

Simulacija nastanka polar-ring galaksija

Kroz numeričku simulaciju ispitivana je mogućnost formiranja polar-ring galaksija sudarom galaksija. Metod koji je korišćen je konstrukcija simulacije sudara jedne patuljaste i jedne spiralne galaksije. Vizualizacijom sudara u različitim vremenskim intervalima, prikazani su izgled i evolucija prstena oko primarne galaksije. Ovo je potvrđeno i analizom profila gustine, normalizovanih profila gustine i toplotnim kartama gustine. Posmatranjem iz različitih ravni u različitim vremenskim trenucima sudara, pokazano je slaganje sa više različitih posmatrački dobijenih slika polar-ring galaksija. Pokazano je da polar-ring galaksije mogu biti prolazni fenomen u evoluciji nekog sudara.

Uvod

Polar-ring galaksije (slika 1) su galaksije oko čijih polova rotira prsten sačinjen od zvezda, prašine i gasa, i koji se proteže na rastojanju od nekoliko desetina hiljada svetlosnih godina od centralne galaksije, skoro pod pravim uglom u odnosu na ravan diska. Do sada je otkriveno nekoliko stotina ovih galaksija i o njihovom poreklu nema preciznih podataka. Numeričke simulacije su jedan od načina ispitivanja porekla ovih galaksija, pri čemu se rezultati simulacija upoređuju sa rezultatima astronomskih posmatranja. Ispitivanje nastanka i osobina polar-ring galaksija može pomoći u razumevanju njihovog sastava i interakcija između galaksija. Vodeće ideje o nastanku polar-ring galaksija su da nastaju plimskim ogoljavanjem – gde dve ga-



Slika 1. Polar-ring galaksija NGC 660 (NASA – Gemini Opservatorija, AURA)

Figure 1. Polar-ring galaxy NGC 660 (NASA – Gemini Observatory, AURA)

laksije gravitaciono interaguju i dolazi do razmene dela materije između njih, ili da nastaju sudarom dve galaksije (Reshetnikov i Sotnikova 1997) – pri čemu materija jedne galaksije u potpunosti postaje deo druge galaksije.

U ovom radu, kroz numeričku simulaciju, ispitivali smo mogućnost formiranja polar-ring galaksija kao posledice sudara dve galaksije. Projekat je baziran na radu „Formation of polar ring galaxies” (Bournaud i Combes 2003) i predstavlja testiranje i dopunu datog ispitivanja. Dopuna je definisana uslovom da jedna galaksija ima značajno manju masu od druge.

U navedenom radu, autori su ispitivali mogućnost formiranja polar-ring galaksija u dva slučaja: preko sudara i plimskog ogoljavanja. Posmatrali su stabilne prstenove koji su dobijeni. Primetili su da su dobijeni prstenovi stabilniji ukoliko je ugao između njih i centralne galaksije bliži pravom uglu.

Danilo Ristić (2000), Beograd, Dr Nika Miljanića 3/15, učenik 3. razreda Treće beogradske gimnazije

MENTORI:

Nemanja Martinović, Astronomska opservatorija u Beogradu

Petar Saulić, ITekako, Beograd

Metod

Za simulaciju nastanka polar-ring galaksija bili su nam potrebni modeli dve stabilne galaksije, koji su dobijeni programskim paketom GalactICS. Dati paket je za zadate početne parametre, poput mase i prečnika diska, generisao galaksiju sačinjenu od N-tela podeljenih u strukture haloa tamne materije, centralnog ovala i diska. Centralni oval je sferno simetričan prostor gusto grupisanih zvezda koji se nalazi u centru galaksije. Disk predstavlja ravan u kojoj je raspoređena materija oko centralnog ovala i ima manju koncentraciju zvezda ali je većeg prečnika od njega. Halo tamne materije je raspoređen sferno-simetrično oko diska i centralnog ovala i najmasivniji je deo galaksije, sačinjen od čestica tamne materije koje interaguju samo gravitaciono.

