

---

Petar Saulić

## Uticaj rotacije na formiranje plimskih repova galaksija na primeru Antena galaksija

---

*U ovom radu je ispitan uticaj smera rotacije galaksija (progradna i retrogradna rotacija) na formiranje plimskih repova prilikom sudara galaksija koristeći numeričke simulacije sudara ekvivalenta Antena galaksija (NGC 4038/4039). Ispitan je niz istorijskih modela galaksija sa akcentom na modernim tipovima modela koji se sastoje od diska, centralnog ovala i tamnog haloa sa parametrima koji odgovaraju spiralnim galaksijama. Pokazano je da je za postojanje stabilne galaksije potreban tamni halo. Dobijeno je da galaksije koje progradno rotiraju prilikom sudara imaju izraženije plimske repove, nego retrogradno rotirajuće, verovatno usled brže evolucije sudara kod potonjeg slučaja.*

---

### Uvod

Kada se dve galaksije nađu u neposrednoj blizini, u njihovim strukturama se javljaju primetne promene. Uzrok ovih promena je bila tema kojom su se bavili mnogi naučnici uključujući Cvikija (Zwicky), Flajderera i Zidentofa (Pfleiderer i Siedentopf), Voroncov-Veljaminova itd. (Toomre i Toomre 1972). Cviki je u nekoliko radova ovakve sisteme nazvao „sistemima u očiglednoj interakciji”, ali je takva tvrdnja bila toliko napredna za taj vremenski period da ju je u kasnijim radovima povukao. Rad koji je pokrenuo promenu paradigme jeste rad koji su objavili Juri i Alar Tumre (Toomre), godine 1972. (u daljem radu navođeno kao TT). U svom radu, TT postavljaju premisu da promene u stru-

kturama galaksija izaziva samo gravitaciona interakcija. Od objavljivanja ovog rada, mnogi naredni radovi prihvataju postavljenu premisu kao tačnu, tj. smatraju da galaktički „repovi i mostovi” nastaju zahvaljujući gravitacionoj interakciji između galaksija.

Svoju tvrdnju TT su pokušali da podupru modelovanjem formiranja specifičnog para galaksija pod nazivom *Antena galaksije* (NGC 4038/9). Ove galaksije su izabrane zbog svojih karakterističnih, veoma tankih i izduženih repova koji svojim oblikom podsećaju na antene insekta (slika 1). Pre ovog rada se smatralo da gravitaciona sila ne može da izazove nastanak bilo kakvih tankih formacija, već da su za to zaslužni nedovoljno poznati mehanizmi poput raznih termodinamičkih efekata, uticaja antimaterije, negativne gravitacije, negativne mase, itd. (Voroncov-Velyaminov 1962). U svom radu, Tumre i Tumre uspešno dokazuju da čisto gravitacioni efekti mogu da dovedu do formiranja tankih i izduženih formacija, ali nisu u potpunosti uspeali da reprodukuju izgled Antena galaksija. U rezultatima koji TT dobijaju dužine repova su jednake, dok se stvarni repovi tih galaksija razlikuju u dužini i više su zakrivljeni; osim toga rotaciona brzina je ista kod obe galaksije, što nije dobijeno u simulaciji. Kao moguće razloge neslaganja, TT navode nedovoljno ispitane parametre koji mogu imati značajan uticaj na rezultate, poput početne inklinacije, smera rotacije i razlike u početnim brzinama. Danas je poznato da je glavni razlog neslaganje eksperimenta sa realnosti bio nedovoljno poznavanje strukture galaksija generalno, što je direktno uticalo na to da oni imaju neprecizan i neade-

---

*Petar Saulić (1995), Subotica, Olimpijska 10b, učenik 4. Razreda Gimnazije „Svetozar Marković” u Subotici*

**MENTORI:**

*Nemanja Martinović, Astronomska opservatorija Beograd*

*Miša Jovanović, student Elektrotehničkog fakulteta Univerziteta u Beogradu*



Slika 1. Izgled Antena galaksija, Star Shadows Remote Observatory i PROMPT/CTIO

Figure 1. The Antennae galaxies, Star Shadows Remote Observatory and PROMPT/CTIO

kvatan model. U kasnijim radovima J. E. Barnes (Barnes 1988) i J. Dubinski (Dubinski *et al.* 1995) uspešno konstruišu modele pomenutih galaksija.

