

Univerzitet u Beogradu
Matematički fakultet

Master rad

Formiranje ultrakompaktnih patuljastih
galaksija

Andrej Obuljen

Beograd, 2013.

Sadržaj

Sažetak	2
1. Uvod	3
2. Metod i simulacije	5
2.1. Modeli patuljastih galaksija	5
2.1.1. Tamni halo	5
2.1.2. Disk	6
2.2. Model jata Fornax	7
2.3. Gadget2	7
2.4. Stabilnost	8
2.4.1. Izolovane patuljaste galaksije	8
2.4.2. Izolovano jato Fornax	8
2.4.3. Odabir dužine ublažavanja za jato Fornax	8
2.5. Simulacije i orbite	9
2.6. Relevantni parametri	10
2.6.1. Površinska gustina	10
2.6.2. Disperzija brzina	11
3. Rezultati	13
3.1. Orbita O1	14
3.2. Orbita O2	16
3.3. Orbita O3	16
3.4. Orbita O4	19
4. Diskusija	21
5. Zaključak	23
Zahvalnice	24
Literatura	25

Sažetak

Ultrakompaktne patuljaste (UCD od eng. *ultra-compact dwarf*) galaksije imaju karakteristike slične masivnim globularnim jatima i kompaktnim ostacima patuljastih galaksija. Način njihovog nastanka i dalje nije u potpunosti utvrđen. Ispitujemo slučaj u kome ovi objekti nastaju kao rezultat jakog plimskog uticaja jata Fornax na evoluciju patuljastih galaksija. Koristimo simulacije N tela visoke rezolucije stabilnih modela patuljastih galaksija kasnog tipa i numerički potencijal jata Fornax. Motivisani prethodnim radovima, ispitujemo modele galaksija sa različitim profilima gustine tamnog haloa galaksija i različite orbite unutar jata Fornax. Analizirajući dinamičku i morfološku evoluciju galaksija, nalazimo da izbor profila gustine kao i orbite bitno utiče na krajnje ostatke galaksija. U nekim slučajevima galaksije se potpuno raspadnu nakon nekoliko bliskih prolaza centru jata. Dobijeni rezultati odstupaju od posmatranih karakteristika UCD galaksija. Nalazimo da konačni ostaci galaksija bolje opisuju sferoidne patuljaste galaksije.

1. Uvod

Ultrakompaktne patuljaste (UCD od eng. *ultra-compact dwarf*) galaksije su kompaktni zvezdani sistemi veličina $10 - 100$ pc, masa između 2×10^6 i $10^8 M_{\odot}$ i luminoznosti $-14 \lesssim M_V \lesssim -9$. Prvobitno su otkriveni u jatu galaksija Fornax (Hilker et al., 1999; Drinkwater et al., 2000; Drinkwater et al., 2000), a zatim i u drugim jatima galaksija: Virgo, Centaurus, Hydra I, Coma (Brodie et al. 2011; Norris and Kannappan, 2011). Pored toga otkriveni su u grupama galaksija (Evstigneeva et al., 2007; Da Rocha et al., 2010) i oko izolovanih galaksija (Hau et al., 2009). Po veličini i luminoznosti ovi objekti su negde između globularnih jata i eliptičnih patuljastih galaksija. Iako se u literaturi nazvaju galaksijama, način njihovog formiranja nije u potpunosti utvrđen i postoji nekoliko predloženih scenarija (Evstigneeva et al., 2008). Prvi scenario je da su UCD galaksije veoma masivna globularna jata formirana kolapsom džinovskih molekulskih oblaka (Mieske et al., 2002). Drugi predloženi scenario je da ovi objekti nastaju sudarima više globularnih jata u jatima galaksija (Fellhauer and Kroupa, 2002). Treći scenario je da su UCD galaksije jezgra patuljastih galaksija čiji su spoljašnji delovi odbačeni usled plimskog dejstva jata galaksija kroz koji prolaze i ovaj mehanizam se u literaturi naziva i plimsko ogoljavanje (od eng. *tidal stripping*) (Bekki et al., 2001; Bekki et al., 2003; Goerdt et al., 2008; Pfeffer and Baumgardt, 2013). Istraživanja ukazuju da je odnos masa-sjaj (M/L) kod UCD galaksija veći u odnosu na globularna jata slične metaličnosti (Dabringhausen et al., 2008; Chilingarian et al., 2011). Ovaj rezultat ukazuje na moguće prisustvo tamne materije u ovim objektima što je konzistentno sa hipotezom da nastaju putem plimskog ogoljavanja. Motivisani ovime, u ovom radu bavimo se ispitivanjem ovog scenarija.

Bekki et al. (2003) izvršili su set numeričkih simulacija u kojima su ispitivali dinamičku evoluciju eliptičnih patuljastih dE,N galaksija koje orbitiraju unutar jata Fornax. U simulacijama koristili su analitički potencijal jata Fornax i modele N tela za patuljaste galaksije koje se sastoje od haloa tamne materije, zvezdanog omotača i jezgra. Rezultati koje dobijaju pokazuju da galaksija vremenom gubi materiju iz zvezdanog omotača i da na kraju simulacije ostaje kompaktno jezgro karakteristika sličnih UCD galaksijama. Takođe su utvrdili da su modeli kod kojih halo tamne materije ima jezgro (eng. *core*) verovatniji da završe kao UCD galaksije. Goerdt et al. (2008) koristili su *N-body / SPH* (eng. *smooth particle hydrodynamics*) simulacije patuljastih galaksija sa diskom u analitičkom potencijalu jata galaksija i takođe dobili rezultate koji se slažu sa posmatranjima UCD galaksija.

Skorija istraživanja koriste numerički potencijal u simulacijama kako bi što realnije ispitali evoluciju galaksija u gustim sredinama kao što su tamni halo i galaksija i jata galaksija. U radu Kazantzidis et al. (2010, u daljem tekstu K10), izvršeno je detaljno ispitivanje efikasnosti mehanizma plimskog ogoljavanja u numeričkom potencijalu Mlečnog puta kao mehanizam nastanka patuljastih sferoidnih galaksija (dSph). Oni pokazuju da je ovaj mehanizam vrlo bitan u evoluciji galaksija u gustim sredinama i formiranju patuljastih kompaktnih struktura i da uvođenje numeričkog potencijala u simulacije bolje opisuje dinamičke i morfološke promene galaksija.

Ispostavlja se da je uticaj profila gustine tamnog haloa patuljaste galaksije bitan faktor u dinamičkoj i

morfološkoj evoluciji patuljastih galaksija u gustim sredinama kao što su tamni halo (Kazantzidis et al., 2013). Numeričke simulacije formiranja strukture, koristeći kosmološki model hladne tamne materije (CDM od eng. *Cold Dark Matter*), predviđaju da se tamni halo mogu opisati tzv. NFW profilom gustine (Navarro, Frank & White, 1996) koji ima strm nagib (eng. *cusp*) ka centru haloa. Iako većinu tamnih haloa možemo opisati NFW profilom, ispostavlja se da kod patuljastih galaksija to nije slučaj. Na osnovu posmatranja otkriveno je da halo tamne materije patuljastih galaksija imaju manji nagib profila gustine u centrima, dok u nekim slučajevima imaju i jezgro tamne materije (eng. *core*). Ovo neslaganje se u literaturi naziva *core-cusp* problem (de Blok, 2009). Pretpostavlja se da su za ovu pojavu odgovorni barionski procesi prilikom formiranja patuljastih galaksija kao što su: hlađenje gasa, formiranje zvezda, pozadinsko kosmičko UV zračenje, zagrevanje gasa i eksplozije supernovih. Eksplozije supernovih dovode do naglog oduvanja gasa iz centra galaksije. Time se naglo smanjuje ukupna masa u centralnim delovima i usled povećanja energije tamna materija kreće da se širi iz centralnih delova. Pored toga, gas koji se širi predaje deo kinetičke energije tamnoj materiji putem dinamičkog trenja (od eng. *dynamical friction*) što dodatno utiče na širenje tamne materije. Na ova dva načina dolazi do opadanja gustine tamne materije u centralnim delovima. Kako su patuljaste galaksije manjih masa, kod njih ovi efekti postaju izraženiji. Na osnovu hidrodinamičkih simulacija formiranja izolovanih patuljastih galaksija u kosmološkom Λ CDM modelu u kojima su uključeni svi navedeni barionski procesi, Governato et al. (2010) otkrili su da rezultujuće patuljaste galaksije imaju manji nagib profila gustine tamne materije. Ovaj rezultat slaže se sa posmatračkim podacima patuljastih galaksija (Oh et al., 2011) i pruža jedno od mogućih rešenja za *core-cusp* problem.

U ovom radu pratimo dinamičku i morfološku evoluciju galaksija u potencijalu jata Fornax i ispituje mehanizam plimskog ogoljavanja kao mogući način formiranja UCD galaksija. Koristimo stabilne dinamičke modele patuljastih galaksija koje se sastoje od diska i tamnog haloa. Obe komponente realizujemo ravnotežnom raspodelom čestica koja prati modele patuljastih galaksije dobijenih kako iz posmatranja, tako i iz kosmoloških numeričkih simulacija. Dok je u prethodnim radovima korišćen analitički potencijal, u ovom radu koristimo numerički potencijal jata Fornax. Fokusiramo se na mali deo ukupnog prostora parametara motivisani prethodnim radovima na ovu temu. Ispitujemo uticaj različitih profila gustine tamnog haloa galaksije i različitih orbita na krajnji ostatak galaksija unutar jata Fornax nakon 10Gyr. Cilj ovog rada bio je ispitati da li se na ovaj način može dobiti ostatak koji odgovara posmatranim UCD galaksijama unutar jata Fornax.

2. Metod i simulacije

2.1. Modeli patuljastih galaksija

Kako bi ispitali evoluciju patuljastih galaksija u jatu Fornax, potrebno je napraviti stabilne modele galaksija i jata Fornax. Za to smo koristili programski paket GalactICs (Kuijken and Dubinski, 1995; Widrow and Dubinski, 2005; Widrow et al., 2008) koji je razvijen da generiše stabilne početne modele galaksija. Ovaj paket pruža mogućnost da se generišu modeli galaksija koje se sastoje iz tri komponente: tamni halo (eng. *dark halo*), disk i centralni oval (eng. *bulge*). U ovom radu ispitujemo galaksije koje se sastoje iz dve komponente: diska i tamnog haloa. Svaka komponenta je realizovana proizvoljnim brojem čestica kojima se zadaju početne pozicije i brzine na osnovu raspodele gustine i funkcije raspodele date komponente. Tako postavljeni početni uslovi aproksimiraju raspodelu gustine i kretanje materije realne galaksije. Izbor broja čestica komponenti galaksija diktira i rezoluciju kojom pratimo dinamičke procese evolucije galaksije. Što je veći broj čestica to je njihova masa manja, a rezolucija po masi veća.

2.1.1. Tamni halo

Na osnovu kosmoloških simulacija formiranja strukture u Univerzumu pretpostavljajući CDM kosmološki model, otkriveno je da tamni halo imaju profile gustine sledećeg oblika (NFW):

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

gde je ρ_0 karakteristična centralna gustina, r_s karakteristična dužina tamnog haloa, r udaljenost od centra haloa. Oblik profila gustine takođe je određen parametrom koncentrisanosti koji se definiše kao $c = R_{200}/r_s$ (Lokas, 2002; de Blok, 2009), gde je R_{200} udaljenost na kojoj prosečna gustina haloa opadne na 200 puta veću gustinu od današnje kritične gustine Univerzuma.

