

Modelovanje i analiza gravitacionih talasa pri inspiralu crne rupe unutar imitatora supermasivne crne rupe

Sa razvojem tehnologija za detektovanje gravitacionih talasa, otvaraju se novi metodi istraživanja svemira. Aktualna hipoteza o postojanju supermasivnih crnih rupa (SMBH), na ovaj način može se testirati nasuprot hipotezi o postojanju kompaktnih, samogravitirajućih objekata koji imitiraju SMBH, a grade ih čestice tamne materije. Numeričkim simulacijama dobijeni su gravitacioni talasi emitovani pri inspiralu crne rupe unutar homogenog imitatora, a zatim su analizirani u domenu frekvencija. Kretanje crne rupe je opisano u Njutnovskoj mehanici, a obrađeni su slučajevi sa dva različita implementirana modela akrecije i uključenim efektom dinamičkog trenja, dok se gubitak energije na zračenje gravitacionih talasa računao u kvadrupolnoj aproksimaciji. Dobijeni rezultati pokazali su kvalitativnu razliku u izgledu spektra u slučaju postojanja imitatora nasuprot inspiralu crne rupe u SMBH. Dobijeni rezultati sugerišu da bi razvojem posmatračke tehnologije bilo moguće testirati postojeću teoriju o SMBH u centrima galaksija nasuprot postojanja potencijalnog imitatora.

Uvod

Otkriće gravitacionih talasa proizvedenih sudarom dve crne rupe, u daljem tekstu BH (eng. Black Hole) 14. septembra 2015 (Abbott *et al.* 2016), sa sobom je donelo nov metod istraživanja različitih fenomena u svemiru. Jedan od otvorenih problema za koji je ovaj metod pogođan jeste problem tamne materije. Od kako je

postulirano da tamna materija mora postojati kako bi svemir imao strukturu koju ima (Carroll i Ostlie 2014), brojni modeli potencijalnih konstituenata tamne materije su predloženi. U određenom broju tih modela, ti konstituenti su još neotkrivene čestice, koje mogu graditi kompaktne samogravitirajuće objekte (Barack *et al.* 2018). Postoji hipoteza da se u centru galaksija može nalaziti jedan takav objekat umesto supermasivne crne rupe, u daljem tekstu SMBH (eng. Supermassive Black Hole) (Macedo *et al.* 2013). On bi imao masu ekvivalentnu masi SMBH u centru galaksija, i ne bi bilo moguće diskriminisati ga na osnovu elektromagnetnog zračenja. Jedna distinktna osobina ovog imitatora na osnovu koje bi se mogla testirati validnost aktuelne hipoteze o postojanju SMBH u centrima galaksija jesu gravitacioni talasi emitovani pri inspiralu crne rupe zvezdane mase unutar imitatora. Inspiral predstavlja spiralno adijabatsko upadanje jednog objekta ka drugom, uz određeni mehanizam gubitka energije. Posmatra se inspiral crne rupe jer će u tom slučaju gravitacioni talasi poticati samo od kretanja kompaktnog objekta, a ne i od drugih izvora (*ibid.*). U ovom slučaju postoje tri glavna mehanizma gubitka energije:

1. Emitovanje gravitacionih talasa
2. Dinamičko trenje
3. Akrecija

U realnosti, efekti akrecije i dinamičkog trenja utiču i pre nego što crna rupa pređe granicu imitatora, no oni bi bili zanemarljivi i, kao takvi, nisu uračunati u analizi u ovom radu. Nakon što pređe granicu imitatora, stepen gubljenja ener-

Luka Jevtović (1999), Beograd, Kestenova 6/9, učenik 3. razreda Trinaeste beogradske gimnazije u Beogradu

MENTORI:

Mateja Bošković, Istraživačka stanica Petnica

Vladan Đukić, student Fizičkog fakulteta Univerziteta u Beogradu

gije izazvan emitovanjem gravitacionih talasa postaje za više redova veličine manji u odnosu na druga dva mehanizma (*ibid.*). Zbog toga se u ovom radu, nakon prelaska granice, zanemaruje mehanizam gubitka energije putem gravitacionih talasa, već se oblik gravitacionih talasa modeluje samo uključivanjem efekata akrecije i dinamičkog trenja.

