

UNIVERZITET U BEOGRADU
MATEMATIČKI FAKULTET

Stanislav Milošević

**Numeričke simulacije sudara galaksija i
nastanka morfoloških podstruktura**

doktorska disertacija

Beograd, 2023.

UNIVERSITY OF BELGRADE
FACULTY OF MATHEMATICS

Stanislav Milošević

**Numerical Simulations of galaxy mergers and
morphological substructures formation**

Doctoral Dissertation

Belgrade, 2023.

Mentor, član komisije

dr Miroslav Mićić

viši naučni saradnik

Astronomska opservatorija u Beogradu

Član komisije

dr Branislav Vukotić

naučni savetnik

Astronomska opservatorija u Beogradu

Član komisije

dr Dragana Ilić

vanredni profesor

Univerzitet u Beogradu

Matematički fakultet

Datum odbrane: _____

Zahvalnica

Hteo bih da se zahvalim svom mentoru dr Miroslavu Mićiću na pomoći i savetima pri izradi doktorske disertacije, kao i na vođenju kroz istraživanje i uputama i diskusijama koje su bile dragocene tokom istraživačkog rada.

Zahvalnost dugujem dr Dragani Ilić, sa kojom sam diskutovao rezultate disertacije i koja je značajno uticala na kvalitet teksta. Pored velike pomoći na izradi ove disertacije, dr Dragana Ilić mi je pružila veliku pomoć i podršku u radu na Katedri za astronomiju. Zahvaljujem i dr Branislavu Vukotiću koji je dao korisne komentare i savete i doprineo da sam tekst disertacije bude čitljiviji, a sa kojim sam često diskutovao teme iz oblasti evolucije galaksija.

Moje kolege sa Katedre za astronomiju su doprinele da u jednoj prijatnoj, radnoj i kolegijalnoj atmosferi, pored nastavnih obaveza, radim i istraživački rad koji je prethodio izradi ove disertacije. Posebno bih se zahvalio kolegama dr Dejanu Uroševiću, dr Bojanu Arbutini i dr Milici Vučetić na pružanju prilike da se bavim i posmatračkom astronomijom.

Istakao bih i zajednički rad s kolegama i koleginicama iz Petnice, pre svega sa dr Ivanom Milićem, dr Markom Simonovićem, dr Vladisavom Jelisavčićem, dr Andrejem Obuljenom, Lazarom Živadinovićem, Jovanom Petrović, Petrom Kostićem, Dušanom Vukadinovićem, Andrijom Kostićem, Stevanom Golubovićem. Posebno bih istakao kolegu dr Nemanju Martinovića koji mi je dosta pomogao sa upoznavanjem oblasti galaktičke dinamike. Zajednički posao u razvoju petničkog programa sam radio i sa koleginicama Nikolinom Milanović i Sanjom Mihajlović, kao i sa kolegicom Deborom Pavelom, sa kojom smo dosta diskutovali o numeričkim rešenjima astrofizičkih problema.

Posebno bih izdvojio kolege i prijatelje Mateju Boškovića i Dušana Pavlovića, sa kojima sam zajedno radio dug niz godina u Petnici.

Sve ove godine, vreme provedeno sa mojim prijateljima Ilijom, Neletom, Piksijem, Milicom, Dušanom, Ukijem, Čedom, Saletom i mnogim drugima, bilo je ispunjeno pričom o muzici, knjigama, fudbalu, politici, zatim koncertima, utakmicama, zajedničkim putovanjima. Studentske dane sam započeo sa Šomijem, Rusom, Komšom, Cirom, Zlajom, Ugijem, Koraćem, Tanjom, Bukijem i evo, posle ne tako malo godina, nastavljamo i dalje.

Zahvalio bih se sestri Jeleni i svojim roditeljima, Gordani i Ranku, koji su uvek uz mene i bez čije podrške ništa ne bi bilo.

Numeričke simulacije sudara galaksija i nastanka morfoloških podstruktura

Sažetak

U ovoj disertaciji predstavljeno je formiranje struktura usled sudara dve galaksije, pri čemu je jedna galaksija velika spiralna galaksija, a druga patuljasta galaksija koja je njen satelit. Pomoću simulacija N-tela predstavljeni su različiti scenariji sudara dve galaksije i nakon toga analiza osobina dobijenih struktura. Poznavanje osobina nastalih struktura i načina njihovog formiranja od velikog je značaja za razumevanje dinamike i evolucije galaksija.

Najpre su izvršene simulacije u kojima je ispitan uticaj osobina patuljaste galaksije na formiranje struktura u sudarima. Testirani su: 1. morfologija patuljaste galaksije, gde su korišćeni modeli sferoidne patuljaste i patuljaste sa diskom, za istu masu; 2. inklinacija orbite kod sudara koji su gotovo radijalni, jer se u takvim sudarima formiraju zvezdane ljuske; 3. smer rotacije patuljaste sa diskom u odnosu na disk velike spiralne galaksije. Dobili smo da se u svim slučajevima nakon sudara javljaju strukture kao što su zvezdani tokovi i ljuske. Morfologija, smer rotacije i upadni ugao patuljaste galaksije imaju uticaj na osobine nastalih podstruktura, kao i na vremenski interval raspada ostatka galaksije.

U slučaju sudara Andromede (M31) i patuljaste galaksije koja je njen satelit, ispitali smo osobine Velikog zvezdanog toka (eng. *Giant Stellar Stream*, GSS), kao i Severoistočne (eng. *Northeast shelf*, NE) i Zapadne (eng. *Western shelf*, W) zvezdane ljuske. Orijentacija GSS, daljine i brzine GSS i NE i W ljuski iz naše simulacije su u skladu sa posmatranjima. Prvi put je objašnjena posmatrana raspodela metaličnosti u ovim strukturama. Pomoću linearno opadajućeg gradijenta inicijalne metaličnosti u patuljastoj galaksiji, koristeći Monte Karlo (MC) simulacije, uspešno smo objasnili posmatranu raspodelu metaličnosti u ovim strukturama. Ovaj rezultat je doprinos poznavanju raspodele metaličnosti u patuljastim galaksijama, što je značajno za proučavanje evolucije galaksija uopšte.

Ključne reči: sudari galaksija, simulacije N-tela, patuljaste galaksije, zvezdani tokovi i ljuske, gradijent metaličnosti

Naučna oblast: Astronomija

Uža naučna oblast: Vangalaktička astronomija

Numerical Simulations of galaxy mergers and morphological substructures formation

Abstract

In this dissertation, we presented galaxy mergers and the forming of stellar morphological substructures. We assume a large spiral galaxy and dwarf galaxy which is a satellite of the first one. We used N-body simulations to present different scenarios for the merger of two galaxies, and after that, we analyzed the properties of formed structures. The investigation of the formation of these structures and their properties is important for understanding the dynamics and evolution of galaxies.

First, we did simulations where we investigated the influence of the properties of dwarf galaxies on the forming structures. We tested: 1. morphology of the dwarf galaxy where we used two models – dwarf with a disk and spheroidal dwarf galaxy; 2. inclination of the orbit in the case of a very radial merger, because in that case, we have the formation of the stellar shells and streams; 3. direction of rotation of the dwarf in the case of a dwarf with a disk. In each case, after the merger, we have stellar shells and streams formed. Morphology, inclination of the orbit, and direction of rotation have their influence on the properties of formed substructures, and on the timescale of disruption of the remnant of the dwarf.

In the case of the merger of Andromeda galaxy (M31) and dwarf galaxy, the satellite of M31, we investigate the properties of the Giant Stellar Stream (GSS), as well as the Northeast shell (NE) and West shell (W). The orientation of the GSS, distances, and velocities of the GSS, NE, and W shells from our simulation are in agreement with the observed one. For the first time, we explained the observed metallicity distribution in these substructures. With a linearly decreasing gradient of the initial metallicity in the dwarf galaxy before the merger, using Monte Carlo (MC) simulations, we successfully explained the observed metallicity distribution in these substructures. These results are a contribution to the investigation of metallicity gradients in dwarf galaxies which is important for galaxy evolution in general.

Keywords: galaxy mergers, N-body simulations, dwarf galaxies, stellar streams, and shells, metallicity gradient

Scientific field: Astronomy

Scientific subfield: Extragalactic astronomy

Sadržaj

1	Uvod	1
1.1	Morfološki tipovi i osobine galaksija	2
1.1.1	Spiralne galaksije	4
1.1.2	Eliptične galaksije	6
1.1.3	Patuljaste galaksije	7
1.2	Stabilnost galaksija i teorema virijala	9
1.2.1	Teorema virijala	10
1.2.2	Bolcmanova i Džinsova jednačina	13
1.3	Hijerarhijsko formiranje galaksija	16
1.4	Sudari galaksija i plimske strukture	18
1.5	Veliki zvezdani tok i zvezdane ljuske u halou galaksije M31	21
1.5.1	Veliki zvezdani tok (GSS)	21
1.5.2	Metaličnost Velikog zvezdanog toka	29
1.5.3	NE i W zvezdane ljuske	33
1.6	Ciljevi doktorske disertacije	35
2	Modeli galaksija u sudaru	37
2.1	Model spiralne galaksije	38
2.2	Model patuljaste galaksije	40
2.3	Parametri sudara	42
2.4	Simulacije N-tela pomoću Gadget2 koda	43
3	Simulacije sudara spiralne i patuljaste galaksije	46
3.1	Rezultati simulacija i formirane strukture	46
3.2	Rezime nastanka podstruktura u halou spiralne galaksije	55
4	Simulacije formiranja i metaličnost Velikog zvezdanog toka	57
4.1	Dinamika i morfologija Velikog zvezdanog toka.	57
4.1.1	Orijentacija Velikog zvezdanog toka	58
4.1.2	Udaljenosti i brzine duž Velikog zvezdanog toka	59
4.2	Metaličnost Velikog zvezdanog toka: rezultati Monte Karlo simulacija	63
4.2.1	Početna raspodela metaličnosti u patuljastoj galaksiji	65
4.2.2	Finalna raspodela metaličnosti u Velikom zvezdanom toku	70
4.2.3	Pikovi u raspodeli metaličnosti	78
4.3	Rezime nastanka Velikog zvezdanog toka i raspodele metaličnosti	82

5	Simulacije formiranja i metaličnost NE i W zvezdane ljuske	85
5.1	Početna raspodela metaličnosti	85
5.2	Rezultati	85
5.2.1	Morfologija i kinematika NE i W zvezdane ljuske	86
5.2.2	Finalna raspodela metaličnosti u NE i W zvezdanim ljuskama . . .	91
5.3	Rezime formiranja zvezdanih ljuski u halou M31 i raspodele metaličnosti u njima	94
6	Rezime i zaključak	96

1 Uvod

Vangalaktička astronomija je relativno mlada grana astronomije koja se bavi proučavanjem osobina objekata van naše Galaksije, odnosno fizičkih osobina drugih galaksija i struktura na velikoj skali. Početkom XX veka još nismo znali da li postoje drugi zvezdani sistemi osim naše Galaksije, prema tome dvadesete godine prošlog veka možemo da uzmemo kao početak razvoja vangalaktičke astronomije i kosmologije.

U toj dekadi desilo se nekoliko značajnih proboja kada je u pitanju znanje o Univerzumu van Mlečnog puta. Harlou Šepi i Heber Kertis su u aprilu 1920. vodili debatu o tome (*The Great debate*) da li je velika spiralna maglina u sazvežđu Andromede u našoj Galaksiji ili van nje, odnosno da li je u pitanju maglina gasa i prašine koja je deo Mlečnog puta, ili je zasebna udaljena galaksija. Broj novih (lat. *novae*) u okviru magline, kao i vrednosti radijalnih brzina su bili argumenti da se ipak radi o posebnoj galaksiji, jer je bilo teško objasniti kako su delovi magline koji imaju velike radijalne brzine gravitaciono vezani za naš zvezdani sistem, sudeći po Keptejnovom modelu univerzuma. Tek posmatranjima Edvina Habla, potvrđeno je da je galaksija M31 ipak posebna galaksija, čija je udaljenost znatno veća od dimenzije Mlečnog puta. Hابل je posmatrao promenljive zvezde - Cefeide u galaksiji M31 i iz promene njihovog sjaja odredio udaljenost. Osnovni problem je bio nepoznavanje skala udaljenosti u Univerzumu. Nakon toga, posmatran je veliki broj drugih galaksija i iz tih posmatranja dobijeni su podaci o njihovim veličinama, oblicima, masama, bojama, hemijskom sastavu, kretanju, grupisanju, međusobnoj interakciji.

Galaksije predstavljaju osnovne gradivne jedinice Univerzuma. Prema hijerarhijskom modelu (npr. White & Rees, 1978) velike galaksije, kao što je naša, nastaju sudarima galaksija manjih masa. Interakcije galaksija su veoma važne za njihovu evoluciju. Sudarima i bliskim prolazima dolazi do morfoloških promena same galaksije, ali i uticaja na dinamiku gasa, te formiranje novih zvezda i promenu fizičkih osobina galaksije.

U našem galaktičkom okruženju, Lokalnoj grupi, najveće galaksije su Andromeda (M31) i Mlečni put. Pored te dve galaksije, Lokalna grupa sadrži i pedesetak manjih galaksija, od kojih su neke sateliti Mlečnog puta i M31. Generalno, sudarima velikih galaksija i manjih galaksija koje su njihovi sateliti, nastaju strukture u haloima velikih galaksija koje vidimo u posmatranjima. Osobine ovih struktura zavise od osobina galaksija u sudaru i samog sudarnog scenarija. Ispitujući sudarni scenario, možemo da dođemo do informacija o osobinama galaksija pre sudara, a one su određene i prethodnom evolucijom samih galaksija, koja je uslovljena i globalnim kosmološkim parametrima. Iz tog razloga, proučavanje sudara galaksija u lokalnom Univerzumu, važno je kako za proučavanje osobina samih galaksija, odnosno određivanja ukupne mase i količine tamne materije, zatim gravitacionog potencijala, tako i za proučavanje evolucije galaksija

u okviru određene kosmološke paradigme.

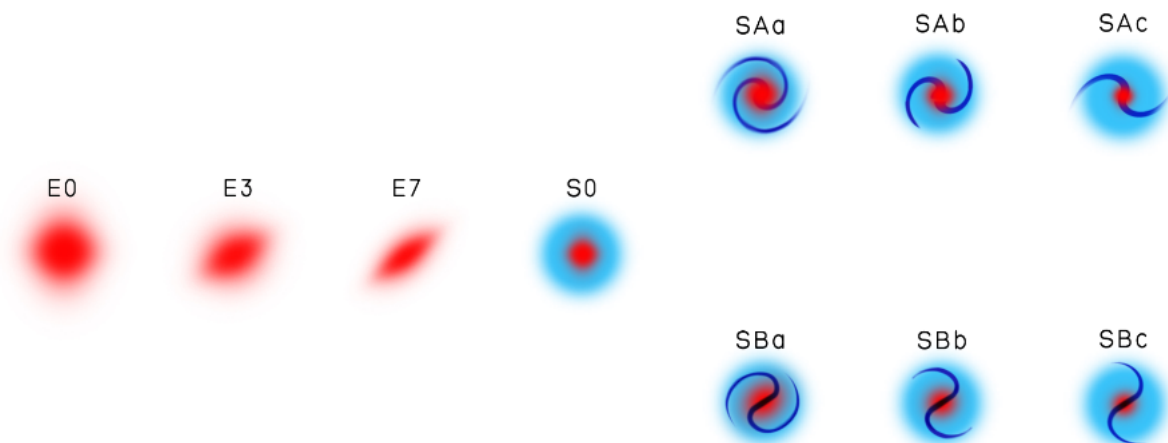
U ovoj disertaciji ispitane su osobine struktura nastalih sudarima velike spiralne galaksije i njenog satelita, patuljaste galaksije. Posebno je ispitan slučaj sudara galaksije M31 sa svojim satelitom. Sudari su predstavljeni pomoću numeričkih simulacija N-tela. Po prvi put je objašnjeno poreklo raspodele metaličnosti u strukturama nastalim u sudaru M31 i patuljaste galaksije.

Disertacija je organizovana u 6 poglavlja. U prvom, uvodnom poglavlju, dati su morfološki tipovi galaksija, kao i teorijske postavke formiranja i interakcije galaksija. Poseban akcenat je stavljan na stabilnost galaksija, u kontekstu teoreme virijala, s obzirom da se u numeričkim simulacijama koriste stabilni modeli N-tela. U drugom delu uvodnog poglavlja, fokus je na osobinama struktura nastalih sudarima u halou galaksije M31. Dat je pregled dosadašnjih istraživanja, kako posmatračkih, tako i teorijskih i istaknuta su otvorena pitanja nastanka i osobina ovih struktura, čime su objašnjeni motivi za izradu ove disertacije.

U drugom poglavlju predstavljeni su modeli galaksija koje učestvuju u sudaru, a koje su predstavljene kao sistemi N-tela. U poglavljima 3, 4 i 5 dati su glavni rezultati ove disertacije. Poglavlje 3 se odnosi na rezultate simulacija sudara spiralne galaksije sa svojim satelitom koji ima dve različite morfologije, a istu masu. Četvrto poglavlje daje glavne rezultate simulacija sudara galaksije M31 i satelita, kao i osobine nastalih struktura, odnosno Velikog zvezdanog toka (GSS, eng. *Giant Stellar Stream*). U petom poglavlju opisan je nastanak Severoistočne i Zapadne zvezdane ljuške (NE i W, eng. *Northeast and West stellar shelves*) u istom sudaru galaksija u kojem je nastao i GSS. Osobine ovih struktura iz numeričkih simulacija u ovoj disertaciji su upoređene sa posmatranim. U poslednjem poglavlju dati su rezime i zaključak.

1.1 Morfološki tipovi i osobine galaksija

Nakon što je definitivno utvrđeno da postoje galaksije osim naše, pažnja je usmerena ka izučavanju njihovih osobina. Pionirsku ulogu u opisivanju izgleda galaksija, odnosno njihovih oblika kakve vidimo u posmatranjima, imao je Hbl. U svom radu iz 1926. (Hubble, 1926) „*Extra-Galactic Nebulae*” predložio je raspodelu galaksija u tri osnovna morfološka tipa: spiralne, eliptične i nepravilne. Ova morfološka klasifikacija galaksija je poznata i kao „Hablova viljuška” (eng. *Hubble sequence*, *Hubble’s tuning fork diagram*). Na levoj strani dijagrama nalaze se eliptične galaksije, a na desnoj strani spiralne i nepravilne, što je prikazano na Slici 1.1. Prvobitni stav je bio da se radi o evolutivnom nizu, pa odatle potiče klasifikacija na rane (eliptične) i kasne (spiralne) tipove galaksija.



Slika 1.1: Hablova viljuška (Hubble, 1926): eliptične i spiralne galaksije. Slika je preuzeta iz rada Graham (2019).

Kasnije je pokazano da ova klasifikacija ipak nije evolutivni niz. Eliptične galaksije su podeljene u potkategorije, od E0 do E7 u zavisnosti koliko su eliptične, odnosno pod kojim uglom ih vidimo. Spiralne galaksije su podeljene u dve grane - sa i bez prečage, dok su nepravilne izdvojene u zasebnu grupu. Potkategorije spiralnih galaksija su Sa, Sb i Sc, pri čemu Sa imaju najmanje izražene spiralne grane, dok Sc imaju najizraženije. Donja grana spiralnih galaksija su SBa, SBb i SBc i ove galaksije imaju vrlo izraženu prečagu (slovo B potiče od engleske reči za prečagu, *bar*). Nepravilne galaksije se ne mogu svrstati ni u eliptične ni u spiralne i uglavnom predstavljaju galaksije u interakciji, ili galaksije koje se plimski razaraju usled prethodnog sudara sa drugom galaksijom, bliskog prolaza, ili usled orbitiranja oko veće, masivnije galaksije. Galaksije koje su po svojoj masi i veličini barem za red veličine manje od velikih posmatranih spiralnih i eliptičnih galaksija nazivaju se patuljaste galaksije. Ove galaksije uglavnom orbitiraju kao sateliti oko većih spiralnih i eliptičnih galaksija. Morfološka klasifikacija se može primeniti i na patuljaste galaksije, pa tako imamo patuljaste sa diskom, zatim sferoidne i eliptične patuljaste, kao i nepravilne.

Pored osnovnih morfoloških razlika, fotometrijska i spektroskopska posmatranja stvorila su mogućnost razlikovanja galaksija i po drugim kriterijumima. Zahvaljujući ukupnoj svetlosti koja dolazi od zvezda i međuzvezdane materije, moguće je razlikovati galaksije po boji, starosti objekata u njoj, metaličnosti, količini gasa i prašine, aktivnosti centralnog regiona. Danas znamo za zvezdorodne (eng. *starburst*) galaksije koje imaju povećanu stopu formiranja zvezda (eng. *star formation rate*, *SFR*) u odnosu na većinu posmatranih galaksija. Takođe, ukoliko je centralni region galaksije značajno svetliji od ostatka cele

galaksije, u toj meri da ostatak galaksije i ne vidimo, govorimo o aktivnim galaktičkim jezgrima (eng. *active galactic nuclei*, *AGN*). Svetlost ovih galaksija potiče od akrecije materije na supermasivnu crnu rupu u centru galaksije. Pošto ovih objekata ima najviše na $z = 2$ crvenom pomaku, smatra se da su AGN-ovi faza u evoluciji galaksija. Količina gasa, stopa formiranja zvezda, broj supernovih i metaličnost galaksije su ključni parametri za njenu nastanjivost. Bitan parametar koji utiče na nastanjivost je i dinamika zvezdane komponente (Mitrašinović et al., 2023). U nastavku su date astrofizičke karakteristike morfološki najznačajnijih tipova galaksija.

1.1.1 Spiralne galaksije

Spiralne galaksije, kao što je rečeno, imaju izražene spiralne grane zvezda, gasa i prašine. Interval masa spiralnih galaksija je $10^6 - 10^{12} M_{\odot}$ (Carroll & Ostlie, 1996; Schneider, 2006). Spiralne grane se nalaze u disku galaksije, a pored diska najvažnije morfološke celine su još centralni oval (eng. *bulge*) i halo tamne materije. U zavisnosti od svoje dinamičke istorije, galaksije mogu da imaju prečagu, koja se proteže od centralnog ovala i iz koje se granaju spiralne grane. Sama prečaga može da nastane internom dinamičkom evolucijom diska, ili usled bliskog prolaza galaksija (Lang et al., 2014), pri čemu ne dolazi i do samog sudara galaksija. Mlečni put je najverovatnije galaksija sa prečagom tipa SBc (Hodge, 1983).

Pionirski radovi Vere Rubin na merenju brzina zvezda i određivanja rotacione krive najpre Mlečnog puta, a zatim i galaksije M31 tokom sedamdesetih godina, aktuelizovali su problem tamne materije, zbog vrlo sličnog izgleda rotacionih krivih posmatranih spiralnih galaksija. Očekivan izgled je bio porast rotacione brzine u centralnim delovima, zatim njen pad kako se radijus povećava, odnosno kako se bližimo ivici luminoznog diska. Posmatranja su davala plato, odnosno rotaciona brzina je ostajala približno ista sa povećanjem radijusa, suprotno očekivanju iz modela:

$$v = \sqrt{\frac{GM(r)}{r}} \quad (1)$$

pri čemu je v rotaciona brzina, G gravitaciona konstanta, $M(r)$ masa galaksije unutar sfere radijusa r , a r radijalna udaljenost od centra galaksije. Na nekoj radijalnoj udaljenosti, cela masa galaksije je obuhvaćena (brojilac u jednačini 1 postaje konstantan), pa povećanjem radijusa, dolazi do smanjenja rotacione brzine. U radu Begeman (1989) predstavljena su posmatranja linije neutralnog vodonika HI i rotaciona kriva spiralne galaksije koja je zaravnjena i na udaljenostima koja su značajno veća od radijusa diska. Neutralni vodonik prilikom hiperfinog prelaza iz stanja paralelnih u stanje antiparalelnih spinova protona

i elektrona, emituje foton talasne dužine 21 cm u radio-domenu. Primera radi, radio-posmatranjima u radu Carignan et al. (2006) prikazana je rotaciona kriva galaksije M31 i data procena mase ove galaksije, kao i odnos mase luminozne i tamne materije.

Posmatranja spiralnih galaksija u optičkom delu spektra, omogućila su određivanje raspodele sjaja u centralnom ovalu. Sjaj opada radijalno po zakonu koji je poznat kao de Vokulervov profil (de Vaucouleurs, 1948; Hernquist, 1990):

$$I(r) = I_0 \exp\left(\frac{r}{r_e}\right)^4 \quad (2)$$

a opštija forma ovog profila je Sersic-ov profil, gde je 4 zamenjeno sa n . U prethodnoj jednačini $I(r)$ je sjaj na radijusu r , I_0 sjaj centralne oblasti, a r_e efektivni radijus, odnosno radijus unutar kojeg je izračena polovina sjaja. Kako najveći deo sjaja potiče od zvezda, koje ujedno predstavljaju i najveći deo mase luminozne materije, profil sjaja nameće mogućí profil gustine, što ima veliki značaj za dinamičko modelovanje galaksija.

Pored zvezda, u disku spiralnih galaksija se nalaze gas i prašina. Posmatranjima linije 21 cm, zatim vodonikove emisije linije H_α i molekula CO (pri čemu je CO indikator molekulskog vodonika, H_2) procenjen je udeo gasa od 4% do 25 % ukupne mase vidljive materije za spiralne galaksije od Sa do Sc morfološke klase (Rubin et al., 1985; Young & Knezek, 1989). Gas je izuzetno važan za hemijsku evoluciju galaksije, nastanak zvezda, kao i raspodelu metaličnosti. Gravitacionim sažimanjem gasnog oblaka nastaju zvezde koje u procesima termonuklearne fuzije proizvode teže elemente od vodonika i helijuma, odnosno metale. U fazama evolucije u kojoj zvezde odbacuju svoje omotače, ili eksplodiraju kao supernove, obogaćuju međuzvezdanu sredinu težim elementima. Količina gasa u galaksiji utiče na stopu formiranja zvezda, samim tim i na spektar i boju galaksija. Centralni ovali spiralnih galaksija su uglavnom crveniji od diska. Kod zvezda veće metaličnosti, odnosno veće zastupljenosti težih elemenata koji u svojim atomskim omotačima imaju više elektrona, imamo veću neprozračnost usled apsorpcije (Carroll & Ostlie, 1996). Veća neprozračnost dovodi do većeg pritiska u atmosferi što uzrokuje širenje atmosfere zvezde i pad efektivne temperature. Crveniji centralni delovi ukazuju na to da je u tim regionima veća metaličnost. Sa druge strane, u disku, prisustvo gasa i prašine uzrokuje povećanu stopu formiranja zvezda. Na taj način imamo prisutne gradijente boje i metaličnosti u spiralnim galaksijama (npr. Magrini et al., 2016).

Posmatranjima kretanja zvezda i gasa u okolini centara spiralnih galaksija, otkrivene su velike mase neluminozne materije na maloj zapremini, odnosno supermasivne crne rupe. Ove crne rupe uglavnom imaju mase od 10^6 do $10^{10} M_\odot$. Supermasivne crne rupe rastu akrecijom mase i spajanjem crnih pri sudarima semena (eng. *seeds*). Semena supermasivnih crnih rupa mogu da nastanu različitim mehanizmima (Smole et al., 2015 i reference

iz tog rada): 1. direktnim kolapsom gasa, 2. kolapsom jata zvezda, 3. evolucijom zvezda populacije III.

Prva posmatrana supermasivna crna rupa je u galaksiji M87, 2019. godine i ima masu od $10^9 M_\odot$ (Event Horizon Telescope Collaboration et al., 2019). U našoj Galaksiji, prvi rezultati posmatranja Srg* A objavljeni su 2022. godine (Event Horizon Telescope Collaboration et al., 2022a,b).

1.1.2 Eliptične galaksije

Eliptične galaksije pokrivaju širok interval masa i luminoznosti. Ove galaksije se razlikuju i po načinu evolucije, količini gasa i prašine koje imaju, kao i dinamici. Postoji nekoliko klasa eliptičnih galaksija.

Najveće eliptične galaksije, (cD, eng. *core dominant*) nalaze se u centrima galaktičkih jata (Carroll & Ostlie, 1996). Mogu da imaju mase do $10^{13} M_\odot$ i radijus do 1 Mpc. Imaju veliki površinski sjaj, koji opada od centra galaksije ka obodu, kao i veliki odnos M/L, što sugeriše na masivan halo tamne materije.

Normalne eliptične galaksije uključuju nekoliko potklasa: džinovske eliptične (gE), eliptične čiji je sjaj između džinovskih i kompaktnih (E) i kompaktne eliptične (cE). Ove galaksije obuhvataju širok interval vrednosti sjaja ($-23 < M_B < -15$, Schneider, 2006). Prelazni morfološki tip, sočivaste S0 galaksije mogu se svrstati i u normalne eliptične.

Posmatranja eliptičnih galaksija pokazuju da su one uglavnom crvene, kada se posmatraju u optici (Visvanathan & Sandage, 1977; Bower et al., 1992; Chang et al., 2006), što znači da zvezdanu komponentu uglavnom čine starije zvezde. Dugo se smatralo da eliptične uopšte ne sadrže gas i prašinu, međutim posmatranja su pokazala da i ove galaksije sadrže i prašinu i gas, u znatno manjoj količini nego spiralne. Gasna komponenta je posmatrana i u vreloj fazi u X domenu (Brighenti & Mathews, 1998), dok je posmatrana i topla komponenta putem emisije H_α , a hladna komponenta, pre svega kroz linije HI (21cm) i CO molekulске linije (Vila-Vilaro et al., 2019). Mnoge normalne eliptične sadrže prašinu koja morfološki zauzima oblik diska prašine. Metalichnost eliptičnih galaksija uglavom opada od centra ka obodu galaksije. Morfologija eliptičnih galaksija se značajno razlikuje od spiralnih i to se objašnjava različitom evolucijom i dinamikom.

Kod eliptičnih galaksija disperzija brzina zvezda je značajna i uređena rotacija kod njih nije izražena. Eliptičnost kod ovih galaksija nije nastala usled spljoštenosti koju uzrokuje rotacija. Spljoštenost usled rotacije može da bude značajna kod centralnih ovala spiralnih

galaksija, ili manje luminoznih eliptičnih. Profil sjaja je određen distribucijom zvezda, odnosno njihovih orbita. Taj profil može da se opiše Sersikovim profilom (Sérsic, 1963):

$$\ln I(r) = \ln I_0 - kr^{1/n} \quad (3)$$

gde je I_0 intenzitet na $r = 0$, a n Sersikov indeks. Ova raspodela sjaja može da se zapiše i preko radijusa r_e kojim je obuhvaćena polovina sjaja galaksije:

$$I(r) = I_e \exp \left\{ -b_n \left[\left(\frac{r}{r_e} \right)^{1/n} - 1 \right] \right\} \quad (4)$$

gde je b_n približno $2n - 1/3$. Ovaj sistem je gravitaciono stabilan odnosno samoodrživ, a dinamika zvezda može da se opiše dinamikom idealnog gasa. Sistem se stabilizuje zahvaljujući pritisku, a oblik je eliptičan zbog anizotropne raspodele zvezda u prostoru brzina. Ovo uzrokuje anizotropnu raspodelu pritiska, a pritisak gasa odgovara prenosu momenta impulsa čestica gasa u njihovom termalnom kretanju.

Raspodela sjaja kod većine eliptičnih galaksija je takva da se izofote mogu dobro opisati elipsama. Eliptičnost može da varira sa radijusom, kao i orijentacija velike ose, što ukazuje da su eliptične galaksije triaksijalni objekti. Za razliku od raspodele sjaja, kinematika objekata u galaksiji može da bude dosta komplikovana. Orijentacija diska prašine ne mora biti ni u jednoj ravni u kojoj je neka od osa elipsoida. Odstupanje izofota od elipse dovodi do dva tipa raspodele sjaja (Carroll & Ostlie, 1996): diskaste (eng. *disky*) i kutijaste (eng. *boxy*). Ako raspodelu sjaja razvijemo u Tejlorov red po polarnom uglu, parametar u redu koji utiče na izgled izofote, odnosno da li će biti kutijasta ili diskasta korelisan je sa odnosom rotacione brzine i disperzije brzina. Ako je parametar u Tejlorovom razvoju veći od nule, galaksija će biti diskasta, u suprotnom kutijasta. Kod velikog broja eliptičnih galaksija uočeni su zvezdane ljuske i druge strukture nastale najverovatnije usled interakcije ovih galaksija sa drugim galaksijama, odnosno sudara. Kutijaste izofote, kao i zvezdane ljuske su indikatori sudara (Bournaud et al., 2007; Ebrov et al., 2021).

1.1.3 Patuljaste galaksije

Patuljaste galaksije su veoma važne za proučavanje dinamike i evolucije galaksija, formiranje struktura i testiranje kosmoloških hipoteza. Postoji više morfoloških tipova ovih galaksija, a razlikuju se i po masi, količini gasa, metaličnosti. Tipovi patuljastih galaksija su:

- sferoidne (dSph)
- eliptične (dE)

- nepravilne (dIrr)
- spiralne patuljaste (dS)
- kompaktne (cE)
- plave kompaktne (BCG)
- ultra kompaktne (UCD)
- ultra difuzne (UDG)

Patuljaste eliptične galaksije (dE) su slične kompaktnim eliptičnim, s tim što imaju značajno manji površinski sjaj i metaličnost. Predstavljaju najmasivnije patuljaste galaksije i česte su u klasterima galaksija (Sandage & Binggeli, 1984).

Patuljaste sferoidne galaksije (dSph) imaju veoma malu luminoznost i površinski sjaj ($M_B \sim -8$). Imaju zvezdane mase od 10^7 do $10^{10} M_\odot$. Do sada su posmatrane u Lokalnoj grupi (McConnachie, 2012; Karachentsev et al., 2015) i upravo interakcija ovih galaksija sa spiralnom galaksijom je jedan od problema kojim se bavi ovaj rad.

Plave kompaktne patuljaste galaksije (BCD) su plavlje od ostalih eliptičnih galaksija sa kolor-indeksom između 0 i 3. Za razliku od ostalih eliptičnih galaksija imaju značajniju količinu gasa.

Ultra kompaktne galaksije su posmatrane u klasterima galaksija (npr. Fornax: Hilker et al., 1999; Abel 1689: Mieske et al., 2005). Mogu da se formiraju zbog gubitka mase usled plimskih efekata prolazaći kroz centralni deo klastera galaksija (Martinović & Micic, 2017).

Ultra difuzne galaksije predstavljaju najmanje sjajne galaksije, sa velikim procentom tamne materije, pri čemu mogu da sadrže od nekoliko hiljada, do nekoliko stotina hiljada zvezda (Simon, 2019).

Kompaktne galaksije imaju relativno veliku masu i mali radijus i ukupnu luminiznost. Posmatran je mali broj ovih galaksija (Mieske et al., 2005).

Nepravilne patuljaste galaksije nemaju jasne morfološke oblike i za razliku od drugih galaksija, plavlje su i sa više gasa (Mo et al., 2010).

Formiranje patuljastih galaksija vezuje se za uslove u ranom univerzumu. Naime hijerarhijska struktura podrazumeva nastanak velikih spiralnih i eliptičnih galaksija, sudarima manjih galaksija. Galaksije koje su preživele ovaj sudarni proces, danas se nalaze uglavnom u jatima galaksija kao sateliti velikih galaksija. To su upravo patuljaste galaksije, koje imaju različite osobine u zavisnosti od početnih uslova u kojima su formirane, ali

i kasnije dinamičke evolucije u okruženju drugih galaksija, kao i plimskih efekata (npr. Martinović & Micic, 2017).

Nakon formiranja prvih zvezda u ovim galaksijama, u jednoj fazi evolucije zvezda dolazi do eksplozije supernove i formiranja udarnog talasa. Ovi talasi mogu da oduvaju preostali gas. Kasnijom ponovnom akrecijom gasom, moguće je formiranje nove generacije zvezda, samim tim i gradijenta starosti i metaličnosti. U tim slučajevima gradijent metaličnosti je negativan, odnosno metaličnost opada od centra galaksije ka obodu, gde se nalaze starije zvezde, dok starost objekata raste od centra ka perifernim delovima galaksije. Gas koji je ponovo akretovan u centar potencijalne jame, odnosno centralni region galaksije, formira novu generaciju zvezda, pri čemu je taj gas bogatiji metalima nastalih evolucijom zvezda prethodne generacije. Na stopu formiranja zvezda i prisustvo gasa može da utiče okruženje patuljaste galaksije, posebno plimski efekti izazvani prisustvom velike galaksije, čija je patuljasta satelit. Plimski efekti mogu patuljastu galaksiju da ostave sa vrlo malo gasa i samim tim utiču na formiranje novih zvezda, profil metaličnosti i starosti objekata u galaksiji. Interne osobine, poput formiranja zvezda, evolucije gradijenta metaličnosti, zvezdanih vetrova i udarnih talasa, zatim eksterni uslovi, pre svega dinamička evolucija u gravitacionom polju veće galaksije, utiču na ukupne osobine patuljaste galaksije (Koleva et al., 2009b,a; Mercado et al., 2021). Ne postoji jasna mera koji od ovih efekata dominantno utiče na evoluciju i morfološke karakteristike patuljaste galaksije.

1.2 Stabilnost galaksija i teorema virijala

Ako govorimo o univerzumu na velikoj skali, onda govorimo o velikom skupu galaksija. Od velikog je značaja razumevanje dinamičke stabilnosti galaksije kao sistema, odnosno skupa zvezda, gasa i tamne materije. Ova tema je obrađena u nekoliko standardnih udžbenika koji se bave evolucijom i dinamikom galaksija (Binney & Tremaine, 2008; Mo et al., 2010; Bovy, 2023; Angelov, 2013). Ako posmatramo dinamiku jedne galaksije, ona je pre svega određena položajem i kretanjem zvezda, kao i kretanjem tamnog haloa. Zvezde se kreću pod dejstvom gravitacione sile, međutim određivanje raspodele zvezdane mase i ukupne mase galaksije je vrlo komplikovano. Naime, posmatranjima možemo da utvrdimo položaje i brzine zvezda (ovde je akcenat stavljen na zvezdanu komponentu u odnosu na gasnu, zbog toga što je ova dominantna u masenom udelu), ali je vrlo kompleksno odrediti funkciju raspodele mase u galaksiji. Takođe, tema stabilnosti galaksije je vrlo kompleksna imajući u vidu evoluciju galaksija. Tokom svog postojanja, galaksije interaguju međusobno, ali čak i kad posmatramo jednu izolovanu galaksiju, fizički procesi poput nastanka zvezda, odnosno sažimanja međuzvezdanog gasa, zatim eksplozije zvezda, udarni talasi, zvezdani vetrovi itd. u velikoj meri čine sliku vrlo kompleksnom.

Ako govorimo o dinamičkoj stabilnosti galaksije, kao sistema, pri samom nastanku galaksije ponovo imamo formiranje haloe tamne materije, zatim privlačenje gasa, odnosno bariona i formiranje zvezda. U već formiranoj galaksiji, dinamika zvezda, odnosno međusobna interakcija koja dovodi do razmene energije prirodno vodi uspostavljanju ravnotežnog stanja (Bovy, 2023). Problem sa ovim scenarijom je taj što je vremenska skala na kojoj je moguća interakcija, mnogo veća od starosti univerzuma. Drugim rečima verovatnoća interakcije, ili sudara zvezda u galaksiji je veoma mala. Dinamičkoj stabilnosti galaksije vode nesudarni procesi, kao što su intenzivna relaksacija (eng. *violent relaxation*) i mešanje faza (eng. *phase mixing*, Bovy, 2023). Mešanje faza odnosi se na distribuciju objekata u faznom prostoru, usled vremenske zavisnosti komponenata orbitalnog kretanja, dok se intenzivna relaksacija odnosi na kolapsirajuće haloe tamne materije, pri čemu gravitacioni potencijal zavisi od vremena, pa energije tela nisu konzervirane, već evoluiraju. (Bovy, 2023).

1.2.1 Teorema virijala

Teorema virijala je važna u opisivanju stabilnosti sistema koji može da bude galaksija, ili zvezdano jato, zatim zvezda ili skup čestica gasa. U opštem obliku teorema virijala može da se izvede na nekoliko načina, kao što su hidrodinamički, diskretni pristup, itd. Različita izvođenja teoreme virijala data su u standardnim udžbenicima galaktičke dinamike (Binney & Tremaine, 2008; Bovy, 2023; Mo et al., 2010; Angelov, 2013), kao i udžbenicima zvezdane strukture (Chandrasekhar, 1939; Cox & Giuli, 1968). Članovi izraza u teoremi virijala se odnose na različite vrste energija u sistemu: kinetička energija makro i mikro kretanja, zatim energija magnetnog polja, itd. Teorema može da se izvede iz jednačine kretanja elementa fluida (u hidrodinamičkom pristupu), ili čestica i da se generalizuje na relativistički slučaj. Oblik teoreme virijala koji je od posebnog interesa za galaktičku dinamiku jeste onaj koji povezuje kinetičku i potencijalnu energiju sistema čestica koji je samoodržan međusobnom gravitacionom interakcijom. To je tzv. skalarni oblik, čije izvođenje može da se nađe u udžbenicima (npr. Bovy, 2023). Pošto se ova disertacija bavi numeričkim simulacijama sudara galaksija, koji su predstavljeni kao sistemi N-tela, pri čemu ti sistemi u početnom trenutku moraju da zadovolje teoremu virijala, izveden je oblik ove teoreme koji je najpraktičniji za testiranje stabilnosti modela galaksija u početnom trenutku. Naveden je primer izvođenja opisan u Chandrasekhar (1939), a koji je ovde malo modifikovan.

Razmotrimo skup čestica masa m za koji možemo da nađemo vezu kinetičke i potencijalne energije, ukoliko pođemo od jednačina kretanja za svaku česticu:

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = F_x \quad (5)$$

$$m \frac{d^2 y}{dt^2} = F_y \quad (6)$$

$$m \frac{d^2 z}{dt^2} = F_z \quad (7)$$

pri čemu su x, y, z koordinate čestice mase m , a F_x, F_y, F_z komponente sile u datim pravcima. Jednačine (5), (6) i (7) možemo da zapišemo kraće (preko intenziteta vektora):

$$m \frac{d^2 r}{dt^2} = F. \quad (8)$$

Ako poslednju jednačinu pomnožimo sa r , da bismo na desnoj strani te jednačine dobili neki izraz koji ima dimenziju potencijala, odnosno potencijalne energije (pod pretpostavkom da je sila potencijalna) dobija se izraz:

$$mr \frac{d^2 r}{dt^2} = rF. \quad (9)$$

Levu stranu jednačine (9) možemo da zapišemo drugačije:

$$mr \frac{d^2 r}{dt^2} = \frac{1}{2} \frac{d^2}{dt^2} (mr^2) - m \left(\frac{dr}{dt} \right)^2 \quad (10)$$

i ako zemenimo levu stranu jednačine (9) dobijamo:

$$\frac{1}{2} \frac{d^2}{dt^2} (mr^2) = m \left(\frac{dr}{dt} \right)^2 + rF. \quad (11)$$

Leva strana jednačine (11) predstavlja drugi izvod momenta inercije po vremenu, dok je prvi član sa desne strane dvostruka vrednost kinetičke energije. Poslednji član u jednačini zvaćemo *Virijal*. Jednačina postaje:

$$\frac{1}{2} \frac{d^2 I}{dt^2} = 2T + \text{Virijal} \quad (12)$$

pri čemu je I moment inercije, a T kinetička energija sistema.