NFW profil predviđa da gustina tamne materije raste kao r^{-1} ka centralnim delovima haloa. Međutim, na osnovu posmatranja jata galaksija i galaksija utvrđeno je da NFW model ne opisuje verodostojno raspodelu gustine tamnih haloa. Problem je još izraženiji kod patuljastih galaksija kod kojih je na osnovu posmatranja zaključeno da imaju manje nagibe profila gustine u unutrašnjim delovima haloa, a u nekim slučajevima i da imaju jezgro (Lokas, 2002 i reference u radu). Koristimo opštiji oblik profila gustine tamne materije (Kravtsov et al., 1998; Lokas, 2002; Kazantzidis et al., 2013):

$$\rho(r) = \frac{\rho_0}{(r/r_s)^\alpha(1+r/r_s)^{3-\alpha}}. \quad (2)$$

gde je α parametar koji određuje nagib profila gustine. Slučaj $\alpha = 1$ odgovara NFW profilu.

Zbog toga što se profili ovog tipa prostiru u beskonačnost, u GalactICs-u je tamni halo predstavljen profilom koji je odsečen (eng. *cut-off*):

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

gde je σ_h karakteristična brzina, r_h je dužina na kojoj počinje „odsecanje” haloa, δr_h je dužina na kojoj gustina glatko opada na nulu i erfc je funkcija greške (od eng. *error function*). Na osnovu zadate dužine r_h , GalactICs računa i plimski radijus (od eng. *tidal radius*) R_h koji predstavlja spoljne granice sistema. Podesili smo parametar r_h tako da dobijeni plimski radijus bude približno jednak radijusu R_{200} .

U ovom radu razmatramo dva modela patuljastih galaksija koji se razlikuju u profilu gustine tamnog haloa. Prvi model (DW1) zadat je sa $\alpha = 1$ koji odgovara NFW profilu gustine tamnog haloa i pri tom koristimo parametre iz K11. Drugi model (DW2) koji koristimo motivisan je radom [Kazantzidis et al. \(2013\)](#) u kome je ispitivana evolucija patuljastih galaksija sa različitim nagibom profila gustine u halou tamne materije sličnom Mlečnom putu i to za tri vrednosti: $\alpha = \{0.2, 0.6, 1\}$. Autori tog rada zaključili su da se za izbor parametra $\alpha = 0.2$ galaksija raspadne u potpunosti pre završetka simulacije, dok za izbor parametra $\alpha = 0.6$ od patuljaste galaksije ostane ostatak koji je manjih dimenzija nego u slučaju $\alpha = 1$. U ovom radu odlučili smo se da ispitamo i slučaj $\alpha = 0.6$, pretpostavljajući da bi taj izbor mogao da dovede do formiranja UCD galaksija.

2.1.2. Disk

Disk je predstavljen cilindrično simetričnom raspodelom gustine koja opada eksponencijalno duž cilindrične koordinate R , dok je vertikalni profil gustine modeliran izotermalnom pločom konstantne debljine:

$$\rho_d(R, z) \propto \exp \left(-\frac{R}{R_d} \right) \operatorname{sech}^2 \left(\frac{z}{z_d} \right) \quad (4)$$

gde su R_d i z_d karakteristična radijalna i vertikalna dužina, respektivno, a R i z koordinate u cilindričnom koordinatnom sistemu. Pretpostavljeno je da radijalna disperzija brzine opada eksponencijalno u ravni diska $\sigma_R^2(R) = \sigma_{R_0}^2 \exp(-R/R_\sigma)$, gde je σ_{R_0} centralna radijalna disperzija brzine, dok za R_σ uzimamo da je $R_\sigma = R_d$ (Widrow et al. 2008). Program GalactICs računa i *Toomre-ov* parametar nestabilnosti u disku Q na rastojanju $R = 2.5R_d$, koji ima vrednosti veće od 1 ukoliko je disk stabilan ([Binney and Tremaine, 2011](#)).

Parametri modela DW1 i DW2 galaksija dati su u tabeli 1 i preuzeti su iz rada K10.

Broj čestica u našim simulacijama galaksija je $N_h = 10^6$ u tamnom halou i $N_d = 1.2 \times 10^6$ u disku.

Tabela 1: *Parametri patuljastih galaksija DW1 i DW2. Kolona 1: naziv modela; Kolona 2: masa tamnog haloa; Kolona 3: nagib profila gustine tamnog haloa u centru; Kolona 4: parametar koncentrisanosti tamnog haloa; Kolona 5: karakteristična dužina tamnog haloa; Kolona 6: odnos mase diska i tamnog haloa; Kolona 7: karakteristična radijalna dužina diska; Kolona 8: odnos karakteristične vertikalne i radijalne dužine diska; Kolona 9: Toomre-ov parametar nestabilnosti na radijusu $R = 2.5R_d$; Kolona 10: maksimalna rotaciona brzina; Kolona 11: udaljenost na kojoj dolazi do maksimalne rotacione brzine.*

Model (1)	M_h ($10^9 M_\odot$) (2)	α (3)	c (4)	r_s (kpc) (5)	m_d (M_h) (6)	R_d (kpc) (7)	z_d/R_d (8)	Q (9)	V_{max} (km s^{-1}) (10)	r_{max} (kpc) (11)
DW1	1	1	20	1.3	0.02	0.45	0.2	4.68	21.6	2.4
DW2	1	0.6	20	1.3	0.02	0.41	0.2	3.69	19.5	2.5

2.2. Model jata Fornax

Jato Fornax sastoji se od tamne materije, desetina galaksija i međugalaktičkog gasa. Pretpostavka je da gravitaciono polje tamne materije ima najveći gravitacioni uticaj na dinamičku evoluciju patuljastih galaksija. Stoga u ovom radu, radi jednostavnosti, modelujemo jato Fornax haloom tamne materije, izostavljajući gravitacioni uticaj drugih delova jata. Takođe pretpostavljamo da se jato ne menja u toku trajanja simulacije, iako to nije realan slučaj evolucije haloa u Λ CDM modelima. Za razliku od prethodnih radova na ovu temu u kojima je korišćen analitički potencijal jata Fornax, u ovom radu koristimo numerički potencijal — stabilan halo sastavljen od N tela. Prednost ovog izbora je što na ovaj način predstavljamo jato Fornax kao sistem gravitaciono vezanih čestica koje kroz interakciju sa patuljastim galaksijama mogu uticati na dinamičku i morfološku evoluciju diska galaksije. Posebno, na ovaj način prisutan je i efekat dinamičkog trenja koji dovodi do dodatnog gubitka mase unutar patuljaste galaksije.

Koristimo NFW model jata Fornax na osnovu rada [Bekki et al. \(2003\)](#). Ukupna masa jata Fornax je $7.0 \times 10^{13} M_{\odot}$, karakteristična dužina tamnog haloa $r_s = 83$ kpc i parametar koncentrisanosti $c = 12$. Početne uslove za ovaj model generišemo pomoću programa GalactICs. Broj čestica u halou je $N_H = 2 \times 10^6$.

2.3. Gadget2

Zbog velikog broja čestica kojima modeliramo interakciju galaksije i jata koristili smo paralelizovani *Tree-PM N-body* kôd Gadget2 ([Springel, 2005](#)) za naše simulacije. Ovaj kôd koristi *Barnes-Hutt* algoritam za računanje gravitacione interakcije čestica na malim skalama i PM (eng. *particle mesh*) na većim skalama.

Budući da čestice u galaksiji i jatu tretiramo kao nesudarajuće (eng. *collisionless*) one predstavljaju delta funkcije gustine i nemaju fizičke dimenzije. Pri bliskim prolazima dve ili više čestica, gravitaciona sila između čestica se povećava i potrebno je smanjiti vremenski korak u integraciji, što dovodi do nepotrebnog usporavanja koda. Još važnije od toga, u jako bliskim prolazima rastojanje između čestica se približava nuli i gravitaciona sila divergira, što unosi numerički šum u simulaciju. Budući da u našim simulacijama čestice ne predstavljaju realne objekte u galaksiji, već aproksimiraju raspodelu materije unutar nje, izbegavanjem ovih efekata ne gubi se na opštosti problema. Da bi izbegli ove probleme iz praktičnih razloga, uvodi se dužina ublažavanja (eng. *softening length*, ϵ) koja predstavlja udaljenost između čestica ispod koje se ne računa njihov međusobni gravitacioni uticaj ([Dehnen and Read, 2011](#)). Kôd Gadget2 pruža mogućnost da se za svaki tip čestice (disk, halo, jato) postavi odgovarajuća dužina ublažavanja. U interakciji između dve čestice različitog tipa, kôd Gadget2 uzima onu vrednost dužine ublažavanja koja je manja. Za patuljaste galaksije koristili smo sledeće dužine ublažavanja: $\epsilon_h = 60$ pc za čestice tamnog haloa i $\epsilon_d = 15$ pc za čestice diska (K10). Za čestice jata koristili smo dužinu ublažavanja $\epsilon_H = 8$ kpc. Izbor ovako velike dinamičke razlike između jata i galaksije ima za cilj da spreči proces zvani *two-body heating* i opravdan je analizom u sledećem odeljku.

Za realizovanje simulacija korišćen je računar na Astronomskoj opservatoriji u Beogradu koji radi pod *Scientific Linux* operativnim sistemom, a čine ga 24 procesora *Intel X5675* sa radnim taktom od 3.0 GHz, zatim 24 grafička modula *nVidia M2090 Tesla* i 288 GB radne memorije. Ukupan skladišni kapacitet na raspolaganju iznosi 2 TB-a.

Sve simulacije evoluirane su do 10 Gyr sa presekom pozicija i brzina svih čestica na svakih 0.1 Gyr.

2.4. Stabilnost

2.4.1. Izolovane patuljaste galaksije

Iako su modeli galaksija koje smo dobili pomoću programa GalactICs stabilni bilo je neophodno proveriti da li je rezolucija naših modela galaksija dovoljno dobra, da li je izbor dužine ublažavanja pogodan i da li drugi numerički efekti imaju uticaj na stabilnost galaksija na vremenskim skalama čitave simulacije.

Da bismo ispitali stabilnost galaksije, pustili smo test simulacije patuljastih galaksija u izolaciji 10 Gyr koristeći zadate dužine ublažavanja. Presek pozicija i brzina svih čestica pravili smo na svakih 0.2 Gyr i analizirali koliko se menjaju relevantni parametri (videti dole, odeljak 2.6). Ovi parametri se ne menjaju značajno tokom simulacije. Relativna promena ukupne energije galaksija DW1 i DW2 održana je ispod 0.3% i 0.1%, respektivno, nakon 10 Gyr. Pored ove analize ispitali smo i disperzije brzina, održanje ugaonog momenta i parametre tamnih haloa galaksija koji se takođe ne menjaju značajno. Zaključili smo da su galaksije stabilne u vremenskom intervalu od 10 Gyr i da se ne pojavljuju značajne promene u disku.

