Agència
de Gestió d'Ajuts
Universitaris
i de Recerca

Memòria justificativa de recerca de les convocatòries BCC, BE, BP, CTP-AIRE, DEBEQ, FI, INEFC, NANOS i PIV

La memòria justificativa consta de les dues parts que venen a continuació:
1.- Dades bàsiques i resums
2.- Memòria del treball (informe científic)

Tots els camps són obligatoris

1.- Dades bàsiques i resums

Nom de la convocatòria

BP

Llegenda per a les convocatòries:

BCC	Convocatòria de beques per a joves membres de comunitats catalanes a l'exterior
BE	Beques per a estades per a la recerca fora de Catalunya
BP	Convocatòria d'ajuts postdoctorals dins del programa Beatriu de Pinós
CTP-AIRE	Ajuts per accions de cooperació en el marc de la comunitat de treball dels Pirineus. Ajuts de mobilitat de personal investigador.
DEBEQ (Modalitat A3)	Beques de Cooperació Internacional i Desenvolupament
FI	Beques predoctorals per a la formació de personal investigador
INEFC	Beques predoctorals i de col·laboració, dins de l'àmbit de l'educació física i l'esport i les ciències aplicades a l'esport
NANOS	Beques de recerca per a la formació en el camp de les nanotecnologies
PIV	Beques de recerca per a professors i investigadors visitants a Catalunya

Títol del projecte: ha de sintetitzar la temàtica científica del vostre document.
Expansió Accelerada de l'Univers i teories de Gravetat Modificada a Grans Escales

Dades de l'investigador o beneficiari

Nom	Cognoms
Oriol	Pujolàs Boix

Correu electrònic
oriol.pujolas@gmail.com

Dades del centre d'origen

New York University

Agència
de Gestió d'Ajuts
Universitaris
i de Recerca

Número d'expedient
2005 BP-A 1013

Paraules clau: cal que esmenteu cinc conceptes que defineixin el contingut de la vostra memòria.
Cosmologia, Expansió Accelerada de l'Univers, Gravetat Modificada a Grans Distàncies, Dimensions Extra, Branes

Data de presentació de la justificació
22/12/2008

Nom i cognoms i signatura
del/de la investigador/a

Vistiplau del/la responsable de la sol·licitud

Generalitat de Catalunya
Departament d'Innovació,
Universitats i Empresa

Resum del projecte: cal adjuntar dos resums del document, l'un en anglès i l'altre en la llengua del document, on s'esmenti la durada de l'acció

Resum en la llengua del projecte (màxim 300 paraules)
Una de les observacions de més impacte en la cosmologia moderna ha estat la determinació empírica que l'Univers es troba actualment en una fase d'Expansió Accelerada (EA). Aquest fenòmen implica que o bé l'Univers està dominat per un nou sector de matèria/energia, o bé la Relativitat General deixa de tenir validesa a escales cosmològiques. La primera possibilitat comprèn els models d'Energia Fosca (EF), i el seu principal problema és que l'EF ha de tenir propietats tan especials que es fan difícils de justificar teòricament.

La segona possibilitat requereix la construcció de teories consistents de Gravetat Modificada a Grans Distàncies (GMGD), que són una generalització dels models de gravetat massiva. L'interès fenomenològic per aquestes teories també va resorgir amb l'aparició dels primers exemples de models de GMGD, com ara el model de Dvali, Gabadadze i Porrati (DGP), que consisteix en un tipus de brana en una dimensió extra. Malauradament, però, aquest model no permet explicar de forma consistent l'EA de l'Univers.

Un dels objectius d'aquest projecte ha estat establir la viabilitat interna i fenomenològica dels models de GMGD. Des del punt de vista fenomenològic, ens hem centrat en la questió més important a la pràctica: trobar signatures observacionals que permetin distingir els models de GMGD dels d'EF. A nivell més teòric, també hem investigat el significat de les inestabilitats del model DGP.

L'altre gran objectiu que ens vam proposar va ser la construcció de noves teories de GMGD. En la segona part d'aquest projecte, hem elaborat i mostrat la consistència del model "DGP en Cascada", que generalitza el model DGP a més dimensions extra, i representa el segon model consistent i invariant-Lorentz a l'espai pla conegut. L'existència d'altres models de GMGD més enllà de DGP és de gran interès atès que podria permetre obtenir l'EA de l'Univers de forma purament geomètrica.

Resum en anglès (màxim 300 paraules)
One of the observations with most impact in modern cosmology has been the measurement that the Universe is currently in a phase of Accelerated Expansion (AE). This phenomenon implies that either the Universe is dominated by a new form of matter/energy or that General Relativity breaks down at cosmological distances. The first possibility is incarnated by the Dark Energy (DE) models, whose main problem is that the properties of DE should be so special that it is hard to justify from a theoretical standpoint.

The second possibility requires the construction of consistent theories of Large Distance Modifications of Gravity (LDMG), which represent a generalization of massive gravity models. The interest for these theories was also revived by the appearance of the first examples of LDMG, such as the Dvali-Gabadadze-Porrati (DGP) model, which involves a certain type of brane in one extra dimension. Unfortunately, though, this model cannot explain the AE of the Universe in a consistent way.

One of the goals of this project has been to establish both the internal and the phenomenological consistency of the LDMG. From the phenomenological viewpoint, we have focussed on the most relevant question in practice: finding observational signatures that allow to distinguish between LDMG and DE. On the theoretical side, we have also studied the meaning of the instabilities of the DGP model.

Resum en anglès (màxim 300 paraules) – continuació -.

The other main goal was to construct new examples of LDMG theories. In the second half of the project, we built and showed the consistency of the "Cascading DGP" model, which extends the DGP model to more extra dimensions, and which represents the second known consistent, Lorent-invariant LDMG model in flat space. The existence of other LDMG models beyond DGP is of great interest since it may allow to obtain the AE of the Universe in a purely geometrical way.

2.- Memòria del treball (informe científic sense limitació de paraules). Pot incloure altres fitxers de qualsevol mena, no més grans de 10 MB cadascun d'ells.