Zbog prirode crne rupe i imitatora, inspiral bi bilo praktično nemoguće detektovati i analizirati preko elektromagnetnog zračenja (*ibid.*). Međutim, tokom inspirala se emituju gravitacioni talasi, koji će biti kvalitativno drugačiji u zavisnosti od toga da li imitator postoji ili je u pitanju inspiral SMBH i BH.

U ovom radu analizirani su gravitacioni talasi emitovani u fazama inspirala u spoljašnjosti, kao i u unutrašnjosti hipotetičkog imitatora SMBH, i upoređeni su sa talasima koji bi bili emitovani da je u pitanju inspiral SMBH i BH, bez imitatora. Ceo postupak primenjen je na slučaj imitatora koji ima konstantnu gustinu. Reprodukovani su rezultati u radu Macedo i saradnika (2013), i detaljnije analizirani u domenu frekvencija koristeći Fast-Fourier-Transform (FFT) algoritam, kako bi se uvidelo postoji li detektabilna razlika u spektrima dobijenim od inspirala unutar imitatora u poređenju sa inspiralom SMBH i BH.

Model inspirala

Inspiral u spoljašnjosti imitatora

Ukoliko je jedini mehanizam disipacije energije emitovanje gravitacionih talasa, kao što je slučaj u delu inspirala koji se odvija van imitatora, trajektorija BH može se modelovati u kvadrupolnoj aproksimaciji. U analiziranom modelu, pratiće se oskulatorne promene orbitalnih elemenata, gde oskulatorna orbita predstavlja keplerovsku orbitu koju bi telo opisivalo da nema spoljnih perturbacija. Parametri oskulatorne orbite kompaktnog objekta će se menjati u skladu sa sledećim jednačinama, koje su dobijene perturbativnim računom (Shapiro i Teukolsky 2008):

$$\dot{a} = -\frac{304}{15} \frac{mM^2}{b^4(1-e^2)^{\frac{5}{2}}} \left(1 + \frac{121}{304} e^2 \right),$$

$$\dot{b} = -\frac{64}{5} \frac{mM^2}{b^3(1-e^2)^{\frac{7}{2}}} \left(1 + \frac{73}{24} e^2 + \frac{37}{96} e^4 \right),$$

$$\dot{\varphi} = \frac{(1+e \cos \varphi)^2}{1-e^2} \sqrt{\frac{M}{b^3}}.$$

Ovde su a i b velika i mala poluosa, e je ekscentricitet oskulatorne orbite u nekom trenutku, a φ prava anomalija. Numeričkim rešavanjem ovog sistema za date početne uslove dobija se evolucija orbitalnih parametara oskulatornih orbita tokom čitavog inspirala crne rupe u spoljašnjosti imitatora. Udaljenost od koordinatnog početka, r , se računa preko relacije:

$$r = \frac{b(1-e^2)}{1+e \cos \varphi}.$$

S obzirom da je sistem aksijalno simetričan, početni ugao φ može biti proizvoljan. U trenutku kada kompaktni objekat dotakne granicu imitatora, numeričko rešavanje gorenavedenog sistema se prekida. Tada gubitak energije putem emitovanja gravitacionih talasa postaje zanemarljiv u odnosu na dva nova mehanizma gubitka energije koji započinju da dominiraju – akreciju i dinamičko trenje.

Akrecija i dinamičko trenje

Tamna materija, kao i bilo koja druga materija, može se akretovati na masivne objekte kao što su crne rupe. Kako je u pitanju tamna materija, koja interaguje dominantno gravitaciono, akrecija neće imati nikakve druge efekte osim povećanja mase crne rupe, što će uticati na njenu dalju evoluciju. U simulacijama su implementirana dva različita modela akrecije – bezsudarni i Bondi-Hojl. Bezsudarna akrecija razvijena je kako bi opisala akreciju međuzvezdane sredine na sferno simetrični objekat, uglavnom neutronsku zvezdu ili crnu rupu. Pogodna je za opisivanje akrecije velikog broja malih čestica na jedno telo. Bondi-Hojl akrecija, sa druge strane, je hidrodinamički model koji uzima u obzir i makroskopske efekte. Izbor između ova dva modela zavisi od odnosa veličine tela koje akretuje materiju (Švarcšildovog radijusa u slučaju crnih rupa ili realnog poluprečnika u ostalim slučajevima) i srednjeg slobodnog puta tela u sredini. U slučaju da je radijus tela koje akretuje masu zna-

čajno veće od srednjeg slobodnog puta, akrecija se vrši po Bondi-Hoijl modelu. Srednji slobodni put zavisi od karakteristika čestice i sredine.

