

Mogući scenario nastanka Velikog južnog toka u galaksiji M31

Cilj ovog rada je ispitivanje nastanka Velikog južnog toka u galaksiji M31 (Andromeda) pomoću semianalitičkih i numeričkih simulacija sudara Andromede i patuljaste galaksije koja je njen satelit. U semianalitičkom slučaju, Andromeda je predstavljena kao halo tamne materije, dok je patuljasta galaksija predstavljena česticom koja ima masu istu kao masa cele galaksije. Upoređivanjem slučaja sa i bez barionske materije, utvrđeno je da su odstupanja u trajektoriji čestice zanemarljiva, pa je zbog toga aproksimacija analitičkog modela Andromede kao tamnog haloa opravdana. U semianalitičkom slučaju izvršene su dve simulacije, sa i bez uključivanja uticaja dinamičkog trenja, dok u trećem slučaju čestica prolazi kroz Andromedu, koja je predstavljena sistemom N-tela. Dinamičko trenje je uračunato pomoću Čandrasekarove jednačine za ubrzanje tela. Drugi cilj ovih simulacija je procena mase satelita, zbog zahteva da satelit prođe kroz oblast u kojoj danas posmatramo Veliki južni tok (tj. kroz posmatračka polja). Izvršene su numeričke simulacije u kojima su i satelit i Andromeda reprezentovani kao sistemi N-tela. Prilikom prolaska satelita, usled dinamičkog trenja i plimskih efekata, dolazi do rasipanja materijala i formiranja toka. Ovim simulacijama su određeni dinamički parametri sudara, koji su uspešno reprodukovali posmatranu orijentaciju toka, prostornu dubinu (udaljenost od centra Andromede), kao i merene radialne brzine duž toka.

Uvod

Posmatranjima koja su izvršena početkom prošle decenije otkrivena je struktura zvezda u galaksiji Andromeda (M31), koju danas zovemo Veliki južni tok (Ibata *et al.* 2001, 2005, 2007; Zucker *et al.* 2004; Richardson *et al.* 2008). Fotometrijskom analizom zračenja zvezda u Toku, zaključeno je da one nisu iste kao druge zvezde u M31 (Ibata *et al.* 2001; Ferguson *et al.* 2002; Fardal *et al.* 2007), a simulacijama je potvrđeno da je Tok mogao da nastane sudarom Andromede i njenog satelita – patuljaste galaksije.

Matija Dodović (1999),
Valjevo, Petička 20,
učenik 4. razreda
Valjevske gimnazije

Predrag Despotović,
Novi Sad, Milice
Stojadinović Srпкиnje 4,
učenik 4. razreda
Gimnazije Jovan
Jovanović Zmaj u
Novom Sadu

MENTORI:

Stanislav Milošević,
Matematički fakultet
Univerziteta u Beogradu

Ivana Bešlić,
Matematički fakultet
Univerziteta u Beogradu

Analizom struktura nastalih sudarom galaksija moguće je rekonstruisati scenario sudara i odrediti osobine galaksija koje su učestvovala u sudaru. Prethodni radovi najčešće ispituju dva moguća načina nastanka ovog toka. Prvi način je veliki sudar koji se desio pre nekoliko milijardi godina (Sadoun *et al.* 2014), dok je drugi način manji sudar, pre manje od milijardu godina (Fardal *et al.* 2007). Ova druga varijanta nije diskutovana u našem radu, jer podrazumeva kosmološki manje verovatan scenario, kao i patuljastu galaksiju bez tamne materije.

Andromeda je nama najbliža velika spiralna galaksija (udaljenost oko 780 kpc, Sadoun *et al.* 2014), i samim tim pogodna je za izučavanje, upravo zbog dostupnih posmatračkih podataka. Po morfologiji je slična Mlečnom putu, nalazi se u Lokalnoj grupi, pa je ispitivanje dinamičke evolucije ove galaksije i njenih satelita značajno za razumevanje dinamike Lokalne grupe.

Pored parametara sudara i karakteristika patuljaste galaksije u ovom radu je ispitan i efekat dinamičkog trenja, koji može imati veliki uticaj na kretanje čestice u sistemu N-tela (Boylan-Kolchin *et al.* 2013). Dinamičko trenje je fizička pojava koja se javlja kada se telo kreće kroz okolni sistem tela. Pri njegovom prolasku, usled gravitacionog delovanja između tog tela i sistema tela kroz koji se kreće, dolazi do preraspodele kinetičke energije i ugaonog momenta. Tela iz sistema stvaraju lokalno zgušnjene u prostoru oko trajektorije tela u tranzitu, pa će ga gravitaciono privlačiti, tj. usporavati. Telo vremenom gubi svoju kinetičku energiju i ugaoni moment, odnosno predaje ga okolnim telima. Efekat dinamičkog trenja se manifestuje kao gubitak energije tela i smanjenje radijusa njegove putanje sa vremenom. Dinamičko trenje se analitički računa pomoću Chandrasekarove formule (Chandrasekhar 1943a). Energija i radijus putanje tela, odnosno čestice („česticom” dalje nazivamo objekat u simulaciji koji reprezentuje određenu količinu mase galaksije, ili celu galaksiju, zavisno od slučaja) upoređivani su u različitim slučajevima, radi ispitivanja mogućnosti korišćenja date formule. Uračunavanje dinamičkog trenja u simulacijama upada čestice u analitički model Andromede omogućava da se sistem realnije opiše (Velayquez *et al.* 1999; Jiang i Binney 2000).

