

UNIVERZITET U BEOGRADU
MATEMATIČKI FAKULTET

Nemanja S. Martinović

**EVOLUCIJA PATULJASTIH GALAKSIJA U
JATIMA GALAKSIJA MALE MASE**

doktorska disertacija

Beograd, 2017.

UNIVERSITY OF BELGRADE
FACULTY OF MATHEMATICS

Nemanja S. Martinović

**EVOLUTION OF DWARF GALAXIES IN
THE LOWER MASS CLUSTERS OF
GALAXIES**

Doctoral Dissertation

Belgrade, 2017.

Mentor:

dr Miroslav MIĆIĆ,

naučni saradnik

Astronomska opservatorija, Beograd

Članovi komisije:

prof. dr Dragana ILIĆ,

vanredni profesor

Univerzitet u Beogradu,

Matematički fakultet

dr Branislav VUKOTIĆ,

viši naučni saradnik

Astronomska opservatorija, Beograd

Datum odbrane: _____

Zahvalnica

Ova disertacija je izrađena dok sam bio zaposlen kao istraživač-saradnik u okviru projekta OI 176021 „Vidljiva i nevidljiva materija u bliskim galaksijama: teorija i posmatranja” na Astronomskoj opservatoriji u Beogradu.

Ispostavilo se, nekako, da je ovo ispao najteži deo teze za pisanje. Ne zato što ne znam kome da zahvalim, nego, naprotiv, zbog toga što mislim da jednostavno neće biti prostora da pomenem sve ljude, iz ovih godina koje su iza mene, koji su stekli moju večnu zahvalnost i poštovanje. Nadam se da ćete mi oprostiti zato što ću pomenuti samo manji deo vas.

Pre svega bih želeo da se zahvalim dr Mirolavu Mičiću, mentoru i prijatelju, bez koga sasvim sigurno ne bih u astrofizici postigao ni ovoliko koliko jesam. Da nije bilo njega i njegovog strpljenja, vođstva i mudrosti nikada ne bih upoznao svet numeričke astrofizike, za koji se ispostavilo da mi je kao sašiven po meri.

Voleo bih da se zahvalim i drugim kolegama i prijateljima sa kojima mi je život, na moju sreću, isprepletan - Bojanu Mojsiloviću, čoveku sa kojim imam prijateljstvo koje bi uskoro moglo da dostigne godina za redovnu penziju i na koga mogu apsolutno uvek da računam; dr Ivanu Miliću, koji se nalazi pola kontinenta daleko a još uvek ima vremena za mene i čija širina životnih i interesovanja za astrofiziku inspiriše.

Dr Milanu Ćirkoviću, na neiscrpnim temama za stimulatívne rasprave, dr Dejanu Uroševiću koji me je zadužio verovatno više puta nego što se verovatno seća, akademiku dr Zoranu Kneževiću čiju autobiografiju čekam sa uživanjem da pročitam i dr Srđanu Samuroviću koji mi je pružio priliku da se formalno bavim astrofizikom kada me je prihvatio na svoj projekat.

Zahvalio bih se i kolegama i prijateljima koji uz mene koračaju kroz svet nauke u Srbiji - dr Majdi Smole, Ani Mitrašinović i Stanislavu Miloševiću za koje mogu reći da sam izuzetno ponosan što ih smatram najbližim saradnicima, kao i Milanu Stojanoviću, bez koga sigurno ne bih bio ovoliki čovek.

Dr Branislavu Vukotiću i dr Dragani Ilić moram zahvaliti što su pristali da budu članovi komisije za ovu tezu. Bane je neumorno isčitavao ovu disertaciju i

dobijao bezbrojne ideje tokom čitanja. Naslućujem da će tu biti stvarno fantastičnih zajedničkih projekata u godinama koje dolaze.

U Petnici imam osećaj da sam proveo više godina nego što stvarno jesam, pri čemu sam imao priliku da steknem saznanja o oblastima i stvarima za koje imam utisak da bi ih teško stekao da ona ne postoji. Takođe sam imao priliku da upoznam i fantastične ljude: Andreja, Mateju, Dušana, Lazara, Jovanu, Nikolinu, Petra i mnoge druge za koje se iskreno nadam da će mi biti deo života duže nego što mogu da zamislim.

Bila bi neoprostiva greška da ne pomenem kolektiv ITekako-a, koji mi je pružio samopouzdanje kada mi je najviše trebalo. To je mesto koje mi izmami osmeh i kad nisam tamo i gde rade ljudi kao što su Bojan Petrović, Velimir Šuša, Marko Nikolić, Miloš Jankucić, Aleksandar Lazović, Ognjen, Jelena, Đole, Sima, Nena, Sanja... Ljudi čije prijateljstvo izuzetno cenim.

Mojim roditeljima, Slaviši i Ljilji, moram odati priznanje za podršku koju mislim da retko ko ima na ovoj steni. Takođe i Marku, mom bratu, koji uspešno krije koliko mu je stalo do mene i Sandri, njegovoj ženi, koja uspešno uspeva da ga raskrinka u tome. Voleo bih da pomenem i par ljudi koji nisu više sa nama, ali su mi bili dragi i kojih se često setim - dedu Kuzmana, kao osobu koja je umnogome uticala na to kakav sam ispao kao čovek; baba Vuku za koju sumnjam da je odgovorna za moju neizmernu ljubav prema astronomiji; deda Dragana i baba Micu koji nikada nisu krili koliko su ponosni na mene.

I na kraju, iskreno nisam siguran da mogu niti da želim da zamislim život bez Marije i dva mala zvrka, Vukana i Tihane.

U Beogradu, jul 2017.

N.M.

Mariji

Naslov disertacije: EVOLUCIJA PATULJASTIH GALAKSIJA U JATIMA GALAKSIJA MALE MASE

Rezime: U okviru ove disertacije će biti predstavljeni rezultati analize formiranja, rasprostranjenosti i evolucije patuljastih galaksija iz kosmoloških simulacija. Biće predstavljena prva kosmološka simulacija koja je u potpunosti izvedena i analizirana u Srbiji. Iz dobijenih rezultata je pokazano kako se formirala struktura na velikim skalama, pre svega kako se formiraju jata galaksija. Kako su jata galaksija dominantne strukture u svemiru, koje se relativno sporo formiraju u odnosu na postojanje svemira, korišćenjem Illustris simulacije, u kojoj je uključena kompletna fizika, biće pokazano da značajan deo jata galaksija nije u stanju dinamičke ravnoteže, kako neki autori tvrde, odnosno da su u procesu formiranja i danas. Dobijeni rezultati će biti iskorišćeni da se jata galaksija podele na tri tipa: jata u interakciji, jata koja interaguju sa manjim grupama (slabo interagujuća jata) i jata galaksija koja nisu u interakciji. Kako patuljaste galaksije po svom broju čine najveći broj galaksija u svemiru, a pogotovu u jatima, ovo postavlja pitanje kako trenutni procesi u kojima se jata nalazi utiču na strukturu i rasprostranjenost različitog tipa patuljastih galaksija. Nakon kratkog pregleda danas poznatih tipova patuljastih galaksija, pokazaćemo da postoji osetljivost rasprostranjenosti patuljastih nepravilnih galaksija u odnosu na to da li je matično jato galaksija u interakciji ili ne. Kako se pretpostavlja da su patuljaste nepravilne galaksije prethodnici za formiranje najbrojnijih tipova patuljastih galaksija, ovo bi moglo da ukaže na dominantan kanal dopremanja tih galaksija u jata galaksija gde se očekuje da dožive morfološku transformaciju. Na kraju će biti predstavljeno otkriće dva kanala formiranja za kompaktne eliptične galaksije u jatima galaksija. Formiranje ovog tipa patuljastih galaksija je bilo predmet diskusije zbog ograničenja u posmatranjima i njihove kompaktne prirode iz koje nije moglo da se zaključi koji proces dovodi

do njihovog formiranja. Ovde je pokazano da nastaju ili plimskim ogoljavanjem velikih spiralnih galaksija nakon njihovog upada u jato ili formiranjem direktno u jatu iz oblaka gasa koji je formiran najverovatnije akrecijom hladnog gasa iz okoline.

Ključne reči: patuljaste galaksije, jata galaksija, numeričke simulacije, halo i tamne materije, evolucija galaksija

Naučna oblast: Astronomija

Uža naučna oblast: Vagalaktička astronomija

UDK broj: 524.4(043.3)

Dissertation title: Evolution of dwarf galaxies in the lower mass clusters of galaxies

Abstract: Within this dissertation results from the analysis of formation, abundance and evolution of the dwarf galaxies from cosmological simulations will be presented. We will present results from first cosmological simulation which was performed and analyzed in its entirety in Serbia. From the obtained results it was shown how the large scale structure formed, primarily the formation of clusters of galaxies. Since the clusters of galaxies are dominant structures in the universe, which are relatively slowly forming in relation to the existence of the universe, using the Illustris cosmological simulation, with included hydrodynamics, it will be shown that a significant part of the clusters of galaxies are not in the state of dynamic equilibrium, as some authors claim, therefore their formation process continues. The obtained results will be used to divide the clusters of galaxies into three types: interacting clusters, clusters interacting with smaller groups (weakly interacting clusters), and clusters of galaxies that are not interacting. As the dwarf galaxies constitute largest number of galaxies in the universe, notably largest number in the clusters of galaxies, this raises the question how cluster's interactions affect the structure and abundance of a diverse type of dwarf galaxies within them. After a brief review of today's known types of dwarf galaxies, we will show that there is susceptibility of the abundance of dwarf irregular galaxies in relation to whether the parent cluster of galaxies is in interaction or not. As it is assumed that the dwarf irregular galaxies are predecessors for the formation of the most numerous types of dwarf galaxies, this could point to the dominant channel of delivering these galaxies to clusters of galaxies where they are expected to undergo morphological transformation. In the end, the discovery of two formation channels for compact elliptical galaxies in the clusters of galaxies will be presented. The

formation of this type of dwarf galaxies has been the subject of discussion due to limitations in observations and their compact nature from which it could not be concluded which process leads to their formation. It has been shown here that they occur either by tidal stripping of large spiral galaxies after their spiraling into the cluster of galaxies or forming directly inside clusters from the clouds of gas which is most probably formed by the accretion of cold gas from the environment.

Keywords: dwarf galaxies, cluster of galaxies, numerical simulations, dark matter halos, evolution of galaxies

Research area: Astronomy

Research sub-area: Extragalactic astronomy

UDC number: 524.4(043.3)

Sadržaj

1	Uvod	1
1.1	Kosmološke simulacije	2
1.1.1	Početni uslovi	4
1.1.2	Računanje sile	5
1.1.3	Integracija vremena	9
1.1.4	Algoritmi za detekciju haloa	10
1.1.5	Drvo sudara	12
1.2	Terminologija	12
2	Funkcija mase haloa kao metod ispitivanja formiranja struktura	14
2.1	Uvod	14
2.2	Parametri kosmološke simulacije	16
2.2.1	Kompjuterski resursi	18
2.2.2	Katalozi haloa i drvo sudara	20
2.3	Analiza formiranja struktura	23
2.3.1	Vizuelizacija haloa	23
2.3.2	Gustina haloa tamne materije kroz vreme	24
2.3.3	Statistika velikih sudara	26
2.3.4	Vreme formiranja haloa	29
2.4	Funkcija mase haloa	31

2.4.1	Funkcije za fitovanje	35
2.4.1.1	Pres Šekter	35
2.4.1.2	Šet Mo i Tormen	35
2.4.1.3	Voren	36
2.4.1.4	Angulo	36
2.4.1.5	Uporedna analiza fitova	38
2.5	Funkcija rasta haloa	38
2.6	Diskusija	41
3	Dinamička podela jata galaksija	48
3.1	Uvod	48
3.2	Ilustris-1 kosmološka simulacija	50
3.3	Identifikovanje jata galaksija u simulaciji	52
3.4	Dinamika jata kroz eliptičnost orbita njegovih članova	54
4	Tipovi patuljastih galaksija i njihove karakteristike	65
4.1	Uvod	65
4.1.1	Patuljaste eliptične galaksije - dE	73
4.1.2	Patuljaste sferoidalne galaksije - dSph	76
4.1.3	Patuljaste nepravilne galaksije - dIrr	78
4.1.4	Kompaktne eliptične galaksije - cE	80
4.1.5	Ultra kompaktne patuljaste galaksije - UCD	82
4.1.6	Patuljaste spiralne galaksije - dS	83
4.1.7	Plave kompaktne patuljaste galaksije - BCD	84
4.1.8	Ultra difuzne galaksije - UDG	85
4.1.9	Patuljaste galaksije u kosmološkim simulacijama	87
5	Uticao dinamike jata galaksija na zastupljenost morfoloških tipova patuljastih galaksija	89

5.1	Uvod	89
5.2	Patuljaste galaksije ranog tipa	90
5.2.1	Patuljaste eliptične galaksije u jatima galaksija	90
5.2.2	Ultra difuzne galaksije u jatima galaksija	91
5.3	Patuljaste galaksije kasnog tipa	93
5.4	Diskusija	95
6	Formiranje kompaktnih patuljastih galaksija u jatima galaksija	100
6.1	Uvod	100
6.2	Identifikovanje kandidata	101
6.3	Dve populacije kompaktnih patuljaka	105
6.3.1	Eksterno formirana populacija	106
6.3.2	<i>In situ</i> formirana populacija	110
6.4	Diskusija	111
7	Rezime i zaključak	121
7.1	Rezime	121
7.2	Zaključak	122
	Bibliografija	124

Glava 1

Uvod

Trenutno dominantna kosmološka paradigma jeste model hladne tamne materije sa kosmološkom konstantom, odnosno takozvani - Λ CDM model. Osnova ovog modela su hladna tamna materija, koju čine masivne barionske nerelativističke (zbog čega se i zove hladna) čestice koje interaguju samo gravitaciono (iako ima indicija i za moguću nuklearnu slabu interakciju) i pored nje, imamo tamnu energiju (Λ) koja se odlikuje negativnim pritiskom, što kao posledicu ima ubrzano širenje svemira.

Jedan od glavnih zadataka u okviru te paradigme jeste rešavanje pitanja formiranja i evolucije struktura u svemiru. Kao i u svim pokušajima opisivanja ponašanja prirode i ovde postoji tendencija ka pronalasku analitičkih rešenja koja bi uspešno objasnila ponašanje strukture. Međutim zbog kompleksnosti problema izvesno je da, ukoliko takva rešenja ikada budu nađena, da to neće biti u skorijoj budućnosti. Stoga su numerička rešenja esencijalna alatka za ispitivanje formiranja struktura na svim skalama. U kontekstu formiranja i evolucije struktura numerička rešenja se svode pre svega na izvršavanje i analizu numeričkih simulacija N-tela.

U okviru ove disertacije će biti razmatrani svi koraci evolucije struktura, od razmatranja problema velikih struktura i analize njihove evolucije, preko detaljnijeg

uvida u dinamiku jata galaksija kao dominantnih struktura na velikim skalama, i zatim njihovog uticaja na formiranje, evoluciju i rasprostranjenost različitih tipova patuljastih galaksija. Biće pokazano da rasprostranjenost patuljastih nepravilnih galaksija zavisi od toga da li je njihovo matično jato u interakciji ili ne, a zatim i presudan uticaj jata galaksija na formiranje kompaktnih eliptičnih galaksija.

U svrhu ispitivanja pomenutih problema, rezultati u okviru ove disertacije će se oslanjati na upotrebu kosmoloških simulacija. Zbog toga ćemo se osvrnuti na neke tehničke karakteristike koje sve kosmološke simulacije N-tela dele između sebe. Svaka simulacija se sastoji od generisanja početnih uslova, izvršavanja same simulacije i analize dobijenih rezultata.

1.1 Kosmološke simulacije

Još od ingenioznih radova Holmberga 1941. godine (Holmberg, 1941), koji je koristio set sijalica da izvrši simulaciju gravitacione interakcije N-tela u cilju ispitivanja interakcija galaksija i pionirskih radova nakon njega, rast kompjuterske snage je omogućio napredak u numeričkoj fizici (Dehnen & Read, 2011). U današnje vreme zajedno sa posmatranjima dubokog polja i velikim pregledima neba, kosmološke simulacije su nezamenljivi deo nove ere precizne kosmologije.

Kosmološke simulacije se koriste za izučavanje evolucije velikih struktura, izučavanja (kosmološkog) lokalnog svemira i za izučavanja evolucije galaksija. Povećanje rezolucije mase u simulacijama je omogućilo da se proučava evolucija haloa sa više detalja (i opšta distribucija istih i evolucija unutrašnjih struktura u haloima).

Većina materije u svemiru je tamna i inicijalno je ravnomerno raspoređena (White, 1994). Iz simulacija vidimo da iz te kvazi-ravnomerne raspodele, nastaje skupina ravnih površi, filamenata i jata koja je nazvana kosmička mreža (Bond et al., 1996). Glavni činioци tih struktura su u formi haloa tamne materije, virija-

lizovanih gustih grumena tamne materije (Cooray & Sheth, 2002). Imajući u vidu da su ti halo i takođe potencijalne jame u koje materija upada jasno je da se u okviru njih galaksije formiraju, gde potom snažno utiču i na evoluciju istih (White & Rees, 1978). Štaviše, razumevanje evolucije sveobuhvatnog polja gustine tamne materije oličene u tavnim haloima bi nam pomoglo u objašnjavanju grupisanja galaksija (Kauffmann et al., 1999).

Do poslednjih nekoliko godina, kosmološke simulacije su isključivo, zbog ograničenosti kompjuterskih resursa, imale uključene samo čestice tamne materije, koje predstavljaju dominantnu komponentu materije u Λ CDM kosmološkom modelu. Tokom izvršavanja kosmoloških simulacija u predefinisanim periodima se vrši ispis relevantnih parametara čestica u fajlove koji su nazvani preseci stanja (en. snapshot). Za kosmološke simulacije koje sadrže isključivo tamnu materiju, takvi preseci stanja sadrže osnovne parametre, identifikacioni broj čestice, položaje i brzine, koji se dalje mogu koristiti za računanje ostalih parametara po potrebi (impuls, momenti). Dublja analiza zahteva primenu semi-analitičkih modela, koji koriste slaganje opštih karakteristika posmatranih objekata sa odgovorajućim rezultatima iz kosmoloških simulacija u cilju razumevanja njihove evolucije (Mo et al., 2010). Međutim u poslednjih nekoliko godina, sa većim kompjuterskim resursima na raspolaganju, postalo je moguće uključiti i barionsku komponentu u same kosmološke simulacije i time direktno ispitivati željene procese (formiranje galaksija, hlađenje i zagrevanje gasa, itd.). U kosmološke simulacije se mogu uvesti, pored čestica tamne materije, i čestice gasa i čestice zvezda kao dominantnih barionskih komponenti. To povlači i računanje hidrodinamičkih procesa, gde od same implementacije u kosmološkoj simulaciji zavisi koji i koliko će ih biti uključeno. Preseci stanja samim tim sadrže daleko više informacija (temperatura gasa, metaličnost zvezda i gasa, starost zvezda, itd. u zavisnosti šta je uključeno). Sjajan i detaljan pregled fizičkih procesa koji mogu biti uključeni u kosmološkim simulacijama sa

barionskom materijom je dat u radu Vogelsberger et al. (2013).

1.1.1 Početni uslovi

Kao što je nagovešteno, materija u svemiru je dominantno hladna tamna materija i nakon inflacije je ravnomerno raspoređena. Da bismo izvršili simulaciju N-tela, potrebno je da je predstavimo diskretno sa što većim brojem čestica u simulaciji koje su uniformno raspoređene, nakon čega projektujemo potencijalno polje koje odgovara fluktuacijama gustine koje vidimo u pozadinskom kosmičkom zračenju. Potencijalno polje se projektuje tako što se česticama daju brzine koje bi imale pod njegovim uticajem. Zatim se sistem sa uniformno raspoređenim česticama i datim brzinama pušta da gravitaciono interaguje.

Generisanje uniformne raspodele čestica se pokazalo kao poseban problem (White, 1994) - naime, inicijalno je korišćena Poasonova raspodela prilikom postavljanja čestica u nekom prostoru da bi se dobila ravnomerna raspodela čestica. Međutim pokazalo se da to dovodi do formiranja struktura koje su posledica toga da ta raspodela nije savršena. Tj. ukoliko bismo pustili gravitacionu interakciju između čestica u mirovanju koje su na taj način ravnomerno raspoređene, počele bi da se formiraju strukture. Da bi se to izbeglo, nađeno je ingeniozno rešenje. Čestice bi bile raspoređene ravnomerno na taj način i bilo bi pušteno da interaguju gravitaciono, međutim sa odbojnom gravitacionom silom (promenjen znak). Nakon dovoljno vremena, čestice bi zauzele položaje u kojima je rezultanta sile jednaka nuli - i takvi dobijeni položaji bi predstavljali savršenu uniformnu raspodelu, pa bi se onda oni koristili za dalji rad. Takva raspodela se naziva raspodela nalik strukturi stakla (en. glass-like) i danas je dominantan način za generisanje početnog stanja simulacije.

Nakon što imamo uniformnu raspodelu, na čestice se projektuje potencijalno polje koje odgovara mikrotalasnom pozadinskom zračenju. To polje se realno ma-

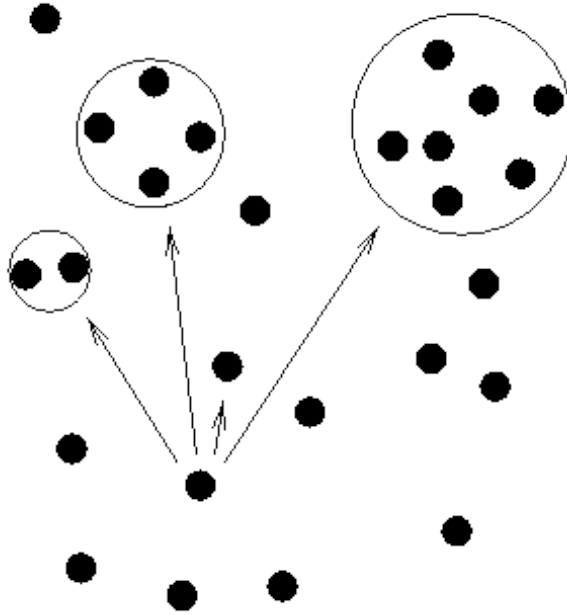
nifestuje sa početnim brzinama koje dobije svaka od čestica.

Srećom, još radovima Zeljdoviča (Zel'dovich, 1970) je utvrđeno da nije neophodno odmah ući u numerički, odnosno nelinearni režim, nego da je moguće jednostavno pustiti čestice da se kreću u zadatim pravcima sa zadatim brzinama. Ovaj deo simulacije se naziva linearni deo simulacije i traje sve dok bilo koje dve čestice ne dođu dovoljno blizu da njihova međusobna gravitaciona interakcija ne postane značajna (tj. da će značajno promeniti kretanje neke od čestica). Ovaj režim, teorijski opravdan, je koristan pošto se time štede značajne količine kompjuterskog vremena i smanjuje uticaj numeričkih efekata. Pored takozvane Zeljdovičeve aproksimacije, koja je bila aproksimacija prvog reda, danas se koriste aproksimacije višeg reda, pre svega Lagranževa teorija perturbacije drugog reda (Crocce et al., 2006).

Nakon što se završi period linearnog rasta, dobijeni položaji, brzine i crveni pomak predstavljaju početne uslove za nelinearan deo simulacije i njeno numeričko računanje može da počne.

1.1.2 Računanje sile

Kosmološke simulacije N-tela predstavljaju sisteme u kojima su dugoročni efekti bliske interakcije dva tela zanemarljivi (Dehnen & Read, 2011), odnosno predstavljaju bezsudarne sisteme (en. collisionless). Preciznije, kako čestice imaju značajnu masu, nije fizički opravdano da dolazi do bliskih prolaza sa drastičnom razmenom energije i nije fizički opravdano da se formiraju binarni parovi takvih čestica. Da bi se takve situacije izbegle, pošto mogu da unesu numerički neopravdane efekte u simulaciju, uvodi se dužina ublažavanja (en. gravitational softening) koja predstavlja minimalnu vrednost rastojanja između dve čestice ispod koga nema gravitacione interakcije. Stoga formula za računanje sile je modifikovana do



Slika 1.1: Vizualizacija funkcionisanja algoritma drveta za aproksimaciju gravitacione interakcije.

na dužinu ublažavanja i izgleda:

$$\vec{F}_i = \sum \frac{Gm_i m_j (\vec{r}_i - \vec{r}_j)}{(|r_i - r_j|^2 + \epsilon^2)^{\frac{3}{2}}} \quad (1.1)$$

gde je ϵ dužina ublažavanja, G univerzalna gravitaciona konstanta, $r_{i,j}$ položaji čestica, $m_{i,j}$ njihove mase, a F_i rezultujuća sila između njih.

Ovakvo računanje sile se zove direktna sumacija i predstavlja jako skup način za računanje gravitacione interakcije, međutim neophodan u simulacijama u kojima su međusobne interakcije čestica bitne (en. collisional), kakve bi recimo bile simulacije dinamike u globularnim jatima. Pošto, kako je već navedeno, bliska interakcija nije presudna za kosmološke simulacije, moguće je uvesti dodatne aproksimacije u cilju efikasnijeg računanja rezultujuće sile.

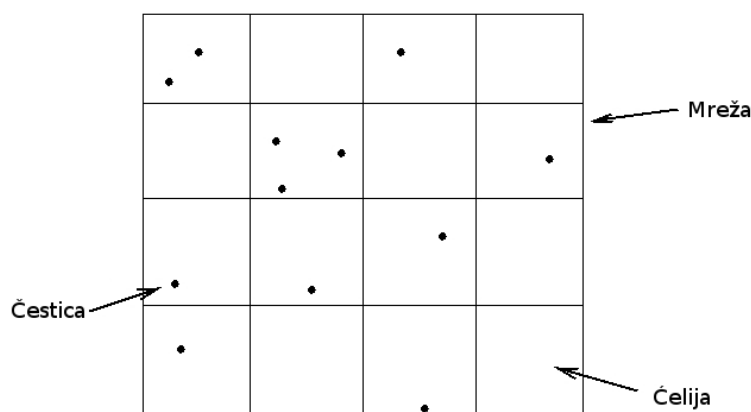
Dva najpopularnija načina za aproksimaciju računanja sile su algoritmi drveta (en. tree), koje ne treba mešati sa drvetom sudara koje će biti karakteristično za

analizu, kao i algoritam čestica-mreža (en. particle-mesh).

Algoritam drveta se svodi na eksploataciju velikih rastojanja između čestica (Barnes & Hut, 1986). Naime, kako je prikazano na slici 1.1, za svaku česticu se računa rezultanta gravitacione sile uticaja svih ostalih čestica u simulaciji. Pošto je očigledno da su u odnosu na česticu koja se računa, neke od čestica jako daleko, možemo grupu čestica na međusobno bliskom rastojanju da posmatramo kao jednu veliku rezultujuću česticu. Sa ovim smo broj računskih operacija smanjili za broj čestica koje smo zamenili sa rezultujućom i time za toliko „ubrjali” simulaciju. Ovaj algoritam pokazuje najveći doprinos ukoliko postoje jasno grupisane međusobno dovoljno odvojene strukture u simulacionoj kutiji, jer se time svaka od struktura u odnosu na čestice iz druge strukture može posmatrati kao jedna struktura.

Drugi jako popularan algoritam jeste takozvani čestica-mreža (en. particle-mesh) i eksploatiše karakteristiku simulacija N-tela u kojima bliske interakcije nisu bitne (Efsthathiou et al., 1985). U takvim sistemima potencijalno polje koje formiraju diskretne čestice može dobro da se aproksimira sa glatkim ukupnim rezultujućim potencijalom. Kao posledica toga je moguće u svakom trenutku računanja generisati ukupni potencijal koji formiraju čestice i zatim umesto čestica-čestica interakcije računati samo čestica-polje interakciju, čime se vreme računanja drastično smanjuje. Međutim odmah je jasno da je doprinos bliskih čestica sa ovim načinom računanja zanemaren, što uvodi veliku grešku. Da bi se to rešilo, algoritam u realizacijama zapravo pravi mrežu kroz celu simulaciju i onda računa koliko je svaka ćelija mreže udaljena od ispitivane čestice. Ukoliko su ćelije mreže daleko, pribegava se čestica-polje računanju rezultujuće sile (slika 1.2), ukoliko su čestice blizu, računanje sile se svodi na čestica-čestica interakciju kako je i ilustrovano na slici 1.1.

Pored ovih, poslednjih godina su postali popularni i algoritmi sa adaptivnom



Slika 1.2: Vizualizacija funkcionisanja algoritma čestica-mreža za aproksimaciju gravitacione interakcije.

mrežom. Oni funkcionišu slično kao čestica-mreža algoritam, ali sa tim dodatkom da ukoliko imamo prostor veće gustine, odnosno u kome se nalazi više čestica, mreža se usitnjava što dovodi do preciznijeg računanja sile prilikom čestica-polje interakcije.

Kako svaki algoritam za aproksimaciju računanja sile ima svoje prednosti i mane, nije neuobičajeno da se kombinuju. Tako najpopularniji programi za simulacije N-tela recimo imaju kombinaciju algoritma drveta i algoritma čestica-mreža. Kako je prvi algoritam veoma neefikasan ukoliko su čestice ravnomerno raspoređene, a drugi upravo kada imamo jasno izražene strukture u kosmološkim simulacijama, iskombinovani su tako da je algoritam čestica-mreža dominantan u početnim trenucima simulacije, pre nego što su se formirale strukture i kada je raspodela još uvek približno uniformna, dok je algoritam drveta dominantan kasnije u simulaciji kada je postojanje velikih struktura jasno izraženo.

1.1.3 Integracija vremena

Pored očigledne diskretizacije polja gustine koje se predstavlja sa N čestica, u kosmološkim simulacijama postoji još i diskretizacija vremenskih trenutaka u kojima se računa promena položaja i brzine svake čestice. Idealno bi bilo koristiti infinitezimalno male vremenske korake, ali bi time i vreme trajanja simulacije težilo realnom vremenu, pa je ovo iz praktičnih razloga nemoguće. Stoga diskretizacija vremenskih koraka predstavlja jedan od značajnih izvora numeričkih grešaka u simulaciji. I tu se koriste aproksimacije da bi odnos željene preciznosti i vremena izvršavanja simulacije bio optimalan, tj. da simulacija traje neki razuman vremenski period, a da se greške svedu na šum definisan veličinom struktura koje se ispituju (Dehnen & Read, 2011).

Ispostavlja se da su algoritmi za integraciju vremena drugog reda najbolje rešenje za kosmološke simulacije, specifično tzv. *leapfrog* algoritam sa adaptivnim korakom. Taj algoritam je primer simplektičkog integratora, koji egzaktno rešavaju problem hamiltonijana. Promena položaja (x) i brzine (\dot{x}), usled ubrzanja (a) se sa njim računa kao:

$$\begin{aligned}\dot{x}' &= \dot{x}_0 + \frac{1}{2}a_0\Delta t \\ x_1 &= x_0 + \dot{x}'\Delta t \\ \dot{x}_1 &= \dot{x}' + \frac{1}{2}a_1\Delta t\end{aligned}\tag{1.2}$$

gde 0 i 1 označavaju t i $t + \Delta t$ vremenske trenutke. Kao što se iz jednačina vidi, ovaj metod karakteriše to što se u okviru jednog koraka prvo računa promena brzine obično do pola vremenskog intervala, pa se zatim računa promena položaja za ceo interval, i nakon toga brzina za ostatak intervala.

Adaptivni korak se upotrebljava u situacijama kada dolazi do jakih gravitacionih interakcija, pri kojima se vremenski korak „usitnjava” da bi se smanjila

numerička greška. Na primeru kretanja komete oko Sunca, adaptivni korak bi se koristio prilikom bliskog prolaza pored Sunca, dok bi se „regularni” korak koristio u ostatku orbite.

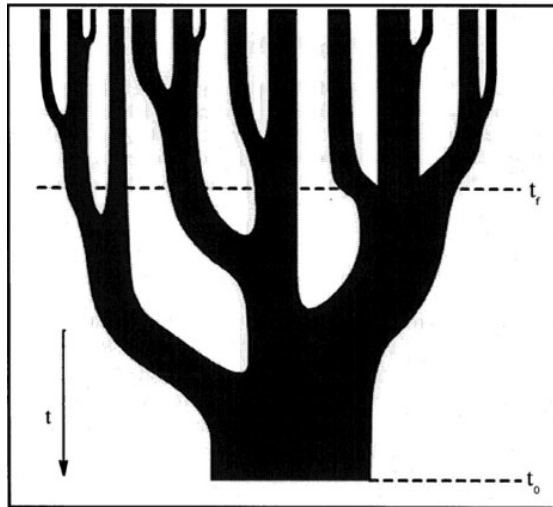
Ovaj algoritam se koristi za vremensku integraciju u svim modernim kosmološkim simulacijama.

1.1.4 Algoritmi za detekciju haloa

Svaka analiza koja se tiče haloa tamne materije, naravno prvo zahteva da se iz datih preseka stanja identifikuje struktura koja predstavlja halo, a zatim da se odredi njena masa i ostale karakteristike (Lukić et al., 2007).

Formalizam za identifikaciju haloa je prvo uveden radom Presa i Šektera (Press & Schechter, 1974). Njihova metoda se svela na pretpostavku da halo nastaju sferičnim kolapsom. To im je omogućavalo da haloe pronađu na sledeći način: prvo su našli tačke najveće gustine u simulaciji; te tačke se označe kao centri haloa; nakon toga, pomerajući se u sfernim ljuskama oko tačke najveće gustine, čestice koje se nalaze u tim ljuskama se prisvajaju svojim respektabilnim haloima; ceo proces se ponavlja, odnosno dodaju se ljuske, sve dok gustina u sferi ne postane jednaka prosečnoj teoretskoj gustini svemira u simulaciji. Time je identifikovan halo i prisvojene su mu čestice koje ga sačinjavaju, a iz čega se mogu izračunati osnovne karakteristike haloa kao što su masa i radijus. Ovaj metod se koristi i u modernim programima za identifikaciju haloa, a zbog osnovne pretpostavke nazvan je model sferne gustine (en. *overdensity*).

Još jedan pristup nazvan slikovito prijatelji-prijatelja (en. *friends-of-friends*) je razvijen od strane Dejvisa i koautora (Davis et al., 1985). Oni su halo definisali tako što su grupisali čestice koje se nalaze na određenom rastojanju jedne u odnosu na drugu. Metod počinje tako što se od zadate čestice proveravaju udaljenosti do svih ostalih čestica u simulaciji. Kada se nađu čestice unutar zadatog radijusa, one



Slika 1.3: Ilustracija drveta sudara preuzeta iz rada Lejsija i Kola (Lacey & Cole, 1993). Na slici, vreme teče od gore ka dole, vidi se kako različite strukture interaguju i formiraju jednu veliku strukturu u krajnjem vremenskom trenutku.

se prisvajaju halou, a zatim se od svake od njih proverava da li postoje čestice u odnosu na njih koje su takođe unutar zadatog radijusa. Time se radijus pomera, sve do trenutka kada se više ne mogu naći povezane čestice (koje već nisu članovi haloa) unutar radijusa od svih čestica u halou ponaosob. Metod se svodi na korišćenje jednog slobodnog parametra, dužine povezivanja (en. linking length), koji definiše koje udaljenosti će biti korišćene da bi se grupisale čestice. Ovaj bezdimenzioni parametar predstavlja procenat srednjeg rastojanja čestica u simulaciji, pri čemu se obično uzima $b = 0.2$.

Praktično svi programi za detekciju haloa razvijeni do danas koriste jedan od ova dva algoritma ili neku kombinaciju njih. Rezultat ovih programa obično ispisuje zasebne fajlove koji se nazivaju katalozi haloa i koji sadrže pored osnovnih informacija za haloe (položaj, brzina, masa, radijus) i dodatne parametre, kako je već definisano programom kojim su detektovani. Analiza simulacije se vrši ili direktno iz kataloga haloa ili analizom drveta sudara.

1.1.5 Drvo sudara

Analiza kataloga haloa može biti dug i repetitivan proces, gde je potrebno, ukoliko se analizira evolucija haloa kroz simulaciju, povezati između preseka stanja pretke i potomke haloa tamne materije, odnosno galaksija. U tu svrhu je razvijena struktura podataka koju zovemo drvo sudara (Lacey & Cole, 1993).

Drvo sudara se formira tako što se iz kataloga haloa za sve preseke stanja naprave sukcesivne veze između haloa u različitim presecima stanja. Time umesto da imamo na raspolaganju sve haloe u preseku stanja, što je situacija sa katalogom haloa, kroz drvo sudara razmatramo formiranje i evoluciju samo struktura koje su povezane kroz vreme. Obično se analiza počinje od poslednjeg preseka stanja u simulaciji, gde identifikujemo jedan halo, a zatim se pronalaze (iz prethodnih preseka stanja) svi haloi koji su učestvovali u njegovom formiranju kroz trajanje simulacije. Time drvo sudara ima informaciju o jednom halou u poslednjem preseku stanja, koja se „grana” obuhvatajući sve više haloa kako se približavamo početku simulacije. Ilustracija drveta sudara je data na slici 1.3.

1.2 Terminologija

Ovde će biti definisani neki od termina koji će biti često korišćeni kroz tekst:

- Efektivni radijus - R_e , predstavlja radijus u okviru koga je emitovano pola od ukupne svetlosti objekta (en. half-light);
- Polumaseni radijus - R_h , predstavlja radijus u okviru koga se nalazi pola mase objekta (en. half-mass). Može se odnositi samo na radijus koji obuhvata samo određeni tip mase (recimo zvezdani polumaseni radijus), ali u tom slučaju je to naglašeno. Ako nije naglašeno misli se na ukupnu masu sistema;

- $R_{\text{mean},200}$ - radijus izvan koga je gustina materije manja od 200 prosečnih gustina lokalnog svemira. Ako se koristi u okviru kosmološke simulacije misli se na 200 prosečnih gustina kutije u kojoj se vrši simulacija;
- $M_{\text{mean},200}$ - masa objekta unutar radijusa $R_{\text{mean},200}$ radijusa.
- $R_{\text{crit},200}$ - radijus izvan koga je gustina materija manja od 200 kritičnih gustina svemira.
- $M_{\text{crit},200}$ - masa objekta unutar radijusa $R_{\text{crit},200}$ radijusa.

Glava 2

Funkcija mase haloa kao metod ispitivanja formiranja struktura

2.1 Uvod

Postoje dva načina koja su dominantna u izučavanju haloa tamne materije kroz simulacije: možemo proučavati njihovu distribuciju ili možemo proučavati njihovu unutrašnju strukturu (Harker et al., 2006). Distribucija haloa je važan marker za praćenje opšte evolucije haloa a samim tim i važan marker za praćenje rasta strukture (Lukic, 2008). Kroz kosmološke simulacije imamo priliku da izučavamo formiranje i rast haloa. Praćenjem statističkih karakteristika (rast, grupisanje, vreme formiranja, itd) i evolucije haloa kroz vreme mi takođe i proširujemo naše razumevanje evolucije galaksija koje postoje u njima. Da bismo postigli ovo korist ćemo analizu drveta sudara o kome je već bilo reči (poglavlje 1).

Jedna od široko rasprostranjenih metoda za analizu distribucije haloa tamne materije je funkcija mase haloa. Ta metoda je veoma korisna za analizu i testiranje kosmoloških numeričkih simulacija, između ostalog i zbog toga što je osetljiva i na kosmološke parametre (Lukic, 2008). Njenim korišćenjem je utvrđeno da

kosmološki modeli sa toplom tamnom materijom ne mogu uspešno formirati haloe male mase za razliku od kosmoloških modela hladne tamne materije (Colín et al., 2000; Angulo et al., 2013).

Ovde ćemo razmatrati funkciju mase haloa i njene implikacije, dobijenu iz kosmološke simulacije u simulacionoj kutiji srednje zapremine (reda 100 Mpc/h). Kroz kataloge haloa tamne materije i drvo sudara će biti proučavane opšte karakteristike haloa, a pored analize stope velikih sudara, takođe će biti razmatran i crveni pomak formiranja haloa tamne materije. Rezultati takve analize pokazuju da se masivniji haloi formiraju u kasnijim epohama evolucije univerzuma, kao što predviđa kosmološki model tamne hladne materije sa kosmološkom konstantom.

Upoređićemo dobijenu funkciju mase haloa i sa analitičkim i sa numeričkim fitovima. Pored istorijskog značaja, kroz to poređenje, možemo dobiti i uvid u to kako se menjalo naše razumevanje formiranja haloa tamne materije, počevši od sferičnog kolapsa Presa i Šektera (Press & Schechter, 1974), preko eliptičnih korekcija Šeta, Moa i Tormena (Sheth et al., 2001) sve do preciznih korekcija dobijenih numeričkim simulacijama Vorena i koautora (Warren et al., 2006) i Angula i koautora (Angulo et al., 2012).

Funkcija rasta haloa će takođe biti razmatrana kao još jedna interesantna metoda za analizu karakteristika i opšte distribucije haloa tamne materije (Heitmann et al., 2006). Izvešćemo funkciju rasta haloa kako za predstavljenu kosmološku simulaciju tako i za svaki predstavljeni analitički i numerički fit, čime ćemo biti u prilici da analiziramo evoluciju broja haloa sa veoma dobrom vremenskom rezolucijom u okviru izabranih raspona masa.

U cilju ispitivanja pomenutih stvari, izvršena je kosmološka simulacija, prva koja je u celosti izvršena u Srbiji. Razlog za pravljenje nezavisne kosmološke simulacije leži u činjenici da nam je to omogućilo da u potpunosti kontrolišemo generisanje početnih uslova, zatim parametre same simulacije (npr. frekventnost

uzimanja preseka stanja, početni crveni pomak za nelinearnu analizu, itd.) i konačno da u potpunosti imamo kontrolu nad analizom podataka iz same simulacije (npr. nije uobičajeno da podaci o česticama kosmoloških simulacija budu javno dostupni, što ograničava moguću analizu čak iako neki podaci iz istih budu javno dostupni). Pored demonstracije tehničkog znanja i tehničkih mogućnosti, time smo pokazali i razumevanje fizike kroz sve korake koji su neophodni za jedan ovakav poduhvat. Na kraju, ceo proces nam je pružio iskustvo i uvid u problematiku cele oblasti, koja je upotpunila naše razumevanje ograničenja i mogućnosti ovog dela numeričke astrofizike.

