

Nastavno-naučnom veću
Matematičkog fakulteta
Univerziteta u Beogradu

Izveštaj Komisije za pregled i ocenu doktorske disertacije
„Simulacije proleta galaksija i uticaj parametra sudara na njihovu evoluciju“
kandidatkinje Ane Mitrašinić

Biografija kandidatkinje

Ana Mitrašinić je rođena 11.2.1990. u Beogradu. Osnovnu školu i gimnaziju završila je u Mladenovcu. Školske 2009/10. godine upisala je osnovne studije na Matematičkom fakultetu Univerziteta u Beogradu, smer Astrofizika. Diplomirala je 2013. godine sa prosečnom ocenom 9,22 i iste godine, na istom fakultetu upisala master studije. Master studije završila je sa prosečnom ocenom 9,50 i odbranom master rada 7.10.2014. godine pod nazivom „*Uticaj bliskog prolaza patuljaste galaksije na morfologiju spiralne galaksije*“, a pod mentorstvom dr Miroslava Mičića, i iste godine upisala doktorske studije. Od marta 2015. godine do završetka projektnog ciklusa bila je angažovana na projektu Astronomske opservatorije „*Vidljiva i nevidljiva materija u bliskim galaksijama: teorija i posmatranja*“ (176021) Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja. Trenutno je zaposlena na Astronomskoj opservatoriji u Beogradu. Koautor je jednog naučnog rada objavljenog u vrhunskom međunarodnom časopisu (Monthly Notices of the Royal Astronomical Society), samostalni autor jednog rada objavljenog u međunarodnom časopisu (Serbian Astronomical Journal) i koautor na više radova (7) objavljenih u zbornicima sa naučnih skupova, od kojih su 3 rada direktno vezana za doktorsku disertaciju (izvor: ADS).

Struktura doktorske disertacije

Disertacija sadrži ukupno 87 stranica teksta sa spiskom korišćene literature od 270 referenci, 28 slika, 10 tabela i jednom stranicom biografije autora. Struktura teksta je sledeća:

- Sadržaj
- 1. Uvod (1-18)
- 2. Modelovanje galaksija i numeričke simulacije (19-34)
- 3. Plimski efekti i gubitak mase tamne materije sekundarne galaksije (35-50)
- 4. Metode detekcije morfoloških struktura u diskovima galaksija (51-61)
- 5. Morfološka evolucija primarne galaksije (62-83)
- 6. Rezime i zaključak (84-87)
- Literatura (88-97)
- Biografija autora (98-98)

Osnovni fenomenološki cilj ove disertacije je ispitivanje uticaja proleta galaksija na strukturnu evoluciju interagujućih galaksija. Proleti galaksija su veoma bliske interakcije koje ne rezultiraju sudarom i imaju veliku učestanost u kasnom Univerzumu, te je njihova uloga u evoluciji galaksija značajna. Raniji radovi su se fokusirali na prolete galaksija jednakih masa, za koje je ustanovljeno iz kosmoloških simulacija da su izuzetno retke pojave. U ovoj disertaciji uzimaju se u obzir rezultati kosmoloških simulacija i karakteristike tipičnih proleta galaksija kod kojih su i odnos masa interagujućih galaksija i parametri sudara (minimalno rastojanje između galaksija tokom interakcije) značajno manji nego kod proleta galaksija jednakih masa. Usled toga, polazi se od pretpostavke da bi ovakvi, tipični proleti trebalo podjednako značajno da utiču na evoluciju interagujućih galaksija, te je nešto specifičniji cilj da se to eksplicitno dokaže, istakne uloga parametra sudara u ovakvim interakcijama i odredi funkcionalna zavisnost različitih posledica (na primer, karakteristika formirane spiralne strukture) od parametra sudara. Uz to, za razliku od prethodnih radova koji su to ignorisali, u ovoj disertaciji se detaljno ispituje evolucija sekundarne galaksije, kao i haloa tamne materije primarne galaksije, kako bi se dobila kompletnija slika o uticajima ovih interakcija na evoluciju galaksija.

Sa tehničke strane, cilj ove disertacije je da se demonstrira značaj nekosmoloških numeričkih simulacija i njihova prednost u odnosu na analitički ili semi-analitički pristup, naročito u slučaju izučavanja galaksija, njihove strukture, evolucije i međusobnih interakcija. Uz to, u ovoj disertaciji se pravi kritički osvrt na ustaljene kriterijume detekcije plimski formiranih struktura (prečke i spiralne strukture) i predlaže modifikacija koja uspešno i efikasno rešava neke probleme (konkretno, detekciju prečke u prisustvu spiralne strukture), a koja predstavlja fundamentalnije rešenje.

