



La cosmología relativista Del universo infinito y estático al universo en expansión

Luis Enrique Otero Carvajal

La Teoría General de la Relatividad planteó una nueva configuración del Universo¹. Si la revolución científica de la física moderna había supuesto, en palabras de Alexandre Koyré, el paso "*Del mundo cerrado al universo infinito*", la revolución einsteiniana supuso el paso del *Universo infinito y estático*, de la cosmología moderna, al *Universo finito y dinámico* de la relatividad general. "*El Dios newtoniano reinaba plenamente en el vacío infinito del espacio absoluto, en el que la fuerza de la atracción universal unía los cuerpos atómicamente estructurados del inmenso universo, haciéndolos moverse en torno, de acuerdo con leyes matemáticas precisas*"², tuvo que ceder el paso al universo relativista. La relatividad general exigía un Universo finito sin límites. "*En el espacio de unos años, entre 1910 y 1930, precisamente cuando la palabra "átomo" cambiaba de sentido, el Universo de la Astronomía cobró una nueva fisonomía, sufrió una verdadera transformación, tan importante como la que, a comienzos del siglo XVII había transformado el Universo de Ptolomeo en Universo de Galileo.*"³

Las consideraciones cosmológicas de Einstein: el universo "*cilíndrico*".

Había de ser de nuevo un artículo de Albert Einstein el que sentase las bases de la nueva cosmología. En 1917, en una comunicación a la Academia Prusiana de Ciencias, titulada "*Kosmologische Betrachtungen zur allgemeine Relativitätstheorie*"⁴, Einstein postuló la existencia de un "*Universo cilíndrico*" en

* Texto basado en OTERO CARVAJAL, L. E.: *La crisis de la Modernidad. La quiebra de la representación determinista*, capítulos V, tesis doctoral, Universidad Complutense de Madrid, 1988.

¹ OTERO CARVAJAL, L. E.: "Einstein y la teoría general de la relatividad. Del universo estático al universo en expansión", en http://umbral.uprrp.edu/seminario/verponencias.php?sem_id=51.

² KOYRÉ, A.: *Del mundo cerrado al universo infinito*, Madrid, Siglo XXI, 1984, pp. 253-254.

³ MERLEAU-PONTY, J.: *Cosmología del siglo XX*, Madrid, Gredos, 1971, p. 13.

⁴ EINSTEIN, A.: "Kosmologische Betrachtungen zur allgemeine Relativitätstheorie", *Sitzungsberichte der königlichen preussischen Akademie der Wissenschaften*, 1917, pp. 142-152, existe reimpresión en

función de los resultados de la relatividad general. La argumentación fundamental de las *Consideraciones Cosmológicas* se encuentra en la exigencia de la ecuación relativista del campo, por la cual el *tiempo* constituye una línea que se extiende hacia el pasado y el futuro de manera infinita, mientras el *espacio* se cierra, deja de ser considerado infinito aunque no tenga límites. El continuo espacio-temporal relativista exige la incorporación del *espacio* y del *tiempo*, por lo que su representación geométrica vendría determinada, según el artículo de Einstein de 1917, por un cilindro que se prolongaría sin límites en la dirección de la línea del Universo determinada por el *tiempo*.

Para Einstein la expresión "*Universo finito*", en su artículo de 1917, debía entenderse como espacio finito, análogo a una esfera, por el cual una partícula, que partiese desde un punto cualquiera, trazaría una circunferencia máxima, delimitada por la circunferencia de la esfera, hasta regresar al punto de origen. Las irregularidades del continuum espacio-temporal, provocadas por la desigual distribución de la materia en el Universo, no afectarían a su carácter *esférico*, tomado en su globalidad (al igual que las irregularidades de la superficie terrestre son despreciables observadas desde el espacio), debido a las enormes dimensiones en las que la materia se encuentra distribuida por el Universo, de manera que la densidad másica del mismo puede ser considerada como uniforme y sujeta a pocas variaciones. "*Cabría imaginar que nuestro mundo se comporta en el aspecto geométrico como una superficie que está irregularmente curvada pero que en ningún punto se aparta significativamente de un plano, lo mismo que ocurre, por ejemplo, con la superficie de un lago rizado por débiles olas. A un mundo de esta especie podríamos llamarlo con propiedad cuasi-euclidiano, y sería espacialmente infinito. Los cálculos indican, sin embargo, que en un mundo cuasi-euclidiano la densidad media de materia tendría que ser nula. Por consiguiente, un mundo semejante no podría estar poblado de materia por doquier... Si la densidad media de materia en el mundo no es nula (aunque se acerque mucho a cero), entonces el mundo no es cuasi-euclidiano. Los cálculos demuestran más bien que, con una distribución uniforme de materia, debería ser necesariamente esférico (o elíptico). Dado que la materia está distribuida de manera localmente no uniforme, el mundo real diferirá localmente del comportamiento esférico, es decir, será cuasi-esférico. Pero necesariamente tendrá que ser finito*"⁵