U simulaciji kretanja čestice u gravitacionom polju Andromede, koja je predstavljena analitičkim modelima, sa računatim efektom dinamičkog trenja, čestica ima masu jednaku masi patuljaste galaksije, dok njena putanja odgovara putanji centra mase patuljaste galaksije. Ovim simulacijama je određen opseg mogućih masa satelita Andromede koji stvara Tok. Osim toga, izvršene su simulacije sudara Andromede i patuljaste galaksije, pri čemu su oba sistema predstavljena sistemom N-tela. Ove simulacije su izvršene u cilju ispitivanja morfologije toka (odnosno njegove orijentacije i prostorne dubine) i određivanja vrednosti radijalnih brzina duž toka. Patuljasta galaksija je modelovana kao sferoidna, odnosno bez diska (dSph), što sugerišu i raniji radovi (Sadoun *et al.* 2014).

Metod

Dinamičko trenje

Efekat dinamičkog trenja je opisan u radu Subramanijana Čandra-sekara (Chandrasekhar 1943), gde je izračunato ubrzanje masivne čestice koja prolazi kroz sistem čestica. U ovom radu je korišćena modifikacija ove formule, data izrazom (Boylan-Kolchin *et al.* 2013):

$$\frac{d}{dt} \vec{v}_{\text{orb}} = -4\pi G^2 \ln \Lambda M_{\text{sat}} \rho_{\text{sat}}(v_{\text{orb}}) \frac{\vec{v}_{\text{orb}}}{v_{\text{orb}}^3} \quad (1)$$

u kojoj je M_{sat} masa satelita koji se kreće brzinom v_{orb} , $\ln \Lambda$ predstavlja Kulonov logaritam, koji je dat izrazom (Binney i Tremaine 1996):

$$\ln \Lambda = \ln \left(\frac{b_{\text{max}}}{\max\{r_h, (GM_{\text{sat}})/v_{\text{typ}}^2\}} \right)$$

gde je b_{max} tzv. maksimalni parametar sudara, za koji je uzet radijus putanje na kojoj se nalazi čestica, i on se menja u zavisnosti od položaja čestica. r_h je radijus na kom je masa sistema tela jednaka polovini ukupne mase tog sistema, a v_{typ} je karakteristična brzina sistema, za šta se uzima koren disperzije brzina čestica, $v_{\text{typ}} = \sigma$. Disperzija brzina se može izraziti kao (Penarrubia i Benson 2005):

$$\sigma^2 = \frac{1}{\rho(r)} \int_{\infty}^r \rho(r') f_h(r') dr' \quad (2)$$

U relaciji (2) $\rho(r)$ predstavlja profil gustine sistema za koji se računa disperzija brzina. Gravitaciona sila koja deluje na česticu na radijusu r je upravo r_h , koja se izračunava kao (*ibid.*):

$$f(r) = \frac{-GM(r_{\text{vir}})}{r^2} \frac{\ln\left(1 + \frac{r}{r_h}\right) - \frac{r}{r+r_h}}{\ln\left(1 + \frac{r_{\text{vir}}}{r_h}\right) - \frac{r_{\text{vir}}}{r_{\text{vir}}+r_h}}$$

gde $M(r_{\text{vir}})$ predstavlja masu unutar virijalnog radijusa galaksije (koja u našem modelu iznosi približno 200 kpc), a r_h predstavlja skalu dužine odgovarajuće komponente.

U izrazu za dinamičko trenje, relacija (1), predstavlja gustinu čestica sistema koji imaju manju brzinu od brzine kretanja satelita. Ova gustina se izračunava kao (Penarrubia i Benson 2005):

$$\rho_{\text{host}}(v_{\text{orb}}) = \rho(r) \left[\text{erf}(X) - \frac{2X}{\sqrt{\pi}} e^{-X^2} \right]$$

u kojoj je, kao i u izrazu (2), $\rho(r)$ odgovarajući profil gustine sistema čestica, a $X = v_{\text{orb}} / (\sqrt{2}\sigma)$, gde je σ dato relacijom (2).

Simulacije

U radu su izvršene sledeće simulacije

I Semianalitičke simulacije

- 1.1. Čestica i analitički potencijal Andromede bez dinamičkog trenja
- 1.2. Čestica i analitički potencijal Andromede sa dinamičkim trenjem
- 1.3. Čestica i numerički potencijal Andromede

II Numeričke simulacije

- 2.1. Patuljasta galaksija bez diska i Andromeda

Semianalitičkim simulacijama je prikazano kretanje čestice u analitičkom i numeričkom potencijalu Andromede. U simulacijama 1.1 i 1.2 Andromeda je prikazana kao halo tamne materije sa NFW profilom gustine (Navarro *et al.* 1996). Masa čestice jednaka je masi patuljaste galaksije, a njeno kretanje reprezentuje kretanje centra mase te galaksije. Izvršena je i simulacija kretanja čestice u gravitacionom potencijalu Andromede koja je predstavljena sistemom N-tela. Ova simulacija daje mogućnost ispitivanja dinamičkog trenja i upoređivanja sa analitičkim modelom gde se trenje računa pomoću Čandrasekarove formule, odnosno izrazom (1).

