



UNIVERZITET U NOVOM SADU
PRIRODNO-MATEMATIČKI
FAKULTET
DEPARTMAN ZA FIZIKU



Problematika određivanja stope eksplozija supernovih

- master rad -

Mentor:

Prof. dr Tijana Prodanović

Kandidat:

Darko Donevski

Novi Sad, jul 2013. godine

U mesto obične zahvalnice,

Ovaj rad je svedočanstvo jednog (ne)realnog vremena za bavljenje naukom i istraživačkim radom u Srbiji, na početku 21. veka. Dok su u svetu izvesne velike kolaboracije koje se formiraju prema ambicioznim projektima istraživanja sve dubljih slika našeg svemira, astronomija u Srbiji i dalje predstavlja egzotičnu, ali i izolovanu teritoriju. Zbog toga moram da se zahvalim svima onima koji su uticali da se iz materijalno vrlo izvesnog i kreativno uspavljajućeg posla stručnog saradnika u inženjeringu, vratim svojoj najvećoj ljubavi – istraživačkoj astrofizici, tačnije povezivanju visokoenergetskih fenomena, kako u teorijskom, tako i u posmatračkom smislu. Dakle, da prebegnem na stazu neizvesnosti, konstantne misaone budnosti i uzbuđenja koje kod istraživača izaziva rešavanje problema. U to ime, hvala mojim roditeljima, kao i mentorki Tijani Prodanović (koja me je podrila pri odlasku na raznorazne konferencije, kao i na doktorske konkurse u Hajdelbergu i Lajdenu, prenoseći pri tome svoj zanos o popularizaciji nauke). Hvala i prof. Milanu Ćirkoviću, koji je dosta doprineo mom zanimanju za posmatračku kosmologiju, pre svega za razumevanje tematike evolucije galaksija i stvaranja strukture na velikim skalamama, što će biti jedna od oblasti kojom ću se baviti u budućnosti na observatoriji u Lajdenu.

Držati korak u nauci znači konstantno se takmičiti sa ostatkom sveta. Da bi se dostigle te udaljene tačke, ponekad se moraju brisati granice, toliko da često nije važno u kojim koordinatama se trenutno fizički nalazite – mnogo je važnije znati kako u tom istom sistemu postoje ljudi koji sa vama funkcionišu poput jednog skladnog tima. Ovo se odnosi kako na profesionalno-naučni, tako i na emotivni domen. Ništa ne može da usreći više od saznanja sa kim možete da radite na unapređenju naučnog života, kao i života uopšte.

Novi Sad/Vršac/Lajden , jul 2013. godine

SADRŽAJ

UVOD	1
GLAVA I Supernove – podela i evolucioni modeli	3
1.1 Evolutivni put zvezda velikih masa na glavnom nizu	4
<i>Termonuklearne supernove</i>	6
<i>Supernove sa kolapsom jezgra</i>	7
1.2 Generalizacija i trenutni status	8
1.3 Misije koje mere stopu eksplozija supernovih.....	8
1.4 Paradigma modela evolucije zvezda velikih masa	9
1.5 Gubitak mase	10
GLAVA II Problem broja supernovih	12
2.1 Inicijalna funkcija mase	12
2.2 Stopa formiranja zvezda	16
2.3 Šta je to “problem nedostatka supernovih?”	18
2.4 Udeo slabih (faint) supernovih (M<-15).....	22
2.5 Postupak rada	22
2.5.1 <i>Metodologija biranja masenih granica za različite IMF-ove.</i>	23
2.5.2 <i>Osobine supernova ostatka</i>	26
2.5.3 <i>Poređenje rezultata sa varijabilnim IMF-om</i>	28
2.6 Korekcije na dosadašnja merenja	29
2.6.1 <i>Supernove nedostupne optičkim pretraživanjima</i>	29
2.6.2 <i>Efekat zvezdane rotacije</i>	31
2.7 Rezultati i analiza	33
<i>Analiza 1</i>	33
<i>Analiza 2</i>	36

GLAVA III Astrofizičke posledice problema supernovih	39
3.1 Efekat nedostatka supernovih na galaktičku zastupljenost Li-6	40
Zaključak	43
DODATAK 1: Pregled najvažnijih aktuelnih sistematskih pretraživanja supernovih	45
Literatura	47
Biografija	49

UVOD

Supernove (SNe) označavaju kraj životnog ciklusa pojedinih zvezda. Kao retki događaji koji oslobođaju ogromne količine energije tokom više meseci, supernove su bile posmatrane još u antičko doba. U modernoj astrofizici, analize ovih kosmičkih fenomena su važne za razumevanje fizike koja dovodi do stvaranja takvih vrsta eksplozija, kao i uticaja na generisanje fizičkih i hemijskih uslova koji supernove mogu podstaknuti u sredinama u kojima se javljaju.

Kao glavni proizvođači teških elemenata, one su ključni faktor za određivanje smera hemijske evolucije, kao i za status međugalaktičke materije preko koje oslobođeni materijal supernovih odlazi iz galaksija.

Da bismo shvatili kako se ovi procesi mogu razvijati tokom kosmičkog vremena, važno je razumeti kako se broj eksplodirajućih supernova menja sa crvenim pomakom, tj. kakva je evolucija stope stvaranja supernovih (*eng. supernova rate (SNR)*). Dosadašnja istraživanja pokazala su da, naročito kod onih supernova sa kolapsom jezgra koje imaju progenitore sa velikim masama i s kratkim životnim trajanjem na glavnom nizu, broj njihovih eksplozija treba da sledi iz stepena formiranja zvezda (*star formation rate (SFR)*), čime se nudi direktni i nezavisni način merenja predviđenog stvaranja zvezda.

Motivacija za rad potekla je od dva veoma važna problema u modernoj astrofizici: prvi je vezan za nerešen status odnosa teorijski predviđene stope formiranja zvezda i izmrerene brojnosti supernovih, dok je drugi vezan za posledice koje bi imala eventualna neusaglašenost ovih vrednosti na modele galaktičke hemijske evolucije.

U radu *Horiuchi et al. (2011)* prvi put je ukazano na mogućnost da su, na osnovu uzorka osam najznačajnijih astronomskih misija koje su prezentovale merne vrednosti stepena stvaranja supernova sa kolapsom jezgra (*eng. Core Collapse Supernovae/CC SNe*), dobijene vrednosti za faktor 2 (sa statističkim intervalom poverenja od 2σ) manje od vrednosti koje su teorijski predskazane iz stope formiranja zvezda. To je označeno kao „problem brojnosti supernovih“ (*eng. Supernova Rate Problem*).

Cilj ovog rada je raspoređen u dva osnovna segmenta

U prva dva poglavlja data je detaljna analiza evolucionih mehanizama zvezda velikih masa koje mogu da izazovu eksplozivne supernove sa kolapsom jezgra, kao i utvrđivanje što tačnijeg odnosa stope formiranja zvezda sa stopom eksplodirajućih supernovih pomenutog CC-tipa. U radu su, u tu svrhu, iskorišćene i neke dodatne korekcije koje se do sada nisu upotrebljavale u važnijim analizama (*Horiuchi et al. (2011)*, *Smartt (2009)*, *Dahlen et al(2004)* *Mattila et al. (2012)*) a tiču se objedinjenih faktora (zaklonjenost prašinom na različitim crvenim pomacima,

nedostajući ideo koji se javlja usled posmatračkih teškoća lociranja slabih supernova, rotacija zvezda, metaličnost sredine) koji mogu da regulišu pomenuti faktor odstupanja na manju vrednost.

U trećem poglavlju dat je sažetak osnovnih ideja koje mogu da predstavljaju osnov za nova istraživanja, a naročito u domenu modeliranja galaktičke evolucije primordijalnih elemenata (pre svega litijuma i deuterijuma). U tu svrhu uključuje se doprinos visokoenergetskih zračenja, poput kosmičkog i gama-zračenja, s obzirom da su bilo koji izvori astrofizičkih šokova (a supernove su jedan od njih) potencijalni podstrekari ovih visokoenergetskih procesa. Takođe, na osnovu radova (*na pr. Reeves et al. 1970, Prodanovic, Fields (2004)*) koji su pokazali povezanost interakcije galaktičkog kosmičkog zračenja sa međuzvezdanom sredinom, kao i to da tekva interakcija uspešno može objasniti uočene LiBeB zastupljenosti, konstruisan je jednostavan teorijski link po kom su mesta formiranja zvezda direktno povezana sa nastalom količinom kosmičkog zračenja, a ta vrednost dalje stoji u direktnoj proporcionalnosti sa priozvedenim gama-zračenjem i količinom litijuma (*Prodanovic & Fields (2005)*).

To bi bila odlična polazna tačka za povezivanje modela ponašanja galaktičkih sistema na malim i velikim crvenim pomacima.

U radu su, zbog opširne analize i velikog broja objekata koji su analizirani, korišćeni neki od korisnih softverskih paketa (u dodatku su navedene sve web adrese i kratak opis ovih paketa):

- Baza CC SNe koju koristi Supernova Large Survey Project (SNLS), u kojoj je data najdetaljnije izmerena vrednost stope eksplozija na rastojanjima do 200 Mpc.
- SDSS katalog supernova (Prieto, Beacom 2012) i specijalizovani katalog MPA instituta u Minhenu sa osobinama galaksija u kojima su registrovane supernove sa kolapsom jezgra.
- Critical Star Forming Rate Density Calculator
- PEGASE 3 synthesis code za proveru vrednosti gustine formiranja zvezda za različite inicijalne funkcije mase.
- MESA Stellar Evolution Code

GLAVA I

Supernove – podela i evolucioni modeli

Sudbina zvezda uglavnom je određena njihovom masom i sastavom, počevši od trenutka rađanja pa do evolutivnog kraja. Za samostalne zvezde koje nisu deo nekog binarnog sistema, gubitak mase dešava se kao posledica zvezdanih vetrova. U teoriji se i dalje vrše detaljne analize i modelovanje na koji način se mogu povezati gubitak mase sa jedne, i stepen metaličnosti sa druge strane. Naravno, sve te zavisnosti moraju da se proučavaju u kontekstu različitih evolutivnih etapa. Zvezde manje metaličnosti imaju manje mase i veća jezgra od helijuma, kao i vodonični omotač prilikom svog evolutivnog završetka. Metaličnost takođe može da bude jedan od faktora koji određuje da li će ta zvezda, od koje kasnije nastaje eksplozija supernove, biti crveni džin ili plavi superdžin. Mehanizmi koji prikazuju detaljnu zavisnost osobina zvezdanih ostataka u funkciji od metaličnosti, precizno su opisani u radu *Heger et al. 2003*, a ovde su neki zaključci tog rada podvrnuti dodatnoj analizi (na pr. donji maseni limit). Kao spektakularni događaji u kojima se luminoznost zvezde drastično uvećava kroz veoma kratak vremenski interval, supernove su izazov za modernu posmatračku astronomiju. Sa astrofizičkog stanovišta korespondiraju sa umirućim zvezdama koje kroz svoj eksplozivni evolutivni kraj ostavljaju okolnoj međuzvezdanoj sredini veliki ideo originalne mase koja se kasnije transformiše u teže elemente putem nuklearnih reakcija. Na osnovu toga, može se reći da supernove imaju jedan od najvažnijih uticaja na međuzvezdanu sredinu jer kroz galaktičke vetrove determinišu količinu i dinamiku obogaćivanja hemijskim elementima kako međuzvezdanog, tako i međugalaktičkog prostora. Zvezde najvećih masa su glavni pokretači hemijske evolucije. Primera radi, na svaku zvezdu u rangu od oko $15 M_{\odot}$ dobija se oko $0.4 M_{\odot}$ izbačenog kiseonika. Takve zvezde (u masenom opsegu između 7 i 10 sunčevih masa) dugo vremena su smatrane za progenitore supernovih koje svoj evolutivni put završavaju kada gvozdeno jezgro više ne može da podržava nuklearne reakcije koje bi se suprotstavile termalnom pritisku¹.

¹ Koristeći poznavanje astrofizičke teorije tog vremena, lucidni švajcarsko-američki astronom Fric Cviki (Fritz Zwicky) je 1934. godine načinio prvi veliki prodror u razumevanju ovih fenomena kada je zajedno sa još jednim velikim naučnikom, Nemcem Valterom Badeom (Walter Baade) formulisao osnovne pravce istraživanja supernovih, dajući pri tome jasnu formulaciju razlike između eksplozija novih (nagla povećanja sjaja, ali znatno manjeg stepena u odnosu na supernove) i supernovih. 1938. godine Cviki je objavio svoj prvi rad o brojnosti supernovih, u kome je izneo procenu da je prosečna učestanost pojave supernovih je oko jedne eksplozije po „vangelaktičkoj maglini lokalne zapremine u toku intervala od oko 600 godina“.

1.1 Evolutivni put zvezda velikih masa² na glavnom nizu

Zvezda koja potroši vodonično gorivo u svom jezgru napušta glavni niz i postaje nestabilna struktura koja kao jedini raspoloživi izvor energije koristi gravitaciono sažimanje. Zvezdana materija se zgušnjava i temperatura raste, pri čemu su temperatura i gustina najviše u samom jezgru, te opadaju ka gornjim slojevima. Za sagorevanje helijuma u jezgru temperatura (koja za zvezde velikih masa na glavnom nizu iznosi oko 10^5 K), ipak nije dovoljno visoka, ali se zato stvaraju uslovi za paljenje termonuklearnih reakcija u tankom sloju oko jezgra. Kada se desi da je proizvedena energija veća od gravitacije omotača, ona se delom oslobađa u okolini prostora, a delom razdvaja omotač koji se širi i tako hlađi. Dimenzija zvezde se povećava, a površinska temperatura opada na oko 3000K. Stvara se konvektivni omotač, i grubo govoreći, u toku ovih promena unutrašnje strukture zvezda se posle glavnog niza premešta po H-R dijagramu postajući crveni džin. Brojnost zvezda je inače dobar pokazatelj trajanja određenih faza njihovih života, slaba naseljenost nekih oblasti na H-R dijagramu ukazuje na kratak boravak određenih struktura u tim oblastima tokom evolucije. Masivnije zvezde mogu jednom, ili čak više puta, da prođu kroz stadijum crvenog džina, a temperatura koja se tada dostigne može učiniti da se materija nastala sagorevanjem u poslednjoj fazi pretvori u gorivo u narednoj etapi, i to kroz C-NE-O-Si-Fe proces. Ako masa zvezde nije dovoljna da sažimanjem dostigne temperaturu od oko 5×10^9 K, tada fuzija neće ići do gvožđa, a dolaziće do smenjivanja stabilnih i nestabilnih stanja, odnosno faza kada su izvori energije u jezgru, i kada su u omotaču oko njega.

Supernove spadaju u red kataklizmičkih i retkih događaja čije kandidate-progenitore treba tražiti među zvezdama srednjih masa, a za samo nekoliko dana oslobodi se energija od skoro 10^{44} J nakon čega se potpuno izmeni struktura matične zvezde. Odbačeni gasni omotač čini eksplandujuću maglinu (supernova ostatak), dok u slučaju kada nije razorenata celokupna zvezda ostaje i neutronska zvezda kao kolapsirajuće jezgro.

Generalno gledano, možemo izdvojiti dva osnovna tipa ovih eksplozija: **Termonuklearne supernove i supernove sa kolapsom jezgra** (tzv. „gravitacione supernove“)³. Treba reći da krajnja teorija koja objašnjava nastanak različitih tipova supernovih još uvek nije kompletirana.

² U ovom radu se pod zvezdama velikih masa podrazumevaju objekti čija je masa u intervalu (7.5 -150) sunčevih masa, na osnovu detaljnih teorijskih ramatranja koja će biti izložena u daljem delu teksta.

³ Takođe se u literaturi može često susresti i spektralna podela na **Supernove tipa Ia i Supernove tipa II (+Ibc)**, koje karakterišu većinu osobina termonuklearnih (Ia), odnosno gravitacionih supernova (Ibc, II). Početkom 2013. godine, grupa astronoma koji su radili zajedničko istraživanje (institut *Barkeley* i *Carnegie* opservatorija u Čileu) objavili su rad kojim potvrđuju novu klasu supernovih – Iax, sličnu tipu Ia, dakle bez vodoničnih linija u spektru, ali sa dosta slabijom magnitudom u odnosu na izvorne Ia tipove, kao i velikim opsegom u radikalnim brzinama (*Foley et al. 2013*).

Najnoviji rezultati potvrđuju ranija mišljenja da su glavni mehanizmi eksplozivno paljenje degenerisanog jezgra usamljene zvezde (u slučaju masa većih od oko $8 M_{\odot}$), ili eksplozivno paljenje belog patuljka, ukoliko je akrecijom mase u tesnom dvojnom sistemu prešao Čandrasekarovu granicu. Takođe, još jedan važan mehanizam je kolaps nedegenerisanog jezgra vrlo masivne zvezde.

Termonuklearne supernove

Mehanizmi termonuklearne eksplozije belog patuljka još uvek nisu poznati. Za razliku od gravitacionih supernovih kod kojih je (kao što će se videti) jedini značajna parametar masa gvozdenog jezgra, mehanizam termonuklearnih supernovih u mnogome zavisi od prethodne istorije tesnog dvojnog sistema čiji je deo. Masivnija zvezda jednog takvog sistema prva stiže do svog životnog kraja i preobražava se u belog patuljka mase oko $1M_{\odot}$. Druga zvezda u tom sistemu preobražava se u crvenog džina i njen prošireni omotač počinje da biva uvučen gravitacionim poljem belog patuljka. U jednom od narednih procesa on dolazi do Čandrasekarove granice (koja iznosi $1.4 M_{\odot}$) i pritisak degenerisanog gasa ultrarelativističkih elektrona više nije u stanju da „iznese“ težinu zvezde.

Mehanizam za konverziju gravitacione potencijalne energije od kolapsirajuće mase jezgra koja prelazi granicu od $1.4 M_{\odot}$ (što je uporedivo sa veličinom gvozdenog jezgra naše planete) putem eksplozivnih procesa, predmet je teorijskih astrofizičkih ispitivanja kroz numeričko modeliranje⁴. Na ekstremnim temperaturama i gustinama u kolapsirajućem jezgru, sve tri vrste neutrina su kreirane sa ukupnom luminioznošću reda veličine 10^{53} erg.

Fuzija jezgara ugljenika započinje na temperaturama od oko 5×10^8 K. Energija oslobođena tim sagorevanjem zagreva sredinu, ali ovaj gas (za razliku od idealnog gasa) ne reaguje širenjem, zbog osobine da je njegov pritisak nezavisан od njegove temperature (*Prantzos et al. 2008*). Temperature sve brže rastu i dolazi do rasplamsavanja termonuklearnih reakcija, pri čemu se jezgro zagreje do nekoliko milijardi stepeni i unutrašnjost belog patuljka gori proizvodeći jezgra iz okoline gvožđa. Prema trenutnim zvezdanim modelima, polovina Čandrasekarove mase se tako pretvorи u ^{56}Ni , dok manje teška jezgra (Ca, Si) nastaju u spoljašnjim slojevima koje zagreva front paljenja koji stiže do površine za manje od jedne sekunde. Supernove tipa Ia na taj način imaju mehanizam zagrevanja u radiaktivnoj energiji nikla, čija je masa $0.7 M_{\odot}$.