Generisani su modeli dve galaksije, jedne masivne spiralne galaksije, slične Andromedi, i jedne patuljaste galaksije, koja je korišćena kao projektil u sudaru. Patuljasta galaksija je galaksija znatno manjih masa i dimenzija, po dva reda veličine manjih u odnosu na spiralnu galaksiju (tabela 1). U dosadašnjim radovima je kao uslov nastanka polar-ring galaksija pri sudaru zadato da obe galaksije treba da budu galaksije većih masa. Naša pretpostavka je da je taj uslov postojao jer je u tom trenutku bilo kompjuterski zahtevno izvesti mali sudar. Samim tim, nije ni postojao kod koji bi mogao, u simulaciji malog sudara, razlučiti prsten dobijene polar-ring galaksije na potrebnim nivoima rezolucije. Pod malim sudarom se podrazumeva sudar dve galaksije pri čemu jedna galaksija ima značajno manju masu od druge.

Tabela 1. Mase i brojevi čestica generisanih galaksija

Tip galaksije	Masa galaksije [M_{\odot}]	Broj čestica galaksije	Broj čestica tamne materije
Patuljasta	$4.4 \cdot 10^9$	467 000	261 000
Spiralna	$9.5 \cdot 10^{11}$	380 000	248 800

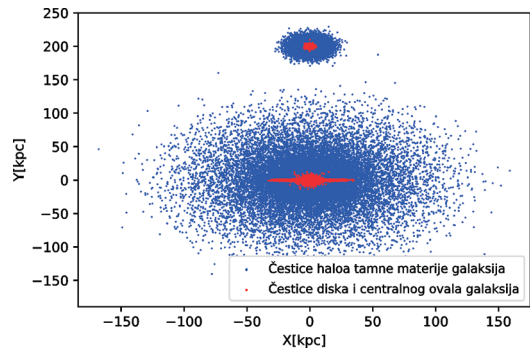
Da bismo proverili stabilnost dobijenih galaksija, one su zasebno puštene da evoluiraju na 5 milijardi godina. Za simulaciju sudara dobijenih galaksija, korišćen je program Gadget2 (Springel 2005). Gadget2 prati simulaciju gravitacionog sistema N-tela i omogućava opcionalno uključivanje dinamike gasa, koja nije korišćena u našoj simulaciji radi smanjivanja zahtevnosti simulacije. Neuračunavanje čestica gasa, koje predstavljaju jednu od komponenti galaksija u Svemiru, se pokazalo da ne predstavlja veliku grešku jer je masa gasa u prstenu polar-ring galaksija mala. Dinamika gasa, takođe, nije preterano bitna za stabilnost galaksija i tačnost simulacije, tako da je odlučeno da se ona ne simulira. Pomoću zadatih početnih parametara sudara, u datom programu je iznova puštena simulacija malog sudara dve galaksije na vremenskom intervalu od 5 milijardi godina. Početni uslovi sudara bazirani su na uslovima rada Bournaud i Combes (2003). Određeno je da ugao između ravni dve galaksije pre sudara bude prav, kako bi verovatnoća za dobijanje polar-ring galaksije bila veća. Pošto se pri posmatranju galaksija na nebu ne može videti halo tamne materije, pri analizi izvedenog sudara on nije ni posmatran, osim za proveru stabilnosti sistema. Rezultati su vizualizovani kako bi se direktno mogao videti produkt simulacije. Ispitivano je više različitih trenutaka u toku interakcije galaksija i samim tim se mogao analizirati tačan nastanak i potpuna evolucija prstena oko centralne galaksije.

Pored vizualizacije, na nekoliko načina je nezavisno potvrđeno da li dobijeni rezultati ukazuju na polar-ring galaksije u datim trenucima. Ispitivan je profil gustine – raspored gustine po udaljenosti od centra mase primarne galaksije. Na profilu gustine može se videti povećanje gustine na udaljenostima na kojima se nalazi struktura koju smo vizuelno identifikovali kao prsten i dalje je referenciramo tako. Posmatranjem profila gustine može se videti i evolucija prstena s vremenom, tako da nam on predstavlja i detaljniji prikaz prstena uz vizualizaciju. Profil gustine sudara je deljen sa profilom gustine primarne galaksije u početnom trenutku, zato što je pokazano da prsten oko centralne galaksije većinski čine čestice sekundarne galaksije. Time je dobijen normalizovan profil gustine koji predstavlja znatno bolji prikaz porasta gustine na mestima

gde se nalazi prsten. Pošto se na vizualizaciji sudara ne može tačno videti odnos broja čestica, tj. mesta gde ima 10000 čestica izgledaju isto kao mesta gde ima 1000 čestica, rađena je toplotna karta sudara. Toplotna karta predstavlja grafički prikaz rasporeda čestica galaksija u ravni. Ako bi svaki način ispitivanja davao tražene rezultate, struktura u datom trenutku bi bila označena kao polar-ring galaksija.

