

UNIVERZITET U BEOGRADU
MATEMATIČKI FAKULTET



Katarina Vrhovac

NUMERIČKE SIMULACIJE FORMIRANJA
ZVEZDANIH LJUSKI U MALIM SUDARIMA
GALAKSIJA

master rad

Beograd, 2026.

Mentor:

dr Stanislav MILOŠEVIĆ, docent
Univerzitet u Beogradu, Matematički fakultet

Članovi komisije:

dr Miroslav MIĆIĆ, naučni savetnik
Astronomska Opservatorija u Beogradu

dr Ana MITRAŠINOVIĆ, viši naučni saradnik
Astronomska Opservatorija u Beogradu

Datum odbrane: _____

Zahvalnice

Ovom prilikom zahvaljujem se Stanislavu Miloševiću sa Matematičkog fakulteta, Univeziteta u Beogradu, mom mentoru, na predlogu teme i podsticaju da se bavim numeričkim simulacijama i interakcijom galaksija, kao i na uloženom trudu i savetima tokom izrade ovog rada.

Zahvaljujem se Ani Mitrašinović sa Astronomske opservatorije u Beogradu (AOB) na korisnim smernicama i savetima prilikom izrade modela galaksija.

Zahvaljujem se i prijateljima Teodoru Kostiću (AOB) i Konstantinu Kostiću na korisnim komentarima prilikom pisanja rada.

Najveću zahvalnost dugujem mojoj porodici, prvenstveno mami, tati i sestri koji su me podržavali tokom čitavih studija.

I na kraju, zahvaljujem se Davidu, mom prijatelju, kolegi i partneru, na mnogobrojnim korisnim savetima, komentarima i diskusijama, kao i na neizmernoj podršci tokom poslednjih godina.

Naslov master rada: Numeričke simulacije formiranja zvezdanih ljuski u malim sudarima galaksija

Rezime: U okviru ovog rada ispitani su početni uslovi pod kojima dolazi do formiranja zvezdanih ljuskastih struktura u halou spiralne galaksije prilikom sudara sa manje masivnom patuljastom galaksijom. Ljuske predstavljaju oštro ograničene, lučne zvezdane strukture koje se opažaju u haloima galaksija ranog tipa, ali i haloima spiralnih galaksija i nastaju faznim namotavanjem materije koja se oslobađa plimskim razaranjem patuljaste galaksije. Proučavanjem zvezdanih ljuski u halou galaksije moguće je rekonstruisati prethodne sudare i dinamičke procese koji su doveli do njihovog formiranja, zbog čega je poznavanje uslova pod kojima one nastaju od značaja za razumevanje evolucije galaksija.

Analiza je vršena kroz numeričke simulacije N -tela, u programskom paketu Gadget-2. Modeli su generisani programom GalactICS, pri čemu primarna galaksija sadrži disk, centralni oval i halo tamne materije, a patuljasta predstavlja sferni sistem bez diska. Varirani su početni parametri, kao što je rastojanje (175, 200 i 250 kpc), ugao nagiba orbite ($0^\circ - 90^\circ$) i početna brzina (0 – 60 km/s) patuljaste galaksije. Formirane strukture analizirane su kroz prikaz prostorne raspodele čestica, raspodelu u faznom prostoru radijalnih brzina i udaljenosti od centra spiralne galaksije, kao i pomoću radijalnih profila gustine vidljive materije.

Rezultati pokazuju da su ljuske najizraženije pri najmanjem početnom rastojanju (175 kpc) i u odsustvu početne brzine patuljaste galaksije, dok njihova izraženost i broj opadaju sa porastom oba parametra. Pri većim početnim brzinama (30 km/s) ljuske su slabije izražene ili se uopšte ne formiraju, kao što je slučaj na rastojanjima od 250 kpc, gde se patuljasta galaksija gotovo ne raspada u zadatom vremenskom intervalu od 5 milijardi godina. Ugao nagiba orbite ne utiče bitno na formiranje ljuski, već isključivo na prostornu orijentaciju nastalih struktura, što je posledica sferno simetričnog potencijala haloa tamne materije. Dobijeni rezultati ukazuju na to da je nastanak zvezdanih ljuski moguć i pri sudarima kada orbite galaksija nisu radijalne.

Ključne reči: dinamika galaksija, sudari galaksija, numeričke simulacije N -tela, plimske strukture, zvezdane ljuske

Sadržaj

1	Uvod	1
1.1	Galaksije i njihova struktura	1
1.1.1	Patuljaste galaksije	3
1.2	Gravitaciona interakcija i sudari	3
1.2.1	Dinamičko trenje	4
1.3	Zvezdane ljuske	5
1.3.1	Mehanizam nastanka zvezdanih ljuski	6
1.3.2	Tipovi zvezdanih ljuski	7
2	Metod	8
2.1	Modeli galaksija	8
2.1.1	Halo tamne materije	9
2.1.2	Disk	11
2.1.3	Centralni oval	12
2.1.4	Model velike primarne galaksije	14
2.1.5	Model patuljaste galaksije	14
2.2	Numeričke simulacije	15
2.2.1	Osnovni algoritamski princip	16
2.2.2	Vremenska integracija	18
2.2.3	Provera stabilnosti	18
2.2.4	Parametri sudara	19
3	Rezultati	21
3.1	Morfologija formiranih struktura	21
3.1.1	Uticaj ugla nagiba orbite	22
3.1.2	Uticaj brzine	24
3.1.3	Uticaj početnog rastojanja	24

SADRŽAJ

3.2	Fazni prostor	25
3.3	Profil gustine	29
4	Diskusija	32
4.1	Kriterijum za prepoznavanje zvezdanih ljuski u simulacijama sudara .	32
4.2	Zavisnost formiranja ljuski od parametara sudara	33
4.3	Poređenje sa ranijim istraživanjima	34
5	Zaključak	35
	Bibliografija	37

Glava 1

Uvod

1.1 Galaksije i njihova struktura

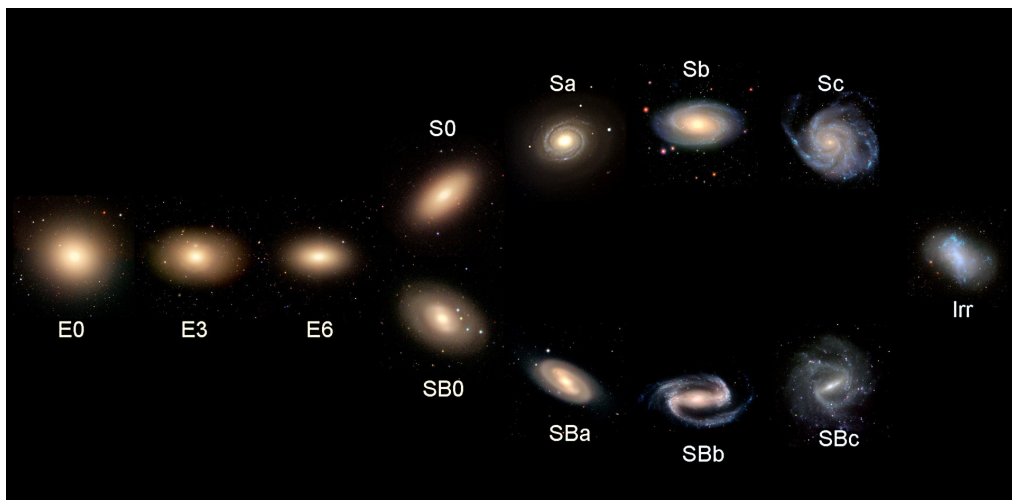
Galaksije su gravitaciono vezani sistemi, sastavljeni od zvezda, međuzvezdanog gasa, prašine i tamne materije. Mogu se klasifikovati prema izgledu, što je prvi put uveo Edvin Habl 1926. godine (Hubble, 1926) i dopunio 1936. (Hubble, 1936). Hablova klasifikacija predstavlja morfološku šemu podele galaksija u obliku „viljuške” (eng. *Hubble tuning fork*), koja je prvobitno objašnjena kao evolutivni niz od ranih, do kasnih galaksija. Danas je poznato da ova klasifikacija ne predstavlja stvarni evolutivni put galaksija, ali su termini „rani” i „kasni” tip galaksija zadržani.

U Hablovoj klasifikaciji izdvajaju se tri glavne grane (Slika 1.1): dršku čine eliptične galaksije (E), gornju granu spiralne (S), a donju spiralne sa prečagom (SB). Na mestu račvanja nalaze se sočivaste galaksije (S0), one predstavljaju prelazni tip između eliptičnih i spiralnih galaksija. Kao posebna grupa van viljuške izdvajaju se nepravilne galaksije (Irr).

Eliptične galaksije javljaju se bez izražene strukture i kao što im sam naziv kaže elipsoidnog su oblika. Uz oznaku E kod ovih galaksija stoji i broj od 0 do 7, koji opisuje prividnu spljoštenost definisanu kao:

$$n = 10 \left(1 - \frac{b}{a}\right), \quad (1.1)$$

gde su b mala i a velika poluosu. Sa E0 obeležene su gotovo sferne galaksije, dok su one sa oznakom E7 izrazito izdužene.



Slika 1.1: Hablova viljuška (Hubble, 1926). Slika preuzeta sa Zooniverse/ESO Supernova.

Eliptične galaksije su pretežno sačinje od starih zvezda, sa malo gasa i prašine, pa u njima gotovo da nema formiranja novih zvezda. Dinamika ovih galaksije nije određena rotacijom, već nasumičnim kretanjem zvezda (Binney and Tremaine, 2008).

Spiralne galaksije imaju izražen disk sa spiralnim granama i centralni oval (o komponentama galaksije biće reči kasnije u poglavlju 2.1). Razlikujemo dve glavne podgrupe spiralnih galaksija, to su obične spiralne galaksije (S), čije grane izlaze direktno iz centralnog ovala i spiralne galaksije sa prečkom (SB). Prečka je izdužena struktura koja prolazi kroz centar galaksije iz čijih krajeva se pružaju spiralne grane. Obe grupe se dalje označavaju malim latiničnim slovima a, b, c (npr. Sa, Sb, Sc), koja označavaju koliko su spiralne grane izražene. Kako idemo od a ka c, centralni oval postaje sve manji, a spiralne grane sve izraženije. Ove galaksije bogate su gasom i prašinom, u njima se aktivno formiraju nove zvezde.

Hablova klasifikacija je razvijena na osnovu posmatranja sjajnih galaksija i ne obuhvata patuljaste galaksije, koje se zbog niskog površinskog sjaja i male mase izdvajaju u posebnu grupu.

1.1.1 Patuljaste galaksije

Patuljaste galaksije odlikuje mala masa, tipično $10^7 - 10^9 M_\odot$, niska luminoznost i male dimenzije u odnosu na velike galaksije poput Mlečnog puta (Mateo, 1998; McConnachie, 2012). Iako čine najbrojniju grupu galaksija u svemiru, tradicionalno se ne nalaze na Hablovoj viljušci, već se klasifikuju u zasebne tipove. U Lokalnoj grupi najzastupljenije su patuljaste eliptične (dE), patuljaste sferoidne (dSph) i patuljaste nepravilne galaksije (dIrr) (McConnachie, 2012).

Slično eliptičnim galaksijama, patuljaste eliptične i sferoidne galaksije nemaju izražen disk niti rotiraju oko svoje ose. Reč je o sistemima podržanim disperzijom brzina, u kojima se zvezde kreću po nasumično orijentisanim orbitama, a raspodela mase je približno sferno simetrična (Binney and Tremaine, 2008). Uz to, posmatranja pokazuju da su ove galaksije izrazito bogate tamnom materijom, odnos mase tamne materije prema vidljivoj (barionskoj) može biti znatno veći nego kod masivnih galaksija (Mateo, 1998; McConnachie, 2012).

U kontekstu ovog rada, patuljasta galaksija predstavlja pratioca (satelit) koji se sudara sa masivnom primarnom galaksijom. Ovakav scenario, u kojem je masa pratioca znatno manja od mase primarne galaksije (taj odnos je tipično između 1 : 4 i 1 : 10) predstavlja tzv. manji sudar (engl. *minor merger*, Helmi, 2020). U Lokalnoj grupi sferoidne galaksije predstavljaju najbrojniji tip među patuljastim galaksijama (McConnachie, 2012). Približno su sferno simetrične i podržane disperzijom brzina, a njihova unutrašnja struktura dobro se opisuje sfernim modelom. Stoga je patuljasta galaksija u našim simulacijama modelovana kao sferni sistem, sastavljen od zvezdane komponente bez diska i haloa tamne materije.

1.2 Gravitaciona interakcija i sudari

Kada je reč o evoluciji, galaksije nisu uvek izolovani sistemi, ne evoluiraju same, već kroz međusobne interakcije i sudare. Skoro sve galaksije pripadaju jatima, pri čemu je rastojanje između galaksija u jatu svega stotinak puta veće od samih dimenzija galaksije (Carroll and Ostlie, 2007). Na ovakvim, relativno malim rastojanjima bliski susreti galaksija postaju verovatni, što je posebno izraženo u gustim jatima gde se u centru opaža veći broj eliptičnih galaksija. To ukazuje na veću učestalost sudara u sredinama sa većom gustinom (Carroll and Ostlie, 2007).

Gravitaciona interakcija utiče na strukturu galaksija. Radio-posmatranja pokazuju da značajan broj diskova u galaksijama ispoljava zakrivljenje (eng. *warp*), dok

više od polovine eliptičnih galaksija sadrži ljuskaste strukture (eng. *shells*, Carroll and Ostlie, 2007). Zvezdane ljuske u eliptičnim galaksijama nastaju usled plimskih interakcija sa manjim, satelitskim galaksijama i nose informacije o prethodnim sudarima. Pored eliptičnih, zvezdane ljuske su posmatrane i u haloima spiralnih galaksija (Martínez-Delgado et al., 2010; Foster et al., 2014). Upravo ovaj slučaj sudara masivne spiralne galaksije sa znatno manjom patuljastom galaksijom je predmet proučavanja u ovom radu.

