

Teorijska analiza nastanka prečage kod spiralnih galaksija usled bliskog prolaza dve galaksije

U ovom radu su izvršene simulacije N-tela bliskog prolaza dve galaksije, u cilju ispitivanja uticaja bliskog prolaza na formiranje i jačinu prečage kod spiralne galaksije. Ispitano je nekoliko slučajeva bliskih prolaza, u zavisnosti od udaljenosti i rotacije galaksija, kao i od njihovih morfoloških tipova. Jačina prečage određivana je na osnovu vrednosti parametra A_2 , koji predstavlja odnos $\Phi_{m=2}$ ($m = 2$ komponenta potencijala razvijenog po sfernim harmonicima) i ukupnog potencijala diska galaksije. Ispitana je azimutalna simetrija raspodele materije u disku pomoću vrednosti A_2 , na vremenskoj skali od pet milijardi godina. Pored jačine prečage, određen je i njen pravac prostiranja, koji se računa preko promene gustine na različitim pozicionim uglovima. Utvrđeno je da se pri bliskom prolazu spiralne galaksije sa drugom spiralnom galaksijom stvara intenzivnija prečaga, dok je pri prolazu sa patuljastom sferoidnom ona istog intenziteta kao i u izolaciji. Prečaga se formira u bliskom prolazu pri direktnoj rotaciji spiralne galaksije, dok se pri retrogradnoj ne razlikuje od one u izolaciji. Za manje vrednosti parametra sudara, pored prečage, formirane su i spiralne grane.

Uvod

Prečage su zvezdane strukture galaktičkog diska. Koncentracija zvezda unutar prečage je veća u odnosu na ostatak diska. Posmatranjima je potvrđeno da spiralne galaksije mogu da imaju prečage dok se kod drugih morfoloških tipova galaksija one ne formiraju (Carroll i Ostlie 2006).

Mehanizam nastanka prečaga nije jasno utvrđen, ali postoje indicije da su prečage jedna od faza u evoluciji galaksije, kao i to da one mogu nastati galaktičkim interakcijama. Numeričkim simulacijama je pokazano da se prečage mogu formirati u disku koji rotira usled malih perturbacija (Noguchi 1987; Gerin *et al.* 1990; Miwa i Noguchi 1998; Berentzen *et al.* 2004).

Sudari galaksija mogu dovesti do slabljenja intenziteta prečage ili do njenog potpunog gubljenja (Romano-Diaz *et al.* 2008). Pored sudara, prečage mogu nastati i prilikom bliskog prolaza dve galaksije (Lang *et al.* 2014). Bliski prolazi galaksija su galaktičke interakcije između dve galaksije kod kojih ne dolazi do preseka putanja galaksija. Galaksije su nakon bliskog prolaza nezavisni sistemi (Carroll i Ostlie 2006).

U ovom radu izvršene su simulacije N-tela sa modelima spiralne i patuljaste galaksije u cilju teorijske analize nastanka prečage prilikom bliskog prolaza dve galaksije, pri čemu je u obzir uzeta samo gravitaciona interakcija. Ispitani su intenziteti i orijentacija prečage nastale pri različitim početnim uslovima bliskih prolaza.

Metod

Modeli galaksija

Za galaksije korišćene u simulacijama bliskih prolaza generisani su modeli N-tela. Model spiralne galaksije sadrži tri komponente: disk, centralni oval i halo tamne materije. Disk spiralne galaksije ima cilindričnu simetriju. U radijalnom pravcu ima eksponencijalni pad gustine, što je predstavljeno sledećom jednačinom (Geehan *et al.* 2006; Sadoun *et al.* 2014):

$$\Sigma(r) = \frac{M_d}{2\pi r_d^2} e^{-\frac{r}{r_d}}, \quad (1)$$

dok je ukupan profil gustine (promena gustine u radijalnom i vertikalnom pravcu):

Matija Dodović (1999), Valjevo, Petnička 20, učenik 3. razreda Valjevske gimnazije

MENTOR: Stanislav Milošević, Matematički fakultet Univerziteta u Beogradu

$$\rho(r, z) = \frac{\Sigma(r)}{2z_d} \operatorname{sech}^2 \left(\frac{z}{z_d} \right). \quad (2)$$

U jednačinama (1) i (2) M_d predstavlja masu diska, r_d i z_d radijalnu i vertikalnu skalu dužine (eng. scale length). Skala dužine predstavlja rastojanje od centra na kojem gustina opadne e puta (Carroll i Ostlie 2006).

Centralni oval ima sferno simetričan profil gusitine (Hernquist 1990):

$$\rho(r) = \frac{M_b}{2\pi} \frac{r_b}{r} \frac{1}{(r + r_b)^3}, \quad (3)$$

gde M_b predstavlja masu centralnog ovala, a r_b njegovu skalu dužine.

Halo tamne materije spiralne galaksije ima raspodelu mase koja odgovara NFW profilu gusitine (Navarro *et al.* 1996):

$$\rho(r) = \frac{\delta_c \rho_{\text{crit}}}{\frac{r}{r_h} \left(1 + \frac{r}{r_h} \right)^2}, \quad (4)$$

u kojoj je r_h skala dužine, a ρ_{crit} kritična gustina svemira. Kritična gustina svemira se dobija iz izraza:

$$\rho_{\text{crit}} = \frac{3H^2}{8\pi G},$$

u kojoj $H = 71.9 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ predstavlja Habblovu (Bovin *et al.* 2017), a G gravitacionu konstantu.

U relaciji (4) δ_c je parametar koji pokazuje koliko puta je gustina haloa veća od ρ_{crit} na rasto-

janju r_h , dok je c parametar koncentracije. Parametar koncentracije predstavlja odnos radijusa r_{200} (radijus pri kojem srednja gustina haloa iznosi $200 \rho_{\text{crit}}$) i r_h . Ova dva parametra su povezana sledećom jednačinom (Navarro *et al.* 1996):

$$\delta_c = \frac{200}{3} \cdot \frac{c^3}{\ln(1+c) - \frac{c}{1+c}}.$$

Pošto se NFW profil teorijski proteže u beskonačnost potrebno ga je ograničiti, što je moguće profilom (Widrow *et al.* 2005):

$$\rho(r) = \frac{2^{1-\alpha} \sigma_h^2}{4\pi r_h^2} \frac{1}{\left(1 + \frac{r}{r_h}\right)^{3-\alpha}} \cdot \operatorname{error} \left(\frac{r - r_{\text{out}}}{\sqrt{2} \delta_{\text{out}}} \right). \quad (5)$$

Jednačina (5) za $\alpha = 1$ postaje jednačina (4) sa dodatkom error funkcije. Parametri r_{out} i δ_{out} predstavljaju rastojanje na kojem počinje „odsecanje” profila i širinu intervala unutar kojeg gustina padne na nulu, i imaju vrednosti 100 kpc i 10 kpc, respektivno. Veličina σ_h predstavlja disperziju brzina (karakterističnu brzinu) čestica haloa, koja je jednaka 425 km/s.

