



La constante cosmológica y la reaceleración del universo

Carlos Ruiz Jiménez

Julio 2020

Resumen

En este escrito se repasa la historia de la constante cosmológica, con especial atención a su renacimiento surgido de las observaciones de supernovas realizadas a finales del siglo XX, que parecen indicar una reaceleración del universo.

1. Introducción

Como es sabido, la cosmología es una ciencia cuyas bases experimentales son problemáticas. Se trata de una de las ciencias experimentales más jóvenes, pero sin embargo sus fundamentos teóricos comienzan prácticamente en los orígenes de la historia del pensamiento. En este sentido, no hay mejor punto de enlace entre la ciencia y la filosofía que esta disciplina. Este hecho tiene sus innegables ventajas, pero también muchos inconvenientes. La “filosofía experimental” que lleva implicada la cosmología hace que sea una ciencia cuyos principios están constantemente puestos en duda, y no solamente por filósofos, sino también por muchos físicos, y la historia de la constante cosmológica y sus reinterpretaciones son un ejemplo paradigmático de esta realidad.

Desde los años setenta del pasado siglo hasta los últimos noventa se daba por hecho un modelo de universo gobernado por la Relatividad General (RG) admitiendo un origen explosivo del universo y una expansión del mismo definida por las ecuaciones de Friedmann, deducidas a partir de la RG y el llamado *principio cosmológico* (PC), que afirma que cualquier observador ve la misma cosmo-historia, negando al ser humano una posición privilegiada en el espacio-tiempo. Fue una sorpresa colosal descubrir en 1998 que el universo no solo no frenaba su expansión, como se creía, sino que se estaba reacelerando. Desde entonces hasta ahora se ha venido buscando sin éxito una explicación física de esa nueva aceleración, que puede llevar consigo el hecho de que el 70 % de la energía del universo sea de origen desconocido.

En este trabajo se va a hacer un recorrido por la historia del término cosmológico desde su origen hace más de un siglo hasta su reintroducción a la luz de la observación de la aceleración de la expansión del universo. En la sección 2 se inicia el recorrido por la historia de los orígenes de la constante cosmológica, estudiando en primer lugar los modelos teóricos desarrollados a partir del trabajo seminal de Einstein en 1917, y a continuación una síntesis de las observaciones experimentales que condujeron a eliminar esta constante por considerarla innecesaria. En la sección 3 se hará una exposición de los acontecimientos que se iniciaron en 1998 a partir de los cuales se tuvo que readmitir la constante cosmológica en los modelos de la RG, debido al descubrimiento de una reacceleración del universo (o, equivalentemente, una aceleración de su expansión). Se comienza con un repaso a la interpretación del término cosmológico como una energía del vacío constante a partir de 1934, y sus consecuencias teóricas en el marco del modelo estándar del *Big Bang*, para a continuación exponer los descubrimientos experimentales acaecidos a partir de 1998 y, por último, abordar el llamado *problema de la constante cosmológica*, planteado desde los primeros cálculos que unían la cosmología y la teoría cuántica, y reformulado en el presente siglo como consecuencia de los nuevos hallazgos. Por último, se cierra este trabajo con las secciones 4 y 5, un repaso de las explicaciones que se vienen dando para justificar el desajuste de las teorías con el experimento y unas breves conclusiones.

2. La constante cosmológica

2.1. Orígenes

Se puede situar el inicio de la cosmología contemporánea en febrero de 1917, dos años después de que Einstein creara su RG, con la presentación de un estudio ante la Academia Prusiana de Ciencias con el título “Consideraciones cosmológicas sobre la Teoría de la Relatividad General” (Einstein 1917)¹. Era la primera vez que Einstein aplicaba esta teoría al universo como un conjunto. En aquel entonces las velocidades medidas de los astros eran pequeñas comparadas con la de la luz, y se podía suponer un universo estático en primera aproximación (Bondi 1960, p. 98). También

¹La teoría de la RG habita en un espacio cuatridimensional en donde las coordenadas de los sistemas de referencia se denotan por x^μ ($\mu = 0, 1, 2, 3$) (siendo la primera coordenada el tiempo), y consta de dos clases de elementos. En primer lugar, los relacionados con la geometría del espacio-tiempo, con la inercia, que son el tensor métrico $g_{\mu\nu}$, funciones de las coordenadas; y sus primeras y segundas variaciones respecto a las coordenadas, representadas en las componentes del llamado *tensor de Ricci*, $R_{\mu\nu}$. El tensor métrico define el invariante infinitesimal $ds^2 = g_{\mu\nu}dx^\mu dx^\nu$ que nos permite calcular distancias desde cualquier sistema de referencia. En segundo lugar, los elementos provenientes de las fuentes de materia-energía (incluida la electromagnética), cuyo papel es representado por las componentes del tensor de energía-momentos, $T_{\mu\nu}$. De esta forma, el análogo a la ecuación clásica newtoniana de Laplace para el espacio vacío quedaría como $R_{\mu\nu} = 0$. Sus ecuaciones de campo surgen de buscar un análogo a la ecuación de Poisson, es decir, las ecuaciones de campo para un espacio lleno de materia. Se introduce también la constante de gravitación de Newton en un parámetro denominado κ y el *escalar de curvatura* R con el que se completa la teoría para dar cuenta de las leyes de conservación.

supuso que la masa estaba repartida uniformemente, de forma que la densidad del universo fuera constante. Pero Einstein quería evitar las paradojas de la teoría de Newton, como la del colapso gravitacional o la de Seeliger, según la cual la gravedad resultante en cada punto de un universo de materia infinita divergía². El problema se solucionaba suponiendo un universo espacialmente finito y añadiendo un término en la ecuación de Poisson que contrarrestara el colapso gravitacional, quedando³, $R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R - \Lambda g_{\mu\nu} = -\kappa T_{\mu\nu}$, siendo Λ una constante universal positiva, suficientemente pequeña para responder a las observaciones de la época, conocida posteriormente como *constante cosmológica*. Con este modelo se resolvían los problemas con las condiciones de frontera de sus ecuaciones diferenciales, respondiendo a un universo ilimitado, pero espacialmente finito, de materia uniforme y estático. Además, pensaba que su modelo estaría de acuerdo con las ideas de Mach sobre la relación entre la inercia (cuyo papel aquí lo juega la métrica) y las masas (o tensor de energía-momentos). Como el mismo Einstein reconoce, el estudio crítico de la mecánica newtoniana de Ernst Mach había ejercido una honda influencia sobre él (Einstein 1949, p. 25). El llamado *principio de Mach* venía a decir que la inercia de un cuerpo depende de la masa total distribuida en el exterior del mismo. El corolario en la teoría de Einstein era que la métrica estuviera condicionada por la masa del universo en su conjunto, y las ecuaciones de campo con $\Lambda = 0$ admitían soluciones de la métrica (inercia) en un espacio vacío de materia ($T_{\mu\nu} = 0$). En el mismo artículo, para lograr un equilibrio estático, Einstein llega a una relación entre la curvatura espacial, R , la densidad media de materia, ρ , y la constante cosmológica, $\Lambda = \kappa\rho/2 = 1/R^2$. En una carta a Besso de ese mismo año, basado en una densidad media demasiado alta de $\rho \sim 10^{-22}\text{g/cm}^3$ ($\sim 10^{-19}\text{kg/m}^3$), estimó un $R \sim 10^7$ años luz ($\sim 10^{23}\text{m}$) (Kragh 2008, p. 217), lo que daría una constante de $\Lambda \sim 10^{-46}\text{m}^{-2}$, suficientemente baja para dar cuenta del experimento⁴.