Naš rad je imao trojak cilj. Pošto je za izvršavanje ovakvog eksperimenta potrebno rešavanje diferencijalnih jednačina numeričkom integracijom, a takav metod neminovno dovodi do određenih odstupanja od realnog slučaja, tj. do nepreciznosti same integracione šeme. Prva sekcija našeg rada se bavi određivanjem uticaja integracione šeme na same rezultate dobijene simulacijom. Model galaksija kao i sama postavka simulacije je ista kao u radu TT, i detaljnije je objašnjena dalje u radu.

U drugom delu našeg rada je simulacija iz rada TT izmenjena tako da početne brzine galaksija, kao i njihove inklinacije, smer rotacije, i mase, ostanu iste, ali je ovaj put korišćen znatno napredniji model koji se sastoji od centralnog ovala, diska, i haloa tamne materije. Pokazano je da model bez haloa tamne materija ne može da ostane stabilan. Ovakav model nije postojao u vreme izrade rada TT, prvenstveno zbog nedovoljnog poznavanja same prirode galaksija, kao i fizičkih zakona koji u njima vladaju. Naše očekivanje je bilo da će napredniji model dati rezultate mnogo više nalik na realne Antena galaksije.

Treći deo našeg rada bavi se inicijalnim problemom koji su TT proučavali, tj. pokušava da numeričkom simulacijom dobije formaciju gala-

ksija koju uočavamo kod Antena galaksija. Da bi se ovo postiglo, bilo je potrebno ispitivanje prostora parametara koji utiču na izgled simuliranih galaksija. Mi smo se u našem radu fokusirali na ispitivanje jednog specifičnog dela prostora parametara, a to je bio smer rotacije galaksija pre sudara.

## Modeli

U ovom radu razmatramo dva modela, jedan istorijski (TT model) koji je bio ključan za naše razumevanje evolucije galaksija, ali koji je sadržao mnoge aproksimacije i jedan kompleksniji model, koji se sastoji od diska, centralnog ovala, i haloa tamne materije, kroz koji predstavljamo naše moderno shvatanje strukture i evolucije galaksija. Poređenjem ovih modela možemo videti nedostatke prvog modela i glavne karakteristike drugog modela koji su posledica evolucije našeg razumevanja galaksija.

### 1. TT model

U ovom radu galaksije se modeliraju koristeći numeričke modele galaksija koje se realizuju gravitacionom interakcijom N-tela. U pokušaju ispitivanja uticaja integracione šeme na preciznost dobijenih rezultata, prvo je reprodukovani model galaksije korišćen u simulacijama TT. Taj model se sastoji od 120 probnih, bezmasenih (čestice čija masa je nula, i čije ubrzanje se dobija isključivo preko jačine gravitacionog polja na mestu na kojem se čestice nalaze. Ovime se podrazumeva da čestice međusobno ne interaguju.) čestica koje se nalaze na koncentričnim kružnicama sa po 12, 18, 24, 32 i 36 čestica. Udaljenost kružnica je iznosila 5; 7,5; 10; 12,5 i 15 kpc od centralne čestice oko koje su sve ostale čestice orbitirale na stabilnim, kružnim orbitama.

### 2. GalactICs model

Pošto je model upotrebljen u radu TT bio znatno ograničen tadašnjim poznavanjem galaksija, za realnije modelovanje galaksija je potreban model znatno složeniji od do tada korišćenih diskastih modela. Za ovo je korišćen programski paket GalactICs (Kuijken i Dubinski 1995), u kojem su generisane galaksije koje se sastoje od tamnog haloa, diska, kao i centralnog ovala.

Ovakav model je upotrebljen zato što nam skoriya istraživanja ukazuju na postojanje tri različite komponente, od kojih je svaka drugačije prirode. Centralni oval je centralni deo, koji se sastoji od gušće grupisanih zvezda. Disk se sastoji od manje koncentracije zvezda u odnosu na centralni oval, dok se halo, koji je maseno i zapreminski najdominantniji deo galaksije, sastoji od tamne materije koja interaguje samo gravitaciono i nalazi se oko centra galaksije. GalactICs je generisao stabilne galaksije istih parametara, ali različitog početnog rasporeda čestica.