⁴ Ideje koje su pratile pomenute teorije predviđale su da postoje ostaci malih energija koji bi trebalo da budu pokretači eksplozija, a noviji teorijski radovi ukazuju i na mogućnost postojanja akustičnih oscilacija u proto-neutronskim zvezdama (*Burrows et al. 2006*). Otkriće supernove 1987a potvrdilo je ideju o kolapsirajućem jezgru na najspektakularniji mogući način.

Radioaktivni raspad jezgra nikla zagreva ostatke SNIA tokom nekoliko nedelja, a po isteku tog perioda dolazi do promene u krvi sjaja zahvaljujući pravilnom radioaktivnom lancu koji se razvija nakon raspada ^{56}Ni ($^{56}\text{Ni} \rightarrow ^{56}\text{Co} \rightarrow ^{56}\text{Fe}$).

Supernove sa kolapsom jezgra (eng. Core Collapse Supernovae/ CC SNe)

Supernove sa kolapsom jezgra predstavljaju najeksplozivnije manifestacije zvezdanih evolucija (energija koja se oslobođi dostiže vrednosti i do 10^{53} erg, od čega su energetski intenzivniji samo događaji kao što su pojava hipernova i kolapsara). Supernove sa kolapsom jezgra javljaju se samo u spiralnim granama spiralnih galaksija, a teorijske procene (koje se usvajaju i u ovom radu) kažu da one potiču od vrlo masivnih zvezda sa vodoničnim omotačem koje zbog svoje brze evolucije ne doživljavaju duboku evolutivnu starost. Njihov sjaj u maksimumu obično ne prelazi do -17^m , a pritom se i maksimum i oblik krive sjaja znatno razlikuju od jedne do druge supernove.

Ovaj proces predstavlja kombinaciju eksplozije i implozije. Pošto je istrošila gorivo u svom jezgru sve do gvožđa masivna zvezda postaje nestabilna i obrušava se prema svom centru, jer uprkos velikoj gustini (oko 10^8 g/cm^3), degenerisani gas ultrarelativističkih elektrona ne može da podnese težinu jezgra koje implodira praktično u deliću sekunde. Kolapsom zvezdanog jezgra temperatura u njemu raste do oko $10 \times 10^9 \text{ K}$. Na tako visokoj temperaturi velika količina gama-fotona izaziva fotodezintegraciju gvožđa uz naglo hlađenje okoline (endotermni proces). Jezgro se sastoji samo od elektrona, protona i neutrona i dalje se sažima. Pri takо velikim gustinama i pritiscima elektroni bivaju ubrzani do ultrarelativističkih brzina stvarajući neutrine putem reakcije neutronizacije $e + p \rightarrow n + \nu$. Neutrini napuštaju zvezdu, a proizvedeni neutroni se sabijaju na još manju zapreminu dajući degenerisano neutronsко jezgro.

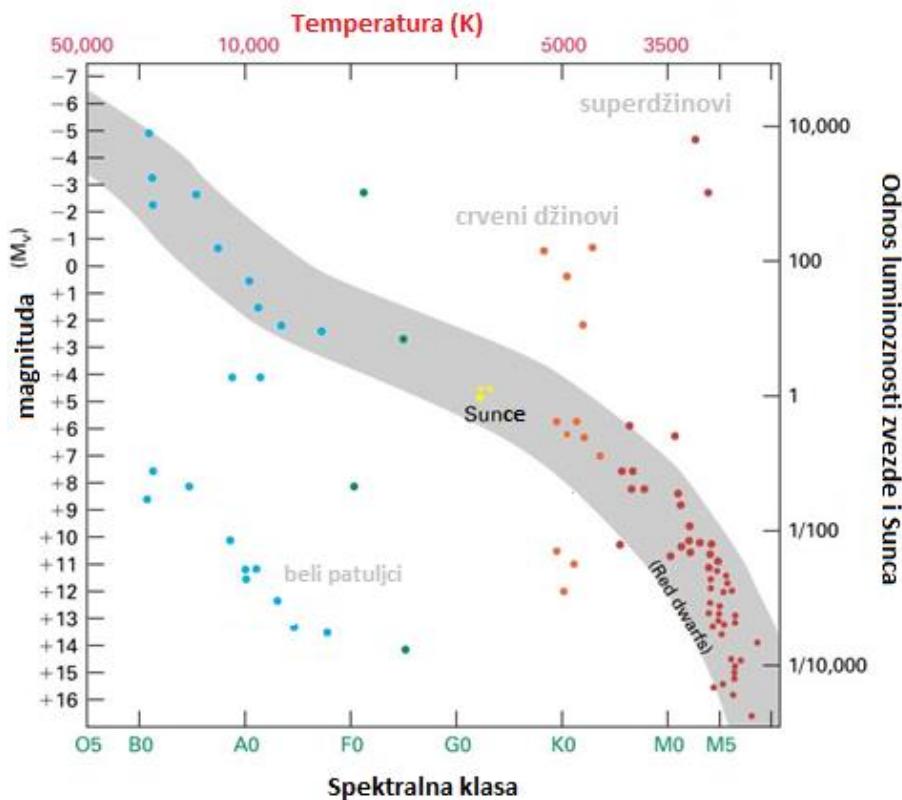
Usled velikog pritiska degenerisanog gasa jezgro počinje da vibrira usled širenja, pri tome stvarajući udarni talas koji se prostire ka spoljašnjosti. Ali, on na svom putu nailazi na spoljašnji sloj gvožđa koji se urušava brzinom od 70000 km/s .

Supernove sa kolapsom jezgra pokazuju veliki raspon različitih fizičkih karakteristika, uključujući hemijski sastav izbačenog omotača, kinetičku energiju, radijativnu energiju, kao i specifičnu strukturu radioaktivnih izotopa kreiranih u eksplozijama (^{56}Ni , ^{57}Ni , ^{44}Ti). Osobine ovih vrsta supernovih⁵ pokazuju, dakle, mnogo veću raznolikost u odnosu na termonuklearne tipove la

⁵ Nova klasa ultra-luminoznih tip II supernova ostvaruje energije u rangu i do 3×10^{53} erg, i povezuju se sa jakim gama-bljeskovima (Woosley & Bloom, 2006).

koje svoje poreklo imaju u dvojnim sistemima belih patuljaka (prema Woosley & Bloom 2000, klasifikaciji).

Diverzitet u osobinama daje nam veliki spektar zvezdanih vrsta koji se vidi u gornjem delu H-R dijagrama, iznad vrednosti mase od $10 M_{\odot}$ (Humphreys et al. 1994, Crowther 2007). Pogledati sliku 1.



Slika 1 H-R dijagram osnovnih populacija, na kojem se može videti odnos luminoznosti i mase za pojedine zvezdane vrste.

Masa, dvojnost sistema, metaličnost, vrednost rotacije, stopa gubitka mase (eng. mass-loss rate) kao i magnetno polje igraju najvažniju ulogu u formiranju sledećeg objekta koji poprima različite radijuse, profile gustine i okružujuću zvezdanu materiju. Prošla decenija bila je ispunjena mnogobrojnim detekcijama SN progenitora i eksplozija najrazličitijih supernova. Ovaj rad pokušava da obuhvati sve najmoderne reultate i klasifikacije identifikovanih masivnih zvezda koje eksplodiraju u supernovu. Za svaku blisku CC supernovu (smatra se lokalno okruženje od oko 11Mpc), astronomска arhiva je pažljivo proučavana tokom više važnih misija, od kojih su neke još uvek aktivne (LOSS, SNLS, VIMOS projekat ... pogledati dodatak 1). U najbitnije detalje svrstavaju se precizna pozicioniranja zvezde-progenitora pre dešavanja same

eksplozije. Bade i Cviki su u pomenutim istraživanjima 1934. godine izvršili ogroman napredak primenjujući tehniku upoređivanja modela zvezdane evolucije sa krivama sjaja posmatranih objekata. Tek su multifrekvencionala istraživanja pokazala svu raznolikost eksplozija i supernova ostataka. Sposobnost za kratkotrajne „blic-tracking“ metode (*eng. glimpsing*) zvezda pre njihove eksplozije učinile su najveći probaj u posmatranju ovih fenomena, a samim tim i mogućnosti da se precizno provere dosadašnji modeli evolucije zvezdanih sistema.

1.2 Generalizacija i trenutni status

Supernove su primarno raspodeljene po osobinama koje iskazuju u svojim sprektrima, najčešće u vremenu neposredno oko dostizanja maksimuma sjaja. Detaljni radovi koji se bave ovom problematikom su *Filippenko (1997)* i *Smartt (2009)* i u njima se mogu naći vrlo koncizni opisi karakterističnih pojava pri supernova eksplozijama. U ovom radu akcenat je na astrofizičkim posledicama koje mogu prouzrokovati razlike između predviđenih i merenih stopa eksplozija, tako da se nećemo detaljnije osvrtati na opise svih slučajeva.

Uopšteno, tipovi Ia su supernove bez ikakvog pristupa vodonikovih linija u spektru (bilo apsorpcionom, bilo emisionom), takođe u ogromnoj većini slučajeva nemaju ni He linije, dok istovremeno sadrže karakteristične Si liniju u apsorpcionom spektru. Tip Ib ima neznatno vidljiviju naznaku He linije, i zajedno sa Ic tipom pokazuje vrlo jasno prisustvo intermedijarnih masenih elemenata kao što su O, Mg i Ca. S obzirom da je ponekad vrlo teško načiniti jasnu razliku između tipova Ib i Ic, one se neretko u teorijskim radovima označavaju kao jedinstvena podklasa Ibc (Smartt 2009).

Supernove tipa II poseduju vrlo izražene H linije, i dalja potklasifikacija odnosi se na krive sjajnosti. Supernove tipa II-P (sadrži plato-fazu) i II-L (linearni pad nakon gornjeg pika sjajnosti). Vrste II-N pokazuju emisione linije vodonika sa višestrukim komponentama brzina i uvek vrlo jakim uzanim profilom linija.

1.3 Misije koje mere stopu eksplozija supernovih

Poslednje decenije organizovani su veliki astronomski projekti koji su za cilj imali da mapiraju položaje skorijih supernova i pomognu u određivanju njihovog broja (*supernova rate/SNR*). Na taj način imamo podatke o merenjima koja su izvršena za lokalni svemir (oko 140 Mpc), blisko lokalno galaktičko okruženje (oko 12 Mpc), i za daleki svemir (vangelastički sistemi, kosmos na većim crvenim pomacima od 1.4) – pogledati *tabelu 1*. Zanimljivo je napomenuti i da je veliku ulogu u otkrivanju značajnog broja supernovih u poslednjoj deceniji imao i tim astronom-a amatera, koji su, koristeći sofisticiranu opremu za svoja amaterska astronomска posmatranja detektovali na desetine eksplozija. Pa ipak, i dalje стоји otvoreno pitanje koliki je broj

neeksplodirajući supernova (predviđanja za postojanje ovakvih događaja potvrđena su rezultatima kompjuterskih simulacija, na pr. Fisher et al. 2009. Inače je njihovo postojanje posledica upravo pokušaja da se odgovori na problem koji se analizira u ovom radu – zbog čega je stopa predviđenog broja supernovih veća od broja detektovanih supernovih), kao i koliki procenat bliskih supernova je zaklonjen prašinom (otežana pretraga u optičkom delu spektra). Na taj način se ostavlja i otvorenim pitanje povezanosti izmerenih vrednosti eksplozija supernovih i različitih fizičkih uslova koji dovode do eksplozije (naročito je metaličnost sredine važan parametar – pogledati na pr. rad *Stoll, Prieto, Stanek 2012*).

Tabela 1. Relativna frekvencija pojave supernovih sa kolapsom jezgra na osnovu izveštaja pet različitih studija: **SECM08** (Smartt et al.), **LWVetal07** (Li et al. 2007), **VLF08** (Van der Bergh, Li & Filippenko 2005), **PSB08** (Prieto, Stanek & Beacom 2008) i **CET99** (Cappellaro 1999). Neodređenosti predstavljaju Poasonove greške. Prve dve studije ograničene su na rastojanja između 28 i 32 Mpc, dok su podaci u preostalim kolonama dati studijama u kojima se uzorkovanje vršilo za oblasti do 180 Mpc.

Vrsta	Uzorak				
	SECM08	LWVetal07	VLF05	PSB08	CET99
II-P	58.07±8.0%				
II-L	2.7±1.7%	67.6%±10%	62.9±4.7%		
II _n	3.8±2.0%	4.4±2.5%	9.2±1.8%		
II _b	5.4±2.7%	1.5±1.5%	3.2±1.0%		
I _b	9.8±3.3%			24.6±5.8%	22.3±5.8
I _c	19.6%±4.5%	26.5±6.2%	24.7±3.0%		
Veličina uzorka	92	68	277	78	67

1.4 Paradigma modela evolucije zvezda velikih masa

Modeli koji se koriste u ovom radu su iskorišćeni iz ranijih istraživanja koja tretiraju evoluciju masivnih zvezda u rangu od 8 sunčevih masa do oko 300 sunčevih masa, za stope formiranja računate bez uticaja rotacije (Heger 2003, Fryer 2002, Heger & Woosley 2002). Takođe, supernova ostatak određen je masom helijumovog jezgra u trenutku umiranja zvezde. Kako masa helijumovog jezgra raste, tako se povećava i njegova vezivna energija a samim tim i entropija. U takvom sledu događaja dešava se da povećana masa helijumovog jezgra u proseku dovodi i do uvećanja gvozdenog jezgra i slabijeg gradijenta gustine okolnog sloja. Kao posledica toga, zvezde opisane na pomenuti način teže eksplodiraju i čak i u uspešnim eksplozijama, pri kojima se stvara vrlo jak udarni talas, masa u kasnijoj fazi može da naglo pritisne ostatak (neutronsku zvezdu) dovodeći do „momentalnog“ stvaranja crne rupe. U radu Fryer et al. (2002) razmatra se da se masa helijumovog jezgra može uzeti da iznosi oko $8 M_{\odot}$ u slučajevima

kada od indirektnog „*fallback*“ procesa nastane crna rupa, dok u slučaju direktnog nastanka ta masa zvezde ima vrednost od oko 15 solarnih masa.

1.5 Gubitak mase

Razumevanje fizike gubitka mase koja se ispoljava kroz jake zvezdane vetrove čija brzina može dostići i do 6000 km/s, kod ovakvih eksplozija ima za zadatku povezivanje evolutivnog toka sa metaličnošću. Zvezde slabije metaličnosti imaju dosta manji gubitak mase i veće omotače od helijuma i vodonika prilikom svog odumiranja. Kada gustina dostigne 10^{10} g/cm^3 jezgra zahvataju elektrone, pri čemu se protoni transformišu u neutrone što dovodi do postepene neutronizacije jezgra. Urušavanje se zaustavlja nakon nekoliko milisekundi kad poluprečnik jezgra dostigne $\sim 30 \text{ km}$, a njegova gustina oko 10^{14} g/cm^3 što je uporedivo sa gustinom materije u atomskom jezgru. Usled velikog pritiska događaju se vibracije jezgra, i na taj način se generiše udarni talas koji se prostire ka spoljašnjosti. On na svom putu nailazi na spoljašnje slojeve gvožđa koji se urušavaju brzinom od skoro 70 000 km/s. Pokazuje se da udarni talas dolazi do zvezdanog omotača koji dobija energiju dovoljnu da se odbaci do okolnog svemirskog prostora, i to pod uslovom da gvozdeno jezgro u početku nije imalo preveliku masu (manju od oko 1.2 M_\odot) što je verovatno slučaj sa zvezdama čija je masa manja od 15 sunčevih masa. Računarske simulacije (*na pr. Takiwaki et al. 2012*) pokazuju da u najmasivnijim zvezdama sa gvozdenim jezgrom taj mehanizam dovodi do „prigušene“ eksplozije - jezgro i omotač se urušavaju i grade crnu rupu, jer čak ni pritisak degenerisanog gasa ne može da održi na okupu masu koja je veća od $\sim 2 \text{ M}_\odot$.

Šta se tiče same eksplozije masivnih zvezda, njih verovatno izaziva sledeći mehanizam – zarobljeni tokom nekoliko sekundi u kranje gustom jezgru, neutrini (kojih na tako visokim temperaturama ima u izobilju usled generisanja u jezgru zvezde kao posledica ogromne topote zvezdane plazme) na kraju prolaze kroz jezgro, baš kao i fotoni koji uspevaju da umaknu iz sunčevog jezgra. Oko 10^{58} neutrina odnosi tako gotovo svu gravitacionu energiju i prolazi kroz zonu u kojoj se udarni talas „zamorio“ od podizanja gvožđa koje pada ka centru. Dovoljno je samo da se 1% energije neutrina prenese kroz materijalnu sredinu, to će biti dovoljno da se stvari „osvežen“ udarni talas koji dospeva do dna omotača i dolazi do eksplozije. Kakav god bio taj mehanizam eksplozije, udarni talas pogađa dno zvezdanog omotača desetak sekundi nakon napuštanja jezgra i kasnije ga izdiže. Tokom nekoliko sekundi hemijski sastav se menja pod uticajem eksplozivne nukleosinteze, proizvodeći jezgra koja su manje stabilna od onih koje je zveuda ranije sintetisala. Među tim jezgrima treba posebno istaći prisustvo ^{56}Ni , radioaktivnog jezgra nastalog u sloju silicijuma na dnu zvezdanog omotača.

Udarni talas stiže do površine zvezde nekoliko sati (ili nekoliko dana) nakon urušavanja jezgra (u zavisnosti od veličine omotača koja zavisi od prethodnog gubitka mase). Površinski slojevi se zagrevaju do nekoliko hiljada stepeni i tek tada eksplozija postaje vidljiva za spoljni svet usled snažnog odbljeska X i UV –zraka. Neminovno smanjivanje luminioznosti uslovljeno je uplitanjem

energije radioaktivnih elemenata nastalih u eksploziji kao što je, na primer, ^{56}Co , nastao brzim raspadanjem nikla. Navedeni scenario važi i za supernova tipa Ib i Ic, sličan suštinski mehanizam je odgovoran i za supernove tipa II.

GLAVA II

Problem broja supernovih

2.1 Inicijalna funkcija mase

Naše razumevanje zvezdanih sistema i njihovih evolucija zavisi direktno od usvojene interpretacije pojma **inicijalne funkcije mase** (eng. *Initial mass function/IMF*). U astronomskoj literaturi termin „inicijalna funkcija mase“ koristi se ukoliko se žele iskazati tri vrste distribucije:

- Raspodela zvezdanih masa posmatranih u određenom uzorku.
- Normalizovana vrednost prethodno navedene raspodele, na primer učestanost distribucije nekih zvezdanih masa u posmatranom uzorku zvezda.
- Teoretska verovatnoća da se zvezda određene mase formira u određenom delu prostora.