2.2 Parametri kosmološke simulacije

Za početne uslove korišćena je *Las Damas* kosmologija (McBride et al., 2009), koja pretpostavlja ravan svemir i kosmološke parametre sa sledećim vrednostima:

$$\begin{aligned}\Omega_m &= 0.25, \\ \Omega_\Lambda &= 0.75, \\ \Omega_b &= 0.04, \\ h &= 0.7, \\ \sigma_8 &= 0.8, \\ n_s &= 1;\end{aligned}\tag{2.1}$$

gde su parametri gustine Ω definisani kao odnosi srednje gustine svake od komponenti u Univerzumu (ρ_x) i kritične gustine pri kojoj je Univerzum ravan (ρ_c), $\Omega_x \equiv \rho_x/\rho_c$ (gde x označava: m za gustinu materije, Λ za gustinu tamne energije i b za gustinu bariona), zatim gde je h Hablov parametar u jedinicama $100 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$, zatim σ_8 je amplituda kvadratnog korena srednje kvadratne

vrednosti linearnih fluktuacija mase u sferama radijusa $8 h^{-1}$ Mpc ekstrapoliranih na $z = 0$, a n_s je spektralni indeks stepenog zakona za primordijalni spektar snage. Za izračunavanje početnih kosmoloških fluktuacija raspodele materije (spektra snage) korišćen je kod pod imenom *CMBfast* (Seljak & Zaldarriaga, 1996).

Sve do $z = 599$ simulacija je tretirana u linearnom rastu, koji je računat iz teorije perturbovanog polja gustine koristeći Lagranževu teoriju perturbacije drugog reda (Crocce et al., 2006). Nelinearan deo simulacije je izračunat korišćenjem javno dostupnog visoko paralelizovanog *Tree-PM* koda za simulacije N-tela koji se zove GADGET2 (Springel, 2005). Ovaj kod koristi hijerarhijsko drvo za izračunavanja interakcija na kratkim rastojanjima i *particle-mesh* algoritam za izračunavanja sile na velikim udaljenostima.

Simulacija je izvršena do sadašnjeg trenutka ($z = 0$) u periodičnoj kutiji sa stranicama veličine 130 Mpc/h, sa 512^3 čestica tamne materije i dužinom ublažavanja od 8 kpc/h. Ti parametri definišu rezoluciju mase čestice u simulaciji koja iznosi: $1.14 \times 10^9 M_{\odot}$. Rezoluciju mase dobijamo kada količinu materije podelimo sa brojem čestica kojima diskretizujemo prostor. Količinu materije na raspolaganju određuje zapremina kutije u kojoj je na osnovu kosmološkog modela (tačnije Ω_m parametra) ograničeno koliko materije kutija sadrži. Trebalo bi pomenuti još i dva aspekta na koji ukazuje rezolucija mase simulacije: jedan je čista demonstracija tehničkih mogućnosti (tj. što više kompjuterskih resursa na raspolaganju, veća je i rezolucija mase), dok je drugi ograničenje u odnosu na analize koje pokušavaju da se izvrše. Iako su (u trenutku izvršavanja ove simulacije manje nego danas) postojale simulacije sa većom rezolucijom mase, dobijena rezolucija mase je više nego dovoljna za analize kojima smo se mi bavili.

Korišćena zapremina kutije je dovoljno velika da potisne numeričke artefakte koji nastaju usled simuliranja prostora konačne zapremine. Visok početni crveni pomak za nelinearan deo simulacije doprinosi preciznosti funkcije mase haloa (Lu-

kić et al., 2007). I zapremina kutije i početni crveni pomak za nelinearan deo simulacije su izabrani tako da što više smanje sistematske greške simulacije.

Simulacija je izvršena na strukturi mreže koja ostavlja mogućnost takozvanih *zoom-in* resimulacija sa većom rezolucijom mase, koja bi odgovarala korišćenom broju čestica od 2048^3 .

Snimljena su 84 preseka simulacije gde se za određivanje vremena koriste i crveni pomak (z) i faktor skaliranja (a) sa poznatom vezom:

$$a = \frac{1}{1+z} \quad (2.2)$$

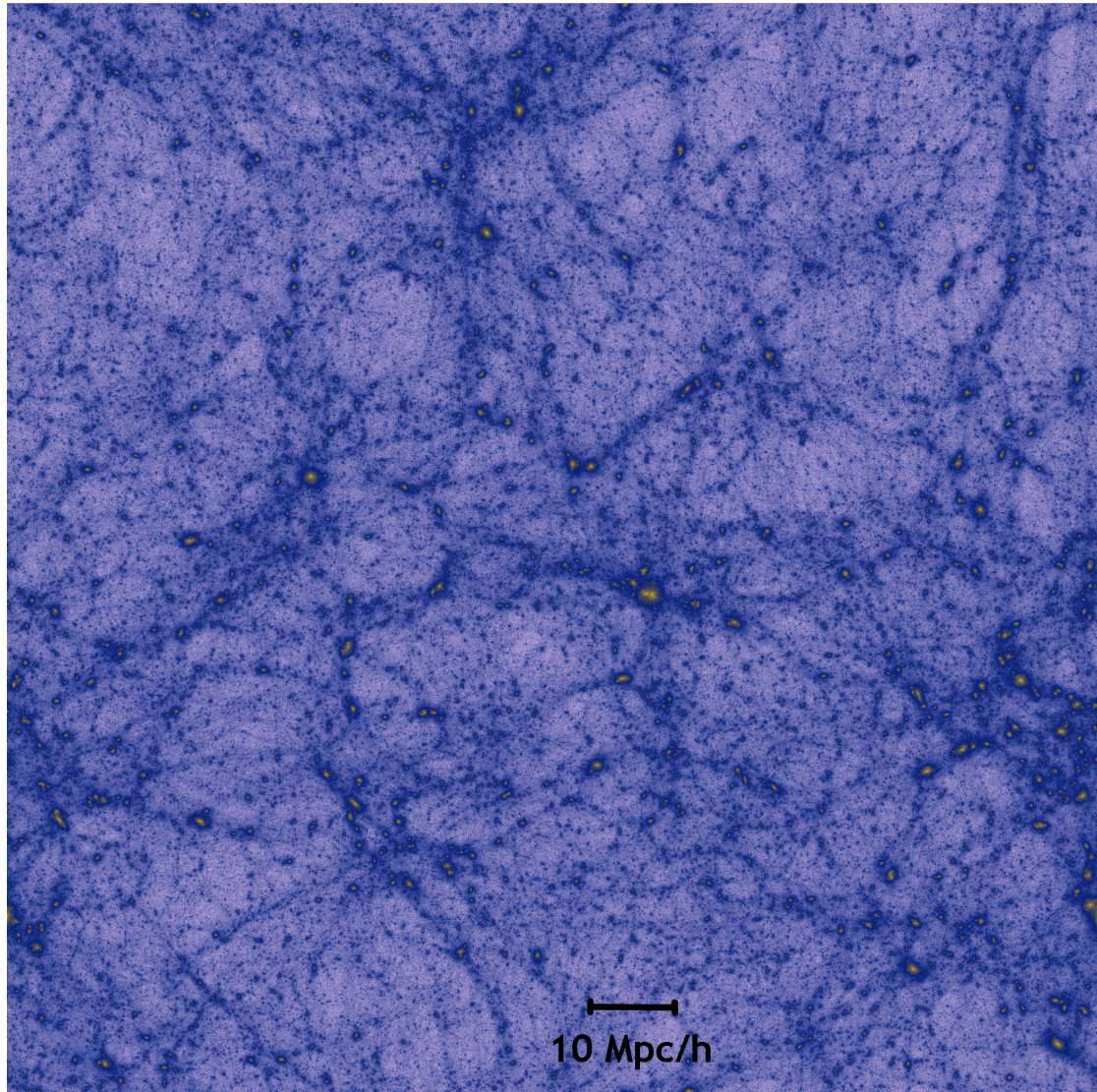
Preseci su snimljeni počevši sa 6 preseka između crvenih pomaka 599 i 9 ($z = [499, 249, 149, 99, 49, 19]$). Ostali preseci simulacije su uzeti od crvenog pomaka 9 do sadašnjeg trenutka pri čemu su vremenski trenuci u kojima su uzeti preseci stanja dobijeni iz iterativne formule:

$$a = a \cdot 1.0304106 \quad (2.3)$$

gde se počinje od $a = 0.1$, a završava naravno sa $a = 1.0$. Svaki presek stanja simulacije je sačuvan u fajlu veličine 3.5 GB. Vizualizacija poslednjeg preseka stanja je data na slici 2.1.

2.2.1 Kompjuterski resursi

Simulacija je izvršena na PARADOX klasteru u *Scientific Computing Lab* (SCL) Instituta za fiziku u Zemunu. Klaster je činilo 89 radnih nodova koji su bili opskrbljeni sa dva četvorojezgarna procesora Xeon E5345 na radnom taktu od 2.33 GHz. Svaki procesor je na raspolaganju imao 8 GB RAM memorije, a sami nodovi su povezani sa Gigabit Ethernet mrežom. Ukupni skladištni prostor na raspolaganju iznosi 50 TB. Za simulaciju je upotrebljeno 256 jezgara sa ukupnim računarskim vremenom od 39000 sati (152 sata po jezgru).



Slika 2.1: Vizualizacija poslednjeg preseka stanja ($z \sim 0$). Sve čestice u simulaciji su kolapsirane po jednoj osi, odnosno 3D kutija je projektovana u 2D ravan. Boje označavaju gustinu, gde prelaz od plavih ka žutim regionima odgovara prelazu iz ređe u gušću sredinu.

2.2.2 Katalozi haloa i drvo sudara

Za kreiranje halo kataloga korišćen je softver za identifikaciju struktura velike gustine, odnosno haloa, po imenu ROCKSTAR (Behroozi et al., 2013a). Primarni fokus je stavljen na vremensku konzistentnost i preciznost u identifikaciji haloa tamne materije. Metod koji ROCKSTAR koristi je zapravo kombinacija osnovna dva metoda (vizuelna demonstracija je prikazana na slici 2.2) - analiza počinje sa klasičnim 3D prijatelji-prijatelja algoritmom, sa velikom dužinom povezivanja ($b = 0.28$), čime su sigurno identifikovane sve potencijalne strukture (kako je ilustrovano na panelu a) na slici 2.2). Behruzi i koautori su u svom radu ispitivali širok interval vrednosti za dužine povezivanja ($b \sim 0.25 - 0.35$) i ustanovili su da za preko $b = 0.28$ ROCKSTAR na kraju vrati isti broj haloa uz dosta sporije izvršavanje (pošto sa većom dužinom povezivanja više čestica bude uključeno u analizu), te su se opredelili da im to bude preporučena vrednost prilikom analize.

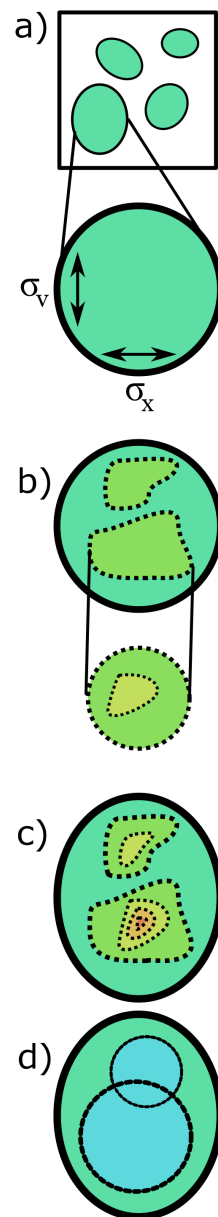
Nakon definisanja svih potencijalnih struktura u simulaciji sledi 6D iteracija algoritma prijatelji-prijatelja (gde se misli na to da je uključena osim tri dimenzije položaja i brzina prilikom analize) sa ciljem identifikovanja podstruktura, ovaj put sa dužinom povezivanja koja se redefiniše u odnosu na svaku sledeću podstrukturu, tj. gde se dužina povezivanja računa samo u odnosu na međusobno rastojanje čestica unutar prethodno definisanih struktura, što dovodi do toga da je manja nego ranije, odnosno da se izdvajaju podstrukture u okviru većih (kako je ilustrovano na panelu b) na slici 2.2), da bi se na kraju iterativnim procesom pronašle sve podstrukture i napravila hijerarhija u okviru rezultata (kako je ilustrovano na panelu c) na slici 2.2). Do koje iteracije će biti tražene podstrukture definiše procenat povezivanja (en. linking fraction), koji je veličina karakteristična za ROCKSTAR i predstavlja donju granicu broja čestica (u procentima u odnosu na broj čestica matične strukture) koje podstruktura mora da ima da bi se smatralo da u okviru nje mogu da se traže dalje podstrukture, tj. ukoliko podstruktura sadrži manje

čestica nego što je dato procentom povezivanja veće podstrukture algoritam je određuje kao hijerarhijski najdublju podstrukturu i ne traži dalje podstrukture.

Iz dobijenih podstruktura formiraju se halo i tako što se u centar svake najdublje podstrukture stavi seme koje predstavlja centar strukture, nakon čega se čestice rekursivno prisvajaju najbližem semenu, tj. centru. Ovo se ponavlja za sve nivoe hijerarhije. Sledeći korak je uspostavljanje veze sa haloima i podstrukturama iz preseka stanja u simulaciji pre i posle zadatog vremenskog trenutka. Koristi se struktura drveta da bi se našle tačke u kojima halo i imaju najveće gustine i nakon toga se izvršava finalni deo algoritma - odstranjivanje nevirijalizovanih čestica. Odstranjivanje se vrši tako što se računa pun potencijal svake čestice, tj. uz već pomenuti algoritam sferne gustine se traži koje su tačne granice haloa u pitanju, gde mu se onda pridodaje masa i radijus (kako je ilustrovano na panelu d) na slici 2.2). Čestice van dobijenog radijusa se odstranjuju. Radijus se definiše tako što se koristi ρ_{vir} (Bryan & Norman, 1998), odnosno virijalna gustina, koja odgovara gustini koja je 360 puta veća od prosečne gustine materije (koja je definisana kao $\rho_m = \Omega_m \rho_{crit}$). Rastojanje do koga je gustina haloa jednaka virijalnoj gustini se definiše kao virijalni radijus haloa. Time se postiže da je u okviru virijalnog radijusa haloa gustina materije jednaka ili veća od granice virijalne gustine.

U analizi, za donju granicu veličine haloa je korišćeno 100 čestica, pri čemu su uzete predložene vrednosti za algoritam prijatelji-prijatelja, odnosno za dužinu povezivanja je korišćena preporučena vrednost od $b = 0.28$, a za procenat povezivanja je korišćena vrednost od 0.7. Prve strukture u odnosu na preseke stanja simulacije koje su korišćene su identifikovane u preseku stanja koji odgovara crvenom pomaku 9 (faktor skaliranja $a = 0.1$). Ukupan broj identifikovanih haloa je preko 66 000 na crvenom pomaku 0.

Drvo sudara je formirano koristeći kompatibilan kod od istog autora nazvan *Consistent Merger Tree* (Behroozi et al., 2013b) koji je razvijen da zadrži dina-



Slika 2.2: Ilustracija koraka prilikom definisanja haloa i prisvajanja čestica njima sa ROCKSTAR metodom. Koraci koji su opisani u tekstu se vremenski izvršavaju od gornjeg ka donjem. Slika je preuzeta iz rada Behruzija i koautora (Behroozi et al., 2013a).

mičku konzistentnost kroz vreme simulacije. Odnosno ukoliko neka od čestica iz jednog haloa u sledećem preseku stanja postane vezani deo nekog drugog haloa, takva interakcija se označava kao spajanje haloa. Haloi u interakciji se deklariraju kao precima a rezultujući halo se zove potomak. Spajanja haloa se deklariraju kao veliki sudar (en. major mergers) ukoliko je odnos masa haloa koji su precima veći od 0.3, odnosno definiše se kao mali sudar (en. minor merger) ukoliko je odnos masa manji od date vrednosti (Behroozi et al., 2013a).

2.3 Analiza formiranja struktura

Pored omogućavanja jednostavne analize, kao što je ukupan broj haloa kroz vreme, katalozi haloa i drvo sudara se mogu koristiti za analizu mnogih drugih karakteristika kosmoloških simulacija.

Ove analize daju okvire slike formiranja strukture kroz evoluciju haloa. Za detaljniju halo statistiku koristićemo funkciju mase haloa i funkciju rasta haloa, pri čemu će sve korišćene analize biti posebno objašnjene.

2.3.1 Vizuelizacija haloa

Vizuelizacija podataka je izvršena kako za svrhe popularizacije tako i zbog testiranja integriteta algoritma za detekciju haloa. Na slici 2.1 se može videti vizuelizacija poslednjeg preseka stanja. Izvedena je kolapsiranjem svih čestica po jednoj osi ostavljajući samo dvodimenzionalnu distribuciju, pri čemu je isti princip korišćen u vizuelizaciji svih preseka stanja. Nakon toga, gustina čestica je izračunata po predefinisanim ćelijama i zatim je dodeljena boja proporcionalno izračunatoj gustini, gde prelaz od plavih ka žutim regionima odgovara prelazu iz ređe u gušću sredinu (na beloj pozadini). Napravljena je i animacija evolucije

struktura u simulaciji ¹. U svrhu toga su interpolirane pozicije čestica između dobijenih preseka stanja zarad kontrolisanja dužine trajanja animacije da bi duže trajanje animacije omogućilo lakše razumevanje procesa u njoj.

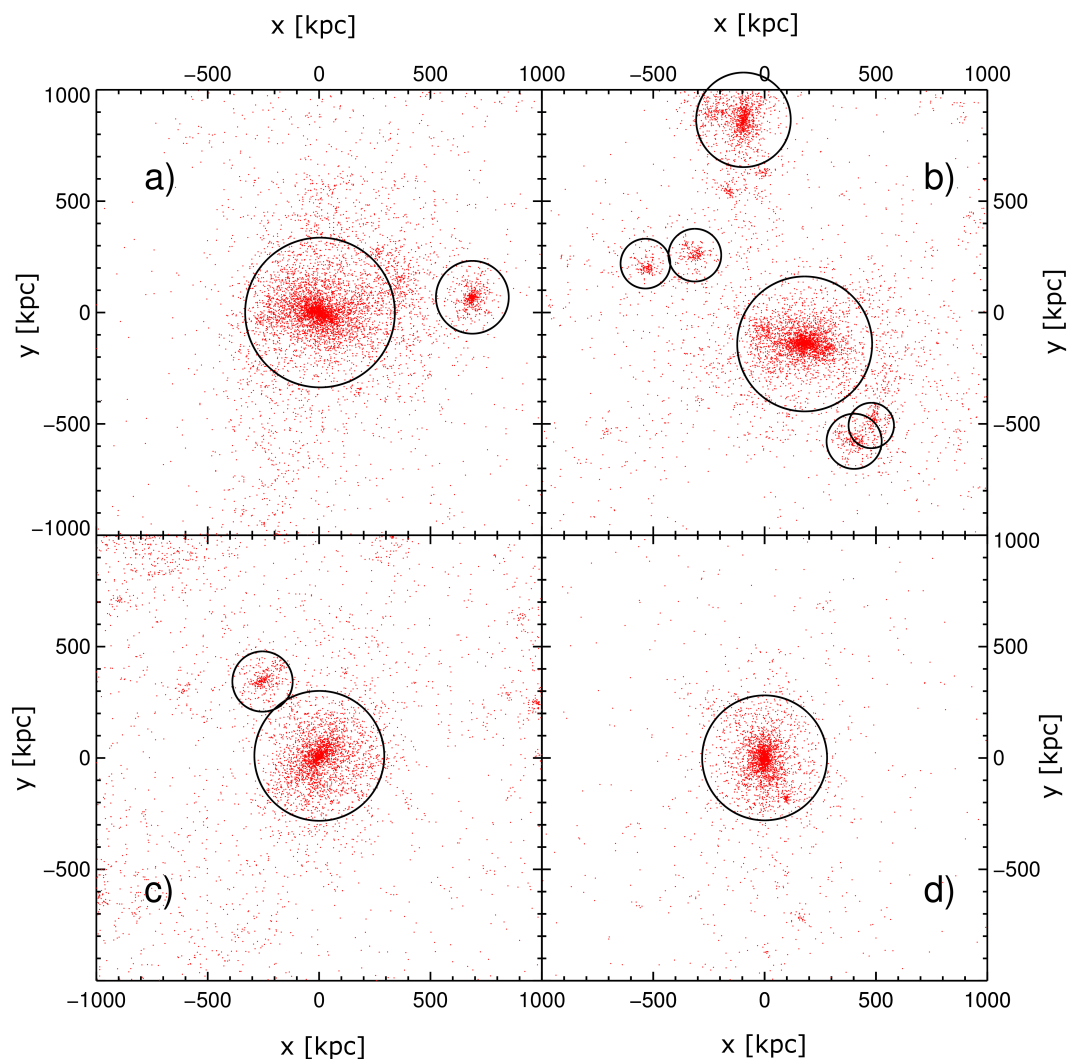
Na slici 2.3 je predstavljena vizuelizacija različitih reprezentativnih haloa u simulaciji. Izabrali smo haloe koji pokrivaju širok pojas osobina (izolovani, u jatu, itd) da vizuelno potvrdimo analizu algoritma za detekciju haloa. Oko svakog haloa je izvučena kutija i vizuelizacija je sprovedena jednostavnim reprezentovanjem položaja čestica u formi tačaka, gde je 2D presek napravljen kroz ravan koja je paralelna najvećem radijusu haloa i prolazi kroz njegov centar. Na dobijeni rezultat je nanesen krug čiji radijus predstavlja virijalni radijus koji je dobijen iz algoritma za detekciju haloa. Može se videti da nema većih neslaganja između rezultata algoritma i uočenih granica haloa, odnosno da su sve strukture identifikovane.

2.3.2 Gustina haloa tamne materije kroz vreme

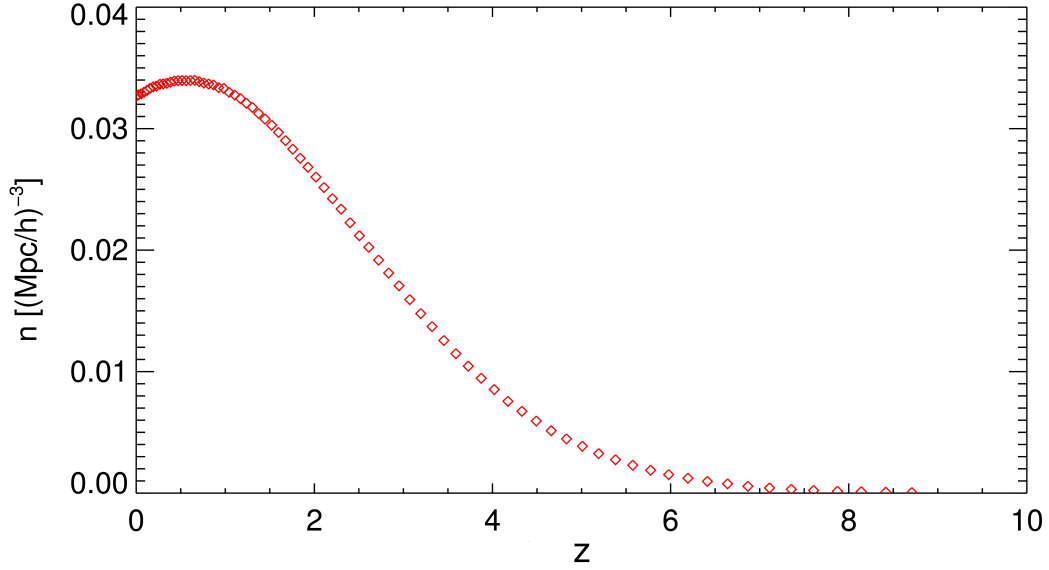
Određena je i ukupna gustina broja haloa u simulaciji kroz sve crvene pomake. Iz dobijenog kataloga haloa se izvuče broj haloa po crvenom pomaku i podeli sa zapreminom. Ova analiza daje pregled prvog pojavljivanja haloa i promenu u njihovom ukupnom broju kroz vreme.

Gustina haloa tamne materije u funkciji crvenog pomaka, gde su uključeni svi identifikovani haloi, je predstavljena na slici 2.4. Svaka tačka predstavlja gustinu haloa u okviru jednog preseka stanja simulacije. Kako se može videti, tokom odvijanja simulacije i kreiranja struktura, tamna materija se grupiše u haloe i njihova gustina u prostoru raste kroz vreme. Pošto smo ograničili masu haloa koji su uključeni u analizu na haloe masa iznad $10^{11} M_{\odot}/h$ (pošto koristimo minimum 100 čestica da razlučimo gravitaciono vezanu strukturu), vidi se i pad ukupne gustine haloa kako se simulacija približava manjim crvenim pomacima (ka $z \sim 0$).

¹Dostupna na <http://nmartinovic.aob.rs/video>



Slika 2.3: Vizuelizacija nekolicine identifikovanih haloa tamne materije iz kosmo-
loške simulacije. Crni krugovi predstavljaju virijalni radijus identifikovanih haloa
dobijen iz ROCKSTAR algoritma za detekciju haloa. Predstavljani su haloi koji
se nalaze u razlicitim sredinama (izolovani, grupe). Sve strukture koje imaju mi-
nimum 100 čestica su zadovoljavajuće identifikovane.

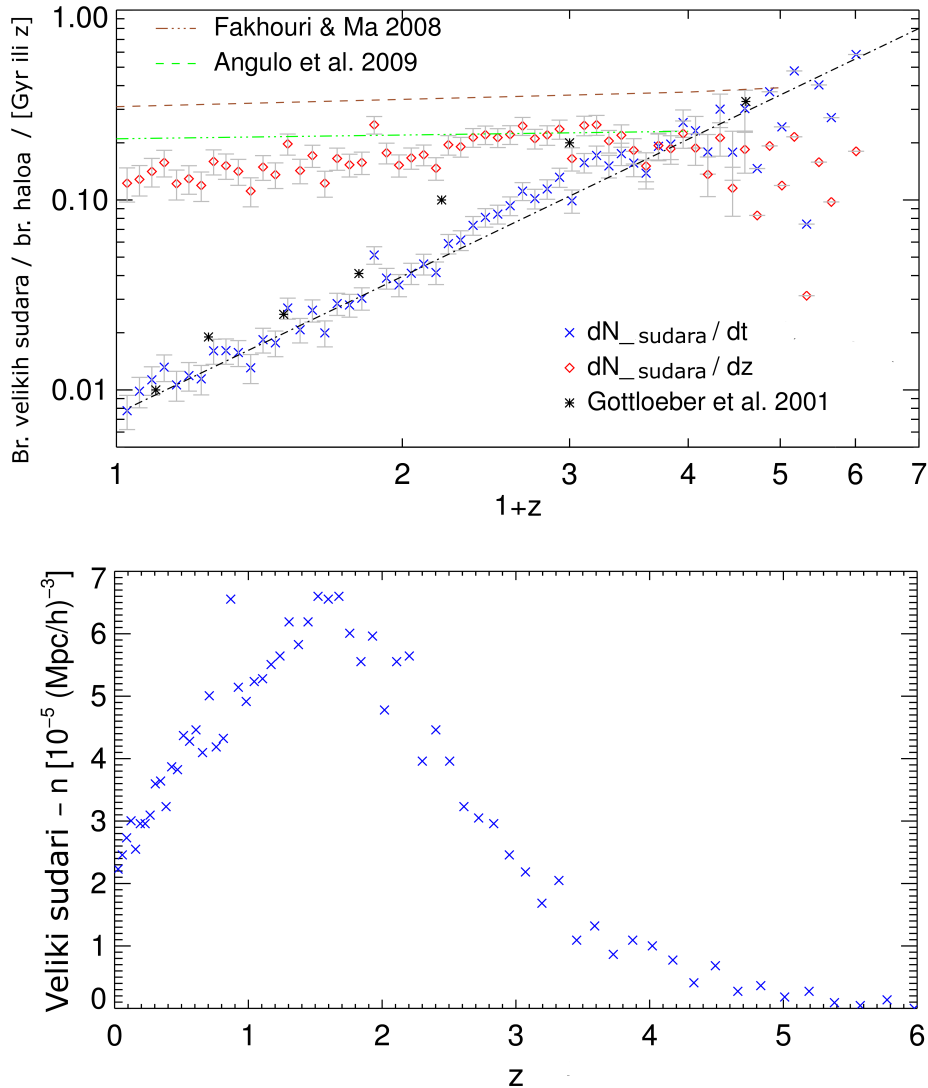


Slika 2.4: Ukupna gustina identifikovanih haloa tamne materije u kosmološkoj simulaciji u funkciji crvenog pomaka. Može se uočiti postepeno formiranja sve većeg broja haloa, saturaciju njihovog broja i blago opadanje prema $z \sim 0$

2.3.3 Statistika velikih sudara

Pošto su veliki sudari pokretač mnogih važnih događaja u svemiru, oni su svakako fokus analize kosmoloških simulacija. Kao što je već pomenuto definišemo ih kao sudare u kojima je odnos masa uključenih haloa > 0.3 . U okviru predstavljene simulacije je iz halo kataloga izvučen broj velikih sudara po ukupnom broju haloa iste populacije po jedinici vremena, gde ispitujemo i Gyr i crveni pomak kao jedinicu vremena. Pored toga iz drveta sudara nalazimo i broj sudara po jedinici zapremine kroz vreme trajanja simulacije.

Broj velikih sudara, predstavljen na slici 2.5, je još jedan dobar pokazatelj opštih karakteristika evolucije struktura u simulaciji. Gornja figura na slici 2.5 zapravo sadrži dvojaku informaciju. Ukupno se prati broj sudara haloa mase veće od $10^{12} M_{\odot}/h$, ali u jednom slučaju po jedinici Gyr (kao dN_{merge}/dt), a u drugom



Slika 2.5: *Gore*: Usrednjena stopa velikih sudara kao funkcija crvenog pomaka. Crveni rombovi su sudari po jedinici crvenog pomaka, rezultati iz rada Fakhurija i Ma (Fakhouri & Ma, 2008) su predstavljeni braon isprekidanom linijom, a rezultati Angula i koautora (Angulo et al., 2009) su predstavljeni zelenom isprekidanom linijom. Plavi iksovi su sudari u zavisnosti od vremena, a preko toga su prezentovani podaci iz rada Gotlibera i koautora (Gottlöber et al., 2001). Kao što se vidi, usrednjeni broj velikih sudara po jedinici crvenog pomaka je skoro konstantan, a u zavisnosti od vremena se menja kao $\propto (1+z)^n$, gde je $n = 2.4$. Greške su Poissonove standardne greške, pri čemu su za rezultate na visokim crvenim pomacima, gde su velike, izostavljene sa grafika. *Dole*: Gustina velikih sudara po jedinici crvenog pomaka. Dobijeno brojanjem velikih sudara u svakom preseku stanja po celoj zapremini simulacije, pri čemu su normirane na ukupan broj identifikovanih haloa u tom preseku stanja.

po jedinici crvenog pomaka (kao dN_{merge}/dz). Haloi mase veće od $10^{12} M_{\odot}/h$ su izabrani zato što nam to omogućava upoređivanje rezultata sa širokim opsegom prethodnih sa jedne strane i zbog toga što time izbegavamo kompromitovanje rezultata koje nastaje kada se ispituje broj glavnih sudara blizu rezolucije mase simulacije (jer time će prirodno broj sudara biti daleko manji od očekivanog). Na visokim crvenim pomacima, gde su haloi tek u formiranju, ukupan broj haloa je nizak, što povlači i da je broj velikih sudara mali. Kako su greške Poasonove standardne greške, za visoke crvene pomake, odnosno mali broj sudara, je njihova vrednost velika, pa su stoga izostavljene sa slike 2.5 za $z > 3.6$.

Oba grafika pokrivaju iste haloe tamne materije (u istom intervalu masa) i kroz iste vremenske intervale, međutim jasno je da postoji razlika u nagibu. Kako se može primetiti sa date slike, a kako je primećeno i u radu Fahurija i Ma (Fakhouri & Ma, 2008), srednji broj sudara po Gyr se povećava sa crvenim pomakom (odnosno kada je svemir bio mlađi bilo je više velikih sudara), dok srednji broj sudara po crvenom pomaku ostaje konstantan. To je posledica toga da dt/dz pokriva kraće vremenske intervale na visokim crvenim pomacima (tj. veza je logaritamska).

Crna linija je fit po stepenom zakonu (Genel et al., 2009) koji pokazuje da se srednja stopa velikih sudara po Gyr povećava sa crvenim pomakom $\propto (1+z)^n$, gde smo za naše podatke dobili vrednost $n = 2.4$. Na slici 2.5 (gore) crni asteriski pokazuju podatke iz rezultata Gotlibera i koautora (Gottlöber et al., 2001). Dve skoro horizontalne linije su rezultati rada Fahurija i Ma (Fakhouri & Ma, 2008) i Angula i koautora (Angulo et al., 2009) gde oni predstavljaju stope velikih sudara iz Milenijum simulacije.

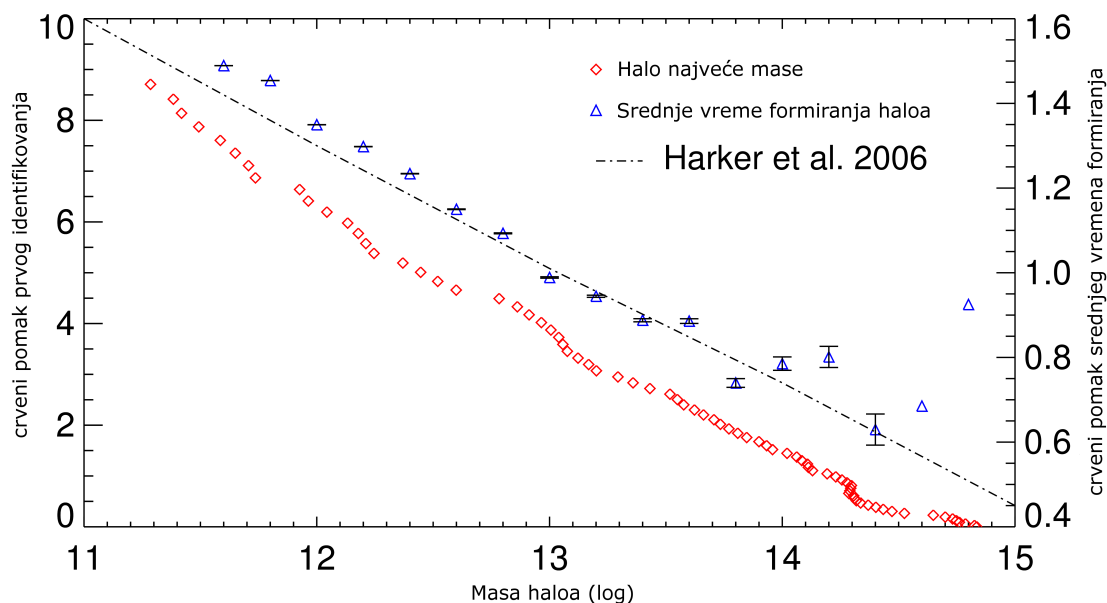
Donji grafik na slici 2.5 (dole) je ukupna gustina velikih sudara u funkciji crvenog pomaka, gde tačke predstavljaju gustinu velikih sudara u svakom preseku stanja. Vrednosti su dobijene tako što je sumiran broj novih velikih sudara za svaki presek stanja (odnosno, brojani su samo potomci koji su imali pretke koji

su se sudarili između dva preseka stanja). Ova vrednost je zatim normalizovana na broj identifikovanih haloa u preseku stanja. Treba pomenuti da gustina velikih sudara prati isti trend kao i gustina haloa u simulaciji, odnosno očigledno možemo primetiti porast gustine sudara koji prati formiranje i dinamičku interakciju sve većeg broja haloa tamne materije, da bi zatim počela da opada kada parovi haloa tamne materije slične mase postanu retki. Izračunate vrednosti broja velikih sudara u zapremini su svakako manje nego vrednosti broja haloa unutar iste zapremine iz prostog razloga što su veliki sudari u nekoj zapremini daleko ređi događaji u odnosu na ukupan broj haloa u istoj. U svakom slučaju se može videti jasna kulminacija na oba grafika (slika 2.4 i slika 2.5 dole).

2.3.4 Vreme formiranja haloa

Pošto već imamo informaciju kako haloi evoluiraju kroz vreme, kao interesantan podatak možemo razmatrati i srednje vreme formiranje haloa na $z = 0$ u određenim intervalima mase, koje je jednako crvenom pomaku na kome je masa glavnog pretka jednaka polovini mase haloa na $z = 0$. Određuje se tako što se formira raspodela po masi haloa na $z = 0$ iz koje se zatim odrede intervali mase haloa. Nakon toga u okviru svakog intervala mase tražimo za sve haloe crveni pomak kada je masa glavnog pretka svakog haloa bila pola mase potomka na finalnom crvenom pomaku, tj. na $z = 0$. Dobijene vrednosti crvenih pomaka usrednjimo i ta usrednjena vrednost predstavlja srednje vreme formiranja za dati interval mase (Lacey & Cole, 1993).

Interesantno, pored ove izvršena je i komplementarna analiza identifikacije najmasivnijeg haloa u svakom preseku stanja simulacije koja efektivno određuje kada su se prvi put pojavili haloi određene mase. Ova analiza takođe ukazuje na značajne glavne sudare u simulaciji. Za razliku od prethodne analize, može da se izvrši za svaki dati presek stanja i time da ukaže u kome trenutku simulacije po-



Slika 2.6: Crveni pomak prvog pojavljivanja haloa u funkciji njegove mase (crveni rombovi, leva y-osa). Drugi set podataka predstavlja srednje vreme formiranja u funkciji intervala mase (plavi trouglovi, desna y-osa). Crna isprekidana linija predstavlja srednje vreme formiranja haloa iz Milenijum simulacije (Harker et al., 2006). Greške su Poasonove standardne greške. Na velikim vrednostima mase, usled malobrojne populacije haloa, greške u određivanju broja haloa u zadatim intervalima mase su veoma velike i nisu prikazane.

stoje interesantni događaji koji bi opravdali dalju daleko intenzivniju analizu.

Prva kriva na slici 2.6, predstavljena sa crvenim rombovima, prikazuje crveni pomak prvog pojavljivanja haloa u funkciji mase haloa. U radu Martinović (2015) ta vrsta analize, odnosno jednostavna vizuelizacija najmasivnijeg haloa u datom trenutku, je predstavljena kao mogući način preliminarne analize formiranja haloa tokom izvršavanja kosmoloških simulacija. Sa slike se vidi skoro linearni trend povećavanja mase haloa kroz trajanje simulacije. Tačke koje odstupaju i prostiru se horizontalno zapravo ukazuju na značajne priraštaje mase kod najmasivnijih haloa. Time zapravo ukazuju na značajne sudare čime ova analiza postaje jeftin (za računanje) prethodnik drveta sudara. Trebalo bi naravno naglasiti da ova kriva

prati samo najmasivnije haloe iz svakog preseka stanja.

Druga kriva na slici 2.6, označena plavim trouglovima, predstavlja srednji crveni pomak formiranja haloa tamne materije u funkciji intervala mase haloa. Predstavlja srednju vrednost crvenih pomaka na kom su najmasivniji preci haloa detektovanih na $z = 0$ imali pola njihove mase. Uzeti su intervali mase koji pokrivaju raspon od 10^{11} do $10^{15} M_{\odot}/h$, sa širinom svakog intervala od 0.2 dex. Plavi trouglovi predstavljaju centre tih intervala. Sa slike možemo primetiti da je ova kriva takođe linearna (osim intervala sa najvišim masama), odakle možemo jasno izvući zaključak da se masivniji haloi formiraju kasnije u simulaciji (bliže $z \sim 0$). Trebalo bi naglasiti da je interval sa najvišim masama nedovoljno populisan, što značajno utiče na usrednjavanje. Isprekidana linija na slici predstavlja empirijski fit za srednji crveni pomak formiranja haloa u Milenijum simulaciji kako je dato u radu Harkera i koautora (Harker et al., 2006). Može se primetiti da su rezultati u dobroj saglasnosti između Milenijum i predstavljene simulacije.

2.4 Funkcija mase haloa

Funkcija mase haloa je definisana kao broj haloa određene mase u jedinici zapremine. Ovde ćemo je tretirati na način koji je predstavljen u radu Lukića i koautora (Lukić et al., 2007) i u radu Mareja i koautora (Murray et al., 2013). Uobičajeno je da se formira raspodela haloa po masi, pa da se nakon toga iz te raspodele izaberu intervali mase ili logaritma mase haloa, a zatim da se u svakom intervalu odredi broj haloa u jedinici zapremine (naprimer da se ukupan broj haloa iz intervala mase podeli sa zapreminom kutije). U ovom slučaju intervali mase izabrani su tako da sadrže dovoljno članova da bi se smanjile greške koje bi nastale usled nedovoljne populisanosti intervala. U analizi koja je predstavljena u radu Martinović (2015) i koja je predstavljena ovde, intervali su širine $\Delta \log M =$

0.5 dex. Tačke na slikama u ovom poglavlju predstavljaju centre uzetih intervala.

Funkciju mase haloa ćemo predstavljati kao:

$$F(M, z) = \frac{dn}{d \log M}; \quad (2.4)$$

gde je n broj haloa po jedinici zapremine, a $\log M$ njihova masa.

Međutim pored računanja funkcije mase haloa iz simulacije, mi možemo da procenimo kako će ona izgledati i analitički tako što ćemo koristiti sledeću formulu:

$$F(M, z)_{anly} = M \frac{\rho_0}{M^2} f(\sigma) \left| \frac{d \ln \sigma}{d \log M} \right|; \quad (2.5)$$

gde $f(\sigma)$ predstavlja različite analitički ili empirijski dobijene funkcije za fitovanje funkcije mase, σ je varijansa mase za dato linearno polje gustine materije (kosmoloških fluktuacija gustine materije), a ρ_0 je srednja gustina svemira. Uopšteno govoreći, $f(\sigma)$ se ne smatra da je direktno vezana za crveni pomak, tj. zavisnost od crvenog pomaka se dobija preko veze $\sigma(M, z)$ i faktora rasta $d(z)$, preko koga se definiše rast struktura nezavisno od širenja svemira (jednačina 2.12).