Sve navedeno ukazuje na to da interakcije imaju važnu ulogu u evoluciji galaksija. U hijerarhijskom scenariju formiranja galaksija (engl. *bottom-up*, White and Rees, 1978), masivne galaksije nastaju postepenim spajanjem i gravitacionim zahvatanjem manjih sistema. Iz te perspektive, interakcije koje danas opažamo predstavljaju prirodni nastavak procesa koji su oblikovali galaksije od najranijih faza njihovog formiranja.

Patuljaste galaksije kroz gravitacionu interakciju sa masivnijim galaksijama postavu njihov sastavni deo.

1.2.1 Dinamičko trenje

Interakcije u sudarima galaksija su isključivo gravitacione, direktni sudari zvezda su malo verovatni zbog velikih međusobnih rastojanja. Mehanizam sudara može se opisati na sledeći način: objekat mase M (zbijeno jato ili mala galaksija) kreće se kroz sredinu ispunjenu zvezdama, gasom i tamnom materijom gustine ρ i tako privlači okolne objekte. Iza njega nastaje oblast povećane gustine, koja ga gravitaciono vuče nazad. Kao posledica masa M predaje kinetičku energiju okolnoj materiji i usporava. Ta sila koja se protivi kretanju zove se dinamičko trenje i može se predstaviti kao:

$$f_d \simeq C \frac{G^2 M^2 \rho}{v_M^2}, \quad (1.2)$$

gde je C bezdimenziona veličina koja zavisi od odnosa brzine objekta (v_M) i disperzije brzine (σ) okolne materije, a G gravitaciona konstanta.

Ako je orbita kružna, dinamičko trenje deluje tangencijalno i smanjuje ugaoni momenat. Uz pretpostavku konstantne orbitalne brzine, integracijom se dobija vreme za koje objekat sa početnog radijusa kružne orbite r_i , spiralno padne do centra:

$$t_c = \frac{2\pi v_M r_i^2}{CGM}. \quad (1.3)$$

Odakle se može izraziti najveće rastojanje sa kojeg objekat može stići do centra (r_{max}) za dato vreme (t_{max}):

$$r_{max} = \sqrt{\frac{t_{max} C_{GM}}{2\pi v_M}}. \quad (1.4)$$

Dinamičko trenje ne utiče samo na zbijena jata, već i na satelitske galaksije prilikom sudara galaksija. Pretpostavka je da sve masivne galaksije tokom svog životnog veka apsorbuju veliki broj patuljastih galaksija (Carroll and Ostlie, 2007).

1.3 Zvezdane ljuske

Pojam ljuske (eng. *shell*) uveo je Halton Arp u radu *Atlas of Peculiar Galaxies* (Arp, 1966), opisujući fine strukture vidljive u galaksiji Arp 230, dok su prvi sistematski katalog dali Malin and Carter (1983), koji su tehnikom neoštrog maskiranja izdvojili 137 galaksija ranog tipa sa ljuskama. Ljuske se javljaju kao slabe, oštro ograničene lučne strukture niskog površinskog sjaja, približno koncentrične sa centrom galaksije i često raspoređene naizmenično sa njegovih suprotnih strana (Malin and Carter, 1980; Pop et al., 2018). Kasnija duboka snimanja pokazala su da su ove plimske strukture znatno češće nego što se prvobitno mislilo: uočene su kod oko 73% bliskih sjajnih eliptičnih galaksija (Tal et al., 2009) i kod približno 26% galaksija iz pregleda neba *CFHT Legacy Survey* (Atkinson et al., 2013), a pregledi ATLAS^{3D} i MATLAS omogućili su i njihovu sistematsku klasifikaciju (Duc et al., 2015; Bílek et al., 2020).

Teorijska slika razvijala se od prvih simulacija zasnovanih na probnim česticama u analitičkom potencijalu (Quinn, 1984; Dupraz and Combes, 1986) i njihovog uopštenja na nenulte nagibe orbita (Hernquist and Quinn, 1988, 1989), do savremenih N -body i kosmoloških simulacija. Pop et al. (2018) su ispitali učestalost i mehanizme nastanka ljuski u kosmološkoj simulaciji *Illustris* (Vogelsberger et al., 2014; Genel et al., 2014). Karademir et al. (2019) su na skupu od 36 simulacija pokazali kako formiranje ljuski i zvezdanih tokova zavisi od odnosa masa i orbitalne konfiguracije upada, a Ebrová et al. (2020) da analitički modeli propagacije ljuski važe i za izrazito neradijalne sudare. Mancillas et al. (2019) procenjuju da plimske strukture ostaju vidljive nekoliko milijardi godina nakon sudara, dok je detaljan pregled predloženih scenarija nastanka dat u radu Ebrová (2013).

1.3.1 Mehanizam nastanka zvezdanih ljuski

Opšte prihvaćen scenario formiranja ljuski jeste spajanje (eng. *merger*) ili akrecija satelitske galaksije, male mase na veliku primarnu galaksiju. U slučaju sudara primarne i patuljaste galaksije, plimske sile postepeno izvlače zvezde i okolnu materiju iz manje masivne galaksije. Nakon prolaska kroz centralni deo primarne galaksije, oslobođene zvezde kreću se po približno radijalnim orbitama. Njihovi orbitalni periodi nisu jednaki, kako nemaju sve zvezde jednake energije. Vremenom dolazi do faznog namotavanja (eng. *phase wrapping*), odnosno zvezde se grupišu u blizini svojih apocentara i formiraju koncentrične ljuske (Quinn, 1984; Dupraz and Combes, 1986; Hernquist and Quinn, 1988).

U najjednostavnijem slučaju, ljuske se mogu posmatrati kao mesto na kojem zvezde privremeno usporavaju, pre nego što promene smer kretanja. Kako se prolasci kroz potencijal primarne galaksije odvijaju u više faza, radijus orbita se svakim prolaskom smanjuje i nastaju nove ljuske, te se mogu interpretirati kao dinamički zapis prethodnog sudara. Zvezdane ljuske nose informacije o vremenu spajanja, orbiti patuljaste galaksije, kao i gravitacionom potencijalu primarne galaksije.

Prvobitni model (Quinn, 1984) uglavnom je razmatrao gotovo radijalne, male sudare, međutim kasnije numeričke simulacije (Hernquist and Quinn, 1988, 1989; Karademir et al., 2019; Ebrov et al., 2020) pokazale su da ljuske mogu nastati i pri sudarima pod nenultim početnim nagibom, kao i u slučaju kad patuljasta galaksija ima disk (Hernquist and Quinn, 1989). U zavisnosti od oblika potencijala primarne galaksije i orbite satelita, ljuske mogu biti u ravni sa diskom primarne galaksije ili pak raspoređene pod različitim uglovima u odnosu na njega (Dupraz and Combes, 1986; Hernquist and Quinn, 1988; Wilkinson et al., 2000).

Pored malih sudara, ljuske se mogu javiti i u velikim sudarima (eng. *major merger*), odnosno događajima u kojima učestvuju galaksije velikih masa, sa odnosom 1 : 1 do 1 : 4. U tom slučaju ljuske ne potiču nužno direktno od galaksije pratioca, već mogu nastati faznim namotavanjem materijala iz spoljašnjih delova diskova koji se nakon spajanja vraća u potencijal ostatka (Hernquist and Spergel, 1992; Hibbard and Mihos, 1995). Savremene kosmološke simulacije takođe ukazuju da se ljuskaste strukture češće javljaju u sudarima sa malim momentom impulsa i relativno radijalnim putanjama pratioca (Pop et al., 2018).

1.3.2 Tipovi zvezdanih ljuski

U zavisnosti od prostornog rasporeda ljuski, razlikuje se nekoliko morfoloških kategorija galaksija u kojima se ljuske javljaju (Prieur, 1990):

- Tip I - Ljuske su uglavnom u ravni sa glavnom osom primarne galaksije i naizmenično se pojavljuju sa suprotnih strana njenog centra.
- Tip II - Ljuske su raspoređene oko galaksije bez jasnog poravnanja sa nekom od njenih osa.
- Tip III - Obuhvata mešovite sisteme koji se ne mogu jednoznačno svrstati ni u jednu od prethodnih kategorija (Mancillas et al., 2019; Pop et al., 2018).

Ova klasifikacija je pre svega zasnovana na posmatranoj morfologiji, ne predstavlja zasebne vrste ljuski u fizičkom smislu. Uopšteno, sistemi tipa I povezuju se sa sudarima na skoro radijalnim orbitama, dok azimutalno raspoređene i nepravilne ljuske mogu ukazivati na složeniju orbitalnu geometriju ili veći moment impulsa satelita (Dupraz and Combes, 1986; Hernquist and Quinn, 1988).

U ovom radu analizirane su numeričke simulacije sudara masivne spiralne galaksije i njenog satelita, sferoidne patuljaste galaksije manje mase. Ispitani su slučajevi neradijalnih sudara, sa ciljem određivanja praga odstupanja od radijalne orbite do kojeg se zvezdane ljuske formiraju u halou spiralne galaksije. Za dobijanje rezultata izvršen je niz simulacija N -tela u programskom paketu Gadget-2, pri čemu su varirani početno rastojanje i početna brzina patuljaste galaksije, kao i ugao nagiba njene orbite u odnosu na ravan diska primarne galaksije. Ispitani su slučajevi od radijalnog do sudara sa velikim momentom impulsa. Formirane strukture analizirane su kroz prostornu raspodelu čestica, raspodelu u faznom prostoru i radijalne profile gustine.

Glava 2

Metod

2.1 Modeli galaksija

Za potrebe ovog rada konstruisana su dva modela galaksija. Prvi, velika primarna spiralna galaksija, sačinjen je od tri komponente: centralnog ovala, diska i haloa tamne materije. Drugi model predstavlja patuljastu galaksiju sfernog tipa (dSph), sačinjenu od barionske materije koju okružuje halo tamne materije. Modeli su generisani u programskom paketu GalactICS (Kuijken and Dubinski, 1995; Widrow and Dubinski, 2005; Widrow et al., 2008). Ovaj program od zadatih parametara konstruiše početne pozicije, brzine i mase za svaku „česticu” u modelu galaksije. Ukupna masa komponente galaksije podeljena je brojem čestica, tako da svaka čestica ima jednaku masu. Od broja čestica koje čine neku komponentu galaksije direktno zavisi njena masena rezolucija, te se za odabir ovog broja uzima kompromis između brzine izvršavanja simulacije i što vernijeg predstavljanja dinamičke evolucije. Ukoliko povećamo broj čestica neke komponente, masa po čestici će se smanjiti, dok će se rezolucija povećati i obrnuto. Čestice u ovom smislu ne predstavljaju pojedinačne objekte u galaksiji (zvezde i sl.), već Monte-Carlo uzorak funkcije raspodele, koja opisuje gustinu sistema u šestodimenzionom faznom prostoru sačinjenom od tri koordinate položaja (x, y, z) i tri koordinate brzine (v_x, v_y, v_z) (Binney and Tremaine, 2008). Uspešnim generisanjem modela galaksije GalactICS program vraća tekstualni fajl sačinjen od 7 kolona i N redova, gde N odgovara broju čestica u galaksiji. Prva kolona nosi podatke o masi, naredne tri koordinate (x, y, z) , a poslednje tri komponente brzine (v_x, v_y, v_z) .

U narednim odeljcima proći ćemo detaljnije kroz način na koji je svaka od komponenti modela izgrađena u programu GalactICS.

2.1.1 Halo tamne materije

Kosmološke simulacije formiranja struktura u Univerzumu, uz pretpostavku Λ CDM kosmološkog modela (eng. *lambda cold dark matter*), daju profil gustine za halo tamne materije (Navarro et al., 1997, u daljem tekstu NFW):

$$\rho_{NFW}(r) = \frac{\rho_0}{(r/r_s)(1 + r/r_s)^2}, \quad (2.1)$$

gde je ρ_0 karakteristična centralna gustina, r_s karakteristična dužina tamnog haloa, a r udaljenost od centra haloa.

Međutim, posmatranja kako galaksija, tako i jata galaksija, pokazuju da NFW profil ne opisuje tačno raspodelu gustine tamne materije u haloima, posebno u njihovim centralnim delovima. Iz tog razloga uvodimo opštiji oblik profila gustine, u kojem je nagib centralnog dela profila određen slobodnim parametrom α (Kravtsov et al., 1998):

$$\rho(r) = \frac{\rho_0}{(r/r_s)^\alpha (1 + r/r_s)^{3-\alpha}}. \quad (2.2)$$

Kao poseban slučaj može se izdvojiti $\alpha = 1$, što odgovara NFW profilu (2.1). GalactICS koristi funkciju profila gustine u nešto drugačijem obliku. Naime, kada bismo integralili teorijski profil kakav smo do sad izložili, on bi divergirao i dobili bismo halo beskonačne mase. Iz tog razloga uveden je dodatni član kojim se profil odseca na određenom radijusu, kako bi masa bila konačna, pa je funkcija predstavljena u sledećem obliku:

$$\rho(r) = \frac{2^{1-\alpha} \sigma_h^2}{4\pi r_s^2} \frac{1}{(r/r_s)^\alpha (1 + r/r_s)^{3-\alpha}} \operatorname{erfc} \left(\frac{r - r_h}{\sqrt{2} \delta_{r_h}} \right), \quad (2.3)$$

gde je σ_h karakteristična brzina haloa, r_h dužina na kojoj počinje odsecanje, δ_{r_h} dužina na kojoj gustina glatko pada na nulu (širina prelazne zone), dok je erfc komplementarna funkcija greške (eng. *error function*) i definiše se kao dopuna funkcije greške erfc . Za jako negativan argument erfc funkcija teži dvojci, u nuli teži jedinici, dok za jako pozitivan argument teži nuli. U datom profilu ova funkcija uzima argument $\frac{r-r_h}{\sqrt{2}\delta_{r_h}}$, razmorićemo tri značajna slučaja. Prvi, kada $r \ll r_h$ argument će biti negativan, dakle $\operatorname{erfc} \rightarrow 2$ i funkcija u unutrašnjem delu haloa je nepromenjena imamo jasan NFW profil. Kada je $r \approx r_h$ funkcija $\operatorname{erfc} \rightarrow 1$ i gustina je približno prepolovljena. Treći slučaj, kada je $r \gg r_h$ argument će biti pozitivan pa $\operatorname{erfc} \rightarrow 0$, odnosno gustina glatko pada na nulu i masa konvergira. Dakle r_h je radijus na kome se halo seče, dok oštrina tog preseka zavisi od parametra δ_{r_h} . Za male

vrednosti δ_{r_h} imamo nagli, gotovo pravougaoni rez, dok je za velike vrednosti prelaz razvučen. Širina odsecanja ne sme biti podešena na premalu vrednost, u suprotnom naglo odsecanje može proizvesti negativne vrednosti funkcije raspodele $f(E)$ (koja predstavlja raspodelu čestica u galaksiji po koordinatama i brzinama), što je fizički besmisleno. GalactICS ne generiše galaksiju isključivo od profila gustine, već i iz potencijala (Widrow et al., 2008), preko Edingtonove inverzije (eng. *Eddington inversion*) izvodi funkciju raspodele (Binney and Tremaine, 2008). U njoj, između ostalog, figuriše i drugi izvod gustine po potencijalu, što je ključno, jer ako gustina padne previše naglo (malo δ_{r_h}) drugi izvod postaje veliki i negativan, pa integral može da vrati negativne vrednosti $f(E)$ za neke energije. Ukoliko do ovoga dođe, ispis pri generisanju galaksije sugerisaće da virijalni odnos odstupa od jedinice.