2.4.2. Izolovano jato Fornax

Ispitali smo i kako odabir dužine ublažavanja za jato Fornax ima uticaj na njegovu stabilnost. Realizovali smo ukupno deset simulacija jato Fornax u izolaciji 10 Gyr sa različitom dužinom ublažavanja $\epsilon_H = \{0.1, 1, 3, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 100\}$ kpc. Relativna promena ukupne energije u toku 10 Gyr za razmatrane vrednosti ϵ_H ne prelazi 0.05% ukupne energije. Na osnovu analize promene profila gustine jata zaključili smo da za velike vrednosti ϵ_H (100kpc) dolazi do nestabilnosti u centru i da je jato nestabilno. Pretpostavljamo da je razlog ovome to što je rezolucija premala i da je potrebno uzeti manju vrednost. Sa druge strane, manja vrednost bi u simulacijama prolaska patuljaste galaksije kroz jato prouzrokovala nestabilnost galaksije. Bilo je potrebno naći kompromis između ova dva izbora.

2.4.3. Odabir dužine ublažavanja za jato Fornax

Budući da su čestice haloa jata jako masivne ($m_H = 3.5 \cdot 10^7 M_\odot$) ispitali smo koliki uticaj imaju ovako masivne čestice na sam disk i tamni halo galaksije u zavisnosti od izbora ϵ_H i koja je optimalna vrednost. Kako bi ispitali uticaj izbora ϵ_H na galaksiju, postavili smo DW1 bez početne brzine na udaljenost 500 kpc od centra jata tako da ravan diska bude normalna na pravac ka centru jata. Praćena je promena relevantnih parametara DW1 u vremenu od 0.5 Gyr. Pušteno je ukupno deset simulacija sa ovim početnim uslovima za različite dužine ublažavanja $\epsilon_H = \{0.1, 1, 3, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 100\}$ kpc. Ovim postupkom mogli smo da vidimo koliko su bitni numerički efekti, posebno *two-body heating*. Ovaj efekat nastaje ukoliko je dužina ublažavanja premala za čestice različitih masa. U bliskom prolazu dve čestice veoma različitih masa dolazi do predavanja dela kinetičke energije masivnije čestice onoj manje masivnoj i time može doći do veštačkog zagrevanja čestica diska. Ovaj efekat se može izbeći ukoliko se poveća dužina ublažavanja masivnijih čestica, u ovom slučaju čestica jata Fornax. Kao dodatnu proveru, pustili smo DW1 i u analitičkom potencijalu jata. Ovim postupkom mogli smo da ocenimo koje promene su uzrokovane gravitacionim uticajem jata, a koje numeričkim efektima. Analitički potencijal jata koji smo koristili bio je približno istih parametara kao i realizacija jata Fornax pomoću N tela.

Analizirali smo kinematičke i dinamičke parametre galaksije na svakih 10 Myr. Ispitali smo koliko se menja kinetička energija diska i haloa, ugaoni momenat diska i disperzija brzina u disku i halou. Na osnovu ove analize izabrali smo $\epsilon_H = 8$ kpc. Ovako izabrana vrednost za ϵ_H konzistentna je sa onom koja je korišćena u radu K10 za čestice tamnog haloa Mlečnog puta. U radu K10, korišćen je NFW model tamnog haloa Mlečnog puta koji ima plimski radijus $R_{MW} = 244.5$ kpc dok smo mi koristili isti model sa $R_H = 1000$

kpc. Nakon slične analize onoj koju smo mi izvršili, pomenuti autori koriste $\epsilon_H = 2$ kpc za čestice tamnog haloa Mlečnog puta.

2.5. Simulacije i orbite

Realizovali smo ukupno osam numeričkih simulacija orbita patuljastih galaksija u jatu Fornax. Svaku galaksiju postavili smo na četiri zatvorene orbite i pratili njenu evoluciju 10Gyr. Budući da plimska sila kojom jato deluje na galaksiju zavisi od udaljenosti od centra, izabrali smo dve udaljenosti sa koje puštamo galaksiju. Početni položaji odgovaraju maksimalnom rastojanju galaksije od centra jata - apocentru, i izabrali smo $r_{apo} = 500$ kpc i $r_{apo} = 300$ kpc. Najbliže rastojanje galaksije od centra jata definisano kao pericentar orbite galaksije. Početni položaj zadat je u ravni yz sa koordinatama $(0, r_{apo}/\sqrt{2}, r_{apo}/\sqrt{2})$ i početnom brzinom $(-V_x, 0, 0)$. Varirajući V_x postavili smo galaksije na orbite sa dve različite ekscentričnosti. Na osnovu kosmoloških simulacija N tela (Ghigna et al., 1998; Diemand et al., 2007) zaključeno je da orbite galaksija u jatima imaju raspon od kružnih ($r_{apo}/r_{peri} \approx 1$) do veoma ekscentričnih ($r_{apo}/r_{peri} \gtrsim 10$). Medijana odnosa r_{apo}/r_{peri} za orbite satelita približno je jednaka 6 ($r_{apo}/r_{peri} \approx 6$) i tu vrednost koristimo za dve orbite. Pored toga ispitali smo još dve orbite sa približno dvostruko manjim odnosom ($r_{apo}/r_{peri} \approx 3$).

Inklinacija (i) diska definisana je kao ugao između ugaonog momenta diska i orbitalnog ugaonog momenta. U ovom radu nismo ispitali uticaj inklinacije diska galaksije u odnosu na jato, i za sve simulacije uzeli smo da je inklinacija jednaka 45° , što odgovara slučaju progradnih orbita patuljastih galaksija. Ne ispitujeemo retrogradne orbite budući da je na osnovu prethodnih istraživanja (Read et al., 2006; Villalobos et al., 2012) ustanovljeno da su galaksije na ovakvim orbitama otpornije na plimsko ogoljavanje, da je potisnuto pojavljivanje prečage u disku i da galaksije više vremena zadržavaju prvobitnu strukturu u odnosu na galaksije na progradnim orbitama.

Početni položaji, brzine i parametri orbita galaksija koje smo koristili u simulacijama dati su u tabeli 2, a nazivi simulacija koje koristimo u daljem tekstu dati su u tabeli 3.

Tabela 2: *Početni uslovi i parametri orbita. Kolona 1: naziv orbite; Kolona 2: početni položaj galaksije; Kolona 3: početna brzina galaksije; Kolona 4: udaljenost apocentra orbite; Kolona 5: udaljenost pericentra orbite; Kolona 6: odnos rastojanja u apocentru i pericentru orbite; Kolona 7: ugao inklinacije.*

Orbita (1)	(x_0, y_0, z_0) (kpc) (2)	(v_{x0}, v_{y0}, v_{z0}) (km s ⁻¹) (3)	r_{apo} (kpc) (4)	r_{peri} (kpc) (5)	r_{apo}/r_{peri} (6)	i (°) (7)
O1	(0, 353.55, 353.55)	(-397.56, 0, 0)	500	158	3.2	45
O2	(0, 212.13, 212.13)	(-426.50, 0, 0)	300	104	2.9	45
O3	(0, 353.55, 353.55)	(-240.00, 0, 0)	500	83	6	45
O4	(0, 212.13, 212.13)	(-244.00, 0, 0)	300	50	6	45

Tabela 3: *Simulacije*

Orbita	O1		O2		O3		O4	
Model	DW1	DW2	DW1	DW2	DW1	DW2	DW1	DW2
Simulacija	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8

2.6. Relevantni parametri

Za opisivanje evolucije patuljaste galaksije koristili smo metod baziran na radu K10. Dok patuljasta galaksija prolazi kroz primarni halo računati su parametri koji opisuju strukturu i kinematiku galaksije u funkciji od vremena. Svaka simulacija zapisuje pozicije i brzine svih čestica u datoteku na svakih 0.1 Gyr. Za svaku takvu izlaznu datoteku prvo je nađena pozicija sa najvećom gustinom u disku koja je korišćena kao centar galaksije. Potom je napravljena rotaciona kriva patuljaste galaksije po sledećoj formuli $V_c(r) = \sqrt{GM(<r)/r}$, gde je $M(<r)$ masa tamnog haloa i diska galaksije unutar sfere radijusa r . Na osnovu rotacione krive nalazimo najveću rotacionu brzinu V_{max} i radijus r_{max} na kom dolazi do te brzine. Vremenom galaksija gubi čestice iz diska i tamnog haloa koje postaju slobodne i formiraju plimske repove (eng. *tidal tails*). U pericentru i apocentru svoje putanje, ostatak galaksije prolazi kroz ove „repove” i broj čestica unutar galaksije se naglo menja, a samim tim i radijus r_{max} . Kako bi izbegli ove nagle promene, pri računanju r_{max} nismo uzimali u obzir čestice koje su se nalazile izvan radijusa $2r_{max}$ od centra galaksije.

Udaljenost r_{max} smo izabrali za karakteristično rastojanje od centra galaksije u okviru koga su razmatrani drugi parametri i osobine galaksije. Ovaj pristup ima prednost u tome što je unutar r_{max} značajan deo mase galaksije i na njega ne utiču plimski repovi (K10), a sa druge strane nije potrebno računati plimski radijus galaksije. Kako galaksija gubi masu vremenom tako se i r_{max} smanjuje.

2.6.1. Površinska gustina

Za ispitivanje oblika diska galaksije nađen je tenzor momenta inercije za sve čestice diska unutar r_{max} . Komponente tenzora momenta inercije imaju sledeći oblik:

$$I_{jk} = \int \rho x_j x_k d^3x \quad (5)$$

gde su j i k indeksi koji odgovaraju koordinatnim osama x , y i z , a ρ gustina. U slučaju diskretne raspodele čestica, integral u formuli 5 svodi se na sumu:

$$I_{jk} = \sum x_j x_k m, \quad (j, k = 1, 2, 3) \quad (6)$$

gde je m masa čestice diska, $x_1 = x$, $x_2 = y$, $x_3 = z$ i sumira se po svim česticama diska unutar r_{max} . U ovom radu sve čestice diska imaju istu masu tako da smo u računu uzeli jediničnu masu za m . Rešavanjem svojstvenog problema ovog tenzora dobijene su svojstvene vrednosti I_1 , I_2 i I_3 koje su sortirane tako da važi $I_1 \geq I_2 \geq I_3$. Ove svojstvene vrednosti predstavljaju momente inercije diska u odnosu na x , y i z osu, respektivno. Odnos dobijenih momenata inercije povezan je sa odnosom dužina osa elipsoida koji opisuje raspodelu mase u disku na sledeći način:

$$\frac{b}{a} = \sqrt{\frac{I_2}{I_1}}, \quad \frac{c}{a} = \sqrt{\frac{I_3}{I_1}}, \quad a \geq b \geq c$$

gde su a , b i c dužine velike, srednje i male poluose, respektivno.

Svojstveni vektori su orijentisani tako da obrazuju koordinatni sistem u kome je x -osa usmerena duž velike, y -osa duž srednje i z -osa duž male poluose sistema. Potom su pozicije i brzine svih čestica diska unutar r_{max} prebačene u novi sistem i u daljem toku rada koristimo ovaj koordinatni sistem kao osnovni.

