



UNNOBA

# NÚCLEOS

Revista científica

# 8

JULIO DE 2021



## SESQUICENTENARIO

DE LA TABLA PERIÓDICA DE MENDELÉYEV

**REPRESENTACIÓN  
PARLAMENTARIA POR  
ASOCIACIÓN Y POR  
PARTIDO: ANÁLISIS  
COMPARADO DE LA  
SITUACIÓN DE LA  
REPÚBLICA DE WEIMAR  
Y LA REPÚBLICA FEDERAL  
ALEMANA**

CLAUDIO A. CONTRERAS

**SESQUICENTENARIO DE  
LA TABLA  
PERIÓDICA DE  
MENDELÉYEV**

OSCAR E. PIRO

**GAVIOLA  
Y EL LÁSER**

MARIO GARAVAGLIA

**EL MODELO ESTÁNDAR  
DE LA COSMOLOGÍA  
MODERNA EN JAQUE**

LUIS A. ANCHORDOQUI

## AUTORIDADES ACADÉMICAS

*Rector: Dr. Guillermo R. Tamarit*

*Vicerrectora: Mg. Danya V. Tavela*

*Guardasellos: Ing. Luis J. Lima*

*Secretaria Académica: TP. Pilar Traverso*

*Secretaria de Investigación, Desarrollo y Transferencia: Dra. Carolina Cristina*

*Secretario de Extensión: Lic. Juan Pablo Itoiz*

*Secretario General: Cdora. Mariana Passarello*

*Secretaria Económico Financiera: Cdora. Mariela García*

*Secretaria de Cultura: Lic. Laura Durán*

*Secretario de Relaciones Institucionales: Cdor. Martín Palma*

*Directora Centro de Edición y Diseño: Mg. Ma. de las Mercedes Filpe*

DIRECTOR DE LA REVISTA

*Dr. Ángel L. Plastino*

---

## SUMARIO

### #8 SESQUICENTENARIO DE LA TABLA PERIÓDICA DE MENDELÉYEV

#### **PÁG. 6**

**REPRESENTACIÓN PARLAMENTARIA POR ASOCIACIÓN Y POR PARTIDO: ANÁLISIS COMPARADO DE LA SITUACIÓN DE LA REPÚBLICA DE WEIMAR Y LA REPÚBLICA FEDERAL ALEMANA**

*CLAUDIO A. CONTRERAS*

#### **PÁG. 20**

**SESQUICENTENARIO DE LA TABLA PERIÓDICA DE MENDELÉYEV**

*OSCAR E. PIRO*

#### **PÁG. 36**

**GAVIOLAY ELLÁSER**

*MARIO GARAVAGLIA*

#### **PÁG. 55**

**EL MODELO ESTÁNDAR DE LA COSMOLOGÍA MODERNA EN JAQUE**

*LUIS A. ANCHORDOQUI*

---

#### Edita



CEDI Centro de Edición y Diseño. UNNOBA  
Calleao 289 3.º piso, CP. 1022  
Tel 54 11 53531520. Ciudad Autónoma  
de Buenos Aires, Argentina

#### Diseño y diagramación

CEDI Centro de Edición y Diseño

Año 6 N.º 8

Julio de 2021

Publicación semestral

ISSN 2408-4492

Queda hecho el depósito

que marca la ley 11723

#### Sede Junín

Libertad 555, CP. 6000

Tel 54 236 4407750

Junín, prov. de Buenos Aires, Argentina

#### Sede Pergamino

Monteagudo 2772, CP. 2700

Tel 54 2477 409500.

Pergamino, prov. de Buenos Aires, Argentina

*Se invita a potenciales colaboradores  
a remitir sus trabajos al CEDI  
(cedi@unnoba.edu.ar)*

[www.unnoba.edu.ar](http://www.unnoba.edu.ar)



Esta obra está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento - NoComercial - SinObraDerivada 4.0 Internacional.



## CONSEJO EDITORIAL

**Dr. Plastino, Ángel R.**  
UNNOBA

**Dr. Tamarit, Guillermo R.**  
UNNOBA

**Mg. Tavela, Danya V.**  
UNNOBA

**Dra. Cristina, Carolina**  
UNNOBA

**Mg. Filpe, Ma. de las Mercedes**  
UNNOBA

## ARBITRAJE

La nuestra es una revista de divulgación que publica artículos originales, en el sentido de que no han aparecido antes en ningún otro medio.

Por ser una revista de divulgación, nuestra principal preocupación es que sus artículos sean accesibles a un público con formación universitaria. No juzgamos tanto el contenido como su accesibilidad.

Todos los artículos son arbitrados por el Consejo Editorial. La mayoría de ellos son el resultado de invitaciones especiales a reconocidos expertos en la áreas abordadas. Se aceptan también presentaciones espontáneas que se someten a riguroso escrutinio que aquí sí se centra en el contenido.

---

## OBJETIVOS Y METAS

Existe gran retraso en el desarrollo de la divulgación de la ciencia y del pensamiento académico en general, en relación con los vertiginosos avances que se han registrado en estos últimos años. Esto ocasiona un pernicioso desfase entre la sociedad y sus científicos y académicos. Por ello resulta muy importante intentar llevar variados aspectos de la concomitante actividad al público, en formato accesible.

Esto constituye a la vez un desafío y una necesidad social. Para satisfacerla, *NÚCLEOS* propone que los propios científicos y académicos traten de ayudar a los ciudadanos a valorar su trabajo. *NÚCLEOS* pretende que nuestros autores-creadores acerquen a sus lectores una visión actualizada de recientes desarrollos, en particular aquellos que se originan en el país. Nos interesa ayudar a apreciar la relevancia del pensamiento creativo, acercándolo en forma directa desde y por sus protagonistas.

Fantásticas innovaciones y grandes sorpresas nos brindan hoy las ciencias y otras disciplinas académicas, con enormes consecuencias tecnológicas y humanas. Beneficia el desarrollo cultural de un pueblo que cierto tipo de investigaciones, hallazgos, descubrimientos y experimentos puedan ser transmitidos al público. Este forma parte de la sociedad de la Información pero, en general, conoce muy poco sobre ciencia y tecnología, a pesar de que estas estén cambiando al mundo, transformando de modo radical la vida cotidiana. *NÚCLEOS* intenta, de forma modesta pero esperamos que eficaz, que se acerquen al público elementos esenciales del desarrollo actual del conocimiento.

# EDITORIAL

Estimados lectores:

Les acercamos el número 8 de nuestra revista, con cuatro artículos de variada temática que esperamos han de concitar interés.

El primero discute un tema fundamental en la historia de Occidente: el de la representación parlamentaria como forma de poder político. Se estudia el problema comparando la fallida República de Weimar de la década de 1920 con las bases constitucionales de la exitosa República Federal alemana de hoy.

Por otra parte, recientemente se cumplieron 150 años de uno de los hitos más importantes en la historia de la Ciencia: la creación de la tabla periódica, base de la química. Usamos hoy en el planeta 71 millones de sustancias químicas, de las que solo menos de 400 son naturales. El resto son artificiales y no existirían sin la tabla. Este es el tema del segundo artículo.