Suštinski, ovaj rad (kao i većina modernih radova koji razmatraju problem zvezdane i galaktičke evolucije) koristi poslednju navedenu definiciju za relevantnu, odnosno ukazuje na raspodelu inicijalnih masa za izabranu zvezdanu populaciju. Na taj način, prepostavlja se pojам funkcije statističke raspodele (*partial distribution function/PDF*) što ukazuje da, ukoliko želimo da koristimo inicijalnu funkciju mase u kontekstu što preciznijih predviđanja, mi zapravo koristimo njen probabilistički okvir. Usvajajući takvu logiku, definicija inicijalne funkcije mase mogla bi da bude i *raspodela zvezdanih masa koje se stvore u toku jednog događaja nastanka zvezda u dатој запремини свемира*. Takođe, do skoro u literaturi nisu navođeni primeri koji potvrđuju na koji način IMF jasno varira u zavisnosti od različitih scenarija formiranja zvezda (pogledati na primer opsežne prikaze razumevanja inicijalne funkcije mase date u *Bastian et al. 2010, Cervino et al. 2013*), ali se takva mogućnost čini sve neophodnjom za buduće realizacije detaljnih galaktičkih evolucionih modela .

Fizika formiranja zvezda govori nam o tome koliko se gasa konvertuje u zvezde prilikom njihovog stvaranja. Izlazni podatak koji dobijamo o tom procesu jeste upravo distribucija zvezda određenih masa. Zajedno sa vremenskom zavisnošću stvaranja zvezda, inicijalna funkcija mase diktira evoluciju galaksija i zvezdanih jata. Ona je određena za čitav spektar zvezdanih masa, od braon patuljaka vrlo malih masa, pa sve do veoma masivnih zvezda. Kombinujući procene inicijalne funkcije mase za različite populacije u kojima se zvezde detektuju, može se vršiti procena univerzalnosti tih procesa.

Evolucija zvezdanog sistema je uslovljena relativnim početnim brojem sledećih struktura:

- braon patuljaka ($<0.072 M_{\odot}$) koji ne fuzionišu vodonik u helijum;

- zvezda malih masa ($0.5\text{-}1 M_{\odot}$)
- zvezda srednjih masa ($1\text{-}8 M_{\odot}$)
- zvezda velikih masa ($>8 M_{\odot}$)

Konstruisanje IMF-a za zvezde velikih masa nije jednostavno zbog toga što one, uglavnom, zrače u UV domenu koji se direktno sa Zemlje ne može posmatrati, a imaju i vrlo kratak životni vek na glavnom nizu. Najčešće se pribegava rešenju da se empirijski zaključci svedu na aproksimaciju oblika $IMF \sim Am^k$, dakle na stepeni zakon.

U ovom radu je značajan akcenat stavljen upravo na variranje inicijalnih funkcija mase i odgovora na to koliko zapravo one utiču na neodređenost između teorijski prepostavljene stope formiranja zvezda i brojnosti supernova određenih posmatračkim misijama. Osnovno tumačenje takve relacije bilo bi da inicijalna funkcija mase praktično preslikava oblast zvezda u rasponu masa od m do $m+dm$ u neku konačnu oblast zapremine (volumetrijska vrednost), i da je takva funkcija proporcionalna zakonu m^α . Koristeći **Kroupa formalizam o univerzalnosti IMF⁶**, korišćene su sledeće inicijalne funkcije mase sa osobinama datim u tabeli 2:

Tabela 2. Pregled različitih analitičkih oblika IMF-ova

Naziv funkcije	Analitički oblik		Skraćenica
Opšti oblik na osnovu Skalo '86 klasifikacije (Scalo, 1986)	$dN = \varphi(m)dm = \varphi_l(m)dlm$ $\Gamma = -x = 1 + \gamma = 1 - \alpha$ <i>na primer, za stepeni power-law oblik:</i> $\varphi_L(m) = (m \ln 10) \varphi(m) = Am^{-x} = Am^\Gamma$ $\varphi(m) = Am^{-\gamma}$		
Salpeter '55	$\varphi_L(lm) = Am^\Gamma$ $A = 0.03 pc^{-3} \log_{10}^{-1} M_\odot$	$\Gamma = -1.35$ ($\alpha = 2.35$)	Sal
Miller-Scalo '79	$\varphi_L(lm) = A \exp \left[-\frac{(lm - lm_0)^2}{2\sigma_l^2} \right]$ $A = 106 pc^{-3} \log_{10}^{-1} M_\odot, lm_0 = -1.02$	$\Gamma = -\frac{(lm - lm_0)}{\sigma_l^2} \log_{10} e$	MS '79

⁶ Prema ovom formalizmu, sve inicijalne funkcije mase mogu se prevesti u jedinstven stepeni oblik, a njihova razlika zavisiće samo od načina na koji one opisuju određene intervale masa. Jasno, ovakva aproksimacija je moguća ako se prepostavi da ne postoji značajno odstupanje inicijalnih funkcija mase u zavisnosti od početnih uslova evolucije, što je u poslednje vreme predmet mnogih provera.

Larson '98	$\varphi_l(lm) = Am^{-1.35} \exp\left[-\frac{m_0}{m}\right]$ $m = 0.3M_\odot$	$\Gamma = -1.35 + \frac{m_0}{m}$	La '98
Chabrier '03	$\varphi_l(lm) = Am^{-\delta} \exp\left[-\left(\frac{m_0}{m}\right)^\beta\right]$ $A = 3.0 \text{ pc}^{-3} M_\odot^{-1}$	$\Gamma(lm) = 1 - \delta + \beta \left(\frac{m_0}{m}\right)^\beta,$ $\beta = 0.25, \delta = 3.3, m_0 = 716.4M_\odot$	Ch '03
Baldry-Glazebrook '03	$\varphi_L(lm) = Am^\Gamma$	$\Gamma = -1.15 \pm 0.2$	BalG '03

Notacija:

$$lm \equiv \log_{10}(m/M_\odot) = \ln(m/M_\odot)/\ln 10;$$

dN – broj usamljenih (pojedinačnih/singl) zvezda u masenom intervalu $(m, m+dm)$, kao i u logaritamskom masenom intervalu $(lm, lm+dlm)$;

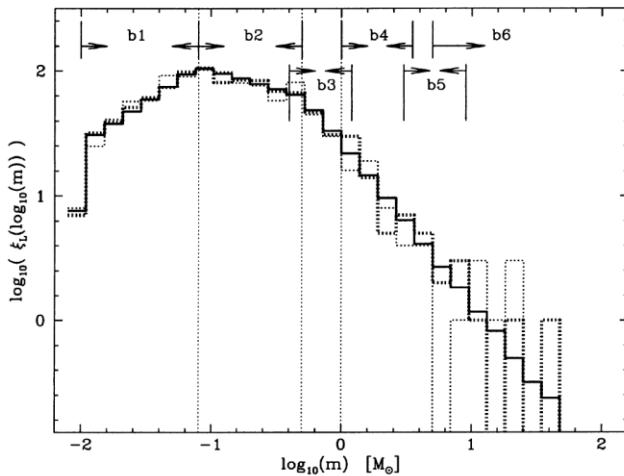
$\varphi(m)$ - inicijalna funkcija mase (u literaturi se često mogu naći različite oznake ove važne astrofizičke veličine, pa se tako pored $\varphi(m)$, mogu susresti i $\phi(m)$, $\psi(m)$ ili $\zeta(m)$).

Γ - stepeni koeficijent preko kog se predstavlja raspodela masa

Kroupa stepeni zakon – ukazuje na stepeni koeficijent koji se menja u odnosu na razmatrane masene intervale, a cela formulacija ovog zakona zasnovana je na univerzalnosti IMF u odnosu na modele evolucije. To je na neki način i izazov savremenoj astrofizici, koja se trudi da pokaže imaju li ovakve aproksimacije realno utemeljenje u modelima evolucije, ili je IMF ipak značajnije varijabilna u odnosu na zaključke teorijskih radova sa početka XXI veka.

$$\varphi(m) = k \begin{cases} \left(\frac{m}{m_1}\right)^{-\alpha_0} \\ \left(\frac{m}{m_1}\right)^{-\alpha_1} \\ \left[\prod_{i=2}^{n>2} \left(\frac{m_i}{m_i-1} \right)^{-\alpha_{i-1}} \right] \left(\frac{m}{m_n}\right)^{-\alpha_n} \end{cases}, m < m \leq m_1 \rightarrow \begin{cases} \alpha = 0.3 \pm 0.7, & 0.01 \leq m/M_\odot < 0.08 \\ \alpha = 1.3 \pm 0.5, & 0.08 \leq m/M_\odot < 0.50 \\ \alpha = 2.3 \pm 0.3, & 0.5 \leq m/M_\odot < 1.0 \\ \alpha = 2.5 \pm 0.5, & 1 \leq m/M_\odot \end{cases} \quad (2.1)$$

Za pojedinačne zvezde koeficijent k , koji figuriše u gornjoj relaciji ima vrednost $k=0.87 \pm 0.045$ zvezda/ $\text{pc}^3 M_\odot$. Tako se dolazi do Kroupinog stepenog oblika IMF koji je analitički predstavljen preko koeficijenta α datim u gornjoj zgradji, a grafički prikazan na slici 5:



Slika 2. Predlog univerzalne funkcije mase koja bi opisivala učešće različitih raspodela nezavisno od varijabilnosti Džinsove mase u galaksijama. Nove analize slažu se sa teorijama koje ukazuju da se ova raspodela ipak menja sa promenljivim parametrima u različitim galaksijama. (Kroupa 2002)

Tabela 3. Vrednosti stepenih koeficijenata u zavisnosti od izabrane IMF i od masenih granica

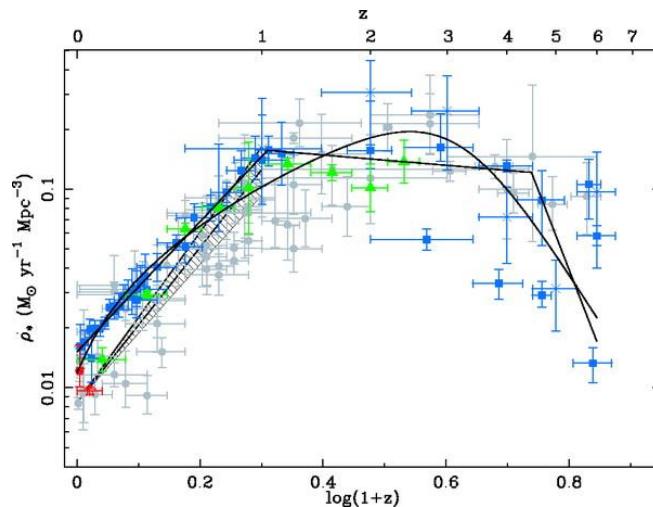
IMF	M1	M2	X
Salpeter	0.1	125	1.35
Scalo	0.1	0.18	-2.6
	0.18	0.42	0.01
	0.42	0.62	1.75
	0.62	1.18	1.08
	1.18	3.5	2.5
	3.5	125	1.63
Kroupa	0.01	0.08	0.03
	0.08	0.5	0.3
	0.5	1.0	1.3
	1.0	150	1.3
Baldry, Glazebrook	0.5	1.0	1.2
	1.0	150	1.35
Miller & Scalo	0.1	1	0.25
	1	2	1
	2	10	1.3
	10	125	2.3

Dakle, inicijalna funkcija mase pruža nam veliki raspon vrednosti koje možemo uključiti u dalju analizu stope eksplozija supernovih - počevši od jednostepenog Salpeterovog zakona, pa do novijih IMF funkcija (BalG '03, Ch '03, Larson '98, Horiuchi '11) koje pokušavaju fino da podese neodređenosti stvorene pre svega nemogućnošću da se odgovori na pitanje koliko tačno one zavise od inicijalnih uslova pod kojima otpočinju procesi zvezdanog nastanka. Salpeterova funkcija je potvrđena za studije koje su proučavale stvaranja zvezda u spiralnim galaksijama (Kennicutt 1983), kao i u mladim zvzedanim jatima u Magelanovim oblacima. Bolji fit za polja zvezda u sunčevoj okolini data je Scalo '86 inicijalnom funkcijom mase, dok su najbolji fitovi za razlikovanje blažeg i oštijeg nagiba krive (u zavisnosti od masenog intervala) koja opisuje stopu zvezdanog formiranja date kroz Chabrier '03 i Baldry-Glazebrook inicijalne funkcije mase (Smartt et al. 2009).

2.2 Stopa formiranja zvezda i normalizacija funkcije njihove istorije

Stopa formiranja zvezda (*eng. Star Formation Rate/SFR*) predstavlja ukupnu masu zvezda koja je stvorena u nekom vremenskom intervalu. Da bismo napravili što tačniju sliku ovih događaja tokom različitih epoha, neophodna su opsežna merenja novim generacijama teleskopa koji će moći da mapiraju procese rađanja zvezda i na crvenim pomacima većim od 6 - tačnije, da nam omoguće uvid u istoriju stope nastanka zvezda (*eng. Star Formation History/SFH*) što predstavlja krajnju granicu za normalizaciju Hopkins, Beacom 2006, koja se koristi u ovom radu, i koja se u današnjoj teoriji smatra najpreciznijom. Kombinacijom lokalnih i kosmoloških posmatračkih misija, porašće i verovatnoća da se sa dovoljnom tačnošću može pedvideti stepen stvaranja zvezdanih populacija u nekom određenom delu našeg svemira.

Analitička normalizacija kosmičke SFR naročito je korisna kada se želi uprostiti jedan relativno složen proces, a pogotovo posmatrački težak, uzimajući u obzir merne nesigurnosti i selekcione efekte. Na taj način, umesto da se pretražuju populacije na različitim crvenim pomacima putem posmatračkih misija, dovoljno je posmatrati etapu smrti zvezda, koristeći činjenicu da one najmasivnije imaju i najkraće vreme života. Takvim rezonovanjem stvara se link koji direktno povezuje *predviđanja* (u ovom slučaju predviđanje koliki broj zvezda iz odabranog masenog intervala treba da svoj životni vek završi kao supernova) i *merenja* (koja nam otkrivaju broj detektovanih događaja/eksplozija, pri čemu taj broj ne mora nužno da bude u skladu sa predviđenom vrednošću, što nas i dovodi do problema koji se analizira u ovom radu).



Slika 3. Trenutni status istorije stvaranja zvezda (eng. *star-formation history*) kao normalizacija na merenja određena u različitim opsezima talasnih dužina na različitim crvenim pomacima (Hopkins, Beacom 2006). Kriva je skalirana sa usvojenom Salpeter A inicijalnom funkcijom mase,

Pokušaji da se na što precizniji način utvrdi stopa formiranja zveuda na različitim crvenim pomacima našli su se u mnogobrojnim skorijim posmatačkim misijama (pregled trenutno najvećih teleskopskih pretraga u cilju mapiranja regiona rađanja zvezda u raznim kosmoloskim epohama dat je u Dodatku 2). Ovde će samo biti spomenuto da su neki od najčešćih „pratilaca“ mesta zvezdanih nastanaka UV kontinuum, radio kontinuum, H_α i H_β emisije, takođe i ostale emisione linije poput L_α , OII i drugih. Izgradnja moćnih posmatačkih svemirskih opservatorija koje snimaju infracrveni deo elektromagnetskog spektra zračenja (*Herschel* i *Spitzer*) još više će upotpuniti analize, pre svega jer je već razrađen metod po kome se simultano mogu mapirati preko 400 galaksija. Ono što je zajedničko svim ovim „tragačima“ formiranja zvezdanih populacija jeste da prate promenu luminoznosti u odnosu na izabrani zapreminske interval, što je direktno proporcionalno stopi formiranja zvezda. Takvim pristupom dobijaju se posmatačke vrednosti. Na osnovu analize preko 150 000 spektara, Baldry et al. (2003), a kasnije i Hopkins i Beacom (2006) konstruisali su jedinstveni analitički oblik koji bi mogao dobro da aproksimira ove procese u zavisnosti od mesta dešavanja.

Najuopštenije, možemo reći da je istorija stepena formiranja zvezda predstavljena kroz analitički oblik $SFR \propto (1+z)^{\alpha(\beta)}$, gde je prvi koeficijent dat za crvene pomake od 0 do 1, dok je za oblasti od crvenog pomaka 1 do recimo 6, taj koeficijent drugačiji. Vremenska skala za merenja kosmičke stope formiranja zvezda takođe je važna, i ona je data kroz odabране vrednosti kosmoloskih parametara $(h, \Omega_m, \Omega_\Lambda)$. Zbog različitih uticaja koje na modeliranje galaktičkih spektara mogu imati faktori poput odnosa starost-metaličnost, u teorijskim analizama uglavnom se pribegava korišćenju inicijalne funkcije mase koja je univerzalna (što

znači nepromenljiva sa sredinom i vremenom). Na osnovu analiziranja fitova koji su generisani kako bi odredili što bolja poklapanja sa empirijskim podacima, korišćenjem koda PEGASE.2, Baldry i Glazebrook su utvrdili da je najbolje poklapanje dato izlomljenom stepenom funkcijom, čiji oblik se može videti u *tabeli 2*.

2.3 Šta je to „problem nedostatka supernovih“?

Na osnovu opisa evolucija zvezda srednjih i velikih masa, kao i osnovnih osobina supernova navedenih u glavi I, možemo zaključiti da je astrofizički značaj eksplozija supernovih veliki i raznolik. On se pre svega ogleda u obogaćivanju metalima sredine kroz koju eksplozije dopiru. Takvi događaji su ključni za hemijsku evoluciju galaksija (neke osnovne ideje koje detaljnije razrađuju ideje regulisanja galaktičke hemijske evolucije date su u poslednjem poglavljju), a takođe su ključni i za razumevanje međugalaktičke sredine na osnovu izlivanja materije koje je podstaknuto upravo snagom eksplozija supernovih. Značajan je i doprinos u stvaranju prašine (na osnovu detaljne studije *Kozasa et al. 2009* smatraju se jednim od najvažnijih generatora prašine u svemiru), a povezane su i sa procesom formiranja galaksija, kao jedna vrsta povratne sprege preko koje se mogu sagledavati širi konteksti tog procesa (videti na primer *Smartt et al. 2009*). Ukoliko želimo da proverimo na koji način se svi pomenuti procesi menjaju tokom kosmološkog vremena, bitno je da saznamo kako se broj eksplodirajućih supernova (samim tim i SNR) menja sa crvenim pomakom. Za povezivanje sa stopom formiranja zvezda, naročito su važni oni progenitori koji dovode do stvaranja gravitacionih supernova sa kolapsom jezgra. Praćenjem evolucije kosmičke stope supernovih dobijamo dodatne podatke o dva važna procesa: **formiranju zvezda** (o čemu je već ponešto rečeno) i **zastupljenosti metala**. Kod supernovih tipa Ia određivanje stope eksplozije pruža nam mogućnost da direktno merimo vremensko kašnjenje između stvaranja zvezde progenitora i njene eksplozije kao supernove, što može da baci novo svetlo na do sada još uvek nepotpun scenario po kojem se degenerativni beli patuljci uzimaju kao progenitori ovih vrsta supernovih (na pr. *Gal-Yam 2004*). Sa druge strane, supernove sa kolapsom jezgra se teže detektuju i prate na krivi rasta zbog činjenice da im je magnituda za faktor 2 slabija nego kod Ia SNe. Svega je nekoliko takvih supernova u literaturi označeno kao uporedivo sa tipom Ia po svojim astrometrijskim osobinama.

