

Análisis de la radiación del fondo cósmico de microondas usando modelos cosmológicos

Autor: Durán-Martínez Samuel^{1*}

Asesor: Hernández-Almada Alberto^{1**}

¹Universidad Autónoma de Querétaro, Facultad de Ingeniería - Campus Aeropuerto, C.P. 76140, Querétaro, Qro.

*sduran26@alumnos.uaq.mx

**ahalmada@uaq.mx

RESUMEN

En este trabajo, se presentan ajustes numéricos en parámetros de dos modelos cosmológicos de energía oscura con los objetivos de aproximar los datos observados al modelo y estudiar la curva de anisotropía del fondo cósmico de microondas para analizar el cambio en los picos del espectro. Los datos observados son mediciones directas del parámetro de Hubble con muestras obtenidas por oscilaciones acústicas de bariones; lo anterior se implementa en el código CLASS cuyo objetivo principal es el análisis del espectro de radiación angular del fondo cósmico de microondas a partir de los datos del satélite Planck 2015-2018. Los cambios presentados en los picos de la curva se relacionan directamente con la cantidad de materia contenida en el universo y el parámetro de expansión de Hubble. Por último, la estimación resulta ser una primera aproximación que visualiza los cambios en la curva del espectro del fondo cósmico.

Palabras clave: Modelos cosmológicos, fondo cósmico de microondas, materia oscura.

ABSTRACT

In this work, numerical adjustments in parameters of two cosmological dark energy models are presented with the objectives of approximating the observed data to the model and studying the anisotropy curve of the cosmic microwave background to analyze the change in the peaks of the spectrum. The observed data are direct measurements of the Hubble parameter with samples obtained by baryon acoustic oscillations; the above is implemented in the CLASS code whose main objective is the analysis of the angular radiation spectrum of the cosmic microwave background from the Planck 2015-2018 satellite data. The changes presented in the peaks of the curve are directly related to the amount of matter contained in the universe and the Hubble expansion parameter. Finally, the estimate turns out to be a first approximation that visualizes the changes in the cosmic background spectrum curve.

Keywords: Cosmological models, cosmic microwave background, dark matter.

INTRODUCCIÓN

Una evidencia observacional muy importante en cosmología es que todo el universo parece alejarse de nosotros y entre más lejos esté el objeto más rápido parece alejarse (Riess et al., 1998). Dicha velocidad es medida en función del corrimiento al rojo y se estudia bajo una solución de las ecuaciones de campo de la relatividad general conocida como la ecuación de Friedmann (Liddle, 2015). Esta ecuación es la más importante en la cosmología ya que describe la expansión acelerada del universo (Matos, 2003) y se plantea bajo la combinación de la homogeneidad e isotropía del universo junto al principio cosmológico.

Históricamente, la ecuación de Friedmann se derivó a partir de las ecuaciones de la relatividad general cuya ecuación de campo es dada por:

$$G_{\mu\nu} = 8\pi GT_{\mu\nu} \quad (1)$$

Donde $G_{\mu\nu}$ es conocido como el tensor de Einstein que contiene implícitamente el tensor de Ricci ($R_{\nu\mu}$), el escalar de Ricci (R) y el tensor métrico ($g_{\nu\mu}$). Por otra parte, del lado izquierdo de la igualdad, se encuentra la constante de gravitación universal G y el tensor de energía-momento ($T_{\nu\mu}$) (Motta et al., 2021), dichos componentes contienen información como la métrica, densidad, presión, velocidades del medio (Dodelson, 2003) para así plantear la ecuación de Friedmann adimensional dada por:

$$E(z)^2 = \left(\frac{H(z)}{H_0}\right)^2 = \sum_i \Omega(z)_i \quad (2)$$

donde $\Omega(z)_i$ se conoce como el parámetro de densidad en función del corrimiento al rojo. Actualmente, se ha propuesto distintos modelos con base en la ecuación de Friedmann para poder explicar la curva de expansión del universo con distintas hipótesis respecto al contenido del universo y así ajustar los datos observados a los modelos teóricos planteados (Matos, 2008). Una de estas hipótesis es la existencia de la materia oscura, la cual se caracteriza por no emitir luz ni interactuar con la materia bariónica, además, no tiene carga por lo que no puede radiar energía, y, al no detectar una temperatura T , se considera que es fría. Este tipo de materia se sustenta en la observación de la radiación del fondo de microondas descrita por un espectro de fluctuaciones de radiación cuyos picos describen el contenido total de materia del universo. Dentro del espectro, destacan tres picos principales: el primero muestra que el universo es geoméricamente plano; el segundo pico representa que la materia ordinaria abarca el 5 % de toda la materia y energía del universo, y, por último, el tercero muestra que el 26 % del universo consiste en materia oscura (Matos, 2003).

