

**REAL ACADEMIA DE CIENCIAS EXACTAS, FÍSICAS,
QUÍMICAS Y NATURALES DE ZARAGOZA**

EDAD DE ORO DE LA COSMOLOGÍA

DISCURSO DE INGRESO LEÍDO POR EL ACADÉMICO ELECTO

Ilmo. Sr. D. MANUEL ASOREY CARBALLEIRA

*EN EL ACTO DE SU RECEPCIÓN SOLEMNE
CELEBRADO EL DÍA 27 DE MAYO DEL AÑO 2021*

Y

DISCURSO DE CONTESTACIÓN POR EL

Ilmo. Sr. D. JOSÉ FERNANDO CARIÑENA MARZO

ACADÉMICO NUMERARIO



ZARAGOZA

2021

Depósito legal: Z 894-2021

Imprime:

Servicio de Publicaciones. Universidad de Zaragoza

EDAD DE ORO DE LA COSMOLOGÍA

POR EL

Ilmo. Sr. D. MANUEL ASOREY CARBALLEIRA

Excmo. Sr. Presidente

Ilmos. Sras. y Srs. Académicos

Señoras y Señores

Es para mí un honor aceptar la invitación de ingreso en esta centenaria institución y por ello quiero agradecer a todos los académicos y especialmente a los de la sección de Físicas que han promovido mi elección, lamentando profundamente la reciente desaparición de tres de ellos: Víctor Orera, Rafael Navarro y Fernando Solsona.

Quiero especialmente recordar a mi antecesor en la medalla académica, el profesor Luis Joaquín Boya, quien fue mi director de tesis y principal responsable de que yo viniese en la Universidad de Zaragoza. Luis Joaquín Boya, tras licenciarse en la Universidad de Zaragoza, comenzó su carrera académica en el año 1958 como profesor encargado de cátedra en esta universidad. Posteriormente realizó estudios de doctorado en las Universidades de Barcelona y Birmingham bajo la supervisión de los profesores Luis Garrido y Rudolf Peierls, que culminó con éxito en 1964 defendiendo su tesis doctoral en la Universidad de Barcelona. A partir de entonces su carrera académica, como docente e investigador, en Física Teórica se desarrolló en las Universidades de Barcelona, Valladolid, Zaragoza y Salamanca para finalmente acabar asentándose como catedrático en su querida Universidad de Zaragoza. Durante su extensa carrera dirigió más de una decena de tesis doctorales y publicó más de un centenar de artículos. Sus discípulos, entre los que se encuentra el actual presidente de la Real Sociedad Española de Física, Adolfo Azcárraga, lo reconocemos con el nombre de El Maestro. Boya estableció numerosas colaboraciones internacionales y participó como conferenciante invitado en múltiples prestigiosas conferencias. Paralelamente desarrolló una brillante labor como divulgador científico, con especial énfasis en la historia de la Física y la Biología. Precisamente, su discurso de entrada a esta Academia versó sobre esta última materia. Como cúlmen de su extensa carrera acabó siendo elegido Presidente de esta Real Academia, cargo que ocupó durante siete años.

Quiero agradecer a mi familia y en especial a mi mujer Lita por su apoyo durante tantos años y a quien la Física robó tanto tiempo de su pareja. Y a mi hijo Jacobo por su comprensión de esa abducción, lo que no impidió que él también iniciase una carrera científica.

Mi formación se gestó en siete colegios y dos universidades: Santiago de Compostela y Valladolid. En ésta última tuve como profesores a numerosos físicos zaragozanos. En primer lugar al ya mencionado Luis Joaquín Boya, José F. Cariñena, el académico que fue

Secretario de esta institución y gran amigo, que hoy contestará a mi discurso, Santiago Mar y Manuel Quintanilla, quien fue Tesorero de esta Real Academia y lamentablemente fallecido hace algunos años. Todos ellos despertaron mi curiosidad por conocer su *alma mater* en la que yo mismo acabé recalando. A todos esos abnegados profesores que contribuyeron a mi formación les estoy profundamente agradecido. Quisiera añadir a esa lista al profesor Pronob Mitter que me introdujo en el mundo de la Física Teórica de primer nivel internacional durante mi añorada estancia postdoctoral en la Universidad de Paris VI, hoy de nuevo La Sorbona. También estoy muy agradecido a los 75 colaboradores que he tenido a lo largo de tantos años. Muy especialmente a los de esta casa, como los ya mencionados Luis Joaquín Boya y José F. Cariñena, Fernando Falceto, Amalio Fernández Pacheco, José García Esteve, Gloria Luzón y Antonio Seguí, así como a todos los estudiantes que realizaron su doctorado bajo mi supervisión.

El tema elegido para mi disertación consiste en un breve resumen de los últimos avances en Cosmología, que nos indican dónde se sitúa en la actualidad la frontera de nuestro conocimiento del Universo. Y lamento no poder seguir la línea biocientífica marcada por mis antecesores en la medalla n^o 18, los profesores Pedro Ramón y Cajal, Francisco Grande Covián y Luis Joaquín Boya Balet.

Según un sabio aforismo acuñado a comienzos de los años cincuenta del siglo pasado entre los veteranos físicos de la antigua URSS, todo joven físico teórico debería resistirse a la tentación de dedicarse al estudio de un tema tan atractivo como la gravitación hasta cumplir los sesenta años. Se supone que a esa edad uno ya puede perder su tiempo en terrenos tan altamente especulativos. Yo no esperé tanto tiempo y ya en mi tesis me dejé seducir por esa atracción, que después de todo no es tan grave, y mi trabajo de mayor impacto es fruto de esa tentación.

En Cosmología la interacción gravitatoria juega un papel fundamental y durante muchos años fue también estigmatizada. Lev Landau solía decir, unas veces en broma y otras en serio, que los cosmólogos se equivocan a menudo, pero raramente dudan. Lo que intentaré argumentar en esta disertación es que ahora lo hacen menos. La Cosmología se ha convertido en una ciencia de gran precisión y se encuentra en la plenitud de su época más dorada.

1. Gravitación relativista y la expansión del Universo

La interacción gravitatoria es la primera fuerza que la humanidad ha descubierto. Desde que el hombre se irguió se encuentra luchando contra esa fuerza, comenzando por el simple reto de ponernos en pie cada día. La sentencia bíblica: ganarás el pan con el sudor de la frente, refleja certeramente cómo la mayoría de sus energías las dedicó la humanidad a dominar con su trabajo la fuerza de la gravedad. El dominio científico de esta fuerza ha requerido varios siglos de estudio y las contribuciones de los dos mejores físicos de historia: Isaac Newton y Albert Einstein. El salto conceptual realizado por Newton (1684) fue espectacular. Su famosa fórmula

$$\mathbf{a} = -\frac{GM}{r^3}\mathbf{r},$$

donde G es la constante de gravitación universal de Newton cuyo minúsculo valor actual es $G = 6,67430(15) \times 10^{-11} \text{m}^3 \text{kg}^{-1} \text{s}^{-2}$, permite explicar tanto las leyes de la gravedad terrestre exploradas por Galileo Galilei, como las de Johannes Kepler sobre la atracción de los planetas al Sol. El descubrimiento de la universalidad de la interacción gravitatoria, que persiste hoy en día, tres siglos después, marca un hito en la historia de la Ciencia. El comprobar que las leyes que rigen la caída de los graves en la superficie de la Tierra son las mismas que las que mantienen unido al Sistema Solar es algo asombroso y sorprendente. Este impresionante salto de gigante realizado por Newton desde las escalas de metros hasta escalas de miles de millones de kilómetros todavía hoy nos maravilla y produce vértigo. El dominio de la interacción gravitatoria y otras *pequeñas* herramientas técnicas ha permitido al hombre viajar en el espacio y llegar a la Luna.

A principios del siglo XX cuando todo ya todo parecía en calma en el ámbito de la teoría de la gravitación, aparece Einstein, quien osadamente argumenta, basándose simplemente en razones de consistencia teórica, que como la teoría de Newton no encaja con su Teoría de la Relatividad, recientemente formulada, habría que buscar una alternativa a la teoría de gravitación Newtoniana. La construcción de esta teoría alternativa, que Einstein fue desgranando en cuatro sesiones consecutivas de la Academia Prusiana de Ciencias realizadas a lo largo del mes de noviembre de 1915, concluyó con éxito en la sesión final del 25 de noviembre. En esa sesión Einstein formuló la versión definitiva de su teoría, que no solo generalizaba de forma asombrosa la teoría de Newton de la gravitación, sino que la hacía todavía más universal [1]. La nueva teoría gravitatoria de Einstein, además de explicar pequeñas desviaciones de la órbita de Mercurio, fue definitivamente confirmada,

hace ahora un siglo, por las observaciones de un equipo británico del observatorio de Greenwich liderado por Arthur Eddington (1919). Los astrónomos británicos observaron que la desviación de los rayos luminosos por los efectos de la gravedad generada por el Sol encajaba con las predicciones de la teoría de Einstein y no con la de Newton. Esa observación supuso la consagración definitiva de la Teoría de la Relatividad General, nombre con que el propio Einstein denominó a su nueva teoría de la interacción gravitatoria.

La teoría de Einstein se resume en una sola ecuación

$$(1.1) \quad R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}Rg_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu},$$

que envuelve tanto la métrica del espacio tiempo $g_{\mu\nu}$ como sus curvaturas geométricas $R_{\mu\nu}$ y R y el tensor de energía impulso $T_{\mu\nu}$ de la radiación y la materia.