Da bi se lakše teorijski odredila vrednost broja predviđenih supernovih, Hopkins i Beacom su u svom radu iz 2006. godine načinili normalizaciju izvedenu iz kosmičke stope formiranja zvezda. U toj normalizaciji je (donekle) izvršena korekcija na prašinu. Podaci su u saglasnosti sa stepenim zakonom (*Yuksel et al. 2008*) koji je dat u obliku

$$\dot{\rho}_*(z) \propto (1+z)^{3.4} \quad (2.2)$$

Ovde je sa $\dot{\rho}_*(z)$ označena gustina formiranja zvezda (*Star Formation Rate Density/SFRD*) tokom kosmičke istorije, i to je praktično jedan od najvažnijih parametra koji nam otkriva podatke kako su sadašnje galaksije formirane i na koji način su evoluirale (pogledati *Kobayashi et al. 2013*). Jedna zanimljiva nekonistentnost primećena je u skrojne vreme kod merenja ove veličine, a to je da SFRD ima vrednosti koje su za magnitudu veće kod kosmološkog u odnosu na lokalni crveni pomak⁷. Neodređenosti koje se pojavljuju prilikom utvrđivanja SFRD posledice su sledećih faktora (*Janka et al. 2007*):

- zaklonjenosti prašinom i eventualnim korekcijama na ovaj efekat koji treba odrediti na UV kontinuum
- efekat „zagadženja“ zračenja starijih zvezdanih populacija
- uspostavljanje što tačnije vrednosti SFR preko luminoznosti u IC delu, i odabir što boljeg faktora konverzije (*Kobayashi et al. 2013*).

Sve te neodređenosti dovode do nepoklapanja sa rezultatima direktnih merenja i vrednosti koje su dobijene iz SFR normalizacije (*Hopkins 2006*) - poput stepena stvaranja supernovih ili pak vangalaktičkog pozadinskog svetla (*Extragalactic Background Light/EBL*).

Koeficijenti u jednačini su određeni fitom koji je dat u radu *Hopkins, Beacom (2006)*, a primenljivi su za *Salpeter A* inicijalnu funkciju mase, koja je modifikacija klasične Salpeter funkcije sa određenim ispravkama za male mase koje su preuzete iz rada *Baldry, Glazebrook (2003)*.

Generalno, funkcija kojom se u novijim radovima određuje vrednost supernovih data je kao

$$R_{cc}(z) = k \times \rho_*(z) \quad (2.3)$$

gde je drugi član predstavljen pomenutom normalizacijom *Hopkins, Beacom*, dok je prvi član koeficijent relacije koji daje vrednost zavisno od izabrane inicijalne funkcije mase. R_{cc} je broj ostvarenih supernovih (tj. SNR).

- Vrednost koja se dobija korišćenjem te normalizacije ostavlja nam mogućnost da izračunamo koeficijent eksplodirajućih supernova

⁷ Ovde se podrazumeva da je kosmološki crveni pomak onaj gde je $z \approx 1$.

$$k = \frac{\int_{M_l}^{M_u} \varphi(M) dM}{\int_{0.1M_\odot}^{125M_\odot} M \varphi(M) dM} \quad (2.4)$$

- Na ovaj način moguće je povezati stopu formiranja zvezda direktno sa stopom eksplozija supernovih (u nivou detekcije), kao i učestvovanje povratnog udela (**eng. return fraction**) lakih elemenata u intergalaktički/interstelarni medijum preko udarnih talasa.

Dakle, možemo sumirati ove relacije na sledeći način:

Broj supernovih koji je teorijski predviđen (*eng. Supernova Rate/SNR*) = funkcija koja zavisi od crvenog pomaka, inicijalne funkcije mase i masenih intervala koji se odabiraju kao donje i gornje granice integrala (na osnovu postupka koji je opisan u prvom poglavljju).

Stopa stvaranja zvezda = funkcija koja je data pomenutom normalizacijom, i zavisi samo od crvenog pomaka na kojem se proces formiranja zvezdanih populacija dešava.

Lokalne vrednosti stope eksplozija supernovih (za rastojanja između 11 Mpc i 200 Mpc) obrađivane su u sledećim bitnijim radovima: *Cappellaro et al. (2001)*, *Smartt et al. (2009)*, *Li et al. (2011)*, *Botticella et al. (2012)*, *Mattila et al. (2012)*, *Dahlen et al. (2012)*

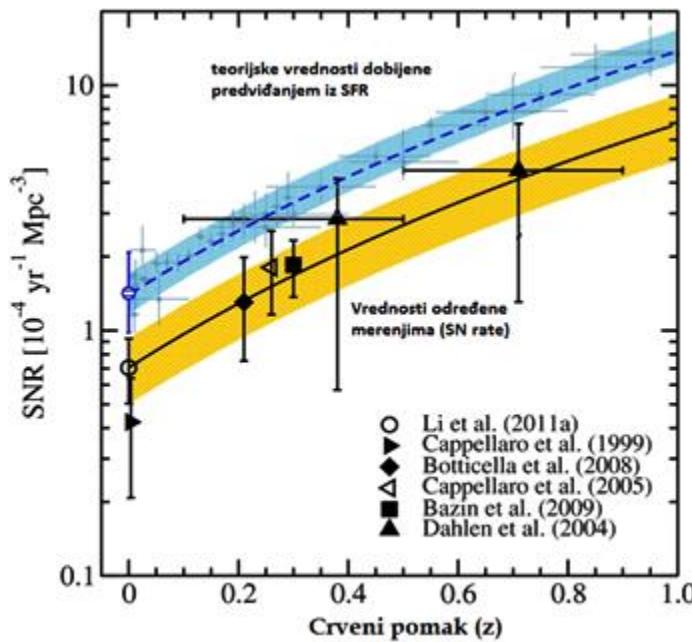
Određivanje stope eksplozija supernovih na kosmološkim rastojanjima obređeno je kroz radove: *Botticella et al. (2008)*, *Graur et al. (2011)*, *Melinder et al. (2011)*, *Dahlen et al. (2004)*.

U ovom radu, izvršena je i dodatna pretraga nekih kataloga misija koje su još uvek u toku (VIMOS, LOSS), kako bi se dobio što veći uzorak izračunatih vrednosti.

Većina ovih vrednosti su međusobno konzistentne, i povećavaju se sa lokalnim crvenim pomakom od 0 do 1. Međutim, ono što čini predmet primarnog istraživanja u ovom master radu, kao i temu diskusija u aktuelnim teorijskim razmatranjima eksplozija supernova sa kolapsom jezgra, jesu razlike u merenim lokalnim vrednostima. Rad *Horiuchi et al. (2011)* ističe da je **izmerena stopa supernova eksplozija za oko faktor 2 manja od vrednosti koja je predviđena teorijskom stopom formiranja zvezda**.

Tabela 4 Brojnost supernova eksplozija određivana u poslednjih 15 godina. Podaci su razvrstani prema rastućem crvenom pomaku radi lakšeg poređenja. Primetne su značajne razlike u količini uzoraka koji je razmatran.

Crveni pomak	SNR vrednost $10^{-4} h_{73} \text{yr}^{-1} \text{Mpc}^{-3}$	N_{CCSNe}	Referenca
0	0.42+/- 0.20	67	Cappellaro (1999)
0	1.4+/- 0.01	37	Horiuchi, Beacom (2011)
0.003	1.5+/- 0.4	17	Mattila (2012)
0.0067	0.9	n	Smartt (2009)
0.01	0.58+/- 0.19	67	Cappellaro (1999)
0.014	0.62+/- 0.067	n	Li et al. (2011)
0.21	1.31+/- 0.42	46	Botticella et al. (2008)
0.26	1.81+/- 0.86	19	Cappellaro et al. (2006)
0.3	1.42+/- 0.34	117	Bazin et al. (2009)
0.39	3.29 +/- 2.72; -0.97	16	Melinder (2012)
0.39	2.24+/- 2.11	9	Dahlen (2004)+Dahlen (2012)
0.5	2.65+/- 0.85	7	SDSS
0.57	2.81+/- 1.87	5	VIMOS project
0.73	6.90+/- 3.12	16	Melinder (2012)
0.73	7.39+/- 1.12	25	Dahlen (2004)+Dahlen (2012)
1.1	9.57+/- 3.20	9	Dahlen (2004)+Dahlen (2012)



Slika 4. Svi tipovi poznatih supernova ukjučujući i Ibc I tip II u funkciji od crvenog pomaka. Predviđena vrednost SNR je fitovana na osnovu normalizovane SFR, pri čemu je fit dat u obliku stepenog zakona $(1+z)^{3.4}$. Primetno je da postoji razlika između očekivane i merene vrednosti. Horiuchi et al. su u svom radu pokazali da, na osnovu njihove obrade, taj faktor razlike iznosi 2, što ukazuje na manjak izmerenih supernova eksplozija u odnosu na očekivan (*PROBLEM NEDOSTAJUĆIH SUPERNOVA*).

To bi moglo da ukazuje na bar dva efekta:

1. Da postoji određena sistematska neodređenost pri ovim merenjima, tj. da se unesu doprinosi korekcija na one supernove koje su nedostupne optičkim pregledima, kao i teorijsko determinisanje tačnog uticaja zaklonjenosti prašinom (tek se u poslednjim radovima pominju ove mogućnosti, pogledati *Matilla et al. 2012* ili *Dahlen et al. 2012*)
2. Za efekat zaklonjenosti prašinom očekivan je porast sa crvenim pomakom na osnovu poređenja mernih efekata u optičkom i UV delu za koji je to smanjenje još izraženije. Takođe, za merenje stope formiranja zvezda empirijskom metodom, otežavajuća okolnost je i prisustvo kompletno zaklonjenih (optičkim pretragama) lumenoznih infracrvenih galaksija (*eng. LIRG – Luminous Infrared Galaxies*) kao i ultralumenoznih infracrvenih galaksija (*eng. ULIRG – Ultra-luminous Infrared Galaxies*). Kako se udeo stvaranja zvezda koji se dešava u ovim tipovima galaksija značajno povećava sa crvenim pomakom (na pr. *Mannucci et al. 2007*, *Mattila 2004*) i dominira na rastojanjima između $z=1$ do $z=2$, potpuno je očekivano da broj nastalih supernova sa kolapsom jezgra u takvim okruženjima raste sa crvenim pomakom. Zbog toga se mora izvršiti detaljna pretraga njihove brojnosti u cilju dobijanja kompletne slike koja bi nam otkrila pravu vrednost stope formiranja CC supernovih.

2.4 Udeo slabih (faint) supernova $M > -15$

Slabe supernove sa magnitudom $M > -15$ mogle bi biti suviše slabe za detekciju čak i lokalnih optičkih pretraživanja kao što je *Lick Observatory Supernova Search (LOSS, Li et al. 2011)* koje obuhvata rastojanja do 200 Mpc. One moraju biti uzete u razmatranja zbog preciznosti utvrđivanja faktora razlike koji je istaknut u pomenutom radu Horiuchi et al. U radu *Richardson et al. (2004)* naglašeno je da procenat u kojem ove supernove učestvuju u ukupnom broju SNR može biti i oko 20%.

2.5 Postupak rada

Za korekcije koje sam izabarao da unesem pri određivanju vrednosti SNR, uzet je uzorak od 40 supernova koje odgovaraju po svojim karakteristikama supernovama sa kolapsom jezgra, a na osnovu vrlo preglednih kataloga datih u *Ströger et al. (2004)* i *Dahlen et al. (2004)*.

U ovom radu su različiti doprinosi koji mogu da dopune preciznost vrednosti broja supernovih, svrstani u dve grupe: teorijske doprinose i posmatračke efekte.

Posmatrački efekti su vezani za preciznost određivanja stope formiranja zvezda na osnovu kalibracionih faktora (pogledati dodatak 2) koji su uslovljeni velikim brojem kompleksnih fizičkih procesa, a naročito veza između evolucije zvezda velikih masa sa osobinama kao što su inicijalna funkcija mase, rotacija, masa, metaličnost ili pak interakcije u binarnim sistemima.

Sa druge strane, **teorijski efekti** koje sam smatrao značajnim su:

1. Efekat biranja donje i gornje granice mase
2. Efekat zvezdane rotacije
3. Efekat uračunavanja nedostajućeg masenog udela

2.5.1 Metodologija biranja masenih granica za različite IMF-ove

Na osnovu bazičnog opisa mehanizama (glava I) koji dovode do stvaranja supernova sa gravitacionim kolapsom, može se izvesti zaključak o značaju važnosti razumevanja njihovih progenitora i populacionoj statistici, kao jednim od ključnih faktora za dalje ispitivanje zvezdane i galaktičke evolucije. Kako je već istaknuto u dva znamenita rada koji se ovde pominju kao referentni (*Smartt et al. 2009, Heger et al. 2003*) postoji donja granica mase za pojedinačnu zvezdu date metaličnosti pri kojoj ta zvezda svoj životni ciklus neće okončati u eksploziji supernove. Ispod te granice, zvezda odbacuje svoj omotač kao AGB (asimptotski džin/*eng. Asymptotic Giant-Branch*) zvezda, koja kasnije formira planetarnu maglinu i postaje beli patuljak (*Eldridge 2004*). Iznad te granične mase, zvezda može da napravi gvozdeno jezgro u procesu nuklearne fuzije sve dok se ne dostigne gornja kritična masa. U takvim slučajevima se događa kolaps jezgra (*Heger et al. 2003*). Stvarna vrednost tog donjeg masenog limita zavisi od mnogo faktora, poput dinamike gubitka mase, procesa mešanja, graničnih zona konvekcije, kao i rotacije. U naznačenim radovima *Smartt et al. (2009)* i *Heger et al. (2003)* vrednosti su dobijene kao nezavisne od metaličnosti, i opseg donjih masenih granica je između $8M_{\odot}$ i $10M_{\odot}$. Način određivanja ovih brojeva iz posmatračkih podataka još uvek nije dovoljno precisan, tako da se i u radu *Smartt et al. (2009)* kombinuju baze načinjene detekcijom supernovih i Sal IMF, što kao rezultat daje maseni opseg $7M_{\odot}$ do $9M_{\odot}$.

Prema predloženom postupku u radu *Paxton et al. (2011)*, kao i u skorijoj detaljnoj studiji (*Ibeling et al. 2013*) ovde je iskorišćen *open-source* kod za numeričku astrofiziku MESA (*Modules For Experiments in Stellar Astrophysics*) koji je dostupan na web adresi <http://mesa.sourceforge.net>. On u sebi uključuje 1D-evolucijski zvezdani kod i omogućava da se lako provere rezultati modela sa posmatračkim podacima.

Za ovaj rad usvojeni su podaci ne-rotacionog zvezdanog modela⁸, za relativni udeo mase metala korišćeni su podaci iz *Gravese et al. (1998)*, dok je zastupljenost nukleosintetičkih elemenata Li, Be i B preuzet iz *Anders et al. (1989)*. Mreža dobijenih podataka odnosi se na 24 vrednosti metaličnosti (Z) između 0 i 0.04, i inicijalnim masama između $8.2 M_{\odot}$ i $10M_{\odot}$. S obzirom na

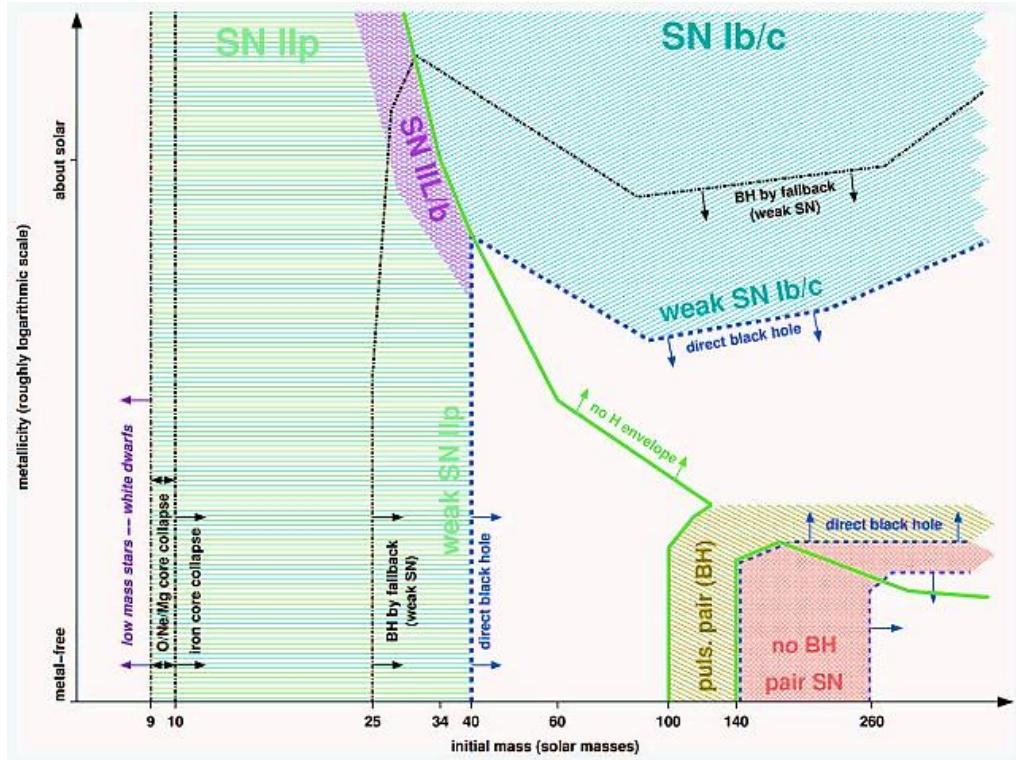
⁸ Moj plan je da u narednom periodu odradim simulaciju i za dodatni rotacioni faktor koji bi bio usvojen prema Horiochi et al. 2013, što bi bila jedina razlika u inicijalnim uslovima u odnosu na izvorni *Ibeling & Heger (2013)* čije zaključke sam proverio i usvojio u ovom master radu, a takođe vrlo će biti važno analizirati šta se događa sa gornjim masenim limitom, s obzirom da on poseduje veliku neodređenost, što je i bio jedan od motiva za varijaciju različitih gornjih granica pri odabranim inicijalnim funkcijama mase.

masene gubitke koji mogu imati vrlo istaknut ideo u što tačnijem određivanju traženih vrednosti, aproksimacija masenih promena sa odabranom metaličnošću ($\dot{M}(Z_0)$) data je izrazom $\dot{M}(Z_0) = \dot{M}(Z_\odot) \sqrt{Z_0 / Z_\odot}$ (Kudritzki 2000), gde je vrednost $Z_\odot = 0.019$. Rezultati simulacije dati su u tabeli:

Tabela 5. Rezultati modelovanja programom MESA; u neparnim kolonama data je metaličnost, dok su u parnim kolonama dobijene vrednosti mase u odnosu na sunčevu. Primetno je da se rezultati modela dobro slažu sa dosadašnjim predviđanjima o opsegu donjih masenih intervala (poređenje sa rezultatima datim u radovima Smartt et al. (2009) i Heger et al. (2003)).

