

4. félévi beszámoló
Máthé Gergely (gergelymathe@caesar.elte.hu)
Részecskefizika és csillagászat
Dr. Kocsis Bence

“Statistical mechanics and gravitational wave astrophysics of galactic nuclei”

Bevezetés:

Galaxismagok és általánosabban például gömbhalmazok esetében is lejátszódik egy dinamikai relaxációs folyamat, amely az egyes impulzusmomentumvektorok irányának gyors rekonfigurációját teszi lehetővé [1-6]. E rekonfigurációs folyamat neve vektorrezonáns relaxáció (VRR). A folyamat gyorsaságának köszönhetően a vizsgált rendszerek köztes egyensúlyi állapotokat (a Hubble időhöz mérten rövid idő alatt; a Tejút esetén például $\sim(10^6-10^7)$ év [3]) érnek el [4], amelyek lehetővé teszik a statisztikus fizika eszköztárának használatát a rendszer dinamikájának megértése céljából.

Doktori képzésem alatt célom ilyen rendszerek dinamikájának statisztikus fizikai megértése illetve olyan meglepő egybeesések felkutatása, mint amely egykomponensű gravitáló rendszerek VRR kvadrupól közelítése és a folyadékristályok Maier-Saupe modellje között fennáll [4]. Ezen felül célom még a gravitációsan kölcsönható objektumok részrendszereinek nem additivitásából adódó olyan nem szokványos jelenségek felkutatása és megértése (pl.: negatív hőkapacitás, különböző statisztikai sokaságok in ekvivalenciája), amelyről a klasszikus, additív statisztikus fizika nem tud számot adni.

Az előző három félévben elért kutatási eredmények:

A korábbi félévek során a bevezetőben részletezett célkitűzésekhez kapcsolódóan a VRR vizsgálatát hajtottam végre egykomponensű rendszerek esetén annak kvadrupólusos közelítésében direkt N-test szimulációk segítségével. Továbbá megvizsgáltam, hogy a kérdéses rendszerek az általában nem additív rendszerek esetében használt, a Boltzmann-Gibbs entrópiát egy további paraméterrel általánosító, Tsallis entrópia milyen q paraméterértékeihez tartozó egyensúlyi állapotain halad keresztül míg el nem éri a Boltzmann-Gibbs entrópia ($q=1$) által kijelölt végső egyensúlyi állapotot.

Ahhoz, hogy a direkt N-test szimulációk statisztikusan reprezentatív eredményt adjanak jól preparált, előre meghatározott kezdeti energia- és impulzusmomentumértéket adott toleranciával megközelítő, kezdeti konfigurációk egész sorát (30db minden különböző kezdeti energia-impulzusmomentum párra) szimuláltuk. Összesen 66 különböző energián 3 különböző impulzusmomentum érték esetén végeztünk szimulációkat. A rendszert az N-RING nevű szimplektikus integrátort használva szimuláltuk [5]. A szimulációkból kapott adatokat használva numerikusan leszámítottuk a rendszer entrópiáját a [7] részletezett entrópia becslő rutint alkalmazva. Továbbá vizsgáltuk még a rendszert leíró kvadrupólusmomentum tenzor sajátértékidősrail és az impulzusmomentuméggömb koordináta-rendszerében az egyensúlyi eloszlások alakját. A kapott eredményeket összevetve a VRR átlagtérelméleti modelljével [4] azt találtuk, hogy mérsékelt energiákon, ami mérsékelt felpuffadt korongoknak felel meg a koordinátatérben, a relaxációs folyamat lényegesen lelassul a Boltzmann-Gibbs entrópiát maximalizáló egyensúlyi állapotot a rendszer nem éri el [8].

A Tsallis egyensúlyi állapotokon való keresztülhaladás vizsgálatához, hasonlóan az előzőekhez direkt N-test szimuláltuk ugyanazt az egykomponensű rendszert a VRR quadropulus közelítésében szintén az N-RING integrátort használva. A kapott adatokat kiértékelve azt kaptuk, hogy szimulációinkat hasonlóan az előzőekhez a speciális lépcsőfüggvény-alakú ún. water bag kezdeti eloszlásból indítva azok nem relaxálnak adott energiaérték alatt. Ezzel szemben a Tsallis-féle entrópiát kielégítő egyensúlyi állapotokból indított szimulációk további q paraméterekhez tartozó egyensúlyi állapotokon keresztül haladva tartanak a Boltzmann-féle $q=1$ végső egyensúlyi állapothoz.

