

Nastavno-naučnom veću  
Matematičkog fakulteta  
Univerziteta u Beogradu

**Izveštaj Komisije za pregled i ocenu doktorske disertacije**  
*„Formiranje supermasivnih crnih rupa i uticaj sudara galaksija na njihovu evoluciju“*  
**kandidatkinje Majde Smole**

**Biografija kandidatkinje**

Majda Smole je rođena 01. 05. 1989. godine u Beogradu. Osnovnu školu i gimnaziju je završila u Beogradu. Studije astrofizike na Matematičkom fakultetu Univerziteta u Beogradu upisala je 2008. i diplomirala 2012. godine. Master studije završava 2013. godine odbranom master rada „Modeliranje rasta supermasivnih crnih rupa na crvenom pomaku  $z = 7$ “ pod mentorstvom dr. Miroslava Mičića, nakon čega upisuje doktorske studije. Tokom 2014. godine bila je stipendista-doktorand Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije na projektu Astronomske opservatorije „Vidljiva i nevidljiva materija u bliskim galaksijama: teorija i posmatranja“ (br. 176021). Od 2015. godine je zaposlena na Astronomskoj opservatoriji u Beogradu na istom projektu. Od početka svoje naučne karijere, objavila je 3 (izvor ADS) naučna rada u međunarodnim časopisima.

## Struktura doktorske disertacije

Disertacija sadrži ukupno 149 stranica teksta sa spiskom korišćene literature od 330 referenci, 28 slika, 3 tabele i jednom stranicom biografije autora. Struktura teksta je sledeća:

- Sadržaj
- 1. Uvod (1-63)
- 2. Rast crnih rupa na visokom crvenom pomaku (64-82)
- 3. Gravitacioni uzmak crnih rupa u analitičkom potencijalu haloa tamne materije (83-100)
- 4. Gravitacioni uzmak crnih rupa u analitičkom i numeričkom potencijalu galaksije (101-125)
- 5. Rezime i zaključci (126-130)
- 6. Biografija autora (159-159)

Osnovni cilj ove doktorske disertacije je ispitivanje pod kojim uslovima crne rupe, koje nastaju od prvih zvezda i imaju masu  $100 M_{\odot}$ , mogu da objasne funkciju mase crnih rupa detektovanih u kvazarima na  $z \sim 6$ . Raniji radovi su većinom odbacivali crne rupe koje nastaju od zvezda Populacije III kao kandidate za semena supermasivnih crnih rupa na visokom crvenom pomaku, usled potrebe za dugotrajnom akrecijom ( $>800$  Myr) ili akrecijom na veoma visokom Edingtonovom odnosu. U ovoj disertaciji se ispituje da li uticaj sudara crnih rupa može da ubrza njihov rast i smanji potrebu za dugotrajnom akrecijom gasa, kao i da li emisija gravitacionog talasnog zračenja može značajno da uspori njihov rast.

U ovoj disertaciji polazi se od pretpostavke da crne rupe rastu akrecijom gasa i u sudarima sa drugim crnim rupama. Prema trenutno prihvaćenom hijerarhijskom rastu struktura, haloa tamne materije i galaksije prolaze kroz veliki broj sudara. Pretpostavlja se da nakon sudara galaksija crne rupe u njihovim centrima formiraju dvojni sistem, a da se zatim usled dinamičkih procesa spajaju. Pored toga, sudari galaksija dovode do priliva gasa u centralne oblasti što aktivira akreciju na crnu rupu.

U prvom poglavlju disertacije dat je detaljan teorijski uvod i pregled dosadašnjih istraživanja u oblasti mehanizama formiranja početnih crnih rupa i parametara njihovog rasta usled akrecije gasa. Zatim je opisana je evolucija dvojnih sistema crnih rupa koji se formiraju nakon sudara galaksija, sa posebnim osvrtom na krajnju etapu evolucije kada dolazi do spajanja crnih rupa i emisije gravitacionog talasnog zračenja. Predstavljen je mehanizam usled koga crne rupe, koje nastaju spajanjem članova dvojnog sistema, dobijaju gravitacioni uzmak; diskutovane su očekivane brzine gravitacionog uzmaka, kao i mogućnosti za direktnu i indirektnu detekciju takvih objekata.

U drugom poglavlju ispitana je evolucija crnih rupa na kosmološkim skalama i mogućnost formiranja supermasivne crne rupe sa masom  $10^9 M_{\odot}$  koja je detektovana u kvazaru posmatranom na crvenom pomaku  $z \sim 7$ . Polazi se od semena crnih rupa sa masom  $100 M_{\odot}$  koja nastaju kao krajnja faza evolucije zvezda Populacije III i rastu kombinacijom spajanja sa drugim crnim rupama i akrecijom gasa.