Ostaje još da definišemo karakterističnu centralnu gustinu:

$$\rho_0 = \rho_{crit} \frac{200}{3} \frac{c^3}{\ln(1+c) - c/(1+c)}, \quad (2.4)$$

gde je ρ_{crit} vrednost današnje kritične gustine Univerzuma i ona zavisi od vrednosti Hablove konstante H_0 , a c je bezdimenzioni parametar koncentracije i definiše se kao $c = R_{200}/r_s$. Parametar R_{200} predstavlja rastojanje od centra galaksije na kojem prosečna gustina haloa padne na vrednost 200 puta veću od današnje kritične gustine Univerzuma i još se naziva virijalni radijus. Spoljne granice sistema određene su plimskim radijusom R_h (eng. *tidal radius*), to je ono što GalactICS računa na osnovu karakteristične dužine r_s , koja se zadaje.

Karakteristična centralna gustina ρ_0 se ne zadaje direktno, ali se preko nje može izraziti karakteristična brzina σ_h :

$$\sigma_h = \sqrt{4\pi\rho_0 r_s^2}. \quad (2.5)$$

Naime ρ_0 izraženo je u $2.325 \times 10^9 M_\odot/\text{kpc}^3$, karakteristična dužina r_s u kpc, dok se dobijena brzina σ_h dobija u jedinicama od 100 km/s.

Ovime smo opisali sve parametre haloa koji se zadaju GalactICS-u prilikom generisanja modela, to su karakteristična dužina r_s , karakteristična brzina σ_h , dužina odsecanja r_h , širina odsecanja δ_{r_h} i nagib profila α . Virijalni radijus R_{200} , a zatim i karakterističnu dužinu r_s možemo izvesti na osnovu virijalne mase haloa tamne materije M_{200} , koja odgovara masi unutar virijalnog radijusa R_{200} :

$$M_{200} = \frac{4}{3}\pi \cdot 200\rho_{crit}R_{200}^3 \quad (2.6)$$

2.1.2 Disk

Model diska opisuje se cilindrično simetričnom raspodelom koja kombinuje dva profila gustine, duž koordinate R profil opada eksponencijalno, dok je vertikalno, duž z -ose.

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

$$\Sigma(R) = \frac{M_d}{2\pi R_d^2} e^{-\frac{R}{R_d}}, \quad (2.7)$$

gde je Σ površinska gustina, M_d ukupna masa diska, a R_d karakteristična radijalna dužina, što se može definisati kao rastojanje na kojem gustina opadne e puta.

Profil gustine duž z -ose, dakle normalno na ravan diska opisan je funkcijom $sech^2$ (Geehan et al., 2006; Sadoun et al., 2014), pa kombinovanjem sa prethodnom jednačinom (2.7) dobija se ukupan profil :

$$\rho_d(R, z) = \frac{\Sigma(R)}{2z_0} sech^2\left(\frac{z}{z_d}\right), \quad (2.8)$$

gde su R i z koordinate u cilindričnom koordinatnom sistemu, a z_d karakteristična vertikalna dužina.

Parametri koji se zadaju pri modelovanju diska su ukupna masa, R_d , z_d , kao i parametri koji određuju na kom rastojanju dolazi do odsecanja diska i kolike je ono oštine. Poslednja dva parametra potrebna su iz sličnog razloga, kao u prošlom odeljku kada smo pominjali odsecanje haloa *erfc* funkcijom. Čist eksponencijalni disk prostirao bi se u beskonačnost, pa mu se dodaje glatki rez, kako bi imao konačnu veličinu. Kao i u prethodnom slučaju, širina prelaza ne sme biti premala. Iako prilikom generisanja diska sa malom širinom prelaza neće doći do javljanja negativnih vrednosti u funkciji raspodele (disk se ne gradi Edingtonovom inverzijom), preoštari prelaz može napraviti neprirodnu ivicu diska, koja će dovesti do perturbacija na krajevima diska prilikom simulacija.

GalactICS programski paket gustinu diska računa iz prethodno pomenutih parametara, međutim brzine čestica i njihova disperzija određuju se posebno. Zakon po kome opada radijalna disperzija brzina sa radijusom glasi:

$$\sigma_R^2 = \sigma_{R_0}^2 e^{-\frac{R}{R_\sigma}}, \quad (2.9)$$

gde je σ_{R_0} centralna radijalna disperzija brzine, tj. σ_R u centru (na $R = 0$), dok je R_σ skala na kojoj disperzija opada radijalno. Dakle, disk je topliji, ima veće nasumične brzine u centru, kako se krećemo ka spoljašnosti brzine opadaju i disk je sve hladniji. Ovaj oblik je standardan, jer prati opadanje površinske gustine. Napomenimo još i da je R_σ konceptualno različito od karakteristične radijalne dužine R_d i kod dozvoljava da se ove vrednosti razdvoje. Međutim, u praksi je često jednostavnije uzeti jednake vrednosti za ove parametre (Widrow and Dubinski, 2005).

Stabilnost diska određena je Toomre-ovim parametrom Q (Toomre, 1964):

$$Q = \frac{\sigma_R \kappa}{3.36 \cdot G \Sigma}, \quad (2.10)$$

gde je κ epiklična frekvencija. Za vrednosti $Q > 1$ disk je lokalno stabilan, dok je za $Q < 1$ disk nestabilan i može doći do kolapsa u fragmente (Binney and Tremaine, 2008). Za vrednosti Q između 1 i 1.5 disk je marginalno stabilan i mogu se formirati spiralne grane i prečaga. Kako je $Q \propto \sigma_R \propto \sigma_{R_0}$, variranjem σ_{R_0} variramo i vrednosti Q , odnosno biramo stabilnost diska.

2.1.3 Centralni oval

Prilikom posmatranja centralnog ovala u galaksijama, kao i galaksije u celosti na noćnom nebu merimo površinski sjaj, odnosno količinu svetlosti po jedinici površine u funkciji od projektovanog radijusa R . Za eliptične galaksije i centralni oval spiralnih galaksija ovaj trend je dobro opisan Sérsic-ovim zakonom (Sérsic, 1968):

$$I(R) \propto \exp \left[-b_n \left(\frac{R}{R_e} \right)^{\frac{1}{n}} - 1 \right] \quad (2.11)$$

gde R_e predstavlja efektivni radijus, tj. radijus unutar kojeg je sadržana polovina ukupnog sjaja, n je Sérsic-ov indeks, a b_n je konstanta koja zavisi od n i definisana je tako da R_e zaista obuhvata polovinu svetlosti. Sérsic-ov indeks kontroliše koliko je profil koncentrisan. Vrednosti $n = 1$ daju eksponencijalni profil, kao onaj kod diskova, dok $n = 4$ daje klasičan De Vaucouleurs-ov profil tipičan za velike eliptične galaksije. Veće vrednosti za n znače koncentrisanije jezgro i sporije opadanje mase ka većem radijusu (Graham and Driver, 2005). Centralni ovali obično imaju indekse između ~ 1 i ~ 4 .

Da bi se iz površinskog sjaja dobila gustina $\rho(R)$ potrebno je izvršiti deprojekciju. Sérsic-ov indeks nema zatvorenu formu i za opšte n deprojekcija ne može da se napiše kao jednostavna elementarna funkcija. Rešenje ovog problema dali su Prugniel and Simien (1997) u vidu analitičke aproksimacije koja dobro reprodukuje deprojekciju, a računa se kao:

$$\rho_b(r) = \rho_{b_0} \left(\frac{r}{R_e} \right)^{-p} \exp \left(-b_n \left(\frac{r}{R_e} \right)^{\frac{1}{n}} \right) \quad (2.12)$$

pri čemu je ρ_{b_0} centralna gustina. Eksponecijalni član u ovom izrazu je glavni za opadanje gustine i čuva Sérsic-ov karakter u 3D prostoru. Prava deprojekcija Sérsic profila u centru ne prati ravan eksponecijalni trend, već ima blago pojačanje gustine kako $r \rightarrow 0$. Zato se uvodi stepeni član $(r/R_e)^{-p}$, on reprodukuje unutrašnje ponašanje deprojektovanog profila. Ovde p nije slobodan parametar, Prugniel i Simien su ga izračunali tako da aproksimacija najbolje fituje pravu deprojekciju i on zavisi od n . Izračunava se kao.

$$p = 1 - 0.6097/n + 0.05563/n^2. \quad (2.13)$$

Dakle, za dato n parametri b_n i p su fiksirani, nisu nezavisni parametri koje slobodno biramo. R_e je karakteristična skala oko koje se dešava prelaz. Blizu centra ($r \ll R_e$) eksponecijalni član je približno jednak 1, pa dominira stepeni član. Daleko od centra ($r \gg R_e$) gustina naglo opada kao posledica eksponecijalnog člana.

Parametar p može se zadati i proizvoljno, nezavisno od unutrašnjeg nagiba koji bi diktirao Sérsic-ov indeks. Potrebno je samo zadati vrednost $p > 0$, prilikom generisanja. Ovo se naziva uopšteni Prugniel–Simien. Ukoliko unesemo $p < 0$ kod zanemaruje unetu vrednost i računa unutrašnji nagib prema formuli (2.13).

Parametri koji se u praksi zadaju prilikom generisanja centralnog ovala su redom: Sérsic-ov indeks n , unutrašnji nagib p , disperzija brzine σ_b i efektivni radijus R_e . Ove veličine možemo pretpostaviti na osnovu ukupne mase centralnog ovala, slično kao kod haloa:

$$M_b = \sigma_b^2 R_e \quad (2.14)$$

Nakon generisanja, model može imati nešto drugačiju ukupnu masu od pretpostavljene, ali ne značajno.

2.1.4 Model velike primarne galaksije

Velika primarna galaksija generisana je prema modelu Mlečnog puta koji dolazi kao primer sa GalactICS 2008 programskim paketom, uz modifikovanje pojedinih parametara. Parametri su dati u Tabeli (2.1). Model čine tri komponente: halo tamne materije, disk i centralni oval.

Tabela 2.1: Parametri modela primarne galaksije po komponentama

Komponenta	Parametar	Vrednost parametra
Halo tamne materije	r_h [kpc]	150
	σ_h [100 km/s]	4.52
	r_s [kpc]	6.01
	δ_{r_h} [kpc]	10
	α	0.67
Disk	M_d [$2.325 \cdot 10^9 M_\odot$]	12.48
	R_d [kpc]	3.72
	disktruncation [kpc]	25
	z_d [kpc]	0.37
	dtruncdisk [kpc]	3
Centralni oval	n	2.826
	p	-1
	σ_b [100 km/s]	2.92
	R_e [kpc]	0.83

Ukupna barionska masa galaksije iznosi $M_{vezda} = 3.96 \cdot 10^{10} M_\odot$, a sačinjena je od $2 \cdot 10^5$ čestica diska i $1 \cdot 10^5$ čestica iz centralnog ovala. Masa tamne materije je $M_{DM} = 6.96 \cdot 10^{11} M_\odot$ i raspoređena je na $2 \cdot 10^5$ čestica u halou.

2.1.5 Model patuljaste galaksije

Patuljasta galaksija predstavlja model sferne galaksije. Ima značajno manju masu od primarne i sačinjena je od dve komponente: centralnog ovala i haloa tamne materije. Ova galaksija nema disk, kako bi se postigla sferna struktura, time je sva barionska materija raspoređena u centralnom ovalu.

Centralni oval broji $5 \cdot 10^4$ čestica i ima ukupnu masu $M_b = 4.66 \cdot 10^7 M_\odot$.

Parametri haloa određeni su na osnovu ukupne mase $M_h = 1 \cdot 10^9 M_\odot$ koju želimo da dobijemo za halo. Odatle, korišćenjem jednačine (2.6) dobijamo vrednost

za virijalni radijus $R_{200} = 20.434$ kpc. Za današnju kritičnu gustinu Univerzuma uzeto je $139.9 M_{\odot}/\text{kpc}^3$ (Jarosik et al., 2011). Dalje iz definicije bezdimenzionog parametra koncentracije c možemo naći karakterističnu dužinu r_s i ona iznosi 1.0217 kpc. Za vrednost parametra koncentracije odabrano je $c = 20$. Ove vrednosti ne biraju se potpuno proizvoljno, već zavise od mase haloa tamne materije. Što je veća masa haloa, parametar c je manji (Macciò et al., 2007), tako je za patuljaste galaksije opseg vrednosti između 15 i 30. Širina odsecanja postavljena je na 8.8% od virijalnog radijusa, što je jednako $\delta_{r_h} = 1.798$ kpc. Nagib profila podešen je na $\alpha = 1$, što nam daje NFW profil haloa tamne materije. Vodeći računa o jedinicama možemo odrediti i karakterističnu brzinu σ_h preko jednačine (2.5). Pre toga je još potrebno odrediti i karakterističnu centralnu gustinu (2.4), što ne predstavlja problem s obzirom da su sve vrednosti potrebne za izračunavanje sada poznate.