El láser es hoy un dispositivo fundamental en nuestras vidas, con todo tipo de aplicaciones en la vida cotidiana. El tercer artículo nos habla sobre la crítica participación de un físico de Argentina en los comienzos de la tecnología del láser.

Finalmente, cerramos con un trabajo sobre el marco teórico-conceptual en el que se basa la cosmología contemporánea, el llamado modelo estándar cosmológico, que enfrenta hoy serios problemas.

En suma, los artículos que tiene el lector a la vista son:

- 1.** Representación parlamentaria por asociación y por partido: análisis comparado de la situación de la República de Weimar y la República Federal Alemana, de Claudio Contreras.
- 2.** Sesquicentenario de la tabla periódica de Mendeléyev, de Oscar E. Piro.
- 3.** Hacia una nueva historia del láser. Algo de “física ficción”: el láser “a lo Gaviola”, de Mario Garavaglia.
- 4.** El modelo estándar de la cosmología moderna en jaque, de Luis A. Anchordoqui.

Confiamos los disfruten.

**Dr. Ángel Luis Plastino**  
Director revista NÚCLEOS

# EL MODELO ESTÁNDAR DE LA COSMOLOGÍA MODERNA EN JAQUE

## LUIS A. ANCHORDOQUI

ES DOCTOR EN FÍSICA (UNLP). EN 1999 RECIBIÓ EL CARGO DE INVESTIGADOR CIENTÍFICO ASOCIADO EN LA UNIVERSIDAD DE NORTHEASTERN. EN 2006 DEJÓ BOSTON Y ACEPTÓ UN PUESTO DE PROFESOR EN LA UNIVERSIDAD DE WISCONSIN MILWAUKEE. COMENZÓ COMO PROFESOR ASISTENTE (TITULARIDAD) Y LUEGO, EN 2010, FUE ASCENDIDO A PROFESOR ASOCIADO (TITULARIDAD). DESDE 2014, ANCHORDOQUI HA ESTADO EN LEHMAN COLLEGE, CITY UNIVERSITY OF NEW YORK, DONDE TIENE EL RANGO DE PROFESOR TITULAR.

**RESUMEN.** El modelo estándar de la cosmología moderna permite la descripción de una amplia gama de datos astronómicos y astrofísicos. Sin embargo, a pesar de este éxito, varias discrepancias han persistido a lo largo del tiempo. La más sorprendente es la discrepancia surgida entre la observación y los valores inferidos de la constante de Hubble al usar el modelo cosmológico. Dicha constante parametriza la tasa de expansión del cosmos y, por lo tanto, proporciona pistas sobre el contenido de energía en el universo primitivo. En este artículo examinamos el origen de esta discrepancia y exploramos posibles soluciones para superar el problema.

**ABSTRACT.** The standard model of modern cosmology provides a description of a wide range of astronomical and astrophysical data. But, notwithstanding its success, a number of discrepancies have persisted over time, the most remarkable of which is the discrepancy between observations and the predicted value of the Hubble constant using a cosmological model. The Hubble constant describes the rate of expansion of the cosmos, and hence provides clues about its energy content. In this work the origin of such discrepancy is examined, and possible solutions to overcome the problem are proposed.

**PALABRAS CLAVES.** MODELO ESTÁNDAR, COSMOLOGÍA, CONSTANTE DE HUBBLE, ENERGÍA OSCURA

**KEYWORDS.** STANDARD MODEL, COSMOLOGY, HUBBLE CONSTANT, DARK ENERGY

La cosmología es una ciencia cuyo objetivo principal es comprender el origen y la evolución de las estructuras que observamos hoy en nuestro universo. El campo de la cosmología ha hecho desarrollos impresionantes en la última década. Ahora se acepta ampliamente que la cantidad de materia visible, compuesta mayoritariamente por bariones (protones y neutrones) y tres sabores de neutrinos levógiros (es decir, un estado de helicidad  $\nu_L$  junto con sus antineutrinos dextrógiros  $\bar{\nu}_R$ ), solo forma una pequeña parte ( $\sim 5\%$ ) de la estructura actual del universo (Tanabashi *et al.* 2018). Cabe añadir que existen sólidas evidencias observacionales que sugieren que la mayor parte del universo está constituido por las componentes de un sector oscuro de naturaleza aún desconocida.

Si bien se desconoce la naturaleza del sector oscuro, en varios aspectos es posible hacer estimaciones fundamentadas haciendo uso de sus efectos gravitacionales. Observaciones astronómicas muy meticulosas han permitido identificar dos tipos de comportamientos diferentes que se corresponden con la materia oscura, que constituye el 26% de la composición del universo, y la energía oscura que completa el 69% restante (Tanabashi *et al.*, 2018). La evidencia que respalda la existencia de materia oscura se relaciona principalmente con anomalías locales en el movimiento de objetos o estructuras visibles en ciertas regiones del universo. Por otra parte, la energía oscura se manifiesta a nivel global con evidencia observacional que avala una expansión acelerada del universo, la cual actúa de manera opuesta a la gravedad ordinaria de los objetos masivos, generando un efecto “antigravitatorio”.

Por medio del efecto gravitacional que el sector oscuro pareciera tener sobre la materia visible, es posible inferir propiedades sobre el comportamiento de la materia y la energía oscura. Es costumbre asumir que la materia oscura es una partícula perfectamente fría y estable, y que además no tiene interacciones. La constante cosmológica  $\Lambda$  es la suposición más económica y elegante que existe en la actualidad para describir el comportamiento de la energía oscura (Peebles y Ratra, 2003). La materia oscura fría (MOF) y la constante cosmológica constituyen la columna vertebral del modelo estándar de la cosmología moderna:  $\Lambda$ MOF. Con estos supuestos podemos estimar cómo se vería el modelo  $\Lambda$ MOF en el universo primitivo y hacer predicciones para confrontar con el experimento.

Si bien se sabe que el universo no tiene ningún borde, existe un borde en el universo observable ya que solo podemos ver hasta cierto punto debido a que la luz viaja a una velocidad finita de alrededor de 300 millones de metros por segundo ( $c = 3 \times 10^8$  m/s). En otras palabras, las señales que nos llegan desde objetos distantes fueron emitidas mucho tiempo atrás, por lo que al mirar objetos distantes estamos mirando hacia el pasado. Suponiendo que el universo es isotrópico, la distancia al borde del universo observable es aproximadamente la misma en todas las direcciones. Es decir, el universo observable tiene un volumen esférico (una bola) centrado en el observador. Cada ubicación en el universo tiene su propio universo observable, que puede superponerse o no con el centrado en la Tierra. El borde del universo observable es también llamado horizonte, ya que proporciona una barrera de lo que puede ser observado en cada instante de tiempo. Más allá de este borde existirán partículas cuya luz todavía no ha tenido tiempo de alcanzarnos, debido a que la edad del universo es finita. Todo suceso actual o pasado situado por detrás de este horizonte de eventos, no forma parte del universo observable actual (aunque puede ser visible en el futuro cuando las señales luminosas procedentes de ellos alcancen nuestra posición futura).

