

dr. Gergely Árpád Lászlónak

az MTA doktora fokozat elnyerésére írott **„Gravitációs sugárzó kompakt kettősök és brán-elméleti kutatások”** című értekezéséről.

A 159 oldalas mű tartalma a címében is jelölt két nagy részre bontható. Mindkét résztéma aktuális kutatási irányzat, amelyet jelentős nemzetközi aktivitással vizsgálnak. Az elsőnek a gravitációs sugárzás megfigyelésének fenomenológiájában van jelentősége. A második kötődik a téridő jelenleg észlelhető szerkezetén való túllépés lehetséges irányaihoz.

Az első rész (66 oldal) „főszereplői” a gravitációs sugárzás forrásjelöltjének tartott összeolvadó nehéz kompakt csillagászati objektumoknak, az ütköző galaxisoknak egymás körül forgó (bespiráló) szupermasszív fekete lyuk magjai. A bespirálás meghatározza a jelenségből származó gravitációs sugárzás időbeli lefutását, ami alapvető előzetes információ a sikeres kimutatáshoz. A disszertáció központi kérdése a saját-forgás hatásának vizsgálata a fekete lyukak összeolvadása során. A 77 oldalas második rész az einstein-i téridőnek azt a minimális kiterjesztését vizsgálja, amely a gravitációs és az egyéb elemi kölcsönhatások sok nagyságrenddel különböző intenzitását a fluxusuk különböző dimenziójú terekben történő megoszlásával értelmezi. A dolgozathoz 227 tételt tartalmazó irodalomjegyzék csatlakozik.

I. Kompakt kettős rendszerek tulajdonságai

E téma tárgyalásában a szerző a forgó komponensekből álló kompakt kettős rendszerek alkalmas változóiban megfogalmazott egyenleteiből indul ki. Ezekre építve konstruálja meg az objektumok forgási kölcsönhatásából, továbbá saját-forgásából származó konzervatív változások, valamint a tömegeloszlás kvadrupólus momentumának időbeli változásához kapcsolódó veszteségek időbeli változási ütemét meghatározó egyenleteket. Módszerét az X-alakú kettős részecskecsóvával rendelkező kompakt objektumok kialakulásának lehetséges magyarázatára alkalmazza. A két résztémakörben elért eredményeit 3 részletesen megfogalmazott tézispontban foglalja össze.

Az 1. (bevezető) fejezetben áttekinti a saját tengelyük körül forgó, egymás körül kötött mozgást végző fekete lyukakból álló rendszerekre vonatkozó csillagászati adatok (tömeg, sugár, forgási jellemzők, kilövellt részecskecsóva szélessége, stb.) helyzetét és amellet érvel, hogy a saját-forgás (spin) generikus tulajdonsága a szupermasszív fekete lyukaknak. Bemutatja a forgás következtében ellapult (kvadrupólus momentummal rendelkező) partnerekből álló kettős rendszerek bespiráló (a bezuhanást megelőző) mozgása poszt-newtoni $[(v/c)^2]$ hatványai szerinti sorfejtésben haladó] számításának helyzetét.

A 2. fejezetben a kettős rendszer dinamikájának konzervatív komponensére koncentrálnak. Bevezeti a rendszer kinematikai változóit mind a megmaradó teljes impulzusmomentumhoz kapcsolt inerciális, mind a newtoni pályamomentumhoz, illetve a newtoni Laplace-Runge-Lenz vektorhoz kapcsolódó nem-inerciális rendszerekben. A változók közötti kényszereket elemezve megállapítja, hogy 5 független dinamikai változó választható. Több alkalmas csoportot elemez. Ez disszertációja 1a) tézispontjának tartalma.

