

Uticaj smera rotacije spiralnih galaksija pri sudaru na formiranje eliptične galaksije

Sudarom dve spiralne galaksije dolazi do formiranja eliptične galaksije koja može biti boxy i disky tipa. U postojećim radovima pokazano je kako odnos masa spiralnih galaksija utiče na formiranje različitih tipova eliptičnih galaksija, odnosno na to da li će formirana galaksija biti boxy ili disky tipa. Tako, pri sudaru spiralnih galaksija jednakih masa nastaje boxy tip galaksije, dok sudarom spiralnih galaksija pri odnosu masa 3:1 nastaje disky tip galaksije. Cilj ovog rada je da, putem numeričkih simulacija, ispita kako smer rotacije dve spiralne galaksije utiče na tip nastale eliptične galaksije. Posmatrana su dva slučaja sudara: slučaj korotacije, kada spiralne galaksije rotiraju u istom smeru i slučaj kontrarotacije, kada galaksije rotiraju u suprotnim smerovima. Za izradu numeričkih simulacija korišćena su dva identična modela spiralnih galaksija. Urađene su simulacije za uglove sudara od 0° , 30° , 60° i 90° . Analizom profila gustine potvrđeno je da se, u zavisnosti od međusobnog smera rotacije roditeljskih galaksija, sistemi nastali sudarima u ravni i pod uglom od 30° , razlikuju u gustini čestica na rastojanju do 20 kpc od centra galaksije. Pri većim uglovima sudara (60° i 90°), ova razika nije izražena. Na osnovu oblika linija koje povezuju tačke iste gustine, utvrđeno je da sudarom dve spiralne galaksije u ravni koje rotiraju u jednaku smeru nastaje boxy galaksija, dok sudarom galaksija koje rotiraju u suprotnim smerovima nastaje galaksija disky tipa.

Uvod

Galaksija je gravitaciono vezan sistem, sačinjen pretežno od zvezda, međuzvezdanog gasa i prašine i tamne materije (Steinmetz i Muller 1993). Svaka zvezda u galaksiji ima sopstvenu gravitaciju kojom deluje na sve ostale zvezde u tom sistemu. Zvezde u galaksiji se nalaze na velikim međusobnim rastojanjima, tako da prilikom sudara sa drugom takvom galaksijom retko dolazi do fizičkih sudara zvezda. Jedan od načina za ispitivanje sudara dve galaksije, kao i evolucije novonastale galaksije, jesu numeričke simulacije N tela.

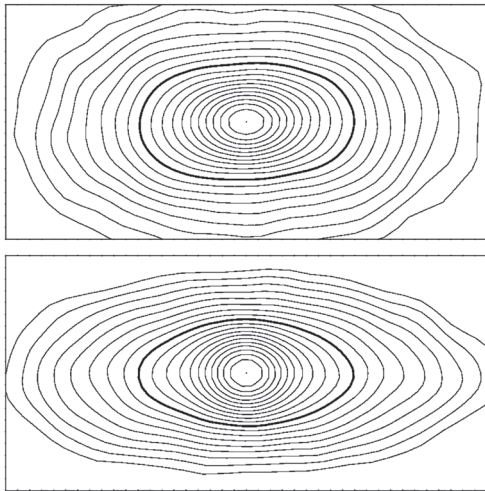
Eliptične galaksije smatraju se starim zvezdanim sistemima, dinamički relaksiranim i bez uočljive strukture (Bender 1997). Međutim, detaljnijim posmatranjima pokazano je da se po kinematičkim karakteristikama, odnosno po različitom izgledu orbita zvezda koje sačinjavaju galaksiju, ovi sistemi mogu podeliti u dva tipa. Ta dva tipa su takozvane boxy i disky galaksije (Rest *et al.* 2001). Razlike između ova dva tipa galaksija najbolje se mogu uočiti predstavljanjem galaksija preko izofota (linije koje povezuju tačke istog intenziteta svetlosti). Primer za to možemo videti na slici 1. Na gornjem delu slike prikazana je eliptična galaksija čije izofote u ravni posmatranja liče na zaobljeni pravougaonik, te ona predstavlja galaksiju boxy tipa. Na donjem delu slike prikazana je eliptična galaksija čije su izofote nalik na disk, te ona spada u disky tip (Naab *et al.* 1999).

