Prvo što treba da uradimo je da odredimo luminoznost na frekvenciji od 1 GHz

$$L_\nu = S_\nu \cdot 4 \cdot \pi \cdot d^2, \quad (8)$$

¹⁰ Ovakav metod za izračunavanje B naziva se metodom minimuma energije.

¹¹ Ukupna snaga izračena sa cele površine ostatka u celom opsegu frekvencija.

$$L_{1000} = S_{1000} \cdot 4 \cdot \pi \cdot d^2$$

$$L_{1000} = 6 \times 10^{-24} \cdot 4\pi \cdot 8500 \cdot 3.08 \times 10^{18} \text{ }^2$$

$$\underline{L_{1000} = 5.17 \times 10^{22} \text{ erg}}.$$

Pošto gustinu fluksa netermalnog izvora pišemo kao $S_\nu = K\nu^{-\alpha}$, tada i luminoznost po frekvenciji možemo definisati kao $L_\nu = K_1\nu^{-\alpha}$. Potom treba da odredimo konstantu K_1 .

Ako u jednačinu (8) zamenimo S_ν dobijemo:

$$L_\nu = K \cdot \nu^{-\alpha} \cdot 4\pi \cdot d^2$$

$$K_1\nu^{-\alpha} = K \cdot \nu^{-\alpha} \cdot 4\pi \cdot d^2$$

$$K_1 \equiv K \cdot 4\pi \cdot d^2$$

$$\log L_\nu = \log K_1 - \alpha \cdot \log \nu$$

$$\log K_1 = \log 5.17 \times 10^{22} + 0.62 \cdot \log 10^9$$

$$\underline{K_1 = 1.95 \times 10^{28}}.$$

Sada treba da odredimo ukupnu luminoznost za dati opseg frekvencija u našem slučaju $10^7 - 10^{11} \text{ Hz}$:

$$L = \int_{10^7}^{10^{11}} L_\nu d\nu$$

$$L = K_1 \cdot \int_{10^7}^{10^{11}} \nu^{-\alpha} d\nu$$

$$L = 1.95 \times 10^{28} \cdot \frac{1}{-0.62+1} \cdot 10^{11 \cdot -0.62+1} - 10^{7 \cdot -0.62+1}$$

$$\underline{L = 7.53 \times 10^{32} \text{ erg} \cdot \text{s}^{-1}}.$$

Potom određujemo konstante C_{12} i C_{13} za $\alpha = 0.72$ ali pošto su tražene konstante date samo za neke vrednosti u tabelama (Pacholczyk 1970), da bismo našli vrednosti koje su između zadatih koristeće se interpolacija.

Iz tabele za C_{12} imamo:

$$C_{12} \text{ } 0.7 = 2.8 \times 10^7$$

$$C_{12} \text{ } 0.8 = 3.9 \times 10^7$$

dok za C_{13} :

$$C_{13} \text{ } 0.7 = 1.7 \times 10^4$$

$$C_{13} \text{ } 0.8 = 2.0 \times 10^4$$

Onda:

$$\frac{\alpha_2 - \alpha_1}{\alpha - \alpha_1} = \frac{C_{12} \alpha_2 - C_{12} \alpha_1}{C_{12} \alpha - C_{12} \alpha_1}$$

$$\frac{0.8-0.7}{0.72-0.7} = \frac{3.9 \times 10^7 - 2.8 \times 10^7}{C_{12} \cdot 0.72 - 2.8 \times 10^7}$$

$$\frac{0.1}{0.02} = \frac{3.9 - 2.8 \times 10^7}{C_{12} \cdot 0.72 - 2.8 \times 10^7}$$

$$C_{12} \cdot 0.72 = 2.2 \times 10^6 + 2.8 \times 10^7$$

$$\boxed{C_{12} \cdot 0.72 = 3.02 \times 10^7}.$$

Dok za C_{13} dobijamo:

$$\boxed{C_{13} \cdot 0.72 = 1.76 \times 10^4}.$$

Sad imamo sve što nam je potrebno da izračunamo B i E_{\min}^{tot} .

$$B = 4.5^{2/7} \cdot 1 + k^{2/7} \cdot C_{12}^{2/7} \cdot \alpha \cdot \phi^{-2/7} \cdot r^{-6/7} \cdot L^{2/7}$$

$$B = 4.5^{2/7} \cdot 41^{2/7} \cdot 3.02 \times 10^7^{2/7} \cdot 0.25^{-2/7} \cdot 1.9 \cdot 3.08 \times 10^{18}^{-6/7} \cdot 7.53 \times 10^{32}^{2/7}$$

$$\boxed{B = 1.84 \times 10^{-4} \text{ Ga}}.$$

$$E_{\min}^{tot} = C_{13} \cdot \alpha \cdot 1 + k^{4/7} \cdot \phi^{3/7} \cdot r^{9/7} \cdot L^{4/7}$$

$$E_{\min}^{tot} = 1.76 \times 10^4 \cdot 41^{4/7} \cdot 0.25^{3/7} \cdot 1.9 \cdot 3.08 \times 10^{18}^{9/7} \cdot 7.53 \times 10^{32}^{4/7}$$

$$\boxed{E_{\min}^{tot} = 6.68 \times 10^{47} \text{ erg}}.$$

Dobili smo minimalnu vrednost ukupne energije koja obezbeđuje da se sinhrotronskim mehanizmom stvori dovoljno zračenja da bi ostatak supernove G1·9+0·3 bio uspešno detektovan.

