

Szakmai záróbeszámoló az Elméleti Kozmológiai Kutatások című, 100216 OTKA pályázatról

A pályázat résztvevőjének szerzőségével a pályázat futamideje alatt összesen 13 publikáció született. A publikációk: 6 referált folyóiratban megjelent [1]-[6], 2 közlésre folyóirathoz benyújtott cikk [b1]-[b2] és 5 megjelent konferencia-kiadvány [k1]-[k5] (egyik közülük referált folyóiratban közölt). A megjelent cikkek kumulatív impakt faktora **28.655**.

A folyóiratokhoz közlésre benyújtott mindkét cikk esetében pozitív bírálói válaszokat kaptunk: [b1] bírálói értékeléséből: „... In conclusion, this is an interesting paper that may deserve publication after the above points are addressed in detail.”; [b2] bírálói értékeléséből: „This article presents an application of the 1+1+2 formalism to the study of cosmological perturbations around a spacetime whose spatial sections present only a local rotational symmetry (Kantowski-Sachs). It is very sound and detailed and therefore deserves publication. It is also well written and organized. ...”. A bírálók által feltett kérdéseket meg tudjuk válaszolni, ezért azt várjuk, hogy a cikkek kisebb módosításokkal a folyóiratoknál publikálásra elfogadásra kerülnek.

A pályázat résztvevője a futamidő alatt 2-szer járt oktatói ERASMUS programmal egybekötött szakmai úton az Umea-i egyetemen (Svédország) Prof. Dr. Michael Bradley vendégeként. Az egyetemi előadások/szemináriumok során a pályázatban elért eredmények is ismertetésre kerültek.

Főbb eredmények összefoglalása:

1. Sötét energia modellek

Tachionikus skalármező sötét energia modell és puha szingularitás:

A tachionikus skalármező sötét energia modellekben, amikor a potenciál trigonometrikus függvényeket tartalmaz, a sík Friedmann univerzumnak kétféle jövő evolúciója lehetséges. Egyik esetben a távoli jövőben de Sitter téridővé válik, ahogy a standard Λ CDM kozmológiai modellben, amíg a másikban az univerzum tágulása a jelenlegi gyorsuló fázisból lassulóba vált és egy ún. puha szingularitásba fut. Ekkor a geodetikus-egyenletek regulárisak maradnak, így a pontszerű részecskék a szingularitáson áthaladhatnak. Végtelen árapály erők lépnek fel, de csupán infinitezimális ideig, ezért a kiterjedt testek térfogata is véges tud maradni a szingularitás elérésekor. Szerzőtársaimmal az univerzumnak a puha szingularitáson keresztüli, illetve az azt követő evolúcióját tanulmányoztuk.

A tachionikus skalármező modell konstans potenciálú esete az ún. anti-Chaplygin gáznak felel meg. Mivel puha szingularitás ekkor is fellép, ezért először ezt az egyszerűbb anti-

Chaplygin gáz és por (barionikus + hideg sötét anyag együttes) komponenseket tartalmazó univerzum modell fejlődését vizsgáltuk [1], [k1] és [k4]. Azt találtuk, hogy a két folyadék modellben a puha szingularitáshoz köthető paradoxon lép fel. A szingularitás elérésekor az anti-Chaplygin gáz nyomása divergál, amíg energiasűrűsége eltűnik. A por komponens jelenléte miatt a Hubble paraméter pozitív. Ezért sima evolúció (skálafaktor első deriváltja folytonos) esetén az univerzum további tágulása következne, aminek ellentmond, hogy az anti-Chaplygin gáz energiasűrűsége ekkor rosszul definiálttá (képzetessé) válna. Ez az ellentmondás, illetve a geodetikusok folytathatósága jelenti a paradoxont. A paradoxont a simasági feltétel elhagyásával sikerült feloldanom, ez a kozmológiai mennyiségeknek disztribúcióként való újradefiniálásához vezetett. Azt találtam, hogy a puha szingularitást keresztezve az univerzum a táguló fejlődési szakaszból összehúzódóba lép. A bizonyításához néhány disztribúció elméleti propozíciót származtattam.

A puha szingularitáson történő áthaladáskor az univerzumnak a táguló fázisból hirtelen összehúzódóba történő váltása analóg tulajdonságot mutat egy kemény labdának a merev falról való tökéletesen rugalmas visszapattanásához, amikor is a labda sebessége változik hirtelen. Ez a szituáció azonban csupán egy „idealizációja” az ütközéskor kicsi, de véges idő alatt lezajló azon folyamatnak, amikor a labda és a fal deformációkat szenvednek. A deformációk figyelembe vétele a labda sebességének folytonosságához vezet.