Sin embargo, Einstein no se detuvo contemplando autocomplaciente sus ecuaciones, y las pequeñas correcciones a la Física del Sistema Solar que se derivaban de las mismas, sino que inmediatamente se dispuso a comprobar si la validez de sus ecuaciones se extendía mucho más allá, y por qué no a todo el Universo. Para ello se preguntó cuál era el modelo cosmológico que emergía de su teoría. Para su sorpresa observó que la teoría no permitía una solución de Universo estático, que en su opinión era el más acorde con las observaciones astronómicas. Por ello propuso añadir un nuevo término a su ecuación

$$(1.2) \quad R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}Rg_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu}$$

donde Λ es un parámetro arbitrario que recibe el nombre de constante cosmológica [2]. Este término Λ contrarresta la fuerza atractiva de la gravedad y permite soluciones estáticas de las ecuaciones de Einstein. Este modelo, aunque erróneo, puede considerarse como el primer modelo cosmológico de la ciencia moderna.

Sin embargo, el verdadero salto del Sistema Solar al Cosmos en su conjunto se encontraba en otro tipo de soluciones de las ecuaciones de Einstein descubierto por Alexander Friedmann [3]. Las soluciones de Friedmann de las ecuaciones de Einstein representan un universo que puede estar en expansión o contracción permanente. La única hipótesis asumida por Friedmann es que el espacio está lleno de materia que se encuentra distribuida de forma homogénea e isotrópica. El campo gravitatorio de la solución de Friedmann

viene dada por una métrica curva del espacio-tiempo

$$(1.3) \quad g_{\mu\nu} = \begin{pmatrix} -c^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{a(t)^2}{1-kr^2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a(t)^2 r^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & a(t)^2 r^2 \sin^2 \theta \end{pmatrix},$$

donde el parámetro de escala $a(t)$ viene determinado por la densidad ρ y la presión p de la materia

$$(1.4) \quad T_{\mu\nu} = \begin{pmatrix} \rho c^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & p & 0 & 0 \\ 0 & 0 & p & 0 \\ 0 & 0 & 0 & p \end{pmatrix}$$

mediante las ecuaciones de Friedmann

$$(1.5) \quad \left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = \frac{8\pi G}{3}\rho - \frac{kc^2}{a^2} + \frac{\Lambda c^2}{3}$$

$$(1.6) \quad \frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{4\pi G}{3}\left(\rho + \frac{3p}{c^2}\right) + \frac{\Lambda c^2}{3}.$$

El cociente

$$(1.7) \quad H(t) = \frac{\dot{a}}{a}$$

marca el ritmo de expansión de la métrica de Friedmann y es conocido también como parámetro de Hubble, aunque también varía con el tiempo.

2. La Ley de Hubble-Lemaître

Las soluciones de Friedmann fueron rederivadas años más tarde, en forma más general e independiente, por Georges Lemaître [4,5], quien además concluyó que de ellas se derivaba una relación entre el corrimiento hacia el rojo del espectro observado λ_o en la luz emitida

por las galaxias¹ lejanas λ_e y su distancia d

$$z = \frac{\lambda_o - \lambda_e}{\lambda_e} = H_0 \frac{d}{c},$$

debida al efecto Doppler inducido por la variación global de las distancias en el Universo en expansión.

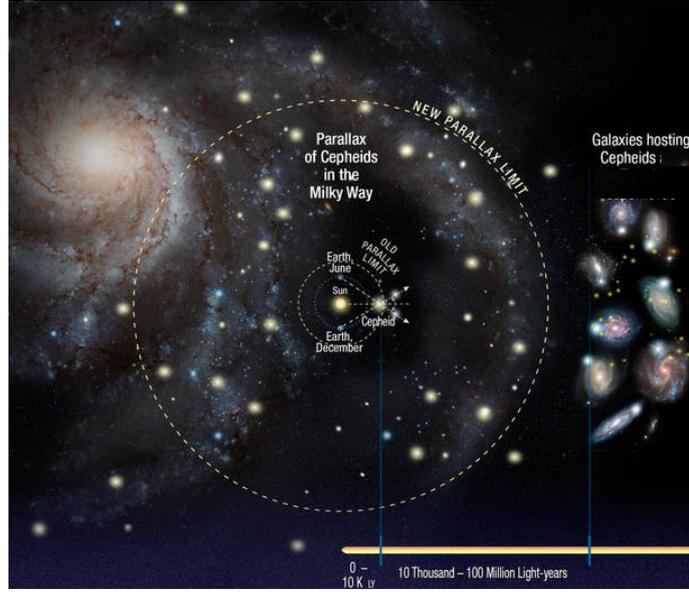


Figura 1: La utilización de las Cefeidas como faros guía ha permitido extender la medida de distancias mucho más allá de los límites del paralaje geométrico estándar [Hubble Space Telescope].

Usando los datos de 42 galaxias catalogadas por Gustaf Strömberg [6] y Vestso M. Slipher [7], Lemaître obtuvo un valor para la constante de proporcionalidad entre $H_0 = 575 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ y $H_0 = 625 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$, dependiendo del peso dado a cada tipo de galaxias consideradas². Dos años más tarde Edwin Hubble [8] utilizando los mejores datos de distancias galácticas obtenidos por Henrietta S. Leavitt [9] dedujo un valor inferior para esa constante, $H_0 = 500 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$.

El valor de la constante H_0 ha continuado mejorando con la incorporación de los datos de nuevos catálogos astronómicos. La medida del corrimiento hacia el rojo puede realizarse con gran precisión, dado que la espectroscopía no deja de perfeccionar sus técnicas de medida, siendo en la actualidad el campo de la Física que alcanza los mayores niveles de precisión. Sin embargo la medida de distancias es el punto débil en la determinación de la constante de Hubble.

¹Nebulosas extragalácticas en el lenguaje de la época

²El Megaparsec (Mpc) es una unidad astronómica de longitud que equivale a $3,0857 \times 10^{19} \text{ km}$

El método utilizado por Leavitt se basa en considerar a las estrellas Cefeidas como faros patrón, lo que permite medir distancias mucho más lejanas que los métodos tradicionales de paralaje geométrico, expandiendo enormemente la escalera de distancias cósmicas. Las Cefeidas son estrellas pulsantes que gozan de una importante propiedad: su luminosidad absoluta es proporcional al ritmo de sus pulsaciones. Cuanto más brillante es la estrella más lento es su ritmo. Las distancias a las que se encuentran las Cefeidas más cercanas de nuestra Galaxia pueden medirse mediante el método de paralaje geométrico tradicional, lo que permite calibrar la relación de su luminosidad con la distancia; y una vez encontrada ésta se pueden determinar las distancias a las Cefeidas más lejanas en función de esa relación. Así se consiguió descubrir que había otras galaxias, como Andrómeda, y averiguar a qué distancia se encuentran (Figura 1). Las Cefeidas actuando como faros o *candelas estándar* permitieron a Lemaître y Hubble establecer su ley y verificar que se adaptaban a las soluciones de Friedmann de las ecuaciones de Einstein. La implicación cosmológica de este descubrimiento es la confirmación de que el Universo se encuentra en expansión.

Sin embargo los valores de H_0 encontrados por Lemaître y Hubble son demasiado elevados. En efecto, como la edad del Universo está relacionada con el inverso de H_0 , esos valores de H_0 dan lugar una edad del orden de 2.000 Maños³, lo que es notablemente inferior a la edad de la Tierra conocida por los geólogos a partir de los datos de la radiactividad de los rocas.

Durante décadas las medidas de distancias fueron perfeccionándose y con ello el valor de la constante de Hubble fue variando con el tiempo, bajando hasta valores inferiores a $100 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$. El siguiente salto cualitativamente importante se produjo con el descubrimiento de una característica de las supernovas de tipo Ia, que resulta similar a la de las Cefeidas. En este tipo de supernovas la evolución de su brillo en los días siguientes a la explosión permite fijar la distancia a la que se encuentran con gran precisión. Esto las convierte en un nuevo tipo de *candelas estándar*. Como las supernovas se pueden observar a distancias mucho mayores que las Cefeidas, dado que su luminosidad es también muy superior a la de éstas, este fenómeno permite extender la escalera de distancias cósmicas hasta horizontes mucho más lejanos.

En las últimas décadas del siglo XX el valor de H_0 se estabilizó entre dos límites $H_0 = 100$, $H_0 = 50$, y aún más, como solía decir con cierto sarcasmo Sidney Coleman, el valor de H_0 obtenido dependía de si se medía en la costa Este o la Oeste de Estados Unidos (Figuras 2, 3 y 4).

³1 Maño = 1 Millón de años

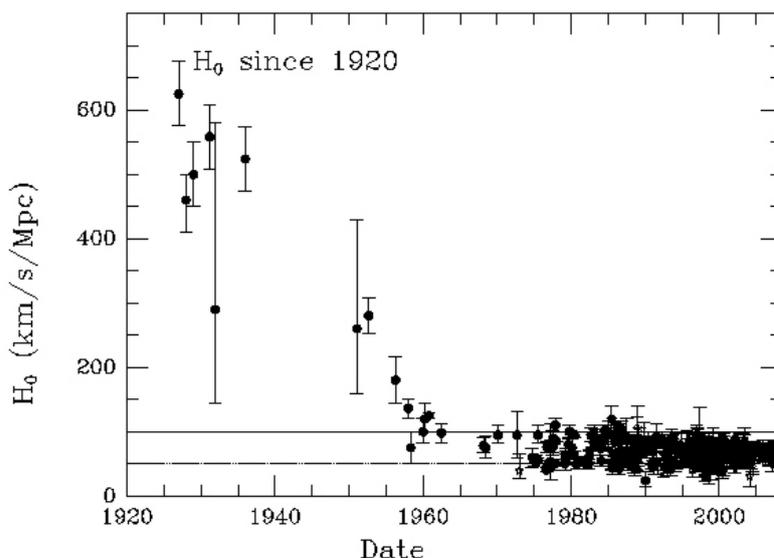


Figura 2: Evolución del valor de la constante de Hubble H_0 a lo largo de todo el siglo XX. Los primeros valores son los obtenidos por Lemaître y Hubble en la década 1920-30 [J. Huchra 2008, <https://www.cfa.harvard.edu/~dfabricant/huchra/>].

