

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/336312376>

# Gravedad Modificada: El zoológico de modelos cosmológicos

Poster · October 2019

DOI: 10.13140/RG.2.2.22803.02081

CITATIONS

0

READS

88

4 authors:



**Amanda Fajardo**

Autonomous University of Nuevo León

5 PUBLICATIONS 0 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



**Alejandro García**

Autonomous University of Nuevo León

9 PUBLICATIONS 0 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



**Jaime Román-Garza**

University of Geneva

18 PUBLICATIONS 32 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



**César Duarte-Ortiz**

Autonomous University of Nuevo León

8 PUBLICATIONS 0 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)

Some of the authors of this publication are also working on these related projects:



Modified Gravity - undergrads 2019 [View project](#)



Introduction to Numerical Relativity [View project](#)



# Gravedad Modificada: El zoológico de modelos cosmológicos.

Amanda Fajardo<sup>1</sup>; Alejandro Garcia Torres<sup>1</sup> Jaime Román-Garza<sup>2</sup>; César Duarte-Ortiz<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Facultad de Ciencias Físico Matemáticas, Universidad Autónoma de Nuevo León, México;

<sup>2</sup>Faculté des Sciences, Université de Genève, Suiza.

amandafajardo.gr@uanl.edu.mx

alejandro.garciats@uanl.edu.mx

## Resumen

En este trabajo presentamos algunas vías para modificar las ecuaciones de campo de Einstein con el objetivo de modelar la expansión acelerada del Universo en la actualidad. Considerando la formulación geométrica y variacional de la relatividad general se exploran las vías de modificación a esta teoría y las consecuencias en la evolución dinámica del Universo. Por último presentamos las constricciones que las observaciones de GW170817 han impuesto a las teorías de gravedad modificada.

## Introducción

Las ecuaciones de campo de Einstein son obtenibles mediante el principio variacional, a partir de la llamada *acción de Einstein-Hilbert* definida como:

$$S = \frac{1}{2\kappa} \int \left( g^{\alpha\beta} R_{\alpha\beta} + 2\Lambda + 2\kappa\mathcal{L} \right) \sqrt{-|g|} \, d^4x \tag{1}$$

Con constante cosmológica  $\Lambda$ , al hacer la variación con respecto a la métrica contravariante llegamos a las ecuaciones de campo de Einstein

$$R^{\mu\nu} - \frac{1}{2}g^{\mu\nu}(R + 2\Lambda) = \kappa T^{\mu\nu} \tag{2}$$

Donde el tensor de energía-momento es:

$$T^{\mu\nu} = 2\frac{\delta\mathcal{L}}{\delta g_{\mu\nu}} - g^{\mu\nu}\mathcal{L} \tag{3}$$

A partir del lagrangiano del contenido de materia-energía del universo podemos considerarlo como un fluido perfecto.

$$(T^{\mu\nu}) = diag(\rho, P, P, P) \tag{4}$$

y donde su ecuación de estado es

$$w = \frac{P}{\rho} \tag{5}$$

Observamos que la acción se puede dividir en dos partes: geométrica (Donde está el tensor de Riemann) y material (Referente al lagrangiano de la materia), de esta forma se dividen las dos teorías. Las teorías que modifican la parte geométrica se clasifican como *gravedad modificada*. Si se modifica la el contenido de materia-energía, i.e. la densidad lagrangiana  $\mathcal{L}$ , estas teorías se clasifican de *energía oscura*.

En este trabajo se estarán presentando las teorías de energía oscura con campos escalares como propuesta para modelarla.

## Quintaesencia

Uno de los modelos de energía oscura más populares de la actualidad es el modelo de *quintaesencia* el cual se obtiene si proponemos para la energía oscura un campo escalar con una densidad lagrangiana dotada de una signatura  $(-,+,+,+)$

$$\mathcal{L}_\phi = -\frac{1}{2}\partial^\gamma\phi\partial_\gamma\phi - V(\phi) \tag{6}$$

Donde la letra griega  $\phi$  representa el campo escalar la cual podemos introducir y variar en la acción de Einstein-Hilbert

$$\delta S = -\frac{1}{2\kappa} \int d^4x \delta g_{\mu\nu} \left( R + 2\kappa \left[ -\frac{1}{2}\partial^\gamma\phi\partial_\gamma\phi - V(\phi) \right] + 2\kappa\mathcal{L} \right) \sqrt{-|g|} \tag{7}$$