Parametri potrebni za kreiranje galaksija idealnih za ovaj rad su uzeti iz rada Dubinskog i saradnika (1995). Uzet je model galaksije odnosa mase diska i centralnog ovala na prema tamnog haloa 1:7. Disk, oval i halo su se sastojali od 5500, 5000 i 12000 čestica, respektivno.

Na priloženim slikama su prikazane x i y koordinate jer su nam davale najveću preglednost.

## Metode

### 1. Integracione šeme

Početni uslovi opisani u sekciji o TT modelu su simulirani u izolaciji (tj. bez prisustva druge galaksije) korišćenjem različitih integracionih šema, specifično Ojlerove (Euler) šeme, Leap-frog sa konstantnim korakom, kao i Runge-Kuta (Runge-Kutta) četvrtog reda. U sva tri slučaja je testirana stabilnost simulacije za tri različita vremenska koraka, koji su iznosili  $10^4$ ,  $10^5$  i  $10^6$  godina, sa maksimalnim vremenom trajanja simulacije od 5 milijardi godina. Jedina masivna čestica se nalazila u centru galaksije, i njena masa je iznosila  $10^{11}$  mase Sunca. Kriterijumi po kojim smo proveravali stabilnost galaksija uključuju proveru održanja totalne energije sistema, raspored čestice jedne galaksije u prostoru. Naime, proveravali smo da li čestice ostaju pri inicijalnoj kružnoj raspodeli koja im je bila zadata.

### 2. Rekonstrukcija TT modelom

Jedan TT model galaksije je zatim stavljen na striktno paraboličnu putanju oko baricentra sa masivnom česticom čija masa je iznosila tačno jednu petinu mase same galaksije. Minimalna udaljenost na koju su se centri ovih galaksija približili, tj. perigalaktička udaljenost iznosi 25 kpc.

Da bi se ovakvi uslovi postigli, potrebne brzine za neke date pozicije su izračunate uz pomoć zakona održanja. Ovakva galaksije su zatim puštene po svojoj orbiti tako da u odnosu na drugu galaksiju (koja je predstavljena česticom) prolazi retrogradno (u suprotnom smeru od rotacije čestica) i direktno (u istom smeru kao i čestice), sa različitim brzinama i početnim pozicijama. Ovo je urađeno da bi se odredila dužina potencijalnih repova i mostova od dužine boravka oko perigalaktičkog minimuma.

Dva diskasta (TT) modela su zatim dobila iste početne uslove kao što su opisani u radu TT. Urađeno je još 5 simulacija variranim početnim brzinama, inkrementiranim u koracima od po 5 km/s, u pokušaju eliminacije pogrešnih početnih uslova kao mogućeg razloga za neuspehu simulaciju Antena galaksija.

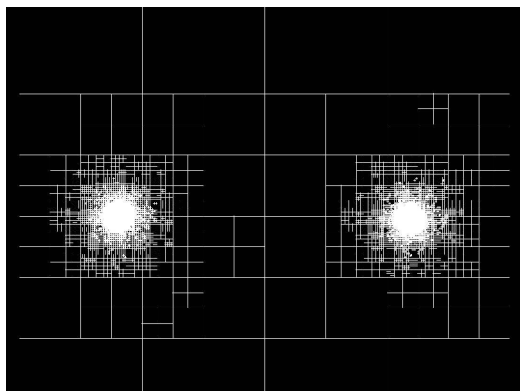
### 3. Barns-Hat

Da bi se ovaj broj čestica mogao integrisati u određenom vremenskog intervalu, napisan je Barns-Hat tree-code kao zamena direktnoj sumaciji sila u simulacijama N-tela. Ovaj kod bi rekurzivno izdelio prostor na ćelije, smeštajući podatke o svakoj ćeliji u jedno hijerarhijsko stablo, deleći kocku prostora od kojeg počinje na po 8 manjih kocaka sve dok svaka kocka ne bude sadržala samo jednu česticu u sebi (slika 2). Ćelija, predstavljena kockom, ovako izgenerisanog stabla, se zatim može koristiti da bi se vršile aproksimacije sile koje deluju na telo. Ceo program je napisan u programskom jeziku C++, a radi lakšeg debugovanja, korišćen je GDB debager.