Parametari modela spiralne galaksije dati su u tabeli 1 (Geehan *et al.* 2006; Sadoun *et al.* 2014).

Patuljasta sferoidna galaksija ima dve komponente: centralni oval koji ima profil gusitine dat izrazom (3) i halo tamne materije, čiji je profil dat izrazom (5). Parametri modela patuljaste sferoidne galaksije predstavljen je u tabeli 2 (Geehan *et al.* 2006; Sadoun *et al.* 2014).

Tabela 1. Parametri spiralne galaksije

Komponenta	Disk	Centralni oval	Halo
Masa komponente [10^{10} M_\odot]	3.7	3.2	88
Broj čestica po komponenti	108929	96 247	261 905
Skalirani radijus [kpc]	$z_d = 0.57, r_d = 6.82$	1.22	8

Tabela 2. Parametri patuljaste sferoidne galaksije

Komponenta	Centralni oval	Halo
Masa komponente [10^{10} M_\odot]	0.22	4.2
Broj čestica po komponenti	131 072	244 809
Skalirani radijus [kpc]	1.03	5

Svi modeli galaksija generisani su pomoću programskog paketa GalactICs (Kujiken i Dubinski 1995; Widrow i Dubinski 2005; Widrow *et al.* 2008). Svaka čestica u modelu čini određeni broj zvezda, odnosno određeni deo ukupne mase galaksije, pošto galaksiju reprezentujemo sa mnogo manjim brojem tela od broja zvezda u galaksiji.

Sve simulacije su izvršene pomoću Tree-PM N-body koda Gadget2 (Springel 2005). Ukoliko rastojanje između dve čestice tokom simulacije teži nuli, gravitaciona sila teži beskonačno. Da bi se izbegao ovaj problem, uvodi se dužina ublažavanja (eng. softening length) koja predstavlja rastojanje ispod kojeg se ne računa gravitaciona sila, zarad izbegavanja numeričkog šuma (Dehnen i Read 2011). Za dužinu ublažavanja, u svim simulacijama, uzeta je vrednost od 100 pc.

Početni uslovi bliskog prolaza

Ispitano je kako bliski prolaz „perturbera” utiče na formiranje prečage u spiralnoj galaksiji i ona je označena kao „primarna” galaksija. Kao perturber su korišćeni modeli i spiralne i patuljaste sferoidne galaksije. Primarna galaksija je postavljena u centar koordinatnog sistema i nije joj saopštena početna brzina. U svim slučajevima bliskog prolaza, za primarnu galaksiju, korišćen je isti model spiralne galaksije.

Razmatrani su samo planarni bliski prolazi (iako je to manje verovatan scenario), jer je u tom slučaju uticaj perturbera na formiranje prečage u primarnoj galaksiji najveći (Lang *et al.* 2014). Planarni bliski prolazi su oni kod kojih su putanja perturbera i disk primarne galaksije u istoj ravni.

Razlikuju se dva slučaja početnih uslova bliskih prolaza (tabela 3) u pogledu rastojanja između primarne galaksije i perturbera.

Rotacija diska primarne galaksije se razlikuje u slučajevima Ia, Ib, IIa, IIb od slučajeva Ic i IIc. U slučajevima Ic i IIc disk rotira retrogradno, dok je u ostalim slučajevima rotacija diska direktna.

Analiza strukture diska

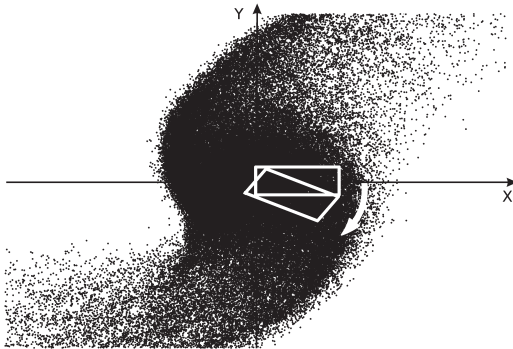
Analiziranjem diska galaksije dobija se informacija o tome da li je prečaga formirana ili nije. Analiza prečage nastale prilikom bliskog prolaza sastoji se u određivanju pravca njenog pružanja i jačine. Pošto je prečaga struktura veće gustine u odnosu na ostatak diska, pomoću profila gustine se može odrediti pravac njenog prostiranja. Jačina prečage se kvantifikuje kao odstupanje diska od sferno-simetrične strukture, što se dobija izračunavanjem parametra A_2 .

Određivanje pravca prostiranja prečage

Prilikom bliskog prolaza, usled formiranja prečage, dolazi do narušavanja cilindrične simetrije u disku. Profil gustine u radijalnom pravcu će se menjati sa pozicionim uglom. Gustina će najsporije opadati u pravcu u kojem je prečaga, a najbrže u pravcu koji je normalan na taj pravac. Disk je podeljen na 360 pravougaonika koji leže u različitim radijalnim pravcima (slika 1) i unutar njih je izračunata razlika gustine na dva kraja pravougaonika. Ta razlika je podeljena sa površinom pravougaonika i na taj način je određeno koliko brzo gustina opada u određenom radijalnom pravcu.

Tabela 3. Različiti slučajevi bliskog prolaza. Kriterijum za početne parametre bliskog prolaza preuzeti su iz literature (Lang *et al.* 2014).

Slučaj	Perturber	Rotacija primarne galaksije	Najbliže rastojanje [kpc]	Početno rastojanje [kpc]	Početna brzina [km/s]
Ia	Patuljasta	Direktna	59	149	440
Ib	Spiralna	Direktna	81.8	171.8	384
Ic	Spiralna	Retrogradna	"	"	"
IIa	Patuljasta	Direktna	277.2	633.4	206
IIb	Spiralna	Direktna	453.45	925.77	164
IIc	Spiralna	Retrogradna	"	"	"



Slika 1. Skica mapiranja diska u cilju ispitivanja pravca pružanja prečage, na osnovu promene gradijenta gustine u različitim radijalnim pravcima

Figure 1. Sketch of disk mapping in order to calculate direction of bar by using density gradient for different radial directions.

Parametar A_2

Analiza jačine prečage (azimutalne simetrije diska) podrazumeva određivanje vrednosti parametra A_2 , koji se dobija u razvoju gravitacionog potencijala po sfernim harmonicima, i predstavlja odnos $\Phi_{m=2}$ člana u tom razvoju i ukupnog potencijala galaktičkog diska.

Za izračunavanje parametra A_2 uzete su u obzir samo čestice diska, tj. nije u obzir uzet centralni oval zbog svoje sferne simetrije i činjenice da disk čini stabilnijim i smanjuje mogućnost uočavanja prečage u centralnom delu diska (Shen i Sellwood 2004; Athanassoula *et al.* 2005). U obzir nisu uzete ni čestice van sfere radijusa r_{\max} jer bi one mogle biti u formiranim spiralnim granama.