Glavni problem ovde predstavlja izvođenje varijanse mase za date kosmološke uslove. Za razliku od varijanse perturbacije gustine, ovde nas interesuje kako varijansa izgleda po intervalima mase. Ako uvedemo talasni broj kao:

$$k = \frac{2 \pi}{\lambda} \quad (2.6)$$

koji je dat preko talasne dužine kosmoloških fluktuacija gustine materije u svemiru λ , onda varijansu mase (u okviru nekog intervala mase) računamo preko integrala:

$$\sigma^2 = \frac{1}{2 \pi^2} \int_0^\infty k^2 P(k) W^2(kR) dk \quad (2.7)$$

gde je $P(k)$ spektar snage, a $W(kR)$ je filter koji smo uveli da ograničimo varijansu na svaki pojedinačni interval mase. Postoji nekoliko vrsta filtera (Percival, 2001), ali je uobičajeno da se u ovom slučaju koristi takozvani cilindar filter (gde se

misli na šesir, en. top-hat). Prednost tog filtera je pre svega u jednostavnoj implementaciji i jako dobrim rezultatima. Cilindar filter se obično računa kao:

$$W(kR) = \frac{3 [\sin(kR) - kR \cos(kR)]}{(kR)^3} \quad (2.8)$$

Prvo što se primećuje jeste da je zavisnost ovog filtera data u odnosu na talasni broj k i u okviru nekog radijusa R (koji zapravo predstavlja radijus haloa). Veza sa masom čija se zavisnost javlja u ostalom računu, iako nije eksplicitno navedena u računu ovog filtera, je direktna preko datog radijusa kao:

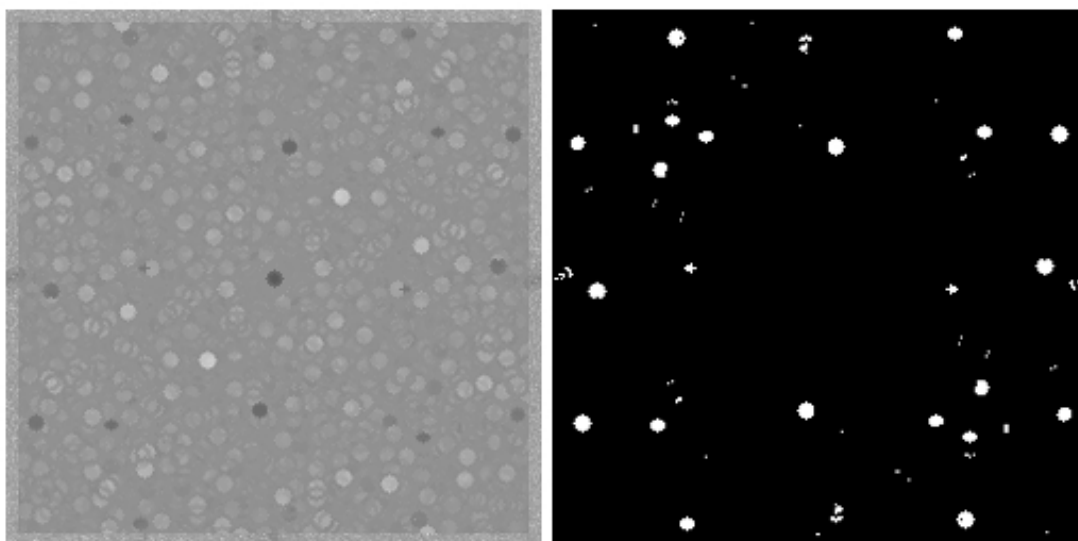
$$M = \frac{4}{3} \pi \rho_0 R^3 \quad (2.9)$$

Ilustracija na koji način funkcioniše cilindar filter je prikazana na slici 2.7. Kao što se vidi, ovde uz pomoć filtera izdvajamo samo haloe određenog radijusa R , pa u odnosu na njih računamo varijansu mase i time dobijamo varijansu mase u određenom intervalu mase (preko zavisnosti sa radijusom).

Da bismo kompletirali račun za varijansu mase, potrebno je da izračunamo spektar snage $P(k)$. Ovde polazimo od jednačine za primordijalni spektar snage (za više detalja pogledati recimo knjigu „*Modern cosmology*“, Dodelson, 2003), kakav je utisnut u pozadinsko kosmičko zračenje prilikom inflacije malo nakon Velikog praska:

$$P(k) = A k^n T^2(k) \quad (2.10)$$

očigledno da je spektar snage dat u funkciji talasnog broja k , ali karakteriše ga još nekoliko veličina: n kao spektralni indeks, A kao konstanta normalizacije i funkcija transfera $T(k)$ koja kvantifikuje kako se spektar snage manifestuje na različitim skalama. Konstanta normalizacije se računa iz varijanse mase dobijene za fiksiranu veličinu haloa od $R = 8 \text{ Mpc}/h$, a funkciju transfera smo izračunali koristeći kod CMBfast (Seljak & Zaldarriaga, 1996).



Slika 2.7: Vizualizacija funkcionisanja cilindar filtera. Sa leve strane je predstavljen uzorak krugova različitog intenziteta osvetljenosti, a sa desne izgled uzorka nakon primene cilindar filtera. Izabrani su samo krugovi unutar predefinisano nivoa osvetljenosti i oni će činiti dalji uzorak za analizu.

Jasno je da u dosadašnjem računu ne postoji zavisnost od vremena ili preciznije od faktora skaliranja (ili crvenog pomaka). Same funkcije za fitovanje se izvode tako da budu invarijantne u odnosu na crveni pomak. Jedino gde veza sa vremenom ostaje jeste preko pretpostavke da varijansa mase zavisi i od mase haloa i od crvenog pomaka za koji se računa, tj. da je varijansa mase vezana za linearni rast struktura preko:

$$\sigma(M, z) = \sigma(M) d(z) \quad (2.11)$$

gde je linearni faktor rasta dat kao:

$$d(z) = \frac{D^+(z)}{D^+(z=0)} \quad (2.12)$$

a zatim $D^+(z)$ ćemo izračunati preko:

$$D^+(z) = \frac{5\Omega_m}{2} \frac{H(z)}{H_0} \int_z^\infty \frac{(1+z')dz'}{[(H(z')/H_0]^3} \quad (2.13)$$

gde je $H(z)$ vrednost Hablove konstante na nekom crvenom pomaku z data kao:

$$H(z) = H_0 \sqrt{\Omega_m(1+z)^3 + (1 - \Omega_m)} \quad (2.14)$$

Nakon ovoga ostaje da ubacimo odgovarajuću funkciju za fitovanje i da izračunamo funkciju mase ili funkciju rasta haloa.

2.4.1 Funkcije za fitovanje

2.4.1.1 Pres Šekter

Istorijski, prvi analitički model funkcije mase je razvijen od strane Presa i Šektera (Press & Schechter, 1974, PS u daljem tekstu). Iako su precizniji fitovi razvijeni u međuvremenu, pogotovu za visoke crvene pomake, PS formalizam još uvek ima dobru predikciju za niže crvene pomake ($z \rightarrow 0$) i dobra je polazna osnova za upoređivanje i analizu. Glavna pretpostavka ovog modela jeste da je sva masa u svemiru povezana sa nekim haloom tamne materije, pri čemu se razmatra isključivo sferni kolaps haloa. Kasniji analitički i empirijski modeli su pokazali da PS fit precenjuje broj haloa tamne materije male mase i da potcenjuje broj haloa velike mase. Sama funkcija fitovanja je data kao:

$$f_{PS}(\sigma) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{\delta_c}{\sigma} \exp\left(-\frac{\delta_c^2}{2\sigma^2}\right) \quad (2.15)$$

gde je $\delta_c = 1.686$ i predstavlja kritičnu vrednost perturbacija gustine sfere tamne materije nakon koje ona kolapsira u virijalizovani halo. Ovde je σ varijansa mase koju smo računali ranije.

2.4.1.2 Šet Mo i Tormen

Poboljšanje u odnosu na funkciju za fitovanje PS-a je predstavljeno u radu Šeta, Moa i Tormena (Sheth et al., 2001, SMT u daljem tekstu). Oni su proširili fit PS-a tako što su umesto sfernog kolapsa, ubacili model eliptičnog kolapsa haloa. Izveli

su analitički fit koji je pokazivao manje odstupanje u odnosu na funkciju mase dobijenu direktno iz numeričkih simulacija. Njihova funkcija je data kao:

$$f_{SMT}(\sigma) = A \sqrt{\frac{2a}{\pi}} \left[1 + \left(\frac{\sigma^2}{a\delta_c^2} \right)^p \right] \frac{\delta_c}{\sigma} \exp \left[-\frac{a\delta_c^2}{2\sigma^2} \right] \quad (2.16)$$

gde je $A = 0.3222$, $a = 0.707$ i $p = 0.3$, a $\delta_c = 1.686$. Interesantno, ukoliko se vrednosti konstanti podese da budu: $A = 0.5$, $a = 1$ i $p = 0$ dobijamo PS fit koji je predstavljen iznad.

2.4.1.3 Voren

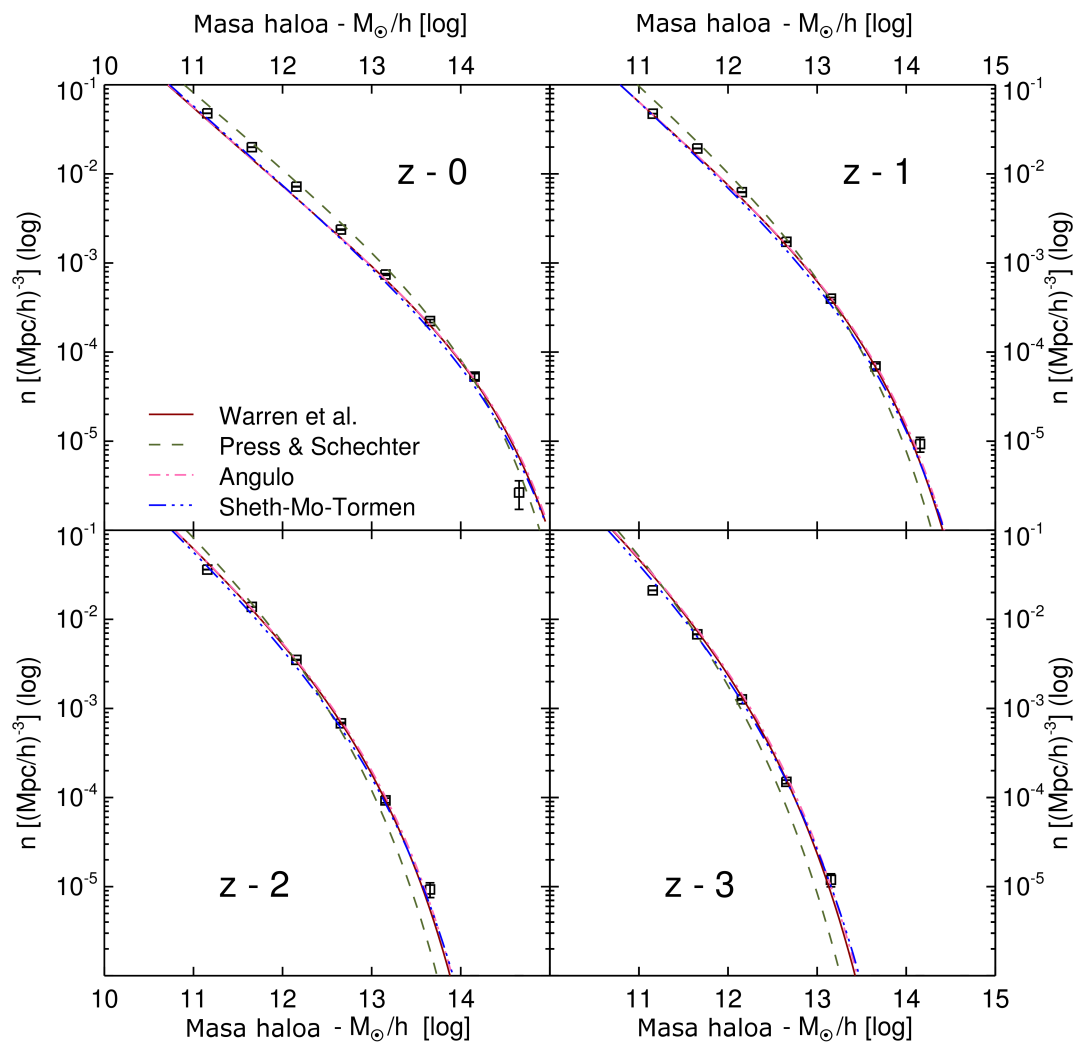
Jedan od jako interesantnih (za ove rezultate) empirijski dobijenih fitova je fit predstavljen u radu Vorena i koautora (Warren et al., 2006, Voren u daljem tekstu). Skrenućemo pažnju na njega i koristiti ga u analizi iz prostog razloga što je dobijen korišćenjem velikog broja takozvanih *zoom-in* numeričkih simulacija sa stepenim povećanjem mase, koristeći isti kod, iste vrednosti kosmoloških parametara, sa statistikom koja pokriva iste intervale masa kao i kosmološka simulacija koja se koristi ovde. Sama funkcija fitovanja je data kao:

$$f_W(\sigma) = 0.7234 (\sigma^{-1.625} + 0.2538) \exp \left[\frac{-1.1982}{\sigma^2} \right] \quad (2.17)$$

2.4.1.4 Angulo

Još jedan empirijski fit za funkciju mase haloa koji je korišćen u analizi je razvijen od strane Angula i koautora (Angulo et al., 2012). Dobijen je kao rezultat kosmološke simulacije koja je bez presedana (u datom trenutku) po veličini kutije i broju čestica - koristi 6720^3 čestica tamne materije u periodičnoj kutiji stranica $3 \text{ Gpc}/h$, time omogućavajući da se u okviru jedne simulacije pokrije daleko veći raspon masa nego što je moguće sa Vorenovim fitom. Empirijski dobijena formula je data kao:

$$f_A(\sigma) = A \left[\left(\frac{b}{\sigma} \right)^a + 1 \right] \exp \left[-\frac{c}{\sigma^2} \right] \quad (2.18)$$



Slika 2.8: Funkcija mase haloa: gustina haloa tamne materije u funkciji intervala mase, izračunata za 4 različita crvena pomaka ($z \sim 0, 1, 2, 3$). Kvadratići predstavljaju centre mase intervala sa širinom od 0.5 dex. Rezultati simulacije su upoređeni sa 4 različita fita, od toga dva analitička: Pres-Šekter i SMT; i dva numerička: Voren i Angulo. Greške su Poasonove standardne greške.

gde konstante imaju vrednosti: $A = 0.201$, $a = 1.7$, $b = 2.08$ i $c = 1.172$.

2.4.1.5 Uporedna analiza fitova

Nakon računanja funkcije mase haloa predstavljene simulacije, upoređujemo je sa nekoliko analitičkih i numeričkih rešenja. Na slici 2.8 možemo videti funkciju mase haloa iz simulacije na 4 različita crvena pomaka ($z \simeq 0, 1, 2$ i 3) sa fitovima analitičkih funkcija prezentovanim u formi linija. Oni mogu pokrivati veći interval masa, ali su ograničeni na raspon od 10^{10} do $10^{15} M_{\odot}/h$ da bi moglo direktno da se uporede fitovi sa predstavljanim rezultatima simulacije. Kvadrati predstavljaju centre masa intervala korišćenih da se grupišu haloii tamne materije određene mase iz kataloga haloa. Ti intervali su izabrani da budu širine 0.5 dex i kao što se može videti broj intervala je manji na visokim crvenim pomacima pošto se na njima haloii većih masa još uvek nisu formirali (pa su intervali masa koji ih pokrivaju prazni). Može se primetiti da postoji slaganje između fitova na svim crvenim pomacima osim sa fitom Pres Šektera koji divergira i na visokim i na niskim intervalima masa kroz sve crvene pomake. Dobro slaganje između simulacije i ostalih fitova (osim PS kao što je pomenuto) je primetno na svim crvenim pomacima osim na $z = 0$, gde postoji nešto veći broj haloa u izabranim intervalima na manjim masama i gde postoji divergiranje za intervale sa najvećim masama haloa što je verovatno posledica nedovoljne populisanosti tog intervala u datom slučaju.

2.5 Funkcija rasta haloa

Još jedna metoda za razmatranje distribucije haloa tamne materije kroz simulaciju je analiziranje funkcije rasta haloa predstavljene u radu Hajtmanove i koautora (Heitmann et al., 2006). Definisana je kao broj haloa u određenom intervalu mase u jedinici vremena kroz celu simulaciju. Za razliku od funkcije mase

haloa koja daje presek u jednom vremenskom trenutku, funkcija rasta haloa daje pregled distribucije mase haloa kroz neki interval vremena. Ovde će biti predstavljeni rezultati iz rada Martinović (2015) gde je funkcija rasta data u intervalu koji obuhvata sve preseke stanja, odnosno u intervalu koji obuhvata celokupno vreme trajanja simulacije, čime je dobijena veoma fina vremenska rezolucija i praktično kontinualna analiza rasta haloa. Funkcija rasta haloa je korišćena da se ispita vremenska evolucija zastupljenosti haloa zadatih intervala mase i da se dobije uvid u to kako se u tim intervalima mase menja odnos populisanosti u vremenu.

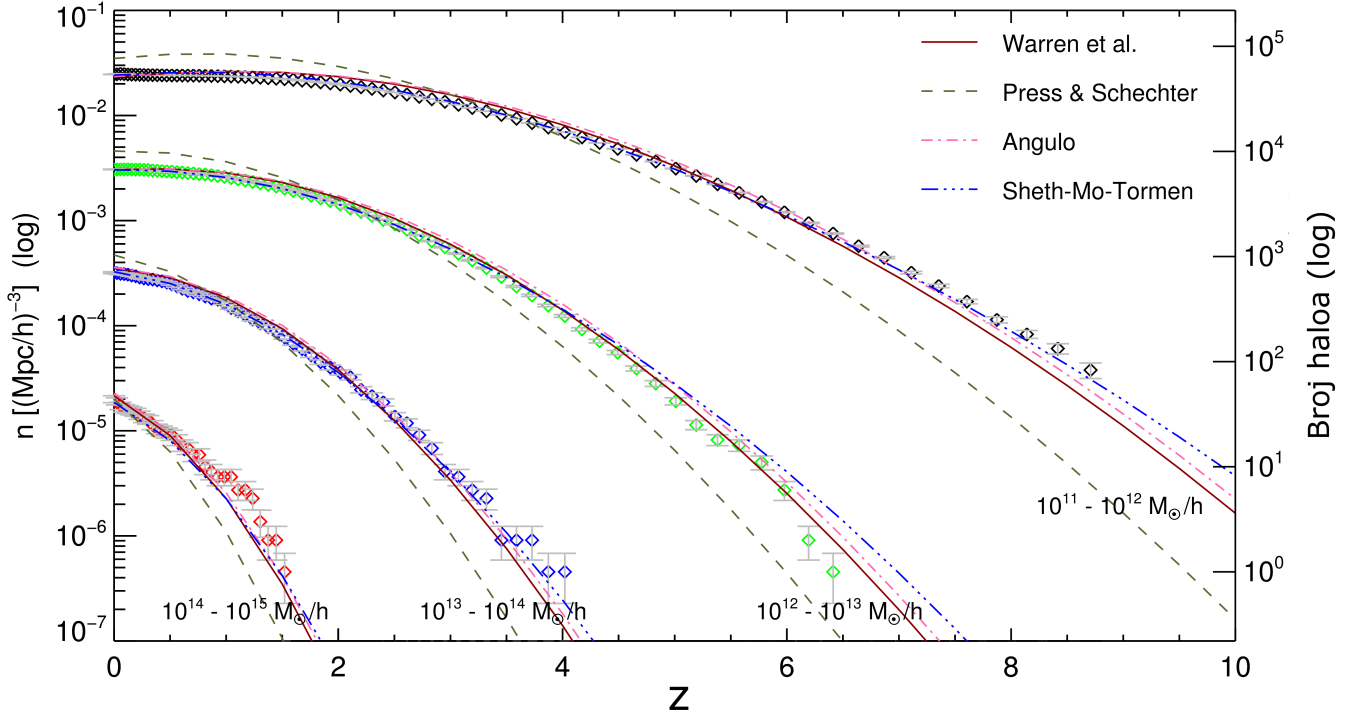
Intervali mase su izabrani da budu jako široki da bi bila obezbeđena populisanost svakog od njih i u najranijim trenucima. Drugačije rečeno, široki intervali mase su omogućili da se broj slabo populisanih intervala mase u bilo kom trenutku svede na minimum, pogotovu ako imamo u vidu da u jako kratkim vremenskim intervalima postoje značajne promene populisanosti nekih intervala. Sa druge strane, intervali mase su dovoljno široki da se izvuče dovoljno informacija o evoluciji gustine haloa malih i velikih masa. Formirana su četiri intervala mase koji pokrivaju raspon od $10^{11}M_{\odot}/h$ do $10^{15}M_{\odot}/h$.

Funkcija rasta haloa je dobijena integracijom kroz crvene pomake funkcije mase za zadate intervale mase i predstavljena je kao:

$$n(M_1, M_2, z) = \int_{M_1}^{M_2} F(M, z) d \log M \quad (2.19)$$

gde je $n(M_1, M_2, z)$ gustina haloa u intervalu mase sa granicama M_1, M_2 na crvenom pomaku z za datu funkciju fitovanja $f(\sigma)$ koja definiše funkciju mase haloa $F(M, z)$ kao što je predstavljeno u jednačini 2.4.

Na slici 2.9 funkcija rasta haloa predstavljene simulacije je data pored analitičkih i empirijskih predviđanja. Ona predstavlja broj haloa u određenom intervalu mase koji se nalaze u jedinici zapremine dat u funkciji crvenog pomaka. Isti fitovi koji su korišćeni za funkciju mase haloa su prezentovani ovde sa tačkama iz simulacije koje su predstavljene preko njih. Sa slike je jasno da su rezultati pred-



Slika 2.9: Funkcija rasta haloa: gustina haloa u funkciji crvenog pomaka prezentovana za 4 intervala mase označenih različitim bojama rombova. Rezultati simulacije su upoređeni sa 4 različita fita, istim fitovima koji se koriste i za funkciju mase haloa na slici 2.8. Greške su Poasonove standardne greške.

stavljani kroz 4 intervala mase koji pokrivaju mase od $10^{11} - 10^{15} M_{\odot}/h$ i koji se prostiru kroz celo trajanje simulacije u kome su identifikovani halo. Koristeći ove podatke je određeno oko kojih crvenih pomaka počinju da se formiraju halo određene mase i koliko ih se očekuje u određenom vremenskom trenutku. Neiznenađujuće, vidimo neslaganje sa Pres-Šekter fitom u odnosu na ostale fitove, gde je to posebno izraženo na velikim crvenim pomacima. Štaviše, sada je jasno vidljivo da na visokim crvenim pomacima svi fitovi donekle divergiraju. Dobro slaganje na manjim crvenim pomacima (pogotovu $0 < z < 1$) između rezultata simulacije i svih fitova je primetno kroz sve intervale masa. U intervalu sa najvećim masama

postoji odstupanje u okviru koga se dobije nešto veći broj haloa na $z > 1$, ali kako je već rečeno (i jasno iz drugih analiza) to je verovatno stohastičan efekat usled slabe populisanosti tog intervala mase na tim crvenim pomacima. Isti problem se može primetiti (neslaganja) u početnom graničnom slučaju ostalih intervala mase sa istim uzrokom (mali broj haloa u datom trenutku u tom intervalu mase). Za interval obeležen plavim dijamantima, između $10^{13}M_{\odot}/h$ i $10^{14}M_{\odot}/h$, vidimo da na najvišim crvenim pomacima sukcesivno u par preseka stanja imamo isti broj haloa dok njihov broj ne počne značajnije da raste kako simulacija odmiče.

Ako uporedimo rezultate simulacije i fitove za različite intervale masa na slici 2.9, postaje jasno da se intervali sa masivnijim haloima počinju pojavljivati kasnije u simulaciji još jedanput naglašavajući činjenicu da se haloji većih masa formiraju kasnije u odnosu na početak simulacije.

2.6 Diskusija

Prezentovani su rezultati kosmološke simulacije N-tela izvršene sa GADGET2 kodom u periodičnoj kutiji sa stranicom od 130 Mpc/h sa 512^3 čestica tamne materije. Katalog haloa i drvo sudara su dobijeni uz pomoć ROCKSTAR koda i njihovom analizom je dobijena statistika i distribucija haloa tamne materije. U svrhe popularizacije je izvršena i vizuelizacija simulacije. Poseban osvrt je posvećen vremenu formiranja haloa, stopi velikih sudara, funkciji mase haloa i funkciji rasta haloa. Sve pomenute analize su izvršene sa veoma dobrom vremenskom rezolucijom i upoređene su i sa analitičkim i sa empirijskim fitovima.

Kratak pogled na ukupan broj haloa po zapremini kroz sve crvene pomake nam pokazuje da postoji očekivano ponašanje u vidu rasta broja haloa, koji dostiže svoj vrhunac i nakon toga opada kako se simulacija odvija.

Drvo sudara nam, pored ostalih stvari, daje uvid u velike sudare predstavljene

simulacije. Ako se fokusiramo na grafike koji se bave srednjim brojem velikih sudara u jedinici vremena primećujemo da postoji dobro slaganje između dobijenih rezultata i ranijih u vidu rezultata iz rada Gotlibera i koautora (Gottlöber et al., 2001), gde oni ispituju samo velike sudare primarnih haloa (koji odgovaraju haloima tamne materije sa masama preko $10^{12} M_{\odot}/h$). Sa druge strane postoji neslaganje između dobijenih rezultata i rezultata iz Milenijum simulacije (Fakhouri & Ma, 2008; Fakhouri et al., 2010). Neslaganje postoji zbog različitih struktura koje se uzimaju u obzir i zbog toga što analizirana simulacija ima manji statistički uzorak i finiju vremensku rezoluciju, što dovodi do manjeg broja glavnih sudara u svakoj tački.

Zavisnost od vremenske rezolucije je pokazana u radu Gotlibera i koautora (Gottlöber et al., 2001), gde se kao što se i očekuje rasturanje povećava sa finijom rezolucijom, tj. pokazuje se da broj populisanosti izabranih intervala postaje mali kako se intervali usitnjavaju što dovodi do stohastičnih efekata. Rasturanje usled niskog broja slučajeva je očigledno za veće crvene pomake u našem uzorku prosto zato što se prvi halo razmatrane mase ne pojavljuju do $z \sim 6$, što znači da je i sam broj glavnih sudara mali oko tog crvenog pomaka.

Angulo i koautori (Angulo et al., 2009) su razmatrali intervale masa iz Milenijum simulacije ($> 10^{12} M_{\odot}/h$) koji su isti kao i intervali iz ove analize sa istim razmatranjem sudara. Rezultati se bolje slažu nego rezultati Fakhurija i Ma (Fakhouri & Ma, 2008) još uvek sa određenim smicanjem u odnosu na dobijene podatke. Ova situacija nas upućuje na rad Hopkinsa i koautora (Hopkins et al., 2010), u kome su pokušali da kvantifikuju doprinose nepouzdanosti i sistematičnih efekata za različite načine izvođenja stope sudara i došli do zaključka da postoji neslaganje koje ide do faktora $\sim 2 - 3$ za simulacije tamne materije dovoljno velike rezolucije ako se sudari definišu konzistentno (naravno u okviru iste kosmologije).

Još jedan test za validaciju našeg drveta sudara je predstavljen u radu Genela

i koautora (Genel et al., 2009) iz koga smo koristili funkciju fitovanja. Uporedili smo je sa našom usrednjenom stopom sudara po Gyr i našli da se stopa sudara skalira sa crvenim pomakom po stepenom zakonu $\propto (1+z)^n$, gde je vrednost n za naše podatke pronađena da iznosi $n = 2.4$. Ovo se slaže sa formom stepenog zakona koji se koristi da se skalira broj sudara sa crvenim pomakom dobijenom iz posmatranja, gde imamo da je $n = 2.43$ (Bridge et al., 2010), $n = 2.5$ (Burkey et al., 1994), $n = 2.3$ (Patton et al., 2002) i $n = 2.7$ (Le Fèvre et al., 2000).

Gledajući sliku koja se bavi ukupnim brojem velikih sudara kroz sve crvene pomake vidimo da njihov broj dostiže vrhunac negde oko $z \sim 2$ što se slaže sa vremenskim trenutkom koji je karakterističan za najveći broj kvazara u zapremini u istoriji svemira. To svakako ide u korist teorija da kvazari nastaju tokom značajnih sudara u kojima se gas efikasno transportuje do supermasivne crne rupe u centru galaksije (Kauffmann & Haehnelt, 2000, itd.). Veliki sudari koje smo našli u okviru naše simulacije su dobra polazna osnova za dalje analize.

Dva grafika (slika 2.6) koja se bave vremenom formiranja haloa daju nam još jedan uvid u evoluciju haloa tamne materije.

Grafik najveće mase haloa (crveni rombovi, slika 2.6) u okviru simulacije je preispitan kao veoma jednostavna ali moćna alatka za preliminarnu analizu simulacije. Ovaj metod je iskorišćen da se identifikuje kada se prvi halo određene mase pojavljuju u simulaciji, što nam daje ograničenje za očekivanje mase pojedinačnih haloa na visokim crvenim pomacima. Na primer, halo veće mase se formiraju kasnije u simulaciji - $10^{12} M_{\odot}/h$ se pojavljuju negde oko $z \sim 6$, halo mase oko $10^{13} M_{\odot}/h$ se mogu razaznati već oko $z \sim 4$, itd. (naravno ovo zavisi i od veličine kutije).

Takođe su ispitani dobijeni halo najveće mase u okviru preseka stanja kao preliminarna metoda analize formiranja haloa tokom kosmološke simulacije. Moderne simulacije postaju sve veće (omogućavaju sve veći broj čestica u simulaciji), bara-

taju sa sve više podataka i povećavaju potražnju za manje zahtevnim analizama u realnom vremenu. Izvlačenje haloa najveće mase u okviru preseka stanja je daleko manje komplikovano (i time zahteva daleko manje resursa) nego generisanje funkcije mase haloa i funkcije rasta haloa, a može biti korišćeno kao indikator gde komplikovanije analize prvo treba da se fokusiraju. Algoritmi za detekciju haloa već mogu da obavljaju analizu u realnom vremenu što čini ovu analizu odmah dostupnom. Mali skokovi u masi (crveni rombovi, slika 2.6) koji se vide na nekoliko mesta su očigledno markeri značajnih slučajeva sudara. Takve informacije su važne ukoliko su resursi za ispitivanje istih ograničeni, a želimo da produbimo analizu. U ovoj situaciji na primer nije neophodno čak ni završiti simulaciju.

Ipak, analiza haloa najveće mase nam ne daje ukupan broj haloa u okviru sličnog raspona mase, niti vreme formiranja koje je karakteristično za te haloe. Za to nam je potrebna malo kompleksnija analiza koju predstavljamo kroz srednje vreme formiranja haloa (plavi trouglovi na slici 2.6). Broj haloa tamne materije na poslednjem crvenom pomaku je dovoljan da potvrdimo da je srednje vreme formiranja haloa u analiziranoj simulaciji u dobrom slaganju sa rezultatima drugih simulacija. Na primer primećujemo dobro slaganje između empirijskih fitova dobijenih analizom Milenijum simulacije u odnosu na rezultate istih analiza iz naše simulacije. Imajući u vidu da je u srednjem vremenu formiranja haloa sadržana informacija o svim identifikovanim haloima koji su podeljeni u odgovarajuće intervale mase na $z = 0$, može se još jednom potvrditi da masivniji halo nastaju kasnije u simulaciji.

Ako imamo u vidu da manje masivni halo imaju tendenciju da nastaju ranije, a da masivniji nastaju kasnije, zajedno sa urađenom vizuelizacijom i analizama se može potvrditi da je u toku grupisanje struktura (u formi jata). Takva grupisanja posle nekog vremena smanjuju mogućnost da se dogode veliki sudari, što nam daje uvid u to šta se dešava na slici 2.5.

Da bismo analizirali u više detalja opštu evoluciju haloa u određenim intervalima mase i kroz sve crvene pomake, okrećemo se daleko specifičnijim analizama, kao što su funkcija mase haloa i funkcija rasta haloa.

Jedno od pitanja koje se nameće u ovim analizama jeste koliko različiti kosmološki parametri utiču na funkciju mase haloa? Dženkins i koautori (Jenkins et al., 2001), Voren i koautori (Warren et al., 2006) i Tinker i koautori (Tinker et al., 2008) između ostalih su probali da se posvete davanju odgovora na ovo pitanje. Funkcija multipliciteta ima univerzalnu formu, gde se isti parametri za fitovanje koriste konzistentno kroz različite kosmologije. Dženkins je našao konzistentnost za različite CDM kosmologije do $\sim 15\%$ (tj. upoređivanje veličine i broja struktura između kosmoloških simulacija i posmatranja iznosi 15% kao posledica nedovoljno dobro određenih kosmoloških parametara u okviru korišćenog kosmološkog modela). Međutim kroz različite ΛCDM kosmologije Voren i koautori (Warren et al., 2006) su pokazali da postoji nezanemarljivo neslaganje ako se variraju neki parametri (Ω_m , σ_8 , h), gde za male varijacije konzistentnost ide do $\sim 5\%$. Tinker i koautori (Tinker et al., 2008) su takođe potvrdili ta neslaganja, ali je naglašeno da su ona posledica velikog variranja pomenutih parametara ($\Omega_m = 0.1 - 1$). Konzistentnost kroz različite kosmologije ispod $\sim 5\%$ je dostižna (i naravno poželjna u eri precizne kosmologije) ali to je izuzetno zahtevan zadatak kojim se nećemo baviti u okviru ove disertacije. Imajući u vidu da sve funkcije mase koje referenciramo ovde imaju slične kosmologije (izuzev Pres-Šekter rešenja) konzistentnost između njih je dovoljna za opšte poređenje.

Gledajući funkciju mase haloa na slici 2.8, gde upoređujemo očekivanja sa našim rezultatima vidimo dobro slaganje sa svim fitovima do $z = 0$, gde je primetan nešto manji broj najmasivnijih haloa u našoj simulaciji, što je lako objašnjivo sa malim statističkim uzorkom koji popuniše pomenuti interval masa. Bolje slaganje je jasno vidljivo na drugim crvenim pomacima. Isto je primetno da su SMT,

Voren i Angulo fitovi konzistentni između sebe. Sa druge strane vidimo da PS fit nije u dobrom slaganju za sve intervale mase i na svim crvenim pomacima. Najmanje neslaganje između PS i ostalih fitova je na crvenom pomaku 0 i postaje veće kako se pomeramo ka ranijim crvenim pomacima, gde neslaganje postaje drastično veće za PS kod populisanja intervala vezanih za najmasivnije haloe na visokim crvenim pomacima. Ovo je posledica toga da najmasivniji halo i imaju tendenciju da najviše odstupaju od sferičnosti (koja je osnovna pretpostavka PS formalizma) zbog njihove veoma nasilne istorije (sudari, sredina veće gustine, itd), što dovodi da kolapsiraju brže nego što PS pretpostavlja, te ih realno ima više od PS predviđenog broja (što se vidi i iz naših i iz ostalih rezultata). Takođe, kao što je razmatrano, različita kosmologija koja se koristila za PS formalizam može doprineti ovom primećenom neslaganju.

Ako obratimo pažnju na funkciju rasta haloa, za razliku od ranijih rezultata ovde je ona proširena da pokrije celu simulaciju, odnosno ceo period u kome su identifikovani halo i. Ako pogledamo, na slici 2.9, odmah je jasno da svi fitovi divergiraju na većim crvenim pomacima i upravo na tom mestu možemo videti pravu razliku između njih. Primećuje se da su Voren i Angulo fitovi najkonzistentniji između sebe, što je posledica da su oba izvedena iz numeričkih simulacija, blago se razilazeći na visokim crvenim pomacima. U odnosu na ove fitove i na tim crvenim pomacima postaje dosta očigledno koliko PS divergira od ostalih fitova.

Interesantno, ali prezentovani rezultati u okviru funkcije rasta haloa prate SMT fit na najnižem intervalu masa haloa. Interval sa najvećim masama je ponovo pogođen malim statističkim uzorkom, mada između $z \sim 1$ i $z \sim 0$ svi fitovi i dobijeni rezultati konvergiraju. Srednji intervali masa (uslovno rečeno) su u dobroj saglasnosti sa Voren fitom. To je u potpunosti očekivano imajući u vidu da i simulacija Vorena i naša imaju ograničenje u veličini kutije, gde pogotovo *zoom-in* resimulacije koje su izvršene u Vorenovoj simulaciji imaju ograničen broj realizacija

svemira. Za razliku od njih Angulo je imao jednu simulaciju sa izuzetno velikom periodičnom zapreminom i superiornom rezolucijom mase.

Interesantno od prvog identifikovanja haloa velike mase (više od $10^{14} M_{\odot}/h$), detektujemo nešto veći njihov broj na ranijim crvenim pomacima, kao što se i vidi sa funkcije rasta haloa na slici 2.9 . Ali na kraju zapravo završimo sa nešto manjim njihovim brojem na crvenom pomaku 0, kako se i vidi sa funkcije mase haloa na slici 2.8. Treba primetiti i da njihov ukupan broj nije dostigao plato kao što se vidi za haloe u intervalu manjih masa. Očigledno je da funkcije mase imaju različito vreme dostizanja maksimuma (en. crossover time) koje zavisi od njihove mase.

Proširivanjem funkcije rasta haloa postaje moguće da se kontinualno prati evolucija broja haloa u datom rasponu mase i da se kvalitativno upoređi sa različitim rezultatima na svim, a posebno na visokim crvenim pomacima. To je svakako oblast posebnog interesovanja koja je sve više u fokusu pažnje istraživača u eri precizne kosmologije.

Iz svih analiza kombinovanih sa funkcijom mase haloa i funkcijom rasta haloa se izvlači očigledan zaključak da većina haloa tamne materije migrira od manje mase ka sve masivnijim haloima kao što je i predviđeno *bottom-up* paradigmom modela hladne tamne materije (Peebles, 1965; Silk, 1968, itd.). To ukazuje na izraženije grupisanje u masivne strukture prema niskim crvenim pomacima, odnosno ka jasnom favorizovanju grupisanja materije u jata galaksija.

Glava 3

Dinamička podela jata galaksija

3.1 Uvod

Kao što smo videli u poglavlju 2, *bottom-up* model formiranja galaksija Λ CDM paradigme dovodi do stvaranja sve većih struktura u svemiru kako vreme odmiče, gde se zapravo ispostavlja da neke od najvećih struktura predstavljaju jata galaksija. U okviru kosmičke mreže ona se formiraju na tačkama koje su predstavljale najveće fluktuacije gustine iz pozadinskog mikrotalasnog zračenja, i u njima dolazi do gravitacionog kolapsa. Kroz istoriju svemira takve lokacije su identifikovane i kao mesta gde se seku filamenti, sa stabilnim prilivom galaksija (Kravtsov & Borgani, 2012).

Jata galaksija mogu imati od nekoliko stotina do nekoliko desetina hiljada galaksija. Jasno je da mogu, sa ovako bogatim cenzusom članova, da imaju različit morfološki izgled, pa je kroz istoriju bilo nekoliko pokušaja da se klasifikuju na taj način. Prva klasifikacija je predložena od strane Cvikija i koautora (Zwicky et al., 1961) gde su podelili jata galaksija na: kompaktna jata, srednje kompaktna jata i otvorena jata u odnosu na njihovu centralnu koncentraciju. Malo nakon toga je Abel predložio podelu na pravilna (en. regular) i nepravilna (en. irregular) jata

(Abell, 1965). Prva su sferno simetrična, sa izraženom centralnom koncentracijom i eliptičnim galaksijama kao dominantnim morfološkim tipom unutar jata, a kao primer je navedeno Koma jato galaksija. Druga vrsta su jata galaksija bez jasne sferičnosti i bez jasne centralne koncentracije i sa daleko bogatijim morfološkim tipovima unutar jata, gde je kao primer navedeno Virgo jato galaksija.

Istovremeno sa prethodnim klasifikacijama je i Morgan (Morgan, 1961) predstavio na američkoj nacionalnoj akademiji nauka predlog podele jata galaksija po morfološkim tipovima koji dominiraju njihovim centralnim delovima. Ova podela je kasnije modifikovana iz čega je proistekla Bauc-Morgan klasifikacija galaksija (Bautz & Morgan, 1970). Prema Bauc-Morgan klasifikaciji, jata galaksija se dele na tri tipa:

- tip I - u jatu postoji dominantna centralna (cD) galaksija;
- tip II - u jatu dominiraju eliptične galaksije, ali ne postoji jedna dominantno centralna (cD) ili najsvetlija galaksija (en. brightest cluster galaxy);
- tip III - ostala jata, bez dominantnih galaksija sa različitim i izmešanim morfološkim tipovima reprezentovanim u jatu.

Jako brzo nakon toga je zaključeno (Bahcall, 1977) da korelacije između koncentracije, broja članova jata i njegovog Bauc-Morgan tipa sugerise vezu između dinamičkog stanja jata i njegovog izgleda (Donahue et al., 2016).

