

# Ispitivanje verovatnoće nastanka polar-ring galaksija kao posledice malog sudara analizom podataka projekta Illustris

---

*U okviru ovog projekta ispitivali smo mogućnost i verovatnoću nastanka polar-ring galaksija kao posledice malog sudara. Metod koji je korišćen je analiza nastanka polar-ring galaksija identifikovanih među podacima Illustris-1 simulacije. Analizom galaksija sa kojima su se dobijene polar-ring galaksije sudarale u prošlosti provereno je koliko je učestao ovaj vid nastanka polar-ring galaksija. Primećeno je da je formiranje polar-ring galaksija kao posledice malog sudara znatno učestalije od nastanka kao posledice velikog sudara.*

---

## Uvod

Galaksije oko čijih polova na udaljenosti od nekoliko desetina hiljada svetlosnih godina, rotira prsten sačinjen od zvezda, prašine i gasa, nazivaju se polar-ring galaksije (Bournaud i Combes 2003). Do sada je otkriveno stotinak ovih galaksija, i o načinu njihovog nastanka nema preciznih podataka. Pretpostavka je da prsten koji karakteriše polar-ring galaksije nastaje kao posledica interakcije dve galaksije, bilo kao uzrok razmene materije između njih, ili direktnog sudara. U dosadašnjim simulacijama je kao uslov zadavano da obe galaksije koje interaguju moraju biti masivnije i sličnih masa (*ibid.*). Prethodnim projektom pokazano je da polar-ring galaksije mogu nastati kao posledica malog sudara, sudara gde je odnos masa interagujućih galaksija veći od jednog reda veličine (Ristić 2018). U okviru ovog projekta analizom nastanka polar-ring galaksija Illustris-1 simulacije ispitivali smo učestalost takvog načina formiranja

polar-ring galaksija. Rad predstavlja i proveru prethodnog projekta, tako što se ispituje da li i u kojoj meri polar-ring galaksije nastaju kao uzrok malog sudara.

## Simulacija

Za izradu ovog projekta korišćeni su podaci simulacije *Illustris-1*. *Illustris-1* je hidrodinamička kosmološka simulacija koja koristi  $\Lambda$ CDM model i koja je posmatrala nastanak i evoluciju kosmosa do danas, koristeći kompletan model fizike formiranja galaksija.  $\Lambda$ CDM model predstavlja najjednostavniju parametrizaciju kosmološkog modela Velikog praska, i sačinjen je iz tri glavne komponente: kosmološke konstante  $\Lambda$  (povezane sa tamnom energijom), tamne materije i obične materije. Početni uslovi simulacije generisani su na crvenom pomaku  $z = 127$ , a završetak simulacije na  $z = 0$ . Simulacija je sačinjena iz 136 preseka stanja, na različitim vrednostima crvenog pomaka (Vogelsberger *et al.* 2014). Pošto prati evoluciju celog kosmosa, u njoj se odvija veliki broj sudara galaksija i formira veliki broj različitih tipova galaksija, među kojima smo pretpostavili da se nalaze i polar-ring galaksije.

Podaci *Illustris-1* simulacije dati su u vidu preseka stanja, kataloga grupa, podataka drveća sudara i kataloga dodatnih podataka simulacije. Preko podataka preseka stanja možemo dobiti sve dostupne informacije o svakoj pojedinačnoj čestici korišćenoj u simulaciji, od 6 tipova čestica koje razlikuje *Illustris-1* simulacija. Pošto potpuni podaci preseka stanja zauzimaju veliku količinu memorije, za ovaj rad su korišćeni ostali tipovi podataka simulacije.

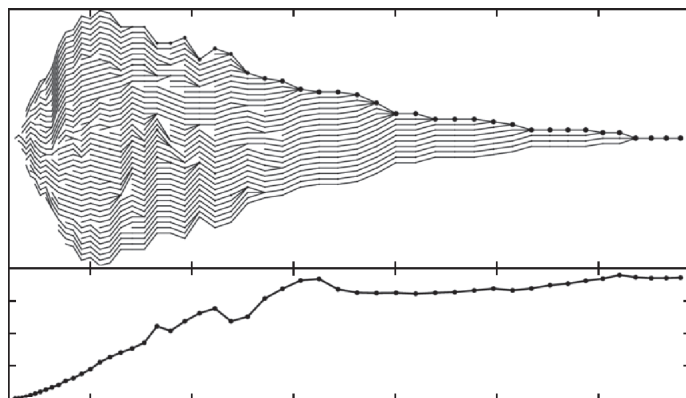
---

*Danilo Ristić (2000), Beograd, Dr Nika Miljanića 3/15, učenik 4. razreda Treće beogradske gimnazije*