Radijus r_{\max} predstavlja rastojanje od centra galaksije na kojem rotaciona brzina dostiže svoj maksimum. Rotaciona brzina na radijusu r se dobija iz izraza:

$$V_c = \sqrt{\frac{GM(r)}{r}},$$

gde je $M(r)$ masa svih čestica galaksije unutar radijusa r .

Za izračunavanje parametra A_2 potrebno je rotirati početni koordinatni sistem tako da mu se ose poklope sa osama elipsoida kojim se disk aproksimira. Ove ose se dobijaju pomoću rešenja

svojstvenog problema tenzora momenta inercije diska (Kazantzidis *et al.* 2011).

Za svaku česticu unutar radijusa r_{\max} izračunate su komponente tenzora momenta inercije, pomoću sledećih izraza:

$$I_{ij} = \begin{cases} \sum_{k=1}^N m_k (x_{i+1}^2 + x_{i+2}^2), & i = j \\ \sum_{k=1}^N m_k x_i x_j, & i \neq j \end{cases}$$

u kojima indeksi i i j odgovaraju koordinatnim osama x , y i z , i to $x_1 = x$, $x_2 = y$ i $x_3 = z$. m_k predstavlja masu k -te čestice, a N broj čestica diska unutar radijusa r_{\max} .

Rešavanjem svojstvenog problema tenzora momenta inercije dobijaju se svojstvene vrednosti I_1 , I_2 i I_3 , za koje važi poredak $I_1 \geq I_2 \geq I_3$ i one predstavljaju momente inercije diska u odnosu na y , x i z osu. Iz odnosa ovih svojstvenih vrednosti mogu se dobiti i parametri elipsoida (velika, srednja i mala poluosa redom) kojim reprezentujemo disk.

Ose elipsoida predstavljaju svojstvene vektore, dobijene rešavanjem svojstvenog problema. Svojstveni vektori formiraju ortonormiran koordinatni sistem, tako da je y -osa usmerena duž velike, x -osa duž srednje i z -osa duž male poluose elipsoida.

Parametar A_2 se računa u koordinatnom sistemu određenom svojstvenim vektorima. U ovom radu računat je kao amplituda $m = 2$ Furijeove komponente razvoja raspodele gustine u disku, normiranog brojem čestica unutar radijusa r_{\max} (Kazantzidis *et al.* 2011):

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

gde je φ_j polarni ugao čestice, koji se dobija iz izraza:

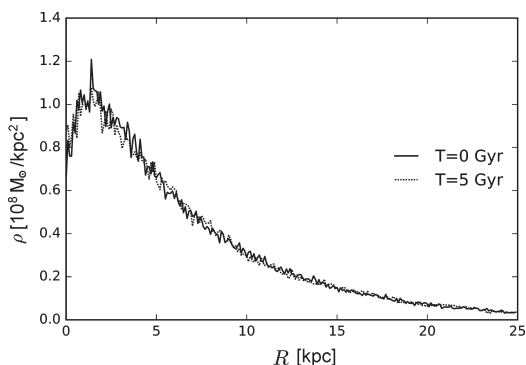
$$\varphi_j = \arctg\left(\frac{y_j}{x_j}\right),$$

u kojoj su x_j i y_j koordinate čestice (u novom koordinatnom sistemu).

Parametar A_2 ima vrednost blisku nuli, za sferno simetrične sisteme, dok njegova vrednost raste ukoliko se narušava sferna simetrija. U ranijim radovima (Kazantzidis *et al.* 2011) smatrano je da je prečaga formirana, ako je vrednost parametra A_2 veća od 0.2, što je korišćeno i u ovom radu.

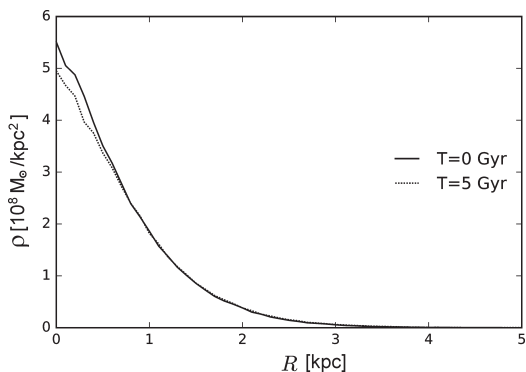
Rezultati i diskusija

Izvršene su simulacije evolucije galaksija u izolaciji u cilju ispitivanja njihovih stabilnosti i analize diska spiralne galaksije. Međusobno su upoređene osobine prečage koja se formira pri evoluciji primarne galaksije u izolaciji i u različitim slučajevima bliskog prolaza. Ukoliko je došlo do promene jačine prečage, bliski prolaz utiče na formiranje prečage.



Slika 2. Profil gustine diska spiralne galaksije u $T = 0$ i $T = 5$ milijardi godina.

Figure 2. Density profile of the disk of spiral galaxy in $T = 0$ and $T = 5$ billions of years.

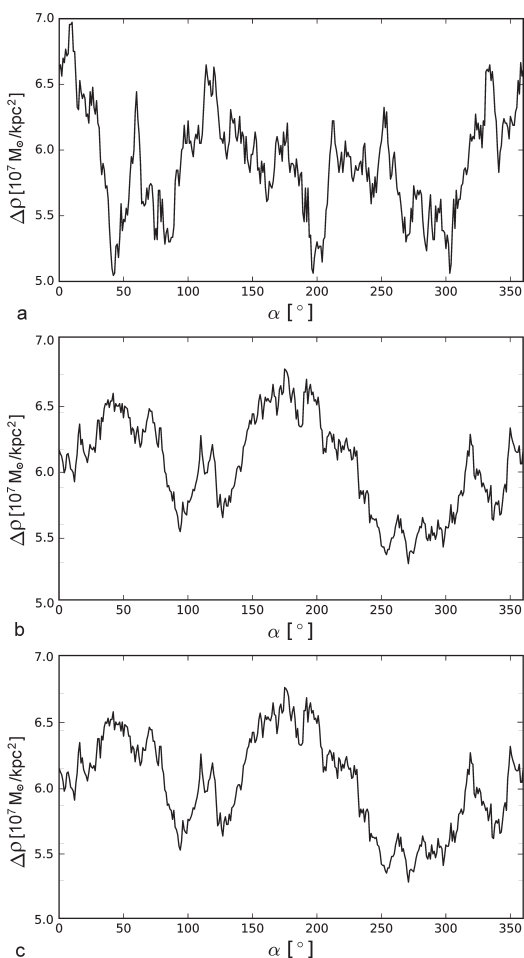


Slika 3. Profil gustine barionske materije patuljaste sferoidne galaksije u $T = 0$ i $T = 5$ milijardi godina.

Figure 3. Density profile of baryon matter of dwarf spheroidal galaxy in $T = 0$ and $T = 5$ billions of years.