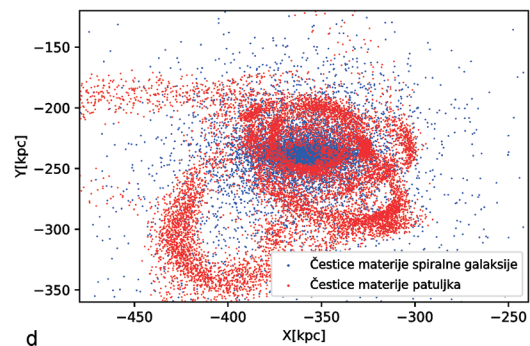
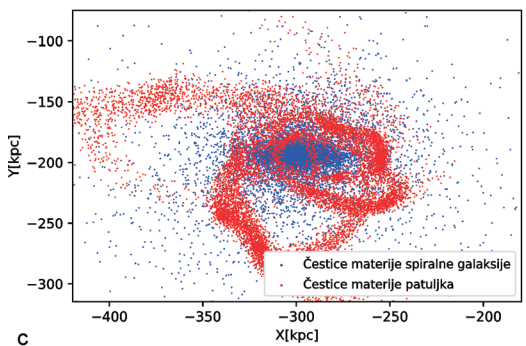
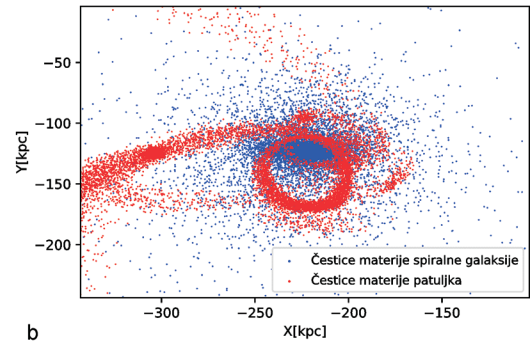
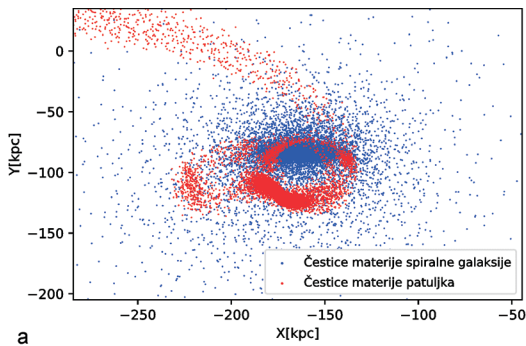
Rezultati

U izvedenoj simulaciji centralna galaksija stavljena je u koordinatni početak simulacije, a patuljasta galaksija je stavljena na udaljenost od 200kpc po y osi u odnosu na centralnu galaksiju. Patuljastoj galaksiji je dodata brzina od 30 km/s u pravcu centralne galaksije (slika 2).



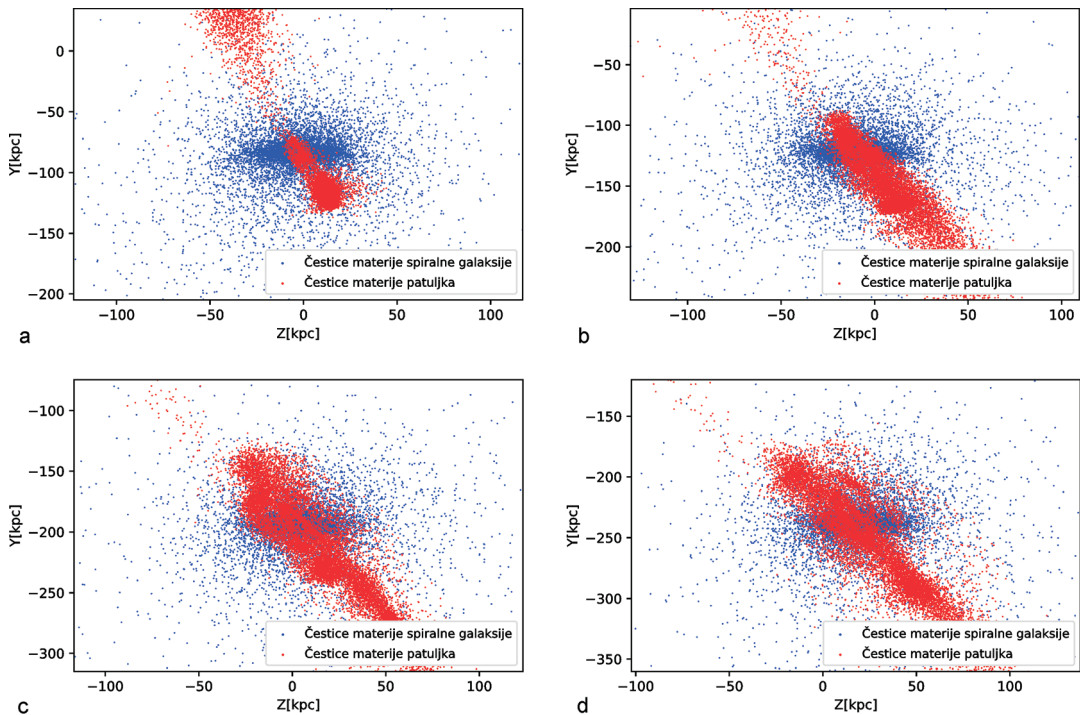
Slika 2. Izgled simulacije sudara u početnom trenutku (gore – patuljasta, dole – spiralna galaksija)