Ubrzo je postalo jasno i da jata galaksija predstavljaju jako bitan pokazatelj za ispitivanje kosmoloških parametara. Međutim, za to je potrebno precizno odrediti masu jata, pa je pored morfologije jata i taj parametar postao bitan. Za određivanje mase se koristi nekoliko metoda, gde je jedna od njih i korišćenje brzina članova jata i pretpostavka dinamičke ravnoteže (Saro et al., 2013, itd.), čime se implicira i veza sa morfologijom. Tj. ukoliko želimo da izračunamo masu jata galaksija pretpostavljamo da je jato virijalizovano i da su orbite članova jata približno

izotropne, što jasno utiče i na morfologiju. Međutim, jata galaksija su dinamički mlade strukture, iz kosmologije preko gravitacionog kolapsa struktura može da se dobije da vreme formiranja struktura koje su reda veličine jata iznosi oko 9 Gyr (Ryden, 2003), što je jaka indikacija da su i danas u toku procesa formiranja. Zaista, Hvang i Li (Hwang & Lee, 2007) su koristeći brzine članova jata tražili indikatore postojanja rotacije unutar jata i našli da svega 10% jata galaksija koje su razmatrali rotira i da se nalazi u stanju dinamičke ravnoteže, odnosno da nisu imala skoro značajnu perturbaciju u vidu nekog sudara. Njihovu analizu su proširili Manolopulo i Plionis (Manolopoulou & Plionis, 2017) analizirajući iz SDSS kataloga Abel grupu jata galaksija. Njihov rezultat ukazuje da između 23% i 28% jata galaksija ima rotaciju, tj. da su u dinamičkoj ravnoteži. Povrh svega, oni su otkrili i 5 jata galaksija iz Abel grupe koja imaju jasno izražene podstrukture.

Iz priloženog se jasno implicira da su dinamika samog jata, morfološki tip jata i samih članova jata usko povezani, gde treba primetiti da nam kosmološke simulacije daju savršenu podlogu za ispitivanje tih parametara, tako da će jedan od rezultata ovde predstavljenih biti i dinamičko ispitivanje jata galaksija iz Ilustris-1 simulacije.

3.2 Ilustris-1 kosmološka simulacija

U svrhu ovog ispitivanja je korišćena Ilustris-1 kosmološka hidrodinamička simulacija sa kompletnim fizičkim modelom za formiranje galaksija predstavljena u radu Vogelsberger et al. (2014). Uključeno je formiranje zvezda sa galaktičkim super vetrovima vođenim formiranjem zvezda kao i efektom na njihovu sredinu, zvezdana evolucija sa hemijskim obogaćivanjem i gubitak mase zvezda koji nastaje usled toga, kao i povratna sprega od aktivnih galaktičkih jezgara i formiranje i evolucija super masivnih crnih rupa.

Simulacija koristi Λ CDM kosmologiju sa sledećim parametrima:

$$\begin{aligned}
 \Omega_m &= 0.2726, \\
 \Omega_\Lambda &= 0.7274, \\
 \Omega_b &= 0.0456, \\
 \sigma_8 &= 0.809, \\
 n_s &= 0.963, \\
 h &= 0.704
 \end{aligned}
 \tag{3.1}$$

Početni uslovi su generisani na $z = 127$ u periodičnoj kutiji sa dužinom stranica od 106.5 Mpc, sa inicijalnom temperaturom gasa od 245 K (Vogelsberger et al., 2014).

Veoma visok broj elemenata koji predstavljaju barione i tamnu materiju od 2×1820^3 daje neverovantu rezoluciju mase bariona od $1.26 \times 10^6 M_\odot$ i rezoluciju mase tamne materije od $6.26 \times 10^6 M_\odot$. Gravitaciona dužina ublažavanja za Ilustris-1 za barione na $z = 0$ iznosi 710 pc, dok najmanja rezolucija hidrodinamičke ćelije iznosi 48 pc (Vogelsberger et al., 2014). Svi kompaktni patuljasti kandidati u ovom radu su razlučeni sa bar 300 čestica na $z = 0$.

Identifikacija haloa u simulaciji je izvršena sa prijatelj-prijatelja algoritmom sa standardnom vrednošću faktora za dužinu povezivanja koja je uzeta da bude 0.2 od srednjeg rastojanja čestica u simulaciji. Za minimalan broj čestica prilikom identifikacije haloa su uzete 32 čestice. Sledeći korak je izvlačenje gravitaciono vezanih podstruktura koji je urađen sa SUBFIND algoritmom (Springel et al., 2001). Drvo sudara je formirano korišćenjem SUBLINK koda (Rodriguez-Gomez et al., 2015). Rezultati iz simulacije su postali dostupni kroz javno objavljivanje podataka (Nelson et al., 2015).

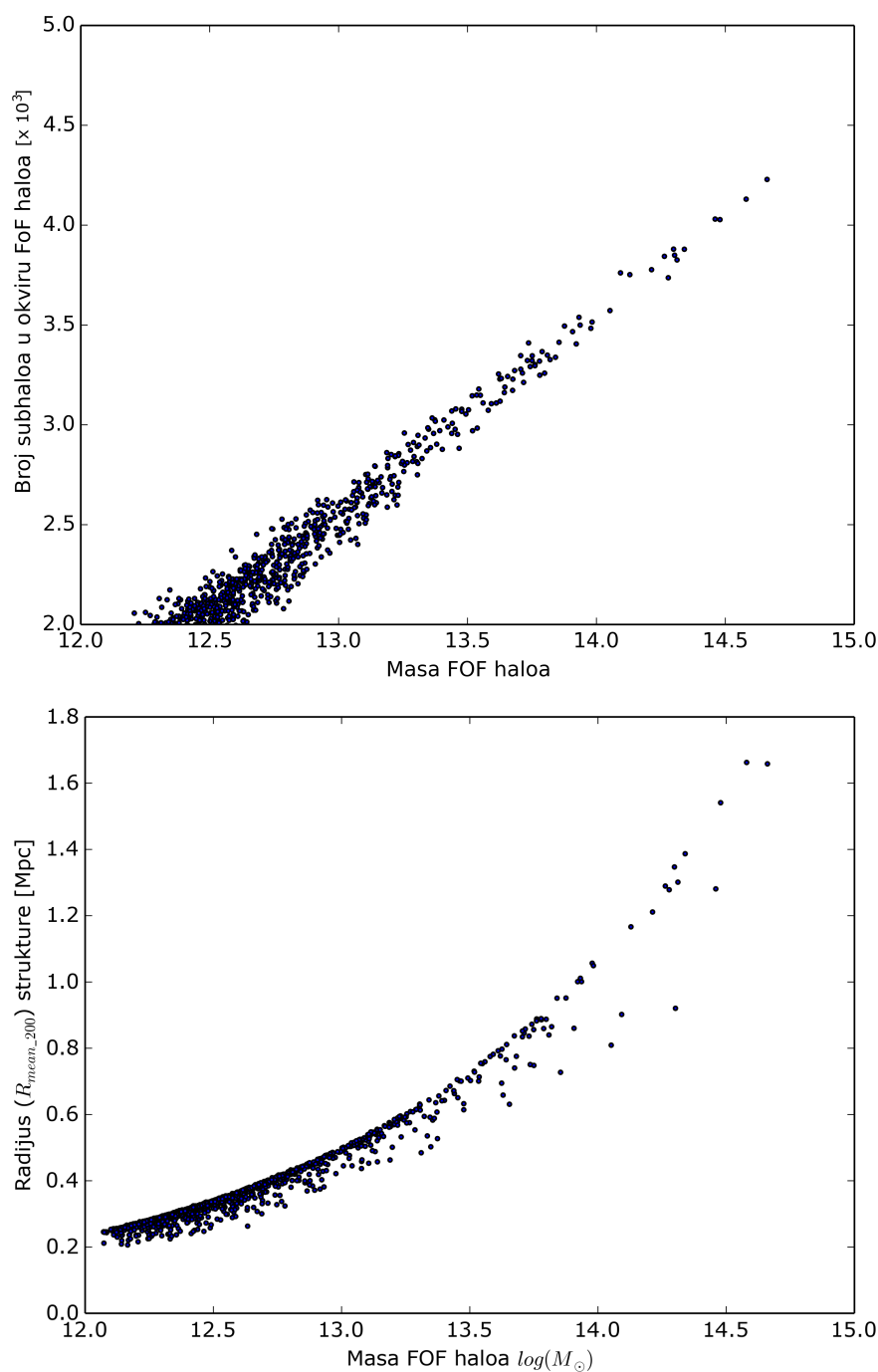
3.3 Identifikovanje jata galaksija u simulaciji

Prilikom analize struktura u kosmološkim simulacijama, jedan od problema je i definisanje granica u okviru kojih se razmatra određena struktura. Ako želimo da razmatramo neka svojstva jata galaksija ili njihovih članova, moramo odrediti koje strukture ćemo označiti kao jata. Problem nastaje zbog činjenice da nam je iz kosmoloških simulacija dostupan potpuni cenzus struktura, što čini problematičnim gde napraviti markaciju između jata galaksija i grupa galaksija koje se kontinualno nadovezuju po masi, veličini i broju članova, kao što se recimo vidi sa slike 3.1. Na toj slici je prikazana zavisnost mase (do donje granice ukupne mase od $10^{12} M_{\odot}$) detektovanih struktura i broja njihovih članova i zavisnost mase od $R_{\text{mean},200}$ radijusa.

Jedno od mogućih rešenja je da se izabere arbitrarna granica, obično u masi, praćena sa još nekim parametrom. Recimo, baš prilikom ispitivanja članova jata u Ilustris-1 simulaciji, Mistani i koautori (Mistani et al., 2016) su odabrali sledeće kriterijume (za koje nisu dali objašnjenja): masa iznad $5 \times 10^{13} M_{\odot}$ unutar radijusa koji podrazumeva gustine veće od 200 kritičnih gustina svemira. Ovakav kriterijum za odabir se tolerisao iz prostog razloga što se zasnivao na poznatim posmatračkim masama za jata i za poznate grupe, ali jasno, sama granica nije bila egzaktno određena.

To se sve promenilo radom Pola i koautora (Paul et al., 2017) koji su u želji da probaju da nađu granicu za grupe galaksija, pokazali da se zakoni skaliranja jata galaksija, zatim termalne i ne-termalne ukupne energije ne održavaju ispod jasne granice od $8 \times 10^{13} M_{\odot}$ i radijusa od $\sim 1\text{Mpc}$. Koristeći datu granicu oni su podelili objekte na galaktičke grupe, ako se nalaze ispod date mase i radijusa, odnosno na jata galaksija ukoliko se nalaze van datih granica. Ovde ćemo prihvatiti njihov rezultat i iskoristiti ga da definišemo jata galaksija koja ćemo dalje analizirati.

Analizom kataloga haloa iz Ilustris-1 simulacije, nađeno je da postoji 21 objekat



Slika 3.1: Gore: Ukupan broj članova u okviru svake detektovane strukture u odnosu na masu strukture. Dole: Radijus ($R_{mean,200}$) detektovane strukture u odnosu na njenu masu. Na oba grafika je očigledan kontinualni trend od najmasivnijih struktura, odnosno jata galaksija, preko grupa do individualnih galaksija. FOF označava da su haloj dobijeni algoritmom prijatelji-prijatelja.

koji zadovoljava date parametre i koje ćemo smatrati jatima. Njihovi parametri su dati u tabeli 3.1.

3.4 Dinamika jata kroz eliptičnost orbita njegovih članova

Kao što smo videli iz funkcije rasta haloa (slika 2.9), broj haloa u najmasivnijim intervalima mase, koji odgovaraju jatima galaksija, još uvek nastavlja da raste. Njihov proces formiranja koji i dalje teče dovodi u pitanje status dinamičke ravnoteže koja se pretpostavlja za jata (videti recimo: Sarazin, 2003). Imajući u vidu da pored toga imamo i jasne rezultate da nisu sva u dinamičkoj ravnoteži (Manolopoulou & Plionis, 2017), ispitaćemo jata galaksija na $z = 0$ da utvrdimo da li je proces njihovog formiranja završen.

Sa slike 3.2 i slike 3.3, je indikativno da su u okviru uzorka iz Ilustris-1 simulacije na $z = 0$ zastupljeni različiti morfološki tipovi jata, odnosno da imamo jata u kojima masom dominira jedna galaksija (tačke bliže crvenoj liniji na slici 3.2, odnosno jata čije najmasivnije galaksije imaju značajan udeo u ukupnoj masi kako je prikazano na slici 3.3) i da imamo jata u kojima nema dominantne galaksije (tačke dalje od crvene linije, odnosno jata gde najmasivnija galaksija ima mali udeo u ukupnoj masi jata na pomenutim respektivnim graficima). Iz ove proste analize možemo zaključiti da su u našem uzorku pokriveni svi tipovi jata iz Bauc-Morgan klasifikacije.

U svrhu ispitivanja dinamike, izračunate su ekscentričnosti svakog od objekata unutar jata. Međutim, ekscentričnosti nisu računane u odnosu na centar mase samog jata, nego u odnosu na najmasivniju galaksiju unutar istog. Ukoliko su sve ekscentričnosti manje od jedinice, to bi značilo da je jato u potpunosti virijalizovano. Sa druge strane objekti sa ekscentričnostima većim od jedinice se, po

Tabela 3.1: Osnovni parametri za definisana jata galaksija u Ilustris-1 simulaciji. Sleva na desno su dati: oznaka jata (manji broj, masivnije jato), ukupan broj članova jata, ukupan broj članova čija je ukupna masa veća od $10^{10}M_{\odot}$, ukupna masa jata, ukupna masa u okviru $R_{\text{crit},200}$, radijus jata ($R_{\text{mean},200}$), ukupna masa gasa u jatu, ukupna masa tamne materije u jatu i ukupna masa zvezda u jatu.

ID	Br. članova	Br. članova > $10^{10}M_{\odot}$	M_{total} M_{\odot} (log)	$M_{\text{crit},200}$ M_{\odot} (log)	$R_{\text{mean},200}$ [Mpc]	M_{gas} M_{\odot} (log)	M_{TM} M_{\odot} (log)	M_{zvezda} M_{\odot} (log)
0	16937	576	14.66	14.37	1.66	13.48	14.62	13.07
1	13493	384	14.58	14.35	1.66	13.30	14.55	12.94
2	10658	341	14.48	14.34	1.54	13.18	14.44	12.87
3	10723	402	14.46	14.07	1.28	13.17	14.43	12.84
4	7573	225	14.34	14.23	1.39	13.00	14.31	12.69
5	6696	231	14.31	14.11	1.30	13.00	14.28	12.74
6	7583	256	14.30	14.13	1.35	13.02	14.26	12.70
7	7071	272	14.30	13.64	0.92	12.85	14.27	12.79
8	5452	177	14.28	14.07	1.28	13.01	14.24	12.71
9	6979	227	14.26	14.05	1.29	12.89	14.23	12.65
10	5983	191	14.21	14.02	1.21	12.87	14.18	12.61
11	5650	192	14.13	13.91	1.17	12.95	14.09	12.51
12	5768	207	14.09	13.46	0.90	12.52	14.07	12.54
13	3734	156	14.05	13.49	0.81	12.33	14.03	12.56
14	3043	99	13.98	13.80	1.06	12.48	13.95	12.30
15	3272	118	13.98	13.86	1.05	12.20	13.97	12.27
16	3158	128	13.94	13.75	1.00	12.28	13.92	12.33
17	3455	127	13.93	13.77	1.01	12.06	13.92	12.33
18	2542	93	13.92	13.80	1.00	12.12	13.90	12.35
19	2929	114	13.91	13.57	0.86	12.28	13.88	12.35
20	2590	109	13.85	13.33	0.73	12.20	13.83	12.42

definiciji, nalaze na hiperboličnim i/ili paraboličnim orbitama. Ukoliko bi postojao značajan deo istih, to bi impliciralo da se jato ne nalazi u stanju dinamičke ravnoteže.

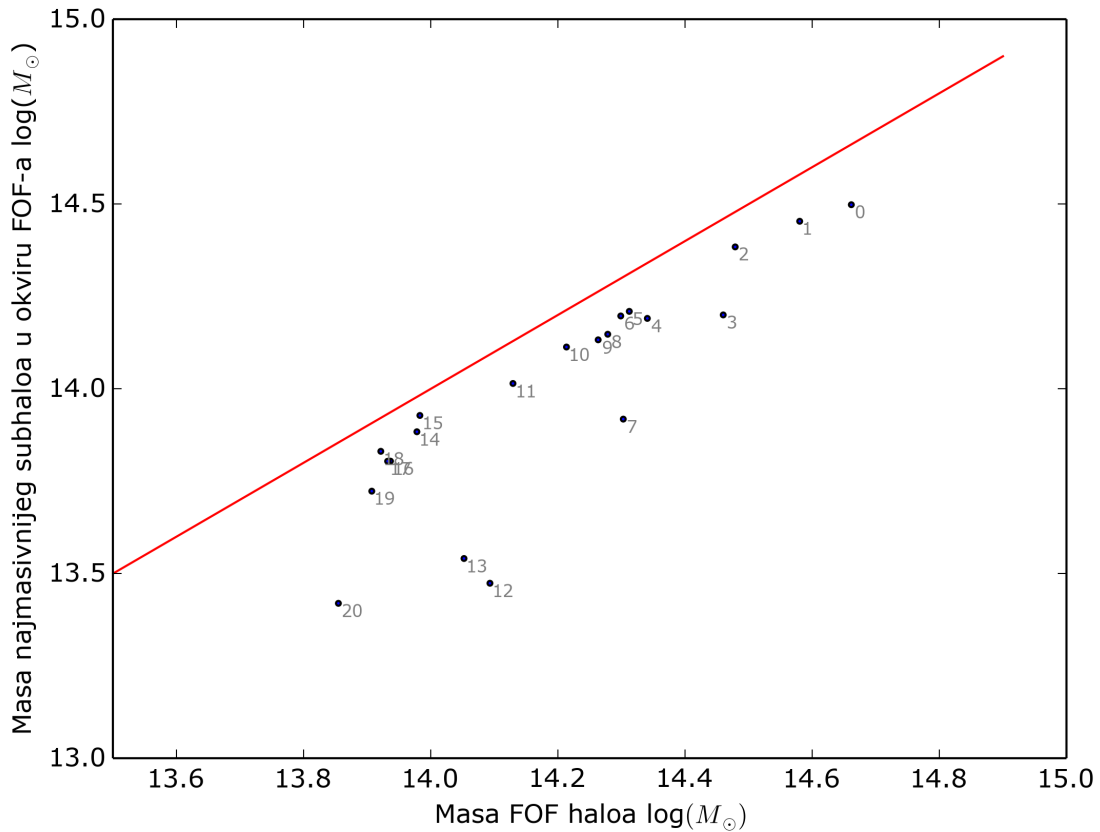
Na slici 3.4 je prikazan odnos zbira mase objekata sa $e > 1$ u odnosu na ukupnu masu jata, gde je bojom označen i broj objekata sa $e > 1$ u svakom jatu.

Na slikama 3.5, 3.6, 3.7 i 3.8 predstavljeni su rezultati ispitivanja ekscentričnosti u odnosu na svako dobijeno jato, pri čemu je za svako dat vizuelni pregled u sve tri ravni i grafik zavisnosti ekscentričnosti od mase. Sa plavom bojom su označeni objekti sa $e > 1$. Pregledom slika može se utvrditi da značajan deo jata ima podstrukture koje su u gravitacionoj interakciji sa glavnom strukturom, odnosno koje su praktično u fazi sudara.

Uporednom analizom slike 3.4 i slika 3.5, 3.6, 3.7 i 3.8 može se videti da postoji 5 jata koje su u fazi sudara sa značajnom masom, odnosno sa ili manjim jatima ili jako masivnim galaktičkim grupama (i to su jata označena sa 0, 3, 7, 12 i 13). Još 5 jata je u interakciji sa galaktičkim grupama veličine Lokalne grupe (jata označena sa 4, 5, 8, 19 i 20), dok za ostatak možemo zaključiti da nemaju značajnih interakcija. Konkretno posmatrajući jata 19 i 20 možemo jasno razlučiti dve odvojene interagujuće strukture koje su sličnih veličina, za razliku od jata 4, 5 i 8 gde vidimo da su u pitanju manje grupe u odnosu na dimenzije jata. Interesantno je da jato 20 zapravo interaguje sa grupom koja ima značajan broj članova, bliži prvoj grupi nego drugoj.

Imajući ovo u vidu napravili smo tri odvojena skupa jata galaksija koja su nam na raspolaganju:

- jata koja su pod uticajem velikog broja objekata u interakciji (preciznije: 0, 3, 7, 12, 13, 19 i 20);
- jata koja apsorbuju grupe koje imaju mali broj članova u odnosu na domi-

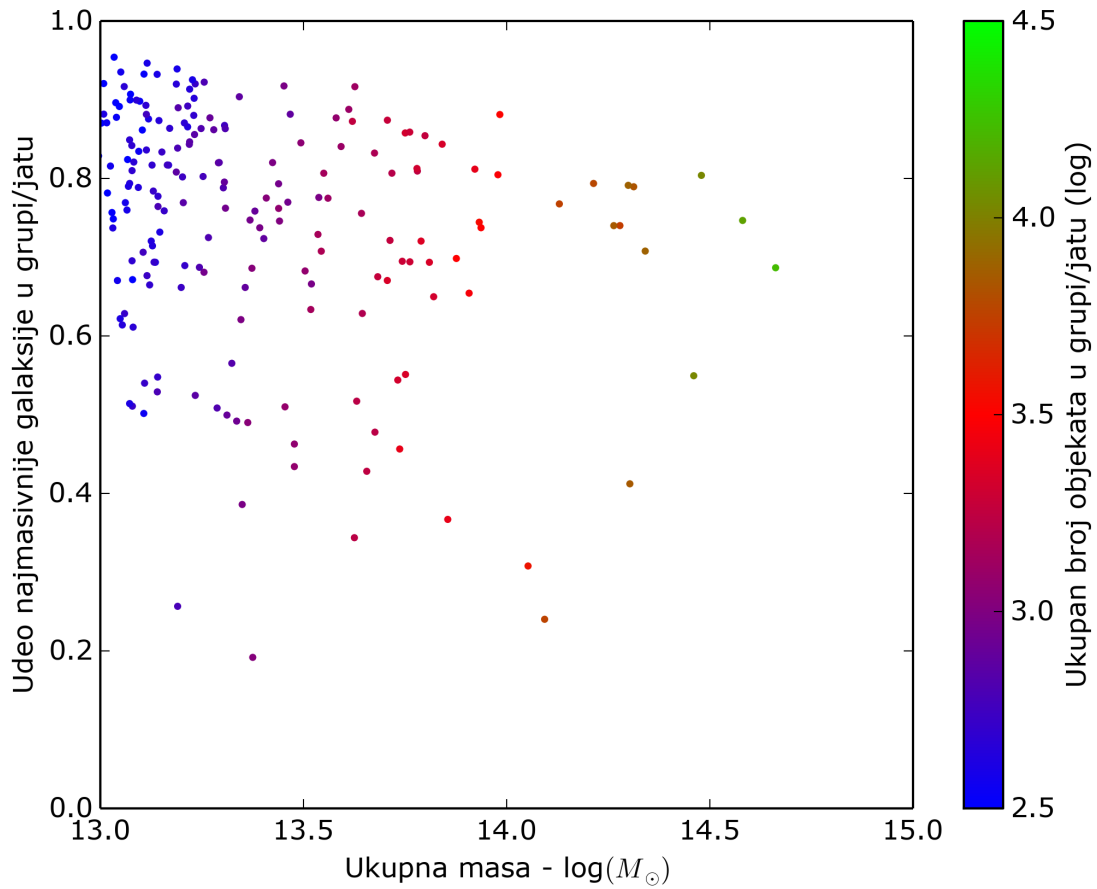


Slika 3.2: Masa najmasivnije galaksije za svako jato iz datog uzorka u odnosu na ukupnu masu jata. Crvena linija označava odnos 1, odnosno da je sva masa jata u jednoj galaksiji. Brojevi odgovaraju oznakama jata galaksija iz tabele 3.1. FOF označava da su haloj dobijeni algoritmom prijatelji-prijatelja.

nantnu strukturu (preciznije: 4, 5 i 8);

- i jata koja nisu u interakciji, za koja možemo pretpostaviti da su u dinamičkoj ravnoteži (preciznije: 1, 2, 6, 9, 10, 11, 14, 15, 16, 17 i 18).

Još jedan interesantan podatak koji vidimo sa slike 3.4 jeste i ukupan broj članova sa $e > 1$ dat kroz različite boje tačaka na grafiku, gde možemo videti da jata 19 i 20 sa sličnim masama imaju zapravo različit broj visokoekscentričnih članova. To nam daje jedinstvenu mogućnost da odgonetnemo da li je za dinamiku



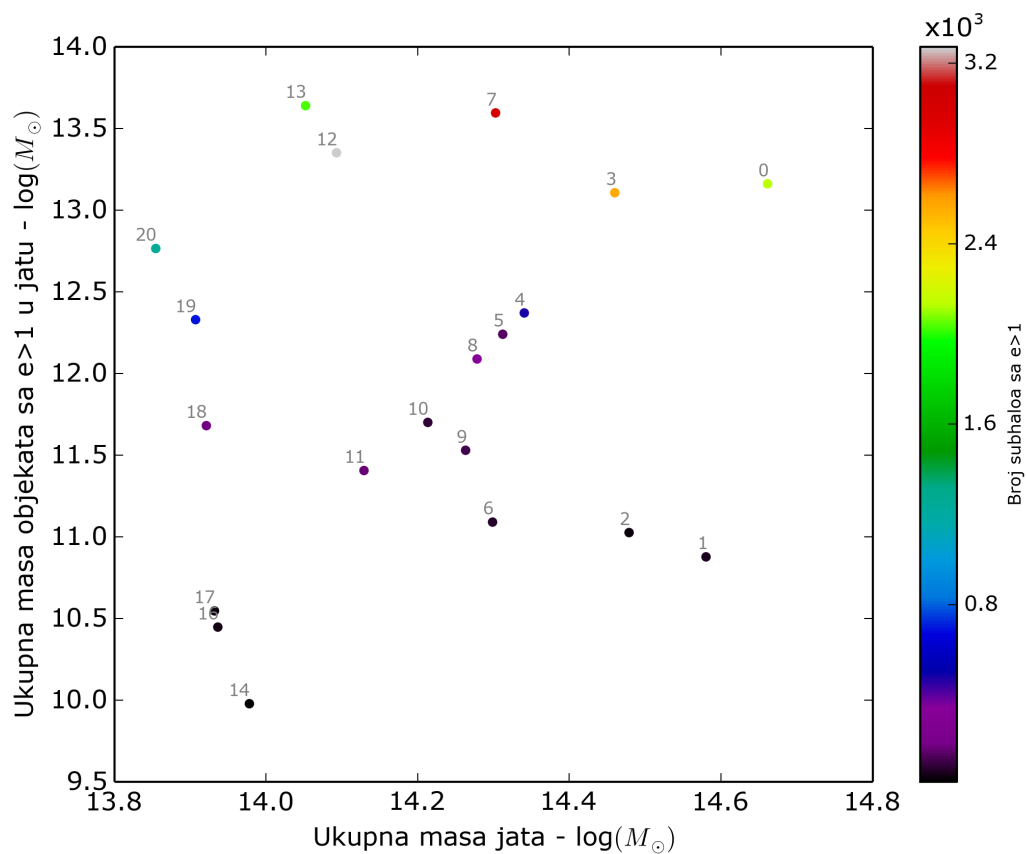
Slika 3.3: Udeo u masi najmasivnije galaksije u odnosu na ukupnu masu jata, sa dodatnom informacijom (predstavljenom kroz dati spektar boja) o ukupnom broju članova jata.

i morfologiju članova značajniji parametar ukupna masa interagujuće strukture (za šta uzimamo zbir masa objekata sa $e > 1$ unutar jata) ili njihov broj.

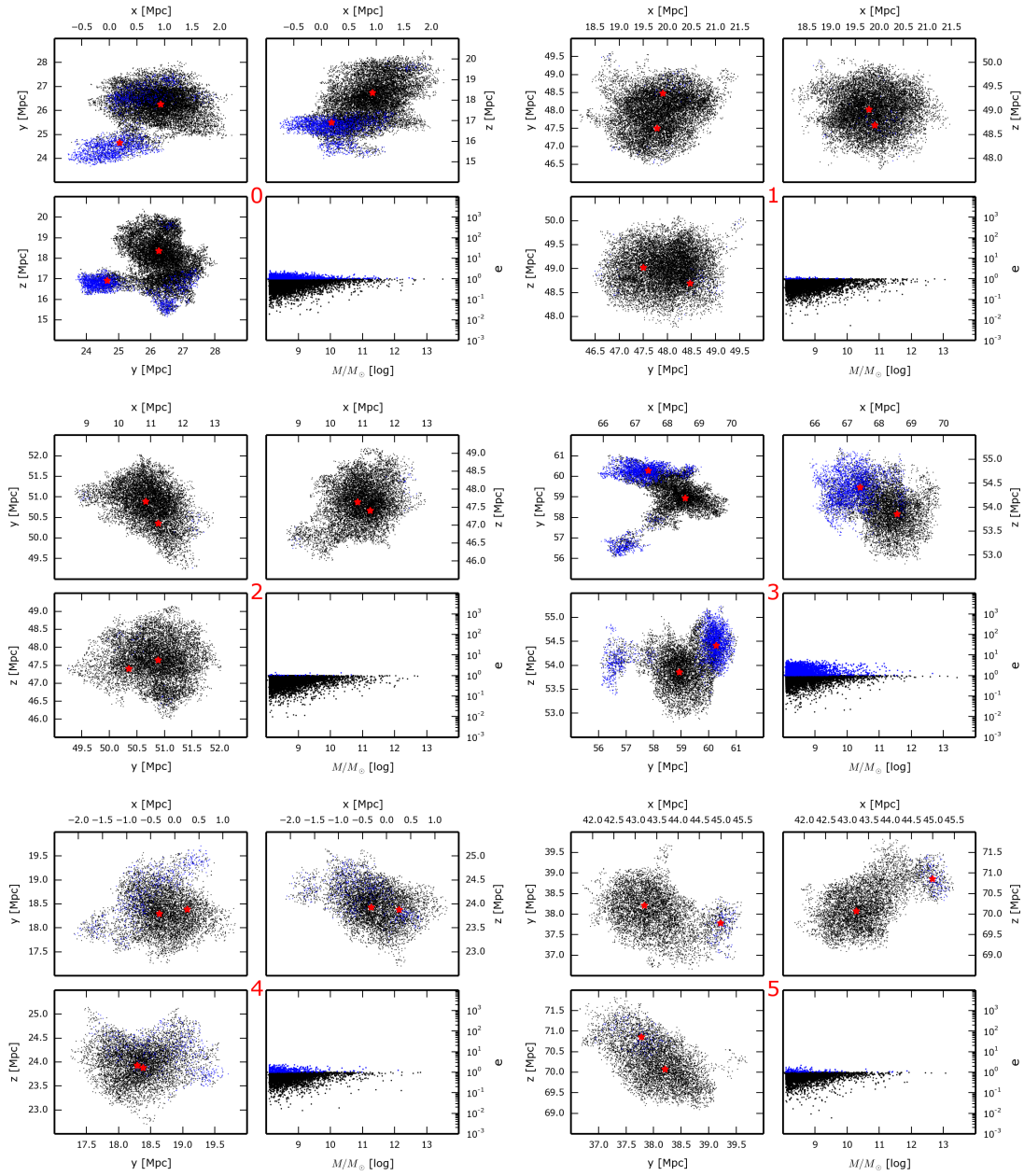
Kao što možemo videti, udeo jata koja smatramo da u potpunosti nisu u interakciji iznosi $\sim 52\%$, skoro duplo više nego što su Manolopulo i Plions dobili analizom SDSS DR10 baze podataka spektroskopskih posmatranja. Međutim moramo uzeti u obzir nekoliko okolnosti. Za početak, Manolopulo i Plions imaju posmatrački uzorak jata galaksija koja su daleko masivnija od jata u Ilustris-1 simulaciji. Kako su najmasivnija jata nastala jako rano u istoriji svemira, postoji

realna šansa da bi ona doprinela brojčanosti skupa čiji su članovi u dinamičkoj ravnoteži (u smislu da bi do $z = 0$ „počistila” svoju okolinu). Takođe, njihov uzorak je daleko veći (celokupni Abel katalog jata galaksija - više od 100 jata), nego naš (21 identifikovano jato galaksija), pa je moguće da je razlika jednostavno do stohastičnosti. Sa druge strane, oni su koristili jata galaksija sa svega 50 identifikovanih članova (zbog niske luminoznosti teško je posmatrački detektovati sve članove jata) da odrede unutrašnju rotaciju na osnovu čega su zaključivali da li je jato u interakciji ili ne (a sa tako malim brojem članova ili postoji selekcionni efekat jer nisu uključeni manje svetli članovi ili je jednostavno teško utvrditi postojanje dinamičke ravnoteže preko rotacije), dok mi iz kosmološke simulacije imamo potpuni pregled. Takođe treba imati u vidu da iako oni imaju značajno veći udeo jata koja su u interakciji, uspeali su da iz SDSS DR10 spektroskopskog kataloga odrede podstrukture za svega 5 jata iz Abel kataloga (što opet ukazuje na mogući selekcionni efekat).

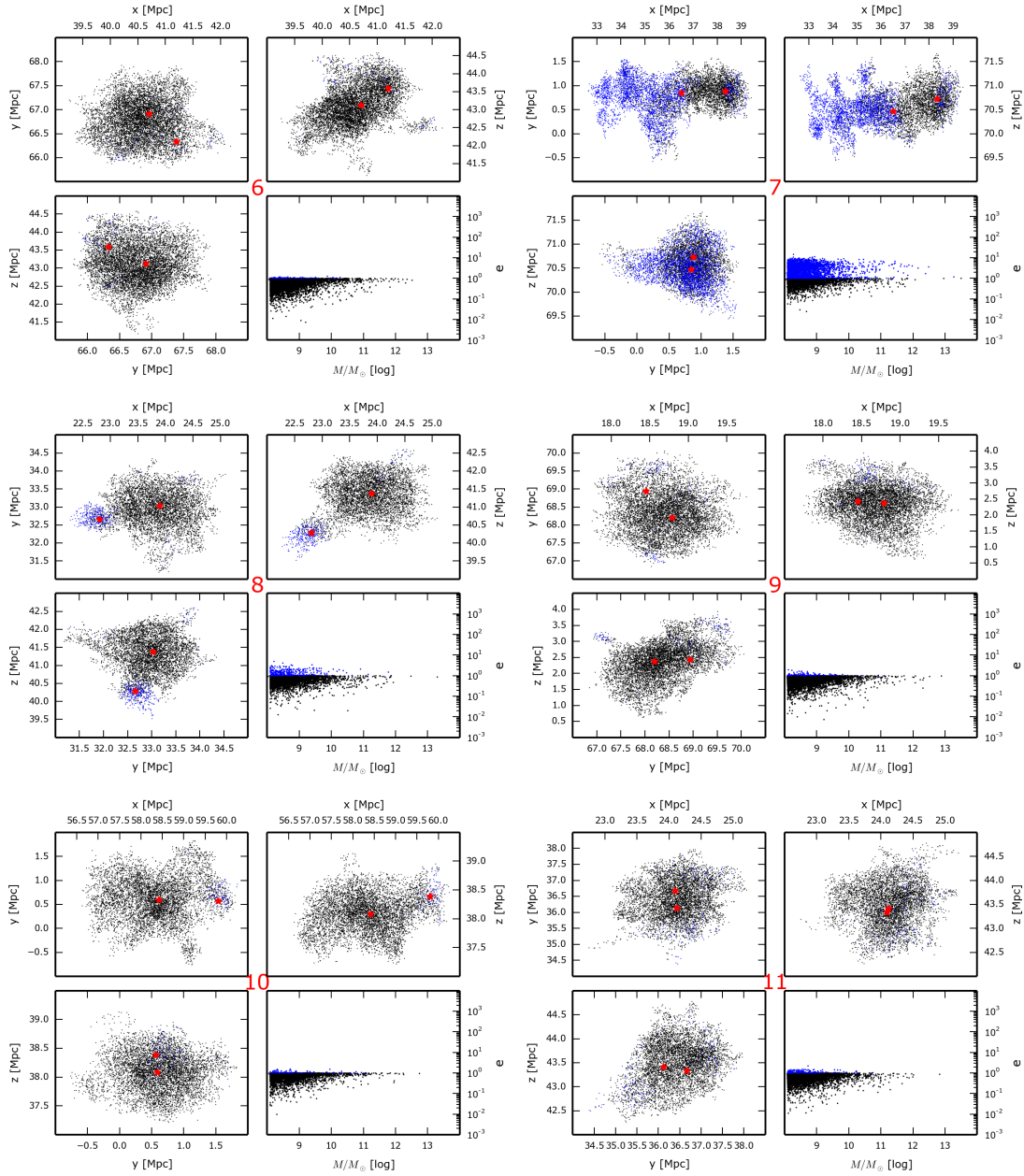
Iz dobijenih rezultata je jasno da postoji značajan udeo jata galaksija koja još uvek možemo da smatramo da su u formiranju, a možemo zaključiti i da pokrivaju sve morfološke Bauc-Morgan tipove. Jasno je da bi različita dinamika i morfologija jata mogla značajno da utiču na morfologiju i evoluciju galaksija koje ga populišu, što će za patuljaste galaksije biti ispitano u poglavlju 5.



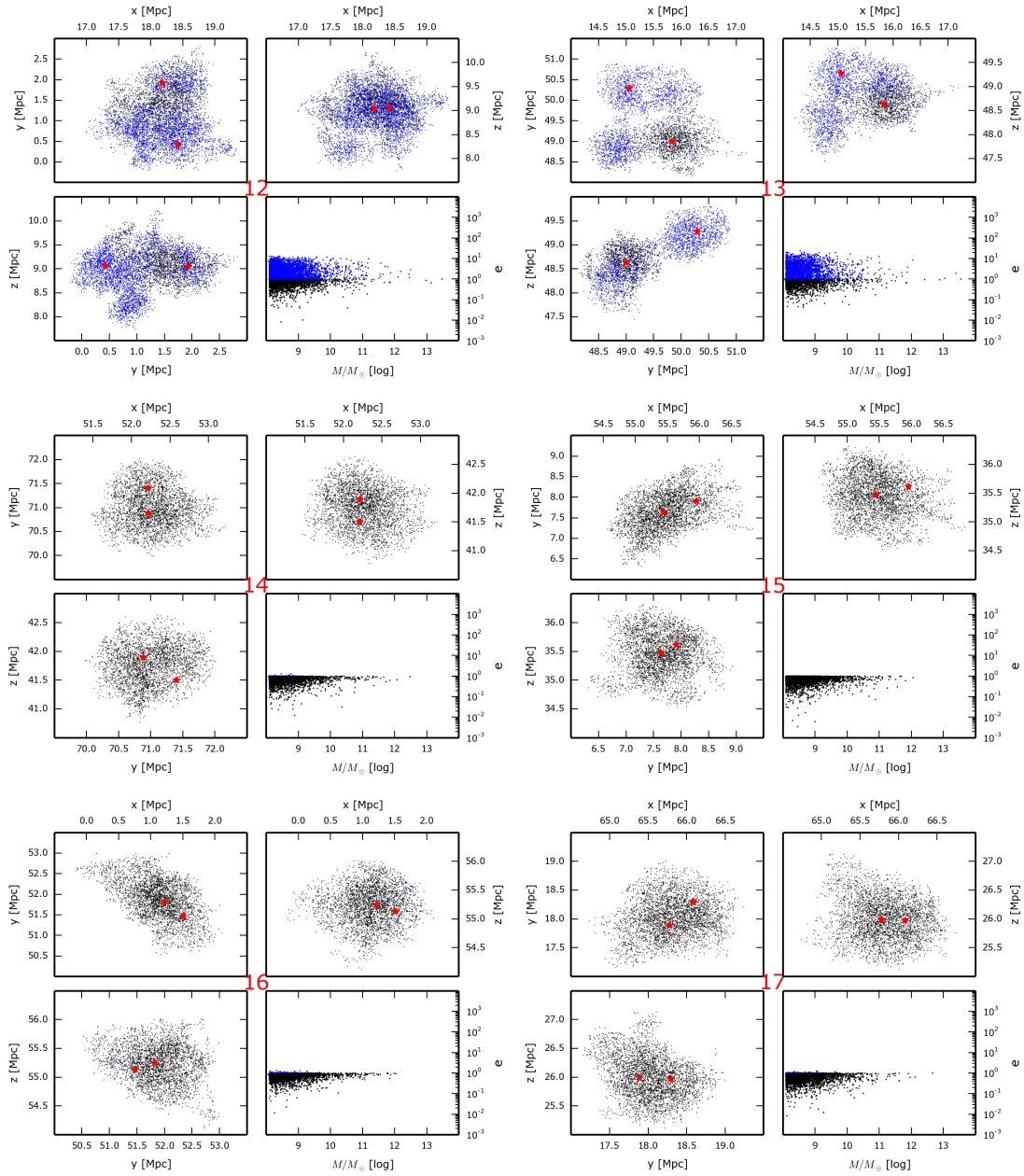
Slika 3.4: Zbir mase objekata sa $e > 1$ u odnosu na ukupnu masu jata. Pored toga (predstavljeno kroz dati spektar boja) je predočena i informacija o ukupnom broju članova sa $e > 1$ unutar jata. Sa ovog grafika možemo pretpostaviti koja su jata u značajnoj interakciji. Brojevi na grafiku odgovaraju oznakama iz tabele 3.1.