Ambas cotas a la constante de Hubble se vieron refinadas en los años 90 con los datos del telescopio espacial Hubble, uno de cuyos objetivos era medir con más precisión esa constante, que resulta fundamental para el análisis de la expansión y edad del Universo.

3. Nucleosíntesis Primordial y la Radiación del Fondo de Microondas

El modelo relativista de Universo en expansión desarrollado por Friedmann y Lemaître implica además del corrimiento hacia el rojo del espectro de las galaxias o supernovas lejanas, que se deriva de la geometría de la teoría de Einstein, una serie de fenómenos físicos derivados de la física de partículas, que una vez observados contribuyeron a afianzar dicho modelo cosmológico.

El primero de estos fue puesto de manifiesto por George Gamow y sus colaboradores [10, 11]. Si el Universo se expande continuamente, en algún momento del pasado su tamaño debió ser muy reducido⁴. Eso implica que la densidad y temperatura del conjunto de partículas materiales debió ser elevadísima en esos momentos. Debido a la expansión posterior tanto la densidad como la temperatura descendieron de forma continua. Cuando la temperatura se situó por debajo de 10^9 grados Kelvin las partículas más pesadas, neutrones y protones (bariones), comenzaron a fusionarse dando lugar a los núcleos ató-

⁴Esta idea ya había sido formulada también por Lemaître, quien llegó a la conclusión de la existencia de un átomo primigenio, concepto que Einstein calificó como abominable.

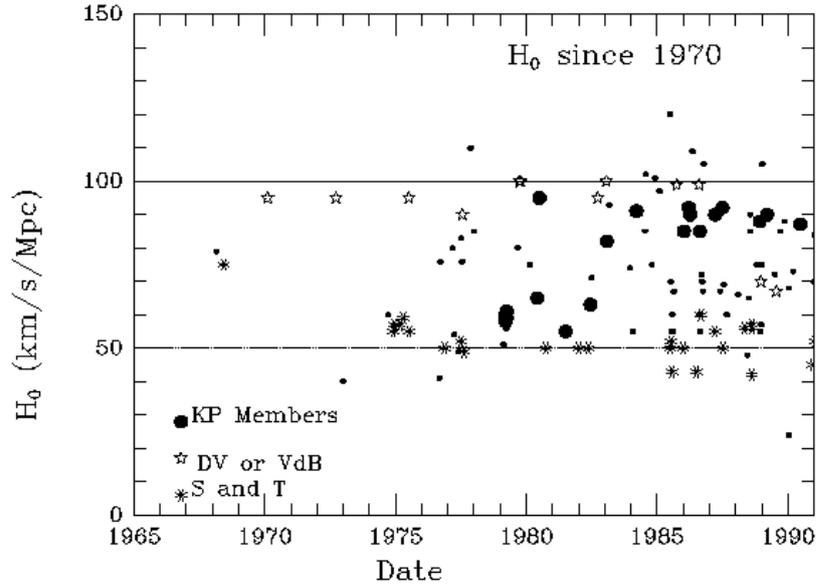


Figura 3: Evolución del valor de la constante de Hubble H_0 entre los años 1965 y 1990 [J. Huchra 2008].

micos. Durante un breve período de tiempo se formaron los núcleos de Deuterio, Helio-3, Helio-4 y Litio-7. Los siguientes núcleos de la tabla de elementos químicos presentan más dificultades para formarse puesto que no son tan estables, y al disminuir la temperatura ya no pueden formarse más tarde.

Durante un breve intervalo de tiempo, los protones y los neutrones colisionaron generando Deuterio. La mayor parte del Deuterio colisionó con otros protones y neutrones para producir Helio y una pequeña cantidad de Tritio. En ese breve instante también pudo generarse Litio-7 mediante la fusión de un núcleo de Tritio y dos de Deuterio. Esta cadena de fenómenos se conoce con el nombre de Nucleosíntesis Primordial. Un hecho importantísimo es que estas predicciones solo dependen de un parámetro: la densidad de bariones (es decir, neutrones y protones) en el momento de la Nucleosíntesis. El valor de esta densidad bariónica puede explicar todas las abundancias de esos elementos de una vez. Ese parámetro puede ajustarse con los datos astrofísicos y el resultado es que todas las proporciones de elementos ligeros predichos por la teoría encajan perfectamente con todas las observaciones. En particular, el Hidrógeno constituye casi el 75% de la materia bariónica del Universo, mientras que el Helio aproximadamente el otro 25%. La teoría también predice que alrededor de 0,01% de dicha materia es deuterio y que el Litio aparece en proporciones todavía más pequeñas (Figura 5).

Estos resultados contribuyeron a afianzar el modelo de un Universo en expansión que pasó a denominarse irónicamente como modelo del Big Bang. Sin embargo la consecuencia

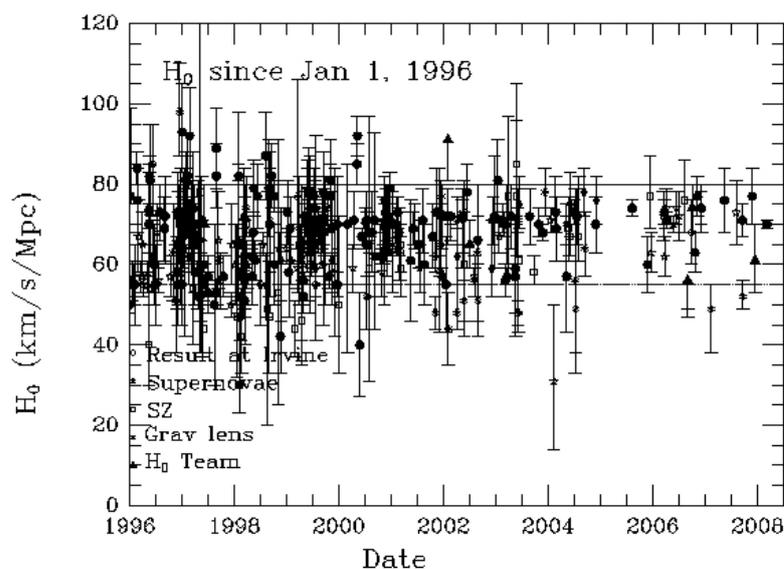


Figura 4: Evolución del valor de la constante de Hubble H_0 en las últimas años del siglo XX y primeros del XXI [J. Huchra 2008]

más importante del trabajo de Gamow y colaboradores fue que el Universo al continuar su expansión y enfriarse un poco más, su temperatura alcanza los 3.000°K y, en ese momento, posterior a la formación de los núcleos atómicos, se produce la captura de los electrones por los núcleos, dando lugar a átomos neutros. Al formarse toda esa materia neutra los fotones restantes quedan liberados, y dan lugar a un espectro de cuerpo negro con una temperatura media que ronda los 3.000°K . Desde el momento de esa recombinación de la materia hasta nuestros días dicha temperatura ha continuado descendiendo, debido la expansión del Universo, hasta alcanzar los 5°K en la actualidad, según estimaron Ralph A. Alpher y Robert C. Herman [12,13]. Este fondo cósmico estaría según esos cálculos en el espectro de microondas. Esta observación permaneció en el olvido hasta que dieciséis años más tarde Arno A. Penzias y Robert W. Wilson descubrieron ese fondo de microondas de forma accidental [16,17]⁵.

El descubrimiento de la radiación del fondo de microondas cosmológico por Penzias y Wilson contribuyó a consolidar definitivamente la teoría del Big Bang. Con los últimos datos proporcionados por los satélites COBE, WMAP y PLANCK se ha podido analizar en gran detalle dicha radiación y comprobar que posee una distribución de frecuencias

⁵La inexplicable ausencia de una búsqueda sistemática de esta radiación de microondas, fue reprochada por el profesor Boya en un artículo de la revista Lull editada en Zaragoza [14]. Dicha reflexión recibió una respuesta epistolar airada de los propios Alpher y Herman, los dos más activos colaboradores de Gamow [15]

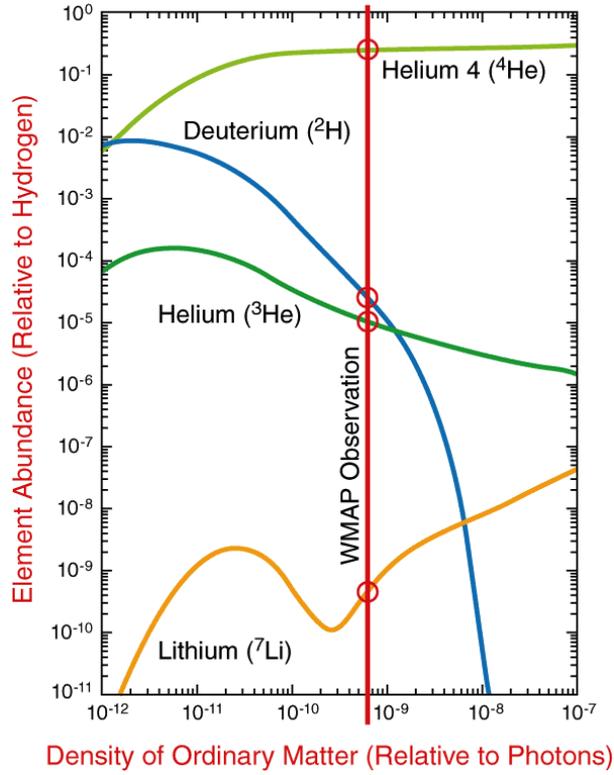


Figura 5: Abundancias primordiales de los elementos químicos ligeros. El Hidrógeno constituye casi el 75 % de la materia bariónica del Universo, el Helio-4 aproximadamente el otro 25 %, y el resto lo constituyen pequeñas trazas de Deuterio, Tritio, Helio-3 y Litio-7.

correspondiente a un cuerpo negro cuasi-perfecto [18]

$$I_\nu = \frac{2 h \nu^3}{c^2} \left(e^{h\nu/k_B T_{\text{rad}}} - 1 \right)^{-1},$$

donde k_B es la constante de Boltzmann y h la de Planck.