**MENTORI:**

*Nemanja Martinović, Astronomska opservatorija u Beogradu*

*Petar Saulić, ITekako, Beograd*



Slika 1. Vizuelni prikaz izgleda drveta sudara s vremenom, gde je početak simulacije na levom kraju (prikaz celog drveta sudara sa svim sporednim granama gore i prikaz izdvojene grane najmasivnijih subhaloa u drvetu dole) (Bernyk *et al.* 2016)

Figure 1. A visual representation of the merger tree with time, where the start of the simulation is depicted on the left (the whole merger tree with side branches is shown at the top, and the most massive subhalo branch at the bottom) (Bernyk *et al.* 2016)

Čestice Illustris-1 simulacije grupisane su u različite strukture, predstavljene kao haloe tamne materije. Halo tamne materije predstavlja najmasivniji deo galaksije, sačinjen od čestica tamne materije koje interaguju samo gravitaciono. Preko kataloga grupa, možemo dobiti informacije o pojedinačnim *FOF haloima* i *subfind subhaloima* u određenom preseku stanja u simulaciji. FOF halo i su halo tamne materije određeni Frieds-of-friends algoritmom koji grupiše čestice na osnovu međusobnog rastojanja u zajednički halo tamne materije. Subhaloi predstavljaju haloe materije, određene *subfind algoritmom*, koji gravitaciono vezane čestice grupiše u jedan zajednički halo. Pošto subfind algoritam posmatra samo gravitaciono vezane čestice, jedan FOF halo može biti sačinjen od nula ili više različitih subhaloa.

*Drvo sudara* (slika 1) predstavlja skup podataka o svakom subhalou u simulaciji koji je s vremenom učestvovao u formiranju posmatranog subhaloa. Sačinjen je od *Sublink* podataka. Sublink podaci nude nam detaljnije informacije o subhaloima u određenom trenutku simulacije, naime, nude nam sve iste informacije o njima kao i katalog grupa, samo nam uz njih nude i određene identifikacione brojeve subhaloa, drveta sudara tog subhaloa ili, na primer, identifikacioni broj prethodnog ili sledećeg člana u tom drvetu sudara. Iz Sublink podataka korišćene su informacije o masama, stepenu formiranja zvezda i fotometrijskim podacima iz  $g$ ,  $r$  i  $i$  filtera subhaloa, masi gasa i masi zvezda u subhalou i o Subfind identifikacionom broju subhaloa.

Pored svega, u ovom radu smo koristili i *Stellar mocks* multispektralne sintetičke prikaze galaksija. Date vizualizacije dostupne su samo za galaksije mase veće od  $10^{10}$  masa Sunca na crvenom pomaku  $z = 0$ . Prikaze galaksija možemo dobiti kako izgledaju iz blizine zasebno, posmatrane sa Zemlje i kako bi izgledale sa prikazanim obližnjim galaksijama.

## Metod

Za analizu verovatnoće nastanka polar-ring galaksija, potrebni su nam podaci o velikom broju ovih galaksija, za šta je pogodno koristiti rezultate Illustris projekta. Kako bismo analizirali nastanak polar-ring galaksija, prvo je trebalo izdvojiti što veći broj kandidata iz kataloga galaksija simulacije Illustris-1. Katalog kandidata polar-ring galaksija formirali smo na osnovu poređenja parametara galaksija iz simulacije sa izvučenim setom parametara iz posmatračkog kataloga ovih galaksija. Parametri korišćeni za određivanje kandidata polar-ring galaksija su dobijeni iz podataka kataloga grupa i drveta sudara, preko Sublink podataka simulacije Illustris-1.

Iz podataka kataloga grupa, konkretno su korišćeni podaci o FOF haloima tamne materije. Posmatrani su samo FOF halo i mase preko  $10^{10}$  masa Sunca, jer je samo za njih mogao biti dobijen Stellar mocks vizuelni prikaz galaksije. Analizirani su samo najmasivniji subhaloi unutar FOF haloa, pošto su samo za njih, pomoću iden-

tifikacionog broja, mogli biti dobijeni Sublink podaci drveta sudara za dalju analizu.