Figure 2. The appearance of the collision simulation at the beginning (top – dwarf, bottom – spiral galaxy; blue – halo particles; red – disk and bulge particles)



Slika 3. Izgled simulacije sudara posmatrano iz xy ravni u vremenskim trenucima 2.8 (a), 3.4 (b), 4.2 (c) i 4.8 (d) milijardi godina

Figure 3. The appearance of the collision simulation observed from the xy plane at the 2.8 (a), 3.4 (b), 4.2 (c) and 4.8 (d) Gyr (blue – spiral galaxy, red – dwarf galaxy)

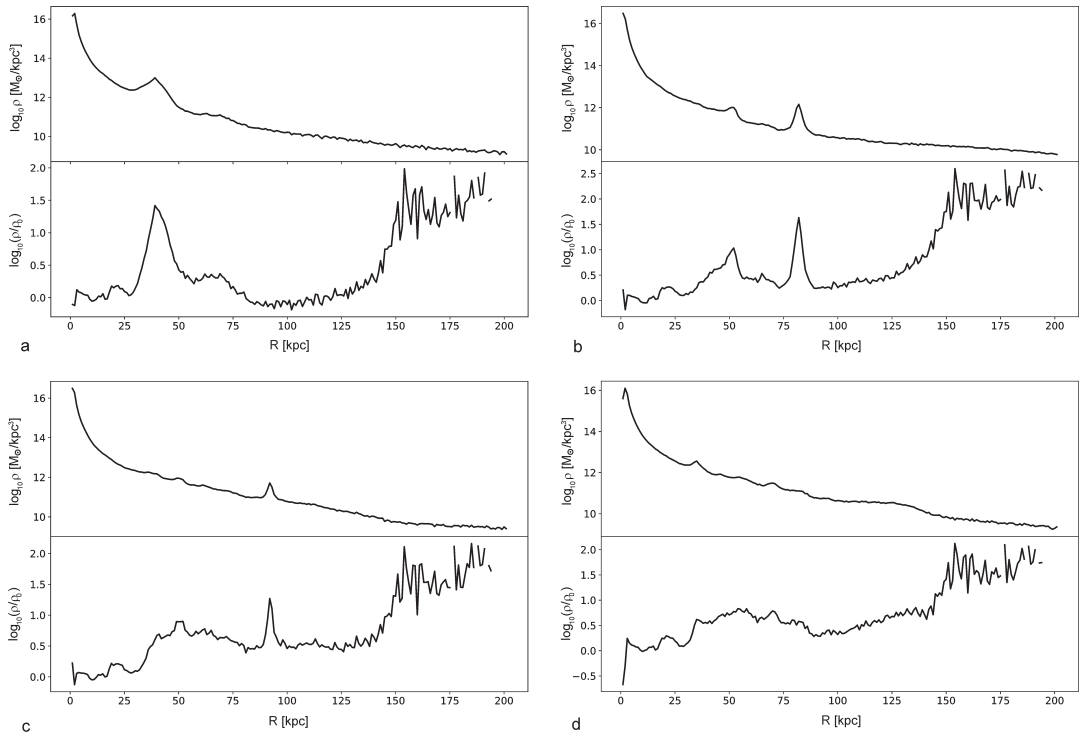


Slika 4. Izgled simulacije sudara posmatrano iz zy ravni u vremenskim trenucima 2.8 (a), 3.4 (b), 4.2 (c) i 4.8 (d) milijardi godina