La frecuencia dominante 162 GHz (1,9 mm) está en el rango de las microondas y corresponde a una temperatura de radiación de $T_{\text{rad}} = 2,726^\circ\text{K}$ (Figura 6) en concordancia con lo predicho por Gamow y sus colaboradores.

En realidad el espectro observado por los satélites no es homogéneo ni isótropo. Para la obtención de la temperatura media hay que sustraer el efecto de corrimiento al rojo en el plano galáctico debido al movimiento de la Tierra y los propios satélites respecto a ese fondo de microondas. Todo ello permite fijar con gran precisión el valor absoluto de la velocidad no solo de la Tierra sino también de todo el Sistema Solar con respecto a ese fondo. Esta última resulta ser 369 km/s en la dirección (264°, 48°) del plano galáctico⁶.

⁶Latitud y longitud medidas en las coordenadas galácticas definidas respecto al eje Tierra-Sol en el plano galáctico y la normal positiva a dicho plano

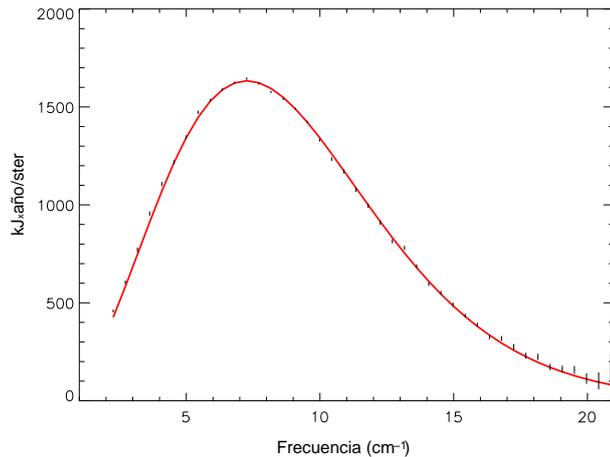


Figura 6: Descomposición espectral de la radiación cósmica de fondo. El perfil se ajusta perfectamente al de un cuerpo negro con una temperatura de $T_{\text{rad}} = 2,726^{\circ}\text{K}$ [18]

En el análisis temporal de las medidas incluso se ha llegado a detectar la modulación de esta velocidad a lo largo de la trayectoria de la Tierra alrededor del Sol.

De esta forma la radiación de fondo cosmológica proporciona un GPS muy especial para el Sistema Solar y todos sus planetas. De hecho puede también deducirse cuál es la velocidad del centro de la Vía Láctea y de nuestro Grupo Local de galaxias respecto al fondo de microondas. Estas resultan ser 565 km/s en la dirección $(265^{\circ}, 28^{\circ})$ y 620 km/s en la dirección $(272^{\circ}, 30^{\circ})$, respectivamente.

Resulta sorprendente que después de 100 años de Teoría de la Relatividad, uno de cuyos resultados básicos fue la prueba de inexistencia del éter, la radiación del fondo de microondas cosmológica nos conduce de vuelta a una situación en la que en un cierto sentido hay un sistema de referencia privilegiado, que aunque no invalide ningún principio de la Teoría de la Relatividad, sí que reduce el relativismo asociado, al descubrir la existencia un sistema de referencia singular en el Universo.

4. El modelo Cosmológico Estándar

Los fenómenos ya mencionados, observados a lo largo de cuatro décadas del siglo XX: ley de expansión de Hubble-Lemaître, nucleosíntesis de Gamow y el descubrimiento de la radiación del fondo cosmológico de microondas, contribuyeron no solo a consolidar la teoría del Big Bang, sino también a formular un completo y preciso modelo cosmológico basado en la teoría de gravitación relativista de Einstein.

Sin embargo, cuando todo parecía ya reducido a una lucha por la precisión observacio-

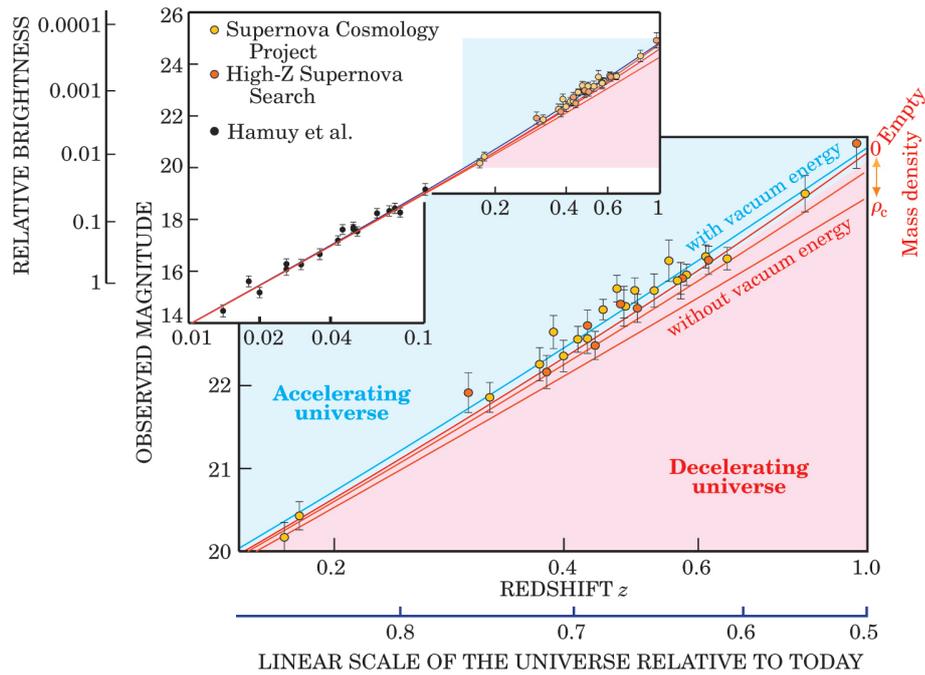


Figura 7: Atenuación del brillo relativo de las supernovas de tipo Ia con respecto a su corrimiento hacia el rojo z observado por los equipos liderados por Perlmutter [19] y Riess [20]. Estos resultados provocaron el cambio de modelo cosmológico a finales del siglo XX, cambiando el modelo del Universo en expansión por un modelo en expansión acelerada.

nal, surge una sorpresa a finales de siglo que hace cambiar el paradigma de la cosmología relativista conocida hasta ese momento. Es el descubrimiento realizado por Saul Perlmutter [19], Adam G. Riess [20] y sus colaboradores de que las supernovas de tipo Ia muy lejanas parecen verse más tenuemente de lo que les correspondería siguiendo la ley de Hubble-Lemaître (Figura 7). Es decir, que el Universo no solo se expande, sino que lo hace aceleradamente. Este fenómeno puede también deducirse de las ecuaciones de Friedman (1.6) pero a costa de añadir un término extra con constante cosmológica, como ya había considerado Einstein, o bien un fluido con características muy extrañas.

Estos resultados fueron muy pronto confirmados por los datos del satélite WMAP [21,22] que mostraron que las anisotropías de la radiación del fondo de microondas podían ser perfectamente descritas por las ecuaciones de Friedmann si la curvatura espacial fuese nula y se incluía una componente aceleradora de la expansión en el tensor de energía impulso de la materia. Con los datos proporcionados por WMAP y otras observaciones de telescopios terrestres dedicados al análisis de la estructura de la distribución de materia en el Universo a grandes escalas [23,24], la Cosmología adquirió un nivel de alta precisión comparable al de las demás ciencias experimentales.

Los espectaculares resultados de WMAP [25]–[27], posteriormente refinados por los

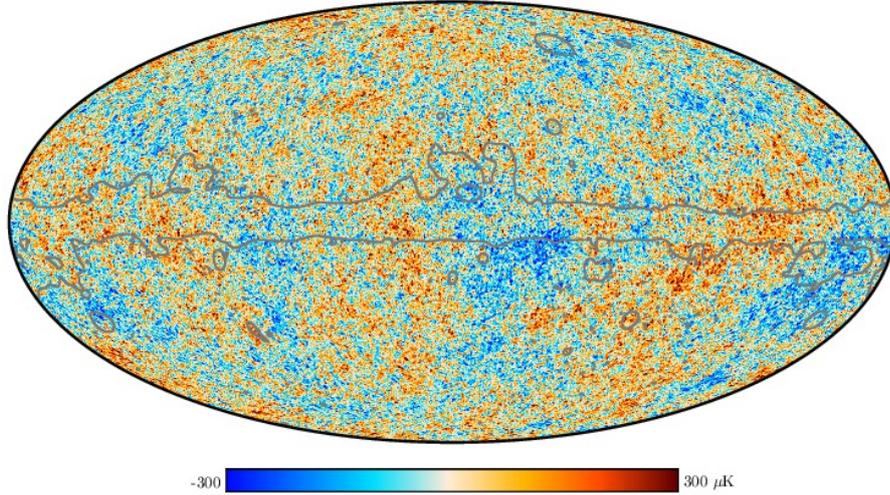


Figura 8: Estructura de la distribución angular de las fluctuaciones térmicas entorno a la temperatura promedio $T = 2,726^{\circ}K$ de la radiación del fondo de microondas obtenida por el satélite PLANCK [28].

del satélite PLANCK [28], surgen del análisis detallado de la estructura de las fluctuaciones y anisotropías de la temperatura de la radiación del fondo cósmico de microondas (Figura 8). El ajuste de la descomposición multipolar de las mismas (Figura 9) cuando se compara con las predicciones de la teoría permite averiguar cuál es modelo del Universo más adecuado. El resultado es que la evolución y estructura del Universo se rige por un modelo basado en la teoría de la gravitación relativista y una distribución de materia con solo seis parámetros.