10. Zaključak

U ovom radu je prezentovan i diskutovan ostatak supernove G1·9+0·3. Cilj ovog rada bio je da se iz dostupnih podataka o ostatku G1·9+0·3 izračuna vrednost magnetnog polja i vrednost ukupne energije. Metodom jednakog učešća izračunate su vrednosti:

$$B = 184 \mu\text{Ga} \text{ i } E_{\min}^{\text{tot}} = 6.68 \times 10^{47} \text{ erg}.$$

Za račun su korišćeni najnoviji dobijeni parametri preuzeti iz Grin 2009 osim spektralnog indeksa koji je zasebno izračunat u ovom radu.

Rezultate sam takođe uporedio sa online PHP aplikacijom (Arbutina, Urošević, Andjelić, Pavlović, Vukotić 2011. <http://poincare.matf.bg.ac.rs/~arbo/eqp/>) koja koristi drugi metod ekvipartacije i uzima u obzir još i brzinu širenja (ukoliko je poznata). Za procenjenu brzinu širenja od oko 14000 km/s (Carlton et al. 2011.), vrednosti za magnetno polje i energiju su:

$$B = 98.5 \mu\text{Ga}$$

$$E_{\min}^{\text{tot}} = 1.47 \times 10^{48} \text{ erg}$$

Rezultati dobijeni korišćenjem metoda Arbutine sa saradnicima (2012) razlikuju od rezultata predstavljenih u ovom radu. Rezultat ovog rada je skoro 2 puta veća vrednost magnetnog polja u odnosu na vrednost dobijenu pomoću PHP aplikacije.

Za analizu promene spektralnog indeksa sa vremenom nažalost nemamo dovoljno podataka da bi mogli da utvrdimo bilo kakav značajan trend opadanja ili porasta.

Dobijena vrednost magnetnog polja u ovom radu pokazuje da je međuzvezdano magnetno polje (prosečna vrednost oko $5 \mu\text{Ga}$), osim što je kompresovano, značajno i pojačano i to za vrednost koja je 20 puta veća, što pokazuje da se magnetno polje pojačava u mladim ostacima supernovih što je i teorijski predviđeno (Bell 2004).

Literatura:

1. Pacholczyk, A.G.: *Radio Astrophysics*, Freeman and Co., San Francisco (1970)
2. Dejan Urošević, Jelena Milogradov-Turin: *Teorijske Osnove Radio-Astronomije*, Beograd (2007)
3. Tijana Prodanović: *Uvod u Spektroskopiju za Astronome*, Novi Sad (2010)
4. Božidar Vujičić, Stevica Djurović: *Astrofizika sa Astronomijom*, Novi Sad (1995)
5. Stephen P. Reynolds, Kazimierz J. Borkowski, David A. Green, Una Hwang, Ilana Harrus & Robert Petre: *The Youngest Galactic Supernova Remnant: G1.9+0.3*, (2008)
6. D. A. Green, S.P. Reynolds, K. J. Borkowski, U. Hwang, I. Harrus and R. Petre: *The Radio Expansion and Brightening of the very young Supernova Remnant G1.9+0.3*, (2008)
7. Bojan Arbutina: *Supernovae and Their Remnants*, Beograd (2011)
8. Ashley K. Carlton, Kazimierz J. Borkowski, Stephen P. Reynolds, Una Hwang, Robert Petre, David A. Green, Kalyani Krishnamurthy, & Rebecca Willett: *Expansion of the Youngest Galactic Supernova Remnant G1.9+0.3*, (2011)
9. Branislav Vukotić: *Evolucija Magnetnih Polja U Ostacima Supernovih*, Beograd (2006)
10. Y. De Horta, M. D. Filipović, E. J. Crawford, F. H. Stootman and T. G. Pannuti: *An ATCA Observation of the Youngest Known Galactic SNR G1.9+0.3*, (2008)
11. D. A. Green: *A revised Galactic supernova remnant catalogue*, (2009)
12. D. A. Green: *A Catalogue of Galactic Supernova Remnants*, (2009)
13. T. Murphy, B. M. Gaensler, S. Chatterjee: *A 20 Year Radio Curve for the Young Supernova Remnant G1.9+0.3*, (2008)
14. B. Arbutina, D. Urošević, M. M. Andjelić, M. Z. Pavlović and B. Vukotić: *Modified equipartition calculation for supernova remnants*, Beograd (2012)
15. A. R. Bell, K. M. Schure and B. Reville: *Cosmic ray acceleration at oblique shocks*, (2011)
16. A. R. Bell: *Turbulent amplification of magnetic field and diffusive shock acceleration of cosmic rays*, (2004)

Kratka biografija:



Attila Varga, rođen 04.07.1983. godine u Novom Sadu.
Osnovno osmogodišnje obrazovanje završio u Temerinu da bi posle toga upisao
ETŠ Mihajlo Pupin u Novom Sadu smer RTV.
Godine 2004 upisuje Pirodno – matematički Fakultet u Novom Sadu, odsek za fiziku,
smer Astronomija sa Astrofizikom.