Tamni halo sačinjen je od $2 \cdot 10^5$ čestica. Nakon generisanja modela, sabiranjem masa svih čestica, dobijena je ukupna masa $M_h = 1.21 \cdot 10^9 M_{\odot}$, što delimično odstupa od ciljane mase.

Svi podaci potrebni za generisanje patuljste galaksije dati su u tabeli 2.2.

Tabela 2.2: Parametri modela patuljaste galaksije po komponentama

Komponenta	Parametar	Vrednost parametra
Halo tamne materije	r_h [kpc]	20.43
	σ_h [100 km/s]	0.45
	r_s [kpc]	1.02
	δ_{r_h} [kpc]	1.8
	α	1
Centralni oval	n	1
	p	-1
	σ_b [100 km/s]	0.201
	R_e [kpc]	0.532

2.2 Numeričke simulacije

Sve simulacije u ovom radu realizovane su pomoću programskog paketa GADGET-2 (Springel, 2005). U pitanju je paralelizovani kod namenjen za kosmološka istraživanja bezsudarnih sistema metodom N -tela, kao i za simulaciju idealnog gasa

primenom hidrodinamike. Kod je razvijen za rad na računarskim sistemima sa distribuiranom memorijom korišćenjem standarda za razmenu poruka (MPI - Message Passing Interface), što omogućava efikasnu simulaciju sistema sa velikim brojem čestica.

Kod razlikuje više tipova čestica, pri čemu se hidrodinamika (SPH) primenjuje isključivo na gasnu komponentu, dok se sve ostale komponente, poput tamne materije i zvezda, tretiraju kao bezsudarni sistemi koji međusobno interaguju samo putem gravitacije. Budući da se ovaj rad bavi modelovanjem gravitacione interakcije galaksija radi analize formiranih zvezdanih struktura, kao što su ljuske, pri čemu gasna komponenta nije uključena u modele, fokus našeg istraživanja biće na simulacijama N -tela. Galaksije se ne posmatraju u kosmološkom kontekstu, već kao izolovani sistemi, čija se dinamika prati u fizičkim koordinatama, bez uticaja širenja svemira.

2.2.1 Osnovni algoritamski princip

U simulacijama N -tela galaksija je bezsudarni sistem, što znači da dinamika pojedinačne čestice nije određena bliskim susretima sa drugim česticama, već glatkim gravitacionim poljem koje stvara celokupna raspodela mase. Evolucija sistema opisana je Njutnovim jednačinama kretanja za vektore položaja $\mathbf{r}_i$:

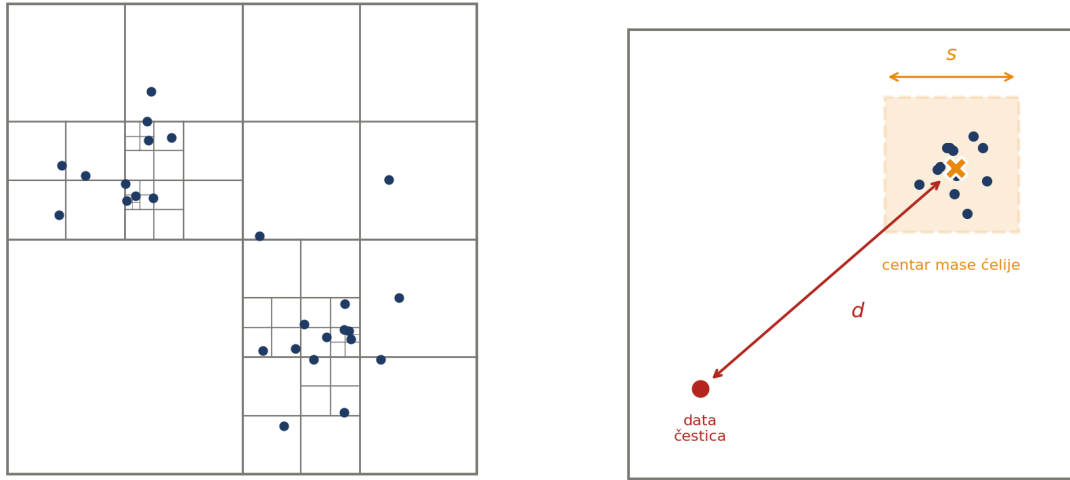
$$\ddot{\mathbf{r}}_i = -\nabla\Phi(\mathbf{r}_i) , \quad (2.15)$$

gde je ubrzanje svake čestice ($i = 1, 2, \dots, N$) određeno gradijentom gravitacionog potencijala:

$$\nabla^2\Phi = 4\pi G\rho . \quad (2.16)$$

Poslednja jednačina predstavlja Poasonovu jednačinu, kojom je gravitacioni potencijal Φ povezan sa raspodelom gustine mase ρ u sistemu.

U programu GADGET-2 direktno sabiranje gravitacionih doprinosa svih parova čestica (tzv. *particle-particle* pristup) daje egzaktne vrednosti sila, ne uvodi nikakve prostorne aproksimacije, niti pojednostavljuje proračun. S druge strane, to zahteva broj operacija koji raste kao $\mathcal{O}(N^2)$, što postupak čini računarski neizvodljivim za sisteme sa velikim brojem čestica. Da bi se ovaj problem prevazišao, koristi se hijerarhijski algoritam stabla (engl. *tree algorithm*), koji smanjuje složenost na $\mathcal{O}(N \log N)$.



Slika 2.1: Shematski prikaz algoritma stabla (Barnes and Hut, 1986): (a) rekurzivna podela prostora do ćelija sa najviše jednom česticom; (b) kriterijum otvaranja, gde se ćelija malog ugaonog prečnika $\theta \simeq s/d$ zamenjuje jednim članom u centru mase. Prikazana je dvodimenziona podela radi preglednosti. Program GADGET-2 koristi oktalno stablo.

Osnovna ideja algoritma stabla jeste da se udaljene grupe čestica ne tretiraju pojedinačno, već zajednički. Prostor se rekurzivno deli na ćelije (u oktalnom stablu svaka ćelija se deli na osam manjih), sve dok svaka najmanja ćelija ne sadrži najviše jednu česticu (Barnes and Hut, 1986), što je shematski prikazano na slici 2.1. Prilikom računanja sile koja deluje na datu česticu, doprinos udaljene grupe čestica aproksimira se multipolnim razvojem njihove ukupne mase oko zajedničkog centra mase, umesto da se sabiraju pojedinačni doprinosi. Da li će se neka ćelija tretirati kao celina ili će se dodatno „otvoriti” i podeliti na manje, određuje se kriterijumom otvaranja (`ErrTolForceAcc`) koji poredi ugaoni prečnik ćelije sa parametrom tačnosti. Manja vrednost ovog parametra daje tačniju silu, ali po cenu dužeg vremena računanja. Time se postiže ravnoteža između tačnosti i efikasnosti: bliske čestice doprinose sili pojedinačno, dok se udaljene grupe obrađuju aproksimativno, bez značajnog gubitka tačnosti.

Pošto čestice u simulaciji predstavljaju kolektivne elemente mase, a ne fizičke tačkaste objekte, potrebno je izbeći nefizičke divergencije gravitacione sile pri ve-

oma malim međusobnim rastojanjima. Iz tog razloga se uvodi dužina ublažavanja (eng. *softening lenght*), koja definiše minimalno rastojanje na kojem je gravitaciona interakcija fizički opravdana. Odabir premale vrednosti dovodi do veštačkih dvočestičnih rasejanja i numeričkog šuma, dok prevelika vrednost preterano „razmazuje” raspodelu mase i narušava realne strukture. U parametarskom fajlu ova veličina se zadaje posebno za svaku komponentu (`SofteningHalo`, `SofteningDisk`, `SofteningBulge`), čime se dužina ublažavanja može prilagoditi rezoluciji svakog dela galaksije.

2.2.2 Vremenska integracija

Za integraciju jednačina kretanja GADGET-2 koristi *leapfrog* metod, formulisan kroz naizmenično računanje koraka za promenu brzine pod dejstvom sile i pomeraja položaja. Ovaj metod pripada klasi simplektičkih integratora, koji imaju osobinu da čuvaju geometrijsku strukturu faznog prostora, zbog čega ne dolazi do sistematskog nagomilavanja greške u energiji tokom dugih vremenskih intervala. Ta osobina je posebno važna za simulacije dinamike galaksija, koje obuhvataju veliki broj orbitalnih perioda i zahtevaju stabilno praćenje sistema tokom dugog vremena.

Kako se čestice u različitim delovima galaksije kreću različitim brzinama i nalaze u oblastima različite gustine, primena jedinstvenog vremenskog koraka za sve čestice bila bi neefikasna. Zbog toga GADGET-2 koristi individualne, adaptivne vremenske korake: svakoj čestici dodeljuje se korak čija je veličina prilagođena lokalnim uslovima, pri čemu se čestice u gustim, brzo promenljivim oblastima integrale češće od onih u razređenim spoljašnjim delovima. Veličina koraka ograničena je kriterijumom tačnosti (`ErrTo1IntAccuracy`) i najvećom dozvoljenom vrednošću (`MaxSizeTimestep`). Time se računarski resursi usmeravaju tamo gde su najpotrebniji, uz očuvanje ukupne tačnosti simulacije.

2.2.3 Provera stabilnosti

Stabilnost generisanih modela galaksija proverena je simuliranjem evolucije izolovane galaksije u trajanju od 5 Gyr, bez ikakvih spoljnih uticaja. Na taj način ćemo sa sigurnošću znati da su sve novonastale strukture direktna posledica sudara, a ne unutrašnje dinamike samih galaksija. Vremenski period od 5 Gyr obuhvata veliki broj orbitalnih perioda čestica u galaksiji, odnosno dovoljno je dug da sistem prođe

kroz fazu inicijalne relaksacije. Ukoliko bi model bio nestabilan, odstupanja bi se u datom vremenskom rasponu jasno ispoljila.

Kriterijum stabilnosti naših modela zasnovan je na teoremi virijala, koja predstavlja odnos kinetičke (T) i potencijalne energije (U) i za stabilan sistem jednaka je (Binney and Tremaine, 2008):

$$\frac{2T}{U} = -1 \quad (2.17)$$

U praksi, stabilnost i dostizanje dinamičke ravnoteže izolovanog sistema pratimo kroz vremensku evoluciju relativne ukupne energije ($E_2/E_1 - 1 = E(t)$). Konstantnost ove vrednosti tokom vremena ($\frac{dE}{dt} \approx 0$) implicira da je sistem prošao fazu inicijalne relaksacije i da stabilno evoluira.

Prvo je ispitana velika primarna galaksija. Nakon 5 Gyr nisu primećene nikakve značajne vizuelne promene u galaksiji, a isti zaključak sledi i iz praćenja relativne ukupne energije. Njene vrednosti u zabeleženim trenucima evolucije razlikuju se tek na trećoj decimali, što potvrđuje da je primarna galaksija stabilna. Na isti način proverena je i evolucija modela patuljaste galaksije, čime je potvrđena njegova stabilnost.

2.2.4 Parametri sudara

Jednom kada smo ustanovili stabilnost naših modela, možemo preći na simulacije sudara. Ispitan je niz slučajeva sa različitim početnim uslovima. Parametri koji su varirani su početno rastojanje, brzina i ugao ravni putanje patuljaste galaksije u odnosu na ravan diska primarne galaksije. Centar mase primarne galaksije postavljen je u koordinatni početak, tako da se ravan diska poklapa sa x - y ravni. Centar patuljaste galaksije pomeran je duž x -ose u odnosu na centar primarne za 175 kpc, 200 kpc i 250 kpc. Početna pozicija patuljaste galaksije ne sme biti previše blizu primarnoj galaksiji, odnosno u njenom halou. U suprotnom ćemo dobiti već započetu interakciju u kojoj je halo patuljaste galaksije oguljen na samom početku simulacije zbog jake plimske sile primarne galaksije. Zato kao najmanje rastojanje biramo $r = 175$ kpc, što je izvan virijalnog radijusa primarne galaksije, tako da za minimalno početno rastojanje imamo kontaktni slučaj. S druge strane postavljanje prevelikog početnog rastojanja dovelo bi do produžavanja vremena upada, prosto patuljastoj galaksiji bi trebalo znatno više vremena da stigne do primarne galaksije, što bi zahtevalo znatno duže trajanje simulacije. Zato je za gornju granicu odabrano

rastojanje od 250 kpc. Za svako početno rastojenje izvršene su simulacije sa zadatim početnim brzinama patuljaste galaksije usmerenim duž y-ose u rasponu od 0 km/s do 100 km/s, sa korakom od 10 km/s. Ova komponenta predstavlja tangencijalnu brzinu koja određuje moment impulsa galaksije. U slučaju kada je početna brzina $v = 0$ km/s dolazi do čisto radijalnog upada, pri čemu patuljasta galaksija pada pravo ka centru primarne galaksije. U kosmološkom kontekstu ovaj slučaj odgovara satelitu koji je usled Hablovog širenja (eng. *Hubble flow*)¹ dospeo u relativno mirovanje u odnosu na primarnu galaksiju koja ga zatim gravitaciono privlači ka sebi. Međutim, patuljaste galaksije sasvim izvesno poseduju moment impulsa, te uvođenje nenulte tangencijalne brzine omogućava da se ispita koliko orbita satelita može odstupati od radijalne, a da dođe do formiranja ljuski. Dalje, za svaku kombinaciju brzine i rastojanja ispitani su slučajevi kada patuljasta galaksija kreće pod različitim upadnim uglom u odnosu na ravan velike primarne galaksije. Pomeranja su vršena u x - z ravni i uglovi se kreću od 0° do 90° , sa korakom od 15° . Vrednost $\alpha = 0^\circ$, odgovara upadu u ravni diska, dok za $\alpha = 90^\circ$ patuljasta galaksija upada normalno na ravan diska. Ovime se ispituje da li orijentacija sudara u odnosu na disk primarne galaksije utiče na nastanak i izgled ljuski.

