

# **Randall-Sundrum 2-es típusú bránelméletek és tachion sötét energia modell**

**Doktori (PhD) értekezés tézisei**

*Keresztes Zoltán*

**Témavezető: Dr. Gergely Árpád László**  
egyetemi docens

**Fizika doktori iskola**  
*Szegedi Tudományegyetem*  
*Kísérleti Fizikai Tanszék*  
*Elméleti Fizikai Tanszék*

**SZTE TTIK**

**Szeged**

**2010**

# Bevezetés

A legújabb megfigyelések szerint az általános relativitáselmélet akkor képes leírni az univerzum fejlődését, ha ismeretlen anyagok létezését feltételezzük. A hideg sötét anyag a struktúráképződés és a galaxis-halmazok megfigyelt dinamikájának megmagyarázásához szükséges. A sötét energia okozza az univerzum gyorsuló tágulását. Fontos kérdés e két anyag-típus mibenlétének tisztázása. Milyen mezők állják ki a megfigyelésekből származó kényszereket? A sötét anyag és a sötét energia okozta hatásokat el lehet érni a gravitációs dinamika megváltoztatásával is. Alternatív gravitációs modellek vizsgálata pusztán elméleti szempontból is érdekes. A húr / M elmélet, ami az egyesített elmélet lehetséges jelöltje, több alternatív gravitációs modellt is motivált. Közülük az egyik a Randall-Sundrum II-es típusú brán modell.

## A dolgozat célkitűzései:

- az általánosított Randall-Sundrum II-es (RS2) típusú brán-világ modell tanulmányozása;
- egy olyan kozmológiai modell vizsgálata, amelyben a sötét energia nem más, mint egy tachion mező.

## RS2 brán-világ modell

RS2 típusú brán-világokban a gravitáció az Einstein-Hilbert hatás szerint öt dimenzióban hat. Megfigyelhető univerzumunk az 5-dimenziós (5d) világban egy 4-dimenziós (4d) időszerű hiperfelületet alkot, a bránt. Az 5d energia-impulzus tenzor egy reguláris, és egy disztribucionális résszel rendelkezik. A reguláris rész az öt dimenzió nem standard anyagi mezőit írja le. A disztribucionális tag, amely tartalmazza a brán-feszültséget és a standard anyagi mezőket, tünteti ki a bránt. A gravitáció kivételével így minden standard kölcsönhatás és anyagi mező a bránra korlátozott.

Húrelméleti nézőpontból az univerzumunk egy Dirichlet 3-brán. A nyitott hurok végpontjai a bránon végződnek, és azon szabadon mozognak, amíg a zárt hurok bejárhatják a teljes magasabb dimenziós téridőt.

A brán két régióra bontja az 5d téridőt. A régiók összeillesztése megkívánja, hogy a bránon indukált metrika folytonos legyen a hiperfelületen való áthaladás során. Az Einstein egyenletek felhasználásával pedig megmutatható (Lanczos-Israel egyenlet), hogy a brán külső görbülete ugrást kell szenvedjen, ha disztribucionális anyag van jelen. A brán energia-impulzus tenzora még vákuum esetben sem nulla a brán-feszültség miatt. Ugyanazon normálissal a brán egyes

oldalain számolt külső görbületek különbsége ezért sosem tűnik el. A Lanczos-Israel egyenletet másképpen úgy értelmezhetjük, hogy a brán külső görbületének ugrása disztribúcionális anyagot eredményez.

Általános relativitáselméletben az energia-impulzus tenzor négyes divergenciája eltűnik. RS2 brán-világ modellben a standard anyag energia-impulzus tenzorára ez általában nem teljesül. Teljesül viszont akkor, ha az 5d energia-impulzus tenzor reguláris részének egyik indexében a bránra és a másikban a brán normálisára vett projekciója eltűnik. Egyébként az 5d régiókból anyag halmozódhat fel a bránon.

A bránon érvényes gravitációs dinamika az 5d Einstein egyenlet mindkét indexében bránra projektált részéből származtatható. Ez effektív Einstein egyenletként ismert. Benne az általános relativitáselméletben megszokott forrás tagokon kívül újak jelennek meg. A standard anyag energia-impulzus tenzorában négyzetes tag nagy energiákon, az univerzum korai fejlődési szakaszában domináns. Megjelennek járulékok az 5d energia-impulzus tenzor reguláris részéből is. A brán beágyazásának aszimmetrikussága szintén újabb tagokat eredményez. Ezekon kívül a magasabb dimenziós gravitációs hatások nem lokális járuléka is feltűnik (az 5d Weyl tenzor második és harmadik indexében bránra merőleges irányú projekcióján keresztül). Vákuum 5d régió és a brán szimmetrikus beágyazása mellett, ez utóbbi adhat extra járulékot alacsony energiákon.