Parametar koji pruža informaciju o dinamičkim i morfološkim promenama galaksije je amplituda Furijeove komponente $m = 2$ raspodele površinske gustine u disku i definiše se kao:

$$A_2 = \frac{1}{N} \left| \sum_{j=1}^N e^{2i\phi_j} \right|$$

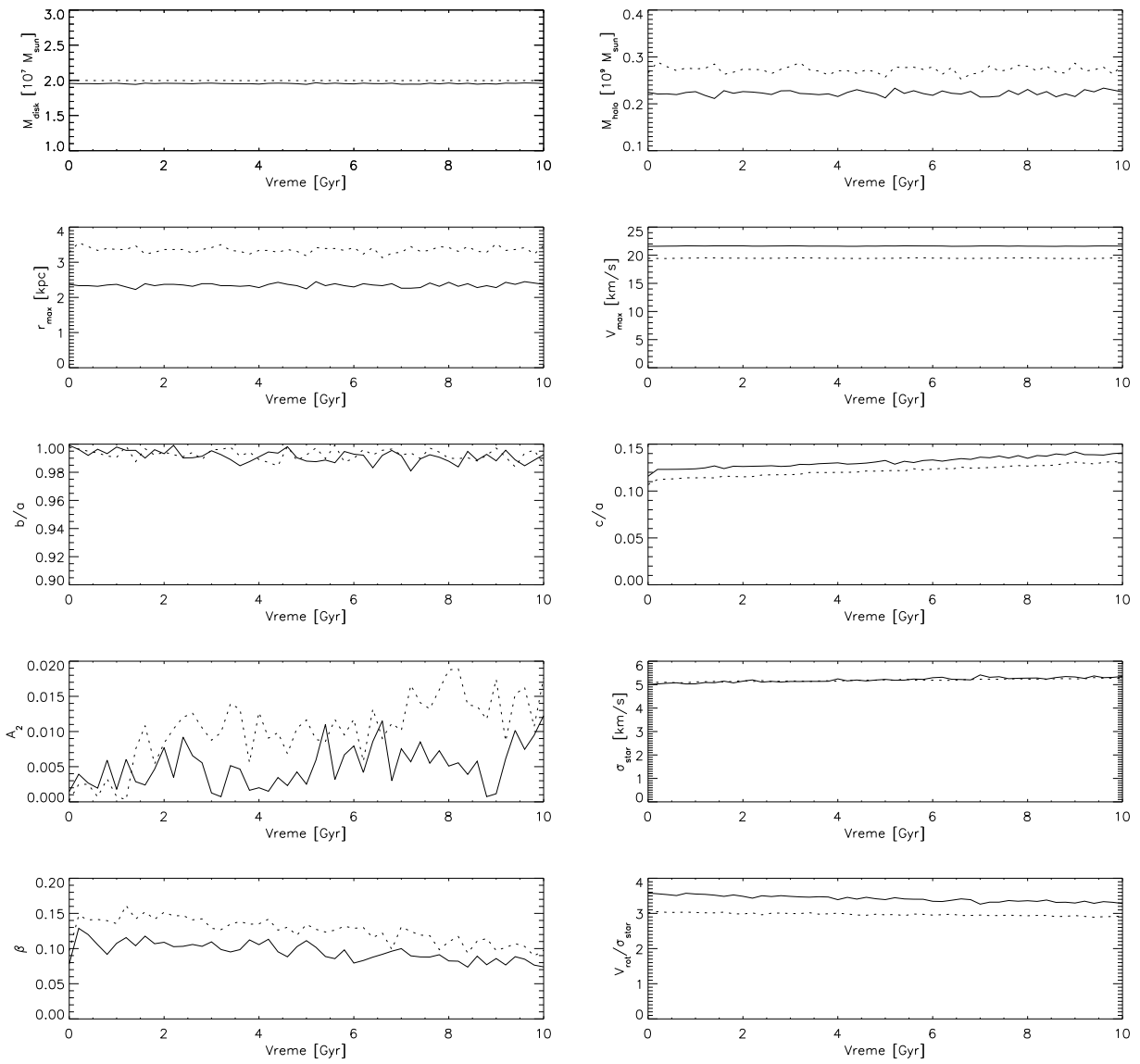
gde je ϕ_j polarni ugao u ravni xy , a suma ide po svim česticama diska (N) unutar r_{max} . Vrednost ovog parametra približno je jednaka nuli za sferno simetrične sisteme i pravilne diskove, dok u slučaju da je došlo do formiranja prečage (eng. *bar*) u disku njegova vrednost raste do jedinice. Oslanjajući se na rad K10 u ovom radu je uzet kriterijum za formiranje prečage ako je $A_2 \geq 0.2$ između dva uzastopna prolaska kroz pericentar orbite galaksije.

2.6.2. Disperzija brzina

Za ispitivanje evolucije kinematike zvezda u disku uvodimo sferni koordinatni sistem u koji prebacujemo brzine čestica i dobijamo komponente brzina V_r , V_θ i V_ϕ za čestice unutar r_{max} . Zatim smo izračunali disperzije brzina σ_r , σ_θ i σ_ϕ . Kako iz posmatranja možemo dobiti disperziju brzina samo iz jednog pravca koji je u principu nasumičan, koristimo jednodimenzionalnu disperziju brzina zvezda u disku kao srednju vrednost duž tri pravca $\sigma_\star \equiv \left[(\sigma_r^2 + \sigma_\theta^2 + \sigma_\phi^2)/3 \right]^{1/2}$. Ovaj parametar nam takođe pruža informaciju o slučajnom (neuređenom) kretanju zvezda. Srednja vrednost brzine oko najmanje ose sistema V_ϕ na udaljenosti r_{max} od centra definišemo kao parametar V_{rot} i ova veličina opisuje koliko je galaksija održala rotaciono (uređeno) kretanje. Ukoliko je kretanje zvezda u disku održano rotacijom (eng. *rotationally supported*) onda je odnos $V_{rot}/\sigma_\star > 1$. Usled plimskih sila dolazi do poremećaja u kretanju zvezda u disku, orbite postaju sve izotropnije i odnos V_{rot}/σ_\star opada. Kada ovaj odnos padne ispod jedinice ($V_{rot}/\sigma_\star \lesssim 1$), disk prelazi iz faze u kojoj je kretanje održano rotacijom, u fazu u kojoj je kretanje održano pritiskom (eng. *pressure supported*).

Parametar anizotropije definiše se kao $\beta \equiv 1 - \sigma_t^2/(2\sigma_r^2)$, gde su σ_r i $\sigma_t = (\sigma_\theta^2 + \sigma_\phi^2)^{1/2}$ radijalna i tangencijalna disperzija brzina, respektivno. Ovaj parametar nam pruža informaciju o globalnom kretanju zvezda u disku. Tri granična slučaja postoje za ovaj parametar: kružno ($\beta \rightarrow -\infty$), izotropno ($\beta = 0$) i radijalno ($\beta = 1$) kretanje zvezda u disku.

Na grafiku 1 prikazani su rezultati evolucije svih relevantnih parametara opisanih u ovom odeljku izračunatih za simulacije izolovanih galaksija DW1 i DW2. Na gornja dva grafika prikazana je ukupna masa diska i haloa unutar radijusa r_{max} . Vidimo da svi parametri galaksija ostaju približno konstantni i na osnovu ove analize možemo zaključiti da su galaksije DW1 i DW2 stabilne u vremenskom intervalu od 10 Gyr.

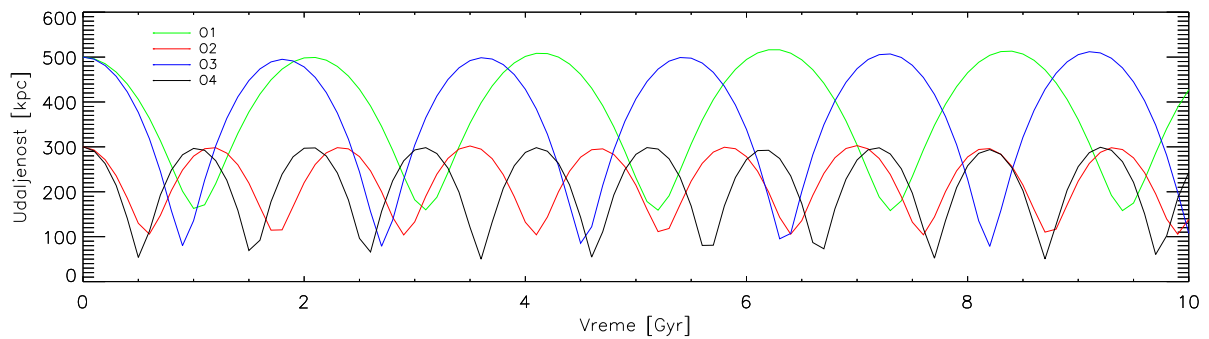


Slika 1: Evolucija relevantnih parametara izolovanih galaksija u vremenu od 10 Gyr. Punom linijom prikazan je model DW1, a isprekidanom linijom model DW2.

3. Rezultati

Na osnovu osam realizovanih simulacija, za svaku simulaciju izračunali smo relevantne parametre. Kako bismo mogli da utvrdimo koliki uticaj ima drugačiji profil gustine tamne materije u tamnom halou patuljaste galaksije, za svaku orbitu poredili smo parametre dva modela galaksija. Na grafiku 2 predstavljene su trajektorije galaksija na orbitama O1, O2, O3 i O4 u funkciji udaljenosti od centra jata. Na graficima 3, 4, 5 i 6 prikazani su rezultati relevantnih parametara za DW1 i DW2 na orbitama O1, O2, O3 i O4, respektivno.

U tabeli 4 predstavljeni su konačni rezultati svih simulacija na osnovu kriterijuma iz K10.



Slika 2: Udaljenosti ostatka galaksija od centra jata Fornax u zavisnosti od vremena za četiri korišćene orbite O1, O2, O3 i O4.

Tabela 4: Konačni rezultati svih simulacija nakon 10 Gyr (osim simulacije S8). Kolona 1: naziv simulacije. Kolona 2: vrednost parametra r_{max} na kraju simulacije. Kolona 3: ukupna masa čestica haloa tamne materije unutar r_{max} . Kolona 4: ukupna masa čestica diska unutar r_{max} . Kolona 5: vrednost parametra A_2 . Kolona 6: odnos srednje i velike poluose elipsoida raspodele mase u disku. Kolona 7: odnos male i velike poluose raspodele mase u disku. Kolona 8: parametar anizotropije. Kolona 9: odnos rotacione brzine i jednodimenzionalne disperzije brzina u disku. Kolona 10: jednodimenzionalna disperzija brzina u disku. Kolona 11: pojavljivanje prečage u disku po kriterijumu iz K10. Kolona 12: klasifikacija konačnog sistema na osnovu kriterijuma iz K10.