Ezt követően közli az önforgást jellemző spin-vektoroknak a konzervatív dinamikai közelítésben érvényes precessziós egyenleteit, majd ezekből származtatja a kettős rendszerben fellépő precessziós mozgások jellemző szögeinek változási sebességét. Szétválasztja a szögsebességbe járulékat adó spin-pálya, spin-spin és kvadrupólus—monopólus járulékat, és mindegyiket kifejezi az 5 független változóval. A Kepler egyenletből származó gyorsulás 2PN rendig kiszámolt perturbált kifejezésében az általános relativitás elméletéből származó két tag mellett az önforgás és a pályamenti impulzusmomentum, valamint a lapultságból következő kvadrupólus—monopólus kölcsönhatás járuléka is szerepel. Miután ezekben is áttér a független kinematikai változókra, a kepleri mozgásállandók (energia és pályamenti impulzusmomentum) változási rátájából indulva a fél-nagy tengelyre, az excentricitásra és a valódi anomáliára elsőrendű egyenleteket vezet le. A pályasík inklinációját, a sajátforgás irányszögeinek és az egymással bezárt szögüknek változási sebességét a newtoni mozgásállandók változási sebességét a szögsebességekkel kombinálva kapja meg. Ezek végül zárt csatolt elsőrendű egyenletrendszert alkotnak, amelyekben az időváltozó helyett a valódi anomália szögváltozójával parametrizálja a pályát. Ez a disszertáció 1b) tézispontja.

Azonos tömegű kettősökre megvizsgálta a szögváltozók bizonyos kombinációi időfüggetlenségének lehetőségét. Többek között megállapítja, hogy az azonos tengely körüli ellenirányú önforgások konfigurációja a konzervatív dinamika során állandósultan fennmarad.

1. Kérdés (összetéve két alkérdésből)

Az 1c) tézispont az ellenirányított azonos nagyságú spinek konfigurációját elemezve, arra alapozza következtetéseit, hogy ez a konfiguráció „bármely oknál fogva előáll”. Szól-e fizikai érv mellett, hogy ez a konfiguráció jellegzetes végállomása lenne a forgó masszív objektumok egymás felé spirálozása során a spinek relatív orientációjának? E konfigurációk jelentőségét abban látja, hogy ekkor a két fekete lyuk a „maximális kilöködést biztosító konfigurációban érkezik a bezuhanás szakaszába”. A „kilöködés” fogalmáról a 2.8 fejezet 33. oldal alján közölt konklúziója sem árul el többet. Kérem ismertesse az általa megadott referenciák numerikus vizsgálatai alapján, hogyan jellemzik a kilöködés jelenségét és e jellemzők hogyan függenek a spinek relatív irányától.

A 3. fejezet a gravitációs sugárzási disszipáció járulékait elemzi. Miután ez magasabb poszt-newtoni rendben jelentkezik, additívan vehető figyelembe, ha az abból következő változás jóval lassúbb, mint a perturbált Kepler-mozgást jellemző jelenség. A sugárzási veszteségeknek, amelyekhez több járulékat a pályázó elsőként számolt ki, csak eredményeit közli a (3.29-3.33) képletsor. A szekuláris energiavesztéshez adódó spin-spin járulékról kiderül, hogy felbomlik az önspin járulékra (3.31) és a kölcsönös spin járulékra (3.32). Ugyanakkor látszik, hogy a kvadrupól-monopól járulék (3.33) teljesen azonos szerkezetű, mint (3.31). Ez összhangban van a spinprecessziók szögsebességéhez adódó, 2.3.1-ben tárgyalt járulékokkal, ahol látszik, hogy az i -dik részecske precessziós szögfrekvenciájában a QM-járulék arányos a fekete lyuk spinjével (amit ezért célszerűen önspinnek hívnak).

2. kérdés

A 2. tézisben mi indokolja az önspin és a kvadrupól-monopól kölcsönhatásból eredő szekuláris energiavesztés szétválasztását? Van-e olyan független megfigyelési lehetőség, amelyben a kétféle eredetű, de azonos formájú energiavesztés mögött álló mennyiségek szétválaszthatók (pl. a rendszer pályamomentumának szekuláris változásában másképp jelentkezik-e a két hatás)?

A 4. fejezetben foglalkozik az önforgási tengelyeknek, amelyek általában azonosíthatók az aktív galaxismagból kiáramló részecskecsóva irányával, az elfordulásával (*"spin-flip"*). Az X-alakú (kettős) rádiócsóvával jellemezhető galaxisok csóvakonfigurációját természetes módon lehet egy kezdeti és egy elfordult spin-iránnyal társítani. A közbenső állásból elegendően gyors átfordulás esetén nem várható részecskeáram. A pályázó egyszerű kialakulási mechanizmust javasolt, amely más javaslatokkal versenyképes, bár nem ad magyarázatot az X-alakú rádiógalaxisok sugárzásának minden megfigyelt sajátosságára (lásd 4.5 fejezet összehasonlító ismertetését!).