Kako bi dalja selekcija kandidata polar-ring galaksija mogla biti izvedena, korišćena su ograničenja na Sublink podatke u vidu uobičajenih vrednosti za različite osobine polar-ring galaksija dobijenih astronomskim posmatranjima u radovima. Ograničenja korišćena u radu postavljena su na vrednosti stepena formacija zvezda (Reshetnikov i Combes 2015), odnos mase gasa i zbiru mase gasa i zvezda galaksija (Combes *et al.* 2013) i ograničenja na fotometrijske podatke (Reshetnikov i Combes 2015), izražene preko boja  $g-r$  i  $r-i$ . Zadana ograničenja na parametre galaksija predstavljena su u tabeli 1. Dobijeno je da 425 galaksija zadovoljava zadata ograničenja, i njih smo okarakterisali kao kandidate za polar-ring galaksije iz Illustris-1 simulacije.

Da bismo bili sigurni da će analiza nastanka biti izvedena na sigurnim primerima polar-ring galaksija, kandidati su morali biti i vizuelno potvrđeni. Korišćenjem Stellar mocks prikaza galaksija Illustris-1 simulacije, potvrđeno je da je 21 dobijena galaksiju sigurni primer polar-ring galaksije (slika 2).

Tabela 1. Vrednosti parametara korišćenih za izbor polar-ring galaksija.  $M_g$  je masa gasa, a  $M_z$  masa zvezda u galaksiji. Parametri  $g$ ,  $r$  i  $i$  su vrednosti fotometrijskih podataka galaksije izraženih preko  $g$ ,  $r$  i  $i$  filtera.

Parametri	Vrednosti parametara
Stepen formiranja zvezda	0.1–5 $M_\odot$ /god
$M_g / (M_g + M_z)$	0.1–0.5
$g-r$	0.54–0.94
$r-i$	0.31–0.51

Kako bi nastanak nađenih polar-ring galaksija bio ispitivan, korišćeni su podaci o galaksijama unutar drveta sudara ispitivanih galaksija, tj. galaksija koje su učestvovala u njihovom formiranju. Jedan od načina ispitivanja nastanka dobijenih galaksija jeste posmatranje grafika evolucije njihove mase s vremenom, od nastanka pa do sad. Na grafiku evolucije mase, sudari mogu da se pojave kao nagli padovi ili porasti vrednosti mase u datom trenutku, što se dešava usled nedostataka algoritma koji prati sudar.

Drugi način je predstavljao analizu galaksija sa kojima su se dobijene polar-ring galaksije sudarale u prošlosti, korišćenjem Sublink podataka drveta sudara galaksija koje su učestvovala u formiranju dobijene polar-ring galaksije. Ako bi odnos masa polar-ring galaksije i galaksije s kojom interaguje bio veći od 1:10, sudar bi bio klasifikovan kao mali, a u suprotnom kao veliki sudar. Posmatrane su galaksije s kojima su dobijene polar-ring galaksije interagovale u poslednjih 5 milijardi godina. Taj interval je korišćen jer je to vremenski period u kojem je očekivano da se oko posmatranih galaksija formirala i da postoji struktura prstena koja karakteriše polar-ring galaksije. Dati interval je korišćen i iz razloga što je isti interval korišćen i za posmatranje stabilnosti polar-ring galaksije u prethodnom radu (Ristić 2018).

Kako bi se izdvojili sudari koji su stvarno mogli prouzrokovati nastanak prstena, na fotometrijske podatke galaksija sa kojima su polar-ring galaksije interagovale u prošlosti, postavljena su sledeća ograničenja:

