

El modelo cosmológico estándar, también conocido como lambda materia oscura fría (Λ CDM), debido a sus componentes principales: la materia oscura fría y la energía oscura en forma de constante cosmológica (Λ), es altamente exitoso en la explicación de una amplia gama de observaciones del universo, como las fluctuaciones de temperatura del fondo cósmico de microondas, las oscilaciones acústicas bariónicas, la abundancia de elementos ligeros como el hidrógeno y el helio, y el patrón observado de la agrupación de galaxias. A pesar de estos éxitos, surgen varias discrepancias dentro de este marco teórico. En este artículo presentaré varias de estas tensiones cosmológicas que llevan intrigando a la comunidad científica y explicaré cómo desde la cosmología se están proponiendo nuevos modelos para solucionar estas anomalías y conseguir explicar con precisión las observaciones que tenemos del universo.



Helena García Escudero
Universidad de California, Irvine (UCI)
garciaeh@uci.edu

EL MODELO ESTÁNDAR DE COSMOLOGÍA, O Λ CDM

La cosmología es el estudio científico riguroso de las estructuras del universo y sus leyes fundamentales, utilizando técnicas de observación avanzadas y modelos teóricos para desentrañar los orígenes, la evolución y el destino final del cosmos. Este campo aborda preguntas profundas, impulsando nuestra comprensión de los principios físicos relacionados con la historia del universo. En el centro de esta exploración se encuentra el modelo cosmológico estándar, Λ CDM, que explica con éxito una gran diversidad de observaciones como las fluctuaciones de temperatura del fondo cósmico de microondas, la distribución de estructuras a gran escala y la abundancia primordial de elementos ligeros. A pesar de estos logros, surgen varias discrepancias dentro de este marco teórico. Empezaré explicando dos tensiones que llevan existiendo varias décadas, y más adelante me centraré en otras que han aparecido más recientemente.

LA TENSION DE HUBBLE

La tensión de Hubble es una discrepancia significativa entre la medición localmente independiente del modelo de la constante de Hubble (H_0), basada en variables cefeidas y supernovas de tipo Ia, y el valor más bajo dependiente del modelo inferido a partir de observaciones del fondo cósmico de microondas, asumiendo el modelo Λ CDM. Esta tensión ha persistido e incluso ha aumentado, a pesar del creciente volumen y precisión de los datos, alcanzando un nivel preocupante en la actualidad. En la Figura 1 se puede observar cómo a lo largo de los años las barras de error asociadas al cálculo de esta constante se han ido reduciendo progresivamente, manteniendo la diferencia en el valor medio utilizando diferentes métodos. Existen modelos que modifican la física del universo como se explica bajo el modelo estándar de cosmología y permiten aliviar significativamente esta tensión. En la Figura 2 presento los resultados de un análisis estadístico en el que comparamos cómo algunos modelos candidatos a resolver este problema alivian la tensión a la vez que se ajustan a los datos con tan buena precisión como el modelo estándar de cosmología. La línea horizontal azul muestra el límite estadístico que delimita si los modelos resuelven la tensión mejor que el modelo estándar de física. Demostramos que cuatro extensiones al modelo estándar de física: la existencia de energía oscura temprana (EDE), la existencia de campos magnéticos primordiales (PMF), una energía

ALLÁ DEL MODELO COSMOLÓGICO ESTÁNDAR

Figura 1. Evolución en las últimas décadas de las mediciones del valor de la expansión actual del universo, o constante de Hubble, mediante dos métodos diferentes: utilizando variables cefeidas y supernovas de tipo Ia (en rojo), y utilizando el fondo cósmico de microondas, asumiendo el modelo Λ CDM (en azul). Figura tomada del artículo [7].