Así, Einstein creyó erróneamente que un universo sin materia no daría lugar a ninguna solución $g_{\mu\nu}$ en las ecuaciones de campo si $\Lambda > 0$. Pero desde un año antes el holandés Willem de Sitter estaba publicando unos trabajos sobre las consecuencias de la teoría de Einstein en la *Real Sociedad Astronómica*, y en los resultados publicados en su tercer artículo, en noviembre de 1917, descubrió una solución con constante cosmológica no nula que describía un espacio vacío de materia. Este modelo violaba el principio de Mach, pero además respondía a un universo cerrado y en expan-

²Véase una exposición de estas paradojas en (Kragh 2008, p. 179), o el análisis que hace el propio Einstein de la paradoja de Seeliger en (Einstein 1916, p. 107).

³Se podrán ver estas ecuaciones con cambios de signo, dependiendo de la *signatura* de la métrica, o con otras constantes, dependiendo del sistema de unidades. Hemos elegido aquí las originales del artículo de Einstein. A lo largo del escrito se usará generalmente el sistema de unidades naturales geometrizadas o de Planck, en donde son unidades la velocidad de la luz, c , y la constante de gravitación, G_N , aunque eventualmente se introducirán estas constantes para estimaciones concretas.

⁴Valores más actuales de la densidad media la sitúan en $\rho_0 \sim 10^{-27}\text{kg/m}^3$, dando un $R_0 \sim 10^{26}\text{m}$, con lo que resulta $\Lambda \sim 10^{-52}\text{m}^{-2}$ (Cepa 2007, p. 155).

sión. Como afirma Bondi, se pasaba de un universo de “materia sin movimiento” (Einstein) a uno de “movimiento sin materia” (De Sitter). En los años veinte lo más juicioso parecía ser encontrar un compromiso entre los dos modelos cosmológicos, cosa que hizo Friedmann a partir de 1922 suponiendo que la curvatura variaba con el tiempo, y más adelante, en 1927, Lemaître, cuyo modelo reflejaba los datos de expansión del universo que se venían observando experimentalmente. Estos modelos respondían a la isotropía y homogeneidad del espacio de Milne (PC), se ayudaban del *postulado de Weyl* de 1923, que permitía tratar el universo como un fluido perfecto (factorizando las dependencias temporal y espacial de la métrica), y fueron desarrollados en su totalidad a finales de esa década y principios de los treinta por los físicos americanos Robertson y Walker. Su métrica ha perdurado hasta nuestros días y es por ello conocida como la métrica FLRW por las iniciales de los cuatro, aunque a menudo se habla simplemente de la métrica Robertson-Walker. En ella el llamado *factor de escala* del universo, $a(t)$, es dependiente del *tiempo cosmológico*, t , perteneciente a un sistema de coordenadas comóviles para lograr un sistema de referencia en el que se pueden considerar las hipótesis de Weyl y Milne. La dependencia con el tiempo de ese factor de escala nos dará la evolución de esa expansión, y su forma concreta viene determinada por las ecuaciones de campo, que en el caso de aceptar las hipótesis mencionadas se reducen a dos relaciones, llamadas *ecuaciones de Friedmann*⁵, que relacionan el factor de escala con la densidad de materia-energía del universo, $\rho(t)$, y la presión de la misma, $p(t)$, ambas suponiendo $T_{\mu\nu}$ un fluido perfecto. Estas ecuaciones solo se pueden resolver suponiendo alguna relación entre la presión y la densidad del universo, es decir, una ecuación de estado del tipo $p = p(\rho)$, diferente dependiendo del fluido perfecto del que tratemos. La interpretación de la constante cosmológica es clara a la luz de la ecuación de Friedmann que refleja el comportamiento de la aceleración del factor de escala, \ddot{a} . Haciendo una analogía con la ley de Newton se ve que corresponde a un término que ejerce una fuerza antigravitatoria, una especie de *repulsión cosmológica*. En 1930 Eddington demostró la precariedad del equilibrio del modelo de Einstein. Su universo estático quedó en el olvido, pero no así, como veremos, su constante cosmológica, a pesar del arrepentimiento posterior sobre su introducción⁶.

⁵Se conocen también como *ecuaciones de Friedman-Lemaître* ya que el trabajo del ruso, empezado en 1922, fue culminado por el belga independientemente en 1927 (Kragh 2008, p. 232).

⁶Es famosa la revelación de George Gamow en sus memorias contando que Einstein le admitió que la constante cosmológica fue la mayor torpeza (*blunder*) de su vida. Su defensa sin embargo le debió durar varios años, llegando a cometer errores de cálculo triviales, como Friedman notó al ver que dividía ambos miembros de una ecuación por una cantidad que pudiera ser nula (Gamow 1970, p. 44). Gamow no apunta una fecha concreta de su arrepentimiento, pero parece que en una carta a Weyl de 1923 ya empezaba a dudar (Weinberg 1989), en su reunión con Hubble en Pasadena en 1931 ya lo reconocía abiertamente (Battaner López 2013, p. 143), y en 1932 presentó junto a De Sitter un modelo en expansión de espacio pseudoeuclídeo sin constante cosmológica (Sellés García 2007, p. 262).