Upoređene su putanje i ukupna energija čestice u slučajevima sa i bez dinamičkog trenja, kao i u slučaju numeričkog modela Andromede. Takođe su ispitane orijentacija i dubina toka.

Semianalitičke simulacije su izvršene i radi procene mase patuljaste galaksije koja može da formira Veliki južni tok, jer su brže od numeričkih simulacija. Donja granica vrednosti mase satelita je određena masom Velikog južnog toka, dok je gornja granica vrednosti mase tipična masa patuljaste galaksije Lokalne grupe. Masa čestice je iz intervala (10^{10} , 10^{11}), sa korakom od 10^9 masa Sunca.

U drugoj grupi simulacija koje su izvršene, i Andromeda i patuljasta galaksija su sistemi N-tela. Masa patuljaste galaksije je ista kao i masa čestice iz semianalitičkog slučaja. Početna pozicija centra mase patuljaste galaksije je ista kao početna pozicija čestice u semianalitičkim simulacijama. Ove simulacije treba da reprodukuju posmatranu prostornu orijentaciju i dubinu toka, kao i radijalne brzine čestica u toku.

Modeli galaksija korišćeni u simulacijama 1.3 i 2.1 su modeli N-tela, generisani pomoću programskog paketa GalactIC-s (Kujiken i Dubinski 1995; Widrow i Dubinski 2005; Widrow *et al.* 2008). Kao model Andromede, korišćen je model spiralne galaksije, dok je za patuljastu korišćen model patuljaste sferoidne galaksije (bez diska), mase $4.42 \cdot 10^{10}$ masa Sunca. Korišćeni modeli su isti kao i u radu Dodović 2017.

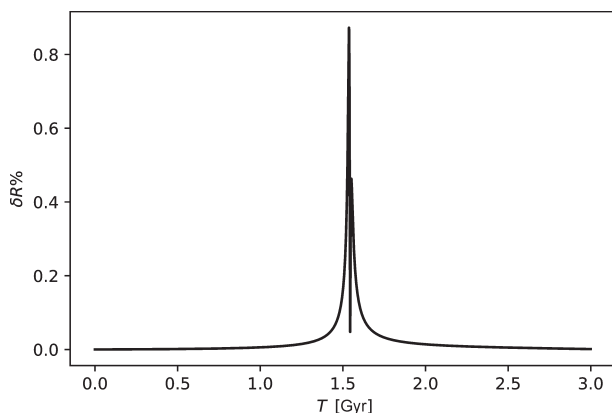
Simulacija sudara Andromede i patuljaste galaksije izvršena je u programskom paketu Gadget (Springel 2005). Centar mase Andromede je postavljen u centar koordinatnog sistema. Početna pozicija patuljaste galaksije (u svim slučajevima) je preuzeta iz rada (Sadoun *et al.* 2014):

$$x = -84.41 \text{ kpc}, y = 152.47 \text{ kpc}, z = -97.08 \text{ kpc}$$

Početna brzina je nula, a kretanje je uzrokovano samo gravitacionom silom.

Rezultati

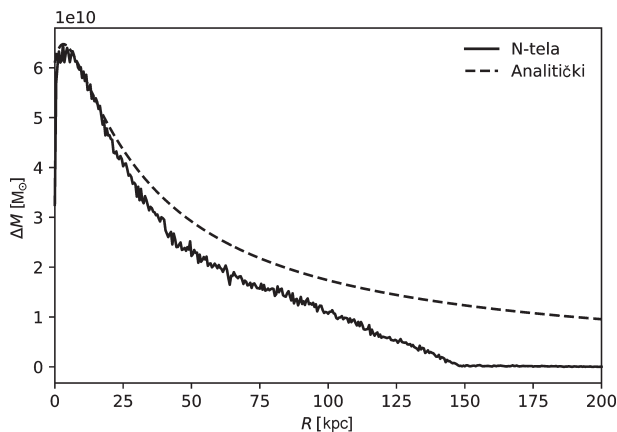
U simulacijama 1.1 i 1.2 Andromeda je predstavljena kao sferno simetrični halo tamne materije. Na slici 1 je prikazan relativni odnos radijusa putanje čestice u tom slučaju i za slučaj kada je, pored haloa, uključen disk i centralni oval (barionska materija). Odstupanje radijusa putanje čestice u ova dva slučaja je ispod jednog procenta, što znači da je aproksimacija predstavljanja analitičkog potencijala Andromede samo pomoću tamnog halo-a opravdana.



Slika 1. Relativni odnos radijusa putanje čestice (u procentima) za slučaj kada model Andromede čine disk, centralni oval i halo tamne materije i u slučaju kada je model predstavljen samo kao halo tamne materije.

Figure 1. Ratio of radii of trajectories of the particle (in percentage) in the case of Andromeda represented with disc, bulge and dark matter halo compared to the case in which Andromeda is represented with a dark matter halo.