Ako pretpostavimo sada da se dve čestice nalaze na koordinatama (x_1, y_1, z_1) i (x_2, y_2, z_2) , njihov doprinos ukupnom virijalu će biti: $F_{12}r_{12}$, gde je $r_{12} = |\vec{r}_1 - \vec{r}_2| = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2}$. Dalje, ako čestice interaguju samo gravitaciono, odnosno ako u sistemu imamo samo gravitacionu silu, tada je virijal za dve čestice:

$$Virijal = \frac{-Gm_1m_2}{r_{12}^2}r_{12}, \quad (13)$$

odnosno za N čestica:

$$Virijal = - \sum_i \sum_j \frac{Gm_i m_j}{r_{ij}}. \quad (14)$$

U jednačini (14) svaki član u sumi je rad uložen da se par čestica koje se privlače gravitacionom silom pomeri sa međusobnog rastojanja r_{ij} na beskonačnu udaljenost. Drugim rečima $Virijal$ predstavlja potencijalnu energiju sistema, odnosno $Virijal = \Omega$, a jednačina (12) postaje:

$$\frac{1}{2} \frac{d^2 I}{dt^2} = 2T + \Omega \quad (15)$$

U stacionarnom slučaju $I = const$, pa je leva strana jednačine (15) jednaka nuli. Tada je:

$$2\mathbf{T} + \mathbf{\Omega} = \mathbf{0}, \quad \text{ili} \quad \frac{2\mathbf{T}}{|\mathbf{\Omega}|} = \mathbf{1} \quad (16)$$

što predstavlja skalarni oblik teoreme virijala. Na ovaj način su povezane ukupna kinetička (T) i ukupna potencijalna energija (Ω) sistema, koji je dinamički stabilan i gde je interakcija između tela koja čine sistem, gravitaciona. Prethodnu jednačinu možemo da zapišemo u sledećem obliku:

$$\sum_{i=1}^N m_i v_i^2 = \sum_{i=1}^N \sum_{j<i} \frac{Gm_i m_j}{|\vec{r}_i - \vec{r}_j|}. \quad (17)$$

Ako su sva tela iste mase m , onda je ukupna masa sistema $M = Nm$, pa izraz transformišemo tako što konstantne veličine izvučemo ispred sume (Bovy, 2023):

$$m \sum_{i=1}^N v_i^2 = Gmm \sum_{i=1}^N \sum_{j<i} \frac{1}{|\vec{r}_i - \vec{r}_j|}. \quad (18)$$

Zamenom da je $m = M/N$ dobijamo izraz:

$$\sum_{i=1}^N v_i^2 = G \frac{M}{N} \sum_{i=1}^N \sum_{j<i} \frac{1}{|\vec{r}_i - \vec{r}_j|}. \quad (19)$$

Odavde možemo da izrazimo ukupnu masu sistema (Bovy, 2023):

$$M = \frac{1}{G} \frac{N \sum_{i=1}^N v_i^2}{\sum_{i=1}^N \sum_{j<i} \frac{1}{|\vec{r}_i - \vec{r}_j|}} \quad (20)$$

Jednačine (16)-(20) daju informaciju o izvesnom balansu kinetičke i potencijalne energije za dinamički stabilan sistem, poput galaksije. Dakle stabilnost galaksije će značiti specifičnu raspodelu ukupne mase, kao i raspodelu zvezda po brzinama. Ukoliko su mere ne brzine, odnosno disperzije brzina velike, znači da sistem mora da sadrži i veliku ukupnu masu da bi ostao stabilan. To je bio jedan od argumenata za nedostajuću masu u Koma klasteru, koji je dao Cviki, pošto masa procenjena iz odnosa mase i sjaja (M/L) nije bila dovoljna da uravnoteži veliku disperziju brzina, galaksija na obodu jata (Zwicky, 1937).

1.2.2 Bolcmanova i Džinsova jednačina

Pošto galaksija predstavlja dinamički sistem tela koja se ne sudaraju, postavlja se pitanje kakva je funkcija raspodele tela po položajima i brzinama i kakve su njene osobine. Ako pođemo od toga da je zadovoljena teorema virijala, odnosno da je sistem stabilan, možemo da posmatramo šta se dešava u nekoj zapremini faznog prostora (definisano generalisanim koordinatama q i impulsima p) u koju ulaze i iz koje izlaze čestice, odnosno zvezde, usled kretanja u gravitacionom polju. Neka je $f(\vec{p}, \vec{q}, t)$ funkcija raspodele zvezda po položajima i brzinama u datom vremenskom trenutku. Ta funkcija daje broj zvezda u nekoj zapremini faznog prostora: $dN(\vec{p}, \vec{q}, t) \sim f(\vec{p}, \vec{q}, t)d\vec{p}d\vec{q}$. Funkcija raspodele je normalizovana, odnosno:

$$\int f(\vec{p}, \vec{q}, t)d\vec{p}d\vec{q} = 1 \quad (21)$$

ili drugačije rečeno, verovatnoća nalaženja zvezde u nekom delu faznog prostora je 1. Interesuje nas šta se dešava sa brojem zvezda u zapremini faznog prostora V , pri čemu zvezde ulaze i izlaze iz tog dela prostora. Takođe, smatramo da površ S ograničava zapreminu V . Ako zvezde u svom kretanju napuštaju zapreminu V , prolazeći kroz površinu S , možemo da definišemo fluks ϕ kroz tu površinu kao:

$$\phi = \oint \rho \vec{u} \cdot d\vec{S} = \oint N f(\vec{p}, \vec{q}, t) \vec{u} \cdot d\vec{S}, \quad (22)$$

pri čemu je ρ broj zvezda po jedinici zapremine faznog prostora, a u brzina u faznom prostoru definisana kao $\vec{u} = (\dot{\vec{p}}_1, \dot{\vec{p}}_2, \dots, \dot{\vec{p}}_N, \dot{\vec{q}}_1, \dot{\vec{q}}_2, \dots, \dot{\vec{q}}_N)$. Možemo da kažemo da je smanjenje broja zvezda u zapremini V jednako fluksu zvezda kroz površinu S :

$$-\frac{\partial N}{\partial t} = \phi. \quad (23)$$

Zamenom izraza za N , dobijamo:

$$- \int \frac{\partial f(\vec{p}, \vec{q}, t)}{\partial t} dV = \oint f(\vec{p}, \vec{q}, t) \vec{u} \cdot d\vec{S} \quad (24)$$

Površinski integral na desnoj strani prethodne jednačine možemo da prevedemo u zapreminski:

$$- \int \frac{\partial f(\vec{p}, \vec{q}, t)}{\partial t} dV = \int \nabla \cdot (f(\vec{p}, \vec{q}, t) \vec{u}) dV. \quad (25)$$

Ovu jednačinu možemo da zapišemo i u sledećem obliku:

$$\frac{\partial f(\vec{p}, \vec{q}, t)}{\partial t} + \nabla \cdot (f(\vec{p}, \vec{q}, t) \vec{u}) = 0. \quad (26)$$

Dobijeni izraz predstavlja jednačinu kontinuiteta za gustinu u faznom prostoru. Ako ovu jednačinu napišemo u kartezijanskim koordinatama, imajući u vidu da je $\partial \dot{\vec{r}} / \partial r = 0$ i $\partial \dot{\vec{v}} / \partial v = 0$, dobijamo Bolcmanovu jednačinu:

$$\frac{\partial f(\vec{p}, \vec{q}, t)}{\partial t} + \dot{\vec{r}} \frac{\partial f(\vec{p}, \vec{q}, t)}{\partial \vec{r}} + \dot{\vec{v}} \frac{\partial f(\vec{p}, \vec{q}, t)}{\partial \vec{v}} = 0 \quad (27)$$

Ova jednačina opisuje dinamiku sistema nesudarajućih čestica, ili zvezda. Ako se vratimo na jednačinu (26), možemo da napišemo divergenciju u faznim koordinatama, a jednostavnosti radi zapisaćemo $f \equiv f(\vec{p}, \vec{q}, t)$, pa će jednačina (26) da se transformiše:

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial}{\partial \vec{p}_i} (f \dot{\vec{p}}_i) + \frac{\partial}{\partial \vec{q}_i} (f \dot{\vec{q}}_i) \right) = 0, \quad (28)$$

dalje imamo:

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial \vec{p}_i} \dot{\vec{p}}_i + \frac{\partial f}{\partial \vec{q}_i} \dot{\vec{q}}_i \right) + f \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial \dot{\vec{p}}_i}{\partial \vec{p}_i} + \frac{\partial \dot{\vec{q}}_i}{\partial \vec{q}_i} \right) = 0. \quad (29)$$

Imajući u vidu Hamiltonove jednačine:

$$\frac{\partial \dot{\vec{p}}}{\partial t} = - \frac{\partial H}{\partial \vec{q}} \quad \text{i} \quad \frac{\partial \dot{\vec{q}}}{\partial t} = \frac{\partial H}{\partial \vec{p}}, \quad (30)$$

gde je H hamiltonijan sistema, pa druga zagrada u jednačini (27) postaje nula i ta jednačina se svodi na:

$$\frac{\partial f}{\partial t} = \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial H}{\partial \vec{q}_i} \frac{\partial f}{\partial \vec{p}_i} - \frac{\partial H}{\partial \vec{p}_i} \frac{\partial f}{\partial \vec{q}_i} \right) \quad (31)$$

ili drugačije zapisano, pomoću Poasonove zagrade:

$$\frac{\partial f}{\partial t} = [H, f]. \quad (32)$$

Po definiciji, totalni izvod funkcije je:

$$\frac{df}{dt} = \frac{\partial f}{\partial t} + [f, H] \quad (33)$$

pa odatle sledi Liuvilova teorema:

$$\frac{df}{dt} = 0. \quad (34)$$

Liuvilova teorema govori o nepromenljivosti funkcije raspodele duž fazne trajektorije, odnosno o konstantnosti fazne gustine. Ukoliko je sistem u ravnoteži, ne postoji eksplisitna zavistnost od vremena, odnosno parcijalni izvod funkcije raspodele je nula, pa se Bolcmanova jednačina za sistem nesudarajućih tela u ravnoteži svodi na sledeći oblik:

$$\dot{\vec{q}} \frac{\partial f(\vec{p}\vec{q})}{\partial \vec{q}} + \dot{\vec{p}} \frac{\partial f(\vec{p}\vec{q})}{\partial \vec{p}} = 0. \quad (35)$$

Izvođenje Liuvilove teoreme je standardni deo udžbenika statističke fizike, (npr. Živić, 2006), a uvođenje ovde je prirodno s obzirom da dinamički opis galaksije znači i statistički. Pored toga, stabilan model galaksije podrazumeva da se profili gustine komponentata galaksije održavaju tokom evolucije.

Pored Bolcmanove jednačine, za opis dinamike sistema su korisne Džinsove jednačine koje se dobijaju kao momenti Bolcmanove jednačine, nakon integraljenja po delu faznog prostora. Neke od Džinsovih jednačina tiču se srednje brzine i tenzora disperzije brzina:

$$\bar{v} = \frac{\int v f dv}{\int f dv} \quad (36)$$

$$\sigma_{i,j} = \frac{\int (v_i - \bar{v}_i)(v_j - \bar{v}_j) f dv}{\int f dv} \quad (37)$$

Džinsove jednačine sadrže članove koji mogu da budu posmatrani parametri galaksije, poput srednje brzine, ili disperzije brzina. Takođe, posmatrani sjaj galaksije vodi ka profilu sjaja, odnosno profilu gustine galaksije. Ove jednačine, uz pretpostaku o funkciji raspodele, vode ka određivanju galaktičkog potencijala $\Phi(\vec{r})$. Galaktički potencijal je vezan sa gustinom, tj. izvorom gravitacionog polja, Poissonovom jednačinom:

$$\nabla^2 \Phi = -4\pi G \rho \quad (38)$$

Džinsova teorema nam kaže da je svaka funkcija integrala kretanja rešenje Bolcma-

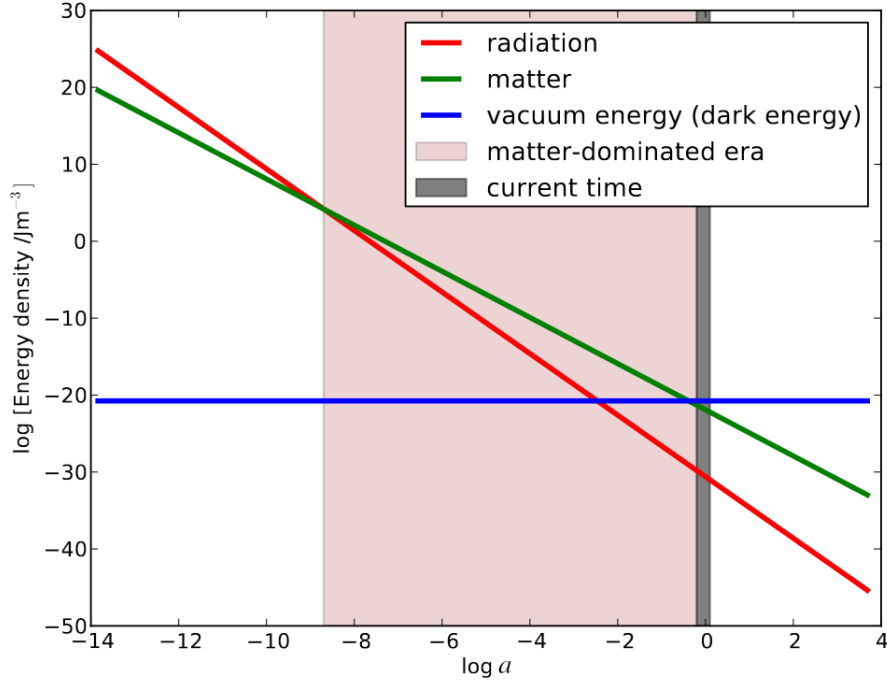
nove jednačine za nesudarajući sistem. Takođe, svako rešenje Boltzmanove jednačine za nesudarajući sistem zavisi samo od koordinata faznog prostora kroz integrale kretanja. Čak i ako funkciju raspodele predstavimo preko integrala kretanja $f(E, L)$ (pri čemu je E ukupna energija, a L moment impulsa), interpretacija je ista - ona predstavlja gustinu verovatnoće u faznom prostoru.

1.3 Hijerarhijsko formiranje galaksija

Prvobitni model formiranja galaksija je bio kolapsirajući model (eng. “*top-down*”, Eggen et al., 1962). Ovaj model je predviđao gravitacioni kolaps oblaka primordijalnog gasa u ranom univerzumu i istovremeno formiranje različitih delova galaksija. Međutim posmatrački podaci daju različite vremenske skale za starost različitih delova galaksija.

Nasuprot ovom modelu, Λ CDM model predviđa hijerarhijski način formiranja galaksija (eng. “*bottom-top*”, Carroll & Ostlie, 1996; White & Rees, 1978; White & Frenk, 1991). Mnogi radovi su se bavili hijerarhijskim modelom u okviru Λ CDM paradigme, odnosno nastankom velikih galaksija kroz sudare malih galaksija (npr. Cole et al., 2000; Bower et al., 1992; Venn et al., 2004). Početni uslovi za nastanak galaksija su predviđeni evolucijom univerzuma u svojoj ranoj fazi, a koja je takođe opisana ovim kosmološkim modelom. Univerzum se sastoji od nekoliko glavnih konstituenata: tamna energija, tamna materija i barionska materija. Nekoliko posmatračkih misija je na osnovu opservabilnih parametara izmerilo energetske udeo svake od komponenata. Misijske COBE, WMAP i Planck, su od 1990. godine različitom rezolucijom merile vrednosti parametara Λ CDM modela. Danas znamo da tamna energija ima udeo $\Omega_\lambda \approx 69\%$, tamna materija $\Omega_m \approx 25,8\%$, barionska materija $\Omega_b \approx 4,82\%$, dok je Hablova konstanta (na osnovu kosmoloških testova) $H \approx 67,5 \text{ km/sMpc}$ (Planck Collaboration et al., 2020).

U modelu hijerarhijskog formiranja struktura, oblasti veće gustine tamne materije u odnosu na okolnu gustinu, mogu da kolapsiraju, nasuprot kosmološkom širenju. Ove zgušnjute oblasti se sudaraju, odnosno spajaju gradeći haloe tamne materije u kojima će nastati buduće galaksije. Barioni, nakon razdvajanja sa zračenjem, upadaju u potencijalne jame formirane haloima tamne materije. Nelinearni kolaps tamne materije se dešava na sve većoj skali i tipična masa koja kolapsira u halo raste, pri čemu se formira raspodela haloa po masama, gde se galaksije mogu formirati. Usled barionskih procesa, koji obuhvataju fizičke procese evolucije zvezda i fizike međuzvezdane sredine, imamo konačnu raspodelu galaksija po masama. Najmasivnije su cD eliptične galaksije u centrima galaktičkih jata koje imaju $\sim 10^{13} M_\odot$, dok patuljaste galaksije imaju uglavnom oko $10^8 M_\odot$, mada galaksije mogu inicijalno da se formiraju i sa $10^6 M_\odot$, što je Džinsova masa nakon rekombinacije, odnosno minimalna masa potrebna da se desi gravitacioni kolaps (Gawiser,



Slika 1.2: Različite epohe evolucije Univerzuma. Linijama su predstavljene promene gustine energije sa faktorom skaliranja, a . Crvenom linjom je predstavljena gustina energije zračenja, zelenom materije, a plavom tamne energije. Osenčeni region predstavlja epohu u kojoj dominira materija. Slika je preuzeta iz rada Dirisa (2012).

2006).

Rast struktura i kolaps tamne materije pri formiranju haloa je deo epohe u kojoj dominira materija. Kada je nastupila faza u kojoj dominira tamna energija, nastanak struktura na velikoj skali je usporen (Bell et al., 2005). Usporenje je nastalo na $z \approx 0,3$ što predstavlja crveni pomak na kom su gustine energije materije i tamne energije približno jednake (Frieman et al., 2008), a nakon toga tamna energija počinje da dominira (Slika 1.2).

Finalna slika koju imamo jeste Hablova viljuška galaksija bliskog Univerzuma na $z = 0$. Ispitivanje starosti i hemijskog sastava zvezdane komponente naše Galaksije i galaksija Lokalne grupe je veoma važno za ispitavanje nastanka i evolucije galaksija. Takođe, komplementarna slika je proučavanje galaksija na velikom crvenom pomaku. Ova epoha se može smatrati epohom formiranja mladih galaksija, koje posle hijerarhijski, sudarima, grade veće galaksije koje vidimo danas.

Kolaps tamne materije u haloe je predmet teorijskog proučavanja nekoliko velikih simulacija. Jedne od najpoznatijih svakako su Milenijum i Milenijum II simulacija (Springel et al., 2005). Pored Gadget2 koda (Springel, 2005), razvijeni su i Gadget3 i Gadget4 (Springel et al., 2021) kodovi. Primeri simulacija koje koriste Gadget3 su Eagle (Schaye

et al., 2015) i MassiveBlack-II (Khandai et al., 2015). Pored različitih varijanti Gadget koda, značajan kod je Arepo (Springel, 2010). Na bazi Arepo koda razvijene su simulacije Illustris (Vogelsberger et al., 2014), IllustrisTNG (Springel et al., 2018), MilleniumTNG (Pakmor et al., 2022). Kôd Ramzes (Teyssier, 2002) je korišćen za simulacije HorizonAGN (Dubois et al., 2014) i NewHorizon (Dubois et al., 2021). U ovoj disertaciji je korišćen Gadget2 kôd, koji će biti bliže predstavljen u poglavlju 2.

1.4 Sudari galaksija i plimske strukture

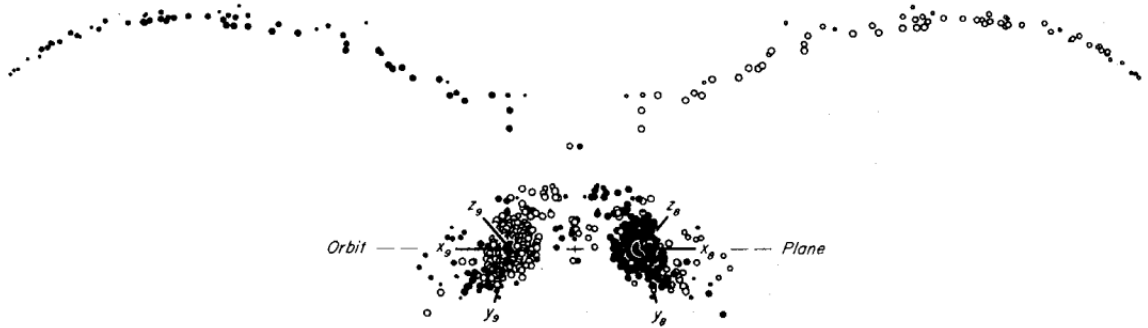
Prilikom sudara galaksija formiraju se plimske strukture, kao i kod galaksija koje orbitiraju jedna oko druge, odnosno u slučajevima gde je manja galaksija satelit veće. Ove strukture nastaju usled gravitacionog privlačenja jedne galaksije, perifernih delova druge galaksije. Kao u slučaju svakog sistema gde je rastojanje između objekata uporedivo sa dimenzijama tih objekata, dolazi do neravnomerne raspodele gravitacionog potencijala, odnosno gravitaciona sila nije ravnomerno raspoređena na konstituente objekta. U tom slučaju, zvezde i gas manje galaksije koje su bliže većoj galaksiji, trpe jaču gravitacionu silu, koja u jednom trenutku može da bude jača od gravitacione sile galaksije čiji su deo. U slučaju sudara galaksija, ukoliko manja galaksija koja je satelit veće, dođe na rastojanje koje je manje od plimskog radijusa veće galaksije, dolazi do “čupanja” materijala iz manje galaksije i formiranja struktura koje vidimo u posmatranjima, kao što su plimski repovi (eng. *tidal tails*), tokovi zvezda i gasa (eng. *streams*), ljuske (eng. *shells*), itd. Primer posmatranih plimskih struktura je dat na Slici 1.3. Plimski radijus, bez obzira na različite definicije, predstavlja rastojanje unutar kojeg neka galaksija ima dominantnu gravitacionu silu, ili rastojanje na kojem gustina pada na nulu, što bi predstavljalo granicu gravitaciono vezanog sistema (Widrow et al., 2008).

Pionirski radovi koji teorijski objašnjavaju nastanak plimskih struktura usled interakcije galaksija su objavljivani od sedamdesetih godina prošlog veka, a jedan od najznačajnijih je rad Toomre & Toomre (1972). U ovom radu objašnjeno je nekoliko interagujućih galaksija, između ostalih i Antene galaksije, prikazane na Slici 1.3. Iako su galaksije prezentovane samo preko diskova sa malim brojem čestice, ove simulacije (Slika 1.4) su uspešno reprodukovale izgled galaksija u interakciji i objasnili poreklo plimskih struktura.

Unutar haloa masivnije galaksije, tokom sudara sa satelitom, nastavlja se proces plimskog rasipanja satelita i formiranja struktura (primer za to je Magelanov tok u našoj Galaksiji). Dinamika i osobine formiranih struktura zavise od karakteristike sudara i osobina samih galaksija. Pri modelovanju ovih procesa analitičkim putem, teško je verodostojno izračunati orbitu satelita i samim tim vremenski interval formiranja struktura, zbog nemogućnosti računanja dinamičkog trenja. Dinamičko trenje se može predstaviti kao sila



Slika 1.3: Antene galaksije (NGC4038 i NGC4039) koje predstavljaju galaksije u interakciji su primer postojanja plimskih struktura (tj. antena na slici) usled interakcije. Autor snimka je Robert Gendler, <http://www.robgendlerastropics.com/>.



Slika 1.4: Antene galaksije (NGC4038 i NGC4039) u prvim simulacijama N-tela. Slika je preuzeta iz rada Toomre & Toomre (1972).

koja usporava telo veće mase koje prolazi kroz polje gde se nalaze tela manjih masa, koja zatim gravitaciono privučena, formiraju oblast veće gustine, koja onda usporavajuće deluje na veće telo. Ako razmatramo kretanje tela mase M kroz populaciju tela mase m_a ($m_a \ll M$), analitički oblik dinamičkog trenja, odnosno usporenje tela veće mase koje prolazi kroz sistem tela manjih masa dato je izrazom (Binney & Tremaine, 2008):

$$\frac{d\vec{v}_M}{dt} = -4\pi G^2 M m_a \ln \Lambda \int f(\vec{v}_a) \frac{\vec{v}_M - \vec{v}_a}{|\vec{v}_M - \vec{v}_a|^3} d^3\vec{v}_a \quad (39)$$

pri čemu $f(v_a)$ funkcija raspodele po brzinama, Λ (Kulonov logaritam) je dato izrazom:

$$\ln \Lambda = \ln \left(\frac{b_{max}}{\max(r_h, GM/v_{typ}^2)} \right) \quad (40)$$

U poslednjoj jednačini b_{max} predstavlja parametar sudara, r_h radijus unutar koga je sadržana polovina mase sistema unutar kojeg telo od interesa orbitira, a v_{typ} tipična brzina definisana kao $v_{typ}^2 \approx GM'/R'$, gde je M' masa sistema tela, a R' radijus sistema. U tom slučaju, maksimalni parametar sudara bi bio jednak radijusu orbite tela mase M . Ako čestice, ili zvezde u polju, imaju izotropnu raspodelu brzina, onda dinamičkom trenju doprinose samo čestice koje se sporije kreću od tela veće mase i izraz za usporenje je dat Čandrasekarovom formulom (Binney & Tremaine, 2008):

$$\frac{d\vec{v}_M}{dt} = -16\pi^2 G^2 M m_a \ln \Lambda \left[\int_0^{v_M} f(\vec{v}_a) v_a^2 dv_a \right] \frac{\vec{v}_M}{v_M^3} \quad (41)$$

Bez obzira na uračunavanje dinamičkog trenja analitičkim putem, posle izvesnog vremena dolazi do odstupanja u odnosu na realne orbite objekata u sudaru. S tim u vezi, realniji prikaz i bolje objašnjenje formiranja struktura plimskim raspadom obezbeđuju modeli N-tela.

Mnogi teorijski radovi objašnjavaju nastanak plimskih struktura u galaksijama različitim sudarnim scenarijima i mogućnost njihovih posmatranja, uzimajući u obzir njihov mali sjaj (Johnston et al., 2008). Plimski raspad satelitske galaksije je uobičajen scenario za nastanak ovih struktura (Zolotov et al., 2009; Cooper et al., 2013, 2015; Longobardi et al., 2018; Karademir et al., 2019). U radovima Pillepich et al. (2014) i Remus et al. (2016), je diskutovana veza profila gustine spoljašnjeg haloa galaksije i istorije sudara. Zvezdani tokovi mogu da budu korisni za određivanje osobina haloa tamne materije, kao i za tokove tamne materije koja se poput barionske materije, dinamički rasipa usled plimskih efekata (Bovy, 2016). Osobine (zvezdanih) plimskih struktura nastalih sudarom galaksija, opisane su u radu Karademir et al. (2019), pomoću simulacija N-tela. U ovom radu dati su modeli spiralne galaksije, kao i patuljaste satelitske galaksije, koja je reskalirana spiralna galaksija. Različiti odnosi masa daju različite tipove sudara: velike, srednje i male sudare. Masa satelitske galaksije, koja je po morfologiji ista kao velika spiralna, bila je manja: 5, 10, 50 i 100 puta (Karademir et al., 2019). Osobine struktura su diskutovane i za različite sudarne scenarije, odnosno različite pozicije uglove, tj. različite orijentacije momenta impulsa. Sudari u kojima je odnos masa od 1:5 do 1:10 okarakterisani kao mali sudari (eng. *minor mergers*), dok su sudari sa većim odnosom masa imenovani kao mini sudari (Karademir et al., 2019). U slučaju malih sudara, primećeno je da je nakon sudara poremećen prvobitni Sersikov profil gustine centralnog regiona velike spiralne galaksije, što znači da se u slučaju ovih sudara deo mase satelitske

galaksije distribuirao u centralne delove, dok kod mini sudara to nije primećeno. U slučaju mini sudara, najveći deo materijala satelitske galaksije se usled plimskih efekata raspe u halou i disku velike spiralne galaksije. To dovodi do zadebljanja diska u ovom slučaju.

Ukoliko su sudari gotovo radijalni, satelitska galaksija prolazi blizu centra galaksije oko koje orbitira (Amorisco, 2015). Radijalni sudari su odgovorni za stvaranje zvezdanih ljuski, dok su sudari koji su manje radijalni, a više cirkularni, odgovorni za stvaranje tokova (Karademir et al., 2019).

U ovoj disertaciji, ispitan je uticaj morfologije patuljaste galaksije na formirane strukture u halou velike spiralne galaksije. Patuljasta galaksija je prezentovana pomoću modela N-tela u sa dve različite morfologije: dSph i patuljasta sa diskom. U oba slučaja satelitska galaksija ima istu masu. Za razliku od rezultata prezentovanih u radu Karademir et al. (2019), ovde je masa fiksirani parametar, a menjani su: 1. morfologija, 2. inklinacija orbite i 3. smer rotacije patuljaste sa diskom u odnosu na smer rotacije diska velike spiralne galaksije. Osobine formiranih struktura i distribucija materije satelitske galaksije zavise pored odnosa masa i od ovih parametara. Modeli galaksija korišćenih u simulacijama koje su izvršene u okviru disertacije, dati su u narednom poglavlju. Rezultati simulacija nastanka struktura u halou spiralne galaksija, dati su u poglavlju 3, a objavljeni u radu Milošević (2022). Ispitivanje uticaja morfologije satelitske galaksije na formirane strukture je od velike važnosti za proučavanje formiranja struktura u haloima velikih galaksija Lokalne grupe. Jedan takav slučaj formiranja zvezdanog toka u galaksiji M31 i osobine toka, prezentovan je u ovoj disertaciji u poglavlju 4.

1.5 Veliki zvezdani tok i zvezdane ljuske u halou galaksije M31

1.5.1 Veliki zvezdani tok (GSS)

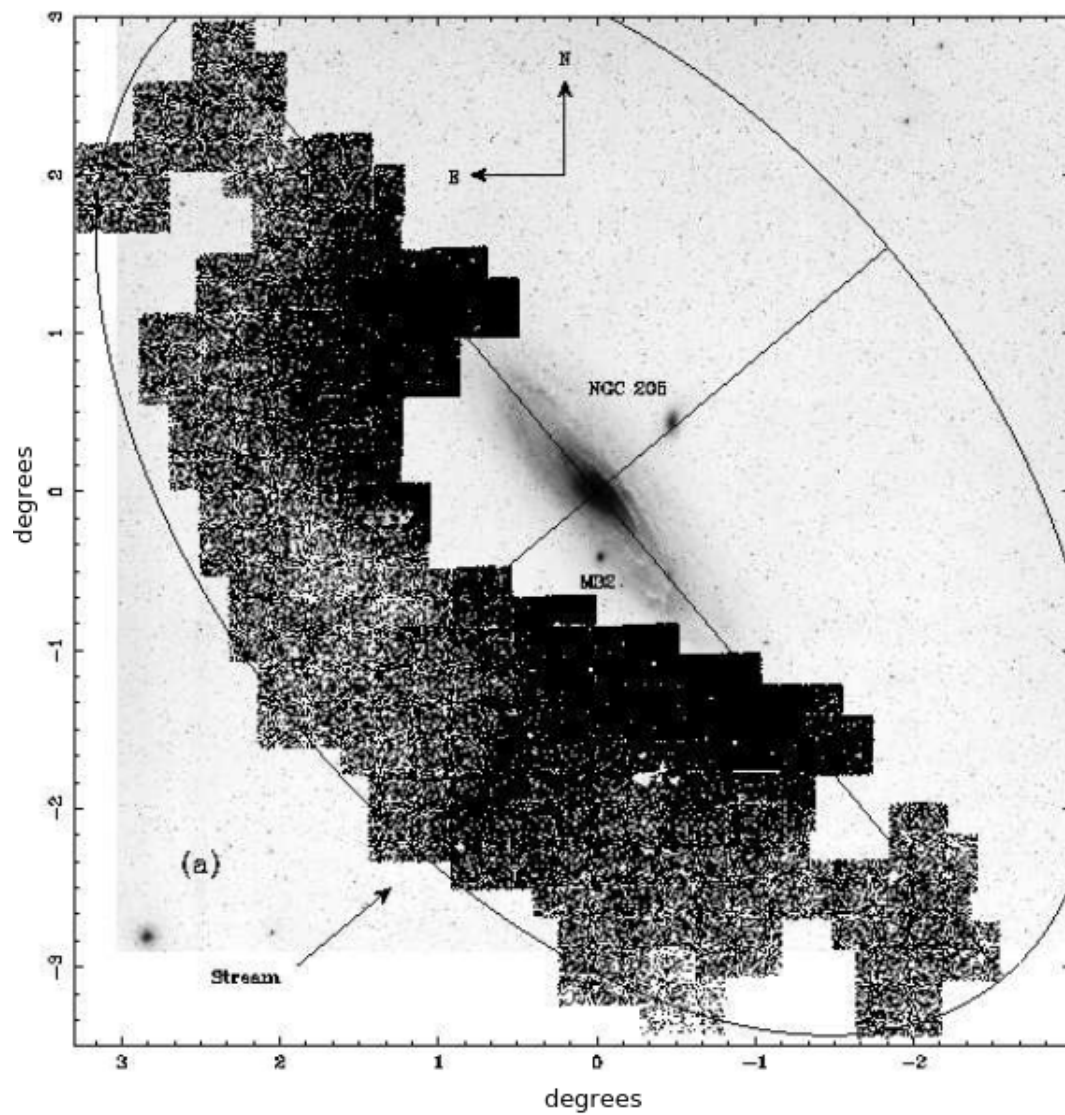
Sudari galaksija su važni u hijerarhijskom modelu nastanka masivnih galaksija. Velike masivne galaksije nastaju sudarima, odnosno spajanjem manje masivnih galaksija (npr. White & Rees, 1978; White & Frenk, 1991). Prilikom sudara galaksija i u spiralnim i u eliptičnim galaksijama mogu da nastanu zvezdani tokovi i ljuske, kao posledice plimskog rasipanja galaksija, odnosno dezintegracije manje masivne galaksije u gravitacionom polju masivnije. Ove strukture najčešće nastaju sudarima masivnih galaksija i njihovih satelita. Zvezdanu komponentu prati i gasna komponenta, ukoliko su galaksije bogate gasom. Strukture koje nastaju su posmatrane u haloima masivnijih galaksija (Atkinson et al., 2013; Hood et al., 2018). Poznavanje njihovih karakteristika daje mogućnost proučavanja osobina manje masivne galaksije koja se raspala. Bliski prolazi i sudari mogu

da prouzrokuju i nestabilnost u disku spiralne galaksije, koja može dovesti do deformacije diska, pojave prečage (Lang et al., 2014) i formiranja više kinematičkih grupa u disku. Osobine deformacija, ali i struktura formiranih u halou, zavise od mnogih parametara. Odnos masa dve galaksije je vrlo značajan i definiše vrstu sudara, odnosno da li se radi o malim ili velikim sudarima, dodatno različita morfologija galaksija koje učestvuju u sudaru vodi nastanku različitih struktura (Hernquist & Quinn, 1988; Hernquist & Quinn, 1989; Karademir et al., 2019). Orbita satelitske galaksije, zatim međusobna orijentacija momenta impulsa diskova, odnosno orijentacije diskova i smer njihove rotacije, utiče na formiranje struktura.

Govoreći o posmatranim tokovima uopšteno, koji su nastali usled gravitacione interakcije, odnosno plimskog raspada, u našoj Galaksiji je posmatran Magelanov tok (eng. *Magellanic Stream*) koji predstavlja tok materije između Velikog i Malog Magelanovog oblaka u halou Mlečnog puta (Wannier & Wrixon, 1972; Mathewson et al., 1974). Ovaj tok nije zvezdani, već gasni, pa je i otkriven u radio domenu, pošto je gasna komponenta svetla u ovom domenu usled netermalnih mehanizama zračenja. Primer zvezdanog toka je Veliki zvezdani tok (eng. *Giant Stellar Stream*, ili *Giant Southern Stream*, u daljem tekstu GSS) u galaksiji M31. Ovaj tok je otkriven 2001. godine posmatranjima Rodriga Ibata i saradnika (Ibata et al., 2001). Posmatranja su izvršena na “Isak Njutn” teleskopu (eng. *Isaac Newton Telescop*, INT), prečnika ogledala 2,5 m u optičkoj oblasti, u V filteru (u Džonsonovom sistemu) i prikazana na Slici 1.5.

Galaksija M31 je nama najbliža velika spiralna galaksija i njena blizina daje mogućnost kvalitetnih posmatračkih podataka i ispitivanja struktura u njoj. U godinama koje su sledile, GSS je posmatran i fotometrijski i spektroskopski, a rezultati tih posmatranja su parametri koji određuju prostornu raspodelu zvezda u GSS, kao i raspodelu po brzinama, zatim metaličnost objekata u toku. Ovi posmatrački podaci dali su i ograničenja vrednostima parametara u teorijskim modelima nastanka ove strukture.

GSS se prostire na nebu na oko 6 stepeni, odnosno 80 kpc od centra M31 (Cohen et al., 2018). Srednja udaljenost za osam posmatračkih polja duž toka je data u radu McConnachie et al. (2003). Pošto heliocentrična daljina polja raste, kako se odmičemo od M31 i ukoliko je centar koordinatnog sistema u centru diska M31, a z-osa usmerena duž pravca vizure, (nalevo je istočna strana, severna nagore) GSS se prostire u pozitivnom smeru z-ose, odnosno zvezde u GSS imaju pozitivne z-vrednosti. Blizina M31 i mogućnost detaljnijeg posmatranja ove galaksije doveli su do otkrića većeg broja struktura, od kojih je svakako GSS najveća. PAndAS (*PanAndromeda Archeological Survey*) posmatranja su



Slika 1.5: Prva posmatranja GSS. U jugoistočnom delu haloa M31 vidi se zvezdana struktura označena na slici kao “Stream”. Slika je preuzeta iz rada Ibata et al. (2001).

od velikog značaja za proučavanje struktura u halou M31 (Ibata et al., 2007, 2014; Martin et al., 2016; McConnachie et al., 2018). Nakon otkrića GSS usledila su posmatranja koja su otkrila NE i W zvezdane ljuske, kao i druge strukture (Ferguson et al., 2002; Bellazzini, 2008; McConnachie et al., 2003; Conn et al., 2016) i određena je prostorna konfiguracija GSS-a. U radovima McConnachie et al. (2003) i Conn et al. (2016) date su udaljenosti određenih posmatračkih polja duž GSS od centra M31, kao i heliocentrična udaljenost. Pored ispitivanja morfologije struktura haloa M31, izvršena je i analiza brzina zvezda u GSS (Ibata et al., 2004; Guhathakurta et al., 2006; Gilbert et al., 2009, 2018). Izmerene su brzine u nekoliko posmatračkih polja duž GSS. Analiza brzina zvezda u toku otkrila je vrlo kompleksnu kinematičku strukturu toka, odnosno više kinematičkih grupa. Najveći broj objekata se grupiše u dve kinematičke grupe koje su razdvojene za oko 100 km/s duž radijalnog rastojanja od oko 7 kpc. Ova razlika je otkrivena u raspodeli zvezda po komponentama brzina koje leže u pravcu vizure (Kalirai et al., 2006a; Gilbert et al., 2009). Izmerena je ukupna luminoznost GSS koja iznosi $3,4 \cdot 10^7 L_{\odot}$, dok je ukupna zvezdana masa $M_{GSS} \approx 2,4 \cdot 10^8 M_{\odot}$ (Ibata et al., 2001; Fardal et al., 2006). Pored GSS, nakon otkrića Severoistočne zvezdane ljuske (eng. *Northeast shelf*, NE), Zapadne zvezdane ljuske (eng. *West shelf*, W) i drugih struktura (Ferguson et al., 2002; Fardal et al., 2007), ispitivanjem dijagrama boja-magnituda (Ferguson et al., 2005; Richardson et al., 2008) primećeno je da je ovaj dijagram za zvezdane ljuske sličan dijagramu za GSS, što ide u prilog da ove strukture vode poreklo od iste galaksije i da su nastale u istom sudaru (Ibata et al., 2004; Fardal et al., 2007). Sa poznatom prostornom raspodelom zvezda, kao i raspodelom po brzinama usledilo je teorijsko ispitivanje mogućeg scenarija nastanka struktura u halou M31.

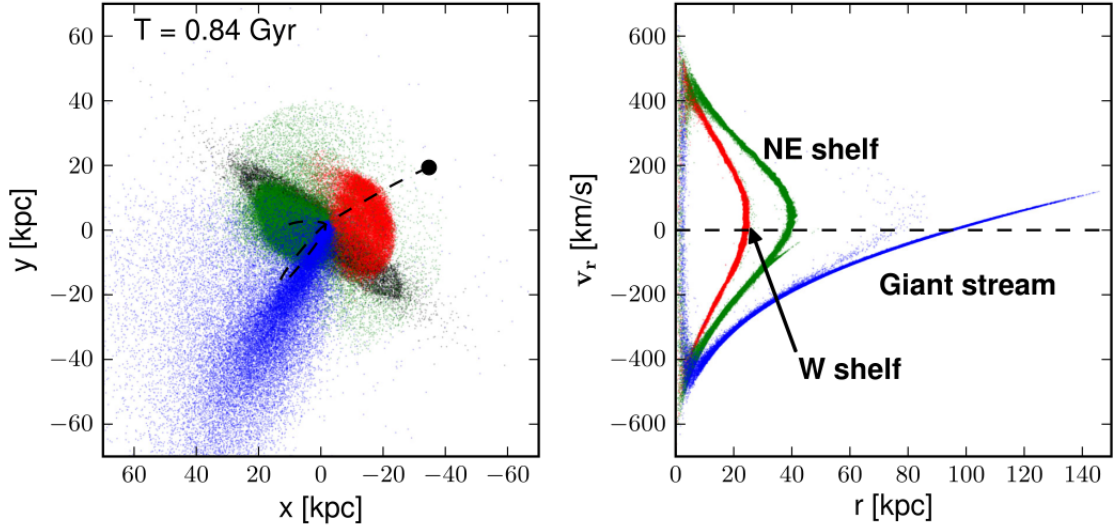
Karakteristike zvezda u GSS, zatim NE i W ljuskama sugerišu da ove strukture potiču od iste galaksije i da su nastale u sudaru te patuljaste galaksije sa M31. Potrebno je naći najverovatniju orbitu, masu i morfologiju patuljaste galaksije. U radovima Geehan et al. (2006), Fardal et al. (2007), Fardal et al. (2008) ispitan je scenario nastanka GSS i zvezdanih ljuski. Korišćen je analitički model za M31 galaksiju i model N-tela za patuljastu galaksiju. Orbita patuljaste galaksije je praćena od 45 kpc pri čemu se smatralo da je na tom rastojanju galaksija već izgubila svoj halo tamne materije usled dinamičkog trenja, odnosno plimskog ogoljavanja. Masa GSS sugerise kolika bi mogla da bude barinoska masa patuljaste galaksije od koje je GSS nastao. Fardal i saradnici su reprodukovali posmatrane karakteristike GSS (Fardal et al., 2007) kao i NE i W ljuski (Fardal et al., 2013) koristeći model patuljaste galaksije koji sadrži centralni oval i disk i analitički model za M31. Pre toga, u radu Geehan et al. (2006) dat je model M31,

odnosno profili gustina komponenata: centralnog ovala, diska i haloa tamne materije na osnovu posmatranih profila sjaja centralnog ovala i diska. Procenjena masa M31 do radijusa od 125 kpc iznosi $(7,4 \pm 1,2) \cdot 10^{11} M_{\odot}$. Prema modelu prikazanom u Fardal et al. (2007) patuljasta galaksija sa udaljenosti od 45 kpc kreće se u gravitacionom polju Andromede po putanji koja je skoro radijalna. Nakon 840 miliona godina formira se GSS. Iako ovaj model dobro reprodukuje posmatranja (Ibata et al., 2001; McConnachie et al., 2003; Ibata et al., 2004; Guhathakurta et al., 2006), korišćenje analitičkog modela za M31 galaksiju ima uticaja na dinamičku evoluciju zbog uračunavanja dinamičkog trenja. Takođe, ukupna masa patuljaste galaksije, odnosno masa njenog haloa tamne materije, nije poznata.

Alternativni scenario sudara M31 i satelitske galaksije je prikazan u radu Sadoun et al. (2014). Ovaj rad analizira i slučaj prikazan u Fardal et al. (2007) (Slika 1.6) i novi scenario koji podrazumeva patuljastu sferoidnu galaksiju koja sadrži sferno-simetrično raspoređenu barionsku materiju i sferni halo tamne materije koji ima dvadeset puta veću masu od barionske komponente. Nakon reprodukovanih rezultata iz Fardal et al. (2007), izvršene su simulacije sa satelitskom galaksijom koja sadrži tamnu materiju i sudara se sa M31, krećući se po svojoj prvoj orbiti oko M31 i u istom sudaru formira zvezdani tok i ljuske. Početna udaljenost patuljaste galaksije u simulaciji je oko 200 kpc. Ova postavka simulacije obezbeđuje realnije praćenje dinamičke evolucije patuljaste galaksije, odnosno postepeno gubljenje tamne materije usled kretanja u gravitacionom polju M31. To utiče na vremensku skalu sudara i formiranja struktura. Takođe, sama orbita je realnije reprodukovana nego u slučaju analitičkog potencijala, ili analitički uračunatog dinamičkog trenja. Ispitana su dva modela patuljaste galaksije - diskasta i sferoidna. U slučaju sferne raspodele barionske materije, ispitani su Hernkvistov i Plamerov profil. Zaključak rada Sadouna i saradnika je da model koji koristi Plamerov profil i sferoidnu patuljastu galaksiju bolje fituje posmatračke vrednosti udaljenosti delova toka, što je prikazano na Slikama 1.7 i 1.8 (Sadoun et al., 2014).