A modellalkotás első lépése az összeolvadó galaxisok magjaiból keletkező kompakt kettősök tipikus tömegarányára vonatkozó becslés. Az ütközési ráta kiszámítást a szerző a szupermasszív galaxismagok tömeg szerinti eloszlásaira, továbbá a két találkozó galaxis befogási hatáskeresztmetszetének tömegfüggésére alapozza. A hatáskeresztmetszetet eleve a nehezebb(!) galaxis tömegének hatványával arányos sugárból becsüli meg, és az ezzel feltevessel elvégzett integrálból adódik a tipikus tömegarány 30 körüli értéke.

3. kérdés

A tömegfüggést bevezető elemzésből kiderül, hogy a hatáskeresztmetszetet azon sugár négyzetével veszik arányosnak, amelyet a galaxisok sugárának és tömegének összefüggése alapján származtatnak. A geometriai hatáskeresztmetszeteket általában az ütköző molekulák sugárának összegére szokás építeni. Csak akkor számít kizárólag a nagyobb méretű, ha eleve feltételezhető, hogy az egyik sugara sokkal kisebb a másikénál. Az analógia alapján természetesen adódik a kérdés: Mennyire érzékenyen reagál a jellemző tömegarány becslése arra a szimmetrikusabb feltevésre, amely a galaxisok sugárösszegének négyzetével arányosnak veszi a hatáskeresztmetszetet?

Ezzel az erősen aszimmetrikus tömegaránnyal olyan helyzetet vizsgáltak, amelyben kezdetben a pályamenti mozgás perdülete dominál az önspin felett, de a bespirálozás végére a viszony megfordul. Ez azért lehetséges, mert a spinváltozás szekuláris átlaga nulla, viszont a pályamomentum a gravitációs sugárzás miatt csökkenő nagyságú. A nagyobb tömegű fekete lyuk kezdetben tetszőleges állású forgástengelye a bespirálozás befejeződésére befordul a szigorúan megmaradó teljes impulzusmomentum irányába. Az átfordulás üteme gyorsuló és az $L \gg S$ helyzetből az $L \sim S$ helyzetbe vezető fejlődés időtartama sokkal hosszabb, mint ami ebből az $L \ll S$ helyzet eléréséhez szükséges. Ez eredményezi, hogy a végső irány körül eléggé szűk a részecskecsóva nyílásszöge. A javasolt mechanizmus alkalmas a megfigyelt X-alakú rádiógalaxisok java részének értelmezésére.

A szerző a kettős kompakt rendszerekre vonatkozó eredményei rövid összefoglalását az 5. fejezetben adja. E rész összefoglaló értékeléseként megállapítható, hogy Gergely Árpád László a szupermasszív fekete lyukak összeolvadásának Perjés Zoltán csoportjában megkezdett vizsgálatát önálló, eredeti problémafelvetésű alkotásokkal folytatta. Disszertációjában vonatkozó eredményeire három tézist épített, amelyek közül az 1. pontot teljes egészében, a 2. pontot az energiaveszteség önspin és a kvadrupólus-monopólus összetevői közötti formai analógia eredetének megvilágítását követően, a 3. pontot teljes egészében eredeti tudományos eredményekként elfogadom.

II. Brán-elméleti kutatások

A gondosan tagolt disszertáció 6. fejezete áttekinti a négydimenziós téridőnk egy magasabb dimenziós (további térszerű kiterjedéssel rendelkező) világ térídejébe beágyazott „hártaként”

modellező elméleteket. A hártya szakzsargonbeli neve a *brán*. Ez a fejezet kijelöli munkája fő irányát: az 5-dimenziós általános relativitás elméletből származó dinamika projekcióját a négydimenziós bránra. Az effektív négydimenziós dinamikának azokat a megoldásait keresi, amelyek a kozmológiai szimmetriákat megvalósító kozmológiaként értelmezhetők, a hártya két oldalára nézve aszimmetrikus geometriát is megengedve. Az asztrofizikai hatások kidolgozásához a gravitációs kollapszus módosult dinamikájának vizsgálatával járul hozzá.

A 7. fejezet mutatja be a gravitációs dinamika egyenleteinek az irodalomban előtte használt megszorításokat mellőző újrafogalmazását. Elkészíti az ötdimenziós Einstein egyenleteknek (amelyekben az ötdimenziós térfogati energiasűrűség mellett a hártýára korlátozott része is van az energia-impulzus tenzornak) tenzori, vektori és skalár projekcióit a bránra. A projekciót a bránra merőleges két irány tükrözési szimmetriája szokásos feltevésének a mellőzésével végzi.