Az aktuális félévben elvégzett kutatások ismertetése:

Doktori képzésem jelen, negyedik félévében a korábbi félévekben végzett kutatómunkámból születő szakcikkek befejezése mellett két új projektet kezdtünk el. Az egyik új projektben galaxismagok Markov Chain Monte Carlo (MCMC) modellezésének a korábbi eredményekhez [9] képesti kiterjesztését végezzük el több különböző energia-impulzusmomentum értékpárra megvizsgálva, hogy más konfigurációkban is létrejön-e a magas energiához tartozó, izotróp esetben látott anizotróp tömegszegregációs effektus vagy sem. Míg a másik projektben azt vizsgáljuk meg, hogy egy kezdetben nem nulla inklinációval rendelkező közepes tömegű fekete lyuk (IMBH) belesüllyed-e csillagoknak egy központi supermasszív fekete lyuk (SMBH) körül keringő korongjába vagy a VRR vagy egyéb más relaxációs folyamatok hatására.

Az MCMC modellezés kiterjesztése érdekében a már fentebb részletezett értelemben, több jól preparált kezdeti eloszlást futtatunk a különböző energia-impulzusmomentum párokra. Majd a már a magasenergiás esetben, az anizotróp tömegszegregáció kimutatásához használt analízis eljárásokat alkalmazva vizsgáljuk a kimenetként kapott egyensúlyi eloszlásokat. A munka a szimulációk futtatásának fázisában tart.

Azt, hogy egy SMBH, IMBH, csillagkorong rendszerben az IMBH belesüllyed-e a csillagok korongjába mind direkt N-test integrátor, mind a VRR közelítést alkalmazó N-RING integrátort használva szimuláljuk. Utóbbival kétféle módon végzünk futtatásokat: -1. a direkt integrátor kezdeti eloszlásait felhasználva, -2. a program által generált eloszlásokat használva. Azt reméljük ettől, hogy ki tudjuk mutatni, az előzetes eredmények szerint a korongba süllyedő IMBH-ról, ha az nem a VRR rezonáns relaxáció miatt süllyed a korongba. Erről ugyanis az utóbbi integrátor nem tud számot adni. Az előzetes direkt integrált eredmények azt mutatják, hogy míg a csillagkoronggal megegyező irányban keringő IMBH belesüllyed a korongba, addig az ellentétes irányban keringő esetben ez nem történik meg.

Publikációk:

1. A numerical study of the statistical physics of vector resonant relaxation: első szerző; kéziratban; 90% < feletti készütség; (itt ebben a félévben a NIIF HPC infrastruktúra elérhetlensége lassította a munkát)
2. Gravitational system driven by nonextensive entropy: első szerző; kéziratban; 90% < feletti készütség; (itt is a NIIF akadozása lassította a munkát)
3. Black Hole Disks in Galactic Nuclei II: a Monte Carlo Markov Chain parameter study
4. Alignment of Intermediate Mass Black Holes in Nuclear Stellar Disks.

Tanulmányi tevékenység az aktuális félévben:

1. Kompakt csillagok szerkezete; neptun kód: FIZ/2/080E

Konferenciák a doktori képzés ideje alatt:

1. YAGN18: 2018.10.29-31. Budapest, Magyarország; szóbeli prezentáció
2. PHAROs PhD Training School: Multi-messenger physics and astrophysics with compact binaries, 2019.03.11-15. Jéna, Németország; poszter prezentáció
3. Nonextensive Statistical Mechanics, Superstatistics and beyond: Theory and Application in Astrophysical and other Complex Systems, 2019.07.02.-08. Erice, Olaszország
4. Kavil-RISE Summer School on Gravitational Waves, 2019.09.23.-27. Cambridge Egyesült Királyság

Szemináriumi részvétel:

1. Astrophysics Lunch; hallgató és előadó
2. GalNUC Seminar; hallgató és előadó
3. Ortvay Kollokvium; hallgató

Oktatási tevékenység:

1. Környezetfizikai Laboratóriumi Gyakorlat 2.; NAP, A napenergia tárolása akkumulátorokban; mérésvezető; heti 4 óra

Irodalom jegyzék:

1. Rauch, K.P. & Tremaine, S. 1996, New A. 1, 149.
2. Meiron, Y. & Kocsis, B. 2019, Astrophys. J. 878,138.
3. Kocsis, B. & Tremaine, S. 2011, MNRAS 412, 187
4. Roupas, Z. & Kocsis, B. and Tremaine, S. 2017, Astrophys. J. 842, 90.
5. Takács, Á. & Kocsis, B. 2018, Astrophys. J. 856, 113.
6. Kocsis, B. & Tremaine, S. 2015, MNRAS 448, 3265
7. Stowell, D. & Plumbley, M. D. 2009, IEEE Signal Processing 537, 16.
8. Fouvy, J-B. et al. 2018, arXiv:1812.07053
9. Szölgény, S. & Kocsis, B. 2018, PRL 121, 101101.