Puštanje cele simulacije sa 45000 tela, koja predstavljaju deo mase galaksije, gde se računanje sila vrši direktnom sumacijom, traje 3 sata i 26 minuta, dok se ista simulacija uz dodatak Barns-Hat algoritma izvršava 28 minuta.

Kao dodatno poboljšanje, paralelizacija ovog algoritma bi dovela do drastičnog ubrzanja.

Kao kontrolu preciznosti napisanog koda korišćen je programski paket Gadget2 (Springel *et al.* 2005) koji sadrži velik broj optimizacija, poput Barns-Hat tree-code, ali i mnoge druge (Peano-Hilbert, adaptivni korak). Sve simulacije su integrisane do vremena od 8 milijardi godina od početka simulacija.



Slika 2. Raspored ćelija korišćene u Barnes-Hat algoritmu za jedan presek po osi normalnoj na vidljivu ravan

Figure 2. The distribution of cells used in the Barnes-Hutt algorithm shown from an axis perpendicular to the visible plane

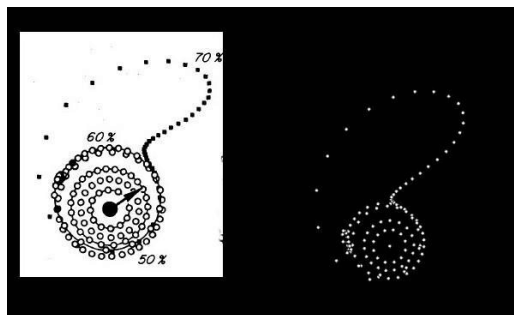
## Rezultati

### 1. Integracione šeme

Simulirali smo galaksije modelirane u radu TT koristeći različite integracione šeme sa namerom da ispitamo stabilnost integratora preko održanja energija celog sistema. Energija sistema u simulaciji koja koristi Ojlerov metod integracije varira i do 10% početne vrednosti, dok druge dve integracione šeme, Runge-Kuta i Leapfrog pokazuju znatno manja odstupanja, do 3% i 2.5%, respektivno. Leapfrog pokazuje veću stabilnost zbog veoma male ekscentričnosti orbita pojedinačnih čestica.

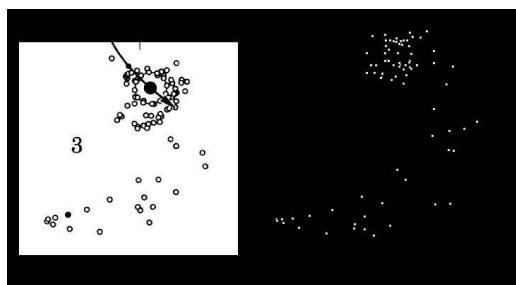
### 2. TT model

U daljem radu smo pokušali da reprodukujemo rezultate dobijene u radu TT, prvenstveno izgled galaksije nakon što je perturbuje druga galaksija pri paraboličnoj orbiti. Ispitana su dva slučaja: slučaj pri retrogradnoj rotaciji galaksije (u odnosu na smer prolaza druge galaksije) i pri direktnoj rotaciji. Rezultat retrogradnog smera rotacija je prikazan na slici 3 i na njoj možemo videti da je raspored čestica identičan rasporedu koje se uočava u radu TT, te smatramo da smo



Slika 3 Izgled prvobitno simuliranih Tumre galaksija u direktnom slučaju (Leva strana predstavlja galaksije iz rada TT, a desno iz našeg rada. Slike uzete sa približno istih vremenskih trenutaka).  $t \approx 3.1$  Gyr.

Figure 3. The initially simulated Toomre galaxies in a direct-rotation collision (The left side represents the galaxies in the TT articles, and the right side shows our own results. The pictures were taken from nearly identical points in time).  $t \approx 3.1$  Gyr.



Slika 4. Galaksije simulirane u radu TT u retrogradnom slučaju (leva strana predstavlja rezultate simulacije TT, a desna naše rezultate).  $t \approx 2.9$  Gyr.

Figure 4. The galaxies simulated in the TT article during a retrograde rotating collision (The left side represents the galaxies in the TT articles, and the right side shows our own results).  $t \approx 2.9$  Gyr.

simulaciju uspešno reprodukovali. Na slici 4 vidimo direktan prolaz galaksije (rezultati naših simulacija su na desnim polovinama slika). Slike su uzete na vremenu od 3.1 Gyr i 2.9 Gyr od početka simulacije, respektivno, i može se uočiti velika podudarnost izgleda nastalih formacija.