Mirando hacia el espacio profundo y, por lo tanto, viajando hacia atrás en el tiempo, es posible observar que, durante los últimos 13.8 billones de años, por donde quiera que miremos existe una radiación electromagnética cuasiuniforme e isotrópica. Esta radiación, que podemos observar hoy en día en el rango de las microondas, es responsable de una pequeña parte (alrededor del 1%) de la estática que aparece en las pantallas de los televisores analógicos al sintonizar un canal en blanco. Para comprender el origen de esta radiación electromagnética es necesario repasar brevemente la historia del universo.

La evidencia observacional indica que el universo comenzó con una gran explosión en la que se originaron el tiempo y el espacio, así como también todas las partículas fundamentales (y sus correspondientes antipartículas). Debido a las altas temperaturas, en los primeros momentos después de la explosión, el universo era un plasma caliente, denso y opaco que contenía materia y radiación (partículas “relativistas” que se mueven a la velocidad de la luz o cerca de ella, como los fotones y los neutrinos) en interacción. En los primeros tres minutos el universo se expandió lo suficiente como para que su temperatura bajara desde  $10^{32}$  K hasta aproximadamente  $10^9$  K<sup>1</sup>. Este enfriamiento rápido permitió que, bajo el efecto de la fuerza nuclear, protones y neutrones se asociaran para formar núcleos atómicos simples a través del proceso llamado nucleosíntesis primordial. La fusión de estos núcleos ocurre aproximadamente antes de los primeros veinte minutos. Esto se corresponde con el rango de temperatura para que el plasma primordial fuese lo suficientemente frío como para que el deuterio (asociación de un protón y un neutrón) sobreviviera las colisiones con los fotones, pero a la vez lo suficientemente caliente y denso como para que ocurrieran reacciones de fusión a una velocidad significativa que dieron origen a estructuras cada vez más complejas, como por ejemplo el helio-3 (dos protones y un neutrón) y el helio-4 (dos protones y dos neutrones). La nucleosíntesis primordial ofrece la sonda confiable más profunda del universo primitivo. Las predicciones de las abundancias de deuterio y helio-4, están en buen acuerdo con las abundancias primordiales inferidas de los datos de observación.

A medida que el universo se fue expandiendo, el enfriamiento adiabático causó que el plasma se enfriara por debajo de los  $3 \times 10^3$  K, lo que permitió que protones y electrones se unieran para formar los primeros átomos constituyentes de la materia neutra que conocemos hoy en día (los átomos tienen igual número de carga positiva y negativa). Esto ocurrió alrededor de 380 000 años (380 kyr) después de la explosión. A partir de ese momento, al no haber carga eléctrica neta, los fotones lograron por primera vez propagarse libremente sin interactuar con las partículas cargadas que ahora formaban sistemas neutros (los átomos). A medida que el universo continuó expandiéndose, la temperatura de estos fotones disminuyó, lo cual explica por qué hoy en día es de apenas 3 K, correspondiéndose con el rango de las microondas en el espectro electromagnético.

Desde el momento de la explosión y hasta unos 47 kyr después, la densidad de radiación en el universo era mayor que la densidad de materia. Sin embargo, en un universo en expansión, la densidad de radiación disminuye más rápido que la densidad de materia, así que cuando la temperatura descendió hasta unos veinte mil grados kelvin, el universo comenzó a ser dominado por la materia. Claro está que, si bien la densidad de energía de la materia era mayor que la de la radiación, la densidad de energía en el plasma de bariones y fotones estaba dominada por la radiación, por lo que el plasma era relativista. La alta presión de este plasma provocó oscilaciones. El potencial gravitacional de la materia oscura era la fuerza impulsora y la presión la fuerza restauradora. Más concretamente, las oscilaciones se produjeron de la siguiente manera: las regiones de mayor densidad de materia oscura causaban una mayor atracción gravitacional. En consecuencia, la densidad del plasma también aumentaba en tales regiones. Pero a medida que el plasma fluía hacia esa región, se comprimía. El plasma comprimido tenía una presión interna más alta, principalmente debido a los fotones, pero también se transfería a los bariones a través de la interacción electromagnética. Una vez que la presión había aumentado lo suficiente, tendía a alejar a los bariones, lo que conducía a una densidad de energía inferior a la media en esa región. La presión del plasma también disminuía y, por lo tanto, por su atracción gravitacional, la materia oscura podía nuevamente atraer más plasma hacia la región, lo que aumentaba la densidad del plasma, y el ciclo comenzaba nuevamente. Las oscilaciones de plasma resultantes son muy similares a las ondas de sonido: fluctuaciones periódicas de densidad en el aire. Por lo tanto, a estas oscilaciones del plasma se las conoce como “oscilaciones acústicas.” Es decir, tal como ocurre en el aire, una pequeña perturbación en la densidad del plasma primordial se habría propagado como una onda de presión: un tren de compresiones y expansiones (o rarefacciones) donde la presión era más alta o más baja que la media, respectivamente. Tanto la materia ordinaria como la materia oscura suministraban masa al gas primordial y, por ende, ambas generaban la atracción gravitacional, pero solo la materia ordinaria sufría compresiones sónicas y rarefacciones. Las compresiones calentaron el plasma y las rarefacciones lo enfriaron, por lo que cualquier perturbación en el universo primitivo resultó en un patrón cambiante de fluctuaciones de temperatura.

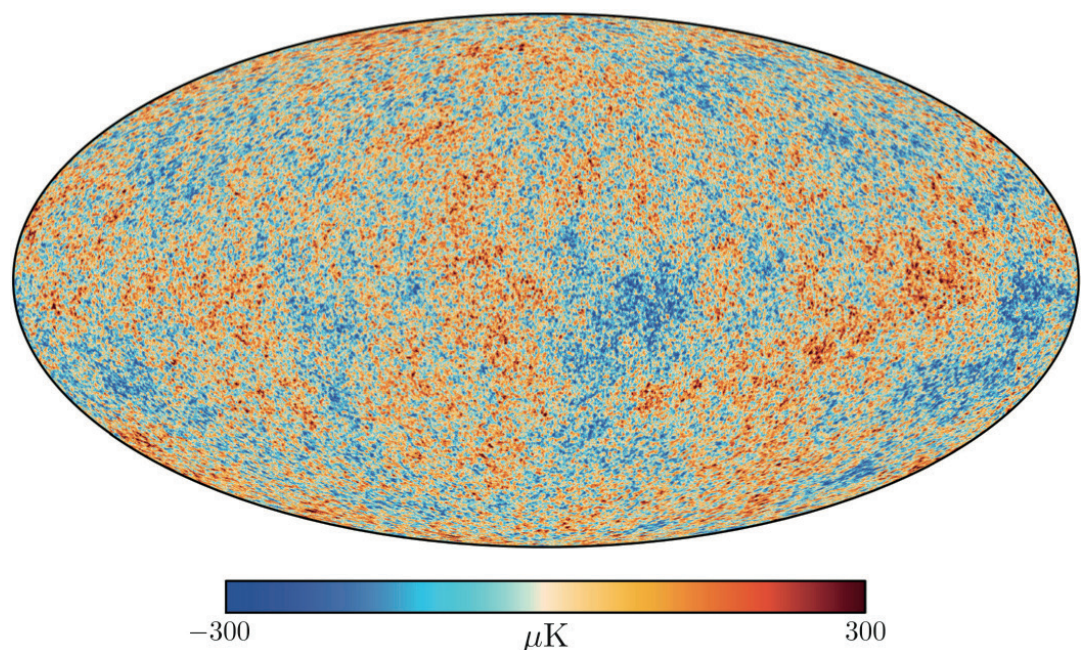
1. Para tener en mente una escala comparativa, notemos que una temperatura de  $10^9$  K  $\equiv$  billón de grados por encima del cero absoluto (o grados kelvin), es 70 veces la del interior del Sol.