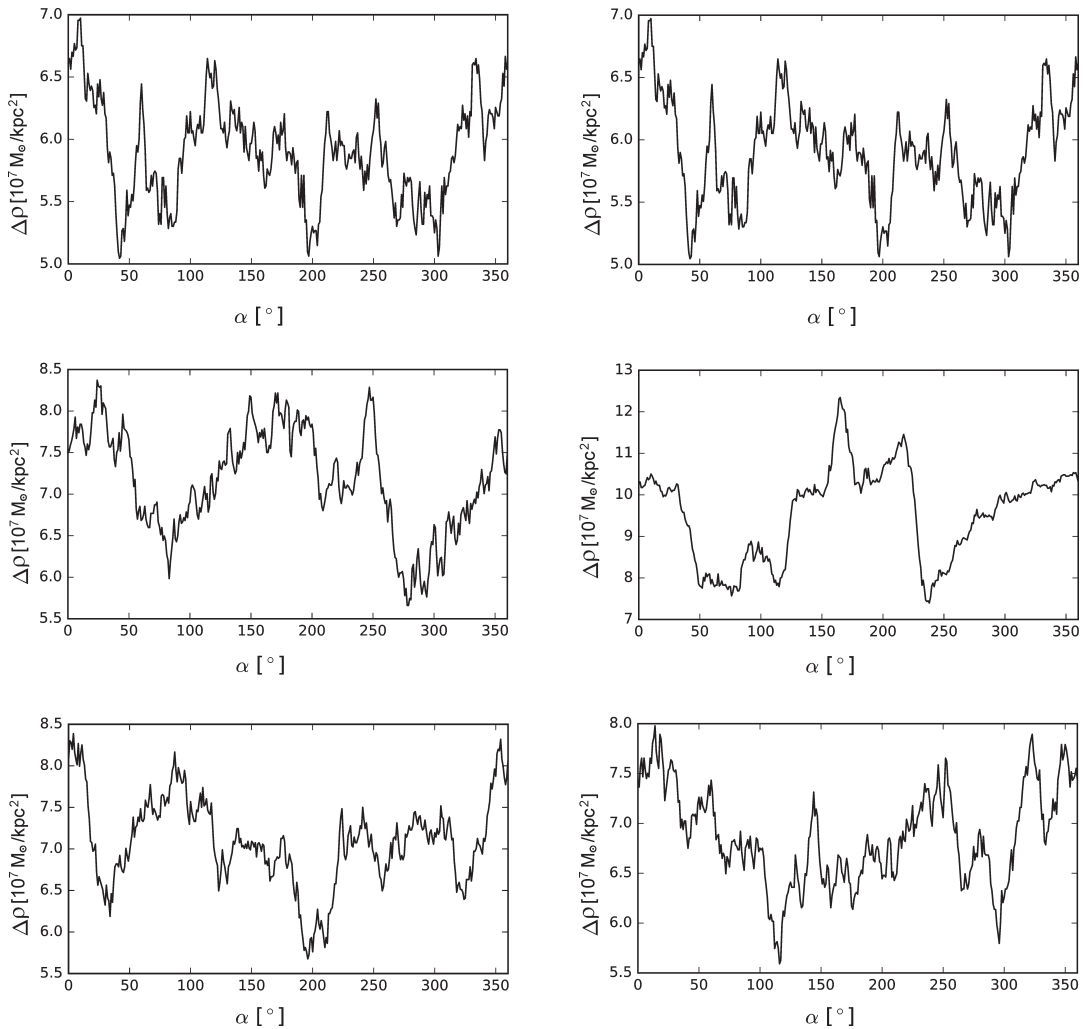
Stabilnost galaksija u izolaciji

Stabilnost galaksije možemo da ispitamo po redjenjem profila gustine u različitim vremen-skim trenucima. Na slikama 2 i 3 nalaze se profili gustine diska spiralne galaksije i barionske materije patuljaste galaksije. Pošto se profili gustine ne menjaju tokom vremena trajanja simulacije, pet milijardi godina, galaksije su stabilne.



Slika 4. Gradijenti gustina za spiralnu galaksiju u izolaciji, za vremenske trenutke $T = 0$, $T = 2.5$ i $T = 5$ milijardi godina.

Figure 4. Density gradient of spiral galaxy in isolation, for $T = 0$, $T = 2.5$ and $T = 5$ billions of years.



Slika 5. Gradijenti gustina za slučajeve: Ia (levo) i Ib (desno) za vremenske trenutke $T = 0$, $T = 2.5$ i $T = 5$ milijardi godina.

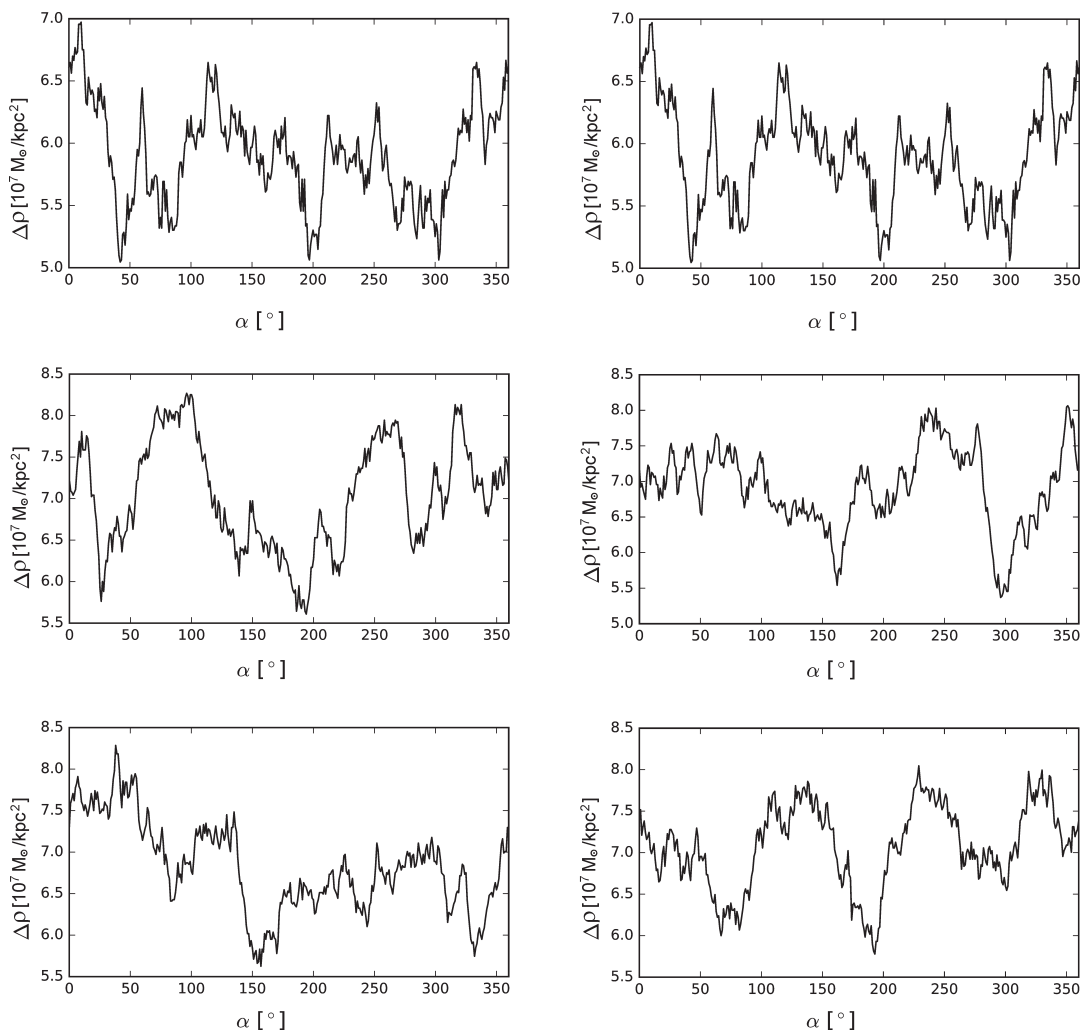
Figure 5. Density gradient for cases: Ia (left) and Ib (right) for $T = 0$, $T = 2.5$ and $T = 5$ billions of years.