Početna brzina patuljaste galaksije na orbiti oko M31 je nula, tj. ona počinje svoju izrazito radijalnu orbitu nakon zaustavljanja na Hablovoj struji (eng. *Hubble flow*). Nakon 2,7 milijardi godina od početka interakcije sa M31, formiraju se GSS i zvezdane ljuske sa karakteristikama kakve danas vidimo u posmatranjima.

Pored rada Sadoun et al. (2014), nastanak struktura u istom sudarnom procesu, razmatran je i u drugim radovima poput D'Souza & Bell (2018), gde je satelitska galaksija imala veću zvezdanu masu: $M = 2,5 \times 10^{10} M_{\odot}$, pri čemu se sudar odvija tokom dve milijarde godina.

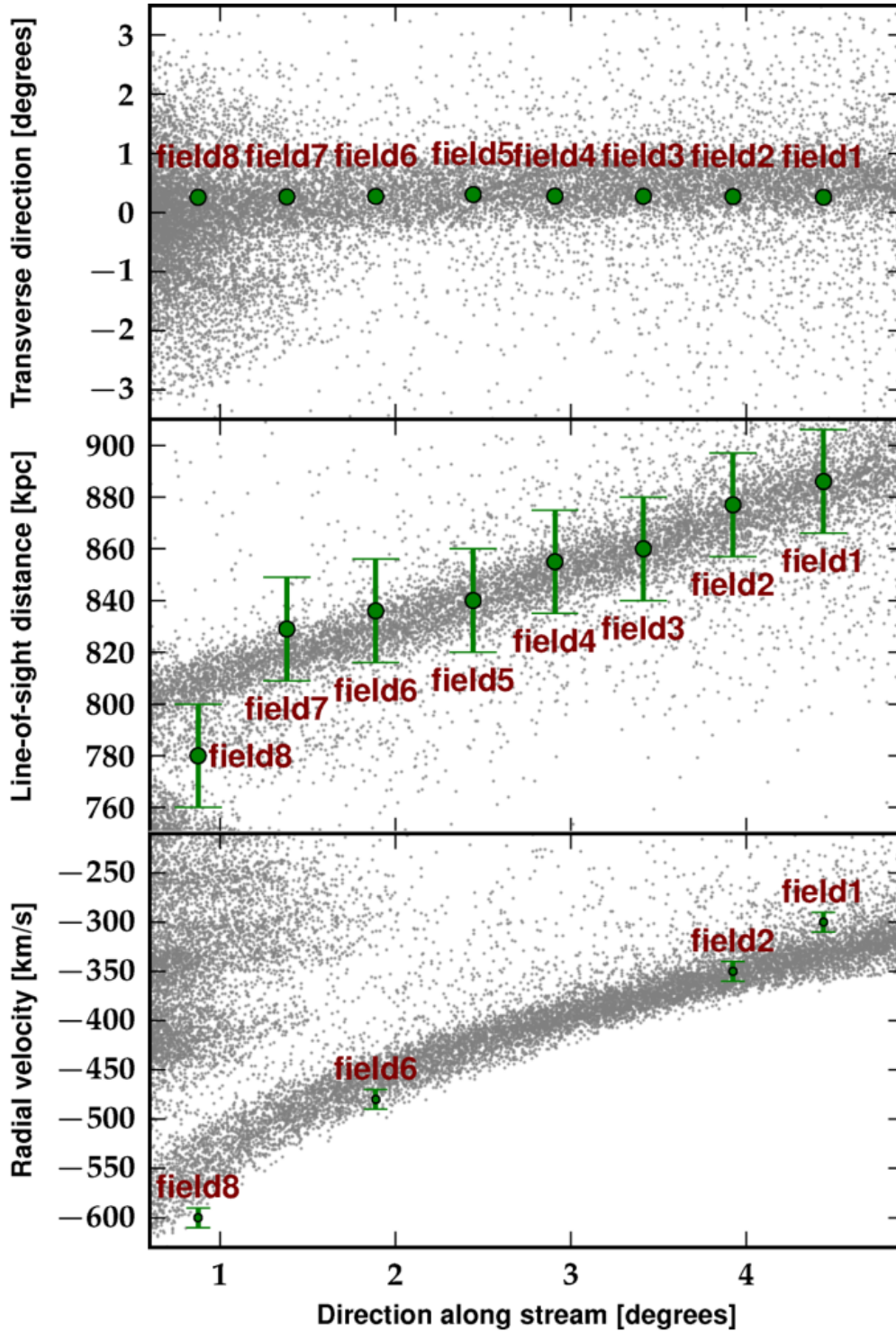


Slika 1.6: Formirane strukture u radu Sadoun et al. (2014) prema modelu datom u Fardal et al. (2007) nakon 0,84 miliona godina. Na levom panelu je prikazan izgled struktura u ravni neba, pri čemu isprekidana linija predstavlja orbitu patuljaste galaksije. Na desnom panelu je prikazana $v_r - r$ ravan, gde je v_r radijalna brzina čestica, a r njihova udaljenost od centra M31. Plavom bojom je prikazan Veliki zvezdani tok (GSS), zelenom bojom NE ljuska i crvenom bojom W ljuska. Slika je preuzeta iz rada Sadoun et al. (2014).

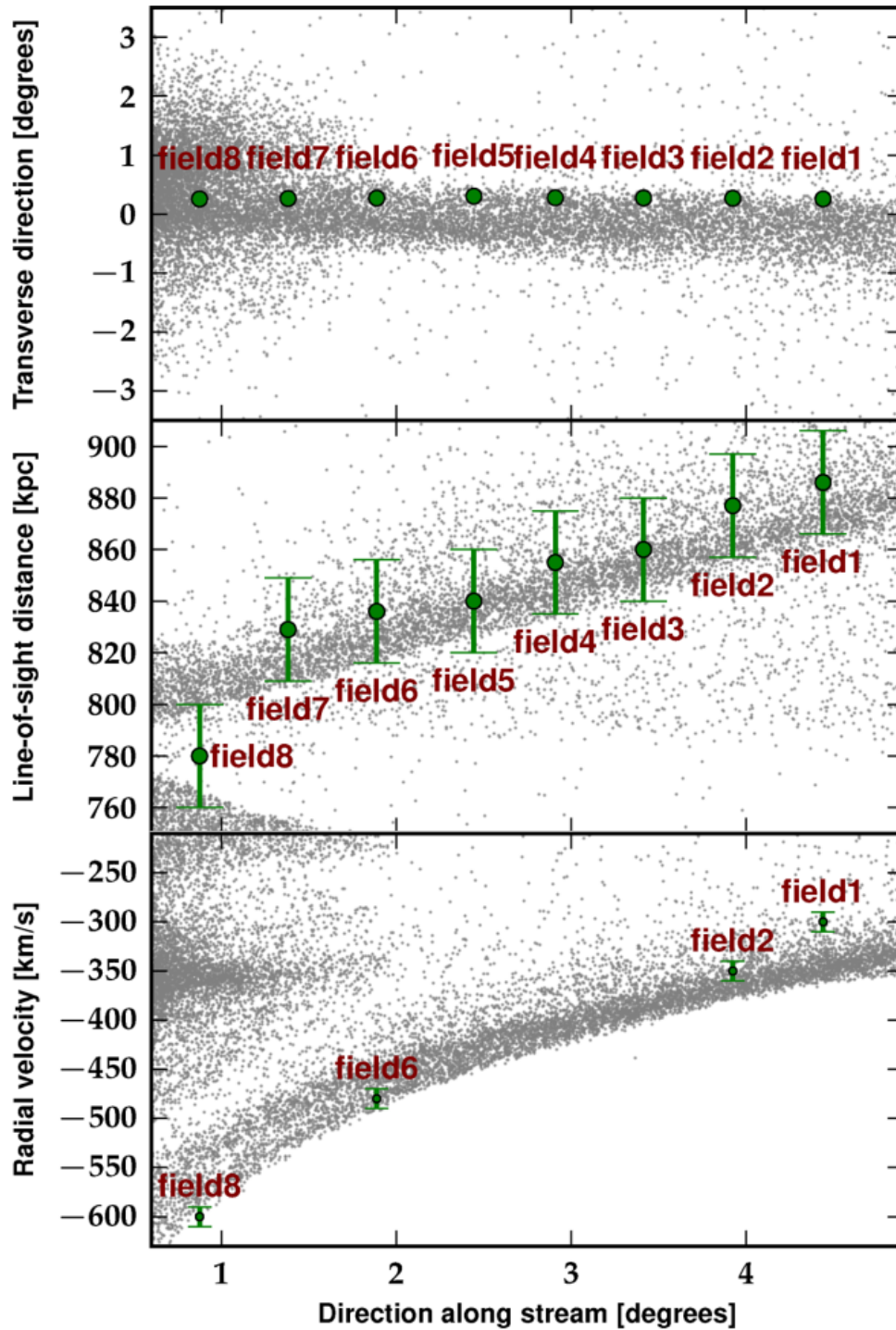
Morfologija satelitske galaksije je i dalje otvoreno pitanje koje je razmatrano u više radova. U radu Fardal et al. (2008) ispitan je slučaj satelita koji ima disk, dok je u pomenutom radu Sadoun et al. (2014) ispitan model satelita sa i bez diska, pri čemu je sferoidna patuljasta galaksija dala bolju podudarnost sa posmatranjima, konkretno posmatranim udaljenostima i distribucijom brzina. Više morfologija satelitske galaksije je istraženo u radu Miki et al. (2016a): patuljasta eliptična, patuljasta nepravilna, i patuljasta spiralna galaksija, dok je model patuljaste galaksije sa debelim diskom analiziran u radu Kirihaara et al. (2017).

Hamer i saradnici (Hammer et al., 2010, 2013) su analizirali mogućnost nastanka struktura u jedinstvenom sudaru, kao i u više različitih sudara M31 i satelita ove galaksije. U radu Hammer et al. (2018) prikazana je hidrodinamička simulacija sudara koja za optimalnu vremensku skalu uzima interval između dve i tri milijarde godina. Pri tome, uzima se da je satelit već bio plimski ogoljen i da je u tom slučaju potrebno nekoliko stotina miliona godina da se formiraju strukture u halou M31.

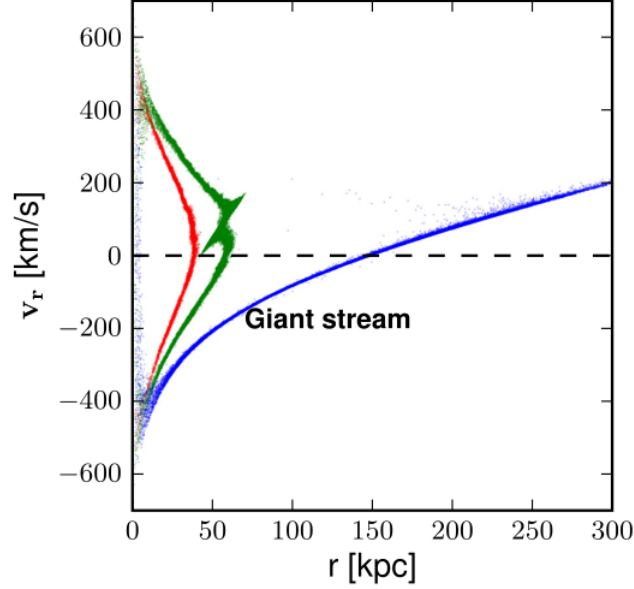
Na specifičnoj veoma radijalnoj orbiti usled dinamičkog trenja, patuljasta galaksija gubi



Slika 1.7: Poređenje vrednosti parametara simuliranih i posmatranih vrednosti u GSS. Prikazani su rezultati za sferni model patuljaste galaksije sa Plamerovim sfernim profilom barionske materije u radu Sadoun et al. (2014). Gornji panel predstavlja posmatračka polja iz rada McConnachie et al. (2003); srednji panel heliocentrične udaljenosti polja duž toka; dok donji panel prikazuje raspodelu brzina duž toka, pri čemu su posmatrane vrednosti za četiri polja preuzete iz Ibata et al. (2004). Na svim panelima sivom bojom su prikazane čestice iz simulacije, dok su zelenom bojom predstavljene posmatrane vrednosti. Slika je preuzeta iz rada Sadoun et al. (2014).



Slika 1.8: Poređenje vrednosti parametara simuliranih i posmatranih vrednosti za GSS za diskasti model patuljaste galaksije iz rada Sadoun et al. (2014). Svi simboli imaju isto značenje kao na Slici 4.2. Posmatrački podaci za udaljenost su preuzeti iz McConnachie et al. (2003), a za brzine iz rada Ibata et al. (2004). Slika je preuzeta iz rada Sadoun et al. (2014).



Slika 1.9: Rezultati simulacije iz rada Sadoun et al. (2014). Čestice simulacije su prikazane u $r-v_r$ ravni. Plavom bojom je prikazan GSS, zelenom NE, a crvenom W ljuska. U regionu NE ljuske se nalazi i ostatak patuljaste galaksije. Slika je preuzeta iz rada Sadoun et al. (2014).

gotovo sav materijal - najpre halo tamne materije, zatim i barionsku materiju. U zavisnosti od parametara sudara i vremenskog intervala tokom kojeg se sudar odvija, moguće je da centralni deo galaksije “preživi”, odnosno da se može videti u posmatranjima. U radu Sadoun et al. (2014) je dat fazni grafik $r-v_r$ gde je r radijalna udaljenost čestica iz simulacije od centra M31 (Slika 1.9), a v_r njihova radijalna brzina. Ovi grafici su pogodni jer se na njima jasnije vide formirane strukture. Pored GSS, NE i W zvezdanih ljuski, vidi se i ostatak patuljaste galaksije u blizini NE ljuske.

1.5.2 Metaličnost Velikog zvezdanog toka

Posmatranjima u nekoliko kolaboracija, gotovo je u potpunosti konstruisana slika prostornog rasporeda materije i raspodele brzina u strukturama nastalim u sudaru Andromede i patuljaste galaksije. Pored dinamičkih osobina, zahvaljujući fotometrijskim i spektroskopskim posmatranjima GSS i zvezdanih ljuski, saznali smo mnogo o fizičkim osobinama, pre svega o metaličnosti ovih struktura. Metaličnost je definisana kao logaritam odnosa količnika broja atoma gvožđa i vodonika za neku zvezdu i za Sunce, odnosno definicija je data izrazom (Carroll & Ostlie, 1996):

$$[\text{Fe}/\text{H}] = \log_{10} \left(\frac{N_{\text{Fe}}}{N_{\text{H}}} \right) - \log_{10} \left(\frac{N_{\text{Fe}}}{N_{\text{H}}} \right)_{\odot} \quad (42)$$

pri čemu se $[\text{Fe}/\text{H}]$ izražava u decimalnom eksponentu, skraćeno “dex” (eng. *decimal exponent*).

Hemijski sastav je ispitan u radovima zasnovanim na fotometrijskim posmatranjima (Ibata et al., 2007; Brown et al., 2006a, 2009), kao i spektroskopskom analizom (Koch et al., 2008; Gilbert et al., 2009, 2014). Fotometrijski rezultati (za spektroskopski potvrđene RGB¹ zvezde u galaksiji M31) o zastupljenosti hemijskih elemenata i kinematici su dati u okviru SPLASH kolaboracije (Guhathakurta et al., 2006; Kalirai et al., 2006a; Gilbert et al., 2009, 2014). Spektroskopska analiza je data u kolaboraciji “Elemental Abundances in M31 galaxy”(Gilbert et al., 2019; Escala et al., 2020a,b; Escala et al., 2021).

Od posebnog značaja su snimljeni gradijenti metaličnosti u GSS. Ukoliko se u nekoj strukturi može videti gradijent metaličnosti, onda možemo da zaključimo nešto o dinamičkoj istoriji nastanka te strukture, ali i o fizičkim karakteristikama same patuljaste galaksije čijim raspadanjem je ta struktura nastala. U radu Ibata i saradnika (Ibata et al., 2007) primećen je gradijent metaličnosti u pravcu koji je normalan na pravac prostiranja GSS, između centralnog dela toka i perifernog. Posmatranja su izvršena u nekoliko polja. Ovaj rezultat je potvrđen spektroskopski u Gilbert et al. (2009), gde je naveden pad metaličnosti od centra ka obodu, od tzv. jezgra ka omotaču toka. Nakon što je snimljen gradijent u pravcu normalnom na tok, posmatrana je i raspodela metaličnosti u pravcu toka. U radovima Conn et al. (2016) i Cohen et al. (2018) predstavljena su dva gradijenta metaličnosti duž toka. Posmatranja su izvršena u 19 posmatračkih polja. Na unutrašnjem delu toka, koji je najbliži centru M31, registrovana vrednost metaličnosti je -0,7 dex. Idući ka centralnom delu GSS, metaličnost raste do vrednosti -0,2 dex, da bi zatim ponovo pala na vrednost oko -1 dex u spoljašnjem delu toka, u poljima najudaljenijim od M31. U centralnom delu toka, gde je maksimum metaličnosti, posmatrana su dva pika u raspodeli (Conn et al., 2016).

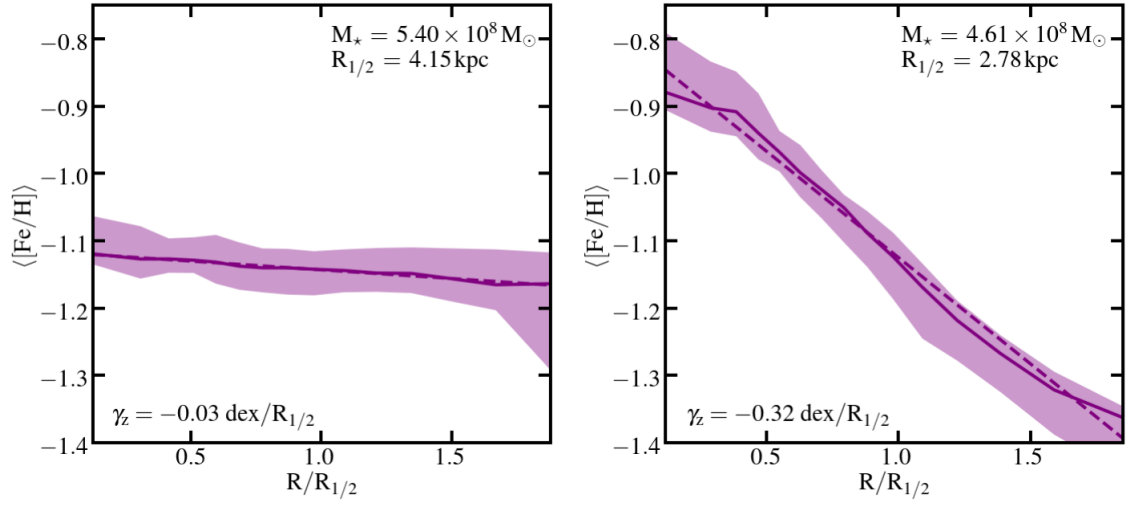
Poreklo gradijenta metaličnosti u GSS je povezano sa osobinama patuljaste galaksije, roditelja GSS. Gradijenti metaličnosti su inače posmatrani u spiralnim i patuljastim galaksijama, što je opisano u ranijim radovima (Koleva et al., 2009b,a; Spolaor et al., 2009; Ross et al., 2015). Takođe, metaličnost u galaksiji zavisi od zvezdane mase galaksije, tako da posmatrana metaličnost postaje ograničavajući parametar za masu, kroz relaciju masa-metaličnost (Gallazzi et al., 2005; Panter et al., 2008; Gonzalez Delgado et al., 2015; Kirby et al., 2013).

Veza između posmatrane metaličnosti i metaličnosti u patuljastoj galaksiji je data u radu Fardal et al. (2008). U radu Miki et al. (2016b), koji je motivisan posmatranjima gra-

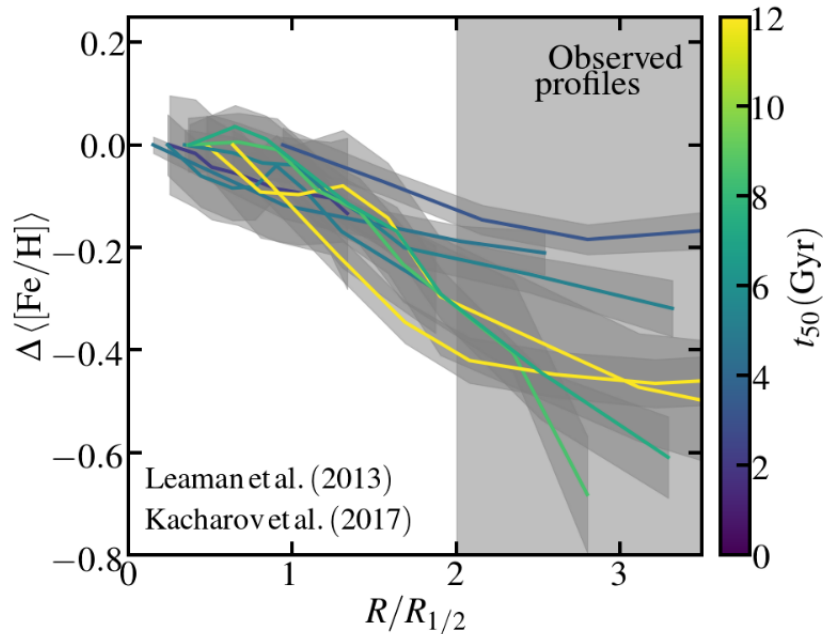
¹eng. *Red Giant Branch*, grana crvenih džinova

dijenta metaličnosti u patuljastim eliptičnim galaksijama (Koleva et al., 2009b,a; Spolaor et al., 2009), ispitani su i pozitivni i negativni gradijenti za patuljastu galaksiju. Rezultati simulacije su upoređeni sa nekoliko posmatračkih polja u radijalnom pravcu (Guhathakurta et al., 2006; Kalirai et al., 2006a,b; Koch et al., 2008; Gilbert et al., 2009), pri čemu se radi o manjem broju posmatračkih polja, koja se nalaze u oblasti R_{proj} između 20 i 40 kpc. Mogućnost da raspodela metaličnosti u GSS može da sugerise raspodelu u patuljastoj galaksiji je ispitana i u drugim teorijskim radovima (Miki et al., 2016a; Panithanpaisal et al., 2021). Posle fotometrijskih posmatranja Conn et al. (2016) i Cohen et al. (2018), koja su prva posmatranja metaličnosti duž GSS, postalo je moguće porediti simularinu raspodelu metalčnosti sa posmatranom, u 19 posmatračkih polja, koja pokrivaju raspon od 6 stepeni na nebu. Vrednosti metaličnosti za ova posmatračka polja, dobijene su pomoću dijagrama boje i magnitude na koje su ucrtane izohrone sa metalčnostima $[Fe/H]$ dobijenim iz evolutivnih modela objavljenih u katalogu “The Dartmouth Stellar Evolution Database” (Dotter et al., 2008). Posmatranja su vršena u optičkom delu spektra, pomoću Kanadsko-francusko-havajskog teleskopa (eng. *Canada-France-Hawaii Telescope*, CFHT), prečnika 3,6 m. Korišćeni su filteri kojima su dobijene i i g magnitude, odnosno $g - i$ indeks boje. Zavisnost metaličnosti od i magnitude je data u Bellazzini (2008). U radu Conn et al. (2016) data je metalčnost pomoću dvodimenzionalnog algoritma, odnosno zavisnosti i od boje i od magnitude. Korišćene su zvezde koje se nalaze na vrhu grane crvenih džinova (eng. *The Tip of the Red Giant Branch*, TRGB), koje se koriste i kao standardne sveće, za određivanje udaljenosti (Conn et al., 2011).

Osobine formiranog GSS, među kojima je i metalčnost i način samog formiranja zavisi od osobina patuljaste galaksije od koje je nastao i sudarnog scenarija. U Lokalnoj grupi posmatrane patuljaste galaksije nalazimo uglavnom u dve morfološke grupe (Mercado et al., 2021): nepravilne (dIrr) i sferoidne (dSph). Nepravilne galaksije se uglavnom nalaze usamljene, dok su sferoidne mahom sateliti većih galaksija (Mateo, 1998; Koch et al., 2007; Walker et al., 2007; McConnachie, 2012). Gradijenti metaličnosti mogu da se razlikuju i za galaksije iste mase. U radu Mercado et al. (2021), ispitani su gradijenti metaličnosti za patuljaste galaksije Lokalne grupe. Modelovani gradijenti dati su na Slici 1.10, gde je uočljiv radijalni gradijent kod dSph galaksija, dok je kod dIrr znatno manji nagib raspodele metaličnosti sa radijusom. Kod dSph modela, vrednost metaličnosti opada od centra ka obodu galaksije. To je primećeno i u posmatranjima, Slika 1.11 (Leaman et al., 2013; Kacharov et al., 2017). U radu Leaman et al. (2013) dati su posmatrački podaci metaličnosti za patuljaste galaksije Lokalne grupe, pri čemu su jasno uočljivi negativni radijalni gradijenti za dSph galaksije. Predstavljeni su spektroskopski podaci za 9 galaksija, od čega 3 pripadaju dIrr tipu, a 6 galaksija su dSph. U ovim



Slika 1.10: Modelovani gradijenti metaličnosti za dIrr (levo) i dSph (desno) galaksije Lokalne grupe u radu Mercado et al. (2021). Osenčeni regioni predstavljaju srednje vrednosti metaličnosti za 100 različitih uglova pod kojim vidimo galaksije. Punom linijom je predstavljena srednja metaličnost po svim projekcijama na datom 2-D radijusu (izraženom u jedinicama radijusa unutar kojeg je sadržano polovina mase, $R_{1/2}$), a isprekidanom linijom je dat fit pune linije pomoću metode najmanjih kvadrata. Nagib linearne zavisnosti je predstavljen sa γ_z . Slika je preuzeta iz rada Mercado et al. (2021).



Slika 1.11: Posmatrani radijalni gradijenti metaličnosti patuljastih galaksija u Lokalnoj grupi. Metaličnost opada od centra ka periferiji galaksija. Bojom je predstavljena starost galaksije, tj. t_{50} predstavlja medijanu starosti zvezda u galaksiji. Slika je preuzeta iz rada (Mercado et al., 2021).

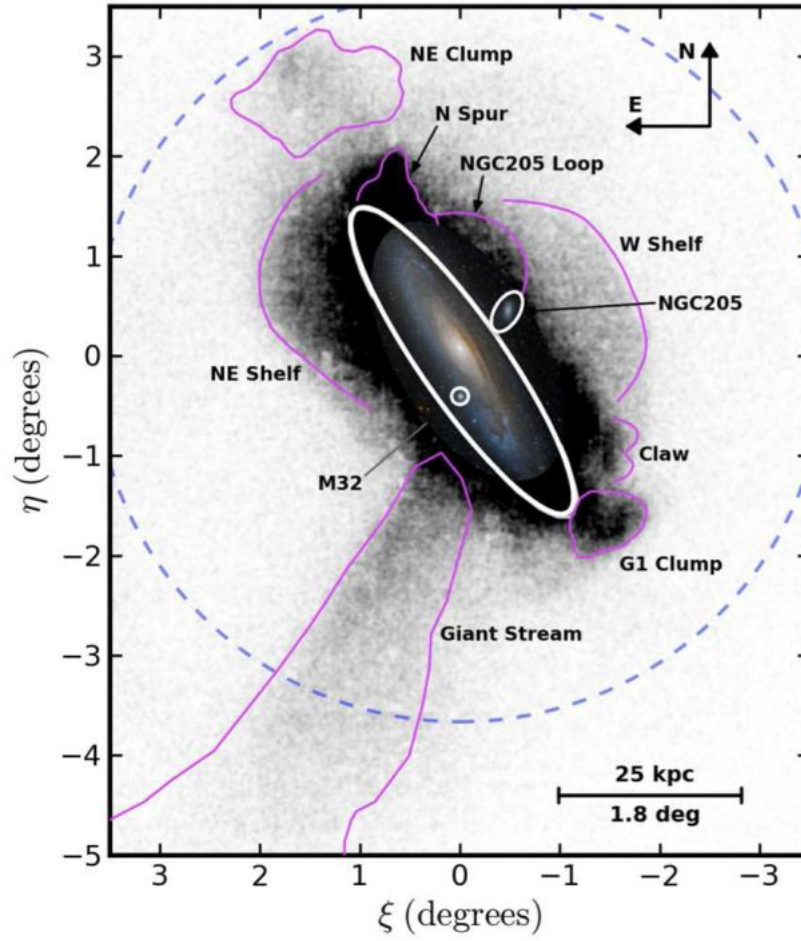
galaksijama su posmatrane na stotine zvezde na različitim galaktocentričkim radijusima, što je omogućilo analizu raspodele metaličnosti u njima (reference u Tabeli 1 iz rada Leaman et al., 2013). U radu Mercado et al. (2021) je analizirana i veza starosti i metaličnosti, sa zaključkom da je kod galaksija koje nisu prolazile kroz više faza akrecije i gubljenja gasa usled plimskih efekata, odnosno kod starijih galaksija (dSph), radijalni gradijent metaličnosti izraženiji. Raspodela metaličnosti u patuljastoj galaksiji je važan trag njene dinamičke istorije i evolucije zvezda i gasa.

U ovoj disertaciji ispitani su radijalni gradijenti metaličnosti u dSph galaksiji, pre sudara sa galaksijom M31, kako bi se objasnila raspodela metaličnosti u GSS. Predstavljene su simulacije sudara galaksije M31 i dSph galaksije i formiranje GSS. Upoređene su osobine simuliranog GSS, sa posmatranim karakteristikama i ispitana je početna raspodela metaličnosti u dSph galaksiji. Rezultati simulacija formiranja GSS i modelovanja metaličnosti toka, prikazani su u poglavlju 4 ove disertacije i objavljeni su u radu Milošević et al. (2022).

1.5.3 NE i W zvezdane ljuske

Mnoge posmatrane strukture u halou M31 su formirane sudarom M31 sa patuljastom galaksijom koja je njen satelit. Svakako najupečatljivija struktura je Veliki zvezdani tok, no pored toka, otkrivene su i druge strukture. Mapa haloa M31, ali i šireg okruženja galaksije prikazane su na Slici 1.12. U radu Ferguson et al. (2002) predstavljeno je otkriće Seveoistočne (NE) i Zapadne (W) ljuske. Poredeći dijagrame boje i magnitude, ove dve strukture verovato imaju isto poreklo kao i Veliki zvezdani tok (Fardal et al., 2006, 2007; Sadoun et al., 2014). Dodatna istraživanja su predstavljena u radovima Merrett et al. (2006) i Bhattacharya et al. (2021) gde su prikazana posmatranja planetarnih maglina u regionu NE zvezdane ljuske. Konzistentnost fizičkih osobina bazirana na hemijskoj analizi povećava verovatnoću da su strukture nastale od iste galaksije u istom sudarnom procesu (Ferguson et al., 2005; Brown et al., 2006b, 2008; Gilbert et al., 2007; Fardal et al., 2012; Richardson et al., 2008; Tanaka et al., 2010; Bernard et al., 2015).

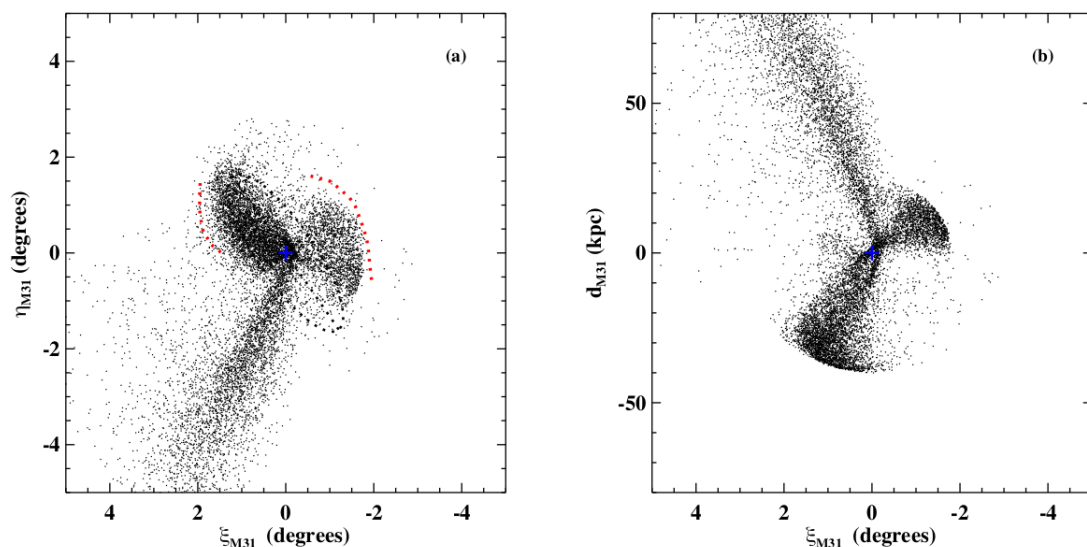
Nakon prvih posmatranja, NE i W zvezdane ljuske su reprodukovane teorijskim modelom u radu Fardal et al. (2008) i prikazane na Slici 1.13, gde su date i koordinate ivice ljuski. Sudarni scenario u kojem nastaju i zvezdane ljuske i GSS prikazan je i u drugim radovima (npr. Sadoun et al., 2014). Na skoro radijalnoj orbiti patuljasta galaksija se raspada u gravitacionom potencijalu Andromede i nakon prvog prolaza kroz perihel svoje putanje, rasuti materijal formira GSS, nakon drugog prolaza NE ljusku, a nakon trećeg prolaza W ljusku (Fardal et al., 2008; Sadoun et al., 2014; Escala et al., 2022). Nakon



Slika 1.12: PAndAS mapa oblasti haloa M31 i podstruktura nastalih sudarom sa patuljastom galaksijom. Slika je preuzeta iz rada Ferguson et al. (2002).

određivanja udaljenosti i brzina u posmatračkim poljima u oblastima ovih struktura i nakon potvrde numeričkih simulacija, GSS i W ljuska se nalaze dalje od nas u odnosu na M31, dok je NE ljuska bliža nama od M31 (Slika 1.13). U ravni normalnoj na pravac vizure, projektovana udaljenost NE ljuske od centra M31 iznosi oko 40 kpc, dok je udaljenost W ljuske oko 20 kpc (Fardal et al., 2008; Escala et al., 2022).

Morfologija patuljaste galaksije utiče na osobine formiranih struktura. Patuljasta sa diskom (dS) je razmatrana u radovima Fardal et al. (2007), Kirihaara et al. (2017), Miki et al. (2016b), dok je model sferoidne patuljaste (dSph) korišćen u simulacijama u radovima Sadoun et al. (2014) kao i u ovoj disertaciji. Motiv za ovaj model je svakako veća zastupljenost ovog morfološkog tipa u Lokalnoj grupi (Mercado et al., 2021). Oba modela pak, uspešno reprodukuju posmatrane karakteristike i GSS i zvezdanih ljuski. U ovim teorijskim radovima strukture su formirane od iste patuljaste galaksije. Bez obzira na morfologije satelitske galaksije, nakon drugog prolaska kroz pericentar putanje, formira-



Slika 1.13: Rezultati simulacije iz rada Fardal et al. (2008). Na levom panelu su prikazane strukture onako kako ih vidimo na nebu (crne tačke), dok su na desnom panelu prikazane udaljenosti tih struktura od centra M31, projektovane na ravan normalnu na pravac vizure. Crvenim tačkama na levom panelu označene su koordinate ivica zvezdanih ljuski projektovanih na ravan normalnu na pravac posmatranja. Plavom tačkom je označen centar M31, kao centar koordinatnog početka. Slika je preuzeta iz Fardal et al. (2008).

ju se zvezdane ljuske i na taj način se potvrđuje scenario jedinstvenog sudara satelitske galaksije i galaksije M31.

Vrednosti metaličnosti kao što je rečeno u regionu haloa M31, gde se nalaze i morfološke podstrukture su prezentovane u posmatračkim radovima. Jedan od najvažnijih pregleda haloa M31 je “Elemental Abundances in M31 survey”(Gilbert et al., 2019; Escala et al., 2020a,b). Ova polja su posmatrana i u pregledu “SPLASH survey”(Kalirai et al., 2006a; Gilbert et al., 2007, 2009; Fardal et al., 2012). Za GSS su date vrednosti metaličnosti duž zvezdanog toka (Conn et al., 2016; Cohen et al., 2018), kao i u pravcu normalnom na tok (Guhathakurta et al., 2006; Kalirai et al., 2006a; Ibata et al., 2007; Gilbert et al., 2009, 2014). U regionu NE i W ljuske date su posmatrane metaličnosti u nekoliko polja za NE ljusku (Escala et al., 2022), kao i metaličnosti za W ljusku (Fardal et al., 2012).

1.6 Ciljevi doktorske disertacije

Posmatranja struktura slabog sjaja u halou galaksije M31 (Ibata et al., 2001; Ferguson et al., 2002) bila su od velike važnosti za proučavanje sudara galaksije M31 i njene satelitske galaksije. U opštem slučaju nastanak ovih struktura zavisi od morfologije patuljaste galaksije. Modeli N-tela, patuljastih galaksija, kao i spiralne galaksije predstavljeni su u

drugom poglavlju.

Jedan od ciljeva ove disertacije je ispitivanje zavisnosti osobina formiranih struktura u sudaru, od morfologije patuljaste galaksije, zatim njene rotacije i nagiba orbite u odnosu na ravan diska spiralne galaksije. Glavni rezultati za različite scenarije sudara predstavljeni su u trećem poglavlju.

Pomoću posmatrane raspodele metaličnosti u GSS, moguće je rekonstruisati raspodelu metaličnosti u patuljastoj galaksiji od koje je tok nastao (Fardal et al., 2008; Miki et al., 2016b; Kirihara et al., 2017). Poznavanje početnog gradijenta metaličnosti u patuljastoj je važno za proučavanje evolucije patuljastih galaksija. U ovoj disertaciji upravo je modelovana raspodela metaličnosti u dSph galaksiji kao satelitu M31 koji se u njoj raspada i formira strukture. Radijalni gradijenti metaličnosti u patuljastim galaksijama mogu biti i pozitivni i negativni (Koleva et al., 2009b,a; Spolaor et al., 2009) i u slučaju GSS, cilj je ispitati da li negativan početni radijalni gradijent metaličnosti u patuljastoj galaksiji opisuje raspodelu metaličnosti u GSS nakon sudara i u pravcu toka i u pravcu normalnom na tok (poglavlje 4).

Pošto su strukture u halou M31 najverovatnije nastale u istom sudaru od iste satelitske galaksije, prirodno je očekivati da i raspodela metaličnosti u NE i W ljusci može da bude opisana istom inicijalnom raspodelom u patuljastoj galaksiji. Poređenjem posmatrane metaličnosti iz rada Escala et al. (2022) u nekoliko polja NE ljuske i teorijske metaličnosti dobijene iz početne raspodele u patuljastoj, imamo dodatni ograničavajući interval za početni gradijent, odnosno imamo dodatni test za početni gradijent i vezu između GSS i sistema zvezdanih ljuski. Vrednosti metaličnosti iz naše simulacije su upoređene i sa srenjim vrednostima metaličnosti za W ljusku, datim u radovima Fardal et al. (2012) i Escala et al. (2022). Rezultati ispitavanja metaličnosti NE i W zvezdane ljuske su prezentovani u poglavlju 5 ove disertacije i poslati u časopis “Monthly Notices of the Royal Astronomical Society” (MNRAS).

2 Modeli galaksija u sudaru

Galaksija M31 je nama najbliža spiralna galaksija. Ta blizina je pogodna da se iz posmatranja odrede parametri koji su važni za teorijsko modelovanje. Tri osnovne morfološke komponente koje su korišćene u modelu N-tela su: disk, centralni oval i halo. Disk i centralni oval reprezentuju barionsku materiju, dok je halo sačinjen od tamne materije. U radovima Geehan et al. (2006), Fardal et al. (2006, 2007, 2008), predstavljan je analitički model za M31, zatim je taj model korišćen u simulacijama sudara sa satelitom. Model M31 podrazumeva profile gustine za centralni oval, disk i halo tamne materije. Satelit je predstavljen kao sistem N-tela pri čemu su dati profili gustina centralnog ovala i diska. U ovom scenariju sudara formirani su GSS, kao i NE i W ljuske. U analitičkom modelu M31 nije bilo moguće na adekvatan način pratiti evoluciju ovih struktura, odnosno plimsko raspadanje satelitske galaksije od koje su ove strukture nastale. Razlog za to je dinamičko trenje, koje čak i kad je uračunato analitički (Binney & Tremaine, 2008) samo grubo reprodukuje putanju galaksije. U ovim simulacijama, koje reprezentuju M31 pomoću analitičkog potencijala, nije uzet u obzir halo tamne materije satelita, jer se podrazumeva da je galaksija već plimski ogoljena, odnosno da je dolazeći na rastojanje od 45 kpc već izgubila svoj halo. Simulacije su izvršene pomoću kôda PKDGRAV (Stadel, 2001). Radovi Fardala i saradnika upravo prate dalje evoluciju od tog rastojanja i dolaze do zaključka da je vremenski interval sudara galaksije M31 i njenog satelita oko 840 miliona godina. Kasniji radovi (Sadoun et al., 2014; Miki et al., 2016a; Hammer et al., 2018) odredili su vremenski interval sudara M31 i njenog satelita, koji iznosi između dve i tri milijarde godina, pri čemu je korišćen model N-tela za M31 galaksiju. U radu Sadoun et al. (2014) korišćen je kôd NBODYGEN, koji je kreiran od strane Sadouna i saradnika. U ovom radu predstavljen je scenario nastanka struktura u halou M31, koji je predstavljen sudarom M31 sa dSph satelitom. Pitanje uticaja morfologije, mase, početne pozicije, uopšte osobina patuljaste galaksije na formiranje podstruktura u halou spiralne galaksije je i jedno od pitanja kojim se bavi ova disertacija.

U radu Karademir et al. (2019) prikazane su simulacije sudara spiralne galaksije i patuljaste galaksije, pri čemu obe galaksije imaju iste profile gustina za centralni oval, disk i halo. Ispitana je zavisnost formiranih struktura od odnosa masa. Karademir i saradnici su za različite odnose masa i različite nagibe orbite satelitske galaksije, pokazali da su uglavnom cirkularni sudari odgovorni za formiranje zvezdanih tokova, dok su radijalni sudari odgovorni za zvezdane ljuske. Spiralna galaksije i njen satelit imaju iste morfologije.

U ovoj disertaciji ispitana je zavisnost osobina formiranih struktura u slučajevima

kada se morfologije patuljaste galaksije razlikuju, takođe u slučaju scenarija kada je satelit patuljasta galaksija sa diskom ispitan je i uticaj različite orijentacije vektora momenta impulsa. Rezultati simulacija formiranja struktura, kojima se bavi disertacija, prikazani su u radu Milošević (2022). Simulacije su realizovane za različite nagibe orbite satelitske galaksije u odnosu na disk spiralne galaksije.

Patuljasta galaksija ima dve morfologije - patuljasta sa diskom i dSph. Pri tome, masa galaksije je fiksiran parametar, odnosno ista je u oba slučaja. Profili gustine za dSph model isti su kao u modelu patuljaste galaksije koji je korišćen u simulacijama sudara satelitske galaksije sa M31. Jedan od predmeta proučavanja ove disertacije je upravo poseban slučaj formiranja struktura usled sudara galaksije M31 i patuljaste. Deo rezultata disertacije koji se odnosi na formiranje GSS, NE i W ljuske, zatim objašnjenje raspodele metaličnosti u GSS, prikazan je u radu Milošević et al. (2022).