U prvom poglavlju napravljen je uvod u osnove morfologije i evolucije galaksija, definisani su osnovni elementi i mere jačina interakcija galaksija, diskutovane mogućnosti njihove klasifikacije i istaknut njihov značaj po evoluciju galaksija. Definisani su proleti galaksija, koji su fenomenološki predmet ove disertacije, predstavljene njihove osnovne karakteristike dobijene iz kosmoloških simulacija i napravljen pregled relevantnih istraživanja iz ove oblasti. Obrazložena je motivacija ove disertacije i jasno su definisani ciljevi istraživanja.

U drugom poglavlju predstavljen je veći deo tehničke osnove disertacije. Dati su recepti za modelovanje galaksija korišćenjem programskog paketa `GalactICs`, predstavljene su osnove numeričkih simulacija i diskutovana praktična primena javno dostupnog programa za realizaciju simulacija `Gadget2`. Predstavljene su i diskutovani modeli galaksija i simulacije proleta, realizovane za potrebe ove disertacije. Naročita pažnja je posvećena opravdanosti i značaju simulacija izolovanih galaksija i događaja. Istaknuto je da je prednost ovakvih simulacija u odnosu na kosmološke u njihovoj boljoj vremenskoj rezoluciji koja omogućava finije ispitivanje evolucije galaksija, njihovih struktura i kratkoročnih efekata. Pokazano je da numeričke simulacije daju realističnije rezultate u odnosu na analitički ili semi-analitički pristup, kao i da razlike između ovih pristupa mogu biti značajne.

U trećem poglavlju je najpre opisan proces plimskog ogoljavanja u interakcijama galaksija koji predstavlja najznačajniju posledicu proleta galaksija po evoluciju sekundarne galaksije, koja je potom detaljno ispitana. Korišćene su tri različite procene mase haloa tamne materije i utvrđeno je da njegova preostala masa, nezavisno od metode procene, prati zakon logaritamskog rasta sa parametrom sudara (pri čemu izgubljena masa onda prati zakon eksponencijalnog opadanja). Takođe je utvrđeno da se zvezdana komponenta radijalno širi prateći zakon eksponencijalnog opadanja sa parametrom sudara. Rezultati ukazuju na to da je doprinos proleta galaksija formiranju egzotičnih galaksija sa iznenađujuće malom količinom tamne materije, kao i formiranju ultradifuznih galaksija, veoma značajan. U ekstremnim, manje tipičnim slučajevima ovakvih interakcija, moguće je samostalno formiranje ovakvih galaksija, bez dodatnih doprinosa.

U četvrtom poglavlju dat je pregled metoda detekcije morfoloških struktura koje se prilikom interakcija formiraju u diskovima galaksija - dvogranih spirala i prečki. Diskutovane su prednosti i mane ustaljenih metoda detekcije prečke korišćenjem elemenata Furijeove analize i predložena nova, modifikovana metoda. Prednost nove metode je u tome što je ona brza, efikasno pravi razliku između prečke i spiralne strukture, a može detektovati slabije i kraće prečke, kao i kompleksnije prečkaste strukture (npr. dvostruke prečke). Poslednje je od posebnog značaja budući da slične, a efikasne metode trenutno ne postoje.

U petom poglavlju je detaljno ispitana morfološka evolucija primarne galaksije, sa najvećim fokusom na spiralnu strukturu i prečku. Utvrđeno je da se dvograne spirale formiraju u svim simulacijama tokom proleta, pri čemu su radijusi na kojima one počinju u korelaciji sa parametrom sudara, a njihove maksimalne jačine se mogu opisati obrnutom sigmoidnom funkcijom. Pokazano je da parametar sudara ne utiče na oblik spiralne

strukture, niti na trajanje perioda tokom kojih je ona jasno izražena. Pokazano je da se prečke, čije su jačine u antikorelaciji sa parametrom sudara, formiraju samo u bližim, jačim proletima. Predstavljen je fenomen dvostruke prečke, za koji je utvrđeno, po prvi put, da može nastati evolucijom i namotavanjem spiralne strukture oko rano formirane prečke. Uticaji na već postojeće nestabilnosti u disku mogu biti raznovrsni i zaključeno je da je nemoguće razdvojiti uticaje proleta od sekularne evolucije. Klasični centralni ovali se mogu blago izmeniti u bližim, jačim proletima ali to nije direktna posledica proleta već njegove ko-evolucije sa formiranom prečkom. Halo tamne materije zadobija rotaciju koja je u antikorelaciji sa parametrom sudara i postoji ugaono odstupanje između momenta impulsa haloa tamne materije i iste veličine diska, koje je u korelaciji sa parametrom sudara.