Figure 4. The appearance of the collision simulation observed from the zy plane at the 2.8 (a), 3.4 (b), 4.2 (c) and 4.8 (d) Gyr (blue – spiral galaxy, red – dwarf galaxy)

Analizom rezultata puštene simulacije, zaključeno je da dobijena struktura i jeste polar-ring galaksija. Dobijeni prsten bio je pod velikim nagibom i u evoluciji se nalazio na rastojanjima između 30 i 100 kpc, što se poklapa sa udaljenostima prstenova iz posmatranja. Na slikama 3 i 4 vidi se prsten oko centralne galaksije posmatran iz dve različite ravni u vremenskim trenucima 2.8, 3.4, 4.2 i 4.8 milijardi godina nakon početka simulacije. Posmatranjem iz različitih ravni u različitim vremenskim trenucima sudara, pokazano je slaganje sa više različitih posmatrački dobijenih slika polar-ring galaksija. Slika 5 prikazuje profil gustine i normalizovan profil gustine u istim vremenskim trenucima. Na slikama 5 a, b i c može se primetiti nagli skok funkcije na udaljenostima između 50 i 100 kpc, tj. na

istim udaljenostima na kojima se prsten vidi na slikama 3 i 4. Na slici 5d se ne vidi značajan skok funkcije na tim udaljenostima. Na normalizovanim profilima gustine, porast funkcije je zanemaren na udaljenostima nakon 150 kpc, jer je gustina primarne galaksije u početnom trenutku na tim udaljenostima mala. Time je pokazano da smo iz samo jedne simulacije dobili više posmatračkih realizacija polar-ring galaksija kroz trajnije simulacije, odnosno da takvi objekti mogu biti prolazni fenomen u evoluciji nekog sudara, što je i dato kao ideja u radovima (Sparke i Gallagher 2007; Maccio *et al.* 2005). Slika 6 prikazuje toplotnu kartu sudara u vremenskim trenucima 2.8, 3.4, 4.2 i 4.8 milijardi godina nakon početka simulacije. Na njima se bolje vidi gustina materije u prstenu i galaksiji.



Slika 5. Izgled profila gustine (gore) i normalizovanog profila gustine (dole) u vremenskim trenucima 2.8 (a), 3.4 (b), 4.2 (c) i 4.8 (d) milijardi godina

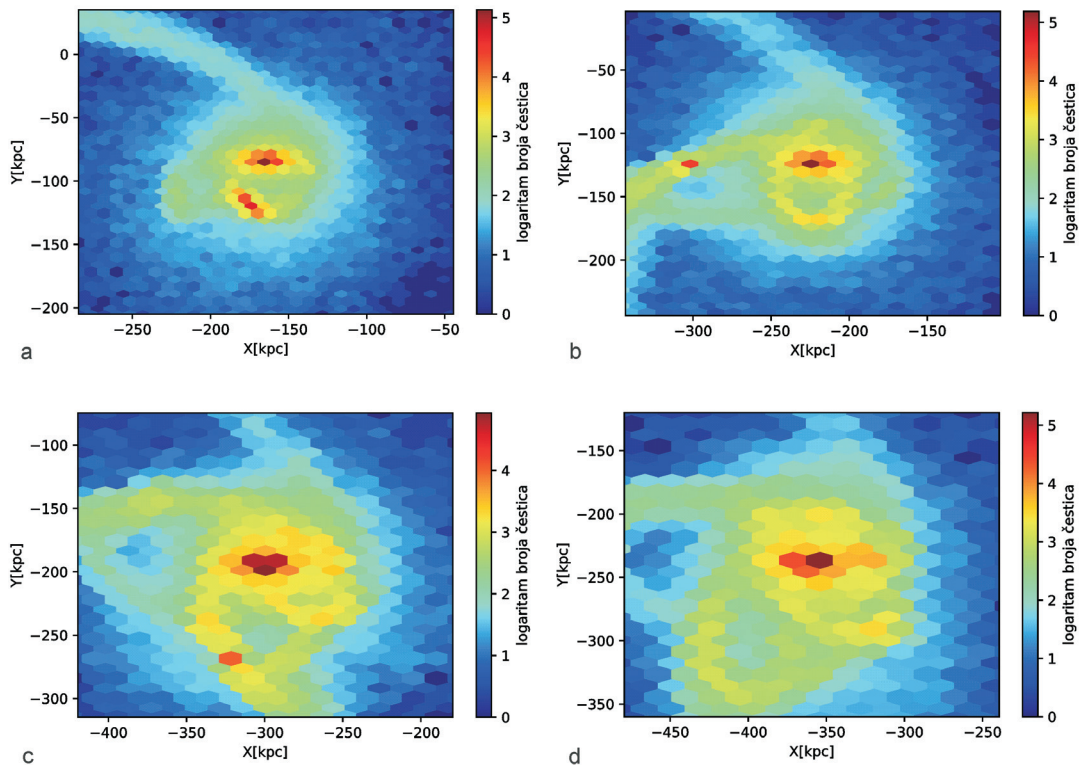
Figure 5. The appearance of the density profile (top) and the normalized density profile (bottom) at 2.8 (a), 3.4 (b), 4.2 (c) and 4.8 (d) Gyr divided by the density profile of the primary galaxy at rest