2.2. Expansión del universo

Como se ha dicho, los modelos en expansión fueron reforzados por la observación experimental en esos años. Desde 1913 se venían haciendo observaciones sobre las distancias a las galaxias y las velocidades de alejamiento de las mismas⁷. Su interpretación era cinemática, debida al efecto Doppler, por el cual se produce un desplazamiento al rojo del espectro de un emisor que se está alejando, dado por la cantidad adimensional $z \equiv (\lambda - \lambda_0)/\lambda_0$, donde λ es la frecuencia del emisor y λ_0 la que se mediría en el laboratorio. Después de la Primera Guerra Mundial, Edwin Hubble se incorporó al observatorio de *Mount Wilson*, en donde habían puesto en marcha un telescopio de 100 pulgadas (2,54 m) (Battaner López 2013, p. 73), que superaría con creces al utilizado por Slipher. Aquella era la época del “Gran Debate” en astrofísica, personificado en Harlow Shapley, que pensaba que las nebulosas formaban parte de nuestra galaxia, y Heber Doust Curtis, que pensaba que era necesario que nuestra galaxia fuera una isla más en un universo hecho de muchas, para explicar las observaciones de estallidos en Andrómeda⁸. Hubble zanjó el debate a favor de Curtis a partir de 1923. Gracias a la observación de variables *cefeidas*⁹ demostró que la nebulosa de Andrómeda estaba fuera de nuestra galaxia¹⁰. Empezó, junto a Humason, a medir velocidades de galaxias (a partir de su desplazamiento al rojo), encontrando que la mayoría se alejaban según una ley lineal, $v = H_0 r$, en donde r es la distancia y v la velocidad de recesión de las nebulosas. Entonces asignaron un valor de 558 km/s/Mpc a H_0 ¹¹. Más adelante, el astrónomo de origen alemán Walter Baade, que curiosamente había trabajado en *Mount Wilson* durante la segunda guerra mundial, recalibraría los periodos de las cefeidas, lo que suponía un universo mayor y más viejo, publicando un H_0 de 263 km/s/Mpc en 1954, y en 1958, utilizando el telescopio de 200 pulgadas *Hale*, en el *Monte Palomar*, Allan Sandage calculó una constante de Hubble de 75 km/s/Mpc (Bondi 1960, pp. 39), cercano al valor actual. Aunque las distancias a sus nebulosas en realidad eran mayores, Hubble pudo presentar dos artículos, el segundo con Humason, en 1929 y 1931¹².

⁷Antes de que en 1914 Hubble se incorporara al observatorio Yerkes de la Universidad de Chicago, oyó una conferencia de Vesto Slipher en donde se hablaba de velocidades de alejamiento de galaxias en torno a los 1000 km/s

⁸Llegaron a celebrar un encuentro el 26 de abril de 1920, en el *Museo Nacional de Historia Natural del Instituto Smithsonian*, en Washington (Ruiz Lapuente 2019, p.14).

⁹Las cefeidas son unas estrellas cuya relación entre sus luminosidades y sus periodos es regular. En 1912 Henrietta Swan Leavitt descubrió la relación entre el periodo y la luminosidad de veinticinco cefeidas situadas en la Nube Menor de Magallanes. Midiendo el periodo se podría deducir la luminosidad y, comparándola con objetos cercanos, hallar distancias lejanas, cosa que no permitía el método de la paralaje (Sellés García 2007, p. 232).

¹⁰En realidad parece que Milton Humason había descubierto antes esas cefeidas, y Shapley estaba informado de ello y lo ocultó. Cuando su contrincante Hubble le notificó la distancia a Andrómeda este le dijo a su compañera Cecilia Payne: “Aquí está la carta que ha destruido mi universo” (Battaner López 2013, p. 84).

¹¹El valor de esta constante dio lugar al “Segundo Gran Debate” en la cosmología, ya que su inversa daba una estimación de la edad del universo, y resultaba un universo demasiado joven en comparación con la datación radiactiva de sus componentes (*paradoja de la edad*).

¹²Hubble no tenía excesiva formación teórica como para entender por qué esa velocidad no se interpretaba como cinemática, sino como una expansión del propio espacio-tiempo, pero por aquel entonces los relativistas así lo hacían, y evitó interpretar el desplazamiento al rojo como un efecto Doppler. La hipótesis de expansión del universo estaba

La correspondiente relación se daba entre el desplazamiento y la distancia, $z = (H_0/c)r$, forma más correcta que la ley de Hubble¹³.

En 1937 parece que Hubble ya había comprendido el significado de la RG y admitía la explicación relativista del corrimiento al rojo. Su razón en distintos tiempos nos da idea de la magnitud de la expansión del universo, debida a un alargamiento relativista de sus longitudes de onda. Si en el tiempo actual es a_0 , por ejemplo, $a_0/a = \lambda_0/\lambda = 1 + z$. En ese artículo, además de tratar la variación con el tiempo del factor de escala, \dot{a} , también se incluía la posibilidad de una variación de esa variación, es decir, una aceleración o desaceleración de la expansión, \ddot{a} . Además del llamado *parámetro de Hubble*, $H \equiv \dot{a}/a$, a partir de los años cincuenta, especialmente por un artículo debido a Hoyle y Sandage en 1956, se introdujo el *parámetro de deceleración o de Sandage*, $q \equiv -a\ddot{a}/\dot{a}^2 = dH^{-1} - 1$, que representa también el ritmo de variación temporal de $(H^{-1} - t)$ ¹⁴. La idea era clara, las ecuaciones de campo con $\Lambda = 0$ predecían una fase de expansión suponiendo que la materia-energía fuera homogénea, pero esa expansión se iría ralentizando debido a su atracción gravitatoria. Veremos en la sección siguiente que la terca realidad mostró lo contrario.

3. Aceleración de la expansión

3.1. Energía del vacío. Energía oscura

Fue Lemaître en 1934 el primero en interpretar el término cosmológico como una energía del vacío (Kragh 2008, p. 372). A la luz de las ecuaciones de Friedmann, el término con la constante cosmológica representa una densidad de energía constante, $\rho_\Lambda = \Lambda/(8\pi)$, que será nula si lo es la constante cosmológica. Además, al contrario que las densidades correspondientes a la materia y a la radiación, ρ_m, ρ_γ , que disminuyen al aumentar el factor de escala, su constancia garantiza que volúmenes propios iguales en cualquier instante de la historia del universo tendrán la misma

entonces ya madura. Aparte del germen experimental de Slipher, el trabajo cosmológico de De Sitter la había previsto trece años antes, y el sacerdote belga George Lemaître en 1927 había escrito un artículo en donde incluso daba una estimación a esa constante de proporcionalidad de 625 km/s/Mpc. Como se afirma en (Battaner López 2013, p. 111), la ley Hubble se podría llamar ley de Slipher-De Sitter-Lemaître-Wirtz-Lundmark-Shapley-Humason-Hubble, pero la historia de la ciencia está repleta de casos en los que la gloria de un descubrimiento compartido se la lleva un solo autor.