Las anisotropías de temperatura del fondo cósmico de microondas han revolucionado y seguirán revolucionando la comprensión de la cosmología. El descubrimiento de los picos acústicos previamente predichos en el espectro de potencia ha establecido un modelo cosmológico funcional con densidad crítica que consta principalmente de materia y energía cuyas estructuras se formaron a través de la inestabilidad gravitacional y de las fluctuaciones cuánticas durante una época inflacionaria. La fenomenología y las implicaciones cosmológicas de los picos acústicos presentan oportunidades para estudiar la inflación y energía oscura (Hu & Dodelson, 2002), por lo que este artículo tiene como objetivo principal estudiarlos mediante ajustes a los

parámetros de los modelos de energía oscura Λ CDM y ω CDM usando mediciones del parámetro de Hubble y compararlos con los datos Planck 2015-2018.

METODOLOGÍA

Para estudiar la expansión del universo con el uso de modelos cosmológicos y la radiación del fondo cósmico de microondas, es necesario usar datos observacionales obtenidos por el satélite Planck y por mediciones directas del parámetro de Hubble (Magaña et al., 2018). La principal herramienta a utilizar es el lenguaje de programación Python en el cual se analizará los parámetros de los modelos cosmológicos con la librería *iminuit* (Dembinski & Ongmongkolkul, 2020) desarrollada en el CERN, la cual resulta de ayuda al ajustar los datos con métodos de minimización de funciones y estimación de error en parámetros. Por otro lado, para estudiar CMB es necesario usar un código llamado CLASS (Lesgourgues, 2019), cuyo propósito es simular la evolución de perturbaciones lineales en el universo y calcular los observables de estructura a gran escala.

a) Análisis de modelos cosmológicos

Espacialmente para un universo tipo FRW (métrica de Friedmann-Lemaître-Robertson Walker) (Weinberg, 1972), los modelos de energía oscura a partir de la ecuación de Friedmann toman la forma (Xu & Zhang, 2016):

$$E(z)^2 = \left(\frac{H(z)}{H_0} \right)^2 \quad (3)$$

$$= \Omega_m(1+z)^3 + \Omega_r(1+z)^4 + (1 - \Omega_r - \Omega_m)f(z)$$

donde $f(z)$ es una función que contiene los diferentes parámetros de cada modelo de energía oscura. Para el modelo Λ CDM se tiene la función:

$$E(z)^2 = \Omega_m(1+z)^3 + \Omega_r(1+z)^4 + (1 - \Omega_r - \Omega_m) \quad (4)$$

Y para el modelo ω CDM se tiene:

$$E(z)^2 = \Omega_m(1+z)^3 + \Omega_r(1+z)^4 + (1 - \Omega_r - \Omega_m)(1+z)^{3(1+\omega)} \quad (5)$$

b) Ajuste de datos

Mediante el uso de *iminuit* se realiza una aproximación a los parámetros de los modelos cosmológicos Λ CDM y ω CDM ajustando los datos obtenidos (Magaña et al., 2018) con la ecuación de Friedmann de cada modelo (Xu & Zhang, 2016).

Estos datos son una compilación de observaciones al parámetro de Hubble (ODH) y consiste en 51 mediciones en un rango al corrimiento al rojo de $0.07 < z < 2.36$; de la muestra total, 31 muestras fueron obtenidas a través del método de edad diferencial (Jimenez & Loeb, 2002). Esta técnica compara las edades de las galaxias de tipo temprano con un diferencial de distancia Δz y bajo la ecuación:

$$H(z) = -\frac{1}{(1+z)} \frac{dz}{dt} \quad (6)$$

Por otra parte, las 20 muestras restantes fueron obtenidas mediante oscilaciones acústicas de bariones, las cuales son obtenidas mediante:

$$H(z)_{true} = \frac{r_{BAO}}{r_{WMAP}} H(z)_{ref} \quad (7)$$

donde $H(z)_{ref}$ es el modelo de referencia con el cual se estima la escala aparente de las oscilaciones acústicas de bariones r_{BAO} , y r_{WMAP} es la escala acústica inmovilizada obtenida de la radiación de fondo cósmico de microondas (Gaztañaga, Cabré, & Hui, 2009).