Za ispitivanje rasta crnih rupa koriste se Milenijum i Milenijum-II kosmološke simulacije problema N-tela. Iz navedenih simulacija preuzeti su snimci haloa tamne materije na različitim crvenim pomacima, kao i informacije o njihovim eventualnim sudarima. Na osnovu tih podataka konstruisano je drvo sudara, kako bi se pratilo formiranje i evolucija struktura u ranom Univerzumu. Haloima iz simulacija su pridružena semena crnih rupa i pod pretpostavkom da se u svakom halou tamne materije nalazi po jedna crna rupa, istorija rasta haloa tamne materije prati i istoriju rasta crnih rupa.

U disertaciji je razvijen metod povezivanja različitih kosmoloških simulacija, što predstavlja novi pristup analizi njihovih rezultata. Visoka rezolucija po masi u Milenijum-II simulaciji koristi se kako bi se pratila evolucija najmanjih haloa tamne materije na visokim crvenim pomacima i rast crnih rupa u njihovim centrima. Zatim se tipične mase crnih rupa iz Milenijum-II simulacije, za datu masu haloa i crveni pomak, koriste kao semena crnih rupa u haloima Milenijum simulacije, čija je simulaciona kutija veća. Na taj način se proširuje uzorak haloa tamne materije kako bi se dobio veći interval masa haloa. Ovakav pristup je izuzetno koristan jer je u praksi teško postići visoku rezoluciju u simulacionoj kutiji veličine one u Milenijum simulaciji.

Pošto se u disertaciji pretpostavlja da sudari crnih rupa doprinose njihovom rastu, u narednim poglavljima je ispitano pod kojim uslovima uzmak crnih rupa, uzrokovan emisijom gravitacionog talasnog zračenja, dovodi do trajnog izbacivanja crne rupe iz matičnog haloa i samim tim do usporavanja rasta supermasivnih crnih rupa.

U poglavlju 3 su analitički izračunate trajektorije crne rupe koja se kreće u statičkom i u evoluirajućem potencijalu haloa tamne materije koji je opisan NFW, odnosno Ainao profilom gustine. U ovom poglavlju ispitan je uticaj evolucije, odnosno rasta haloa, kao i oblika njegovog potencijala, na mogućnost haloa da zadrži crnu rupu u svom centru. Crnim rupama u centru haloa pripisane su različite brzine uzmarka, na različitim crvenim pomacima, kako bi se izračunalo njihovo rastojanje od centra haloa na  $z = 0$ .

U poglavlju 4 izračunate su trajektorije crnih rupa u analitičkim i numeričkim modelima gravitacionog potencijala galaksija. Pored haloa tamne materije, razmatra se i uticaj prisustva centralnog ovala i diska. Ispitano je kako se brzina napuštanja galaksije, odnosno brzina koju je potrebno saopštiti crnoj rupi kako bi ostala izvan centra galaksije tokom Hablovog vremena, menja sa: (i) masom galaksije, (ii) masom crne rupe i (iii) načinom formiranja galaksije, odnosno da li galaksija nastaje nakon malog ili velikog sudara. Zasebno su konstruisani analitički i numerički modeli galaksija istih karakteristika sa ciljem da se ispita kako perturbacije u profilu gustine galaksija nakon sudara u numeričkim modelima utiču na trajektorije crnih rupa. Početni uslovi numeričkih modela dobijeni su korišćenjem programskog paketa `GalactICS`, dok je za simulacije sudara galaksija u

izolaciji korišćen GADGET-2 kod.

## Pregled važnijih rezultata

Jedan od najvažnijih rezultata ove disertacije je uspešno formiranje supermasivne crne rupe sa masom  $10^9 M_{\odot}$  na crvenom pomaku  $z \sim 7$ . Pokazano je da semena crnih rupa, koja nastaju kao krajnja faza evolucije prvih zvezda i rastu kombinacijom akrecije gasa i sudara sa drugim crnim rupama, mogu da objasne supermasivne crne rupe u centrima kvazara na visokim crvenim pomacima. Neophodan uslov je da se akrecija gasa odvija pri efektivnoj vrednosti Edingtonovog odnosa  $f_{\text{Edd}} = 3.7$ , što je u skladu sa novijim posmatranjima kvazara u ranom Univerzumu. Dobijena funkcija mase crnih rupa je u saglasnosti sa funkcijom mase izvedenom iz posmatranja kvazara na  $z \sim 6$ . Značaj ovog rezultata je u tome što su prethodni proračuni ukazivali da je, za početna semena crnih rupa od  $100 M_{\odot}$ , neophodna kontinuirana akrecija gasa na Edingtonovoj granici tokom 840 Myr (što prevazilazi starost Univerzuma na crvenom pomaku  $z = 7$ ) ili akrecija gasa na Edingtonovom odnosu  $f_{\text{Edd}} \sim 18$  tokom 45 Myr.