## Tachion kozmológiai modell

A csupán időtől függő skalármezők ideális folyadékok. Az állapot-egyenletben megjelenő barotropikus index függhet az időtől. A skalármezőket leíró Lagrange-sűrűségek egyik típusa ( $L_\varphi$ ) az egy dimenziós mozgást végző, nem relativisztikus részecskék Lagrange függvényének természetes általánosításának tekinthető. Másik típus a relativisztikus részecskék Lagrange függvényéből származtatható ( $L_{tach}$ ), amire alább tachion mezőként hivatkozok.

Izotróp kozmológiai modell esetén a skálafaktor adott időfüggéséhez mindig lehet találni olyan minimálisan csatolt skalármezőt  $L_\varphi$  Lagrange-sűrűséggel, amellyel reprodukálni lehet az adott kozmológiai evolúciót. Hasonló állítás igaz az  $L_{tach}$  Lagrange-sűrűséggel adott tachion mezőt tartalmazó kozmológiai modellekre. Ezért kapcsolatot lehet találni a Lagrange-sűrűségek potenciáljai között abban az értelemben, hogy megfelelően választott kezdeti feltételek esetén, a mezők ugyanahhoz a skálafaktor fejlődéshez vezetnek.

# Előzmények és célkitűzések

## RS2 modell keretein belüli kutatások

1. Főként kozmológiai perturbációs számításokban igen sikeresen alkalmazták a kinematikai és gravito-elektro-mágneses mennyiségeket használó 3+1 kovariáns formalizmust. Ennek általánosítását kozmológiai vákuum 5d téridőbe szimmetrikusan beágyazott bránokra dolgozták ki korábban. Azonban az általánosított formalizmus csak a gravitáció bránon való dinamikáját tárgyalja, és nem a teljes 5d téridőt. A kapott egyenletek ezért nem alkotnak gravitációs szempontból zárt rendszert. A záródás csak abban az esetben volt ismert, amikor az effektív Einstein egyenletben megjelenő magasabb dimenziós gravitációs hatások nem lokális járuléknak anizotróp nyomás része eltűnik ( $\hat{\mathcal{E}}_{ab} = 0$ ). Ez megnehezíti például a kozmikus mikrohullámú háttérsugárzás teljesítmény spektrumának elméleti meghatározását. Az elvi nehézség abból származik, hogy határfeltételeket kell előírni az 5d régiókban.

Létezik egy kanonikus változókat használó s+1+1 leírás is. Ebben a szerzők azzal a feltevessel éltek, hogy az s+1+1 dimenziós téridő fóliázható eggyel alacsonyabb dimenziós időszerű és térszerű hiperfelületekkel. Ha a téridő felbontásában szereplő vektorok örvényesek, akkor ez nem lehetséges. Általános relativitáselméletben az időszerű vektor örvényes például olyan egzakt megoldásokban is, mint a Kerr, vagy a Taub-NUT téridők.

**Cél:** Általánosítani a fenti formalizmusokat. Alkalmassá tenni a brán 3+1 kovariáns formalizmust általános perturbáció számításra a brán tetszőleges beágyazása mellett. Megvizsgálni, hogy lehet-e záródó brán egyenleteket nyerni az  $\hat{\mathcal{E}}_{ab} = 0$  feltételnél általánosabb esetben.

2. Általános relativitáselméletben, amikor egy időszerű vektoron kívül minden pontban van egy térbeli irányt kijelölő vektor is, célszerű a téridő 3+1 alakját 2+1+1 alakba tovább bontani. A lokális forgás-szimmetria (LRS; local rotational symmetry) egyértelműen kijelöl minden pontban egy térbeli irányt. Általános relativitáselméletben az LRS téridőket három osztályba sikerült sorolni.

RS2 modellben találtak olyan lokálisan forgás-szimmetrikus brán megoldásokat, melyek az általános relativitáselméleti Reissner-Nordström és Kerr-Newmann téridőknek feleltek meg azzal a különbséggel, hogy az elektromos töltés helyett bennük a Weyl tenzorból származó árapály töltés paraméter jelent meg.

**Cél:** Új lokálisan forgás-szimmetrikus brán megoldás származtatása.

3. Ötdimenziós Birkhoff-tétel alatt azt az eredmény értik, hogy Friedmann bránt tartalmazó, és az extra dimenzió mentén annak szimmetriáival rendelkező 4-dimenziós hiperfelületekkel fóliázható, negatív kozmológiai állandóval rendelkező 5d téridők sztatikusak és az általánosított Schwarzschild - Anti-de Sitter osztályba tartoznak. Ezt a tételt sérti a Gergely-Maartens (GM) metrika, amely ugyanezen szimmetriákkal rendelkezik, de nem tartozik az említett osztályba. A tétel bizonyítása során használt koordináta transzformációk egyike a GM téridőre nem alkalmazható. A GM metrika hiperbolikus esetben ismert volt, hogy egyes görbüeti skalárok megegyeznek a tételben szereplő extrémális fekete lyuk megoldás degenerált horizontjával.