Z	M (M_s)	Z	M (M_s)	Z	M (M_s)
0	9.2	1×10^{-7}	8.8	1×10^{-3}	8.45
1×10^{-10}	9.25	1×10^{-6}	8.7	2.5×10^{-3}	8.65
1×10^{-11}	9.25	4×10^{-6}	8.56	5×10^{-3}	8.95
3×10^{-10}	9.35	7×10^{-6}	8.55	7.5×10^{-3}	9.05
5×10^{-10}	9.5	1×10^{-5}	8.47	1.5×10^{-2}	9.35
1×10^{-9}	9.5	2×10^{-5}	8.43	1.9×10^{-2}	9.5
3×10^{-9}	9.3	5×10^{-5}	8.47	3×10^{-2}	9.6
1×10^{-8}	9.05	1×10^{-4}	8.35	4×10^{-2}	9.85

Gornji maseni interval takođe zahteva ozbiljnu diskusiju. On je još više neodređen usled različitih efekata koji su najbolje grafički prikazani u radu Heger et al. (2003), a suma svih doprinosa predstavljena je i objašnjena na slici 5.



Slika 5 Tipovi supernovih (nerotirajući model jediničnih zvezda) kao funkcija početne mase i metaličnosti. Zeleni regioni označavaju oblasti gde zvezde zdržavaju svoje vodonične omotače, i predstavljaju granične oblasti sa onima gde tih omotača nema (gornji desni ugao i površina između 100 i 140 Ms). Isprekidanim plavim linijama je označena oblast direktnog stvaranja crnih rupa, koja je prekinuta površinom koja simbolizuje supernove sa nestabilnim parovima (*pair-instability supernovae*), što ujedno čini i deo najvećih masa na kojima se očekuju nastanci supernovih (oko 260 Ms). Na krajevima koji karakterišu velike mase, posmatračka tačnost može biti umanjena zbog izlivanja veće količine ^{56}Ni . Te slabije supernove događaju se uglavnom u oblastima sa velikom metaličnošću. U režimu koji pokriva direktno stvaranje crnih rupa, ne očekuju se "klasične" supernove (sa podstičućim udarnim talasom), a jedini izuzetak su pomenute pulsirajuće supernove sa nestabilnim parovima. One se očekuju sa najekstremnije populacije zvezda (tzv. Pop III) i potpuno uništavaju vodonik. Iznad tih masa (pretpostavlja se većim od 260 Ms, zvezda direktno kolapsira u crnu rupu). (Heger et al. 2003)

Kombinujući efekte navedene u Heger et al. (2003), dosadašnje empirijske zakonitosti, kao i činjenice da je veoma malo detektovanih (statistički zanemarljiv broj) supernova u masenom opsegu između 25 i 40 solarnih masa, u ovom radu su za donji i gornji maseni pik uzeti brojevi iz sledećih intervala:

$$\begin{aligned} m_l &\in [7.8; 9.0] M_{\odot} \\ m_u &\in [16 \pm 1.5; 25] M_{\odot} \cup [50, 125] M_{\odot} \end{aligned}$$

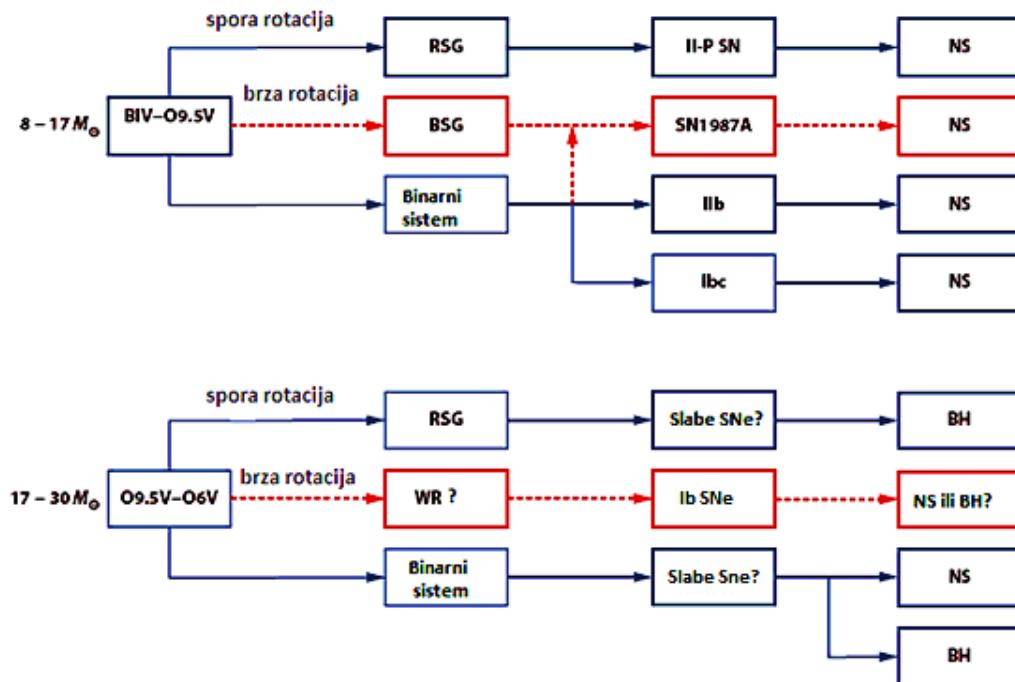
Podaci o brojnosti masenih progenitora za određene vrste supernova mogu se videti u Horiuchi et al. (2011), gde je specijalno naznačen interval za gornje masene granice. Na primer, za zvezde čija je metaličnost ispod metaličnosti Sunca, maksimalna granica za proizvodnju supernove je $40M_{\odot}$, dok se situacija znatno menja ukoliko je metaličnost veća, što za sobom povlači i osobinu

značajnog gubitka mase pre samog kolapsa, kao i formiranje Wolf-Rajeovih zvezda⁹, čime se maksimalna vrednost gornje granice mase može uvećati i do $100 M_{\odot}$.

Drugi problem nastaje zbog činjenice da još nisu priloženi direktni dokazi za identifikovanje progenitora supernovih tipa Ibc u masenom intervalu $(16.5, 25) M_{\odot}$, što je istaknuto i u radu Smartt et al. (2009). Taj problem označen je kao „**problem crvenih superdžinova**“ (red supergiant problem).

2.5.2 Osobine supernova ostatka

Na slici ispod mogu da se vide očekivani tipovi ostataka kao funkcija mase i inicijalne metaličnosti za navedene pretpostavke (Heger et al. 2003). U njihovoј studiji uzeta je pretpostavka da zvezde ispod $9 M_{\odot}$ nisu dovoljno masivne da dovedu do kolapsa. Ta pretpostavka je donekle upotpunjena preciznijim modelima koji su kasnije usledili (neodređenost granice varira u domenu od 7.5 do $9 M_{\odot}$ u Smartt et al. 2009), ali je suštinski scenario ostao nepromenjen.



⁹ Wolf-Rajeove zvezde su zvezde koje se odlikuju velikim gubitkom mase, reda veličine $4 \times 10^{-5} M_{\odot}$ godišnje, a potpuno su originalne po svom hemijskom sastavu, jer su obogaćene helijumom i azotom, a sa nimalo vodonika. Tako neobičan hemijski sastav ukazuje da su WR zvezde zapravo ogoljena jezgra nastala usled velikog gubitka mase, dok se u kasnijim fazama ogoljavaju i dublji slojevi sagorevanjem helijuma.

Slika 6. Evolutivni model zvezda-progenitora masa 17-30 Ms predložen u *Smartt et al. (2009)*. Crvenom isprekidanom linijom označeni su kanali evolucije koji su manje verovatni. Rad je zasnovan i na posmatračkim i na teorijskim predviđanjima. NS – neutronska zvezda (eng. Neutron Star); BH – crna rupa (eng. Black Hole); WR – Wolf-Rajeove zvezde;

U izvornom radu *Horiuchi, Beacom (2011)* raspon masa koji je iskorišćen za teorijsko računanje SNR je između $8M_{\odot}$ i $40M_{\odot}$. Konverzionalni koeficijent koji pokriva odnos SFR-SNR ima vrednost od $0.0088 \text{ } 1/M_{\odot}$. Na osnovu te vrednosti, dobija se broj supernovih na crvenom pomaku $z=0$, koji iznosi $R_{cc} = 1.4 \times 10^{-4} \text{ } yr^{-1} Mpc^{-3}$.

2.5.3 Poređenje rezultata u kojima variraju IMF-ovi za predloženi opseg masa

Korišćenjem jednačine (2.4), dobijaju se rezultati koji su posledica varijacije inicijalnih funkcija mase za granične intervale masa korišćene u *Horiuchi et al. (2011)*. Promene u rezultatima su ostvarene korišćenjem SalA , Ch '03 i BalG '03 inicijalnih funkcija mase.

- Najpre ćemo uvesti gustinu SFR u zavisnosti od crvenog pomaka,

$$\dot{\rho}_*(z) = \dot{\rho}_0 \left[(1+z)^{a\eta} + \left(\frac{1+z}{B} \right)^{b\eta} + \left(\frac{1+z}{C} \right)^{c\eta} \right]^{1/\eta}, \quad (2.5)$$

pri čemu su normalizacioni parametri dati sledećim vrednostima

$$\begin{aligned} B &= (1+z)^{1-a/b}, C = (1+z_1)^{(b-a)/c} (1+z_2)^{1-b/c} \\ a &= 3.4 \\ b &= -0.3 \\ c &= -3.5 \\ z_1 &= 1 \\ z_2 &= 4 \\ \eta &= -10 \end{aligned} \quad (2.6)$$

- *Horiuchi, Beacom (2011)*, *Bazin et al. (2009)* i *Yuksel (2008)* su usvojili da je nominalna vrednost za istoriju formiranja zvezda $\rho_0 = 0.016 h_{73} M_{\odot} Mpc^{-3} yr^{-1}$ (predstavlja kosmičku SFR za crveni pomak $z=0$).

- Ukoliko se usvoji IMF koja je korišćena i u *Horiuchi et al. (2011)*, *Bazin et al. (2009)*, *Dahlen et al. (2004)*, *Melinder et al. (2011)*, *Botticella et al. (2012)*, kao i kosmologija obrađena rezultatima WMAP 09¹⁰, tada je $\rho_* = 0.0193 \pm 0.0012 h_{73} M_\odot Mpc^{-3} yr^{-1}$.
- U svim navedenim radovima, autori su koristili isključivo Salpeter IMF, sa masama progenitora od $8M_\odot$ do 40 (50) M_\odot .

Izbor zbog čega je korišćena Salpeterova incijalna funkcija mase opravdan je podatkom da većina merenja broja supernovih, kao i proračuni za gustine formiranja zvezda na različitim crvenim pomacima, koriste upravo ovu funkciju, iako je iz tabele 2 prilično lako uočljivo da ona dobro podržava oblast većih masa, dok za mase ispod jedne mase Sunca nije dovoljno precizna, i mora se kombinovati sa još nekom funkcijom. Sa tim su saglasni svi teorijski radovi koji su se bavili normalizacijom istorije stepena formiranja zvezda, i da bi donjem graničniku masa više odgovorala funkcija sa blažom stepenom zavisnošću u odnosu na Salpeter IMF. Promena tih IMF-ova i njihovo variranje u kontekstu preciznijih izračunavanja SNR unela bi i sistematske neodređenosti pri poređenjima vrednosti.

Prema tome, analitički oblik koji je iskorišćen za proveru u kom rasponu vrednosti se nalazi R_{cc} dat je sledećom šemom:

Horiuchi, Beacom $R_{cc} = k \times \dot{\rho}_*(z)$

$$k = \frac{\int_{m_{\min}}^{m_{\max}} \varphi(m) dm}{\int_{m_{\min}}^{m_{\max}} \langle m \rangle \varphi(m) dm} =$$

$$= \frac{\int_{(8.5 \pm 1.3) M_\odot}^{50 M_\odot} \varphi(m) dm}{\int_{0.1 M_\odot}^{125 M_\odot} \langle m \rangle \varphi(m) dm}$$

Maseni opseg progenitora

Maseni opseg za zvezdane populacije

uzeta je IMF korišćena u Horiuchi, Beacom (2011), što predstavlja Salpeter A inicijalnu funkciju mase i dobro odgovara velikim M .

¹⁰ Ove godine je veliki evropski satelit PLANCK izvršio do sada najdetaljniji pregled kosmičke mikrotalasne pozadine, u izvesnoj meri korigujući rezultate WMAP misije, što se ogleda u nešto većoj starosti Univerzuma, kao i većem procentu materije u odnosu na tamnu energiju. U svakom slučaju, te razlike suštinski nemaju bitniji uticaj na korekcije koje su ovde izvršene.

Numerički, rezultat koji se dobija za koeficijent proporcionalnosti je $k=0.0070 \text{ } 1/M_s$. Neodređenost u pogledu izbora donjeg limita masa (koji se u slučaju IIP progenitora kreće u intervalu $7 < M/M_s < 9.5$) dovodi do odstupanja za vrednost koeficijenta $+22\%/-23\%$., dok izbor ograničenja gornjeg masenog udela ($30 < M/M_s < 125$) dovode do neodređenosti koja se kreće između $+6\%$ i -9% .

Koristeći sve te kombinacije u proračunu, dobija se da vrednost koeficijenta k leži u intervalu $0.0048 < k < 0.0093$, ukazujući na maksimalnu neodređenost od 20% u odnosu na normalizaciju.

2.6 Korekcije na dosadašnja merenja

Analiza odnosa SFR/SNR u ovom radu je fokusirana za vrednosti onih masenih intervala za koje nisu nađeni odgovarajući progenitori, prema *Horiuchi et al. (2011)*.

Što se tiče dosadašnjih misija traganja za supernovama i merenja njihovog broja u delu konačne zapremine, sledeći faktori su značajni za buduće analize:

1. SFR parametrizacija koja se koristila u radu *Hopkins, Beacom (2006)* i njeno poređenje sa novom normalizacijom koja je data sa značajnijim ispravkama u *Inoue (2013)*
2. CC SNe rate koja se dobija kao odnos masenih opsega u kojima figuriše univerzalna IMF
3. Korišćenje različitih masenih opsega da bi se ispitalo kolika su odstupanja od predviđenih i izmerenih vrednosti SN eksplozija. U tom smislu se modeliraju promene primenjujući modifikovanu Sal A incijalnu funkciju mase, i u drugom slučaju preostale IMF-ove, najčešće *Baldry-Glazebrook, Chabrier '03* i *Kroupa A (2003)*.
4. Cela parametrizacija je zasnovana na univerzalnosti IMF i jedinstvenom stepenom obliku koji pokriva oblast za crvene pomake od 0 do 5. Međutim, takva pretpostavka je još uvek diskutabilna, kao što je i ranije spomenuto („problem univerzalnosti IMF”, pogledati opširni prikaz u *Matzberger et al. 2012*).
5. Preostali efekti koji mogu imati značajan deo su zvezdana rotacija (*Horiuchi, Beacom, Botwell 2013*), atenuacija zbog prašine i nedostajući deo (*missing-fraction*) deo koji je detaljno proračunat u radu *Mattilla et al. 2012*, a čiju parametrizaciju koristimo i ovde.

2.6.1 Supernove nedostupne optičkim pretraživanjima/problem lociranja supernovih

Prva istraživanja koja su pokrenuta da bi se poredile evolucija i normalizacija kosmičke SFR i kosmičke SNR bila su prilično nemerodavna zbog velikih neodređenosti. U skorije vreme, sa razvojem boljih metoda detekcije, kao i vrlo dobro osmišljenih sistematskih pretraga (poput

LOSS, ili SNLS) dostupnost podacima o broju supernovih na većim crvenim pomacima postala je znatno olakšana.

Najveći posmatrački problem pretraživanja eksplozija supernovih je taj što se sumnja da je značajan deo njih zaklonjen prašinom. Kako je navedeno u ranijem delu teksta, na većim crvenim pomacima, prikriveni procesi formiranja zvezda u luminoznim i ultraluminoznim ($L_{IR} \approx 10^{12} L_\odot$) infracrvenim galaksijama, dominantni su u odnosu na procese rađanja zvezda detektibilne u UV ili optičkom delu spektra. Zbog brojnosti tih regiona u kojima se stvaraju zvezde, krucijalni faktor za njihovu dalju detekciju i preciznije konturisanje oblasti je povećana prostorna rezolucija. Dalji razvoj posmatračke astronomije i podaci sa velikih teleskopa koji mapiraju daleke regione intenzivnog formiranja zvezda (LOFAR, ALMA, H.E.S.S., Herschel) daće nam jasniju sliku koliki je zaista uticaj prekrivenosti prašinom na nedostajući deo supernovih koji je prvi put pomenut u radu *Horiuchi et al. (2011)*. Supernove koje se smatraju teško detektabilnim teoretičari dele u dve grupe: u prvu grupu spadaju „tihe“ supernove (slabog sjaja u optičkom delu spektra) i „tamne“ supernove (gotovo ispod praga detekcije zbog ogromnog efekta eksinkcije koji se javlja u njihovom okruženju).

Efekat nedostajućeg broja supernovih prvi put je obrađen u radu *Mannucci et al. (2007)*, ali je parametrizacija koja karakteriše nedostajući broj supernovih bila vrlo neprecizna zbog malog uzorka koji je razmatran u tom radu. Mnogo detaljnije tumačenje ovog efekta urađeno je u *Mattila et al. (2012)* koji koristi sličan formalizam kao *Mannucci et al. (2007)* – koriste podatke dobijene posmatranjima u UV i optičkom delu spektra, korigujući ih zajedno sa načinjenim prepostavkama koliki bi trebalo da bude efekat zaklonjenosti pod prašinom u lokalnim regionima intenzivnog stvaranja zvezda (eng. *starburst regions*), kako bi se dobio parametar korekcije primenljiv i na veće crvene pomake.

Ovde sam izbegao da opisujem ceo taj postupak, već sam se samo usredsredio na korišćenje parametrizacije u cilju dobijanja što tačnijih rezultata koji bi trebalo da daju konačni odgovor na pitanje: ***da li je faktor razlike istaknut u Horiuchi et al. zaista 2, ili je on drugačiji kada se u analizu uključe i efekat nedostajućeg broja supernova eksplozija (a takođe i variranje masenih intervala, inicijalne funkcije mase i zvezdane rotacije) ?***

Značajan pomak ka odgovoru na to pitanje načinjen je računanjem apsolutnih magnituda optičkih pikova za rastojanja do 12 Mpc u *Botticella et al. (2012)*. U tom radu su navedeni primeri svega tri supernove koje imaju apsolutnu magnitudu slabiju od $M = -15.5$, dok nijedna nije pronađena sa osobinom $M = -15.0$. Zaključeno je da u *Horiuchi et al.* nisu izvršene korekcije na galaktičke ekstinkcije prilikom izračunavanja apsolutnih magnituda analiziranih supernovih.