Ennek analógiája anti-Chaplygin gáz esetében, hogy a puha szingularitáson történő áthaladáskor a gáz egy geometriailag indukált anyag transzformáción esik át, az állapotegyenlete megváltozik [4]. A skálafaktor első deriváltja folytonos marad a puha szingularitáson áthaladáskor, az anti-Chaplygin gáz pedig Chaplygin gázzá válik. Egy relatív rövid periódust követően az univerzum a táguló fázisból összehúzódóba vált, majd egy újbóli puha szingularitás keresztezésekor a Chaplygin gáz állapotegyenlete az anti-Chaplygin gázéra változik. Végül az univerzum a „Big Crunch” erős szingularitásba fejlődik.

Trigonometrikus potenciállal rendelkező tachionikus skalármező sötét energia és por jelenlétében a kezdeti feltételektől függően egyes evolúciók szintén puha szingularitásba vezetnek. Ahogy az anti-Chaplygin gáz, a tachionikus skalármező szintén egy geometriailag indukált anyag transzformáción esik át [4]. A tachionikus skalármező új állapotát kvázitachionikusnak neveztük el. Egy relatív rövid időszakot követően az univerzum összehúzódóvá válik, egy újbóli puha szingularitást keresztez, amikor a mező újból tachionikus lesz, végül az evolúció „Big Crunch” szingularításban végződik. A puha szingularitásba jövő fejlődő univerzum múlt evolúciója jól képes reprodukálni az Ia típusú szupernóva (SNIa) megfigyelésekből származtatott luminozitás-vöröseltolódás relációt. Ábrázoltam az 1σ konfidencia szinthez tartozó paraméter tartományokat különböző hideg sötét anyag mennyiség mellett. A megfigyelési adatok kisebb sötét anyag hányadot preferálnak a Λ CDM modellhez viszonyítva.

Tachionikus skalármező sötét energiával és a kozmikus mikrohullámú háttérsugárzás hőmérsékleti anizotrópia spektruma által megengedett pozitív görbülettel rendelkező Friedmann univerzum esetén egy újabb jövő evolúciót határoztunk meg [5]. Sík Friedmann univerzum esetén minden olyan trajektória, amikor a jelenlegi gyorsuló tágulás lassulóvá válik, az evolúció egy puha szingularitásba vezet. Zárt univerzum esetén azonban az összehúzódó fázis már hamarabb bekövetkezhet, mint ahogy a puha szingularitás megjelenne. A modell szintén jól képes reprodukálni az Ia típusú szupernóva megfigyelésekből származtatott luminozitás-vöröseltolódás relációt.

„Szupravezető” sötét energia modellek

Egy új, érdekes, szupravezetéssel analóg tulajdonságokat mutató sötét energia modellt tanulmányoztam. Ez az eredeti munkatervhez képest többletteljesítést jelent a sötét energia modellek vizsgálatában.

Tovább fejlesztettünk egy olyan skalár-vektor-tenzor gravitációs modellt, amelyben egy mértékmező egy skalármezőhöz és egy kozmológiai folyadékhoz $U(1)$ mértékinvariáns kölcsönhatási taggal csatolódik [b1]. A sötét energia a vektor- és skalármezőn keresztül jelenik meg. A kozmológiai folyadék a barionikus és hideg sötét anyag együttest jellemzi. A kölcsönhatási tagok mértékinvariáns módon [b1]-ben jelennek meg először. A sötét energia alapállapota egy Bose-Einstein típusú kondenzátum, amelyben az $U(1)$ szimmetria spontán sérülése történik. Más szóval a sötét energia egy tömeges vektormezőként jelenik meg, amely egy tömeg nélküli vektor és egy skalármező szuperpozíciójaként áll elő. A skalármező a Goldstone bozonnak felel meg.

Két sajátos esetben tárgyaltuk a mezők evolúcióját sík Friedmann univerzumban. Az egyikben a kozmológiai folyadékkal együttmozgó rendszerben a sötét energia 4-es vektormezőjének csak az időszerű komponense nem nulla. Összevettem a modell jóslatait az SNIa és a Hubble paraméterre vonatkozó adatokkal. A modell paraméterei terében jó illeszkedést (1σ konfidencia szinten belül) a megfigyelésekhez egy a Λ CDM modell határesetet magába foglaló keskeny tartományban találtam.

