

Szakmai záróbeszámoló

KH-17 125675 Galaxisok fekete lyukai

Bevezető

A pályázat célja a galaxisok belső részeiben elhelyezkedő fekete lyukak eloszlásának és a gravitációs hullám eseményekre vonatkozó következtetések vizsgálata volt. A projekt eredeti célkitűzéseit teljesítettük és azokon nagymértékben túlléptünk. Az eredményeinket a következőképpen csoportosíthatjuk, amiket alább külön tárgyalunk.

1. Fekete lyukak eloszlásának, dinamikájának megértése
2. Gravitációshullám eseményekre vonatkozó jóslatok

1. Fekete lyukak eloszlásának, dinamikájának megértése

Megmutattuk, hogy a LIGO-VIRGO detektorok által mért gravitációshullám események a galaxismagba behulló gömbhalmazokból származhatnak, a fekete lyukak a galaxismagokban korongba rendeződnek és azok pályasíkjai gömbhalmazokban is tömeg szerint rendeződnek, ami a rezonáns relaxációval magyarázható. Ezen eredményünk a rangos PRL folyóiratnak a frontoldalára került (Szölgén, Kocsis 2018).

Közvetlen N-test szimulációval megmutattuk, hogy a fekete lyuk korongok forgó gömbhalmazokban is kialakulhatnak (Szölgén, Meiron, Kocsis 2019).

Meghatároztuk, hogy a galaxismagban a rezonáns gravitációs dinamika következtében a pályasíkok hogyan rendeződnek át (Meiron, Kocsis 2018). A rezonáns relaxációnak meghatároztuk a végállapotát statisztikus módszerrel, figyelembevéve a kölcsönhatás multipólsorfejtésének magasabb momentumait is (Takács, Kocsis, 2018). Megmutattuk, hogy a rendszer elsőrendű fázisátalakuláson megy át egy rendezett korong állapotból egy rendezetlen gömbszerű állapotba.

Megmutattuk, hogy a galaxismagba beeső gömbhalmazok gamma és röntgen forrásokhoz vezetnek, és ezek mérésével a galaxismag formálódásának folyamatára következtethetünk (Arca-Sedda, Kocsis, Brandt 2018).

Megvizsgáltuk a galaxismagban esetlegesen jelenlevő középnehéz fekete lyukak hatását az ottani fekete lyuk kettősökre. Megmutattuk, hogy rezonáns kölcsönhatással a szupermasszív fekete lyukat megközelítő elliptikus pályára kényszerülnek, aminek következtében a szupermasszív fekete lyuk széttépi a kettőst (Deme, Meiron, Kocsis 2020).

Megvizsgáltuk az első szupermasszív fekete lyukak, hogyan alakulhatnak ki a galaxisok közepén fősorozati csillagok sorozatos ütközésével. Megmutattuk, hogy az ütköző csillagok egy szupermasszív csillagot hoznak létre, ami nem tud fősorozatbeli csillaggá vagy középnehéz fekete lyukká válni az újabb csillagok által közölt hő következtében. A folyamat végén a szupernehéz csillag létrehozza a szupermasszív fekete lyukat (Tagawa, Haiman, Kocsis 2020).

2. Gravitációshullám eseményekre vonatkozó jóslatok

Gravitációshullám eseményeknek különböző formálódási csatornáját vizsgáltuk: primordiális fekete lyukakat, a gravitációshullám befogódással keletkező kettősök, a szupermasszív fekete lyuk kettősök, és a középnehéz fekete lyuk kettősökre vonatkozóan.

Megmutattuk, hogy az univerzum korai szakaszában keletkező ún. primordiális fekete lyuk kettősök ütközései hogyan különíthetők el más folyamatokból származó fekete lyuk ütközésektől (Kocsis, Suyama, Tanaka, Yokoyama, 2018). Ez a gravitációshullámok eseménygyakoriság statisztikájával lehetséges, az ütköző fekete lyukak két dimenziós össztömeg-tömegarány párok statisztikájának van egyfajta mérhető momentuma ami független az ismeretlen fekete-lyuk tömegeloszlástól.

A gravitációshullám kibocsátás során közeli elhaladások kettősök kialakulásához vezet a galaxismagban. Kiszámoltuk a keletkező gravitációshullám jelek várható gyakoriságát, figyelembevéve a fekete lyukak várható eloszlását (Rasskazov, Kocsis, 2020). Megmutattuk, hogy a kettősök gyakran excentrikusak (Gondán, Kocsis, Raffai, Frei 2018a; Gondán, Kocsis 2019), ami a gravitációshullámok mérésével kimutatható (Gondán, Kocsis, Raffai, Frei 2018b).