UNIVERZITET U NOVOM SADU
PRIRODNO-MATEMATIČKI FAKULTET

KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA

<i>Redni broj:</i>	
RBR	
<i>Identifikacioni broj:</i>	
IBR	
<i>Tip dokumentacije:</i>	Monografska dokumentacija
TD	
<i>Tip zapisa:</i>	Tekstualni štampani materijal
TZ	
<i>Vrsta rada:</i>	Diplomski rad
VR	
<i>Autor:</i>	Varga Atila
AU	
<i>Mentor:</i>	dr Tijana Prodanović
MN	
<i>Naslov rada:</i>	Primena metode jednakog učešća na ostatak supernove G1·9+0·3
NR	
<i>Jezik publikacije:</i>	srpski (latinica)
JP	
<i>Jezik izvoda:</i>	srpski/engleski
JI	
<i>Zemlja publikovanja:</i>	Srbija
ZP	
<i>Uže geografsko područje:</i>	Vojvodina
UGP	
<i>Godina:</i>	2012
GO	
<i>Izdavač:</i>	Autorski reprint
IZ	
<i>Mesto i adresa:</i>	Prirodno-matematički fakultet, Trg Dositeja Obradovića 4, Novi Sad
MA	
<i>Fizički opis rada:</i>	(Broj poglavlja/broj strana/broj tabela/broj slika/broj grafikona)
FO	12/34/4/14/2
<i>Naučna oblast:</i>	Fizika
NO	
<i>Naučna disciplina:</i>	Astronomija, Radio-astronomija
ND	
<i>Predmetna odrednica/ ključne reči:</i>	Radio-astronomija, ostaci supernovih
PO	
UDK	
<i>Čuva se:</i>	Biblioteka departmana za fiziku, PMF-a u Novom Sadu
ČU	
<i>Važna napomena:</i>	nema
VN	
<i>Izvod:</i>	
IZ	
<i>Datum prihvatanja teme od NN veća:</i>	10.11.2011.
DP	
<i>Datum odbrane:</i>	07.03.2012.
DO	
<i>Članovi komisije:</i>	
KO	
<i>Predsednik:</i>	dr Dušan Mrđa
<i>član:</i>	dr Dejan Urošević
<i>član:</i>	dr Tijana Prodanović

UNIVERSITY OF NOVI SAD
FACULTY OF SCIENCE AND MATHEMATICS

KEY WORDS DOCUMENTATION

<i>Accession number:</i>	
ANO	
<i>Identification number:</i>	
INO	
<i>Document type:</i>	Monograph publication
DT	
<i>Type of record:</i>	Textual printed material
TR	
<i>Content code:</i>	Final paper
CC	
<i>Author:</i>	Varga Atila
AU	
<i>Mentor/comentor:</i>	dr Tijana Prodanović
MN	
<i>Title:</i>	Equipartition method analysis of supernova remnant G1·9+0·3
TI	
<i>Language of text:</i>	Serbian (Latin)
LT	
<i>Language of abstract:</i>	English
LA	
<i>Country of publication:</i>	Serbia
CP	
<i>Locality of publication:</i>	Vojvodina
LP	
<i>Publication year:</i>	2012
PY	
<i>Publisher:</i>	Author's reprint
PU	
<i>Publication place:</i>	Faculty of Science and Mathematics, Trg Dositeja Obradovića 4, Novi Sad
PP	
<i>Physical description:</i>	(Chapter/pages/tables/pictures/graph)
PD	12/34/4/14/2
<i>Scientific field:</i>	Physics
SF	
<i>Scientific discipline:</i>	Astronomy, Radio-astronomy
SD	
<i>Subject/ Key words:</i>	Radio-astronomy, supernova remnants
SKW	
UC	
<i>Holding data:</i>	Library of Department of Physics, Trg Dositeja Obradovića 4
HD	
<i>Note:</i>	none
N	
<i>Abstract:</i>	
AB	
<i>Accepted by the Scientific Board:</i>	11.10.2011.
ASB	
<i>Defended on:</i>	03.07.2012.
DE	
<i>Thesis defend board:</i>	
DB	
<i>President:</i>	dr Dušan Mrđa
<i>Member:</i>	dr Dejan Urošević
<i>Member:</i>	dr Tijana Prodanović

