

La energía oscura en la cosmología estándar

 Fulgencio Villegas *¹

¹ *Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Perú*

Recibido 14 May 2021 – Aceptado 20 Jul 2021 – Publicado 24 Jul 2021

Resumen

Se presenta una revisión del modelo estándar de la cosmología haciendo énfasis en la ecuación de Friedmann. Se muestra un resumen de las evidencias de la expansión acelerada del universo; con el fin de explicar tal aceleración en la expansión, se describe y se revisa las características de algunos modelos de energía oscura como la constante cosmológica, la quintaesencia, la K-esencia y el gas de Chaplygin.

Palabras clave: Cosmología, energía oscura, Universo.

Dark energy in standard cosmology

Abstract

A revision of the standard model of cosmology is presented with an emphasis on the Friedmann equation. A summary of the evidence for the accelerated expansion of the universe is shown; In order to explain such an acceleration in expansion, the characteristics of some dark energy models such as the cosmological constant, the quintessence, the K-essence and the Chaplygin gas are described and reviewed.

Keywords: Cosmology, dark energy, Universe.

Introducción

La cosmología es una parte de las ciencias físicas que estudia la composición, evolución y propiedades del Universo. La cosmología es tan antigua como el hombre mismo, surge cuando hombres de civilizaciones remotas trataban de dar explicación a diversos fenómenos que influían en sus vivencias como los eclipses, la presencia de las estrellas, el movimiento de la Luna, entre otros.

En la actualidad la cosmología es estudiada por especialistas que se ocupan de analizar y descubrir sus secretos los cuales consisten en comprender sus propiedades y leyes físicas que la gobiernan.

El valor de la cosmología radica en la posibilidad de construir teorías y modelos que describen las propiedades del Universo en base a una descripción matemática y comprensión física. Con el advenimiento de la Teoría de la Relatividad General (TRG) de Einstein la cosmología presenta un avance importante, gracias a la TRG es posible establecer modelos cosmológicos y mejorar las observaciones astronómicas.

Uno de los avances más estimulantes de la cosmología sucedió en el año 1929, observaciones del Universo hechas por Edwin Hubble, mostraron que las galaxias se alejan las unas de las otras a una velocidad proporcional a su distancia [1]. Así se creó el concepto de expansión del Universo.

Otro descubrimiento de la cosmología, posiblemente uno de los más importantes en los últimos tiempos, sucedió en 1998 cuando Adam Riess y su equipo, en base a observaciones del brillo de supernovas tipo Ia descubrieron que el Universo se expandía aceleradamente [2]. La expansión acelerada del Universo es posiblemente el descubrimiento más importante de la cosmología moderna.

Después del descubrimiento de la expansión acelerada del Universo surge una pregunta inevitable: ¿Qué hace que el Universo se expanda aceleradamente? Para responder a esta pregunta los científicos se han planteado una serie de modelos, todos ellos englobados en un modelo general denominado energía oscura. Actualmente la energía oscura es considerada la componente responsable de la aceleración del Universo, esto debido a que genera

* fvillegas@unmsm.edu.pe

© Los autores. Este es un artículo de acceso abierto, distribuido bajo los términos de la licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional (CC BY 4.0) que permite el uso, distribución y reproducción en cualquier medio, siempre que la obra original sea debidamente citada de su fuente original.



una presión negativa contrarestando las fuerzas gravitacionales. Dentro de los modelos de energía oscura tenemos: la constante cosmológica [3], la quintaesencia [4], la K-esencia [5] y el gas de Chaplygin [6]. Las observaciones recientes revelan que la energía oscura representa casi el 70% del Universo. Esto está confirmado por datos muy recientes de la sonda Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) [7]. Hasta ahora la investigación teórica de la energía oscura se centra principalmente en la evolución de su densidad de energía.

Modelo estándar cosmológico

El modelo estándar de la cosmología se sustenta sobre dos principios fundamentales la homogeneidad e isotropía del Universo. Isotropía significa que el Universo es igual en todas las direcciones y homogeneidad que es igual en todos los puntos.