Továbbá vizsgáltuk a fekete lyuk kettősök kölcsönhatását a galaxismagban található szupermasszív fekete lyukkal. A rezonáns háromtest kölcsönhatás excentrikus Kozai-Lidov oszcillációhoz vezet, ami a fekete lyukak ütközéséhez vezet (Hoang, Naoz, Kocsis, Rasio, Dosopoulou 2018). A Kozai-Lidov oszcilláció a LISA műszerrel közvetlenül kimutatható (Hoang, Naoz, Kocsis, Farr, McIver, 2019). Hasonlóképpen középnehéz és szupermasszív fekete lyuk hármasok oszcillációja is létrejöhet és mérhető a LISAvan (Deme, Hoang, Naoz, Kocsis 2020).

Megvizsgáltuk, hogy a fekete lyuk kettősök hogyan fejlődnek aktív galaxismagokban, ahol a szupermasszív fekete lyukba gáz áramlik, ami fényes elektromágneses sugárzást bocsát ki. Megmutattuk, hogy ilyen környezetben a fekete lyukak gyakran összeütköznek. Az ütköző fekete lyukak tömegeloszlása a nehezebb tömegek felé tolódik a csillagokból keletkező eredeti fekete lyuk tömegeloszláshoz viszonyítva (Yang, Bartos, Haiman, Kocsis, Márka, Stone, Márka, 2019). Megmutattuk, hogy a gravitációshullám források vöröseltolódás eloszlása nagyobb vöröseltolódások felé lassabban cseng le mint az egyéb asztrofizikai csatornáknál ütköző fekete lyukak vöröseltolódása (Yang, Bartos, Haiman, Kocsis, Márka, Tagawa 2020).

A rangos PRL folyóiratban közöltük a hierarchikus fekete lyuk ütközések várható tulajdonságait (Yang, Bartos, Gayathri, Ford, Haiman, Klimentko, Kocsis, et al. 2019). Megmutattuk, hogy a GW170817A gravitációshullám forrás egy galaxismagban létrejövő hierarchikus ütközést reprezentálhat (Gayathri, Bartos, Haiman, Klimentko, Kocsis, et al. 2020). Megmutattuk, hogy a fekete lyukak keringési síkja a gázkorong síkjának irányába fordul, és utóbbinak mérése javítja a gravitációshullám forrás lokalizációját egy hármas faktorról (Corley, Rainer, Bartos, Singer, Williamson, Haiman, Kocsis, et al. 2019).

A fekete lyuk kettősök aktív galaxismagokban történő evolúciójának szemianalitikus szimulációjához kidolgoztuk egy minden koribbánál lényegesen részletesebb módszertanát (Tagawa, Haiman, Kocsis, 2020). A szimulációval meghatároztuk az ütköző objektumok fizikai paramétereinek várható eloszlását. A módszert tovább fejlesztettük a fekete lyukak spinjeinek fejlődésének követéséhez (Tagawa, Haiman, Bartos, Kocsis, 2020).

Numerikus N-test szimulációs segítségével megvizsgáltuk naptömegű hármas rendszerekben a csillagmorzsolás valószínűségét (Fragione, Leigh, Perna, Kocsis, 2019), és a fehér törpék morzsolásának valószínűségét ezeknek a gravitációshullám együttes kisugárzásának lehetőségét (Fragione, Metzger, Perna, Leigh, Kocsis 2020). Továbbá megvizsgáltuk ilyen rendszerekben az ütköző fekete lyukak spin eloszlását, ami a detektorokkal mérhető (Fragione, Kocsis, 2020).

Numerikus N-test szimuláció segítségével kiszámoltuk a fekete lyukak négyes rendszerekben ütköző fekete lyukak gyakoriságát (Fragione, Kocsis, 2019).

Megvizsgáltuk, hogy a gömbhalmazok fejlődése és a körülvevő galaxis belseje felé süllyedésének következtében, hogyan változik a fekete lyuk ütközések várható gyakorisága. Megmutattuk, hogy fekete lyuk kettősök a gömbhalmaz korai történetében létrejöhetnek, amik azután ütközhetnek, hogy a gömbhalmazok megsemmisülnek. A ma már nem létező gömbhalmazok jelentős mértékben hozzájárulnak a LIGO-VIRGO detektorok által mért gravitációshullám eseménygyakorisághoz. Az eredményt a rangos PRL folyóiratban közzétettük (Fragione, Kocsis, 2018).