2.1 Model spiralne galaksije

Pri generisanju modela N-tela, korišćen je programski paket GalactICs (Widrow et al., 2008). U ovom paketu gravitacioni potencijal se računa iz date mase i raspodele mase za svaku komponentu galaksije. Spiralna galaksija, koja po masi odgovara galaksiji M31, predstavljena je pomoću tri komponente: centralni oval, disk i halo. Za stabilan model uzima se onaj kod koga je za svaku komponentu zadovoljena teorema virijala, odnosno $2T/|\Omega| = 1$. Nakon što se kôd izvrši, ispisuje se fajl u kojem se nalazi sedam kolona i N vrsta.

Broj vrsta odgovara broju čestica, za svaku česticu se u jednoj vrsti ispisuju podaci za masu i komponentne položaja i brzina, odnosno m, x, y, z, v_x, v_y i v_z . Jedinica za masu je $2,39 \cdot 10^9 M_\odot$, za udaljenost kpc i za brzinu 100 km/s. Sistem čestica sa ovako dodeljenim masama, položajima i brzinama predstavlja početne uslove za simulaciju galaksije.

U ovom radu uzeto je da je masa M31 približno $\sim 10^{12} M_\odot$, a broj čestica koji reprezentuje ovu galaksiju je 467081. Ovaj broj čestica obezbeđuje istu rezoluciju kao u radu Sadoun et al. (2014): $10^5 M_\odot$ za čestice barionske materije i $10^6 M_\odot$ za tamnu materiju. Mase čestica svake komponente, broj čestica po komponentama i vrednosti ostalih parametara modela M31, dati su u Tabeli 1.

Model centralnog ovala je reprezentovan profilom gustine koji je projekcija Sersikovog profila, datog u radu Widrow et al. (2008). Ovaj profil je predstavljen sledećim izrazom:

$$\rho_b = \rho_{b0} \left(\frac{r}{r_b} \right) \exp(r/r_b)^{-1/n}, \quad (43)$$

pri čemu je ρ_{b0} gustina na $r = r_b$, r_b je skala dužine za centralni oval. Vrednost eksponenta n je 1.8 (Widrow et al., 2008).

Disk je predstavljen kombinacijom dva profila: eksponencijalni u ravni diska, odnosno x-y ravni i sech^2 u ravni normalnoj na disk.

Eksponencijalni profil je dat izrazom (Geehan et al., 2006; Sadoun et al., 2014):

$$\Sigma(R) = \frac{M_d}{2\pi R_d^2} e^{-\frac{R}{R_d}} \quad (44)$$

Ovde je M_d ukupna masa diska, Σ površinska gustina i R_d skala rastojanja za disk. U poslednje dve jednačine r je sferni radijus, a R cilindrični. Profili gustina su motivisani raspodelama sjaja. Pod pretpostavkom da najveći deo sjaja galaksije potiče od zvezdane komponente, raspodela sjaja odgovara raspodeli barionske materije. Skala dužine u nekom pravcu, ili ravni, predstavlja karakteristično rastojanje, odnosno često se definiše kao rastojanje na kojem gustina opada e puta.

U vertikalnom pravcu, normalnom na ravan diska, korišćen je sech^2 profil (Sadoun et al., 2014) i kombinovani profil je dat kao:

$$\rho(R, z) = \frac{\Sigma(R)}{2z_0} \text{sech}^2\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad (45)$$

Skala visine (debljine) diska je z_0 . Inklinacija diska galaksije M31 je 77° , a pozicioni ugao 37° (Fardal et al., 2007), dok je heliocentrično rastojanje do Andromede 784 kpc (Stanek & Garnavich, 1998).

Za profil gustine haloa tamne materije koršćen je Navaro-Frenk-Vajt profile (NFW) (Navarro et al., 1996):

$$\rho_h(r) = \frac{\rho_0}{\frac{r}{r_h} \left(1 + \frac{r}{r_h}\right)^2}, \quad (46)$$

a opštija forma je data u paketu GalactICs sa dodatnim članom kojim se profil odseca na određenom radijusu. To je potrebno pošto se teorijski profil kakav je predstavljen u (Navarro et al., 1996) proteže u beskonačno. Iz tog razloga je korišćena sledeća forma:

$$\rho(r) = \frac{2^{2-\alpha} \sigma_h^2}{4\pi r_s^2} \frac{\rho_0}{(r/r_s)^\alpha (1 + r/r_s)^{3-\alpha}} \frac{1}{2} \text{erfc}\left(\frac{r - r_h}{\sqrt{2}\delta_{r_h}}\right) \quad (47)$$

Radijus haloa na kojem gustina počinje da opada je r_h u gornjoj jednačini, σ_h je disperzija

raspodele brzina za čestice haloa, δ_{r_h} je rastojanje duž kojeg gustina pada na nulu, a r_s je skala dužine za halo. Eksponent α u NFW profilu je 1 u ovom slučaju. Plimski radijus je r_{200} i uzeto je da njegova vrednost aproksimativno jednaka rastojanju gde gustina padne na vrednost koja je 200 puta manja od centralne gustine. Ukupna masa haloa unutar radijusa r_{200} je $M_{200} = 8.8 \times 10^{11} M_\odot$. Vrednosti ovih parametara su date u Tabeli 1. Ove vrednosti su motivisane posmatračkim radovima: Kent (1989), Braun (1991) i Widrow et al. (2003).

komponenta	m [$M_\odot$]	N	r [kpc]	σ [km/s]	M [$M_\odot$]
centralni oval	3.36×10^5	96247	$r_b = 1.23$	393	3.2×10^{10}
disk	3.36×10^5	108929	$R_d = 6.82$ $z_0 = 0.57$		$3.66 \times 10^{10} M_\odot$
halo	3.36×10^6	261905	$r_h = 122.5$ kpc $\delta_{r_h} = 12$ $r_s = 8$	525	8.8×10^{11}

Tabela 1: Vrednosti parametara za model N-tela galaksije M31 koji su korišćeni u programskom paketu GalactICs, gde je m masa čestice, N broj čestica svake komponente, M masa komponente, r skala dužine svake komponente, a σ je disperzija brzina.

2.2 Model patuljaste galaksije

U cilju ispitivanja osobina struktura nastalih sudarima spiralne galaksije i njenog satelita, generisano je više modela satelitske galaksije. U prvom setu simulacija korišćene su sferoidna patuljasta galaksija (dSph) i patuljasta galaksija koja ima disk.

Patuljasta galaksija sa diskom predstavlja spiralnu galaksiju skaliranu na manju dimenziju. Profili gustine za disk, centralni oval i halo tamne materije su isti kao za spiralnu galaksiju M31, ali sa drugim vrednostima parametara. Sličan postupak je primenjen u radu Karademir et al. (2019). Vrednosti parametara za oba morfološka tipa patuljastih galaksija su dati u Tabeli 2.

Postoji više različitih modela za satelitsku galaksiju čijim raspadanjem nastaje GSS u M31. Različite morfologije su korišćene kako bi se objasnio nastanak GSS i drugih zvezdanih struktura, pre svega ljuski. U radovima Fardal et al. (2007, 2008) i Sadoun et al. (2014) ispitan je scenario nastanka morfoloških podstruktura u halou M31 sa patuljastom galaksijom sa i bez diska. U simulacijama nastanka GSS, uzimajući u obzir zaključke iz rada Sadoun et al. (2014), ispitan je sudar M31 i patuljaste sferoidne galaksije (dSph) koja je njen satelit. Ovaj model patuljaste uključuje barionski sferni

Model	komponenta	M [$M_\odot$]	r [kpc]	σ [km/s]
dSph	barionska materija	$2,18 \cdot 10^9$	1,03	93
	halo tamne materije	$2,4 \cdot 10^{10}$	5	185
patuljasta sa diskom	disk	$1,69 \cdot 10^9$	R_d 0,8	
			$z_0 = 0,4$	
	centralni oval	$0,49 \cdot 10^9$	0,4	78
	halo tamne materije	$2,2 \cdot 10^{10}$	5	127

Tabela 2: Vrednosti parametara za model N-tela za patuljastu galaksiju. M je masa svake komponente, r skala dužine, a σ je disperzija brzina.

komponenta	m [$M_\odot$]	N	r [kpc]	σ [km/s]	M [$M_\odot$]
barionska materija	1.66×10^4	131072	1.03	93	2.18×10^9
halo tamne materije	1.66×10^5	248809	5	242	4.13×10^{10}

Tabela 3: Vrednosti parametara za model N-tela patuljaste sferoidne galaksije od koje nastaje GSS, pri čemu je m masa jedne čestice, N broj čestica po komponentama, r skala dužine, σ disperzija brzina, a M masa komponente.

centralni oval i sferni halo tamne materije.

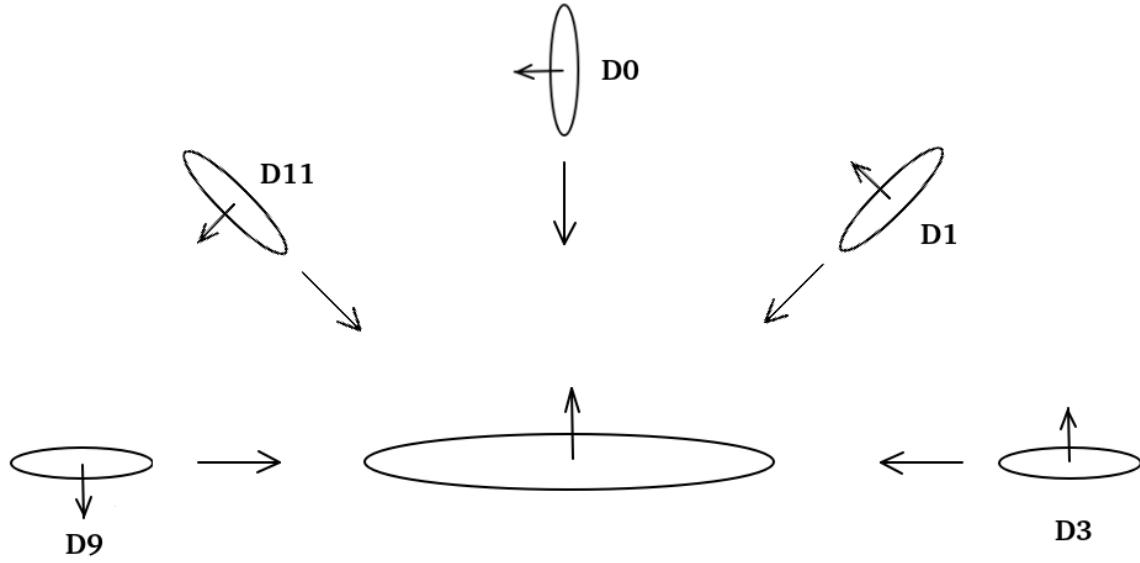
Centralni oval patuljaste galaksije je modelovan kao i centralni oval galaksije M31, profilom gustine koji je prestavljen jednačinom (43), pri čemu je barionska masa patuljaste galaksije $2,18 \cdot 10^9 M_\odot$. Ista vrednost za masu barionske komponente satelitske galaksije je korišćena u radovima Fardal et al. (2006) i Sadoun et al. (2014). Barionski deo satelitske galaksije određen je masom samog GSS, koja je određena iz posmatranja i iznosi $2,4 \cdot 10^8 M_\odot$ (Ibata et al., 2001; Fardal et al., 2006). Nakon sudara, čestice koje završe u regionu koji odgovara GSS, imaju ukupnu masu koja je sugerisana posmatranjima. Za razliku od barionskog dela, masa tamnog haloa nije tako dobro određena. Potrebno je modelovati halo tamne materije patuljaste galaksije i u tu svrhu je korišćen kosmološki relevantniji scenario sudara i odnos mase barionske i tamne materije koji je primenjiv na galaksije Lokalne grupe i prezentovan u radu Brook et al. (2014). Tamni halo je 20 puta masivniji od barionskog dela i masa haloa je $4,13 \cdot 10^{10} M_\odot$. Profil gustine je generalizovani NFW profil, predstavljen jednačinom (47). Broj čestica svake komponente, kao i mase čestica su date u Tabeli 3.

2.3 Parametri sudara

Sudarima galaksija, kao što je već rečeno nastaju strukture koje su posledica plimskog raspadanja satelitske galaksije u gravitacionom polju velike spiralne galaksije koja u ovom slučaju ima morfologiju kao M31 galaksija. Osobine struktura zavise od velikog broja parametara i u ovom radu su ispitani sudarni procesi za različite scenarije, odnosno početne pozicije, morfologije i orijentacije patuljaste, satelitske galaksije. Prvi cilj je bio naći zavisnost načina formiranja struktura od morfologije galaksije od koje nastaju. Postavljeno je osam različitih početnih uslova patuljaste galaksije za pet različitih pozicija, odnosno inklinacija orbita. Kad govorimo o početnoj inklinaciji orbita, misli se na ugao u odnosu na ravan velike spiralne galaksije, pri čemu se koordinatni početak nalazi u centru diska i sam disk je postavljen u x-y ravni. U radu Karademir et al. (2019) je testirano pet orbita zarad ispitivanja kako formiranje struktura zavisi od upada satelitske galaksije sa diskom. U ovom radu smo zainteresovani kako morfologija utiče na formiranje struktura za različite upade, pri čemu ispitujemo sferoidnu patuljastu galaksiju (dSph) i patuljastu galaksiju sa diskom. Parametri modela ove dve galaksije su dati u Tabeli 2. Obe galaksije imaju približno istu masu, tako da razlika mase ne diktira sudarni scenario i vremenski interval plimskog raspadanja.

Za dSph model su testirane tri pozicije i još dve dodatne za patuljastu sa diskom. Dodatne dve pozicije za patuljastu sa diskom su ispitane zbog različite orijentacije vektora momenta impulsa, odnosno različitog smera rotacije diska velike spiralne galaksije i patuljaste sa diskom. Pozicioni uglovi su 0, 45, 90, 135 i 180 stepeni, kao što je prikazano na Slici 2.1. U svim slučajevima početno rastojanje galaksija je 100 kpc i odabrano je tako da vremenski interval formiranja podstruktura premašuje milijardu godina, što je potrebno vreme za formiranje podstruktura u Lokalnoj grupi u halou galaksije koja je kao M31 (Sadoun et al., 2014; Hammer et al., 2018). Scenariji sudara za patuljastu galaksiju sa diskom su imenovani kao D3, D1, D0, D11 i D9, a za dSph S3, S1 i S0. Brojevi su pridruženi u obrnutom smeru od smera kazaljke na satu (Slika 2.1).

Za galaksiju M31 korišćen je model N-tela, kao i za patuljastu galaksiju za koju smatramo da je satelit M31 i čijom plimskom dezintegracijom nastaje GSS, kao i ljuske: NE i W. U radu Fardal et al. (2007), analizirana je satelitska galaksija bez tamnog haloa, koja je već plimski ogoljena, i osobine struktura dobijene iz posmatranja su reprodukovane. Sa druge strane, satelitska galaksija sa tamnom materijom je analizirana u radu Sadoun et al. (2014). U ovom radu patuljasta galaksija se sudara sa M31 na orbiti koja je skoro radijalna i evolucija sudara se prati od radijusa orbite koji je 200kpc, sa nultom početnom brzinom. Orbitalni parametri zavise od mase galaksije i njene brzine i menjanju se pro-



Slika 2.1: Početne pozicije za patuljastu galaksiju sa diskom - D scenariji. Pozicije za S3, S1 i S0 scenarije, koji odgovaraju pozicijama D3, D1 i D0 na slici, su korišćene za simulacije sa dSph galaksijom. Poslednje dve pozicije su simetrične sa prve dve, pa se ta klasa simulacija nije izvršavala.

menom mase satelita, što je opisano u radu Hammer et al. (2018), gde je različit odnos masa korišćen za različite scenarije sudara u kojima se formira GSS, bilo da su u pitanju mali ili veliki sudari. Pošto naš model takođe ima dvadeset puta masivniji tamni halo, početna pozicija patuljaste galaksije u sudaru sa M31 je takođe slična: početna brzina je nula, a početne koordinate su:

$$\begin{aligned} x &= -84,41 \text{ kpc} \\ y &= 108,47 \text{ kpc} \\ z &= -156,08 \text{ kpc} \end{aligned}$$

2.4 Simulacije N-tela pomoću Gadget2 koda

Ako galaksije koje modelujemo posmatramo kao sisteme N-tela (koja se ne sudaraju), onda su ti sistemi stabilni ukoliko su virijalizovani, odnosno ukoliko na njih možemo primeniti teoremu virijala (jednačina 16) koja kaže da je zbir dvostruke vrednosti kinetičke energije i potencijalne energije jednak nuli. Ukoliko je ovaj uslov zadovoljen, evolucija sistema je određena Bolcmanovom i Poasonovom jednačinom:

$$\frac{df}{dt} = \frac{\partial f}{\partial t} + \vec{r} \cdot \frac{\partial f}{\partial \vec{r}} + \frac{\partial \Phi}{\partial \vec{r}} \cdot \frac{\partial f}{\partial \vec{r}} \quad (48)$$

$$\nabla^2\Phi = -4\pi G\rho \quad (49)$$

Gravitacioni potencijal celog sistema predstavlja sumu gravitacionih potencijala komponenata sistema. Takođe, bitna osobina sistema kao što su galaksije, jeste mala koncentracija zvezda, odnosno mali broj zvezda po jedinici zapremine, a dinamičke vremenske skale su predugačke da bi bliski susreti, ili sudari zvezda bili značajni (Dehnen & Read, 2011).

Gustina i gravitacioni potencijal su dati jednačinama:

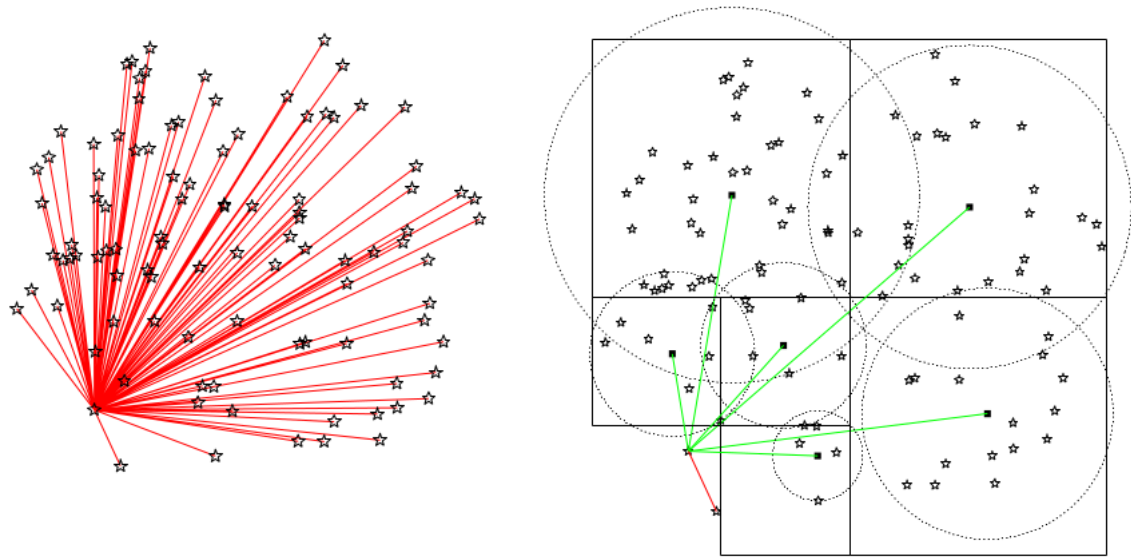
$$\rho(\vec{r}, t) = \int f(\vec{r}, \vec{v}, t) d\vec{v} \quad (50)$$

$$\Phi(\vec{r}, t) = -G \int \frac{\rho(\vec{r}', t)}{|\vec{r} - \vec{r}'|} d\vec{v} \quad (51)$$

Dinamički opis galaksije podrazumeva poznavanje funkcije raspodele mase, odnosno profila gustine. Ukoliko modelujemo galaksiju kao sistem N-tela, broj tela ne reprezentuje broj zvezda u galaksiji, već svih N-tela oponašaju funkciju raspodele po položajima i brzinama. U tom smislu, nakon evolucije galaksije posle nekog vremena, aktuelan raspored i brzine tela, ukoliko je galaksija stabilna, reprezentovani su istom funkcijom raspodele, odnosno profili gustine se ne menjaju. Aktuelni položaji i brzine zvezda mogu da se uzmu kao početni za numeričku integraciju i računanje narednih položaja i brzina. Broj čestica u simulaciji određuje masenu rezoluciju simulacije. Ako realnu masu galaksije podelimo na što veći broj čestica, detaljnije ćemo opisati strukturu galaksije, ali će i izvršavanje simulacije trajati dugo. Često je potrebno naći kompromis između efikasnosti izvršavanja simulacije i detaljnog opisa strukture galaksije.

Da bi se izračunali naredni položaji i brzine objekata u simulaciji sa određenim vremenskim korakom, potrebno je računati gravitacionu silu koja deluje na svaku česticu simulacije. Sila može da se računa direktnom metodom, odnosno računanjem dejstva između svaka dva tela, što je računski vrlo zahtevno. Barnes i Hut su razvili algoritam drveta (eng. *tree algorithm*, Barnes & Hut, 1986) za računanje sile (Slika 2.2).

Da bi se ispitao nastanak morfoloških struktura u sudarima galaksija, potrebno je izračunati gravitacionu silu koja deluje na svaku česticu u modelu galaksije koji je reprezentovan sistemom N-tela. U tu svrhu korišćen je kôd za kosmološke simulacije Gadget 2 (Springel, 2005). Ovaj kôd je paralelizovan i adaptiran da radi na većem broju procesorskih jezgara. Gravitacionu silu računa po Njutnovom zakonu, tako što sumira silu između svake dve čestice na malim rastojanjima, dok koristi algoritam drveta



Slika 2.2: Računanje sile direktnom sumacijom - levo i računanje sile metodom drveta (*eng. tree method*) - desno (Dehnen & Read, 2011).

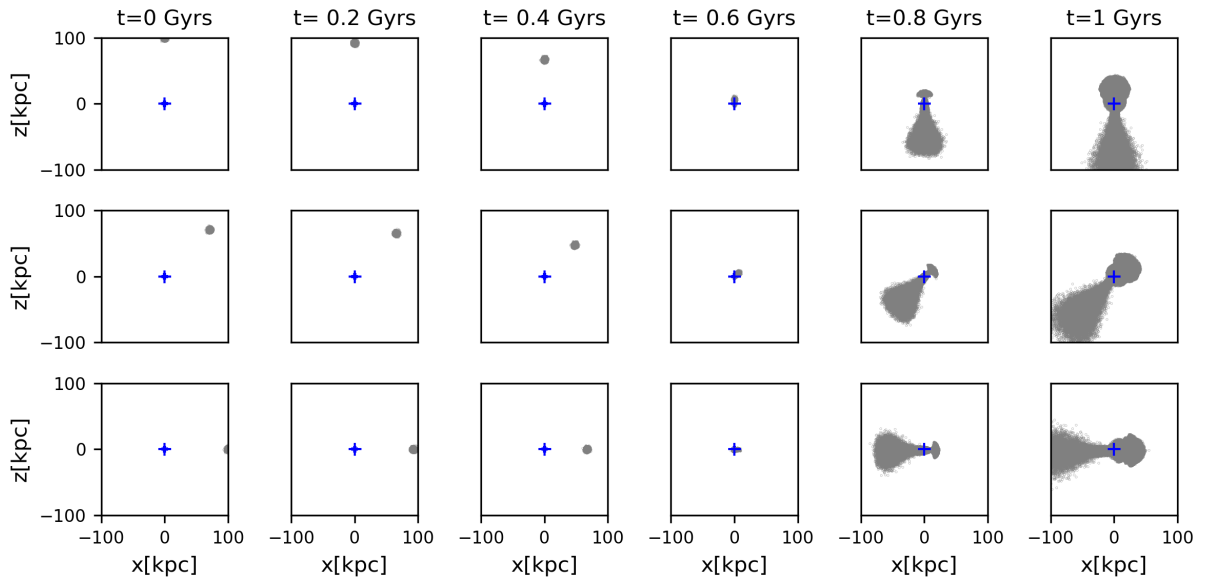
za velike udaljenosti. Pod uticajem gravitacione sile, čestice menjaju vektore položaja i brzina. Nove vrednosti položaja i brzina se upisuju u fajl. U simulacijama koje su izvršene, podaci o položajima i brzinama su zapisivani svakih 0,1 milijardi godina. Pri računanju sile, da bi se izbegla singularnost na malim rastojanjima, odnosno kada r teži nuli, uvodi se dužina ublažavanja ϵ (*eng. softening length*). Ovaj parametar obezbeđuje da gravitacioni potencijal bude glatka funkcija i da ne dolazi do singulariteta pri malim rastojanjima (Athanassoula et al., 2000; Barnes, 2012).

Fajl koji je generisan paketom GalactICs, a koji sadrži početne uslove, nakon prevođenja u binarni format, prosleđuje se kôdu Gadget 2 za realizaciju simulacije. Sam izvršni kôd koristi fajl sa početnim uslovima i izvršava simulaciju sa podešenim parametrima u parametarskom fajlu. Parametri koji se podešavaju su dužina trajanja simulacije, vremenski interval zapisa podataka u izlazne fajlove i dužina ublažavanja. Većina simulacija sudara je trajala $t = 3,5$ milijardi godina, sa dužinom ublažavanja od $\epsilon = 100$ pc i izlazni podaci su se ispisivali na svakih $\Delta t = 0,1$ milijardi godina. Ovi parametri su podstaknuti vremenskim intervalom formiranja struktura u galaksiji M31 i dinamičkim scenarijima u galaksijama slične mase, ranije opisanim u literaturi (Fardal et al., 2007; Hammer et al., 2010; Sadoun et al., 2014; Karademir et al., 2019).

3 Simulacije sudara spiralne i patuljaste galaksije

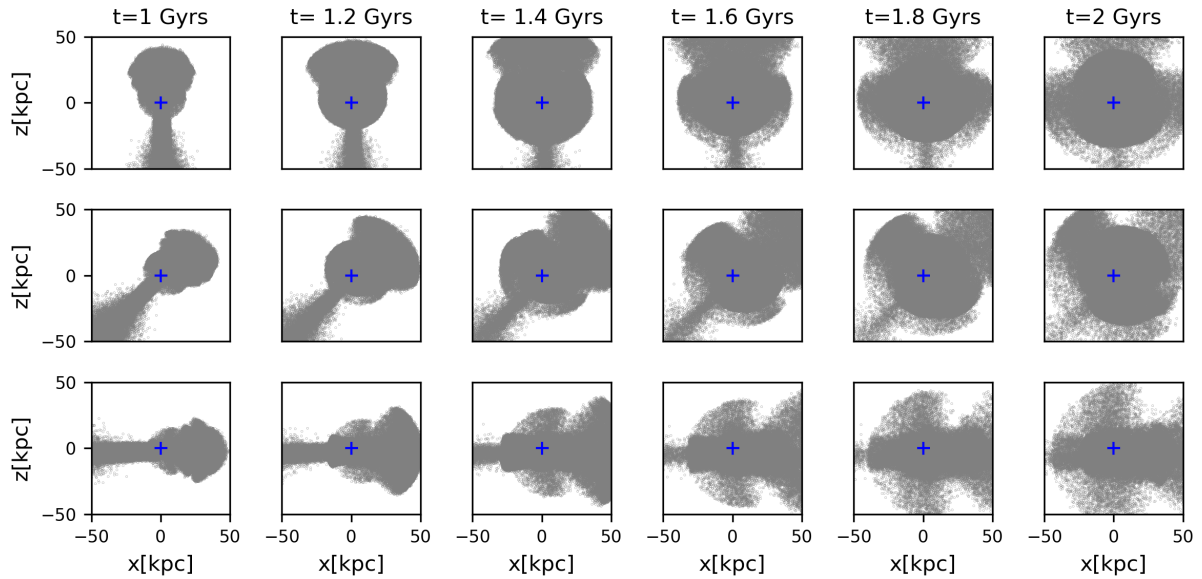
3.1 Rezultati simulacija i formirane strukture

Izvršene su simulacije N-tela pomoću paralelizovanog kosmološkog kôda, Gadget-2. Simulirani su sudari patuljaste galaksije i velike spiralne galaksije. Rezultati prikazani u disertaciji su objavljeni u radu Milošević (2022). Mase i parametri modela spiralne i patuljaste galaksije su dati u tabelama 1 i 2. Ispitana je zavisnost osobina formiranih struktura u halou spiralne galaksije, od morfologije, nagiba orbite u odnosu na ravan diska spiralne i smeru rotacije patuljaste galaksije. Spiralna galaksija je imala parametre kao galaksija M31 (Tabela 1), radi kasnijeg korišćenja istog modela u svrhu ispitivanja nastanka struktura u halou ove galaksije.



Slika 3.1: Istorija sudara spiralne i dSph patuljaste galaksije, od početka simulacije do 1 milijarde godina. Sive tačke predstavljaju čestice patuljaste galaksije, a plavi krstić je centar diska spiralne galaksije. Čestice spiralne galaksije su izuzete sa grafika, radi bolje vidljivosti promene strukture patuljaste. Gornji red reprezentuje sudar u slučaju S0 scenarija sudara, srednji red S1 i donji red S3 scenario.

Korišćena su dva modela za patuljastu galaksiju - spiralna koja je reskalirana galaksija M31 i sferoidna patuljasta. Sličan pristup pri modelovanju patuljaste galaksije sa diskom korišćen je u radu Karademir et al. (2019). Sudarni scenario patuljaste galaksije je prikazan na Slici 3.1 i Slici 3.2. za vremenski interval od 0 do 1 milijardi godina i od 1 do 2 milijardi godina, respektivno. Simulacija je izvršena za tri karakteristična ugla,



Slika 3.2: Istorija sudara za dSph model između jedne i dve milijarde godina od početka sudara. Simboli i redovi na slici imaju isto značenje kao na Slici 3.1.

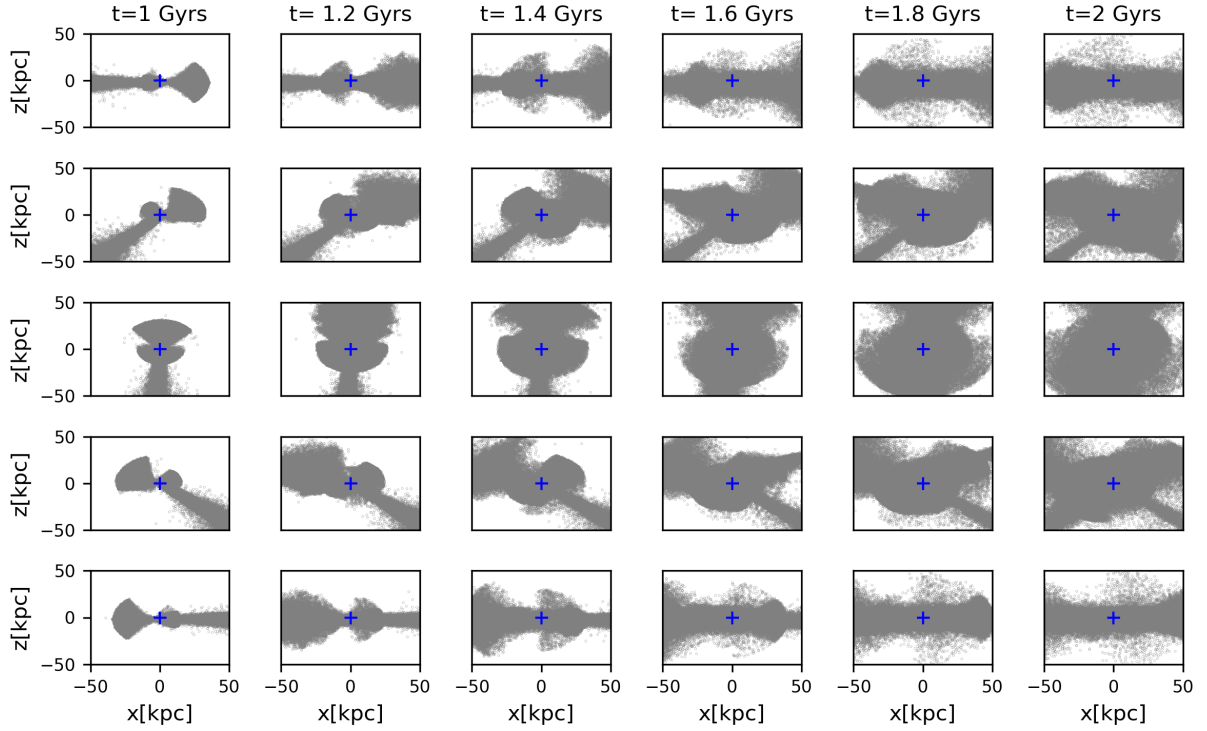
od 0, 45 i 90 stepeni u odnosu na disk velike spiralne galaksije. Scenariji su imenovani kao S3, S1 i S0. Početno rastojanje je isto za sve tri simulacije i iznosi 100 kpc. Pošto je raspodela barionske materije u patuljastoj galaksiji sferno-simetrična, nije bilo potrebe za ispitivanjem dodatnih uglova nagiba putanja u odnosu na disk spiralne galaksije.

Slična analiza je urađena i za patuljastu galaksiju sa diskom. Ova galaksija ima istu masu i početnu poziciju kao dSph galaksija, ali drugačiju morfologiju. Izvršeno je pet simulacija za upadne uglove 0, 45, 90, 135 i 180 stepeni, pri čemu su scenariji imenovani kao D3, D1, D0, D11, D9. Evolucija sudara i nastanak struktura u ovih pet slučajeva su prikazani na Slici 3.3. za vremenski interval između 1 i 2 milijardi godina, jer nam je taj interval od interesa, pošto patuljasta galaksija napravi više od jedne orbite.

Formiranje struktura se bolje reprezentuje na graficima sa površinskom gustinom. Sudarni proces za oba modela patuljaste galaksije je prikazan na Slikama 3.4 i 3.5.

U oba slučaja, bilo da je u pitanju patuljasta sa diskom, ili sferoidna, formiraju se strukture u haolu velike spiralne galaksije. Takođe, strukture se formiraju bez obzira na upadni ugao, samo je pitanje koliko su intenzivne i posle koliko vremena se potpuno dezintegrišu. U svim slučajevim formira se zvezdani tok i zvezdane ljuske, što je karakteristika radijalnih sudara (Amorisco, 2015).

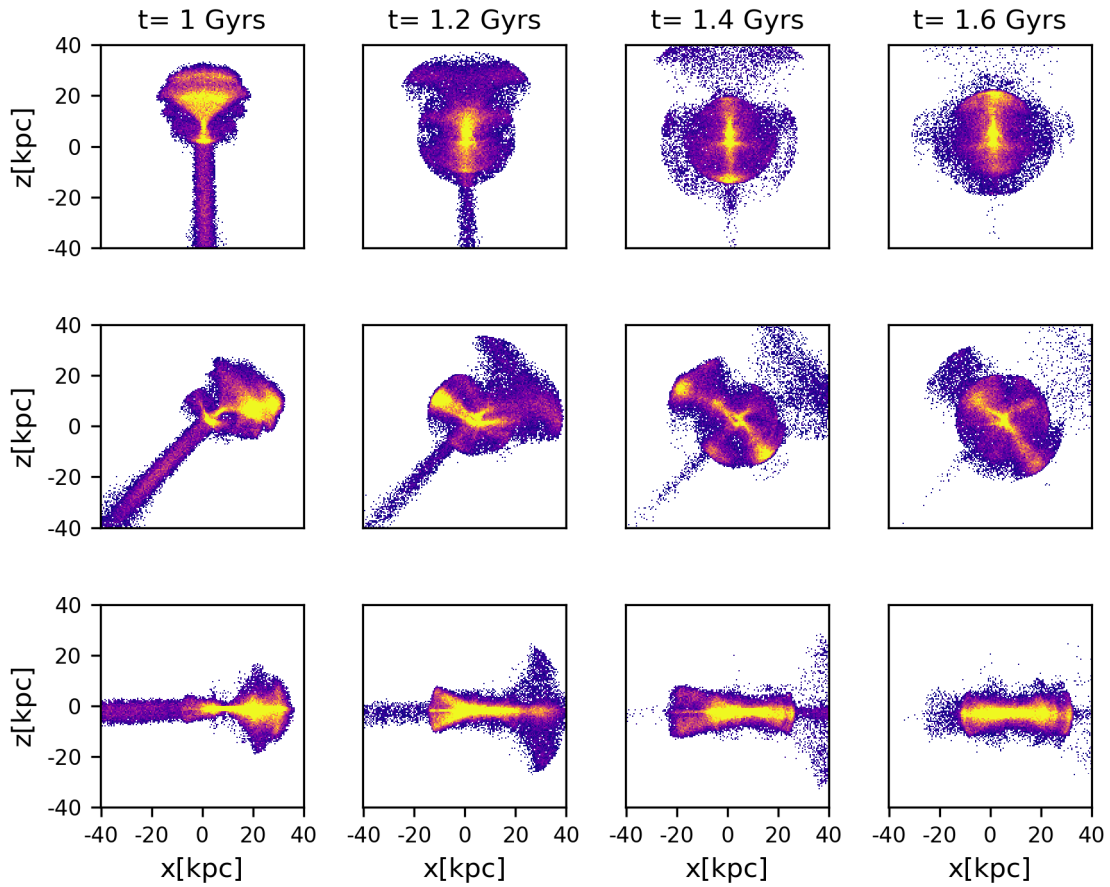
Morfološke podstrukture, odnosno formirani tokovi i ljuske, ali i ostatak patuljaste galaksije mogu da se uoče na grafiku gde su prikazani radijalna udaljenost od centra



Slika 3.3: Istorija sudara za patuljastu galaksiju sa diskom, između jedne i dve milijarde godina. Sive tačke reprezentuju čestice galaksije, dok je plavi krstić centar diska spiralne galaksije. Čestice spiralne su izuzete radi bolje preglednosti. Redovi od vrha ka dole reprezentuju modele D3, D1, D0, D11, i D9, respektivno.

spiralne galaksije i radijalna brzina, tj. na $d - v$ plotu. Na Slici 3.6 prikazani su fazni grafici za dve različite početne pozicije i dve morfologije. Ispitani su scenariji S3, D3 i D9. Početna pozicija u sva tri slučaja leži u ravni diska, pa je i orbita svake od patuljastih galaksija u istoj ravni kao i disk spiralne galaksije. Formiranje morfoloških podstruktura je ispitano za vremenski interval između 1 i 1,6 milijardi godina, jer tokom tog perioda patuljasta galaksija prođe dva puta kroz pericentar svoje putanje i plimskim rasipanjem materijala formira pomenute strukture - zvezdane tokove i ljuske.

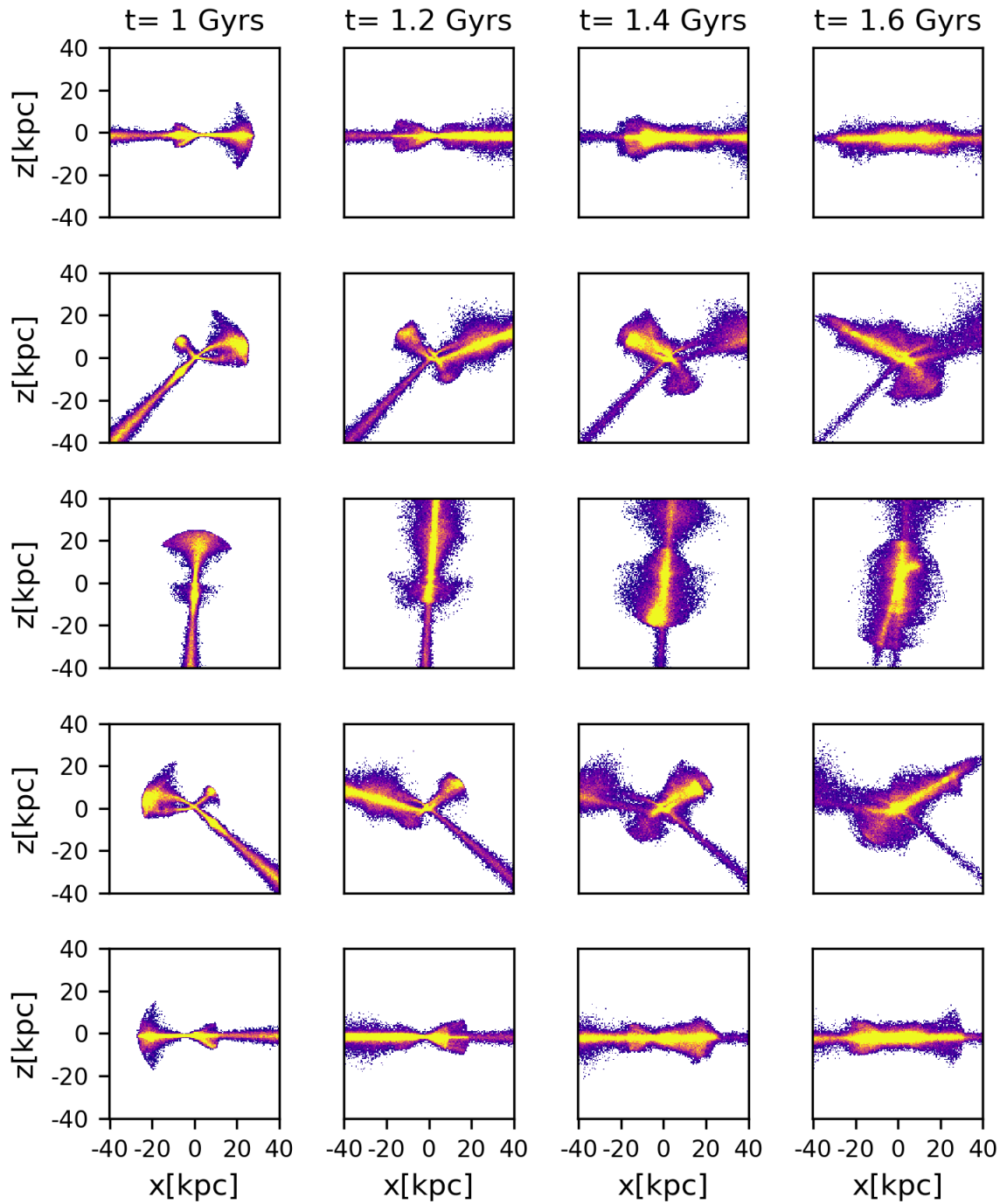
U prvom redu na Slici 3.6 prikazan je nastanak podstruktura u slučaju scenarija D3. Ovaj scenario podrazumeva sudar patuljaste galaksije sa diskom čiji je vektor momenta impulsa paralelan vektoru momenta impulsa diska velike spiralne galaksije. Drugim rečima, galaksije se nalaze u istoj ravni, rotiraju u istom smeru i početno rastojanje centara masa je 100 kpc. Vidimo da se u tom slučaju formira zvezdani tok, kao i bar dve zvezdane ljuske, pri čemu je tokom posmatranog vremenskog intervala moguće pratiti i evoluciju ostatka patuljaste galaksije. Nakon 1,4 milijarde godina, umesto jednog



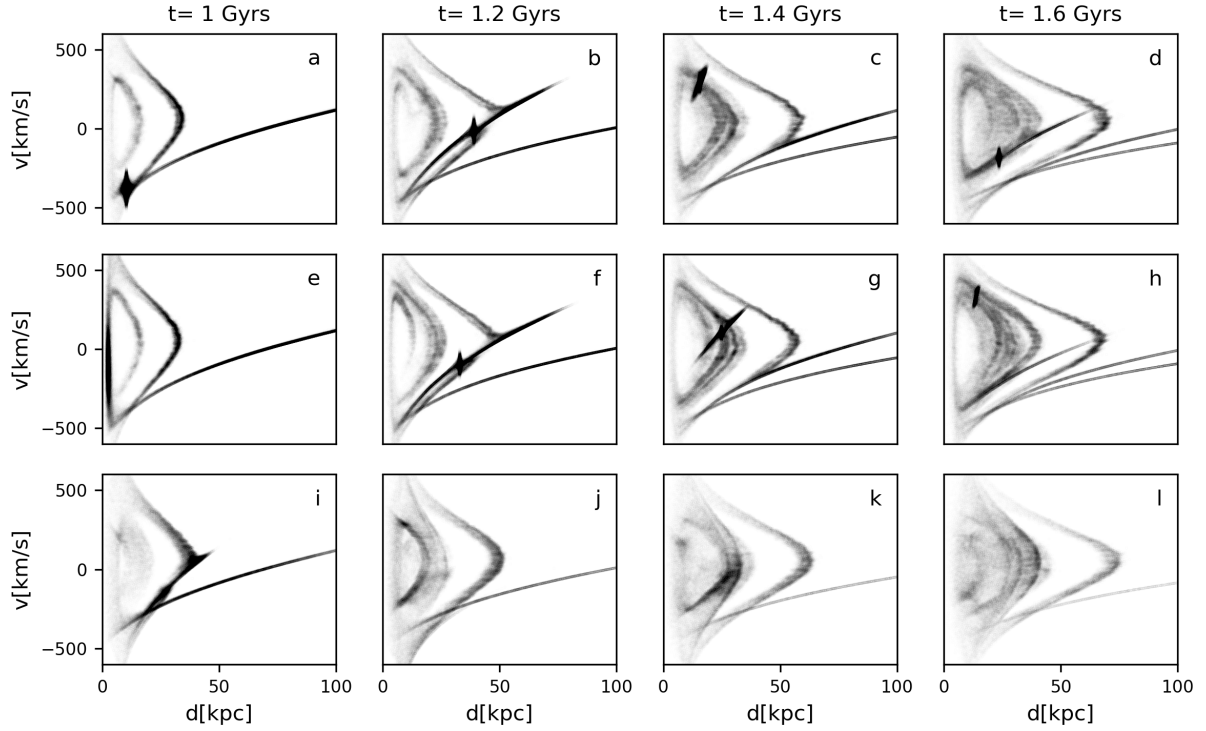
Slika 3.4: Istorija sudara za dSph galaksiju, između 1 i 1,6 milijardi godina. Na slici su prikazani plotovi površinske gustine, pri čemu je prikazana samo patuljasta galaksija radi bolje preglednosti. Redovi od vrha ka dole reprezentuju scenarije S0, S1 i S3, respektivno.

izraženog toka, vidimo dva manje izražena zvezdana toka.