Katarina Vrhovac (2000), Pančevo, Braće Jovanovića 106/6, učenica 3. razreda Gimnazije „Uroš Predić“ u Pančevu

MENTORI:

Nemanja Martinović, Astronomska opservatorija u Beogradu

Nikolina Milanović, student Matematičkog fakulteta Univerziteta u Beogradu



Slika 1. Prikaz izofota eliptične galaksije boxy tipa, dobijene sudarom dve spiralne galaksije čiji je odnos masa 1 : 1 (gore), odnosno disky tipa, dobijene sudarom dve spiralne galaksije čiji je odnos masa 3 : 1 (dole). Rezultati su preuzeti iz literature (Naab *et al.* 1999).

Figure 1. Representation of an isophote of an elliptical galaxy of boxy type, obtained by collision of two spiral galaxies with a mass ratio of 1 : 1 (above) or disky type, obtained by collision of two spiral galaxies with a mass ratio of 3 : 1 (below). The results are taken from the paper of Naab *et al.* 1999.

Poznato je da eliptične galaksije nastaju sudarom dve spiralne galaksije (Steinmetz i Muller 1993). U već postojećim radovima pokazano je kako odnos masa spiralnih galaksija pri sudaru utiče na formiranje različitih tipova eliptičnih galaksija, odnosno na to da li će formirana galaksija biti boxy ili disky tipa. Boxy tip galaksije nastaje pri sudarima spiralnih galaksija jednakih masa, dok sudarom spiralnih galaksija čiji je odnos masa 3 : 1 nastaje disky tip galaksije (Naab *et al.* 1999).

Većina spiralnih galaksija se može predstaviti sa tri strukturne komponente: centralnog ovala, rotirajućeg diska i tamnog haloa. Centralni oval je struktura u centru galaksije, može biti različitih dimenzija, većinom je sačinjen od starih zvezda. Rotirajući disk je zaravnjena površina koja okružuje centralni oval i uglavnom se sastoji od mladih zvezda i zvezdane prašine. Tamni halo je najmasivniji deo galaksije, pretpostavlja se da je sferno-simetrično rasprostranjen oko centra galaksije. Sačinjen je od tamne materije koja

deluje samo gravitaciono na disk i centralni oval galaksije i održava galaksiju u dinamički stabilnom stanju (Steinmetz i Muller 1993).

U ranijim radovima, pomoću numeričkih simulacija N-tela, posmatrana je interakcija između dve spiralne galaksije različitih masa pri sudaru. Pokazano je da pri sudarima koji zavise od masa galaksija dolazi do formiranja boxy, odnosno disky eliptične galaksije (Naab *et al.* 1999). Pri sudaru spiralnih galaksija zvezdani sistemi se mešaju i dinamički zagrevaju. Smer rotacije diska spiralne galaksije ima uticaj na stepen dinamičkog zagrevanja rezultujućeg sistema prilikom takvih interakcija.

Cilj ovog rada je da se pomoću numeričkih simulacija sudara dve spiralne galaksije istraži kako smer rotacije utiče na formiranje različitih tipova eliptične galaksije. Ispitaćemo sudare dve spiralne galaksije u ravni i pod uglom od 30°, 60° i 90°. Pri svakom od ovih sudara biće razmotrena dva slučaja: slučaj korotacije, kada spiralne galaksije rotiraju u jednakom smeru, i slučaj kontrarotacije, kada spiralne galaksije rotiraju u međusobno suprotnim smerovima.

Metod

Za izvršavanje numeričke simulacije sudara dve spiralne galaksije potreban je model spiralne galaksije. Predstavljeni model galaksije generisan je programskim paketom GalactICS (Kuijken i Dubinski 1995) i sadrži osnovne strukturne komponente – disk, centralni oval i tamni halo. Upotrebljen je model galaksije Mlečni put, sačinjen od 250 000 čestica, od čega disk i tamni halo čini po 100 000 čestica, dok centralni oval čini 50 000 čestica. Iz naših simulacija isključen je gas, koji je sastavni deo strukture diska galaksija. Udeo mase gasa u galaksiji je zanemarljiv, tako da dinamika gasa ne utiče značajno na stabilnost galaksije, niti na tok simulacije. Radi provere stabilnosti sistema, generisana galaksija je puštena da evoluira u izolaciji u periodu od 5 milijardi godina u programu Gadget-2 (Springel 2005). Stabilnost galaksije potvrđena je ispitivanjem relativne promene energije i vizuelno.