Pregled važnijih rezultata

Jedan od najvažnijih opštih rezultata ove disertacije je uspešno demonstriranje da tipični proleti galaksija mogu značajno doprineti promenama u strukturi interagujućih galaksija. Ovo je naročito bitno jer skreće pažnju na to da bi takve, tipične prolete trebalo više izučavati budući da kosmološke simulacije nesumnjivo pokazuju da su oni česti.

Analizom evolucije sekundarne galaksije, koja je praktično uvek ignorisana, ustanovljeno je da posledice proleta mogu biti veoma značajne. Plimskim ogoljavanjem sekundarna galaksija gubi velike količine tamne materije i primećeno je da preostala masa tamne materije prati zakon logaritamskog rasta sa parametrom sudara. Spekulisano je da bi ekstremniji proleti usled toga mogli dovesti do formiranja galaksija sa malom količinom tamne materije. Tokom izrade ove disertacije objavljeni su rezultati istraživanja (koje se bavi analizom kosmoloških simulacija) i koji upravo to potvrđuju. Utvrđeno je i da se zvezdana komponenta sekundarne galaksije radijalno širi prateći zakon eksponencijalnog opadanja sa parametrom sudara, što implicira da nešto manje tipični, ali jači ili bliži proleti mogu dovesti do formiranja ultradifuznih galaksija. U poslednjih par godina, sve je veći broj istraživanja koja ukazuju da bi ovo zaista mogao biti slučaj. Značaj rezultata prezentovanih u okviru ove disertacije je, pre svega, doprinos u rešavanju veoma aktuelnih problema.

Pokazano je da su posledice tipičnih proleta po evoluciju i strukturu primarne galaksije podjednako značajne kao kod proleta galaksija jednakih masa. Može doći do zadebljanja diska, koje zavisi od tipa i karakteristika formiranih struktura (prečke i spiralne strukture). Dvograna spiralna struktura se formira u disku galaksije u svim simulacijama, radijus na kome ona počinje je u korelaciji sa parametrom sudara a njeno vreme života dovoljno dugo da sekundarna galaksija napusti neposrednu blizinu primarne, što predstavlja potvrdu mehanizma formiranja dvogranih spirala kroz interakcije. Ovaj rezultat je od naročitog

značaja jer ima posmatračkih primera koji ovakav mehanizam formiranja spiralne strukture mogu dovesti u pitanje. Ustanovljeno je da se prečka formira u disku galaksije samo u jačim, odnosno bližim proletima i da je njena jačina u antikorelaciji sa parametrom sudara. Po prvi put je predložen mehanizam formiranja takozvane dvostruke prečke, namotavanjem spiralne strukture oko rano formirane prečke. O poreklu ovakvih struktura se i dalje polemše i jako malo zna, te bi značaj ovog rezultata trebalo biti očigledan. Posebno je diskutovana i observabilnost detektovanih prečki, uzimajući u obzir da su neke od njih veoma slabe i kratke, a da je detekcija ignorisala doprinos centralnog ovala. Zaključeno je da neke od njih ne bi mogle biti uočene posmatranjima ali da i dalje doprinose transportu momenta impulsa, kao i prilivu gasa do centra galaksije. Ovaj rezultat je značajan jer daje dodatno objašnjenje zašto istraživanja, koja se bave vezom između postojanja prečke i aktivnosti galaktičkog jezgra, često imaju oprečne rezultate. Ustanovljeno je da, iako su klasični centralni ovali otporni na prolete galaksija, oni mogu trpeti sekundarne posledice usled ko-evolucije sa formiranom prečkom u jačim i bližim proletima. Halo tamne materije primarne galaksije prilikom proleta zadobija nezanimljivu rotaciju, čija je mera u antikorelaciji sa parametrom sudara. Ovo je naročito značajno jer rotacija haloa tamne materije takođe može doprineti promenama u strukturi i evoluciji zvezdane komponente galaksije.