Oba modela akrecije su analizirana u ekstremnom odnosu masa, gde je izabran odnos $m(0) = 0.01 M$ ($m(0)$ je funkcija mase crne rupe u trenutku $t = 0$, a M je masa imitatora). U realnosti, SMBH će imati mase reda $10^6 - 10^{10}$ masa Sunca, dok će crne rupe zvezdane mase imati mase reda veličine mase Sunca. Ovakav odnos masa implementiran je radi bolje vizuelizacije, kao i u radu Macedo i saradnika (2013). Svaki rezultat skaliran je sa masom imitatora, ostavljajući tu vrednost proizvoljnom. Na ovaj način se dobijaju rezultati nezavisni od mase imitatora i lako se mogu skalirati sa njom.

Jednačine modela akrecije uzete su iz literature i imaju sledeći oblik:

$$\dot{m} = \frac{4\pi G^2 \rho m^2}{v}, \quad (1)$$

za bezsudarni model (Macedo *et al.* 2013), i:

$$\dot{m} = \frac{4\pi G^2 \rho m^2}{(v^2 + c_s^2)^{\frac{3}{2}}}, \quad (2)$$

za Bondi-Hoijl model (Bondi i Hoyle 1944). U ovim jednačinama je ρ gustina imitatora, v brzina crne rupe, a c_s brzina zvuka unutar imitatora. U slučaju modela imitatora sa konstantnim profilom gustine, pokazuje se da su razlike između ova dva modela akrecije male i ne utiču na kvalitativne aspekte orbitalne dinamike.

Drugi mehanizam gubitka energije koji počinje da dominira nakon upada crne rupe u imitatora jeste dinamičko trenje. Dinamičko trenje je pojava do koje dolazi pri prolasku masivnog tela kroz grupu manje masivnih čestica ili fluid, pri čemu se formira struktura nalik na rep, koja prati masivno telo. Ta struktura interaguje gravitaciono sa masivnim telom i pritom se ispoljava sila istog pravca a suprotnog smera kretanju masivnog tela, analogno standardnom trenju. Dinamičko trenje se različito manifestuje u različitim režimima – supersoničnom i subsoničnom. Supersonični režim opisuje slučaj u kome je brzina crne rupe veća od brzine zvuka u imitatoru, dok subsonični režim opisuje slučaj u kome je brzina crne rupe manja od brzine zvuka u imitatoru. Sila dinamičkog trenja računa se kao (*ibid.*):

$$F_{DT} = \frac{4G^2 \rho m^2}{v^2} I_v, \quad (3)$$

Gde poslednji član, I_v , određuje razliku između dva režima, i to tako što dobija dva različita oblika u zavisnosti od odnosa brzine crne rupe i zvuka u imitatoru (*ibid.*):

$$I_v = \begin{cases} \frac{1}{2} \ln \left(\frac{1 + \frac{v}{c_s}}{1 - \frac{v}{c_s}} \right), & v < c_s \\ \frac{1}{2} \ln \left(1 - \frac{c_s^2}{v^2} \right) + \ln \left(\frac{2rv}{m} \right), & v > c_s \end{cases}. \quad (4)$$

Jednačina (3) važi u slučaju da je medijum homogeni fluid, što je pretpostavljeno u ovom radu. U slučaju nehomogenog bezsudarnog sistema, koristila bi se Čandrasekarova jednačina za dinamičko trenje (Carrol i Ostlie 2014). U jednačini (4) vidi se da u supersoničnom slučaju u član I_v figuriše i član oblika $\ln(2rv/m)$, koji dovodi do toga da će sila dinamičkog trenja biti veća i crna rupa će u supersoničnom režimu rapidno gubiti energiju. Kako se vidi, brzina zvuka igra ključnu ulogu u računanju jednačina (2) i (4). U radu su analizirana dva slučaja sa različitim brzinama zvuka od $0.2c$ i $0.6c$. Ove vrednosti izabrane su kao reprezentativne za dva pomenuta režima – $0.2c$ za supersonični, i $0.6c$ za subsonični.