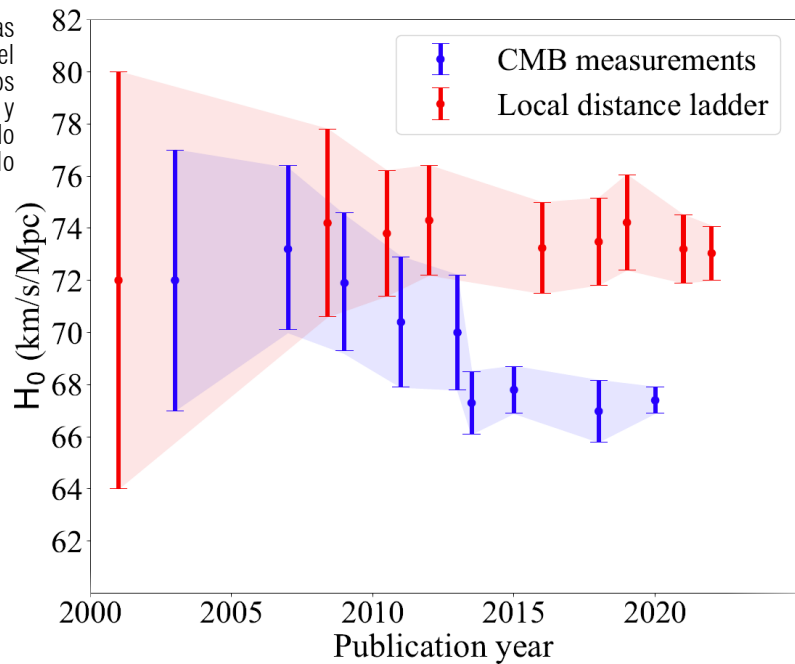


Figura 2: La figura muestra los valores del test estadístico, criterio de información de akaike (AIC) de los modelos candidatos considerados con respecto a Λ CDM: de izquierda a derecha: densidad de energía oscura variable (ω CDM), la existencia de un incremento en el número de especies relativistas en nuestro universo (Λ CDM+ N_{eff}), masa de neutrinos no trivial (Σm_ν), curvatura no nula (Ω_k), existencia de campos magnéticos primordiales (PMF), neutrinos auto-interactuantes (SI_ν) y energía oscura temprana (EDE), para aliviar la tensión de H_0 . Utilizando los datos base del fondo cósmico de microondas (barras rojas), combinados con las oscilaciones acústicas bariónicas (barras verdes) y combinados con observaciones de supernovas (barras azules). Las barras azules son las que combinan todas las observaciones cosmológicas de nuestro universo colectivamente, por ello son las que tomamos como referencia para las conclusiones finales de nuestro estudio. La línea horizontal es el umbral de preferencia más fuerte en la escala estadística de Jeffrey. Los cuatro modelos que alivian esta tensión mejor que el modelo estándar son ω CDM, Λ CDM+ N_{eff} , PMF y EDE. Figura tomada del artículo [2].

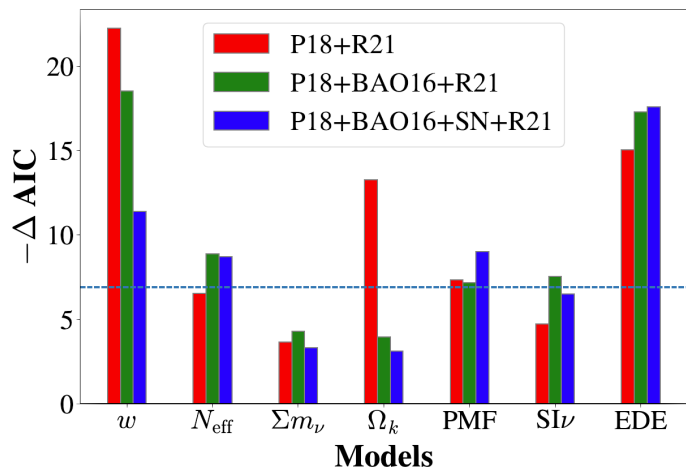
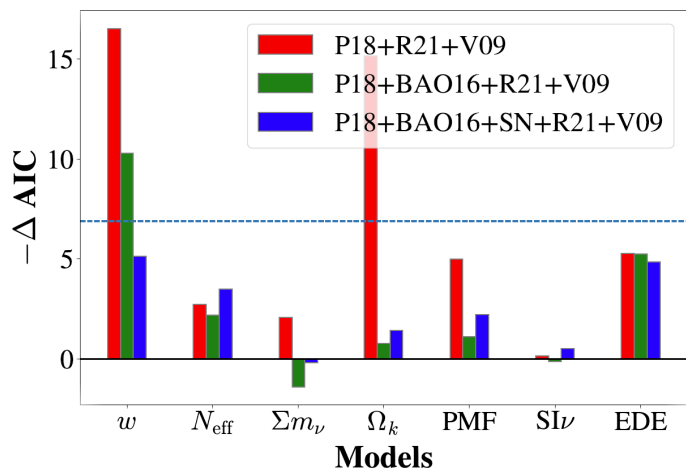


Figura 3. La figura muestra los mismos resultados que la figura 2, pero combinando las tensiones H_0 y S_8 simultáneamente. En esta ocasión, se puede observar cómo ningún modelo supera la barra horizontal azul cuando se combinan todas las observaciones cosmológicas de nuestro universo colectivamente (barras azules). Figura tomada del artículo [2].



oscura variable (ω CDM) o la existencia de un incremento en el número de especies relativistas en nuestro universo (Λ CDM + N_{eff}) fueron los modelos ganadores. Dicho de otra forma, estos modelos alivian la tensión de Hubble a la vez que explican las observaciones de nuestro universo mejor que Λ CDM [2]. No obstante, para obtener este resultado solo consideramos la tensión de Hubble, pero no podemos aislar este problema olvidándonos de otras anomalías como la discrepancia en la amplitud de las fluctuaciones de densidad de la materia en el universo.