Pri realizaciji simulacije 1.3 i 2.3 korišćen je numerički model Andromede koji ima istu masu kao i analitički koji je korišćen u simulacijama 1.1 i 1.2. Upoređen je profil mase ova dva modela, što je prikazano na slici 2. Do razlike na većim udaljenostima od centra dolazi zbog činjenice da se analitički model prostire u beskonačnost. Na manjim radijusima profili mase ova dva modela se poklapaju.



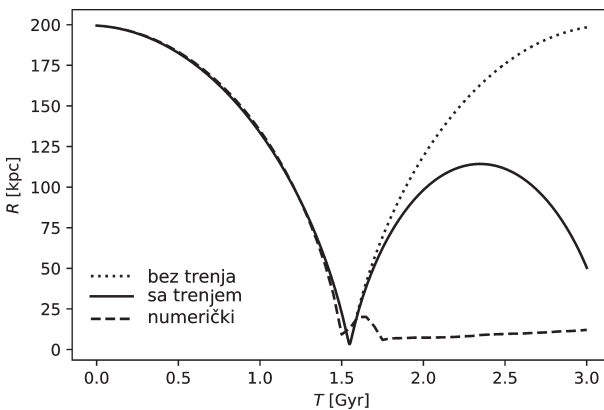
Slika 2. Zavisnost mase od radijusa u slučaju analitičkog potencijala i numeričkog modela Andromede.

Figure 2. Mass profile in the cases of analytical and numerical representation of Andromeda.

Semianalitičke simulacije

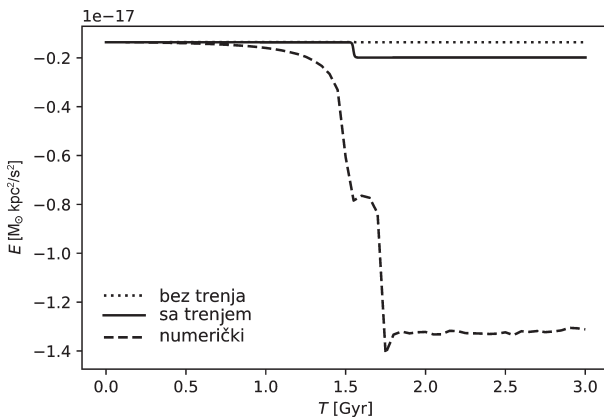
Izvršeno je ispitivanje uticaja dinamičkog trenja, datog izrazom (1). Na slikama 3 i 4 su prikazani radijus putanje i energija čestice u funkciji od vremena, respektivno, za slučajeve sa i bez uključenog dinamičkog trenja. Ispitivanju je dodat i slučaj kada je Andromeda predstavljena numeričkim modelom.

U slučaju kada dinamičko trenje nije uključeno radijus putanje čestice se periodično menja, za razliku od slučaja kada je ono uključeno, kada se maksimalni radijus putanje čestice smanjuje sa vremenom, što je u skladu sa nekim ranijim radovima (Taylor i Babul 2001; Van den Bosh *et al.* 1999). Kada je numerički potencijal u pitanju, javlja se nagli pad radijusa putanje. Putanje se, u sva tri slučaja, do ~ 1.5 milijardi godina poklapaju, što znači da pri prolasku kroz centralni deo galaksije dolazi do najveće preraspodele energije. Promena energije (slika 4) u slučaju dinamičkog trenja i numeričkog potencijala (slučajevi 1.2 i 1.3) se javlja u vremenskim trenucima oko ~ 1.5 milijardi godina, što odgovara trenutku prolaska kroz centralni deo galaksije. U slučaju sa dinamičkim trenjem energija se smanji oko dva puta u odnosu na energiju u slučaju bez dinamičkog trenja. U



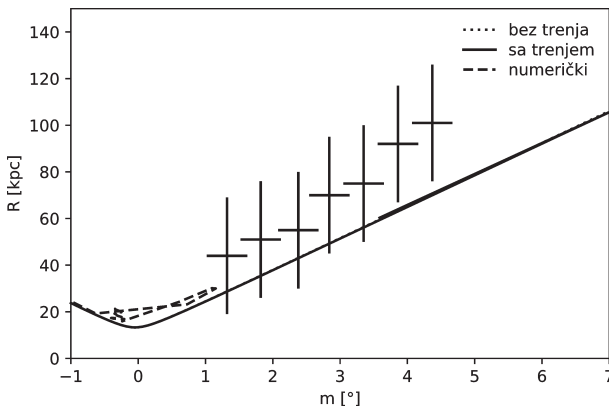
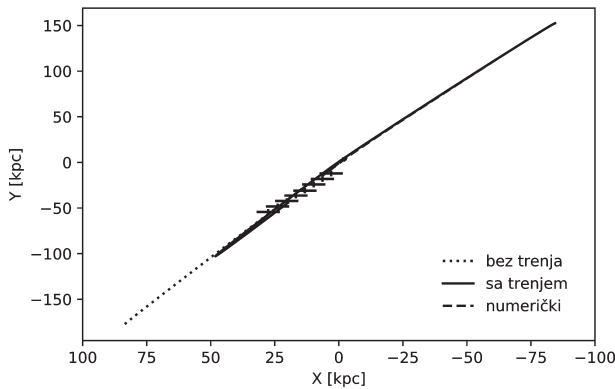
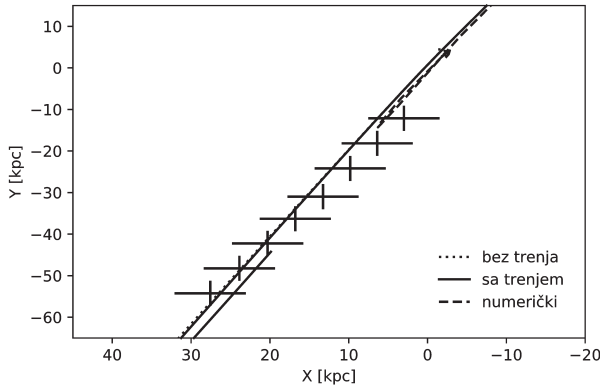
Slika 3. Zavisnost radijusa putanje čestice od vremena, u analitičkom modelu Andromede sa i bez uticaja dinamičkog trenja i u slučaju numeričkog modela Andromede.