Se usa la estadística χ^2 para ajustar cada modelo cosmológico cuya función es definida por:

$$\chi^2 = \frac{\xi_{th} - \xi_{obs}}{\sigma_{\xi}^2} \quad (8)$$

Donde ξ_{obs} son los datos experimentales, ξ_{th} son los valores teóricos del modelo y σ_{ξ}^2 es la desviación estándar. Esta función está presente en los distintos tipos de datos por lo que funciona como una superposición

$$\chi^2 = \sum_{\xi} \chi_{\xi}^2 = \chi_{BAO}^2 + \chi_{H_0}^2 \quad (9)$$

c) Modificación del código CLASS

Una vez obtenido el ajuste de los parámetros h , ω y Ω_m los compararemos con los datos Planck 2015 y Planck 2018 en el código CLASS. Dentro de este código sustituimos los valores h , ω y Ω_m ; además, ajustamos los porcentajes de materia bariónica y materia oscura respecto al parámetro Ω_m de tal forma que sea consistente con las investigaciones actuales, las cuales señalan un 5 % de materia bariónica en el universo (Xu & Zhang, 2016). Una vez sustituidos los parámetros, se analizarán las principales diferencias en la curva para estudiar su comportamiento.

RESULTADOS

El ajuste de los datos cosmológicos (Magaña et al., 2018) al modelo teórico está representado por una curva de expansión que se observa en la Figura 1 y describe una minimización de los parámetros de cada modelo. Es importante mencionar que para el modelo Λ CDM solo hay dos parámetros en la ecuación de Friedmann los cuales son implícitamente h y Ω_m correspondientes al parámetro de Hubble relacionado a la tasa de expansión del universo y al parámetro de densidad. Para el modelo ω CDM los parámetros son h , ω y Ω_m siendo ω un parámetro representado con una constante en el modelo.

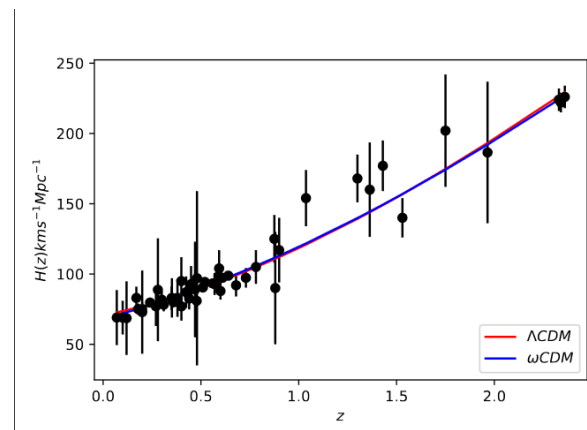


Figura 1. Ajuste a la curva de expansión de la función $H(z)$ para los modelos Λ CDM y ω CDM. Fuente: Elaboración propia.

Los parámetros de los modelos se correlacionan entre sí por lo que pueden tener distintos posibles valores y se representan mediante contornos de verosimilitud con rangos de confianza de 1σ - 3σ . En la Figura 2, se presenta el contorno para el modelo Λ CDM cuyos parámetros fueron $\Omega_m = 0.2576$ y $h = 0.7071$.

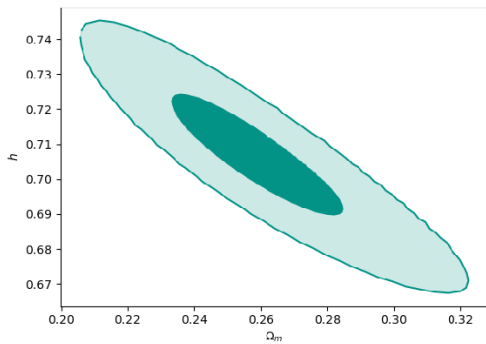


Figura 2. Contornos de confianza del 68.3% y 99.9% para los parámetros $\Omega_m - h$ del modelo Λ CDM. Fuente: Elaboración propia.