LA TENSION DE S_8

El parámetro cosmológico S_8 cuantifica la amplitud o tasa de crecimiento de las estructuras en el universo a una escala de 8 Mpc. La tensión de S_8 surge de discrepancias entre las predicciones del modelo cosmológico estándar y las observaciones de las estructuras a gran escala del universo, como los cúmulos de galaxias. En este análisis incluimos ambas tensiones de manera simultánea y planteamos la misma cuestión: ¿existe algún modelo que se ajuste a los datos tan bien como el modelo estándar de física mientras resuelva ambas discrepancias? Los resultados no fueron tan satisfactorios, como se puede comprobar en la figura 3. No existe ningún modelo a día de hoy, de los que analizamos en este estudio, que resuelva ambas tensiones y se ajuste a los datos como el modelo estándar de cosmología. Este resultado no debe eliminar la esperanza; hemos identificado modelos que resuelven algunos problemas que el modelo estándar de cosmología no es capaz de explicar y conocemos algunas de las propiedades que debe tener la solución que alivie estas tensiones [2]. Nuevas misiones que están actualmente operativas o empezarán a tomar datos en el futuro próximo nos van a permitir seguir investigando estas cuestiones, como por ejemplo Instrumento Espectroscópico de Energía Oscura (DESI), o el satélite europeo Euclid [9].

ANOMALÍAS COSMOLÓGICAS RECIENTES: DENSIDAD DE ENERGÍA OSCURA VARIABLE O NEUTRINOS CON MASA "NEGATIVA"

Más recientemente, en abril de 2024, los análisis y mediciones del primer conjunto de datos de la colaboración de las oscilaciones acústicas bariónicas de DESI, junto con observaciones del fondo cósmico de microondas y supernovas, mostraron que sus datos se ajustaban más favorablemente a un modelo

en el que densidad de la energía oscura varía con el tiempo, presentando una nueva discrepancia con el modelo cosmológico estándar donde la energía oscura es constante. Además, si se combinan los datos de las colaboraciones de Planck y DESI, existe una preferencia por una "masa de neutrinos negativa", un resultado no físico que podría estar asociado con un exceso del efecto de lente gravitacional del fondo cósmico de microondas en comparación con las predicciones del modelo Λ CDM, pero que requiere más investigación [4,5,6].

Actualmente, estamos analizando el origen de esta anomalía. Al combinar los datos del fondo cósmico de microondas con las oscilaciones acústicas bariónicas y supernovas, y ajustando los datos a curvas Gaussianas la media de todas ellas predice que las masas de los neutrinos se sitúan en valores negativos. Sin embargo, mantengamos la calma, ya que estos efectos pueden explicarse por diversos factores. En primer lugar, los análisis del fondo cósmico de microondas de la colaboración Planck presentan un exceso del efecto de lente gravitacional, una discrepancia con la predicción del modelo estándar de cosmología. Varios reanálisis de este conjunto de datos corrigen este problema, y cuando los incluimos en nuestro análisis, la masa de los neutrinos adquiere valores más positivos. En segundo lugar, hay varios puntos asociados a las épocas del universo correspondientes a desplazamientos al rojo o redshift ($z=0.5$ y 0.7) en los que los datos proporcionados por DESI presentan discrepancias con respecto al modelo estándar de física y han sido señalados por varios estudios como objeto de fluctuaciones estadísticas [3,8]. Estos datos pueden contribuir a las predicciones de masas "negativas" de los neutrinos. Por otro lado, si consideramos modelos más allá del modelo cosmológico estándar, existen varios escenarios que podrían relajar el límite cosmológico sobre la masa de los neutrinos, aliviando esta anomalía. Uno de ellos es precisamente la energía oscura dinámica no constante, que los datos de DESI apoyan. Si se permite que la ecuación de estado de la energía oscura varíe, en combinación con la masa de los neutrinos, entonces los límites en la masa de los neutrinos se relajarían hasta valores positivos [3,8]. Existen otros escenarios cosmológicos donde el límite cosmológico de la masa de los neutrinos podría ser relajado o completamente evadido, algunos de los cuales están conectados a modelos relevantes de física de partículas. Estos inclu-

yen universos con temperaturas de calentamiento inferiores a las habituales, la desintegración de neutrinos, interacciones de neutrinos a larga distancia o transiciones de fase tardías [1,3,6]. La motivación para este tipo de escenarios es actualmente débil, pero si las futuras misiones cosmológicas no detectan la masa de los neutrinos, podríamos estar viendo el primer indicio de una propiedad no estándar de los neutrinos.