**Cél:** Az 5d Birkhoff-tétel kiterjeszhetőségének vizsgálata GM téridőre.

4. A brán szolgálhat a magasabb dimenziós téridőben jelen lévő sugárzás forrásául, mert magas energiákon a részecske kölcsönhatások képesek az extra dimenzióba jutó gravitonokat produkálni. Ilyen sugárzás esetén a brán kozmológiai evolúcióját vizsgálták mind a brán szimmetrikus beágyazása, mind aszimmetrikus beágyazása mellett. Egy másik lehetőség az 5d sugárzás megjelenésére, amikor forrásául 5d objektum szolgál. A bránvilág modellekben standard anyag csak a bránon létezik. Ezért a magasabb dimenziós sugárzásnak nem standard természetűnek kell lennie. Ilyen esetet szolgáltat a magasabb dimenziós fekete lyuk Hawking sugárzása. A Hawking sugárzás a horizonton kívüli, de ahhoz közeli részecske pár keletkezéséként képzelhető el, amikor a görbület miatt a pozitív energiájú a fekete lyukat tipikusan elhagyja, amíg a negatív energiájú a fekete lyukba "hull". A brán az öt ért sugárzás egy részét elnyeli, más részét áttereszti, illetve visszaveri. A brán mozgását olyan téridőben, ahol az egyes 5d régiók tartalmaznak egy-egy párolgó fekete lyukat, és a brán az összes öt ért sugárzást átengedi, vizsgálták azzal a feltevés-sel, hogy az egyes 5d régiók Vaidya-Anti-de Sitter (VAdS<sub>5</sub>) régiók. Azonban a VAdS<sub>5</sub> téridőben csak egykomponensű sugárzás van jelen.

**Cél:** Az 5d fekete lyuk Hawking sugárzás hatásainak vizsgálata aszimmetrikusan beágyazott bránokra, amikor az 5d régiók VAdS<sub>5</sub> régiók.

5. Az Ia típusú szupernóva (SNIa) megfigyeléseknek köszönhetően ismerték fel, hogy az univerzum tágulása jelenleg gyorsul. A megfigyelt fénygörbékből kapott luminozítás távolság-vöröseltolódás reláció az egyes kozmológiai modellekre elméletileg is számolható. RS2 brán modellek SNIa adatokkal való összevetését korábban azokban az esetekben végezték el, amikor az energia-impulzus tenzor kvadratikus járulékkára viszonylag nagy értékeket is megengedtek, és az 5d Weyl görbület járuléka sötét sugárzásként jelent meg a bránon. Az energia-impulzus tenzor kvadratikus járulékat tartalmazó kozmológiai paraméter  $\Omega_\lambda = 0.026$  értékére találtak legjobb illeszkedést. Azonban a brán-feszültségre asztrofizikai és más kozmológiai becslésekből származtatott kényszerek  $\Omega_\lambda$ -ra sok nagyságrenddel kisebb számot adnak.

A Weyl görbület akkor jelenik meg sötét sugárzásként a bránon, ha a bránt 5d Schwarzschild - (Anti)-de Sitter téridőbe ágyazzuk. Érdekes azonban az az eset, amikor a brán és a magasabb dimenziós téridő között energia kicserélődés megy végbe. Ha a brán úgy sugárzik, hogy a fekete lyukak tömeg paramétere az  $m \propto a^\alpha$  (ahol  $1 \leq \alpha \leq 4$ , és  $a$  a skálafaktor) szerint változik, akkor a struktúráképződés magyarázható sötét anyag helyett a bránon az 5d téridő Weyl görbületéből származó Weyl folyadékkal.

**Cél:** Luminozitás-vöröseltolódás reláció származtatása RS2 brán-világ modellekre, illetve szupernóva megfigyelésekkel való tesztelésük, amikor a brán és a magasabb dimenziós téridő között végbemehet energia kicserélődés.

## Tachion modell keretein belüli kutatások

6. Valós potenciál esetén a tachion mezők speciálisabbak a minimálisan csatolt skalármezőknél. A tachion mező nyomása ekkor negatív és sértheti az erős energia feltételt, ami az univerzum gyorsuló tágulását eredményezi. Az általam vizsgált potenciál esetében, ha az a jövőben végig valós értékű marad, a modell a de Sitter végállapotba fut.