$$0.90 \geq r-i \geq 0.32 \text{ i}$$

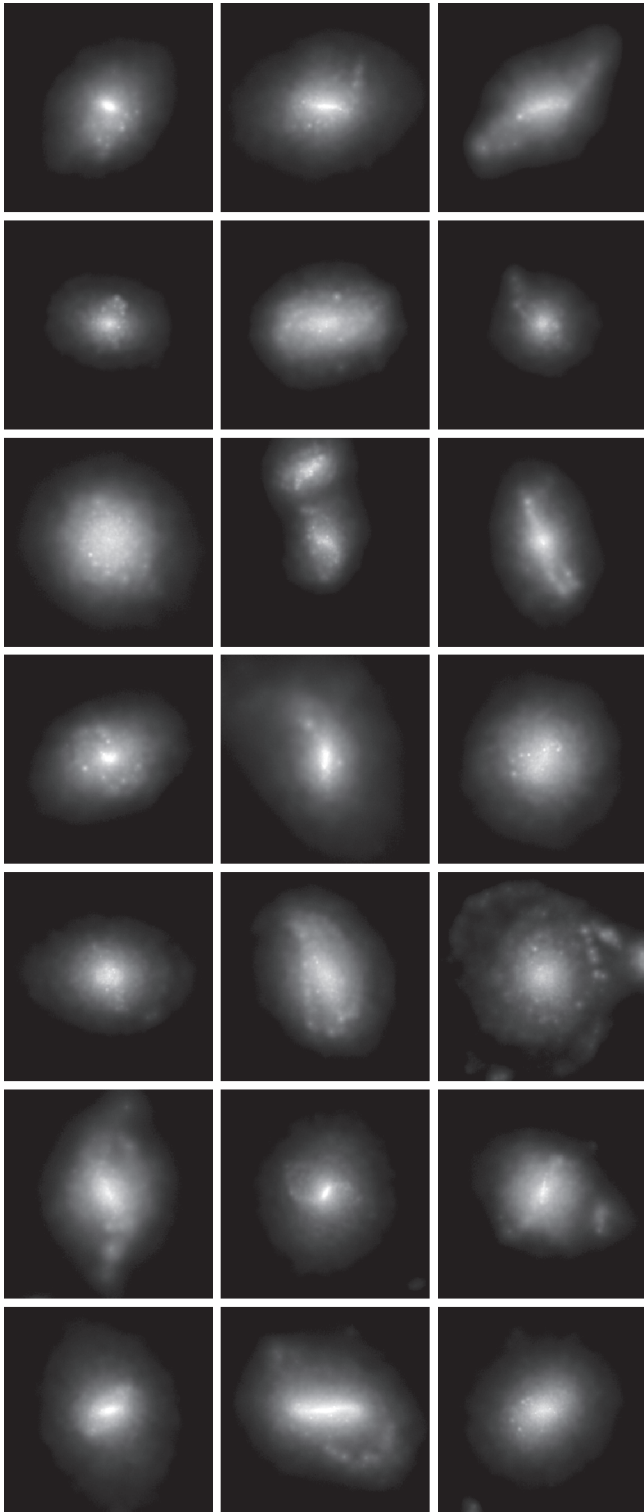
$$0.59 \geq r-i \geq 0.07$$

(Reshetnikov i Combes 2015). Ukoliko bi se u prošlosti dobijene galaksije primetio odgovarajući i mali i veliki sudar, ne bi se moglo utvrditi koji od njih je prouzrokovao nastanak prstena, pošto nisu dostupni podaci o izgledu dobijene galaksije u prošlosti, tj. na crvenim pomacima  $z > 0$ , kao ni informacije o osobinama i položaju zasebnih čestica.

## Rezultati

Na osnovu grafika evolucije mase dobijenih polar-ring galaksija, nisu primećeni nikakvi nagli porasti ili padovi vrednosti mase dobijenih galaksija ni na vremenskom intervalu od 10 milijardi godina, zbog čega je ovaj način ispitivanja okarakterisan kao nedovoljno precizan.

Analizom galaksija sa kojima su dobijene galaksije interagovale u prošlosti dobijeni su znatno bolji rezultati. Od 21 dobijene galaksije primećeno je da je njih 17 u poslednjih 5 milijardi godina imalo sudare koji bi mogli prouzrokovati nastanak prstena. Svih 17 galaksija koji su imale sudar imale su odgovarajući mali sudar, dok je samo njih 3 imalo i odgovarajući veliki sudar. Pošto je primećeno da 4 od 21 dobijene galaksije u poslednjih 5 milijardi godina nisu



Slika 2. Stellar Mocks prikaz izdvojenih primera polar-ring galaksija Illustris-1 simulacije

Figure 2. Stellar Mocks view of the selected polar-ring galaxy samples of the Illustris-1 simulation

imale nikakav odgovarajući sudar koji bi prozrokovao njihov nastanak, analiza je urađena i na intervalu od 8 milijardi godina od završetka simulacije, što je najraniji interval na kome je svaka od dobijenih galaksija imala odgovarajući sudar. Na tom intervalu je primećeno da je svaka od 21 polar-ring galaksije imala odgovarajući mali sudar, dok je njih 7 imalo i odgovarajući veliki sudar. Ovim rezultatima potvrđeno je da polar-ring galaksije mogu nastati kao posledica malog sudara, i pokazano da je taj vid formiranja znatno učestaliji od formiranja velikim sudarom.