Gravitacioni talasi

Gravitacioni talasi emitovani tokom inspirala mogu se modelovati u kvadrupolnoj aproksimaciji (*ibid.*). Naime, razvijanjem gravitacionog potencijala sistema koji zrači u red i uzimajući u obzir prva tri člana tog reda dobija se sledeći izraz (Griffiths 2005):

$$V = -\frac{GM}{r} - G \frac{\vec{r} \cdot \vec{p}}{r^3} - G \int_v \rho(\vec{r}') \frac{r'^2}{2r^3} (3 \cos^2 \alpha - 1) d^3 \vec{r}',$$

gde je \vec{p} dipolni moment, \vec{r} je položaj u kome se gravitacioni potencijal računa, a \vec{r}' vektor čija vrednost opisuje pozicije od centra do granice

tela koje stvara potencijal, pri integraciji po njegovoj zapremini. Ugao između ova dva vektora obeležen je sa α . Ovakav razvoj gravitacionog polja u red se naziva multipolna ekspanzija.

Gravitacioni monopol, odnosno prvi član reda, predstavlja masu nekog objekta. U slučaju električnog polja, monopolni član je naelektrisanje izvora polja. Gravitacioni dipol, odnosno drugi član reda, je vektorska veličina koja opisuje kako je masa objekta dislocirana u odnosu na neki centar (najčešće centar mase objekta ili sistema objekata). Elektromagnetno (EM) zračenje se opisuje oscilovanjem električnog dipola. Međutim, to je moguće zbog postojanja pozitivnog i negativnog naelektrisanja. Njihovo međusobno oscilovanje stvara promenu u električnom polju, odnosno EM talase. Kod gravitacionog dipola, zbog nepostojanja „negativne mase” moment gravitacionog dipola će uvek biti nula kada se koordinatni sistem veže za centar mase. Prvi član multipolne ekspanzije odgovoran za gravitaciono zračenje jeste kvadrupolni moment. Gravitacioni kvadrupol kvantifikuje deformisanost neke mase u odnosu na savršenu sferu duž određene ose, te će se kvadrupolni moment menjati u skladu sa ubrzanim kretanjem masenih objekata. Ukoliko je kvadrupolni moment nula, u pitanju je sferno simetrična raspodela mase, koja ne može zračiti gravitacione talase. U ovom radu je zračenje gravitacionih talasa modelovano u kvadrupolnoj aproksimaciji. Ovaj model je aproksimativan jer zanemaruje više članove multipolnog razvoja.

Za razliku od EM zračenja, koje predstavlja oscilacije električnog i magnetnog polja u prostoru i vremenu, gravitacioni talasi su oscilacije samog prostor-vremena. Oni imaju dva režima linearne polarizacije, tzv. „plus” (+) i „krst” (×) režimi, koji su imena dobili po tome kako bi se krug hipotetičkih čestica deformisao pri njihovom prolasku u pravcu normalnom na centar tog kruga. Ova dva režima povezana su sa spinom gravitona, hipotetičke elementarne čestice, nosioca gravitacione sile, koji se pojavljuje u svakom pristupu teorije kvantne gravitacije (Hudomal 2015).