A potenciál valós jellegét azonban nem szükséges kikötni. A dolgozatban vizsgált potenciál esetén, amikor az képzetessé válik, a dinamikai egyenletekben más tagok is képzetesek lesznek úgy, hogy a fizikai változók valóságosak maradnak. Az átmenetkor a téridő nem válik szingulárisra. A mező Lagrange-sűrűsége ebben a tartományban a fénysebességnél gyorsabban mozgó részecske Lagrange függvényének felel meg. A folyadék nyomása ebben a tartományban pozitív, így az univerzum tágulása lassuló. A trajektóriák egy új típusú szingularitásba a Big Brake-be (Nagy Megtorpanás) fejlődnek. Mivel a geodetikus egyenlet nem szinguláris a Big Brake elérésekor, a geodetikusok folytathatók. A Big Brake tehát nem végső állapota az univerzumnak. Egy összehúzó fázis következik, melynek során az Univerzum végül a Big Crunch-nak (Nagy Összeroppanás) nevezett szingularitásba fut.

**Cél:** A tachion kozmológiai model SNIA adatokkal való tesztelése, valamint annak vizsgálata, hogy az univerzum fejlődhet-e Big Brake-be. Annak megállapítása, hogy a jól illeszkedő paraméterek esetén a mező hogyan fejlődött a távoli múltban.

# Tézis pontok

1. *Új formalizmus kifejlesztése a Randall-Sundrum 2-es típusú brán-világmodellek leírására* ([7] és [8]):

Kidolgoztam az RS2 brán-világ modell leírására szolgáló olyan formalizmust, ami a téridő  $3+1+1$  alakú felbontásához illeszkedik. A formalizmus változói: (i) kinematikai, (ii) gravito-elektro-mágneses, (iii) anyagi változók. A kidolgozott módszer általánosítja a brán  $3+1$  kovariáns és ( $s = 3$ -ra) a kanonikus változókat használó formalizmusokat.

Megadtam az általános egyenleteket a brán tetszőleges beágyazása mellett, mind a bránon, mind a külső  $5d$  téridőben. Az egyenletek felírásakor semmilyen feltevést nem használtam az  $5d$  téridő szimmetriáira, a brán beágyazására, vagy az anyagi forrásra. Megadtam az egyes kovariáns deriváltak kommutációs relációit és a mennyiségek transzformációit infinitezimális bázisváltoztatásra. Ez utóbbi a perturbációszámításban fontos.

Származtattam a lokális  $3d$  görbületesi tenzor  $3+1+1$  változókkal való kifejezését. Örvénymentes esetben ez a  $3d$  Riemann tenzor  $3+1+1$  felbontása. Ennek megfelelő kontrakciójából (a  $3d$  Riemann görbületesi skalárból) vezettem le a kozmológia egyik alapegyenletét, a Friedmann egyenletet.

Az  $5d$  régiókban és a brán mentén érvényes általános  $3+1+1$  egyenletek akkor érvényesek, ha gravitációs törvényként elfogadjuk az  $5d$  Einstein egyenletet. Így érvényesek DGP (Dvali-Gabadadze-Porrati) modellre is. A formalizmus a brán beágyazásra (a két  $5d$  régió brán menti illesztésére) vonatkozó egyenletekkel specifikálódik az RS2 modellre. Ezek a brán beágyazási relációk DGP esetre könnyen általánosíthatók.

A  $3+1+1$  formalizmus általános egyenleteinek egy alcsoportjából származtatható a gravitációs dinamikát bránon leíró egyenletek. Ezek korábban csak kozmológiai állandóval rendelkező vákuum  $5d$  téridőbe tükörszimmetrikusan ágyazott bránra voltak ismertek. Javítottam az irodalomban talált hibákat. A brán egyenletek nem csatolódnak le az  $5d$  régiókat leíróktól. A dolgozatban a korábban ismertnél ( $\hat{\mathcal{E}}_{ab} = 0$ ) általánosabb záródási feltétel került megfogalmazásra abban az esetben, amikor a brán beágyazása szimmetrikus.

A kifejlesztett  $3+1+1$  kovariáns formalizmus alkalmas általános perturbációk vizsgálatára, valamint brán fekete lyuk megoldások származtatására.