Veure document adjunt

Agència
de Gestió d'Ajuts
Universitaris
i de Recerca

L'AGAUR inclourà a RECERCAT la memòria justificativa en versió digital. Per aquest motiu, us demanem el vostre consentiment per introduir a RECERCAT el contingut científic de la vostra justificació de recerca. Si esteu d'acord amb aquesta proposta, cal que llegiu la **llicència Creative Commons** i ens envieu el document que us adjuntem imprès, omplert i signat a:

Programa de documentació científica
Agència de Gestió d'Ajuts Universitaris i de Recerca
Via Laietana, 28 2na planta
08003 Barcelona

RECERCAT

Les persones sotasignants en qualitat de beneficiàries i/o responsables de l'ajut de l'Agència de Gestió d'Ajuts Universitaris i de Recerca (AGAUR), amb núm d'expedient 2005 BP-A 1013, manifesten el seu consentiment exprés per tal que la justificació presentada en el marc de l'esmentat ajut sigui introduïda al dipòsit digital RECERCAT del Consorci de Biblioteques Universitàries de Catalunya, d'acord amb els termes especificats a la llicència Creative Commons de Reconeixement-No-Comercial-SenseObra Derivada.

Aquesta llicència estableix que es permet copiar, distribuir i comunicar públicament l'obra sempre que se'n citi l'autor original i la institució que l'empara i no se'n faci cap ús amb finalitats comercials ni obra derivada. Per obra derivada s'entén aquell document que ha estat editat, traduït, combinat amb materials de tercers, canviat de format, o modificat de qualsevol altra forma.

☒ Sí, estic d'acord amb el text anterior.
☐ No, no estic d'acord.

Barcelona, 22 de desembre de 2008

Nom i cognoms i signatura
del/de la investigador/a

Vistiplau del/ de la responsable de la sol·licitud

Aquelles persones o institucions que ho requereixin, amb una adequada argumentació, podran sol·licitar, si escau, un retràs màxim de dos anys per introduir la memòria justificativa a Recercat.

Memòria Justificativa

Programa Beatriu de Pinós

Títol del projecte: Expansió Accelerada de l'Univers i teories de Gravetat Modificades a Grans Escales

Número d'expedient: 2005 BP-A 10131

Període d'execució: 25/05/2006 – 24/05/2008

Sumari

Una de les observacions de més impacte en la cosmologia moderna ha estat la determinació empírica que l'Univers es troba actualment en una fase d'Expansió Accelerada (EA). Aquest fenòmen implica que o bé l'Univers està dominat per un nou sector de matèria/energia, o bé la Relativitat General deixa de tenir validesa a escales cosmològiques. La primera possibilitat comprèn els models d'Energia Fosca (EF), i el seu principal problema és que l'EF ha de tenir propietats tan especials que es fan difcils de justificar teòricament.

La segona possibilitat requereix la construcci de teories consistents de Gravetat Modificada a Grans Distncies (GMGD), que són una generalització dels models de gravetat massiva. L'interès fenomenològic per aquestes teories també va resorgir amb l'aparició dels primers exemples de models de GMGD, com ara el model de Dvali, Gabadadze i Porrati (DGP), que consisteix en un tipus de brana en una dimensió extra. Malauradament, però, aquest model no permet explicar de forma consistent l'EA de l'Univers.

Un dels objectius d'aquest projecte ha estat establir la viabilitat interna i fenomenològica dels models de GMGD. Des del punt de vista fenomenològic, ens hem centrat en la questió més important a la pràctica: trobar signatures observacionals que permetin distingir els models de GMGD dels d'EF. A nivell més teòric, també hem investigat el significat de les inestabilitats del model DGP.

L'altre gran objectiu que ens vam proposar va ser la construcció de noves teories de GMGD. En la segona part d'aquest projecte, hem elaborat i mostrat la consistència del model"DGP en Cascada", que generalitza el model DGP a més dimensions extra, i representa el segon model consistent i invariant-Lorentz a l'espai pla conegut. L'existència d'altres models de GMGD més enllà de DGP és de gran interès atès que podria permetre obtenir l'EA de l'Univers de forma purament geomètrica.

Els resultats d'aquesta recerca han donat lloc a vuit publicacions [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8] en revistes arbitrades d'alt impacte en col·laboració amb experts mundials en el tema, i els he presentat en nombrosos seminaris a universitats i congressos internacionals.

1 Introducció

Una de les observacions cosmològiques de més impacte en la cosmologia moderna ha estat la determinació mitjançant Super-Noves de tipus IA [9] (confirmada posteriorment per nombrosos altres experiments) que l'Univers es troba actualment en una fase d'expansió accelerada. Les diverses propostes per explicar aquest fenomen es poden classificar en dos grans grups: els models d'Energia Fosca (EF) i els de modificacions de gravetat. Els models del primer tipus introdueixen alguna nova forma de matèria (típicament un camp escalar), i el seu principal inconvenient és que l'origen d'aquests nous graus de llibertat i la seva dinàmica no està ben entesos.

Les teories de Gravetat Modificada a Grans Distàncies (GMGD) proporcionen una explicació alternativa i simple d'aquest fenomen, i darrerament estan rebent una gran atenció. La idea és que l'expansió accelerada de l'univers (EAU) pot ser la primera indicació que la Relativitat General (RG) deixi de tenir validesa a grans distàncies. Així, enlloc d'afegir nous ingredients, el que s'intenta és modificar la dinàmica interna de la gravetat de forma que pugui acomodar l'EAU. Naturalment, les modificacions del sector gravitatori que es manifesten a distàncies grans són en realitat teories de gravetat massiva. És per això que aquest tipus de teories estan molt restringides, en contrast amb models d'Energia Fosca. Això és degut a què els gravitons massius propaguen polaritzacions addicionals. Com expliquem més avall, a part de la dificultat en obtenir una teoria no-lineal internament consistent, un dels reptes que plantegen aquestes teories és entendre com es desacoblen les polaritzacions addicionals de forma que la teoria no quedi descartada pels tests astronòmics de gravetat.

El model de GMGD més ben entès és el de Dvali Gabadadze i Porrati (DGP) [10], que consisteix en un cert tipus de brana (de 3+1 dimensions) submergida en un espai-temps de cinc dimensions no-compactes. La característica més important és que a distàncies curtes la gravetat manifesta l'habitual dinàmica quadri-dimensional, mentre que a distàncies majors que una certa escala crítica passa a ser cinc-dimensional. Deffayet [11] va mostrar que el model sempre presenta dues solucions, i que en l'anomenada 'branca auto-accelerada' l'univers eventualment passa a expandir-se acceleradament sense necessitat d'introduir la constant cosmològica o cap forma d'energia fosca. Cal emfatitzar l'extraordinari interès d'aquesta solució, ja que en aquesta branca l'EAU és un fenomen purament geometro-dinàmic. És important, doncs, determinar totes les propietats del model DGP en la branca auto-accelerada.