Diskusija i zaključak

U ovom radu hteli smo da prikazemo da li je moguć nastanak polar-ring galaksije kao rezultat malog sudara dve galaksije. Korišćeni su modeli jedne masivne spiralne i jedne patuljaste galaksije. Patuljastoj galaksiji je, u početnom trenutku, dodata brzina od 30 km/s u pravcu centralne galaksije. Analizom sudara, zaključeno je da dobijena struktura i jeste polar-ring galaksija.

Posmatranjem iz različitih ravni pokazana je korelacija sa više posmatračkih fenomena koji predstavljaju polar-ring galaksije. Ovime smo uspešno pokazali da sudar može biti uzrok velikog broja tih galaksija i da je mogućnost nastanka ovih galaksija sudarom mnogo veća nego što se mislilo. Iz dobijenih rezultata nemamo dovoljno podataka da govorimo o rasprostranjenosti

ovog načina formiranja polar-ring galaksija i za bolju analizu mogućnosti ovakvog nastanka potrebno je izvršiti veći broj simulacija. Takođe je pokazano i da ti različiti oblici polar-ring galaksija mogu biti posledica ugla pod kojim gledamo galaksiju. Posmatranjem promene profila gustine s vremenom, primećeno je da se pri kraju gubi prsten, tj. da on postaje deo centralne galaksije, i time je dokazana ideja da polar-ring može biti prolazni stadijum u evoluciji sudara. Ideja je da što nagib prstena više odstupa od 90 stepeni, to je on manje stabilan. Pretpostavlja se da je to i slučaj kod naše simulacije pošto nagib dobijenog prstena dosta odstupa od 90 stepeni. Nagib i stabilnost dobijenog prstena može zavisiti od više parametara poput početne brzine koja je data projektilnoj galaksiji ili ugla između ravni galaksija pre sudara. Pošto su početni uslovi bazirani



Slika 6. Izgled toplotne karte posmatrane iz xy ravni u vremenskim trenucima 2.8 (a), 3.4 (b), 4.2 (c) i 4.8 (d) milijardi godina

Figure 6. The appearance of the heat map observed from the xy plane at the 2.8 (a), 3.4 (b), 4.2 (c) and 4.8 (d) Gyr

na pomenutom prethodnom istraživanju (Bournaud i Combes 2003), gde su dobijeni stabilni prstenovi skoro pod pravim uglom u odnosu na ravan diska centralne galaksije, pretpostavljamo da je veliko odstupanje nagiba prstena od pravog ugla posledica malog sudara. Da bi se tačno ispitali uzroci potrebno bi bilo izvesti mnogo više simulacija.

Zahvalnost. Autor se zahvaljuje mentorima, Nemanji Martinoviću i Petru Sauliću, i Stanislavu Miloševiću koji su svojim predlozima pomogli u realizaciji ovog rada i izradi kodova neophodnih za analizu simulacije izvođene u ovom radu. Takođe, zahvaljuje se Matiji Dodoiću na korisnim komentarima.