¹³La relación $v = H_0 r$ no puede ser correcta para grandes distancias, puesto que la velocidad tiene como límite la de la luz, ni de hecho es correcta para distancias muy cortas, dados los efectos de las velocidades “peculiares” de las galaxias. En la práctica supone unos límites aproximados de $0,01 \leq z \leq 0,2$, lo que indica que debemos estar aproximadamente en distancias mayores que unas decenas de Mpc y menores que el Gpc (Galindo Tixaire 2005, pp. 116, 128)

¹⁴Como se ha dicho, la inversa de la constante de Hubble proporciona una estimación de la edad del universo actual, $t_0 \sim H_0^{-1}$ y a la cantidad $t_0 - t$ se la denomina *tiempo retrospectivo*, puesto que los objetos desplazados al rojo se observan como eran en el pasado en un instante t (Cepa 2007, p. 116).

energía debida a la constante cosmológica, por lo que se interpreta como una *densidad de energía del vacío*. Para mantener esta constancia debe haber algún término que compense el cambio exactamente, para lo que se postula una presión negativa del vacío. En efecto, suponiendo una ecuación de estado lineal del tipo $p = w\rho$, donde w es un número real, y teniendo en cuenta que de las ecuaciones de Friedmann se puede deducir una evolución de la densidad de la forma $\dot{\rho} = -3(\rho + p)\dot{a}/a$, la constante cosmológica se interpreta como una densidad de energía correspondiente a una ecuación de estado con $w = -1$, es decir, $p = -\rho$. La presión, que se suponía que ejercía una fuerza gravitatoria encaminada a frenar la expansión, debe ser reinterpretada en este caso como repulsiva¹⁵, lo que lleva a suponer alguna otra forma de energía distinta a la habitual, denominada por esto *energía oscura*, término acuñado por Michael Turner y otros en un artículo de 1998. Por otra parte, la segunda ecuación de Friedmann se puede leer como $H^2 = 8\pi\rho_t/3 - \epsilon/a^2$, siendo ρ_t la suma de las contribuciones de todas las energías. Se puede definir así una *densidad de energía crítica*, $\rho_c \equiv 3H^2/(8\pi)$, que anularía el signo de la curvatura del universo, $\epsilon = 0$. En la cosmología actual se usan densidades adimensionales de energía, refiriéndolas a la crítica, $\Omega \equiv \rho_t/\rho_c$ ($\Omega_i \equiv \rho_i/\rho_c$). Estas densidades, como la crítica, sí dependen del tiempo, y sus valores actuales son denotados con subíndices cero, Ω_{i0} ¹⁶. Si la densidad del universo es mayor que la crítica sería un universo esférico cerrado y si es menor un universo hiperbólico abierto. Actualmente la densidad del universo es muy cercana a la crítica, lo que indica que habitamos en un universo muy plano ($|\Omega_0 - 1| < 0,007$).

Después de convivir varios modelos cosmológicos de explicaciones de la evolución del universo, desde los años cincuenta, gracias fundamentalmente a los trabajos de Alpher y Gamow, fue calando la idea de un universo en expansión proveniente de una gran explosión (*Big Bang*) que dio lugar a un *plasma* formado por un conjunto de protones, neutrones y electrones divididos dentro de un mar de fotones. Cuando después de un minuto la temperatura bajó a unos mil millones de grados, se produjo la llamada *nucleosíntesis primordial*, formando núcleos de elementos ligeros como el helio, el deuterio o el litio. En las estrellas también se dan esas síntesis, y su energía proviene de la fusión de hidrógeno en helio y, en realidad, se forman todos los elementos más pesados hasta el hierro. El resto de elementos nos pueden provenir de explosiones mucho más energéticas de estrellas, las llamadas *supernovas*. Según esta teoría, el universo se fue enfriando hasta que tuvo unos 3000 °C a la edad de 380000 años, cuando los electrones se ralentizaron y pudieron ser capturados por los núcleos, formando los átomos neutros, proceso denominado *recombinación*.

¹⁵En los siglos XVII y XVIII, Benjamin Worster, Nicolas Saunderson, Gowin Knight o el mismo Immanuel Kant, ya habían sugerido fuerzas de repulsión para evitar el colapso newtoniano (Sellés García 2007, p. 199).

¹⁶Actualmente el parámetro de Hubble tiene un valor de $H_0 \approx 67$ km/s/Mpc, la densidad crítica es de unos 5 protones por $m^3 \sim 10^{-26}$ kg/ m^3 , y los valores de las densidades parciales se estiman en $\Omega_{\Lambda 0} \sim 0,7$, $\Omega_{\gamma 0} \sim 5,5 \cdot 10^{-5}$ y $\Omega_{m0} \sim 0,3$, siendo la parte de materia ordinaria tan solo $\Omega_{m0}/5$. La edad del universo actual sería $t_0 \sim 13,8 \cdot 10^9$ años (Rújula 2015, p. 7).

Los fotones, liberados, pudieron viajar libremente, y en 1964, gracias a una afortunada casualidad, los radioastrónomos Penzias y Wilson observaron sus huellas, ya debilitadas, con una antena de la compañía *Bell Telephone*. Los fotones hallados se habían enfriado hasta una temperatura de 270 °C bajo cero (Casas 2010, p. 44). Las diferentes medidas, hechas por satélites, de esta radiación, sólo vinieron a corroborar la teoría del Big Bang. Gracias a estudios espectroscópicos de Sakharov, Peebles y Yu, y Sunyaev y Zel'dovich, en los años sesenta, se pudo analizar esta radiación de fondo. Debería responder al espectro de radiación de un cuerpo negro, y los datos deducidos a partir de observaciones a partir de los noventa y la teoría de la nucleosíntesis apuntan a que tan sólo un 6 % de la densidad crítica es materia ordinaria. El resto se conoce como *materia oscura*, de naturaleza desconocida, fría e invisible (no se tienen noticia de sus radiaciones), y ambas suponen tan sólo un 30 % de la densidad crítica ($\Omega_{m0} \sim 0,3$). El término “materia oscura fría” (*cold dark matter*, *CDM*), fue introducido por Peebles en 1982. Además, las teorías inflacionarias, creadas en los ochenta por físicos como Alan Guth o Andrei Linde para explicar los problemas teóricos derivados del modelo de Big Bang, como la paradoja de la gran uniformidad de la radiación de fondo sin conexión causal inicial, también preveían una densidad cercana a la unidad¹⁷. Por tanto, el resto debería provenir de una *energía oscura* cuyo rastro no nos llegó a partir de esta radiación de fondo.