Sve simulacije puštane su u programskom paketu Gadget-2, u trajanju od 5 Gyr, pri čemu se podaci iz simulacije čuvaju na svakih 0.2 Gyr. Trajanje od 5 Gyr izabrano je tako da obuhvati vreme upada i dovoljan broj prolazaka kroz centar primarne galaksije, što je neophodno da bi se fazno namotavanje razvilo i ljuske postale uočljive. To je ujedno i tipična skala formiranja plimskih struktura u Lokalnoj grupi, među koje spadaju i ljuske. Dužina ublažavanja podešena je jednako za sve komponente sudara na 0.1 kpc.

Ukupno je izvršeno 147 simulacija sudara, za svaku kombinaciju nagiba orbite patuljaste galaksije, početnog rastojanja i početne brzine.

¹Hablovo širenje (ili Hablov tok) označava kretanje astronomskih objekata koje je uzrokovano širenjem svemira, a ne njihovom sopstvenom brzinom kroz prostor.

Glava 3

Rezultati

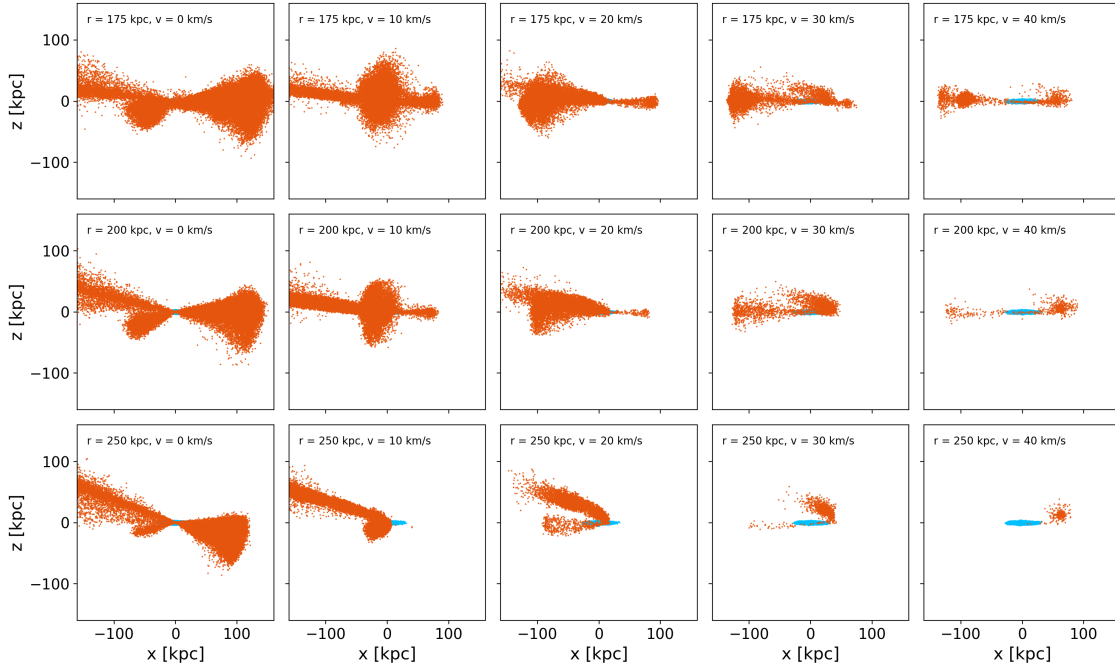
U okviru ovog poglavlja prikazani su rezultati simulacija sudara primarne spiralne galaksije i patuljaste galaksije dobijeni za različite kombinacije vrednosti ugla nagiba ravni putanje satelita u odnosu na ravan diska primarne galaksije, početnog rastojanja i tangencijalne brzine patuljka. Analizirani su kroz tri različita prikaza: prostornu raspodelu čestica u x - z ravni koja omogućava uvid u morfologiju nastalih struktura, zatim dijagrame u faznom prostoru brzina-rastojanje i profile gustine iz kojih možemo odrediti poziciju ljuski, kao i trenutak njihovog nastanka.

Prikazani su najvažniji rezultati simulacija, pri čemu je analizirano nekoliko parametara koji bitno utiču na formiranje plimskih struktura. Najpre se razmatra morfologija, a zatim i kinematička svojstva i pozicije formiranih struktura.

3.1 Morfologija formiranih struktura

Kao što je već pomenuto, morfologija struktura nastalih u sudaru jasno se vidi na graficima koji predstavljaju raspodelu čestica u x - z ravni.

Grafici su organizovani tako da svaka slika (3.1, 3.2 i 3.3) odgovara jednoj vrednosti ugla nagiba orbite (α). Unutar slika, kolone predstavljaju različite vrednosti početne brzine patuljaste galaksije ($v = 0, 10, 20, 30, 40$ km/s), dok redovi odgovaraju različitim početnim rastojanjima ($r = 175, 200, 250$ kpc). Svi paneli prikazuju konfiguraciju sistema u krajnjem trenutku simulacije ($t = 5$ Gyr), čime je omogućeno direktno poređenje ishoda sudara pri različitim kombinacijama parametara. Plavom bojom označene su čestice diska primarne galaksije, a narandžastom čestice koje su prvobitno pripadale patuljastoj galaksiji.

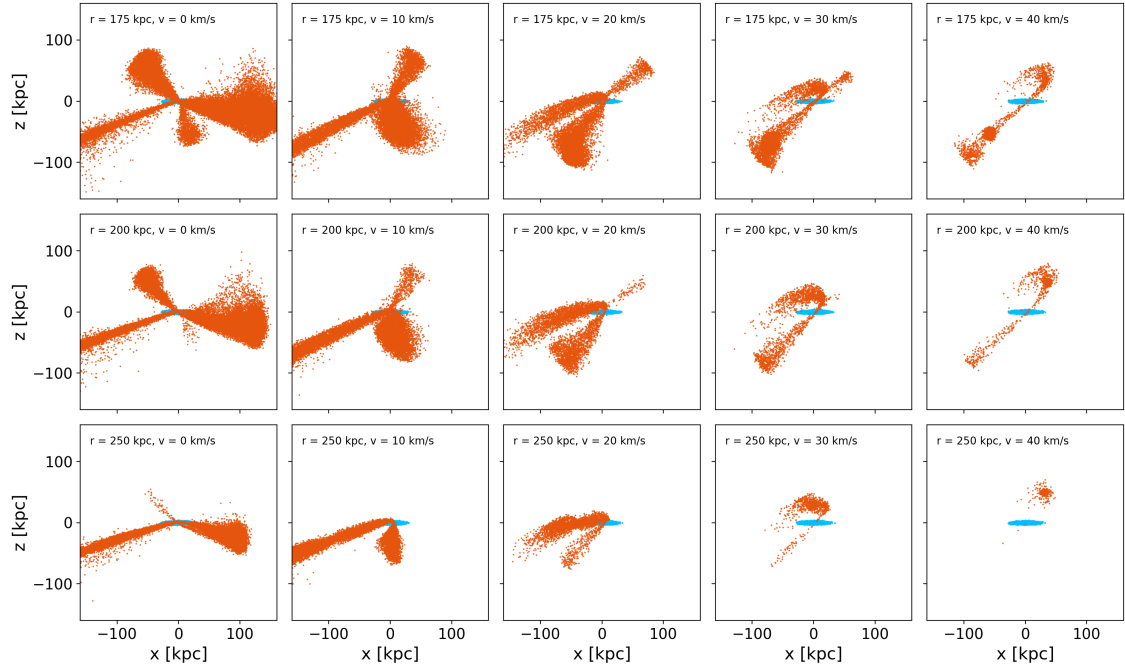


Slika 3.1: Raspodela čestica u x - z ravni u trenutku $t = 5$ Gyr za upadni ugao $\alpha = 0^\circ$. Redovi odgovaraju različitim početnim rastojanjima ($r = 175, 200, 250$ kpc), a kolone različitim početnim brzinama patuljaste galaksije ($v = 0 - 40$ km/s). Plavom bojom prikazane su čestice diska primarne galaksije, a narandžastom čestice patuljaste galaksije.

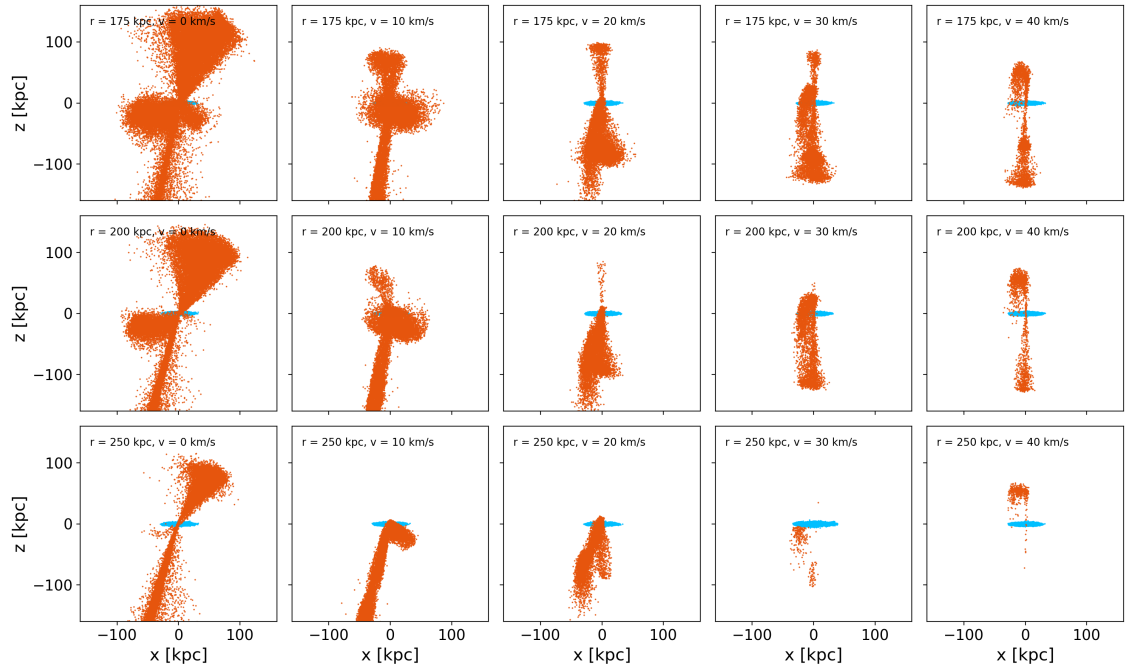
3.1.1 Uticaj ugla nagiba orbite

Ugao nagiba orbite pod kojim patuljasta galaksija prilazi primarnoj nema značajan uticaj na morfologiju i broj formiranih ljuskastih struktura. Poređenjem grafika na slikama 3.1, 3.2 i 3.3 koji redom odgovaraju upadnom uglu $\alpha = 0^\circ, 45^\circ$ i 90° , pri istim vrednostima za r i v , uočava se da ljuske nastaju pod sličnim uslovima i imaju sličnu strukturu, nezavisno od orijentacije upada. Ono što se menja jeste prostorna orijentacija formiranih struktura: pri uglovima od 0° materijal iz patuljaste galaksije rasipa se pretežno u ravni diska primarne galaksije, dok se sa porastom ugla struktura postepeno rotira, da bi pri uglu od 90° bila orijentisana duž z -ose.

Ovakav rezultat je očekivan s obzirom na to da dinamikom oslobođenih zvezda na velikim radijusima dominira halo tamne materije, koji je u korišćenom modelu približno sferno simetričan. U takvom potencijalu ne postoji izdvojen pravac, pa uslovi za fazno namotavanje ne zavise od orijentacije orbite, već pre svega od nje- ne energije i momenta impulsa. To su veličine određene rastojanjem i početnom



Slika 3.2: Raspodela čestica kao na Slici 3.1 za slučaj upadnog ugla $\alpha = 45^\circ$.



Slika 3.3: Raspodela čestica kao na Slici 3.1 za slučaj upadnog ugla $\alpha = 90^\circ$.

brzinom, a ne uglom upada.

3.1.2 Uticaj brzine

Analizom rezultata simulacija uočava se izražena zavisnost formiranih struktura od početne brzine patuljaste galaksije ($v = 0 - 60$ km/s). To se može videti poređenjem kolona unutar svake od slika 3.1, 3.2, 3.3. Pri brzini $v = 0$ km/s, kada je upad gotovo radijalan, materijal oslobođen iz satelita rasipa se simetrično duž ose upada, obrazujući najizraženije i najoštrije definisane ljuskaste strukture. Kako se krećemo sa leva na desno po graficima raste početna brzina i ljuske postepeno gube oštrinu i simetriju. Strukture se izvijaju u zakrivljene lukove, a raspodela materijala postaje asimetrična. Pri najvećim razmatranim brzinama ($v = 30$ i 40 km/s) ljuske se više ne formiraju, a umesto njih uočavaju se izduženi plimski repovi, dok u pojedinim slučajevima patuljasta galaksija ostaje delimično ili potpuno očuvana struktura.

Ovakvo ponašanje posledica je porasta momenta impulsa orbite pratioca. Iz ranijih radova poznato je da se ljuske javljaju pri radijalnim sudarima (Hernquist and Quinn, 1988), što potvrđuju i naši rezultati. U sudarima sa početnim brzinama $v = 0$ (prva kolona na graficima 3.1, 3.2, 3.3) patuljasta galaksija pada pravolinijski ka centru primarne, orbite čestica su izdužene i raspršene. Sa porastom brzine (dalje kolone na graficima) raste i moment impulsa, orbite čestica su koncentrisanije i zakrivljene. Strukture formiraju zakrivljene lukove što može da se vidi u kolonama gde su brzine $v = 20$ i 30 km/s.

Veći moment impulsa uzrokuje veće vrednosti pericentara orbita, to čini da patuljasta galaksija više ne prolazi kroz centralne oblasti primarne, gde su plimske sile najjače, pa razaranje postaje nepotpuno, pri većim brzinama od $v = 40$ km/s, naročito na rastojanju od 250 kpc (poslednja kolona na graficima 3.1, 3.2, 3.3). Patuljasta galaksija formira kompaktnu strukturu koja je gravitaciono vezana za primarnu galaksiju. Ne dolazi do razaranja, niti do formiranja ljuski.