A másik sajátos esetben a sötét energia 4-es vektormezőjének nincs időszerű komponense a kozmológiai folyadékkal együttmozgó rendszerben. A Friedmann téridő izotrópiájának megfelelően a vektormező térszerű komponensei egyenlők. Az SNIa és Hubble paraméter adathalmazokkal való összevetés azt mutatja, hogy a modell sötét anyag nélkül is jól illeszkedik a megfigyelésekhez. Így a modell egységes leírást adhat mind a sötét energiára és a sötét anyagra.

Továbbá mindkét esetben azt találtuk, hogy a megfigyelési adatok preferálják a barionikus és a hideg sötét anyag (amikor az utóbbi is jelen van) lecsatolódását a sötét energia vektor és skalár szektorairól.

2. Randall-Sundrum 2-es típusú brán kozmológia

A pályázat értékelésének ajánlását megfogadva a kutatási tervnek a „sötét energia” és „lokálisan forgásszimmetrikus kozmológia” részeire fektettem a fő hangsúlyt. A kutatási tervnek e pontjához egy folyamatban lévő munka tartozik.

A Randall-Sundrum 2-es típusú brán kozmológiában az univerzumunk egy 4-dimenziós téridő hiperfelületként (ami a brán) jelenik meg az 5-dimenziós téridőben. A bránon a gravitációs egyenletek megváltoznak az általános relativitáselmélethez képest. A módosult 4-dimenziós gravitációs egyenletben megjelenő egyik járulék a magasabb dimenziós téridő Weyl görbületéből származik. A Weyl görbületnek bránra eső vetülete bizonyos tekintetben analóg módon kezelhető a bránon jelenlévő disztribucionális energia-impulzus tenzorral. Ilyen módon beszélhetünk egy ún. Weyl folyadékról. Ez az „effektív” folyadék rendelkezik „energiasűrűséggel”, „energiaárammal”, „izotróp és anizotróp nyomással”. Azt vizsgáljuk, hogy ez az effektív folyadék felelhet-e a galaktikus forgásgörbékben a szokásosan sötét anyagnak

tulajdonítható hatásokért. A megfigyelésekkel való összevetéshez szükséges bránelméleti analitikus kifejezések származtatásához a perturbációs számítás módszereit alkalmazzuk.

3. Lokálisan forgásszimmetrikus kozmológiák

Pozitív kozmológiai konstanssal rendelkező Kantowski-Sachs típusú kozmológiákat tanulmányoztunk [2]. Ezekben a homogén, lokálisan forgásszimmetrikus téridőkben, egyes paraméter értékek mellett az összehúzódó univerzum táguló fejlődési szakaszba léphet. Ezt „bounce”-nak nevezik. Különösen érdekes az univerzum korai fejlődés szakaszának szempontjából, hisz ekkor az ősrobbanás, ami egy téridő szingularitásból való születést jelent, elkerülhető.

A Kantowski-Sachs kozmológiai modellek összevetése a kvazár megfigyelésekkel azt mutatta, hogy „bounce” csak a lokális forgásszimmetria által kijelölt térbeli irányban lehetséges. (Összehasonlításként: Barionikus és hideg sötét anyagot, sugárzást és kozmológiai konstans tartalmazó izotróp kozmológiában nincs a kvazár megfigyelésekkel kompatibilis olyan paraméter tartomány, ahol „bounce” lehetséges.)

Vizsgáltuk a Kantowski-Sachs kozmológiákban a skalártípusú perturbációkat és az anyag sűrűségperturbációit. Általában a sűrűség gradiens növekedése különböző az anizotrópia (amit a lokális forgásszimmetria jelöl ki) és az erre merőleges irányokban. A különbözőségeket ábrákkal illusztráltuk. A „bounce” szintén hatással van a sűrűség gradiens növekedésére. Általános szabályként azt találtuk, hogy a sűrűség gradiens az anizotrópia irányában kissé a „bounce”-t követően lokális szélsőértéket vesz fel. Olyan izotróp kozmológiában (kvazár megfigyelésekkel nem összeegyeztethető), amikor a „bounce” minden irányban egyszerre megy végbe, a sűrűség gradiens hasonló viselkedése nem tapasztalható.