3.2. Observaciones de supernovas

A partir de la década de 1990 se reavivó el debate de la constante de Hubble por los diferentes resultados a los que llegaban distintos grupos de investigación por recalibraciones de las cefeidas. Las *supernovas termonucleares o de tipo Ia (SNIa)* son indicadores de distancia mucho más potentes que las cefeidas, ya que constituyen indicadores secundarios de gran alcance. En su agonía, algunas estrellas ya convertidas en *enanas blancas* forman sistemas dobles con gigantes rojas y absorben masa de sus compañeras, provocando, si se supera el límite de Chandrasekhar, una contracción y una implosión que desencadena una fusión termonuclear de carbono/oxígeno de muy alta energía. El brillo de las más luminosas decae lentamente, y esto las hace ser candelas calibrables mejores que las cefeidas, ya que, al tener mayor potencia, se pueden calcular distancias mucho mayores, hasta miles de millones de años luz (con las cefeidas sólo se podía llegar al orden del millón). Aunque esta *curva de luz* o caída de brillo de las supernovas fue sugerida por Pskovskii en 1977, hasta mediados de los 90 no se pudo realizar una buena calibración, gracias a los telescopios de *Calán-Tololo*, en Chile. Fue Mark Phillips en 1993 el primero que presentó la relación entre el

¹⁷Estas teorías suponían también un campo escalar positivo, el *inflatón*, simulando una situación de presión negativa análoga a la de la constante cosmológica, pero en este caso dependiente del tiempo según la ecuación del inflatón, el nuevo campo postulado, que regiría su evolución.

brillo y el declive de estas supernovas, verificada con más observaciones entre 1994 y 1996 por Mario Hamuy. Así se disponía de un *diagrama de Hubble*, o relación entre distancias y corrimientos al rojo.

En 1988 se había empezado a recuperar el viejo proyecto de Sandage, que en 1961 dejó escrito que el futuro de la cosmología observacional debía pasar por la búsqueda, además de una constante de Hubble con precisión, del parámetro de deceleración q . Con las observaciones de supernovas se podía llegar a *distancias cosmológicas*, que se pueden asociar con desplazamientos al rojo grandes ($z > 0,5$), y estudiar esa variación del parámetro de Hubble con el tiempo. El proyecto, liderado por Saul Perlmutter, se denominó *Supernova Cosmology Project* (SCP). Otro proyecto, el *High-Z Supernova Search Team* (HZT), empezó a trabajar en 1994, con una metodología ligeramente distinta, bajo la dirección de Brian Schmidt. En este último estaba Adam Riess, que se adelantaría a liderar la publicación de los primeros hallazgos. Este equipo obtuvo cuatro noches de tiempo de observación en *Tololo* para un primer proyecto piloto en el que descubrieron la supernova *SN1995Y*. Más adelante se unieron al proyecto más investigadores americanos, australianos y chilenos. El grupo utilizó los telescopios Keck de Hawaii y los de la *European Southern Observatory* (ESO) en Chile, aparte de contar con acceso a los datos del *Hubble*. En el SCP se estudiaron 42 supernovas de alto corrimiento al rojo y 18 de bajo, y en el HZT 14 supernovas de alto y 34 de bajo. Ambos proyectos llegaron a la conclusión, en 1998, de que las supernovas aparecían entre un 10 % y un 15 % más distantes de lo esperado. La expansión no se estaba ralentizando sino reaccelerando, el parámetro de Sandage era negativo, $q_{1998} \sim -0,75^{18}$, y la impresión general es que volvía a actuar una constante cosmológica en las ecuaciones de campo (Ruiz Lapuente 2019, p. 76). De esta forma se inició la defensa del modelo estándar cosmológico que subsiste hasta nuestros días, el llamado Λ CDM, también conocido como *modelo concordante*. Los valores de densidades encontrados entonces no distan mucho de los actuales: $\Omega_{m1998} \sim 0,27$, $\Omega_{\Lambda1998} \sim 0,73$. Hay que decir que en las primeras conclusiones en los rangos de error también se podía dar la ralentización de la expansión. La interpretación como una nueva aceleración en realidad se “decidió” por votación en un congreso científico celebrado en mayo de 1998, mes en el que Riess encabezó la primera publicación al respecto. Más adelante, en observaciones hechas en 2001 a mayores desplazamientos al rojo, $z \sim 1,7$, se pudo descartar la ralentización con más fiabilidad, siempre que se aceptaran las calibraciones de las supernovas (Cepa 2007, p. 54). Es sabido que por este descubrimiento Saul Perlmutter, Brian Schmidt y Adam Riess recibieron el Nobel de física en 2011. En 1998 se reeditó el “Gran Debate” de 1920 en el *Museo de Historia Natural de la Institución Smithsonian*, esta vez entre James Peebles y Michael Turner, y con el tema de la naturaleza del nuevo universo. En

¹⁸La inflexión, o el momento en el que $q = 0$ se produjo a los 7,1 Ga de vida del universo [p. 131] (Galindo Tixaire 2005).

2013, los datos provenientes del telescopio espacial *Planck* de la ESA (*European Space Agency*) corroboraron el modelo estándar del universo Λ CDM, corrigiendo mínimamente los valores de 1998.

3.3. Energía del vacío cuántico. El problema de la constante cosmológica

En 1967 se resucitó en cierta forma la idea de la constante cosmológica para explicar los altos corrimientos al rojo, $z \approx 2$, de los objetos cuasi-estelares (*cuásars*), por Petrosian, Salpeter y Szekeres (Earman 2001, p. 205). Pero a partir de estas observaciones, el primero en relacionar la constante cosmológica con la energía del vacío calculada con la teoría cuántica fue el físico soviético Yákov Zel'dovich en un artículo publicado en una revista rusa en mayo de 1968¹⁹. Su título era *The cosmological constant and the theory of elementary particles*, y allí se demostraba que una constante cosmológica no nula se podía deducir de un tratamiento invariante relativista de las fluctuaciones del vacío cuántico, siempre que se aceptara la ecuación de estado de presión negativa del vacío, $p = -\rho_\Lambda$. Sus cálculos demostraron que las divergencias obtenidas en el cálculo cuántico de una energía del vacío podían dar un valor finito con una adecuada regularización. De esta forma se ponía de nuevo en el tablero la constante cosmológica, que ayudaría a los teóricos posteriores a aventurar hipótesis para explicar fenómenos como la inflación o el que nos ocupa. En aquel tiempo había cierto convenio en poder considerar nula la constante cosmológica, pero como el mismo Zel'dovich declaró, una vez que Einstein la había presentado ya **“the genie has been let out of the bottle and it is no longer easy to force it back in”**.