En [12, 13], s'argumentava que aquesta solució és inestable ja que conté excitacions 'fantasma', és a dir modes d'energia negativa. Des de llavors, diversos grups van analitzar aquest punt [14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 2], i el consens general és que aquesta solució realment té fantasmes. Part del debat recent sobre aquesta qüestió s'ha centrat en les implicacions físiques de la inestabilitat 'fantasma' [4, 22, 23]. Si la teoria subjacent fós invariant Lorentz, aleshores el buit decauria desastrosament, a un ritme infinit. Però si no ho fós, aleshores aquest decaïment seria finit, però implicaria desviacions de la Llei de Newton a petites distàncies [24].

Més enllà de les patologies de la branca auto-accelerada del model DGP (certament la més interessant fenomenològicament), la 'branca normal' d'aquest model representa el primer exemple explícit de GMGD consistent, i com a tal ha marcat tota una fita per la comprensió teòrica d'aquest tipus de teories. En particular, aquest és el primer model conegut en què el gravitó és massiu (en realitat és una ressonància, però l'important és que no té massa nul·la) i no només no presenta inestabilitats fantasmes (tant a nivell lineal com no-lineal), sinó que a més no està descartat observacionalment! Hem d'emfatitzar que mantenir totes aquestes propietats és altament no-trivial i que arribar a entendre com es poden compatibilitzar ha comportat un considerable esforç teòric i observacional. Fruit d'aquest esforç, s'ha entès que un mecanisme molt semblant [25] al proposat per Vainshtein [26] és el que permet que la teoria passi els tests a nivell del sistema Solar. A petites distàncies, la polarització addicional d'helicitat 0 està fortament acoblada i les interaccions són tals que aquest mode queda suprimit. Així, és la peculiar estructura no-lineal del model DGP el que té cura de la discontinuïtat de van Dam-Veltman-Sakharov (vDVZ) [27] i alhora evita els fantasmes de Boulware-Deser [28] a ordre no-lineal. És possible que aquest tipus de mecanisme sigui genèric en les modificacions de gravetat consistents. Una de les eines més importants que han permès entendre aquest mecanisme en detall és l'anomenat 'límit de desacoblament' del model [12, 13], que consisteix en mantenir les auto-interaccions més importants (en la polarització d'helicitat 0) i negligir les del sector de helicitat-2, molt més febles. En aquest límit, vàlid precisament a distàncies petites,

el model es redueix a una teoria escalar-tensor amb certes no-linealitats per l'escalar, i totes les qüestions enumerades més amunt (presència de fantasmes, resolució de la discontinuïtat de vDVZ, etc) es poden analitzar fàcilment. D'altra banda, les solucions exactes del model que vaig obtenir durant el primer any del projecte [2, 4] han consolidat l'existència de l'efecte Vainshtein.

Un altre dels desenvolupaments recents pel que fa a la recerca d'altres models consistents de GMGD va ser la classificació obtinguda en [29], on es va mostrar que a ordre lineal tots els models de GMGD corresponen a teories on el gravitó o bé és massiu o bé és una ressonància, i es poden caracteritzar amb un índex α comprès entre 0 i 1. Per exemple, el model de DGP en 5 dimensions correspon a $\alpha = 1/2$, i els models de tipus DGP en més dimensions a $\alpha = 0$. Així mateix, tots els models amb $\alpha > 1/2$ estan descartats observacionalment pels experiments de monitorització de l'òrbita lunar. Això planteja la interessant pregunta de si és possible construir models consistents corresponents al rang $0 < \alpha < 1/2$. Com explico més endavant, el resultat més destacable d'aquest projecte ha estat la construcció d'una família de models geomètrics que generalitzen DGP a més dimensions extra, que vam anomenar *DGP en cascada* [5, 7], i representen el segon exemple conegut de GMGD consistent invariant Lorentz a l'espai pla.

Una de les conseqüències més interessants d'aquestes generalitzacions passa per la possible resolució del problema de la constant cosmològica mitjançant el que s'anomena 'degravitació' [30], que consisteix en què enlloc d'explicar per què la constant cosmològica és tant petita, en explicar per què gravita tan poc. En [31], es mostra que les teories compreses en el rang $0 < \alpha < 1/2$ poden *degravitar* la constant cosmològica, de forma que aquest paràmetre passa a ser irrellevent i a la pràctica el problema es transforma en explicar per què avui observem que l'univers s'expandeix acceleradament.

Finalment, entre l'activitat recent a nivell observacional hem de destacar els esforços per discriminar entre els models d'EF i GMGD [34, 35, 36, 37, 38, 39, 40], que passen per analitzar la formació d'estructura i en combinar les múltiples sondes cosmològiques (radiació de fons de microones, catàlegs de galàxies, lensing feble, supernoves, clusters de galàxies, etc); els darrers límits observacionals sobre la branca auto-accelerada de DGP [41, 42, 38, 43, 44, 37, 45], que tendeixen a confirmar que sembla estar en conficte amb les dades observacionals; i els tests a distàncies molt curtes que podrien posar de manifest certs tipus de modificacions a grans distàncies [2, 3]. També hem de mencionar els resultats recents de [46] que suggereixen que la tensió entre la branca auto-accelerada de DGP amb els fits observacionals són conseqüència de la inestabilitat fantasma, i que els models consistents podrien explicar una sèrie d'anomalies presents en la formació d'estructura.

2 Pla de treball

L'objectiu d'aquest projecte ha estat establir la viabilitat teòrica i fenomenològica de les teories de GMGD, així com la construcció de nous models consistents.

En la primera meitat del projecte vaig adreçar diversos aspectes de la consistència interna del model DGP (com els efectes quàntics poden explicar una escala de modificaió molt gran [1]; un estudi no-pertorbatiu de la inestabilitat fantasma de la branca auto-accelerada de DGP [2]; i el significat físic d'aquesta inestabilitat [4]), i vaig analitzar dues característiques de les teories de GMGD que permeten distingir-les observacionalment dels models d'Energia Fosca (el camp gravitatori generat per objectes extesos [2]; i la relaxació dels límits sobre la possible violació d'invariància Lorentz [3]).

La segona meitat del projecte ha estat dedicada a la construcció i comprensió de nous models de GMGD (en [5] vaig construir el model *DGP en cascada*, i en [7] explico com aquest model demostra que la gravetat massiva no té perè tenir l'estructura tensorial de Pauli-Fierz), i a l'estudi del model de gravetat massiva de Karch-Randall així com els el seu dual hologràfic (en [6] vaig fer un estudi previ de la dualitat holografica en el model de Randall Sundrum, i en [8] he estudiat unes solucions exactes en el model de Karch-Randall que demostren la seva interpretació com a teoria de gravetat massiva).

2.1 Articles publicats

[1] O Pujolas, "Quantum fluctuations in the DGP model and the size of the cross-over scale," *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics* **0610**, 004 (2006) [arXiv:hep-th/0605257].