Intenzitet oscilacija gravitacionih talasa u + i × režimima polarizacije računat je na sledeći način (Maggiore 2008):

$$h_+(t; \theta, \varphi) = \frac{G}{*rc^4} \left[\ddot{Q}_{11} (\cos^2 \varphi - \sin^2 \varphi \cos^2 \theta) + \ddot{Q}_{22} (\sin^2 \varphi - \cos^2 \varphi \cos^2 \theta) - \ddot{Q}_{33} \sin^2 \theta - \ddot{Q}_{12} \sin 2\varphi (1 + \cos^2 \theta) + \ddot{Q}_{13} \sin \varphi \sin 2\theta + \ddot{Q}_{23} \cos \varphi \sin 2\theta \right], \quad (5)$$

$$h_\times(t; \theta, \varphi) = \frac{G}{*rc^4} \left[(\ddot{Q}_{11} - \ddot{Q}_{22}) \sin 2\varphi \cos \theta + 2\ddot{Q}_{12} \cos 2\varphi \cos \theta - 2\ddot{Q}_{13} \cos \varphi \sin \theta + 2\ddot{Q}_{23} \sin \varphi \sin \theta \right]. \quad (6)$$

Vrednosti h_+ i h_\times su pomenuti intenziteti oscilacija gravitacionih talasa, θ je polarni ugao, $*r$ udaljenost do udaljenog i statičnog posmatrača, a Q_j je redukovani tenzor kvadrupolnog momenta, za kretanje materijalne tačke definisan kao:

$$Q^{ij} = \int m x_i x_j dV.$$

Ovaj tenzor je definisan u opštem obliku, gde su x^i i x^j dve koordinate u proizvoljnom koordinatnom sistemu.

Inspirali će se, zbog održanja momenta impulsa, odvijati u jednoj ravni, tako da će u gornjem izrazu jednačine (5) Q_{33} biti nula. U ovom radu pretpostavljeno je da se posmatrač nalazi na $\theta = \pi/2$ ekvatorijalnoj ravni, odakle pod pravim uglom posmatra ravan na kojoj se odvija inspiral. Sve je analizirano u jednoj ravni, h_\times komponenta gravitacionog talasa postaje nula tako da je analiziran samo + režim polarizacije gravitacionih talasa. Uvođenjem druge vrednosti ugla θ u jednačine (5) i (6) trivijalno se može doći do oblika gravitacionih talasa pri obe polarizacije, a time bi se analizirani slučaj samo bespotrebno komplikovao, te je zbog toga uvedena ova pretpostavka.

Jednačine kretanja

Pomenuti mehanizmi gubitka energije implementirani su u opis dinamike sistema kako bi njihovi efekti mogli da se analiziraju. Kako masa nije konstantna, već i ona zavisi od vremena, jednačina kretanja ima oblik:

$$m\dot{v} + \dot{m}v = -G \frac{mM}{r^2} + F_{\text{DT}}.$$

Razloživši ubrzanje, brzinu i silu dinamičkog trenja na komponente u polarnim koordinatama, dolazi se do glavnog sistema jednačina:

$$\dot{m}\dot{r} + m(\ddot{r} - r\dot{\phi}^2) = -G \frac{mM(r)}{r^2} + F_{\text{DT}} \frac{\dot{r}}{v}, \quad (7)$$

$$r\dot{m}\dot{\phi} + m(r\ddot{\phi} - 2\dot{r}\dot{\phi}) = F_{\text{DT}} \frac{r\dot{\phi}}{v}. \quad (8)$$

Spregnuti sistem jednačina (7), (8) i (1) ili (2) (zavisno od izabranog modela akrecije), se mogu razložiti na sistem od pet diferencijalnih jednačina prvog reda, koji je numerički rešiv. U ovom radu korišćen je Ojlerov metod za njihovo rešavanje, a rezultati su prikazani na slikama 1 i 2.

Rezultati

Sistem jednačina i modela opisan do sada numerički je implementiran, a u svakom koraku računat je intenzitet gravitacionih talasa.