Sa tehničke strane, pokazano je ne samo da su izolovane simulacije N tela primenljive i praktične, već i poželjne i vrlo relevantne za istraživanja raznih fenomena koji zahtevaju finiju vremensku rezoluciju i realističniji pristup problemu od analitičkih ili semi-analitičkih pristupa. Razvijena praktična, brza i efikasna metoda za detekciju prečke u prisustvu spiralne strukture, detektuje i strukturu kao što je dvostruka prečka, što će biti od posebnog značaja za buduća istraživanja.

Naučni radovi iz oblasti istraživanja prezentovanog u disertaciji

1. Smole, M., Mičić, M., Mitrašinović, A., 2019, *Recoiling supermassive black holes in analytical and numerical galaxy potential*, **MNRAS**, **488**, 5566 (M21, impakt faktor 5.357),
2. Mitrašinović, A., 2022, *Dark matter mass loss in galaxy flybys: dependence on impact parameter*, **Serb. Astron. J.**, **204**, 39 (M23, petogodišnji impakt faktor (za 2021. godinu) 0.686),
3. Mitrašinović, A., Mičić, M., Smole, M., Stojković, N., Martinović, N., and Milošević, S., 2021, *Various Effects of Galaxy Flybys: Dependence on Impact Parameter*, **POBeo**, **100**, 323 (M63),
4. Mitrasinovic, A., Micic, M., Martinovic, N., Smole, M., and Milosevic, S., 2018, *Bar detection in N-body simulations using Fourier analysis*, **POBeo**, **98**, 167 (M63),
5. Martinović, N., Mičić, Miroslav, Mičić, Milica, Obuljen, A., Smole, M., Milošević, S., Mitrašinović, A., Stojanović, M., Smailagić, M., 2017, *Recommendation for running pure N-body simulations on computing facilities in Serbia*, **POBeo**, **96**, 257 (M63).

Ostali naučni radovi kandidatkinje

1. Smole, M., Mičić, M., Mitrašinović, A., Stojković, N., Martinović, N., and Milošević, S., 2021, *Statistics of Recoiling Supermassive Black Holes from Cosmological Simulation*, **POBeo**, **100**, 345 (M63),
2. Smole, M., Micic, M., Martinovic, N., Mitrasinovic, A., and Milosevic, S., 2018, *Early growth of supermassive black holes and gravitational wave recoil*, **POBeo**, **98**, 187 (M63),
3. Milosevic, S., Micic, M., Martinovic, N., Smole, M., and Mitrasinovic, A., 2018, *Influence of the softening length on stability of spiral galaxies in N-body simulations*, **POBeo**, **98**, 161 (M63),
4. Martinovic, N., Micic, M., Mitrasinovic, A., Milosevic, S., and Smole, M., 2018, *Reconstructing formation and evolution of compact dwarf candidates in clusters of galaxies*, **POBeo**, **98**, 145 (M63).

Zaključak i predlog

Doktorska disertacija pod nazivom „*Simulacije proleta galaksija i uticaj parametra sudara na njihovu evoluciju*“ Ane Mitrašinović predstavlja celovito naučno delo. Problematika koja se razmatra izložena je strukturno, sa jasnim ciljem. Poglavlja disertacije razdeljena su tako da jasno predstavljaju celovitu sliku uticaja proleta na evoluciju galaksija, ali i opravdanost i značaj metoda korišćenih za potrebe istraživanja. Kandidatkinja je pokazala veliku samostalnost u radu i široko poznavanje date oblasti, služeći se različitim metodama analize podataka. Rezultati disertacije predstavljaju naučni doprinos istraživanju uticaja interakcija galaksija na njihovu evoluciju i daju smernice za buduća istraživanja. Iz naučne oblasti kojom se bavi, kandidatkinja je objavila, samostalno i kao koautor, 2 rada u međunarodnim časopisima na SCI listi, od kojih je 1 objavljen u vodećem međunarodnom časopisu.

Stoga, predlažemo Nastavno-naučnom veću Matematičkog fakulteta da prihvati ovaj izveštaj i pozitivnu ocenu doktorske disertacije „*Simulacije proleta galaksija i uticaj parametra sudara na njihovu evoluciju*“ Ane Mitrašinović i odredi komisiju za njenu odbranu.

Beograd, 07.07.2022. godine

Komisija:

dr Miroslav Mičić,
viši naučni saradnik,
Astronomska opservatorija

dr Branislav Vukotić,
naučni savetnik,
Astronomska opservatorija

prof. dr Dragana Ilić,
vanredni profesor,
Matematički fakultet