Megvizsgáltuk, hogy a gömbhalmazokban létezhetnek-e középnehéz fekete lyukak anélkül, hogy kilökődjenek a naptömegű fekete lyukakkal való kölcsönhatás következtében. Megmutattuk, hogy a LIGO-VIRGO detektorok tervezett érzékenység elérése után képesek lesznek kimérni a középnehéz fekete lyukak jeleit amennyiben léteznek (Fragione, Ginsburg, Kocsis 2018). Továbbá megmutattuk, hogy középnehéz fekete lyukak csillagmorzsolási folyamatokat is okozhatnak, ami elektromágneses tartományban mérhető (Fragione, Leigh, Ginsburg, Kocsis, 2018).

Megmutattuk, hogy a fekete lyukak ütközésének egy lehetséges katalizátora a gáz jelenléte lehet, amit a fekete lyukat létrehozó masszív csillag ledobott anyaga alkothat. Az eredményünket a PRL folyóirat közölte (Tagawa, Saitoh, Kocsis 2018).

Megvizsgáltuk, hogy a szupermasszív fekete lyukak milyen gyakorisággal ütköznek a galaxisok ütközése révén, és ezt az ütközési gyakoriságot, hogyan lehet mérni a pulzár időzítés gravitációshullám módszerrel és az elektromágneses periodikus változékonyság összehasonlításával (Sesana, Haiman, Kocsis, Kelley, 2018).

Összefoglalás

A projekt többszörösen túlteljesítette az ígéreteket. Összesen 33 kevésszerzős referált tudományos folyóiratcikk jelent meg az eredményekből, és további 1 folyóiratcikk lett beküldve elbírálásra. Ezekre a cikkekre már 945 hivatkozás érkezett. Továbbá egy összefoglalócikk fejezetet is publikáltunk amire további 246 hivatkozás érkezett. A rangos Physical Review Letters tudományos folyóiratban négy tudományos publikációnk jelent meg, egyik annak a címlapjára került. Az eredményeket 37 nemzetközi és hazai konferencián bemutattuk előadás és poszter formájában, 9 iskolaelőadást vagy workshop előadást tartottunk, és 15 intézményi szemináriumot vagy nagyelőadást tartottunk. A publikációs listát a pályázati rendszerbe feltölttük, a konferencia prezentációk listáját alább közöljük.

Konferencia előadás, vagy poszter

1. Kocsis Bence, előadás, "Gravitational wave sources in galactic nuclei and dense systems", MODEST17, Prague, Czechia, Szeptember 2017
2. Yohai Meiron, előadás, "Relaxation and mixing in globular clusters", MODEST17, Prague, Czechia, Szeptember 2017
3. Alexander Rasskazov, előadás,
4. "Evolution of massive black hole binaries in rotating stellar nuclei and its implications for gravitational wave detections", MODEST17, Prague, Czechia, Szeptember 2017
5. Kocsis Bence, előadás, "Gravitational wave sources in galactic nuclei",
6. Stellar Dynamics in Galactic Nuclei, Institute for Advanced Study, Princeton, USA, I 2017
7. Yohai Meiron, poszter prezentáció, "Stellar dynamics with N-body simulations",
8. Stellar Dynamics in Galactic Nuclei, Institute for Advanced Study, Princeton, USA, November 2017
9. Alexander Rasskazov, poszter prezentáció,
10. "Evolution Of Massive Black Hole Binaries In Rotating Stellar Nuclei: Implications For Gravitational Wave Detection", Stellar Dynamics in Galactic Nuclei, Institute for Advanced Study, Princeton, USA, November 2017
11. Kocsis Bence, meghívott előadás, Gravity@Malta 2018 COST Action, "Gravitational Waves, Black Holes and Fundamental Physics", Malta, Január 2018
12. Hiromichi Tagawa, előadás, "Compact object mergers driven by gas fallback", Gravitational wave physics and astronomy: Genesis, University of Tokyo, Japan, Március 2018
13. Kocsis Bence, meghívott előadás, "EM counterparts for LISA sources", Sackler Conference 2018: Gravitational Wave Astrophysics, Harvard University, Cambridge, MA, USA, Május 2018
14. Idan Ginsburg, poszter prezentáció, "Gravitational waves and Intermediate Mass Black Hole retention in Globular Clusters", Sackler Conference 2018: Gravitational Wave Astrophysics, Harvard University, Cambridge, MA, USA, Május 2018