Generisani je model Mlečnog puta je potom dupliran i pripisan drugoj galaksiji koja će učestvovati u sudaru. Time su dobijene dve identične galaksije sa jednakom masom i brojem čestica, čime je isključen uticaj ovih parametara na rezultat sudara. Koordinatni sistem je postavljen

tako da se disk simulirane galaksije nalazi u xOy ravni, dok je z -osa osa rotacije galaksije. Prvo je ispitan slučaj korotacije sudara u ravni, tada je ugao koji zaklapaju diskovi interagujućih galaksija 0° , tako dolazi do takozvanog edge-on sudara. U tom slučaju druga galaksija je pomerena za 200 kpc po y -osi. Pomerenoj galaksiji je zadata negativna početna brzina od -100 km/s po y -osi. Kada se sudar galaksija odvija pod uglom α , početna brzina koju je potrebno zadati pomenoj galaksiji razlaže se po x , y i z komponentama i izračunava se trigonometrijski, tako da ukupan intenzitet brzine ostane -100 km/s. Galaksija je pomerena po z -osi za određen ugao α i nagnuta za isti taj ugao po y -osi ka prvoj galaksiji, da bi galaksija bila pravilno usmerena. Nove koordinate čestica galaksije (x'_2, y'_2, z'_2) računaju se trigonometrijskim putem, tako da spiralne galaksije ostanu na međusobnom rastojanju d od 200 kpc. Simulacija sudara puštena je na 5 milijardi godina u programu Gadget (Springel 2005).

Drugi slučaj koji je ispitan je slučaj kontrarotacije, smer rotacije pomerene galaksije je promenjen invertovanjem njenih koordinata i brzina po y i z -osi. Ponovljen je ceo postupak izrade simulacije sa istim početnim uslovima sudara u ravni, a zatim i za sudare galaksija pod navedenim uglovima. Koordinate i početne brzine čestica nagnute galaksije računaju se na isti način kao i u slučaju korotacije. Kako fenomen boxy i disky galaksija može biti prolazan, simulacija je praćena na bliskim vremenskim periodima u intervalu od 0.05 milijardi godina.

Osim vizualizacije, korišćene su i druge metode za predstavljanje rezultata dobijenih sudarom dve galaksije, kao što su profil gustine, profil brzina i linije koje povezuju tačke jednake gustine. Profil gustine predstavlja zavisnost gustine materije od rastojanja od centra galaksije. Galaksija je podeljena na ljuske, za svaku ljusku određen je odnos broja čestica i zapremine ljuske. Određen je profil gustine eliptične galaksije nastale sudarom u ravni, pod različitim uglovima u slučaju korotacije u trenutku 4.95 milijardi godina. U tom trenutku sudar se već odigrao, i nastala eliptična galaksija je stabilizovana. Određen je i profil gustine eliptične galaksije u istom vremenskom trenutku, u slučaju kontrarotacije. Radi jasnijeg uočavanja razlika, od pomenutog profila gustine galaksije nastale sudarom pod određenim uglom u slučaju korotacije oduzet je

profil gustine galaksije nastale sudarom pod istim uglom u slučaju kontrarotacije.

Profil brzina, odnosno rotaciona kriva je kriva zavisnosti brzine rotacije od udaljenosti čestice od centra galaksije. Izračunata je rotaciona kriva galaksije nastale sudarom u ravni i pod ranije navedenim uglovima u slučaju korotacije i upoređena sa rotacionom krivom galaksije nastale sudarom sa istim parametrima u slučaju kontrarotacije.