Para adecuar las ecuaciones de la relatividad general a la métrica del espacio esférico, Einstein se vio obligado a introducir la "*constante cosmológica*" (Λ), mediante la agregación de un nuevo término, conocido como "*término cos-*

EINSTEIN, A.; LORENTZ, H. A.; MINKOWSKI, H., y otros: *The Principle of Relativity*, London, Methuen and Co., Ltd., 1923, reimpresso por Dover Publications, Inc., Nueva York.

⁵ EINSTEIN, A.: *Sobre la teoría de la relatividad especial y general*, pp. 98-99.

mológico": $G_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}G + \Lambda g_{\mu\nu} = -KT_{\mu\nu}$. La nueva ecuación permitía la existencia de un espacio *hiperesférico* compatible con una línea abierta del tiempo, no afectada por la curvatura del espacio. *"En el Universo de Einstein, el encurvamiento del espacio no afecta al Tiempo; la distinción intrínseca entre Tiempo y Espacio, puesta en duda por la geometría local de la teoría de la Relatividad restringida, se vuelve a hallar restablecida a escala cósmica. Un tiempo universal fluye uniformemente en cualquier punto del Universo einsteiniano, va de menos infinito a más infinito, sin que en ningún momento se distinga intrínsecamente de cualquier otro"*⁶. El Universo hiperesférico de Einstein creaba, pues, algunas complicaciones a la teoría de la relatividad, referidas a la consideración del continuum espacio-temporal, al dejar al *tiempo* como una variable independiente de la métrica del *espacio*.

Einstein reconoció posteriormente que la representación del Universo propuesta en el artículo de 1917 no era todavía la adecuada, pues no era necesaria la exigencia de un *tiempo* lineal e infinito, como puso de manifiesto el matemático ruso Friedman en 1922. *"Mis iniciales consideraciones sobre este problema se basaban en dos hipótesis: 1. La densidad media de materia en todo el espacio es distinta de 0 e igual en todas partes. 2. La magnitud (o el "radio") del universo es independiente del tiempo. Estas dos hipótesis demostraron ser compatibles según la teoría de la relatividad general, pero únicamente cuando se añadía a las ecuaciones un término hipotético que ni era exigido por la propia teoría ni tampoco parecía natural desde el punto de vista teórico ("término cosmológico de las ecuaciones de campo")... Sin embargo, el matemático ruso Friedman descubrió, allá por los años veinte, que desde el punto de vista puramente teórico era más natural otro supuesto diferente. En efecto, Friedman se dio cuenta de que era posible mantener la hipótesis 1 sin introducir en las ecuaciones de campo de la gravitación el poco natural término cosmológico, siempre que uno se decidiese a prescindir de la hipótesis 2. Pues las ecuaciones de campo originales admiten una solución en la que el "radio del mundo" depende del tiempo (espacio en expansión). En este sentido cabe afirmar con Friedman que la teoría exige una expansión del espacio."*⁷ De esta forma, el continuum espacio-temporal no euclídeo de la relatividad general adquiere su máxima coherencia, al ligar espacio y tiempo con la propia representación del Universo.

El universo de De Sitter.

⁶ MERLEAU PONTY, J.: *Cosmología del siglo XX*, p. 51.

⁷ EINSTEIN, A: "La estructura del espacio en conexión con la teoría de la relatividad general", Apéndice a la obra *Sobre la teoría de la relatividad especial y general*, pp. 117-118.