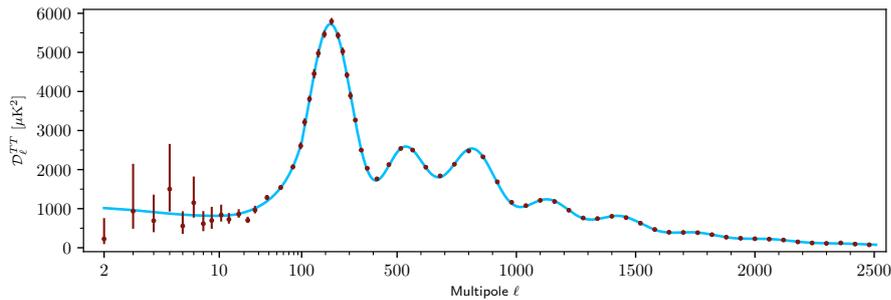


Figura 9: Estructura multipolar de las fluctuaciones de la temperatura de la radiación cósmica de fondo entorno a la temperatura promedio de $T = 2,726^{\circ}K$ medidas por el satélite PLANCK [28].

Dos de estos parámetros consisten en las proporciones de materia bariónica y materia oscura en el balance energético del Universo. A grandes escalas la materia se comporta como un fluido perfecto, pero según el tipo de materia que se trate se comporta de manera

diferente de acuerdo con su propia ecuación de estado

$$p = w\rho c^2, \quad w = \begin{cases} \frac{1}{3} & \text{radiación} \\ 0 & \text{materia no relativista} \\ -\frac{1}{3} & \text{curvatura espacial} \\ -1 & \text{constante cosmológica.} \end{cases}$$

Usando la ley de conservación de la energía del fluido perfecto

$$\dot{\rho} + 3H\left(\rho + \frac{p}{c^2}\right) = 0$$

se obtienen las siguientes evoluciones de la densidad con el factor de escala a (Figura 10)

$$\rho(a) = \begin{cases} \rho_r a^{-4} & \text{radiación} \\ \rho_m a^{-3} & \text{materia no relativista} \\ \rho_k a^{-2} & \text{curvatura espacial} \\ \rho_\Lambda & \text{constante cosmológica} \end{cases}$$

para las distintas componentes energéticas del Universo.

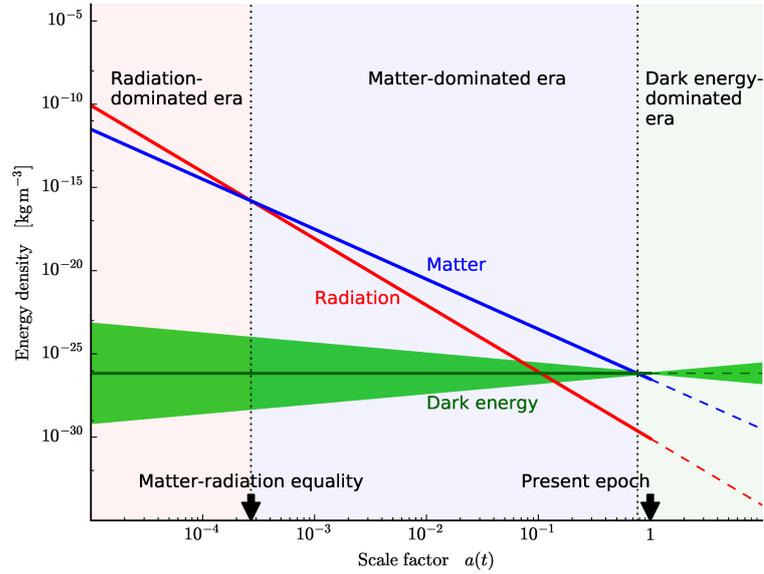


Figura 10: Evolución de la densidad de energía en función de la escala a para las distintas componentes energéticas del Universo. Es de destacar que después de una etapa inicial donde la componente dominante fue la radiación, la mayor parte de la historia ha sido dominada por la materia. Solo recientemente la componente de energía oscura se ha convertido en la componente dominante.

Los términos asociadas a la curvatura y a la constante cosmológica, cuando son considerados como fluidos, tienen una ecuación de estado extraña con presiones negativas lo que induce expansiones aceleradas. Los datos obtenidos por el satélite PLANCK indican que la componente de curvatura debe ser nula $\rho_k = 0$, como ya se sabía a partir de los resultados de los globos sonda BOOMERANG [29] y MAXIMA [30]. Por lo tanto la existencia de una contribución de tipo Λ se hace inevitable. La necesidad de tener al menos dos componentes diferentes de la energía hace que la evolución de la constante de Hubble a lo largo de la historia del Universo sea más compleja. Dicha evolución viene dada por la ecuación

$$H(z)^2 = H_0^2 \left(\Omega_r a^{-4} + \Omega_m a^{-3} + \Omega_k a^{-2} + \Omega_\Lambda \right),$$

donde H_0 es el valor actual de la constante de Hubble ($a = 1, z = 0$) y

$$\Omega_r = \rho_r \frac{8\pi G}{3H_0^2}, \quad \Omega_m = \rho_m \frac{8\pi G}{3H_0^2}, \quad \Omega_\Lambda = \rho_\Lambda \frac{8\pi G}{3H_0^2}$$

son las contribuciones de las distintas componentes de la energía total del Universo. Los resultados del satélite PLANCK [28] fijan los valores de esas componentes de una forma precisa

$$H_0 = 67,4, \quad \Omega_m = 0,315, \quad \Omega_\Lambda = 0,685.$$

Como los bariones solo contribuyen a la componente de materia con un fracción minúscula $\Omega_b = 0,049$ y la de curvatura se anula $\Omega_k = 0$, la componente material es fundamentalmente debida a materia oscura⁷.

De esos datos se deduce que la edad del Universo, que viene dada por

$$T_{\text{Univ}} = \frac{1}{H_0} \int_0^z \frac{dw}{(1+w)E(w)}$$

con

$$E(z) = \sqrt{\Omega_r (1+z)^4 + \Omega_m (1+z)^3 + \Omega_k (1+z)^2 + \Omega_\Lambda},$$

es

$$T_{\text{Univ}} = \frac{1}{H_0} \int_0^z \frac{dw}{(1+w)E(w)} = 13.797 \text{ Maños}$$

Los restantes parámetros del modelo cosmológico estándar conocido como Λ CDM llano son:

⁷La componente de radiación es prácticamente despreciable: $\Omega_r = 9,236 \times 10^{-5}$.

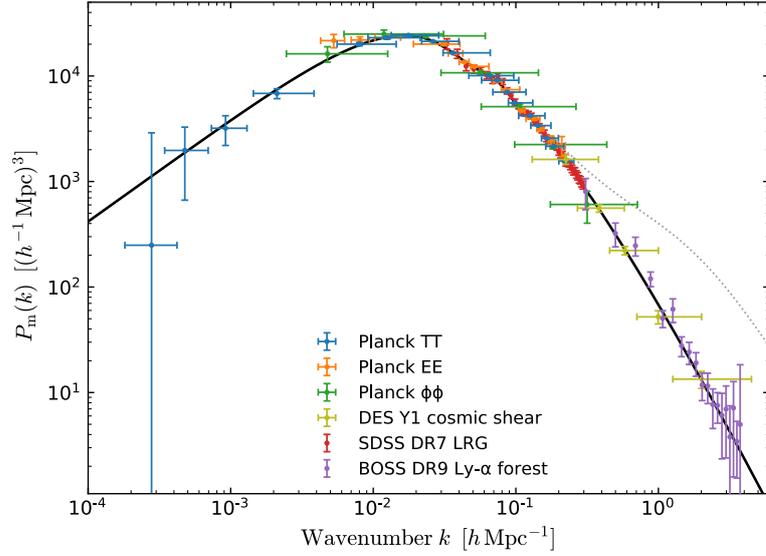


Figura 11: Espectro de las correlaciones de las anisotropías de la radiación y de la materia a grandes escalas. El perfil se ajusta perfectamente a un espectro de potencias para escalas $k < 10^{-2}$. El índice espectral correspondiente es muy próximo a la unidad $n_s = 0,966 \approx 1$ como correspondería un espectro Gaussiano conforme [31, 32].

- i) La escala acústica angular $\theta_{MC} = 0,001$ que indica el tamaño angular del horizonte del Universo en el momento de la recombinación. Un valor tan pequeño solo es compatible con el hecho de que el Universo tenga curvatura espacial nula.
- ii) El índice espectral de la radiación n_s que mide las correlaciones entre las desviaciones de la densidad $\delta\rho(x) = \rho(x) - \bar{\rho}$ con respecto a la densidad media $\bar{\rho}$

$$\delta\rho(x)\delta\rho(y) = \frac{\rho^2}{4\pi} \int \frac{d^3\mathbf{k}}{k^3} \mathcal{P}_s(k) e^{i\mathbf{k}(x-y)}, \quad \mathcal{P}_s(k) \propto k^{n_s-1},$$

y cuyo valor $n_s = 0,965$ se aproxima al que corresponde a una distribución Gaussiana conforme $n_s = 1$ de las fluctuaciones escalares (Figura 11).

- iii) La amplitud de las fluctuaciones escalares $A_s = 10^{-10} e^{3,044}$.
- iv) La profundidad óptica $\tau = 0,0544$, que cuantifica la opacidad generada por la absorción de fotones en la reionización del Hidrógeno producida en épocas posteriores a la recombinación cuando las nuevas estructuras formadas comenzaron a emitir luz ionizante.