Pravac prostiranja prečage

Zavisnost gradijenta gustine od pozicionog ugla, iz koje se dobija pravac prostiranja prečage, prikazana je na slikama 4, 5 i 6, i data je na početku, sredini i na kraju simulacije.

U početnom trenutku za sve slučajeve (slike 4, 5 i 6), u disku se ne uočava jedinstven par minimuma gradijenta gustine na razmaku od 180

stepeni, pa se pravac prečage ne može jasno odrediti. U kasnijim fazama evolucije, i u izolaciji i u oba slučaja bliskog prolaza može se odrediti pravac prečage. Pravac prečage je jasnije definisan u slučaju I nego u slučaju II, što je očekivano, jer je parametar sudara u slučaju I manji nego u slučaju II (veći uticaj perturbatora na primarnu galaksiju).



Slika 6. Gradijenti gustina za slučajeve: IIa (levo) i IIb (desno) za vremenske trenutke $T = 0$, $T = 2.5$ i $T = 5$ milijardi godina.

Figure 6. Density gradient for cases: IIa (left) and IIb (right) for $T = 0$, $T = 2.5$ and $T = 5$ billions of years.

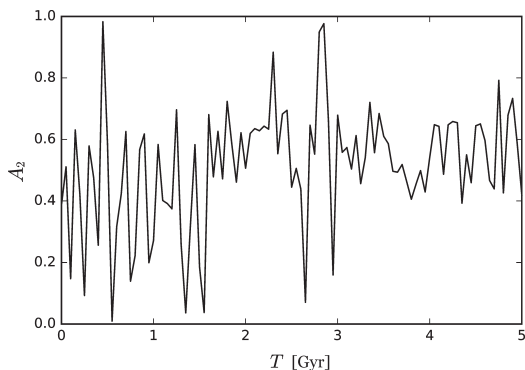
Jačina prečage

Na slikama 7, 8 i 9 prikazana je zavisnost parametra A_2 od vremena za izolaciju i različite scenarije bliskog prolaza.

U slučaju galaksije u izolaciji (slika 7) prvih 1.8 milijardi godina vrednost parametra A_2 osciluje, jer nema stabilnih formiranih struktura u disku, da bi se nakon toga njegova vrednost

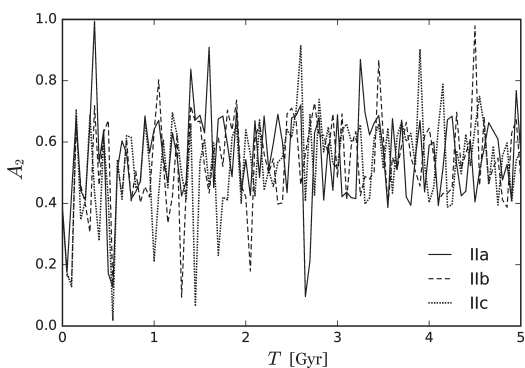
ustalila u intervalu ~ 0.4 i ~ 0.6 što ukazuje na formiranje prečage.

U slučaju Ia bliskog prolaza (slika 8) vrednost parametra A_2 se nakon dve milijarde godina nalazi u intervalu ~ 0.6 i ~ 0.8 , dok je za slučaj Ic ta vrednost između ~ 0.3 i ~ 0.6 . U slučaju Ib nakon jedne milijarde godina vrednost parametra A_2 iznad ~ 0.8 i raste. U slučaju Ia i Ib formirana prečaga je jačeg intenziteta nego u izolaciji, s tim što



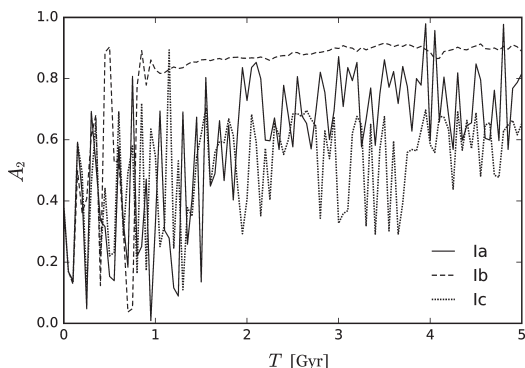
Slika 7. Parametar A_2 za spiralnu galaksiju u izolaciji.

Figure 7. A_2 parameter for spiral galaxy in isolation.



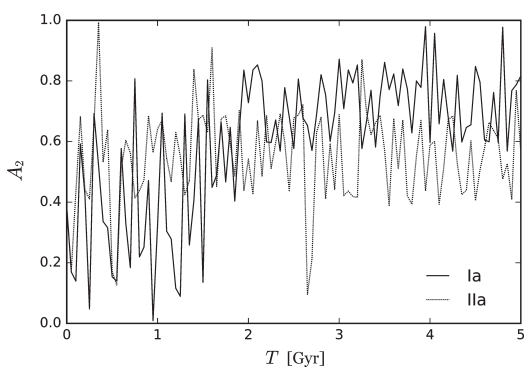
Slika 9. Parametar A_2 za slučaj II bliskog prolaza.

Figure 9. A_2 parameter for flyby case II.



Slika 8. Parametar A_2 za slučaj I bliskog prolaza.

Figure 8. A_2 parameter for flyby case I.



Slika 10. Parametar A_2 za slučajeve Ia i IIa.

Figure 10. A_2 parameter for Ia and IIa cases.

je prečaga u slučaju Ib većeg intenziteta i stabilnija nego u slučaju Ia bliskog prolaza. U slučaju Ic prečaga je istog intenziteta, tj. bliski prolaz nije uticao na pojačavanje njenog intenziteta.