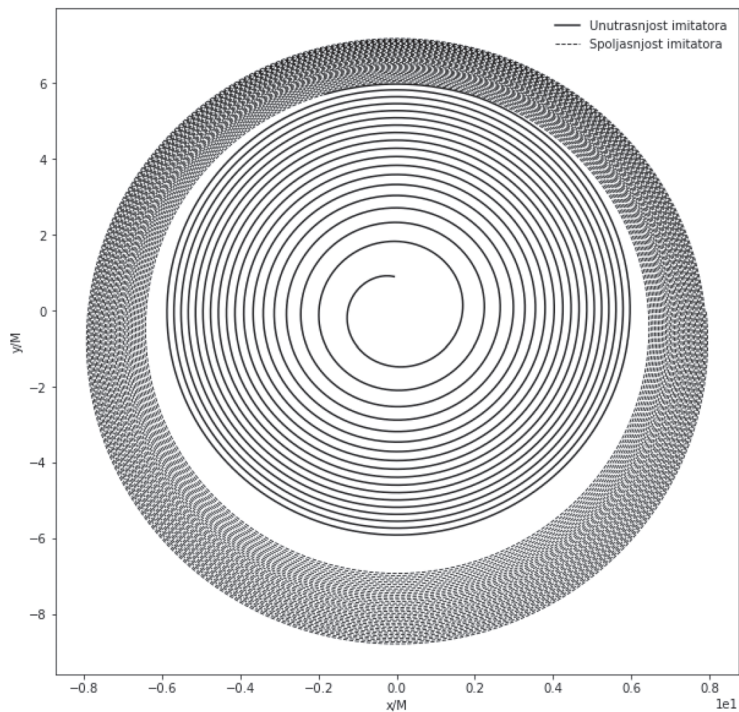
Konkretni početni uslovi analizirani u ovom radu jesu ekscentricitet $e_0 = 0.1$ i početna udaljenost $r_0 = 4R_s$, gde je $R_s = 2GM/c^2$ Švarcšildov raijus imitatora. Početni ugao ϕ izabran je da

bude $\pi/2$, a granica imitatora zadata je kao $R = 3R_s$.

Signal je obrađen preko diskretne Furijeove transformacije, čime se dobija spektar emitovanih gravitacionih talasa u domenu frekvencija. Ova obrada je implementirana pomoću FFT algoritma, i na ovaj način dobijeni su spektri gravitacionih talasa u tri slučaja:

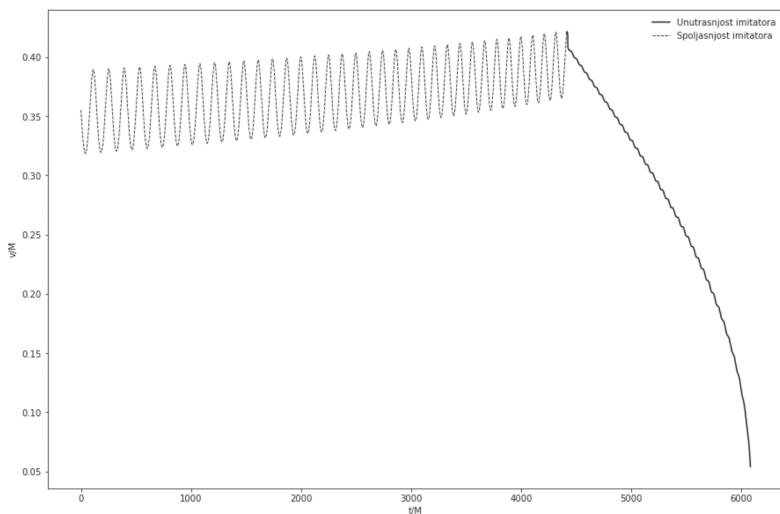
1. U slučaju BH i SMBH (bez imitatora)
2. U spoljnom delu imitatora (kada akrecija i dinamičko trenje još nemaju značajnog efekta)
3. U unutrašnjem delu imitatora (kada gubitak energije putem emitovanja gravitacionih talasa više nema značajnog efekta)

Na narednim slikama prikazane su trajektorija crne rupe u ekvatorijalnoj ravni, zavisnost brzine crne rupe od vremena, kao i spektar gravitacionih talasa emitovanih tokom inspirala i u slučaju inspirala crne rupe oko SMBH umesto imitatora. Važno je napomenuti da je u izračunavanju veličina u ovim graficima korišćen geometrijski sistem jedinica, u kom su gravitaciona konstanta i brzina svetlosti jednaki 1, kao i to da su jedinice skalirane sa masom imitatora SMBH.