La concordancia de los resultados provenientes tanto del estudio de la radiación de fondo como de la distribución de materia en cúmulos y supercúmulos a grandes escalas, y del análisis de una ingente cantidad de supernovas, permiten no solo confirmar la existencia de una expansión acelerada, sino también que la estructura de las anisotropías, tanto de

radiación como de materia, se rige por el modelo estándar Λ CDM llano. El modelo queda caracterizado por tres hechos: ausencia de curvatura espacial (llano), materia oscura no relativista (materia oscura fría, cold dark matter (CDM) en inglés) y energía oscura regida por una constante cosmológica Λ . Con este modelo la Cosmología moderna se convierte en una ciencia de precisión.

El impresionante incremento de nuevos datos, fruto de las observaciones tanto terrestres como espaciales, permite incluso dar un paso más allá y preguntarse por el origen de las inhomogeneidades anteriores a la época de recombinación, En particular, los datos de la polarización de la radiación del fondo cosmológico de microondas permiten verificar si el escenario teórico propuesto durante décadas como fuente de esas anisotropías es correcto o no. Ese marco teórico conocido como Teoría de la Inflación Cosmológica [33]–[37] asegura que el origen de las anisotropías es cuántico y proviene de una época temprana en la que el Universo estaba en una fase de expansión acelerada como la que ahora comienza. Uno de los argumentos que favorecen esta conjetura es el hecho de que las fluctuaciones de temperatura sean casi Gaussianas, lo que concuerda con las predicciones de todas las teorías de inflación.

Otra huella que dicho período deja en la radiación de fondo puede verse en la relación que existe entre las componentes tensoriales y escalares de su polarización [36]. El resultado es que sobre todos los modelos de inflación propuestos destaca uno en particular, el modelo de Alexei Starobinsky [33], que precisamente fue el primero en ser formulado (Figura 12).

Es curioso observar cómo combinando estos resultados con los de la expansión acelerada provenientes no solo de los datos de supernovas, sino también de los catálogos que analizan la estructura de la distribución de la materia, se puede concluir que desde el punto de vista gravitatorio la teoría que parece regir la evolución del Universo en etapas tempranas viene dada por un Lagrangiano local muy sencillo, que no difiere mucho del originalmente propuesto por Einstein ($\alpha = 0$)

$$\mathcal{L} = \sqrt{g} \left(\Lambda + \kappa R + \alpha R^2 \right).$$

De hecho este tipo de Lagrangianos también surge de las correcciones cuánticas del Modelo Estándar de la Física de Partículas y Campos lo que confirmaría su origen genuinamente cuántico. Este tipo de extensiones de la teoría de Einstein da lugar a una serie de generalizaciones conocidas con el nombre de teorías $f(R)$ que substituyen la función

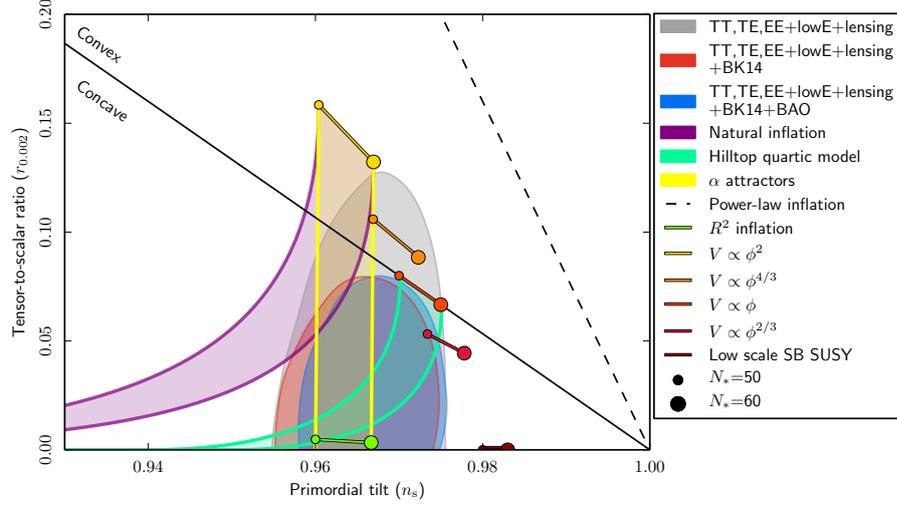


Figura 12: Relación observada entre las componentes escalares y tensoriales de la polarización de la radiación del fondo cosmológico de microondas en función del valor del índice espectral n_s y las predicciones para dichos valores de los distintos modelos de inflación. Destaca entre ellos el propuesto por Starobinsky y también conocido como inflación R^2 [36]

cuadrática R^2 de Starobinsky por otras funciones reales $f(R)$. Esas teorías constituyen no solamente alternativas a la Teoría de Inflación Cosmológica sino que también sirven para describir evoluciones del Universo con menos o incluso ninguna materia oscura. Sin embargo la mayoría de ellas no concuerdan con los datos de las precisas observaciones de la física del Sistema Solar. Y la mayoría de las que son compatibles con esos datos dan lugar a mayores singularidades en la evolución del Universo, tales como el Big Crunch o el Big Rip, que el Big Bang de la propia teoría de Einstein.

Por otro lado es sabido que la teoría de Einstein no permite una cuantización consistente, debido a la aparición de divergencias ultravioletas que violan el principio de renormalización. Las nuevas teorías $f(R)$, aunque presentan singularidades ultravioletas más suaves, tampoco dan lugar a teorías renormalizables [38]. Para conseguir una teoría renormalizable de la gravitación cuántica hay que considerar teorías que incluyan todos los términos que involucran al tensor curvatura de Riemann $R_{\mu\nu\sigma\kappa}$. Es decir, teorías con densidades Lagrangianas de la forma

$$\mathcal{L} = \sqrt{g}(\Lambda + \kappa R + \alpha R^2 + \beta R^{\mu\nu} R_{\mu\nu} + \gamma R^{\mu\nu\sigma\kappa} R_{\mu\nu\sigma\kappa})$$

que posibilitan la formulación de teorías cuánticas renormalizables [38]. Otra posibilidad

consiste en añadir más altas derivadas de la métrica del espacio-tiempo, e. g.

$$\mathcal{L} = \sqrt{g} \left[\Lambda + \kappa R + \sum_{n=0}^N (\alpha_n R \square^n R + \beta_n R^{\mu\nu} \square^n R_{\mu\nu} + \gamma_n R^{\mu\nu\sigma\kappa} \square^n R_{\mu\nu\sigma\kappa}) \right],$$

lo que conduce a teorías superrenormalizables de gravitación cuántica⁸, donde todas las divergencias están perfectamente controladas mediante un número finito de renormalizaciones [39].

Sin embargo, aunque desde el punto de vista ultravioleta estas teorías son más regulares que la teoría de Einstein, a su vez presentan numerosos problemas: existencia de campos fantasma, pérdidas de unitariedad y causalidad, y aparición de inestabilidades de Ostrogradski. Eso hace que las correspondientes teorías cuánticas no den lugar, de forma genérica, a teorías consistentes de gravedad cuántica [40]. Sin embargo, algunas de estas teorías quedan al margen de estos problemas y podrían dar lugar a teorías cuánticas de gravedad absolutamente consistentes.

5. Tensiones recientes. ¿Hacia una nueva Física?

Hay una característica genuina de la historia de la Física que consiste en una constante búsqueda de resquicios en las observaciones que produzcan un vuelco radical de los fundamentos y esperar descubrir nuevas leyes que sustenten dicho cambio. Y en efecto, en Cosmología según se van conociendo más datos surgen nuevos problemas y dudas acerca de si, al incrementar nuestro conocimiento de la estructura y evolución del Universo, todo concuerda con la teoría vigente: el Modelo Estándar Λ CDM llano.

Esto es lo que viene ocurriendo con el cálculo preciso del valor de la constante de Hubble H_0 , que es uno de los parámetros fundamentales del modelo vigente.

Como ya se ha mencionado, a finales del siglo XX los valores de H_0 variaban entre 100 y 50 $\text{km s}^{-1} \text{Mpc}^{-1}$. Con el aumento de las observaciones dichos valores se han refinado enormemente. La fuente fundamental de error proviene de la medida de la distancia a la que se encuentran las fuentes luminosas lejanas. La escalera de distancias cósmicas se ha perfeccionado con distintas técnicas y actualmente se alcanzan precisiones increíbles en la medida de distancias cada vez mayores (Figura 13).

⁸

$$\square = \frac{1}{\sqrt{g}} \partial_\mu g^{\mu\nu} \sqrt{g} \partial_\nu$$

es el operador D'Alambertiano

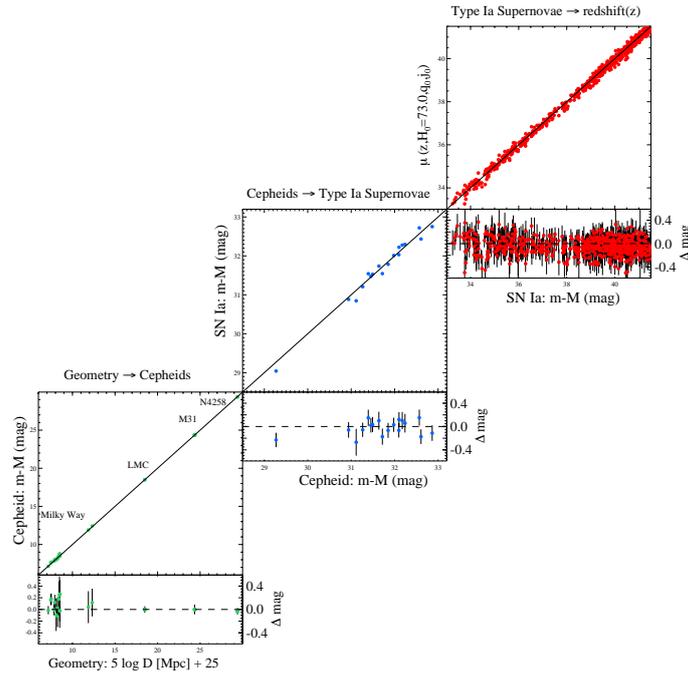


Figura 13: Comportamiento de la ley de Hubble en los tres regímenes de distancias en la escalera cósmica: Geométrico, Cefeidal y Supernovico [41].