Una vez hecha la variación podemos sustituir términos en el tensor energía-momento de la ecuación (3)

$$T^{\mu\nu} = \partial^\mu\phi\partial^\nu\phi - \left[ \frac{1}{2}\partial^\gamma\phi\partial_\gamma\phi - V(\phi) \right] g^{\mu\nu} \tag{8}$$

si consideramos un campo escalar en función del tiempo podemos obtener la ecuación de estado correspondiente al modelo de *quintaesencia*:

$$w_\phi = \frac{\dot{\phi}^2 - 2V(\phi)}{\dot{\phi}^2 + 2V(\phi)} \tag{9}$$

si hacemos a  $\dot{\phi}$  tender a cero,  $w(z)$  tiende a -1, en cambio si  $V(\phi)$  tiende a cero,  $w(z)$  llegaría a un valor máximo de +1, por lo que concluimos que para la *quintaesencia* los valores que puede tomar la ecuación de estado son:

$$-1 \leq w \leq 1 \tag{10}$$

## Campo de energía fantasma

Las antigua observaciones de SNe Ia , WMAP , SDSS y Chandra X-ray Observatory no excluyen de que halla un modelo que describa a la naturaleza de la energía oscura de la siguiente manera: Consideremos una densidad lagrangiana de tal forma que esta misma posea una energía cinética negativa

$$\mathcal{L}_\sigma = \frac{1}{2}(\nabla\sigma)^2 - V(\sigma) \tag{11}$$

en la cual hemos empleado la misma signatura que en el modelo de *quintaesencia*  $(-,+,+,+)$ . Donde  $(\nabla\sigma)^2 = \partial^\gamma\sigma\partial_\gamma\sigma$ .

Esta ecuación puede ser introducida a la acción de Einstein-Hilbert. Al aplicar el principio de mínima acción obtenemos:

$$\delta S = -\frac{1}{2\kappa} \int d^4x \delta g_{\mu\nu} \left( R + 2\kappa \left[ \frac{1}{2}(\nabla\sigma)^2 - V(\sigma) \right] + 2\kappa\mathcal{L} \right) \sqrt{-|g|} \tag{12}$$

Realizando la variación y sustituyendo términos en el tensor de energía-momento podemos obtener valores para la densidad de energía y la presión dada la ecuación (4)

$$w_\sigma = \frac{\dot{\sigma}^2 + 2V(\sigma)}{\dot{\sigma}^2 - 2V(\sigma)} \tag{13}$$

De tal manera que el dominio de la ecuación se encuentra en  $\omega_\sigma < -1$  para  $\dot{\sigma}/2 < V(\sigma)$ . Este modelo es llamado *modelo de energía fantasma*.

## Campo energía oscura Quintom

El modelo *Quintom* es un modelo relativamente reciente que data del año 2004 y consiste en los siguiente: consideremos un campo de energía cinética negativa  $\sigma$  y un campo de energía cinética normal  $\phi$  tal que la densidad lagragiana quede expresada de la siguiente manera

$$\mathcal{L}_{\sigma\phi} = \frac{1}{2}(\nabla\phi)^2 - \frac{1}{2}(\nabla\sigma)^2 - V(\sigma, \phi) \tag{14}$$