Las ondas sonoras viajan a la velocidad del sonido  $c_s$ . Para ondas de sonido ordinarias en el aire, esto equivale a alrededor de trescientos metros por segundo. Por el contrario, para las ondas de sonido del plasma en el universo primitivo, la velocidad del sonido equivale aproximadamente al 60 % de la velocidad de la luz. La velocidad del sonido nos dice cuán rápido las perturbaciones de densidad existentes viajan a través del espacio. Pero también nos dice cuánto tiempo lleva excitar oscilaciones específicas: para una región de extensión espacial  $L$  se necesita un tiempo  $L/c_s$  para establecerse en un estado coherente de oscilación en el que la densidad del plasma aumenta y disminuye de la misma manera a lo largo de la región. Esto conduce a un límite superior para la extensión espacial de cualquier oscilación acústica en el universo primitivo. La razón para la existencia de este borde es que solo hubo un tiempo limitado, los 380 000 mil antes mencionados, para que estas oscilaciones se excitaran en el plasma cósmico. Después de ese período de tiempo, las partículas del plasma se combinaron para formar átomos estables. Dado que el fuerte acoplamiento electromagnético entre fotones y materia dependía de la presencia de cargas eléctricas libres (los fotones son constantemente absorbidos y reemitidos por partículas cargadas), la formación de átomos nos lleva a que el fuerte acoplamiento de fotones y materia llegara a su fin. Hubo una caída abrupta de la presión y cesaron las oscilaciones.

Considerando el tiempo cósmico en que se formaron los átomos es sencillo estimar que las oscilaciones coherentes más grandes posibles tenían una extensión espacial de unos 228 000 años luz (o 70 000 parsecs). Simplemente no había tiempo para más: con la velocidad del sonido al 60 % de la velocidad de la luz y un tiempo de aproximadamente 380 000 años, las regiones más grandes en las que podrían desarrollarse oscilaciones coherentes tenían una extensión espacial de  $0,6 \times 380 \text{ kyr} \sim 230 \text{ 000 años luz}$ . A este límite superior se lo conoce como el “horizonte acústico”.

La nucleosíntesis primordial y el fondo cósmico de microondas (FCM) constituyen los puntos de referencia más antiguos que pueden ser verificados observacionalmente. Nos proporcionan un experimento para confrontar las predicciones de  $\Lambda$ MOF (Jungman *et al.*, 1996). En efecto, usando el modelo de  $\Lambda$ MOF como se hubiera visto poco antes de la última dispersión de fotones, es posible predecir el tamaño de las fluctuaciones físicas en el plasma. Las predicciones del tamaño de estas fluctuaciones físicas pueden ser comparadas con observaciones del espectro de potencia angular de las fluctuaciones de temperatura en el FCM, que se muestran en la Figura 1. Al hacer que la comparación funcione podemos calibrar los parámetros libres del modelo  $\Lambda$ MOF (que incluyen el tamaño preciso del horizonte acústico, la densidad bariónica y la densidad de MOF) y también podemos verificar algunas de las suposiciones. Una vez que todos los parámetros son calibrados, permitimos que el modelo evolucione como la física nos dice que debería. Todo este proceso nos permite pronosticar la historia de expansión del universo de acuerdo con  $\Lambda$ MOF y culmina con la predicción sobre una propiedad fundamental del universo: cuán rápido debería expandirse el universo al día de hoy, lo que llamamos la constante de Hubble:  $H_0 = 67 \pm 4 \text{ o } 5 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$  (Aghanim *et al.*, 2018). Es importante tener en cuenta que kilómetros y megaparsecs son unidades de longitud, por lo que el producto de uno con el inverso del otro es un número adimensional

**Figura 1.** Las anisotropías del FCM según lo observado por la misión Planck de la ESA. El FCM es una instantánea de la luz más antigua de nuestro cosmos, impresa en el cielo cuando el universo tenía solo 380 000 años. La figura muestra pequeñas fluctuaciones de temperatura que se corresponden con regiones de densidades ligeramente diferentes. Tomada de ESA, Planck Collaboration.





y, por lo tanto, la constante de Hubble tiene dimensiones de tasa de expansión por unidad de tiempo.<sup>2</sup> La predicción de la constante de Hubble que nos provee el modelo de  $\Lambda$ MOF ajustado a las mediciones de Planck es increíblemente precisa. Por lo tanto, una prueba de principio a fin muy eficaz de toda esta historia del modelo cosmológico  $\Lambda$ MOF y en particular de las componentes del sector oscuro en los supuestos que hicimos al tratar de medir la tasa de expansión del universo con una precisión comparable.

La expansión del universo hace que todas las galaxias se alejen de un observador dado (por ejemplo, en la Tierra), y cuanto más lejos están, más rápido se alejan. Dicho de otro modo, las galaxias se alejan unas de otras con una velocidad proporcional a la distancia entre ellas (Hubble, 1929). La llamada ley de Hubble describe la relación entre la distancia  $d$  a un objeto dado y su velocidad de recesión  $v$ :

$$H_0 = \frac{(\text{velocidad de recesión})}{(\text{distancia al objeto})} = \frac{v}{d} \quad (1)$$