[2] G Dvali, G Gabadadze, O Pujolas, R Rahman, "Domain walls as probes of gravity," *Physical Review* D**75**, 124013, 2007 [arXiv:hep-th/0612016].

[3] G Dvali, O Pujolas, M Redi, "Consistent Lorentz violation in flat and curved space," *Physical Review* D**76**, 044028, 2007 [arXiv:hep-th/0702117].

[4] K Izumi, K Koyama, O Pujolas, T Tanaka, "Bubbles in the Self-Accelerating Universe", *Physical Review* D**76**, 104041, 2007 [arXiv:0706.1980].

[5] C de Rham, G Dvali, S Hofmann, J Khoury, O Pujolas, M Redi, AJ Tolley, "Cascading gravity: Extending the Dvali-Gabadadze-Porrati model to higher dimension", *Physical Review Letters* **100**, 251603, 2008 [arXiv:0711.2072].

[6] L Grisa, O Pujolas, "Dressed Domain Walls and Holography", *Journal of High Energy Physics* **0806**, 059, 2008 [arXiv:0712.2786].

[7] G Dvali, O Pujolas, M Redi, "Non Pauli-Fierz Massive Gravitons", *Physical Review Letters* **101**, 171303, 2008 [arXiv:0806.3762].

[8] O Pujolas, "Strongly Coupled Radiation from Moving Mirrors and Holography in the Karch-Randall model", *Journal of High Energy Physics* **0812**, 057, 2008 [ArXiv:0809.0005].

2.2 Descripció detallada dels articles publicats

[1] Efectes quàntics en DGP

Vaig comencar el primer any d'aquest projecte per l'estudi de les fluctuacions quàntiques en el model de DGP, que va donar lloc l'article [1]. El model de DGP dona lloc a unes condicions de frontera a la brana molt peculiars que des del punt de vista matemàtic representen un problema molt menys estudiat que el que sorgeix en altres models de branes. En [1] vaig considerar la situació més senzilla d'interès per la cosmologia actual, és a dir quan la brana infla i el bulk és pla, que té l'avantatge que les fluctuacions quàntiques es poden calcular explícitament. Així, vaig poder mostrar que no aparèixen divergències en el valor esperat del tensor d'energia moment, $\langle T_{\mu\nu} \rangle$ en el bulk.

A més, el resultat proporciona un mecanisme per generar un valor naturalment gran per l'escala crítica del model, r_c, que per no contradir les observacions ha de ser molt gran, de l'ordre del radi de Hubble actual. Tal com vaig calcular en [1], els efectes quàntics produeixen un potencial efectiu amb un mínim per r_c a un valor exponencialment gran. Aquest càlcul ha estat confirmat posteriorment en [49]. En el mateix article [1], vaig argumentar que aquest mecanisme no funciona en una situació més realista on la brana s'expandeixi. El motiu és que el potencial efectiu és un efecte quàntic i per tant és petit en comparació amb possibles termes clàssics. En el cas que la brana és plana, els termes clàssics són zero i el potencial a 1-loop és rellevant. Però en el cas corbat, els termes clàssics dominen i no generen un valor gran per r_c.

[2] Parets de domini com a tests de gravetat

En col·laboració amb G Dvali, G Gabadadze i R Rahman (NYU). En aquest treball, vàrem construir solucions exactes del model DGP, corresponents a parets de domini localitzades sobre la brana. Aquestes són, fins avui, les úniques solucions exactes conegudes del model DGP a banda de les cosmològiques. Donat que aquesta teoria és altament no-lineal, aquestes solucions van aportar informació molt valuosa sobre la dinàmica de la gravitació en aquest model. En particular, vam poder confirmar alguns dels trets de la solució corresponent a una partícula puntual localitzada a la brana de [50]. Aquesta és una solució que ha generat força controvèrsia ja que és exacta però només es coneix sobre la brana, i per tant no se sap si la continuació en el bulk és regular, cosa que qüestiona la seva validesa. Moltes de les propietats de les solucions de paret de domini són molt semblants a les de la partícula puntual. La magnitud de l'apantallament de les nocions de tensió quadri-dimensional i cinc-dimensional són pràcticament idèntiques a l'apantallament de la massa en [50]. Això sembla donar més credibilitat a [50], i suggereix un patró comú a qualsevol tipus de font.

Una altra conseqüència d'aquest treball té a veure amb la solució auto-accelerada [11]. Com he dit abans, el consens general és que aquesta branca té fantasmes. No obstant, les anàlisis de [12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 20, 21] són pertorbatives, mentre que la solució auto-accelerada es troba en un règim d'acoblament fort. Per tant, no acaba d'estar clar si a nivell no-pertorbatiu els fantasmes persisteixen [29, 19]. Com que les solucions de [2] són exactes, contenen informació del comportament de la branca auto-accelerada a nivell no-pertorbatiu. El que vam trobar és que en aquesta branca, una paret de tensió positiva produeix un angle de dèficit negatiu, és a dir es comporta com un objecte d'energia negativa. Això indica que realment hi ha una patologia en aquesta branca, i pot representar una manifestació no-pertorbativa que realment la branca auto-accelerada és inestable.

L'altre aspecte molt important de les paret de domini en DGP és que la mètrica que produeixen difereixen totalment de la que s'obtindria en gravetat ordinària. En la Relativitat General, una paret de domini produeix una força repolsiva. En DGP, en canvi, no produeixen cap mena de forca (sempre que la tensió sigui menor que un cert valor crític). L'efecte gravitatori queda totalment apantallat. Això és degut a què en DGP el gravitó és massiu, i com a tal propaga més polaritzacions que un gravitó sense massa. Per una paret de domini, les polaritzacions addicionals cancel·len completament l'efecte que generen les polaritzacions habituals, i el resultat és que la forca neta es nulla. El més sorprenent és que això passa a qualsevol distància respecte de la paret, i en particular a tan a la vora com es vulgui, malgrat que l'escala de la modificació de gravetat (la longitud d'ona de Compton del gravitó) és de l'ordre del radi de Hubble! Aquest és, doncs, l'exemple més dramàtic que les teories de GMGD estan molt restringides, en el sentit que la modificació també té efectes a escales molt menors.

Les propietats d'aquestes solucions de paret de domini es poden fer extensives a altres models de gravetat modificada a grans escales. Això implica que en principi les parets de domini proporcionen un test ideal per determinar si la gravetat realment està modificada o no a grans distàncies. Evidentment, aquest no seria un test per fer en el laboratori perquè la paret hauria de ser molt gran. Un dels projectes pel futur consisteix en estudiar l'evolució cosmològica de les parets que s'hagin pogut produir en transicions de fase en l'univers primordial.