Tárgyaltam a Kantowski-Sachs típusú kozmológiák általános perturbációit [k3], [k5] és [b2]. A kidolgozott perturbációs formalizmus a téridő $2+1+1$ felbontásához kötődik. A felbontás két lépésben történt. A téridőt először 3-dimenziós térszerű és időszerű részekre, majd a térszerű részt a lokális forgásszimmetria által kitüntetett térbeli irány szerint $2+1$ alakba bontottam. Ezt követően perturbáltam a téridőt és a benne található anyag energia-impulzus tenzorát. Változóként a metrika komponensek helyett intuitívabb jelentéssel rendelkező kinematikai és görbületi változókat használtam. A perturbációk jellemzésére pedig olyan mennyiségeket választottam (pl. energiasűrűség 2-dimenziós (2d) gradiense), amelyek a háttéren zérus értéket vesznek fel, így azok mértékinvariánsak a 2d térszerű szeleteken. Teljes mértékinvariancia általában nem áll fent, mert a formalizmusban használt mennyiségek definícióiban megjelennek a felbontásban használt idő- (u) és térszerű (n) vektorok. A perturbációkat jellemző változókat a háttér-téridő szimmetriáinak megfelelő harmonikusok szerint kifejtettem, és az együtthatókra az Einstein egyenletek felhasználásával a Ricci-, illetve Bianchi azonosságokból fejlődési és kényszer egyenleteket vezettem le. Az örvénymentes esetben megjelenő 28 változóra 17 független kényszer egyenletet kaptam. Kantowski-Sachs téridőn a $2+1+1$ formalizmus szerinti skalár, 2d vektor és 2d tenzori perturbációk egymáshoz csatolódnak.

Adiabatikus perturbációk esetén, alkalmas “frame”, vagyis a perturbált téridő felbontása során használt (u,n) diád megválasztásával a bonyolult csatolt elsőrendű differenciálegyenlet-rendszer 6 változóra vonatkozó 6 időfejlődési egyenletrendszerre redukálható. A rendszer négy, illetve kettő egyenletből álló, egymástól lecsatolt alrészre bomlik. A négy egyenletből álló rész tartalmazza az anyagi perturbációkat, amíg a két egyenletből álló szektor a tenzori perturbációknak a sűrűségperturbációktól lecsatolódo részét írja le.

Az általam kidolgozott formalizmus egy igen érdekes alkalmazási területének a magas frekvenciájú perturbációk tanulmányozása mutatkozott. Ez az alkalmazás túlmutat a pályázat anizotróp kozmológiák vizsgálatát célzó eredeti tervezetén.

Magas frekvenciájú (geometriai optikai) közelítésben elsőrendben a Weyl tenzor 2d vetületét jellemző páros és páratlan tenzori perturbációk fénysebességgel, gravitációs hullámként terjednek. A nyírás és anyagsűrűség perturbációkat jellemző módusokra szintén hullámszerű egyenletek kaptunk. E módusok ugyanakkora hangsebességgel, de a nyírás és sűrűségperturbációk egymáshoz képest $\pi/2$ fáziseltolódással terjednek. A közelítés másodrendjében a nyírási és sűrűségperturbációs módusok csillapított kényszerrezgéseknek tesznek eleget. A Weyl tenzor módusaira pedig csillapított oszcillátor egyenletek vonatkoznak. A csillapítási tényező különbözik az anizotrópia és az erre merőleges irányban, ami irányfüggő diszperziós relációk létezésére utal.

4. Kompakt kettős rendszerek és aktív galaxismagok

Az alábbi publikációk a pályázat eredeti tervezetét meghaladó kutatásokban történő részvételemmel készültek. E publikációkban az OTKA támogatás szintén feltüntetésre került.

Saját tengely körüli forgással (spinnel) rendelkező kompakt objektumokból álló kettős rendszerekből származó gravitációs hullámok leírására alkalmas új hullámformát származtattunk [3]. A hullámforma arra az esetre érvényes, amikor az egyik test tömege legalább 30-szorosa a másiknak. Ilyen rendszereket tipikusan szupermasszív fekete lyukak alkotnak. A hullámforma a bespirálozás utolsó szakaszában érvényes, amikor a nagyobbik spin dominál a pálya impulzusmomentum felett. Ekkor a poszt-newtoni paraméter mellett a pálya impulzusmomentum és spin aránya egy második kis paraméterként szolgál, amelyben sorfejtési lehet. A két paraméterben történő sorfejtés jelentősen egyszerűsítette a spin figyelembe vételét a gravitációs hullámformában.

Spines kompakt kettősök konzervatív fejlődését vizsgáltuk második poszt-newtoni rendig [6]. Figyelembe vettük a vezető rendű spin-pálya, spin-spin és tömeg kvadrupol-monopol csatolásokat. A pályaelemekre és a spin irányokat jellemző szögek evolúcióját leíró csatolt, első rendű differenciálegyenletekből álló zárt rendszer származtattunk. A formalizmus alkalmazásával kis szeparációk esetén új típusú ún. kaméleon pályákat találtunk. A kaméleon pályák olyan pályák, amelyek lokális oszkuláló kúpszelete hiperbolikusról elliptikusra vált, amint megközelíti a pericentrumot, majd vissza hiperbolikusra. Ez konzisztens azzal, hogy kis szeparációnál az einsteini gravitáció erősebb a newtoninál.