Rezultati novijih merenja dati su za WMAP kosmološke parametre predstavljene obradom iz 2011. godine $h = h_{70}$, $\Omega_m = 0.3$, $\Omega_\Lambda = 0.7$, dok je u radu *Dahlen et al. (2012)* urađena i korekcija

za supernove koje su „zaklonjene“ regionima sa velikom ekstinkcijom. Ovo je naročito važno za luminozne infracrvene galaksije zato što na većim crvenim pomacima procesi formiranja zvezda vidjivi u ovom delu spektra igraju veću ulogu u odnosu na procese vidljive u UV i optičkom delu (*LeFloch 2005, Magnelli 2009, Dahlen 2004, Mattila 2012*). **Lokalna brojnost supernovih** (za galaktičku okolinu u radijusu od 11 do 200 Mpc) u novijim istraživanjima obrađena je detaljno u studiji *Botticella et al. (2008)*.

Tabela 6 Parametrizacija nedostajućeg udela supernovih (Mattila et al. 2012). Faktori k i m predstavljaju korekcione parametre.

Crveni pomak	K	m
$z < 0.25$	0.135	0.188
$0.25 < z < 0.55$	0.314	0.144
$0.55 < z < 1.15$	0.116	0.254
$1.15 < z < 1.55$	-0.049	0.442
$1.55 < z < 2.00$	-0.016	0.392

Analitički, ova parametrizacija se može predstaviti u obliku $f_m = k \times z + m$. Treba još reći da se u radu Dahlen et al. (2012), u kojem je obrađen uzorak od 27 supernovih otkrivenih tokom poslednjih 12 godina, predstavlja donja granica za lokalnu SNR (u zapreminsном radijusu do 15 Mpc) koja iznosi $1.5^{+0.4}_{-0.3} \times 10^{-4} \text{ yr}^{-1} \text{Mpc}^{-3}$, što je u saglasnosti sa rezultatima koji su dobijeni u Botticella et al. (2012). Takva vrednost je u mnogome veća od vrednosti koju su dobili Li et al. (2011), koja iznosi $0.85^{+0.13}_{-0.13} \times 10^{-4} \text{ yr}^{-1} \text{Mpc}^{-3}$. Međutim, kada se u taj rezultat unese korekcije na nedostajuću brojnost supernovih, dobija se povećanje SNR ($1.04^{+0.22}_{-0.22} \times 10^{-4} \text{ yr}^{-1} \text{Mpc}^{-3}$).

2.6.2 Efekat zvezdane rotacije

Još jedan od potencijalno značajnih efekata koji može da doprinese korekciji vrednosti broja supernovih jeste rotacija zvezda. Do skorijeg vremena uglavnom su bile zastupljene teorije koje su razmatrale nerotacione modele (*Kennicutt 1989, Maeder 2000*) i one su se dobro poklapale sa posmatranjima sve do razvoja modernih opservatorija, koje su sprovele sistematičniju analizu, pokazavši pritom da ipak postoji odstupanje, a kao jedan od razloga mogao bi da bude i rotaciono kretanje zvezde¹¹. Fizičko objašnjenje zbog čega je ovaj efekat važan leži u činjenici da rotacija dovodi do centrifugalnog ubrzanja koje redukuje gravitaciono privlačenje, čineći da se na taj način raduju i vrednosti površinske temperature. Međutim, ono što je još značajnije

¹¹ Najkompletniju analizu značenja rotacije zvezda na evoluciju SFR dali su *Horiuchi et al. (2013)*, u kojem je korišćen PEGASE.2 softverski kod za evolucionu sintezu. Kao rezultat su dobili poboljštane verzije kalibracionih faktora za merenu luminoznost iz koje se računa SFR, a ti podaci iskorišćeni su i u ovom radu prilikom analize eventualnih implikacija na CC SNe.

kada se govori o rotaciji, jeste da ona stvara unutrašnje mešanje koje pak utiče da zvezde postaju sve toplije i luminoznije (*Brott et al. 2011*). Sve ovo zajedno dovodi do gubitka mase koji je tako uslovjen rotacionim kretanjem.

Koristeći različite indikatore za procese formiranja zvezda (računanje UV i H α kalibracionih faktora korišćenjem PEGASE.2 koda), definisan je kalibracioni faktor koji je korigovan na atenuaciju prašinom, a koji je dat izrazom $SFR = f_x L_x$, gde su f_x - pomenuti kalibracioni faktor, L_x - luminoznost za koju je takođe izvršena korekcija na prašinu, data je u jedinicama erg s $^{-1}$ Hz $^{-1}$. U tom radu (*Horiuchi et al. 2013*) korišćen je isti izbor IMF-ova i njihovih graničnih intervala, kao i onaj koji je u ovom radu iskorišćen za poređenje vrednosti čiji su rezultati dati u tabeli 7. U odnosu na klasičnu Salpeter funkciju, Salpeter A funkcija (ista kao Salpeter '55 na masama iznad 0.5 sunčevih masa, ali sa koeficijentom -1.35 za mase ispod te granice), Baldry-Glazebrook i Kroupa '03, doprinose UV kalibracionom faktoru 0.78, 0.50 i 0.83 puta respektivno u odnosu na klasičnu Salpeter IMF. Ponavljači postupak za rotacioni model, račun ukazuje na vrlo male promene: 0.78, 0.49 i 0.83 su skoro identične vrednosti kao u nerotacionom modelu.

Promene gornjeg masenog limita takođe unose promene u vrednosti SFR kalibracionih koeficijenata. Ukoliko se kanonička gornja masena granica od 100 M_s pomeri na 120 M_s, dobijaju se za oko 3-15 % manje vrednosti za UV i H α kalibracije respektivno. U nekim novijim radovima koji su i ovde spominjani (*Horiuchi et al. 2011, Kobayashi et al. 2013*) usvojene su gornje masene granice od 50 M_s (ponegde i 60 sunčevih masa), što je za promenu dovelo do rasta kalibracionih koeficijenata za 12%, odnosno 60% u slučaju H α .

Na osnovu izloženog u radu *Horiuchi et al. (2013)*, može se izvesti zaključak da su korekcije koje zvezdana rotacija pravi na kalibracione SFR faktore nešto manji nego efekti koje mogu da načine različiti izbori inicijalnih funkcija mase (oko 0.78 za Sal A, odnosno 0.50 za Baldry-Glazebrook IMF).

2.7 REZULTATI I ANALIZA

ANALIZA 1

Rezultati ove analize predstavljeni su *grafikom 1*. Najpre je izvršeno poređenje različitih inicijalnih funkcija mase za one masene intervale koji su dati u originalnom Horiuchi, Beacom radu. Inicijalne funkcije mase uzete u razmatranje date su u tabeli 4, dok granice integrala ostaju iste kao i u *Horiuchi et al (2011)*. Na osnovu nekih ranijih radova (*Bazin et al. 2011 ili Baldry-Glazebrook 2003*) ustanovio sam da masene prekide na donjim granicama koje sam usvojio u ovom radu najbolje opisuje funkcija Baldry-Glazebrook, koja jedina daje značajnije korekcije u odnosu na klasičnu Salpeter funkciju.

Zaključak ove analize je da variranje IMF-ova ne daje prevelika odstupanja od već datih rezultata u Horiuchi et al. **Koristeći sve te kombinacije u proračunu, dobija se da vrednost koeficijenta k leži u intervalu $0.0048 < k < 0.0093$, ukazujući na maksimalnu neodređenost od 20% u odnosu na normalizaciju.**

Uključujući u analizu i doprinose nedostajućih supernova, faktor razlike se smanjuje sa 2 na približno 1.3. Slične rezultate dobili su Melinder et al. (2012), dok je u radu Dahlen et al. dobijeno mnogo bolje slaganje između predviđenih i izmerenih vrednosti, ali na crvenim pomacima većim od 0.5.

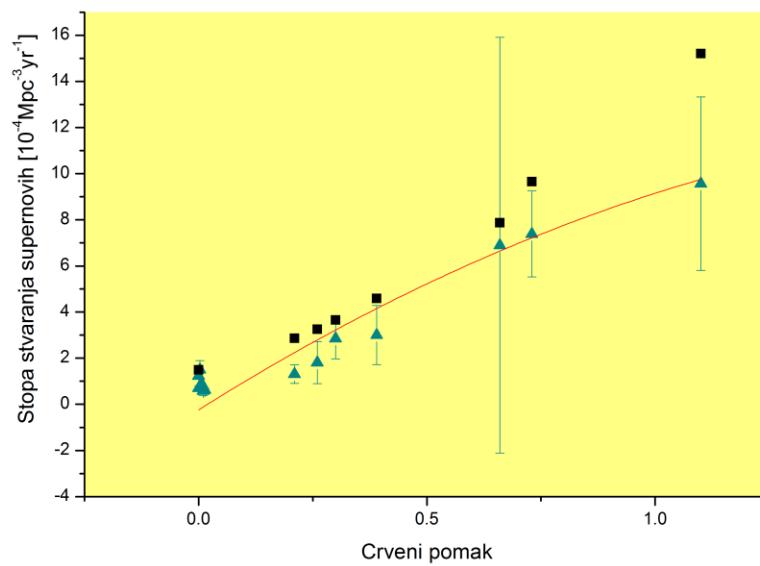
SFR na različitim crvenim pomacima

Poređenje stope formiranja zvezda merenim na kosmičkim rastojanjima komplikovano je zbog više faktora, kao što su: odstupanja koja nastaju pri izboru različitih galaksija, različiti uticaji koje mogu načiniti velike koncentracije prašine u galaksijama, luminoznosti različitih frekvencionalnih kanala kao pratioci procesa formiranja zvezda (ovde su kao najvažniji istaknuti UV i $H\alpha$, ali treba reći da se u poslednje vreme sve više kombinuju i IC, kao i emisija u radio kontinuumu). Hopkins i Beacom su rešavajući sve ove probleme selektovali skorašnje podatke SFR merenja, konvertovali ih u odabrani kosmološki okvir (Λ CDM), generalizovali korekcije na prašinu, IMF (Salpeter '55) i odabir kalibracionih faktora. Njihov najbolji fit kao rezultat kosmičke SFR daje vrednost od $2.1 \pm 0.4 \times 10^{-2} M_{\odot} Mpc^{-3} yr^{-1}$, što je nešto manje od najnovije (obnovljene) normalizacije koju su izvršili Kobayashi et al. (2013), i gde je ta vrednost oko $2.4 \pm 0.2 \times 10^{-2} M_{\odot} Mpc^{-3} yr^{-1}$.

Za razliku od kosmološke SFR, metode određivanja stope formiranja zvezda na lokalnoj skali (oko 10 Mpc) imaju tu pogodnost da su skoro sva merenja izvršena za identične uzorce galaksija (*na pr. Kennicutt 2008, 11HUGS mission*).

Vrednosti broja supernovih sa kolapsom jezgra, koje su dobijene posmatranjima, aproksimirane su fitom $\propto (1+z)^{3.4}$ za crvene pomake $0 < z < 1$, pri čemu je normalizacija za $z=0$ data vrednošću. Poređenja radi, stopa eksplozija supernovih koja je predviđena uzimanjem u obzir nerotirajućeg modela kalibracije opisanog u ovom dodatku i jednačine (2.4). Kao rezultat takve normalizacije, dobija se skoro dvostruko veći broj: $1.59_{-0.2}^{+0.3} \times 10^{-4} Mpc^{-3} yr^{-1}$ (u Horiuchi i Beacom (2011) je dobijena vrednost $1.4_{-0.2}^{+0.2} \times 10^{-4} Mpc^{-3} yr^{-1}$ zbog nešto drugačijeg odabira masenih granica). Neodređenosti koje su karakteristične za računanje Rcc preko SFR ovde ne mogu uspešno da objasne uočenu razliku.

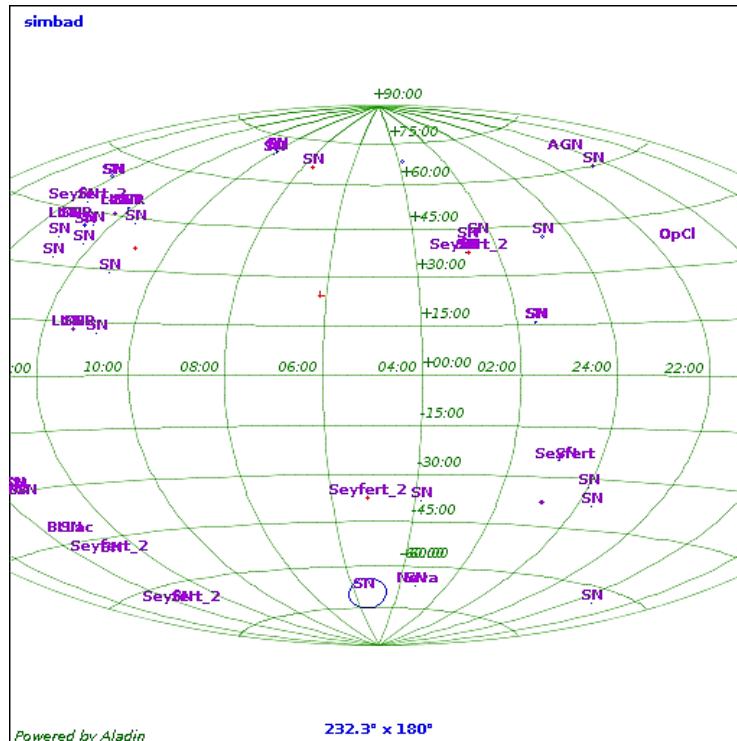
Rotacija može da predstavlja jedan od faktora koji donekle premošćavaju ovaj problem smanjujući SFR, a samim tim i teorijski predviđenu vrednost za broj supernovih. Na osnovu priloženog u radu Kochanek et al. (2008) i Horiuchi et al. (2013), zaključuje se da je maksimalna moguća ispravka oko 30% što i dalje nije dovoljno da objasni kompletну razliku.



Grafik 1. Vrednosti teorijski i merno dobijenog broja supernovih na različitim crvenim pomacima, za iste masene granice kao u radu Horiuchi et al. (2011), samo sa prmenjenom IMF (Sal A, umesto klasičnog Sal '55). Primetno je i dalje postojanje faktora razlike. Unošenjem korekcija koje su razmatrane u ovom poglavlju (nedostajući ideo SNe, rotacija, statističke korekcije) taj odnos može da se smanji na svega 0.3 na većim crvenim pomacima (>1) i na faktor 1.6 na manjim crvenim pomacima.

Tabela 7. Vrednosti teorijski i merno dobijenog broja supernova sa kolapsom jezgra na osnovu uzorka od 40 supernovih izdvojenog iz kataloga Drehler et al. (2004) i kataloga projekta SNLS. Crveni pomaci su birani na isti način kao i u Horiuchi et al. (2011) kako bi poređenje vrednosti bilo što lakše, dok je za funkciju normalizacije kosmičke SFR uzeta Hopkins Beacom '06.

Crveni pomak	Stopa stvaranja supernovih				Stopa stvaranja supernovih [$10^{-4} \text{Mpc}^{-3} \text{yr}^{-1}$] Vrednosti predviđene parametrizacijom izvedenom iz Cosmic SFR	
	Vrednosti odredjene detekcijom CC SNe na crvenim pomacima do 1.3		Statističke greške merenja			
			+	-		
0	0.705	0.099	0.097			
0	1.23	0.14	0.17		1.49	
0.003	1.5	0.4	0.3		--	
0.0067	0.9	0	0		--	
0.01	0.58	0.19	0.19		--	
0.014	0.62	0.067	0.067		--	
0.21	1.31	0.4	0.4		2.86	
0.26	1.81	0.91	0.79		3.25	
0.3	2.85	0.88	0.97		3.65	
0.39	3	1.28	0.94		4.59	
0.66	6.9	9.01	5.4		7.87	
0.73	7.39	1.86	1.52		9.65	
1.1	9.57	3.76	2.8		15.2	



Slika 7. Raspodela priloženog uzorka supernovih određenih prema galaktičkim koordinatama – grafik je učitan korišćenjem programa Aladin

ANALIZA2

Rezultati ove analize predstavljeni su *grafikom 2* koji poredi vrednosti dobijene korišćenjem izlomljene IMF sa prekidnim graničnim intervalima masa, u odnosu na vrednosti dobijene posmatranjima, nad kojima je izvršena korekcija za nedostajući ideo prema parametrizaciji dатој у табели 4.

Donji i gornji integral izabrane IMF imaju oblike:

$$\int_{0.1Ms}^{125Ms} < m > \varphi(m) dm$$

$$\int_{0.1Ms}^{17Ms} \varphi(m) dm + \int_{25Ms}^{50Ms} \varphi(m) dm \quad (2.7)$$

Rezultati ove analize pokazuju da se pri manjim crvenim pomacima (do 0.5) zadržava konstantan odnos između nedostajuće brojnosti supernovih. Iako je taj efekat manji od predviđenog faktora 2, on iznosi 1.4 i dalje pokazuje da se mora objasniti fizički razlog usled čega ova razlika nastaje.

Zanimljivo je takođe primetiti da faktor razlike varira u odnosu na SFR, koja ne opada tako naglo pri crvenom pomaku od 1.3 (kao u normalizaciji *Hopkins, Beacom*), već se nasuprot tome podiže, što bi moglo da navede na zaključak da je i sama normalizacija još više osetljiva na korekcije na prašinu od one koja je iskazana u tematskom radu *Hopkins, Beacom (2006)*. U svakom slučaju, ovde ću se osvrnuti na eventualne astrofizičke posledice dva moguća scenarija:

1. Realne razlike SFR i SNR
2. Mogućnost da je normalizacija SFR nedovoljno precizna, i da usled dodatnih korekcija ona može da poveća vrednost teorijski dobijene SNR taman za onoliko koliko nam ukazuju prethodne analize (“Mitaka model”).

Mitaka model kosmičke stope formiranja zvezda

„Da li je predviđena vrednost SFR za crvene pomake veće od 1 premala?“

Jedan od najnovijih pokušaja da se utvrdi tačna priroda neslaganja predviđenih i posmatranih vrednosti stope stvaranja zvezda urađen je u radu Kobayashi et al. (2013). U njemu je iskorišćen semianalitički model za formiranje galaksija („*Mitaka model*“, Nagashima et al. (2002)) koji kao osnovnu platformu koristi Λ CDM model stvaranja struktura i računa evoluciju fizičkih

parametara na osnovu različitih crvenih pomaka, pri čemu se razmatra evolucija haloa tamne materije kao i evolucija barionske komponente van haloa. Vremenska evolucija barionske komponente ima za cilj da poveže fenomenološke modele za radijativno hlađenje, formiranje zvezda, supernova „*feedback*”, hemijsku zastupljenost gasova i ostalih elemenata. Kao rezultat, mogu se dobiti različite fizičke karakteristike kao što je na primer upravo SFR računata preko posmatranih zvezdanih luminoznosti galaksije na bilo kom crvenom pomaku. (detaljan opis modela dat je u Nagashima (2004) i Kobayashi (2007)). Glavni cilj tog rada je bio da se locira problem u određivanju SFR preko konverzije UV luminoznosti, kao i što precizniji ideo zaklonjenosti prašinom na većim crvenim pomacima. Osnovni rezultat je blago povećanje SFR na crvenim pomacima većim od 1, i znatnije povećanje SFR na crvenim pomacima većim od 3, u odnosu na Yuksel parametrizaciju koja je poslužila kao osnova za Horiuchi-Beacom formulu kosmičke SFR (2.4). (pogledati rade Yuksel *et al.* 2008 i Nagashima 2004).