[3] Violació d'invariància Lorentz com a test de gravetat

En col·laboració amb G Dvali i M Redi (NYU). En aquest article, ens vam adonar que els límits observacionals a les violacions d'invariància Lorentz es poden relaxar molt significativament en models on la gravetat es modifica a grans distàncies. És per això que concloem que si es detecten efectes no-invariants Lorentz en el futur pròxim com per exemple a l'LHC seria una evidència indirecta de què realment la gravetat es comporta de forma molt diferent que en la Relativitat General a grans distàncies. Així doncs, els tests d'invariància Lorentz (IL) passen a ser automàticament tests de modificacions de gravetat a escales cosmològiques.

El nucli de l'argument rau en què en gravetat ordinària, els límits observacionals més restrictius de violacions de IL provenen precisament de la cosmologia. Per poder generar operadors no-IL que donin efectes observables per exemple als acceleradors de partícules, caldria acumular tanta densitat d'energia que seria incompatible amb l'evolució cosmològica que observem. En models de GMGD, això no passa perquès donen fenòmens d'apantallament. En [3], vam identificar dos classes de models on és possible tenir un trencament d'IL compatible amb què l'espai sigui exactament pla, i per tant el trencament d'IL no es transmet a la mètrica. Un primer tipus es pot etiquetar com 'condensació de camps taquiònics de spin elevat', i està estretament relacionat amb els models de condensació de fantasmes [53]. El problema d'aquests models és precisament que tenen fantasmes en la fase invariant Lorentz, i per tant només representen una teoria efectiva al voltant de la fase trencada.

L'altra classe de models està format per les teories de gravetat massiva (que inclouen el model DGP), en conjunció amb la presència de fonts homogènies que trenquin la IL. La idea és que l'efecte gravitatori de la font queda completament apantallat, perquè el gravitó és un camp massiu. En DGP, es coneixen algunes solucions exactes que presenten precisament aquest comportament, [54]. En aquestes solucions, la brana conté un fluïd cosmològic que trenca espontàniament la IL, però que no afecta la mètrica, i la geometria de la brana és plana. En [3], vam discutir aquestes solucions i vam generalitzar-les per a qualsevol tipus de fluïd. En general, la constant cosmològica i la curvatura de Weyl en el bulk no són nul·les. També vam investigar el mateix fenòmen quan l'espai és corbat però màximament simètric. En de Sitter, és possible apantallar un fluïd amb eqüació d'estat $w = -1/3$, però perquè la solucińo sigui singular, cal introduir energia negativa. En Anti-de Sitter, les solucions són sempre singulars. Per contra, en els models de condensació de fantasmes, no hi ha cap problema per obtenir solucions en (Anti-) de Sitter, cosa que mostra que realment són dos tipus de models ben diferents.

Més enllà dels detalls de cada model, el que està clar és que ambdós casos són exemples de models de GMGD, i que sembla que l'única manera de poder tenir trencament de IL compatible amb l'espai pla (o màximament simtric) és modificant la gravetat a grans escales. Aquest tipus d'informació és de gran valor ja que permetria discriminar els models de GMGD dels d'Energia Fosca si s'observessin efectes no-invariants Lorentz en els acceleradors de partícules en un futur proper. Això és particularment important si tenim en compte que molts models de GMGD i d'Energia Fosca prediuen una evolució cosmològica completament degenerades. Per tant, és crucial trobar tests com aquest que potencialment distingeixin entre els models.

[4] Decaïment de la branca auto-accelerada en DGP

En col·laboració amb Takahiro Tanaka, Keisuke Izumi (U Kyoto) i Kazuya Koyama (Portsmouth U). Motivats per l'acord entre els diversos grups sobre la presència de fantasmes en la branca auto-accelerada del model DGP, vam investigar el significat de la inestabilitat que això podria representar.

Concretament, vam estudiar si aquesta branca pot decaure a la branca normal(lliure de fantasmes) mitjançant el procés no-pertorbatiu de formació de bombolles. Els nostres resultats indiquen que aquest proceś no passa, a menys que es violi la condició d'energia nul·la, és a dir que s'introdueixi a mà un altre tipus de fantasma. Això suggereix que al capdavall potser la inestabilitat fantasma tampoc és tan seriosa. Cal destacar el càlcul pertorbatiu de [23], que també apunta en la mateixa direcció.

[5] DGP en Cascada

Aquest projecte és en col·laboració amb G Dvali, M Redi (NYU), C de Rham, J Khoury, S Hofmann i A Tolley (Perimeter Institute, Canada). La forma més senzilla d'obtenir altres teories de GMGD consisteix en extendre el model DGP a 2 o més dimensions extra. Malgrat que això es va intentar ben aviat [51, 52], tots els intents van topar amb dos grans problemes: el primer (i menor) probleme és que amb 2 o més dimensions extres les branes no es poden tractar com infinitament primes, i s'ha d'introduir d'una manera o altra la seva estructura microscòpica. En aquest projecte, ens vam adonar que hi ha una excepció a aquesta 'norma', quan les branes estan submergides en branes de tipus DGP de més dimensions. El problema més seriós, però, és que aquests models, un cop regularitzats tenen inestabilitats fantasma fins i tot en la branca normal.

El gran pas endavant que vam poder realitzar en aquest treball va ser adonar-nos que incorporant la tensió de la brana els fantasmes desapareixen de la teoria. Això va ser possible ja que aquest model admet un l'imit de desacoblament cinc-dimensional. L'important, però, és que vam obtenir un altre exemple de GMGD consistent amb un buit invariant Lorentz i assimptòticament pla, el segon que es coneix amb aquestes propietats, que òbviament són les rellevants fenomenològicament. Tot i que aquest model és força més complicat que el DGP en 5 dimensions, això obre tota una sèrie de qüestions, com ara si és possible obtenir una branca auto-accelerada sense fantasmes en aquest model. Malgrat que no disposo de resultats definitius (encara que tinc previst de publicar un article sobre aquest punt en el futur proper), em plau poder informar que investigacions preliminars indiquen que sí que és possible, cosa que representaria el primer exemple de model amb auto-acceleració consistent. Per tant, considero que el resultat d'aquesta investigació ha estat molt interessant i rellevant pel desenvolupament d'aquest camp d;investigació. Això també queda palès en el fet que aquest article (així com [7], que es basa en aquest resultat) es va publicar en *Physical Review Letters*, una revista del més alt prestigi internacional i no especialitzada en cosmologia ni física de partícules, i en l'elevat nombre de cites (20) recollides en un any des de la seva publicació.