Por último, cabe destacar que el orden de este problema no es comparable con las otras dos tensiones mencionadas anteriormente, ya que se encuentra por debajo del nivel de 2σ . Aunque requiere atención, esperamos que esta anomalía desaparezca cuando se corrijan los efectos anómalos mencionados en esta sección con la publicación de nuevos datos de mayor precisión.

¿QUÉ RESULTADOS PODEMOS ESPERAR EN EL FUTURO DE ESTAS TENSIONES COSMOLOGICAS?

Los próximos años van a ser muy emocionantes en el campo de investigación de las tensiones cosmológicas. Existen varias misiones y experimentos programados para tomar medidas y publicar más datos sobre nuestro universo. Por ejemplo, DESI ya ha recopilado tres veces más datos que los publicados en su primer paquete de resultados, y el satélite europeo Euclid, que recopilará las posiciones de aún más galaxias, está completamente operativo y comenzará a recolectar datos cosmológicos muy pronto [9]. Se espera detectar la masa de los neutrinos a partir de una combinación de experimentos de DESI, Euclid y fondo cósmico de microondas dentro de 5 a 10 años. Si, a pesar de errores estadísticos y sistemáticos excepcionalmente pequeños, no se realiza ninguna detección, esto podría indicar la necesidad de una física más allá del modelo estándar de cosmología y física de partículas, posiblemente señalando una nueva propiedad no identificada de los neutrinos. Sin duda, los avances en cosmología y la física de neutrinos en los próximos años prometen revolucionar nuestra comprensión del universo y desvelar nuevos horizontes en la física fundamental.

NOTA

¹ El "número efectivo de especies relativistas" se refiere a una medida en cosmología que cuantifica la cantidad de partículas que se comportan como relativistas en el universo temprano. El número

efectivo de especies relativistas hoy es aproximadamente 3, correspondiendo principalmente a las tres especies conocidas de neutrinos: el neutrino electrónico, el muónico y el tauónico. Los neutrinos son las únicas partículas relativistas a las temperaturas cosmológicas actuales. Sin embargo, este número puede variar ligeramente dependiendo del modelo y de la temperatura que se esté examinando. Por ejemplo, si se consideran partículas adicionales, el número efectivo de especies relativistas podría ajustarse para reflejar esas condiciones.

REFERENCIAS

- [1] Abazajian K. y García Escudero H. (2023). Visible in the laboratory and invisible in cosmology: Decaying sterile neutrinos. *Phys. Rev. D* 108 September 20, 2023. e-Print: 2309.11492 [hep-ph] <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.108.123036>
- [2] García Escudero H., Kuo, J., Keeley, R. y Abazajian K. (2022) Early or phantom dark energy, self-interacting, extra, or massive neutrinos, primordial magnetic fields, or a curved universe: An exploration of possible solutions to the H_0 and Ω_8 problems. *Phys. Rev. D* 108 August 30, 2022. e-Print: 2208.14435 <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.106.103517>
- [3] Naredo-Turedo, D., Escudero, M., Fernández-Martínez E., et al. (2024). Living at the Edge: A Critical Look at the Cosmological Neutrino Mass Bound. (July 30th, 2024), e-Print: 2208.14435
- [4] Planck Collaboration. (2018). Planck 2018 results. VI. Cosmological parameters. *Astron.Astrophys.* 641 (2020) A6 Jul 17, 2018. DOI = [10.1051/0004-6361/201833910](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201833910)
- [5] G. Adame et al. DESI 2024 VI: Cosmological Constraints from the Measurements of Baryon Acoustic Oscillations. (April 3rd 2024). e-Print: 2404.03002
- [6] Craig N., Green D., Meyers J., y Rajendran S. No Ω_8 is Good News. (May 1st, 2024) *JHEP*, 09:097, 2024. DOI = [10.1007/JHEP09\(2024\)097](https://doi.org/10.1007/JHEP09(2024)097)
- [7] Hu J.y Wang F. Hubble Tension: The Evidence of New Physics. *Universe* 9 (February 2023) DOI = [10.48550/arXiv.2302.05709](https://doi.org/10.48550/arXiv.2302.05709)
- [8] Allali J., y Notari A. Neutrino mass bounds from DESI 2024 are relaxed by Planck PR4 and cosmological supernovae. (Jun 20, 2024) e-Print: 2406.14554
- [9] Euclid Collaboration. I. Overview of the Euclid mission. (May 22, 2024). e-Print: 2405.13491