Para el modelo ω CDM al tener tres parámetros, entonces se obtuvieron dos contornos representados en la Figura 3 y los valores fueron $\Omega_m = 0.2599$, $h = 0.6811$ y $\omega = -0.86$ respectivamente.

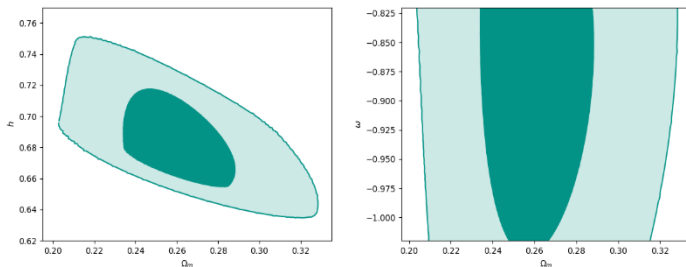


Figura 3. Contornos de confianza del 68.3% y 99.9% para los parámetros $\Omega_m - h$ (izquierda) y $\Omega_m - \omega$ (derecha) del modelo ω CDM. Fuente: Elaboración propia.

Al cambiar el parámetro h , se puede observar en la Figura 4 y 5 que las curvas se desplazan a la izquierda o a la derecha; por otra parte, la curva que se obtuvo con los parámetros ajustados mediante iminuit cambian significativamente en la altura del pico principal respecto a los que se obtienen de los datos del satélite Planck. En los espectros, se encuentra implícitamente el cambio en el parámetro Ω_m , por lo que, mediante el ajuste de los parámetros, se obtuvo un total de 25.7651 % de materia existente en el universo para el modelo Λ CDM y de 25.99 % para el modelo ω CDM, en ambos modelos se definió

5 % de materia bariónica y el resto como materia oscura. Por tanto, a diferencia de los datos del satélite Planck (donde hay 5 % de materia bariónica y 24 % de materia oscura) los cambios más significativos se encuentran en los primeros tres picos. En el primero, se deduce que hay una variación pequeña en la geometría plana del universo debido al cambio de la altura del pico. Por otro lado, el segundo pico representa la cantidad de materia ordinaria o bariónica del universo; por último, el tercero define el porcentaje de materia oscura, por lo que al estar desplazada la gráfica a la derecha respecto a los datos Planck se comprueba la variación en la materia calculada en el ajuste. Dicho esto, el cambio representa una variación en el momento multipolar del espectro de radiación angular.

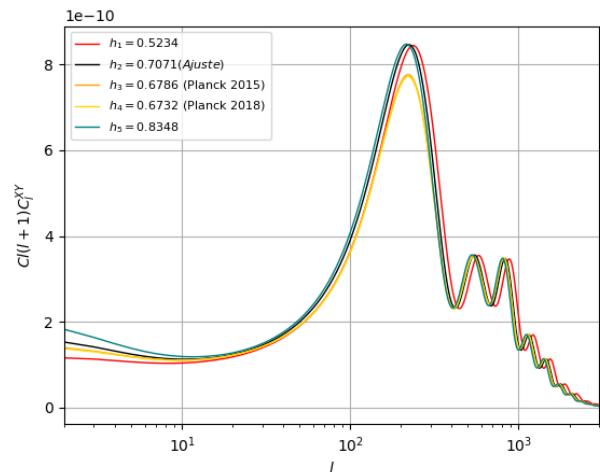


Figura 4. Curva de anisotropía del fondo cósmico de microondas con distintos valores de h para el modelo Λ CDM. Fuente: Elaboración propia.