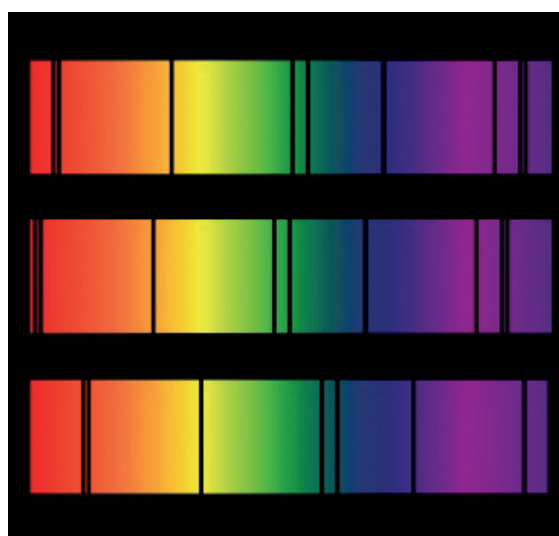
Ahora, un punto que vale la pena señalar en esta coyuntura es que las galaxias no siguen exactamente la ley de Hubble. Además de la expansión del universo, los movimientos de las galaxias se ven afectados por la gravedad de estructuras cercanas, como por ejemplo la atracción entre la Vía Láctea y la galaxia de Andrómeda. Por consiguiente, cada galaxia tiene una velocidad peculiar, donde se usa esta identificación en el sentido de “individuo” o “específico de sí mismo”. Por lo tanto, la velocidad de recesión de una galaxia está dada por la relación

$$v = H_0 \times d + v_{\text{pec}}, \quad (2)$$

donde  $v_{\text{pec}}$  es la velocidad peculiar de la galaxia a lo largo de la línea de la visión. Si las velocidades peculiares pudieran tener cualquier valor, entonces esto haría la ley de Hubble irrelevante. Sin embargo, las velocidades peculiares son típicamente de unos 300 kilómetros por segundo, y rara vez superan los mil kilómetros por segundo. Por lo tanto, la ley de Hubble se vuelve precisa para las galaxias muy muy lejanas, cuando el producto entre  $H_0$  y  $d$  es mucho más grande que mil kilómetros por segundo.

La velocidad de recesión de una galaxia puede medirse usando el llamado “corrimiento al rojo” de la luz que emite. En un universo en expansión las ondas de luz se estiran (aumentando así su longitud de onda) desplazándose cada vez más hacia el rojo en el espectro electromagnético debido al efecto Doppler. Dicho efecto puede ser medido al tomar la luz emitida por una galaxia y descomponerla en un arcoíris para medir la cantidad de luz con que contribuye cada color (a cada color le corresponde una longitud de onda y una frecuencia diferente). Debido a que conocemos los elementos químicos que están presentes en las galaxias, tales como hidrogeno y oxígeno, sabemos que estas emiten luz en determinadas longitudes de onda. Así es que, en el espectro observado de las estrellas, las longitudes de onda características aparecen desplazadas al rojo con respecto al espectro original (ver Figura 2), pudiendo así determinar la velocidad de recesión de las estrellas y/o de las de las galaxias en las que residen. La razón del cambio en la longitud de onda debido al corrimiento Doppler se llama *redshift* o corrimiento al rojo, y las galaxias con un alto corrimiento al rojo tienen una alta velocidad de recesión.

La determinación de la distancia a las galaxias lejanas es más compleja. Con el transcurso de los años, se han encontrado diferentes estimadores de distancias. Uno de ellos es una clase de estrellas conocidas como variables Cefeidas. Las Cefeidas son estrellas gigantes pulsantes que se pueden



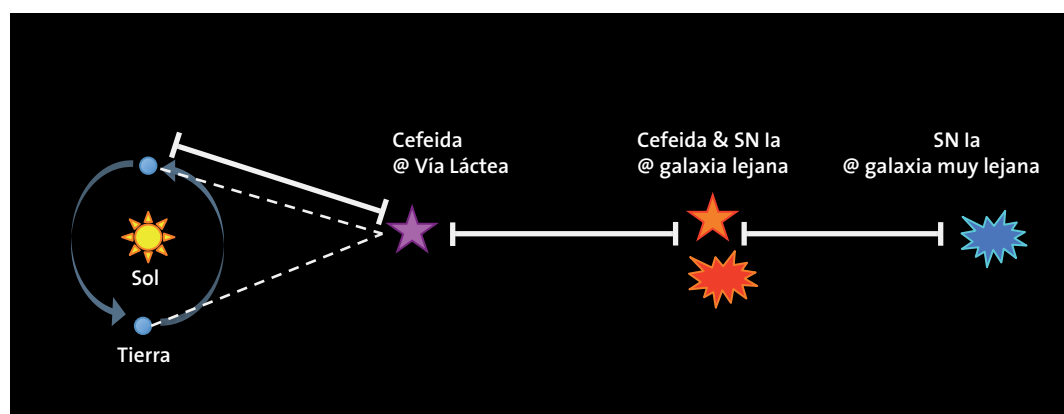
**Figura 2.** El panel superior muestra las posiciones normales de las líneas espectrales (oscuras) de una fuente en reposo. El panel central muestra el espectro cuando la fuente se aleja del observador. Las líneas espectrales se ven desplazadas hacia la izquierda (corrimiento al rojo). El panel inferior muestra el espectro cuando la fuente se mueve hacia el observador. Las líneas espectrales se ven desplazadas hacia la derecha (corrimiento al azul). Tomada de NASA.

2. Un megaparsec es una unidad de distancia que equivale a 3,26 millones de años luz, una magnitud conveniente cuando consideramos la estructura a gran escala del universo.

ver en galaxias distantes. Son cien veces más luminosas que el sol y la frecuencia con la que pulsan se correlaciona muy fuertemente con su luminosidad. En efecto, existe una fuerte correlación entre el brillo intrínseco y el período de pulsación de las estrellas variables Cefeidas: estrellas intrínsecamente más brillantes poseen períodos de variación más largos. De este modo, observando el período de cualquier Cefeida, se puede deducir su brillo intrínseco y así, observando su brillo aparente, calcular su distancia. De esta forma pueden usarse las estrellas variables Cefeidas como una de las “candelas estándar” del universo, tanto como indicadores de distancia directamente, como así también para calibrar (o seleccionar el punto cero de) otros indicadores de distancias. El nombre Cefeida proviene de la estrella  $\delta$  Cephei en la constelación de Cefeo; fue el primer ejemplo conocido de este particular tipo de estrellas variables y es un objeto fácilmente visible a simple vista.

Para medir la distancia a galaxias muy lejanas el método más preciso es conocido como escalera de distancia. La idea es construir una escalera de distancia simple con escalones sólidos. El primer escalón es puramente geométrico, basado en el método de paralaje para medir la distancia a las variables Cefeidas en nuestra Vía Láctea (o en galaxias vecinas). Este escalón, que generalmente se corresponde con escalas de kiloparsec o megaparsec, puede interpretarse como el trazado de una cinta métrica a estrellas cercanas. Ahora bien, en algunas galaxias podemos ver tanto Cefeidas como supernovas de tipo Ia (SNs Ia). Las SNs Ia se producen cuando una enana blanca, el “cadáver” de una estrella similar al Sol, absorbe material de una estrella compañera y alcanza una masa crítica (llamada límite de Chandrasekhar que es equivalente a 1,39 masas solares), lo que desencadena una explosión cuya luminosidad será, dado su origen, similar en casi todos los casos. Esta uniformidad y el hecho de que el brillo alcanza unos mil millones de luminosidades solares convirtió a las SNs Ia en los objetos idóneos para medir distancias a galaxias muy lejanas. Para fabricar nuestro segundo escalón entonces observamos las galaxias que recientemente albergaron una SN Ia y buscamos variables Cefeidas en esas galaxias. La única suposición para fabricar este escalón es que las Cefeidas y las SNs Ia se encuentren en el mismo lugar, y por lo tanto ambas estén a la misma distancia. Esta calibración generalmente se hace en galaxias que están entre 10 y 40 megaparsecs de distancia. En el tercer y último escalón, se calibran las SNs Ia que se encuentran en galaxias muy distantes (en el llamado flujo del Hubble), por lo que su desplazamiento hacia el rojo (que es aproximadamente 0,1) nos permite determinar  $H_0$ . El uso de SNs Ia como “candelas estándar” nos permite medir distancias de hasta gigaparsecs. El ciclo de todo este proceso que permite la medición de distancias astronómicas se muestra gráficamente en la Figura 3.