3.1.3 Uticaj početnog rastojanja

Poređenjem redova unutar svake od slike 3.1, 3.2 i 3.3 uočava se zavisnost morfologije ljuski od početnog rastojanja na kom se nalazi patuljasta galaksija. Ljuske su najjasnije definisane na $r = 175$ kpc, gde se javljaju kao oštro ograničene, međusobno razdvojene strukture sa suprotnih strana u odnosu na centar primarne galaksije. Sa porastom početnog rastojanja izraženost ljuski opada: na $r = 200$ kpc strukture su difuznije i slabijeg kontrasta, dok se na $r = 250$ kpc u većini slučajeva umesto razvijenog sistema ljuski uočavaju izduženi plimski repovi ili delimično očuvano je-

zgro patuljaste galaksije. Ovaj trend prisutan je za sve razmatrane uglove upada i za svaku fiksiranu vrednost početne brzine, što ukazuje na to da je reč o sistematskom efektu početnog rastojanja, a ne o posledici konkretne konfiguracije sudara.

Uočena zavisnost može se objasniti kombinacijom nekoliko činilaca. Naime, kako sve simulacije imaju fiksirano vreme trajanja od 5 Gyr, patuljasta galaksija koja polazi sa $r = 250$ kpc znatno veći deo vremena provodi u prilasku primarnoj galaksiji, nego u slučaju kada kreće sa manjih rastojanja. Stoga mu nakon plimskog razaranja ostaje manje vremena za formiranje ljuski. Pošto broj i izraženost ljuski rastu sa brojem prolazaka kroz centar primarne galaksije, sistemi sa većim početnim rastojanjem jednostavno su mlađi u trenutku posmatranja. Na 175 kpc pratilac ranije stiže do centra, prolazi kroz više interakcija i formira razvijeniji sistem ljuski.

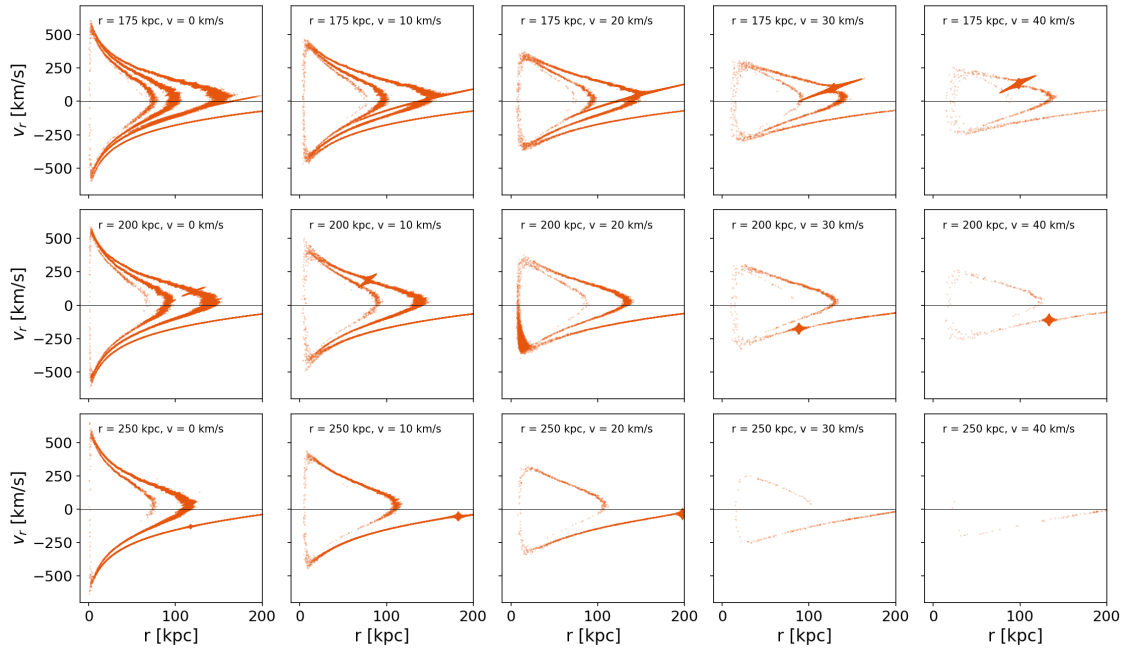
Moment impulsa raste sa rastojanjem, za istu početnu brzinu v . Veći moment impulsa znači i da patuljasta galaksija prolazi dalje od centra primarne, gde su plimske sile slabije. To za posledicu ima slabije ili čak nepotpuno razaranje. Što se najjasnije vidi u donjem desnom uglu slika 3.1, 3.2 i 3.3 ($r = 250$ kpc, $v = 40$ km/s), gde patuljasta galaksija ostaje u kompaktnom obliku, umesto da se čestice rasprše u ljuske.

Na brzinama od 50 km/s i 60 km/s više ne dolazi do formiranja ljuski ni u jednom ispitanom slučaju, stoga dalje simulacije, na većim brzinama nisu puštane.

3.2 Fazni prostor

Dodatni uvid u strukturu formiranih ljuski pruža analiza raspodele čestica patuljaste galaksije u faznom prostoru, odnosno zavisnost njihove radijalne brzine (v_r) od rastojanja do centra primarne galaksije (r), još poznata i kao v_r - r dijagram. U ovom prikazu ljuske su predstavljene kao polukružne petlje tako da svaka petlja odgovara jednoj ljusci. Tačka u kojoj petlja preseca pravu $v_r = 0$ km/s na najvećem radijusu predstavlja pericentar odgovarajuće grupe zvezda, odnosno radijus na kojoj se ljuska nalazi. Pregled broja ljuski koje se javljaju pod različitim početnim uslovima simulacija određen je prebrojavanjem petlji na v_r - r dijagramima (Slike 3.4, 3.5 i 3.6) i dat je u tabeli 3.1.

Poređenjem grafika (Slike 3.4, 3.5 i 3.6) potvrđuju se trendovi uočeni u x - z ravni (Slike 3.1, 3.2 i 3.3), koji su detaljno opisani u odeljku 3.1. Pri najmanjem početnom rastojanju i odsustvu početne brzine ($r = 175$ kpc, $v = 0$ km/s) uočava se najveći



Slika 3.4: Raspodela čestica barionske materije patuljaste galaksije u faznom prostoru u trenutku $t = 5$ Gyr za upadni ugao $\alpha = 0^\circ$. Redovi odgovaraju različitim početnim rastojanjima ($r = 175, 200, 250$ kpc), a kolone različitim početnim brzinama patuljaste galaksije ($v = 0 - 40$ km/s).

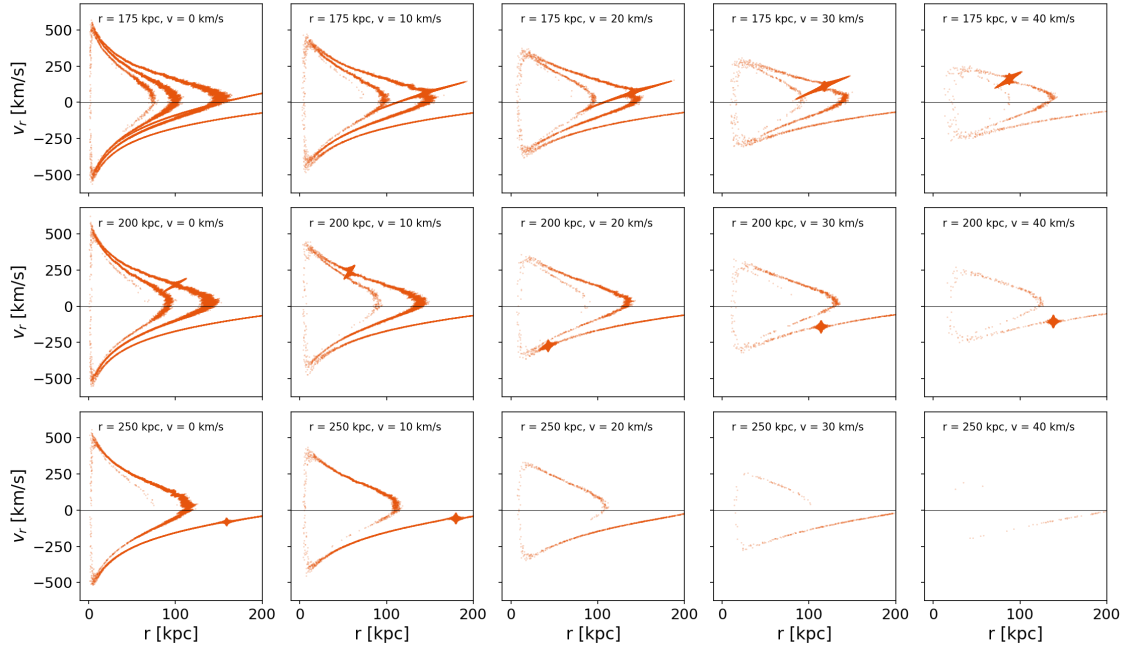
broj petlji. Sa porastom početne brzine njihov broj se smanjuje, da bi pri brzini od 40 km/s u većini slučajeva ostala svega jedna nepotpuna struktura. Isti trend može se primetiti i sa porastom početnog rastojanja.

Na većini grafika (Slike 3.4, 3.5 i 3.6) uočava se i zvezdani tok (eng. *stellar stream*) koji se pruža ka velikim radijusima. U njemu se nalaze čestice u širokom opsegu brzina, koje još nisu završile prvu orbitu oko primarne galaksije. U pojedinim slučajevima, naročito pri velikim rastojanjima i brzinama, na ovoj traci se izdvaja zgušnjavanje čestica sa uskim rasponom brzina, koje odgovaraju preživlom jezgrou patuljaste galaksije. U pojedinim slučajevima, kompaktno jezgro je van opsega dijagrama, što se može primetiti na donjim desnim graficima slika 3.4, 3.5 i 3.6

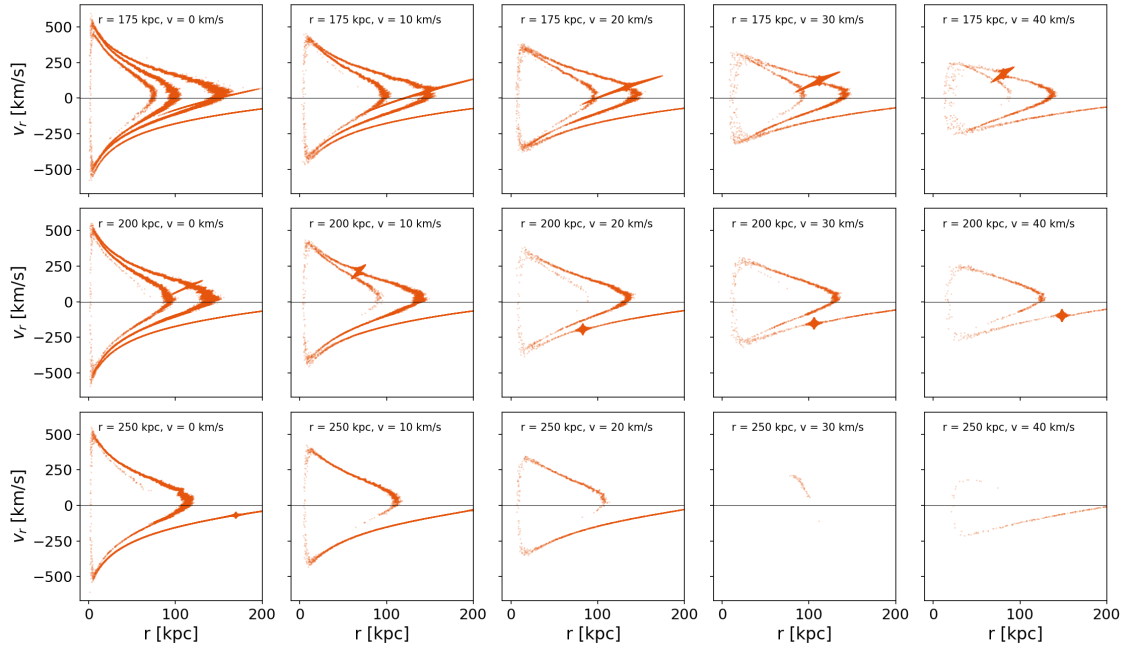
Poređenjem grafika za različite uglove uočava se da je struktura faznog prostora, pri istim vrednostima r i v , praktično nepromenjena. Ovo predstavlja nezavisnu potvrdu ranije iznetog zaključka da ugao upada ne utiče bitno na formiranje ljuski, budući da prikaz u faznom prostoru ne zavisi od prostorne orijentacije struktura, već isključivo od energije i momenta impulsa.

Tabela 3.1: Broj formiranih ljuski u zavisnosti od upadnog ugla α , početnog rastojanja r i početne brzine v patuljaste galaksije. Broj ljuski određen je prebrojavanjem petlji u faznom prostoru v_r - r na kraju simulacije ($t = 5$ Gyr).

α [°]	r [kpc]	v [km/s]						
		0	10	20	30	40	50	60
0	175	3	2	2	1	1	/	/
	200	2	2	1	1	/	/	/
	250	1	1	/	/	/	/	/
15	175	3	2	2	1	1	/	/
	200	2	2	1	1	/	/	/
	250	1	1	/	/	/	/	/
30	175	3	2	2	1	1	/	/
	200	2	1	1	1	/	/	/
	250	1	1	/	/	/	/	/
45	175	3	2	2	1	1	/	/
	200	2	2	1	1	/	/	/
	250	1	1	/	/	/	/	/
60	175	2	2	2	1	1	/	/
	200	2	1	1	1	/	/	/
	250	1	1	/	/	/	/	/
75	175	2	2	2	1	1	/	/
	200	2	1	1	1	/	/	/
	250	1	1	/	/	/	/	/
90	175	3	2	2	1	1	/	/
	200	2	1	1	1	1	/	/
	250	1	1	/	/	/	/	/



Slika 3.5: Raspodela čestica kao na Slici 3.4 za slučaj upadnog ugla $\alpha = 45^\circ$.