Grafik 2. Poređenje teorijski i merno dobijenog broja supernova sa kolapsom jezgra na osnovu uzorka od 40 supernovih izdvojenog iz kataloga Drehler et al. (2004) i kataloga projekta SNLS. Odražena je varijacija gornjeg masenog limita i podešavanje stepenih koeficijenata u IMF kako bi funkcija bila što osetljivija na promene masenih intervala. Isprekidanom linijom je dato predviđanje nbroja supernovih na osnovu SFR, pri čemu je korišćena normalaciona funkcija Hopkins, Beacom '06 za crvene pomake do 1.6. Punom crvenom linijom je dat fit na merne rezultate. Usled velikih neodređenosti i korekcije na zaklonjenost prašinom na crvenim pomacima većim od 0.6, te dve krive mogu značajno da smanje faktor razlike (Dahlen et. al). Međutim, na crvenim pomacima do 0.4 faktor razlike od ~1.4 se zadržava.

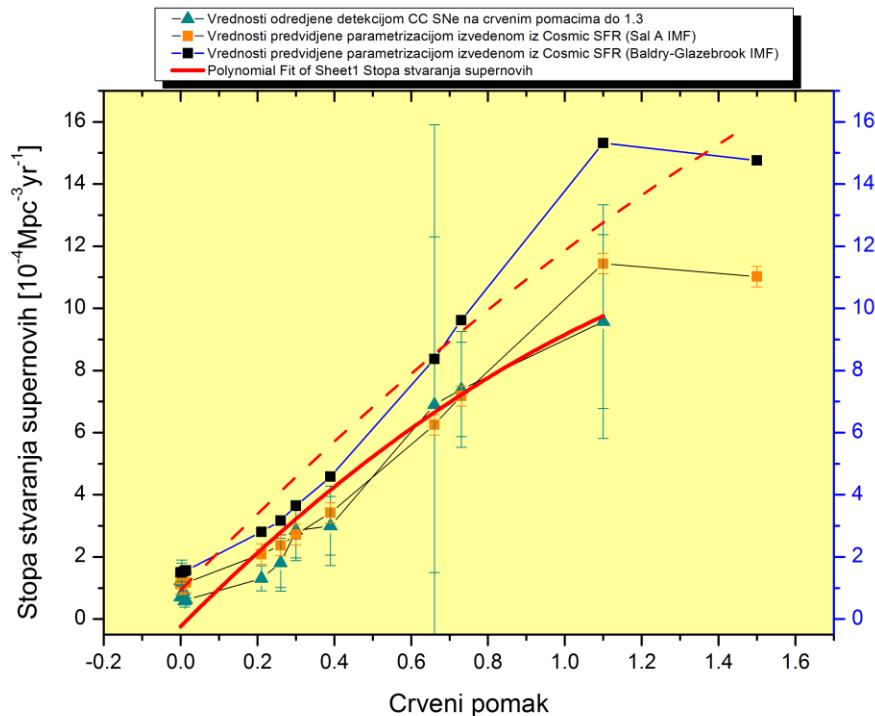


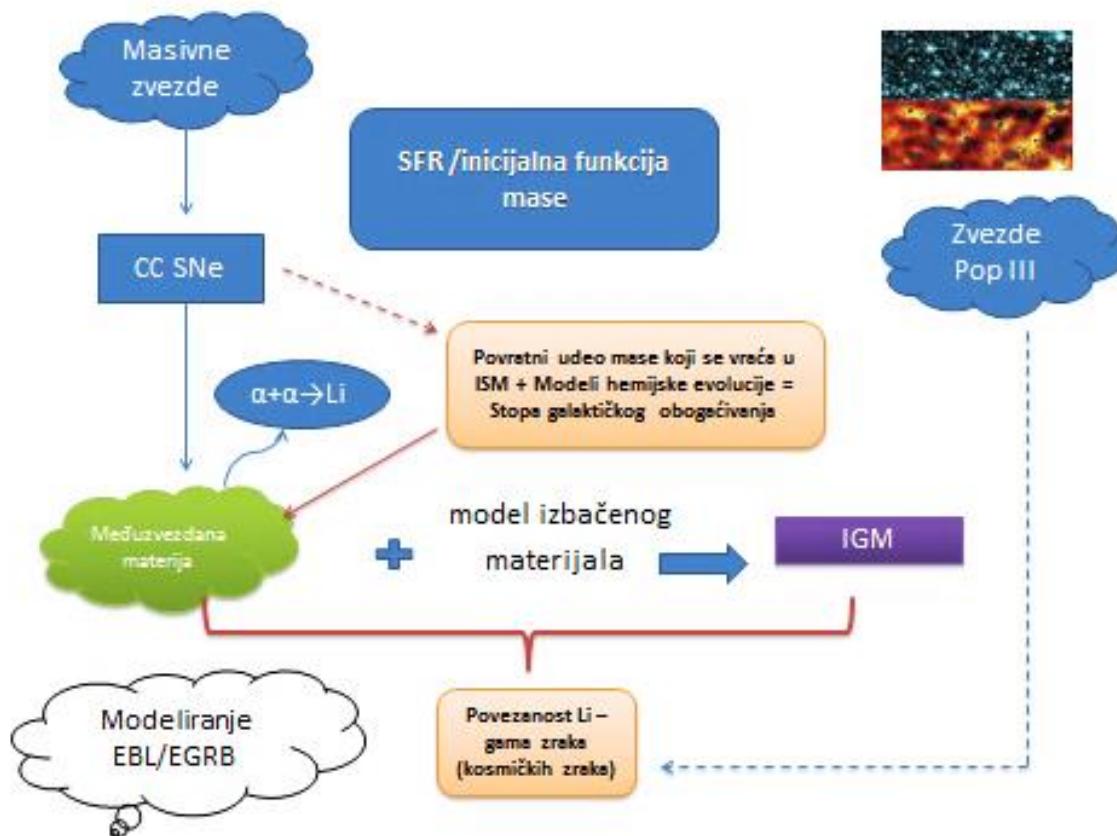
Tabela 8. Rezultati teorijski i merno dobijenih vrednosti broja supernovih za različite IMF-ove.

Crveni pomak	Stopa stvaranja supernovih				Stopa stvaranja supernovih		Stopa stvaranja supernovih	
	$[10^{-4} \text{Mpc}^3 \text{yr}^{-1}]$						$[10^{-4} \text{Mpc}^3 \text{yr}^{-1}]$	
	Vrednosti odredjene detekcijom CC SNe na crvenim pomacima do 1.3		Statističke greške merenja		Vrednosti predviđene parametrizacijom izvedenom iz Cosmic SFR (Baldry-Glazebrook IMF)		Vrednosti predviđene parametrizacijom izvedenom iz Cosmic SFR (Sal A IMF)	
0	0.705		0.099	0.097				
0	1.23		0.14	0.17	1.49		0.98	
0.003	1.5		0.4	0.3	--			
0.0067	0.9		0	0	--			
0.01	0.58		0.19	0.19	--			
0.014	0.62		0.067	0.067	--			
0.21	1.31		0.4	0.4	2.86		1.76	
0.26	1.81		0.91	0.79	3.25		2.18	
0.3	2.85		0.88	0.97	3.65		2.28	
0.39	3		1.28	0.94	4.59		2.87	
0.66	6.9		9.01	5.4	7.87		4.91	
0.73	7.39		1.86	1.52	9.65		6.03	
1.1	9.57		3.76	2.8	15.2		9.5	

GLAVA III

Astrofizičke posledice „problema supernovih“

Ciklus prenošenja zvezdanih materijala kroz međuzvezdanu materiju jednosmeran proces, jer nastanak zvezda čini pretvaranje međuzvezdanog gasa u zvezdane objekte, ali taj proces takođe ima i sposobnost da vrati gas do međuzvezdane materije putem mehanizama koji smo već opisali: izbacivanjem broja crvenih džinova, i eksplozijom supernova. Ovo nam govori o jednostavnoj povezanosti povratnog dela mase (eng. *return fraction*) u međuzvezdanu i međugalaktičku sredinu.



Slika 8. Bazični prikaz algoritma procesa koji koriste materijal nastao nakon eksplozivnih procesa supernovih na različitim crvenim pomacima. Kao što se može videti, važan je doprinos eksplozija supernovih za povezivanje dva ključna procesa: njen uticaj na generisanje visokoenergetskih kosmičkih i gama zraka (na grafiku predstavljeni kao veza Li i gama zraka), a sa druge strane imamo akreacioni model kojim možemo da modeliramo šta se dešava sa nukleosintetičkim elementima (poput litijuma-6 ili deuterijuma) u lokalnoj međuzvezdanoj materiji na osnovu priliva gasa koji se očekuje od eksplodirajućih supernova. Notacija: IGM – međugalaktička sredina (intergalactic medium); EBL – vangalaktičko pozadinsko svetlo (extragalactic background light); EGRB – vangalaktička gama pozadina (extragalactic gamma-ray background).

Takođe je moguće uočiti povezanost između mase galaksije i njene metaličnosti - prvo, više masivne spiralne galaksije su formirale više zvezda i otpremile veći deo svoje mase u zvezde, a samim tim i pospešile proizvodnju metala. Drugo, masivnije galaksije imaju i veće radikalne brzine. Zvezde mogu određeni deo svoje mas da vrate okolnom svemiru, (na osnovu *Horiuchi et al. 2011*) za zvezde od kojih nastaju CC SNe većina mase koja ulazi u njihov sastav se ne vrati u gas, bog toga se preferira se objašnjenje da Mlečni put nastavlja da skuplja novi materijal iz međuzvezdanog prostora.

3.1 Efekat „nedostatka supernovih“ na galaktičku zastupljenost litijuma-6

Ispitivanje istorije stvaranja zvezda je ključ razumevanja galaktičke evolucije u širem kontekstu. Stopa stvaranja zvezda je ključni pokretač strukture evolucije u međuzvezdanom gasu i snažno utiče na formiranje i evoluciju galaksija preko energije, kretanja i hemijske evolucije, i šalje gas iz kasnijih zvezdanih vetrova i supernova eksplozija u međuzvezdenu sredinu.

Evolucija stope stvaranja supernovih sa kolapsom jezgra u zavisnosti od crvenog pomaka je na neki način artefakt takve istorije koji nam omogućava da ograničimo obogaćivanje galaksija hemijskim elementima. Loša statistika je glavni ograničavajući faktor za korišćenje ove vrednosti. Kako je navedeno ranije u tekstu, na velikim crvenim pomacima teškoća leži u otkrivanju kompletnih uzoraka tzv. „tihih“ supernova (*faint SNE (Botticella et al 2008; Bazin 2009; Li et al. 2011)*). Štaviše, u prethodnim poglavljima je pokazano da, na osnovu dosadašnjih misija, postoji značajan ideo supernova koja su nedostupna optičkim pretraživanjima, budući da su ugrađene u prašnjavim oblastima spiralnih krakova ili jezgrima galaksija (*Horiuchi 2013*). Ovaj ideo može varirati s crvenim pomakom, ako se iznos praštine u galaksijama menja s vremenom (*Kobayashi et al. 2012*). Napredak u korišćenju CC SN stope kao pratioca procesa stvaranja zvezda zahteva tačna merenja stope u različitim kosmičkim razdobljima i u različitim okruženjima. Ono na što se naročito želi skrenuti pažnja u ovom III poglavljju je skica doprinosa koje eksplozije supernovih (i procesi formiranja zvezda generalno) imaju na evoluciju lakih elemenata, pogotovo litijuma.

Primordijalni elementi (od D do B – izuzev ^4He) imaju vrlo nestabilna jezgra i češće bivaju razorenia nego stvorena u procesu termonuklearnog paljenja. U poznatom radu *Burbidge, Burbidge, Fowler i Hoyle (1957)*, poreklo LiBeB sinteze je opisan kao "x-proces", jer nije bilo poznato mesto za proizvodnju tih lakih elemenata koji bi mogli objasniti svoju brojnost izmerenu u tom trenutku. Na kraju se pokazalo (*Reeves et al. 1970*) da interakcija galaktičkog koSmičkog zračenja (GCR) sa međuzvezdanom sredinom uspešno može objasniti uočene LiBeB zastupljenosti. Tokom poslednjih dvadesetak godina merenjima LiBeB u Suncu i Galaktičkom disku, su se pridružila i LiBeB merenja u haloima; tako je porasla ponuda posebno vrednih informacija o poreklu interakcije kosmičkih zraka sa galaktičkom i proto-galaktičkom materijom.

Redak litijumov izotop ${}^6\text{Li}$ nastaje prvenstveno uticajem kosmičkih zraka, kroz α - α fuzioni proces ($\alpha_{\text{cr}} + \alpha \rightarrow {}^6\text{Li}^{6,7} + \dots$) sa helijumom prisutnim u međuzvezdanoj materiji. Ono što je od suštinske važnosti je što nam taj nuklid omogućava jedinstvenu dijagnostiku istorije kosmičkih zraka u našoj galaksiji. Naime, istovetna hadronska reakcija raspadom pionskog kosmičkog zračenja dovodi do nastanka gama-zraka visokih energija.



Tako su hadronski gama-zraci i ${}^6\text{Li}$ povezani. U slučaju litijuma-6 i međuzvezdane sredine, osnovna interakcija predstavljena je sledećom jednačinom



Ova reakcija spalacije pokazuje stvaranje litijumovog izotopa-6, i dominira u načinu proizvodnje galaktičkog litijuma. (*Prodanovic, Fields 2004, Rolinde et al. 2006, Steigman i Walker 1992, Montmerle 1977*). To čini proizvodnju kosmičkog litijuma putem visokoenergetskih interakcija posebno "čistom" od njegove evolucije, pa tako ona zavisi jedinstveno od uticaja kosmičkih zraka, za razliku od Be i B, kod kojih se pojavljuje i zavisnost od prisustva teških elemenata.

Takođe, kako je potvrđeno u radovima koji se bave nuklearnom astrofizikom, broj supernovih i fluks galaktičkog kosmičkog zračenja stoje u direktnoj proporciji, i može se iskoristiti aproksimacija prema kojoj je $\Phi_{\text{cr}} \propto R_{\text{CCSNe}}$ (na pr. *Prodanovic, Fields 2004*). Takvim pojednostavljenim pristupom možemo reći da kosmičko zračenje koje svoje poreklo ima u eksplozijama supernovih, može biti odgovorno i za produkciju litijuma-6 preko reakcije sa međuzvezdanom materijom, a isto tako i za nastanak gama-zraka preko raspada π^0 mezona. Usvajajući sve navedeno, dobijamo uvid u važnu povezanost supernova eksplozija i zastupljenosti galaktičkog litijuma, ali i vangalaktičkih gama-zraka. Praktično, litijum-6 nam može poslužiti za direktno merenje lokalne zastupljenosti kosmičkog zračenja tokom nekog vremena, dok vangalaktičko hadronske gama-zračenje otkriva podatke o prosečnom uticaju kosmičkog zračenja van naše galaksije.

Osnovni formalizam koji objašnjava pomenute uticaje dat je sledećom aproksimacijom (*Prodanovic, Fields 2004*). U njemu se otkriva još jedan važan podatak, a to je povezanost fluksa kosmičkog zračenja i stope formiranja zvezda, koja direktno otkriva broj supernovih.

$$Li_{\text{GCR}} \propto R_{\text{SN}} \propto SFR \sim \Phi_{\text{CR}} \sim \Phi_a \sigma_{aa} \quad (3.3)$$

$$L_{\gamma} = X_H \frac{\Gamma_{\pi \rightarrow \gamma}^{MW}}{\psi_{MW}} \frac{\langle M_{gas}(z) \rangle}{m_p} \dot{\rho}_*(z) \quad (3.4)$$

Li_{GCR} - litijum proizведен interakcijom galaktičkih kosmičkih zraka;

Φ_{CR} - fluks kosmičkog zračenja; $\Phi_a \sigma_{aa}$ - proizvod ukupnog fluksa zračenja alfa-čestica sa presekom reakcije

L_{γ} - prosečna galaktička luminoznost gama-zračenja; $\Gamma_{\pi \rightarrow \gamma}^{MW}$ - produkcija gama-zračenja raspadom pionske komponente kosmičkih zraka

ψ_{MW} - stopa formiranja zvezda u galaksiji

$\langle M_{gas}(z) \rangle$ - masa gasa

Trenutna slika koja nam daje vrednosti nekih od značajnih parametara (masa gasa, pre svega) data je tabelom 8. preuzetom iz studije *Botticella et al. (2012)*.

Tabela 8. Doprinos trenutno izmerenog udela mase izbačenog gasa iz eksplozija supernovih koji se može dalje procesirati u modelu (B. Pagel, Nucleosynthesis and the Chemical Evolution of Galaxies, 2009)

Galaksija		Sunčev cilindar (dV)
Vremenska skala $t \sim 10 - 15 \text{ Gyr}$		Površinska oblast, πR_0^2 , $R_0 = 8.5 \text{ kpc}$
Masa zvezda (trenutno)	$\alpha M_s = 7 \times 10^{10} M_s$	$\alpha \sum_s \sim 45 M_s \text{ pc}^{-2}$
Masa sadržana u gasu	$M_G \sim 7 \times 10^9 M_s$	$\sum_G \sim 7 - 14 M_s \text{ pc}^{-2}$
Gasni ideo	$\mu = M_G / M_0 \approx 0.1$	$\mu = 0.14 - 0.25$
Oko 90% ukupnog gasa se konvertuje u zvezde		
Trošenje gasa tokom formiranja zvezda		
Prosečno vreme trošenja gasa	$M_G / (\alpha M_s / t) \approx 1 \text{ Gyr}$	1 - 1.5 Gyr
Procesi koji obnavljaju gas		
Izbacivanje gasa / AGB zvezde/ (zvezdani vетар +planetарне magline)		$0.8 M_s \text{ pc}^{-2} \text{ Gyr}^{-1}$
Izbacivanje gasa sa zvezda O klase		$\sim 0.05 M_s \text{ pc}^{-2} \text{ Gyr}^{-1}$
Izbacivanje gasa putem supernovih	$\sim 0.15 M_s \text{ pc}^{-2} \text{ Gyr}^{-1}$	$\sim 0.05 M_s \text{ pc}^{-2} \text{ Gyr}^{-1}$
Ukupan priliv gasa iz IGM-a	$\leq 2 M_s \text{ pc}^{-2} \text{ Gyr}^{-1}$	$\leq 1 M_s \text{ pc}^{-2} \text{ Gyr}^{-1}$

Trenutno najveće kolaboracije koje istražuju gama-pozadinu (Fermi i H.E.S.S.) bolje će ograničiti (ili odrediti!) ideo pionske vangalaktičke gama-pozadine, i tako biti ključni u omogućavanju još preciznije slike koja pokazuje link između evolucije hemijskih elemenata i eksplozija supernovih.

Zaključak

U ovom radu prikazane su posledice koje na modele zvezdane i galaktičke hemijske evolucije može imati aktuelni „problem nedostatka supernovih“. Prve dve glave ovog rada bile su posvećene što detaljnijoj analizi tog problema, kako sa posmatračkog, tako i sa teorijskog aspekta.