El Universo homogéneo e isotrópico es descrito por la métrica de Friedmann-Lemaître-Robertson-Walker (FLRW), la cual es la base de la cosmología moderna y viene expresada por [8]

$$ds^2 = -dt^2 + a^2(t) \left[\frac{dr^2}{1 - kr^2} + r^2 d\theta^2 + r^2 \sin^2 \theta d\varphi^2 \right], \quad (1)$$

donde $a(t)$ es el factor de escala y k es un parámetro que indica si la geometría del Universo es plana ($k = 0$), esférica ($k = 1$) o hiperbólica ($k = -1$).

Haciendo uso del principio cosmológico se puede escribir el tensor de energía-momentum en forma de un fluido perfecto

$$T_{\mu\nu} = (\rho + p)u_\mu u_\nu + pg_{\mu\nu}, \quad (2)$$

donde p es la presión de un fluido, ρ es la densidad de energía, u^μ la cuadrivelocidad de los observadores y $g_{\mu\nu}$ el tensor métrico.

Haciendo uso de la ecuación de campo de Einstein $G_{\mu\nu} = 8\pi G T_{\mu\nu}$ y de las ecuaciones (1) y (2) se obtienen las ecuaciones de Friedmann, que son

$$H^2 = \left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = \frac{8\pi G}{3}\rho - \frac{k}{a^2} \quad (\text{componente temporal}), \quad (3)$$

$$\frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{4\pi G}{3}(\rho + 3p) \quad (\text{componente espacial}), \quad (4)$$

donde H es el parámetro de Hubble.

La ecuación (3) es conocida como la ecuación de Friedmann y la ecuación (4) como la ecuación de la aceleración del Universo.

La ley de conservación de la energía viene dada por

$$\nabla_{\mu\nu} T^{0\mu} = 0, \quad (5)$$

haciendo uso de esta ley y aplicandola a la métrica de FLRW se obtiene

$$\frac{d}{dt}(\rho a^3) + p \frac{d}{dt}(a^3) = 0. \quad (6)$$

Para resolver la ecuación (6) se requiere conocer la relación entre la densidad ρ y la presión p .

Toda componente que forma parte del fluido cosmológico se caracteriza por una ecuación de estado, la forma más usual es considerar un modelo [9]

$$p = w\rho, \quad (7)$$

donde w es un parámetro que define las características del fluido cósmico y que a lo mucho puede depender del tiempo.

Expansión acelerada del Universo

La ecuación de Friedmann (4) predice la aceleración del Universo y que esta depende de su composición. Si consideramos un Universo compuesto únicamente por materia y radiación, esto explicaría que la presión y densidad son positivas y por lo tanto de acuerdo a la ecuación (4) se tendría que $\ddot{a} < 0$, es decir que si el Universo se expande en presencia únicamente de materia y energía, esta expansión debería ser desacelerada. Sin embargo, en la ecuación (4) la expansión es acelerada, es decir $\ddot{a}(t) > 0$ siempre y cuando se viole la condición de energía fuerte, $\rho + 3p < 0$.

La ecuación (3) se puede escribir como

$$\Omega(t) - 1 = \frac{k}{(aH)^2}, \quad (8)$$

donde $\Omega(t) = \rho/\rho_c$ es el parámetro de densidad adimensional y $\rho_c(t) = 3H^2$ es la densidad crítica.

El valor de $\Omega(t)$ es muy importante por que determina la geometría espacial del universo.

$$\Omega > 1 \quad \text{ó} \quad \rho > \rho_c \quad \text{ó} \quad k = +1 (\text{Esférico}), \quad (9)$$

$$\Omega = 1 \quad \text{ó} \quad \rho = \rho_c \quad \text{ó} \quad k = 0 \quad (\text{Plano}), \quad (10)$$

$$\Omega < 1 \quad \text{ó} \quad \rho < \rho_c \quad \text{ó} \quad k = -1 (\text{Hiperbólico}). \quad (11)$$

Observaciones recientes sugieren que el universo actual es muy cercano a una geometría plana [10].

En el año de 1998 un grupo de astrónomos dirigidos por Adam G. Riess midieron el brillo de supernovas del tipo Ia [11, 12]. El brillo de estas supernovas apareció más tenue de lo que se esperaba, de acuerdo a la ecuación (4), si el Universo desacelera el brillo de las supernovas debería ser más intenso. Las observaciones y conclusiones determinaron que la expansión del universo está acelerando [13] como se indica en la Figura 1.