Las *Consideraciones Cosmológicas* fueron presentadas por Einstein el 8 de febrero de 1917 en la Academia Prusiana de Ciencias; inmediatamente después, el 31 de marzo, Willem De Sitter publicó un trabajo en las Actas de la Academia de Ciencias de Ámsterdam, fruto del diálogo sostenido con Einstein durante 1916 sobre los problemas cosmológicos de la Relatividad General⁸; en él señalaba la debilidad de los resultados alcanzados por Einstein, al demostrar que las ecuaciones de campo, con la introducción del "término cosmológico", admitían una solución distinta a la proporcionada por éste, si se aceptaba que el espacio-tiempo cósmico se encontraba *vacío*. Para De Sitter el espacio esférico postulado por Einstein no podía ser considerado como una solución *real*; según su punto de vista, la Relatividad no afirmaba las propiedades reales del modelo propuesto, sino que hacía referencia a las transformaciones matemáticas. Más interesante era la crítica que realizaba sobre el papel otorgado por Einstein al *tiempo* en sus *Consideraciones Cosmológicas*, al señalar que no satisfacía de manera plena la exigencia de co-varianza de la relatividad general. Para de Sitter el Universo de Einstein se fundamentaba en presupuestos físicos pero también filosóficos, mientras que él era partidario de una solución estrictamente matemática. El modelo que proponía, conocido como "*Universo de De Sitter*", era contemplado como un límite, físicamente hablando. De Sitter mantenía la "*constante cosmológica*" (Λ) de Einstein, pero sin el contenido dado por éste a la misma. En su artículo "*On Einstein's theory of gravitation and its consequences*" insistió en esta cuestión, señalando las dificultades que acarrearía la introducción de Λ . "*No puede negarse que la introducción de la constante Λ es algo artificial y que altera la simplicidad y la elegancia de la teoría original de 1915, uno de cuyos mayores encantos era el abarcarlo todo sin que se introdujese ninguna nueva constante cósmica.*"⁹

El modelo de Universo propugnado por De Sitter fue presentado por éste como un modelo alternativo y simétrico al modelo de Einstein, lo cual dio origen a notables confusiones a la hora de su interpretación. Por otra parte, de Sitter indicaba que no era lícito hablar de tiempo cósmico, frente a la afirmación de Einstein de que el *espacio hiper-esférico* era independiente de la variable tiempo, lo que conducía a considerar que la materia se encontraría en reposo estático; sin embargo, su crítica en este punto no era consistente y su modelo fue considerado como un modelo estático, en el que los coeficientes de la métrica en un sistema de coordenadas son independientes del tiempo. Ahora bien, como señaló Howard Percy Robertson el "*Universo de de Sitter*" no puede ser

⁸ DE SITTER, W.: "On the relativity of inertia; remarks concerning Einstein's latest hypothesis" *Koninklijke van Wetenschappen te Amsterdam*, 19, 1917, pp. 1.217-1.225.

⁹ DE SITTER, W.: "On Einstein's Theory of Gravitation and Its Astronomical Consequences: III" *Monthly Notices Royal Astronomical Society*, vol. 78, 1917, pp. 3-29.

considerado estático sino *estacionario*¹⁰. "La simetría equívoca y engañosa entre los dos modelos [el de Einstein y el de de Sitter] hizo que hasta el de de Sitter apareciera como espacialmente cerrado, cuando esta propiedad no pertenece como intrínseca a ese modelo; en el Universo de Einstein no es posible elegir la coordenada de tiempo para que pueda aparecer el espacio como infinito; una tal elección es, por el contrario, posible en el Universo de de Sitter: el espacio es, en ese caso, euclídiano."¹¹

En el Universo de Einstein la materia se encuentra estadísticamente en reposo, al estar dotada de movimientos desordenados y de velocidades débiles, por lo que es permisible hablar de un tiempo cósmico universal, sobrepuesto a los tiempos locales de la materia local en movimiento. Einstein en un artículo de 1918 criticó la inconsistencia del modelo de De Sitter¹², al señalar que las ecuaciones propuestas por de Sitter no satisfacían el postulado de uniformidad, considerado básico en toda construcción cosmológica. Sólo algunos años más tarde, cuando se hubo aclarado el carácter "*pseudo-estático*" del modelo de De Sitter, se pudo comprobar que esta crítica no se encontraba justificada en los términos en que Einstein la realizó¹³; para Einstein resultaba contrario a los presupuestos de la relatividad general la existencia de un Universo vacío con una estructura potencial que determinara las propiedades dinámicas de la materia en él introducida. El Universo de De Sitter era un modelo en *movimiento sin materia*¹⁴, en contraposición al modelo de Einstein caracterizado por su contenido material pero sin movimiento.