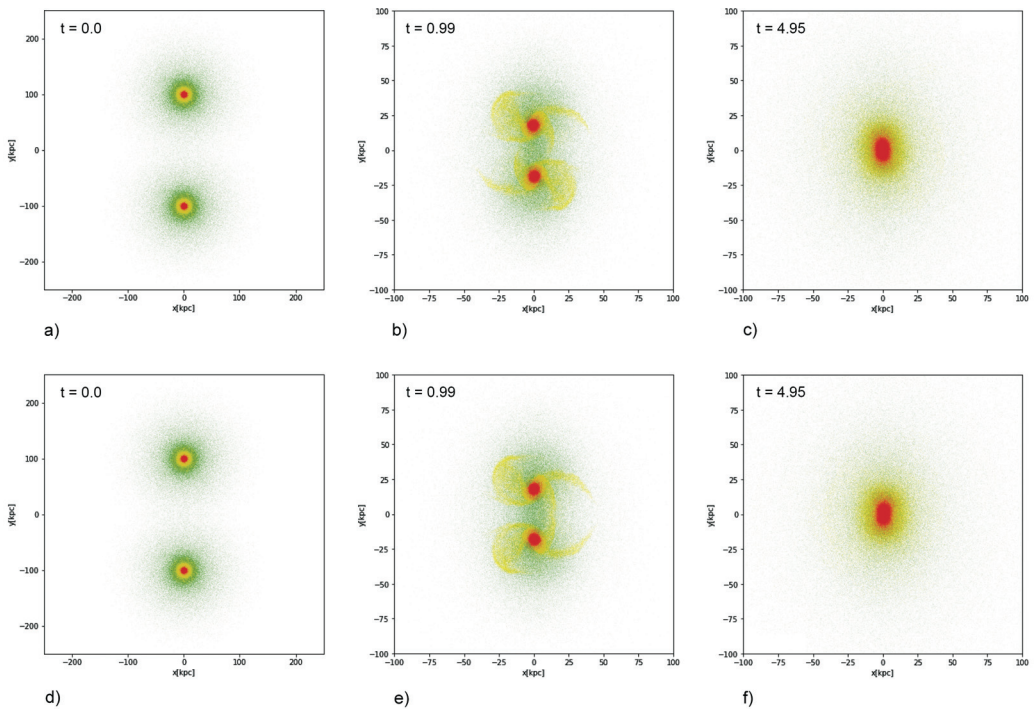
Kao treći metod analize rezultata pravljeni su grafici na kojima su predstavljene linije koje povezuju tačke jednake površinske gustine u ravni sudara, odnosno xOy ravni, kako bismo videli postoje li razlike u oblicima nastalih galaksija. Kako je tamni halo sačinjen od tamne materije, koja nije vidljiva na posmatračkim snimcima galaksija, na kojima je i uočen boxy, odnosno disky oblik, u pomenutim metodama analize uzete su u obzir samo komponente centralnog ovala i diska.

Rezultati

Sve simulacije sudara praćene su vizualizacijom (slika 2). Putem ovih grafika možemo pratiti promenu strukture svih segmenata galaksije, naznačenih različitim bojama, tokom simulacije sudara. Pored vidljive materije, na graficima vizualizacije predstavljena je i tamna materija.

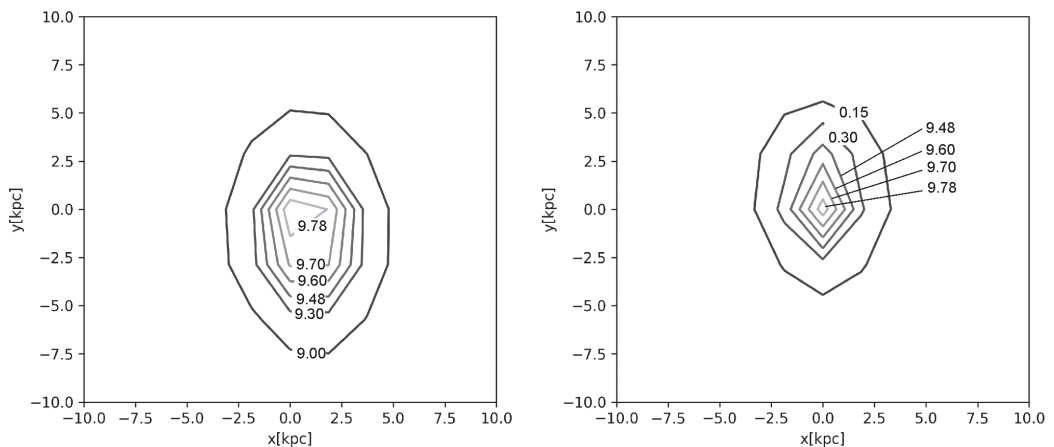
Daljom analizom dobijenih rezultata konstatovane su razlike između nastalih eliptičnih galaksija zavisno od smera rotacije spiralnih galaksija pri sudaru. Pri sudaru koji se odvijao u ravni u slučaju korotacije formirana je eliptična galaksija boxy tipa, što se može videti na slici 3.a. Na njoj su predstavljene linije koje povezuju tačke iste gustine, gde se može uočiti blago zaobljenje linija na ivicama grafika. Na slici 3.b iz oblika linija može se uočiti da eliptična galaksija nastala u slučaju kontrarotacije pripada disky tipu. Na grafiku odnosa profila gustine vidimo da je pri samom centru galaksije veća gustina kod galaksije nastale u slučaju kontrarotacije. Sa odaljavanjem od centra gustina galaksije nastale u slučaju korotacije raste do razdaljine od 15 kpc, odakle odnos gustina stagnira oko 1, što znači da su na većim razdaljinama gustine obe galaksije približno jednake.