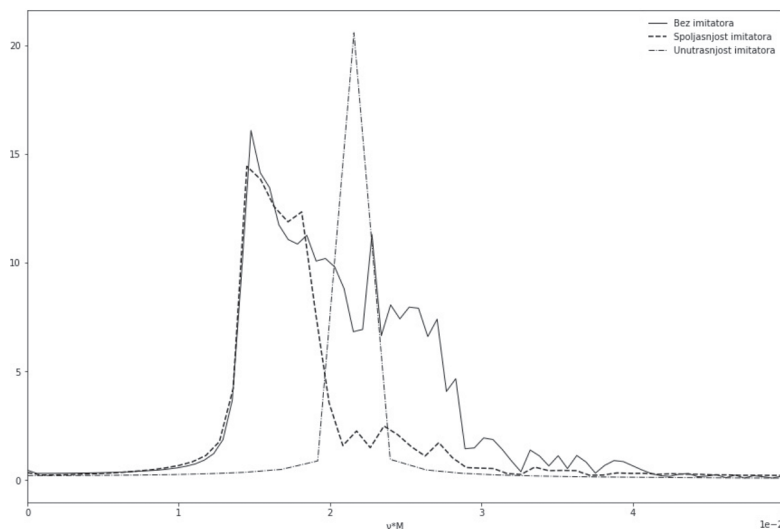
Slika 1.
Trajektorija crne rupe van i unutar imitatora

Figure 1.
The trajectory of a Black Hole around (dotted line) and inside (full line) the SMBH mimic



Slika 2. Zavisnost brzine BH od vremena

Figure 2. The time-dependency of velocity around (dotted line) and inside (full line) the mimic



Slika 3. Spektar gravitacionih talasa u tri analizirane situacije

Figure 3. The gravitational wave spectra of the three analyzed situations around (dotted line) and inside (full line) the mimic

Količnik dužine l i mase M će, u SI sistemu, biti $l/2R_s$, gde je $R_s = 2GM/c^2$ Švarcšildov radijus. Slično, količnik vremena i mase, odnosno proizvod frekvencije i mase postaju $tc^3/(GM)$, odnosno vMc^3/G , respektivno. Ove konverzije je moguće uspostaviti dimenzionom analizom.

Obratiti pažnju na kvalitativnu razliku spektra u slučaju inspirala SMBH i BH, u poređenju sa inspiralom BH u imitatora SMBH. Glavni pik spektra je pomeren za faktor od par, dok su sekundarni pikovi različiti u dva analizirana slučaja.

Diskusija i zaključak

Na primeru imitatora sa konstantnim profilom gustine modelovani su spektri gravitacionih talasa za različite modele akrecije i za supersonični i subsonični režim dinamičkog trenja. Reprodukovan su rezultati dobijeni u radu Macedo i saradnika 2013, a zatim su dodatno gravitacioni talasi emitovani tokom inspirala analizirani u domenu frekvencija, koristeći FFT algoritam. Dobijeni spektri gravitacionih talasa u sebi sadrže informaciju o putanji crne rupe unutar imitatora. Različiti modeli akrecije i brzine

zvuka davali bi kvalitativno drugačije spektre, što dobijeni rezultati sugerišu. Pikovi frekvencija imaju drastično različite vrednosti, te bi detektori mogli da naprave razliku između imitatora i prave SMBH. Na primeru supermasivne crne rupe u Mlečnom putu, u Sagitarijusu A*, očekivani red veličine frekvencija gravitacionih talasa u slučaju da je u pitanju imitator bio bi ~1Hz. Ovaj opseg frekvencija poklapa se sa graničnim koje bi LISA mogla detektovati u trenutku kada bude napravljena (Moore *et al.* 2014). Valjalo bi napomenuti kako je u ovom radu analizirana samo faza inspirala, koju takođe prate i faze spajanja (merger) i prigušenog oscilovanja (ringdown), koje bi proizvodile kvalitativno drugačije gravitacione talase i zahtevale dodatnu analizu.

Ukoliko bi bio detektovan signal koji odstupa od očekivanog za sistem dve crne rupe, daljom analizom mogli bi se ograničiti parametri potencijalnog imitatora koji bi bio izvor odstupanja. Dobijeni parametri bi ograničili broj mogućih modela za čestice koje sačinjavaju tamnu materiju.