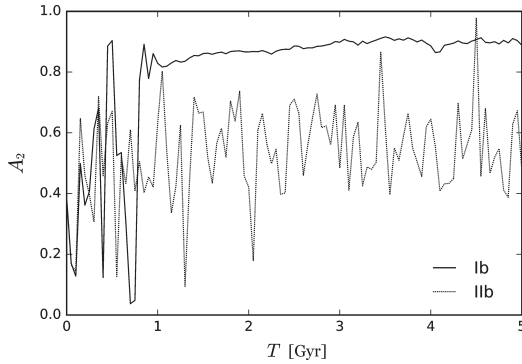
U svim slučajevima II bliskog prolaza (slika 9) vrednosti parametra A_2 osciluje između ~ 0.4 i ~ 0.6 , kao i u slučaju izolacije. Intenziteti prečaga su isti kao i u izolaciji što znači da u ovim slučajevima bliskih prolaza perturbir ne utiče na formiranje prečage u primarnoj galaksiji.

Parametar A_2 u slučajevima Ia i IIa (slika 10) osciluje, pri čemu veću vrednost ima u slučaju Ia,

što je očekivano s obzirom da u tom slučaju perturbir prolazi pored primarne galaksije na manjem rastojanju.

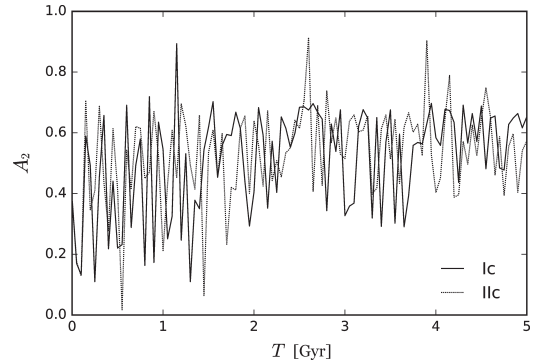
Parametar A_2 u slučajevima Ib i IIb (slika 11) osciluje prvih milijardu godina, pri čemu se u slučaju Ib vrednost znatno sporije menja nakon prve milijarde godina. Prečaga je takođe intenzivnija pri manjem rastojanju primarne galaksije i perturbir (slučaj Ib).

Parametar A_2 u oba slučaja Ic i IIc bliskog prolaza (slika 12), kod kojih je rotacija retrogradna, ne odstupa od opsega vrednosti za galaksiju u



Slika 11. Parametar A_2 za slučajeve Ib i IIb.

Figure 11. A_2 parameter for Ib and IIb cases.



Slika 12. Parametar A_2 za slučajeve Ic i IIc.

Figure 12. A_2 parameter for Ic and IIc cases.

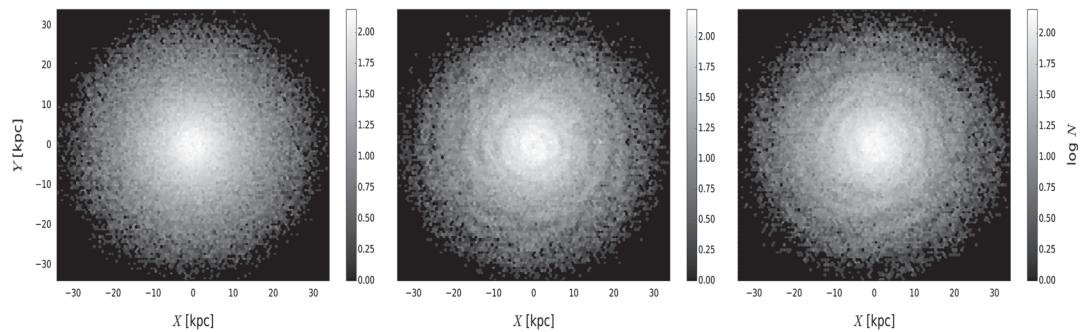
izolaciji. Jačina prečage se nije promenila. To je u skladu sa ranijim radovima (Lang *et al.* 2014), u kojima je potvrđeno da pri retrogradnoj rotaciji primarne galaksije ne dolazi do uticaja perturbatora na formiranje prečage u primarnoj galaksiji.

Možemo da zaključimo (slike 10 i 11) da je formirana prečaga intenzivnija što je perturbator prošao na manjem rastojanju od primarne galaksije i što je masa perturbatora veća (slika 8). Prečaga je jača ukoliko primarna galaksija rotira u direktnom smeru (slike 8 i 9) nego u retrogradnom.

Mapa galaktičkog diska u xy ravni

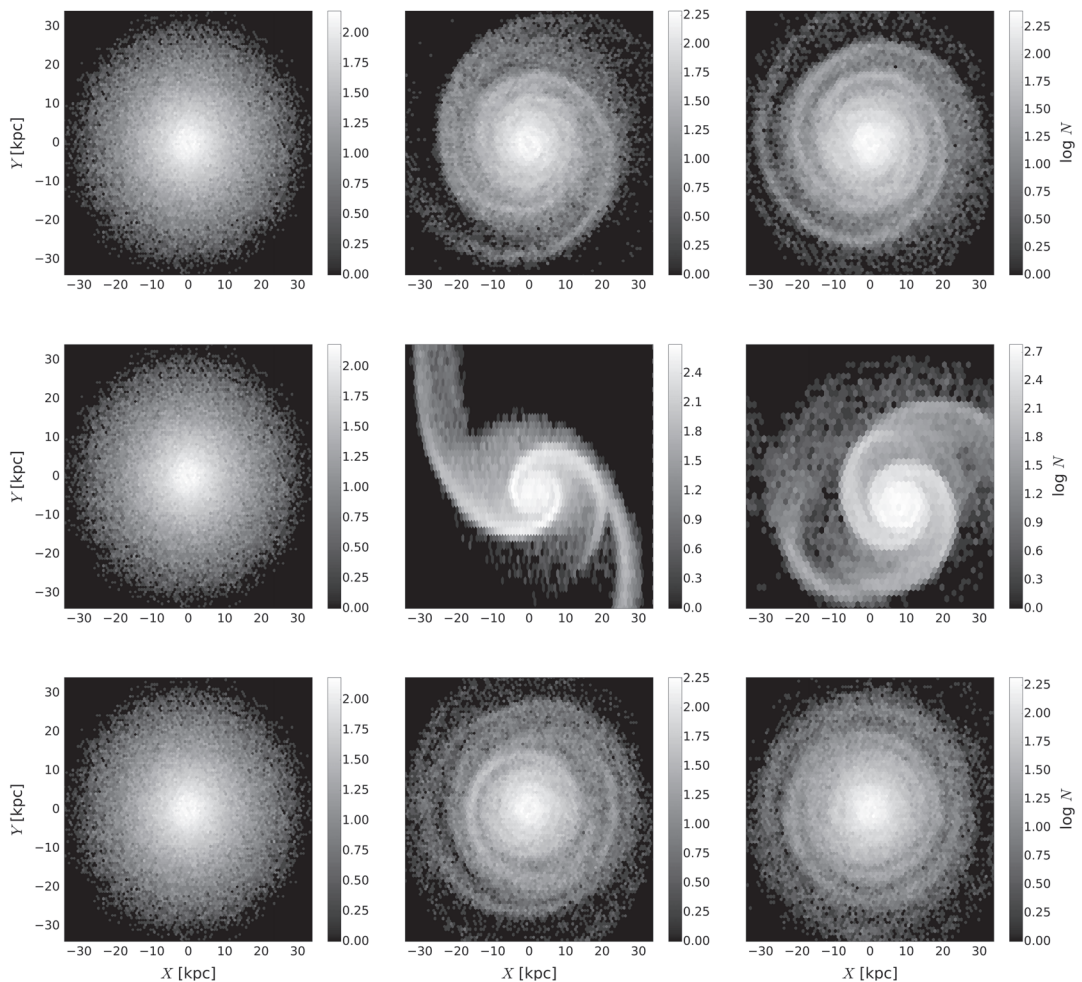
Projekcija diska primarne galaksije u xy ravni daje realan izgled diska galaksije i informaciju o tome da li se pored prečage stvorila i neka dodatna struktura, poput spiralnih grana. Za svaki grafik je centar mase diska stavljen u koordinatni početak, a skala boja predstavlja logaritam broja čestica na odgovarajućem polju.