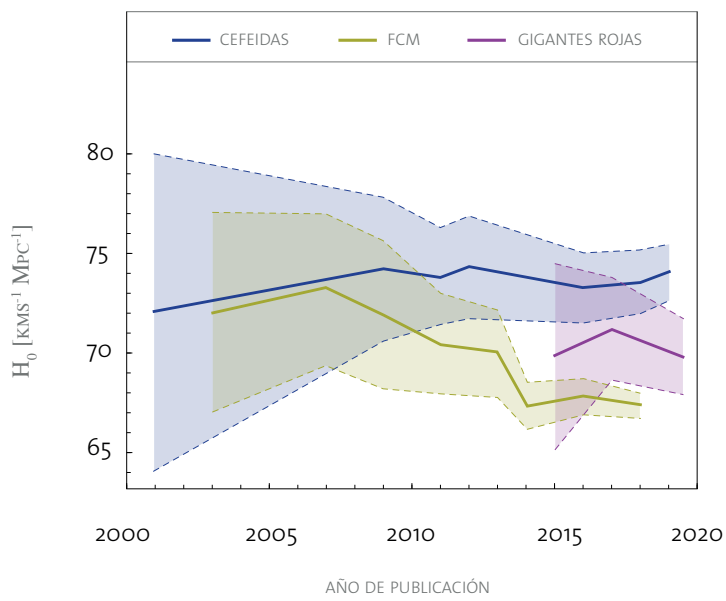
**Figura 3.** Representación esquemática de la escalera de distancia.



En resumen, la escalera de distancia nos permite derivar un resultado empírico, ya que no hay ningún tipo de *física* involucrada; es decir, no hay suposiciones del modelo astrofísico ni tampoco del modelo cosmológico  $\Lambda$ MOF. Siempre que las mediciones de distancia se obtengan de una manera consistente, al propagar también de manera precisa los errores estadísticos y sistemáticos (y en particular la covarianza entre los errores), podemos obtener un valor preciso de  $H_0$  para comparar con la predicción de  $\Lambda$ MOF. Usando el método de la escalera de distancias el grupo SHoES ha observado un valor  $H_0 = 74,03 \pm 1,42 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$  (Riess *et al.*, 2019), que se encuentra a más de  $5,3\sigma$  (o desviaciones estándar) de la predicción de  $\Lambda$ MOF (Verde *et al.*, 2019).

El “punto de la rama de gigantes rojas” (PRGR) es un conjunto de estrellas que se encuentran en un punto crucial en su evolución. Las estrellas que se encuentran en la llamada “rama de las gigantes rojas” son estrellas que casi han agotado el hidrógeno en sus núcleos. La siguiente etapa de su vida

se desencadena cuando comienzan a fusionar helio en sus núcleos. Las estrellas en el PRGR son las que acaban de comenzar esta etapa de quema de helio, y se pueden distinguir por su enrojecimiento y brillo característicos. Estas particularidades del conjunto PRGR lo hacen muy adecuado para medir distancias, ya que sabemos cuán brillantes sus estrellas deben aparecer a cierta distancia. La medición más reciente de la constante de Hubble,  $H_0 = 69,8 \pm 1,9 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ , está basada en una calibración de la rama de gigantes rojas (o más precisamente del conjunto PRGR) aplicada a SNe Ia (Freedman *et al.*, 2019). El valor obtenido es compatible (a  $1,2\sigma$ ) con el valor estimado por el modelo cosmológico. A pesar de usar SNe Ia, este método es independiente del método de la escalera de distancias que usa Cefeidas y SNe Ia. El valor de  $H_0$  que resulta de la calibración a Cefeidas se encuentra también a menos de  $2\sigma$  del nuevo valor. En la Figura 4 se muestra la evolución de las mediciones de la constante de Hubble en función del año de publicación. Es importante notar que también se han llevado a cabo varias mediciones independientes de  $H_0$ , aunque utilizando métodos un tanto dependientes del modelo astrofísico (Wong *et al.*, 2020). La tensión entre las mediciones y las predicciones de  $H_0$  se extiende al estudio del conjunto universal de datos estadísticamente independientes que muestra una discrepancia de  $4,4\sigma$  (Verde *et al.*, 2019). La discrepancia entre que tan rápido parece expandirse el universo y que tan rápido esperamos que se expanda ha puesto al modelo estándar de la cosmología moderna en jaque. Podría ser que la tensión entre el valor observado y predicho de  $H_0$  no sea más que un error de medición. Pero si la discrepancia es real, esta pareciera indicar que el universo primitivo se comportó de manera diferente a la predicha por  $\Lambda$ MOF. Ahora bien, ¿cómo podemos solucionar el problema? Está claro que una dosis extra de radiación en el universo primitivo podría conciliar los valores en conflicto de la constante de Hubble, ya que la presión externa de esta radiación habría acelerado la expansión del universo antes de que se formara la luz observada del FCM.



**Figura 4.** Mediciones de la constante de Hubble en función de la fecha de publicación. Las líneas continuas indican la evolución de la media. Las regiones sombreadas abarcan valores dentro de una desviación estándar de la media. El color azul representa valores de  $H_0$  determinados en el universo cercano con una calibración basada en la escala de distancia a Cefeidas aplicada a SNe Ia. La primera medida es de Hubble Key Project (Freedman *et al.*, 2001), las siguientes dos mediciones son del grupo SHoES (Riess *et al.*, 2009; Riess *et al.*, 2011), la tercera medición es del programa Carnegie Hubble, que utilizó datos del infrarrojo para recalibrar los datos del Hubble Key Project (Freedman *et al.*, 2012), y las últimas tres mediciones son también del grupo SHoES (Riess *et al.*, 2019; Riess *et al.*, 2016; Riess *et al.*, 2018). El color marrón indica valores derivados de  $H_0$  basados en el modelo  $\Lambda$ MOF y medidas del FCM. Las primeras cinco medidas son de la sonda espacial WMAP (Spergel *et al.*, 2003; Spergel *et al.*, 2007; Komatsu *et al.*, 2009; Komatsu *et al.*, 2011; Hinshaw *et al.*, 2013), las dos siguientes son de la misión Planck (Ade *et al.*, 2014; Ade *et al.*, 2016), luego hay una estimación realizada usando el mapeo de energía oscura (Abbott *et al.*, 2018) y el último punto también pertenece a la misión Planck (Aghanim *et al.*, 2018). El color rojo indica medidas locales de  $H_0$  basadas en una calibración de la rama de gigantes rojas aplicada a SNe Ia (Freedman *et al.*, 2019; Jang y Lee, 2015; Jang y Lee, 2017).