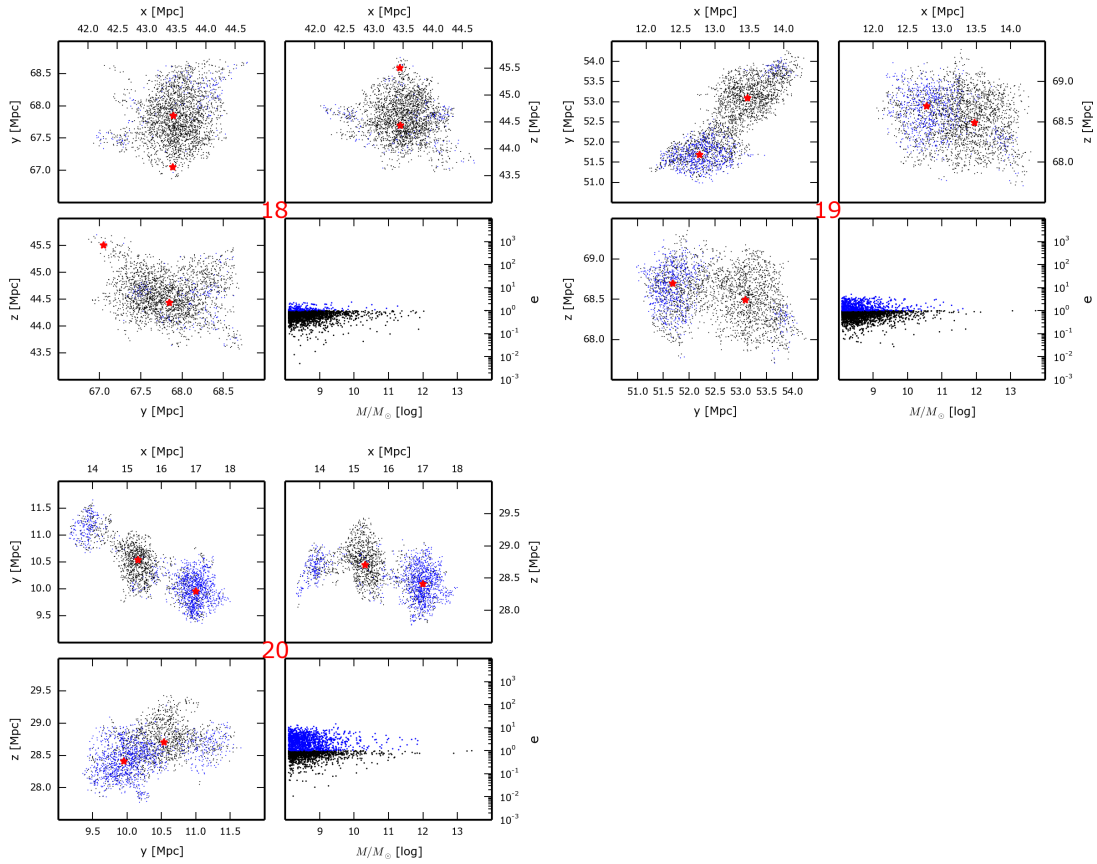
Slika 3.5: Trodimenzionalni pregled distribucije članova svakog jata galaksija, pri čemu su plavom bojom označeni objekti sa $e > 1$, sa crvenim zvezdama dva najmasivnija objekta u jatu, dok crveni broj između grafika odgovara oznakama iz tabele 3.1. Pored toga je data i zavisnost eliptičnosti objekata unutar jata u odnosu na ukupnu masu svakog od njih. I tu su plavom bojom predstavljeni objekti sa $e > 1$.



Slika 3.6: Nastavak sa 3.5. Trodimenzionalni pregled distribucije članova svakog jata galaksija, pri čemu su plavom bojom označeni objekti sa $e > 1$, sa crvenim zvezdama dva najmasivnija objekta u jatu, dok crveni broj između grafika odgovara oznakama iz tabele 3.1. Pored toga je data i zavisnost eliptičnosti objekata unutar jata u odnosu na ukupnu masu svakog od njih. I tu su plavom bojom predstavljeni objekti sa $e > 1$.



Slika 3.7: Nastavak sa 3.6. Trodimenzionalni pregled distribucije članova svakog jata galaksija, pri čemu su plavom bojom označeni objekti sa $e > 1$, sa crvenim zvezdama dva najmasivnija objekta u jatu, dok crveni broj između grafika odgovara oznakama iz tabele 3.1. Pored toga je data i zavisnost eliptičnosti objekata unutar jata u odnosu na ukupnu masu svakog od njih. I tu su plavom bojom predstavljeni objekti sa $e > 1$.



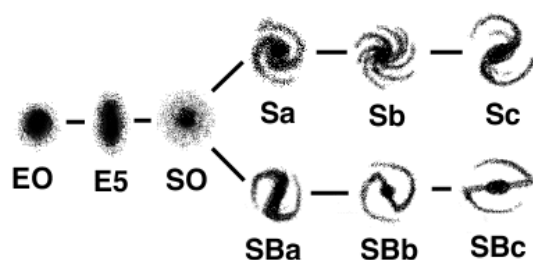
Slika 3.8: Nastavak sa 3.7. Trodimenzionalni pregled distribucije članova svakog jata galaksija, pri čemu su plavom bojom označeni objekti sa $e > 1$, sa crvenim zvezdama dva najmasivnija objekta u jatu, dok crveni broj između grafika odgovara oznakama iz tabele 3.1. Pored toga je data i zavisnost eliptičnosti objekata unutar jata u odnosu na ukupnu masu svakog od njih. I tu su plavom bojom predstavljeni objekti sa $e > 1$.

Glava 4

Tipovi patuljastih galaksija i njihove karakteristike

4.1 Uvod

Morfološke razlike galaksija su bile očigledne daleko pre nego što je Hابل utvrdio da galaksije predstavljaju zasebne strukture u svemiru na velikim udaljenostima od Mlečnog puta (Hubble, 1926). Ubrzo nakon toga predložio je klasifikaciju po morfološkim karakteristikama koja je po njemu i nazvana Hablova viljuška (prikazana na slici 4.1). Kao što se vidi sa slike, dijagram deli galaksije po morfologiji na eliptične galaksije, označene sa E0...E7, pri čemu broj označava sferičnost po formuli $10(1 - b/a)$, gde su a i b velika i mala poluosu, zatim lentikularne galaksije (SO) i spiralne galaksije, označene sa Sa/SBa - Sc/SBc, u zavisnosti od toga da li imaju izražene spirale (Sa...) i da li imaju izraženu prečagu (SBa..., Binney & Tremaine, 2008). Iako su u Hablovu klasifikaciju uključena pomenuta tri tipa galaksija, pri čemu se naizgled preudicira vezu između njih, u okviru same klasifikacije postojala je kategorija galaksija koja nije našla mesto na njoj - kategorija takozvanih patuljastih galaksija. Jedan od razloga je svakako taj što je broj otkri-



Slika 4.1: Izgled Hablove viljuške koja predstavlja čuvenu morfološku podelu galaksija, predstavljenu u radu Habla iz 1926. godine (Hubble, 1926). Grafika adaptirana iz knjige Džinsa gde je vizuelizacija te morfološke podele prvi put predložena (Jeans, 1928) i knjige Habla kroz koju je popularizovana (Hubble, 1936).

venih patuljastih galaksija u tom trenutku bio relativno mali, a najbrojnija klasa, patuljaste eliptične, neće biti otkrivene i definisane do radova Šeplija 1938. godine (Shapley, 1938) i Badaea 1944. godine (Baade, 1944).

Kako su prvi rezultati bili posmatrački, za određivanje šta su patuljaste galaksije su korišćeni posmatrački parametri. Po definiciji, iz istorijskih razloga, patuljastim galaksijama smatramo sve galaksije koje imaju $\mathcal{M}_B \gtrsim -18$ (Sandage & Binggeli, 1984), gde je \mathcal{M}_B apsolutna magnituda u B filteru i ukazuje na ukupnu luminoznost objekta. Razlika između patuljastih i „običnih” galaksija ima svoje poreklo u tome da de Vokulerov zakon (de Vaucouleurs, 1948), koji prati $R^{1/4}$, ne opisuje dobro raspodelu površinskog sjaja patuljaste galaksije ispod pomenute apsolutne magnitude. Njihovi profili površinskog sjaja (jednačina 4.1) konzistentnije prate eksponencijalni zakon (Faber & Lin, 1983; Binggeli et al., 1985). Štaviše Kormendi je 1985. godine (Kormendy, 1985) pokazao da patuljaste galaksije (specifično patuljaste eliptične) imaju povećanje površinskog sjaja za razliku od masivnijih galaksija kojima pada površinski sjaj sa povećanjem luminoznosti.

Površinski sjaj se izražava u magnitudama po kvadratu lučne sekunde i posma-

trački se, za neki filter X, dobija iz formule (Mo et al., 2010):

$$\mu_X = -2.5 \log\left(\frac{I_X}{L_\odot \text{pc}^{-2}}\right) + 21.572 + \mathcal{M}_{\odot, X} \quad (4.1)$$

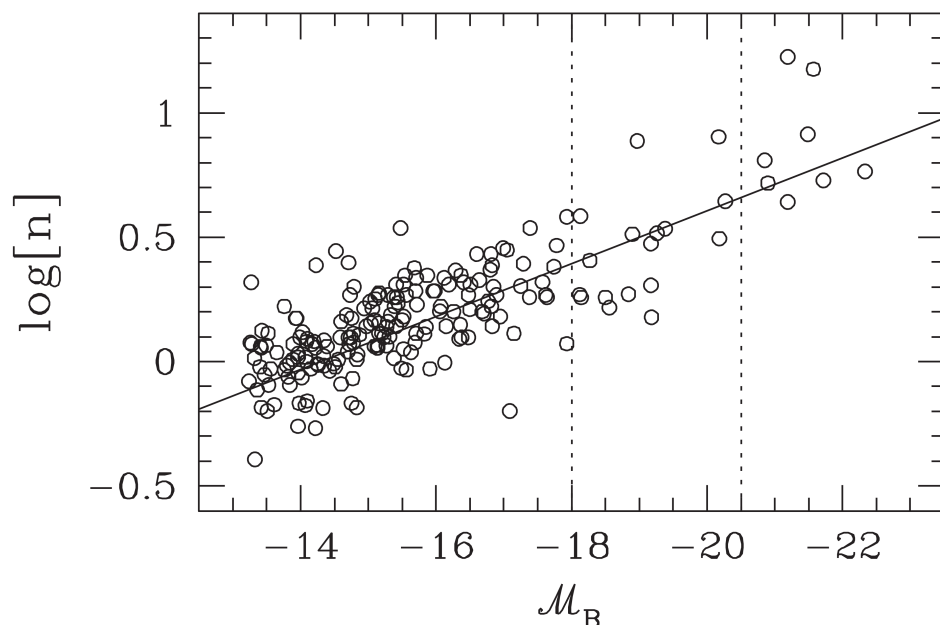
gde je μ_X površinski sjaj u filteru X, I_X površinski sjaj meren u fizičkim jedinicama, a $\mathcal{M}_{\odot, X}$ je apsolutna magnituda Sunca u datom filteru. Kao što vidimo kako se iz posmatranja dobijaju magnitudo po kvadratu lučne sekunde, preko implicitno uvedene daljine do objekta možemo svesti dobijene veličine na fluks po kvadratu parseka, a zatim skalirati sve na apsolutne veličine da bismo mogli merene vrednosti da upoređujemo između različitih objekata.

Sa druge strane ukoliko se površinski sjaj fituje sa uopštenijim Sersikovim zakonom (Sérsic, 1963) podela između de Vokulerovog i eksponencijalnog profila se gubi. Sersikov zakon, inače, predstavlja empirijsku formulu koja se koristi da se fituju profili površinskog sjaja eliptičnih galaksija i glasi:

$$I_n(R) = I_e e^{-b_n[(R/R_e)^{1/n} - 1]} \quad (4.2)$$

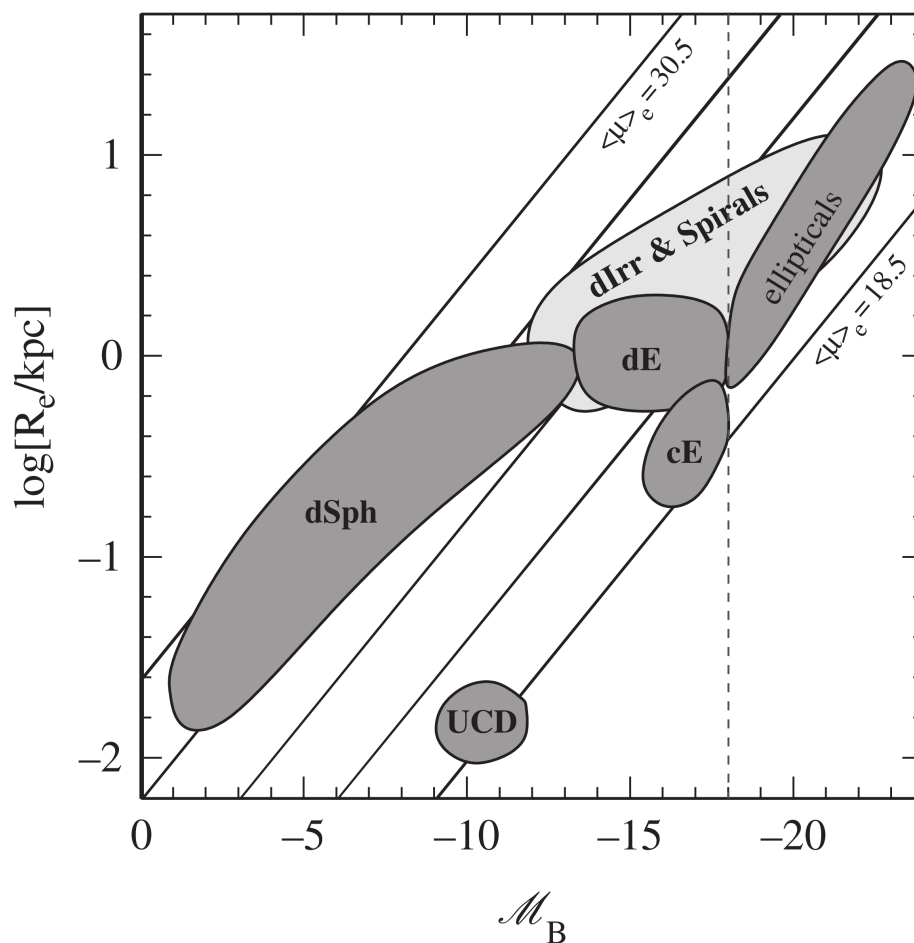
gde je $I(R)$ površinski sjaj na R poluprečniku, I_e je površinski sjaj na efektivnom radijusu R_e , parametar n je tzv. indeks Sersika, koji je korelisan sa ukupnom luminoznošću galaksije, a b_n je parametar koji se približno izračunava kao $b_n = 2n - 0.324$ za $n \gtrsim 1$. Tako imamo da luminozne eliptične galaksije imaju $n = 6$, a tamne imaju $n = 2$. Na sredini ovog raspona imamo (očigledno) $n = 4$, pri čijoj vrednosti navedena formula uzima izgled već pomenutog de Vokulerovog zakona ($R^{1/4}$). Za vrednosti $n = 1$, Sersikov zakon se svodi na eksponencijalni, koji odgovara promeni površinskog sjaja spiralnih galaksija.

Upravo korišćenjem Sersikovog zakona je i široko prihvaćeno da patuljaste eliptične, zajedno sa njihovim većim rođacima čine kontinualnu raspodelu ako se gledaju luminoznosti galaksija (Sandage & Binggeli, 1984).

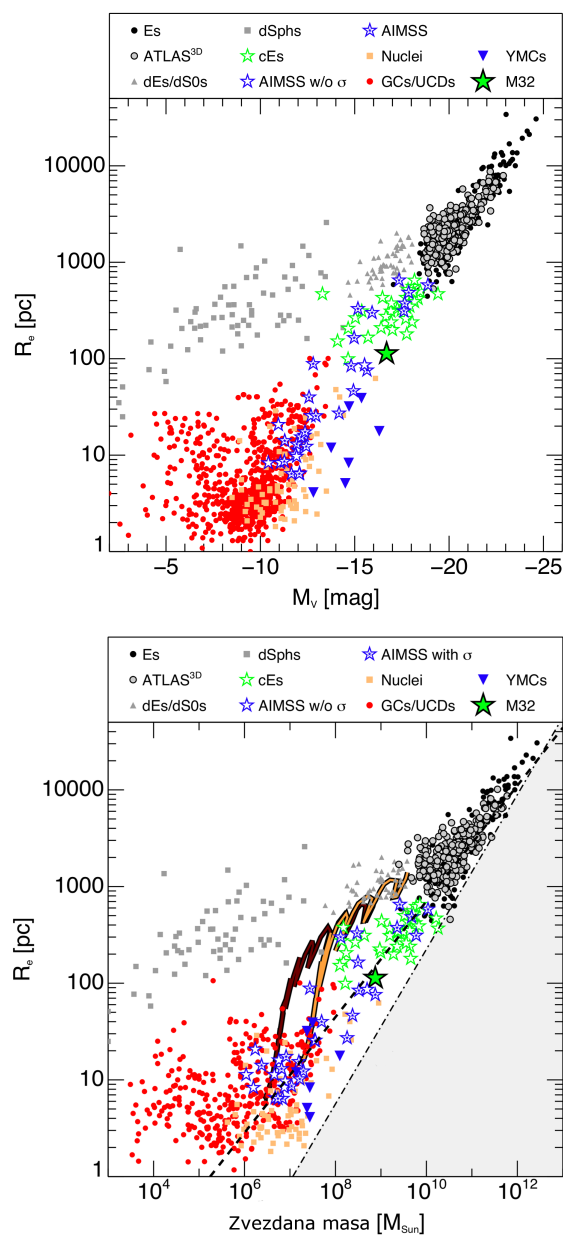


Slika 4.2: Zavisnost Sersikovog indeksa (n) od apsolutne magnitude u B filteru (\mathcal{M}_B) za eliptične galaksije svih luminoznosti. Uspravna isprekidana linija na $\mathcal{M}_B = -18$ je granica ispod koje se galaksije tretiraju kao patuljaste. Grafik preuzet iz knjige Mo et al. (2010), pri čemu su korišćeni podaci iz rada (Graham & Guzmán, 2003).

Još uvek traje debata između toga da li patuljaste eliptične i sferoidalne (koje se još uvek tako zovu iz istorijskih razloga) čine istu klasu patuljastih. Recimo Mo, van den Boš i Vajt u svojoj knjizi „*Galaxies formation and evolution*” (Mo et al., 2010) tvrde da ne postoji jasna fizička motivacija za tu podelu, upravo zbog toga što se po površinskom sjaju one nastavljaju kontinualno na patuljaste eliptične (slika 4.2). Ova stav je i preovladavao ‘80ih i ‘90ih godina XX veka. Sa druge strane Kormendi već godinama (pogledati rad iz 2012. godine Kormendy & Bender, 2012 i dalje reference) tvrdi da su patuljaste sferoidalne posebna klasa patuljastih galaksija, gde se argumenti pre svega svode na različite korelacije između efektivnog radijusa (R_e), površinskog sjaja na tom radijusu i apsolutne magnitude patuljastih eliptičnih i sferoidalnih galaksija. Štaviše, mnoge galaksije koje bi bile klasifikovane



Slika 4.3: Skica prostorne raspodele različitih morfoloških tipova galaksija u parametarskom prostoru efektivnog radijusa (R_e) i apsolutne magnitude u B filteru M_B . Uspravna isprekidana crta je istorijska granica ispod koje se galaksije tretiraju kao patuljaste. Dijagonalne pune linije predstavljaju konstantni (usrednjen) površinski sjaj. Preuzeto iz Mo et al. (2010).



Slika 4.4: *Gore*: Posmatrački dobijene zavisnosti efektivnog radijusa od apsolutne magnitude u V filteru za sve tipove objekata od globularnih jata, preko UCD-ova, cE, dSph, dE tipova sve do najmasivnijih galaksija. Jasno se vidi populisanje različitih delova grafika i preklapanje nekih tipova. *Dole*: Zavisnosti efektivnog radijusa od zvezdane mase. Dve pune linije preko grafika predstavljaju predložene evolutivne puteve za dE galaksije. *Oba*: Simboli su isti na oba grafika, a sami grafici su preuzeti iz rada Norris et al. (2014).

kao patuljaste eliptične, Kormendi zbog tih korelacija naziva sferoidalnim. Trebalo bi napomenuti da to donekle doprinosi terminološkoj konfuziji jer se takođe kada se u radovima pominju patuljaste sferoidalne, zapravo misli na patuljaste eliptične ili se tretiraju i jedne i druge kao jedinstvena klasa. Recimo u čuvenom pregledu Fergusona i Bingelija iz 1994. godine (Ferguson & Bingeli, 1994) koji se bavi patuljastim eliptičnim galaksijama su patuljaste sferoidalne implicitno uključene u pregled i tretiraju se kao eliptične - međutim u samom pregledu oni skreću pažnju na više i manje luminozne eliptične galaksije sa granicom oko $\mathcal{M}_B = -14$ i time opet implicitno prave podelu između tih klasa iako to ne naglašavaju.

Imajući u vidu tu raspravu, ovde će patuljaste sferoidalne biti tretirane kao zasebna klasa koja se pre svega odvađa po luminoznosti (više - manje luminozne) i mestu pronalaska (jata galaksija - lokalna grupa) u odnosu na patuljaste eliptične.

Iako su inicijalno istorijski postojala svega 3 tipa patuljastih galaksija - patuljaste eliptične, patuljaste sferoidalne i patuljaste nepravilne, danas znamo za daleko više tipova koje se razlikuju morfološki, strukturalno i po svemu sudeći po nastanku i evoluciji. Trenutno poznati tipovi patuljastih galaksija i neke njihove opšte karakteristike su:

dE - patuljaste eliptične (bez gasa, starija populacija zvezda, najmasivnije);

dSph - patuljaste sferoidalne (bez gasa, starija populacija zvezda, nizak površinski sjaj, mala masa, visok M/L);

dIrr - patuljaste nepravilne (gas, aktivno formiranje zvezda, nepravilan oblik po čemu su i dobile ime);

cE - kompaktne eliptične (bez gasa, luminozne, kompaktne - manji R_e/R_h radijus od dE);

UCD - ultra-kompaktne patuljaste (bez gasa, visoke luminoznosti, manji R_e/R_h radijus od cE):

dS - patuljaste spiralne (diskolika struktura, moguće spirale, postojanje ne-utrnalnog vodonika, isključivo galaksije polja);

BCG - plave kompaktne patuljaste (gas, dve populacije zvezda - mlađa i starija, veoma visoka stopa formiranja zvezda);

UDG - ultra difuzne patuljaste (izuzetno visok M/L , jako mala luminoznost).

U zavisnosti koji parametar izaberemo kao osnovni postoje različite metode za klasifikaciju patuljastih galaksija: po količini gasa bismo patuljaste mogli da podelimo na one sa i na one bez gasa. U grupi bez gasa bi bile patuljaste eliptične, sferoidalne, ultra kompaktne patuljaste i kompaktne eliptične; dok bi grupu patuljastih koje imaju gas činile patuljaste nepravilne, patuljaste spiralne i plave kompaktne galaksije. Po luminoznosti bismo mogli da ih podelimo na one koje imaju veliku luminoznost i na one koje imaju malu. Ovu potonju grupu bi činile ultra difuzne galaksije i patuljaste sferoidalne, dok bi sve ostale činile luminoznu grupu.

Na slikama 4.3 i 4.4 dat je pregled zavisnosti veličine patuljastih galaksija u odnosu na njihovu luminoznost i masu. Sa samih slika jasno se vidi da se navedeni tipovi razlikuju po tome koji deo grafika populišu.

Patuljaste galaksije pokrivaju nekoliko redova veličine po luminoznosti. Iz poznate veze luminoznosti i mase, veoma rano je bilo jasno da to korelira i sa nekoliko redova veličine u masi. U oba slučaja se radi o najmanje svetlim, odnosno najmanje masivnom delu respektivnih krivih. Štaviše, kako posmatračke i numeričke metode postaju sve sofisticiranije, dolazi do redefinisavanja krajeva ovih krivih. Trenutno

je najmanje luminozna galaksija Willman I otkrivena 2005 godine sa $\mathcal{M}_B \simeq -2.6$ (Willman et al., 2005; Martin et al., 2007).

Trebalo bi pomenuti i da je očigledno iz numeričkih simulacija, a što je uslovljeno paradigmatom hladne tamne materije sa kosmološkom konstantom (Λ CDM) da su patuljaste galaksije trenutno najbrojniji tip galaksija u svemiru (na šta recimo ukazuje funkcija mase kosmoloških simulacija prikazana u radu Martinović (2015) i u poglavlju 2 ove disertacije). Sa druge strane, niske luminoznosti ukazuju da one sadrže relativno mali udeo ukupnog broja zvezda.

Jedno od interesantnih pitanja jeste i pitanje koliko tamna materija dominira u samim patuljastim galaksijama. Djuzepe Bertin u svojoj knjizi „*Dynamics of galaxies*” (Bertin, 2014) skreće pažnju da je jedno od važnih pitanja koje se bave dinamikom galaksija: Da li je istina da su neke od klasa malih zvezdanih sistema potpuno lišene prisustva tamne materije dok su neki drugi mali zvezdani sistemi komparabilne luminoznosti pod značajnim uticajem tamne materije? Iako je to posmatrački izuzetno komplikovano utvrditi, pogotovu za sisteme sa malim masama i luminoznostima, autorovo mišljenje je da na osnovu analize numeričkih rezultata simulacija možemo napraviti razliku između sistema sa različitim dijapazonom prisustva tamne materije kao što ćemo videti u poglavlju 5.

Podela po karakteristikama može, kao što vidimo, da bude puno. Stoga ćemo ovde prikazati pregled poznatih karakteristika svakog pojedinačnog, trenutno poznatog tipa patuljastih galaksija.

4.1.1 Patuljaste eliptične galaksije - dE

Patuljaste eliptične galaksije su klasa galaksija čije se apsolutne magnitude kreću između $\mathcal{M}_B = -18$ i -14 , a kao što vidimo sa slike 4.4 sa zvezdanim masama između 10^8 i $10^{10}M_{\odot}$ uz efektivni radijus reda veličine $10^2 - 10^3$ pc. One predstavljaju ubedljivo najbrojniji tip patuljastih galaksija. Čine oko 80% svih

patuljastih galaksija u jatima, odnosno oko 70% cenzusa jata galaksija (Sandage & Binggeli, 1984). Ovo je zapravo prilično heterogen tip galaksija i istorijski gledano već se nekoliko puta fragmentirao iz čega je proisteklo nekoliko zasebnih klasa patuljastih galaksija. Iako je u decenijama nakon njihovog otkrića delovalo da im je profil površinskog sjaja gladak, modernim posmatračkim tehnikama je utvrđeno da mogu da imaju podstrukture u formi diskova, izraženih jezgara, nepravilnih izofota, itd (Prugniel et al., 2005).

Opšte karakteristike su da su potpuno lišene gasa i imaju veoma staru populaciju zvezda, mada u manjem broju slučajeva mogu da se nađu patuljaste eliptične sa zvezdama starosti i oko 1 Gyr. Recimo za NGC 185 se sumnja da ima bar jedan ostatak supernove (Vučetić et al., 2016).

Galaksije ovog tipa se zbog starije populacije zvezda i odsustva gasa, što implicira da se faza formiranja zvezda završila jako davno, ponekad nazivaju i zvezdanim fosilima (Hensler, 2012).

Pretežno populišu gušće sredine, odnosno jata galaksija ili kako to navode Trentham i Tali (Trentham & Tully, 2002), morfološki evoluirane sredine. U jatima u kojima su do sada detektovane čine dominantan (po brojnosti) tip galaksija. Sama činjenica da populišu toliko dinamički vruće sredine ukazuje na to da je uticaj sredine ključan za razumevanje njihovog nastanka i evolucije.

Pored ostalog, krasi ih relativno mala metaličnost (oko 0.1 solarne i manje), usled veoma niske efikasnosti formiranja zvezda. Štaviše, za ovaj tip patuljastih, metaličnost ukazuje na to da je formiranje zvezda prekinuto usled eksternih procesa, a ne usled toga što je gas potrošen tokom faze formiranja zvezda (Dekel & Silk, 1986; Nagashima & Yoshii, 2004).

Za razliku od drugih tipova patuljastih galaksija, tranzicija od „normalnih“ galaksija (u smislu razlika u karakteristikama) za ovaj tip je daleko manje spektakularna pošto je preovlađujuće mišljenje da nema bitnih razlika u odnosu na tipične

eliptične galaksije, odnosno da varijacija rotacione brzine nije primarni parametar koji određuje formu ovih galaksija (Sandage & Binggeli, 1984).

Još jedna bitna karakteristika koja karakteriše određen broj galaksija ovog tipa je postojanje izraženog nukleusa. Naime, Bingeli i koautori su 1987. godine (Binggeli et al., 1987) predstavili studiju Virgo jata, u okviru koje su se bavili morfologijom članova jata. U okviru obrade patuljastih eliptičnih (koje opet dele na svetlije i tamnije, a ne na patuljaste eliptične i patuljaste sferoidalne) ustanovili su da jedan deo svetlijih (koji odgovara našoj klasifikaciji ovog tipa) ima izraženo luminozno jezgro. Napravili su podelu na patuljaste eliptične sa jezgrom (dE, N) i patuljaste eliptične bez jezgra (dE). Novije studije rađene sa Hابل svemirskim teleskopom su utvrdile daleko veći procenat onih sa jezgrom nego što je bilo utvrđeno iz posmatranja sa Zemlje. Kote i koautori (Côté et al., 2006) su recimo izneli tvrdnju da između 66% i 80% svih patuljastih eliptičnih ima izraženo jezgro. Štaviše utvrdili su da jezgra imaju veću metaličnost nego ostatak patuljastih i da su karakteristike slične sa kompaktnim jezgrima drugih galaksija. Boja jezgra ili slabije korelira sa njegovom luminoznošću ili uopšte ne korelira sa luminoznošću ostatka patuljaste galaksije u kome se nalazi. Sve ovo potencijalno ukazuje da je jezgro u patuljastim eliptičnim galaksijama, koje ga imaju izraženog, imalo nezavisnu evoluciju u odnosu na ostatak galaksije. Sličnost koja postoji između izraženog jezgra u patuljastim i ostalim galaksijama sa sličnim centralnim osobinama (npr. spiralne sa kompaktnim jezgrom) ukazuju na moguće postojanje centralnog kompaktnog objekta koji definiše evoluciju (Côté et al., 2006; Wehner & Harris, 2006).

Navedene karakteristike patuljastih eliptičnih otvaraju pitanje njihovog nastanka. Iako hijerarhijski „*bottom-up*” model podrazumeva manje galaksije koje se spajaju u veće, ispostavlja se da patuljaste eliptične možda imaju drugačiji put nastanka ili da bar ne učestvuju u formiranju krupnijih galaksija. Na to ukazuje postojanje već pomenutih jezgara, starije populacije zvezda sa istorijom formira-

nja zvezda koja se davno završila i nešto višom metaličnošću od one koja bi se očekivala za prvobitne patuljaste galaksije (Ferguson & Binggeli, 1994).

Pretpostavljeni mehanizmi formiranja uključuju ogoljavanje usled probojnog pritiska (en. ram pressure stripping) spiralnih galaksija koje upadaju u jato (Mori & Burkert, 2000) ili u grupe (Marcolini et al., 2003), ili gubitak gasa usled gravitacionog uticaja okolnih jata, ili moguću vezu između drugih tipova patuljastih galaksija - pre svega vezu između patuljastih nepravilnih ka patuljastim eliptičnim (Prugniel et al., 2005). Kao što vidimo svaki navedeni mehanizam nastanka ukazuje na to da je uticaj sredine presudan za formiranje ovog tipa patuljastih galaksija. Kao što su to приметili Prunjiel i koautori (Prunjiel et al., 2005), moguće je da su patuljaste eliptične imale slične pretke, ali da im se evolutivni put razlikovao usled različite sredine u kojoj su ponikle, tj. usled različite kombinacije plimskih uticaja, ogoljavanja usled probojnog pritiska i povratnog uticaja (en. feedback) od formiranja zvezda.

4.1.2 Patuljaste sferoidalne galaksije - dSph

Kao što je već pomenuto, patuljaste sferoidalne galaksije čine galaksije sa $M_B > -14$. Opšte karakteristike dele sa patuljastim eliptičnim - imaju staru populaciju zvezda i potpuno su lišene gasa. Međutim za razliku od dE galaksija, sa slike 4.4 se vidi da imaju manju masu sa sličnim (ponekad i većim) efektivnim radijusom (zvezdane mase manje od $10^7 M_\odot$, sa efektivnim radijusom takođe reda $10^2 - 10^3$ pc). To čini da im je površinski sjaj jako mali, daleko manji od sjaja noćnog neba na primer, pa je njihovo detektovanje jako veliki problem. Sve patuljaste sferoidalne su detektovane time što se statistički otkrije eksces zvezda sa drugačijim kinematičkim karakteristikama na nebu u odnosu na zvezde koje pripadaju našoj galaksiji, koje su najsvetlije u datoj grupi zvezda koja je kandidat za patuljastu sferoidalnu (Binney & Tremaine, 2008). Još jedna posledica ovako

niskog površinskog sjaja je i nemogućnost da se trenutnim posmatračkim instrumentima detektuju patuljaste sferoidalne na većim daljinama, pa je njihov ukupni poznati cenzus vezan za Lokalnu grupu.

Ukupno je poznato nekoliko desetina patuljastih sferoidalnih galaksija na do 300 kpc od Mlečnog puta, gde poslednju detekciju čini 9 kandidata za patuljaste sferoidalne otkrivenih u okviru programa *Dark Energy Survey* 2015. godine (Bechtol et al., 2015). Procenjuje se da se njihov ukupan broj u Lokalnoj grupi kreće od 50 - 100 (Belokurov et al., 2007). Najbliža patuljasta sferoidalna je *Sagittarius* patuljasta galaksija koja se nalazi na oko 20 kpc od Mlečnog puta i trenutno se spaja sa Mlečnim putem (Ibata et al., 1994).

Još jedna stvar koja je specifična za patuljaste sferoidalne galaksije jeste izuzetno veliki M/L odnos. Naime, kinematika zvezda unutar samih galaksija pokazuje da one imaju daleko veću masu od zvezdane mase. Nekolicina poznatih patuljastih sferoidalnih su pod plimskim uticajem većih galaksija (Andromede i Mlečnog puta), ali za one za koje je uticaj mali, može se odrediti iz disperzije brzina zvezda da bi morale da imaju mnogo veću masu da bi virijalna teorema bila zadovoljena - na primer za *Sextans* galaksiju. Takođe treba pomenuti da postoji realna šansa da one ne mogu da postignu stanje dinamičke ravnoteže usled plimskih uticaja masivnijih galaksija Lokalne grupe (Sparke & Gallagher, 2007). Imajući u vidu da se za neke dSph sisteme pretpostavlja da M/L odnos ide i do nekoliko stotina, razmatra se da li ovaj tip galaksija ima najveći udeo tamne materije od svih poznatih tipova galaksija (Strigari et al., 2008).

Metaličnost ovih galaksija je izuzetno niska. Najluminoznije dSph imaju metaličnost koja ide do 1/30-dela Sunčeve metaličnosti, dok manje luminozni sistemi imaju još siromašnije metaličnosti. Metaličnost ukazuje na jako nisku efikasnost formiranja zvezda. Pored dSph koji imaju jako stare zvezde, nekolicina ima istoriju nekoliko faza formiranja zvezda - na primer Carina patuljasta sferoidalna galaksija

ima 2% zvezda koje su mlađe od 2.5 Gyr, dok je ostatak nastao u tri odvojena intervala formiranja zvezda koji su se desila pre 3, 7 i 12 Gyr respektivno (Sparke & Gallagher, 2007). Uopšteno, patuljaste sferoidalne imaju jako malo zvezda mlađih od 1 Gyr.

U kontekstu Λ CDM kosmološke paradigme, patuljaste sferoidalne su ostaci primordijalnih patuljastih galaksija koje još uvek nisu učestvovala u hijerarhijskom formiranju masivnijih galaksija. Međutim, dovoljno vremena je prošlo da su ostale sa tamnom materijom i zvezdanom populacijom bez gasa. To ukazuje da su podvrgnute sličnim uticajima kao i patuljaste eliptične, samo za razliku od njih dSph su podvrgnute uticajima manje nasilne sredine od jata kakva je okvir Lokalne grupe. Tj. pretpostavlja se da su dSph pod uticajem plimskih sila, dinamičkog trenja i ogoljavanja usled probojnog pritiska u okviru grupe (Mayer et al., 2001, 2007; Klimentowski et al., 2009, itd.).

Otkrivanje ovog tipa patuljastih u okviru drugih struktura u svemiru van Lokalne grupe, tj. povećanje uzorka, će svakako doprineti boljem razumevanju i ovog tipa patuljastih i razumevanju evolucije galaksija.

4.1.3 Patuljaste nepravilne galaksije - dIrr

Patuljaste nepravilne galaksije, kao što im ime i sugeriše, karakteriše nepravilan oblik, odnosno nepostojanje dominantne strukture u okviru njihove morfologije. Pored toga opšte karakteristike su im, za razliku od prethodne dve grupe, da imaju gasa, mlađu populaciju zvezda i nisku do umerenu stopu formiranja zvezda, pa su zbog toga i plave boje. U okviru njih obično dominira jedan ili više svetlih HII regiona. Patuljaste nepravilne galaksije manje mase imaju veći udeo gasa i manju metaličnost, što je i očekivano jer je metaličnost galaksija direktno proporcionalna masi. Veći sistemi imaju nagoveštaje rotaciono podupretog diska, ali većina ima prilično haotičnu kinematiku (Mo et al., 2010).

Ovaj tip patuljastih je bio poznat relativno davno i prilično je čest u okviru ranijih kataloga (recimo Markarian, Cviki katalogi), ali danas je svakako daleko ređi od patuljastih eliptičnih (koje su otkrivene u velikom broju kasnije, u okviru jata galaksija). Galaksije ovog tipa u principu imaju mase između 10^8 i $10^{10}M_{\odot}$, prečnike od 1-10 kpc, efektivne radijuse od $10^2 - 10^3$ i apsolutne magnituda između $M_B - 13$ i -20 (Matteucci, 2012).

Stopa formiranja zvezda se javlja u nepovezanim regionima koji obuhvataju velike delove diska. Čak i jako male patuljaste nepravilne mogu da formiraju spektakularne OB asocijacije zvezda, kao i mnogo regiona mladih zvezda. Kako im je površinski sjaj mali, svetle koncentracije mladih zvezda mogu da se ističu, što doprinosi haotičnom izgledu ovih galaksija (Sparke & Gallagher, 2007). Imaju skoro kontinualno formiranje zvezda kroz Hablovo vreme, međutim ostaje nejasno da li imaju nisku stopu formiranja u dužim vremenskim intervalima ili imaju više diskretnih raspona sa nešto većom stopom formiranja zvezda. Međutim, čak i u potonjem slučaju epizode formiranja zvezda su nezavisne jedna od druge (Kunth & Östlin, 2000).

Globalna metaličnost ovih galaksija ima raspon od $Z \sim 0.03$ do $Z \sim 0.7$, sa prosekom oko $Z \sim 0.1$. Udeo gasa u njima se kreće od 10% do čak 90% sa prosekom oko 50%. Ovo čini da one izuzetno podsećaju na primordijalne galaksije, odnosno na patuljaste sa visokih crvenih pomaka koje čine osnovu hijerarhijskog modela. U Lokalnoj grupi dIrr uglavnom imaju niske metaličnosti, a za veća rastojanja, odnosno za dIrr koje su u polju ili okolnim jatima galaksija treba naglasiti da je problem pouzdano odrediti metaličnost (Matteucci, 2012).

Postoje indicije prema povezanosti ovog tipa galaksija sa dSph i dE galaksijama. Neke dIrr su zapravo klasifikovane kao prelazni oblici između dIrr i dSph (*Phoenix* i LGS3 na primer). Njih recimo karakteriše populacija zvezda stara nekoliko Gyr, malo gasa i odsustvo formiranja zvezda. Zbog sličnih struktura

pretpostavlja se da dIrr mogu biti rana faza, a dSph kasnija faza istog tipa patuljastih. Štaviše ukoliko se pogleda raspodela u okviru Lokalne grupe, dSph se nalaze bliže masivnim galaksijama grupe, dok se dIrr nalaze na većim udaljenostima - to pokazuje da su dSph imale pod plimskim uticajem ranije formiranje zvezda i gubitak gasa, dok dIrr imaju nešto mirniji život i daleko sporiju evoluciju (Sparke & Gallagher, 2007).

Sličnu vezu, ali za dIrr i dE su napravili i Prunijjel i koautori (Prugniel et al., 2005), pokazavši da je moguće da dE nastanu nakon upada većih dIrr galaksija u jata galaksija.

Kao i za većinu tipova patuljastih galaksija, i za dIrr se pretpostavlja da imaju izraženu komponentu tamne materije (Mateo, 1998).

4.1.4 Kompaktne eliptične galaksije - cE

Kompaktne eliptične galaksije predstavljaju tip patuljastih galaksija koji, za razliku od do sada pomenutih (dE, dSph, dIrr) krasi visok površinski sjaj sa malom ukupnom luminoznošću, što je posledica njihovog malog efektivnog radijusa i relativno velike mase. Istorijski gledano ovaj tip galaksija je bio poznat dosta rano, verovatno zato što je jedna od nama bližih i svetlijih galaksija, M32, upravo ovog tipa. Objavljivanjem kataloga Cvikija i Cvikija 1971. godine (Zwicky & Zwicky, 1971), navedene su tri galaksije koje danas klasifikujemo kao cE. Dosta dugo nakon toga bilo je poznato svega 6 galaksija ovog tipa. Međutim u poslednjih par decenija je otkriveno još nekoliko predstavnika ove grupe (Mieske et al., 2005; Chilingarian et al., 2007; Chilingarian & Mamon, 2008; Zhang & Bell, 2017). Ovo je doprinelo repopulaciji dela grafika između globularnih zvezdanih jata i patuljastih eliptičnih na graficima koji povezuju masu i radijus galaksija, kao što vidimo sa slike 4.4. Većina kompaktnih eliptičnih se nalaze oko masivnih galaksija u jatima galaksija ili u grupama, mada ovo za sada može da bude i selekcion efekat, pošto

je posmatrački izuzetno teško detektovati cE galaksije na značajnim rastojanjima.

Opšte karakteristike dele sa brojčano nadmoćnijim tipovima patuljastih - imaju staru populaciju zvezda, nemaju gasa, samim tim ni aktivno formiranje zvezda, imaju kao što je već pomenuto mali efektivni radijus, reda $> 10^2$ pc, veliki površinski sjaj i zvezdane mase u rasponu od 10^8 do $10^{10}M_{\odot}$. Za mnoge je izuzetno teško utvrditi da li uopšte imaju tamni halo (Yıldırım et al., 2017), dok će u poglavlju 6 biti pokazano da je prisustvo tamne materije minimalno iz prostog razloga što su već uronjene u tamne haloe matičnih galaksija. Metaličnosti u centrima idu do solarnih, pa se može zaključiti da imaju dosta visoku metaličnost (Yıldırım et al., 2017).