Slična situacija se zapaža i u slučaju D9 scenarija. Ovde patuljasta galaksija sa diskom, kreće da orbitira oko velike spiralne galaksije, takođe u istoj ravni i istim početnim rastojanjem kao u prethodnom slučaju, ali vektor momenta impulsa je sada suprotan vektoru momenta impulsa spiralne galaksije, odnosno galaksije rotiraju u suprotnim smerovima. Ovaj sudar je prikazan u srednjem redu Slike 3.6, paneli od e do h. Iako su glavni dinamički parametri isti - radi se o galaksiji iste mase, iste morfologije, na istom rastojanju od velike spiralne, ipak, rotacija ima uticaj. Bez obzira što se formira takođe najpre jedan izražen zvezdani tok, a zatim dva manje izražena, kao i makar dve zvezdane ljuske, položaj ostatka patuljaste galaksije, kao i njegova morfologija nisu isti kao u prethodnom slučaju. U istim trenucima, usled različitih smerova rotacije, ostatak će se



Slika 3.5: Istorija sudara za patuljastu galaksiju sa diskom, između 1 i 1,6 milijardi godina. Na slici su prikazane raspodele površinske gustine, pri čemu je prikazana samo patuljasta galaksije radi bolje preglednosti. Redovi od vrha ka dole reprezentuju scenarije D3, D1, D0, D11 i D9, respektivno.

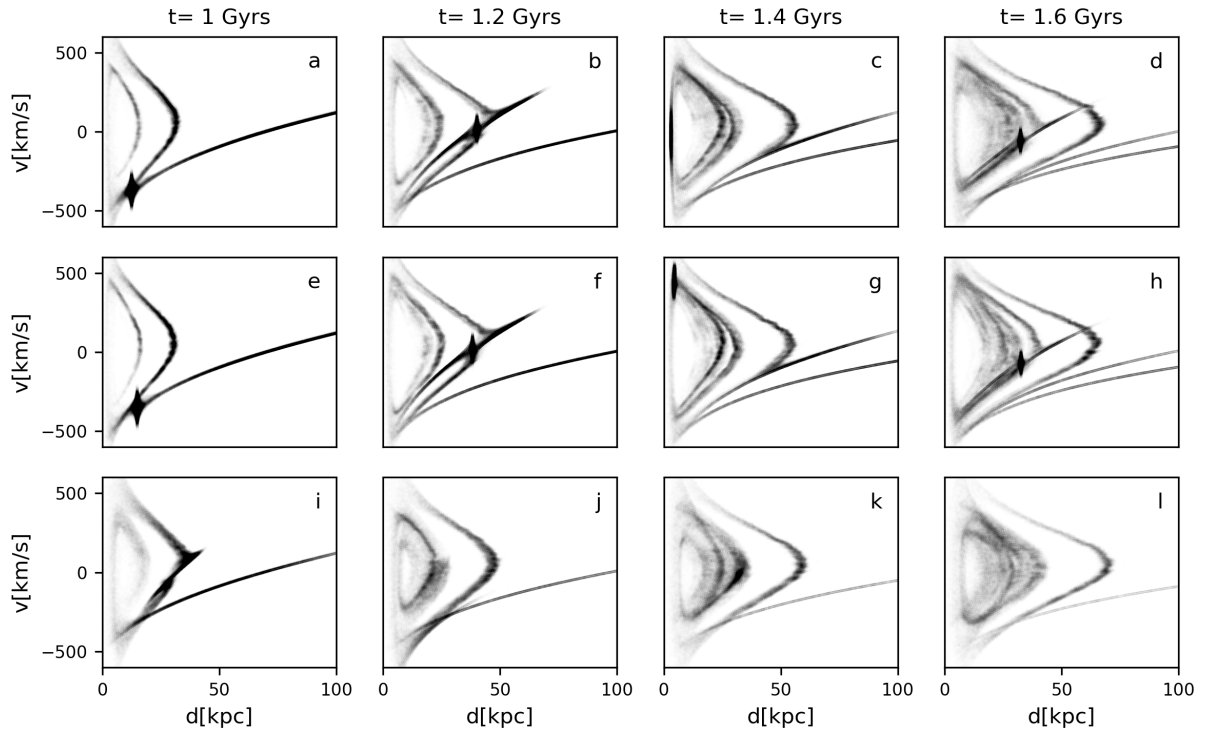


Slika 3.6: Fazni grafici $d - v$, gde je d radijalna udaljenost čestica od centra diska velike spiralne galaksije, a v njihova radijalna brzina. Prikazani su grafici za vremenski interval između 1 i 1,6 milijardi godina. Gornji red predstavlja D3 scenario, srednji red D9, a donji red S3 scenario.

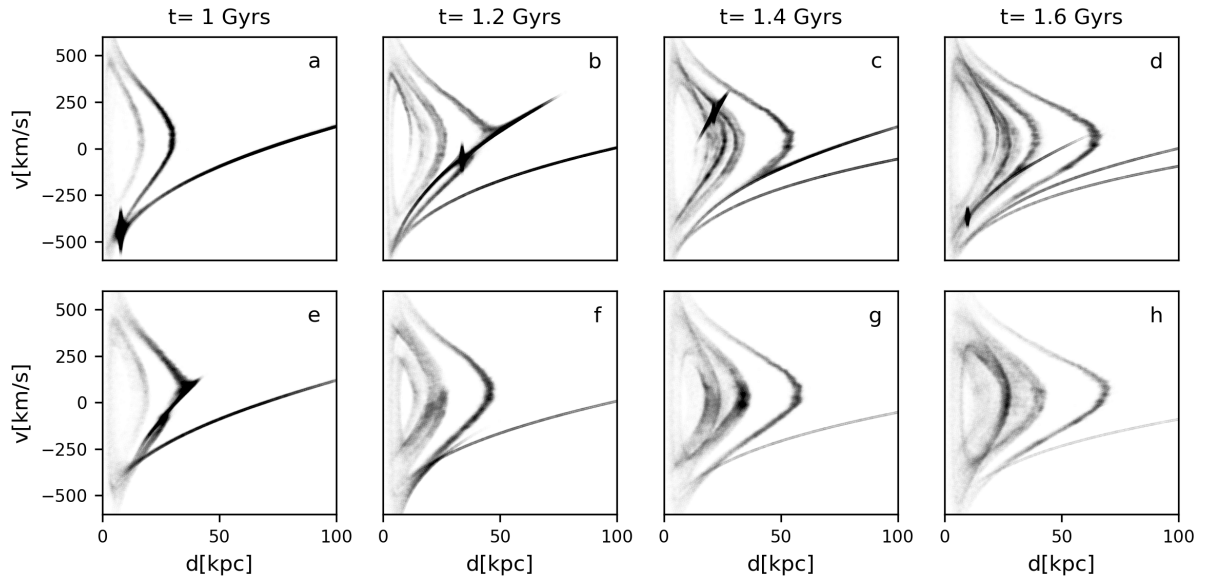
nalaziti morfološki izmenjen, na mestima na $d - v$ plotu koja su različita od prethodnog slučaja.

U slučaju S3 scenarija, imamo patuljastu sferoidnu galaksiju iste mase kao patuljasta sa diskom, koja sa iste pozicije započinje svoju orbitu oko velike spiralne galaksije. I u ovom slučaju imamo formiranje dve slabo intenzivne zvezdane ljuske i zvezdanog toka, nakon dva prolaska kroz pericentar, što je prikazano u donjem redu Slike 3.6. Zbog toga što se radi o patuljastoj galaksiji koja ima sferno-simetričnu raspodelu barionske materije, odnosno ne postoji deo galaksije koji je rotaciono uređen, ispitan je samo jedan slučaj planarnog sudara sa spiralnom galaksijom. Već posle jedne milijarde godina teško se može uočiti ostatak galaksije. Takođe tokom ovog vremenskog intervala postoji samo jedan zvezdani tok, koji postaje sve slabije izražen, kako sistem dinamički evoluira.

Za istu masu patuljaste galaksije, osobine nastalih morfoloških podstruktura zavise od morfologije patuljaste galaksije, a za istu morfologiju, ako je u pitanju patuljasta sa

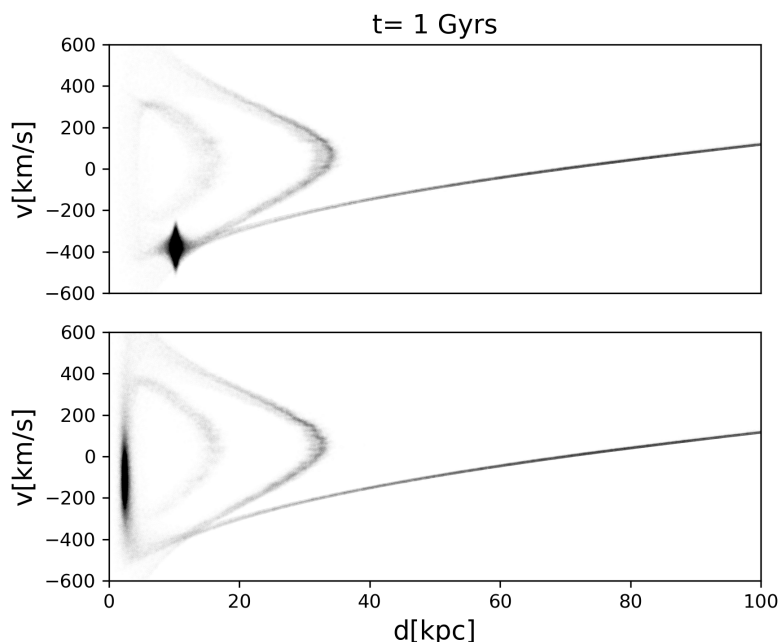


Slika 3.7: Fazni grafici za vremenski interval između 1 i 1,6 milijardi godina. Redovi reprezentuju D1, D11 i S1 scenarije, respektivno.



Slika 3.8: Fazni grafici za scenarije D0 (gornji red) i S0 (donji red) za interval od 1 do 1,6 milijardi godina.

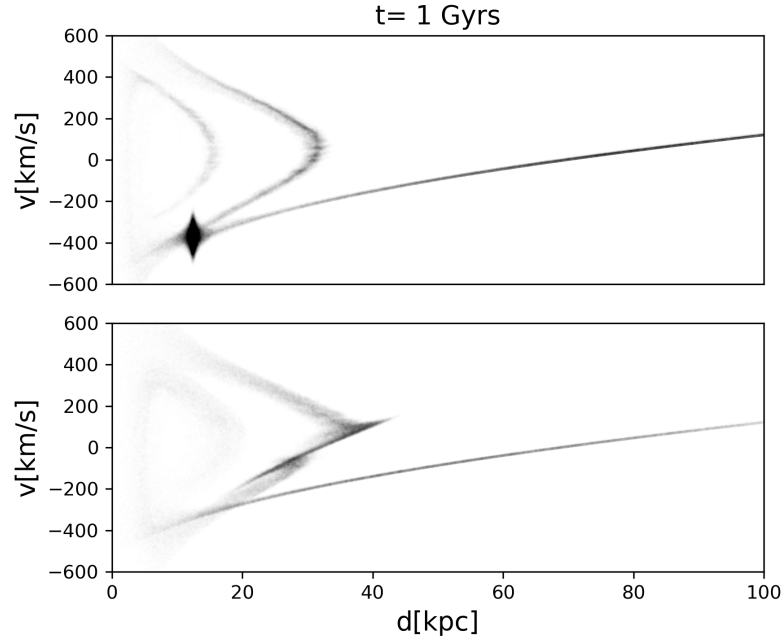
diskom zavise i od smera rotacije, kada se radi o sudarima koji se odvijaju u ravni u kojoj se nalaze diskovi obe galaksije.



Slika 3.9: Fazni grafici za trenutak nakon jedne milijarde godina od početka simulacije, za scenarije D3 (gornji red) i D9 (donji red). U prvom slučaju vektor momenta impulsa je paralelan vektoru momenta impulsa velike spiralne galaksije, a u drugom slučaju anti-paralelan.

Slična analiza je urađena u slučaju da je orbita patuljaste galaksije orijentisana pod uglom od 45 stepeni u odnosu na ravan diska spiralne galaksije. Na Slici 3.7 prikazani su sudari u slučaju scenarija D1, D11 i S1. U sva tri slučaja imamo formirane zvezdane tokove i ljuske. Analiza je rađena za isti vremenski interval, kao i u prethodnom slučaju, između 1 i 1,6 milijardi godina. Ostatak galaksije je ponovo jasnije uočljiv i na većoj vremenskoj skali u slučaju patuljaste galaksije sa diskom, nego u slučaju dSph galaksije. Takođe, inklinacija orbite utiče na to da se dosta ranije nego u prethodnom slučaju ostatak rasturi, tako da je već nakon 1,2 milijarde godina neuočljiv u slučaju patuljaste galaksije sa diskom. Kod S1 scenarija vidimo da već nakon jedne milijarde godina nije moguće pratiti ostatak i formira se jedan tok, za razliku od modela patuljaste sa diskom. Vidimo da pored uticaja morfologije, na formiranje podstruktura utiče i inklinacija orbite.

Ispitani su i sudari kod kojih je ugao između ravni orbite patuljaste galaksije i ravni diska spiralne galaksije 90° i dinamička evolucija u tom slučaju je prikazana na Slici 3.8.



Slika 3.10: Fazni grafici za trenutak nakon jedne milijarde godina od početka simulacije, za scenarije D1 (gornji red) i S1 (donji red).

Realizovane su dve klase simulacija sa D0 i S0 scenarijima. U slučaju patuljaste sa diskom formiraju se dva toka i bar dve zvezdane ljuske, a ostatak galaksije moguće je pratiti na celom vremenskom intervalu od interesa. Za razliku od ovog modela patuljaste, u sudaru dSph sa spiralnom galaksijom imamo formirane strukture, koje su slabije izražene, posebno zvezdani tok (pri čemu se kao i u prethodnim slučajevima formira jedan tok), a ostatak galaksije se raspada već posle jedne milijarde godina, odnosno nakon prvog prolaska kroz pericentar.

Uticaj rotacije diskaste patuljaste galaksije je prikazan na Slici 3.9. Poređena su dva scenarija D3 i D9, pri čemu su potpuno identične patuljaste galaksije sudarane sa spiralnom galaksijom, sa jedinom razlikom u tome da li su im vektori momenta impulsa paralelni ili antiparalelni sa vektorom momenta impulsa spiralne galaksije, drugim rečima da li rotiraju u istom ili suprotnom smeru u odnosu na spiralnu galaksiju. U scenariju sudara D3, patuljasta galaksija ima isti, a u slučaju D9 suprotan smer rotacije u odnosu na spiralnu. Poređenje je urađeno nakon jedne milijarde godina, odnosno nakon što patuljasta galaksija prođe kroz pericentar i formira zvezdani tok i dve zvezdane ljuske. Vidimo da se u slučaju istog smera rotacije jasnije uočava ostatak patuljaste galaksije, što nije slučaj kod obrnutih smerova. U oba slučaja se zvezdane ljuske formiraju na istim udaljenostima od centra spiralne galaksije.

Uticaoj morfologije patuljaste galaksije na formiranje struktura u sudarima, prikazan je na Slici 3.10. Gornji red predstavlja sudar sa D1 scenariom, a donji red sa S1. U slučaju patuljaste galaksije sa diskom vidimo dve zvezdane ljuske i jedan tok i sve strukture su izraženije nego u slučaju S1. Obe galaksije imaju iste početne pozicije, početne brzine, mase i inklinacije orbita koje iznose 45° . U slučaju galaksije sa diskom, ostatak galaksije je vidljiv, dok kod dSph modela se raspada nakon jedne milijarde godina i materijal se razmešta u jednu od ljuski, usled dinamičke evolucije sistema, odnosno nekoliko prolazaka kroz pericentar. Sličnu situaciju imamo kod GSS u halou M31, gde se materijal ostatka patuljaste galaksije nalazi u blizini NE zvezdane ljuske (Sadoun et al., 2014).

3.2 Rezime nastanka podstruktura u halou spiralne galaksije

Za sudarni scenario i dinamičku evoluciju galaksija u sudaru, odnosno nastanak morfoloških podstruktura u halou velike spiralne galaksije koja se sudara sa svojim satelitom - patuljastom galaksijom, odnos masa igra veliku ulogu (Karademir et al., 2019). Pored mase, morfologija patuljaste galaksije ima veliki značaj. Simulacije N-tela su pokazale da postoje razlike u formiranju struktura, u zavisnosti od toga da li se radi o patuljastoj galaksiji sa diskom, ili sferoidnoj patuljastoj. U oba slučaja se formiraju zvezdani tokovi i ljuske. U slučaju patuljaste sa diskom, imamo dva zvezdana toka i na većem vremenskom intervalu moguće je pratiti ostatak galaksije. U sudarima sa S scenarijima, ostatak galaksije se već posle dva prolaska kroz pericentar orbite, gotovo potpuno plimski raspadne. Zvezdane ljuske se formiraju nakon nekoliko prolazaka kroz pericentar, pri čemu nisu jednako intenzivne, odnosno masivne, u ova dva slučaja različitih morfologija patuljaste galaksije. Nakon nekoliko prolazaka kroz pericentar, zvezdani tok u slučaju D scenarija je izraženiji, što je slučaj i za ostatak patuljaste galaksije. Ukoliko se formiraju dva zvezdana toka, možemo pouzdano pretpostaviti da je roditeljska galaksija patuljasta sa diskom. Ukoliko imamo formiran jedan zvezdani tok, potrebna su nam dodatna ispitavanja osobina roditeljske galaksije.

Posmatrani GSS u galaksiji M31 i zvezdane ljuske, mogu biti formirani u sudaru galaksije M31 i patuljaste galaksije sa i bez diska (Fardal et al., 2007; Sadoun et al., 2014; Miki et al., 2016b), te je to primer neophodnog dodatnog ispitivanja parametara, da bi se favorizovao jedan od modela.

Za obe grupe modela, S i D, inklinacija orbite igra takođe značajnu ulogu, jer imamo

različite osobine formiranih struktura i na različitim vremenskim skalama. Sličan rezultat je dobijen i u Karademir et al. (2019).

Orijentacija patuljaste galaksije sa diskom nema zanemarljiv uticaj u sudaru, jer nije isti scenario sudara sa paralelnim i antiparalelnim vektorima momenta impulsa galaksija u sudaru. Razlika u smeru rotacije dovodi do različite distribucije čestica u sudaru. Iako imamo formirane dve zvezdane ljuske i jedan zvezdani tok u slučaju D3 i D9 modela, ostatak galaksije opstaje duži vremenski interval u slučaju D3 modela, odnosno istog smera rotacije diskova.

4 Simulacije formiranja i metaličnost Velikog zvezdanog toka

Nastanak Velikog zvezdanog toka u halou galaksije M31, kao i zvezdanih ljuski, ispitan je numeričkim simulacijama sudara galaksije M31 i patuljaste galaksije koja je njen satelit. Modeli ovih galaksija su opisani u Tabelama 1 i 3. Kako je rečeno, model patuljaste sferoidne galaksije bolje reprodukuje posmatrane vrednosti udaljenosti i brzina duž GSS (Sadoun et al., 2014), pa je ovaj model i korišćen u simulacijama realizovanim i opisanim u ovoj disertaciji. Analiza sudara podrazumeva dve grupe rezultata:

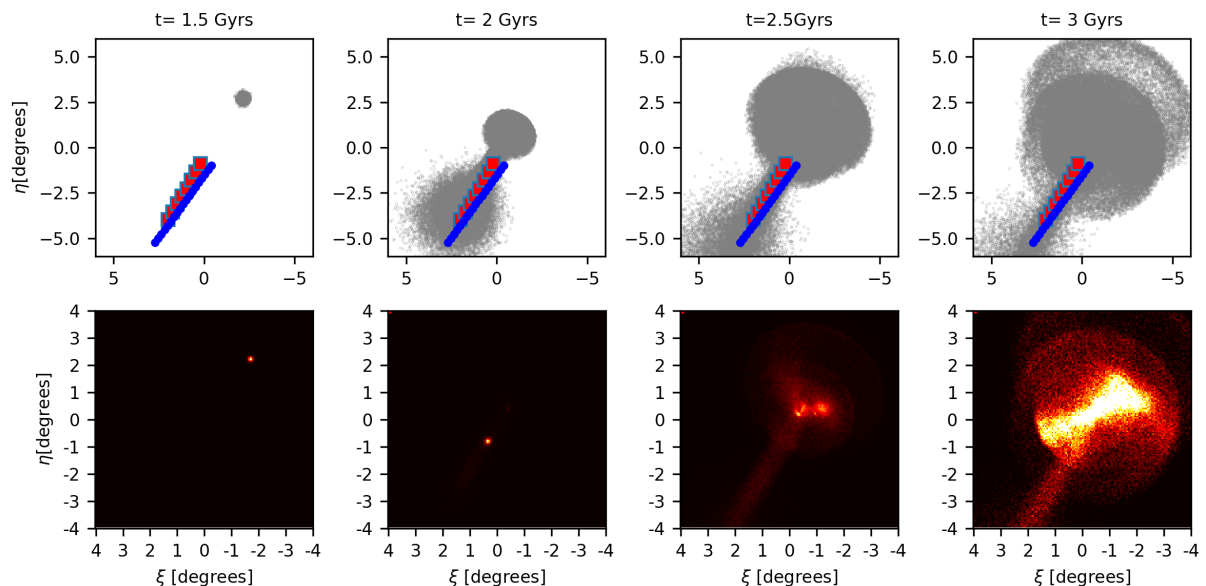
1) Prva grupa rezultata se odnosi na reprodukovanje dinamičkih osobina GSS. Formirane strukture u numeričkim simulacijama N-tela su upoređene sa posmatranom orijentacijom GSS na nebu, zatim merenim udaljenostima u posmatračkim poljima, kao i brzinama.

2) Druga grupa rezultata obuhvata Monte Karlo simulacije koje su izvršene na rezultatima numeričkih simulacija. Ove simulacije podrazumevaju modelovanje inicijalne raspodele metaličnosti u patuljastoj galaksiji pre sudara i vezu te raspodele sa finalnom raspodelom metaličnosti u GSS nakon sudara, dobijenom iz posmatračkih podataka.

4.1 Dinamika i morfologija Velikog zvezdanog toka.

U ovoj disertaciji izvršene su simulacije N-tela, pri čemu su i galaksija M31 i dSph patuljasta galaksija predstavljeni kao sistemi N-tela. Modeli galaksija i početni uslovi sudara su opisani u poglavlju 2. Patuljasta sferoidna galaksija počinje svoju orbitu oko Andromede sa rastojanja od 208 kpc od centra Andromede i nultom početnom brzinom. Kako se galaksija približava centralnom regionu M31 galaksije, tamna materija iz haloa patuljaste galaksije počinje da se “ljušti” usled plimske interakcije sa haloom M31. Barionski deo patuljaste galaksije preživljava i prolazi kroz centralni region galaksije M31 posle 1,5 milijardi godina.

Usled dinamičkog trenja i plimskih procesa, patuljasta galaksija počinje da usporava i ostavlja za sobom barionski materijal u dužini od oko 6 stepeni na nebu, odnosno oko 80 kpc, formirajući GSS. Usled gravitacionog privlačenja M31, smanjeno jezgro patuljaste galaksije, vraća se ka centralnom delu M31, ponovo prolazi kroz pericentar i u drugom prolazu formira NE ljusku, a u trećem prolazu W ljusku (Escala et al., 2022). Nakon tri



Slika 4.1: Raspodela čestica u patuljastoj galaksiji prikazana za četiri vremenske epohe od početka sudara, odnosno za 1, 2, 2,5 i 3 milijarde godina. Gornji red prikazuje sve čestice patuljaste galaksije u simulaciji. Crvene kutije su posmatračka polja iz rada McConnachie et al. (2003), a plavi krugovi polja iz rada Conn et al. (2016). Donji red predstavlja masenu površinsku gustinu iste galaksije za iste trenutke. Čestice M31 su izostavljane, radi bolje preglednosti.

prolaska kroz pericentar i značajnog gubitka barionskog materijala, završava u blizini NE ljuske.

4.1.1 Orijentacija Velikog zvezdanog toka

Pošto je sudar skoro radijalni, odnosno orbita patuljaste galaksije u potencijalu M31 je veoma ekscentrična, orijentacija GSS doprinosi određivanju orbite, kao i početnih koordinata patuljaste galaksije. Na Slici 4.1 prikazan je sudar u vremenskom intervalu između 1,5 i 3 milijarde godina. Ovaj interval je odabran jer prethodni radovi sugerišu da su se strukture u halou M31 formirale upravo u tom vremenskom periodu (Sadoun et al., 2014; Hammer et al., 2018). Patuljasta galaksija još ne napravi prvi prolaz kroz pericentar, odnosno centralni region M31 posle 1,5 milijardi godina, a sve strukture poput zvezdanog toka i ljuski sa današnjim posmatranim karakteristikama se formiraju do 3 milijarde godina (Hammer et al., 2018).

Čestice patuljaste galaksije su prikazane u gornjem redu Slike 4.1, a mape površinske gustine materije u donjem redu, za iste vremenske trenutke. Na slici vidimo da se patuljasta galaksija približava centru M31 (čestice M31 su izostavljene sa grafika, radi pregledno-

sti) na skoro radijalnoj putanji posle 1,5 milijardi godina. Nakon dve milijarde godina od početka sudara, dSph je prošla kroz centralni deo M31, ostavljajući svoj zvezdani materijal u pravcu u kojem će se formirati GSS. Nakon prvog prolaska kroz centralni deo M31, ostatak galaksije se vraća i pravi drugi prolazak, a zatim treći i ta dinamička evolucija dovodi do nastanka zvezdanih ljuski. Na kraju vremenskog intervala, jezgro patuljaste galaksije završava u blizini NE ljuske u halou M31.

Veliki zvezdani tok se formira u južnom delu haloa Andromede. Orijentacija je upoređena sa položajem posmatračkih polja datih u McConnachie et al. (2003). Osam polja koja smo poredili sa simulacijom data su u gornjem redu Slike 4.1 (crveni kvadrati), dok su plavi kružići kasniji posmatrački podaci iz rada Conn et al. (2016). Orijentacija toka na nebu je data rasporedom ovih posmatračkih polja.

Morfologija toka je takođe data na Slici 4.1 onako kako je vidimo na nebu, projektovano na x-y ravan, tako da je x-osa orijentisana u levu stranu, y-osa na gore, a z-osa duž pravca posmatranja. Ove koordinate su transformisane u uglovne koordinate ξ i η prema sledećim jednačinama (Fardal et al., 2007):

$$\xi = x/(z_g + z) \quad (52)$$

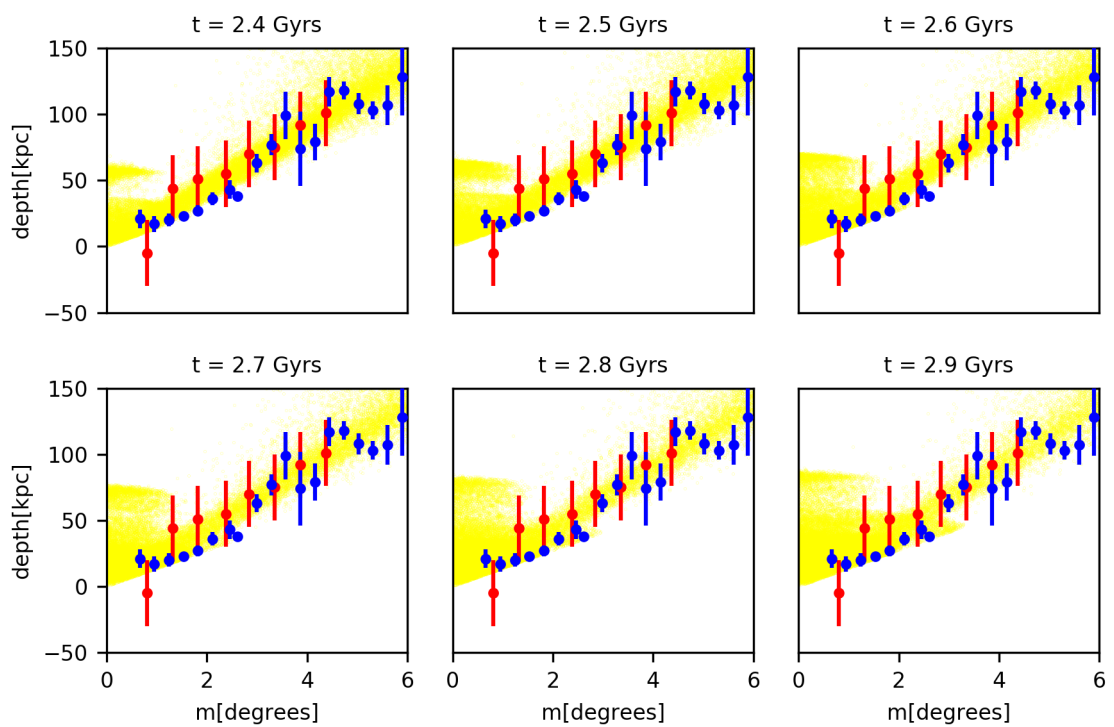
$$\eta = y/(z_g + z) \quad (53)$$

gde je z_g heliocentrična udaljenost M31 koja iznosi 784 kpc (Stanek & Garnavich, 1998).

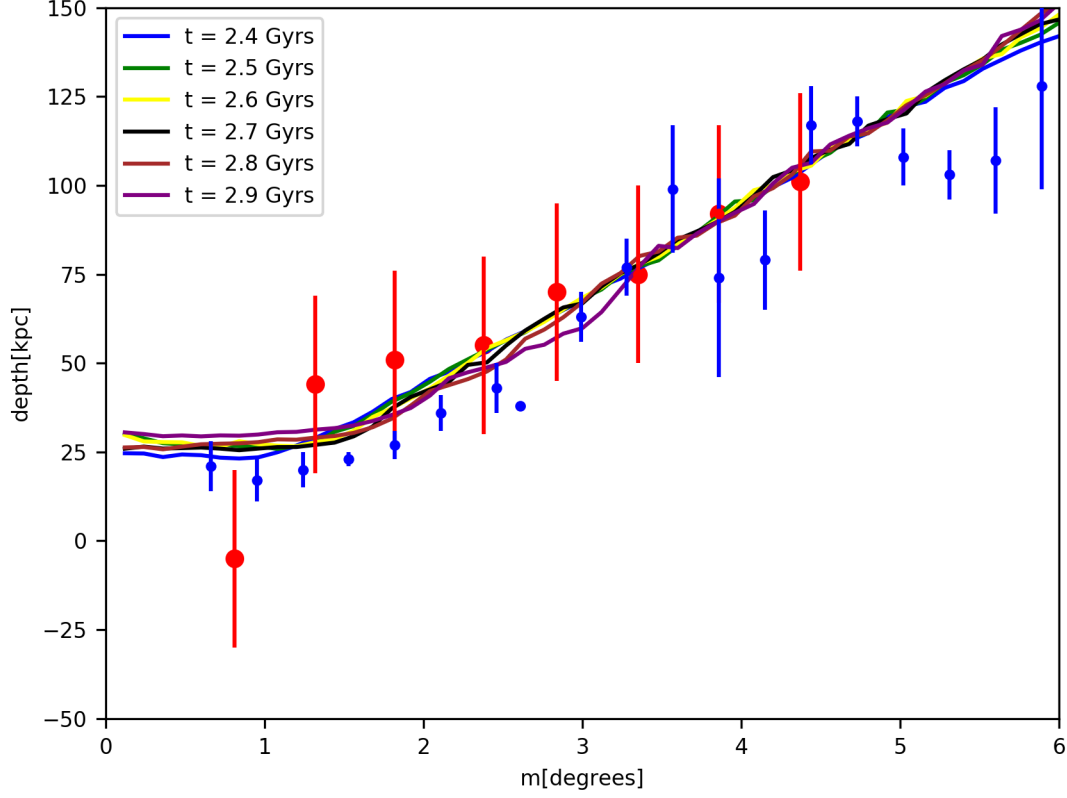
4.1.2 Udaljenosti i brzine duž Velikog zvezdanog toka

U posmatračkim poljima duž toka možemo da poredimo posmatrane vrednosti udaljenosti i brzina sa vrednostima udaljenosti i brzina čestica u tim poljima u simuliranom toku. Izračunali smo heliocentrične udaljenosti čestica u toku i uporedili sa posmatranjima koja su data u radovima McConnachie et al. (2003) i Conn et al. (2016). Slika 4.2 prikazuje udaljenosti čestica iz simulacije od centra M31, odnosno prostornu dubinu toka (eng. *depth*). Na ove vrednosti su nanete posmatrane vrednosti udaljenosti za ista polja, sa intervalima greške iz radova McConnachie et al. (2003) (crvena boja) i Conn et al. (2016) (plava boja). Pozicije čestica su prevedene u koordinate m i n , pri čemu je m koordinata duž toka, a n normalna na tok (Fardal et al., 2007):

$$m = 0.504 \times \xi - 0.864 \times \eta \quad (54)$$



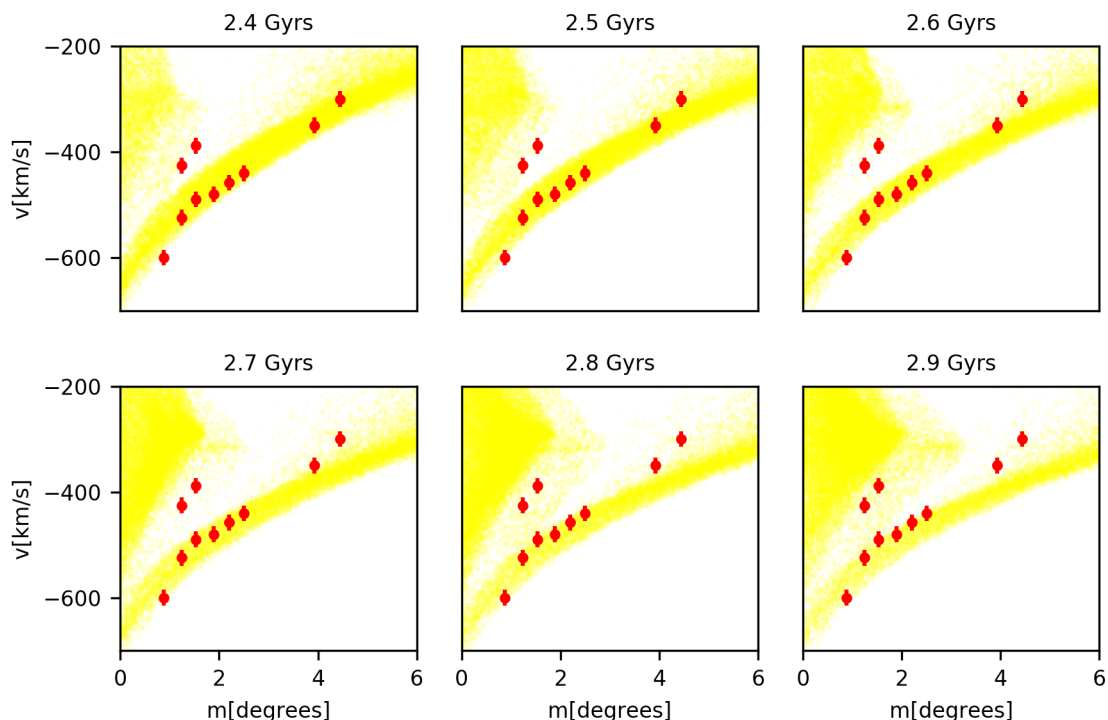
Slika 4.2: Udaljenosti od centra M31 u funkciji koordinate duž toka, m , dobijene iz naše simulacije N-tela (žute tačke). Crvene tačke sa intervalima pouzdanosti su posmatranja iz McConnachie et al. (2003), dok su plave tačke posmatrački podaci iz Conn et al. (2016). Paneli predstavljaju različite trenutke sudara između 2,4 i 2,9 milijardi godina.



Slika 4.3: Srednje udaljenosti zvezda u osam posmatračkih polja sa intervalima pouzdanosti (crveno iz rada McConnachie et al. (2003) i plavo iz Conn et al. (2016)). Srednje udaljenosti za čestice simulacije su prezentovane linijama. Svaka linija predstavlja jedan trenutak tokom evolucije u poslednjih pola milijarde godina formiranja GSS.

$$n = -0.864 \times \xi - 0.504 \times \eta \quad (55)$$

Paneli na Slici 4.2 prikazuju vremenske intervale tokom sudara, kada je GSS već formirana struktura. Tokom ovog intervala, između 2,4 i 2,9 milijardi godina, naši simulirani podaci se poklapaju sa posmatranim. Ovo takođe može da se potvrdi i na Slici 4.3, gde je prikazana srednja dubina po posmatračkom polju, za različite vremenske trenutke sudara. Postoji slaganje simularanih i posmatranih vrednosti za sve trenutke između 2,4 i 2,9 milijardi godina. Crvenom i plavom bojom su prikazane posmatračke vrednosti (McConnachie et al., 2003; Conn et al., 2016). Kao što je napomenuto u Sadoun et al. (2014), prvo posmatračko polje kod McConnachie et al. (2003) je najbliže centru Andromede i kontaminirano zvezdama haloa Andromede, pa se jedino u tom polju vidi odstupanje simularnih i posmatranih vrednosti srednje daljine. Vrednosti daljine dobijene u posmatračkim poljima

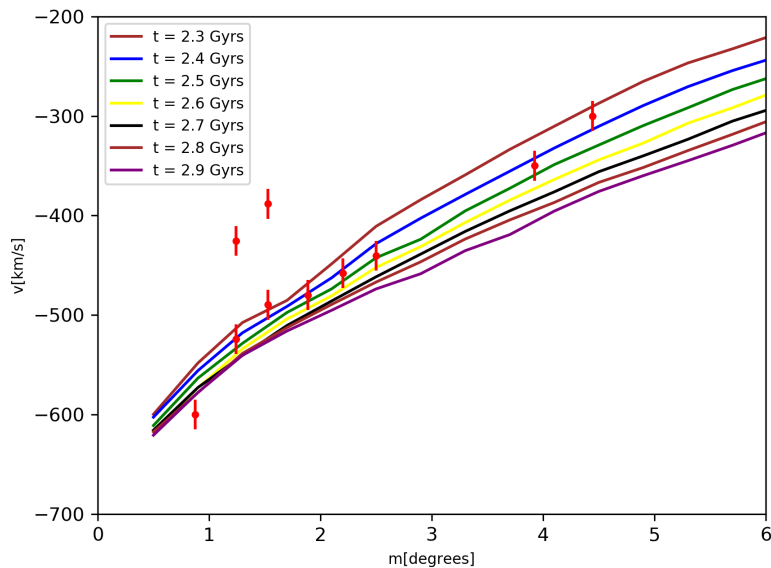


Slika 4.4: Radijalne brzine duž GSS (žuta boja), kao funkcija udaljenosti za vremenske intervale između 2,4 i 2,9 milijardi godina. Plotovane su i posmatračke vrednosti crvenim tačkama, koje su preuzete iz Ibata et al. (2004), Guhathakurta et al. (2006) i Gilbert et al. (2009).

između 5 i 6 stepeni (po koordinati m), leže ispod srednje vrednosti udaljenosti dobijene iz simulacije (Slika 4.3.) iako u granicama greške neke čestice toka su obuhvaćane ovim posmatračkim vrednostima (Slika 4.2). Već nakon 5 stepeni, GSS počinje da se rasipa i teže je utvrditi pripadnost čestica samom toku, pa samim tim i neslaganja posmatračkih i simuliranih vrednosti daljine u ovoj oblasti su očekivana.

Radijalne brzine duž toka su prezentovane na Slici 4.4. Simulirane vrednosti su date žutom bojom, a posmatrane vrednosti iz radova Ibata et al. (2004), Guhathakurta et al. (2006) i Gilbert et al. (2009, 2018), crvenom bojom. Vrednosti brzine u prvom posmatračkom polju su veće iz istog razloga kontaminacije zvezdama iz haloa M31 u posmatranjima. Isti slučaj se zapaža i u prethodnim radovima, npr. Sadoun et al. (2014). U drugom i trećem posmatračkom polju, data su dva para posmatračkih vrednosti radijalnih brzina za ista polja, pri čemu je jedan par van intervala simuliranih vrednosti. Paneli prikazuju poslednjih 500 miliona godina formiranja GSS, gde očekujemo najbolje poklapanje simulacije i posmatranja.

Pri poređenju simuliranih i posmatranih vrednosti brzina u GSS, najbolje poklapanje



Slika 4.5: Srednje vrednosti radijalnih brzina duž GSS, kao funkcija udaljenosti za različite vremenske trenutke. Crvene tačke su posmatračke vrednosti iz Ibata et al. (2004), Guhathakurta et al. (2006) and Gilbert et al. (2009).

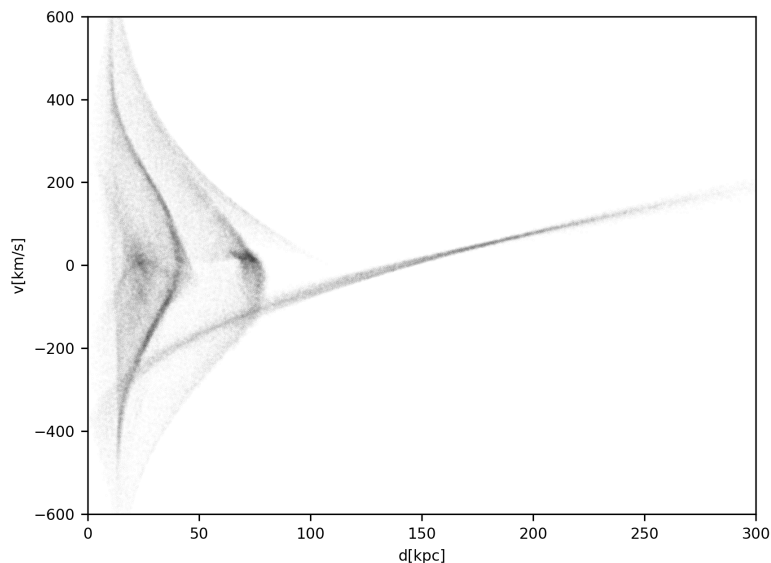
imamo između 2,4 i 2,5 milijardi godina od početka sudara. Ovaj rezultat odstupa od zaključka iz Sadoun et al. (2014), u slučaju dSph, gde je trenutak najboljeg poklapanja 2,7 milijardi godina. Ovo neslaganje je doduše za dva poslednja posmatračka polja, koja su na više od 4 stepena udaljena od početka toka. Za unutrašnja posmatračka polja imamo poklapanje tokom posmatranog intervala od 2,4 do 2,9 milijardi godina.