Figure 3. Evolution of the radius of trajectory of the particle in time, in the case of the analytical model of Andromeda with (full line) and without (dotted line) dynamical friction and in the case of the numerical model (dashed line) of Andromeda.



Slika 4. Zavisnost ukupne energije čestice od vremena, u analitičkom modelu Andromede sa i bez uticaja dinamičkog trenja i u numeričkom modelu Andromede.

Figure 4. Change of the total energy of the particle in time, in the case of the analytical model of Andromeda with (full line) and without (dotted line) dynamical friction and in the case of the numerical model (dashed line) of Andromeda.



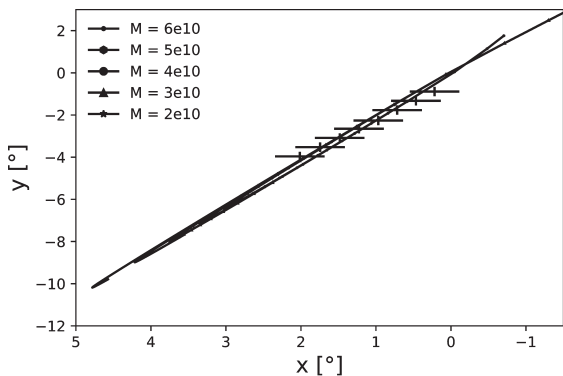
Slika 5. Trajektorija čestice (gore) i zumirani deo trajektorije gde su prikazana posmatračka polja krstićima (McConnachie *et al.* 2003), odnosno oblast u kojoj danas posmatramo Veliki južni tok (dole). Centar Andromede je u centru koordinatnog sistema, ali Andromeda nije prikazana, radi preglednosti.

Figure 5. Particle trajectory (above) and zoomed trajectory with observed fields, (crosses on the figure) (McConnachie *et al.* 2003), of the Giant Southern Stream (below). The center of Andromeda is in the center of the coordinate system, but Andromeda is not presented because of the transparency. Dotted line – without friction; full line – with friction; dashed line – numerical model.

Slika 6. Udaljenost čestice od centra Andromede – prostorna dubina toka. Na x -osi je koordinata duž toka, dok y -osa predstavlja udaljenost od centra Andromede. Krstićima su predstavljena posmatračka polja preuzeta iz McConnachie *et al.* 2003.

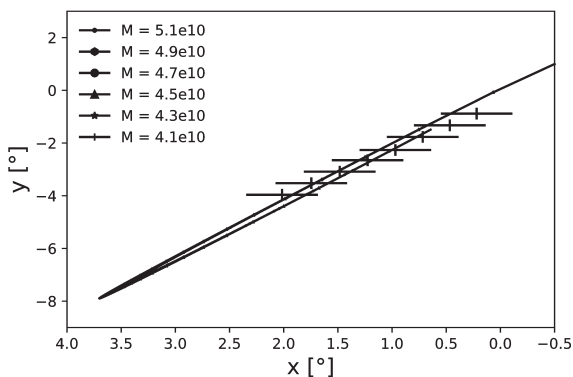
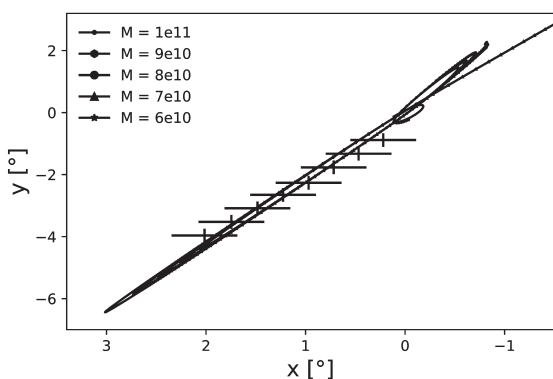
Figure 6. The distance of the particle from the center of Andromeda – spatial depth of the stream. The coordinate along the stream is represented on the x -axis, while the distance from the center of Andromeda is on the y -axis. Observed fields are presented with crosses (McConnachie *et al.* 2013). Line markings same as above.

numeričkom potencijalu, energija je nakon 3 milijarde godina za red veličine manja od energija u slučajevima 1.1 i 1.2, što je konzistentno sa promenom radijusa, i u saglasnosti je sa rezultatima u prethodnim radovima (Fujii *et al.* 2006; Binney i Tremaine 2008).



Slika 7. Trajektorija čestice u simulaciji analitičkog potencijala Andromede sa uključenim efektom dinamičkog trenja za različite mase čestice.