Pošto su prilično neuobičajeni objekti u odnosu na ostale patuljaste (pogotovu mali broj njih), pitanje njihovog formiranja je privuklo dosta pažnje. Već 1973. godine Sandra Faber (Faber, 1973) je pretpostavila da su ove galaksije ogoljena jezgra velikih eliptičnih galaksija, ali su Choi et al. (2002) utvrdili da ovo nije verovatno. Sa druge strane Kormendi je tvrdio da se one ne razlikuju od ostalih eliptičnih galaksija i da predstavljaju „prave” patuljaste verzije većih rođaka - u smislu da dele način formiranja i evoluciju (Kormendy, 1985; Kormendy et al., 2009; Kormendy & Bender, 2012). Međutim pronalaskom dodatnih članova ovog tipa pojavile su se nove pretpostavke - da su nastale plimskim ogoljavanjem spiralnih galaksija (Bekki et al., 2001) ili da su jednostavno nastale unutar jata gde im je rast ograničen sredinom (Wellons et al., 2016). Jedan od rezultata ove disertacije zapravo pokazuje da 30% kompaktnih patuljastih nastaje ogoljavanjem spiralnih galaksija koje nastaju van matičnih jata galaksija, dok ostatak nastaje akrecijom hladnog gasa u samom jatu, gde će više detalja biti navedeno u poglavlju 6.

4.1.5 Ultra kompaktne patuljaste galaksije - UCD

Ovaj tip patuljastih je otkriven, na iznenađenje stručne javnosti, 1999. godine od strane grupe predvođene Drinkwaterom (Drinkwater et al., 1999) koja je radila na projektu pregleda Fornaks jata galaksija, tj. nađene su analizom podataka *2dF Fornax Spectroscopic Survey*-a. Ovaj pregled neba je pokrio sve objekte na 12 kvadratnih lučnih stepeni centriranih na Fornaks jatu i time omogućio daleko dublju posmatračku analizu nego prethodni projekti, što je i doprinelo ovom otkriću (Drinkwater et al., 2000b).

Pored identifikovanih UCD-ova u Fornaksu (Drinkwater et al., 2000a,b, 2003), otkrivene su nakon toga i u drugim jatima: Abell 1698 (Mieske et al., 2004), Virgo (Jones et al., 2006), Koma (Price et al., 2009), Hidra I (Misgeld et al., 2011), Persej jatu galaksija (Penny et al., 2012, 2014).

UCD galaksije su zapravo jako kompaktne patuljaste galaksije, sa efektivnim radijusom od svega nekoliko desetina parseka i apsolutnim magnitudama koje idu od $M_B - 11.4$ do -13.4 . Uz tako mali radijus i tolike apsolutne magnitude, ispostavlja se da zapravo imaju visok (za patuljaste) površinski sjaj ekvivalentan dE galaksijama. Sa slike 4.4 se može videti da im se zvezdana masa kreće oko $10^7 M_\odot$. Karakteriše ih odsustvo gasa, starija populacija zvezda i izuzetno velika gustina.

Iako se inicijalno pretpostavljalo da mogu da predstavljaju familiju masivnijih globularnih jata (recimo: Mieske et al., 2002), danas se misli da su njihov veliki sjaj i masa isključili ovu mogućnost. Zapravo u deceniji od njihovog otkrića je predstavljeno nekoliko scenarija za njihovo formiranje:

- da su ostaci plimski ogoljenih patuljastih galaksija (Bekki et al., 2003). Ono što ovaj scenario čini zanimljivim je sličnost kompaktnih jezgara patuljastih galaksija sa UCD-ovima;
- da su nastali spajanjem masivnih zvezdanih jata (Fellhauer & Kroupa, 2002);

- ili da su jednostavno posebna klasa patuljastih galaksija sa „normalnom” evolucijom (Drinkwater et al., 2004).

Iako je inicijalno bilo teško da se odredi prisustvo tamne materije (usled kompaktnosti), utvrđeno je da imaju M/L odnos koji je dvaput veći od globularnih jata sa sličnom metaličnošću (Dabringhausen et al., 2008; Mieske & Kroupa, 2008). Ovo implicira ili da je zvezdana populacija UCD-ova izuzetno masivna ili da zapravo UCD-ovi imaju haloe tamne materije, što bi ih činilo objektima sa najvećom koncentracijom tamne materije na malim skalama. U ovom slučaju bi visoka gustina tamne materije mogla da se pokaže ključna u razumevanju prirode iste (Gilmore et al., 2007).

4.1.6 Patuljaste spiralne galaksije - dS

U svom radu iz 1984. godine Sandaž i Bingeli (Sandage & Bingeli, 1984) su uradili sveobuhvatni pregled Virgo jata galaksija, sa posebnim osvrtom na patuljaste galaksije. U okviru ove studije su klasifikovali morfološke tipove članova Virgo jata galaksija i pokušali da nađu patuljaste koje bi morfološki odgovarale galaksijama koje su populisale Hablovu viljušku (slika 4.1). Međutim nisu uspeli da detektuju ni jednu patuljastu koja bi odgovarala spiralnim galaksijama (Sa, Sb, Sc) i uzevši u obzir dotadašnje rezultate, izneli su tvrdnju da patuljaste spiralne zapravo ne postoje. Tvrdnju za koju su rekli da „ukoliko je tačna, predstavlja fundamentalnu činjenicu”.

Nešto više od decenije od tog rada je objavljen rad Šomberta i koautora (Schombert et al., 1995) koji je imao za cilj da mapira morfološke tipove patuljastih galaksija na velikim skalama u cilju produblјivanja razumevanja formiranja galaksija. U tu svrhu su koristili Aresibo teleskop (305 metara) i posmatrali 21 cm liniju neutralnog vodonika. Jedan od rezultata tog posmatranja je i otkriće patuljastih

spiralnih galaksija u polju.

Za ovaj tip patuljastih je utvrđeno da imaju male apsolutne magnitudo $\mathcal{M}_B > -17$, male efektivne radijuse ($< 5\text{kpc}$), nizak površinski sjaj. Pored toga sadrže i male količine gasa ($M_{\text{HI}} < 10^9 M_{\odot}$ - svakako bogate gasom u odnosu na dE recimo), imaju izraženu rotaciju i kinematičke obrasce koji odgovaraju višestrukim spiralnim granama ili izraženu strukturu diska (Schombert et al., 1995).

Pošto su nađene samo u polju, zaključeno je da ne postoje u jatima galaksija (što donekle potvrđuje tvrdnju Sandaža i Bingelija). Sa druge strane, pretpostavlja se da one zapravo mogu da postanu patuljaste eliptične nakon ulaska u gušće sredine, nalik jatima (Moore et al., 1996). Štaviše moguće je da su Magelanovi oblaci zapravo prelazni tip iz patuljastih spiralnih u patuljaste eliptične ili sferoidalne šta bi mogle da postanu ako prežive interakciju sa Mlečnim putem.

4.1.7 Plave kompaktne patuljaste galaksije - BCD

Ovaj tip galaksija se dugo smatrao kao podtip dIrr (Matteucci, 2012), ali sada se tretiraju kao zaseban tip patuljastih galaksija. Karakterišu ih visok površinski sjaj, mali efektivni radijus, velike količine gasa, svetli HII regioni (pa se ponekad zovu i vangalaktičkim HII regionima) i izuzetno visoka stopa formiranja zvezda, sa naravno plavom bojom po kojoj su i dobili ime (Thuan & Martin, 1981; Buta, 2013). Apsolutna magnitudo im je niska $\mathcal{M}_B > -18$ (sa prosečnom apsolutnom magnitudom od $\mathcal{M}_B > -16.1 \pm 1.4$, Gil de Paz et al., 2003) i niskim metaličnostima (od $1/3 > Z > 1/50 Z_{\odot}$, Kunth & Östlin, 2000, pri čemu je solarna metaličnost $Z_{\odot} = 0.0127$).

Imajući u vidu da neki primerci BCD galaksija imaju izuzetno visoke stope formiranja zvezda (*starburst*), mladu populaciju zvezda i jako niske metaličnosti (u literaturi se često navodi primer I Zw18 objekta), dugo se mislilo da su ovi objekti zapravo veoma mladi i da prolaze kroz prvu epizodu formiranja zvezda ili

da su imale više kraćih epizoda (do 10^7 godina) izraženog formiranja zvezda (Searle et al., 1973) za razliku od dIrr za koje se, kao što smo videli, prepostavlja da imaju daleko nižu stopu formiranja zvezda koja traje dugoročnije. Moderna posmatranja koja su uključila i Hablov svemirski teleskop su pokazala da ove galaksije zapravo imaju i stariju populaciju zvezda, staru najmanje 10^9 godina (npr. Loose & Thuan, 1986; James, 1994; Cairós et al., 2001; Amorín et al., 2007).

Očigledniji deo populacije zvezda ovog tipa galaksija se nalazi u OB dominiranim regionima u kojima postoji visoka stopa formiranja zvezda i koji imaju mali odnos zvezdane mase i luminoznosti, tj. M/L. Iz formiranja masivnih zvezda koje kratko žive bi se očekivalo da nastali galaktički vetrovi doprinose obogaćivanju okolnog gasa većom metaličnošću, međutim za ovaj tip galaksija se pokazalo da je taj proces neefikasan u obogaćivanju i uklanjanju preostalog gasa iz BCD-ova (Ferrara & Tolstoy, 2000; Recchi & Hensler, 2007).

Slično kao i sa dIrr, prepostavlja se da bi BCD galaksije mogle da budu prekurzori drugih tipova patuljastih galaksija. Prepostavljena je i veza između dIrr i BCD gde je postulirano da bi, pošto su strukturalno slične, BCD mogli da budu dIrr koji prolaze kroz epizodu intenzivnog formiranja zvezda (Davies & Phillipps, 1988). Sa jedne strane je pokazano da su i strukturalno slične (Vaduvescu et al., 2006), ali je to ubrzo osporeno (Meyer et al., 2014). Moguća veza između dE i BCD u jatima je naizgled moguća samo ukoliko razmatramo dE(N), odnosno patuljaste eliptične sa izraženim jezgrom, pre svega zbog kompaktne veličine BCD-ova.

4.1.8 Ultra difuzne galaksije - UDG

Ovaj tip galaksija predstavljaju prilično čudni primerci i u poslednje 2 godine interesovanje za galaksije ovog tipa je doživelo renesansu. Poznat je još sa kraja '80ih, kada su Impey et al. (1988) predstavili svoje rezultate detektovanja objekata male zvezdane mase, jako niskog površinskog sjaja, ali velikog radijusa, bez gasa

i sa starijom populacijom zvezda u okviru Virgo jata galaksija. U žižu stručne javnosti su ponovo ušli radom van Dokkum et al. (2015) u kome su autori pronašli 47 novih kandidata galaksija koje imaju srednju zvezdanu masu od $\sim 6 \times 10^7 M_{\odot}$, jako nizak površinski sjaj, staru (crvenu) populaciju zvezda i efektivne radijuse koji idu i do 5 kpc, što implicira veličinu daleko većih i luminoznijih galaksija (tj. imaju sličnu veličinu kao Mlečni put, ali i do 10^3 zvezda manje). U tom radu su ih i imenovali kao ultra difuzne galaksije.

Upravo zbog tolike veličine postavlja se pitanje da li se one uopšte mogu računati u patuljaste galaksije? Jedna struja tvrdi da su ovo zapravo „neuspešne“ galaksije, odnosno prekursori galaksija sa Hablove viljuške koje jednostavno nisu uspele da formiraju dovoljno zvezda (van Dokkum et al., 2015; Koda et al., 2015; van Dokkum et al., 2016), dok sa druge strane postoji struja koja tvrdi da su ovo patuljaste galaksije koje su usled nekog eksternog procesa (bilo dinamičkog bilo termalnog) postale „naduvane“ (Beasley & Trujillo, 2016; Amorisco & Loeb, 2016; Di Cintio et al., 2017). Kakva god da im je priroda ta rasprava kao što primećuju Lee et al. (2017) još uvek traje.

U periodu nakon primarne detekcije u Koma jatu, njihov broj naglo raste. Otkriveno je još preko 800 kandidata (Koda et al., 2015). Detektovani su i u grupama i u jatima, gde je poslednja detekcija od 47 i 40 UDG-ova u jatima Abell S1063 i Abell 2744, respektivno, objavljena u trenutku pisanja ove doktorske disertacije (Lee et al., 2017).

Imajući u vidu rezultate postulirano je da ovo mogu biti zapravo džinovske strukture tamne materije sa veoma malim barionskim sastavom (van Dokkum et al., 2016).

Iako je pitanje njihovog formiranja i evolucije još uvek prilično otvoreno, takođe u toku pisanja ove doktorske disertacije je objavljen rad koji tvrdi (na osnovu spektroskopski obrađenog uzorka od 325 UDG-ova, od jata do grupa veličine ukupne

mase od $10^{12}M_{\odot}$) da su UDG-ovi daleko prisutniji u strukturama veće mase i da im broj skalira kao $N_{UDG}(R < R_{200}) \propto M_{200}^{1.11 \pm 0.07}$ (van der Burg et al., 2017). Da li ovo znači da u grupama efikasnije prelaze u druge morfološke tipove ili da u jatima galaksija sredina pospešuje njihovo formiranje ostaje da se vidi.

4.1.9 Patuljaste galaksije u kosmološkim simulacijama

Kosmološke simulacije, kao što smo videli u poglavlju 1 pate od donje granice za rezoluciju mase i donje granice za veličinu najmanjih struktura koje možemo razlučiti (zbog gravitacionog ublažavanja). Kako patuljaste galaksije predstavljaju upravo donje ekstreme za masu i veličinu galaksija nije (još uvek) moguće razmatrati sve tipove isključivo kroz kosmološke simulacije.

Moderne kosmološke simulacije imaju (poglavlje 3) uključenu kompletnu fiziku, barionsku materiju i rezoluciju mase koja je neprevaziđena pre toga. To omogućava da se, njihovom analizom, po prvi put bavimo pitanjima nekih tipova patuljastih galaksija. Pregled glavnih karakteristika tipova patuljastih galaksija koje su predstavljene do sada je dat u tabeli 4.1.

Iz kosmoloških simulacija je moguće baviti se pre svega sa dE, dIrr, BCG i UDG. Sa druge strane, karakteristike određenih tipova su još uvek ispod rezolucije mase kosmoloških simulacija, tako da nećemo biti u prilici da ispitujemo karakteristike UCD-ova i dSph, dok dS ne razmatramo iz prostog razloga što nisu detektovane u jatima, pa ni ne očekujemo da postoje zbog uticaja sredine. Kompaktne eliptične (cE), kao što ćemo videti u jednom od kasnijih poglavlja (poglavlje 6), posebno razmatramo i zbog interesantnih rezultata vezanih za njihovo formiranje i zbog toga što se nalaze na granici detekcije.

Tabela 4.1: Usporedni pregled glavih karakteristika po tipovima patuljastih galaksija: tip patuljaste galaksija, lokacija gde se nalaze, apsolutna magnituda u B filteru, zvezdana masa, efektivni radijus, da li sadrže gasa, stopa formiranja zvezda, da li je pokazano prisustvo tamne materije

Tip	Lokacija	\mathcal{M}_B	Zvezdana masa [M_\odot]	R_e [pc]	Gas?	SFZ [M_\odot/yr]	Tamna Materija
dE	Jata + grupe galaksija	-14 do -18	$10^8 - 10^{10}$	$10^2 - 10^3$	Ne	Ne	Da
dSph	Samo Lokalna grupa	> -14	$< 10^7$	$10^2 - 10^3$	Većina ne	Ne	Da, izraženo
dIrr	Svuda sem u centralnim delovima jata galaksija	-13 do -20	$10^8 - 10^{10}$	$10^2 - 10^3$	Da	< 0.1	Da
cE	M32, oko najmasivnijih galaksija u jatima galaksija	-14 do -20	$10^8 - 10^{10}$	$> 10^2$	Ne	Ne	Zanemarljivo
UCD	Jata + grupe galaksija	-11.4 do -13.4	$\sim 10^7$	$< 10^2$	Ne	Ne	Verovatno
dS	Isključivo u polju	> -17	$10^8 - 10^{10}$	10^3	Da	< 0.1	Da
BCG	Slično kao i dIrr	> -18	$10^8 - 10^{10}$	$10^2 - 10^3$	Da	> 0.1	Da
UDG	Jata + grupe galaksija	-12 do -16	$10^7 - 10^{10}$	$(1.5 - 4.6) \times 10^3$	Ne	Ne	Da, izraženo

Glava 5

Uticaj dinamike jata galaksija na zastupljenost morfoloških tipova patuljastih galaksija

5.1 Uvod

Već sa Bauc-Morgan klasifikacijom je postalo jasno da se jata galaksija mogu razlikovati po drugačijoj zastupljenosti morfoloških tipova unutar njihovih članova. Napretkom posmatračkih tehnologija, pregledi jata su uspeli da pokriju cenzus članova koji je uključio i deo patuljastih galaksija u njima (Virgo: Binggeli et al., 1985; Drinkwater et al., 1996; Koma Aguerri et al., 2005; Fornaks Drinkwater et al., 1999, itd.). Uporedo sa posmatranjima, razvijale su se i kosmološke simulacije, što je naposljetku omogućilo da se i kroz njihovu analizu ispituje populacija patuljastih galaksija unutar jata. Prvi rezultati su se oslanjali na semi-analitičke metode (Lisker et al., 2013), ali skorašnje kosmološke simulacije sa punom fizikom su omogućile direktno iz halo kataloga analizu rasprostranjenosti i svojstava patuljastih galaksija unutar jata (Mistani et al., 2016; Sales et al., 2017).

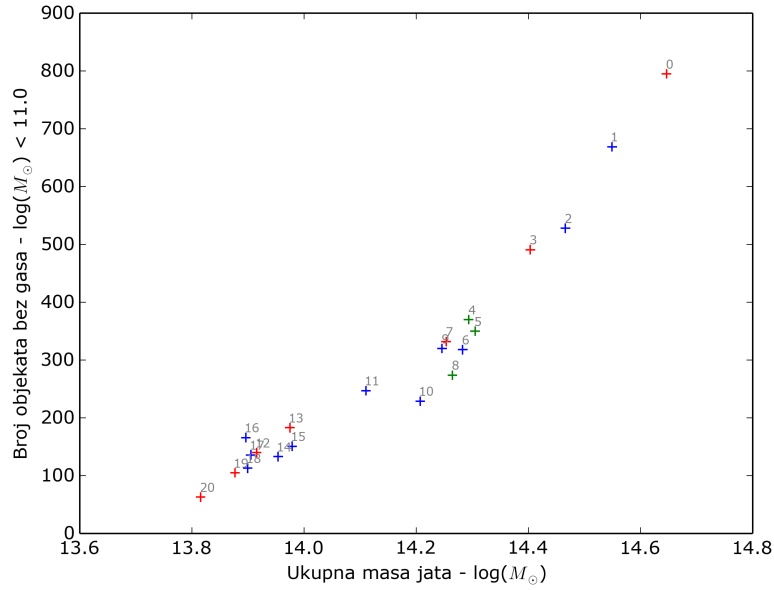
Iako je utvrđeno da je sama struktura u okviru istog tipa patuljastih galaksija analogna u različitim jatima (Aguerri et al., 2005), sama zastupljenost različitih tipova patuljastih galaksija može da se razlikuje od jata do jata (Weinmann et al., 2011). Imajući u vidu rezultate iz poglavlja 3, pokušaćemo da utvrdimo da li i kako dinamika jata utiče na zastupljenost različitih morfoloških tipova patuljastih galaksija u Illustris simulaciji.

5.2 Patuljaste galaksije ranog tipa

5.2.1 Patuljaste eliptične galaksije u jatima galaksija

Na slici 5.1 je prikazana zastupljenost kandidata za patuljaste eliptične galaksije u jatima galaksija koja su dobijena iz Illustris simulacije i predstavljena u tabeli 3.1. Patuljaste eliptične galaksije smo izdvojili time što smo tražili članove jata koji nemaju gasa, koji imaju ukupnu masu manju od $10^{11}M_{\odot}$, $R_h < 1.0$ kpc i masu zvezda $\log(M_{\odot}) > 7.5$ (što bi predstavljalo donju granicu za dE sa slike 4.4). Crvenom bojom na slici 5.1 su predstavljena jata galaksija u interakciji, a plavom bojom jata koja možemo smatrati da su u dinamičkoj ravnoteži.

Jasno se vidi da se broj patuljastih eliptičnih u jatima skalira sa masom jata i da njihova zastupljenost nije osetljiva na to da li je jato u interakciji ili ne. Ovo i nije toliko neočekivan rezultat, pošto iako je jasno da sredina jako utiče na formiranje patuljastih eliptičnih, pretpostavlja se da su ona nastala bar pre 9 Gyr (Roediger et al., 2011), tj. da je uticaj sredine bio daleko dominantniji za ovaj tip patuljastih daleko u prošlosti. Broj dobijenih objekata odgovara broju nađenih patuljastih eliptičnih u jatima odgovarajuće mase (Ferguson & Binggeli, 1994).

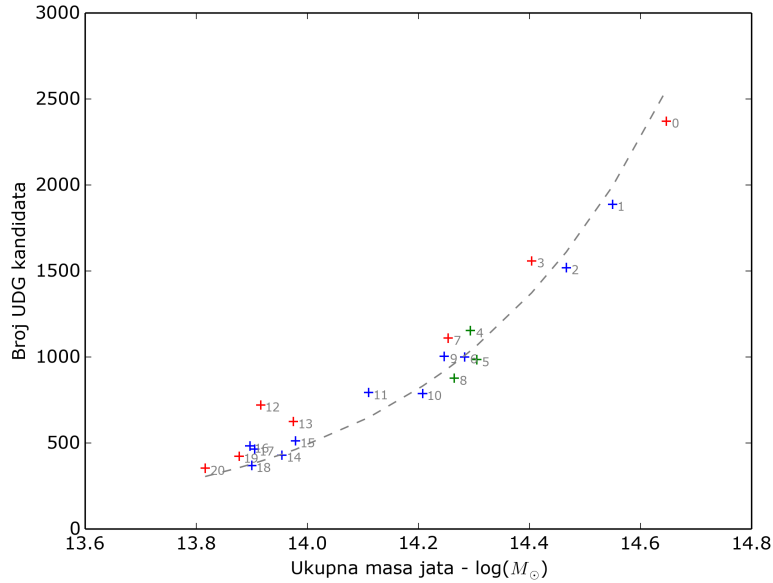


Slika 5.1: Ovde je predstavljen broj patuljastih eliptičnih u odnosu na masu jata u kojem se nalaze. Crvenom bojom su označena jata u interakciji, zelenom jata koja interaguju sa manjim grupama, a plavom jata bez interakcije. Brojevi odgovaraju oznakama jata u tabeli 3.1.

5.2.2 Ultra difuzne galaksije u jatima galaksija

Zastupljenost ultra difuznih galaksija u jatima galaksija u odnosu na masu jata je prikazana na slici 5.2. Na njoj su crvenom bojom predstavljene UDG galaksije koje se nalaze u jatima u interakciji, zelenom UDG galaksije nađene u jatima koja su u interakciji sa grupama galaksija sa manjim brojem članova i plavom bojom jata galaksija koja nisu u interakciji odnosno ona koja su u dinamičkoj ravnoteži. UDG-ovi su definisani kao objekti u jatima koji imaju ukupnu masu manju od $10^{11}M_{\odot}$, R_h veći od 1 kpc i mali udeo barionske mase (manji od 20%).

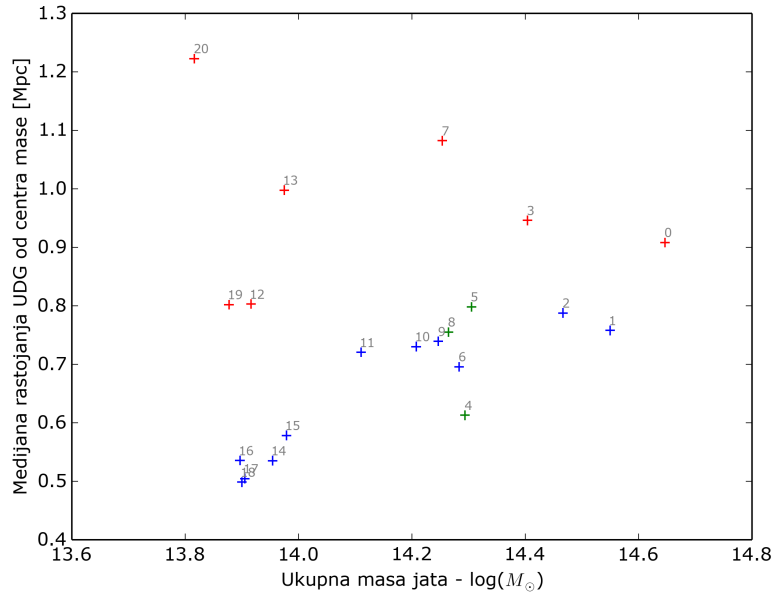
Može se videti da ni u ovom slučaju zastupljenost ovih potencijalnih patuljastih ne zavisi od toga da li je jato u interakciji ili ne. Štaviše na slici je isprekidanom linijom predstavljen skorašnji rezultat u kome je naznačeno da se broj ultra difuznih galaksija skalira isključivo sa masom strukture kao $\propto M^{1.11}$ (van der Burg et al.,



Slika 5.2: Na ovoj slici je prikazan broj ultra difuznih galaksija u odnosu na masu jata u kojem se nalaze. Crvenom bojom su označena jata u interakciji, zelenom jata koja interaguju sa manjim grupama, a plavom jata bez interakcije. Isprekidana linija predstavlja zavisnost broja ultra difuznih galaksija u odnosu na masu strukture u kojoj se nalaze kako je predstavljeno u radu van der Burga i koautra (van der Burg et al., 2017). Brojevi odgovaraju oznakama jata u tabeli 3.1.

2017), čime se potvrđuju dobijene vrednosti. Na slici 5.3 je prikazana medijana udaljenosti UDG galaksija od centra mase jata za svako jato galaksija u Ilustris-1 simulaciji. Može se primetiti da jata u interakciji imaju populaciju UDG galaksija koja je zastupljena na nešto većim rastojanjima nego što je to slučaj za ostala jata galaksija.

Interesantno je primetiti da postoji $\sim 2 - 3$ puta više UDG od dE galaksija u jatima, ali se ultra difuzne galaksije ne navode kao najbrojniji patuljci. Ovo je posledica toga što se još uvek vode debate, kao što je navedeno u poglavlju 4, da li su one uopšte patuljaste ili ne. Samim tim kriterijumi korišćeni za izbor objekata koje možemo smatrati UDG mogu obuhvatati deo populacije ovog tipa galaksija koji se ne mogu smatrati patuljastim galaksijama. Nova istraživanja će svakako

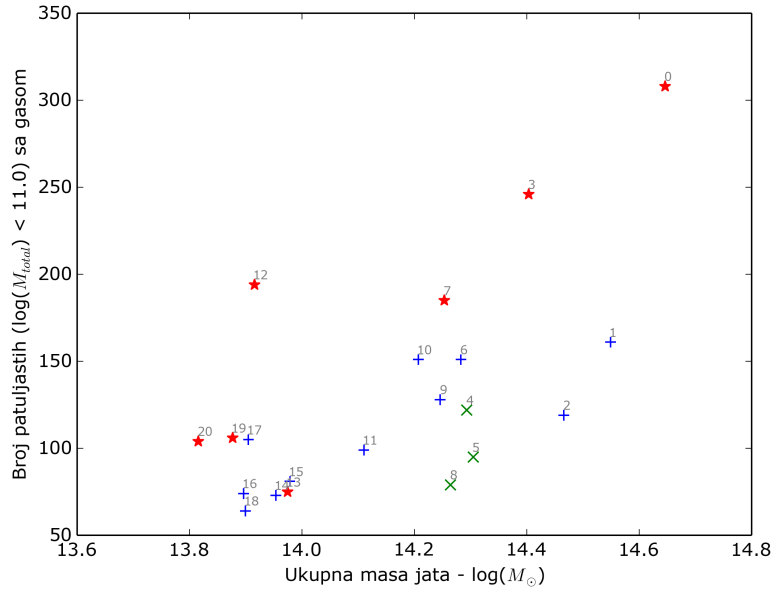


Slika 5.3: Medijana rastojanja UDG od centra jata u odnosu na masu jata u kojem se nalaze. Crvenom bojom su označena jata u interakciji, zelenom jata koja interaguju sa manjim grupama, a plavom jata bez interakcije. Brojevi odgovaraju oznakama jata u tabeli 3.1.

baciti više svetla na prirodu ovih objekata.

5.3 Patuljaste galaksije kasnog tipa

Patuljaste galaksije kasnog tipa, pre svega patuljaste nepravilne (ali i plave kompaktne patuljaste) kao što je pokazano u poglavlju 4 kao glavnu karakteristiku imaju postojanje gasa i stope formiranja zvezda, pa ćemo, da bismo ih identifikovali, izabrati sve članove jata iz kataloga haloa koji imaju prisjedinjene čestice gasa na $z = 0$ i ukupnu masu manju od $10^{11}M_{\odot}$. Patuljaste nepravilne galaksije i plave kompaktne galaksije ćemo razlikovati po stopi formiranja zvezda. Na slici 5.4 je dat broj ovih objekata u zavisnosti od mase jata. Kao i ranije i ovde su crvenom bojom označeni objekti jata galaksija koja su u interakciji, zelenom jata



Slika 5.4: Zavisnost broja patuljastih galaksija sa gasom u odnosu na masu jata u kojem se nalaze. Crvenom bojom su označena jata u interakciji, zelenom jata koja interaguju sa manjim grupama, a plavom jata bez interakcije. Brojevi odgovaraju oznakama jata u tabeli 3.1.

galaksija koja interaguju sa grupama i plavom jata galaksija koja ne interaguju.

Za razliku od prethodnih rezultata ovde je vidljiv trend da jata u interakciji imaju veći broj patuljastih galaksija sa gasom, u odnosu na jata koja nisu u interakciji. Štaviše može se primetiti da nema nekih značajnih razlika između jata koja interaguju sa grupama i jata koja ne interaguju uopšte.

Na slici 5.5 smo proverili stopu formiranja zvezda pri čemu je podeljena na 2 intervala: prvi grafik (gore) predstavlja sve patuljaste sa gasom čija je stopa formiranja zvezda manja od $0.1 M_{\odot}/\text{yr}$, što je karakteristično za patuljaste nepravilne galaksije, dok drugi grafik (dole) sadrži patuljaste sa gasom koje imaju izuzetno visoku stopu formiranja zvezda (veću od $0.1 M_{\odot}/\text{yr}$). Ove potonje galaksije bi odgovarale plavim kompaktnim patuljcima. Kao što je prikazano na graficima, patuljastih sa gasom i niskom stopom formiranja zvezda ima značajno više u od-

nosu na ove druge, što je i očekivan rezultat pošto patuljaste galaksije ne mogu dugo da održe visoku stopu formiranja zvezda karakterističnu za plave kompaktne patuljaste galaksije.

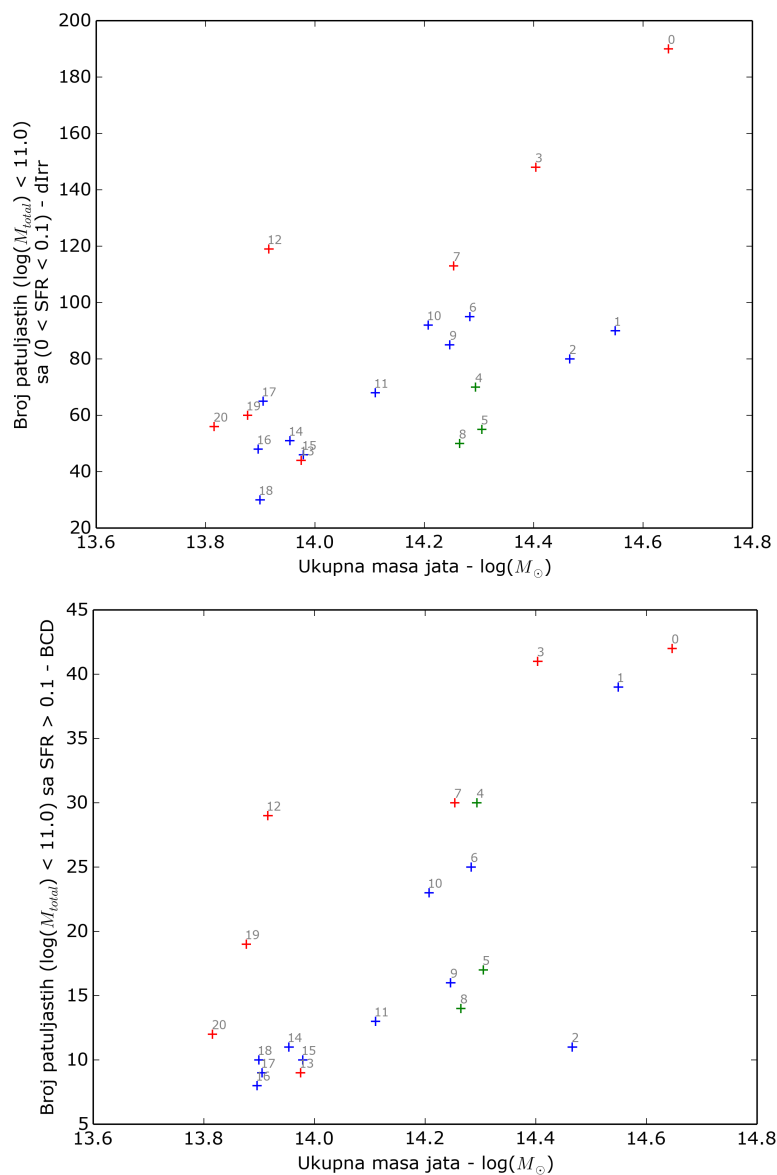
Kako znamo da patuljaste sa gasom ne populišu centralne delove jata, interesantno nam je da pogledamo da li postoji razlika rastojanja ovih galaksija od centra jata u odnosu na to da li je jato u interakciji ili ne. Medijana rastojanja patuljastih galaksija sa gasom u odnosu na masu jata je data na slici 5.6, gde se jasno vidi da patuljaste nepravilne u jatima u interakciji zapravo populišu rastojanja koja su veća od rastojanja koja populišu njihovi analozi u jatima koja ne interaguju.

Poslednja stvar koju smo ispitali jeste metaličnost, gde je na slici 5.7 prikazana srednja metaličnost gasa ovih patuljastih u odnosu na to koje jato populišu. Sa slike je u potpunosti jasno da nema nikakve zavisnosti od toga da li je jato u interakciji ili ne, a dobijene metaličnosti u potpunosti odgovaraju očekivanim vrednostima, recimo dobijenim merenjima metaličnosti gasa u Abel jatima (Durret et al., 2005), gde je zaključeno da je za tu stopu metaličnosti odgovorno obogaćivanje od strane supernovih, što je moguće i u ovom slučaju kao posledica aktivne stope formiranja zvezda.

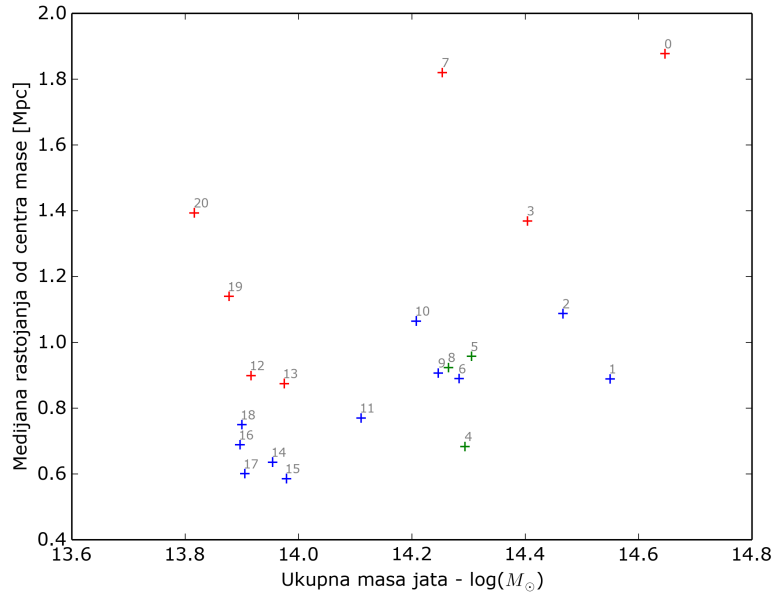
5.4 Diskusija

Možemo zaključiti da rasprostranjenost patuljastih eliptičnih i ultra difuznih galaksija ne zavisi od toga da li jato interaguje, nego da skalira sa masom samog jata galaksija. Ovo je donekle očekivano pošto su patuljaste eliptične nastale daleko u prošlosti i već su prošle kroz period kada je uticaj sredine bio dominantan.

Za ultra difuzne galaksije treba napomenuti da postoje rezultati da ove galaksije ipak nastaju od patuljastih koje vremenom i pod uticajem sredine bivaju „nadu-



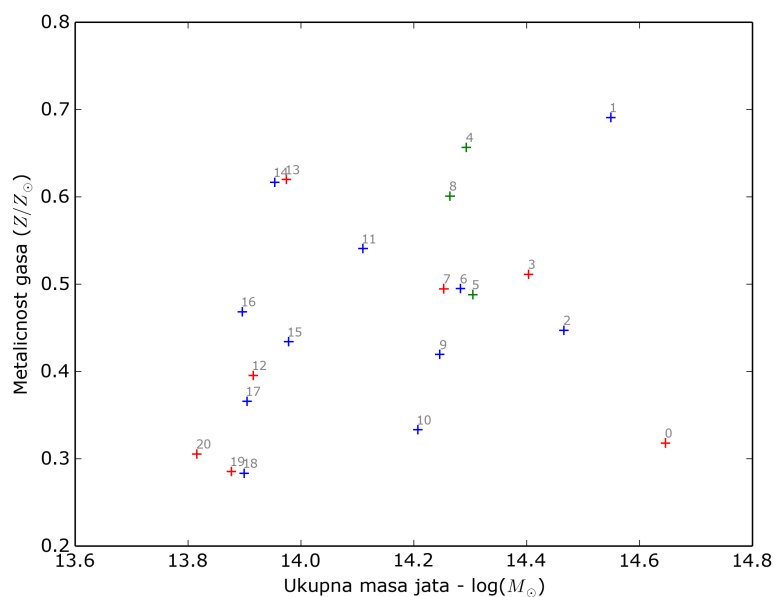
Slika 5.5: Gore: Broj patuljastih sa gasom koje imaju nisku stopu formiranja zvezda u odnosu na masu jata u kojem se nalaze. Dole: Broj patuljastih sa gasom koji ima visoku stopu formiranja zvezda u odnosu na masu jata u kojem se nalaze. Brojevi na obe slike odgovaraju oznakama jata u tabeli 3.1. Za obe slike važi da su crvenom bojom označena jata u interakciji, zelenom jata koja interaguju sa manjim grupama, a plavom jata bez interakcije.



Slika 5.6: Medijana rastojanja patuljastih sa gasom od centra jata u odnosu na masu jata u kojem se nalaze. Crvenom bojom su označena jata u interakciji, zelenom jata koja interaguju sa manjim grupama, a plavom jata bez interakcije. Brojevi odgovaraju oznakama jata u tabeli 3.1.

vane”, tj. nisu neuspješne „normalne”. Razlog za ovu potonju teoriju se izgleda nalazi u činjenici da su van Dokumove galaksije otkrivene 2015. godine masivnije i da kao takve nisu tipične galaksije ovog tipa (Kereš, privatna komunikacija). Ultra difuzne galaksije su stoga ostatak, najverovatnije patuljastih galaksija, koje su završile upravo suprotno od patuljastih eliptičnih, odnosno njihova veličina se povećavala, a koncentracija materijala unutar galaksije smanjivala. Štagod da je odgovorno za njihov nastanak, mora da deluje kontinualno i da bude neosetljivo na interakciju celog jata.

Sa druge strane prisustvo gasa u patuljastim galaksijama je jako osetljivo na uticaj sredine. Dugoročna izloženost plimskim uticajima u jatu bi svakako uticala na gubitak gasa. Na to ukazuje i činjenica da patuljaste sa gasom nisu detektovane u posmatranjima u centralnim regionima jata. Sa te strane, dobijeni rezultat



Slika 5.7: Srednja metaličnost gasa koji se nalazi u patuljastim galaksijama u odnosu na masu jata u kojem se nalaze. Crvenom bojom su označena jata u interakciji, zelenom jata koja interaguju sa manjim grupama, a plavom jata bez interakcije. Može se videti da metaličnost gasa unutar patuljastih nije pod uticajem toga da li je jato u interakciji ili ne. Brojevi odgovaraju oznakama jata u tabeli 3.1.

je razuman, članovi neinteragujućih jata galaksija su verovatno daleko duže izloženi unutrašnjim uticajima i gubitku gasa pored trošenja istog u toku formiranja zvezda. Već smo u poglavlju 4 naveli rezultate skorašnjih istraživanja koja pokazuju da nakon upada u jato patuljaste nepravilne (i plave kompaktne patuljaste galaksije), odnosno patuljaste sa gasom, usred uticaja sredine doživljavaju morfološku transformaciju u patuljaste sferoidalne ili eliptične. Sve ovo pokazuje da je očekivan rezultat da jata u interakciji imaju daleko veći broj patuljastih galaksija sa gasom. Medijane rastojanja u odnosu na centar jata su stoga i očekivano veće za jata u interakciji pošto su ona i izraženije triaksijalna i imaju populaciju patuljastih galaksija sa gasom koja tek upada u jato. Interesantno je uporediti medijane rastojanja za patuljaste sa gasom i ultra difuzne galaksije, gde dolazi

*GLAVA 5. UTICAJ DINAMIKE JATA GALAKSIJA NA ZASTUPLJENOST
MORFOLOŠKIH TIPOVA PATULJASTIH GALAKSIJA*

do izražaja koliko veća rastojanja populišu patuljaste sa gasom u odnosu na ultra difuzne galaksije u jatima.