El model DGP en cascada en 6 dimensions és interessant per un altre motius: és un model explícit on la idea de degravitació de la constant cosmològica [30, 31] es realitza. Això no obstant, no és possible degravitat una constant cosmològica prou gran com perquè sigui rellevant observacionalment en aquest sentit. La recerca més interessant en aquest model es concentra la cosmologia, i en particular en si manifesta auto-acceleració sense fantasmes.

Finalment, vull emfatitzar el paper crucial que juguen els termes de curvatura extrínseca en aquest model. De la mateixa manera que el model DGP aconsegueix ser una modificació de gravetat consistent a ordre no-lineal gràcies a la peculiar estructura de les no-linealitats, en el model de DGP en cascada els termes de curvatura extrinseca (que s'originen perquè la brana està localitzada en una altra de dimensió major) són el que permeten que la teoria sigui consistent quan s'inclou la tensió. Sense l'estructura de branes submergides les unes dins de les altres, les no-linealitats no permetrien la consistència ni incloent la tensió. Així, un cop més, és la peculiar estructura no-lineal de la teoria que la fa consistent.

[6] Parets de domini localitzades i holografia

Aquest article és en col·laboració amb Luca Grisa (NYU), i el vaig realitzar com a estudi previ a [8]. Una lleugera modificació del model de RS en què la geometria de la brana és Anti de Sitter enlloc de plana és el que es coneix com el model de Karch-Randall (KR) i consisteix en una teoria de gravetat massiva en Anti de Sitter. Tant el model RS com el KR són cinc-dimensionals però admeten una interpretació holografica en termes d'una teoria de camps conforme (CFT) fortament acoblada en quatre diemsnions, i feblement acoblada a gravetat. En aquest primer article [6], ens vam proposar entendre bé els detalls de la correspondència holografica estudiant les solucions donades per parets de

domini en el model de RS, que es poden obtenir exactament en les dues bandes de la correspondència. Per si sol, això ja és interessant per establir la validesa d'aquesta correspondencia en presència de la gravetat quadri-dimensional, que ha portat un considerable debat i és rellevant per l'evaporació de forats negres.

Un cop més, les parets de domini proporcionen un laboratori teòric idoni per estudiar els efectes gravitatoris. Una de les implicacions fenomenològiques és que contràriament als models de gravetat massiva, en RS l'efecte gravitatori de les parets de domini és major que en la relativitat general. Així doncs, les parets de domini permeten obtenir informació de com és la gravetat tant a petites com a curtes distàncies.

[7] Gravitons massius no-Pauli-Fierz

Aquest artícle, en col·laboració amb G Dvali (NYU i CERN) i M Redi (NYU i EPFL Lausanne), és una extensió de [5] on vam posar de manifest que el model DGP en cascada també trenca una de les preconcepcions erròniament establertes de les teories de gravetat massiva: que l'estructura tensorial a ordre lineal ha de ser la de Pauli-Fierz (PF). Efectivament, per un sol gravitó massiu, el terme de massa ha de tenir la forma PF per tal de no tenir fantasmes. Peró les teories de GMGD no necessàriament propaguen un sol gravitó massiu. Ben el contrari, els exemples consistents coneguts (DGP, DGP en cascada i Karch-Randall) es basen en la presència de dimensions extra, i per tant en un conjunt infinit de gravitons massius. Aquests casos es poden tractar de forma equivalent com una ressonància, i en general els termes de massa depenen del moment (és a dir, de l'escala).

En aquest treball vam 'refer' l'anàlisi de quan la teoria està lliure de fantasmes per el cas completament general d'un gravitó-ressonància. El que vam obtenir és que els termes de massa es poden desviar de la forma PF sempre i quan es compleixin certs criteris, com per exemple que a moments grans la desviació siqui petita (però no necessàriament zero). No només això, sinó que és possible veure que en general aquestes teories són en realitat models escalar-tensor. I això connecta amb els models de DGP en cascada, ja que en 2 o més dimensions extres els models sempre presenten modes escalars.

Aaquest és un artícle de 'síntesi', on vam poder articluar de forma transparent diverses qüestions que no estaven ben enteses anteriorment, i que va merèixer novamentn la publicació en *Physical Review Letters*.

[8] Gravetat massiva en Anti de Sitter i holografia

Aquest arícle és la continuació de [6], i de fet analitza el cas més interessant en què la teoria de gravetat és massiva, és a dir en el model de Karch Randall (KR). El dual hologràfic d'aquest model consisteix en una teoria conforme (CFT) en l'espai-temps Anti de Sitter (AdS) quadridimensional acoblada a gravetat. Escollint les condicions de contorn transparents a la vora de AdS, es pot veure que les correccions quàntiques de la CFT generen un terme de massa pel gravitó, de forma que en certa manera aquest model és l'anàleg gravitacional al model de Schwinger. En aquest treball vaig estudiar les solucions exactes generades per parets de domini i vaig veure com els efectes quàntics de la CFT distorsionen la mètrica produida per les parets de forma que produeixen un apantallament de la seva tensió, cosa que confirma la interpretació del model com una teoria de gravetat massiva.

Aquesta solució també és molt interessant pel que fa a la validesa de la interpretació hologràfica dels models de KR i RS, i per l'evaporació de forats negres en partícules fortament interactuants. El motiu és que la solució es pot trobar exactament en les dues bandes de la correspondència, i això dóna lloc a un test d'aquesta, que ha permès distingir detalls com la correspondència entre condicions de contorn en les dues bandes, i que l'inclusió de gravetat a primer ordre també està codificada en el dual cinc-dimensional. D'altra banda, aquest és un dels pocs exemples coneguts on és possible calcular explícitament la producció de partícules tant a acoblament fort com feble, i en permet la comparació. Els resultats mostren que la diferència entre la teoria fortament acoblada i la lliure és ben poca. Això suggereix que els forats negres (suficientment calents) s'haurien d'evaporar a ritmes comparables tant si els modes que emeten interactuen fortament com feblement.