Figure 7. Trajectory of the particle in simulations of the analytical model of Andromeda with dynamical friction for different particle masses.



Ispitana putanja čestica prikazana je na slici 5. Da bi se proverila validnost modela, potrebno je da čestica prođe kroz posmatračka polja čije su koordinate definisane u ravni u kojoj je Veliki južni tok posmatran.

U slučaju analitičkog modela Andromede, čestica prolazi kroz posmatračka polja i nastavlja dalje kretanje. Kada je uključeno dinamičko trenje, nakon ~50 kpc se javlja promena smera kretanja, i čestica se vraća ka posmatračkim poljima. U slučaju kada je Andromeda predstavljena sistemom N-tela, čestica dolazi do prvog posmatračkog polja i tu menja smer kretanja ka centru galaksije, da bi u tom regionu ostala do kraja simulacije. Radijus

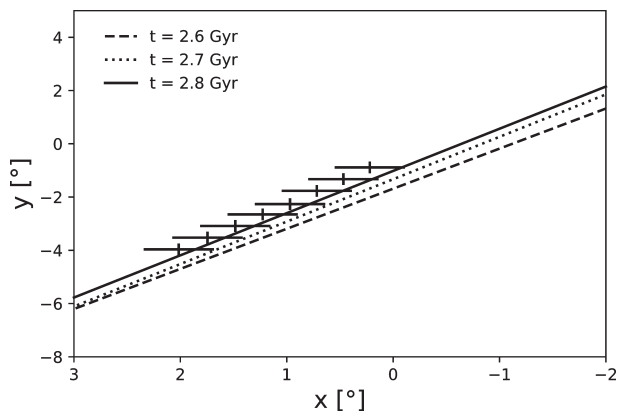
putanje čestice je konzistentan u sva tri slučaja sa rezultatima dobijenim za zavisnost radijusa i energije od vremena. Simulacije 2.1 nisu uspele da reprodukuju prostornu dubinu toka (slika 6). Razlog za to leži u činjenici da kod analitičkog modela Andromede čestica usporava pod uticajem dinamičkog trenja, ali promena sistema se ne vidi (zbog analitičke reprezentacije). U slučaju numeričkog modela, čestica pri prvom prolasku kroz sistem izvrši prostornu preraspodelu čestica. Efekat usporenja je izraženiji nego u slučaju 1.2 (što je konzistentno sa energijom, slika 4), što dovodi da čestica ne napušta centralni deo Andromede (što je u saglasnosti sa promenom radijusa putanje čestice, slika 3).

Masa patuljaste galaksije

Radi dobijanja opsega masa patuljaste galaksije koja može da reprodukuje Veliki južni tok, izvršene su simulacije kretanje čestice u analitičkom potencijalu Andromede, sa uključenim efektom dinamičkog trenja. Na slici 7 se nalaze trajektorije čestice za različite mase. Mase čestica su bile u rasponu, od $2 \cdot 10^{10}$ do 10^{11} masa Sunca, u prvom slučaju i od $4.1 \cdot 10^{10}$ do masa Sunca, u drugom slučaju. Korak za povećavanje je bio $0.2 \cdot 10^{10}$ masa Sunca. Čestice masa između $4 \cdot 10^{10}$ i $5 \cdot 10^{10}$ masa Sunca prolaze kroz posmatračka polja na način kojim se formira tok, što je prikazano na slici 7. Mase veće od 10^{11} masa Sunca nisu ispitane, jer te vrednosti ne odgovaraju masama satelita Andromede (Mateo 1998), dok manje mase nisu ispitane zbog ograničenja mase Velikog južnog toka (Sadoun *et al.* 2014).

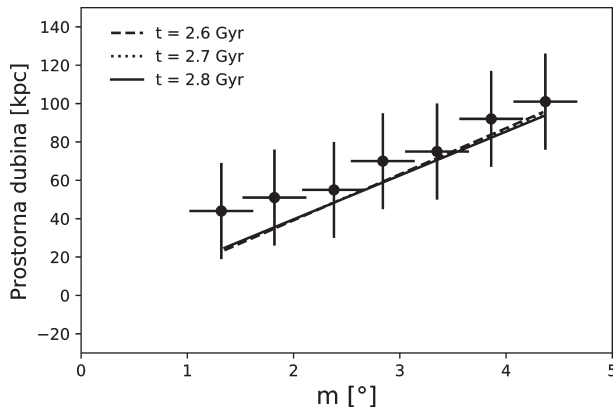
Numeričke simulacije

Glavni parametri koji su korišćeni prilikom poređenja rezultata numeričkih simulacija sa posmatračkim podacima su orijentacija toka, radijalne brzine čestica i udaljenost delova toka u odnosu na centar Andromede, tj. prostorna dubina. Numerička simulacija je korišćena za potvrdu scenarija sudara Andromede i patuljaste galaksije bez diska, i na slikama 8, 9, 10 prikazano je poređenje modela sa posmatračkim podacima (tačke na ovim slikama su posmatrački podaci sa greškama) koji su preuzeti iz rada