Srednje radijalne brzine su prikazane na Slici 4.5. Ovaj grafik potvrđuje zaključak sa Slike 4.4, pri čemu dolazi do većih odstupanja srednjih vrednosti od posmatranih posle 2,5 milijardi godina, ali merene brzine i dalje ostaju u intervalu simuliranih brzina na tim udaljenostima (debljina raspodele na Slici 4.3).

U istom sudarnom procesu, formiraju se zvezdane ljuske (Fardal et al., 2007, 2013; Sadoun et al., 2014). Ove strukture, NE i W ljuska mogu da se vide na Slici 4.6. Na slici se vidi i ostatak patuljaste galaksije koji se nalazi u blizini NE ljuske. Osobine formiranih ljuski detaljnije su opisane u narednom odeljku.

4.2 Metaličnost Velikog zvezdanog toka: rezultati Monte Karlo simulacija

Posmatrane karakteristike zvezdanog toka u halou M31, otvorile su mogućnost teorijskog modelovanja sudara patuljaste galaksije i Andromede, kao i proćuvanje morfologije



Slika 4.6: Fazni grafik, odnosno $d - v_{rad}$ ravan za trenutak 2,9 milijardi godina od početka sudara. Na slici možemo da uočimo GSS, zatim NE i W zvezdane ljuske. U regionu NE ljuske, nalazi se ostatak patuljaste galaksije.

patuljaste galaksije. Raspodela zvezda u toku, zatim njihove brzine, daju dinamičku sliku sudara i mogućnost ispitivanja globalnih dinamičkih karakteristika galaksije od koje je tok nastao.

Na sličan način, teorijsko ispitivanje metaličnosti patuljaste galaksije, usledilo je nakon fotometrijskih i spektroskopskih posmatranja toka i određivanja srednje metaličnosti u posmatračkim poljima duž toka i u pravcu normalnom na tok. U tom smislu najvažniji posmatrački rezultati metaličnosti u GSS, koji su suzili prostor parametara moguće raspodele metaličnosti u patuljastoj galaksiji, objavljeni su u radovima Ibata et al. (2007); Gilbert et al. (2009); Conn et al. (2016); Cohen et al. (2018). Vrednosti metaličnosti duž toka sugerišu na početni gradijent metaličnosti u patuljastoj galaksiji. Takvi gradijenti su posmatrani (Koleva et al., 2009b,a), ali i modelovani u teorijskim radovima (Miki et al., 2016b; Kirihaara et al., 2017). Pokazano je (posmatrački i teorijski) da ti gradijenti mogu biti i pozitivni i negativni, odnosno da metaličnost može i da raste i da opada od centra galaksije, ka obodu. Naime, gas koji se nalazi u patuljastoj galaksiji (koja nije izolovana galaksija), plimskim dejstvom može da bude povučen na obod galaksije, dok se ona kreće u gravitacionom potencijalu velike masivne galaksije. Takođe, moguće je da taj gas bude nakon toga gravitaciono privučen tom istom patuljastom galaksijom, nakon što izgubi deo kinetičke energije. U tom slučaju gas se kreće ka centru galaksije, gde se gravitaciono sažima, formira zvezde i povećava metaličnost u centru. To dovodi do negativnog gradi-

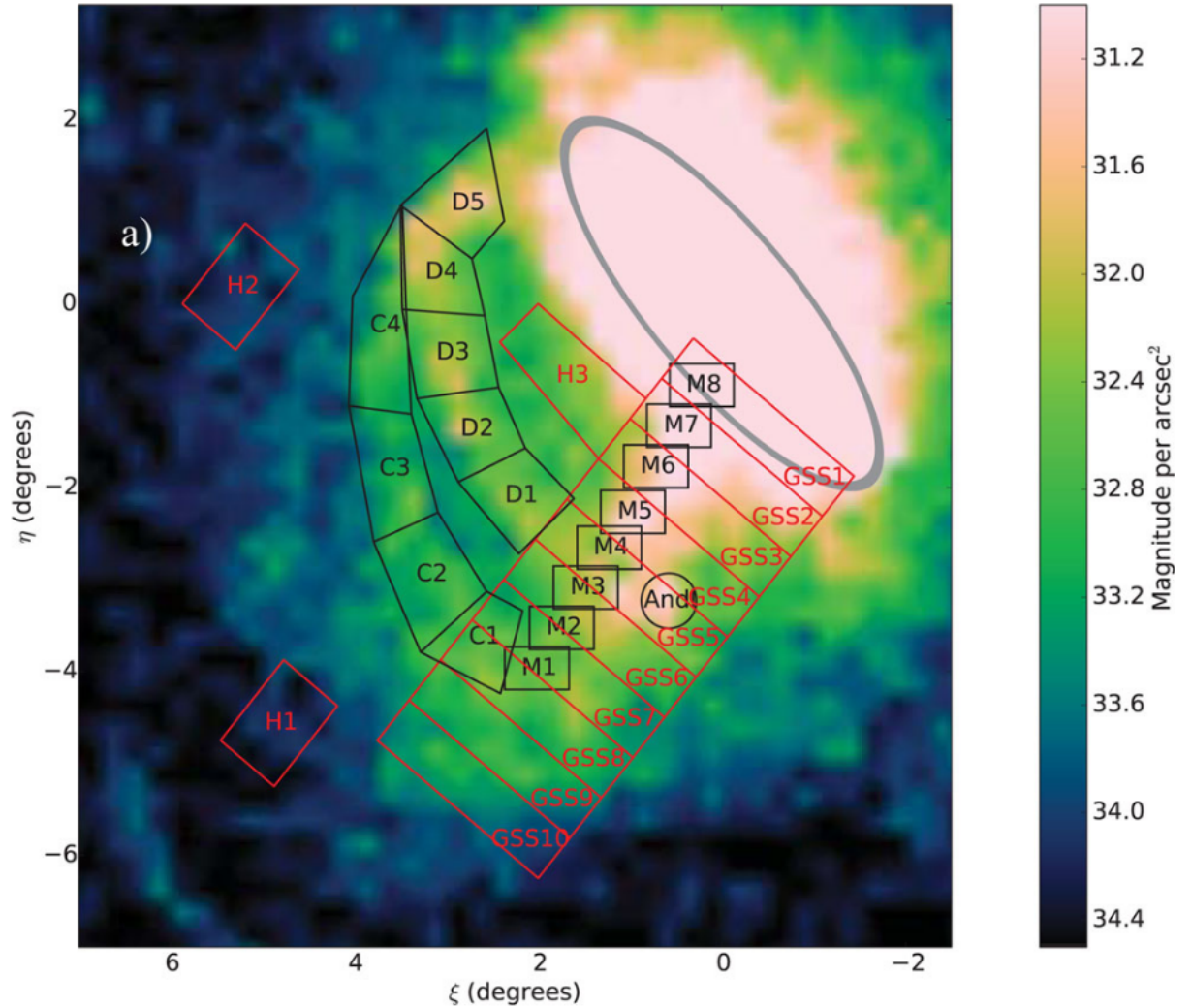
jenta metaličnosti, odnosno metaličnost opada od centra ka obodu galaksije. Istovremeno, galaksija praktično ostaje bez gasa, jer je preostali gas privučen plimskim dejstvom gravitacionog polja kroz koji se patuljasta galaksija kreće. U tom slučaju imamo patuljastu galaksiju bez ili sa jako malo gasa, kojoj metaličnost opada od centra ka obodu galaksije. Druga varijanta je da je internom evolucijom zvezda i gasa u patuljastoj galaksiji već pri njenom formiranju uspostavljen negativni radijalni gradijent metaličnosti (što je diskutovano u poglavlju 1.3). Upravo taj model raspodele metaličnosti u patuljastoj galaskiji je iskorišćen za objašnjenje raspodele metaličnosti u GSS.

Polazeći od početne raspodele metaličnosti u patuljastoj galaksiji i evoluirajući tu raspodelu kroz sudar galaksije sa M31, nađena je finalna raspodela metaličnosti u GSS. Ova teorijska, finalna raspodela metaličnosti je upoređena sa posmatranom raspodelom duž GSS koja je data u radu Conn et al. (2016). Poređenje ove dve raspodele, daje ograničenje na vremensku skalu sudara. Raspodela metaličnosti, zajedno sa dinamičkim karakteristikama GSS sugerise da je optimalni vremenski interval sudara 2,9 milijardi godina, koji se malo razlikuje od vremenske skale koja je određena u radu Sadoun et al. (2014), a koja iznosi 2,7 milijardi godina.

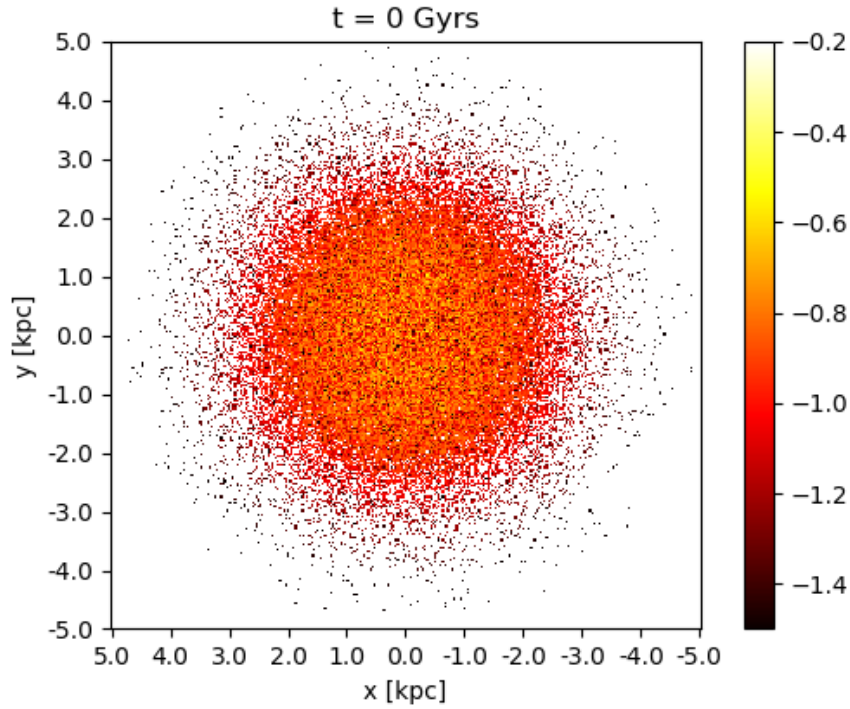
4.2.1 Početna raspodela metaličnosti u patuljastoj galaksiji

Da bismo objasnili posmatranu raspodelu metaličnosti u zvezdanom toku, koja je opisana u radovima Conn et al. (2016) i Cohen et al. (2018), za posmatračka polja GSS1-GSS10 (Slika 4.7), pretpostavljamo da početna metaličnost u patuljastoj galaksiji pre sudara, najviše utiče na finalnu distribuciju metaličnosti duž GSS, nakon što se formira u sudarnom procesu. Posmatrana su dva gradijenta duž toka: metaličnost raste od minimalne vrednosti -0,7 dex (u oblasti GSS koja je najbliža M31) do maksimalne vrednosti -0,2 dex na sredini toka (3 stepena daleko od oblasti najbliže M31). Metaličnost zatim opada ka spoljašnjem delu, do kraja GSS, gde ima vrednost oko -1 dex (Conn et al., 2016; Cohen et al., 2018). Ova prva posmatranja metaličnosti duž GSS su dobijena iz dijagrama boja-magnituda. Vrednosti metaličnosti u posmatračkim poljima daleko od unutrašnjih delova bliskih M31, kontaminirane su objektima koji se nalaze ispred objekata od interesa u datom posmatračkom polju (Cohen et al., 2018) i ove vrednosti mogu da se razlikuju u slučaju različitih tehnika obrade podataka. Metaličnost je određena za 19 polja duž toka. Kao što je ranije pomenuto, pre ovih posmatranja, bila je poznata vrednost metaličnosti u nekoliko polja u pravcu normalnom na tok. Utvrđeno je opadanje metaličnosti kako se ide od centralnog dela GSS ka obodu u pravcu normalnom na tok (Ibata et al., 2007; Gilbert et al., 2009).

Tražimo odgovarajuću početnu raspodelu metaličnosti u patuljastoj galaksiji koja može



Slika 4.7: Posmatračka polja duž GSS obeležena su sa GSS1-GSS10. Pored ovih 10 polja, posmatranja su izvršena i u još 9 polja duž toka, pri čemu svako od ovih 9 polja obuhvata drugu polovinu jednog polja i prvu polovinu narednog polja, tako da je GSS mapiran sa ukupno 19 posmatračkih polja. Polja koja su obeležena sa C1-C4 i D1-D5 predstavljaju C i D tokove koji su takođe najverovatnije plimske strukture. Polja H1-H3 su oblasti haloa M31 koje su izabrane radi poređenja sa populacijama zvezda iz GSS. Sivom elipsom je predstavljen disk M31. Krug obeležen sa And I je zona koja je izuzeta iz polja GSS4 i GSS5 usled prisustva patuljaste galaksije Andromeda I u tom pravcu posmatranja. Posmatračka polja iz McConnachie et al. (2003) obeležena su sa M1-M8. Slika je preuzeta iz rada Conn et al. (2016).

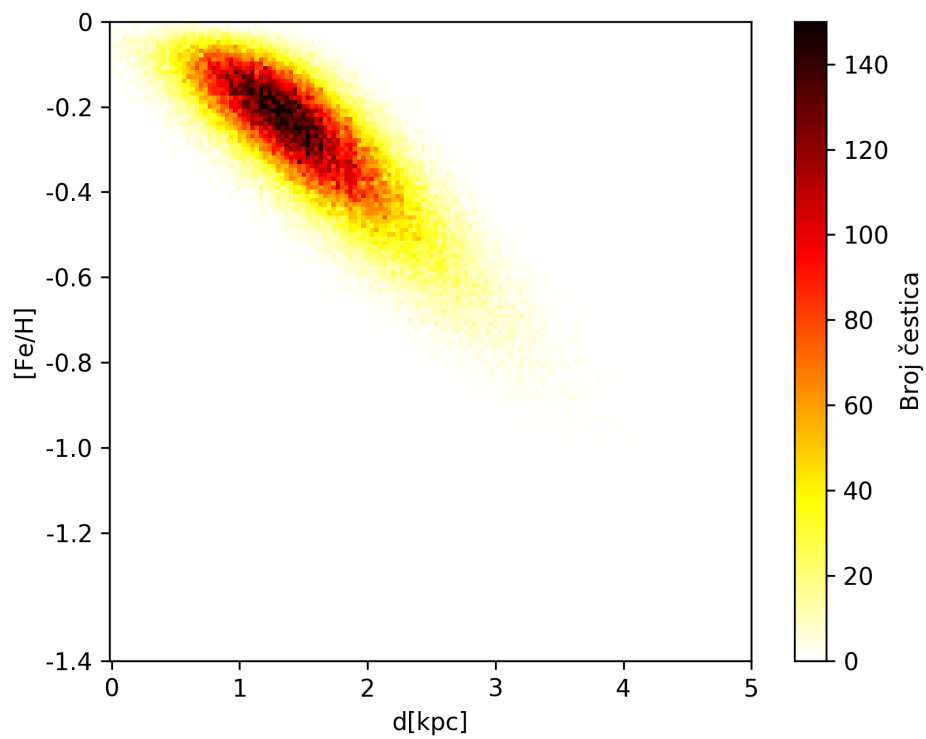


Slika 4.8: Mapa početne raspodele metaličnosti u patuljastoj galaksiji.

da reprodukuje posmatranu raspodelu metaličnosti duž GSS, uključujući dva gradijenta, tj. rast metaličnosti od delova GSS najbližih M31 do centralnog dela, zatim opadanje od centralnog dela ka spoljašnjem delu GSS. Uzeli smo u obzir da je početna raspodela metaličnosti linearno opadajuća funkcija od centra ka obodu patuljaste galaksije (Slika 4.8). Moguće vrednosti maksimalne i minimalne vrednosti metaličnosti su ograničene posmatranim vrednostima u GSS. Takođe, distribucija zavisi od morfologije patuljaste galaksije.

Na Slici 4.8 je prikazana početna raspodela metaličnosti u patuljastoj galaksiji u trenutku $t=0$ Gyrs. Galaksija je po morfologiji dSph, odnosno ima sferno-simetričnu raspodelu barionske materije. Sa mape površinske gustine metaličnosti vidimo da metaličnost raste od oboda ka centru galaksije. Ovaj trend je prikazan i u $d-[Fe/H]$ ravni na Slici 4.9.

Svakoj čestici patuljaste galaksije je pridružena specifična vrednost metaličnosti iz početne distribucije. Čestice “nose” sa sobom svoje metaličnosti prilikom realizacije simulacije sudara. Praćenje svake čestice je moguće jer imaju svoj specifični identifikacioni broj (id) u Gadget2 kôdu, koji se ispisuje u izlaznom fajlu. Nakon što se simulacija izvrši i formira se GSS, izdvajamo čestice koje obrazuju tok i očitamo metaličnosti. Na osnovu to-



Slika 4.9: Raspodela čestica po metaličnosti za različite radijalne udaljenosti u patuljastoj galaksiji (od koje je nastao GSS) na početku simulacija u $d - [\text{Fe}/\text{H}]$ ravni, gde je d radijalna udaljenost od centra galaksije.

ga, konstruišemo raspodelu metaličnosti u simuliranom toku i poredimo sa posmatranom metaličnosti u 19 polja iz rada Conn et al. (2016). Takođe, moguće je izračunati srednje metaličnosti u posmatračkim poljima, koristeći koordinate date u radu Conn et al. (2016) i uporediti ih sa posmatranim vrednostima u ovim poljima. Testirali smo finalnu distribuciju metaličnosti duž toka za nekoliko trenutaka u post-sudarnom periodu (između dve i tri milijardi godina). Nakon toga variramo početnu raspodelu metaličnosti u patuljastoj galaksiji i koristimo Monte Karlo simulacije kako bismo našli onu početnu raspodelu koja obezbeđuje podudaranje simulirane i posmatrane raspodele u GSS, odnosno odredili disperziju simuliranih vrednosti metaličnosti i grešku početne pretpostavke. Šema Monte Karlo simulacije uključuje nekoliko koraka:

1. linearno opadajuća funkcija za početnu raspodelu metaličnosti u patuljastoj galaksiji (Slika 4.8). Za vrednost metaličnosti u centralnoj oblasti patuljaste galaksije smo uzeli -0,2, koja je zatim linearno opadala do vrednosti -1,5 u spoljašnjem delu galaksije. Ove vrednosti su motivisane posmatranim vrednostima metaličnosti toka datim u Conn et al. (2016).
2. patuljasta galaksija je podeljena na ljuske debljine 75 pc.
3. u svakoj ljusci srednja metaličnost, $[Fe/H]_{srednje}$ je uzeta iz linearne funkcije opisane u 1.;
4. pretpostavljamo Gausovu raspodelu metaličnosti u svakoj ljusci. Za svaku ljusku uzeta je standardna devijacija od $\sigma = 0.4$ za Gausovu distribuciju metaličnosti u ljusci. Ta vrednost je duplirana vrednost standardne devijacije posmatranih metaličnosti u Conn et al. (2016). Centralna vrednost je varirana između 0 i -0,3, dok je periferna vrednost bila od -1 do -1,8.
5. za svaku česticu u ljusci, nasumično dodeljujemo jednu vrednost metaličnosti iz Gausove raspodele;
6. ponavljamo proces (tačku 5) 1000 puta;
7. pratimo čestice patuljaste galaksije koje završe formirajući GSS i očitavamo vrednosti metaličnosti onih čestica čije se pozicije podudaraju sa posmatračkim poljima. Računamo srednje vrednosti metaličnosti i standardne devijacije za svako posmatračko polje;
8. poredimo računate metaličnosti sa posmatranim za svako posmatračko polje.

Centralna i periferna vrednost metaličnosti su varirane, a samim tim i gradijent. Finalna raspodela metaličnosti je dobro mapirana ovim testovima, pošto su za različite početne maksimalne i minimalne vrednosti metaličnosti u centru i perifernom delu galaksije, reprodukovane veće i manje vrednosti od posmatranih u GSS. Masa i morfologija patuljaste galaksije, zatim sudarni scenario su fiksirani parametri u proceduri modelovanja raspodele metaličnosti u GSS. Jedino je variran gradijent inicijalne raspodele metaličnosti u patuljastoj galaksiji.

Početni gradijent metaličnosti $\Delta[\text{Fe}/\text{H}]$ iz linearne funkcije $[\text{Fe}/\text{H}](r) = \Delta[\text{Fe}/\text{H}] \times r$ je -0.3. Testirane su i različite minimalne i maksimalne vrednosti metaličnosti u graničnim oblastima, odnosno u centru i na obodu patuljaste galaksije. To je uzrokovalo da gradijenti metaličnosti variraju od -0,1 do -0,5. Motivacija za ove vrednosti gradijenata sledi iz posmatračkih radova Koleva et al. (2009b,a), kao i teorijskog rada Kirihara et al. (2017).

4.2.2 Finalna raspodela metaličnosti u Velikom zvezdanom toku

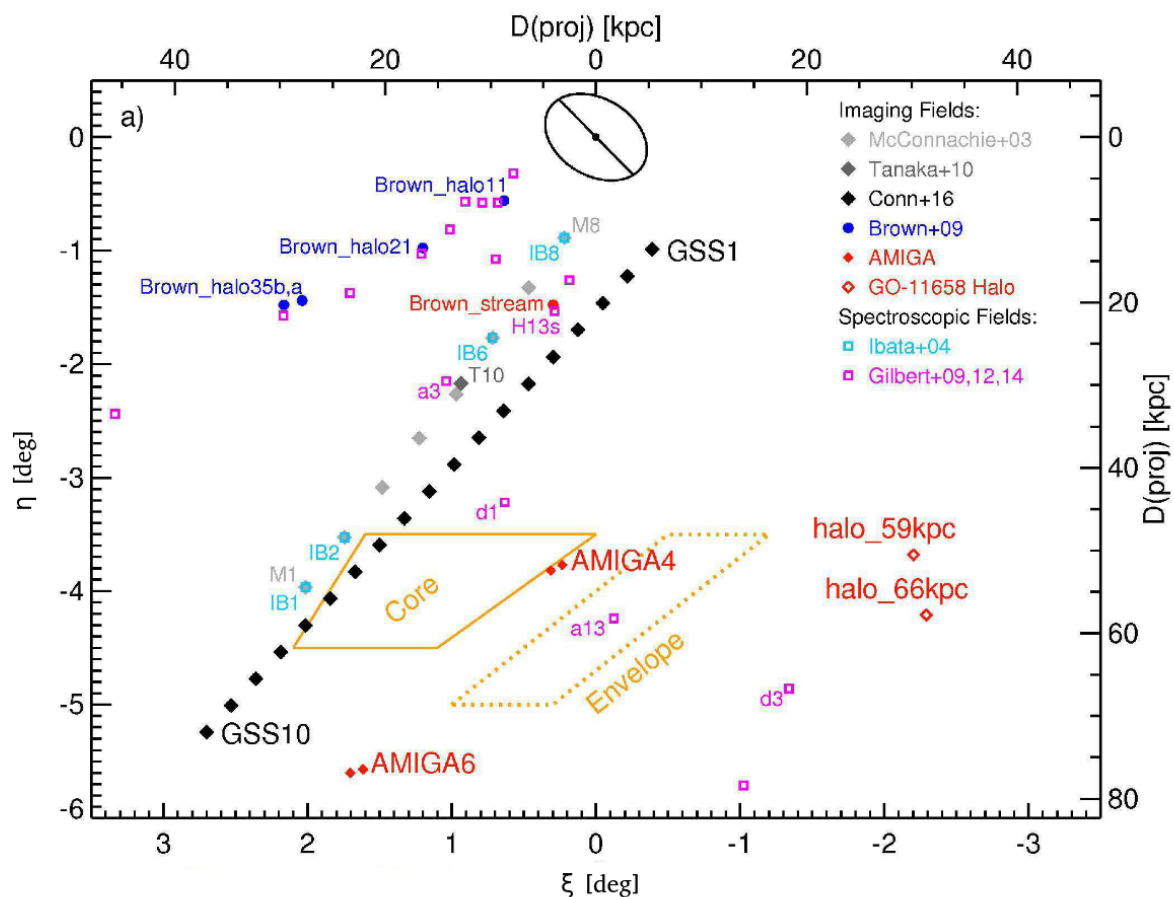
U posmatračkim radovima Conn et al. (2016) i Cohen et al. (2018) date su vrednosti metaličnosti za 19 polja i kao što je rečeno, postoje dva gradijenta duž toka - rastući od početka do centralnog dela, zatim opadajući gradijent od centralnog dela ka kraju toka. Vrednosti metaličnosti rastu od -0,7 dex do -0,2 dex, zatim opadaju do -1 dex. Monte Karlo metodom opisanom u prošlom odeljku, testirana je linearna funkcija inicijalne raspodele metaličnosti u patuljastoj galaksiji. Poređenje rezultujuće distribucije metaličnosti je izvršeno sa posmatračkim vrednostima iz rada Conn et al. (2016) koja dobro mapiraju raspodelu duž toka, s obzirom na gust raspored posmatračkih polja.

Posmatrane vrednosti metaličnosti razmatrane su u nekoliko radova, koji su zajedno sa prikazom regiona haloa M31 u kojem se nalazi GSS dati na Slici 4.10 (Cohen et al., 2018).

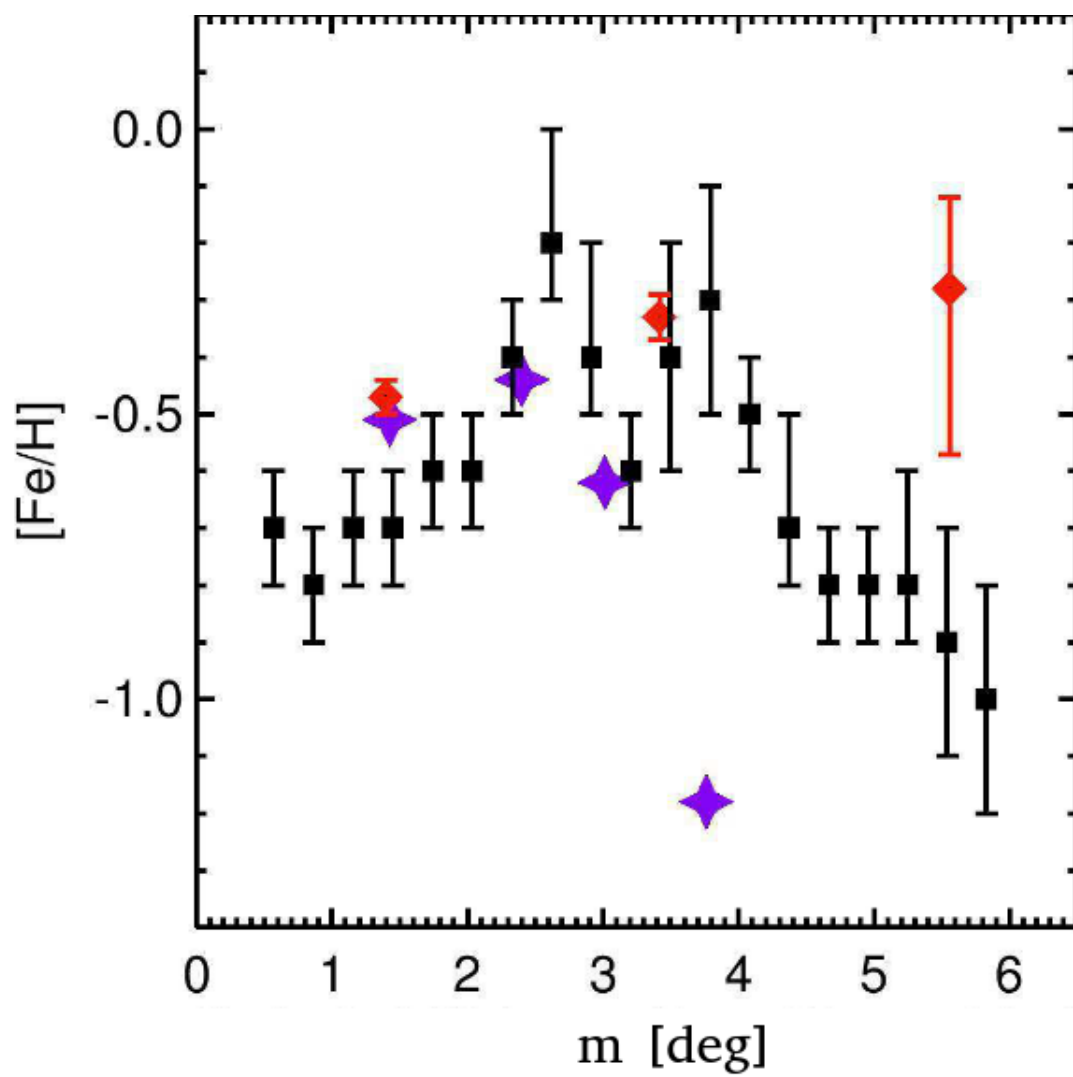
Prikaz raspodele metaličnosti duž GSS, dat je na Slici 4.11, gde su različitim simbolima prikazane različite posmatračke kolaboracije.

Vrednosti posmatrane metaličnosti sa kojima upoređujemo simuliranu raspodelu metaličnosti dati su u Tabeli 4, a preuzeti iz rada Conn et al. (2016). U prve dve kolone su date uglovne koordinate polja na nebu definisane jednačinama (50) i (51), dok je $[\text{Fe}/\text{H}]$ vrednost metaličnosti u tim poljima.

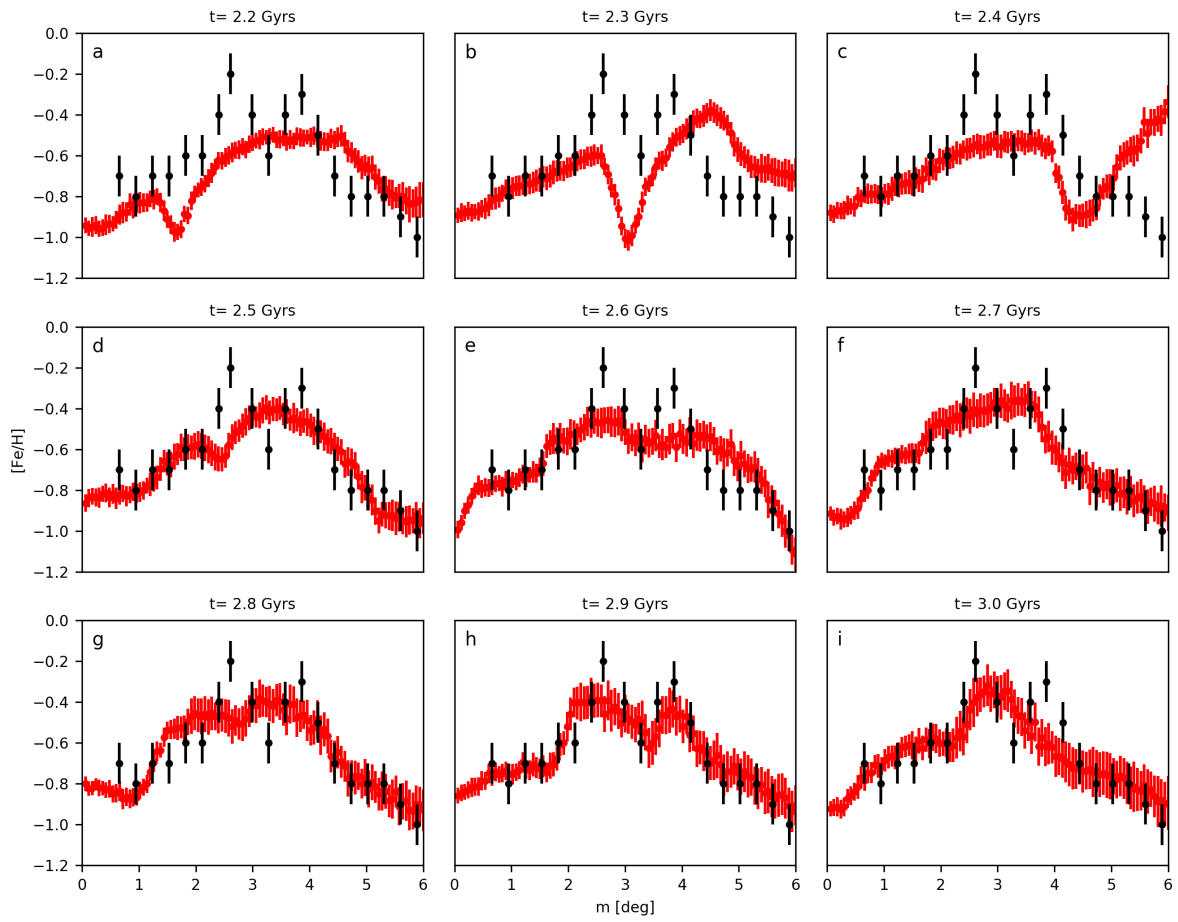
U prethodnom odeljku smo istakli kako radijalna brzina i daljine čestica toka mogu biti parametri koji određuju starost strukture, odnosno vremenski interval formiranja strukture od početka sudara. Na sličan način, možemo da iskoristimo metaličnost duž toka za određivanje vremenske skale nastanka samog toka. U tu svrhu uporedili smo simuliranu



Slika 4.10: Mapa posmatračkih polja u kojima je merena metaličnost duž i normalno na tok GSS. Različita merenja metaličnosti su iz radova navedenih u gornjem desnom uglu. Ose grafika su date u uglovnim koordinatama, a gore i desno date su i udaljenosti u kpc projektovane na ravan normalnu na pravac posmatranja. Slika je preuzeta iz Cohen et al. (2018).



Slika 4.11: Posmatrana raspodela metaličnosti duž GSS u rasponu od 6 stepeni. Crne tačke sa intervalima greške su posmatranja iz Conn et al. (2016), a slika je preuzeta iz Cohen et al. (2018).



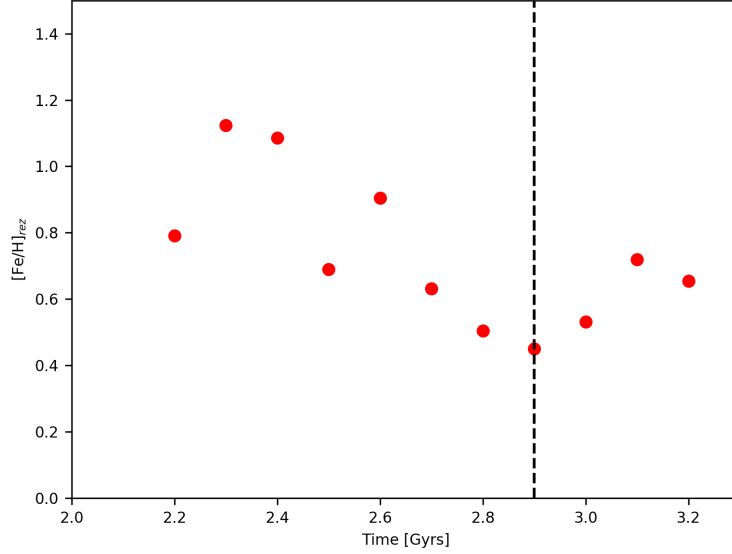
Slika 4.12: Finalna raspodela metaličnosti duž GSS za interval između 2,2 i 3 milijarde godina. Crvene tačke sa intervalima greške reprezentuju metaličnosti dobijene iz Monte Karlo simulacije, a crne tačke su posmatranja unutar 19 posmatračkih polja iz Conn et al. (2016).

polje	ξ	η	[Fe/H]
GSS1	-0,390	-0,988	-0,7
GSS1,5	-0,219	-1,225	-0,8
GSS2	-0,047	-1,462	-0,7
GSS2,5	0,125	-1,699	-0,7
GSS3	0,297	-1,937	-0,6
GSS3,5	0,469	-2,174	-0,6
GSS4	0,641	-2,411	-0,4
GSS4,5	0,812	-2,648	-0,2
GSS5	0,984	-2,885	-0,4
GSS5,5	1,156	-3,121	-0,6
GSS6	1,328	-3,358	-0,4
GSS6,5	1,500	-3,594	-0,3
GSS7	1,671	-3,830	-0,5
GSS7,5	1,843	-4,066	-0,7
GSS8	2,015	-4,302	-0,8
GSS8,5	2,186	-4,537	-0,8
GSS9	2,358	-4,772	-0,8
GSS9,5	2,530	-5,007	-0,9
GSS10	2,701	-5,242	-1

Tabela 4: Posmatrane vrednosti metaličnosti unutar 19 posmatračkih polja duž GSS preuzete iz Conn et al. (2016), date su u trećoj koloni, dok su prve dve kolone uglovne koordinate polja.

raspodelu metaličnosti sa posmatranom za različite vremenske trenutke. Poređenje ove dve raspodele dato je na Slici 4.12 za 9 trenutaka između 2,2 i 3 milijarde godina. Crvenom bojom prikazana je simulirana metaličnost, a crnom bojom posmatrana metaličnost iz rada Conn et al. (2016). Simulirana metaličnost u nekom posmatračkom polju, predstavlja srednju vrednost metaličnosti čestica, čije se koordinate nalaze unutar tog posmatračkog polja. Raspodela metaličnosti vremenski evoluirala, zato što GSS dinamički evoluirala pod uticajem dinamičkog trenja i plimskih efekata - zvezde menjaju svoje položaje i brzine tokom vremena, pa samim tim i vrednost metaličnosti u određenom posmatračkom polju. Nakon 1000 realizacija Monte Karlo simulacija prostora parametara udaljenost-metaličnost, rezultujuća metaličnost na svakoj udaljenosti duž toka, ima svoju srednju vrednost i interval greške (raspodele vrednosti od 1σ). Zbog gusto raspoređenih tačaka, ovaj interval je prezentovan debljinom raspodele simularine metaličnosti (crvena boja). Sa Slike 4.12 vidimo da se podudaranje sa posmatranim vrednostima menja sa vremenom.

Potrebno je pronaći najbolji trenutak poklapanja simulirane i posmatrane raspodele metaličnosti. Najpre je izračunata suma kvadrata razlike ove dve vrednosti, $[\text{FeH}]_{\text{rez}}$, po



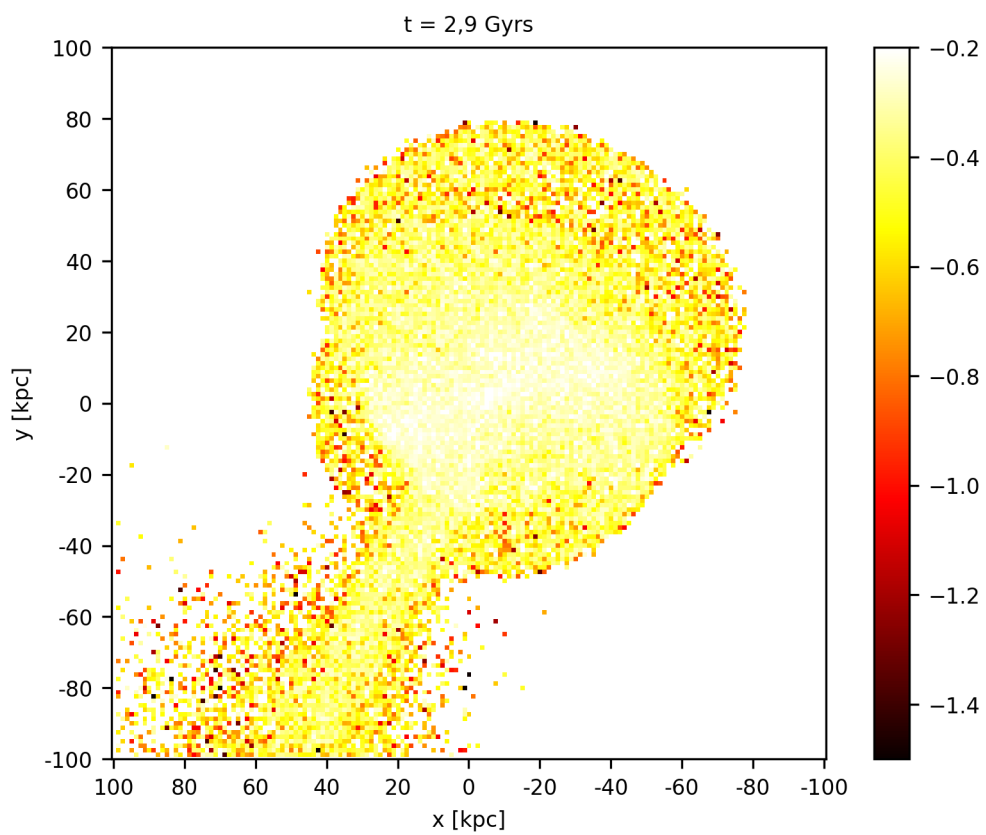
Slika 4.13: Rezidualne metaličnosti za različite vremenske trenutke. Naš model sugerše da je najbolje poklapanje simulirane i posmatrane raspodele metaličnosti posle 2,9 milijardi godina od početka simulacije.

svim posmatračkim poljima i to je ponovljeno za različite trenutke. Zatim je nađen trenutak za koji je ta suma minimalna. Rezidualne vrednosti metaličnosti za jedan trenutak su predstavljene jednačinom:

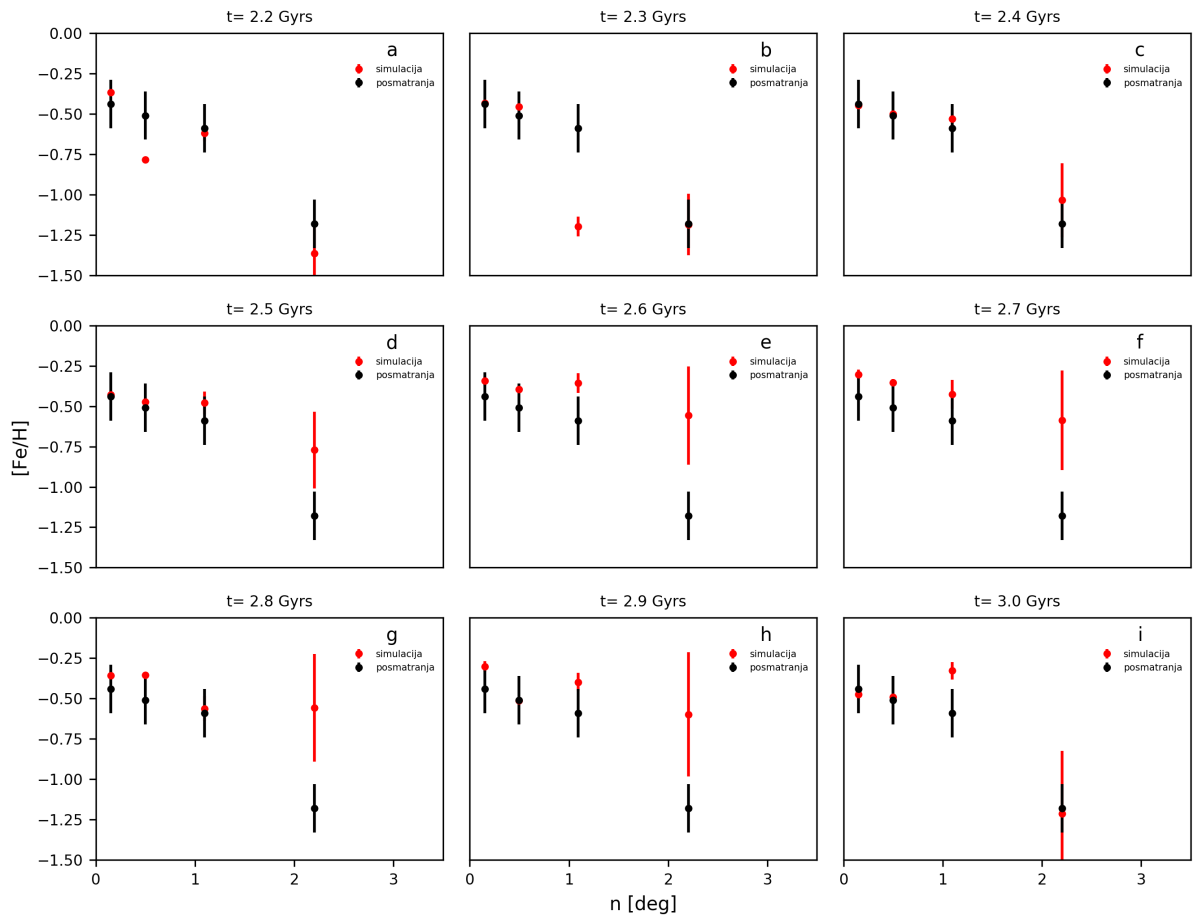
$$[\text{Fe}/\text{H}]_{\text{rez}} = \sum_{i=1}^{19} \sqrt{([\text{Fe}/\text{H}]_{\text{MC}}(i) - [\text{Fe}/\text{H}]_{\text{pos}}(i))^2} \quad (56)$$

gde su $[\text{Fe}/\text{H}]_{\text{MC}}$ simulirane vrednosti metaličnosti, a $[\text{Fe}/\text{H}]_{\text{pos}}$ posmatrane vrednosti iz Conn et al. (2016). Simulacije su izvršene i za vreme nakon 3 milijarde godina od početka sudara, bez obzira na činjenicu da gotovo svi radovi sugeršu nastanak struktura između dve i tri milijarde godina (npr. Hammer et al., 2018). Na Slici 4.13 je prikazana evolucija odstupanja simulirane i posmatrane vrednosti metaličnosti za sva posmatračka polja između 2,2 i 3,2 milijardi godina. Najbolje slaganje imamo za trenutak 2,9 milijardi godina, što sugerše i Slika 4.13. U trenutku 2,9 milijardi godina, rezidualne vrednosti metaličnosti imaju najmanju vrednost.