Fue en los años veinte del siglo XX, cuando el Universo de De Sitter fue reinterpretado, y se aclaró su contenido *pseudo-estático* por Lanczos, Friedman, Weyl, Lemaître y Eddington. Tanto Friedman como Lemaître dieron con la solución no estática de las ecuaciones de Einstein. Arthur Stanley Eddington, al igual que Cornelius Lanczos señaló el carácter pseudo-estático del Universo de de Sitter, aunque no propuso explícitamente un cambio de las coordenadas del tiempo en aquellos años¹⁵. Hermann Weyl señaló, en 1923, que una métrica riemanniana implicaba una desviación espectral de la luz, sobre todo hacia el rojo, a propósito del Universo de De Sitter; dando solución, además, al problema del tiempo cósmico sin necesidad de recurrir a la hipótesis de la *materia en*

¹⁰ ROBERTSON, H. P.: "On the foundations of relativistic Cosmology" *Proceedings of the Natural Academie Sciences*, vol. 15, 1929, pp. 822-829; "Relativistic Cosmology" R.M.P. 5, 1933, p. 62.

¹¹ MERLEAU-PONTY, J.: *Cosmología del siglo XX*, p. 68.

¹² EINSTEIN, A.: "Kritisches zu einer von Herrn de Sitter gegebenen Lösung der Gravitationsgleichungen", *Sitzungsberichte der preussischen Akademie der Wissenschaften*, 1918, pp. 270-272.

¹³ LANCZOS, K.: "Bemerkungen zur de Sitterlichen Welt", *Physikalische Zeitschrift*, 23, 1922, p. 336.

¹⁴ NARLIKAR, J.: *La estructura del Universo*, Alianza, Madrid, 1987, p. 137.

¹⁵ EDDINGTON, A. S.: *Mathematical Theory of Relativity*. Cambridge, 1923, contiene las discusiones desarrolladas durante estos años sobre el corrimiento hacia el rojo y el Universo de de Sitter.

*reposeo*¹⁶. Mientras Georges Lemaître, en 1925, y Howard Robertson, en 1928, descubrieron la métrica por la que el modelo de De Sitter dejaba de mostrarse estático y, al mismo tiempo, permanecía estacionario¹⁷.

Friedman: el nacimiento del universo dinámico.

Alexander Friedman fue el primero en dar con la solución general del problema cosmológico dentro del marco de la Teoría de la Relatividad General, al señalar que las ecuaciones relativistas de campo se reducen a un sistema de dos ecuaciones diferenciales que permiten una infinidad de soluciones, espacialmente abiertas o espacialmente cerradas, donde la métrica del espacio es función del tiempo cósmico¹⁸. La cosmología de Friedman fue la primera que planteó el abandono explícito de la imagen de un Universo estático. En su primer artículo, aparecido en 1922 en la revista *Zeitschrift für Physik*, Friedman habló de la posibilidad de un espacio cósmico de curvatura constante en el que el tiempo no constituyese una variable independiente, en contraposición con lo sostenido por Einstein en su artículo de 1917. En dicho artículo Friedman presuponía que la curvatura del espacio-tiempo era positiva.

Friedman partía de los siguientes presupuestos: la relación entre la métrica y el estado de la materia era resuelta mediante las ecuaciones de campo relativistas, con la inclusión de la *constante cosmológica*; la materia se encontraría repartida uniformemente por el espacio; y, por último, las velocidades locales eran reducidas en comparación con la velocidad de la luz. Estos presupuestos eran comunes a los trabajos de Einstein y de Sitter. A este primer grupo de presupuestos Friedman añadió un segundo, que partía de la consideración de que el espacio tenía una curvatura constante, en el que las coordenadas podían elegirse de tal manera que el tiempo fuese ortogonal al espacio –generalización geométrica de perpendicularidad en geometrías no euclídeas¹⁹.

De esta forma, Friedman llegó en su artículo al resultado de las ecuaciones de campo relativistas en su forma más general, en las que quedaban incluidas como soluciones particulares las ecuaciones de Einstein de 1917 y las de de Sitter de 1918, dando lugar a la solución fundamental de la cosmología relativista. En ella se considera que la materia contenida en el Universo responde como un fluido perfecto que ocupa la totalidad del espacio-tiempo cósmico (en las teorías

¹⁶ WEYL, H.: "Zur allgemeine Relativitätstheorie", *Physikalische Zeitschrift*, 24, 1923, pp. 230-232.

¹⁷ LEMAÎTRE, G.: "Note on de Sitter's Universe", *Journal of Mathematical and Physics*, M.I.T. (USA), 4, 1925, pp. 188-192; ROBERTSON, H. P.: "On the foundations of relativistic Cosmology", N.A.S., 15, 1929, pp. 822-829.