Mapa diska u xy ravni prikazana je na slikama 13, 14 i 15. Izbor vremenskih trenutaka odgovara izboru vremenskih trenutaka za prikaz gradijenta gustine u različitim slučajevima bliskog prolaza i izolacije.



Slika 13. Mapa diska galaksije u izolaciji za vremenske trenutke $T = 0$, $T = 2.5$ i $T = 5$ milijardi godina.

Figure 13. Map of galactic disk in isolation for $T = 0$, $T = 2.5$ and $T = 5$ billions of years.

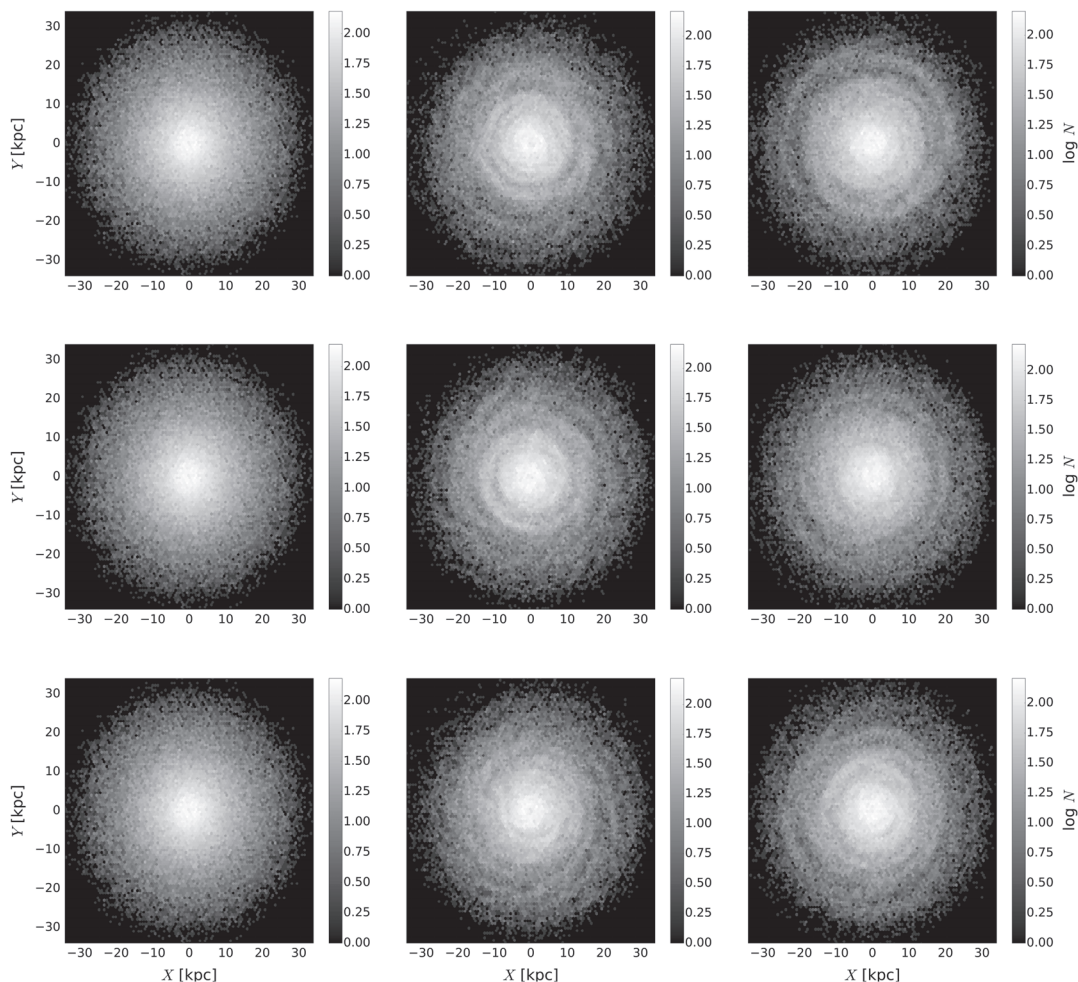


Slika 14. Mapa diska galaksije za slućajeve: Ia (gore), Ib (sredina) i Ic (dole), za vremenske trenutke $T = 0$, $T = 2.5$ i $T = 5$ milijardi godina.

Figure 14. Map of galactic disk for cases: Ia (top), Ib (middle), Ic (bottom), for $T = 0$, $T = 2.5$ and $T = 5$ billions of years.

Disk galaksije u početnom trenutku je sime-triĉan u xy ravni i preĉaga se ne uoĉava. U slućaju izolacije (slika 13) kao i u slućaju II (slika 15), u disku se ne uoĉavaju spiralne grane. U slućaju Ib (slika 14 sredina) se javljaju dve izraţene spir-alne grane i u sredini i na kraju simulacije, kao i najverovatnije preĉaga izmeĉu njih, koja se teško uoĉava pri ovom prikazu.

U slućajevima Ia i Ib bliskih prolaza preĉaga postaje većeg intenziteta u odnosu na izolaciju što je konzistentno sa analizom parametra A_2 tih slućajeva (slika 8). Za slućaj II bliskog prolaza se ne uoĉava jasna preĉaga izmeĉu spiralnih grana (slika 15), što je u skladu sa parametrom A_2 za te slućajeve (slika 9), koji ne odstupa od slućaja ga-laksije u izolaciji.



Slika 15. Mapa diska galaksije za slućajeve: I Ia (gore), I Ib (sredina), I Ic (dole), za vremenske trenutke $T = 0$, $T = 2.5$ i $T = 5$ milijardi godina.