La expansión acelerada del Universo es un tema de mucho interés y constituye uno de los grandes problemas de la cosmología moderna. Para resolver este problema de la aceleración del Universo se han considerado como soluciones dos teorías: Teorías de energía oscura y teorías de gravedad modificada.

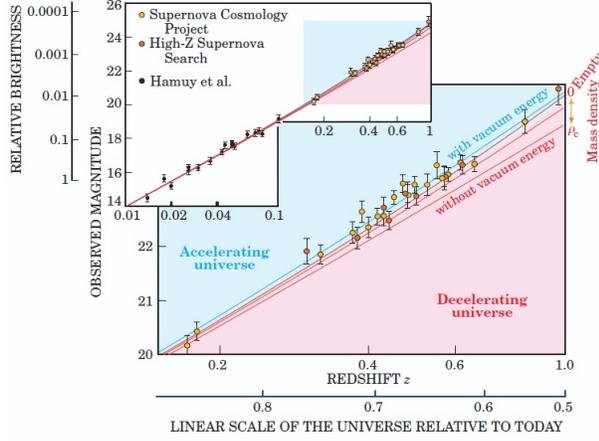


Figura 1: Diagrama magnitud-Corrimiento al rojo usado por Perlmutter y su equipo para estudiar la expansion del Universo. Con corrimientos al rojo superiores de $z = 0, 1$, las predicciones cosmológicas comienzan a divergir, dependiendo de las densidades cósmicas asumidas de masa y energía del vacío. Las curvas rojas representan modelos con energía de vacío cero y densidades de masa que van desde la densidad crítica ρ_c hasta cero. El mejor ajuste lo da la línea azul que supone una densidad de masa $\rho_c/3$ más una densidad de energía del vacío dos veces mayor, lo que implica una expansión acelerada del Universo [12].

Energía oscura

Se han propuesto diversas teorías para explicar la expansión acelerada del Universo, una de estas teorías considera la existencia de algún tipo de energía capaz de generar dicha aceleración. A esta energía se le ha denominado energía oscura.

Una de las principales características de la energía oscura es que su ecuación de estado cumple con la condición $w < -1/3$ lo que justifica la suficiente presión negativa para acelerar el universo [9].

La energía oscura se ha clasificado en dos modelos, uno denominado modelo de la concordancia o modelo Lambda-Cold Dark Matter (Λ CDM) que tiene que ver en la constante cosmológica y otro denominado modelos de campo escalar.

Modelo Λ CDM

Es el modelo más simple que envuelve energía oscura y es capaz de explicar la aceleración del universo. resulta de considerar la constante cosmológica Λ como materia oscura fría CDM (Cold Dark Matter) en un universo plano.

Las ecuaciones de Einstein con constante cosmológica es-

tán dadas por

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R + \Lambda g_{\mu\nu} = 8\pi G T_{\mu\nu}. \quad (12)$$

Usando la métrica de FLRW dada por la ecuación (1) se obtiene

$$H^2 = \frac{8\pi G}{3}\rho - \frac{k}{a^2} + \frac{\Lambda}{3}, \quad (13)$$

$$\frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{4\pi G}{3}(\rho + 3p) + \frac{\Lambda}{3}. \quad (14)$$

Se puede notar que la constante cosmológica contribuye negativamente al término de presión, generando un efecto repulsivo.

Definiendo una presión y densidad modificada

$$p^* = p - \frac{\Lambda}{4\pi G} = p - p_\Lambda, \quad \rho^* = \rho - \frac{\Lambda}{4\pi G} = \rho + p_\Lambda, \quad (15)$$

de donde encontramos que la ecuación de estado para la constante cosmológica es

$$w_\Lambda = \frac{p_\Lambda}{\rho_\Lambda} = -1. \quad (16)$$

Observamos que la condición dada por la ecuación (16) viola la condición de energía fuerte ($\rho + 3p \geq 0$), por tanto esto indica que la constante cosmológica es responsable de una fuerza repulsiva [14] capaz de acelerar la expansión del universo.

Modelos de campo escalar

Los campos escalares aparecen espontáneamente en la física de partículas y la teoría de cuerdas, resultando como modelos aceptables de energía oscura.

Quintaesencia

El modelo denominado quintaesencia es otro candidato para la energía oscura [15]. En este modelo se considera un campo escalar con un término cinético canónico y puede ser interpretado como un fluido perfecto con presión negativa.