Zastupljenost kompaktnih eliptičnih galaksija će biti razmotrena u sledećem poglavlju (poglavlju 6).

Glava 6

Formiranje kompaktnih patuljastih galaksija u jatima galaksija

6.1 Uvod

Kao što je pomenuto u poglavlju 5, kompaktne eliptične patuljaste galaksije predstavljaju neuobičajen problem i za posmatranje i za analizu kroz numeričke simulacije zbog svojih malih dimenzija, pa ćemo se njima posebno baviti.

U poglavlju 4 je pomenuto da je u proteklih nekoliko godina, pojačano interesovanje za patuljaste galaksije dovelo do otkrića nove klase kompaktnih patuljaka, koje popuniše prostor između globularnih jata (GC) i patuljastih eliptičnih galaksija (dEs) na dijagramu masa-veličina galaksija (slika 4.4). Te M32 nalik galaksije, nazvane kompaktne eliptične (pogledati poglavlje 4) su identifikovane u blizini najmasivnijih galaksija unutar jata. Iako, kao što smo videli, sve više ovakvih objekata biva otkriveno, pitanje njihovog formiranja je još uvek jako otvoreno. Imajući u vidu heterogenost ovih objekata očekivano je da se njihove istorije formiranja razlikuju drastično.

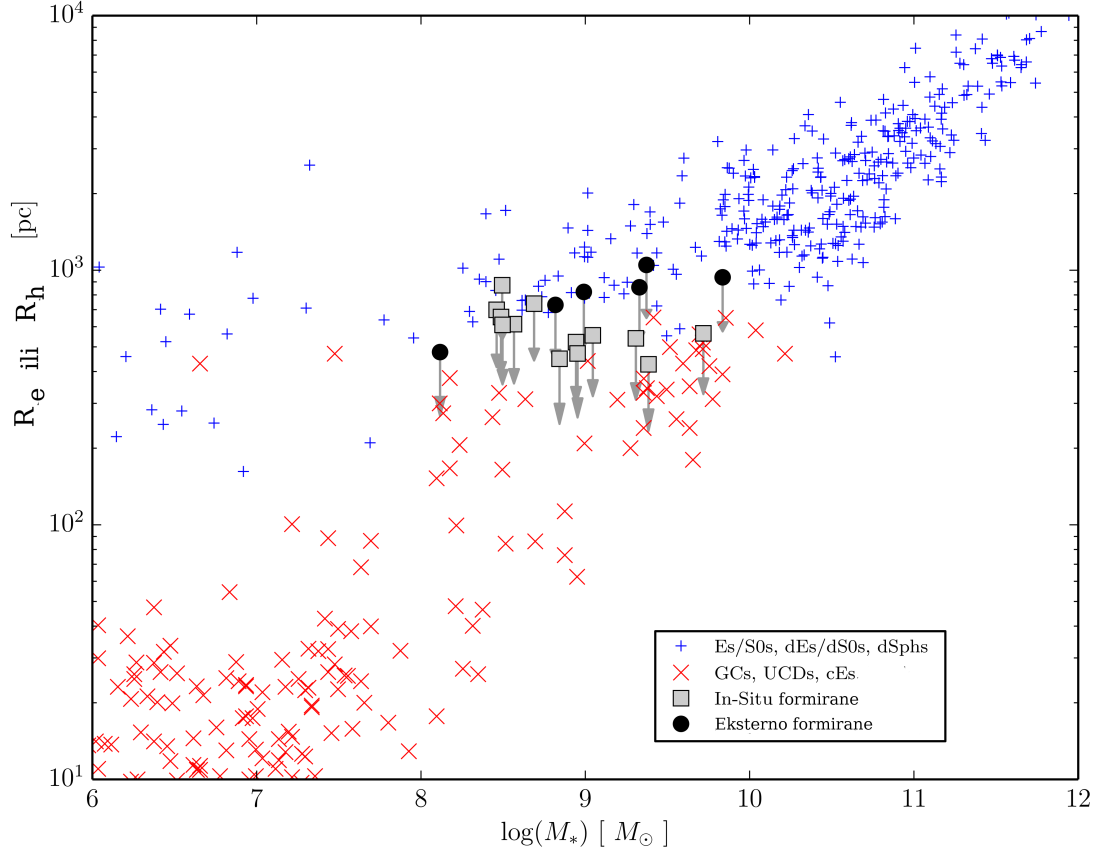
Inspirisani radom Žang i Bela (Zhang & Bell, 2017) koji su prvi uradili pregled

broja kompaktnih patuljastih u jatima oko najmasivnijih galaksija, pokušali smo da nađemo moguće kandidate u sličnim uslovima u Ilustris simulaciji. Nakon identifikovanja, zahvaljujući temporalnim podacima kosmološke simulacije uspeali smo da otkrijemo njihove pretke i time način njihovog formiranja i evolucije. Identifikovali smo dva kanala formiranja kompaktnih patuljastih galaksija rekonstrukcijom istorije mase i rastojanja kandidata koji se nalaze u blizini najmasivnijih galaksija u simulaciji na $z = 0$. Jedan kanal je plimsko ogoljavanje galaksija mase sličnih Mlečnom putu koje se formiraju van jata galaksija i naposljetku potonu u jato, spiralno se krećući prema centralnom masivnom objektu. Drugi kanal formiranja je *in situ* formacija (u odnosu na matično jato) galaksija koje imaju masu sličnu patuljastim galaksijama, sa zanemarljivom evolucijom i ograničenom promenom u zvezdanoj masi. Pronašli smo 19 kompaktnih patuljastih galaksija u centrima 14 jata, što je konzistentno sa posmatranjima. Oko 30% ima eksterno poreklo, dok oko 70% se formira *in situ*. Ovaj rezultat bi mogao značajno da utiče na rasvetljavanje pitanja formiranja kompaktnih eliptičnih galaksija.

Kao i u nekim prethodnim rezultatima i ovde koristimo rezultate iz Ilustris-1 simulacije, kosmološke hidrodinamičke simulacije sa kompletnim fizičkim modelom za formiranje galaksija.

6.2 Identifikovanje kandidata

U potrazi za kandidatima smo pretražili katalog grupa Ilustris-1 simulacije za moguće kandidate kompaktnih patuljastih galaksija u blizini najmasivnije galaksije u jatima galaksija, pri čemu su pretraživana sva jata galaksija prethodno identifikovana u Ilustris-1 simulaciji. Žang i Bel (Zhang & Bell, 2017) su utvrdili da koncentracija kompaktnih objekata iz njihovog posmatračkog uzorka raste ka centrima masivnih jata galaksija (razmatrali su anuluse od 100, 75, 50 i 25



Slika 6.1: Dijagram zvezdana masa - veličina za kompaktne patuljaste galaksije. Plavi plusevi i crveni krstići su podaci iz rada Norisa (Norris et al., 2014) prezentovani sa R_e radijusom. Ostali podaci su kandidati za kompaktne patuljaste galaksije iz rada Martinovića i Mičića (Martinović & Micic, 2017) - kandidati su sa $z = 0$ iz Ilustris-1 simulacije predstavljeni sa 2D projektovanim R_h radijusom (usrednjenim iz 1000 nasumičnih projekcija). Crni kružići predstavljaju objekte koji su ostaci plimski ogoljenih galaksija mase Mlečnog puta, dok su sivi kvadratići ostaci patuljastih objekata koji se formiraju unutar jata galaksija. Strelice naglašavaju da je očekivano da je za ove populacije R_e radijus manji nego R_h radijus.

kpc). Na tim rastojanjima je i kontaminacija njihovog posmatračkog uzorka manja nego na većim rastojanjima, pa je pod uticajem toga izabrano rastojanja od 106 kpc (75kpc/h) od najmasivnije galaksije jata u Ilustris-1 simulaciji za traganje za kompaktnim kandidatima. Izabrani su samo oni kandidati koji imaju R_h radijus niži od 1.4 kpc (odnosno 1kpc/h), odnosno oni čiji polumase radijus obuhvata kompaktne eliptične galaksije. Iz te pretrage je identifikovano 22 kandidata za galaksije koji na dijagramu masa-veličina galaksija populišu prostor između UCDoVa i dEs, kao što se vidi na slici 6.1. Na ovoj slici su izvučeni podaci iz uske oblasti sa slike 4.4 koju populišu upravo kompaktne eliptične i njima bliske galaksije. Time možemo preciznije da utvrdimo položaj naših kandidata na ovom grafiku. Da bi bolje uparili posmatračke rezultate sa našim uradili smo 2D projekciju R_h radijusa, koja je izračunata i usrednjena na 1000 projekcija na nasumično pozicioniranim ravnima. Treba naglasiti da naši kandidati imaju zanemarljivu količinu tamne materije (kako se može zaključiti iz tabele 6.1), što dodatno ukazuje na to da pripadaju tipu kompaktnih eliptičnih galaksija, a ne patuljastih eliptičnih.

Nažalost, za skoro sve kandidate za kompaktne patuljaste (iz obe identifikovane populacije) nisu nađeni podaci o njihovoj evoluciji u drvetu sudara ili informacije o precima u katalogu haloa. Ovo je posledica toga da su kodovi, koji su korišćeni za analizu od strane Ilustris tima, bili podešeni da pokriju što veći prostor parametara u simulaciji. Kao primarni parametar koji su njihovi kodovi koristili za povezivanje haloa kroz vreme je korišćena pripadnost čestica tamne materije, čije je prisustvo u objektima koje smo mi našli na $z = 0$ zanemarljivo (tj. oni su se više orijentisali ka masivnijim strukturama, odnosno širini analize). Ovo je otvorilo put ka tome da analiziramo podatke koji se, iako javno dostupni, nisu našli na radaru drugih timova, a sadrže jako zanimljiv rezultat. Sve podatke smo stoga morali da rekonstruišemo ponaosob.

Za svakog kandidata za kompaktne patuljaste, tip čestice, identifikacioni broj

(ID) čestice i informacija o faznom prostoru (pozicije, brzine) su izvučeni iz podataka za presek stanja simulacije.

Informacija o faznom prostoru i vremenu između preseka stanja je iskorišćena da se identifikuju najverovatnije lokacije kandidata u prethodnom preseku stanja, nakon čega u širokom prostoru oko te lokacije (radijusa do 400kpc/h) su izvučeni mogući preci iz kataloga grupe za taj presek stanja. Nakon toga sledi upoređivanje ID-a čestica za svaki tip čestica (zvezde, gas, tamna materija) između potomka i mogućih predaka, da bi se utvrdio tačan objekat koji predstavlja pravog pretka. Cela procedura se ponavlja za svaki sledeći presek stanja, dok god je moguće prema početku simulacije.

Podaci iz kataloga grupe za povezane podhaloe na svakom preseku stanja daju nam uvid u njihovu evoluciju. Od 22 pronađena kandidata, 3 su bila na limitu detekcije SUBFIND algoritma (skoro nedovoljan broj čestica) i nisu imali nikakvu povezanu identifikovanu strukturu ni u jednom od prethodnih preseka stanja, pa su isključena iz daljih analiza. Za ostale postojalo je dovoljno podataka da se rekonstruiše istorija mase, evolucija veličine, istorija formiranja zvezda i evolucija njihovih komponenti (tamna materija, gas, zvezde).

Imajući u vidu da je jedna od populacija (*in situ* formirana unutar jata) formirana iz oblaka gasa koji se nalazi unutar jata (i bez tamne materije koja je povezana sa tim oblakom), proverili smo i vreme formiranja pojedinačnih čestica zvezda unutar svakog podhaloa u simulaciji da se uverimo da nema starije populacije zvezda u njima, odnosno sve čestice zvezda kandidata koji su članovi *in situ* populacije su formirane u procesima formiranja zvezda iz početnog oblaka gasa unutar jata.

Dodatno, za pretka (oblak gasa) koji je najranije detektovan u slučaju *in situ* populacije su izvučene sledeće informacije: zastupljenost neutralnog vodonika ili preciznije procenat gasa koji se nalazi u neutralnom vodoniku - HI, unutrašnja

energija po jedinici mase (ili takozvana specifična unutrašnja energija) u , stopa formiranja zvezda SFR , i metaličnost Z . Metaličnost smo izrazili u solarnim jedinicama kao: Z/Z_{\odot} , gde je uzeto da je solarna metaličnost $Z_{\odot} = 0.0127$. Takođe smo izračunali i temperaturu T prema formuli:

$$T = \frac{2U\mu m_H}{3k_B} \quad (6.1)$$

gde je U unutrašnja energija, μ je srednja molekulska masa gasa, m_H masa vodonikovog atoma i k_B je Bolcmanova konstanta.

6.3 Dve populacije kompaktnih patuljaka

Naš interes je bio da tražimo kandidate za kompaktne patuljaste galaksije u blizini (unutar radijusa 106 kpc) najmasivnijih galaksija u jatima na $z = 0$ u okviru Ilustris-1 simulacije.

Našli smo 19 kandidata, koji su predstavljeni na 6.1, gde u okviru dijagrama masa-veličina galaksija vidimo njihovu poziciju u odnosu na ostalu familiju kompaktnih patuljastih galaksija. Podaci sa slike 4.4 su preuzeti iz rada Noris (2014) u kome su kompaktne patuljaste galaksije date sa R_e radijusom. Sa druge strane naši podaci su dati sa projektovanim 2D R_h radijusom (usrednjenim na 1000 nasumičnih projekcija) iz Ilustris-1 simulacije.

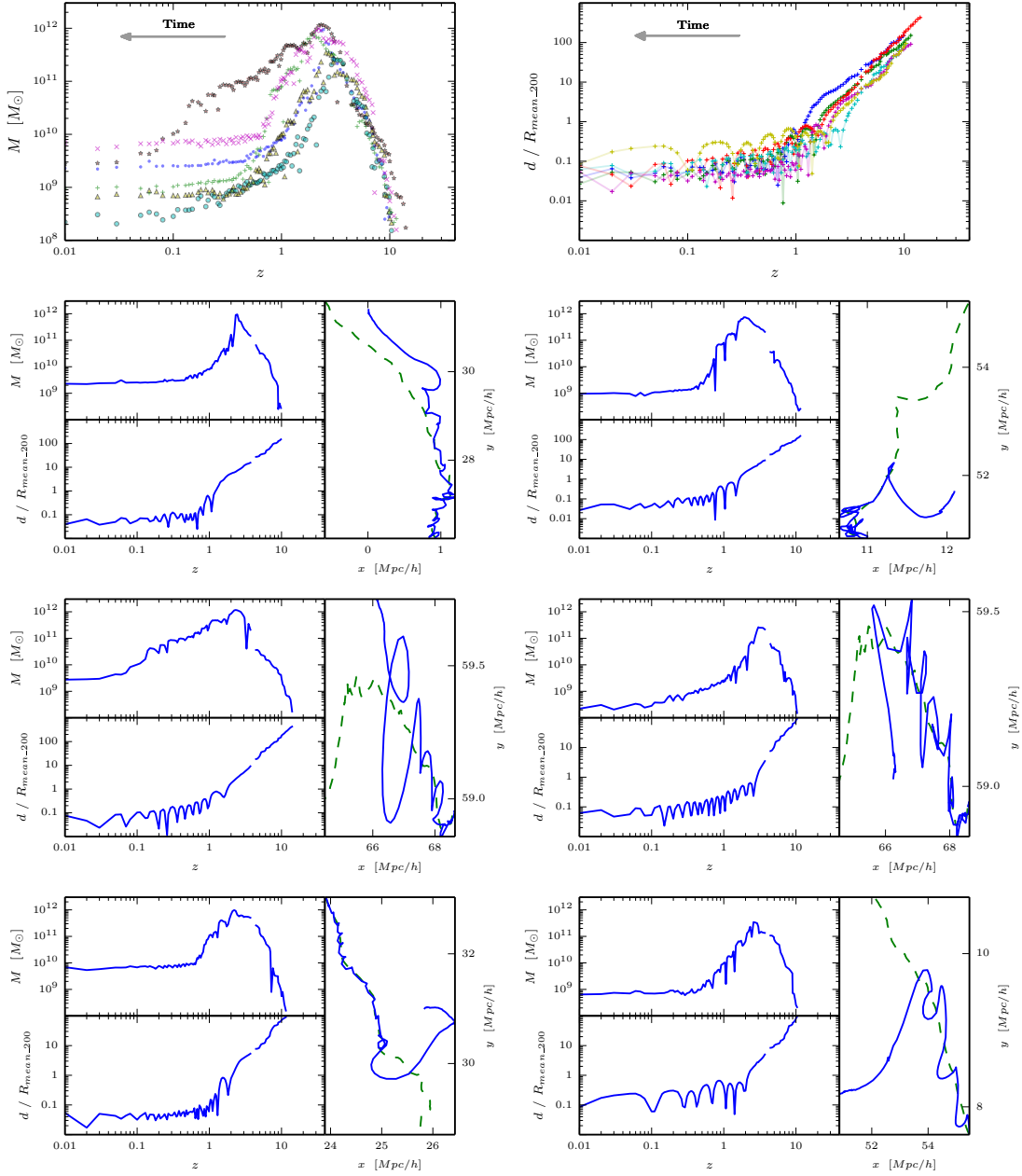
Od 19 kandidata za koje je rekonstruisana istorija mase, izdvojene su dve populacije kandidata za kompaktne patuljaste galaksije sa različitim istorijama formiranja. Parametri svake populacije su predstavljeni u tabeli 6.1. U datoj tabeli, objekti bez slovne oznake predstavljaju eksternu grupu, a objekti sa slovnim oznakom predstavljaju *in situ* grupu. U okviru svake populacije kandidati za kompaktne patuljaste galaksije su imali veoma sličnu istoriju (evoluciju).

Ultimativno i eksterna i *in situ* populacija će formirati kandidate za kompaktne patuljke na $z = 0$ koji su međusobno slični.

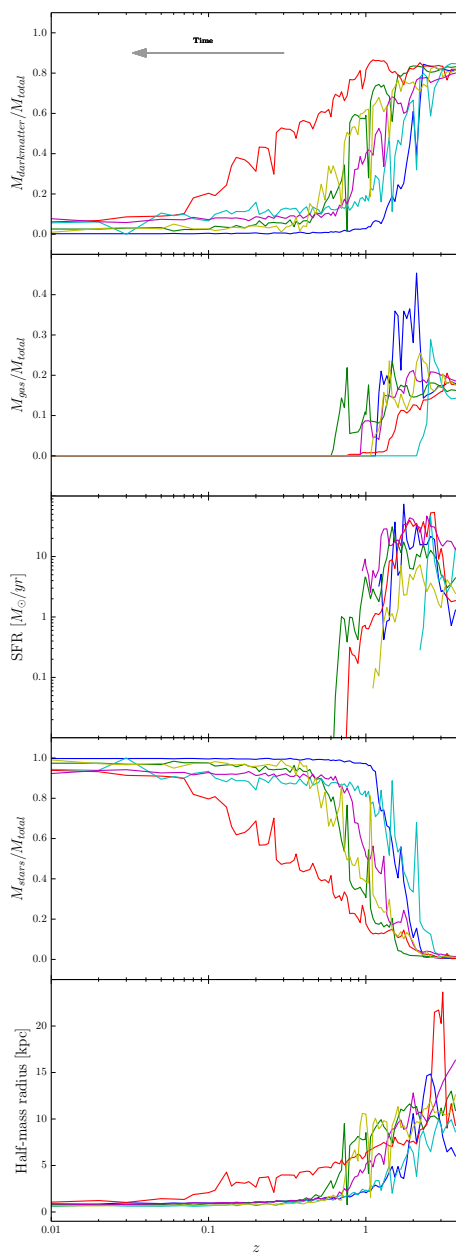
6.3.1 Eksterno formirana populacija

Na slici 6.2 i slici 6.3 identifikovali smo populaciju čije formiranje vuče koren iz plimskog ogoljavanja galaksija masa Mlečnog puta koje su formirane eksterno u odnosu na finalno jato galaksija. Ovde ukazujemo na to da maksimum ukupne virijalne mase galaksija u ovoj populaciji je sličan sa procenjenom ukupnom virijalnom masom Mlečnog puta, odnosno da iznos $\sim 10^{12}M_{\odot}$ (Kafle et al., 2014; McMillan, 2017). Kao što se vidi sa slika, formiranje na visokim crvenim pomacima prati standardnu *bottom up* Λ CDM paradigmu. Sa slike 6.3 vidimo da objekti počinju svoju evoluciju sa očekivanim odnosom gasa i tamne materije od 20%/80%, respektivno. Nakon toga sledi rast mase koji prati aktivno formiranje zvezda. Gas se troši dok se zvezde formiraju. Međutim, dalja očekivana evolucija ovih objekata mase Mlečnog puta je prekinuta i oni počinju da gube masu dok ulaze u jato galaksija na $z \sim 2$, kao što se može zaključiti sa slike 6.2. Veći deo mase koji se izgubi plimskim ogoljavanjem do crvenog pomaka $z \sim 1$ tokom interakcija sa okolinom dok galaksije tonu sve dublje u jato. Usled ovih interakcija galaksije ostaju bez gasa i tamne materije, gde se zadržava samo kompaktni zvezdani ostatak. Ovo koincidira sa time da galaksija dolazi do centralnih delova jata gde postaje blizak satelit najmasivnije galaksije samog jata. Sa desne strane svakog grafika na slici 6.2 pregled orbita je dat za potrebe vizuelizacije (plava linija predstavlja trajektoriju kandidata za kompaktnog patuljka, dok isprekidana zelena linija predstavlja trajektoriju centralnog masivnog objekta). Orbite su date za vrednosti z koje odgovaraju razdoblju od prvog pojavljivanja objekata do $z = 0$, a oblast vizuelizacije (x, y) je izabrana tako da u prikaz stanu cele putanje u datim intervalima.

GLAVA 6. FORMIRANJE KOMPAKTNIH PATULJASTIH GALAKSIJA U JATIMA GALAKSIJA



Slika 6.2: Eksterno formirana populacija. Evolucija mase i rastojanja od centra jata galaksija kandidata za kompaktne patuljke, predstavljena relativno u odnosu na $R_{\text{mean}200}$ jata galaksija u datom preseku stanja. Gornji red su predstavljene ukupne mase i evolucija rastojanja kombinovano za sve kandidate, pri čemu su svim kandidatima pridružene različite boje i oznake. Svaka pojedinačna kompaktna galaksija je predstavljena na zasebnim graficima zarad jasnog pregleda. Dodate su orbite u x-y ravni zarad lakše vizuelizacije, gde plava puna linija predstavlja kretanje kandidata za patuljaste a zelena isprekidana linija kretanje najmasivnije galaksije unutar jata galaksija.



Slika 6.3: Evolucija mase i veličine eksterno formirane populacije kompaktno elip-
tičnih galaksija. Na graficima od vrha naniže su predstavljeni: evolucija udela u
masi tamne materije, evolucija udela u masi gasa, stopa formiranja zvezda unutar
dvostrukog zvezdanog R_h radijusa, evolucija udela u masi zvezda i evolucija veli-
čine galaksija predstavljena kroz zvezdani R_h radijus. Boje kroz sve panele su iste
za isti objekat.

Tabela 6.1: Parametri kandidata za kompaktne patuljaste galaksije iz Ilustris-1 simulacije na $z = 0$ (po kolonama): oznaka na graficima (ako je primenjivo), rastojanje do najmasivnije galaksije u jatu galaksija (kpc), ukupna masa (log), ukupna zvezdana masa (log), maksimalna zvezdana masa kandidata u njegovoj istoriji (log), maksimalna ukupna masa kandidata u njegovoj istoriji (log), zvezdani R_h radijus (pc), 2D projektovani zvezdani R_h radijus usrednjen iz 1000 nasumičnih projekcija (pc), minimalna vrednost 2D projektovanog zvezdanog R_h radijusa (pc), maksimalna vrednost 2D projektovanog zvezdanog R_h radijusa (pc). Horizontalnom linijom su odvojeni parametri za eksternu populaciju (iznad linije) i za *in situ* populaciju (ispod linije).

Label	d (kpc)	$\log(M_\odot)$ ($z = 0$ ukupna)	$\log(M_\odot)$ ($z = 0$ zvezdana)	$\log(M_\odot)$ (max zvezdana)	$\log(M_\odot)$ (max ukupna)	R_h	R_h^{proj}	R_h^{min}	R_h^{max}
	45	9.3	9.3	10.3	12.0	1136	857	778	928
	91	9.0	9.0	10.5	11.9	1074	822	757	892
	99	9.4	9.3	10.8	12.1	1395	1049	1016	1078
	21	8.1	8.1	10.0	11.4	656	477	419	527
	92	9.8	9.8	10.8	12.0	1257	938	888	994
	73	8.8	8.8	9.9	11.5	943	731	626	855
a)	71	9.7	9.7	9.8	10.3	739	565	374	685
b)	32	9.4	9.4	9.7	10.0	558	427	338	479
c)	76	9.3	9.3	9.6	10.0	692	540	332	636
d)	71	8.8	8.8	9.4	9.9	587	449	432	463
e)	83	8.9	8.9	9.6	10.2	679	522	411	615
f)	80	8.5	8.5	9.0	9.6	895	699	567	778
g)	64	9.0	9.0	9.4	9.9	730	555	479	634
h)	85	8.6	8.6	9.2	9.7	808	614	538	688
i)	76	9.0	8.9	9.3	9.7	618	471	452	493
j)	104	8.5	8.5	8.9	9.7	1125	873	813	926
k)	88	8.5	8.5	8.9	10.0	847	655	563	741
l)	93	8.5	8.5	9.3	9.8	787	610	516	669
m)	58	8.7	8.7	9.1	9.8	967	739	548	855

6.3.2 *In situ* formirana populacija

Na slici 6.4 i slici 6.5 identifikovali smo kandidate za kompaktne patuljke za koje se inicijalno formiranje desi *in situ* u odnosu na konačno jato galaksija. Kao što se vidi sa slika, galaksija mase slične patuljastim se formira unutar jata, na crvenim pomacima $z \sim 1$. Slika 6.5 pokazuje da su kandidati za kompaktne patuljke ove populacije formirani iz oblaka gasa koji se nalaze unutar jata i nemaju prisjedinjenu komponentu tamne materije. Ti oblaci gasa prolaze kratku fazu formiranja zvezda koja potroši gas i kreira zvezdanu komponentu koja ostaje. Na kraju procesa ostaje samo kompaktno jezgro od zvezda. Pošto imaju manje vremena za interakciju (u odnosu na eksternu populaciju) i već su blizu centra njihovih matičnih jata, njihov gubitak mase je komparativno daleko manji nego kod patuljaka iz eksterne populacije. Kandidati za kompaktne patuljke iz ove populacije takođe završe kao bliski sateliti masivnih centralnih objekata u matičnom jatu.

Formiranjem *in situ* populacije se bavimo analiziranjem najranijih predaka tih patuljaka. Parametri za svakog od predaka su izvučeni i izračunati (metaličnost u solarnim jedinicama i temperature) i prezentovani u tabeli 6.2. Dodatno, zastupljenost neutralnog vodonika (HI), metaličnost u solarnim jedinicama, temperatura i raspored zvezdane komponente su date na slikama 6.6, 6.7 i 6.8.

Rezultati iz tabele 6.2 i slika 6.6, 6.7 i 6.8, pokazuju da se svi oblaci gasa sastoje iz hladnog ($< 10^5 K$), gustog gasa u različitim fazama formiranja zvezda. Temperatura i intervali mase oblaka gasa su konzistentni sa slikom hladne (*cold mode*) akrecije u različitim fazama (Kereš et al., 2005; Norris et al., 2014) kao razloga formiranja.

Tri oblaka gasa se nalaze u najranijoj fazi formiranja zvezda (f, j, k), pošto se vidi da tek počinju da formiraju zvezdanu komponentu. Kao takvi se razlikuju od ostalih oblaka po većoj zastupljenosti neutralnog vodonika, nešto nižim temperaturama i nižoj stopi formiranja zvezda. Metaličnost svih oblaka gasa je nešto

veća ali još uvek konzistentna sa rezultatima iz prethodnih radova (Genel, 2016; Kacprzak et al., 2016) na odgovarajućem crvenom pomaku, za istu količinu gasa i fazu formiranja zvezda u kojoj se oblak gasa nalazi. Ti oblaci gasa, gde je skoro počelo formiranje zvezda, će naposljetku imati istu sudbinu kao i oni koji se već nalaze u fazi značajno veće stope formiranja zvezda. Tj. oni će doživeti trošenje gasa formiranjem zvezda, obogaćivanje okolnog gasa u tom procesu i povećanje metaličnosti (kao što se može zaključiti iz slika 6.6, 6.7 i 6.8).

6.4 Diskusija

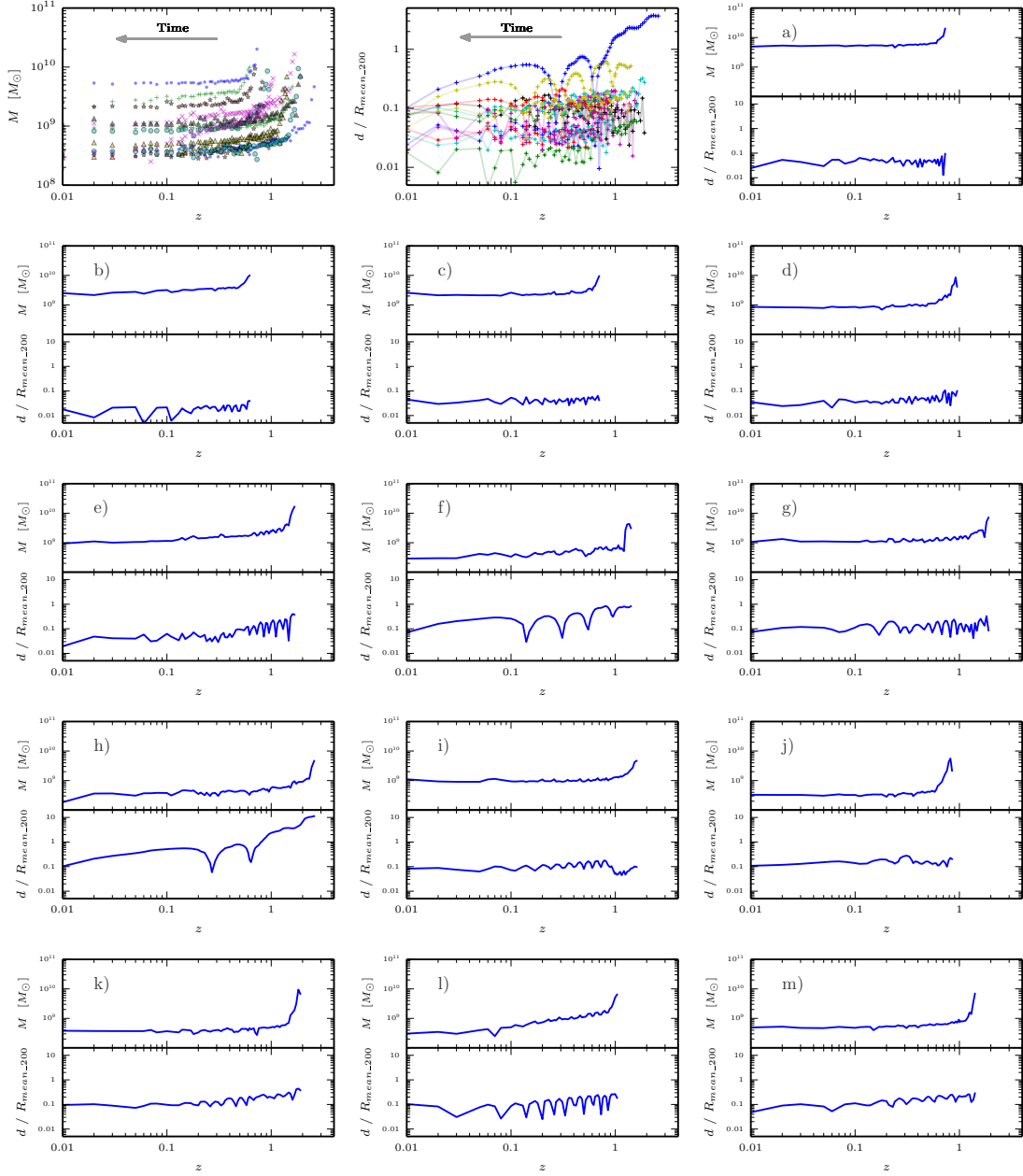
Dve grupe kandidata za kompaktne patuljaste galaksije na $z = 0$ su identifikovane iz Ilustris-1 simulacije u odnosu na svoje različite istorije formiranja.

Eksterna grupa su plimski ogoljene galaksije mase Mlečnog puta. One su se formirale izvan jata galaksija u maniru koji je karakterističan za Λ CDM *bottom up* paradigmu. Formirane su na veoma niskim crvenim pomacima kao kombinacija gasa i tamne materije (20%/80%). Akumulaciju mase prati formiranje zvezda koje potroši gas. Ali nakon upada u jato njihova evolucija mase sugerise da su ovi objekti sa masama sličnim Mlečnom putu izloženi ekstremnom plimskom ogoljavanju. U međuvremenu, promena u R_h radijusu ukazuje na transformaciju objekta veličine Mlečnog puta ka kandidatu za kompaktne patuljaste galaksije. I gas i tamna materija su u potpunosti otrgnuti (ili u slučaju gasa - i potrošeni) ostavljajući samo kompaktni zvezdani ostatak. Svi kandidati ultimativno postaju bliski sateliti najmasivnije galaksije u jatu, što se jasno može videti sa vizuelizacije orbita na slici 6.2.

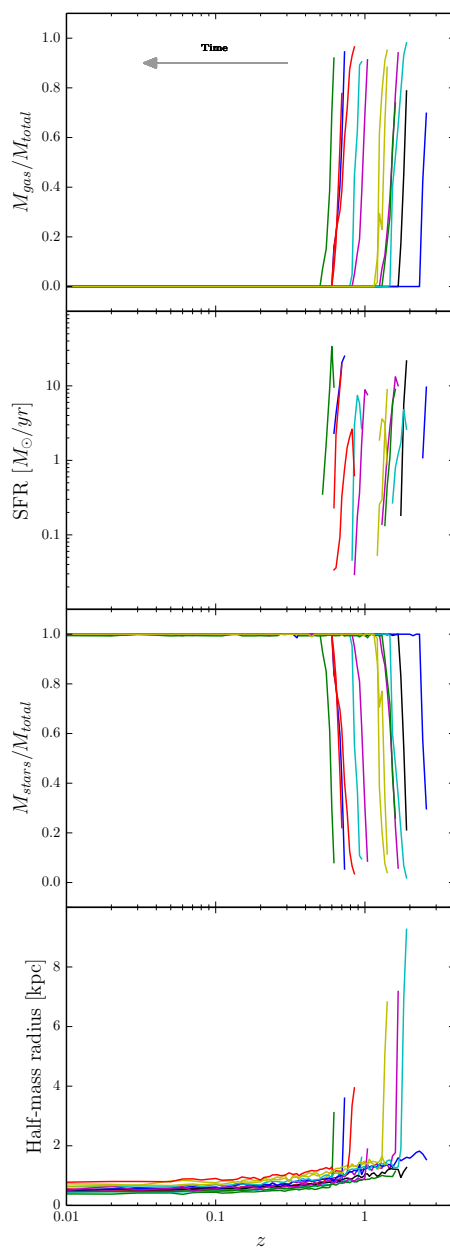
In situ grupa su kandidati za kompaktne patuljke koji se formiraju unutar jata galaksija. Njihove mase nakon formiranja su karakteristične za patuljaste galaksije.

Parametri izvučeni za najranije detektovane pretke - odnosno za oblake gasa

GLAVA 6. FORMIRANJE KOMPAKTNIH PATULJASTIH GALAKSIJA U JATIMA GALAKSIJA



Slika 6.4: *In situ* formirana populacija. Evolucija mase i rastojanja od centra jata galaksija kandidata za kompaktne patuljke, predstavljena relativno u odnosu na $R_{\text{mean},200}$ jata galaksija u datom preseku stanja. Slično kao i na slici 6.2, prva dva grafika gornjeg reda predstavljaju evoluciju ukupne mase i rastojanja, kombinovano za sve kandidate, pri čemu su svim kandidatima pridružene različite boje i oznake. Svaka pojedinačna kompaktna galaksija je predstavljena na zasebnim graficima zarad jasnog pregleda pojedinačne evolucije mase i rastojanja. Izostavljena je vizuelizacija orbite zbog mesta koje bi prikazivanje tih orbite zahtevalo. Oznake na panelima odgovaraju oznakama u tabeli 6.1.



Slika 6.5: Evolucija mase i veličine *in situ* formirane populacije. Na graficima od vrha naniže su predstavljeni: evolucija udela u masi gasa, stopa formiranja zvezda unutar dvostrukog zvezdanog R_h radijusa, evolucija udela u masi zvezda i evolucija veličine galaksija predstavljena kroz zvezdani R_h radijus. Trebalo bi naglasiti da u halo katalogu nemaju komponentu tamne materije koja je povezana sa njima. Boje kroz sve panele su iste za isti objekat.

Tabela 6.2: Parametri najstarijeg pretka kandidata za kompaktne patuljaste galaksije *in-situ* populacije iz Ilustris-1 simulacije (vreme formiranja je dato u drugoj koloni): oznake na graficima, crveni pomak prve detekcije najstarijeg pretka, masa gasa (log), masa zvezda (log), ukupna stopa formiranja zvezda, udeo HI, metaličnost, metaličnost izražena u jedinicama sunčeve metaličnosti, maksimalna temperatura za gas u datom objektu, minimalna temperatura za gas u datom objektu, srednja temperatura za gas u datom objektu.

Oznaka	z	$\log(M_{\odot})$ Gas	$\log(M_{\odot})$ Stars	SFR [M_{\odot}/year]	HI(%)	Z	Z/Z_0	T_{\max} [10^5K]	T_{\min} [10^5K]	\bar{T} [10^5K]
a)	0.73	10.3	9.0	29	0.10	0.019	1.5	4	0.01	0.8
b)	0.62	10.0	8.9	10	0.03	0.025	2.0	2	0.03	0.7
c)	0.7	9.9	9.3	21	0.02	0.026	2.0	4	0.02	1.3
d)	0.95	9.6	8.6	4	0.10	0.022	1.7	2	0.01	0.6
e)	1.67	10.2	9.0	12	0.08	0.011	0.8	3	0.02	0.5
f)	1.41	9.5	8.1	1	0.33	0.007	0.5	1	0.04	0.3
g)	1.9	9.8	9.2	23	0.00	0.015	1.2	4	0.02	1.7
h)	2.58	9.5	9.1	10	0.01	0.020	1.6	4	0.06	1.5
i)	1.6	9.5	9.1	10	0.02	0.027	2.1	3	0.06	1.4
j)	0.85	9.3	7.9	1	0.27	0.015	1.2	1	0.02	0.3
k)	1.9	9.8	8.1	3	0.20	0.006	0.5	2	0.03	0.3
l)	1.04	9.8	8.7	10	0.02	0.023	1.8	2	0.02	0.9
m)	1.47	9.8	8.9	10	0.10	0.016	1.3	3	0.03	0.8

koji prolaze kroz formiranje zvezda - su konzistentni sa slikom hladne akrecije gasa kao metoda nastanka (Kereš et al., 2005). Imajući u vidu koliko duboko u jatu su oblaci gasa (koji predstavljaju najranije pretke) detektovani prvi put, ukazuje ili na mogućnost da potiču od dela gasa koji se ohladio blizu centra jata i koji je oduvan aktivnošću aktivnog galaktičkog jezgra (Nipoti & Binney, 2004) ili ukazuje na eksterno poreklo gasa (u odnosu na jato), tj. da je gas vođen filamentom uspeo da bude ubačen duboko u jato galaksija. Nažalost vremenska rezolucija simulacije nas sprečava da potvrdimo sa sigurnošću pravu prirodu porekla ovog gasa. Gas je verovatno počeo u međugalaktičkoj sredini u difuznoj fazi, nakon čega je prešao direktno u gustu fazu bez zagrevanja više od $\sim 10^5 K$ (Kereš et al., 2005). U okviru ovog hladnog gasa postoji stopa formiranja zvezda u svim oblacima gasa koji predstavljaju najranije pretke, ali u različitim fazama u trenutku detekcije. U nekim oblacima, formiranje zvezda je uzelo maha, dok su drugi oblaci detektovani upravo u trenutku u kome počinje proces formiranja zvezda (pre svega f) i k) obeleženi oblaci gasa) kao što se i da videti sa slika 6.6, 6.7 i 6.8.

Za razliku od eksterne populacije, kandidati *in situ* populacije imaju svoj rast potisnut od starta od strane sredine u kojoj nastaju (odnosno od sredine jata). Formirani su u novije vreme u odnosu na eksternu populaciju i od starta su lišeni tamne materije (mada treba pomenuti da se oni nalaze uronjeni u halo tamne materije roditeljskog jata galaksija). U početku su samo gusti oblak gasa koji prolazi kroz kratku fazu formiranja zvezda pri čemu se troši sav gas. Iz tog procesa se formiraju kompaktni zvezdani objekti koji naposljetku postaju sateliti najmasnijih galaksija u jatima. U toku te evolucije oni doživljavaju drastično manji gubitak mase nego eksterna populacija.

Može se primetiti da je galaksija označena sa h) na slici 6.4 (panel sa vrednostima $R_{\text{mean } 200}$) kandidat za kompaktnog patuljka koji nastaje van jata galaksija (u kome će finalno završiti), što predstavlja razliku u odnosu na ostale članove *in*

situ populacije u koju je uvršćen. Međutim svi drugi parametri ovog objekta od interesa su konzistentni sa *in situ* populacijom. Dodatna analiza prilikom koje je ispitivana orbita ovog objekta u odnosu na druge grupe, koje se nalaze u blizini razmatranog jata galaksija, otkriva da je ovaj objekat formiran u okviru manje masivne grupe u kojoj interaguje sa najmasivnijim objektom te grupe. Naposljetku ta oba objekta (i naš kandidat i najmasivniji objekat te manje grupe) završavaju u finalnom jatu galaksija, gde interaguju sa najmasivnijom galaksijom tog jata, kao i ostali članovi *in situ* grupe. Kao takav, iako njegova istorija formiranja i evolucija nisu očigledne ali su suštinski iste kao i za ostatak grupe, on ipak pripada *in situ* populaciji.