## Zaključak

Dosadašnji radovi su kao pretpostavku postavljali da polar-ring galaksije ne mogu nastati kao posledica malog, već samo velikog sudara. U prethodnom radu (Ristić 2018) smo pokazali da polar-ring galaksije mogu nastati i kao posledica malog sudara i da mogu biti prolazna faza u istoriji galaksije. Cilj ovog rada bio je da potvrdimo zaključak prethodnog rada (*ibid.*) i da proverimo kolika je učestalost tog vida formiranja polar-ring galaksija. Korišćeni su podaci galaksija Illustris-1 simulacije, čiji je nastanak kasnije ispitivan.

Formiran je katalog polar-ring galaksija iz Illustris-1 simulacije, koristeći posmatračke podatke dobijene u radovima (Combes *et al.* 2013; Reshetnikov i Combes 2015). Iz dobijenih kandidata polar-ring galaksija, dalje je vizuelno određeno koje galaksije su sigurni primeri polar-ring galaksija. Analizom grafika evolucije mase nije primećen nijedan pokazatelj da je bilo velikih sudara u prošlosti dobijenih galaksija. Daljom analizom prošlosti dobijenih galaksija dobijeni su drugačiji rezultati, čime je ovaj metod okarakterisan kao nevalidan.

Analizom galaksija s kojima su dobijene polar-ring galaksije interagovale u prošlosti, primetili smo da u poslednjih 5 milijardi godina postoje galaksije koje nisu imale nijedan sudar odgovarajući za formiranje polar-ring galaksije. Ovaj rezultat pokazuje da polar-ring galaksije mogu biti stabilne i na periodima dužim od 5 milijardi godina, što nije očekivano na osnovu dosadašnjih radova. Primećeno je da na peri-

odima i od 5 i od 8 milijardi godina od završetka simulacije, rezultati pokazuju da je znatno veći procenat polar-ring galaksija mogao nastati pri malom, nego velikom sudaru.

Na osnovu ovih rezultata, zaključeno je da je nastanak ovog tipa galaksija kao posledice malog sudara, znatno učestaliji nego nastanak kao posledica velikog. Da bi dobijeni rezultati bili sigurniji, potrebno bi bilo imati i podatke o individualnim česticama galaksija Illustris-1 projekta. Takođe, korišćenjem podataka o položaju zasebnih čestica, moglo bi biti provereno i da li polar-ring galaksije predstavljaju vremenski stabilan ili prolazan fenomen.

**Zahvalnost.** Autor se zahvaljuje mentorima, Nemanji Martinoviću i Petru Sauliću, koji su svojim predlozima pomogli u realizaciji ovog projekta. Takođe, zahvaljuje se Stanislavu Miloševiću i Dušanu Vukadinoviću na korisnim komentarima.

---

## Literatura

Bernyk M., Croton D. J., Tonini C., Hodkinson L., Hassan A. H., Garel T., *et al.* 2016. The theoretical astrophysical observatory: cloud-based mock galaxy catalogs. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, **223** (1): 9.

Bournaud F., Combes F. 2003. Formation of polar ring galaxies. *Astronomy & Astrophysics*, **401** (3): 817.

Combes F., Moiseev A., Reshetnikov V. 2013. Molecular content of polar-ring galaxies. *Astronomy & Astrophysics*, **554**: A11.

Reshetnikov V., Combes F. 2015. Polar-ring galaxies: the SDSS view on the symbiotic galaxies. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, **447** (3): 2287.

Ristić D. 2018. Simulacija nastanka polar-ring galaksija. *Petničke sveske*, 76: 22

Vogelsberger M., Genel S., Springel V., Torrey P., Šijački D., Xu D., *et al.* 2014. Introducing the Illustris Project: simulating the coevolution of dark and visible matter in the Universe. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, **444** (2): 1518.

---

*Danilo Ristić*

## Examination of the Probability of the Formation of Polar-Ring Galaxies as a Consequence of a Small Collision by Analyzing the Data of the Illustris Project

Within this project we examined the probability of the formation of polar-ring galaxies as a result of a small collision. The method used was the analysis of the formation of polar-ring galaxies found in the Illustris-1 simulation data. By analyzing the galaxies with which the polar-ring galaxies had collided in the past, it was verified how frequent the phenomenon of this kind of formation of the polar-ring galaxies is. It has been observed that the formation of this type of galaxy as a consequence of a small collision is much more frequent than the result of a major collision.