Slika 3.6: Raspodela čestica kao na Slici 3.4 za slučaj upadnog ugla $\alpha = 90^\circ$.

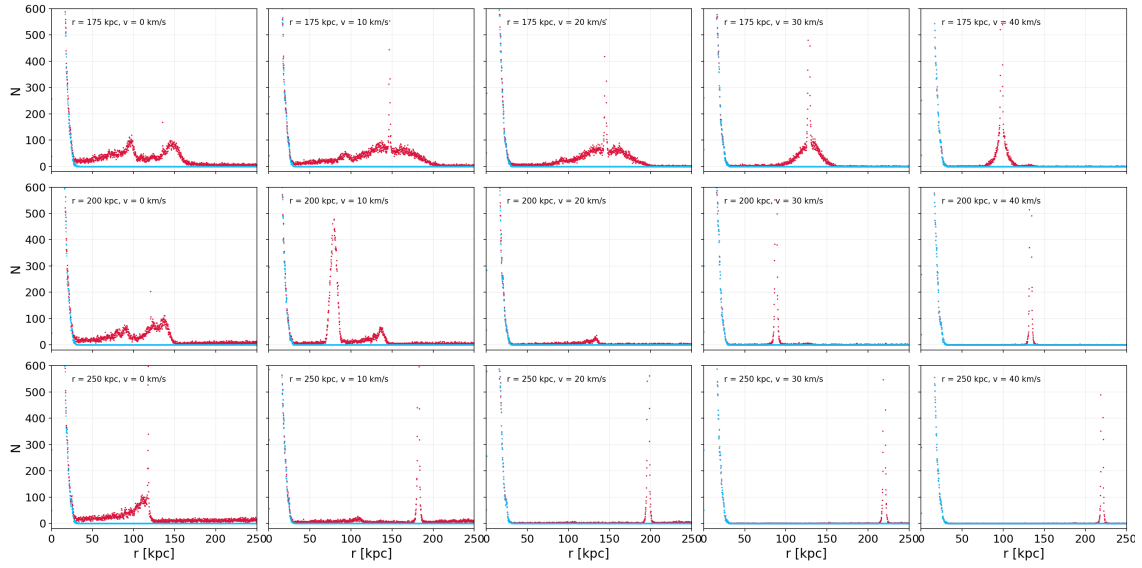
3.3 Profil gustine

Radijalni profili gustine (Slike 3.7, 3.8, 3.9) pružaju kvantitativnu potvrdu zaključaka izvedenih iz prostorne raspodele čestica (Slike 3.1, 3.2, 3.3) i faznih dijagrama (Slike 3.4, 3.5, 3.6). Profil raspodele čestica iz diska primarne galaksije pokazuje najveću gustinu u centru, zatim eksponencijalno opada sa povećanjem rastojanja. Na svim graficima ovaj deo profila ostaje praktično nepromenjen (Slike 3.7, 3.8, 3.9), budući da sudar sa znatno manje masivnom galaksijom ne narušava bitno strukturu primarne galaksije.

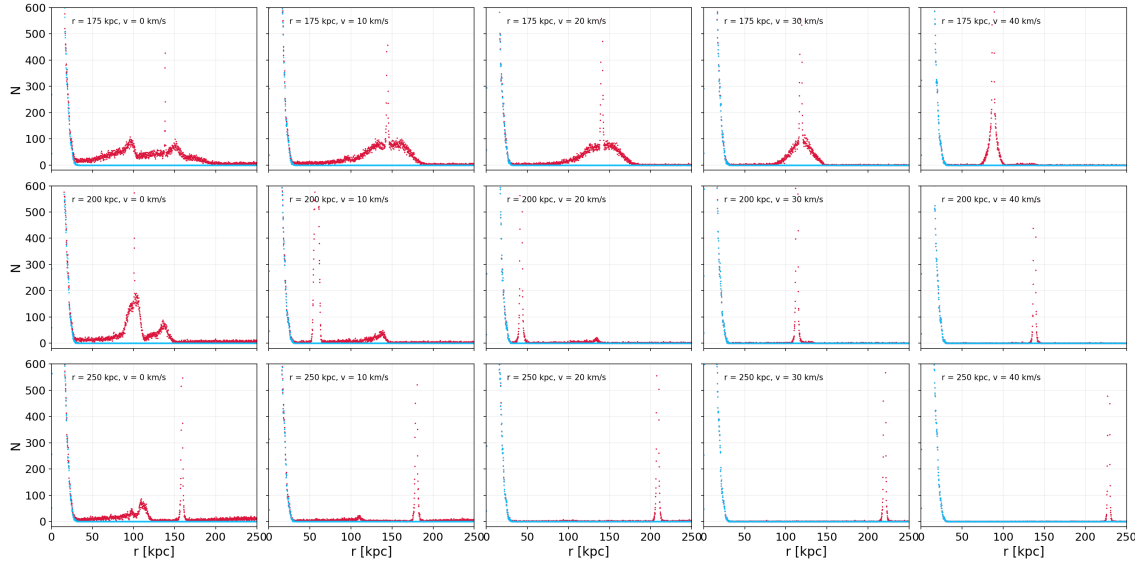
Pri početnoj brzini $v = 0$ km/s, čestice iz patuljaste galaksije raspoređene su na širokom opsegu rastojanja od centra primarne. Protežu se od 25 kpc do oko 150 kpc, dok je njihova koncentracija niska u odnosu na centar primarne galaksije, koji izlazi izvan prikazanog opsega y-ose (Slika 3.7, prva kolona). To odgovara razorenom satelitu čije su zvezde raspoređene po velikom delu haloa. Sa porastom tangencijalne brzine i početnog rastojanja, u profilu se pojavljuje uzak i izrazito visok maksimum, koji takođe izlazi van prikazanog opseg za y-osu (Slika 3.7, četvrta i peta kolona). Njegova mala širina i velika koncentracija čestica ukazuju na to da nije reč o ljuskastoj strukturi, već o gravitaciono vezanim česticama, odnosno o jezgru patuljaste galaksije. Rastojanje ovog maksimuma od centra primarne galaksije raste sa početnim rastojanjem r , što ukazuje da satelit u tim slučajevima pravi manje orbita oko centra primarne galaksije za vreme trajanja simulacije.

Poređenjem grafika za $\alpha = 0^\circ$ (Slika 3.7), $\alpha = 45^\circ$ (Slika 3.8) i $\alpha = 90^\circ$ (Slika 3.9) uočava se da su profili pri istim vrednostima r i v međusobno vrlo slični, čime se još jednom potvrđuje da upadni ugao ne utiče bitno na ishod sudara, već samo na prostornu orijentaciju nastalih struktura.

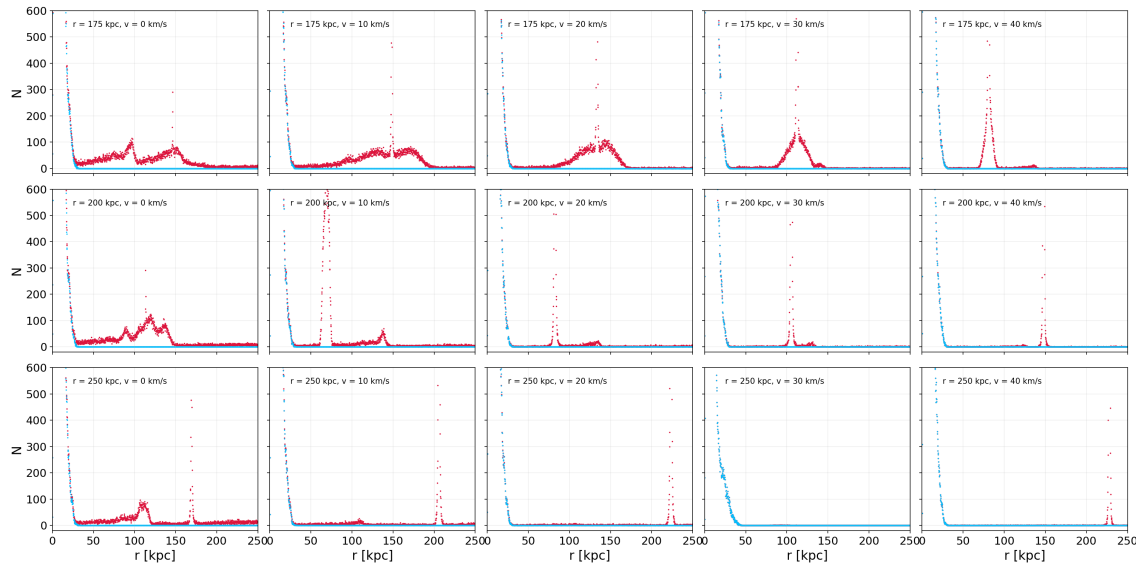
Poređenjem faznih dijagrama (Slike 3.4, 3.5, 3.6) i radijalnih profila gustine (Slike 3.7, 3.8, 3.9) uočava se da lokalni maksimumi u profilima gustine odgovaraju radijusima na kojima se na faznim dijagramima javljaju ljuske. Svaki izraženiji maksimum gustine pojavljuje se približno na rastojanju na kojem je na faznom dijagramu prisutna ljuskasta struktura. Zvezde u blizini apocentra orbite kreću se sporije i privremeno nagomilavaju, čime se povećava gustina na odgovarajućem radijusu. Radijalni profil gustine stoga predstavlja dodatni pokazatelj prisustva i položaja ljuski, nezavisan od prostornih i faznih dijagrama. Ipak, bliske ili slabo izražene ljuske mogu se na profilu gustine stopiti u jedan širi maksimum, zbog čega je fazni dijagram



Slika 3.7: Radijalni profil gustine čestica u trenutku $t = 5$ Gyr za upadni ugao orbite patuljaste galaksije u odnosu na ravan diska primarne $\alpha = 0^\circ$. Redovi odgovaraju različitim početnim rastojanjima ($r = 175, 200, 250$ kpc), a kolone različitim početnim brzinama patuljaste galaksije ($v = 0 - 40$ km/s). Plavom bojom prikazane su čestice diska primarne galaksije, a crvenom čestice diska i zvezde patuljaste galaksije.



Slika 3.8: Radijalni profil gustine čestica kao na Slici 3.7 za slučaj upadnog ugla $\alpha = 45^\circ$.



Slika 3.9: Radijalni profil gustine čestica kao na Slici 3.7 za slučaj upadnog ugla $\alpha = 90^\circ$.

pogodniji za njihovo razlučivanje.

Glava 4

Diskusija

4.1 Kriterijum za prepoznavanje zvezdanih ljuski u simulacijama sudara

Rezultati izloženi u prethodnom poglavlju predstavljeni su kroz prostornu raspodelu čestica, v_r - r fazni dijagram i radijalni profil gustine čestica. Sva tri načina za predstavljanje vode ka istim zaključcima. Prostorna raspodela čestica u x - z ravni pokazuje da ljuske nastaju kao oštro ograničene lučne strukture pri malim vrednostima početne brzine, i da sa njenim porastom postepeno prelaze u zvezdane tokove (Slike 3.1, 3.2, 3.3). Fazni dijagrami istu pojavu prikazuju kao opadanje broja petlji (Slike 3.4, 3.5, 3.6), a radijalni profili gustine kao smanjenje koncentracije na širokim maksimumima koji predstavljaju materijal iz patuljaste galaksije (Slike 3.7, 3.8, 3.9).

Tri prikaza se, međutim, razlikuju po osetljivosti. Prostorna raspodela čestica najbolje prikazuje morfologiju i orijentaciju struktura, ali ne omogućava pouzdano prebrojavanje ljuski, budući da se strukture na različitim radijusima u projekciji mogu preklopiti. Radijalni profil gustine daje položaje ljuski, ali se bliske ljuske mogu stopiti u jedan širi maksimum ukoliko imaju nisku koncentraciju. Fazni prostor zadržava informaciju o radijalnoj brzini, zbog čega se pojedinačni namotaji razdvajaju u zasebne lukove na v_r - r dijagramu. Naime, ljuske koje bi u dubokim snimcima ostale neopažene mogu biti prisutne u sistemu i detektovane merenjem radijalnih brzina, što treba imati u vidu pri proceni učestalosti galaksija sa ljuskama.

4.2 Zavisnost formiranja ljuski od parametara sudara

Osnovni cilj ovog rada bio je da se odredi do koje mere orbita satelita može odstupati od radijalne, a da ljuskaste strukture i dalje nastaju. Iz tabele 3.1 vidi se da taj prag nije jedinstven, već zavisi od početnog rastojanja. Pri $r = 175$ kpc ljuske se formiraju do $v = 40$ km/s, pri $r = 200$ kpc do $v = 30$ km/s, dok je pri $r = 250$ kpc poslednji slučaj u kome se ljuske javljaju pri brzini $v = 10$ km/s (što je dopuna rezultata iz Milošević, 2026, gde su pri početnom rastojanju od 250 kpc ljuske formirane samo pri radijalnom sudaru, usled izbora koraka za povećanje brzine). Ni u jednom ispitanoj slučaju ljuske se ne formiraju pri brzinama od 50 km/s i više (sličan rezultat dobijen je u radu Milošević, 2026).

U razmatranim konfiguracijama specifični moment impulsa orbite patuljaste galaksije iznosi $l = |\vec{r} \times \vec{v}| = |r| \cdot |v|$ ¹. Ljuske se pri početnom rastojanju $r = 175$ kpc formiraju za vrednosti l do 7000 kpc km/s, pri $r = 200$ kpc do 6000 kpc km/s, a pri $r = 250$ kpc do 2500 kpc km/s. Prema tome, ne postoji jedinstvena granična vrednost specifičnog momenta impulsa koja određuje nastanak ljuski. Na primer, konfiguracija $r = 200$ kpc i $v = 30$ km/s, za koju je $l = 6000$ kpc km/s, formira ljuske, dok ih konfiguracija $r = 250$ kpc i $v = 20$ km/s, za koju je $l = 5000$ kpc km/s, ne formira. To pokazuje da nastanak ljuski ne zavisi samo od specifičnog momenta impulsa, već i od početnog rastojanja.