Fundamentalmente, como ya se ha indicado anteriormente, hay dos tipos de observaciones donde puede medirse H_0 . El más directo es el que proviene de la observación de fuentes luminosas cercanas. Ese es el método que utilizaron Lemaître y Hubble. Otro proviene del análisis de la estructura de las anisotropías de la radiación de fondo, que también permite medir el valor de H_0 actual por extrapolación de los datos de la época de recombinación, donde se generó la radiación del fondo de microondas, a la situación de expansión actual, utilizando para ello el Modelo Cosmológico Estándar.

En ambos casos la situación observacional ha mejorado enormemente en los primeros años del siglo XXI. En primer lugar el número de supernovas de tipo Ia observadas ha continuado creciendo, desde las 100 que contribuyeron a establecer el escenario de Universo acelerado a finales del siglo XX, hasta las más de 1.300 de la actualidad [41]. Esto ha permitido extender el rango de distancias de objetos lejanos observados en varios órdenes de magnitud. El análisis de la estructura de las anisotropías de la radiación de fondo también se ha refinado enormemente con las misiones de los satélites WMAP [26]–y PLANCK [28].

Por último las observaciones proporcionadas por nuevos catálogos astrofísicos dedicados fundamentalmente a estudios cosmológicos han permitido contrastar los resultados de la distribución observada de materia con los de la radiación de fondo hasta órdenes de

precisión espectaculares [42]–[44].

Sin embargo, los datos más recientes de todos esos catálogos dan lugar resultados aparentemente contradictorios, dentro de los márgenes de error establecidos. En particular el valor de $H_0 = 74$ obtenido a partir de las supernovas de tipo Ia analizadas por la colaboración SH0ES [45] es ligeramente más elevado que el valor $H_0 = 67,4$ obtenido a partir del análisis de las anisotropías de la radiación de fondo obtenidos por el satélite PLANCK [28] (Figura 14). El problema es que ambos valores han sido obtenidos con gran precisión y la diferencia entre ambos resultados está fuera de los márgenes de error. Esta discrepancia, que todavía no alcanza los 5σ , considerados como el umbral de incompatibilidad manifiesta, se ha visto reforzada por una lista de datos provenientes de otras observaciones tanto astrofísicas como cosmológicas:

- i) La colaboración H0LiCOW ha medido con gran precisión cuásares cuya visión se deforma por el fuerte efecto de lente gravitatoria que ejercen galaxias muy masivas que se interponen en la trayectoria de su luz hasta la Tierra [46]. Los datos obtenidos proporcionan un valor $H_0 = 73,3$ muy cercano al valor obtenido por SH0ES.
- ii) La colaboración DES ha medido la distribución a gran escala de la materia del Universo y analizado la distribución de cúmulos de galaxias y los efectos de lentes gravitatorias débiles. La comparación de sus resultados con los de las Oscilaciones Acústicas de Bariones y la Nucleosíntesis Primordial, ha permitido obtener con gran precisión [42, 43] un valor $H_0 = 67,4$ muy cercano al resultado obtenido por PLANCK. Resultados similares han sido publicados durante la redacción de este discurso por la colaboración eBOSS [44]. En ellos se parte de un catálogo astrofísico diferente y se analizan los efectos de las oscilaciones acústicas de bariones y las distorsiones del corrimiento hacia el rojo en la estructura de la materia del Universo a grandes escalas. El valor encontrado para la constante de Hubble $H_0 = 68,2$ es compatible con los resultados de DES y PLANCK.

Todos estos resultados sugieren que los datos provenientes de observaciones del Universo temprano $z = 1.100$ difieren sustancialmente de los obtenidos analizando el Universo más tardío $z \leq 2$. Mientras estos últimos proporcionan medidas directas de H_0 , los primeros necesitan ajustar los parámetros de algún modelo cosmológico.

Para complicar aún más la situación han surgido recientemente otras observaciones que dan valores intermedios de H_0 .

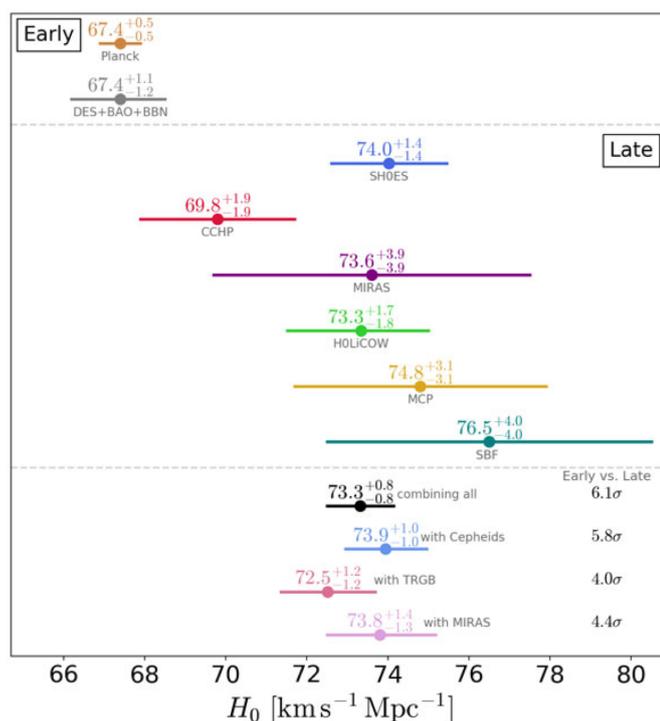


Figura 14: Últimos datos de la medida de la constante de H_0 con medios ópticos [47].

iii) La colaboración Carnegie-Chicago Hubble Program ha publicado recientemente su medida de H_0 en el universo tardío. El valor obtenido $H_0 = 69,8$ se encuentra en medio de los dos extremos anteriores. En este caso la candela estándar se obtiene a partir del patrón del pico de luminosidad en la evolución de las estrellas rojas gigantes, lo que permite fijar con bastante precisión la distancia a las galaxias que las contienen [48].

La reconciliación o no de estas discrepancias es de importancia suprema puesto su mera existencia pone en cuestión todo el Modelo Cosmológico Estándar vigente.

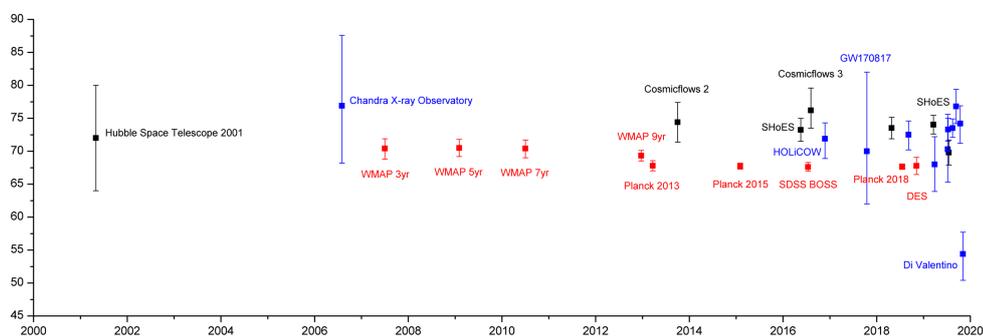


Figura 15: Últimos datos de la medida de la constante de Hubble H_0 , incluyendo la proveniente del análisis de las ondas gravitatorias generadas por la fusión de dos estrellas de neutrones detectadas en 2017 [50]

Una nueva y prometedora fuente de información, que puede aclarar este dilema, surge

con la detección de las ondas gravitatorias [49]. Las fuentes de este nuevo tipo de radiación provienen de la fusión de dos agujeros negros. Por lo tanto con su detección no solo se confirma la existencia de estas singulares soluciones de las ecuaciones de Einstein sino que también permite medir las masas y momentos angulares de rotación de los progenitores y del agujero negro resultante de la fusión, así como la distancia a la que se produce el cataclismo. Por esta razón la detección de las ondas gravitacionales generadas por este tipo de sucesos permite establecer un nuevo patrón de medida de distancias cósmicas conocido como *sirena estándar*.

El ingrediente esencial que aporta el fenómeno para la determinación de la constante de Hubble-Lemaître es que también se han detectado las ondas gravitacionales generadas por la fusión de dos estrellas de neutrones. Este hecho es de primordial importancia, puesto que también permite detectar la radiación electromagnética generada por el cataclismo, lo que se ha podido detectar en múltiples observatorios y en todas las longitudes de onda, desde los rayos X hasta el infrarrojo [50]. De esas observaciones *ópticas* se extrae el valor del corrimiento hacia el rojo de la kilonova remanente, y de la detección de ondas gravitatorias la distancia a la que se encuentra. El resultado es que con la observación de un solo evento podemos obtener la medida de la constante de Hubble. El valor obtenido $H_0 = 69,8$ está en la zona intermedia [50]. Aunque el error de esta simple observación es muy grande (Figura 15), es concebible que con la detección de más eventos de este tipo se obtendrá una estadística más amplia que permitirá reducir los errores y clarificar las discrepancias actuales.

De persistir la presente situación solo se contemplan dos explicaciones. O bien el análisis de las observaciones locales del Universo tardío posee errores sistemáticos que no se han tenido en cuenta, o bien el análisis del universo temprano utilizando la evolución dictada por el Modelo Cosmológico Estándar deber ser modificado. Esta segunda posibilidad es muy atractiva puesto que implica la existencia de una nueva Física desconocida hasta ahora. En ella las modificaciones de la teoría de Einstein sugeridas por la Teoría de Inflación Cosmológica y los modelos de gravedad cuántica pueden jugar un papel importante. En cualquier caso esta controversia parece contradecir la rotunda afirmación de Lev Landau sobre los cosmólogos reseñada en la introducción.