## 2. Új brán megoldás származtatása ([8]):

Speciális szimmetriák esetén a  $3+1+1$  kovariáns formalizmust új brán téridő származtatására alkalmaztam. A brán stacionér és lokálisan forgás szimmetrikus. A lokális forgás szimmetria minden pontban egyértelműen kijelöl egy térbeli irányt, ezért a brán téridőt tovább bontottam  $2+1+1$  alakba. Vizsgálataimat az általános relativitáselméleti lokálisan forgás-szimmetrikus téridők három osztálya közül az I-es típusú örvényes téridőre korlátoztam. A Weyl folyadék anizotróp nyomás tagjára kirótt segéd-feltétel figyelembe vételével származtattam két másodrendű, nem lineáris differenciál egyenletből álló rendszert, aminek általános megoldása szolgáltatja a feltevésekkel konzisztens brán téridőket. Az egyenletek nem-linearitása miatt partikuláris megoldás keresésére szorítkoztam.

A talált téridő formálisan az általános relativitáselméleti elektromosan töltött Taub-NUT-(A)dS téridő-nek feleltethető meg. A Taub-NUT-(A)dS téridő egy kozmológiai vákuumba ágyazott elektromosan töltött, tömeges, NUT (Newman-Unti-Tamburino) töltéssel rendelkező fekete lyukat ír le. A NUT töltés egyik érdekes következménye, hogy a téridő egyes régióiban zárt időszerű görbéket tartalmaz. A brán megoldásban az elektromos töltés szerepét az 5d nem lokális gravitációs hatások eredményeképpen megjelenő árapály-töltés veszi át. Amíg az elektromos töltés a fekete lyuk gravitációs vonzását gyengíti, addig az árapály-töltés előjelétől függően erősítheti is azt. Az új téridő az árapály-töltésű Taub-NUT-(A)dS bránként interpretálható.

## 3. 5d Birkhoff-tétel kiterjesztése ([5]):

A dolgozatban bizonyítottam, hogy a Gergely-Maartens metrika gömbi és hiperbolikus esetei az általánosított Schwarzschild-(Anti)-de Sitter téridő degenerált horizont környezetét írják le.

Először megvizsgáltam, hogy az általánosított Schwarzschild-(Anti)-de Sitter téridő milyen paraméterekre rendelkezik két esemény horizonttal. Ezután képeztem az extrémális határesetet (ekkor a két esemény horizont egybe esik), és előállítottam a degenerált horizontok környezetét leíró téridőket. A kapott új téridők egzakt megoldásai az 5d Einstein egyenleteknek. A horizont téridők több szimmetriával rendelkeznek, mint az eredeti metrikák. A Killing vektorok száma annyi, mint a GM téridőben.

Megmutattam, hogy a GM és a horizont metrikák átranszformálhatók egymásba. Az eredmények szerint a GM metrika gömbi esetben a Schwarzschild-de Sitter, hiperbolikusra pedig a negatív görbületi indexű Schwarzschild-Anti-de Sitter téridő degenerált horizontját adja. A kapcsolat az általános relativitáselméleti Bertotti-Robinson és az extrémális Reissner-Nordström téridők köztire hasonlít.

A hiperbolikus Schwarzschild-Anti-de Sitter téridő szerepel az 5d Birkhoff-tételben. A bizonyítás az 5d Birkhoff-tétel egy gyengébb értelemben vett kiterjesztését adja a GM téridő hiperbolikus esetére.



#### 4. Besugárzott zárt Friedmann bránok vizsgálata ([1] és [2]):

A párolgó 5d fekete lyuk aszimmetrikusan beágyazott Friedmann bránra kifejtett hatásait tárgyaltam. Az aszimmetriát az biztosította, hogy fekete lyuk csak az egyik 5d régióban található. Nem ismert olyan kozmológiai állandót tartalmazó 5d téridő, amely kétkomponensű sugárzást tartalmaz. Ezért a Hawking sugárzás brán által visszavert komponensének hatására nem, de az elnyelt és az áteresztett részeire lehetőség nyílt. Az 5d régiók Vaidya-Anti-de Sitter-ek, ahol a sugárzás geometriai optikai limitben tárgyalható. Korai univerzumot vizsgáltam, így a brán sugárzás-dominált.

Numerikusan megvizsgáltam a párolgás mentes 5d fekete lyuk esetén a bránt jellemző mennyiségek időfejlődését. A sugárzás-dominált zárt univerzumok ( $k = 1$  görbületi index és  $\Lambda = 0$  brán kozmológiai konstans) hasonlóan, mint az általános relativitáselméletben összehúzódtak, végül a Big Crunch típusú szingularitásban végződtek.