Budući da sve simulacije traju jednakih 5 Gyr, pratilac koji polazi sa većeg rastojanja veći deo tog vremena provodi u prilasku, pa mu nakon razaranja ostaje manje vremena da se oslobođen materijal deponuje u ljuske. Drugim rečima, izostanak ljuski pri velikim početnim rastojanjima ne znači nužno da one tamo ne mogu nastati, već da u razmatranom vremenskom intervalu još nisu stigle da se formiraju. Razdvajanje ova dva uticaja moglo bi da se uoči poređenjem $v_r - r$ dijagrama u fiksnom trenutku nakon prvog prolaska kroz centar, a ne u fiksnom trenutku u odnosu na početak simulacije.

¹Pošto je početni položaj patuljaste galaksije zadat duž x -ose, a njena početna brzina duž y -ose, specifični moment impulsa u početnom trenutku ima samo komponentu duž z -ose.

4.3 Poređenje sa ranijim istraživanjima

Model faznog namotavanja (Quinn, 1984) razvijen je za gotovo radijalne sudare i naši rezultati potvrđuju da je formiranje ljuski u takvim slučajevima najintenzivnije. Pri $v = 0$ km/s dobija se najveći broj i najoštrije definisane ljuske. Zaključak da ljuske nastaju i pri nenultim vrednostima tangencijalne brzine u skladu je sa rezultatima Hernquist and Quinn (1988, 1989), koji su pokazali da se ljuske javljaju i u opštijim interakcijama, dok je u radu Ebrová et al. (2020), pokazano da analitički modeli propagacije ljuski ostaju upotrebljivi i za izrazito neradijalne sudare.

Slabljenje ljuski sa porastom momenta impulsa, odgovara zaključcima Pop et al. (2018) i Karademir et al. (2019), prema kojima ljuske nastaju pretežno pri sudarima sa malim vrednostima momenta impulsa, dok zakrivljenije orbite formiraju zvezdane tokove.

Materijal oslobođen iz patuljaste galaksije raspoređen je pretežno na rastojanjima od nekoliko desetina do preko 100 kpc, gde dominira približno sferno simetričan halo tamne materije. U takvom potencijalu ne postoji izdvojen pravac, pa uslovi za fazno namotavanje zavise od energije i momenta impulsa orbite, a ne od njene orijentacije. Ovo je u saglasnosti sa posmatranjima ljuski u haloima spiralnih galaksija (Martínez-Delgado et al., 2010; Foster et al., 2014) i sugeriše da prisustvo diska nije prepreka za nastanak ljuskastih struktura.

Glava 5

Zaključak

U ovom radu ispitani su uslovi pod kojima dolazi do formiranja zvezdanih ljuski u halou masivne spiralne galaksije prilikom sudara sa sfernom patuljastom galaksijom. Simulacije su vršene u programskom paketu GADGET-2 (Springel, 2005), sa modelima galaksija generisanim u programu GalactICS (Kuijken and Dubinski, 1995; Widrow and Dubinski, 2005; Widrow et al., 2008). Varirani su početno rastojanje (175, 200 i 250 kpc), početna tangencijalna brzina ($0 - 60$ km/s) i upadni ugao orbite u odnosu na ravan diska primarne galaksije ($0^\circ - 90^\circ$). Formirane strukture analizirane su kroz prostornu raspodelu čestica, raspodelu u faznom prostoru i radijalne profile gustine.

Osnovni zaključci mogu se sažeti na sledeći način:

1. Zvezdane ljuske formiraju se i pri neradijalnim sudarima, ali su najbrojnije i najoštrije definisane pri radijalnom sudaru. Sa porastom tangencijalne brzine njihov broj se smanjuje, strukture gube simetriju i prelaze u zakrivljene lukove i plimske repove.
2. Prag do kojeg se ljuske formiraju zavisi od početnog rastojanja: pri $r = 175$ kpc ljuske nastaju do $v = 40$ km/s, pri $r = 200$ kpc do $v = 30$ km/s, a pri $r = 250$ kpc do $v = 10$ km/s. Pri brzinama od 50 km/s i većim ljuske se ne formiraju ni u jednom ispitanom slučaju.
3. Pri najvećim vrednostima početnog rastojanja i brzina plimsko razaranje satelita je nepotpuno. U tim slučajevima jezgro patuljaste galaksije zadržava kompaktnu strukturu, dok se ljuske ne formiraju.

4. Ugao nagiba orbite ne utiče bitno na nastanak i broj ljuski, već isključivo na prostornu orijentaciju formiranih struktura. Ovaj zaključak posledica je dominantnog uticaja sferno simetričnog haloa tamne materije na dinamiku oslobođenih zvezda na velikim radijusima.

Dobijeni rezultati pokazuju da uslovi za nastanak ljuski nisu ograničeni na strogo radijalne sudare, već obuhvataju širi opseg orbitalnih konfiguracija, kao i da je formiranje ljuski prisutno i kada je primarna galaksija spiralnog tipa. Time se proširuje skup sudara koji mogu biti odgovorni za opažene ljuskaste strukture, što je od značaja pri rekonstrukciji istorije sudara galaksija iz njihove opažene morfologije. Prirodan nastavak ovog rada bio bi ispitivanje zavisnosti od odnosa masa dveju galaksija i praćenje vremenske evolucije ljuski.

Bibliografija

- Arp, H. (1966). Atlas of peculiar galaxies. *Astrophysical Journal Supplement Series*, 14:1.
- Atkinson, A. M., Abraham, R. G., and Ferguson, A. M. N. (2013). Faint tidal features in galaxies within the canada–france–hawaii telescope legacy survey wide fields. *Astrophysical Journal*, 765:28.
- Barnes, J. and Hut, P. (1986). A hierarchical $O(N \log N)$ force-calculation algorithm. *Nature*, 324:446.
- Bilek, M., Cuillandre, J.-C., Gwyn, S., et al. (2020). Census and classification of low-surface-brightness structures in nearby early-type galaxies from the MATLAS survey. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 498:2138.
- Binney, J. and Tremaine, S. (2008). *Galactic Dynamics*. Princeton University Press, Princeton, 2 edition.
- Carroll, B. W. and Ostlie, D. A. (2007). *An Introduction to Modern Astrophysics*. Pearson Addison-Wesley, San Francisco, 2 edition.
- Duc, P.-A., Cuillandre, J.-C., Karabal, E., et al. (2015). The ATLAS^{3d} project – XXIX. the new look of early-type galaxies and surrounding fields disclosed by extremely deep optical images. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 446:120.
- Dupraz, C. and Combes, F. (1986). Shells around galaxies: testing the mass distribution and the 3-D shape of ellipticals. *Astronomy & Astrophysics*, 166:53.
- Ebrová, I. (2013). *Shell Galaxies: Kinematical Signature of Shells, Satellite Galaxy Disruption and Dynamical Friction*. PhD thesis, Charles University in Prague. arXiv:1312.1643 [astro-ph.CO].

- Ebrová, I., Blek, M., Vudragovi, A., Yildız, M. K., and Duc, P.-A. (2020). NGC 4993, the shell galaxy host of GW170817: constraints on the recent galactic merger. *Astronomy & Astrophysics*, 634:A73.
- Foster, C., Lux, H., Romanowsky, A. J., et al. (2014). Kinematics and simulations of the stellar stream in the halo of the umbrella galaxy. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 442:3544.
- Geehan, J. J., Fardal, M. A., Babul, A., and Guhathakurta, P. (2006). Investigating the andromeda stream – I. simple analytic bulge-disc-halo model for M31. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 366:996.
- Genel, S., Vogelsberger, M., Springel, V., Sijacki, D., Nelson, D., Snyder, G., Rodriguez-Gomez, V., Torrey, P., and Hernquist, L. (2014). Introducing the Illustris project: the evolution of galaxy populations across cosmic time. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 445:175.
- Graham, A. W. and Driver, S. P. (2005). A concise reference to (projected) Sérsic $r^{1/n}$ quantities. *Publications of the Astronomical Society of Australia*, 22:118.
- Helmi, A. (2020). Streams, substructures, and the early history of the Milky Way. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 58:205.
- Hernquist, L. and Quinn, P. J. (1988). Formation of shell galaxies. I – spherical potentials. *Astrophysical Journal*, 331:682.
- Hernquist, L. and Quinn, P. J. (1989). Formation of shell galaxies. II – nonspherical potentials. *Astrophysical Journal*, 342:1.
- Hernquist, L. and Spergel, D. N. (1992). Formation of shells in major mergers. *Astrophysical Journal*, 399:L117.
- Hibbard, J. E. and Mihos, J. C. (1995). Dynamical modeling of NGC 7252 and the return of tidal material. *Astronomical Journal*, 110:140.
- Hubble, E. P. (1926). Extragalactic nebulae. *Astrophysical Journal*, 64:321.
- Hubble, E. P. (1936). *The Realm of the Nebulae*. Yale University Press, New Haven.
- Jarosik, N., Bennett, C. L., Dunkley, J., et al. (2011). Seven-year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) observations: Sky maps, systematic errors, and basic results. *Astrophysical Journal Supplement Series*, 192:14.

- Karademir, G. S., Remus, R.-S., Burkert, A., et al. (2019). The outer stellar halos of galaxies: how radial merger mass deposition, shells, and streams depend on infall-orbit configurations. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 487:318.
- Kravtsov, A. V., Klypin, A. A., Bullock, J. S., and Primack, J. R. (1998). The cores of dark matter-dominated galaxies: Theory versus observations. *Astrophysical Journal*, 502:48.
- Kuijken, K. and Dubinski, J. (1995). Nearly self-consistent disc/bulge/halo models for galaxies. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 277:1341.
- Macciò, A. V., Dutton, A. A., van den Bosch, F. C., et al. (2007). Concentration, spin and shape of dark matter haloes: scatter and the dependence on mass and environment. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 378:55.
- Malin, D. F. and Carter, D. (1980). Giant shells around normal elliptical galaxies. *Nature*, 285:643.
- Malin, D. F. and Carter, D. (1983). A catalog of elliptical galaxies with shells. *Astrophysical Journal*, 274:534.
- Mancillas, B., Duc, P.-A., Combes, F., et al. (2019). Probing the merger history of red early-type galaxies with their faint stellar substructures. *Astronomy & Astrophysics*, 632:A122.
- Martínez-Delgado, D., Gabany, R. J., Crawford, K., et al. (2010). Stellar tidal streams in spiral galaxies of the local volume. *Astronomical Journal*, 140:962.
- Mateo, M. (1998). Dwarf galaxies of the local group. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 36:435.
- McConnachie, A. W. (2012). The observed properties of dwarf galaxies in and around the Local Group. *Astronomical Journal*, 144:4.
- Milošević, S. (2026). Possible orbits of a satellite galaxy for shell formation in galaxy merger events. (212):67–78.
- Navarro, J. F., Frenk, C. S., and White, S. D. M. (1997). A universal density profile from hierarchical clustering. *Astrophysical Journal*, 490:493.

- Pop, A.-R., Pillepich, A., Amorisco, N. C., and Hernquist, L. (2018). Formation and incidence of shell galaxies in the Illustris simulation. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 480:1715.
- Prieur, J.-L. (1990). Status of shell galaxies. In Wielen, R., editor, *Dynamics and Interactions of Galaxies*, page 72. Springer, Berlin.
- Prugniel, P. and Simien, F. (1997). The fundamental plane of early-type galaxies: non-homology of the spatial structure. *Astronomy & Astrophysics*, 321:111.
- Quinn, P. J. (1984). On the formation and structure of shell galaxies. *Astrophysical Journal*, 279:596.
- Sadoun, R., Mohayaee, R., and Colin, J. (2014). Formation of the Magellanic Clouds. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 442:160.
- Sérsic, J. L. (1968). *Atlas de Galaxias Australes*. Observatorio Astronómico, Córdoba.
- Springel, V. (2005). The cosmological simulation code GADGET-2. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 364:1105.
- Tal, T., van Dokkum, P. G., Nelan, J., and Bezanson, R. (2009). The frequency of tidal features associated with nearby luminous elliptical galaxies from a statistically complete sample. *Astronomical Journal*, 138:1417.
- Toomre, A. (1964). On the gravitational stability of a disk of stars. *Astrophysical Journal*, 139:1217.
- Vogelsberger, M., Genel, S., Springel, V., Torrey, P., Sijacki, D., Xu, D., Snyder, G., Nelson, D., and Hernquist, L. (2014). Introducing the Illustris Project: simulating the coevolution of dark and visible matter in the Universe. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 444:1518.
- White, S. D. M. and Rees, M. J. (1978). Core condensation in heavy halos: a two-stage theory for galaxy formation and clustering. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 183:341.
- Widrow, L. M. and Dubinski, J. (2005). Equilibrium disk-bulge-halo models for the Milky Way and Andromeda galaxies. *Astrophysical Journal*, 631:838.

BIBLIOGRAFIJA

- Widrow, L. M., Pym, B., and Dubinski, J. (2008). Dynamical blueprints for galaxies. *Astrophysical Journal*, 679:1239.
- Wilkinson, A., Prieur, J.-L., Lemoine, R., et al. (2000). Shell galaxies – I. photometric properties. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 319:977.

Biografija autora

Katarina Vrhovac (*Pančevo, 19. avgust 2000.*) završila je osnovnu školu „Stevica Jovanović” i gimnaziju „Uroš Predić” u Pančevu. U periodu od 2015. do 2019. godine učestvovala je kao polaznik na seminaru astronomije u Istraživačkoj stanici Petnica. Upisala je osnovne akademske studije studijskog programa Astronomija i astrofizika (modul Astrofizika) školske 2019/20. godine na Matematičkom fakultetu Univerziteta u Beogradu. Diplomirala je 2025. godine i iste godine upisala master studije astrofizike. Od 2021. godine aktivna je u Istraživačkoj stanici Petnica kao saradnica na seminaru astronomije, uporedo sa studijama. Godine 2025. radila je kao naučni komunikator u Palati nauke, a tokom drugog polugodišta školske 2026. radila je kao profesorka fizike u Filološkoj gimnaziji u Beogradu.