Najpre je dijagnostifikovan „problem supernovih sa kolapsom jezgra“. On se ogleda u tome da je istaknuta izvesna razlika između broja koji predviđa teorija formiranja zvezda, u odnosu na detektovani broj supernovih. Izvorni rad *Horiuchi et al. (2011)* odredio je čak faktor 2 u korist stope formiranja zvezda. Analiza koja je ovde izvršena bila je zasnovana na proveri uticaja koji izbor inicialne funkcije mase i njenih graničnih intervala može imati na korekciju tog faktora razlike. Osnovni zaključak do kojeg se došlo jeste da se, uključujući sve moguće ispravke (IMF, zvezdanu rotaciju, korekciju na prašinu), ta razlika smanjuje, ali je na niskim crvenim pomacima i dalje prisutna (pogledati Analizu 1).

Drugi deo analize obuhvatao je uzorak od preko 40 supernova sa kolapsom jezgra, detektovnih u projektu LOSS (pogledati Dodatak1), pri čemu je određivana stopa eksplozija supernovih, ali sa izlomljenim masenim granicama i donekle drugačijim izborom inicialnih funkcija masa. Potvrđeno je da je kritični granični interval za gornje masene limite između 16 i 25 sunčevih masa, sa odstupanjima od ± 1.5 mase Sunca. Taj interval u dosadašnjim posmatračkim pretragama nije pokazao značajniji udio među detektovanim progenitorima supernova sa kolapsom jezgra, pa je opravdano izvršena podela kontinualnog masenog intervala u integralima koji opisuju broj supernovih. Funkcija Baldry-Glazebrook se pokazala kao najosetljivija na normalizaciju SFR koju su uradili Hopkins i Beacom, ali i u tom slučaju razlika između predviđene i izmerene SNR ostaje oko 1.2 – 1.4.

Zbog toga je u trećoj glavi dat vrlo sažet prikaz važne povezanosti između elemenata koji služe kao pratioci regiona sa jakim zvezdanim aktivnostima (kosmički zraci), i retkog izotopa (litijum-6), kako bi se stvorio polazni link između procesa eksplozija supernovih (kao posledice evolucije zvezda, tj. promenljive koja sledi direktno iz SFR), i produkcije litijuma-6 (kao izotopa, čija produkcija direktno prati broj stvorenih gama-zraka, nakon raspada pionskih čestica, direktnih produkata ubrzavanja putem eksplozija supernovih).

Naredna istraživanja u ovoj oblasti započeće sa prepostavkom da je „supernova problem“ izvestan, te da zastupljenost litijuma treba da odstupa od predviđene takođe za taj faktor razlike. Modeliranje hemijske evolucije u galaksijama biće važna spona između procesa na malim i velikim crvenim pomacima, jer treba imati na umu da su traganja za intenzivnim zvezdanim „porodilištima“ u epohi rejonizacije tek otvorena, i da će se u budućnosti dobijati sistematski pregledi stope stvaranja zvezdanih populacija svega nekoliko stotina miliona godina

nakon Velikog praska, čime će normalizacija Hopkins, Beacom '06 još više biti stavljena pod analizu. Takođe, korekcija procesa na zaklonjenost prašinom, koja je u dosadašnjim misijama bila najveći problem, posmatrački će se mapirati moćnim radio i infracrvenim teleskopima (Herschel, Spitzer), što će sigurno omogućiti dobijanje prave vrednosti korekcije koju na kosmičku SFR imaju gusti regioni prašine.

U isto vreme, trenutno najveće kolaboracije koje istražuju gama-pozadinu (Fermi i H.E.S.S.) bolje će ograničiti ideo pionske vangalaktičke gama-pozadine, pa se slobodno može napisati da nas očekuje uzbudljivo vreme novih otkrića koja će povezati nuklearnu astrofiziku sa modelima zvezdane i galaktičke evolucije.

Dodatak 1

Pregled najvažnijih aktuelnih sistematskih pretraživanja supernovih

- PRETRAŽIVANJA NA LOKALNIM CRVENIM POMACIMA ($Z < 0.03$)**

Naziv misije	Referenca	Rezultati
LOSS (Lick Observatory SNe Search)	Smith et al. (2010) Li et al. (2011)	Otkriveno preko 1000 supernova različitih tipova u lokalnom galaktičkom okruženju ($z < 0.05$). Najbolja pretraga do sada, sa najpouzdanim katalogom.
CSP (Carnegie Supernova Project)	Hamuy et al. 2006, Phillips et al. 2007, Folatelli et al. 2010	Detektovano preko 400 supernovih na manjim (ali i srednjim crvenim pomacima).
SN Factory	Childress et al. (2010)	Još uvek bez objavljenih radova o značaju pretrage – do sada prijavljeno da je nađeno oko 600 supernova.
PanSTARRS-1	Young et al. (2008)	Aktivna od 2011. godine, smatra se da će biti najmoćnija pretraga gravitacionih supernovih (očekuje se oko 26 000 detekcija).
Palomar Transient Factory	Sullivan et al. (2010)	Detaljno pretraživanje južnog neba, za godinu dana je detektovano oko 500, još uvek neprijavljenih, supernova.

- PRETRAŽIVANJA NA SREDNJIM CRVENIM POMACIMA ($0.03 < Z < 0.5$)**

Naziv misije	Referenca	Rezultati pretrage
SDSS	Frieman et al. (2008)	Preko 500 supernova tipa Ia u sklopu trogodišnje misije. Svi potencijalni kandidati mogu se javno videti preko interneta u besplatnom SDSS modulu VoEventNet.
SVISS (Stockholm VIMOS Supernova Survey)	Melinder et al. (2011)	Evropski program za supernove sa kolapsom jezgra na srednjim crvenim pomacima. Tek se očekuju značajniji rezultati.
CSP (Carnegie Supernova Project)	Stritzinger et al. (2012)	Petogodišnji program pretrage opservatorije Las Campanas (uglavnom za Ia supernove).

- PRETRAŽIVANJA NA KOSMOLOŠKIM CRVENIM POMACIMA ($Z>0.5$)**

Naziv misije	Referenca	Rezultati pretrage
High-Z SN Search	Schmidt et al. (2004)	Jedna od najdužih pretraga, započeta 1995. Trenutno orijentisana na doprinos supernova ograničenju vrednosti tamne energije u svemiru.
SNLS (Supernova Legacy Survey)	Sullivan et al. (2012)	Takođe ima primarni cilj da pomogne u konstruisanju jednačine tamne energije, a koristi velike teleskope na Havajima, kao i velike spektroskopske pretrage putem VLT i Gemini teleskopa.
Danish Distant SN Search	Hansen et al. (1989)	Koristi La Silla teleskope za pretraživanje la supernovih
GOODS HST Search	Riess et al. (2009)	Pretraga koja je omogućila detekciju i analizu do sada najudaljenijih supernova tipa Ia (na crvenim pomacima većim od 1.4)

Literatura

- Abdo, A. A. et al. 2010, *ApJ*, 723, 1082
Aharonian, F. et al. 2006, *Nature*, 440, 1018
Ando, S., Beacom, J. F., & Yüksel, H. 2005, *Phys. Rev. Lett.*, 95, 171101
Baldry, I. K. & Glazebrook, K. 2003, *ApJ*, 593, 258
Baldry, I. K. et al. 2005, *MNRAS*, 358, 441
Bazin, G. et al. 2009, *A&A*, 499, 653
Beacom, J. F. 2010, *Annu. Rev. Nucl. Part. Sci.*, 60, 439
Beacom, J. F. & Vagins, M. R. 2004, *Phys. Rev. Lett.*, 93, 171101
Bond, H. E., Bedin, L. R., Bonanos, A. Z., Humphreys, R. M., Monard, L. A. G. B., Prieto, J. L., & Walter, F. M. 2009, *ApJ*, 695, L154
Botticella, M. T. et al. 2008, *A&A*, 479, 49
Botticella, M. T. et al. 2009, *MNRAS*, 398, 1041
Brinchmann, J., Charlot, S., White, S. D. M., Tremonti, C., Kauffmann, G., Heckman, T., & Brinkmann, J. 2004, *MNRAS*, 351, 1151
Brunthaler, A. et al. 2010, *A&A*, 516, A27
Cappellaro, E., Evans, R., & Turatto, M. 1999, *A&A*, 351, 459
Cappellaro, E. et al. 2005, *A&A*, 430, 83
Dahlen, T., Strolger, L., & Riess, A. G. 2010, *BAAS*, 42, 360
Dahlen, T. et al. 2004, *ApJ*, 613, 189
Dahlen, T. et al. 2012, *ApJ*, 757, 70
Della Valle, M. et al. 2006, *Nature*, 444, 1050
Fields, B.D., Prodanović, T. 2005, *ApJ*, 623, 877
Fraser, M. et al. 2010a, *ApJ*, 714, L280
Fryer, C. L. 1999, *ApJ*, 522, 413
Gal-Yam, A. & Leonard, D. C. 2009, *Nature*, 458, 865
Gal-Yam, A. et al. 2011, *ApJ*, 736, 159
Heger, A., Fryer, C. L., Woosley, S. E., Langer, N., & Hartmann, D. H. 2003, *ApJ*, 591, 288
Hopkins, A. M. 2004, *ApJ*, 615, 209
Hopkins, A. M. & Beacom, J. F. 2006, *ApJ*, 651, 142
Horiuchi, S. & Beacom, J. F. 2010, *ApJ*, 723, 329
Horiuchi, S et al. 2011, *ApJ*, 738, 154
Horiuchi, S, Beacom, J. F, Bothwell, M, Thompson, T.A. 2013, *ApJ*, 769, 113
Hornoch, K. 2002, *IAU Circ.*, 7923, 5
Janka, H.-T., Langanke, K., Marek, A., Martínez-Pinedo, G., & Müller, B. 2007, *Phys. Rep.*, 442, 38
Jarosik, N. et al. 2011, *ApJS*, 192, 14
Kennicutt, R. C., Jr. 1998, *ARA&A*, 36, 189
Kennicutt, R. C., Jr., Lee, J. C., Funes, S. J., José, G., Sakai, S., & Akiyama, S. 2008, *ApJS*, 178, 247
Kistler, M. D., Yuksel, H., Ando, S., Beacom, J. F., & Suzuki, Y. 2011, *Phys. Rev. D*, 83, 123008
Kobayashi et al. 2013, *ApJ*, 763, 1
Kochanek, C. S. et al. 2008, *ApJ*, 684, 1336

- Kroupa, P. 2002, *Science*, 295, 5552
Lattimer, J. M. & Prakash, M. 2007, *Phys. Rep.*, 442, 109
Law, N. M. et al. 2009, *PASP*, 121, 1395
Le Floc'h, E. et al. 2005, *ApJ*, 632, 169
Li, W. et al. 2011a, *MNRAS*, 412, 1441
Li, W. et al. 2011b, *MNRAS*, 412, 1473
Mannucci, F., Della Valle, M., & Panagia, N. 2007, *MNRAS*, 377, 1229
Maschberger, T. 2013, *MNRAS*, 429, 1725
Matteucci, F. & Greggio, L. 1986, *A&A*, 154, 279
Mattila, S. et al. 2012, *ApJ*, 756, 111
Maund, J. R. et al. 2006, *MNRAS*, 369, 390
Melinder, J. et al. 2011, *A&A*, 545, 96
Orr, M., Krennrich, F., & Dwek, E. 2011, *ApJ*, 733, 77
Pascale, E. et al. 2009, *ApJ*, 707, 1740
Paxton, B. et al. 2013, arXiv1301.0319P
Peacock, J. A. & Dodds, S. J. 1994, *MNRAS*, 267, 1020
Poelarends, A. J. T., Herwig, F., Langer, N., & Heger, A. 2008, *ApJ*, 675, 614
Pojmanski, G. 2007, *IAU Circ.*, 8875, 1
Prodanović, T., Fields, B.D., 2006, *ApJ*, 645, 125
Salim, S. et al. 2007, *ApJS*, 173, 267
Schaefer, B. E. 1996, *ApJ*, 464, 404
Schiminovich, D. et al. 2005, *ApJ*, 619, L47
Schiminovich, D. et al. 2007, *ApJS*, 173, 315
Smartt, S. J. 2009, *ARA&A*, 47, 63
Smartt, S. J., Eldridge, J. J., Crockett, R. M., & Maund, J. R. 2009, *MNRAS*, 395, 1409
Smith, N. et al. 2009, *ApJ*, 697, L49
Smith, N. et al. 2011, *ApJ*, 732, 63
Stoll, R., Prieto, J. L., Stanek, K. Z., Pogge, R. W., Szczygiel, D. M., Pojmanski, G., Antognini, J., & Yan, H. 2011, *ApJ*, 730, 34
Watson, C. R. et al. 2009, *ApJ*, 696, 2206
Wilkins, S. M., Hopkins, A. M., Trentham, N., & Tojeiro, R. 2008, *MNRAS*, 391, 363
Wilkins, S. M., Trentham, N., & Hopkins, A. M. 2008, *MNRAS*, 385, 687
Woosley, S. E. 1993, *ApJ*, 405, 273
Young, D. R., Smartt, S. J., Mattila, S., Tanvir, N. R., Bersier, D., Chambers, K. C., Kaiser, N., & Tonry, J. L. 2008, *A&A*, 489, 359
Yüksel, H., Kistler, M. D., Beacom, J. F., & Hopkins, A. M. 2008, *ApJ*, 683, L5
Yun, M. S., Reddy, N. A., & Condon, J. J. 2001, *ApJ*, 554, 803
Zhang, T., Wang, X., Li, W., Zhou, X., Ma, J., Jiang, Z., & Chen, J. 2006, *AJ*, 131, 2245

Biografija

Darko Donevski je rođen u Vršcu. Kao učenik generacije završio je osnovnu školu „Dositej Obradović“ u Plandištu i gimnaziju „Borislav Petrov Braca“ u Vršcu. Paralelno je studirao Prirodno-matematički fakultet u Novom Sadu i Fakultet tehničkih nauka. Studije na odseku za mikroelektroniku okončao je 2006. godine, dok je na PMF-u diplomirao 2007. godine na departmanu za fiziku, smer astronomija sa astrofizikom (tema: Uticaj tamne energije na evoluciju crnih rupa).

Nakon osnovnih studija, bio je stručni saradnik na međunarodnom Science Consulting projektu, a potom tri godine radio kao profesor fizike u srednjoj Hemijsko-medicinskoj školi.



Stipendiju fondacije „Exit“ za studijsku istraživačku praksu dobio je 2011. godine, kada odlazi na usavršavanje na Institut za teorijsku fiziku u Trstu, a novembra iste godine dobija zajedničku stipendiju instituta ICTP u Trstu i instituta INAF u Bolonji za program numeričkih metoda u astrofizici. Marta 2013. godine zvanično je primljen na veliki LOFAR-Herschel astronomski projekat koji realizuju holandski Univerzitet Lajden i Evropska svemirska agencija. Tamo će se, kao doktorant, baviti analizom protoklastera i pravljenjem modela za evoluciju strukture na velikoj skali.

Učestvovao je na devet međunarodnih konferencija i seminara.

Pored astronomije, bavi se književnošću (objavio je jednu knjigu poezije *Simetrija, spontano narušena*, i jednu radio-dramu *Zločin u pozorištu*), kao i šahom (dvostruki univerzitetski prvak u pojedinačnoj i ekipnoj konkurenciji).

Osnivač je i autor naučno-popularnog bloga „SAPIENS KLUB“.

UNIVERZITET U NOVOM SADU
PRIRODNO-MATEMATIČKI FAKULTET

KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA

Redni broj:

RBR

Identifikacioni broj:

IBR

Tip dokumentacije:

TD

Tip zapisa:

TZ

Vrsta rada:

VR

Autor:

AU

Mentor:

MN

Naslov rada:

NR

Jezik publikacije:

JP

Jezik izvoda:

JI

Zemlja publikovanja:

ZP

Uže geografsko područje:

UGP

Godina:

GO

Izdavač:

IZ

Mesto i adresa:

MA

Fizički opis rada:

FO

Naučna oblast:

NO

Naučna disciplina:

ND

Predmetna odrednica/ ključne reči:

PO

UDK

Čuva se:

ČU

Važna napomena:

VN

Izvod:

IZ

Monografska dokumentacija

Tekstualni štampani materijal

Diplomski - Master rad

Darko Donevski

Prof. dr Tijana Prodanović

Problematika određivanja stope eksplozija supernovih

srpski (latinica)

srpski/engleski

Republika Srbija

Vojvodina

2013.

Autorski reprint

Prirodno-matematički fakultet, Trg Dositeja Obradovića 4, Novi Sad

3/49/44/9/8

Astrofizika

Nuklearna astrofizika / evolucija galaksija

Supernove; Stopa formiranja zvezda; Stopa formiranja supernovih;

Evolucija zvezda; Evolucija galaksija; Modeliranje evolucije hemijskih elemenata u galaksiji;

Biblioteka departmana za fiziku, PMF-a u Novom Sadu

Nema

Ovaj rad bavi se analizom dva aktuelna problema u modernoj astrofizici: prvi je vezan za nerešen status odnosa teorijski predviđene stope formiranja zvezda i izmrerene brojnosti supernovih, dok je drugi vezan za posledice koje bi imala eventualna neusaglašenost ovih vrednosti na modele galaktičke hemijske evolucije.

Datum prihvatanja teme od NN veća:

15/06/2013.

DP

Datum odbrane:

12/08/2013.

DO

Članovi komisije:

KO

Prof. Dr Dušan Mrđa

Prof. Dr Tijana Prodanović

Dr Miroslav Mićić

član:

član:

UNIVERSITY OF NOVI SAD
FACULTY OF SCIENCE AND MATHEMATICS

KEY WORDS DOCUMENTATION

Accession number:

ANO

Identification number:

INO

Document type:

Monograph publication

DT

Type of record:

TR

Content code:

CC

Author: Darko Donevski

AU

Mentor/comentor: Prof. Dr Tijana Prodanović

MN

Title: Problematics of the Determination of Supernovae Explosions Rate

TI

Language of text: Serbian (Latin)

LT

Language of abstract: English

LA

Country of publication: Serbia

CP

Locality of publication: Vojvodina

LP

Publication year: 2013.

PY

Publisher: Author's reprint

PU

Publication place: Faculty of Science and Mathematics, Trg Dositeja Obradovića 4, Novi Sad

PP

Physical description: 5/182/32/0/71/0/3

PD

Scientific field: Astrophysics

SF

Scientific discipline: Nuclear astrophysics/Stellar Evolution

SD

Subject/ Key words: Core Collapse Supernovae; Core Collapse Supernova Rate; Star Formation

Rate; Initial Mass Functons; Evolution of Lithium-6 in Galaxy; Hadronic

Gamma-rays

Holding data: Library of Department of Physics, Trg Dositeja Obradovića 4

HD

Note: none

N

Abstract:

AB

Core Collapse Supernovae are giving back to the ISM and IGM large amount of gas transformed into heavy elements by nuclear reactions. Modeling of their effect leads to predictions of star formation timescales. Here are noted discrepancy between those two values and possible astrophysical consequences.

Accepted by the Scientific Board:

15/06/2013.

ASB

Defended on:

12/08/2013.

DE

Thesis defend board:

DB

President: Prof. Dr Dušan Mrda

Member: Prof. Dr Tijana Prodanović

Member: Dr Miroslav Mićić