A tenzori projekció adja az indukált metrikára épülő négydimenziós Einstein-egyenleteket. Ennek a magasabb dimenziós geometriából származó effektív forrástagjai is fellépnek, továbbá megjelenik a négydimenziós energia-impulzusban négyzetes forrássűrűség is. A vektori és a skalár projekciók kényszer jellegű egyenletek. A vektorprojekció a brán és környezete energiamérlegének időbeli alakulását szabályozza, amelybe a bránról lesugárzott gravitációs energia mellett a hártýafeszültség esetleges változása is járulékot ad. A skalár egyenlet ötdimenziós mennyiségeket kapcsol össze.

Miután a hártýára korlátozott energia-impulzus tenzorban a hártýafeszültséget önállóan kezeli, expliciten követhető ennek hatása, egyebek között abban az esetben is, amikor értéke térben vagy időben változik.

A dinamikai egyenletek általános feltételek melletti konstrukciójában elért eredményeit a 4. tézispont foglalja össze.

Az egyenletek megoldásait a 8. fejezetben a kozmológiai szimmetriával, azaz téridő homogenitásával rendelkező esetre keresi. A Friedman-bránnak nevezett eset vizsgálata során az aktuálisan megvalósuló FRW-metrikára vezető beágyazásra érvényes az általánosított Friedman- és Raychaudhury-egyenletek megoldásait elemzi.

A külső geometriát is egy ideális folyadéknak megfelelő tenzor-szerkezetű forrástaggal képviseli négy dimenzióban amelynek erősségét egy ismeretlen $U(\tau)$ függvény adja (τ a sajátidő-paraméter). Ennek változását a kontrahált Bianchi-azonosság megszorítja.

Gergely László előtt is vizsgálták már azt a kérdést, hogy az FRW metrika milyen ötdimenziós geometriába ágyazható. A 8.2 alfejezet elektromosan töltött ötdimenziós fekete lyukak metrikáját tételezi fel a brán két oldalán, továbbá megengedi gravitációs sugárzás jelenlétét is (amelynek energiasűrűségére a geometriai optikának megfelelő parametrizációt használ). Erre a beágyazó geometriára a korábbi irodalomban unicitási állítások jelentek meg.

4. Kérdés

A (8.15) egyenlet szerint, az $U(\tau)$ függvény sugárzás jellegű forrástagot képvisel, amennyiben, a hártýaállandó nem időfüggő és a bránra tükrözés-szimmetrikus külső világot tételezünk fel. (8.62) szerint pl. a hártýafeszültség alkalmas időfüggésének bevezetésével elérhető, hogy a járulék nem-

relativisztikus anyag energiasűrűségére jellemző hígulást mutasson és ezzel „sötét anyag” hatást fejtsen ki. Van-e elképzelés arra, hogy ennek részaránya és a fénylő négydimenziós anyag részaránya között természetes módon arányosság álljon fenn, azaz értelmezhető legyen a fénylő és a sötét anyag sűrűségének nagyjából azonos nagyságrendje?

Ez a kérdés érdekes a 2.c) tézispont értékelése szempontjából, miután a késői fejlődés szempontjából az Eötvös-brán csak akkor releváns, ha a hártafeszültség időfejlődése szinkronizálva van a hártya anyagsűrűségének alakulásával. További eredménye, hogy ebben a fejezetben konstruál egy olyan ötdimenziós téridőt is, amelyben a brán sztatikus (Einstein) geometriával rendelkezhet.

Az asztrofizikai vonatkozásokat tárgyaló 9. fejezet több olyan jelenségekört elemez, amelyek az Általános Relativitáselmélet legjelentősebbnek tekintett alkalmazásai közé tartoznak.

A 4+1 dimenziós világ speciális konfigurációinak, a brán-on áthatoló fekete húrok hatásainak vizsgálata során leírja az ún. emmentáli-sajt szerkezetet. Az áthatoló fekete szivar hatását a brán-t kitöltő ideális folyadék állapotegyenletének kozmológiai fejlődésére a kozmológiai állandó nagyságának és előjelének különböző eseteire vizsgálja és feltárja a lassulva táguló univerzum végállapotában fellépő újszerű (nyomás-) szingularitás lehetőségét.