Al principio de la discusión sugerimos que la manera más simple de explicar la energía oscura es la constante cosmológica  $\Lambda$ , la energía del espacio mismo, con una densidad constante en todas partes. Pero, ¿qué ocurría si la cantidad de energía oscura en el universo no es constante? Un breve período dominado por la energía oscura en el universo primitivo (llamada energía oscura temprana) en principio podría reconciliar las mediciones de  $H_0$  (Poulin *et al.*, 2019). De manera alternativa, uno podría postular la existencia de tres sabores de neutrinos dextrógiros  $\nu_R$  junto con sus antineutrinos levógiros  $\bar{\nu}_L$  para restaurar la simetría quiral del modelo estándar de la física de partículas (Anchordoqui y Goldberg, 2012). Sin embargo, también debemos tener en cuenta que el agregado de partículas relativistas puede distorsionar la abundancia de los elementos que fueron sintetizados durante la nucleosíntesis primordial (Steigman *et al.*, 1977). En particular, la abundancia de núcleos de helio-4 depende de la abundancia relativa de neutrones  $n$  y protones  $p^+$  al momento de la síntesis del helio. Cuando el universo tenía menos de un segundo de edad, los protones y los neutrones podían absorber y emitir neutrinos libremente para transformarse entre sí. La continua conversión de protones en neutrones y viceversa estaba gobernada por los siguientes procesos de la llamada interacción débil,

$$p^+ + \bar{\nu} \rightleftharpoons n + e^+ \quad \text{y} \quad p^+ + e^- \rightleftharpoons n + \nu, \quad (3)$$

donde  $e^-$  denota un electrón y  $e^+$  su antipartícula, el positrón, y donde la doble flecha indica que la reacción puede suceder en ambos sentidos. Estas transmutaciones eran igual de rápidas en cualquier dirección, por lo que en el plasma primordial había la misma cantidad de protones que de neutrones. Pero a medida que la temperatura del universo disminuyó, la energía se volvió escasa para mantener las interacciones débiles en equilibrio. Debido a que se necesita más energía para producir un neutrón que un protón, que es un poco menos masivo, la cantidad de neutrones comenzó a disminuir en relación con la cantidad de protones. Cuando el universo alcanzó la edad de un segundo, y su temperatura estaba por debajo de los diez mil millones de grados kelvin, la expansión se hizo tan rápida que las transmutaciones entre las poblaciones (ahora desiguales) de protones y neutrones no pudieron mantener el ritmo. Esto dejó una proporción particular de neutrones a protones en el universo primitivo. Tres minutos después, las reacciones nucleares los transformaron en una abundancia cósmica definida de helio. De este modo, la abundancia que hoy observamos de helio-4 depende de manera crucial de la proporción entre protones y neutrones antes de que comiencen las reacciones nucleares. Esto, a su vez, depende de que tan rápido se estaba expandiendo el universo en ese momento. Y aquí es donde la cantidad de neutrinos entra en la historia. Cada especie de neutrino relativista se suma a la densidad total del universo y aumenta la velocidad de expansión. Cuanto más rápida sea la expansión, más rápido se terminan las transmutaciones y mayor será el número de neutrones sobrevivientes. Más neutrones significarían una mayor abundancia de helio-4. Combinando datos del FCM y mediciones de la abundancia de helio-4 es posible obtener límites a la cantidad de radiación que uno puede agregar en el universo primitivo (Aghanim *et al.*, 2018). Dichos límites ponen severas restricciones a los modelos alternativos a  $\Lambda$ MOF (Anchordoqui y Pérez Bergliffa, 2019). Los datos colectados hasta el momento sugieren que la solución más convincente parecería ser la existencia de tres  $\nu_r + \bar{\nu}_l$ . Sin embargo, si las mediciones futuras del parámetro Hubble tienen barras de error más pequeñas, pero con el mismo valor central, los modelos de energía oscura temprana podrían verse favorecidos ya que permiten valores mayores para  $H_0$  (Agrawal *et al.*, 2019a). La solución al problema de  $H_0$  también podría manifestarse en un cambio en la tasa de expansión actual, como por ejemplo introduciendo una nueva interacción entre la energía y la materia oscura (Agrawal *et al.*, 2019b; Di Valentino *et al.*, 2019). Sin embargo, aun teniendo en consideración todas las libertades adicionales mencionadas, la mayoría de los modelos cosmológicos alternativos a  $\Lambda$ MOF solo reducen la tensión en la constante de Hubble en lugar de eliminarla (Benevento *et al.*, 2020). Predicen una tasa de expansión cósmica más rápida que  $\Lambda$ MOF, pero aún no es lo suficientemente rápida como para igualar las observaciones de supernovas y otros objetos astronómicos. En principio, con modelos combinados uno podría encontrar una solución global (Anchordoqui *et al.*, 2019; Anchordoqui *et al.*, 2020).