2.3 Conferències

- "6th Northeast String Cosmology Meeting", December 9, 2005, ISCAP Columbia University, New York.
- "Axions", 20-22 Octubre 2006, Institute of Advanced Study, Princeton.
- "IR Modifications", November 18 - 21, 2006, Perimeter Institute, Canada.
- "High Energy, Cosmology and Strings", 11-15 December 2006, Institut Henri Poincaré , Paris.
- "9th Northeast String Cosmology Meeting", May 4th, 2007, ISCAP Columbia University, New York.
- "Origins of Dark Energy", 14-21 Maig 2007, Origins Institute i Perimeter Institute, Canada.
- "10th Northeast String Cosmology Meeting", Dec 7th, 2007, ISCAP Columbia University, New York.
- "Simons Workshop in Mathematics and Physics 2007", Stony Brook University, July 24 - August 5, 2007
- "7a Trobada de Nadal de Fsica Terica", Universitat de Barcelona, 19-20 de desembre de 2007.
- "Quantum black holes, braneworlds and holography", Valencia May 12-16 2008.
- Planck 2008, 19-23 May 2008, Barcelona (IFAE).
- "Workshop on Cosmological Frontiers in Fundamental Physics", APC Laboratory, Paris 7 University, 19-23 May 2008.
- "Black Holes: A Landscape of Theoretical Physics Problems", 1-5 Sep 2008, CERN.
- "Beyond Big Bang Princeton: Branes, Strings and Inflation", Princeton Center for Theoretical Science, 2-3 Oct 2008.
- "Paris-Stockholm Workshop on Consistent Infra-Red Modifications of Gravity", 24-28 Nov 2008, APC Laboratory, Paris 7 University.

2.4 Seminaris

- *Do mini Black Holes escape from the brane?*, October 31 2006, Case Western University, Cleveland.
- *Domain walls as probes of gravity.* November 21 2006, "IR Modifications", Perimeter Institute, Canada.
- *Domain walls as probes of gravity.* 11 December 2006, "High Energy, Cosmology and Strings", Institut Henri Poincare, Paris
- *Domain walls as probes of gravity.* 5 Febrer 2007, UC Davis.
- *Loerntz Violation and Domain walls in massive gravity.* 17 Abril 2007, Tufts Institute of Cosmology.
- *Consistent Loerntz Violation in flat and curved space*, in "Origins of Dark Energy", Perimeter Institute, Canada, 20 Maig 2007.
- *Cascading DGP* 7a trobada de nadal, Universitat de Barcelona, 19 de desembre de 2007..
- *Strongly coupled radiation from moving mirrors*, in "Quantum black holes, braneworlds and holography", Valencia May 15 2008.
- *Cascading Gravity* in Planck 2008, Barcelona, 19 Maig 2008.

- UC Davis, *Gravitational Particle production in Strongly coupled field theories* 12 Nov 2008
- *Classical and quantum screening in AdS gravity*, in "PS Workshop on Consistent Infra-Red Modifications of Gravity", 27 Nov 2008, APC Laboratory, Paris 7 University.
- *Black Hole(-graphic) evaporation*, UAB Barcelona, 11/12/2008.
- *Black Hole(-graphic) evaporation*, UB Barcelona, 12/12/2008.
- *Gravitational Particle Production in Strongly Coupled Field Theories*, in "XIV Christmas Workshop", IFT, Madrid 17/12/2008.

3 Conclusions

L'objectiu d'aquest projecte ha estat establir la viabilitat de les teories de modificacions de gravetat i la construcció de nous models consistents d'aquest tipus. Passats els dos anys de beca, em sembla que és just afirmar que els resultats obtinguts s'ajusten molt bé als objectius que em vaig marcar, i crec que han contribuït de manera molt positiva i fins i tot clau al debat internacional i al progrés d'aquest camp de recerca, un dels més actius en física teòrica i cosmologia. Sens dubte, el resultat més important ha estat la construcció del model DGP en cascada, que com he explicat, permet anar més enllà del model DGP i per tant manté viva l'esperança de trobar models que realitzin l'expansió accelerada sense inestabilitats fantasma. Pel que fa als altres articles, em sembla que en conjunt representen una aportació considerable al coneixement de les modificacions de gravetat, i han estat de crucial importància també per la obtenció del model DGP en cascada.

Tot aquest treball no solament m'ha servit per consolidar molts coneixements i establir col·laboracions amb altres investigadors de prestigi, especialment els membres del Center for Cosmology and Particle Physics, a New York University, sinó que m'ha permès publicar articles en pràcticament tots els aspectes rellevants pel que fa a les modificacions de gravetat. Finalment, aquests resultats científics també m'han servit per aconseguir una beca al prestigiós Centre Européen de Recherche Nucléaire (CERN), etapa que enfoco amb il·lusió i amb nombrosos i interessants projectes entre mans.

Per tot això, considero que aquesta beca ha estat molt profitosa, tant per mi com pels meus col·laboradors, per l'avanç del coneixement i per l'Agència de Gestió d'Ajuts i Universitaris i de Recerca, que va dipositar la seva confiança en mi i a la qual quedaré sempre molt agraït.

Oriol Pujolàs Boix
29 de Desembre del 2008

References

[1] O. Pujolas, "Quantum fluctuations in the DGP model and the size of the cross-over scale," JCAP **0610**, 004 (2006) [arXiv:hep-th/0605257].

[2] G. Dvali, G. Gabadadze, O. Pujolas and R. Rahman, "Domain walls as probes of gravity," Phys. Rev. D **75**, 124013 (2007) [arXiv:hep-th/0612016].

[3] G. Dvali, O. Pujolas and M. Redi, "Consistent Lorentz violation in flat and curved space," Phys. Rev. D **76**, 044028 (2007) [arXiv:hep-th/0702117].

[4] K. Izumi, K. Koyama, O. Pujolas and T. Tanaka, "Bubbles in the Self-Accelerating Universe," Phys. Rev. D **76**, 104041 (2007) [arXiv:0706.1980 [hep-th]].

[5] C. de Rham, G. Dvali, S. Hofmann, J. Khoury, O. Pujolas, M. Redi and A. J. Tolley, "Cascading gravity: Extending the Dvali-Gabadadze-Porrati model to higher dimension," Phys. Rev. Lett. **100**, 251603 (2008) [arXiv:0711.2072 [hep-th]].

[6] L. Grisa and O. Pujolas, "Dressed Domain Walls and Holography," JHEP **0806**, 059 (2008) [arXiv:0712.2786 [hep-th]].

[7] G. Dvali, O. Pujolas and M. Redi, "Non Pauli-Fierz Massive Gravitons," Phys. Rev. Lett. **101**, 171303 (2008) [arXiv:0806.3762 [hep-th]].

[8] O. Pujolas, "Strongly Coupled Radiation from Moving Mirrors and Holography in the Karch-Randall model," JHEP **0812**, 057 (2008) [ArXiv:0809.0005 [hep-th]].

[9] S. Perlmutter *et al.* [Supernova Cosmology Project Collaboration], Astrophys. J. **517**, 565 (1999) [arXiv:astro-ph/9812133];
A. G. Riess *et al.* [Supernova Search Team Collaboration], Astron. J. **116**, 1009 (1998) [arXiv:astro-ph/9805201].