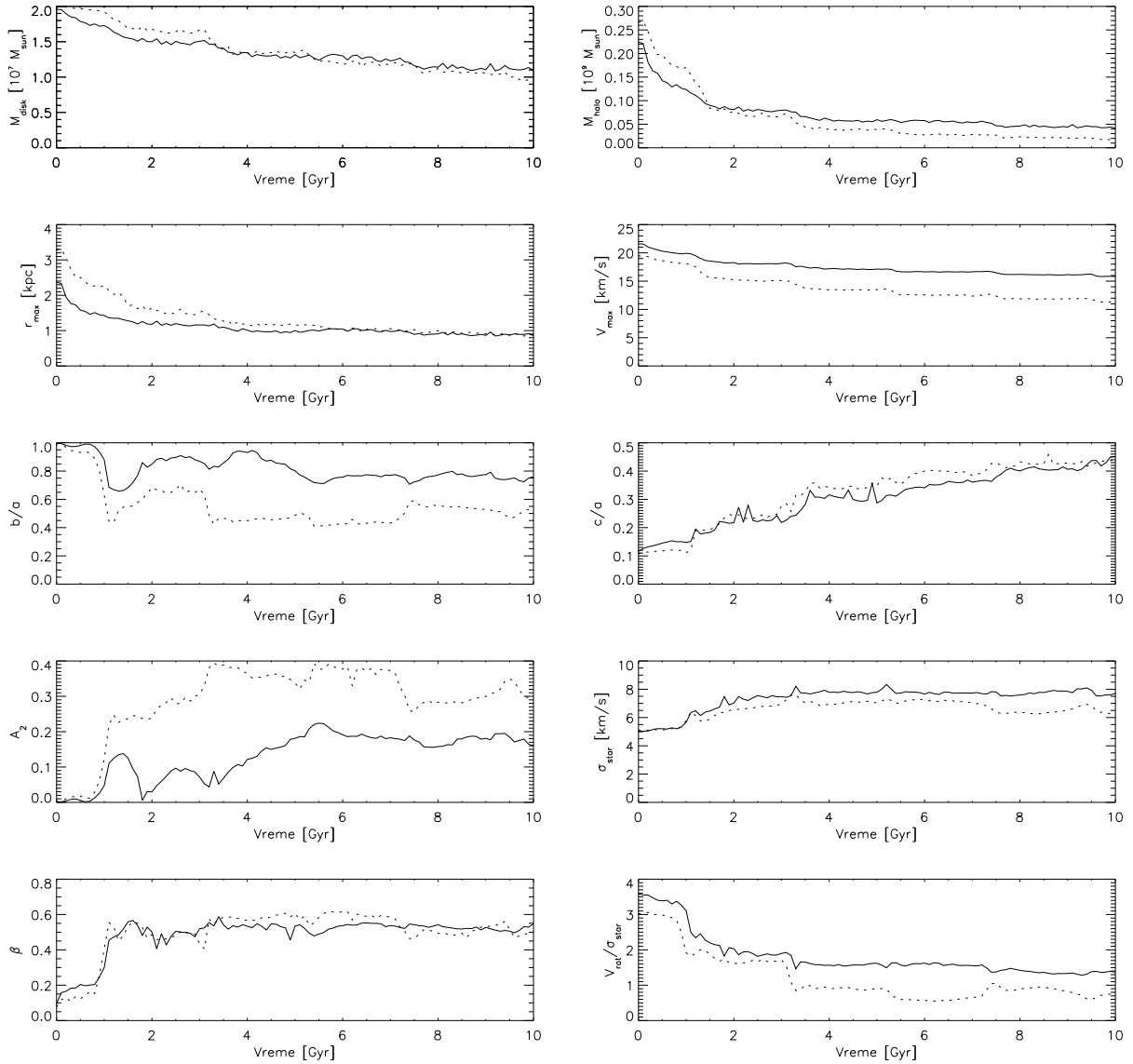
Simulacija (1)	r_{max} (kpc) (2)	M_h^f [$10^9 M_\odot$] (3)	M_d^f [$10^7 M_\odot$] (4)	A_2 (5)	b/a (6)	c/a (7)	β (8)	V_{rot}/σ_* (9)	σ_* (km s^{-1}) (10)	Pojava prečage (11)	Klasifikacija (12)
S1	0.87	0.042	1.09	0.16	0.76	0.45	0.55	1.37	7.71	ne	non-dSph
S2	0.87	0.017	0.95	0.29	0.53	0.44	0.50	0.76	6.26	da	non-dSph
S3	0.59	0.017	0.59	0.10	0.82	0.62	0.29	1.14	6.87	da	non-dSph
S4	0.53	0.0024	0.20	0.14	0.76	0.67	0.02	0.85	3.53	da	dSph
S5	0.59	0.020	0.66	0.28	0.58	0.53	0.58	0.64	8.47	da	dSph
S6	0.62	0.0061	0.47	0.26	0.58	0.55	0.36	0.73	5.04	da	dSph
S7	0.36	0.0050	0.16	0.02	0.96	0.83	0.21	0.76	5.58	ne	dSph
S8 (8Gyr)	0.47	0.00058	0.038	0.10	0.82	0.76	0.18	0.86	2.77	ne	dSph

3.1. Orbita O1

Patuljaste galaksije na orbiti O1 kreću se najdalje od centra jata Fornax. Na grafiku 3 predstavljeni su rezultati relevantnih parametara za DW1 i DW2 na ovoj orbiti. Svi parametri su računati unutar r_{max} . Masa diska opada do polovine početne vrednosti. Nakon 10 Gyr masa tamnog haloa opada na 18.5% početne mase unutar r_{max} za DW1 i na 6.5% za model DW2. Masa tamnog haloa koja ostane u galaksiji po završetku simulacije značajno je manja u slučaju DW2 nego DW1 što je direktno povezano sa time da je tamna materija u modelu DW2 manje koncentrisana u centru i da lakše gubi masu. Ovakva raspodela mase ima posledice i na parametar r_{max} koji je u početku simulacije veći kod DW2 nego kod DW1. Parametar r_{max} opada vremenom kako galaksija gubi čestice diska i haloa i na kraju simulacije je ispod 1kpc. Još jedna posledica razlike raspodele tamne materije u DW1 i DW2 je i brzina v_{max} koja je uvek manja za model DW2.

Evolucija oblika diska galaksija direktno je povezana sa evolucijom odnosa poluosu b/a i c/a . Galaksija počinje kao disk i vremenom gubi taj oblik. Promene u obliku odgovaraju i promeni parametra A_2 koji se povećava onda kada se b/a smanjuje. Oba modela održavaju približno diskoliki oblik i ne ispunjavaju kriterijum $c/a \geq 0.5$ i ne postaju sferoidne galaksije. Kako vrednosti parametra A_2 iznad 0.2 odgovaraju pojavi prečage u disku, vidimo da se disk pretvara u prečagu kod modela DW2 dok kod modela DW1 ne dolazi do ove pojave. Kod galaksije DW2 pojava prečage traje do kraja simulacije. Disperzija brzina u disku se povećava zbog uticaja plimskih sila koje imaju efekat da “zagrevaju” disk. Parametar anizotropije menja se tako da u prvom pericentričnom prolazu orbite postaju radijalne što odgovara širenju diska i plimskom udaru koji raznosi čestice dalje od diska. Ovaj parametar ostaje približno konstantan tokom dalje evolucije za modele DW1 i DW2. Odnos V_{rot}/σ_* opada sa vremenom što je posledica toga što brzina V_{rot} , koja opisuje rotaciono kretanje u disku opada kako disk prolazi kroz promene i gubi uređeno kretanje koje je imao na početku. Ovde se takođe može uočiti razlika modela DW1 i DW2. Brzina V_{rot} kod modela DW1 kreće od veće vrednosti što odgovara tome da je na početku simulacije brzina rotacije čestica u disku povezana sa masom unutar orbita tih čestica. Kod modela DW1 tamna materija je više skoncentrisana u centru pa je i

rotaciona brzina veća. Odnos V_{rot}/σ_* za model DW1 ostaje iznad jedinice na kraju simulacije i disk ostaje održan rotacijom, dok za model DW2 ovaj odnos pada ispod jedinice i možemo reći da je ostatak galaksije DW2 održan pritiskom.



Slika 3: *Orbita 1* — Evolucija relevantnih parametara galaksija u vremenu od 10 Gyr. Punom linijom prikazan je model DW1, a isprekidanom linijom model DW2.

3.2. Orbita O2

Na orbiti O2 galaksije se kreću bliže centru jata Fornax i približavaju se do skoro 100 kpc od centra. Plimski uticaj na galaksije na ovoj orbiti značajno je veći. Na grafiku 4 predstavljeni su dobijeni rezultati evolucije relevantnih parametara DW1 i DW2 na ovoj orbiti.

Masa diska unutar r_{max} za DW1 na kraju simulacije opada na 30%, dok za DW2 opadne ispod 10%. Na kraju simulacije masa tamnog haloa DW1 opadne na 7.6%, dok tamne materije gotovo da nema u ostatku DW2 (<1%). Parametar r_{max} opada do približno 500 pc kod obe galaksije. Kako ostaci galaksije gube tamnu i vidljivu materiju tako i v_{max} opada. Razlika u evoluciji v_{max} za model DW2 prisutna je zbog gubitka tamne materije ove galaksije.

Posle analize simulacija možemo uočiti da su oba ostatka sferoidnog oblika ($b/a \approx 1, c/a \approx 0.8$). Već kod prvog prolaza kroz pericentar dolazi do formiranja prečage $A_2 \geq 0.2$ u obe galaksije. Uočimo i da kod galaksije DW2 pre dolazi do formiranja prečage koja je jača i koja traje skoro do kraja simulacije, kada se gubi. Mogući razlog ovome je to što DW2 brže gubi tamnu materiju koja "čuva" disk od tako naglih promena.

Disperzija brzine na orbiti O2 evoluirala slično kao i kod orbite O1. U simulaciji DW1 disperzija poraste tokom prvog prolaska kroz pericentar i ostaje približno konstantna. U simulaciji DW2 disperzija takođe raste u početku simulacije, ali potom kreće da opada. Pretpostavljamo da do ovoga pada dolazi zbog toga što se masa diska unutar r_{max} smanjuje, dok se parametar r_{max} značajno ne menja. Parametar anizotropije na kraju simulacije galaksije DW2 ima vrednost približno jednaku nuli ($\beta \approx 0$) što odgovara izotropnoj raspodeli brzina u ostatku. Kod galaksije DW1 to nije slučaj i vrednost ovog parametra na kraju simulacije odgovara blago radijalnim brzinama. Odnos V_{rot}/σ_* za galaksiju DW1 na kraju simulacije je približno jednak jedinici. Sa druge strane, za DW2 ovaj odnos je manji od jedinice već u drugom prolazu kroz pericentar i ostaje manji od jedinice do kraja simulacije. Ostatak galaksije DW2 je dakle održan pritiskom već posle manje od 2 Gyr. Možemo zaključiti da oba modela završavaju svoju evoluciju kao približno sferoidni sistemi koji nemaju uređeno rotaciono kretanje.