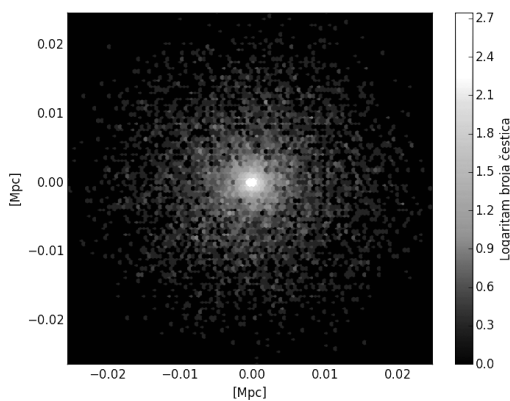
### 3. Napredniji model

Za dalji rad nam je bila potrebna stabilna galaksija koja se sastojala od tri komponente, diska, centralnog ovala i tamnog haloa. Dobijenu galaksiju smo pustili da evoluirala na vremenskom intervalu od 5 Gyr da bismo proverili njenu stabilnost. Na slici 5 se vidi kako ta galaksija izgleda nakon 5 Gyr, i iz te slike možemo zaključiti da se čestice nisu rasule, te da je galaksija stabilna. Radi preglednosti, tamni halo nije prikazan na slici.

U sledećim simulacijama generisane galaksije (čija stabilnost je ispitana i opisana u sekciji „GalactICs model”) smo postavili na parabolične putanje sa različitim inklinacijama u odnosu na orbitalnu ravan, i sa različitim smerovima rotacije. Na slici 6 je rezultat sudara dve galaksije pri suprotnim smerovima rotacije uz inklinaciju od  $60^\circ$ . Nastaje oblik koji liči na Antena galaksije, ali uz primetno kraće repove od očekivanih.

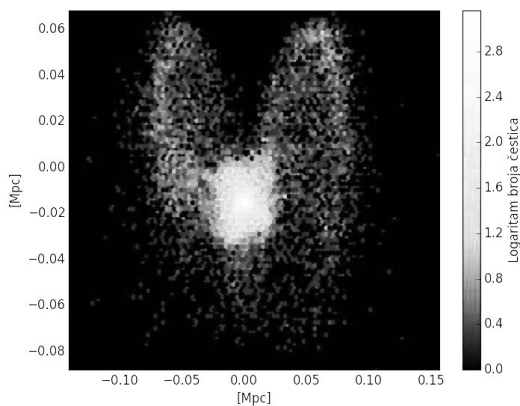
Slika 7 prikazuje sudar dve galaksije sa istim smerom rotacije, pri istoj inklinaciji. Na slici se primećuju dva tanka i izdužena galaktička repa koja se krive ka suprotnim smerovima.

Sve slike galaksija prikazuju x i y koordinatu čestica u galaksiji, tj. galaksije su prikazane iz pravca normalnog na ravan diska pri inklinaciji od  $0^\circ$ .



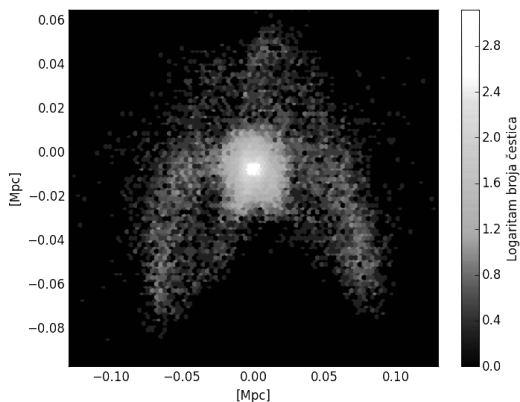
Slika 5. Izgled galaksije u izolaciji

Figure 5. A galaxy simulated in isolation



Slika 6. Sudar dve galaksije pri inklinaciji  $60^\circ$ , prilikom kontrarotirajućeg slučaja

Figure 6. The collision of two retrograde rotating galaxies at an inclination of 60 degrees



Slika 7. Sudar dve galaksije pri inklinaciji  $60^\circ$ , prilikom korotirajućeg slučaja