En efecto, se puede interpretar la constante cosmológica como relacionada con una densidad de energía del vacío, sin más que pensarla formando parte del tensor de impulsos, en lugar de en el primer miembro, $\langle T_{\mu\nu} \rangle_{\text{vac}} = -\frac{g_{\mu\nu}}{c^2} \rho_{\text{vac}}$ (Bass 2015). Se tratará así de una energía constante cuyo origen podría estar asociado a las fluctuaciones cuánticas del vacío que se derivan del principio de incertidumbre de Heisenberg. Dentro del rango de incertidumbre energética de este principio, se puede considerar el vacío como un mar de partículas “virtuales” vibrantes. Siguiendo la tradición de Fermi de hacernos idea de un orden de magnitud aproximado, lo que los anglosajones denominan *back-of-the-envelope calculation*, podemos dar una estimación de esta densidad de energía. Suponiendo que nuestros osciladores cuánticos tienen una masa igual a la característica de nuestro sistema de unidades, la masa de Planck²⁰, definida como $M_p \equiv \sqrt{\hbar c/G_N} = 2,18 \cdot 10^{-8}$ kg, en donde \hbar es la constante de Planck reducida, y suponiendo que vibra en un volumen correspondiente a

¹⁹Véase una reedición y análisis en, por ejemplo, (Sahni y Krasinski 2008)

²⁰Se supone la escala de Planck como el umbral de validez de la RG debido a que los efectos cuánticos se deberían tener en consideración y, a día de hoy, como se sabe, no existe una teoría aceptada por la comunidad científica a propósito de la gravedad cuántica.

su *longitud de onda Compton*, $\lambda_C = h/(M_p c)$, longitud característica de la vibración que tendría un fotón con esa masa, entonces $\rho_{\text{vac}} \sim M_p/\lambda_C^3$, lo que nos daría un valor de $\rho_{\text{vac}} \sim 10^{94} \text{ kg/m}^3$, mientras que la densidad de energía oscura que arrojan las observaciones, próxima a la crítica, es de unos 5 protones por metro cúbico, es decir, equivalente a $\rho_\Lambda \sim 10^{-26} \text{ kg/m}^3$. Una diferencia nada menos que de ¡120 órdenes de magnitud! Para el premio nobel Steven Weinberg, por ejemplo, uno de los creadores del modelo estándar de partículas elementales, **“este debe de ser el peor fracaso en una estimación del orden de magnitud de la historia de la ciencia”**(Weinberg 1994, p. 178). Antes del descubrimiento de la reaceleración el problema era la explicación de una constante cosmológica nula, este era realmente el llamado “problema de la constante cosmológica”. Se supuso que la contribución a la expansión del universo estaba condicionada por una constante cosmológica total, o efectiva, escribiendo $\Lambda = 8\pi G_N \rho_{\text{vac}} + \Lambda_0$, siendo Λ_0 un posible término compensatorio. De esta forma la contribución de la energía del vacío cuántico podría cancelarse, pero ni con estas ni con otras supuestas contribuciones hubo éxito, dado que la cancelación debería tener una alta precisión (*problema del ajuste fino*). También se interpretaba la energía del vacío como una consecuencia del *efecto Casimir*, que fue predicho en 1948 y medido experimentalmente en 1997. Se trata de un efecto cuántico por el cual la presencia de placas metálicas paralelas alteran el valor esperado de la energía del vacío, cuando están separadas por distancias de varios diámetros atómicos (lo que impide que se materialicen partículas que vibren con una longitud de onda mayor que esa distancia), generando una fuerza atractiva entre ellas. Su interpretación, sin embargo, como el resultado de una energía del vacío cuántica es discutible, dado que su magnitud es independiente de la forma de la regularización o límite de las frecuencias de vibración que se imponga artificialmente (Earman 2001, p. 209). En los últimos años del pasado milenio la esperanza era el desconocido campo cuántico del bosón de Higgs, que todavía no había salido a la luz (Abbott 1989, p. 110).

Sin embargo, cálculos más precisos posteriores teniendo en cuenta las teorías cuánticas de campos, la teoría de cuerdas, el campo inflacionario o el campo de Higgs tampoco han resuelto el problema. La teoría cuántica de campos predice rupturas de simetría que se produjeron a lo largo de la expansión del universo, dando lugar al desacople de fuerzas y la creación de nuevas partículas. Cuando uno pone en juego toda la potencia de este modelo debe admitir ciertas técnicas que han funcionado con la mayor precisión en la historia de la física hasta el momento. Una de ellas es la admisión de cotas de corte (*cut offs*) para las frecuencias altas de vibración de las partículas, lo que se conoce con el nombre de *renormalización*. Si uno quiere sumar (integrar) las contribuciones de las vibraciones de partículas que dan lugar a un cierto nivel de energía del vacío, lo que obtiene son cantidades infinitas. Estas cantidades se hacen finitas si uno pone un límite superior de vibración, normalmente asociado con la escala de la que esté tratando la teoría. Estas técnicas no arreglan el problema de la constante cosmológica ni en el caso de vibraciones de quarks ni en el del bosón de

Higgs, aunque disminuyen el orden de magnitud del error ²¹. Por tanto, si uno no quiere poner en duda las técnicas de la teoría cuántica de campos, los físicos se ven abocados a suponer que algo anda mal. El problema de la constante cosmológica pasó a ser “el problema de la energía oscura”. Habría que admitir hipótesis adicionales, algunas de ellas las vemos a continuación.