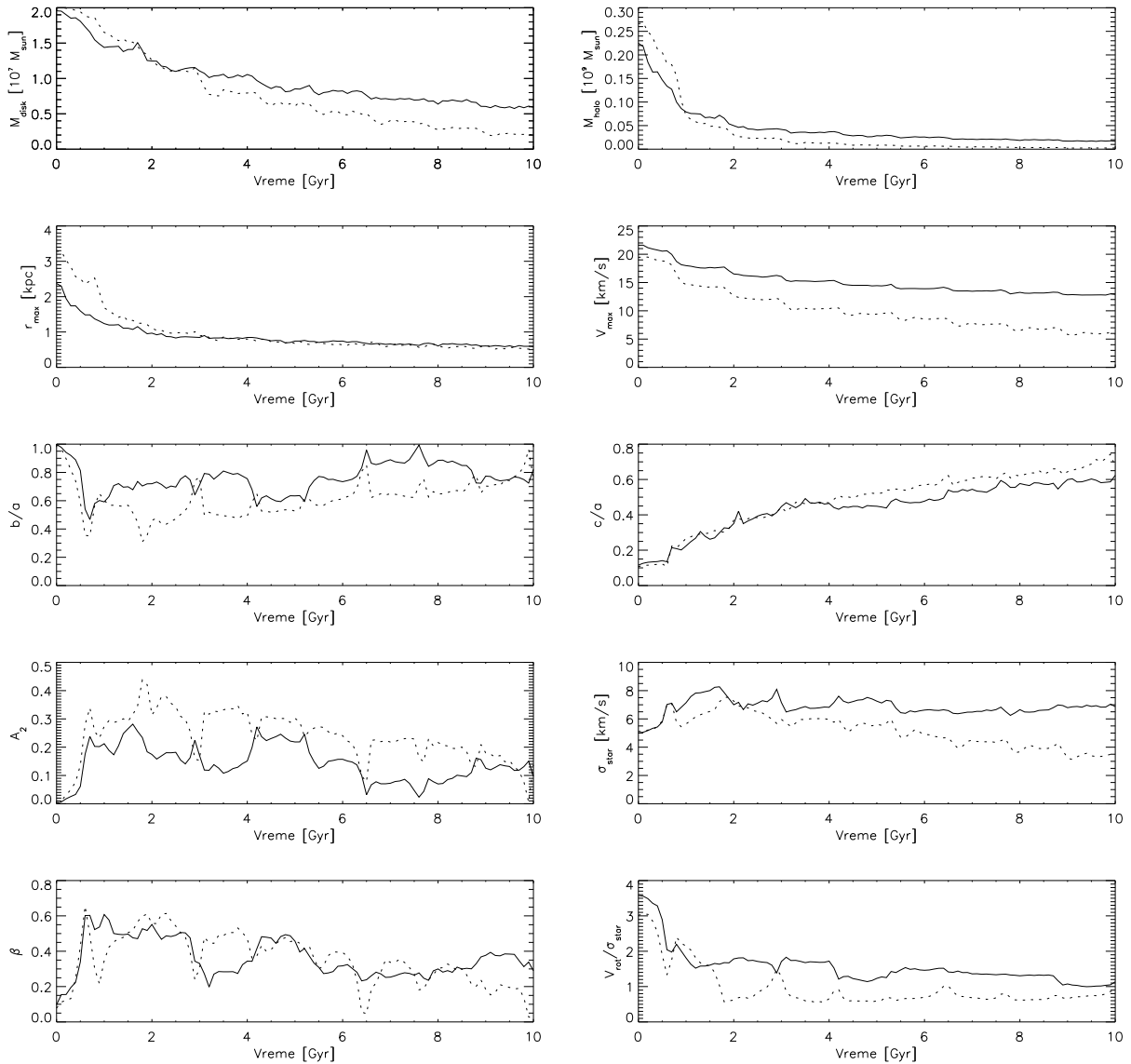
3.3. Orbita O3

Orbita O3 slična je orbiti O1 po tome što galaksije kreću sa iste udaljenosti od 500 kpc, ali je različita po tome što galaksije prolaze bliže centru jata - na 83 kpc. Orbite ovakvog odnosa apocentrične i pericentrične udaljenosti od jata odgovaraju najverovatnijim orbitama u kosmološkim simulacijama (Ghigna et al., 1998; Diemand et al., 2007). Na grafiku 5 predstavljeni su dobijeni rezultati evolucije relevantnih parametara DW1 i DW2 na ovoj orbiti.

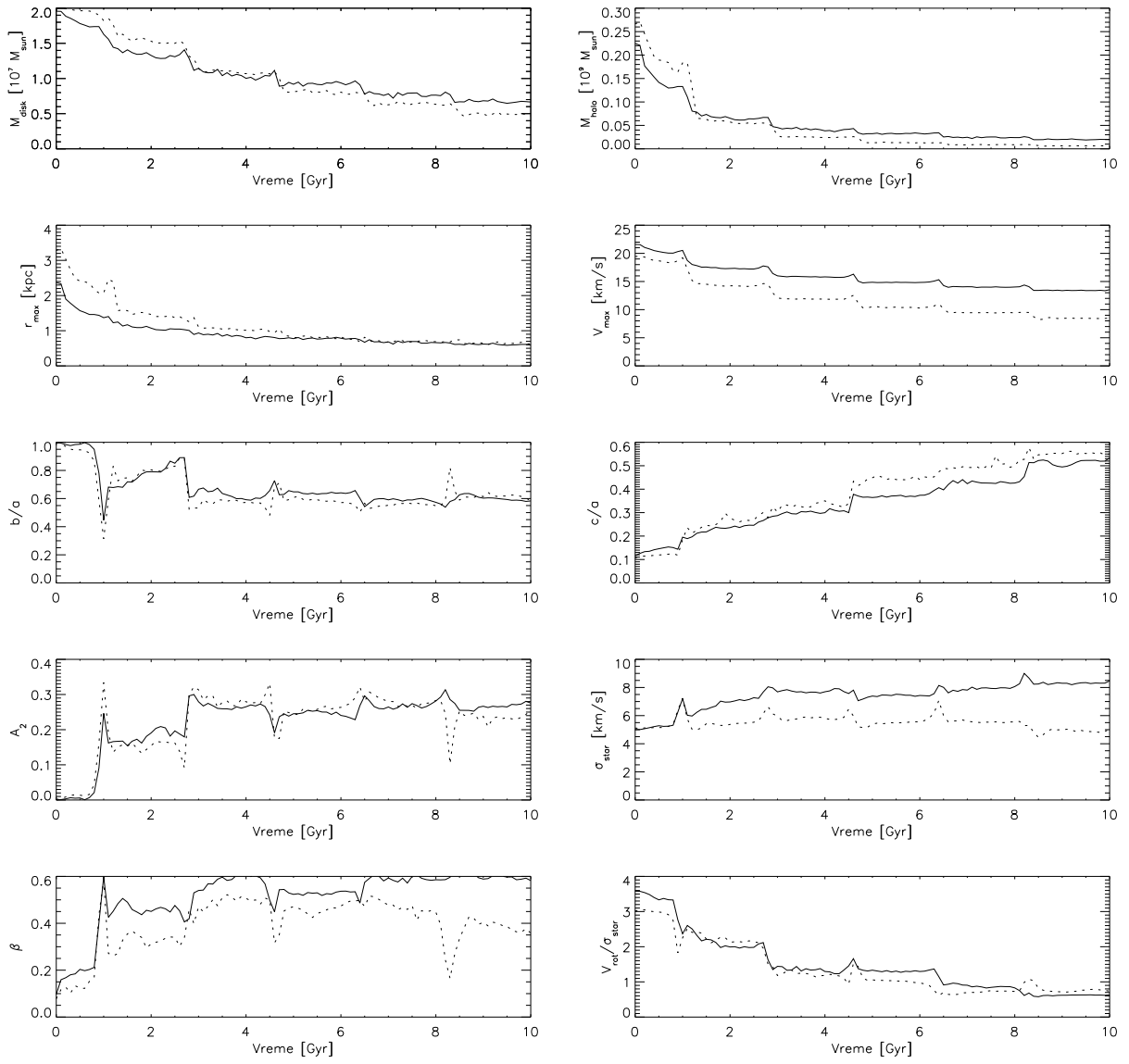
Masa diska unutar r_{max} u slučaju DW1 i DW2 na kraju simulacije opada na 34%, odnosno 24%. Masa tamnog haloa galaksija DW1 i DW2 na kraju simulacije opadne na 8.7%, odnosno 2.3% početne mase tamne materije unutar r_{max} . Uočimo da se u ovom slučaju, u kome imamo orbitu većeg ekscentriciteta i dolazi do bližeg prolaza jatu, izgubi skoro dvostruko više mase i diska i tamnog haloa nego u slučaju orbite O1. Radijus r_{max} na kraju obe simulacije ima vrednost otprilike 600 pc.

Oblik diska menja se tokom simulacije, što možemo uočiti na osnovu evolucije odnosa poluosova zvezdanog sistema b/a i c/a . Na kraju simulacije ovi odnosi ispunjavaju kriterijum $b/a \geq 0.5$ i $c/a \geq 0.5$ te ih možemo klasifikovati kao sferoidne sisteme. U oba slučaja, i za DW1 i DW2, dolazi do formiranja prečage ($A_2 \geq 0.2$) već nakon prvog prolaza kroz pericentar i koja se održava do kraja simulacije. Možemo uočiti i vezu između evolucije parametra A_2 i disperzije brzina σ_* koja raste upravo u trenutcima kada dođe do formiranja prečage. Ovo se može objasniti time da prečaga unosi poremećaje u kretanje čestica diska i samim tim utiče na disperziju brzina.

Na kraju obe simulacije čestice unutar ostataka imaju blago radijalne orbite ($0.2 \leq \beta \leq 0.6$) što znači da i dalje dolazi do rasipanja čestica iz ostataka. Odnos V_{rot}/σ_* na kraju simulacije opada ispod jedinice ($V_{rot}/\sigma_* \leq 1$) i možemo oba ostatka klasifikovati da su izgubili kružno kretanje čestica diska.



Slika 4: *Orbita 2* — Evolucija relevantnih parametara galaksija u vremenu od 10 Gyr. Punom linijom prikazan je model DW1, a isprekidanom linijom model DW2.



Slika 5: Orbita 3 — Evolucija relevantnih parametara galaksija u vremenu od 10 Gyr. Punom linijom prikazan je model DW1, a isprekidanom linijom model DW2.

3.4. Orbita O4

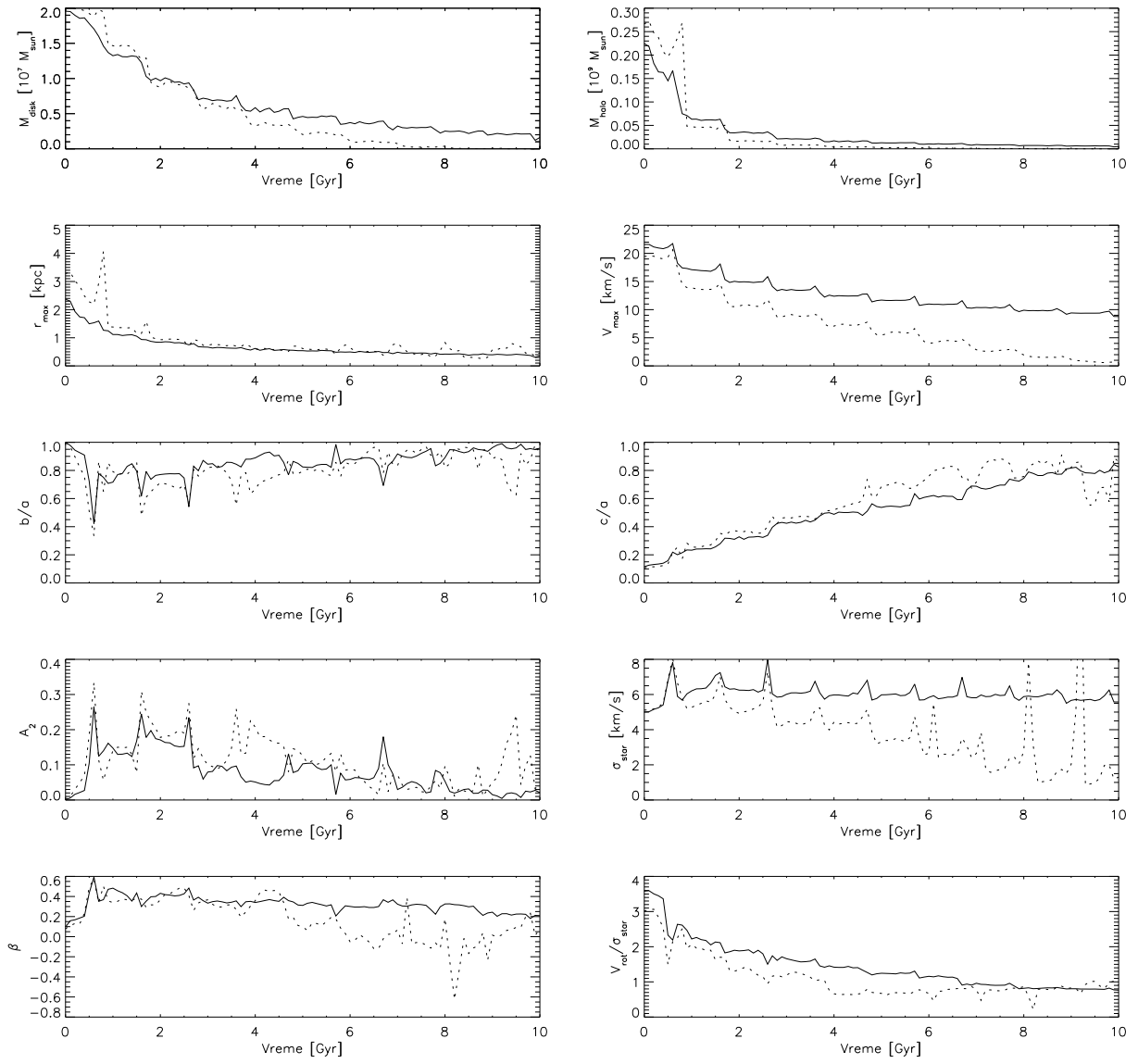
Orbita O4 ima najbliži prolaz na 50 kpc i galaksije kreću sa 300 kpc od centra jata Fornax. Na ovoj orbiti galaksije trpe najveći plimski uticaj i dolazi do najvećih promena u ostacima galaksija. Na grafiku 6 predstavljeni su dobijeni rezultati evolucije relevantnih parametara DW1 i DW2 na ovoj orbiti.