15. Kocsis Bence, előadás, "Distinguishing Source Populations with LIGO/VIRGO", MODEST-18 Dense Stellar Systems in the Era of Gaia, LIGO, & LISA, Santorini, Görögország, Június 2018
16. Alexander Rasskazov, előadás, "The Rate of GW Capture of Stellar-mass BHs in Nuclear Star Clusters", MODEST-18 Dense Stellar Systems in the Era of Gaia, LIGO, & LISA, Santorini, Görögország, Június 2018
17. Szölgvény Ákos, előadás, "Disks of Black Holes in Galactic Nuclei", MODEST-18 Dense Stellar Systems in the Era of Gaia, LIGO, & LISA, Santorini, Görögország, Június 2018
18. Giacomo Fragione, előadás, "IMBHs in GCs – Retention, GWs and Tidal Disruption Events", MODEST-18 Dense Stellar Systems in the Era of Gaia, LIGO, & LISA, Santorini, Görögország, Június 2018
19. Hiromichi Tagawa, poszter prezentáció, "Compact Object Mergers Driven by Gas Fallback", MODEST-18 Dense Stellar Systems in the Era of Gaia, LIGO, & LISA, Santorini, Görögország, Június 2018
20. Yohai Meiron, poszter prezentáció, "Resonant Relaxation in Globular Clusters", MODEST-18 Dense Stellar Systems in the Era of Gaia, LIGO, & LISA, Santorini, Görögország, Június 2018
21. Yohai Meiron, meghívott előadás, "Resonant relaxation in globular clusters", Star Clusters around the Milky Way and in the Local Group, Heidelberg, Németország, Augusztus 2018
22. Szölgvény Ákos, meghívott előadás, "Anisotropic mass segregation in stellar systems", Star Clusters around the Milky Way and in the Local Group, Heidelberg, Németország, Augusztus 2018
23. Hiromichi Tagawa, poszter prezentáció, "Compact Object Mergers Driven by Gas Fallback", IAU General Assembly, Vienna, Austria, Augusztus 2018
24. Kocsis Bence, előadás, "Gravitational waves and high energy electromagnetic waves from disrupted globular clusters", MWStreams: Survival of Dense Star Clusters in the Milky Way System, MPA Heidelberg, Németország, November 2018
25. Alexander Rasskazov, előadás, "Hypervelocity stars from a supermassive black hole-intermediate mass black hole binary", MWStreams: Survival of Dense Star Clusters in the Milky Way System, MPA Heidelberg, Németország, November 2018
26. Kocsis Bence, meghívott előadás, "Gravitational waves from disrupted globular clusters", Astrophysics with Gravitational-Wave Populations, Aspen, USA, Február 2019
27. Hiromichi Tagawa, előadás, "Formation and evolution of compact object binaries in active galactic nuclei", Astrophysics with Gravitational-Wave Populations, Aspen, USA, Február 2019
28. Alexander Rasskazov, poszter prezentáció, "The Rate of GW Capture of Stellar-mass BHs in Nuclear Star Clusters", Astrophysics with Gravitational-Wave Populations, Aspen, USA, Február 2019
29. Szölgvény Ákos, poszter prezentáció, "Anisotropic Mass Segregation in Rotating Globular Clusters",
30. MODEST-19 Star Clusters: from the Milky Way to the Early Universe, Bologna, Olaszország, Május 2019

31. Deme Barnabás, poszter prezentáció, "Black hole binary disruptions via intermediate mass black holes"
32. MODEST-19 Star Clusters: from the Milky Way to the Early Universe, Bologna, Olaszország, Május 2019
33. Kocsis Bence, meghívott előadás, "On the Origin of Gravitational Wave Sources observed by LIGO/VIRGO", Modern theories of gravity, Hungarian Academy of Sciences, Budapest, Hungary, Május 2019
34. Alexander Rasskazov, előadás, "Hypervelocity stars from a supermassive black hole - intermediate mass black hole binary", Stars on the run II, Potsdam, Németország, Augusztus 2019
35. Hiromichi Tagawa, előadás, "Keep Growing to Super Massive Star via Runaway Collision", Cosmic Evolution of Quasars: from the First Light to Local Relics, Kína, Október 2019
36. Alexander Rasskazov, előadás, "Merger rate of binary intermediate-mass black holes", The new faces of black holes, Annapolis MD, USA, November 2019
37. Alexander Rasskazov, előadás, "Hypervelocity star production by a supermassive black hole - intermediate mass black hole binary and its dynamical evolution", The Origins of Black Hole Mergers and Gravitational Waves, Leiden, Netherlands, December 2019