Figure 7. The collision of two prograde rotating galaxies at an inclination of 60 degrees

## Diskusija

Tumre i Tumre su bili primorani da broj čestica svedu na 120, radi vremenske izvodljivosti simulacija. U ovom radu smo tražili odgovor na pitanje uticaja integracione šeme na rezultate simulacija ovog tipa. Da bismo odgovorili na ovo pitanje, ponovili smo simulacije iz rada TT ali sa

tri različite integracione šeme, a zatim smo poredili dobijene rezultate. Modeli galaksija koji su simulirani su preuzeti iz rada TT i sastoje se od bezmasenih čestica koje orbitiraju oko masivne čestice koja se nalazi u centru galaksije.

Ovim simulacijama je utvrđeno da je RK4 integrator bio dovoljno precizan za svrhu njihovih simulacija. Leapfrog integrator daje manje fluktuacije ukupne energije, dok je vreme izvršavanja znatno manje. Iz toga zaključujemo da su Tumre i Tumre imali mogućnost korištenja većeg broja čestica na račun korišćenja Leapfrog integratora umesto RK4.

U prvom delu rada želeli smo da reprodukujemo simulacije rađene u radu TT, sudarajući dve galaksije sačinjene od bezmasenih čestica koje orbitiraju oko centralne mase. Galaksije su postavljene na parabolične putanje prvo sa retrogradnim smerom rotacije (u odnosu na prolaz druge galaksije), a zatim i sa direktnim (progradnim). Pri ovakvom prolazu se javlja znatno tanji i izduženiji plimski rep, isti kao što je dobijen u simulaciji TT.

Analiza uspešnosti reprodukcije rezultata se bazira na vizuelnoj podudarnosti dobijenih galaksija prvenstveno zato što je u vreme izrađivanja rada Tumre i Tumre numerička astronomija još bila mlada, te se uobičajenje metode analize rezultata još nisu koristile (profili gustina, održanje energije, i sl.). Iz slika 3 i 4 se može uočiti veoma velika podudarnost u izgledima galaksija. Do malih odstupanja dolazi zbog malih razlika u vremenskim trenucima (naša simulacija je blago „pomerena” za mali vremenski interval od 0.05 Gyr) u kojima se slike galaksija uzimaju u našem radu i u originalnom radu TT.

Ovime možemo zaključiti da smo uspešno reprodukovali sudar galaksija koji je opisan u radu TT.

Danas znamo da se spiralne galaksije sastoje od tri specifične i razlučive komponente. Prosečna spiralna galaksija ima centralni oval (bulge) koji sadrži veću koncentraciju zvezda i ostalog materijala od diska, zatim poseduje disk, i konačno halo tamne materije koji je mnogo veći od vidljivog dela galaksija i svojom masom, tj. gravitacionom interakcijom stabilizuje ostatak galaksije. Preliminarne simulirane galaksije rađene bez tamnog haloa su bile veoma nestabilne, a eventualno bi se i raspale, čime se ukazuje potre-

ba za dodatnom komponentom koja bi galaksiju stabilizovala.

Činjenica da se za tamni halo u tadašnje vreme nije znalo objašnjava sve neuspele pokušaje modeliranja stabilne galaksije koji su prethodili radu Barnsa iz 1988. TT su koristili bezmasene čestice kao reprezentaciju gravitacionog polja oko centralne, masivne, čestice, zato što bi međusobna interakcija čestica, bez ikakvog tamnog haloa, onemogućila formiranje bilo kakve stabilne galaksije, te bi izvršavanje bilo kakve dugotrajnije simulacije bilo besmisleno.

Kasnije je radom koji su radili Dubinski *et al.* (Dubinski *et al.* 1995) utvrđeno da odnos masa haloa i ostatka galaksije, znatno utiču na samu dinamiku interagujućih galaksija.

Da bismo reprodukovali Antena galaksije koristeći današnje shvatanje galaksija morali smo prvo da generišemo takve galaksije, te smo koristili programski paket GalactICs (Kuijken i Dubinski) Tako generisane galaksije smo zatim simulirali u izolaciji da bismo proverili njihovu stabilnost. Da bismo generisali galaksije korišćene za dalji rad, koristili smo parametre upotrebljene u radu Barnsa (1988).