Disk DW1 na kraju simulacije ima 8.3% početne mase diska, dok tamni halo DW1 održava 2.2% svoje početne mase unutar r_{max} . Broj čestica diska galaksije DW2 unutar r_{max} na kraju simulacije opada približno na nulu (0.03%), dok tamni halo DW2 takođe biva potpuno rasturen (0.02%). Budući da galaksija DW2 biva rasturena već posle otprilike 8 Gyr, pratićemo evoluciju DW2 do tog trenutka. Radijus r_{max} do 8 Gyr za DW2 se smanji na vrednost od otprilike 400 pc, dok za DW1 ovaj parametar na kraju simulacije ima vrednost približno 300 pc. Evolucija maksimalne brzine v_{max} prati promene u masi diska i haloa unutar r_{max} i opada brže za slučaj DW2 nego DW1. Može se uočiti i da brzina opada pri svakom prolazu kroz pericentar.

Oblik diska menja se tokom simulacije, što možemo uočiti na osnovu evolucije odnosa poluosa zvezdanog sistema b/a i c/a . Može se uočiti da vrednosti ovih odnosa imaju nagle promene koje odgovaraju prolascima galaksija kroz pericentar orbite. U tim prolazima i parametar A_2 ima nagle skokove ali ne ispunjava kriterijum $A_2 \geq 0.2$ između dva prolaza kroz pericentar. Prečaga se pojavljuje u disku samo u trenutcima prolaska kroz pericentar.

Disperzija brzina takođe ima nagle promene upravo u trenutcima prolaska kroz pericentar kada njena vrednost raste zbog pojave prečage. Parametar anizotropije na kraju simulacije galaksije DW1 ima vrednost $\beta \leq 0.2$ i odgovara slučaju kada imamo izotropnu raspodelu brzina u ostatku. Ovaj parametar u slučaju DW2 opada i ispod nule posle otprilike 6 Gyr, međutim u tom trenutku ima jako malo čestica unutar r_{max} da bismo mogli da pridajemo značaj ovom rezultatu. Pre nego što izgubi većinu čestica diska, ostatak DW2 ima vrednosti parametra anizotropije $\beta \leq 0.2$ što znači da su u tom trenutku orbite već dosegle izotropnu raspodelu. Možemo uočiti i da je galaksija DW2 već posle 4 Gyr što odgovara približno četvrtom prolasku kroz pericentar orbite dostigla vrednost odnosa $V_{rot}/\sigma_* \leq 1$ i da je ostatak izgubio rotaciono kretanje. Galaksija DW1 na kraju simulacije takođe ispunjava uslov $V_{rot}/\sigma_* \leq 1$. Takođe možemo uočiti da dolazi do drastičnog pada odnosa V_{rot}/σ_* već u prvom prolazu kroz pericentar kada dolazi do formiranja prečage u raspodeli čestica diska.

Možemo zaključiti da su obe galaksije postale sferoidni ostaci na kraju simulacije, s tim da je u slučaju DW2 došlo do potpunog rasturanja usled jakih plimskih udara nakon otprilike 8 Gyr.



Slika 6: *Orbita 4* — Evolucija relevantnih parametara galaksija u vremenu od 10 Gyr. Punom linijom prikazan je model DW1, a isprekidanom linijom model DW2.

4. Diskusija

Dobijeni rezultati dinamičke i morfološke evolucije patuljastih galaksija kasnog tipa unutar jata Fornax pokazuju da je mehanizam plimskog ogoljavanja moguć scenario formiranja sferoidnih galaksija. Patuljaste galaksije u prolazu kroz jato Fornax gube masu tamnog haloa i diska usled plimskih sila. Disk patuljaste galaksije trpi velike promene što u dinamičkim, što u morfološkim karakteristikama. U bliskim prolazima centru jata dolazi do pojavljivanja prečage u raspodeli mase u disku. Rezultati koje smo dobili slažu se sa prethodnim radovima (K10; Kazantzidis et al., 2013) u kojima je ispitivana evolucija istih galaksija kao u ovom radu, ali pod gravitacionim poljem Mlečnog puta. Nakon 10 Gyr disk se pretvara u kompaktan ostatak koji odgovara posmatranim sferoidnim patuljastim galaksijama.

Pokazali smo da profil gustine tamnog haloa bitno utiče na evoluciju patuljastih galaksija u jatu Fornax. Model u kom koristimo profil gustine koji ima manji nagib (DW2) od NFW profila, podložniji je gubitku materije iz tamnog haloa što takođe utiče na dinamičke i morfološke promene u disku. Izbor orbita takođe ima značajan uticaj na krajnji ostatak. U slučaju orbita O2 i O4, koje imaju bliže prolaze centru jata Fornax, krajnji ostatak galaksija ima manju masu i dimenzije.

Budući da nas je u ovom radu zanimalo da li je ovaj mehanizam, primenjen na gušću sredinu kao što je jato Fornax, validan i za formiranje UCD galaksija upoređićemo dobijene rezultate sa posmatranim karakteristikama UCD galaksija. Dok se dobijene mase kompaktnih ostataka slažu sa masama posmatranih UCD galaksija, druge karakteristike se ne slažu. Jednodimenzionalne disperzije brzine UCD galaksija unutar jata Fornax imaju nekoliko puta veće vrednosti od onih koje dobijamo u ovom radu (Drinkwater et al., 2003; Hilker et al., 2007; Chilingarian et al., 2011). Iako u ovom radu nismo detaljno ispitali strukturu dobijenih ostataka kako bismo mogli da ih uporedimo sa posmatranim UCD galaksijama, možemo napraviti okvirno poređenje. Radijus koji se obično u literaturi navodi za UCD galaksije je efektivni radijus koji odgovara radijusu unutar koga se nalazi polovina ukupnog sjaja sistema. Efektivni radijusi UCD galaksija u jatu Fornax imaju dimenzije ispod 100 pc (Evstigneeva et al., 2008). U našem slučaju možemo pretpostaviti da površinski sjaj odgovara površinskoj gustini čestica diska u ostatku. Ako uzmemo da parametar r_{max} u našim simulacijama odgovara dimenzijama koja sadrži veći deo materije u ostatku, možemo uočiti da su ove vrednosti u svim simulacijama preko 300 pc. Vidimo da su ostaci koje dobijamo većih dimenzija od posmatranih. U budućem radu detaljnije ćemo ispitati raspodele površinske gustine dobijenih ostataka.

Na osnovu ovog poređenja vidimo da karakteristike objekata koje dobijamo u našim simulacijama odstupaju od karakteristika posmatranih UCD galaksija i da su objekti koje dobijamo bliži po karakteristikama sferoidnim patuljastim galaksijama nego UCD galaksijama. Ova odstupanja, međutim, nisu toliko značajna da bismo isključili mogućnost da se na ovaj način mogu formirati UCD galaksije. Pretpostavljamo da je jedan od mogućih razloga ovog odstupanja izbor dužine ublažavanja za čestice diska koji koristimo $\epsilon_d = 15$ pc. Ova vrednost je uporediva sa efektivnim radijusima UCD galaksija u jatu Fornax. Izborom ove vrednosti smanjili smo prostornu rezoluciju koju možemo da ispitujemo i onemogućili česticama diska da formiraju gusto jezgro. Sa druge strane, izborom manjih vrednosti za ϵ_d simulacije bi bile zahtevnije i potrebno bi

bilo više procesorskog vremena. Drugi razlog koji pretpostavljamo da je imao uticaj na konačne rezultate je velika dinamička razlika u masi čestica galaksije i jata. Zbog ove razlike bilo je potrebno uzeti veliku dužinu ublažavanja za čestice jata. Ovaj izbor jeste konzistentan sa drugim radovima na ovu temu (K10), međutim, pretpostavljamo da je mogao da onemogući efekat dinamičkog trenja čestica tamnog haloa i diska galaksija. Iz praktičnih razloga nije bilo moguće povećati rezoluciju po masi čestica jata kako bi dinamička razlika bila manja. Za to bi bilo potrebno povećati broj čestica u jatu za nekoliko redova veličine što bi zahtevalo značajno više procesorskog vremena.

5. Zaključak

U ovom radu koristili smo simulacije N tela visoke rezolucije kako bismo ispitali evoluciju patuljastih galaksija kasnog tipa unutar jata galaksija Fornax. Ispitali smo mehanizam plimskog ogoljavanja kao moguć način nastanka posmatranih UCD galaksija. Za razliku od prethodnih radova na ovu temu, koristili smo numerički potencijal kako bismo bolje opisali jato Fornax. Koristili smo stabilne modele patuljastih galaksija koje se sastoje od tamnog haloa i diska. Motivisani prethodnim radovima koji su nam služili da suzimo prostor parametara, ispitali smo manji deo prostora parametara i skoncentrisali se na dva modela galaksija sa različitim profilom gustine tamnog haloa. Pored toga ispitali smo i kako različite orbite utiču na dinamičku i morfološku evoluciju galaksija. Naš izbor orbita motivisan je rezultatima radova koji su se bavili kosmološkim simulacijama formiranja strukture. Orbite se razlikuju po udaljenosti od centra jata i odnosom udaljenosti u apocentru i pericentru.

Naši rezultati pokazuju da mehanizam plimskog ogoljavanja dobro opisuje formiranje patuljastih struktura u jatu Fornax. Ostaci koje dobijamo kao krajnji rezultat naših simulacija više odgovaraju sferoidnim patuljastim galaksijama nego posmatranim UCD galaksijama. Ovaj rezultat je u skladu sa prethodnim radovima u kojima je ispitan ovaj mehanizam u Mlečnom putu. Odstupanja od posmatranih karakteristika UCD galaksija u jatu Fornax su najveća po dimenzijama i kinematičkim osobinama, dok je opseg masa dobijenih ostataka u skladu sa posmatranjima. Međutim, ova odstupanja nisu toliko značajna da bismo odbacili ovaj mehanizam kao moguć način formiranja UCD galaksija. Dobijeni rezultati daju nam uvid u razmatrane procese kao i smer u kome treba da nastavimo istraživanje.