La quinta esencia consiste en un campo escalar canónico ϕ mínimamente acoplado con la gravedad tal que su acción esta dada por

$$S = \int d^4x \sqrt{-g} \left[-\frac{1}{2}(g^{\mu\nu} \partial_\mu \phi \partial_\nu \phi) + V(\phi) \right], \quad (17)$$

donde $V(\phi)$ es la densidad de energía potencial asociada al campo. La variación suave de $V(\phi)$ conduce a una expansión acelerada del Universo [16].

El tensor de energía-momento asociado a este campo es

$$\rho_\phi = T^{00} = \frac{1}{2}\dot{\phi}^2 + V(\phi), \quad p_\phi = T^{ii} = \frac{1}{2}\dot{\phi}^2 - V(\phi), \quad (18)$$

utilizando la ecuación de campo de Einstein con la métrica de FLRW (1) obtenemos las ecuaciones

$$H^2 = \frac{8\pi G}{3}\rho_\phi = \frac{8\pi G}{3}\left[\frac{1}{2}\dot{\phi}^2 + V(\phi)\right], \quad (19)$$

$$\frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{4\pi G}{3}(\rho_\phi + 3p_\phi) = -\frac{8\pi G}{3}\left[\dot{\phi}^2 - V(\phi)\right]. \quad (20)$$

Además la variación de la ecuación (16) con respecto a ϕ da

$$\ddot{\phi} + 3H\dot{\phi} + \frac{dV(\phi)}{d\phi} = 0. \quad (21)$$

Las cantidades p_ϕ y ρ_ϕ pueden relacionarse mediante la ecuación de estado $w_\phi = p_\phi/\rho_\phi$ de modo que

$$w_\phi = \frac{\dot{\phi}^2 - 2V(\phi)}{\dot{\phi}^2 + 2V(\phi)}. \quad (22)$$

De la ecuación (21) notamos que para que sea posible la expansión acelerada del universo es necesario que el parámetro w_ϕ este dentro del intervalo de valores $(-1, -1/3)$ [16].

K-esencia

La K-esencia es un modelo opuesto al modelo de quintaesencia. Este modelo reproduce muchas características cosmológicas de forma más natural que el de quintaesencia [17].

El modelo K-esencia tiene una acción de la forma

$$S = \int d^4x \sqrt{-g} \left[\frac{1}{2k^2} R + P(\phi, X) \right] + S_m, \quad (23)$$

donde $P(\phi, X)$ es una función en términos del campo escalar ϕ y de su energía cinética $X = (-1/2)g^{\mu\nu}\partial_\mu\phi\partial_\nu\phi$. Donde su tensor de energía-momento viene dado por

$$T_{\mu\nu} = \frac{-2}{\sqrt{-g}} \frac{\delta(\sqrt{-g}P)}{\delta g^{\mu\nu}} = P_{,X}\partial_\mu\phi\partial_\nu\phi + g_{\mu\nu}P, \quad (24)$$

donde la densidad de energía y presión vienen dadas por

$$\rho_\phi = 2XP_{,X} - P, \quad p_\phi = P. \quad (25)$$

La ecuación de estado para la K-esencia es

$$w_\phi = \frac{p_\phi}{\rho_\phi} = \frac{P}{2XP_{,X} - P}. \quad (26)$$

Se puede notar que si $|2XP_{,X}| \ll |P|$, entonces $w_\phi \approx -1$; bajo esta consideración, el modelo de K-esencia se convierte en un modelo de energía oscura capaz de acelerar la expansión del Universo.

Gas de Chaplygin

Otro modelo de energía oscura es el denominado gas de Chaplygin cuya ecuación de estado es

$$p_c = -\frac{A}{\rho_c}, \quad (27)$$

donde A es una constante positiva.

Este modelo tiene un comportamiento similar al de la materia no relativista cuando el tamaño del universo es pequeño, tendiendo al de una constante cosmológica cuando este crece [6].

La ecuación de conservación de la energía reproduce la siguiente relación

$$\dot{\rho} + 3\frac{\dot{a}}{a}(\rho + 3p) = 0. \quad (28)$$

De las ecuaciones (26) y (27) se obtiene

$$\rho_c = \sqrt{A + \frac{B}{a^6}}, \quad (29)$$

donde B es una constante de integración.