4. Posibles explicaciones

4.1. Principio antrópico

El principio antrópico fue introducido en el contexto de la expansión del universo por Gregory Idlis en la URSS y Robert Dicke en EEUU en 1960, y bautizado por Brandon Carter en 1967 (Kragh 2008, p. 382). Viene a afirmar que el universo es tal y como lo vemos precisamente porque podemos verlo así, y en este sentido no cabe preguntarse por la causalidad de las magnitudes de ciertas constantes. Hay una versión fuerte de los ochenta, creada por John Barrow y Frank Tipler, que viene a defender que la evolución del universo estaba obligada a crear vida inteligente que se preguntara sobre la evolución del universo, argumento que a primera vista parece que tiene tintes tautológicos. Antes del descubrimiento de la reacceleración, se especulaba sobre el hecho de que quizás el universo tuviera una constante cosmológica nula precisamente para que su evolución no fuera tan acelerada como para no dar tiempo a la evolución de la vida (Weinberg 1994, p. 179). Pero precisamente este mismo argumento también vale para el caso del universo reaccelerado actual. Ateniéndonos a las ideas de Andrei Linde sobre la inflación eterna pueden existir un conjunto infinito de universos cada uno con una energía del vacío particular. Un cálculo hecho precisamente por Steven Weinberg en 1987 dio un margen para ρ_Λ entre -10 y 100 veces el valor de ρ_m para el desarrollo de la vida en el universo (Casas 2010, p. 110). El universo actual tendría $\rho_{\Lambda 0} \simeq 2,3\rho_{m0}$, con lo que entraría dentro de ese rango. Quizás en la mayoría de los universos ese valor excedería con mucho el rango posible y no habría vida inteligente, pero en el nuestro se ha debido producir alguna cancelación por parte de algún otro tipo de energía de forma que estemos en un universo que pueda ser pensado. Ideas relacionadas con el principio antrópico en cosmología fueron propuestas por Lee Smolin en su *selección cosmológica natural* y retomadas por el teórico de cuerdas Leonard Susskind en su *paisaje cósmico* (Susskind 2007, p. 181).

4.2. Quintaesencia, energía fantasma y otros campos

La determinación de la ecuación de estado de la energía oscura es uno de los objetos de investigación en las explicaciones de la reacceleración del universo. La energía oscura puede suponerse

²¹Vanos intentos, nada menos que 56 cifras decimales separan por ejemplo el cálculo detallado de la energía debida al campo de Higgs respecto de la medida (Bass 2015, p. 6).

que no sea de tipo vacío, es decir, que su ecuación de estado no tenga $w = -1$. De hecho cualquier $w < -1/3$ daría lugar a aceleraciones de la expansión. El caso de la energía oscura denominada *quintaesencia* estaría en el rango $-1 < w < -1/3$ pero no sería constante sino que dependería de z . La integración de las ecuaciones de Friedmann en este caso no podría ser analítica, salvo para $w = -2/3$. La quintaesencia es un campo escalar que ha de ser derivado a partir de un lagrangiano, como se suele realizar en teoría de campos, que definirá el potencial que dará lugar a la dependencia funcional con z . En esta línea está trabajando, por ejemplo, Cumrun Vafa, que hizo su tesis bajo la supervisión de Edward Witten, en Princeton²².

Otra variante es la llamada *energía fantasma*, en donde $w < -1$, llamada así porque la densidad de energía más la presión darían un valor negativo. No se ha encontrado un lagrangiano que la represente y viola la causalidad. No hay por tanto un potencial estable que la defina. Además, la expansión predicha por este modelo es colosal, y el factor de escala divergería, fenómeno conocido como “la Gran Fuga” (*Big Rip*). En los últimos diez años se vienen proponiendo teorías con distintos campos escalares que interaccionan con el campo fantasma y cuyas ecuaciones de estado oscilen a través de la barrera de $w = -1$. Estos modelos pertenecen a lo que se denomina *quintom scenario*, por una mezcla de las palabras inglesas *quintessence* y *phantom*.

4.3. Revisión de teorías o métodos

Una opción sería echar por tierra las hipótesis fundamentales del PC y suponer universos inhomogéneos y/o anisótropos. El mismo Einstein, junto con Straus, propuso en 1945 un modelo de RG que “pegaba” una solución local de las ecuaciones con una cosmológica. Actualmente también se han creado modelos de RG inhomogéneos que no necesitan la energía oscura para explicar la reaceleración (Célérier 2007; Temple y Smoller 2009), pero aunque también cosmólogos de la talla de George Ellis vienen poniendo en cuestión el PC (Ellis 2017), estudios del fondo cósmico de microondas aseguran la anisotropía del universo solamente en una parte en 100000, suficiente para atisbar las semillas de la formación de galaxias. Además, entre 1997 y 2001 se hizo una distribución de galaxias por conteo en todas las direcciones en Arizona y en Chile, el proyecto 2MASS (*Two Micron All-Sky Survey*), catalogando más de 300 millones de objetos que han dado una imagen isotropa del universo a gran escala. La homogeneidad ha sido comprobada recientemente, entre 2009 y 2014, gracias al proyecto BOSS (*baryon oscillation spectroscopic survey*), encontrando un límite de esta de tan solo 64,3 Mpc, lo que asegura la homogeneidad a gran escala

²²Edward Witten es muy conocido entre los físicos teóricos por ser uno de los mayores expertos en teoría de cuerdas. Hay que decir que la mayoría de los teóricos de cuerdas, como Leonard Susskind, se muestran muy esperanzados en la resolución de todos los problemas teóricos mediante sus teorías. El problema es que llevan del orden de cuarenta años esperanzados sin demasiados frutos visibles.

supuesta en el PC (Ruiz Lapuente 2019, p. 103).

También existen intentos de alternativas a la RG que no necesitan de la constante cosmológica o tienen otros términos parecidos, algunas de ellas conteniendo a la RG como caso particular. Las más exitosas eran aquellas que introducían un campo escalar de tal forma que su interacción con el de la gravitación hacía que las ondas gravitatorias se propagaran a velocidad distinta a la de la luz. Sin embargo, la señal de onda gravitatoria GW170817 detectada en 2017 por los observatorios *LIGO* y *Virgo* y otras posteriores han confirmado una transmisión acorde con la RG estándar.

Por último, se puede argumentar que es necesario revisar el principio de equivalencia y no suponer que las mismas leyes físicas valgan para $z \gg 1$ (grandes distancias), o modelos nuevos para la propagación de la luz (luz cansada) o que de hecho haya habido problemas sistemáticos en el diseño de las observaciones experimentales, debidos a la interacción de polvo intergaláctico, a variaciones intrínsecas de la luminosidad de las supernovas (por ejemplo, por cambios en su metalicidad), etc. El corrimiento al rojo por ejemplo se podría deber a un efecto Doppler causado efectivamente por movimientos “reales” de las galaxias. Famosa es, por ejemplo, la disidencia contra la asociación del desplazamiento al rojo con la expansión del universo del astrónomo estadounidense Halton Arp en 1992, afirmando observaciones de objetos a la misma distancia con distintos desplazamientos al rojo, que fueron rechazadas como deficientes por la comunidad científica, denegándole tiempo de estudio en *Monte Palomar* (Arp 1992). El Segundo Gran Debate, por ejemplo, sigue vigente en nuestros días, teniendo en cuenta que los valores de H_0 obtenidos a partir de las cefeidas del cúmulo de *Virgo* por el telescopio espacial *Hubble* han dado resultados distintos que los obtenidos a partir del fondo cósmico por el satélite *Planck* (Ruiz Lapuente 2019, 100). Una tercera vía fue abierta a partir de la detección de ondas gravitacionales, y los resultados obtenidos parece que están en el rango de los valores en disputa. Sólo queda esperar que nueva física pueda explicar de verdad los grandes interrogantes que se ocultan detrás del modelo concordante.