[10] G. R. Dvali, G. Gabadadze and M. Porrati, Phys. Lett. B **484**, 112 (2000) [arXiv:hep-th/0002190].

[11] C. Deffayet, Phys. Lett. B **502**, 199 (2001) [arXiv:hep-th/0010186].

[12] M. A. Luty, M. Porrati and R. Rattazzi, JHEP **0309**, 029 (2003) [arXiv:hep-th/0303116].

[13] A. Nicolis and R. Rattazzi, JHEP **0406**, 059 (2004) [arXiv:hep-th/0404159].

[14] M. A. Luty, M. Porrati and R. Rattazzi, JHEP **0309** (2003) 029 [arXiv:hep-th/0303116];

[15] A. Nicolis and R. Rattazzi, JHEP **0406** (2004) 059 [arXiv:hep-th/0404159];

[16] K. Koyama and K. Koyama, Phys. Rev. D **72** (2005) 043511 [arXiv:hep-th/0501232]; K. Koyama, Phys. Rev. D **72** (2005) 123511 [arXiv:hep-th/0503191].

[17] D. Gorbunov, K. Koyama and S. Sibiryakov, Phys. Rev. D **73** (2006) 044016 [arXiv:hep-th/0512097].

[18] C. Charmousis, R. Gregory, N. Kaloper and A. Padilla, JHEP **0610** (2006) 066 [arXiv:hep-th/0604086].

[19] C. Deffayet, G. Gabadadze and A. Iglesias, JCAP **0608**, 012 (2006) [arXiv:hep-th/0607099].

[20] M. Carena, J. Lykken, M. Park and J. Santiago, Phys. Rev. D **75**, 026009 (2007) [arXiv:hep-th/0611157].

[21] K. Izumi, K. Koyama and T. Tanaka, arXiv:hep-th/0610282.

[22] K. Izumi and T. Tanaka, arXiv:0709.0199 [gr-qc].

[23] K. Izumi and T. Tanaka, arXiv:0810.4811 [hep-th].

[24] D. E. Kaplan and R. Sundrum, JHEP **0607**, 042 (2006) [arXiv:hep-th/0505265].

[25] C. Deffayet, G. R. Dvali, G. Gabadadze and A. I. Vainshtein, Phys. Rev. D **65**, 044026 (2002) [arXiv:hep-th/0106001].

[26] A. I. Vainshtein, Phys. Lett. B **39** (1972) 393.

[27] H. van Dam and M. J. G. Veltman, Nucl. Phys. B **22**, 397 (1970);
V. I. Zakharov, JETP Lett. **12** (1970) 312 [Pisma Zh. Eksp. Teor. Fiz. **12** (1970) 447].

[28] D. G. Boulware and S. Deser, Phys. Rev. D **6**, 3368 (1972).

[29] G. Dvali, New J. Phys. **8**, 326 (2006) [arXiv:hep-th/0610013].

[30] N. Arkani-Hamed, S. Dimopoulos, G. Dvali and G. Gabadadze, arXiv:hep-th/0209227.

[31] G. Dvali, S. Hofmann and J. Khoury, Phys. Rev. D **76**, 084006 (2007) [arXiv:hep-th/0703027].

[32] N. Kaloper, Phys. Lett. B **652**, 92 (2007) [arXiv:hep-th/0702206].

[33] N. Kaloper and D. Kiley, JHEP **0705**, 045 (2007) [arXiv:hep-th/0703190].

[34] E. J. Copeland, M. Sami and S. Tsujikawa, Int. J. Mod. Phys. D **15**, 1753 (2006) [arXiv:hep-th/0603057].

[35] R. Durrer and R. Maartens, arXiv:0811.4132 [astro-ph].

[36] Y. S. Song and K. Koyama, arXiv:0802.3897 [astro-ph].

[37] S. Wang, L. Hui, M. May and Z. Haiman, Phys. Rev. D **76**, 063503 (2007) [arXiv:0705.0165 [astro-ph]].

[38] S. A. Thomas, F. B. Abdalla and J. Weller, arXiv:0810.4863 [astro-ph].

[39] W. Hu and I. Sawicki, Phys. Rev. D **76**, 104043 (2007) [arXiv:0708.1190 [astro-ph]].

[40] Y. S. Song, W. Hu and I. Sawicki, Phys. Rev. D **75**, 044004 (2007) [arXiv:astro-ph/0610532].

[41] Y. S. Song, I. Sawicki and W. Hu, Phys. Rev. D **75**, 064003 (2007) [arXiv:astro-ph/0606286].

[42] K. Koyama and F. P. Silva, arXiv:hep-th/0702169.

[43] W. Fang, S. Wang, W. Hu, Z. Haiman, L. Hui and M. May, Phys. Rev. D **78**, 103509 (2008) [arXiv:0808.2208 [astro-ph]].

[44] A. Cardoso, K. Koyama, S. S. Seahra and F. P. Silva, Phys. Rev. D **77**, 083512 (2008) [arXiv:0711.2563 [astro-ph]].

[45] M. S. Movahed, M. Farhang and S. Rahvar, arXiv:astro-ph/0701339.

[46] N. Afshordi, G. Geshnizjani and J. Khoury, arXiv:0812.2244 [astro-ph].

[47] O. Pujolas and T. Tanaka, JCAP **0412**, 009 (2004) [arXiv:gr-qc/0407085].

[48] O. Pujolas and M. Sasaki, JCAP **0509**, 002 (2005) [arXiv:hep-th/0507239].

[49] A. O. Barvinsky, A. Y. Kamenshchik, C. Kiefer and D. V. Nesterov, Phys. Rev. D **75**, 044010 (2007) [arXiv:hep-th/0611326].

[50] G. Gabadadze and A. Iglesias, Phys. Rev. D **72**, 084024 (2005) [arXiv:hep-th/0407049]; Phys. Lett. B **632**, 617 (2006) [arXiv:hep-th/0508201].

[51] G. R. Dvali and G. Gabadadze, Phys. Rev. D **63**, 065007 (2001) [arXiv:hep-th/0008054].

[52] S. L. Dubovsky and V. A. Rubakov, Phys. Rev. D **67**, 104014 (2003) [arXiv:hep-th/0212222].

[53] N. Arkani-Hamed, H. C. Cheng, M. A. Luty and S. Mukohyama, JHEP **0405**, 074 (2004) [arXiv:hep-th/0312099];
H. C. Cheng, M. A. Luty, S. Mukohyama and J. Thaler, JHEP **0605**, 076 (2006) [arXiv:hep-th/0603010].

[54] C. Deffayet, G. R. Dvali, G. Gabadadze and A. Lue, Phys. Rev. D **64**, 104002 (2001) [arXiv:hep-th/0104201].