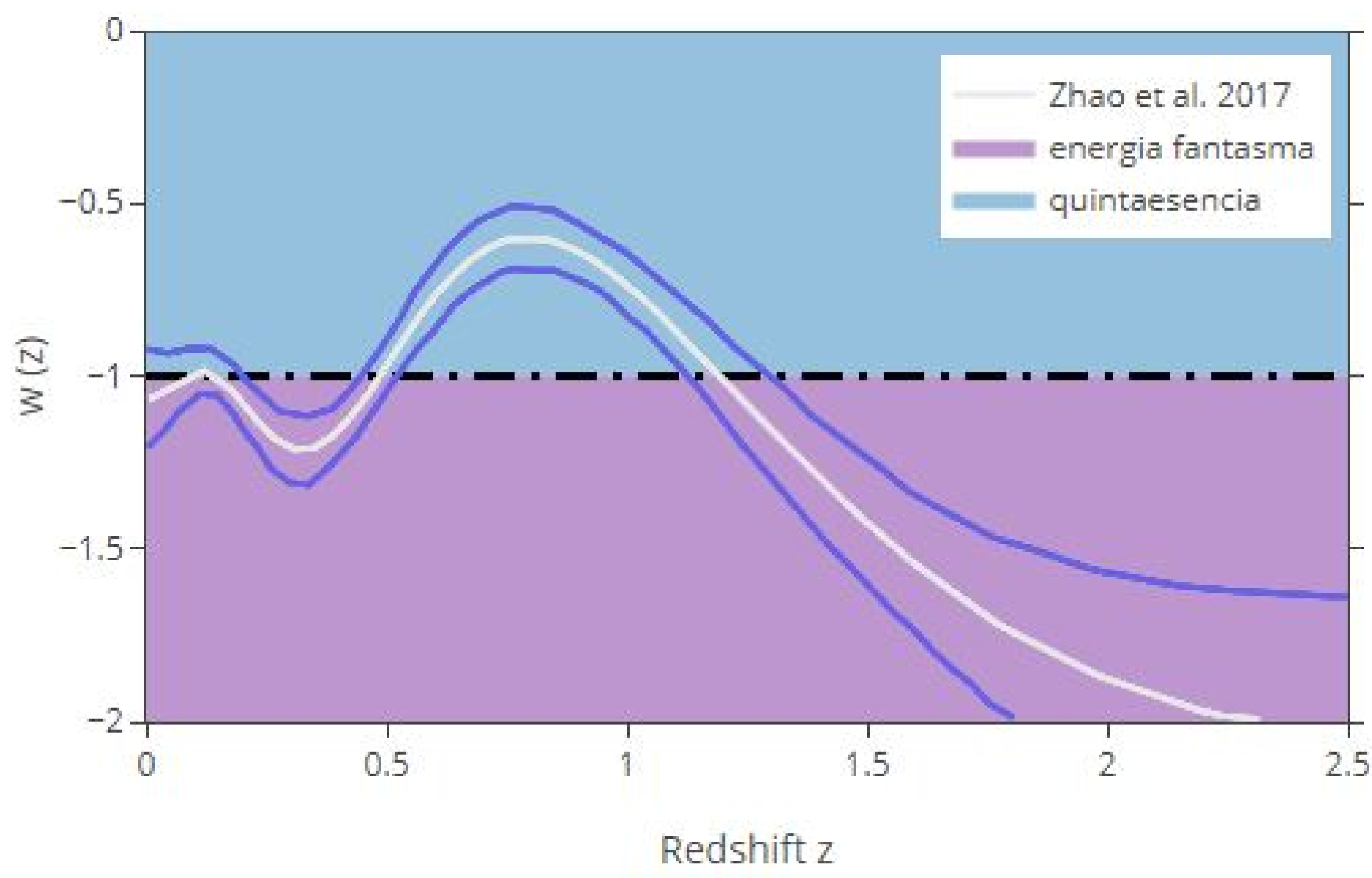
que puesta bajo el principio de misma acción, puede ser descrita como

$$\delta S = -\frac{1}{2\kappa} \int d^4x \delta g_{\mu\nu} \left( R + 2\kappa \left[ \mathcal{L}_{\sigma\phi} + \mathcal{L} \right] \right) \sqrt{-|g|} \tag{15}$$

Haciendo algunos cálculos y tomando en cuenta que los campo  $\sigma$  y  $\phi$  son homogéneos y que se encuentran en un espacio plano, pueden ser capaces de describir una densidad de energía  $\rho$  y una presión P, de tal manera que sustituidas en la ecuación de estado nos da lo siguiente:

$$w = \frac{-\dot{\sigma}^2 + \dot{\phi}^2 - 2V(\sigma, \phi)}{-\dot{\sigma}^2 + \dot{\phi}^2 + 2V(\sigma, \phi)} \tag{16}$$

con este modelo el parámetro w toma el rango de  $w \geq -1$  donde  $\phi \geq \sigma$  y  $w \prec -1$  donde encontramos que  $\sigma \succ \phi$  . En suma: el modelo *Quintom* es uno de los mejores modelos con los que contamos hoy en día, ya que logra unir los modelos de quintaesencia y energía fantasma en uno solo. Además es capaz de lograr que el parámetro  $\omega$  cruce -1, lo que implica que sea perfecto para nuestras observaciones en el tiempo pasado del universo.