Galaksija nastala korotacijom ima povećanu gustinu čestica na rastojanju od 5 do 10 kpc, gde se otprilike nalazi granica barionskog dela



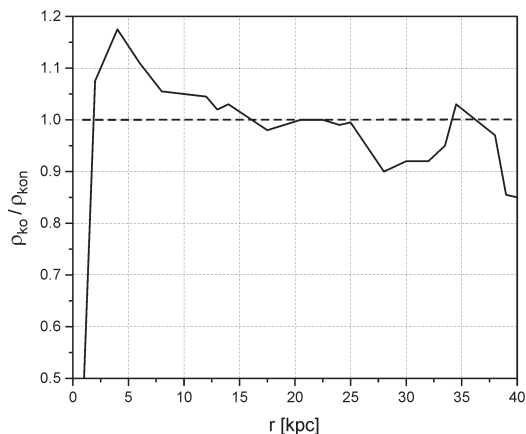
Slika 2. Prikaz x_0y ravni simulacije sudara dve spiralne galaksije duž y -ose u slučaju korotacije (a, b, c) i kontrarotacije (d, e, f) u trenucima 0, 0.99 i 4.95 milijardi godina, respektivno. Crvenom bojom predstavljen je centralni oval, žutom disk, a zelenom tamni halo galaksije.

Figure 2. Plot of collision simulations in x_0y plane of two spiral galaxies by y -axis in the case of corotation (a, b, c) and counterrotation (d, e, f) at time moments 0, 0.99, and 4.95 billion years, respectively. The central oval is represented by the red color, the disc is yellow, and the dark halo of the galaxy is green.



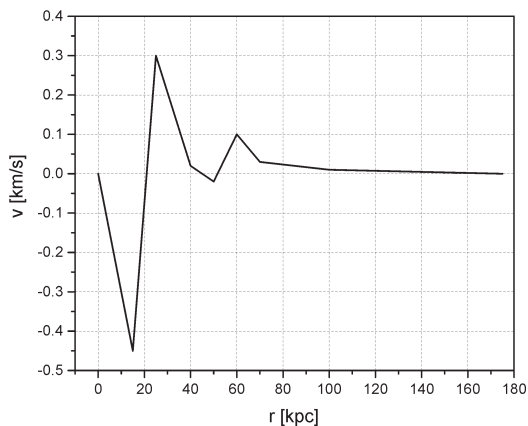
Slika 3. Eliptična galaksija nastala sudarom u ravni, duž y -ose, korotacijom (levo) i kontrarotacijom (desno) preko linija koje povezuju tačke iste gustine, u trenutku 4.95 milijardi godina. Linije su određene desetičnim logaritmima gustine.

Figure 3. Elliptical galaxy formed by collision along the y -axis, in case of corotation (left) and counterrotation (right) over lines connecting points of the same density, at 4.95 billion years. The lines are determined by the decimal logarithms of density.



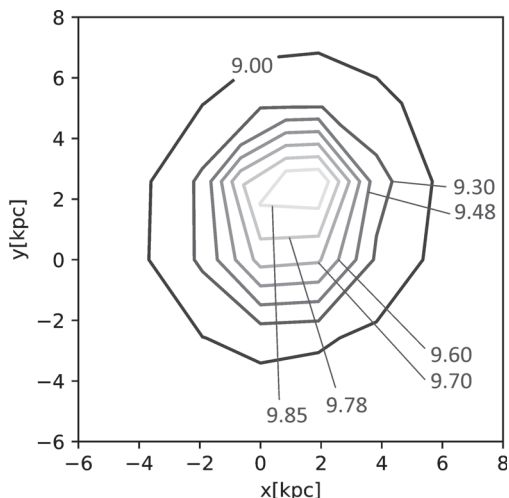
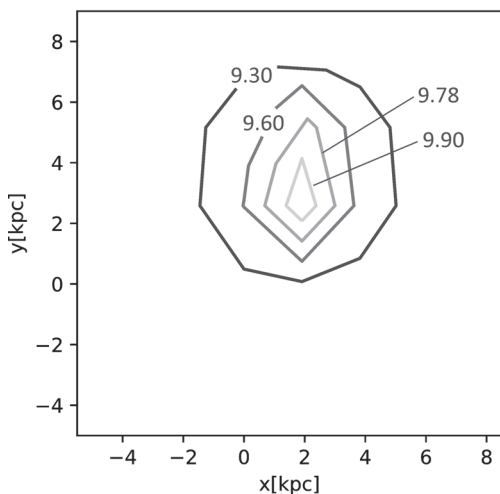
Slika 4. Odnos gustine eliptične galaksije nastale sudarom u ravni korotacijom i gustine eliptične galaksije nastale kontrarotacijom, u zavisnosti od rastojanja od centra galaksije, u trenutku 4.95 milijardi godina.