Fizikai iskola, workshop előadások

1. Máthé Gergely, poszter prezentáció, "A numerical study the statistical physics of vector resonant relaxation",
2. 48th Saas-Fee course: Black hole formation and growth, Saas-Fee, Switzerland, Január 2018
3. Szölgény Ákos, poszter prezentáció, "Anisotropic Mass Segregation of Black Hole Orbits in Galactic Nuclei",
4. 48th Saas-Fee course: Black hole formation and growth, Saas-Fee, Switzerland, Január 2018
5. Kocsis Bence, meghívott előadás, "The origin of black hole mergers seen by LIGO",
6. Eötvös Loránd Physics Society Summer School, Matrahaza, Hungary, Szeptember 2018
7. Máthé Gergely, Kavli RISE Summer School on Gravitational Waves, University of Cambridge, Cambridge, United Kingdom, Szeptember 2019
8. Szölgény Ákos, Kavli RISE Summer School on Gravitational Waves, University of Cambridge, Cambridge, United Kingdom, Szeptember 2019
9. Hiromichi Tagawa, előadás, "Formation and Evolution of Compact Object Binaries in Active Galactic Nuclei", Multi-Messenger Astrophysics in the Gravitational Wave Era, Kyoto, Japan, Október 2019

Intézeti előadások, egyéb előadások

1. Kocsis Bence, invited institutional talk, "Gravitational wave sources in galactic nuclei and dense systems", DARK seminar, Niels Bohr Institute, Copenhagen, Denmark, Oct. 2017
2. Kocsis Bence, invited institutional talk, "Eccentric sources of gravitational waves", Bahcall Lunch, Institute for Advanced Study, Princeton, USA, November 2017

3. Szölgén Ákos, invited student talk, "Gravitational waves: a beginning of a new astronomy", Bolyai János High School, December 2017
4. Kocsis Bence, invited institutional talk, "Open questions on the interpretation of black hole mergers seen by LIGO", GALNUC Seminar, Eötvös University, Hungary, Március 2018.
5. Kocsis Bence, invited institutional talk, "Stellar Dynamics and Gravitational wave astrophysics in the GALNUC Project", ELTE Astronomy Talent Day, Eötvös University, Hungary, Április 2018
6. Kocsis Bence, invited institutional talk, "Liquid crystals of stars and black holes at the centers of galaxies", CERN Cosmo Coffee, Geneva, Switzerland, Január 2019
7. Kocsis Bence, invited institutional talk, "On the Origin of Gravitational Wave Sources Observed by LIGO/VIRGO", CERN Particle and Astro-particle Seminar, Geneva, Switzerland, Január 2019.
8. Kocsis Bence, invited institutional talk, "On the Origin of Gravitational Wave Sources Observed by LIGO/VIRGO", Astrophys. and Cosm. Relativity Seminar, AEI, Postdam, Németország, Március 2019
9. Deme Barnabás, invited institutional talk, "Restricted and hierarchical three-body problem", Research Group Seminar, UCLA, Los Angeles, USA, Március 2019
10. Kocsis Bence, invited institutional talk, "Liquid crystals of stars and black holes at the centers of galaxies", Special seminar, Oxford Department of Physics, Május 2019
11. Kocsis Bence, invited institutional talk, "Compact object mergers due to gas fall back", Santa Barbara Astro Lunch, UCSB, Santa Barbara, USA, Május 2019
12. Kocsis Bence, invited institutional talk, "On the Origin of Gravitational Wave Sources observed by LIGO/VIRGO", Astrophysics Colloquium, Kyoto University, Kyoto, Japan, Július 2019
13. Kocsis Bence, invited institutional talk, "On the Origin of Gravitational Wave Sources observed by LIGO/VIRGO", Physics Seminar, Bolyai College, Hungary, Október 2019
14. Alexander Rasskazov, invited institutional talk, "Observational signatures of intermediate-mass black holes", CIERA theory seminar, Northwestern University, Chicago, USA, November 2019
15. Hiromichi Tagawa, invited institutional talk, "Formation and evolution of compact object binaries in active galactic nuclei", Theoretical Seminar, Tohoku University, Japan, Január 2020