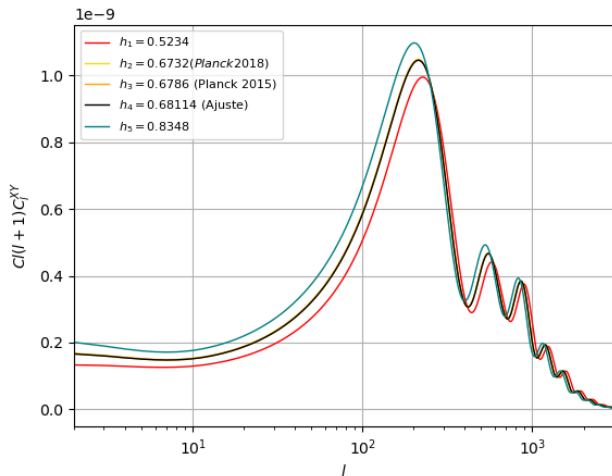


Figura 5. Curva de anisotropía del fondo cósmico de microondas con distintos valores de h para el modelo ω CDM. Fuente: Elaboración propia.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

En este proyecto, se ajustaron los parámetros que contienen dos modelos cosmológicos para observar un cambio en la curva de anisotropía del fondo cósmico de microondas. Dichos ajustes hacen que la curva del fondo cósmico se vea desplazada cambiando los tres picos principales, los cuales representan la geometría y materia del universo respectivamente. Este desplazamiento se debe al cambio simultáneo entre la materia y el parámetro de Hubble h , los cuales sugieren una variación en el momento multipolar del espectro de radiación angular, que resulta ser es una variación en la forma de medir este espectro relacionado a la temperatura.

La aproximación a los modelos Λ CDM y ω CDM es efectiva ya que el costo computacional es mínimo por el uso de una computadora ordinaria y los segundos que tomó en compilar. Lo anterior es importante ya que podría servir para realizar primeras aproximaciones con otros modelos cosmológicos para descartar anomalías antes de llevar el análisis en el centro de investigación usando el cómputo de alto desempeño, donde los tiempos de

compilación son prolongados y así poder ahorrar recursos.

REFERENCIAS

- Dembinski, H., & Ongmongkolkul, P. (2020). scikit-hep/iminuit. Zenodo. doi:10.5281/zenodo.4310361
- Dodelson, S. (2003). *Modern cosmology*. Elsevier.
- Gaztañaga, E., Cabré, A., & Hui, L. (2009). Clustering of luminous red galaxies – IV. Baryon acoustic peak in the line-of-sight direction and a direct measurement of $H(z)$. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 399(3), 1663-1680. doi:10.1111/j.1365-2966.2009.15405.x
- Hu, W., & Dodelson, S. (2002). Cosmic microwave background anisotropies. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 40(1), 171-216. doi:arXiv:astro-ph/0110414
- Jimenez, R., & Loeb, A. (2002). Constraining Cosmological Parameters Based on Relative Galaxy Ages. *American Astronomical Society*, 573(1), 37-42. doi:10.1086/340549
- Lesgourgues, J. (2019). *CLASS (the Cosmic Linear Anisotropy Solving System)*. Obtenido de https://lesgourg.github.io/class_public/class.html
- Liddle, A. (2015). *An Introduction to Modern Cosmology*. England: John Wiley & Sons.
- Magaña, J., Amante, M., Miguel, G.-A., & Motta, V. (2018). The Cardassian expansion revisited: constraints from updated Hubble parameter measurements and type Ia supernova data. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 476(1), 1036-1049.
- Matos, T. (2003). Formación de la estructura del universo. *Revista Mexicana de Física*, 49, 16-25.
- Matos, T. (2008). La materia oscura del universo: retos y perspectivas. *Revista Mexicana de Física*, 54, 193-202.
- Motta, V., García-Aspeitia, M. A., Hernández-Almada, A., Magaña, J., & Verdugo, T. (2021). Taxonomy of Dark Energy Models. *Universe*, 7(6), 163. doi:arXiv:2104.04642
- Riess, A. G., Filippenko, A. V., Challis, P., Clocchiatti, A., Diercks, A., Garnavich, P. M., & ... & Tonry, J. (1998). Observational evidence from supernovae for an accelerating universe and a cosmological constant. *The Astronomical Journal*.
- Weinberg, S. (1972). *Gravitation and cosmology: principles and applications of the general theory of Relativity*. New York: John Wiley & Sons.
- Xu, Y.-Y., & Zhang, X. (2016). Comparison of dark energy models after Planck 2015. *The European Physical Journal C*, 76, 1-15. doi:https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-016-4446-5