Pomenuti metod mogao bi se lako primeniti na različite profile gustina, a u literaturi postoje motivacije za politropske strukture uz različite modele međučestičnih interakcija, od kojih bi zavasio politropski indeks. Rešavanjem Lejn-Emdenove jednačine dobijao bi se profil gustine imitatora koji ima politropsku strukturu. Politropski indeksi 0.5 i 1 pominju se u literaturi (Khoury 2016), jer oni opisuju skalarnu tamnu materiju sa dominantnim tročestičnim, odnosno dvočestičnim interakcijama.

Kako je pomenuto u uvodu, tehnologija detektovanja gravitacionih talasa trenutno postaje sve naprednija. U bližoj budućnosti može se očekivati da postoji tehnologija sposobna da detektuje ovakve spektre sa dovoljnom preciznošću da napravi distinkciju između različitih profila gustine i strukture samog imitatora. Time bi se otvorila mogućnost da se postojanje imitatora empirijski testira. Opisani metod bi na osnovu detektovanih gravitacionih talasa inspirala crne rupe oko struktura u centrima galaksija mogao testirati pretpostavku o postojanju SMBH

u poređenju sa imitatorima sačinjenim od tamne materije.

Zahvalnost. Autor se zahvaljuje Mateji Boškoviću na strpljenju, pruženoj podršci i iscrpnim objašnjenjima.

Literatura

- Abbott B. P., Abbott R., Abbott T. D., Abernathy M. R., Acernese F., Ackley K., Adams C., Adams T., Addesso P., Adhikari R. X., Adya V. B. 2016. Observation of gravitational waves from a binary black hole merger. *Physical review letters*, **116** (6): 061102.
- Barack L., Cardoso V., Nissanke S., Sotiriou T. P., Askar A., Belczynski C., Bertone G., Bon E., Blas D., Brito R., Bulik T. 2018. Black holes, gravitational waves and fundamental physics: a roadmap. arXiv preprint arXiv:1806.05195.
- Bondi H., Hoyle F. 1944. On the mechanism of accretion by stars. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, **104** (5): 273.
- Carroll B. W., Ostlie D. A. 2014. *An introduction to modern astrophysics*. Cambridge University Press
- Griffiths D. J. 2005. *Introduction to electrodynamics*. New Jersey: Prentice Hall
- Hudomal A. 2015. New periodic solutions to the three-body problem and gravitational waves. Master teza. Univerzitet u Beogradu, Fizički Fakultet, Studentski trg 12, 11 000 Beograd
- Khoury J. 2016. Another path for the emergence of modified galactic dynamics from dark matter superfluidity. *Physical Review D*, **93** (10): 103533.
- Macedo C. F., Pani P., Cardoso V., Crispino L. C. 2013. Into the lair: gravitational-wave signatures of dark matter. *The Astrophysical Journal*, **774** (1): 48.
- Maggiore M. 2008. *Gravitational Waves: Volume 1: Theory and Experiments*. Oxford university press
- Moore C. J., Cole R. H., Berry C. P. 2014. Gravitational-wave sensitivity curves. *Classical and Quantum Gravity*, **32** (1): 015014.
- Shapiro S. L., Teukolsky S. A. 2008. *Black holes, white dwarfs and neutron stars: the physics of compact objects*. Wiley

Luka Jevtović

Modeling and Analysis of Gravitational Waves During the Inspirals of a Black Hole inside a Supermassive Black Hole Mimic

With the rapid technological development of gravitational wave detectors, new ways of probing the nature of dark matter appear. The widely accepted hypothesis of the existence of supermassive black holes (SMBH) can now be tested against the supposed existence of compact, self-gravitating dark matter objects that mimic the SMBH. This paper investigated the phenomenon of a stellar black hole inspiral into a homogenous SMBH mimic. The inspiral was modeled in the Newtonian framework, taking into account dynamical friction, as well as two different regimes of dark matter accretion onto the black hole. The gravitational waves that are emitted during this inspiral represent a distinct feature of SMBH mimics that can be used to further probe the structure of self-gravitating compact dark matter objects. They were further analyzed in the frequency domain, and the results suggest that, with sufficient technology, we could distinguish if there is a mimic based on the gravitational spectrum of such an inspiral. 