**Figura 1:**  $\omega(z)$  a partir de la reconstrucción paramétrica de Zhao et al. 2017 (línea blanca) junto a su incertidumbre del 68% por DESI++ (líneas azules), rango de la ecuación de estado  $\omega(z)$  para la energía fantasma (zona azul celeste) y el rango de la ecuación de estado para la quinta esencia (zona morada), el rango de la energía quintom está dada por ambas zonas.

## Estado actual de la energía oscura

El objetivo principal de las teorías de gravedad modificada es explicar la expansión acelerada del universo en la presente época, de la cual se tiene evidencia observacional, ver [5]. Un considerable numero de teorías pueden modelar esta dinámica partiendo de distintas condiciones físicas. Uno de los problemas más importantes de la cosmología es romper esta degeneración para encontrar la teoría que explique la física de nuestro universo.

Además de la evidencia observacional de  $H(z)$ , recientemente se ha abierto una ventana que amplía la visión de la raza humana respecto al cosmos por medio de las ondas gravitacionales. Las recientes observaciones han podido determinar que la velocidad de propagación de las perturbaciones del espacio tiempo es la misma a la de la luz [3]. Esto ha permitido descartar una numerosa cantidad de teorías de gravedad modificada. Las teorías  $f(R)$ , entre otras, son consistentes con las evidencias observacionales y siguen siendo candidatos para explicar la dinámica de nuestro universo, leer [1].

## Conclusión

Las observaciones nos muestran que aún hay mucho por recorrer, las observaciones descartan a la *quintaesencia* por describir sólo una pequeña parte de la ecuación de estado y a pesar de que gran parte de ésta cae dentro del rango de la energía fantasma, falla al describir su comportamiento en regiones cercanas del Universo, en cambio la energía *quintom* cuyo intervalo para la ecuación de estado cubre ambas zonas no es descartable pero aún faltaría explicar el por qué del comportamiento de la variabilidad de  $\omega$  a través del corrimiento al rojo. Cabe mencionar la teoría de Horndeski, que es una generalización de la propuesta de energía oscura como campos escalares y algunas teorías de gravedad modificada.

## Referencias

- [1] Dario Bettoni, Jose María Ezquiaga, Kurt Hinterbichler, and Miguel Zumalacárregui. Speed of gravitational waves and the fate of scalar-tensor gravity. *Physical Review D*, 95(8):084029, 2017.
- [2] Edmund J Copeland, Mohammad Sami, and Shinji Tsujikawa. Dynamics of dark energy. *International Journal of Modern Physics D*, 15(11):1753–1935, 2006.
- [3] Paolo Creminelli and Filippo Vernizzi. Dark Energy after GW170817 and GRB170817A. *Phys. Rev. Lett.*, 119(25):251302, 2017.
- [4] Thanu Padmanabhan. *Theoretical Astrophysics: Volume 1, Astrophysical Processes*. Cambridge University Press, 2000.
- [5] Adam G. Riess et al. Type Ia supernova discoveries at  $z > 1$  from the Hubble Space Telescope: Evidence for past deceleration and constraints on dark energy evolution. *Astrophys. J.*, 607:665–687, 2004.
- [6] Jaime Román-Garza. Apuntes de relatividad general. 2019.
- [7] Hao Wei, Rong-Gen Cai, and Ding-Fang Zeng. Hessence: A New view of quintom dark energy. *Class. Quant. Grav.*, 22:3189–3202, 2005.
- [8] Gong-Bo Zhao, Marco Raveri, Levon Pogosian, Yuting Wang, Robert G Crittenden, Will J Handley, Will J Percival, Florian Beutler, Jonathan Brinkmann, Chia-Hsun Chuang, et al. Dynamical dark energy in light of the latest observations. *Nature Astronomy*, 1(9):627, 2017.

## Agradecimientos

Los autores agradecen a la iniciativa del Taller de Producción Científica de la comunidad estudiantil, que ha brindado un ambiente de colaboración y trabajo óptimo en la comunidad estudiantil. Se agradece a los organizadores del Congreso Nacional de Física por permitir presentar este trabajo.