Esperemos que el futuro consiga resolver algunas de estas nuevas incógnitas de la cosmología actual. Para ello ya están en marcha un número considerable de proyectos que van a dedicarse a explorar nuevas facetas del Cosmos (Tabla 1) y que reflejan el hecho de que la Cosmología se encuentra en la plenitud de su edad de oro.

TELESCOPIOS TERRESTRES	
eBOSS	Extended Baryon Oscillation Spectroscopic Survey, USA (2014-2020)
DES	Dark Energy Survey, Chile (2013-2019)
DESI	Dark Energy Spectroscopic Instrument, USA (2020-)
LSST-DESC	Large Synoptic Survey Telescope, Chile (2022-)
JPAS	Javalambre Physics of the Accelerating Universe Astrophysical Survey, Spain (2020-)
CTA	Cherenkov Telescope Array, Spain (1923-1927)
SKA	Square Kilometre Array, Australia-Sudafrica (2030-)
SATELITES	
HST	Hubble Space Telescope (1990-)
JWST	James Webb Space Telescope (2021-)
Euclid	(2022-2028)
GAIA	Global Astrometric Interferometer for Astrophysics (2013-)
ONDAS GRAVITATORIAS	
LIGO-VIRGO	Gravitational Wave Observatories, US-Italy (2015-)
KAGRA	Kamioka Gravitational Wave Detector, Japan (2020-)
LISA	Laser Interferometer Space Antenna (2030-)
ET	Einstein Telescope Underground, Europe

Tabla 1: Principales proyectos de observaciones cosmológicas. Algunos se encuentran ya en funcionamiento y otros verán la luz en un cercano futuro.

En estas nuevas exploraciones, la Física de Astropartículas jugará un papel fundamental. Los procesos que generan toda la radiación que llega a la Tierra proviene de procesos astrofísicos que son descritos por el Modelo Estándar de Partículas y Campos. El análisis de estos procesos puede contribuir a consolidar, o no, el Modelo Cosmológico, y en ese caso abrir las puertas al descubrimiento de nueva Física no solo a nivel cosmológico sino también a nivel microscópico.

En particular urge desvelar la naturaleza de la materia oscura y el origen de la componente de energía oscura para intentar lograr la consistencia entre los dos modelos estándar.

En la actualidad existe un candidato firme para la componente de materia oscura dentro de las extensiones mínimas del Modelo Estándar. Se trata de un nuevo tipo de campo escalar, similar al campo de Higgs, pero en este caso con una partícula cuántica asociada, el axión, que es mucho más ligera e interacciona muy débilmente con todas las demás [51]–[54]. Existen varios experimentos en marcha dedicados a su búsqueda. De su éxito depende la confirmación, o no, de esta atractiva hipótesis teórica [55].

En cuanto a la energía oscura, si como sostiene el Modelo Estándar Cosmológico toda ella proviene del término regido por la constante cosmológica, sí que conocemos un

posible origen. En el Modelo Estándar de Partículas y Campos cada campo genera una contribución a la energía del vacío que depende de su masa. El problema es que el valor de esas contribuciones cuánticas a la constante cosmológica Λ que rige actualmente la evolución del Universo es muchos órdenes de magnitud superior al valor observado [56]–[57]. Y esto constituye uno de los mayores desafíos, si no el mayor de todos, de la Física Teórica actual.

Me gustaría concluir con una reflexión. Después de casi un siglo de observaciones y teorías conviene recordar las palabras de Sócrates:

La única verdadera sabiduría es saber que no sé nada,

que a comienzos del siglo XXI, y después de los colosales esfuerzos realizados por la Cosmología moderna, podría traducirse como

Solo conocemos menos del 5 % del Universo.

Bibliografía

- [1] A. Einstein, Preuss. Akad. Berlin. (1915) 844-847.
- [2] A. Einstein, Preuss. Akad. Berlin. (1917) 142-157.
- [3] A. Friedmann, Z. Phys. 10 (1) (1922) 377-386.
- [4] G. Lemaître, Ann. Soc. Sci. Brux. A 47 (1927) 49-59.
- [5] G. Lemaître, Mon. Not. Roy. Astron. Soc. 91 (1931) 483-490.
- [6] G. Stromberg, ApJ. 61 (1925) 353-362.
- [7] V. M. Slipher, Lowell Obs. Bull. 2 (1913) 56-57
- [8] E. P. Hubble, Proc. Natl. Acad. Sci. USA 15 (1929) 168-173.
- [9] H.S. Leawitt y E. C. Pickering, HarCi. 173 (1912) 1-3.
- [10] G. Gamow, Phys. Rev. 70 (1948) 572-573.
- [11] R. A. Alpher, H. A. Bethe y G. Gamow, Phys. Rev. 73 (1948) 803-804.
- [12] R. A. Alpher y R. C. Herman, Phys. Rev. 74 (1948) 1737-1742.
- [13] R. A. Alpher y R. C. Herman, Nature, 162 (1948) 774-775.
- [14] L. J. Boya, LLULL : Bol. Soc. Esp. Hist. Ciencias, 16 (1993) 5-21.

- [15] R. A. Alpher y R. Herman, Alpher Papers, private correspondence, April 13 (1995)
- [16] A. A. Penzias y R. W. Wilson, *ApJ.* 142 (1965) 419-421.
- [17] R. H. Dicke, P. J. E. Peebles, P. G. Roll y D. T. Wilkinson, *ApJ.* 142 (1965) 414-419.
- [18] D. J. Fixen, E. S. Cheng, J. M. Gates, J. C. Mather, R. A. Shafer y E. E. Wright, *ApJ.* 473 (1996) 576-587.
- [19] S. J. Perlmutter *et al.*, *ApJ.* 517 (1999) 565-586.
- [20] A. G. Riess *et al.* *Astron. J.*, 116 (1998) 1009-1038.
- [21] D. N. Spergel *et al.* *ApJ. Supl.* 148 (2003) 175-194.
- [22] G. Hinshaw *et al.* *ApJ. Supl.* 148 (2003) 135-159.
- [23] S. Cole *et al.*, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* 362 (2005) 505-534.
- [24] D. Eisenstein *et al.* *ApJ.* 633 (2005) 560-574.
- [25] E. Komatsu *et al.* *ApJ. Supl.* 180 (2009) 330-376.
- [26] E. Komatsu *et al.* *ApJ. Supl.* 192 (2011) 18-65.
- [27] G. F. Hinshaw *et al.* *ApJ. Supl.* 208 (2013) 19-44.
- [28] N. Aghanim *et al.* *A&A* . 641 (2020) A1:1-56.
- [29] P. de Bernardis *et al.* *Nature*, 404 (2000) 955-959.
- [30] S. Hanany *et al.* *ApJ. Lett.*, 545 (2000) L5-L9.
- [31] E. R. Harrison, *Phys. Rev. D* 1 (1970) 2726-2730.
- [32] Y. B. Zeldovich, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* 160 (1972) 1-3.
- [33] A. A. Starobinsky, *Phys. Lett. B* 91 (1980) 99-102.
- [34] A. Guth, *Phys. Rev. D* 23 (1981) 347-356.
- [35] A. Linde, *Phys. Lett. B* 108 (1982) 389-393.
- [36] Y. Akrami *et al.* *A&A* 641 (2020) A10:1-47.
- [37] A. Albrecht y P. J. Steinhardt, *Phys. Rev. Lett.* 48 (1982) 1220-1223.
- [38] K. S. Stelle, *Gen. Relat. Gravit.* 9 (1978) 353-371.

- [39] M. Asorey, J.L. López y I. Shapiro, *Int. Jour. Mod. Phys. A* 12 (1997) 5711-5734.
- [40] M. Asorey, L. Rachwal, I. Shapiro, *Galaxies* 61 (2018) 23:1-7.
- [41] A. G. Riess *et al.* *ApJ*. 826 (2016) 56-87.
- [42] T. M. C. Abbott *et al.* *Phys. Rev. D*, 98 (2018) 043526:1-31.
- [43] T. M. C. Abbott *et al.* *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* 480 (2018) 3879-3888.
- [44] S. Alam *et al.* arXiv preprint: arXiv:2007.08991 (2020).
- [45] A. G. Riess, S. Casertano, W. Yuan, L. M. Macri y D. Scolnic. *ApJ*, 876 (2019) 85:1-13.
- [46] K. C. Wong *et al.* *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* 498 (2019) 1420-1439.
- [47] L. Verde, T. Treu y A. G. Riess, *Nature Astron.* 3 (2019) 891-895.
- [48] W. L. Freedman *et al.* *ApJ*, 882 (2019) 34:1-29.
- [49] B. P. Abbott *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* 116 (2016) 061102:1-16.
- [50] B. P. Abbott *et al.*, *Nature* 551 (2017) 85-88.
- [51] R. D. Peccei y H. R. Quinn, *Phys. Rev. Lett.* 38 (1977) 1440-1443.
- [52] R. D. Peccei y H. R. Quinn, *Phys. Rev. D* 16 (1977) 1791-1797.
- [53] S. Weinberg, *Phys. Rev. Lett.* 40 (1978) 223-226.
- [54] F. Wilczek, *Phys. Rev. Lett.* 40 (1978) 279-282.
- [55] I. G. Irastorza y J. Redondo, *Prog. Part. Nucl. Phys.* 102 (2018) 89-159.
- [56] S. Weinberg, *Rev. Mod. Phys.* 61(1989) 1-23.
- [57] M. Asorey, *Nucl. Phys. (Proc. Suppl.)* 127 (2004) 15-22.