Figure 4. Density ratio of the elliptical galaxy created by a plane collision in case of corotation and the elliptical galaxy generated by counterrotation, depending on the distance from the center of the galaxy, at the moment of 4.95 billion years.



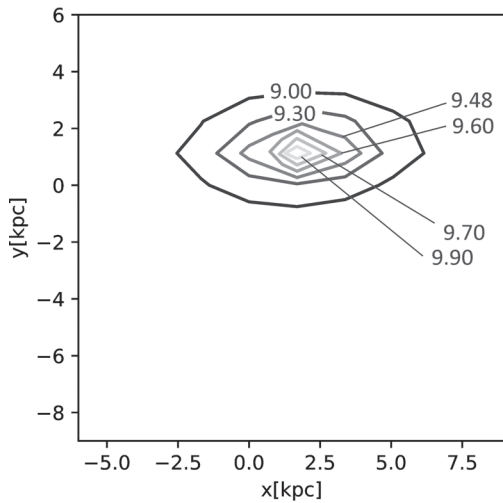
Slika 5. Razlika rotacione krive galaksije nastale sudarom u ravni, u slučaju korotacije i kontrarotacije u zavisnosti od rastojanja od centra galaksije u trenutku 4.95 milijardi godina.

Figure 5. The difference of the rotational curve of a collision galaxy in a plane, in the case of corotation and counterrotation in dependence on the distance from the center of the galaxy at the time of 4.95 billion years.

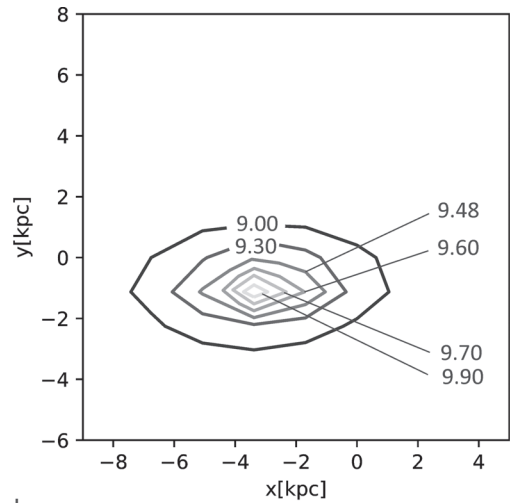


Slika 6. Eliptična galaksija nastala sudarom pod uglom od 30° u slučaju korotacije (levo) i kontrarotacije (desno) preko linija koje povezuju tačke iste guste gustine, u trenutku 4.95 milijardi godina. Linije su određene desetičnim logaritmima gustine.

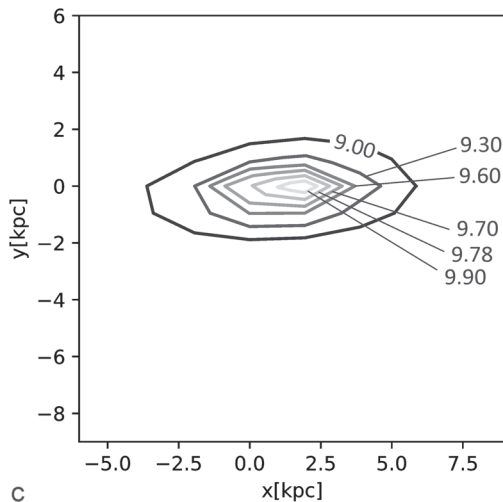
Figure 6. Elliptical galaxy created by a 30° collision in the case of corotation (left) and counterrotation (right) over lines connecting points of the same dense density, at the moment of 4.95 billion years. The lines are determined by the decimal logarithms of density.