Grafik h na Slici 4.12, koji odgovara trenutku od 2,9 milijardi godina nakon početka sudara, predstavlja najbolje poklapanje između simulirane i posmatrane metaličnosti u toku. Ovo slaganje je prisutno u najvećem broju polja, a najveće neslaganje je u polju 8 (za vrednost koordinate duž toka od 2,6 stepeni), za najveću vrednost metaličnosti duž toka. Postoje različite posmatračke vrednosti za ovo polje u ranijim radovima. U radu



Slika 4.14: Mapa metaličnosti za GSS nakon 2,9 milijardi godina od početka sudara. Možemo da vidimo manje vrednosti metaličnosti na obodu toka, u odnosu na centralni deo.



Slika 4.15: Simulirana finalna raspodela metaličnosti za pravac normalan na GSS (crvene tačke) upoređena sa posmatranim vrednostima (crne tačke) iz Gilbert et al. (2009).

Cohen et al. (2018) je prijavljena manja vrednost za isto polje od vrednosti u radu Conn et al. (2016) što je prikazano na Slici 4.11, što daje još bolje slaganje sa simuliranom metaličnošću. U našem modelu vrednost od -0,2 dex takođe je van predviđenog intervala za tu daljinu duž GSS.

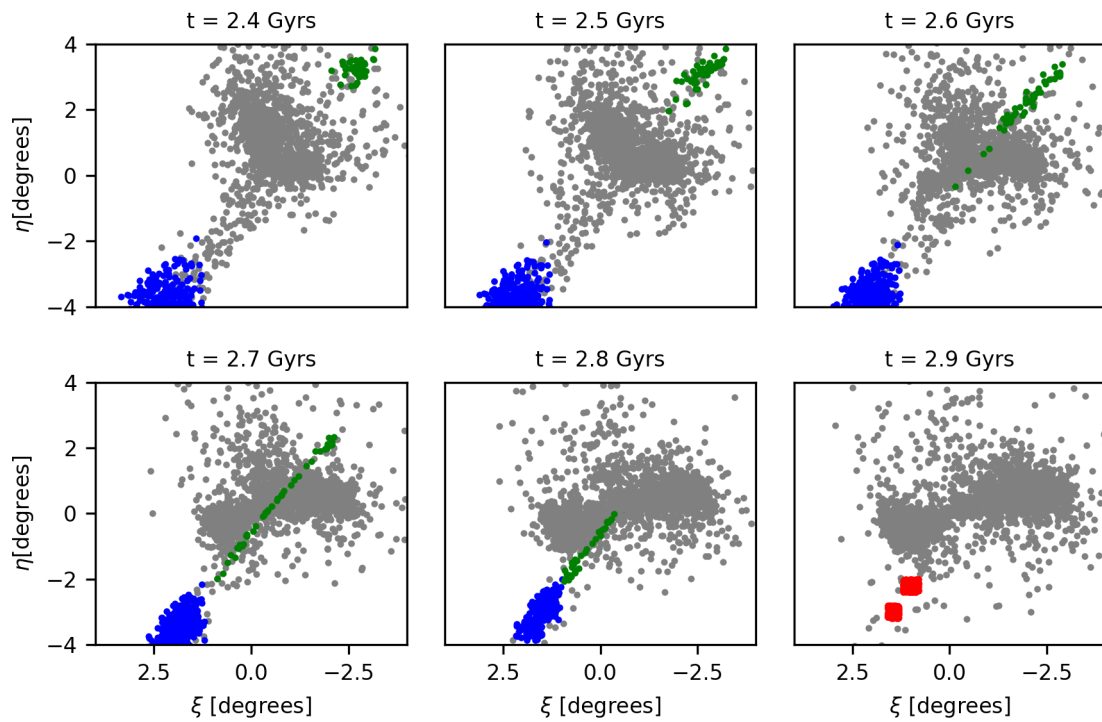
Pored gradijenta duž toka, ranije je posmatran gradijent metaličnosti u nekoliko polja u pravcu normalnom na pravac toka. Tu je registrovana razlika između “jezgra” i “omotača” GSS (Ibata et al., 2007; Gilbert et al., 2009). Raspored polja je dat na Slici 4.10 preuzetoj iz rada Cohen et al. (2018). To su polja koja su označena kao d1, AMIGA4 i a13.

Ukoliko predstavimo metaličnost svih čestica (koje formiraju strukture u halou M31 raspadom patuljaste galaksije) na mapi metaličnosti prikazanoj na Slici 4.14, jasnije se vidi gradijent između jezgra i omotača GSS nego duž GSS. To sugeriše da je centralni deo, tj. jezgro GSS bogatije metalima nego omotač. Mapa je urađena za trenutak 2,9 milijardi godina, dobijen kao najoptimalniji iz raspodele metaličnosti duž toka. Ova mapa sugeriše i iz kojih delova patuljaste galaksije zvezde formiraju određene strukture. “Poprečni” gradijent je detaljnije ispitan i prikazan na Slici 4.15. Posmatrane vrednosti metaličnosti su preuzete iz rada Gilbert et al. (2009) i označene crnom bojom. Ove vrednosti su upoređene sa simuliranim vrednostima (crvena boja) za posmatračka polja. Metaličnost opada od jezgra ka omotaču i to potvrđuje i naš teorijski model i posmatranja, pri čemu se najbolje poklapanje modela i posmatranja ostvaruje za trenutak 2,4 milijarde godina od početka sudara.

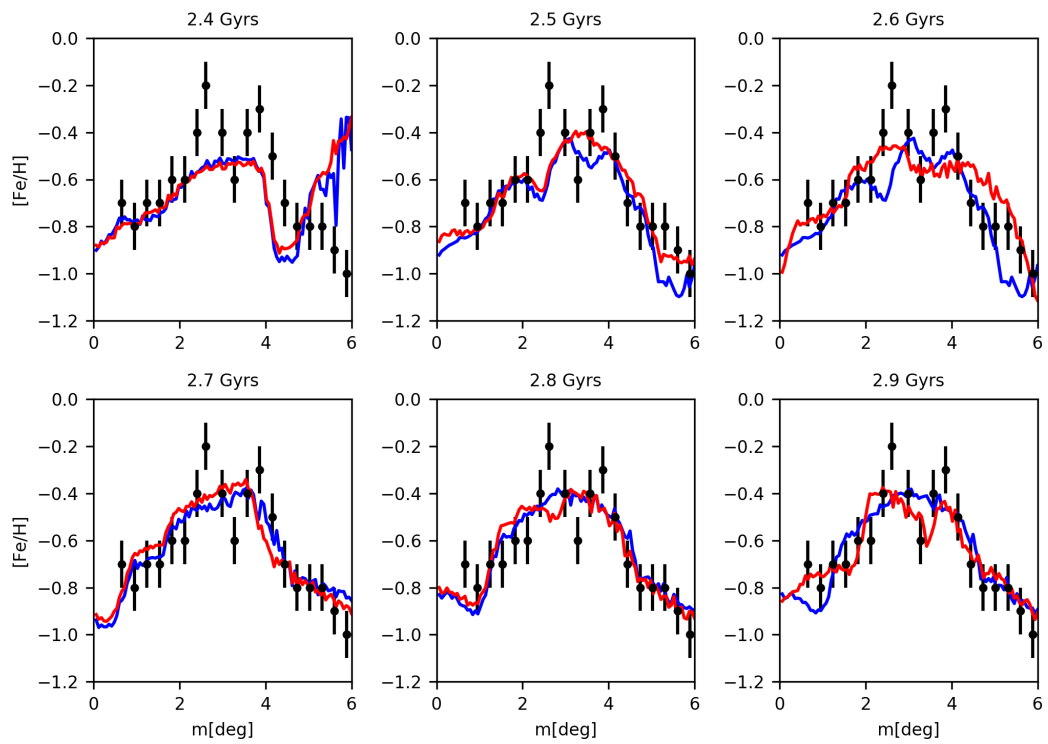
4.2.3 Pikovi u raspodeli metaličnosti

Simulirana raspodela metalčnosti u toku pokazuje dva pika u centralnom delu (grafik h, Slika 4.12). S obzirom na to da je u našoj simulaciji metalčnost jedne čestice stalna za tu česticu, dva pika mogu da se objasne specifičnim položajem, ili promenom položaja čestica. Analizom raspodele čestica po brzinama, ustanovljeno je da postoji više kinematičkih grupa. Dve kinematičke grupe čestica iz regiona gde vidimo pikove metaličnosti su prikazane na Slici 4.16 preko njihovih koordinata. Plave tačke reprezentuju zvezde koje se kreću u severozapadnom smeru, dok zelene tačke reprezentuju zvezde koje se kreću u suprotnom smeru - jugoistočnom. Pikovi metaličnosti se formiraju kao privremene strukture kada se obe grupe čestica nađu u istim posmatračkim poljima. Čestice iz ovih polja su i praćene od trenutka 2,4 milijarde godina od početka sudara do 2,9 milijardi godina kada se nađu u poljima gde se formiraju dva pika metaličnosti.

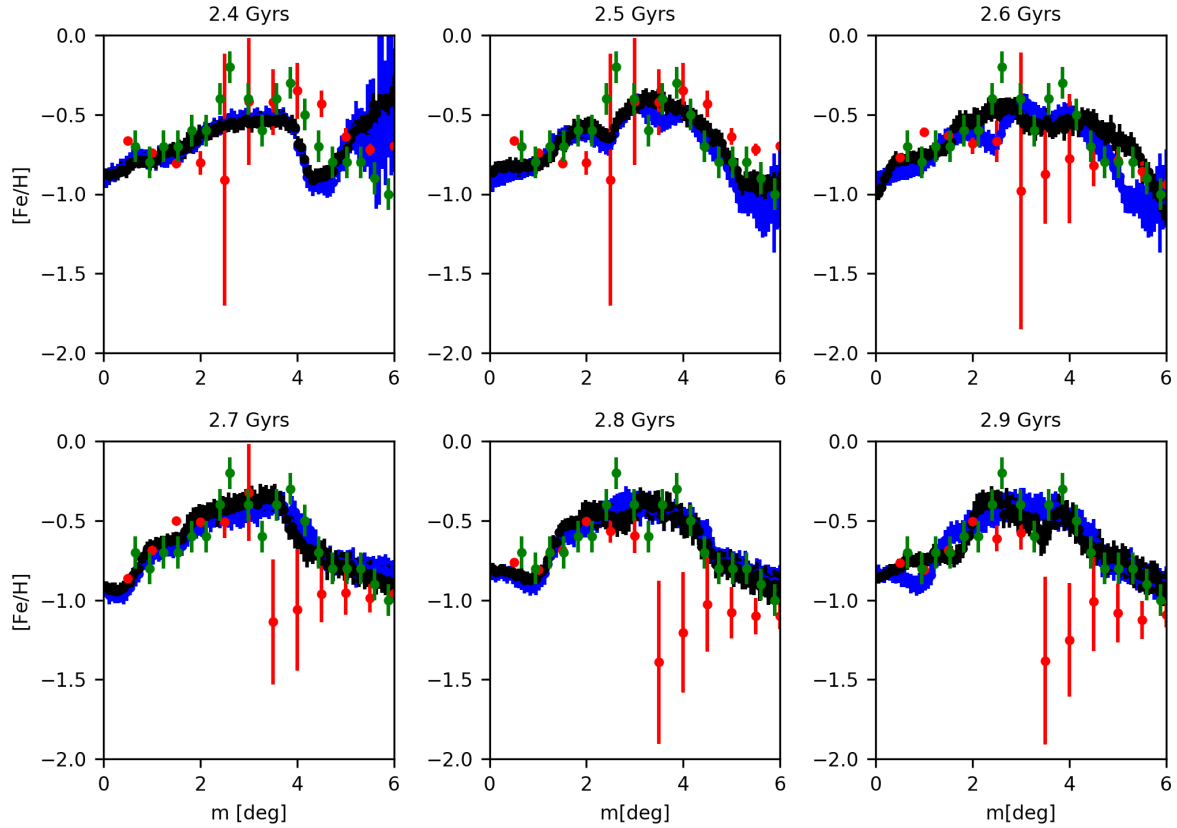
Posmatrana distribucija metalčnosti duž GSS pokazuje dva pika bez sugestija o njihovom poreklu (Conn et al., 2016; Cohen et al., 2018). Takođe nije bilo jasno da li su ovi pikovi stalne ili promenljive strukture i na kojoj vremenskoj skali. Pošto možemo da



Slika 4.16: Kretanje čestica u različitim smerovima duž GSS tokom vremenskog intervala od 2,4 do 2,9 milijardi godina od početka simulacije. Plave tačke predstavljaju čestice koje se kreću u NW smeru, dok zelene tačke predstavljaju čestice koje se kreću u SE smeru. Ove čestice dospevaju u region gde vidimo pikove u raspodeli metaličnosti. Ovi regioni su predstavljeni crvenim tačkama na poslednjem panelu.



Slika 4.17: Raspodela metaličnosti duž GSS za 6 trenutaka između 2,4 i 2,9 milijardi godina. Posmatrana metaličnost je predstavljena crnim tačkama, a simulirana crvenom linijom koja odgovara panelima d, e, f, g, h, i, na Slici 4.15. Plavom linijom prikazana je metaličnost, ali samo za čestice koje se kreću u NW smeru.



Slika 4.18: Posmatrana metaličnost je predstavljena zelenim tačkama, a simulirana plavom linijom. Debljina linije odgovara intervalu greške. Plava linija odgovara graficima c, d, e, f, g, h na Slici 4.12, ali samo za čestice koje se kreću u NW smeru. Crvene tačke reprezentuju čestice koje se kreću u SE smeru, a sa crnom linijom su prikazane sve čestice i njihov ukupan, kumulativni uticaj na finalni oblik raspodele metaličnosti sa dva pika.

evoluiramo raspodelu metaličnosti duž toka, numeričke simulacije mogu da budu vrlo koristan alat za proučavanje pikova u raspodeli metaličnosti. Našli smo da oblik distribucije metaličnosti zavisi od dinamike čestica koje formiraju tok. Veliki zvezdani tok se formira kroz rasipanje materijala patuljaste galaksije koja se sudara sa M31. Usled okolnosti sudara, patuljasta galaksija prolazi kroz centralni deo M31 po veoma radijalnoj orbiti, da bi nakon prolaska, bila povučena nazad. Ovo kretanje se ponavlja nekoliko puta. Svaki put kada galaksija prođe kroz centralni region M31, gubi značajnu količinu materijala, odnosno zvezda. Posledica toga je da se sve zvezde u GSS ne kreću u istom smeru i da imamo vrlo komplikovanu kinematičku sliku toka.

Na Slici 4.16 vidimo da se neke čestice kreću u SE smeru, dalje od centra M31, dok se neke kreću u NW smeru, ka centru. Ove čestice imaju različite brzine u $\xi - \eta$ ravni, ali takođe i komponente brzine duž pravca posmatranja. Čestice koje se kreću u SE smeru

imaju pozitivne komponente brzine u pravcu posmatranja čija je srednja vrednost ~ 30 km/s, dok čestice koje se kreću u suprotnom smeru imaju negativne komponente brzine u pravcu posmatranja čija je srednja vrednost ~ -420 km/s.

Na Slici 4.17 je prikazana posmatrana raspodela metaličnosti crnim tačkama i simulirana metaličnost crvenom linijom, za sve čestice, koje odgovaraju graphicima c, d, e, f, g, h sa Slike 4.12. Plavom linijom prikazana je simulirana distribucija metaličnosti, ali samo za čestice koje se kreću u NW smeru. Vidimo dva pika samo kada su sve čestice uključene, tako da unutrašnja dinamika toka, tačnije činjenica da imamo bar dve kinematičke grupe čestica, je odgovorna za ovakvu raspodelu metaličnosti duž toka koja ima dva pika.

Poređenje raspodele metaličnosti kada su sve čestice uključene i kada uzimamo u obzir samo one koje se kreću u NW ili SE smeru, prikazano je na Slici 4.18. Dinamička evolucija toka, drugim rečima, suprotni smerovi kretanja čestica, stvaraju pikove u raspodeli metaličnosti kao privremene strukture, ali globalna distribucija sa maksimalnom vrednošću metaličnosti u centralnom delu GSS je očuvana.

4.3 Rezime nastanka Velikog zvezdanog toka i raspodele metaličnosti

U ovom poglavlju ispitana je raspodela metaličnosti u Velikom zvezdanom toku, u haolu galaksije M31. Samo formiranje toka je otvoreno pitanje, ali ono što sugerise većina radova jeste da je zvezdani tok nastao sudarom Andromede i patuljaste galaksije koja je njen satelit. U ovoj disertaciji za patuljastu galaksiju koja formira GSS, korišćen je model patuljaste sferoidne galaksije.

Teorijsko ispitivanje nastanka zvezdanog toka koji je otkriven posmatrački, u ovom radu podrazumeva realizaciju numeričkih simulacija N-tela. Simulacijama je predstavljen sudar M31 i patuljaste galaksije, pri čemu podrazumevamo da obe galaksije imaju barionsku, odnosno zvezdanu komponentu i halo tamne materije. Numeričke simulacije daju informaciju o dinamičkoj istoriji sudara i pri tome parametri dobijeni iz simulacija, moraju da se poklapaju sa vrednostima koje su posmatrane. Posmatrački kriterijumi koji pre svega stavljaju ograničenja na moguće modele, su orijentacija toka, dubina (prostor-na raspodela materije) i raspodela brzina u toku. Kako je u ranijim radovima određeno, najverovatniji vremenski interval sudara je između 2 i 3 milijarde godina. Uspešno su reprodukovane raspodele udaljenosti i brzina u toku GSS, zatim orijentacija na nebu, što je prikazano na Slikama 4.1, 4.2 i 4.4.

Nakon prvih posmatranja metaličnosti duž zvezdanog toka, koja su predstavljena u radovima Conn et al. (2016) i Cohen et al. (2018), postale su dostupne neophodne informacije da bi se ta raspodela teorijski modelovala. Raspodelom metaličnosti u toku smo ograničili prostor parametara i povezali je sa početnom raspodelom metaličnosti u patuljastoj galaksiji. Reprodukovana je posmatrana distribucija metaličnosti prezentovana u radu Conn et al. (2016), pošto je formirana nakon sudara patuljaste galaksije sa M31 (Slika 4.12).

Za gradijent metaličnosti u patuljastoj galaksiji iskorišćena je linearno opadajuća funkcija na početku simulacije. Pomoću Monte Karlo simulacija, pridružili smo vrednosti metaličnosti svakoj (barionskoj) čestici galaksije i reprodukovali posmatranu distribuciju u GSS za vremenski interval između 2 i 3 milijarde godina, od početka simulacije. Najbolje slaganje simulirane i posmatrane raspodele metaličnosti u toku, postignuto je za vremenski trenutak 2,9 milijardi godina od početka sudara (Slike 4.12 i 4.13). U radovima Ibata et al. (2007) i Gilbert et al. (2009) prikazan je posmatrani gradijent metaličnosti u pravcu normalnom na tok. Metaličnost jezgra toka je veća od one u omotaču. U ovoj disertaciji smo reprodukovali ovaj poprečni gradijent. Za gradijent između jezgra i omotača smo dobili najbolje poklapanje nakon 2,4 milijarde godina od početka sudara (Slika 4.15). Za ovaj pravac, vrednosti simulirane i posmatrane metaličnosti su poređenje za 4 posmatračka polja, za razliku od pravca duž toka gde posmatračka polja mnogo bolje mapiraju raspodelu. Za isti interval između 2 i 3 milijarde godina, reprodukovana je raspodela metaličnosti u oba pravca: duž toka i normalno na tok.

Dinamičke osobine zvezdanog toka mogu da budu odgovorne za dva pika u raspodeli metaličnosti, koja su posmatrana u centralnom delu GSS. Pratili smo čestice iz regiona gde se obrazuju pikovi i zaključili da je unutrašnja dinamika toka određena sa bar dve grupe zvezda: jedne koja se kreće u NW smeru i druge koja se kreće u suprotnom, SE smeru, što je prikazano na Slikama 4.16 i 4.17. Pošto imamo najmanje dve kinematičke grupe, ovo vodi zaključku da su pikovi metaličnosti privremene strukture u distribuciji metaličnosti i da se globalna raspodela sa maksimalnom vrednošću u centralnom delu GSS i manjim vrednostima na krajevima GSS, očuvava duž toka u dužem vremenskom periodu.

U radu Kalirai et al. (2006a) predstavljene su dve kinematičke komponente u toku. Korelacija pikova u raspodeli metaličnosti sa drugom komponentom iz rada Kalirai et al. (2006a) nije uočena, pošto je ova komponenta posmatrana u polju H13 (Kalirai et al., 2006a; Cohen et al., 2018) koje je na $R_{proj} = 20$ kpc, što odgovara polju $m = 1.53$ u radu Conn et al. (2016), a pikovi metaličnosti su između 2,5 i 4 stepena (Conn et al., 2016;

Cohen et al., 2018). Bez obzira na to, posmatranja dve kinematičke komponente u polju H13 i dva pika raspodele metaličnosti duž toka, sugerišu vrlo kompleksnu kinematičku sliku zvezdanog toka.

Početna raspodela metaličnosti u patuljastoj galaksiji određuje finalnu metaličnost u zvezdanom toku. Ovo može da bude dodatni faktor za modelovanje dinamičkih osobina samog sudara galaksija. Rezultati disertacije iz ovog poglavlja su objavljeni u radu Milošević et al. (2022). Ovaj model takođe predviđa nastanak zvezdanih ljuski u severoistočnom i zapadnom delu haloa M31, odnosno posmatranih NE i W ljuski u istom sudaru u kojem nastaje i GSS. Osobine samih zvezdanih ljuski, kao i njihova metaličnost, opisani su u narednom odeljku.

5 Simulacije formiranja i metaličnost NE i W zvezdane ljuske

5.1 Početna raspodela metaličnosti

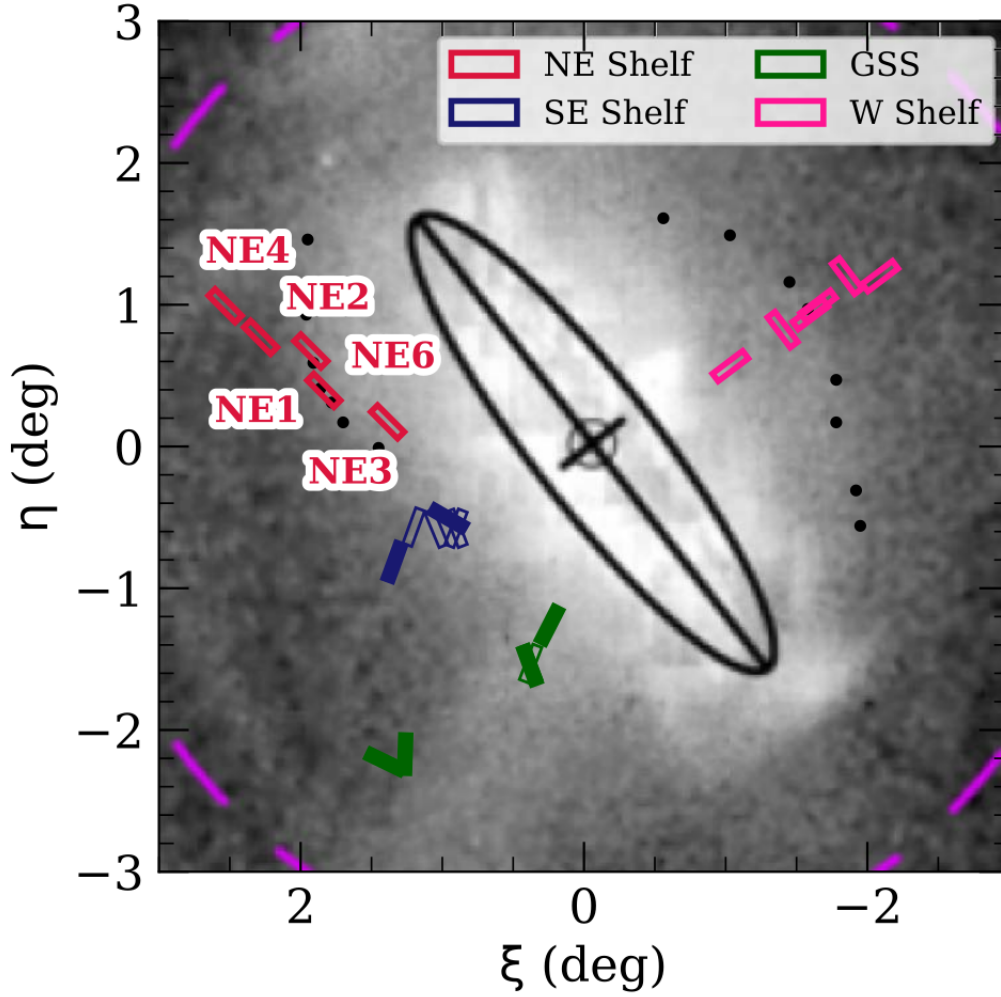
Iskorišćen je isti model početne metaličnosti za patuljastu galaksiju koji podrazumeva negativan gradijent, odnosno veću metaličnost u centru galaksije koja onda radijalno opada ka periferiji, po linearnoj funkciji. Gradijent $\Delta[\text{Fe}/\text{H}] = -0.3 \pm 0.2$ uspešno reprodukuje raspodelu u GSS. Istim modelom je upoređena finalna metaličnost u zvezdanim ljuskama sa posmatranim fotometrijskim vrednostima metaličnosti, datim u radu Escala et al. (2022). Teorijski radovi predviđaju nastanak ljuski nakon nekoliko orbita patuljaste galaksije u gravitacionom potencijalu M31 (Fardal et al., 2008; Kirihaara et al., 2017; Miki et al., 2016b).

Korišćen je Monte Karlo (MC) metod za ispitivanje početne raspodele u patuljastoj galaksiji, opisan u poglavlju 4.2. Galaksija je podeljena u sferne ljuske i za svaku česticu u svakoj ljusci, nasumično je dodeljena vrednost metaličnosti iz Gausove distribucije. Centralna vrednost Gausove distribucije u svakoj ljusci je uzeta iz negativnog radijalnog gradijenta metaličnosti. Ove čestice su praćene kroz simulaciju preko svojih id brojeva i izračunata je finalna metaličnost u posmatračkim poljima. Posle 1000 iteracija izračunali smo srednju vrednost i standardnu devijaciju metaličnosti u svakom posmatračkom polju i na taj način generisali finalnu raspodelu.

Uzete su vrednosti u intervalu od 0 do -0,3 za centralni deo galaksije i od -1 do -1,8 za periferiju. Ove vrednosti i gradijent $\Delta[\text{Fe}/\text{H}] = -0.3 \pm 0.2$ su iskorišćeni za opisivanje finalne raspodele u GSS, pa se koriste i za opis finalne distribucije metaličnosti za NE i W ljusku. Početna raspodela metaličnosti je motivisana posmatračkim podacima duž GSS datim u radovima Conn et al. (2016) i Cohen et al. (2018). Za širinu gausove raspodele u ljusci uzeto je $\sigma = 0.4$. Sa fiksiranim svim parametrima, osim početne raspodele u patuljastoj, ispitali smo finalnu raspodelu u NE i W zvezdanim ljuskama i uporedili sa posmatranim vrednostima datim u radu Escala et al. (2022).

5.2 Rezultati

U radovima Fardal et al. (2008), Sadoun et al. (2014) i u ovoj disertaciji opisano je formiranje zvezdanih ljuski u istom sudarnom procesu u kojem je formiran i GSS. Ovde je prikazan nastanak NE i W ljuske u jedinstvenom sudaru i prvi put je modelovana raspodela vrednosti metaličnosti za ove zvezdane ljuske.

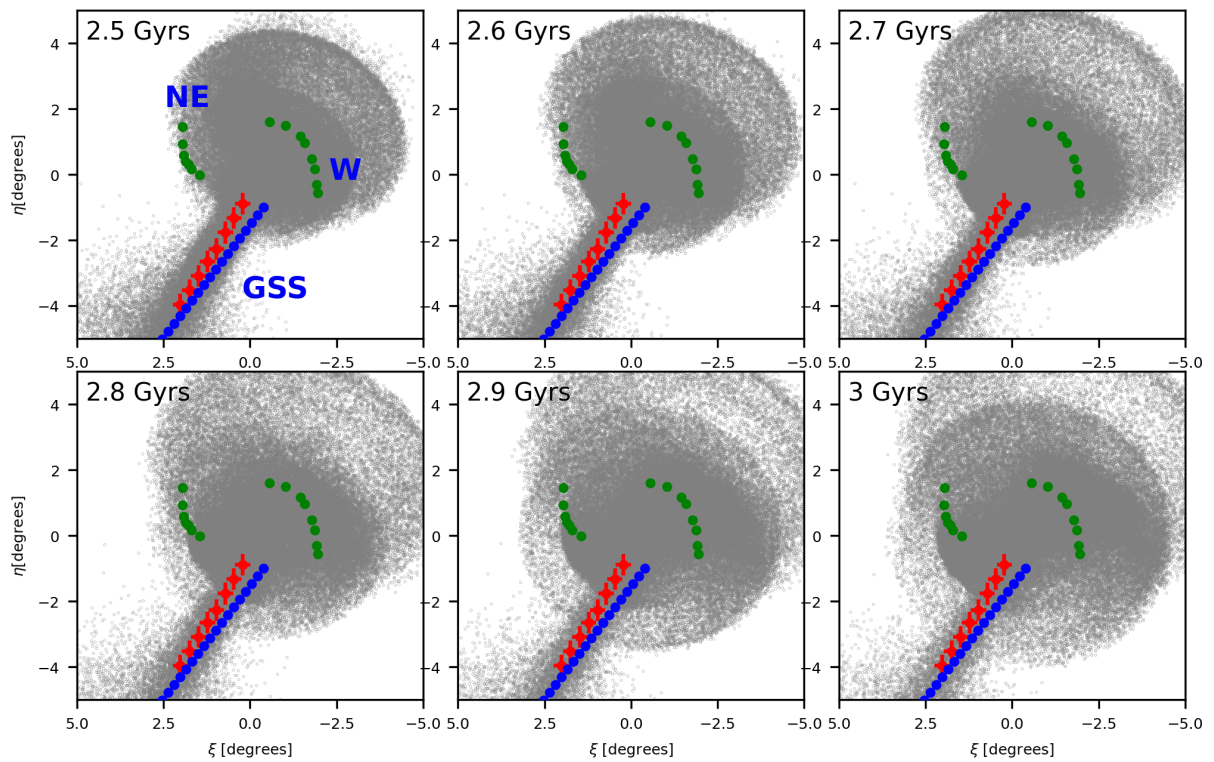


Slika 5.1: Posmatračka polja u NE i W ljusci. Polja u W ljusci su polja iz rada Fardal et al. (2012). Slika je preuzeta iz Escala et al. (2022).

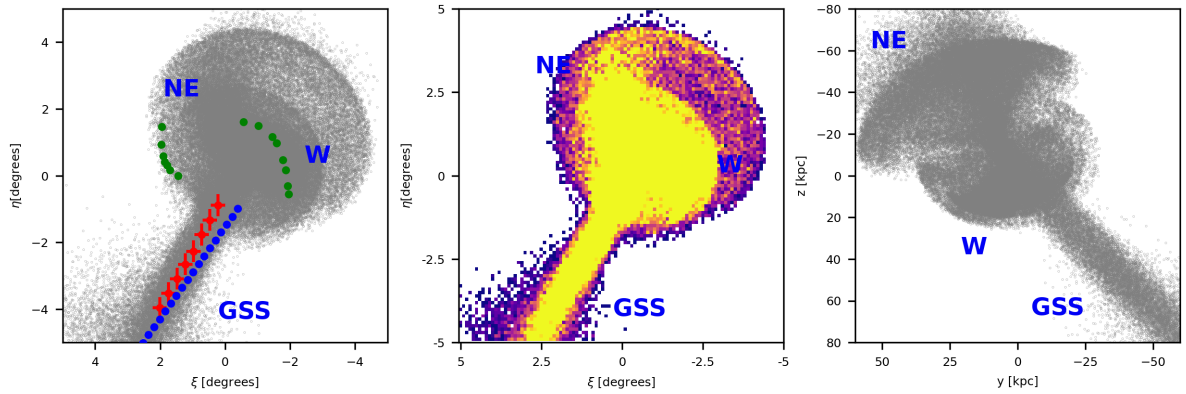
5.2.1 Morfologija i kinematika NE i W zvezdane ljuske

Kao što je već pomenuto, patuljasta galaksija se na svojoj skoro radijalnoj orbiti plimski raspada u halou M31, formirajući GSS, kao i NE i W zvezdane ljuske. U prvom prolazu kroz pericentar, formira se GSS, u drugom prolazu NE ljuska, a u trećem W zvezdana ljuska. NE ljuska je formirana “ispred” M31, odnosno bliže nama, dok je W ljuska (kao i GSS) formirana dalje od nas. Ako postavimo z-osu duž pravca posmatranja sa početkom u centru M31, onda objekti koji pripadaju W ljusci imaju pozitivne vrednosti z-koordinate, dok objekti koji pripadaju NE ljusci imaju negativne vrednosti z-koordinate (Fardal et al., 2008; Fardal et al., 2012; Escala et al., 2022).

Mapa posmatračkih polja iz radova Fardal et al. (2012) i Escala et al. (2022) data je



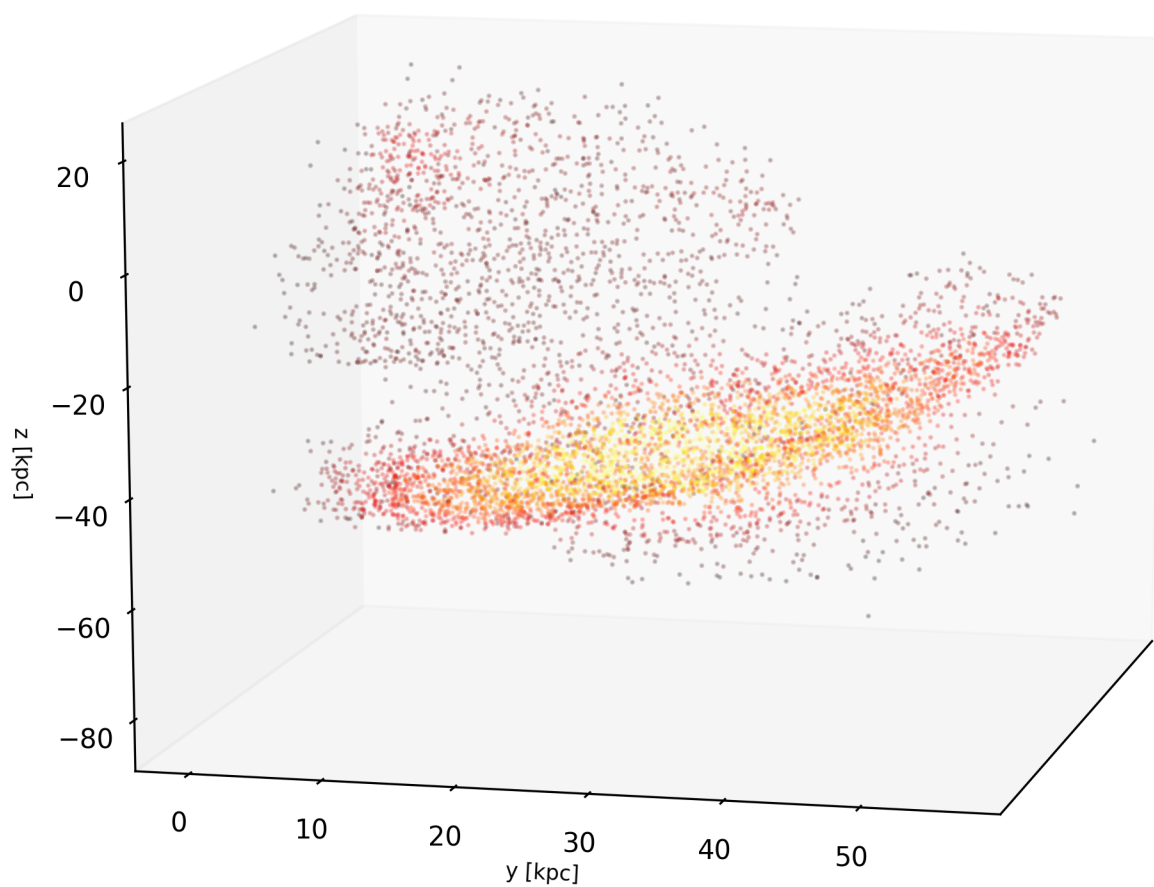
Slika 5.2: Formiranje GSS, NE i W zvezdane ljuske između 2,5 i 3 milijarde godina od početka simulacije. Na svakom panelu crveni krstići predstavljaju posmatrane vrednosti udaljenosti date u McConnachie et al. (2003); plave tačke su posmatrački podaci iz Conn et al. (2016), dok zelene tačke predstavljaju koordinate ivica NE i W ljuski datih u Fardal et al. (2008).



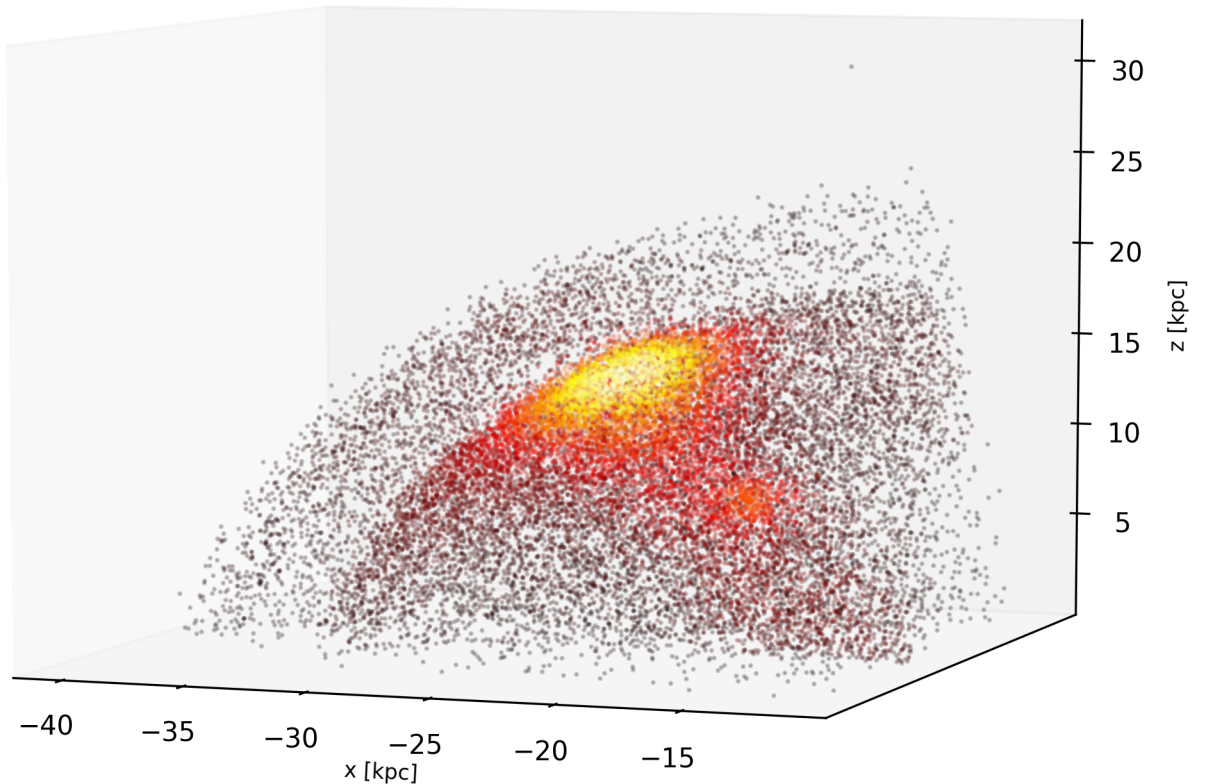
Slika 5.3: Čestice iz GSS, NE i W ljuske iz simulacije posle 2,5 milijardi godina. Na levom panelu simboli su isti kao na slici 6.4. Srednji panel predstavlja površinsku gustinu, gde se jasnije vide podstrukture, dok desni panel reprezentuje podstrukture u y-z ravni.

na Slici 5.1. Na Slici 5.2 je prikazano formiranje GSS i ljuski u našoj simulaciji N-tela. Prikazane su samo čestice patuljaste galaksije, a čestice M31 izostavljene, radi bolje vidljivosti. Možemo da vidimo formirani tok i posmatračka polja pri čemu su polja iz McConnachie et al. (2003) prikazana crvenim krstićima, a iz Conn et al. (2016) plavim tačkama. Zelene tačke reprezentuju obod zvezdanih ljuski, pri čemu su koordinate centra polja date u radu Fardal et al. (2008). Za ova posmatračka polja, koja su takođe data u radu Escala et al. (2022) izračunali smo metaličnost iz naše simulacije. Zvezdane ljuske prikazane u koordinatama na način na koji ih vidimo na nebu, nisu toliko uočljive. U radu Hammer et al. (2018) vremenski interval potreban za formiranje struktura u halou M31 je procenjen između 2 i 3 milijarde godina; u Sadoun et al. (2014) je određena vremenska skala od 2,7 milijardi godina za formiranje GSS, dok je u ovoj disertaciji data skala od 2,9 milijardi godina. Ovo vreme je procenjeno iz raspodele metaličnosti, odnosno vremena za koje imamo najbolje poklapanje simulirane i posmatrane metaličnosti za GSS (poglavlje 4). Na Slici 5.2 je prikazana evolucija struktura između 2,5 i 3 milijarde godina.

Strukture koje nastaju detaljnije se vide na Slici 5.3. Vidimo formirane zvezdane ljuske na srednjem panelu, gde je prikazana površinska gustina u ξ - η ravni, kao i na levom panelu. Na desnom panelu Slike 5.3 predstavljene su zvezdane ljuske, kao i GSS u y-z ravni, gde možemo da vidimo čestice na obodu ljuski, koje imaju radijalne daljine (u odnosu na centar M31, projektovane na ravan normalnu na pravac vizure) oko 40 kpc za NE ljusku, odnosno oko 20 kpc za W ljusku. Takođe čestice NE ljuske imaju negativne vrednosti z, dok W imaju pozitivne. Iste vrednosti radijalne udaljenosti, projektovane na ravan normalnu na pravac posmatranja, date su u radovima Fardal et al. (2008) i Escala



Slika 5.4: 3-D plot NE ljuske za trenutak 2,4 milijarde godina nakon početka sudara. Nijanse boja od crvene ka žutoj predstavljaju koncentraciju čestica koja se kreće od manje ka većoj. Koordinata z je duž pravca posmatranja, a centar koordinatnog sistema je u centru M31.