Fekete lyuk körüli akkréciós korongban proton-proton ütközések során végbemenő pion keltéseket vizsgáltunk [k2]. Azt találtuk, hogy csak gyorsan forgó fekete lyuk körül, négy Schwarzschild sugáron belül keletkezhetnek pionok jelentős számban. A pionok keletkezésének jelentősége abban áll, hogy másodlagos bomlástermékei közül a pozitronok energiája statisztikailag egy bizonyos értéknél magasabbak. Szinkrotronsugárzásukkal elvben az aktív galaxismagok esetén rádió csillagászati megfigyelésekben tapasztalt alacsony energiájú levágás magyarázható.

Publikációs lista

Folyóiratcikkek

- [1] **Z. Keresztes**, L. Á. Gergely, A. Yu. Kamenshchik: *Paradox of soft singularity crossing and its resolution by distributional cosmological quantities*, Phys. Rev. D **86**, 063522, 2012 (IF=4.691)
- [2] M. Bradley, P. K. S. Dunsby, M. Forsberg, **Z. Keresztes**: *Density growth in Kantowski–Sachs cosmologies with a cosmological constant*, Class. Quantum Grav. **29**, 095023, 2012 (IF=3.562)
- [3] M. Tápai, **Z. Keresztes**, L. Á. Gergely: *Spin-dominated waveforms for unequal mass compact binaries*, Phys. Rev. D **86**, 104045, 2012 (IF=4.691)
- [4] **Z. Keresztes**, L. Á. Gergely, A. Yu. Kamenshchik, V. Gorini, D. Polarski: *Soft singularity crossing and transformation of matter properties*, Phys. Rev. D **88**, 023535, 2013 (IF=4.864)
- [5] Zs. Horváth, **Z. Keresztes**, A. Y. Kamenshchik, L. Á. Gergely: *Criticality and big brake singularities in the tachyonic evolutions of closed Friedmann universes with cold dark matter*, Phys. Rev. D **91**, 103513, 2015 (IF=4.864)
- [6] L. Á. Gergely, **Z. Keresztes**: *Spinning compact binary dynamics and chameleon orbits*, Phys. Rev. D **91**, 024012, 2015 (IF=4.864)

Publikálásra benyújtott cikkek

- [b1] **Z. Keresztes**, L. Á. Gergely, T. Harko, S.-D. Liang: *Cosmological constraints on superconducting dark energy models*, Közlésre beküldve a "*Physical Review D*" folyóiratnak; arXiv:1509.00492, 2015 (IF=4.864)
- [b2] **Z. Keresztes**, M. Forsberg, M. Bradley, P. K. S. Dunsby, L. Á. Gergely: *Gravitational, shear and matter waves in Kantowski-Sachs cosmologies*, Közlésre beküldve a "*Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*" folyóiratnak; arXiv:1507.08300, 2015 (IF=5.810)

Konferencia-kiadványok

- [k1] L. Á. Gergely, **Z. Keresztes**, A. Yu. Kamenshchik: *Distributional cosmological quantities solve the paradox of soft singularity crossing*, AIP Conf. Proc. **1514**, 132, 2013
- [k2] E. Kun, P. J. Wiita, L. Á. Gergely, **Z. Keresztes**, Gopal-Krishna, P. L. Biermann: *Constraints on supermassive black hole spins from observations of active galaxy jets*, ASTRON

NACHRICH **334**: (9) 1024-1027, 2013 (**IF=1.119**)

[k3] **Z. Keresztes**, M. Forsberg, M. Bradley, P. K. S. Dunsby, L. Á. Gergely: *Perturbations of Kantowski-Sachs models with a cosmological constant*, Springer Proceedings in Mathematics & Statistics **60**, 289-293, 2014

[k4] A. Yu. Kamenshchik, **Z. Keresztes**, L. Á. Gergely: *The paradox of soft singularity crossing avoided by distributional cosmological quantities*, Proceedings of the Thirteenth Marcel Grossman Meeting on General Relativity, Eds. RT Jantzen, K Rosquist, R Ruffini, World Scientific Singapore, p. 1847-1849, 2015

[k5] M. Bradley, M. Forsberg, **Z. Keresztes**, P. K. S. Dunsby, L. Á. Gergely: *Perturbations of Kantowski-Sachs models*, Proceedings of the Thirteenth Marcel Grossman Meeting on General Relativity, Eds. RT Jantzen, K Rosquist, R Ruffini, World Scientific Singapore, p. 2547-2549, 2015