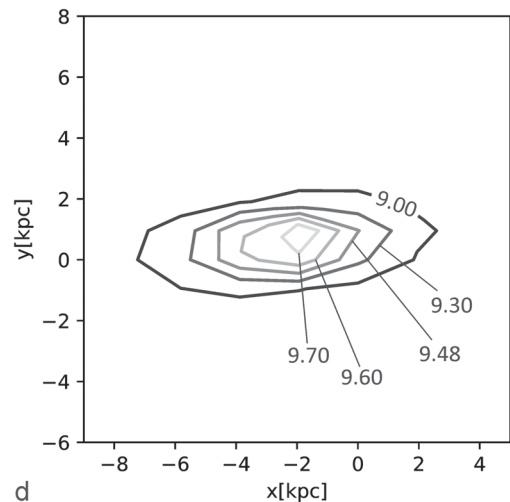
a



b



c



d

Slika 7. Eliptična galaksija nastala sudarom pod uglom od 60° u slučaju korotacije (a) i kontrarotacije (b) i pod uglom od 90° u slučaju korotacije (c) i kontrarotacije (d) preko linija koje povezuju tačke iste gustine, u trenutku 4.95 milijardi godina. Linije su određene desetičnim logaritmima gustine.

Figure 7. Elliptical galaxy formed by a collision of 60° in the case of corotation (a) and counterrotation (b) and 90° in the case of corotation (c) and counterrotation (d) over the lines connecting the points of the same density, at the time of 4.95 billion years.

materije, u odnosu na eliptičnu galaksiju nastalu kontrarotacijom (slika 4). Povećana gustina čestica kod eliptične galaksije nastale korotacijom, takođe nam pokazuje da je to galaksija boxy tipa

Upoređivanjem rotacionih krivi u oba slučaja rotacije vidimo da su razlike u cirkularnim brzinama zanemarljive (slika 5), što nam dalje

sugeriše da brzine kretanja zvezda u galaksiji nemaju direktnog značaja na raspodelu gustine u galaksiji, odnosno iz njih ne možemo zaključiti kom tipu galaksija pripada.

Sudar pod uglom od 30° takođe potvrđuje postojanje razlika koje zavise od smera rotacije. Te razlike najbolje možemo uočiti sa grafika na

kojem su prikazane linije koje povezuju tačke jednake gustine (slika 6). Rezultati sudara pod većim uglovima (60° i 90°) daju slične grafike u slučaju korotacije i kontrarotacije (slika 7). Sa njih ne možemo jasno da odredimo koji oblik ima dobijena kontura, te ne možemo ni odrediti kom tipu galaksija pripada.

Zaključak

U ovom radu pokazano je kako smer rotacije dve identične spiralne galaksije pri sudaru utiče na formiranje različitih tipova eliptične galaksije. Posmatrana su dva slučaja: korotacija i kontrarotacija. Izvršen je niz numeričkih simulacija za koje je korišćen uprošćen model Mlečnog puta. Posmatrani su slučajevi sudara pod uglovima od 0° , 30° , 60° i 90° . Analizom rezultata dobijenih iz simulacija sudara u ravni pokazano je da postoje razlike između galaksije nastale korotacijom i galaksije nastale kontrarotacijom. Pri sudaru dve spiralne galaksije u ravni koje rotiraju u istom smeru nastaje galaksija boxy tipa. Pri sudaru dve spiralne galaksije u ravni koje rotiraju u suprotnim smerovima nastaje galaksija diskus tipa. Pri sudaru po uglom od 30° situacija je obrnuta: sudarom u slučaju korotacije nastaje galaksija diskus tipa, dok u slučaju kontrarotacije nastaje galaksija boxy tipa. Kod sudara pod većim uglovima kao što su 60° i 90° nema razlika između eliptične galaksije nastale u slučaju korotacije i kontrarotacije.

U dosadašnjim radovima, putem numeričkih simulacija, ispitivan je uticaj mase spiralnih galaksija pri sudaru na formiranje eliptične galaksije. Ispitivanje uticaja smera rotacije pri sudaru spiralnih galaksija predstavlja nov i nedovoljno ispitivan pristup tom problemu. Tokom rada korišćena je jedna simulacija za ispitivanje svih slučajeva sudara pod različitim uglovima i smerovima rotacije. Spiralna galaksija korišćena za numeričke simulacije sudara, usled tehničkih ograničenja u vidu ograničene dostupne kompjuterske snage i vremena, predstavlja model Mlečnog puta sa znatno umanjanim brojem čestica unutrašnje strukture. Kako bi se ovi rezultati potvrdili potrebno je ponoviti simulacije sudara sa drugim modelima spiralnih galaksija i povećati broj simulacija.