A brán-világba ágyazva elemzi újra egy csillag gravitációs összeomlásának folyamatát, amely a szokásos téridőben fekete lyuk keletkezésére vezet. Az általános relativitás elmélet egzakt megoldásainak beágyazhatósága a magasabb dimenziós brán elméletekbe nem garantált. A szerző vizsgálata szerint a külső tartomány sztatikus vákuum állapotának megkövetelése az összeroppanó csillagot alkotó folyadék állapotegyenletének sajátos viselkedését várja el: a hártafeszültségnél sokkal kisebb energiasűrűsége zérus nyomású folyadék a kollapszus során, azaz nagy energiasűrűsége sötét energia viselkedésű közeggé kell alakuljon. Az átalakulás időbeli lejátszódása (a horizont átlépéséhez viszonyított bekövetkezési pillanata) függ az objektum tömegétől.

5. kérdés

Az állapotegyenlet integrális alakját az anyag mikroszkopikus szerkezete és a rendszerre alkalmazott termodinamikai szigetelések határozzák meg. Van-e olyan ismert anyag (térelméleti közeg), amely rendelkezik az elemzésből leszűrt tulajdonságokkal? Ha nincs (aminek elég nagy esélyt adnék), akkor következik-e, hogy nem lehetséges olyan ötdimenziós beágyazás, amelyre a csillagon kívüli tartomány sztatikus vákuum állapotban van?

A gravitációs kollapszus időbeli lefutásának részletei ugyanúgy az Általános Relativitáselmélet tesztjét alkothatják mint a fény elhajlása gravitáló objektum környezetében. A pályázó munkatársaival a korábban ismertnél nagyobb pontosságú (a perturbációszámítás második rendjében érvényes) képletet vezetett le az irányszög megváltozására és megmutatta, hogy azonos eredményt ad a Lagrange-i és a Hamilton-Jacobi formalizmus használata. A naprendszeren belüli méréseknek az Általános relativitáselmélet jóslatától való maximális eltéréséről megmutatta, hogy azt nem okozhatja ún. árapálytöltésű fekete lyuk jelenléte.

Végül a fekete lyukak Bekenstein-Hawking entrópiájának fogalmát használva vizsgálja az ötdimenziós beágyazású fekete lyukak stabilitását (a negatív hő-kapacitás tartományát, a gravitációs sugárzássá alakulás hatékonyságát és más termodinamikai vonatkozásokat).

6. kérdés

A szerző idézi azt az irodalomban elterjedt vélekedést, miszerint az ötdimenziós elméletben a négydimenziós fekete lyuk egy ötdimenziós véges horizontú objektum négydimenziós metszete (130. oldal). Bekenstein gondolkísérlete az entrópiát információvesztésre és a horizont-felület azt kísérő növekedésére alapozza. Tudható-e, hogy az ötdimenziós világban 1 bit információnak a fekete szivarban történő elnyelése a négydimenziós felület arányos megváltozását eredményezi? Nem lehetséges-e, hogy az ötdimenziós geometria valamelyik más adata az adekvát mérőszám?

Erre a kérdésre adott válasza megítélésem szerint befolyásolja a tézisek 6.d) pontjában megfogalmazott eredményének érvényességi tartományát.

Végül a 10. fejezetben téziseivel összhangban összegzi brán-elméleti kutatásainak eredményeit.

Véleményemet összefoglalva, Gergely Lászlónak a gravitációelmélet modern irányzatait aktívan művelő munkásságát méltónak tartom az MTA-doktora cím odaítélésére. Dolgozata jó fogalmazásban, világos szerkezetben mutatja be eredményeit.

Munkáját jellemzi az alapegyenletekből induló, gondos matematikai elemzés, majd a törekvés megfigyelésekhez kapcsolódó következtetések levonására. Ennek kiemelkedő érdekességű példája a kettős részecskecsóvájú rádió-galaxisok létrejöttére vonatkozó elmülethez vezető vizsgálatsorozata.

Brán-elméleti munkái közül kiemelem a Friedman-brán megoldás részletes vizsgálatát, azaz az FRW-metrika sztatikus vákuum-beágyazására vonatkozó no-go tétel kiterjesztését szélesebb állapotegyenlet osztályra.

Mindemellett téziseinek egy részét (1c, 2, 5c, 6a) a kérdéseimre adott pontosabb értelmezés után tudom majd elfogadni.

Budapest, 2013. február 12.

Patkós András

az MTA rendes tagja