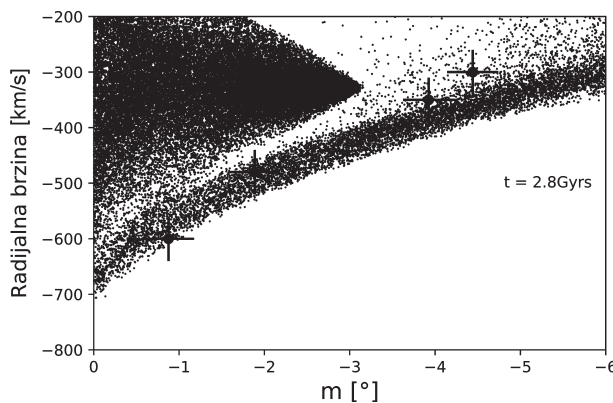
Slika 8. Orijentacija toka u numeričkom modelu za vremenske trenutke $T = 2.6-2.8$ milijardi godina. Vrednosti za svako posmatračko polje su usrednjene.

Figure 8. Orientation of the stream from the numerical model of Andromeda for $T = 2.6-2.8$ billions of years. Values for every observed field are averaged.



Slika 9. Dubina toka u numeričkom modelu za vremenske trenutke $T = 2.6\text{--}2.8$ milijardi godina. Vrednosti za svako posmatračko polje su usrednjene.

Figure 9. Depth of the stream for the numerical model of Andromeda for $T = 2.6\text{--}2.8$ billions of years. Values for every observed field are averaged.



Slika 10. Radijalna brzina za vremenski trenutak $T = 2.8$ milijardi godina. Posmatrački podaci, predstavljeni krstićima, preuzeti su iz rada Ibata *et al.* 2004.

Figure 10. Radial velocity for $T = 2.8$ billions of years. Observed fields are presented with crosses (Ibata *et al.* 2014).

McConnachie *et al.* 2003. Na x -osi na slikama 9 i 10 je prikazana koordinata duž toka.

Orijentacija toka je reprodukovana za vreme trajanja sudara između 2.6 i 2.8 milijardi godina (slika 8), što je slučaj i sa prostornom dubinom toka (slika 9). Vrednosti radijalnih brzina sugerišu da je vremenski interval sudara 2.8 milijardi godina (slika 10). Ovi rezultati su u saglasnosti sa ranijim procenama i scenarijom opisanim u radu (Sadoun *et al.* 2014) gde je procenjeno da je sudar bio pre 2.7 milijardi godina.

Zaključak

U ovom radu je ispitana mogućnost nastanka Velikog južnog toka pomoću semianaličkih i numeričkih simulacija sudara Andromede i njenog satelita. Semianaličke simulacije, sa i bez uticaja dinamičkog trenja (1.1 i 1.2), izvršene su sa dva cilja. Jedan cilj je bio ispitivanje opsega mase patuljaste galaksije koja je satelit Andromede, jer se ove simulacije brže izvršavaju. Drugi cilj je bio ispitivanje uticaja dinamičkog trenja. Analitičko uračunavanje dinamičkog trenja bi trebalo da obezbedi brže izvršavanje simulacije u odnosu na numeričke, a sa druge strane da da realniju, odnosno približniju realizaciju onoj koja odgovara numeričkoj simulaciji. Zbog toga

su rezultati simulacija 1.1 i 1.2 poređeni sa rezultatima simulacije 1.3, u kojoj je Andromeda predstavljena sistemom N-tela. Poređeni su promena radijusa putanje čestice i njene energije sa vremenom. Analitičkim simulacijama je utvrđen opseg masa patuljaste galaksije koja može da stvori Veliki južni tok, koja je u saglasnosti sa ranijim radovima (Sadoun *et al.* 2014; Fardal *et al.* 2007). Simulacijama 1.2 sa uključenim dinamičkim trenjem dat je opis trajektorije čestice do prvog prolaska kroz centralni deo galaksije, odnosno potvrđena je mogućnost stvaranja Velikog južnog toka, sa stanovišta orijentacije i dubine toka.

Numeričke simulacije u kojima su Andromeda i patuljasta galaksija, obe sistemi N-tela su uspešno reprodukovale orijentaciju toka, njegovu prostornu dubinu (heliocentričnu udaljenost, odnosno udaljenost od centra Andromede), kao i vrednosti radijalnih brzina u toku. Patuljasta galaksija je sferoidna (dSph), a njena masa ima vrednost dobijenu iz analitičkih simulacija kao najbolju (oko $4.4 \cdot 10^{10}$ masa Sunca). Vreme trajanja sudara je u saglasnosti sa ranijim radovima (Sadoun *et al.* 2014) i iznosi ~ 2.8 milijardi godina. Ovim radom je potvrđen najverovatniji scenario nastanka Velikog južnog toka, koji podrazumeva sudar Andromede i njenog satelita, patuljaste galaksije.