En los próximos años, el telescopio Euclides mapeará meticulosamente cómo la gravedad y la energía oscura han moldeado la evolución cósmica (Laureijs *et al.*, 2011). Los nuevos datos experimentales tal vez nos permitan descartar definitivamente al  $\Lambda$ MOF modelo. Las observaciones de Euclides también nos permitirán hacer un testeo exhaustivo y mucho más restrictivo de todos los modelos alternativos propuestos.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abbott, T. M. C. *et al.* [DES Collaboration] (2017). Dark Energy Survey year 1 results: A precise  $H_0$  estimate from DES Y1, BAO, and D/H data, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* 480, no. 3, 3879. doi:10.1093/mnras/sty1939
- Ade, P. A. R. *et al.* [Planck Collaboration] (2014). Planck 2013 results XVI: Cosmological parameters, *Astron. Astrophys.* 571, A16. doi:10.1051/0004-6361/201321591
- Ade, P. A. R. *et al.* [Planck Collaboration] (2016). Planck 2015 results XIII: Cosmological parameters, *Astron. Astrophys.* 594, A13. doi:10.1051/0004-6361/201525830
- Aghanim, N. *et al.* [Planck Collaboration] (2018). Planck 2018 results VI: Cosmological parameters arXiv:1807.06209[astro-ph.CO].
- Agrawal, P., Cyr-Racine, F. Y., Pinner, D. y Randall, L. (2019). Rock 'n' roll solutions to the Hubble tension, [arXiv:1904.01016 [astro-ph.CO]].
- Agrawal, P., Obied, G. y Vafa, C. (2019).  $H_0$  tension, Swamp-land conjectures and the epoch of fading dark matter. doi:10.1103/PhysRevD.103.043523
- Anchordoqui, L. A. y Goldberg, H. (2012). Neutrino cosmology after WMAP 7-year data and LHC first Z, bounds, *Phys. Rev. Lett.* 108, 081805. doi:10.1103/PhysRevLett.108.081805
- Anchordoqui, L. A. y Perez Bergliaffa, S. E. (2019). Hot thermal universe endowed with massive dark vector fields and the Hubble tension, *Phys. Rev. D* 100, no.12, 123525. doi:10.1103/PhysRevD.100.123525
- Anchordoqui, L. A., Antoniadis, I., Lust, D., Soriano, J. F. y Taylor, T. R. (2020).  $H_0$  tension and the String Swampland, *Phys. Rev. D* 101, 083532. doi:10.1103/PhysRevD.101.083532
- Anchordoqui, L. A., Antoniadis, I., Lust, D., Soriano, J. F. y Taylor, T. R. (2020). Dark energy, Ricci-nonflat spaces, and the Swampland. doi:10.1016/j.physletb.2021.136199
- Benevento, G., Hu, W. y Raveri, M. (2020). Can late dark energy transitions raise the Hubble constant? *Phys. Rev. D* 101, no.10, 103517. doi:10.1103/PhysRevD.101.103517
- Di Valentino, E., Ferreira, R. Z., Visinelli, L. y Danielsson, U. (2019). Late time transitions in the quintessence field and the  $H_0$  tension, *Phys. Dark Univ.* 26, 100385. doi:10.1016/j.dark.2019.100385
- Freedman, W. L. *et al.* (2019). The Carnegie-Chicago Hubble Program VIII: An independent determination of the Hubble constant based on the tip of the red giant branch, doi:10.3847/1538-4357/ab2f73
- Freedman, W. L. *et al.* [HST Collaboration] (2001). Final results from the Hubble Space Telescope key project to measure the Hubble constant, *Astrophys. J.* 553, 47. doi:10.1086/320638
- Freedman, W. L., Madore, B. F., Scowcroft, V., Burns, C., Monson, A., Persson, S. E., Seibert, M. y Rigby, J. (2012). Carnegie Hubble Program: A mid-infrared calibration of the Hubble Constant, *Astrophys. J.* 758, 24. doi:10.1088/0004-637X/758/1/24
- Hinshaw, G. *et al.* [WMAP Collaboration] (2013). Nine-year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) observations: Cosmological parameter results, *Astrophys. J. Suppl.* 208, 19. doi:10.1088/0067-0049/208/2/19
- Hubble, E. (1929). A relation between distance and radial velocity among extra-galactic nebulae, *Proc. Nat. Acad. Sci.* 15, 168. doi:10.1073/pnas.15.3.168
- Jang, I. S. y Lee, M. G. (2015). The tip of the red giant branch distances to type Ia supernova host galaxies III: NGC 4038/39 and NGC 5584, *Astrophys. J.* 807, no. 2, 133. doi:10.1088/0004-

637X/807/2/133

- Jang, I. S. y Lee, M. G. (2017). The tip of the red giant branch distances to type Ia supernova host galaxies V: NGC 3021, NGC 3370, and NGC 1309 and the value of the Hubble constant, *Astrophys. J.* 836, no. 1, 74. doi:10.3847/1538-4357/836/1/74
- Jungman, G., Kamionkowski, M., Kosowsky, A. y Spergel, D. (1996). Cosmological parameter determination with microwave background maps, *Phys. Rev. D* 54, pp. 1332-1344 doi:10.1103/PhysRevD.54.1332
- Komatsu, E. *et al.* [WMAP Collaboration] (2009). Five-year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) observations: Cosmological interpretation, *Astrophys. J. Suppl.* 180, 330. doi:10.1088/0067-0049/180/2/330
- Komatsu, E. *et al.* [WMAP Collaboration] (2011). Seven-year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) observations: Cosmological interpretation, *Astrophys. J. Suppl.* 192, 18. doi:10.1088/0067-0049/192/2/18
- Laureijs, R. *et al.* [EUCLID Collaboration] (2011). Euclid definition study report, [arXiv:1110.3193 [astro-ph.CO]].
- Peebles, P. y Ratra, B. (2003). The cosmological constant and dark energy, *Rev. Mod. Phys.* 75, pp. 559-606. doi: 10.1103/RevModPhys.75.559
- Poulin, V., Smith, T. L., Karwal, T. y Kamionkowski, M. (2019). Early dark energy can resolve the Hubble tension, *Phys. Rev. Lett.* 122, no.22, 221301. doi:10.1103/PhysRevLett.122.221301
- Riess, A. G. *et al.* (2009). A redetermination of the Hubble constant with the Hubble Space Telescope from a differential distance ladder, *Astrophys. J.* 699, 539. doi:10.1088/0004-637X/699/1/539
- Riess, A. G. *et al.* (2011). A 3% solution: Determination of the Hubble constant with the Hubble Space Telescope and Wide Field Camera 3, *Astrophys. J.* 730, 119 Erratum: [*Astrophys. J.* 732, 129 (2011)]. doi:10.1088/0004-

637X/732/2/129, 10.1088/0004-637X/730/2/119

- Riess, A. G. *et al.* (2016). A 2.4% determination of the local value of the Hubble constant, *Astrophys. J.* 826, no. 1, 56. doi:10.3847/0004-637X/826/1/56
  - Riess, A. G. *et al.* (2018). Milky Way Cepheid standards for measuring cosmic distances and application to Gaia DR2: Implications for the Hubble constant, *Astrophys. J.* 861, no. 2, 126. doi:10.3847/1538-4357/aac82e
  - Riess, A. G., Casertano, S., Yuan, W., Macri, L. M. y Scolnic, D. (2019). Large magellanic cloud Cepheid standards provide a 1% foundation for the determination of the Hubble constant and stronger evidence for physics beyond  $\Lambda$ CDM, *Astrophys. J.* 876, no.1, 85. doi:10.3847/1538-4357/ab1422
  - Spergel, D. N. *et al.* [WMAP Collaboration] (2003). First year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) observations: Determination of cosmological parameters, *Astrophys. J. Suppl.* 148, 175. doi:10.1086/377226
  - Spergel, D. N. *et al.* [WMAP Collaboration] (2007). Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) three year results: Implications for cosmology, *Astrophys. J. Suppl.* 170, 377. doi:10.1086/513700
- Steigman, G., Schramm, D. y Gunn, J. (1977). Cosmological limits to the number of massive leptons, *Phys. Lett. B* 66, pp. 202-204. doi:10.1016/0370-2693(77)90176-9
- Tanabashi, M. *et al.* [Particle Data Group] (2018). Review of Particle Physics, *Phys. Rev. D* 98, no.3, 030001. doi:10.1103/PhysRevD.98.030001
- Verde, L., Treu, T. y Riess, A. (2019). Tensions between the Early and the Late Universe, doi:10.1038/s41550-019-0902-0
- Wong, K. C. *et al.* (2019). HoLiCOW XIII – A 2.4% measurement of  $H_0$  from lensed quasars: 5.3 $\sigma$  tension between early and late-Universe probes. doi: 10.1093/mnras/stz3094