A Hawking sugárzás figyelembe vétele az alábbiakat okozta:

- a Hawking sugárzás csak perturbatíván változtatja meg a kozmológiai evolúciót a nem sugárzó esethez képest. Két szembenálló kis hatás lép fel: (i) a bránon elnyelt sugárzás növeli a brán öngravitációját, így a bránt a gyorsabb rekollapszus felé hajtja; (ii) a Hawking sugárzás azonban nyomást is fejt ki a bránra, amely a bránnak a fekete lyuktól való távolodását segítve elő ( kozmológiai tágulást gyorsító hatás);
- a transzmisszió 0.275-nél kisebb értékeire léteznek olyan kritikus kezdeti brán energiasűrűségek ( $\widehat{\rho}_0^{crit}$ ), amikor a Hawking sugárzás miatt fellépő két egymással versengő hatás közel kioltja egymást;
- minél nagyobb a transzmisszió, annál kisebb a kritikus brán energiasűrűség;
- ha a kezdeti energiasűrűség ( $\widehat{\rho}_0$ ) kisebb, mint  $\widehat{\rho}_0^{crit}$ , akkor a sugárzási nyomás a domináns, míg ha  $\widehat{\rho}_0 > \widehat{\rho}_0^{crit}$ , akkor a sugárzás okozta öngravitáció;
- a félig áteresztő bránok rekollapszusa gyorsabb magas transzmisszió esetén.

#### 5. Sík Friedmann bránok luminozitás-vöröseltolódás relációjának származtatása, és összevetésük az Ia típusú szupernóva (SNIa) megfigyelésekből származó adatokkal ([3] és [4]):

Sík Friedmann brán szimmetrikus beágyazása mellett származtattam a luminozitás-vöröseltolódás relációt a következő esetekben:

- Randall-Sundrum finom-hangolt bránok (a  $\Lambda$  brán kozmológiai állandó zérus). Ez az eredeti RS2 modell. A luminozitás-vöröseltolódás reláció elliptikus integrálokra vezethető vissza;
- $\Lambda = \kappa^2 \lambda / 2$  ( $\lambda$  a brán-feszültség,  $\kappa^2$  a gravitációs csatolási állandó) feltételnek eleget tevő modellek. Ezeknél a luminozitás-vöröseltolódás reláció elemi függvényekkel megadható;

- a Weyl folyadékból, illetve az energia-impulzus tenzor kvadratikus tagjából származó járulékok kicsik és  $\Lambda \neq 0$ . A modell három kozmológiai paraméterrel rendelkezik:  $\Omega_\rho$  (hideg sötét anyag),  $\Omega_d$  (Weyl folyadék),  $\Omega_\Lambda$  (brán kozmológiai konstans). Ezek eleget tesznek az  $\Omega_\rho + \Omega_d + \Omega_\Lambda = 1$  feltételnek. Speciális Weyl járulék esetén a brán sugárzik. Emiatt a brán és az 5d régiókban található fekete lyukak között energia csere van (LWRS modell). A luminozítás-vöröseltolódás reláció elliptikus integrálokkal adható meg.

Az első két esetben az 5d régiók SAdS<sub>5</sub>, míg az LWRS modellben VAdS<sub>5</sub> régiók. Az LWRS modellben a brán sugárzását az 5d fekete lyukak elnyelik, melyek tömegparaméterei ezért fokozatosan nőnek:  $m \propto a^\alpha$ , ahol  $1 \leq \alpha \leq 4$ , és  $a$  a skálafaktor.

A felsorolt modelleket összevetettük a Gold2006 szupernóva adatokkal. A Randall-Sundrum finom-hangolt bránokat a megfigyelések nem támogatják. A  $\Lambda = \kappa^2 \lambda / 2$  feltételnek eleget tevő modell bár jó egyezést mutatott a szupernóva adatokkal, a bránfeszültség túl alacsony értéke miatt, más asztrofizikai és kozmológiai becslésekből származó kényszereket, melyek a  $\lambda$  minimum értékére vonatkoznak, képtelen teljesíteni.

Az  $\alpha = 0$  paraméterű LWRS modelleknél olyan kozmológiai paraméterekkel rendelkezőt találtuk a szupernóva adatokhoz legjobban illeszkedőnek, ami tökéletes egyezésben van a WMAP 3-év adataiból kapottal. Az  $\alpha = 1$  és  $\alpha = 4$  paraméterekkel rendelkező LWRS modellek formálisan megegyeznek a  $\Lambda$ CDM-el, de itt a sötét anyag, illetve a sötét energia bizonyos része geometriai eredetű lehet. Az  $\alpha = 2$  és  $\alpha = 3$  értékek esetén az adatokkal való összevetés nem tüntet ki élesen egy kozmológiai paraméter-párt. Összevetve a különböző eseteket azt találtuk, hogy növekvő  $\alpha$ -ra az  $\Omega_\rho \approx 0.3$  egyre kitüntetettebbé válik, viszont az  $\Omega_d$  (vagy az  $\Omega_\Lambda$ ) egyre szélesebb tartományban mutat jó illeszkedést.