U budućem radu planiramo da nađemo način da povećamo rezoluciju po masi čestica jata Fornax kao i prostornu rezoluciju za čestice patuljastih galaksija. Takođe planiramo da proširimo prostor parametara koje ispituje i da ispitamo uticaj mase diska i mase haloa na ostatke koji se formiraju.

Zahvalnice

Ovom prilikom hteo bih da se zahvalim Miroslavu Mićiću sa Astronomske opservatorije u Beogradu (AOB), mom mentoru, bez koga ovaj rad ne bi postojao. Zahvalan sam mu što me je uveo u svet evolucije galaksija i numeričkih simulacija i inspirisao me da se bavim ovom temom. Pored toga zahvalan sam mu na trudu koji je uložio da se ovaj rad ostvari, na korisnim diskusijama, komentarima i savetima u realizaciji ovog rada, kao i sugestijama o budućem radu.

Zahvaljujem se Nemanji Martinoviću (AOB), prijatelju i kolegi, bez čije pomoći bi bilo teško realizovati sve simulacije u ovom radu. Zahvalan sam mu na trudu, stpljenju i brizi u toku mog bavljenja ovim radom. Takođe sam mu zahvalan na korisnim diskusijama, komentarima i savetima prilikom pisanja ovog rada.

Zahvaljujem se Darku Jevremoviću (AOB) na pomoći pri ustupanju hardverskih resursa koji su korišćeni za simulacije u ovom radu.

Zahvaljujem se Branislavu Vukotiću (AOB), Bojanu Arbutini (Matematički fakultet u Beogradu) i Ivanu Miliću (AOB) na pomoći pri pisanju ovog rada.

Literatura

- K. Bekki, W. J. Couch, M. J. Drinkwater, and Y. Shioya. Galaxy threshing and the origin of ultra-compact dwarf galaxies in the Fornax cluster. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 344(2):399–411, 2003. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/2003MNRAS.344..399B>.
- Kenji Bekki, Warrick J. Couch, and Michael J. Drinkwater. Galaxy Threshing and the Formation of Ultracompact Dwarf Galaxies. *The Astrophysical Journal*, 552(2):L105–L108, 2001. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/2001ApJ...552L.105B>.
- J. Binney and S. Tremaine. *Galactic Dynamics: (Second Edition)*. Princeton Series in Astrophysics. Princeton University Press, 2011. ISBN 9781400828722.
- Jean P. Brodie, Aaron J. Romanowsky, Jay Strader, and Duncan A. Forbes. THE RELATIONSHIPS AMONG COMPACT STELLAR SYSTEMS: A FRESH VIEW OF ULTRACOMPACT DWARFS. *The Astronomical Journal*, 142(6):199, 2011. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/2011AJ...142..199B>.
- Igor V. Chilingarian, Steffen Mieske, Michael Hilker, and Leopoldo Infante. Dynamical versus stellar masses of ultracompact dwarf galaxies in the Fornax cluster. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 412(3):1627–1638, 2011. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/2011MNRAS.412.1627C>.
- C. Da Rocha, S. Mieske, I. Y. Georgiev, M. Hilker, B. L. Ziegler, and C. Mendes de Oliveira. Two formation channels of ultra-compact dwarf galaxies in Hickson compact groups. *Astronomy & Astrophysics*, 525:A86, 2010. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/2011A&A...525A..86D>.
- J. Dabringhausen, M. Hilker, and P. Kroupa. From star clusters to dwarf galaxies: the properties of dynamically hot stellar systems. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 386(2):864–886, 2008. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/2008MNRAS.386..864D>.
- W. J. G. de Blok. The Core-Cusp Problem. *Advances in Astronomy*, 2010:1–14, 2009. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/2010AdAst2010E...5D>.
- W. Dehnen and J. I. Read. N-body simulations of gravitational dynamics. *The European Physical Journal Plus*, 126(5):55, 2011. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/2011EPJP...126...55D>.
- Jurg Diemand, Michael Kuhlen, and Piero Madau. Formation and Evolution of Galaxy Dark Matter Halos and Their Substructure. *The Astrophysical Journal*, 667(2):859–877, 2007. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/2007ApJ...667..859D>.
- M. J. Drinkwater, M. D. Gregg, M. Hilker, K. Bekki, W. J. Couch, H. C. Ferguson, J. B. Jones, and S. Phillipps. A class of compact dwarf galaxies from disruptive processes in galaxy clusters. *Nature*, 423:519–521, 2003. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/2003Natur.423..519D>.

- Â M.Â J. Drinkwater, Â J.Â B. Jones, Â M.Â D. Gregg, and Â S. Phillipps. Compact stellar systems in the Fornax Cluster: Super-massive star clusters or extremely compact dwarf galaxies? *Publications Astronomical Society of Australia*, 17:227–233, 2000. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/2000PASA...17..227D>.
- E. a. Evstigneeva, M. J. Drinkwater, R. Jurek, P. Firth, J. B. Jones, M. D. Gregg, and S. Phillipps. Searches for ultracompact dwarf galaxies in galaxy groups. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 378(3):1036–1042, 2007. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/2007MNRAS.378.1036E>.
- E. A. Evstigneeva, M. J. Drinkwater, C. Y. Peng, M. Hilker, R. De Propris, J. B. Jones, S. Phillipps, M. D. Gregg, and A. M. Karick. STRUCTURAL PROPERTIES OF ULTRA-COMPACT DWARF GALAXIES IN THE FORNAX AND VIRGO CLUSTERS. *The Astronomical Journal*, 136(1):461–478, 2008. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/2008AJ....136..461E>.
- Michael Fellhauer and Pavel Kroupa. The formation of ultracompact dwarf galaxies. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 330(3):642–650, 2002. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/2002MNRAS.330..642F>.
- S. Ghigna, B. Moore, F. Governato, G. Lake, T. Quinn, and J. Stadel. Dark matter haloes within clusters. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 300(1):146–162, 1998. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/1998MNRAS.300..146G>.
- Tobias Goerdt, Ben Moore, Stelios Kazantzidis, Tobias Kaufmann, Andrea V. Macciò, and Joachim Stadel. The formation of ultra-compact dwarf galaxies and nucleated dwarf galaxies. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 385(4):2136–2142, 2008. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/2008MNRAS.385.2136G>.
- F Governato, C Brook, L Mayer, A Brooks, G Rhee, J Wadsley, P Jonsson, B Willman, G Stinson, T Quinn, and P Madau. Bulgeless dwarf galaxies and dark matter cores from supernova-driven outflows. *Nature*, 463(7278):203–6, 2010. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/2010Natur.463..203G>.
- George K. T. Hau, Lee R. Spitler, Duncan A. Forbes, Robert N. Proctor, Jay Strader, J. Trevor Mendel, Jean P. Brodie, and William E. Harris. An ultra-compact dwarf around the Sombrero galaxy (M104): the nearest massive UCD. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters*, 394(1):L97–L101, 2009. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/2009MNRAS.394L..97H>.
- M. Hilker, L. Infante, and T. Richtler. The central region of the Fornax cluster. *Astronomy and Astrophysics Supplement Series*, 138(1):55–70, 1999. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/1999A&AS...138...55H>.
- M. Hilker, H. Baumgardt, L. Infante, M. Drinkwater, E. Evstigneeva, and M. Gregg. Dynamical masses of ultra-compact dwarf galaxies in Fornax. *Astronomy and Astrophysics*, 463(1):119–130, 2007. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/2007A%26A...463..119H>.
- Stelios Kazantzidis, Ewa L. Lokas, Simone Callegari, Lucio Mayer, and Leonidas A. Moustakas. On the Efficiency of the Tidal Stirring Mechanism for the Origin of Dwarf Spheroidals: Dependence on the Orbital and Structural Parameters of the Progenitor Disky Dwarfs. *The Astrophysical Journal*, 726(2):34, 2010. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/2011ApJ...726...98K><http://arxiv.org/abs/1009.2499>.
- Stelios Kazantzidis, Ewa L. Lokas, and Lucio Mayer. Tidal Stirring of Disky Dwarfs with Shallow Dark Matter Density Profiles: Enhanced Transformation into Dwarf Spheroidals. *The Astrophysical Journal*, 764(2):8, 2013. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/2013ApJ...764L..29K>.

- Andrey V. Kravtsov, Anatoly A. Klypin, James S. Bullock, and Joel R. Primack. The Cores of Dark Matter-Dominated Galaxies: Theory versus Observations. *The Astrophysical Journal*, 502(1):48–58, 1998. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/1998ApJ...502...48K>.
- K. Kuijken and J. Dubinski. Nearly Self-Consistent Disc / Bulge / Halo Models for Galaxies. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 277, 1995. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/1995MNRAS.277.1341K>.
- E. L. Lokas. Dark matter distribution in dwarf spheroidal galaxies. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 333(3):697–708, 2002. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/2002MNRAS.333..697L>.
- S. Mieske, M. Hilker, and L. Infante. Ultra compact objects in the Fornax cluster of galaxies: Globular clusters or dwarf galaxies? *Astronomy and Astrophysics*, 383(3):823–837, 2002. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/2002A&A...383..823M>.
- Julio F. Navarro, Carlos S. Frenk, and Simon D. M. White. The Structure of Cold Dark Matter Halos. *The Astrophysical Journal*, 462:563, 1996. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/1996ApJ...462..563N>.
- Mark A. Norris and Sheila J. Kannappan. The ubiquity and dual nature of ultra-compact dwarfs. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 414(1):739–758, 2011. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/2011MNRAS.414..739N>.
- Se-Heon Oh, Chris Brook, Fabio Governato, Elias Brinks, Lucio Mayer, W. J. G. de Blok, Alyson Brooks, and Fabian Walter. THE CENTRAL SLOPE OF DARK MATTER CORES IN DWARF GALAXIES: SIMULATIONS VERSUS THINGS. *The Astronomical Journal*, 142(1):24, 2011. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/2011AJ....142...24O>.
- J. Pfeffer and H. Baumgardt. Ultra-compact dwarf galaxy formation by tidal stripping of nucleated dwarf galaxies. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 433(3):1997–2005, 2013. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/2013MNRAS.433.1997P>.
- J. I. Read, M. I. Wilkinson, N. W. Evans, G. Gilmore, and Jan T. Kleyna. The tidal stripping of satellites. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 366(2):429–437, 2006. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/2006MNRAS.366..429R>.
- V. Springel. The cosmological simulation code GADGET-2. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 364(4):1105–1134, 2005. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/2005MNRAS.364.1105S>.
- Á. Villalobos, G. De Lucia, S. Borgani, and G. Murante. Simulating the evolution of disc galaxies in a group environment - I. The influence of the global tidal field. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 424(4):2401–2428, 2012. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/2012MNRAS.424.2401V>.
- Lawrence M. Widrow and John Dubinski. Equilibrium Disk-Bulge-Halo Models for the Milky Way and Andromeda Galaxies. *The Astrophysical Journal*, 631(2):838–855, 2005. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/2005ApJ...631..838W>.
- Lawrence M. Widrow, Brent Pym, and John Dubinski. Dynamical Blueprints for Galaxies. *The Astrophysical Journal*, 679(2):1239–1259, 2008. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/2008ApJ...679.1239W>.