Un gas de Chaplygin generalizado fue propuesto tal que la densidad de energía en la ecuación de estado tenga la forma [14]

$$P = -\frac{A}{\rho^\alpha}, \quad (30)$$

Donde α es un parámetro positivo. El parámetro de la ecuación de estado, en este caso, viene dado por

$$w = \frac{|w_0|}{\left[|w_0| + \frac{1 - |w_0|}{a^{3(1+\alpha)}}\right]}, \quad (31)$$

que interpola entre $w = 0$ en tiempos remotos ($a \ll 1$) y $w = -1$ en el futuro ($a \gg 1$); siendo w_0 el parámetro actual de estado para $a = 1$.

Este modelo sugiere un camino para construir un modelo unificado de materia y energía oscura.

Conclusiones

En vista que los resultados experimentales indican que el Universo se expande aceleradamente, una forma de explicar dicha aceleración es considerar la existencia de una sustancia denominada energía oscura. La energía oscura debe ser capaz de generar una presión negativa que contrarreste las fuerzas gravitacionales logrando así expandir el universo. Por tanto, la aceleración del Universo no puede explicarse mediante ninguna forma conocida de materia o energía. Se han propuesto una serie de modelos de energía oscura, siendo la constante cosmológica uno de los más simples y más controversiales debido a la discrepancia existente entre los valores teóricos y experimentales. Otros modelos interesantes (quintaesencia, K-esencia, gas de Chaplygin) se basan en la consideración de un campo escalar provisto con un término cinético descritos por sus respectivas lagrangianas.

Para que los modelos estudiados se comporten como modelos de energía oscura, capaces de expandir aceleradamente al Universo, se han fijado condiciones a los parámetros que definen sus ecuaciones de estado.

Referencias

- [1] E. Hubble. A relation between distance and radial velocity among extra-galactic nebulae. Proceedings of the National Academy of Sciences, **15**(3), 168-173 (1929).
- [2] S. Perlmutter et al. Measurements of Omega and Lambda from 42 High-Redshift Supernovae. *Astrophys. J.* 517:565-586 (1999).
- [3] E. J. Copeland, M. Sami and S. Tsujikawa. Dynamics of dark energy. *Int. J. Mod. Phys. D***15**, 1753-1936 (2006).
- [4] M. Sami, and T. Padmanabhan. Viable cosmology with a scalar field coupled to the trace of the stress tensor. *Phys. Rev. D***67**, 083509 (2003).
- [5] T. Chiba. Tracking K-essence. *Phys. Rev. D***66**, 063514 (2002).
- [6] A. Kamenshchik, U. Moschella and V. Pasquier. An alternative to quintessence. *Phys. Lett. B***511**, 265 (2001).
- [7] Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) Three Year Observations: Implications for Cosmology. *astro-ph/0603449v227* (2007).
- [8] S. Weinberg. *Cosmology*. Oxford University Press (2008).
- [9] S. Dodelson. *Modern Cosmology*. Academic Press (2008).
- [10] A. H. Guth. Inflationary universe: A possible solution to the horizon and flatness problems. *Phys. Rev. D* **23**, 347 (1981)
- [11] A. G. Riess et al. Observational Evidence from Supernovae for an Accelerating Universe and a Cosmological Constant. *The Astrophysical Journal*, 116 (1998)
- [12] S. Perlmutter. Supernovae, dark energy and the accelerating Universe. *Physics Today* **56**, 4, 53 (2003).
- [13] A. G. Riess et al. Supernova search team collaboration. *Astrophys. J.* 607-665 (2004).
- [14] V. Sahni. Dark matter and Dark energy. *Lecture notes in Physics*, 141-179 (2004).
- [15] R. R. Caldwell, R. Dave, and P. J. Steinhardt. Cosmological imprint of an energy component with general equation-of-state. *Phys. Rev. Lett.* 80 (1998).
- [16] S. Tsujikawa. Quintessence: a review. *Classical and Quantum Gravity*, IOP Publishing, **V30**, n 21 (2013).
- [17] J.P. Bruneton, G. Esposito-Farese. Field-theoretical formulations of MOND-like gravity. *Phys. Rev. D* **76** 124012 (2007).