Analizu rezultata bi trebalo proširiti tako da obuhvati i druge metode (kao što su vrednosti a_4 Furijevog koeficijenta, najpre da bismo ocenili preciznost merenja) i predstaviti ih boljom statistikom (Kormedy i Djorgovski 1989). U ovom radu sa grafika linija koje povezuju tačke jednake gustine vizualnim putem smo određivali kog oblika su dobijene linije. Na osnovu toga smo određivali da li je galaksija boxy ili diskus tipa. Određivanje Furijevog koeficijenta može nam dati preciznije rezultate.

Kao nastavak daljeg rada može se ispitati zavisnost ugla pod kojim se galaksije sudaraju od početne brzine. Praćenjem promene profila gustine, kao i ostalih metoda analize, mogli bismo da utvrdimo da li je ovaj fenomen prolazan i kako se menja sa vremenom.

Literatura

- Bender R. 1997. Structure, Formation and Ages of Elliptical Galaxies. *ASP Conference Series*, **116**: 11.
- Kormedy J., Djorgovski S. 1989. Surface photometry and the structure of elliptical galaxies. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, **27**: 235.
- Kuijken K., Dubinski J. 1995. Nearly Self-Consistent Disc / Bulge / Halo Models for Galaxies. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, **277**: 1341.
- Naab T., Burkert A., Hernquist L. 1999. On the Formation of Boxy and Disky Elliptical Galaxies. *The Astrophysical Journal*, **523**: L133.
- Rest A., Van den Bosch F. C., Jaffe W., Tran H., Tsvetanov Z., Ford H. C., Davies J., Schafer J. 2001. WFPC2 Images of the Central Regions of Early-Type Galaxies – I. The Data. *The Astronomical Journal*, **121**: 2431.
- Springel V. 2005. The Cosmological Simulation Code GADGET-2. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, **364**: 1105.
- Steinmetz M., Muller E. 1993. Formation of spiral and elliptical galaxies in a CDM cosmogony. *Astronomy and Astrophysics Letters*

Katarina Vrhovac

The Influence of the Direction of Rotation of Spiral Galaxies in a Collision on the Formation of an Elliptical Galaxy

The collision of two spiral galaxies leads to the formation of an elliptical galaxy. It has been confirmed that the formed elliptical galaxies can be of the boxy and disky type. In already existing works it has been shown that the ratio of the mass of spiral galaxies in a collision affects the formation of different types of elliptical galaxies, that is, whether the formed galaxy will be boxy or disky type. A boxy type of galaxy is formed in the collision of spiral galaxies of equal mass, while a spiral galaxy with a mass ratio of 3:1 creates a disk type of the galaxy.

The aim of this project is to investigate, through numerical simulations, how the direction of rotation of the two spiral galaxies in a collision affects the formation of an elliptical galaxy. Two cases were observed: the case of corotation, when the spiral galaxies rotate in the same direction, and the case of a contrarotation, when the spiral galaxies rotate in different directions. Two

identical models of spiral galaxies were used to create numerical simulations. Each galaxy is made up of 250 000 particles. The two galaxies were placed at a distance of 200 kpc with an initial radial velocity in a collision of 100 km/s. Simulations of collisions were run on a period of 5 billion years, in the Gadget2 program.

Simulations of collisions were made in the plane, at an angle of 30°, 60° and 90°. The systems developed at the end of the simulation of collisions at the same angle in the case of corotation and contrarotation are compared by making a profile of density, speed profile and isolines, line graphs that connect points of the same density, in the plane of collision. By analyzing the density profile of the emerging systems in a collision in the plane and at an angle of 30° it was confirmed that there are differences in the density of particles at distances of about 20 kpc from the center of the galaxy. Density profiles of an elliptical galaxy formed in a collision at an angle of 60° and 90° do not differ significantly in the case of corotation and the case of contrarotation. From the isolines, it is found that a collision of two spiral galaxies in the plane, that are rotating in the same direction, creates a boxy galaxy, while the collision of two spiral galaxies rotating in opposite directions creates a disky galaxy. 