Literatura

- Bournaud F., Combes F. 2003. Polar Ring Galaxies: Formation and Properties. *Astronomy and Astrophysics*, **401**: 817.
- Maccio A., Moore B., Stadel J. 2005. The Origin of Polar Ring Galaxies: Evidence for Galaxy Formation by Cold Accretion. *The Astrophysical Journal*, **636**: 25.
- Reshetnikov V., Sotnikova N. 1997. Global structure and formation of polar-ring galaxies. *Astronomy and Astrophysics*, **325**: 933.
- Sparke L., Gallagher J. 2007. *Galaxies In The Universe: An Introduction*. Cambridge University Press
- Springel V. 2005. The Cosmological Simulation Code GADGET-2. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, **364**: 1105.

Simulation of the Formation of Polar-Ring Galaxies

Polar-ring galaxies are galaxies around whose poles a ring made of stars, dust and gas, that stretches over a few tens of thousands of light-years from the central galaxy, rotates almost at a right angle to it. So far, several hundreds of these galaxies have been discovered and there is no precise data on their origin. Numerical simulations are one of the ways of testing the origin of these galaxies, where simulation results are compared with the results of astronomical observations. Examination of the origin and properties of polar-ring galaxies can help in understanding their composition and the interactions between galaxies. Leading ideas about the emergence of the polar-ring galaxies are due to tidal-accretion – where two galaxies interact gravitationally and there is an exchange of matter between them, or that they form by a collision of two galaxies – where the matter of one galaxy completely becomes a part of the other galaxy.

In this project, we examined the possibility of forming a polar-ring galaxy by a collision of two galaxies through numerical simulations. This research is based on the paper “Formation of polar ring galaxies” (Bournaud and Combes 2003) and it presents the testing of and addition to the cited research. The method used in the project is the construction of a simulation of a small collision of two galaxies. A small collision is a collision of two galaxies, where one galaxy has a significantly smaller mass than the other. The galaxies were generated in the GalactICS program based on the given parameters, and then converted to a format corresponding to the Gadget2 integrator where the simulation of the collision occurs. The galaxies were intentionally generated to obtain stable models of two galaxies. The initial parameters when generating the galaxies in GalactICS were changed so that the conditions for the properties of the galaxies involved in the collision are satisfied, i.e. to get a stable dwarf and massive spiral galaxy.

The models generated were the models of a dwarf galaxy, which serves as a collision missile,

and a galaxy similar to Andromeda, a large spiral galaxy. Adapting certain collision parameters, it was observed how galaxies react and what kind of products were obtained. The initial conditions of the collision were based on the conditions of the cited work (Bournaud and Combes 2003). It was determined that the angle between the planes of the two galaxies before the collision is straight so that the probability of getting a polar-ring galaxy would be greater. The primary galaxy was placed in the coordinate center of the simulation, and the dwarf galaxy was placed at a distance of 200kpc on the y axis relative to the primary galaxy. The speed given to the dwarf galaxy at the start of the simulation was equal to 30km/s in the direction of the central galaxy.

The results were visualized in order to directly see the product of the simulation. Through visualization, the appearance and evolution of the ring around the primary galaxy were seen.

Several different moments were investigated during the interaction of the galaxies. In addition to visualization, it was independently confirmed in several ways whether the obtained results represent a polar-ring galaxy at the given moments. The density profile was determined – density distribution at a distance from the center of the mass of the primary galaxy. On the density profile, an increase in density can be seen at the distances at which the structure we have visually identified as a ring exists. By observing the density profile, one can see the evolution of the ring over time. The collision density profile was divided by the density profile of the primary galaxy at rest, in order to get a normalized density profile which presents a better ring display. A heat map was created – a graphic representation of the layout of the particles of the dwarf galaxy on a plane of sight. If every way of testing gave the required results, the conclusion that the product is a polar-ring galaxy would be made.

By observing from different levels at different time intervals of the collision, the correlation with several different observational images of the polar-ring galaxies has been shown. On the density profile, it seemed that the ring began to disappear at the end of the simulation. It was demonstrated that such objects could be a transient phenomenon in the evolution of a collision, which had been stated as an idea in previously

published research (Sparke and Gallagher 2007; Maccio *et al.* 2005). It is assumed that the passing of the ring results from a minor collision and from a large deviation of the ring from the right angle. From the obtained results we do not have enough data to discuss the prevalence of this way of forming the polar-ring galaxies. For a better analysis of the possibility of such an occurrence, more simulations should be done. 