Obe populacije tonu kroz jato da bi postali bliski sateliti najmasivnije galaksije u jatu - ovo je donekle očekivan rezultat imajući u vidu da je početni filter za ekstrakciju mogućih kandidata za kompaktne patuljaste galaksije bio da tražimo odgovarajuće objekte upravo na tim lokacijama (oko najmasivnije). Međutim, nisu nađeni slični kandidati na trajektorijama bliskih prolaza, što, bar za eksternu populaciju, nagoveštava da je dugoročno plimsko ogoljavanje unutar jata esencijalno za formiranje kompaktnih patuljastih galaksija koje završe kao sateliti masivnijih.

Same kandidate smo identifikovali tako što smo tražili objekte koji odgovaraju određenim regionima na dijagramu masa-veličina galaksija. Treba pomenuti da R_e radijus galaksija koji se obično dobija iz posmatranja se u ovom slučaju upoređuje sa R_h radijusom dobijenim iz simulacije. Veza između ta dva nije jednostavna (osim ukoliko je odnos M/L konstantan) i zavisi od toga koliko je kompaktan objekat i od njegove mase. Za kompaktne objekte manje mase R_e radijus teži da bude niži od R_h radijusa (Wellons et al., 2015) što je na slici 6.1 predstavljeno strelicama. Stoga, iako se naši kompaktni patuljci nalaze u gornjem delu grafika, očekivalo bi se da se pomere niže kroz režim kompaktnih eliptičnih, zbog toga što očekujemo da im je R_e radijus niži u našem slučaju.

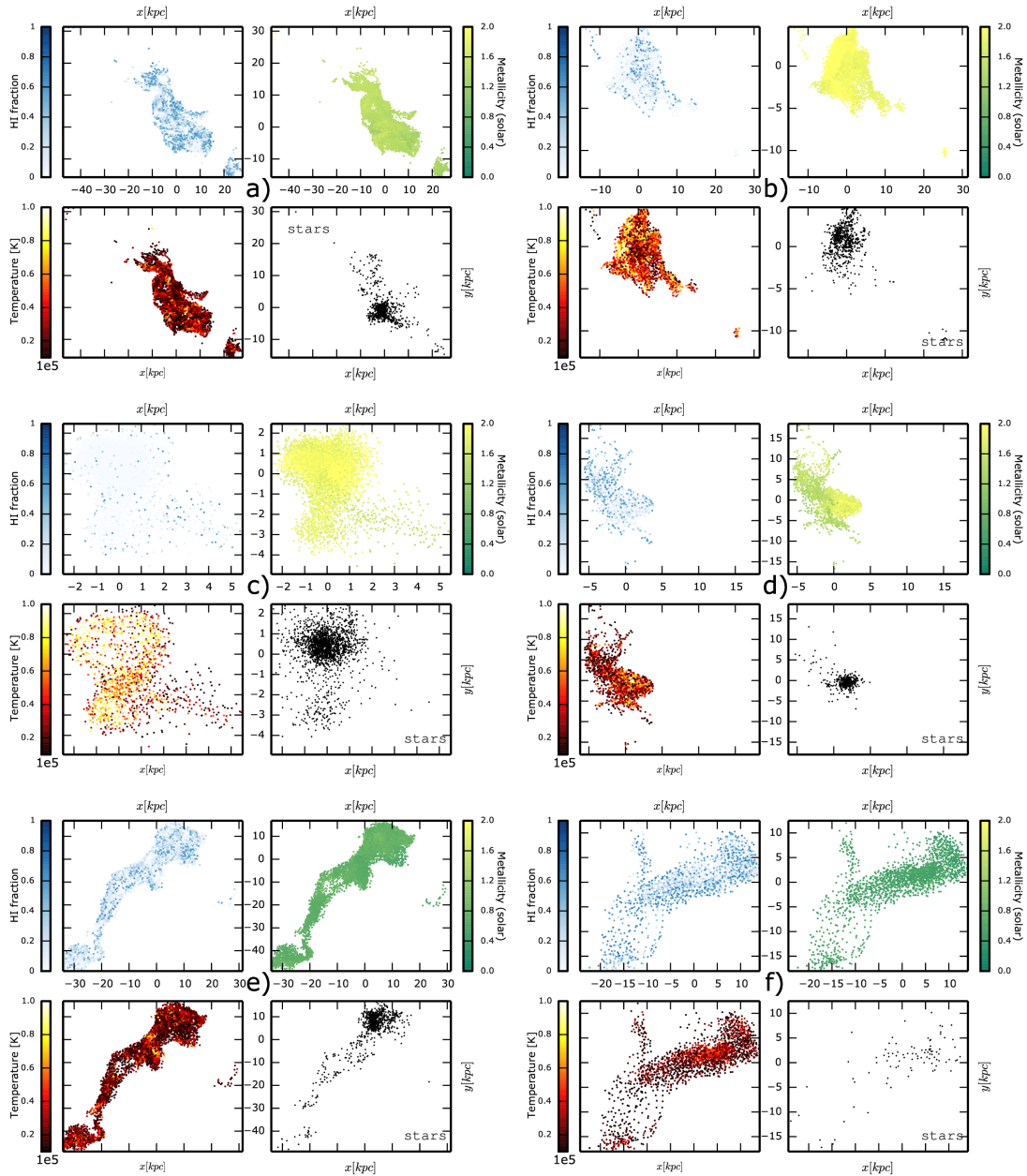
Našli smo 19 kandidata za kompaktne patuljaste galaksije iz 14 jata galaksija. Ovaj rezultat je konzistentan sa rezultatima rada Žanga i Bela (Zhang & Bell, 2017). Oni su posmatrali 17 jata galaksija i našli 45 kompaktnih patuljastih galaksija unutar radijusa od 300 Mpc i 10 kompaktnih patuljastih unutar radijusa od 50 kpc od najmasivnije galaksije u jatu.

Treba pomenuti (zbog budućeg istraživanja) da drugo najmasivnije jato u Ilustris-1 simulaciji nije dalo ni jednog kandidata za kompaktne patuljke na $z = 0$ što sugeriše da evolucija samog jata galaksija igra ulogu u formiranju populacije kompaktnih patuljastih galaksija u blizini najmasivnijih galaksija u jatu.

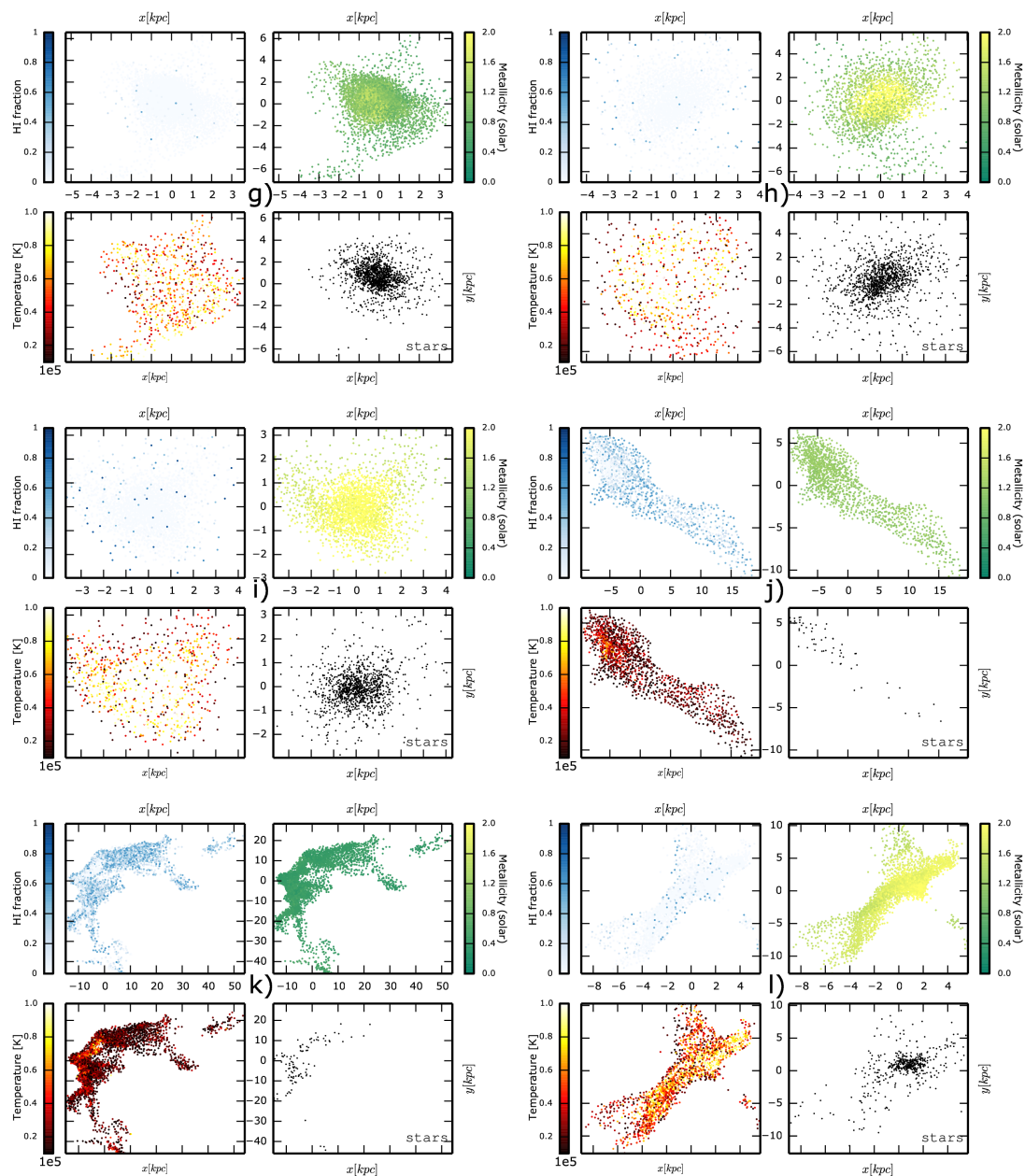
Ukupno, negde oko 30% kandidata za kompaktne patuljaste galaksije u blizini najmasivnijih galaksija u jatu je formirano plimskim ogoljavanjem galaksija koje upadaju u jato i imaju mase slične Mlečnom putu pre upada. Ostatak (oko 70%) su *in situ* formirane od strane predaka koji su više nalik patuljastim galaksijama. Ovo je najvažniji rezultat vezan za kandidate za kompaktne eliptične u ovoj disertaciji imajući u vidu da posmatranja ne mogu lako da razluče istoriju populacija galaksija koje su od interesa.

Treba na kraju primetiti, pošto gravitaciona dužina ublažavanja u Ilustris-1 simulaciji za barione na $z = 0$ iznosi 710 pc i pošto je najmanja rezolucija hidrodinamičke ćelije oko 48 pc, da to ograničava mogućnost da se nađe više kompaktnijih objekata od ovih koji su detektovani. Stoga je razumno pretpostaviti da ovi objekti predstavljaju vrh populacije kompaktnih patuljastih galaksija blizu najmasivnijih galaksija u jatu. Očekivalo bi se da se nađe više kompaktnih objekata kada se pojave buduće kosmološke simulacije sa kompletnom fizikom i većom rezolucijom mase.

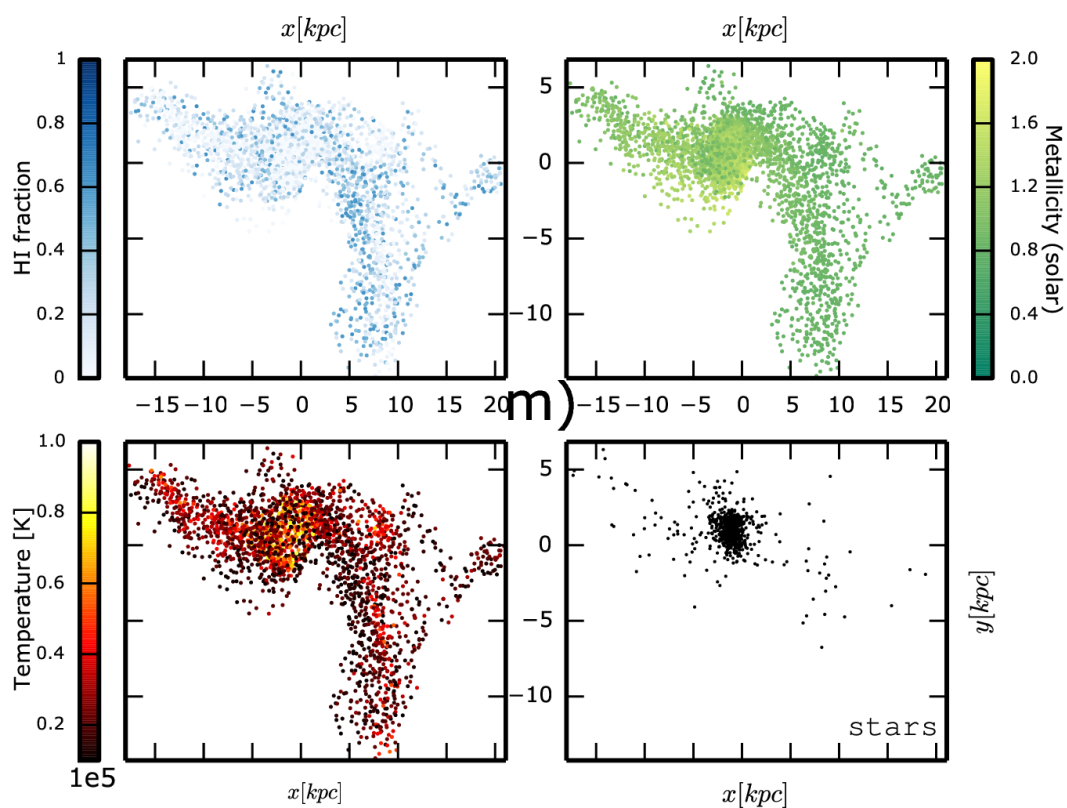
GLAVA 6. FORMIRANJE KOMPAKTNIH PATULJASTIH GALAKSIJA U JATIMA GALAKSIJA



Slika 6.6: Najstariji precu *in situ* formirane populacije. Na graficima je, za svaki, predstavljena prostorna distribucija za: rasprostranjenost HI gasa (gore levo), metaličnost gasa u solarnim jedinicama (gore desno), temperatura gasa (dole levo) i zvezdana komponenta (dole desno). Svi grafici su za najranije detektovane pretke. Oznake odgovaraju oznakama u tabelama 6.1 i 6.2.



Slika 6.7: Najstariji precu *in situ* formirane populacije (nastavak sa slike 6.6). Na graficima je, za svaki, predstavljena prostorna distribucija za: rasprostranjenost HI gasa (gore levo), metalicnost gasa u solarnim jedinicama (gore desno), temperatura gasa (dole levo) i zvezdana komponenta (dole desno). Svi grafici su za najranije detektovane pretke. Oznake odgovaraju oznakama u tabelama 6.1 i 6.2.



Slika 6.8: Najstariji preci *in situ* formirane populacije (nastavak sa slike 6.7). Na graficima je, za svaki, predstavljena prostorna distribucija za: rasprostranjenost HI gasa (gore levo), metaličnost gasa u solarnim jedinicama (gore desno), temperatura gasa (dole levo) i zvezdana komponenta (dole desno). Svi grafici su za najranije detektovane pretke. Oznake odgovaraju oznakama u tabelama 6.1 i 6.2.

Glava 7

Rezime i zaključak

7.1 Rezime

U prvom uvodnom poglavlju je pokazan značaj kosmoloških simulacija za moderna istraživanja u astrofizici i opis tehničkih procedura koje su relevantne za sve moderne kosmološke simulacije.

U drugom poglavlju su opisani rezultati prve kosmološke simulacije izvršene u Srbiji, gde je analizirano formiranje velikih struktura. Pokazano je kako se formiraju halo tamne materije koji su nosioci galaksija u svemiru i kako kosmološki model hladne tamne materije utiče na formiranje svih struktura, sa posebnim osvrtom na formiranje struktura koje predstavljaju jata galaksija. Iz dobijenih rezultata se može videti da su jata galaksija još uvek u procesu formiranja.

U trećem poglavlju su detaljnije ispitana jata galaksija identifikovana iz Ilustris-1 kosmološke simulacije, pri čemu je definitivno pokazano da su ona još uvek u procesu formiranja, pri čemu značajan broj njih još uvek nije u dinamičkoj ravnoteži. Na osnovu interakcije, jata su podeljena na interagujuća jata galaksija, jata galaksija koja interaguju sa manjim grupama i jata galaksija koja nisu u interakciji.

U četvrtom poglavlju je dat pregled poznatih tipova patuljastih galaksija, sa osvrtom na njihove definišuće karakteristike i najnovije rezultate, kako iz posmatranja, tako i iz simulacija.

U petom poglavlju je ispitan uticaj interakcije jata galaksija na rasprostranjenost različitih tipova patuljastih galaksija, gde je utvrđeno da postoji značajan uticaj na broj patuljastih nepravilnih galaksija u interagujućim jatima. Ovo bi mogao da bude značajan rezultat koji objašnjava način dopremanja tih galaksija u jata, gde nakon toga doživljavaju morfološke transformacije u druge tipove patuljastih.

U šestom poglavlju je diskutovano postojanje dva kanala formiranja kompaktnih eliptičnih galaksija u jatima galaksija na šta ukazuju rezultati analize podataka iz Ilustris-1 kosmološke simulacije. Jedan kanal je plimsko ogoljavanje masivnih spiralnih galaksija nakon njihovog upada u jato, dok je drugi formiranje unutar jata iz gustog oblaka gasa koji je formiran najverovatnije akrecijom hladnog gasa iz okoline. Ovo je značajan rezultat jer dosadašnja istraživanja nisu uključivala dovoljno detaljnu analizu koja bi omogućila izdvajanje potencijalnih procesa koji bi mogli da dovedu do formiranja kompaktnih eliptičnih galaksija.

7.2 Zaključak

Kosmološke simulacije su presudan alat u ispitivanju formiranja strukture u svemiru i u ispitivanju formiranja i evolucije galaksija. U okviru ove disertacije je predstavljena prva kosmološka simulacija u celosti izvršena u Srbiji. Analizom te kosmološke simulacije je utvrđeno da su jata galaksija još uvek u procesu formiranja.

Analizom Ilustris-1 kosmološke simulacije je dobijeno nekoliko rezultata:

- Napravljena je podela u odnosu na stepen interakcije u kome se nalaze jata

galaksija na:

- interagujuća jata;
 - jata u slaboj interakciji;
 - jata koja ne interaguju.
- Analiziran je uticaj stepena interakcije jata galaksija na rasprostranjenost različitih tipova patuljastih galaksija, pri čemu je utvrđeno:
 - da ne postoji uticaj na rasprostranjenost patuljastih eliptičnih galaksija;
 - da ne postoji uticaj na rasprostranjenost ultra difuznih galaksija. Prilikom te analize je potvrđen skorašnji rezultat koji pokazuje da se broj ultra difuznih galaksija skalira sa masom strukture;
 - utvrđeno je da postoji značajno veći broj patuljastih nepravilnih galaksija u interagujućim jatima galaksija. Pošto se smatra da one doživljavaju morfološke prelaze prilikom upada u jato u druge tipove patuljastih galaksija ovo bi moglo da da odgovor i svakako baca novo svetlo na pitanja koja se tiču evolucije patuljastih galaksija, pre svega na mehanizam dopremanja tih galaksija do jata galaksija.
 - Prvi put su identifikovana dva potencijalna kanala formiranja kompaktnih eliptičnih galaksija:
 - Jedan kanal čini plimsko ogoljavanje masivnih spiralnih galaksija;
 - Drugi kanal je formiranje unutar jata iz gustih oblaka gasa koji su najverovatnije nastali akrecijom hladnog gasa iz okoline.

Bibliografija

Abell G. O., 1965, ARA&A, 3, 1

Aguerri J. A. L., Iglesias-Páramo J., Vílchez J. M., Muñoz-Tuñón C., Sánchez-Janssen R., 2005, AJ, 130, 475

Amorín R. O., Muñoz-Tuñón C., Aguerri J. A. L., Cairós L. M., Caon N., 2007, A&A, 467, 541

Amorisco N. C., Loeb A., 2016, MNRAS, 459, L51

Angulo R. E., Lacey C. G., Baugh C. M., Frenk C. S., 2009, MNRAS, 399, 983

Angulo R. E., Springel V., White S. D. M., Jenkins A., Baugh C. M., Frenk C. S., 2012, MNRAS, 426, 2046

Angulo R. E., Hahn O., Abel T., 2013, MNRAS, 434, 3337

Baade W., 1944, ApJ, 100, 147

Bahcall N. A., 1977, ARA&A, 15, 505

Barnes J., Hut P., 1986, Nature, 324, 446

Bautz L. P., Morgan W. W., 1970, ApJL, 162, L149

Beasley M. A., Trujillo I., 2016, ApJ, 830, 23

- Bechtol K., et al., 2015, *ApJ*, 807, 50
- Behroozi P. S., Wechsler R. H., Wu H.-Y., 2013a, *ApJ*, 762, 109
- Behroozi P. S., Wechsler R. H., Wu H.-Y., Busha M. T., Klypin A. A., Primack J. R., 2013b, *ApJ*, 763, 18
- Bekki K., Couch W. J., Drinkwater M. J., Gregg M. D., 2001, *ApJL*, 557, L39
- Bekki K., Couch W. J., Drinkwater M. J., Shioya Y., 2003, *MNRAS*, 344, 399
- Belokurov V., et al., 2007, *ApJ*, 654, 897
- Bertin G., 2014, *Dynamics of Galaxies*
- Binggeli B., Sandage A., Tammann G. A., 1985, *AJ*, 90, 1681
- Binggeli B., Tammann G. A., Sandage A., 1987, *AJ*, 94, 251
- Binney J., Tremaine S., 2008, *Galactic Dynamics: Second Edition*. Princeton University Press
- Bond J. R., Kofman L., Pogosyan D., 1996, *Nature*, 380, 603
- Bridge C. R., Carlberg R. G., Sullivan M., 2010, *ApJ*, 709, 1067
- Bryan G. L., Norman M. L., 1998, *ApJ*, 495, 80
- Burkey J. M., Keel W. C., Windhorst R. A., Franklin B. E., 1994, *ApJL*, 429, L13
- Buta R. J., 2013, *Galaxy Morphology*. p. 155
- Cairós L. M., Vílchez J. M., González Pérez J. N., Iglesias-Páramo J., Caon N., 2001, *ApJS*, 133, 321
- Chilingarian I. V., Mamon G. A., 2008, *MNRAS*, 385, L83

- Chilingarian I., Cayatte V., Chemin L., Durret F., Laganá T. F., Adami C., Slezak E., 2007, *A&A*, 466, L21
- Choi P. I., Guhathakurta P., Johnston K. V., 2002, *AJ*, 124, 310
- Colín P., Avila-Reese V., Valenzuela O., 2000, *ApJ*, 542, 622
- Cooray A., Sheth R., 2002, *PhR*, 372, 1
- Côté P., et al., 2006, *ApJS*, 165, 57
- Crocce M., Pueblas S., Scoccimarro R., 2006, *MNRAS*, 373, 369
- Dabringhausen J., Hilker M., Kroupa P., 2008, *MNRAS*, 386, 864
- Davies J. I., Phillipps S., 1988, *MNRAS*, 233, 553
- Davis M., Efstathiou G., Frenk C. S., White S. D. M., 1985, *ApJ*, 292, 371
- Dehnen W., Read J. I., 2011, *European Physical Journal Plus*, 126, 55
- Dekel A., Silk J., 1986, *ApJ*, 303, 39
- Di Cintio A., Brook C. B., Dutton A. A., Macciò A. V., Obreja A., Dekel A., 2017, *MNRAS*, 466, L1
- Dodelson S., 2003, *Modern cosmology*
- Donahue M., et al., 2016, *ApJ*, 819, 36
- Drinkwater M. J., Currie M. J., Young C. K., Hardy E., Yearsley J. M., 1996, *MNRAS*, 279, 595
- Drinkwater M. J., Phillipps S., Jones J. B., 1999, in Davies J. I., Impey C., Phillipps S., eds, *Astronomical Society of the Pacific Conference Series Vol. 170, The Low Surface Brightness Universe*. p. 120 ([arXiv:astro-ph/9810295](https://arxiv.org/abs/astro-ph/9810295))

- Drinkwater M. J., Jones J. B., Gregg M. D., Phillipps S., 2000a, *PASA*, 17, 227
- Drinkwater M. J., et al., 2000b, *A&A*, 355, 900
- Drinkwater M. J., Gregg M. D., Hilker M., Bekki K., Couch W. J., Ferguson H. C., Jones J. B., Phillipps S., 2003, *Nature*, 423, 519
- Drinkwater M. J., Gregg M. D., Couch W. J., Ferguson H. C., Hilker M., Jones J. B., Karick A., Phillipps S., 2004, *PASA*, 21, 375
- Durret F., Lima Neto G. B., Forman W., 2005, *A&A*, 432, 809
- Efstathiou G., Davis M., White S. D. M., Frenk C. S., 1985, *ApJS*, 57, 241
- Faber S. M., 1973, *ApJ*, 179, 423
- Faber S. M., Lin D. N. C., 1983, *ApJL*, 266, L17
- Fakhouri O., Ma C.-P., 2008, *MNRAS*, 386, 577
- Fakhouri O., Ma C.-P., Boylan-Kolchin M., 2010, *MNRAS*, 406, 2267
- Fellhauer M., Kroupa P., 2002, *MNRAS*, 330, 642
- Ferguson H. C., Binggeli B., 1994, *A&A Rv*, 6, 67
- Ferrara A., Tolstoy E., 2000, *MNRAS*, 313, 291
- Genel S., 2016, *ApJ*, 822, 107
- Genel S., Genzel R., Bouché N., Naab T., Sternberg A., 2009, *ApJ*, 701, 2002
- Gil de Paz A., Madore B. F., Pevunova O., 2003, *ApJS*, 147, 29
- Gilmore G., Wilkinson M. I., Wyse R. F. G., Kleyna J. T., Koch A., Evans N. W., Grebel E. K., 2007, *ApJ*, 663, 948

- Gottlöber S., Klypin A., Kravtsov A. V., 2001, *ApJ*, 546, 223
- Graham A. W., Guzmán R., 2003, *AJ*, 125, 2936
- Harker G., Cole S., Helly J., Frenk C., Jenkins A., 2006, *MNRAS*, 367, 1039
- Heitmann K., Lukić Z., Habib S., Ricker P. M., 2006, *ApJL*, 642, L85
- Hensler G., 2012, *Astrophysics and Space Science Proceedings*, 28, 75
- Holmberg E., 1941, *ApJ*, 94, 385
- Hopkins P. F., et al., 2010, *ApJ*, 724, 915
- Hubble E. P., 1926, *ApJ*, 64
- Hubble E. P., 1936, *Realm of the Nebulae*
- Hwang H. S., Lee M. G., 2007, *ApJ*, 662, 236
- Ibata R. A., Gilmore G., Irwin M. J., 1994, *Nature*, 370, 194
- Impey C., Bothun G., Malin D., 1988, *ApJ*, 330, 634
- James P. A., 1994, *MNRAS*, 269, 176
- Jeans J. H., 1928, *Astronomy and cosmogony*
- Jenkins A., Frenk C. S., White S. D. M., Colberg J. M., Cole S., Evrard A. E.,
Couchman H. M. P., Yoshida N., 2001, *MNRAS*, 321, 372
- Jones J. B., et al., 2006, *AJ*, 131, 312
- Kacprzak G. G., et al., 2016, *ApJL*, 826, L11
- Kafle P. R., Sharma S., Lewis G. F., Bland-Hawthorn J., 2014, *ApJ*, 794, 59
- Kauffmann G., Haehnelt M., 2000, *MNRAS*, 311, 576

- Kauffmann G., Colberg J. M., Diaferio A., White S. D. M., 1999, *MNRAS*, 307, 529
- Kereš D., Katz N., Weinberg D. H., Davé R., 2005, *MNRAS*, 363, 2
- Klimentowski J., Łokas E. L., Kazantzidis S., Mayer L., Mamon G. A., 2009, *MNRAS*, 397, 2015
- Koda J., Yagi M., Yamanoi H., Komiyama Y., 2015, *ApJL*, 807, L2
- Kormendy J., 1985, *ApJ*, 295, 73
- Kormendy J., Bender R., 2012, *ApJS*, 198, 2
- Kormendy J., Fisher D. B., Cornell M. E., Bender R., 2009, *ApJS*, 182, 216
- Kravtsov A. V., Borgani S., 2012, *ARA&A*, 50, 353
- Kunth D., Östlin G., 2000, *A&A Rv*, 10, 1
- Lacey C., Cole S., 1993, *MNRAS*, 262, 627
- Le Fèvre O., et al., 2000, *MNRAS*, 311, 565
- Lee M. G., Kang J., Lee J. H., Jang I. S., 2017, preprint, ([arXiv:1706.02521](https://arxiv.org/abs/1706.02521))
- Lisker T., Weinmann S. M., Janz J., Meyer H. T., 2013, *MNRAS*, 432, 1162
- Loose H.-H., Thuan T. X., 1986, *ApJ*, 309, 59
- Lukic Z., 2008, PhD thesis, University of Illinois at Urbana-Champaign
- Lukić Z., Heitmann K., Habib S., Bashinsky S., Ricker P. M., 2007, *ApJ*, 671, 1160
- Manolopoulou M., Plionis M., 2017, *MNRAS*, 465, 2616
- Marcolini A., Brighenti F., D’Ercole A., 2003, *MNRAS*, 345, 1329

- Martin N. F., Ibata R. A., Chapman S. C., Irwin M., Lewis G. F., 2007, *MNRAS*, 380, 281
- Martinović N., 2015, *Serbian Astronomical Journal*, 190, 11
- Martinović N., Micic M., 2017, *MNRAS*, 470, 4015
- Mateo M., 1998, in Richtler T., Braun J. M., eds, *Magellanic Clouds and Other Dwarf Galaxies*. pp 53–66
- Matteucci F., 2012, *Chemical Evolution of Galaxies*, doi:10.1007/978-3-642-22491-1.
- Mayer L., Governato F., Colpi M., Moore B., Quinn T., Wadsley J., Stadel J., Lake G., 2001, *ApJL*, 547, L123
- Mayer L., Kazantzidis S., Mastropietro C., Wadsley J., 2007, *Nature*, 445, 738
- McBride C., Berlind A., Scocimarro R., Wechsler R., Busha M., Gardner J., van den Bosch F., 2009, in *American Astronomical Society Meeting Abstracts #213*. p. 253
- McMillan P. J., 2017, *MNRAS*, 465, 76
- Meyer H. T., Lisker T., Janz J., Papaderos P., 2014, *A&A*, 562, A49
- Mieske S., Kroupa P., 2008, *ApJ*, 677, 276
- Mieske S., Hilker M., Infante L., 2002, *A&A*, 383, 823
- Mieske S., et al., 2004, *AJ*, 128, 1529
- Mieske S., Infante L., Hilker M., Hertling G., Blakeslee J. P., Benítez N., Ford H., Zekser K., 2005, *A&A*, 430, L25

- Misgeld I., Mieske S., Hilker M., Richtler T., Georgiev I. Y., Schubert Y., 2011, A&A, 531, A4
- Mistani P. A., et al., 2016, MNRAS, 455, 2323
- Mo H., van den Bosch F. C., White S., 2010, Galaxy Formation and Evolution
- Moore B., Katz N., Lake G., Dressler A., Oemler A., 1996, Nature, 379, 613
- Morgan W. W., 1961, Proceedings of the National Academy of Science, 47, 905
- Mori M., Burkert A., 2000, ApJ, 538, 559
- Murray S. G., Power C., Robotham A. S. G., 2013, Astronomy and Computing, 3, 23
- Nagashima M., Yoshii Y., 2004, ApJ, 610, 23
- Nelson D., et al., 2015, Astronomy and Computing, 13, 12
- Nipoti C., Binney J., 2004, MNRAS, 349, 1509
- Norris M. A., et al., 2014, MNRAS, 443, 1151
- Patton D. R., et al., 2002, ApJ, 565, 208
- Paul S., John R. S., Gupta P., Kumar H., 2017, preprint, ([arXiv:1706.01916](https://arxiv.org/abs/1706.01916))
- Peebles P. J. E., 1965, ApJ, 142, 1317
- Penny S. J., Forbes D. A., Conselice C. J., 2012, MNRAS, 422, 885
- Penny S. J., Forbes D. A., Strader J., Usher C., Brodie J. P., Romanowsky A. J., 2014, MNRAS, 439, 3808
- Percival W. J., 2001, MNRAS, 327, 1313

- Press W. H., Schechter P., 1974, *ApJ*, 187, 425
- Price J., et al., 2009, *MNRAS*, 397, 1816
- Prugniel P., Chilingarian I., Sil'Chenko O., Afanasiev V., 2005, in Jerjen H., Binggeli B., eds, *IAU Colloq. 198: Near-fields cosmology with dwarf elliptical galaxies*. pp 73–76 ([arXiv:astro-ph/0510398](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0510398)), doi:10.1017/S1743921305003510
- Recchi S., Hensler G., 2007, *A&A*, 476, 841
- Rodriguez-Gomez V., et al., 2015, *MNRAS*, 449, 49
- Roediger J. C., Courteau S., MacArthur L. A., McDonald M., 2011, *MNRAS*, 416, 1996
- Ryden B., 2003, *Introduction to cosmology*
- Sales L. V., et al., 2017, *MNRAS*, 464, 2419
- Sandage A., Binggeli B., 1984, *AJ*, 89, 919
- Sarazin C. L., 2003, *Physics of Plasmas*, 10, 1992
- Saro A., Mohr J. J., Bazin G., Dolag K., 2013, *ApJ*, 772, 47
- Schombert J. M., Pildis R. A., Eder J. A., Oemler Jr. A., 1995, *AJ*, 110, 2067
- Searle L., Sargent W. L. W., Bagnuolo W. G., 1973, *ApJ*, 179, 427
- Seljak U., Zaldarriaga M., 1996, *ApJ*, 469, 437
- Sérsic J. L., 1963, *Boletin de la Asociacion Argentina de Astronomia La Plata Argentina*, 6, 41
- Shapley H., 1938, *Nature*, 142, 715
- Sheth R. K., Mo H. J., Tormen G., 2001, *MNRAS*, 323, 1

- Silk J., 1968, *ApJ*, 151, 459
- Sparke L. S., Gallagher III J. S., 2007, *Galaxies in the Universe: An Introduction*.
Cambridge University Press
- Springel V., 2005, *MNRAS*, 364, 1105
- Springel V., White S. D. M., Tormen G., Kauffmann G., 2001, *MNRAS*, 328, 726
- Strigari L. E., Koushiappas S. M., Bullock J. S., Kaplinghat M., Simon J. D., Geha
M., Willman B., 2008, *ApJ*, 678, 614
- Thuan T. X., Martin G. E., 1981, *ApJ*, 247, 823
- Tinker J., Kravtsov A. V., Klypin A., Abazajian K., Warren M., Yepes G., Got-
tlöber S., Holz D. E., 2008, *ApJ*, 688, 709
- Trentham N., Tully R. B., 2002, *MNRAS*, 335, 712
- Vaduvescu O., Richer M. G., McCall M. L., 2006, *AJ*, 131, 1318
- Vogelsberger M., Genel S., Sijacki D., Torrey P., Springel V., Hernquist L., 2013,
MNRAS, 436, 3031
- Vogelsberger M., et al., 2014, *MNRAS*, 444, 1518
- Vučetić M., Arbutina B., Pavlovic M. Z., Ciprijanovic A., Urosevic D., Petrov N.,
Onić D., Trcka A., 2016, in *Supernova Remnants: An Odyssey in Space after
Stellar Death*. p. 34
- Warren M. S., Abazajian K., Holz D. E., Teodoro L., 2006, *ApJ*, 646, 881
- Wehner E. H., Harris W. E., 2006, *ApJL*, 644, L17
- Weinmann S. M., Lisker T., Guo Q., Meyer H. T., Janz J., 2011, *MNRAS*, 416,
1197

- Wellons S., et al., 2015, MNRAS, 449, 361
- Wellons S., et al., 2016, MNRAS, 456, 1030
- White S. D. M., 1994, ArXiv Astrophysics e-prints,
- White S. D. M., Rees M. J., 1978, MNRAS, 183, 341
- Willman B., et al., 2005, AJ, 129, 2692
- Yıldırım A., van den Bosch R. C. E., van de Ven G., Martín-Navarro I., Walsh J. L., Husemann B., Gültekin K., Gebhardt K., 2017, MNRAS, 468, 4216
- Zel'dovich Y. B., 1970, A&A, 5, 84
- Zhang Y., Bell E. F., 2017, ApJL, 835, L2
- Zwicky F., Zwicky M. A., 1971, Catalogue of selected compact galaxies and of post-eruptive galaxies
- Zwicky F., Herzog E., Wild P., Karpowicz M., Kowal C. T., 1961, Catalogue of galaxies and of clusters of galaxies, Vol. I
- de Vaucouleurs G., 1948, Annales d'Astrophysique, 11, 247
- van Dokkum P. G., Abraham R., Merritt A., Zhang J., Geha M., Conroy C., 2015, ApJL, 798, L45
- van Dokkum P., et al., 2016, ApJL, 828, L6
- van der Burg R. F. J., et al., 2017, preprint, ([arXiv:1706.02704](https://arxiv.org/abs/1706.02704))

Biografija autora

Nemanja Martinović (je rođen 23. novembra 1982. godine u Beogradu. Završio je Prvu beogradsku gimnaziju 2001. godine i iste godine je upisao smer Teorijska i eksperimentalna fizika na Fizičkom fakultetu Univerziteta u Beogradu. Na smer Astrofizika na Matematičkom fakultetu Univerziteta u Beogradu se prebacio 2005. godine i diplomirao na istom u oktobru 2010. godine sa prosečnom ocenom 8.88. U novembru 2010. godine upisao doktorske studije na Matematičkom fakultetu. Položio je sve ispite predviđene planom i programom doktorskih studija sa prosečnom ocenom 9.88.

Zaposlen je na Astronomskoj opservatoriji od februara 2011. godine i trenutno ima zvanje istraživač-saradnik. Dugogodišnji je stručni saradnik Istraživačke stanice „Petnica”.

Bio je predavač u okviru međunarodne „Letnje škole kosmologije“ održane u Petnici, 2013. godine. U saradnji sa Centrom za promociju nauke i Domom omladine Beograda organizovao je manifestaciju „Astro vikend - Vikend astrobiologije” decembra 2013. godine. Učesnik preko 15 naučnih konferencija iz oblasti astrofizike. Pored toga je učesnik manifestacije Noć istraživača, održao je više javnih, naučno-popularnih predavanja, autor nekoliko naučno-popularnih tekstova i učestvovao je u popularizaciji nauke u više emisija (TV, radio). Od 2011. je angažovan na projektu 176021 – „Vidljiva i nevidljiva materija u bliskim galaksijama: teorija i posmatranja“.

Koautor je četiri naučna rada objavljena u vrhunskim međunarodnim časopisima (Monthly Notices of the Royal Astronomical Society), dva rada objavljena u međunarodnom časopisu (Serbian Astronomical Journal), i nekolicine radova objavljenih u zbornicima radova sa konferencija. Dva od navedenih radova su direktno vezani za ovu disertaciju.

Прилог 1.

Изјава о ауторству

Потписани-а Немања Мартиновић

број индекса АФ 2002/2010

Изјављујем

да је докторска дисертација под насловом

ЕВОЛУЦИЈА ПАТУЉАСТИХ ГАЛАКСИЈА У
ЈАТИМА ГАЛАКСИЈА МАЛЕ МАСЕ

- резултат сопственог истраживачког рада,
- да предложена дисертација у целини ни у деловима није била предложена за добијање било које дипломе према студијским програмима других високошколских установа,
- да су резултати коректно наведени и
- да нисам кршио/ла ауторска права и користио интелектуалну својину других лица.

Потпис докторанда

У Београду, 26.07.2017.



Прилог 2.

Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада

Име и презиме аутора Немања Мартиновић
Број индекса АФ 2002/2010
Студијски програм АСТРОНОМИЈА И АСТРОФИЗИКА
Наслов рада ЕВОЛУЦИЈА ПАТУЊАСТИХ ГАЛАКСИЈА У ЈАТИМА ГАЛАКСИЈА МАЛЕ МАСЕ
Ментор Др МИРОСЛАВ Митић

Потписани/а Немања Мартиновић

Изјављујем да је штампана верзија мог докторског рада истоветна електронској верзији коју сам предао/ла за објављивање на порталу **Дигиталног репозиторијума Универзитета у Београду**.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци везани за добијање академског звања доктора наука, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране рада.

Ови лични подаци могу се објавити на мрежним страницама дигиталне библиотеке, у електронском каталогу и у публикацијама Универзитета у Београду.

Потпис докторанда

У Београду, 26.07.2017.



Прилог 3.

Изјава о коришћењу

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Светозар Марковић“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду унесе моју докторску дисертацију под насловом:

ЕВОЛУЦИЈА ПЛУМБАСТИХ ГАЛАКСИЈА У
ЈАТИМА ГАЛАКСИЈА МАЛЕ МАСЕ

која је моје ауторско дело.

Дисертацију са свим прилозима предао/ла сам у електронском формату погодном за трајно архивирање.

Моју докторску дисертацију похрањену у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду могу да користе сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons) за коју сам се одлучио/ла.

1. Ауторство
2. Ауторство - некомерцијално
3. Ауторство – некомерцијално – без прераде
4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима
5. Ауторство – без прераде
6. Ауторство – делити под истим условима

(Молимо да заокружите само једну од шест понуђених лиценци, кратак опис лиценци дат је на полеђини листа).

Потпис докторанда

У Београду, 26.07.2017.