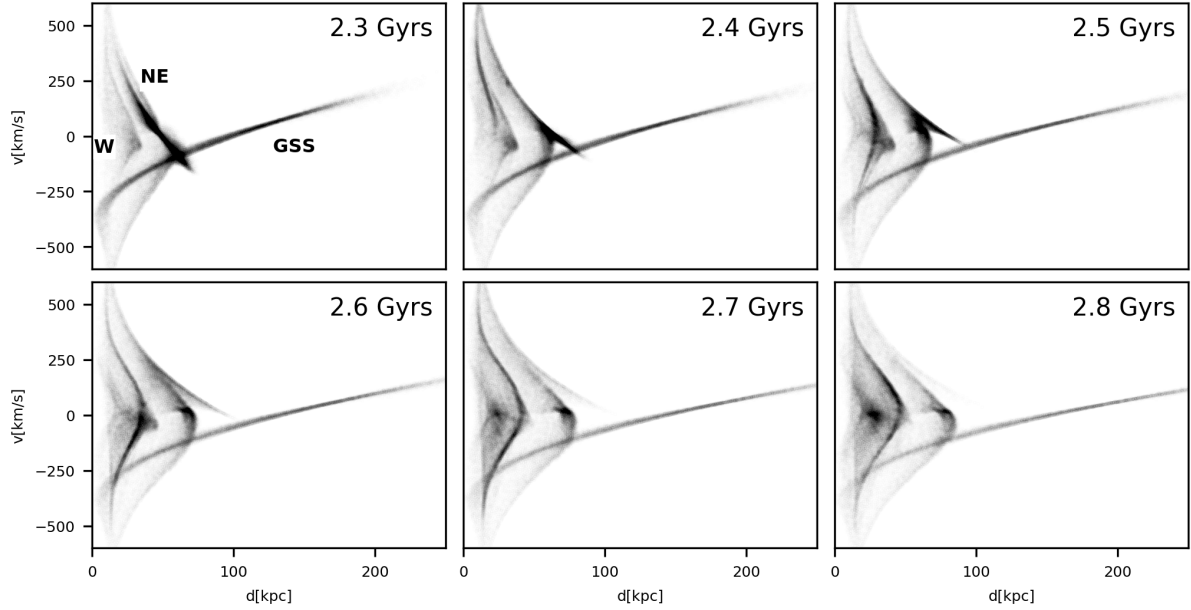
Slika 5.5: 3-D plot W ljuske za trenutak 2,4 milijarde godina nakon početka sudara. Koordinatni sistem i boje su definisani na isti način kao na Slici 5.4.

et al. (2022).

Čestice iz regiona NE i W ljuske smo predstavili u 3-D prostoru na Slikama 5.4 i 5.5. Na Slici 5.4 su čestice iz NE ljuske i možemo da vidimo strukturu ljuske, odnosno raspodelu čestica tipičnu za radijalne sudare (Amorisco, 2015). Kao što je predloženo u Fardal et al. (2008), NE ljuska se formira bliže nama u odnosu na M31, dok se W ljuska formira dalje od nas. Na ovim graficima gde smo prikazali morfologiju ljuski u 3-D prostoru ne možemo pouzdano da odredimo da li je ostatak galaksije dinamički preživeo i gde se nalazi. Morfološke osobine ljuski su prikazane u radovima Fardal et al. (2008) i Escala et al. (2022).

Ove strukture možemo da predstavimo u $d-v$ prostoru, gde je na x-osi data radijalna udaljenost čestica od centra M31, a na y-osi radijalna brzina.

Na Slici 5.6 su dati $d-v$ grafici za vremenski interval između 2,5 i 3 milijarde godina. Na njima se jasno vide formirane strukture - tok i ljuke. Poređenje sa posmatranjima je dato na Slici 5.7, gde su dati slični grafici, ali za projektovanu radijalnu udaljenost na ravan neba, odnosno na ravan normalnu na pravac posmatranja, kako bismo mogli da ih poredimo sa posmatranjima, jer su posmatračka polja definisana koordinatama u ovoj



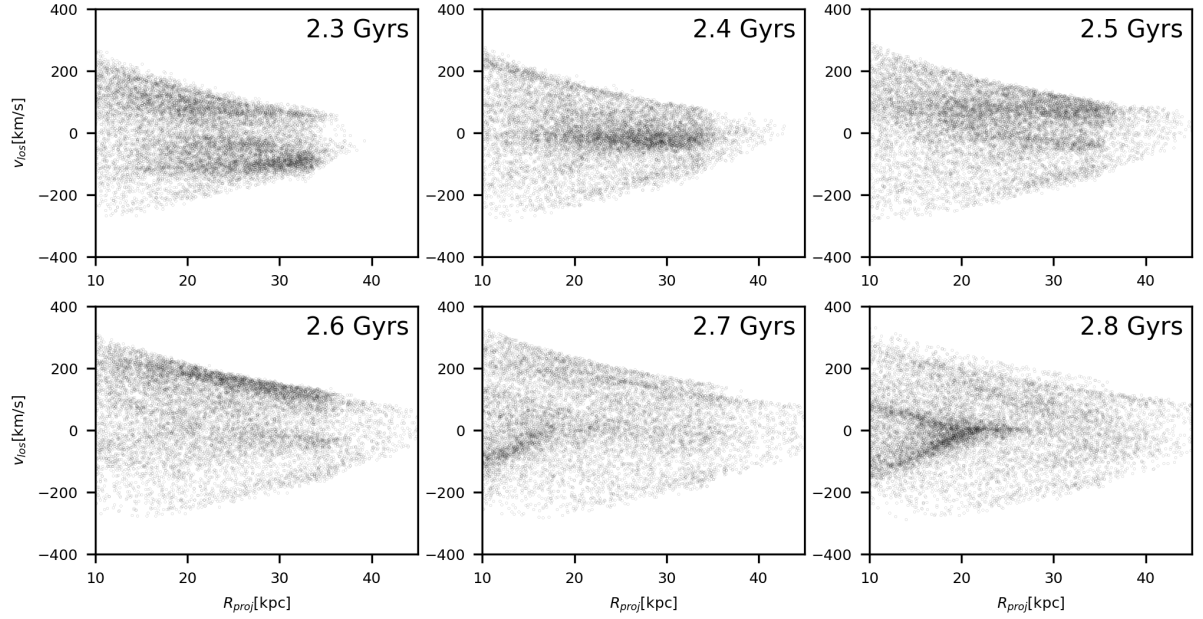
Slika 5.6: Fazni grafici, odnosno $d - v_r$ ravan za različite vremenske epohe između 2,4 i 2,9 milijardi godina. Na slici je prikazana evolucija podstruktura u ovom vremenskom intervalu.

ravni.

Na Slici 5.6 vidimo formirane GSS i NE i W ljuske, kao i ostatak galaksije u blizini NE ljuske. Iako u posmatranjima za sada nema dokaza da je ostatak galaksije “preživeo” plimsko rasipanje, (Escala et al., 2022), vidimo ostatak na Slici 5.6, u regionu NE ljuske. Posle 2,6 milijardi godina manje je izražen na faznom grafiku, pa vreme raspadanja može da bude dodatni ograničavajući parametar na vrednosti vremenskog intervala sudara. Sa Slike 5.7 vidimo da je najbolje poklapanje sa posmatranom radijalnom daljinom NE ljuske ostvareno nakon 2,4 milijarde godina. Nakon tog intervala radijalna udaljenost zvezdane ljuske je 40 kpc, što je i dato posmatranjima. To su procenjene vrednosti u radovima Escala et al. (2022), a sličnu teorijsku vrednost su dobili i Sadoun et al. (2014).

5.2.2 Finalna raspodela metaličnosti u NE i W zvezdanim ljuskama

Modelovali smo početnu metaličnost u patuljastoj galaksiji kao opadajuću linearnu funkciju od centra ka obodu galaksije. Posmatrane vrednosti duž i normalno na GSS su date u ranijim radovima (Ibata et al., 2007; Gilbert et al., 2007, 2009; Conn et al., 2016; Cohen et al., 2018). Iz funkcija distribucije metaličnosti za GSS, zatim NE (Slika 5.8) i W zvezdanu ljusku prikazanih u radu Escala et al. (2022), možemo da vidimo veliku sličnost ovih distribucija za sve tri strukture. Posmatrane vrednosti metaličnosti su date za 5 posmatračkih polja za NE ljusku, dok su posmatrane vrednosti za W ljusku

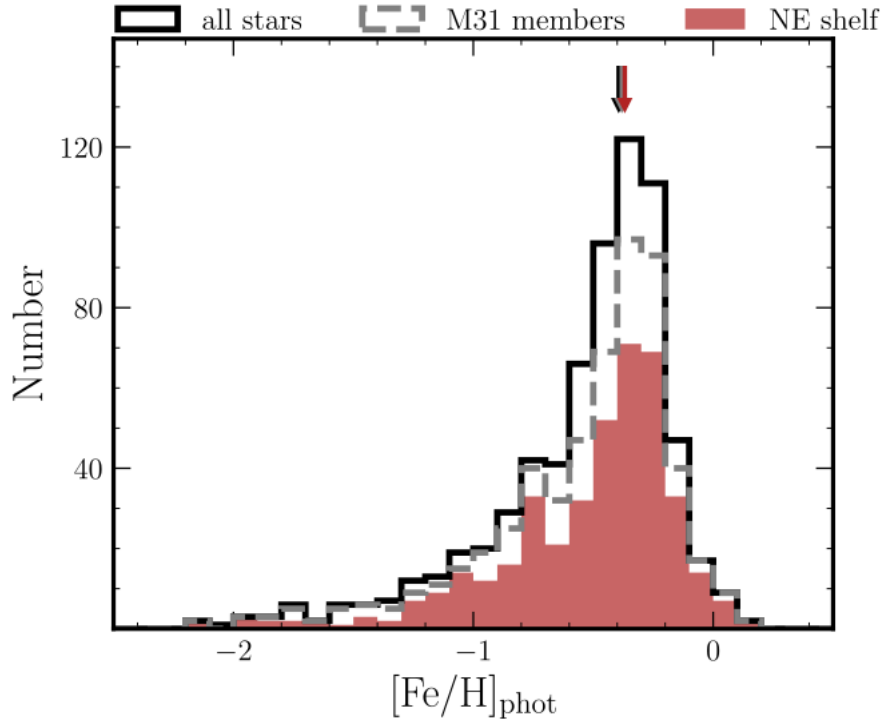


Slika 5.7: Fazni grafici u $R_{proj} - v_r$ ravni za NE ljusku u različitim trenucima, pri čemu je R_{proj} projektovana radijalna udaljenost na ravan normalnu na pravac posmatranja. U trenutku 2,4 milijarde godina od početka simulacija, ivica ljuske se proteže do $R_{proj} \approx 40$ kpc, što odgovara vrednosti dobijenoj iz posmatranja.

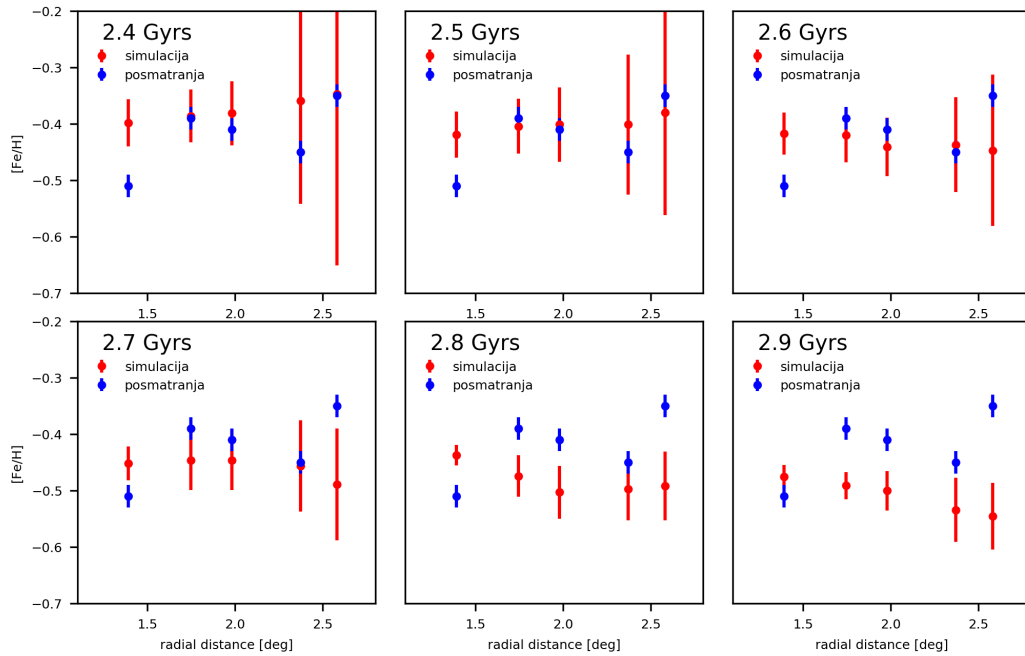
preuzete iz Fardal et al. (2012). Posmatrane vrednosti metaličnosti za GSS i ljuske i sličnost funkcija distribucije metaličnosti za ove strukture omogućavaju testiranje početne funkcije raspodele metaličnosti u patuljastoj galaksiji, kojom bi se objasnila raspodela nakon sudara za sve formirane strukture.

Koristeći negativan gradijent metaličnosti u patuljastoj galaksiji, izračunali smo raspodelu za 5 posmatračkih polja u NE i W zvezdanoj ljusci. Na Slici 5.9 su prikazane teorijska i posmatrana raspodela metaličnosti. Za vremenski interval između 2,4 i 2,7 milijardi godina imamo podudaranje sa posmatranim vrednostima za sva posmatračka polja, osim prvog polja gde je teorijska vrednost veća od posmatrane. Na osnovu vrednosti u ovim poljima ne možemo uočiti neki gradijent u NE ljusci, kao što je to bio slučaj sa GSS. Sve vrednosti koje su izračunate iz modela su bliske srednjoj vrednosti metaličnosti za NE ljusku koja iznosi -0,4 a koja je dobijena iz posmatranja.

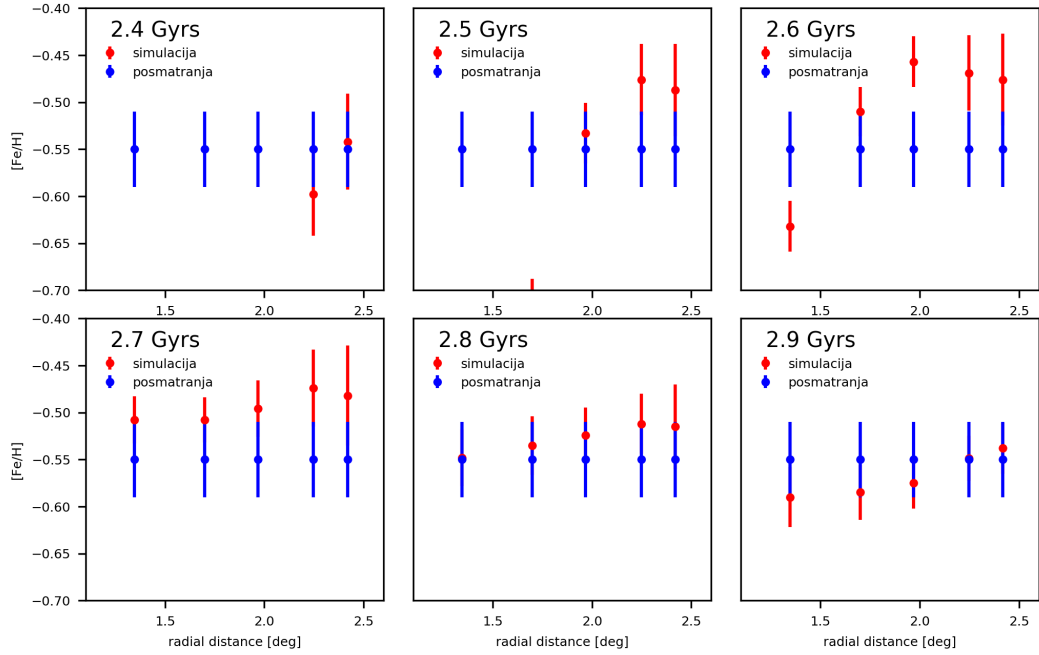
Posmatračka polja za W ljusku, data su u radu Fardal et al. (2012) i uporedili smo teorijske vrednosti metaličnosti iz našeg modela sa srednjom vrednosti dobijenom iz posmatranja, a datom u radu Escala et al. (2022). U svakom polju je data srednja metaličnost za W ljusku, radi kvalitativnog poređenja sa teorijskim vrednostima. Rezultati za W ljusku su prikazani na Slici 5.10. Ova zvezdana ljuska ima manju vrednost metaličnosti, koja iznosi ~ -0.5 . Kao i za NE ljusku, ni u W ljusci ne možemo da uočimo neki



Slika 5.8: Raspodela zvezda po metaličnosti za region NE ljuske (crvena boja). Slika je preuzeta iz Escala et al. (2022).



Slika 5.9: Raspodela metaličnosti za posmatračka polja iz NE ljuske za interval između 2,4 i 2,9 milijardi godina. Plave tačke su posmatračke vrednsoti iz Escala et al. (2022), a crvene su simulirane vrednosti metaličnosti.



Slika 5.10: Raspodela metaličnosti za posmatrana polja W ljuske za interval između 2,4 i 2,9 milijardi godina. Plave tačke su srednja vrednost za W ljusku preuzeta iz Escala et al. (2022), a crvene vrednosti su simulirane vrednosti metaličnosti.

gradijent metaličnosti. Poklapanje između teorijskih i posmatranih vrednosti (odnosno srednjih vrednosti) imamo između 2,7 i 2,9 milijardi godina. Ove vremenske skale i poklapanje teorijki predviđenih metaličnosti koje potiču iz inicijalne raspodele u patuljastoj i posmatranih vrednosti za zvezdane ljuske i tok, sugerišu da ove strukture vode poreklo od iste galaksije.

5.3 Rezime formiranja zvezdanih ljuski u halou M31 i raspodele metaličnosti u njima

Vodeći se rezultatima iz poglavlja 4.2, gde je prikazano kako posmatrana metaličnost u GSS može da bude objašnjena inicijalnom raspodelom metaličnosti u patuljastoj galaksiji, od koje GSS nastaje, isti princip je primenjen na zvezdane ljuske. U prethodnim teorijskim radovima istaknuto je da su zvezdane ljuske i GSS nastali od iste galaksije u istom sudarnom procesu (Fardal et al., 2008; Sadoun et al., 2014). U ovom poglavlju prikazano je formiranje NE i W zvezdane ljuske i njihova morfologija. Rezultati ovog poglavlja su predstavljeni i u radu Milošević et al. (2023).

Iskoristili smo negativan radijalni gradijent metaličnosti u patuljastoj galaksiji koja

je po morfologiji dSph. Modelovana metaličnost je upoređena sa posmatranjima datim u radu Escala et al. (2022) za nekoliko polja u NE zvezdanoj ljusci. Teorijski dobijenu metaličnost smo uporedili i sa srednjom vrednošću metaličnosti za W ljusku. Simulirana metaličnost je u saglasnosti sa posmatranom što opravdava korišćenje linearno opadajuće metaličnosti kao modela inicijalne raspodele u patuljastoj galaksiji (Slike 5.9 i 5.10). Srednje teorijske i posmatrane vrednosti metaličnosti za NE ljusku su ~ -0.4 , dok su za W ljusku ~ -0.5 . Na osnovu različitih kriterijuma, dobijen je vremenski interval formiranja GSS i zvezdanih ljuski između 2,4 i 2,9 milijardi godina, pošto se ove strukture ne formiraju istovremeno i pri tome GSS ima svoju kompleksnu unutrašnju kinematiku.

Morfologija patuljaste galaksije, kao i raspadanje ostatka nakon nekoliko orbita, su i dalje predmet istraživanja. U simulacijama do 3 milijarde godina, ostatak galaksije je uočljiv do 2,7 milijardi godina, nakon čega se raspada i teško je locirati centralni deo galaksije.

Model sferoidne patuljaste galaksije, koja je satelit M31, uspešno reprodukuje posmatračke vrednosti za različite veličine zvezdanog toka (GSS). Sa negativnim početnim, radijalnim gradijentom u patuljastoj galaksiji, uspešno smo reprodukovali posmatranu metaličnost u GSS, ali i u zvezdanim ljuskama NE i W.

6 Rezime i zaključak

U hijerarhijskom modelu, velike galaksije nastaju sudarima malih galaksija. Patuljaste galaksije koje nisu imale sudare u ranoj fazi univerzuma, danas su važne za proučavanje osobina ranih galaksija. U Lokalnoj grupi određeni broj patuljastih galaksija predstavljaju satelite velikih galaksija, odnosno Mlečnog puta i Andromede (M31). U slučaju sudara spiralne galaksije sa svojim satelitom nastaju strukture, čijim proučavanjem možemo da zaključimo mnogo o osobinama galaksije čijim raspadanjem su te strukture nastale.

Ispitali smo osobine struktura koje nastaju sudarom patuljaste galaksije i spiralne galaksije koja po masi i morfologiji odgovara galaksiji M31, pomoću simulacija N-tela. U slučaju satelitske galaksije, ispitana su dva morfološka tipa: patuljasta sa diskom i sferoidna patuljasta (dSph), pri čemu obe galaksije imaju iste mase. Utvrdili smo da za oba tipa nastaju zvezdani tokovi i ljuske, pri čemu broj tokova zavisi od morfologije galaksije. Takođe, vreme za koje se ostatak galaksije potpuno raspadne se razlikuje za dva tipa, pri čemu u slučaju patuljaste sa diskom, duže preživljava. Inklinacija orbite i smer rotacije diska patuljaste galaksije, pored mase i morfologije utiču na vremenski interval formiranja struktura u halou velike spiralne galaksije.

Pri sudaru M31 sa svojim satelitom, dolazi do formiranja Velikog zvezdanog toka, kao i NE i W zvezdane ljuske. Potvrdili smo raniju pretpostavku da sve strukture nastaju u istom sudaru od iste patuljaste galaksije. Morfologija same galaksije je otvoreno pitanje, ali sferoidna patuljasta uspešno reprodukuje posmatranja, a jedan je od zastupljenijih tipova patuljastih galaksija u Lokalnoj grupi. Dobili smo poklapanje između simuliranih daljina i brzina duž GSS i posmatranih. Takođe, morfološke osobine NE i W ljuske su reprodukovane našom simulacijom.

Prvi put smo dali objašnjenje raspodele metaličnosti u GSS i zvezdanim ljuskama. Koristili smo linearno opadajuću funkciju za inicijalnu raspodelu metaličnosti u patuljastoj galaksiji: $[\text{Fe}/\text{H}](r) = \Delta[\text{Fe}/\text{H}] \times r$, odnosno negativni gradijent: $\Delta[\text{Fe}/\text{H}] = -0,3 \pm 0,2$. Dobili smo poklapanje sa merenim metaličnostima u posmatračkim poljima duž GSS, kao i u pravcu normalnom na GSS. Naš model uspešno objašnjava i merene metaličnosti u posmatračkim poljima NE ljuske, gde je srednja vrednost $\sim -0,4$, kao i srednje metaličnosti u W ljusci koja je $\sim -0,5$. Procenjeno vreme formiranja GSS na osnovu raspodele metaličnosti duž toka iznosi 2,9 milijardi godina od početka sudara.

Pokazali smo da i pomoću simulacija N-tela možemo da objasnimo raspodele meta-

ličnosti, iako nismo razmatrali fiziku gasa u galaksijama. Ipak, dSph galaksije uglavnom nemaju, ili imaju jako malo gasa. Inicijalni gradijent metaličnosti zavisi i od interne evolucije same galaksije i od okruženja u kojem se galaksija nalazi i u tom smislu dinamički evoluira. Rezultati ovog rada otvaraju i temu evolucije gasa u patuljastim galaksijama koja utiče na to da li će gradijent metaličnosti biti pozitivan ili negativan. Raspodelu metaličnosti u strukturama haloa M31 uspešno objašnjava gradijent metaličnosti za dSph patuljastu galaksiju gde je metaličnost veća u centru galaksije i linearno opada ka periferiji.

Buduća istraživanja podrazumevaju proučavanje dinamike gasa u patuljastim galaksijama, koja utiče na gradijente metaličnosti u ovim galaksijama. Takođe, osobine zvezdanih tokova nastalih u interakcijama galaksija, u kosmološkim simulacijama, kao i mogućnost određivanja osobina haloa tamne materije pomoću tokova, biće predmet budućeg rada.

Literatura

- Amorisco N. C., 2015, MNRAS, 450, 575
- Angelov T., 2013, Zvezdana astronomija, Matematički fakultet, Beograd, Srbija
- Athanassoula E., Fady E., Lambert J. C., Bosma A., 2000, MNRAS, 314, 475
- Atkinson A. M., Abraham R. G., Ferguson A. M. N., 2013, ApJ, 765, 28
- Barnes J. E., 2012, MNRAS, 425, 1104
- Barnes J., Hut P., 1986, Nature, 324, 446
- Begeman K. G., 1989, A&A, 223, 47
- Bell E. F., et al., 2005, ApJ, 625, 23
- Bellazzini M., 2008, Mem. Soc. Astron. Italiana, 79, 440
- Bernard E. J., et al., 2015, MNRAS, 446, 2789
- Bhattacharya S., Arnaboldi M., Gerhard O., McConnachie A., Caldwell N., Hartke J., Freeman K. C., 2021, A&A, 647, A130
- Binney J., Tremaine S., 2008, Galactic Dynamics: Second Edition, Princeton University Press, Princeton, NJ USA
- Bournaud F., Jog C. J., Combes F., 2007, A&A, 476, 1179
- Bovy J., 2016, Phys. Rev. Lett., 116, 121301
- Bovy J., 2023, Dynamics and Astrophysics of Galaxies
- Bower R. G., Lucey J. R., Ellis R. S., 1992, MNRAS, 254, 589
- Braun R., 1991, ApJ, 372, 54
- Brighenti F., Mathews W. G., 1998, ApJ, 495, 239
- Brook C. B., Di Cintio A., Knebe A., Gottlöber S., Hoffman Y., Yepes G., Garrison-Kimmel S., 2014, ApJ, 784, L14
- Brown T. M., Smith E., Guhathakurta P., et al. 2006a, ApJ, 636, L89

- Brown T. M., Smith E., Ferguson H. C., Rich R. M., Guhathakurta P., Renzini A., Sweigart A. V., Kimble R. A., 2006b, *ApJ*, 652, 323
- Brown T. M., et al., 2008, *ApJ*, 685, L121
- Brown T. M., Smith E., Ferguson H. C., et al. 2009, *ApJS*, 184, 152
- Carignan C., Chemin L., Huchtmeier W. K., Lockman F. J., 2006, *ApJ*, 641, L109
- Carroll B. W., Ostlie D. A., 1996, *An Introduction to Modern Astrophysics*
- Chandrasekhar S., 1939, *An introduction to the study of stellar structure*, The University of Chicago press
- Chang R., Gallazzi A., Kauffmann G., Charlot S., Ivezić Ž., Brinchmann J., Heckman T. M., 2006, *MNRAS*, 366, 717
- Cohen R. E., Kalirai J. S., Gilbert K. M., Guhathakurta P., et al. 2018, *ApJ*, 156, 230
- Cole S., Lacey C. G., Baugh C. M., Frenk C. S., 2000, *MNRAS*, 319, 168
- Conn A. R., et al., 2011, *ApJ*, 740, 69
- Conn A. R., McMonigal B., Bate N. F., Lewis G. F., Ibata R. A., et al. 2016, *MNRAS*, 458, 3282
- Cooper A. P., D’Souza R., Kauffmann G., Wang J., Boylan-Kolchin M., Guo Q., Frenk C. S., White S. D. M., 2013, *MNRAS*, 434, 3348
- Cooper A. P., Parry O. H., Lowing B., Cole S., Frenk C., 2015, *MNRAS*, 454, 3185
- Cox J. P., Giuli R. T., 1968, *Principles of stellar structure*, New York: Gordon and Breach
- D’Souza R., Bell E. F., 2018, *Nature Astronomy*, 2, 737
- Dehnen W., Read J. I., 2011, *European Physical Journal Plus*, 126, 55
- Dirirsa F. F., 2012, PhD thesis, doi:10.13140/RG.2.2.12912.20487
- Dotter A., Chaboyer B., Jevremović D., Kostov V., Baron E., Ferguson J. W., 2008, *ApJS*, 178, 89
- Dubois Y., et al., 2014, *MNRAS*, 444, 1453
- Dubois Y., et al., 2021, *A&A*, 651, A109

- Ebrov I., Blek M., Vudragovi A., Yildız M. K., Duc P.-A., 2021, *A&A*, 650, A50
- Eggen O. J., Lynden-Bell D., Sandage A. R., 1962, *ApJ*, 136, 748
- Escala I., Gilbert K. M., Kirby E. N., Wojno J., Cunningham E. C., Guhathakurta P., 2020a, *ApJ*, 889, 177
- Escala I., Kirby E. N., Gilbert K. M., Wojno J., Cunningham E. C., Guhathakurta P., 2020b, *ApJ*, 902, 51
- Escala I., Gilbert K. M., Wojno J., et al. 2021, *AJ*, 162, 45
- Escala I., Gilbert K. M., Fardal M., Guhathakurta P., Sanderson R. E., Kalirai J. S., Mobasher B., 2022, *AJ*, 164, 20
- Event Horizon Telescope Collaboration et al., 2019, *ApJ*, 875, L1
- Event Horizon Telescope Collaboration et al., 2022a, *ApJ*, 930, L12
- Event Horizon Telescope Collaboration et al., 2022b, *ApJ*, 930, L15
- Fardal M. A., Babul A., Geehan J. J., Guhathakurta P., 2006, *MNRAS*, 366, 1012
- Fardal M. A., Guhathakurta P., Babul A., McConnachie A. W., 2007, *MNRAS*, 380, 15
- Fardal M. A., Babul A., Guhathakurta P., Gilbert K. M., Dodge C., 2008, *ApJ*, 682, L33
- Fardal M. A., et al., 2012, *MNRAS*, 423, 3134
- Fardal M. A., Weinberg M. D., Babul A., et al. 2013, *MNRAS*, 434, 2779
- Ferguson A. M. N., Irwin M. J., Ibata R. A., Lewis G. F., Tanvir N. R., 2002, *AJ*, 124, 1452
- Ferguson A. M. N., Johnson R. A., Faria D. C., Irwin M. J., Ibata R. A., Johnston K. V., Lewis G. F., Tanvir N. R., 2005, *ApJ*, 622, L109
- Frieman J. A., Turner M. S., Huterer D., 2008, *ARA&A*, 46, 385
- Gallazzi A., Charlot S., Brinchmann J., White S. D. M., Tremonti C. A., 2005, *MNRAS*, 362, 41
- Gawiser E., 2006, *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, 352, 177
- Geehan J. J., Fardal M. A., Babul A., Guhathakurta P., 2006, *MNRAS*, 366, 996

Gilbert K. M., Fardal M. A., Kalirai J. S., Guhathakurta P., Geha M. C., et al. 2007, *ApJ*, 668, 245

Gilbert K. M., Guhathakurta P., Kollipara P., et al. 2009, *ApJ*, 705, 1275

Gilbert K. M., Kalirai J. S., Guhathakurta P., et al. 2014, *ApJ*, 796, 76

Gilbert K. M., Tollerud E., Beaton R. L., et al. 2018, *ApJ*, 852, 128

Gilbert K. M., Kirby E. N., Escala I., et al. 2019, *ApJ*, 883, 128

Gonzalez Delgado R. M., García-Benito R., Pérez E., et al. 2015, *A&A*, 581, A10

Graham A. W., 2019, *MNRAS*, 487, 4995

Guhathakurta P., Rich R. M., Reitzel D. B., et al. 2006, *AJ*, 131, 2497

Hammer F., Yang Y. B., Wang J. L., et al. 2010, *ApJ*, 725, 542

Hammer F., Yang Y. B., Fouquet S., et al. 2013, *MNRAS*, 431, 3543

Hammer F., Yang Y. B., Wang J. L., Ibata R., Flores H., Puech M., 2018, *MNRAS*, 475, 2754

Hernquist L., 1990, *ApJ*, 356, 359

Hernquist L., Quinn P. J., 1988, *ApJ*, 331, 682

Hernquist L., Quinn P., 1989, *ApJ*, 342, 1

Hilker M., Infante L., Richtler T., 1999, *A&AS*, 138, 55

Hodge P. W., 1983, *PASP*, 95, 721

Hood C. E., Kannappan S. J., Stark D. V., Dell’Antonio I. P., Moffett A. J., Eckert K. D., Norris M. A., Hendel D., 2018, *ApJ*, 857, 144

Hubble E. P., 1926, *ApJ*, 64, 321

Ibata R., Irwin M., Lewis G., Ferguson A. M. N., Tanvir N., 2001, *Nature*, 412, 49

Ibata R., Chapman S., Ferguson A. M. N., Irwin M., Lewis G., 2004, *MNRAS*, 351, 117

Ibata R., Martin N., Irwin M., et al. 2007, *ApJ*, 671, 1591

Ibata R., Lewis G. F., McConnachie A. W., et al. 2014, *ApJ*, 780, 128

- Johnston K. V., Bullock J. S., Sharma S., Font A., Robertson B. E., Leitner S. N., 2008, *ApJ*, 689, 936
- Kacharov N., et al., 2017, *MNRAS*, 466, 2006
- Kalirai J. S., Guhathakurta P., Gilbert K. M., et al. 2006a, *ApJ*, 641, 268
- Kalirai J. S., Gilbert K. M., Guhathakurta P., et al. 2006b, *ApJ*, 648, 389
- Karachentsev I. D., Makarova L. N., Makarov D. I., Tully R. B., Rizzi L., 2015, *MNRAS*, 447, L85
- Karademir G. S., Remus R.-S., Burkert A., Dolag K., Hoffmann T. L., Moster B. P., Steinwandel U. P., Zhang J., 2019, *MNRAS*, 487, 318
- Kent S., 1989, *AJ*, 97, 1614
- Khandai N., Di Matteo T., Croft R., Wilkins S., Feng Y., Tucker E., DeGraf C., Liu M.-S., 2015, *MNRAS*, 450, 1349
- Kirby E. N., Cohen J. G., Guhathakurta P., Cheng L., Bullock J. S., Gallazzi A., 2013, *ApJ*, 779, 102
- Kirihara T., Miki Y., Mori M., Kawaguchi T., Rich R. M., 2017, *MNRAS*, 464, 3509
- Koch A., Kleya J. T., Wilkinson M. I., Grebel E. K., Gilmore G. F., Evans N. W., Wyse R. F. G., Harbeck D. R., 2007, *AJ*, 134, 566
- Koch A., Rich R. M., Reitzel D. B., et al. 2008, *ApJ*, 689, 958
- Koleva M., Prugniel P., De Rijcke S., Zeilinger W. W., Michielsen D., 2009a, *AN*, 330, 960
- Koleva M., de Rijcke S., Prugniel P., Zeilinger W. W., Michielsen D., 2009b, *MNRAS*, 396, 2133
- Lang M., Holley-Bockelmann K., Sinha M., 2014, *ApJ*, 790, L33
- Leaman R., et al., 2013, *ApJ*, 767, 131
- Longobardi A., Arnaboldi M., Gerhard O., Pulsoni C., Söldner-Rembold I., 2018, *A&A*, 620, A111
- Magrini L., Coccato L., Stanghellini L., Casasola V., Galli D., 2016, *A&A*, 588, A91

Martin N. F., Ibata R., Lewis G. F., McConnachie A., et al. 2016, *AJ*, 790, L33

Martinović N., Micic M., 2017, *MNRAS*, 470, 4015

Mateo M. L., 1998, *ARA&A*, 36, 435

Mathewson D. S., Cleary M. N., Murray J. D., 1974, *ApJ*, 190, 291

McConnachie A. W., 2012, *AJ*, 144, 4

McConnachie A. W., Irwin M. J., Ibata R. A., Ferguson A. M. N., Lewis G. F., et al. 2003, *MNRAS*, 343, 1355

McConnachie A. W., Ibata R. A., Martin N., et al. 2018, *ApJ*, 868, 55

Mercado F. J., et al., 2021, *MNRAS*, 501, 5121

Merrett H. R., et al., 2006, *MNRAS*, 369, 120

Mieske S., Infante L., Hilker M., Hertling G., Blakeslee J. P., Benítez N., Ford H., Zekser K., 2005, *A&A*, 430, L25

Miki Y., Mori M., Rich R. M., 2016a, *ApJ*, 827, 82

Miki Y., Mori M., Rich R. M., 2016b, *ApJ*, 827, 82

Milošević S., 2022, *Serbian Astronomical Journal*, 205, 33

Milošević S., Mićić M., Lewis G. F., 2022, *MNRAS*, 511, 2868

Milošević S., Mićić M., Lewis G. F., 2023, *MNRAS*, submitted

Mitrašinović A., Vukotić B., Mićić M., Čitković M., 2023, *PASA*, submitted

Mo H., van den Bosch F. C., White S., 2010, *Galaxy Formation and Evolution*, Cambridge, UK, Cambridge University Press

Navarro J. F., Frenk C. S., White S. D. M., 1996, *ApJ*, 462, 563

Pakmor R., et al., 2022, *arXiv e-prints*, p. arXiv:2210.10060

Panithanpaisal N., Sanderson R. E., et al. 2021, *ApJ*, 920, 10

Panther B., Jimenez R., Heavens A. F., Charlot S., 2008, *MNRAS*, 391, 1117

Pillepich A., et al., 2014, *MNRAS*, 444, 237

Planck Collaboration et al., 2020, A&A, 641, A6

Remus R.-S., Dolag K., Naab T., Burkert A., Hirschmann M., Hoffmann T. L., Johansson P. H., 2016, MNRAS, 464, 3742

Richardson J. C., et al., 2008, AJ, 135, 1998

Ross T. L., Holtzman J., Saha A., Anthony-Twarog B. J., 2015, AJ, 149, 198

Rubin V. C., Burstein D., Ford W. K. J., Thonnard N., 1985, ApJ, 289, 81

Sadoun R., Mohayaee R., Colin J., 2014, MNRAS, 442, 160

Sandage A., Binggeli B., 1984, AJ, 89, 919

Schaye J., et al., 2015, MNRAS, 446, 521

Schneider P., 2006, Extragalactic Astronomy and Cosmology, Berlin, Springer

Sérsic J. L., 1963, Boletín de la Asociación Argentina de Astronomía La Plata Argentina, 6, 41

Simon J. D., 2019, ARA&A, 57, 375

Smole M., Micic M., Martinović N., 2015, MNRAS, 451, 1964

Spolaor M., Proctor R. N., Forbes D. A., Couch W. J., 2009, ApJ, 691, L138

Springel V., 2005, MNRAS, 364, 1105

Springel V., 2010, MNRAS, 401, 791

Springel V., et al., 2005, Nature, 435, 629

Springel V., et al., 2018, MNRAS, 475, 676

Springel V., Pakmor R., Zier O., Reinecke M., 2021, MNRAS, 506, 2871

Stadel J. G., 2001, PhD thesis, University of Washington, Seattle

Stanek K. Z., Garnavich P. M., 1998, ApJ, 503, L131

Tanaka M., Chiba M., Komiyama Y., Guhathakurta P., Kalirai J. S., Iye M., 2010, ApJ, 708, 1168

Teyssier R., 2002, A&A, 385, 337

- Toomre A., Toomre J., 1972, ApJ, 178, 623
- Venn K. A., Irwin M., Shetrone M. D., Tout C. A., Hill V., Tolstoy E., 2004, AJ, 128, 1177
- Vila-Vilaro B., Espada D., Cortes P., Leon S., Pompei E., Cepa J., 2019, ApJ, 870, 39
- Visvanathan N., Sandage A., 1977, ApJ, 216, 214
- Vogelsberger M., et al., 2014, MNRAS, 444, 1518
- Walker M. G., Mateo M., Olszewski E. W., Gnedin O. Y., Wang X., Sen B., Woodroffe M., 2007, ApJ, 667, L53
- Wannier P., Wrixon G. T., 1972, ApJ, 173, L119
- White S. D. M., Frenk C. S., 1991, ApJ, 379, 52
- White S. D. M., Rees M. J., 1978, MNRAS, 183, 341
- Widrow L. M., Perrett Suyu 2003, ApJ, 588, 311
- Widrow L. M., Pym B., Dubinski J., 2008, ApJ, 679, 1239
- Young J. S., Knezek P. M., 1989, ApJ, 347, L55
- Zolotov A., Willman B., Brooks A. M., Governato F., Brook C. B., Hogg D. W., Quinn T., Stinson G., 2009, ApJ, 702, 1058
- Zwicky F., 1937, ApJ, 86, 217
- de Vaucouleurs G., 1948, Annales d'Astrophysique, 11, 247
- Živić I., 2006, Statistička mehanika, PMF Kragujevac, Kragujevac, Srbija

Biografija autora

Stanislav Milošević je rođen 11.12.1989. godine u Sremskoj Mitrovici. Osnovnu školu je završio u Čalmi, a gimnaziju u Sremskoj Mitrovici. Školske 2008/2009. upisao je Matematički fakultet, smer astrofizika i diplomirao 2013. godine prosečnom ocenom 9,24. Iste godine je upisao master studije na Matematičkom fakultetu, koje je završio 2015. prosečnom ocenom 9,50 i odbranom master rada “Određivanje parametara sudara galaksije M31 i patuljaste galaksije”. Iste godine je na Matematičkom fakultetu upisao doktorske studije. Položio je sve ispite predviđene planom i programom doktorskih studija prosečnom ocenom 9,25.

Školsku 2014/2015. predavao je fiziku u OŠ “Ivan Goran Kovačić” u Beogradu. Od oktobra 2015. radi kao saradnik u nastavi, a od 2017. godine kao asistent na Matematičkom fakultetu, na Katedri za astronomiju. Angažovan je na predmetima Radio-astronomija, Radio-astrofizika, Fizički principi strukture zvezda, Modeli i evolucija zvezda, Kinematika zvezda i dinamika zvezdanih sistema, Osnovi astrofizike za fizičare, Metodika nastave astronomija. Prethodnih godina je bio angažovan i na predmetima Opšta astrofizika 1 i 2, kao i Tehnike astrofizičkih posmatranja. Kao član Katedre za astronomiju držao je nastavu astronomije dve školske godine specijalizovanom odeljenju Zemunske gimnazije. Član je Komisije za nastavu astronomije Društva astronoma Srbije. Od 2010. je mlađi, a od 2014. stručni saradnik programa Astronomije u IS Petnica. Bio je rukovodilac ovog programa dve godine, 2020. i 2021. Od 2018. do isteka projektnog ciklusa, bio je angažovan na projektu Ministarstva prosvete nauke i tehnološkog razvoja 176005 Emisione magline: struktura i evolucija. Učestvovao je na nekoliko domaćih i međunarodnih skupova. Od 2019. učestvuje u organizaciji međunarodne studentske škole u Petnici gde se smenjuju teme kosmologija, astrofizika, opšta relativnost i fizika elementarnih čestica.

Prvi je autor rada objavljenog u časopisu kategorije M21 i samostalni je autor rada objavljenog u časopisu kategorije M23. Koautor je još nekoliko radova u pripremi, kao i nekoliko saopštenja na skupovima od nacionalnog značaja, koja su štampana u zbornicima konferencija.

Прилог 1.

Изјава о ауторству

Потписани-а Станислав Милошевић

број уписа 2022/2015

Изјављујем

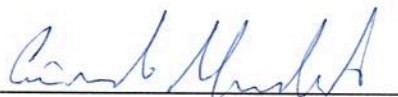
да је докторска дисертација под насловом

Нумеричке симулације судара галаксија и настанка морфолошких подструктура

- 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, 18.07.2023.



Прилог 2.

**Изјава о истоветности штампане и електронске
верзије докторског рада**

Име и презиме аутора Станислав Милошевић

Број уписа 2022/2015

Студијски програм Астрономија и астрофизика

Наслов рада Нумеричке симулације судара галаксија и настанка морфолошких
подструктура

Ментор др Мирослав Мићић

Потписани Станислав Милошевић

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, 18.07.2023



Прилог 3.

Изјава о коришћењу

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

Нумеричке симулације судара галаксија и настанка морфолошких
подструктура

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, 18.07.2023.



1. **Ауторство** - Дозвољавање умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце, чак и у комерцијалне сврхе. Ово је најслободнија од свих лиценци.

2. **Ауторство – некомерцијално.** Дозвољавање умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела.

3. **Ауторство - некомерцијално – без прераде.** Дозвољавање умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела. У односу на све остале лиценце, овом лиценцом се ограничава највећи обим права коришћења дела.

4. **Ауторство - некомерцијално – делити под истим условима.** Дозвољавање умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада.

5. **Ауторство – без прераде.** Дозвољавање умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела.

6. **Ауторство - делити под истим условима.** Дозвољавање умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада. Слична је софтверским лиценцама, односно лиценцама отвореног кода.