#### 6. *Tachion kozmológiai modell összevetése az SNIa adatokkal, illetve a modell jól illeszkedő paramétereire a múlt és jövő időfejlődés vizsgálata ([6]):*

Ahhoz, hogy a szupernóva adatokkal egy kozmológiai modell illeszkedjen, napjainkra gyorsuló tágulást kell létrehoznia. Feltettem, hogy a mező jelenleg a szublumínális tartományban van (ekkor sérülhet az erős energia-feltétel). Az eredmények mutatták, hogy a modell összhangban áll a szupernóva megfigyelésekből származó távolságmodulus adatokkal, ezért megfelelő sötét energia jelölt. Meghatároztam az SNIa adatokkal jól illeszkedő paramétertartományt.

Ha a mező a jövőben mindvégig a szublumínális tartományban marad, akkor az univerzum a de Sitter végállapotot éri el. Ezzel szemben a superlumínális tartományban a trajektóriák a Big Brake exotikus szingularitásba futnak. Megvizsgáltam, hogy az SNIa adatok támogatják-e a Big Brake elérését. A legjobban illeszkedő kezdeti feltételekre a trajektóriák egy alhalmaza ebbe az új típusú szingularitásba futott. Kiszámoltam a Big Brake elérésének időskáláját, ez az Univerzum jelenlegi korához mérhető.

A Big Brake-be tartó trajektóriák esetén a gyorsuló tágulás szükségszerűen lassulóba megy át. Néhány esetben azt tapasztaltam, hogy ez az átmenet már a múltban bekövetkezhetett (a vöröseltolódás 0.1-nél kisebb értékeire).

A szupernóva adatokkal leginkább illeszkedő trajektóriák távoli múltba való visszafejlesztése azt mutatta, hogy a tachion mező porként, vagyis sötét anyagként viselkedik. Ezért elképzelhető, hogy a tachion mező egységes sötét folyadékot szolgáltat (unified dark fluid).

# Publikációk

## Disszertációban felhasználásra került publikációk

### Referált szakfolyóiratban megjelent publikációk

[8] **Z. Keresztes** és L. Á. Gergely: *Covariant gravitational dynamics in 3+1+1 dimensions*, *Class. Quantum Grav.* **26** 204006 (2010), e-print: arXiv:0909.0490

[7] **Z. Keresztes** és L. Á. Gergely: *3+1+1 dimensional covariant gravitational dynamics on an asymmetrically embedded brane: The average equations*, *Ann. Phys.* **19** 249 (2010), e-print: arXiv:0911.2495

[6] **Z. Keresztes**, L. Á. Gergely, V. Gorini, U. Moschella és A. Yu. Kamenshchik: *Tachyon cosmology, supernovae data and the Big Brake singularity*, *Phys. Rev. D* **79** 083504 (2009), e-print: arXiv:0901.2292

[5] **Z. Keresztes** és L. Á. Gergely: *On the validity of the 5-dimensional Birkhoff theorem: The tale of an exceptional case*, *Class. Quantum Grav.* **25** 165016 (2008), e-print: arXiv:0712.3758

[4] Gy. M. Szabó, L. Á. Gergely és **Z. Keresztes**: *The luminosity-redshift relation in brane-worlds: II. Confrontation with experimental data*, *PMC Phys. A* **1** 8 (2007), e-print: arXiv:astro-ph/0702610

[3] **Z. Keresztes**, L. Á. Gergely, B. Nagy és Gy. M. Szabó: *The luminosity-redshift relation in brane-worlds: I. Analytical results*, *PMC Phys. A* **1** 4 (2007), e-print: arXiv:astro-ph/0606698

[2] **Z. Keresztes**, I. Képiró és L. Á. Gergely: *Semi-transparent brane-worlds*, *JCAP* **0605** 020 (2006), e-print: arXiv:hep-th/0603223

[1] L. Á. Gergely és **Z. Keresztes**: *Irradiated asymmetric Friedmann branes*, *JCAP* **0601** 022 (2006), e-print: arXiv:hep-th/0601217

## További publikációk

### Referált szakfolyóiratban megjelent publikációk

[A6] L. Á. Gergely, P. L. Biermann, B. Mikóczi és **Z. Keresztes**: *Renormalized spin coefficients in the accumulated orbital phase for unequal mass black hole binaries*, *Class. Quantum Grav.* **26** 204006 (2009), e-print: arXiv:0909.0487

[A5] L. Á. Gergely, **Z. Keresztes** és M. Dwornik: *Second-order light deflection by tidal charged black holes on the brane*, *Class. Quantum Grav.* **26** 145002 (2009), e-print: arXiv:0903.1558

[A4] L. Á. Gergely, **Z. Keresztes** és B. Mikóczi: *An Efficient Method for the Evaluation of Secular Effects in the Perturbed Keplerian Motion*, *Astrophys. J. Suppl.* **167** 286 (2006), e-print: arXiv:astro-ph/0603677