5. Conclusiones

En este trabajo se ha hecho un breve repaso a la situación actual al respecto de las teorías de expansión y reacceleración del universo, relacionadas con el término cosmológico introducido por Einstein. Se ha visto la dificultad que tiene la ciencia cosmológica para elaborar teorías globales del universo a partir de observaciones locales, y la necesidad de aceptar a priori principios de tipo metafísico cuya comprobación experimental a veces no es demasiado sólida. En este sentido se han analizado los problemas asociados con la constante cosmológica introducida por Einstein hace más de un siglo, y su posible reinterpretación actual como una energía oscura de la que solo se tiene

noticia indirectamente. Por último, se ha hecho una breve exposición de las posibles explicaciones a este problema indicando que, a día de hoy, no hay un consenso en la comunidad científica acerca de ningún camino en concreto, y sigue siendo motivo de debate.

Sin embargo, no es necesario tanto escepticismo al respecto, si uno conoce la idiosincrasia de la ciencia cosmológica y sus dificultades. No parece, por ejemplo, que se pueda renunciar al PC sin aceptar a cambio algún prejuicio antrópico con matices teológicos, y la observación experimental viene apoyándolo de forma bastante convincente. Además, son numerosas las teorías que sí han dado pruebas de su robusted a lo largo de la historia, como la misma RG como punto de partida a los distintos modelos cosmológicos. En cuanto al modelo Λ CDM vigente en la actualidad, ya en 2007, a pesar de la falta de explicaciones de tantas medidas, se daba cierto convenio en aceptar este paradigma (Cepa 2007, p. 464). La teoría del *Big Bang* parece que ofrece la mayor cota de credibilidad, por los numerosos indicios experimentales y teóricos que se han encontrado que la avalan (nucleosíntesis primordial, fondo cósmico...), y se acepta la expansión del universo como la sobreviviente de todas las alternativas que ha habido, si bien su parte inflacionaria todavía es deficitaria tanto desde el punto de vista teórico (origen del inflatón) como experimental (solamente evidencias indirectas). En cuanto a la energía oscura, tratada en este trabajo, parece que es la pata más floja de este modelo, y se precisarán más medidas y, quizás, una nueva física capaz de explicar el problema. Hay esperanzas en los proyectos al respecto de la ESA, el satélite *Euclides*, que debería ser lanzado en junio de 2022, y en el de la NASA en esa misma década, el Telescopio de Sondeo Infrarrojo de Campo Amplio (o en inglés, *Wide Field Infrared Survey Telescope*, WFIRST), rebautizado este mes como Telescopio Espacial Roman, en honor a la astrónoma Nancy Grace Roman, “madre” del telescopio Hubble. No obstante, la discrepancia en la convergencia con las teorías cuánticas de campos hace pensar que probablemente la solución venga de la mano de la anhelada unificación de la teoría cuántica con la gravedad, cuya búsqueda en breve cumplirá también el siglo.

Referencias

- Abbott, Larry. 1989. “The Mystery of the Cosmological Constant.” *Scientific American* 258 (5): 106–113.
- Arp, Halton. 1992. *Controversias sobre las distancias cósmicas y los cuásares*. Barcelona: Tusquets.
- Bass, Steven D. 2015. “Vacuum energy and the cosmological constant.” *Modern Physics Letters A* 30 (22): 1–13.

- Battaner López, Eduardo. 2013. *HUBBLE. La expansión del universo. El cosmos se hace mayor*. Barcelona: RBA.
- Bondi, H. 1960. *Cosmology. Second Edition*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Casas, Alberto. 2010. *El lado oscuro del universo*. Madrid: CSIC, Catarata.
- Célérier, Marie-Noélie. 2007. “The Accelerated Expansion of the Universe Challenged by an Effect of the Inhomogeneities. A Review.” *New Advances in Physics* 1:29.
- Cepa, Jordi. 2007. *Cosmología física*. Madrid: Akal.
- Earman, John. 2001. “Lambda: The Constant That Refuses to Die.” *Arch. Hist. Exact. Sci.* 55:189–220.
- Einstein, A. 2019(1916). *Sobre la teoría de la relatividad especial y general*. Madrid: Alianza.
- . 1952(1917). “Cosmological Considerations on the General Theory of Relativity.” En *THE PRINCIPLE OF RELATIVITY*. New York: Dover.
- . 1986(1949). *Notas autobiográficas*. Madrid: Alianza.
- Ellis, George. 2017. “The Domain of Cosmology and the Testing of Cosmological Theories.” En *The Philosophy of Cosmology*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Galindo Tixaire, Alberto. 2005. “La nueva cosmología: principio y fin del universo.” *Rev. R. Acad. Cienc. Exact. Fis. Nat.* 99 (1): 113–159.
- Gamow, G. 1970. *My World Line: An Informal Autobiography*. New York: Viking Press.
- Kragh, Helge. 2008. *Historia de la cosmología*. Barcelona: Crítica.
- Ruiz Lapuente, Pilar. 2019. *La aceleración del universo*. Madrid: CSIC, Catarata.
- Rújula, Álvaro de. 2015. “La radiación de fondo, casi a fondo.” *Rev. Esp. Fis.* 29 (1): 5–10.
- Sahni, Varun, y Andrzej Krasinski. 2008. “Republication of: The cosmological constant and the theory of elementary particles (By Ya. B. Zeldovich).” *Gen. Relativ. Gravit.* 40:1557–1591.
- Sellés García, Manuel. 2007. *Introducción a la historia de la cosmología*. Madrid: UNED.
- Susskind, Leonard. 2007. *Paisaje cósmico*. Barcelona: Crítica.
- Temple, Blake, y Joel Smoller. 2009. “Expanding wave solutions of the Einstein equations that induce an anomalous acceleration into the Standard Model of Cosmology.” *Proc. of the Nat. Acad. of Sci. of the USA* 106 (34): 14213–14218.
- Weinberg, Steven. 1989. “The cosmological constant problem.” *Reviews of Modern Physics* 61 (1): 1–23.
- . 1994. *El sueño de una teoría final*. Barcelona: Crítica.

Este documento ha sido firmado digitalmente por Carlos Ruiz Jiménez, con DNI XXX302, jurando que este trabajo, *La constante cosmológica y la reaceleración del universo*, es de su autoría y no ha sido plagiado