Literatura

- Binney J., Tremaine S. 2008. *Galactic dynamic* (2nd edition). New Jersey: Princeton University Press
- Boylan-Kolchin M., Chung-Pei M., Quataert E. 2008. Dynamical friction and galaxy merging time-scales. *MNRAS*, **383**: 93.
- Chandrasekhar S. 1943. Dynamical friction I. General considerations: the coefficient of dynamical friction. *Astrophysical Journal*, **97**: 255C.
- Dodović M. 2017. Teorijska analiza nastanka prečage kod spiralnih galaksija usled bliskog prolaza dve galaksije. *Petničke sveske*, **76**: 53.
- Fardal M. A., Babul A., Geehan J. J., Guhathakurta P. Investigating the Andromeda stream – II. Orbital fits for progenitor. *MNRAS*, **366**: 996.
- Ferguson A. M. N., Irwin M. J., Ibata R. A., Lewis G. F., Tanvir N. R. 2002. Evidence for Stellar Substructure in the Halo and Outer Disk of M31. *The Astronomical Journal*, **124**: 1452.
- Fujii M., Funato Y., Makino J. 2006. Dynamical Friction on Satellite Galaxies. *Publications of the Astronomical Society of Japan*, **58**: 743.
- Ibata R., Irwin M., Lewis G., Ferguson A. M. N., Tanvir N. 2001. A giant stream of metal-rich stars in the halo of the galaxy M31. *Nature*, **412**: 49.

- Ibata R., Chapman S., Ferguson A. M. N., Irwin M., Lewis G., McConnachie A. 2004. Taking measure of the Andromeda halo: a kinematic analysis of the giant stream surrounding M31. *MNRAS*, **351**: 117.
- Ibata R., Chapman S., Ferguson A. M. N., Lewis G., Irwin M., Tanvir N. 2005. On the accretion origin of a vast extended stellar disk around the Andromeda galaxy. *Astrophysical Journal*, **634**: 287.
- Ibata R., Martin N. F., Irwin M., Chapman S., Ferguson A. M. N., Lewis G. F., McConnachie A. W. 2007. The haunted halos of Andromeda and triangulum: A panorama of galaxy formation in action. *Astrophysical Journal*, **671**: 1591.
- Jiang I. G., Binney J. 2000. The orbit and mass of the Sagittarius dwarf galaxy. *MNRAS*, **314**: 468.
- Kujiken K., Dubinski J. 1995. Nearly self-consistent disc-bulge-halo models for galaxies. *MNRAS*, **277**: 1341.
- Mateo M. 1998. Dwarf galaxies of the local group. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, **36**: 435.
- McConnachie A. W., Irwin M. J., Ibata R. A., Ferguson A. M. N., Lewis G. F., Tanvir N. 2003. The three-dimensional structure of the giant stellar stream in Andromeda. *MNRAS*, **343**: 1335.
- Navarro J. F., Frenk C. S., White S. D. M. 1996. The structure of cold dark matter halos. *Astrophysical Journal*, **462**: 563.
- Penarrubia J., Benson A. J. 2005. Effects of dynamical evolution on the distribution of substructures. *MNRAS*, **364**: 977.
- Richardson C., Ferguson A. M. N., Johnson R. A., Irwin M. J., Tanvir N. R., Faria D. C., Ibata R. A., Johnston K. V., Lewis G. F., McConnachie A. W., Chapman S. C. The nature and origin of substructure in the outskirts of M31: I. surveying the stellar content with the Hubble space telescope advanced camera for surveys. *The Astronomical Journal*, **135**: 1998.
- 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.
- Springel V. 2005. The cosmological simulation code GADGET-2. *MNRAS*, **364**: 1105.
- Taylor J., Babul A. 2001. The dynamics of sinking satellites around disk galaxies: A poor man's alternative to high-resolution numerical simulations. *Astrophysical Journal*, **559**: 716.
- Van den Bosch F., Lewis F. G., Lake G., Stadel J. 1999. Substructure in dark halos: orbital eccentricities and dynamical friction. *Astrophysical Journal*, **515**: 50.

- Velazquez H., White S. D. M. 1999. Sinking satellites and the heating of galaxy discs. *MNRAS*, **304**: 254.
- 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.
- Zucker B. D., Kniazev A. Y., Bell F. E., Martinez-Delgado D., Grebel K. E., Rix H.W., *et al.* 2004. A new giant stellar structure in the outer halo of M31. *The Astrophysical Journal*, **612**: L117.

Matija Dodović and Predrag Despotović

A Possible Scenario of the Formation of the Giant Southern Stream in M31 Galaxy

In this paper we investigated the formation of the Giant Southern (or Stellar) Stream in M31 galaxy through semi-analytical and numerical simulations of the merger of Andromeda and its satellite – a dwarf galaxy. In the semi-analytical model Andromeda is represented as a dark matter halo, while the dwarf galaxy is represented as a single particle with the same mass as the whole galaxy. By comparing the models with and without baryonic matter, we determine that the discrepancies in the trajectory of the particle in these two cases are negligible, thus the approximation is useful to describe the trajectory of the satellite in the gravitational potential of Andromeda. In the semi-analytical model, we ran simulations with and without the influence of dynamical friction, while in the third case a particle passes through Andromeda, which is represented as an N-body system. Dynamical friction is implemented by Chandrasekhar's equation. The second goal of these simulations is the determination of satellite mass.

We also ran pure N-body simulations, where Andromeda and the satellite are represented as N-body systems. During the passage of the satellite, due to dynamical friction and tidal disruption, dissipation of matter occurs and the stream is formed. Using these simulations we determine the dynamical parameters of the merger which successfully reproduced the observed stream orientation, depth (distance from the center of Andromeda) as well as the measured radial velocities along the stream.