Rezultat ovakve simulacije zavisi od jako velikog prostora parametara poput odnosa masa haloa i zvezdane komponente, početnih uslova (inicijalne brzine, i njenog pravca), masa galaksija, inklinacije, itd. Mi, kao autori ovog rada, smatramo da je uticaj smera rotacije bio nedovoljno ispitan u slučaju Antena galaksija, te smo odlučili da se fokusiramo na taj parametar.

Iz urađenih simulacija (slike 6 i 7) se vidi da su karakteristični oblici galaktičkih repova i mostova veoma zavisni od smera rotacije galaksije. Ukoliko obe galaksije rotiraju u istom smeru (slika 7), nakon nekog vremena se uočava formacija koja prisustvom prečage podseća na oblik spiralne galaksije, dok se iz sudara dve galaksije suprotnih smerova rotacije (slika 6) nastaje formacija koju možemo uočiti kod Antena galaksija.

## Zaključak

U ovom radu smo utvrdili da je izbor integracione šeme u radu TT bio neadekvatan. Takođe smo pokazali da za postojanje stabilne galaksije neophodan vid stabilizacije, koji se u prirodi

javlja u vidu tamnog haloa koji okružuje galaksije. Uspešno smo rekonstruisali simulacije koje su radili Tumre i Tumre, kao i znatno unapređeniju verziju njihove incijalne ideje, tj. rekonstrukcije Antena galaksija, koristeći znatno napredniji model za koji se u vreme izrađivanje njihovog rada nije znalo. Takođe je pokazano da galaksije prilikom retrogradne rotacije nakon sudara produkujaju znatno izraženije plimske ostatke od progradnog slučaja.

---

## Literatura

Barnes J. E., Hernquist L. 1992. Dynamics of Interacting Galaxies. *Annual review of astronomy and astrophysics*, **30**: 705.

Barnes J., Hut P. 1986. A hierarchical O (N log N) force-calculation algorithm. *Nature*, **324**: 446.

Barnes J. E. 1988. Encounters of Disk/Halo galaxies. *The Astrophysical Journal*, **331**: 699.

Dubinski J., Christopher Mihos J., Hernquist L. 1995. Using Tidal Tails to Probe Dark Matter Halos. *Astrophysics Journal*, **462**: 576.

Kuijken K., Dubinsky J. 1995. Nearly Self-Consistent Disk-Bulge-Halo Models for Galaxies. *MNRAS*, **277**: 1341.

Peebles P. J. E. 1980. *The Large-Scale Structure of the Universe*. arXiv:1202.6633

Pfleiderer J., Siedentopf H. 1960. Spiralstrukturen durch Gezeiteneffekte bei der Begegnung zweier Galaxien. *Zeitschrift für Astrophysik*, **51**: 201.

Springel V., White S. D., Jenkins A., Frenk C. S., Yoshida N., Gao L., ... & Pearce F. 2005. Simulating the joint evolution of quasars, galaxies and their large-scale distribution. *Nature*, **435**: 629.

Toomre A., Toomre J. 1972. Galactic Bridges and Tails. *Astrophysical Journal*, **178**: 623.

Vorontsov-Velyaminov B. 1962. Interaction of Multiple Systems, Problems of Extra-Galactic Research. *Proceedings from IAU Symposium*, **15**: 194.

---

*Petar Saulić*

## Effect of Galaxy Rotation on Tidal Tail Formation – Case Study: Antennae Galaxies

In this article we examine the impact of the direction of rotation on the formation of tidal tails on the example of the Antennae galaxies (NGC 4038/4039). This is done using numerical simulations. A series of models have been analyzed with a focus on modern models that consist of a disk, bulge and a halo, with parameters that coincide with those of spiral galaxies. To enable the necessary computations within a reasonable timeframe, we have developed our own implementation of the Barnes-Hutt tree algorithm. We have tested the stability of our algorithm by comparing the results of our simulations to those outputted by the Gadget2 software package. We show that the existence of a stable galaxy requires the existence of a dark halo. Our results show that prograde rotation of the galaxies produces a more distinct tidal tail (Figure 4.3) than a retrograde case (Figure 4.2) This is probably due to the quicker collisional evolution in the latter case. We also conclude that the prograde rotation of galaxies produces tidal tails that resemble those of the Antennae galaxies. 