Figure 15. Map of galactic disk for cases: I Ia (top), I Ib (middle), I Ic (bottom), for $T = 0$, $T = 2.5$ and $T = 5$ billions of years.

Zaključak

U radu je ispitan uticaj bliskog prolaza na formiranje prećage u spiralnoj galaksiji pomoću simulacija N tela.

Prećaga se formira i održava u slućaju Ib, u kojem je perturber spiralna galaksija, a rotacija primarne galaksije je direktna. U slućaju II, koji odgovara većem rastojanju primarne galaksije i perturbera, formira se prećaga koja se ne razli-

kuje od prećage primarne galaksije u izolaciji, zbog premalog uticaja galaksija jedne na drugu. Prećaga se u slućaju retrogradne rotacije spiralne galaksije (slućajevi Ic i I Ic) ne razlikuje od prećage formirane u izolaciji. Ovim je potvrđen rezultat ranijih radova (Lang *et al.* 2014).

Do formiranja prećage dolazi i kada je perturber patuljasta sferoidna galaksija, slućajevi Ia i I Ia, ali se u slućaju I Ia ona ne razlikuje od izolacije. Velićina perturbera, u slućaju kada su

galaksije na malim rastojanjima, utiče na jačinu prečage. U slučaju I bliskog prolaza stvaraju se spiralne grane u primarnoj galaksiji. Iz ovog se može izvesti zaključak da ukoliko neka galaksija već poseduje prečagu, ona postaje izraženija pri manjem parametru sudara, masivnijem perturbu i direktnoj rotaciji primarne galaksije.

U simulacijama su korišćene galaksije sa brojem čestica reda veličine 10^5 , što je za red veličine manje od broja čestica korišćenih u ostalim radovima (Lang *et al.* 2014). Model spiralne galaksije korišćen u našem radu ima prečagu u izolaciji, što nije slučaj u pomenutim radovima. Potrebno je ispitati i slučajeve bliskog prolaza u kojem primarna galaksija u izolaciji nema prečagu da bi se potvrdilo da bliski prolaz, ne samo da pojačava intenzitet prečage, već je i stvara. Poboljšanje modela galaksija bi se ogledalo u većoj rezoluciji, tj. većem broju čestica u simulaciji, što bi obezbedilo detaljniju analizu prečage i njeno lakše uočavanje. Više simulacija bi obezbedilo bolje mapiranje prostora parametara, pre svega kada su u pitanju udaljenosti na kojima prolazi perturbu i masa perturbu.

Literatura

Athanassoula E., Lambert J. C., Dehnen W. 2005. Can bars be destroyed by a central mass concentration? I. Simulations. *MNRAS*, **363**: 496.

Berentzen I., Athanassoula E., Heller C. H., Fricke K. J. 2004. The regeneration of stellar bars by tidal interactions. Numerical simulations of fly-by encounters. *MNRAS*, **347**: 220.

Bovin V., Courbin F., Suyu S. H., Marshall P. J., Rusu C. E., Sluse D., Tewes M., Wong K. C., Collett T., Fassnacht C. D., Treu, T. 2017. H0LiCOW V. New COSMOGRAIL time delays of HE 0435-1223: H_0 to 3.8% precision from strong lensing in a flat Λ CDM model. *MNRAS*, **465**: 4914.

Carroll B. W., Ostlie D. A. 2006. *An Introduction to Modern Astrophysics* (2nd Edition). London: Pearson

Dehnen W., Read J. I. 2011. N-body simulations of gravitational dynamics. *The European Physical Journal Plus*, **126** (5): 55.

Geehan J. J., Fardal M. A., Babul A., Guhathakurta P. 2006. Investigating the Andromeda stream – I. Simple analytic bulge-disc-halo model for M31. *MNRAS*, **366**: 996.

Gerin M., Combes F., Athanassoula E. 1990. The influence of galaxy interactions on stellar bars. *Astronomy and Astrophysics*, **230**: 37.

Hernquist L. 1990. An analytical model for spherical galaxies and bulges. *Astrophysical Journal*, **356**: 359.

Kazantzidis S., Lokas E. L., Callegari S., Mayer L., Moustakas L. A. 2011. On the efficiency of the tidal stirring mechanism for the origin of dwarf spheroidals: dependence on the orbital and structural parameters of the progenitor disk dwarfs. *Astrophysical Journal*, **726**: 98.

Kujiken K., Dubinski J. 1995. Nearly self-consistent disc-bulge-halo models for galaxies. *MNRAS*, **277**: 1341.

Lang M., Holley-Bockelmann K., Sinha M. 2014. Bar formation from galaxy flybys. *Astrophysical Journal Letters*, **790**: L33.

Miwa T., Noguchi M. 1998. Dynamical properties of tidally induced galactic bars. *Astrophysical Journal*, **499**: 149.

Navarro J. F., Frenk C. S., White S. D. M. 1996. The structure of cold dark matter halos. *Astrophysical Journal*, **462**: 563.

Noguchi M. 1987. Close encounter between galaxies – II. Tidal deformation of a disc galaxy stabilized by massive halo. *MNRAS*, **228**: 635.

Romano-Diaz E., Sholsman I., Heller C., Hoffman Y. 2008. Disk evolution and bar triggering driven by interactions with dark matter substructure. *Astrophysical Journal*, **687**: L13.

Sadoun R., Mohayaee R., Colin J. 2014. A single-merger scenario for the formation of the giant stream and the warp of M31. *MNRAS*, **442**: 160.

Shen J., Sellwood J. A. 2004. The destruction of bars by central mass concentrations. *Astrophysical Journal*, **604**: 614.

Springel V. 2005. The cosmological simulation code GADGET-2. *MNRAS*, **364**: 1105.

Widrow L. M., Dubinski J. 2005. Equilibrium disk-bulge-halo models for the milky way and Andromeda galaxies. *Astrophysical Journal*, **631**: 838.

Widrow L. M., Pym B., Dubinski J. 2008. Dynamical blueprints for galaxies. *Astrophysical Journal*, **679**: 1239.

Matija Dodović

Theoretical Analysis of Bar Formation in Spiral Galaxies Due to Flybys of Two Galaxies

In this paper we investigated how the flybys of two galaxies may have influence on forming bars and their characteristics using N-body simulations. Models of a spiral and a dwarf spheroidal galaxy were used. We tested several cases of flybys, with different distances, rotation of galaxies and their morphological types. To investigate the

strength of the bar, A_2 parameter, which is the ratio of $\Phi_{m=2}$ ($m = 2$ is a second term of potential, represented in spherical harmonics) and the whole potential of the galactic disc, is calculated. Simulations lasted 5 billions years, for each case. We constructed density profiles of the disk for different position angles in order to check the position of the bar. In the case of a flyby of two spiral galaxies, the bar was stronger than in isolation, unlike the flyby with a dwarf. If the rotation of the spiral galaxy is direct, the bar will be formed, but in the case of retrograde rotation its strength will not be stronger than in isolation. Spiral arms are formed in case of a small impact parameter.