[A3] **Z. Keresztes**, B. Mikóczi és L. Á. Gergely: *The Kepler equation for inspiralling compact binaries*, *Phys. Rev. D* **72** 104022 (2005), e-print: arXiv:astro-ph/0510602

[A2] M. Vasúth, **Z. Keresztes**, A. Mihály és L. Á. Gergely: *Gravitational radiation reaction in compact binary systems: Contribution of the magnetic dipole-magnetic dipole interaction*, *Phys. Rev. D* **68** (2003), 124006 e-print: arXiv:gr-qc/0308051

[A1] L. Á. Gergely és **Z. Keresztes**: *Gravitational radiation reaction in compact binary systems: Contribution of the quadrupole-monopole interaction*, *Phys. Rev. D* **67** 024020 (2003), e-print: arXiv:gr-qc/0211027

## Konferencia kiadványok

[B11] L. Veréb, **Z. Keresztes**, P. Raffai, Zs. Udvari, M. Tápai and L. Á. Gergely: *Compact binary waveform recovery from the cross-correlated data of two detectors by matched filtering with spinning templates*, (2010), a Gravitational Wave Data Analysis Workshop GWDAW14 kiadványában kerül publikálásra, Roma, Italy 2010, Ed. F Ricci, e-print: arXiv:1005.2101

[B10] **Z. Keresztes** és L. Á. Gergely: *3+1+1 dimensional covariant gravitational dynamics on an asymmetrically embedded brane: The difference equations*, a 12. Marcel Grossmann konferencia (MG12), Párizs, Franciaország 2009, kiadványában fog megjelenni (2010), e-print: arXiv:0911.2495

[B9] **Z. Keresztes**, B. Mikóczi, L. Á. Gergely és M. Vasúth: *Secular momentum transport by gravitational waves from spinning compact binaries*, Eight Edoardo Amaldi Conference on Gravitational Waves (Amaldi8) kiadványában, New York, 2009; a J. Phys.: Conf. Series-ben (JPCS) fog megjelenni; e-print: arXiv:0911.0477

[B8] L. Veréb, **Z. Keresztes**, P. Raffai, Sz. Mészáros és L. Á. Gergely: *Recovering a spinning inspiralling compact binary waveform immersed in LIGO-like noise with spinning templates*, Eight Edoardo Amaldi Conference on Gravitational Waves (Amaldi8) kiadványában, New York, 2009; J. Phys.: Conf. Series-ben (JPCS) fog megjelenni; e-print: arXiv:0911.0473

[B7] L. Á. Gergely, **Z. Keresztes**, A. Yu. Kamenshchik és V. Gorini, U. Moschella: *Do supernovae favor tachyonic Big Brake instead de Sitter?*, Invisible Universe International Conference kiadványában, Paris, 2009, J. M. Alimi szerkesztésében fog megjelenni; arXiv:0910.3887

[B6] L. Á. Gergely, **Z. Keresztes** és Gy. M. Szabó: *Cosmological tests of generalized RS brane-worlds with Weyl fluid*, *AIP Conference Proceedings* **957** 391 (2007), e-print: arXiv:0709.0933

[B5] L. Á. Gergely, **Z. Keresztes** és B. Mikóczi: *The second post-Newtonian order generalized Kepler equation*, Eleventh Marcel Grossmann Meeting 2006 kiadványában, H. Kleinert,

R. T. Jantzen és R. Ruffini szerkesztésében, World Scientific, Singapore, p. 2503-2505 (2008), e-print: arXiv:gr-qc/0612086

[B4] **Z. Keresztes** és B. Mikóczi: *Kepler Equation for the Compact Binaries under the Spin-spin Interaction*, *ASP Conference Series* **349** 265 (2006), e-print: arXiv:astro-ph/0610287

[B3] B. Nagy és **Z. Keresztes**: *On the luminosity-redshift relation in brane-worlds with cosmological constant*, *Publications of the Astronomy Department of the Eötvös University (PADEU)* **17** 1 (2006), e-print: arXiv:astro-ph/0606662

[B2] B. Mikóczi és **Z. Keresztes**: *Generalized eccentric vs. true anomaly parametrizations in the perturbed Keplerian motion*, *Publications of the Astronomy Department of the Eötvös University (PADEU)* **17** 63 (2006), e-print: arXiv:astro-ph/0610285

[B1] **Z. Keresztes** és I. Képíró: *Irradiated closed Friedmann brane-worlds*, *Publications of the Astronomy Department of the Eötvös University (PADEU)* **17** 205 (2006), e-print: arXiv:hep-th/0610112