Prilikom analize trajektorija crnih rupa u ovoj disertaciji primenjena su dva nova pristupa: (i) u poglavlju 3 uzeta je u obzir evolucija haloa tamne materije, odnosno razmatra se kretanje crne rupe kroz halo koji istovremeno raste akrecijom hladnog gasa kroz filamente tamne materije, (ii) u poglavlju 4 proširuju se prethodni analitički proračuni konstruisanjem numeričkih modela galaksija koji omogućavaju preciznije modelovanje galaksija koje nastaju nakon sudara.

Ispitivanjem trajektorija crnih rupa koje nakon sudara bivaju izbačene iz centara matičnih haloa tamne materije utvrđeno je da evolucija haloa ima uticaj na sposobnost haloa da zadrži crnu rupu, jer haloi na visokom crvenom pomaku imaju male mase. Samim tim, emisija gravitacionih talasa ima veći uticaj na rast crnih rupa na visokim crvenim pomacima. U prisustvu zvezdane komponente galaksije potrebne su veće brzine uzmaka za trajno izbacivanje crne rupe nego u slučaju kada se razmatra isključivo halo tamne materije. Poređenjem analitičkih i numeričkih modela galaksija utvrđeno je da numerički modeli galaksija nakon sudara imaju manje brzine napuštanja, jer u trenutku izbacivanja crne rupe galaksija još uvek nema formiran stabilan potencijal. Pored toga, karakteristike samih galaksija i način njihovog formiranja utiču na brzine napuštanja. Veliki sudari galaksija dovode do većih perturbacija potencijala što omogućava crnim rupama sa manjim brzinama uzmaka da trajno napuste centar novonastale galaksije. Pošto veliki sudari dovode do priliva gasa u centralne oblasti galaksije i akrecije gasa na crnu rupu, ovaj efekat može uticati na rast crnih rupa usled sudara. Ovaj efekat je naročito izražen na visokim crvenim pomacima gde je potencijalna jama galaksija plića.

### Naučni radovi iz oblasti istraživanja prezentovanog u disertaciji

1. Smole M., Micic M., Martinović N., 2015, *SMBH growth parameters in the early Universe of Millennium and Millennium-II simulations*, **MNRAS**, **451**, 1964,
2. Smole M., 2015, *Recoiling Black Holes in Static and Evolving Dark Matter Halo Potential*, **Serb. Astron. J.**, **191**, 17.

### Ostali naučni radovi kandidatkinje

1. Kraus M., Tomić S., Oksala M., Smole, M., 2012, *Detection of a 1.59h period in the B supergiant star HD 202850*, **A&A**, **542**, L32.

## Zaključak i predlog

Doktorska disertacija pod nazivom „*Formiranje supermasivnih crnih rupa i uticaj sudara galaksija na njihovu evoluciju*“ Majde Smole predstavlja celovito naučno delo. Problematika koja se razmatra izložena je strukturno, sa jasnim ciljem. Poglavlja disertacije predstavljaju nezavisne rezultate koji su povezani u celinu kako bi se dobila kompletnija slika doprinosa sudara crnih rupa njihovom rastu. Kandidatkinja je pokazala široko poznavanje date oblasti, služeći se podjednako analitičkim i numeričkim metodama. Rezultati disertacije predstavljaju naučni doprinos istraživanju rasta supermasivnih crnih rupa i uticaja sudara galaksija na njihovu evoluciju. Iz naučne oblasti kojom se bavi u svojoj disertaciji, 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 „*Formiranje supermasivnih crnih rupa i uticaj sudara galaksija na njihovu evoluciju*“ Majde Smole i odredi komisiju za njenu odbranu.

Beograd, 14.04.2017. godine

Komisija:

---

dr Miroslav Mičić,  
naučni saradnik,  
Astronomska opservatorija

---

dr Branislav Vukotić,  
viši naučni saradnik,  
Astronomska opservatorija

---

prof. dr Dragana Ilić,  
vanredni profesor,  
Matematički fakultet

---

dr Bojan Novaković,  
docent,  
Matematički fakultet