¹⁸ FRIEDMAN, A.: "Über die Krümmung der Raumes", *Zeitschrift für Physik*, 10, 1922, p. 327. FRIEDMAN, A.: "Über die Möglichkeit einer Welt mit Konstanter negativer Krümmung" *Zeitschrift für Physik*, 21, 1924, p. 326.

¹⁹ FRIEDMAN, A.: "Über die Krümmung des Raumes", *Zeitschrift für Physik*, 10, 1922, p. 327.

cosmológicas sólo se contempla el caso del fluido perfecto). Se obtiene así la ecuación diferencial en $R, \dot{R}, \ddot{R}, \dot{\dot{R}}$ (R es el radio de curvatura del espacio en función del tiempo), en la que las ecuaciones de Einstein se escriben:

$$\Lambda - \frac{kc^2 + R^2 + 2\dot{R}}{c^2 R^2} = k\rho; -\Lambda + 3\frac{R^2 + kc^2}{c^2 R^2} = kc^2 \rho \quad ^{20}.$$

Dos grandes problemas cosmológicos eran resueltos mediante la ecuación de Friedman. En primer lugar, eliminaba la distinción existente entre el espacio infinito y el Universo material, origen de las teorías defensoras de los Universos-islas procedentes de la cosmología newtoniana; al igual que eliminaba las dificultades del Universo de De Sitter, respecto de la exigencia de un espacio vacío en el que el comportamiento y existencia de la materia no eran resueltos de forma satisfactoria. En segundo lugar, al incorporar la variable tiempo en la solución de la curvatura del espacio, resolvía las dificultades de las soluciones de Einstein y de Sitter, en las cuales el tiempo aparecía como variable independiente, lo cual planteaba importantes dificultades al no cumplir el principio de co-varianza general inherente a la relatividad general, no satisfaciendo en la debida forma la métrica del continuum espacio-temporal.

Surgió, así por vez primera, la concepción de un Universo dinámico, en expansión. El propio Friedman en su artículo de 1922 contemplaba tres modelos de Universo en función del valor de Λ . Dos modelos vendrían definidos por un proceso de expansión indefinida; en uno, la expansión se habría iniciado en un momento determinado del pasado, es decir, en un tiempo finito, en cuyo caso el radio del Universo en ese momento inicial sería nulo; en el otro, la expansión habría comenzado a partir de un minimum finito producido de modo asintótico que tendería hacia $t = -\infty$. El tercer modelo de Universo propuesto por Friedman era periódico; esto es, el radio de la curvatura del continuum espacio-temporal crecería a partir de cero hasta un máximo finito, alcanzado el cual comenzaría a disminuir hasta alcanzar de nuevo el valor cero. En este primer artículo Friedman partía de la consideración de que el valor de la curvatura del espacio-tiempo era positiva, y de que el espacio era esférico o elíptico. Los tres modelos propuestos por Friedman han constituido los tres modelos sobre los que se han sustentado las diferentes teorías cosmológicas que se desarrollaron en el siglo XX.

²⁰ Donde $c^2 \rho$ es la densidad de materia-energía tanto en su forma de masa como de irradiación; p es la presión del fluido; $k = 8\pi\gamma/c^4$, en el que γ es la constante newtoniana de la gravitación; y Λ es la constante cosmológica.

En un segundo artículo, "*Über die Möglichkeit einer Welt mit Konstanter negativer Krümmung*"²¹, publicado en 1924, Friedman se interrogaba sobre la posibilidad de la existencia de un Universo con una curvatura del espacio-tiempo negativa²², partiendo de los mismos presupuestos sobre los que descansaba su primer artículo, el continuo espacio-temporal sería infinito al no ser posible un continuum espacio-temporal esférico o elíptico. En este caso no existiría un Universo estacionario de curvatura negativa cuya densidad fuese positiva, de ahí que el único Universo estacionario con materia sería el representado por el modelo de Einstein; o bien si la densidad era nula, el modelo de de Sitter sería factible. En el caso de un Universo no estacionario con curvatura negativa la ecuación obtenida sería similar a la del Universo no estacionario con curvatura positiva, dando lugar a un Universo de curvatura negativa de densidad no nula, en función sólo del tiempo.

En este segundo artículo, Friedman demostraba la posibilidad teórica de un Universo con curvatura negativa. Echaba así por tierra uno de los principales resultados de las *Consideraciones Cosmológicas* de Einstein: demostrar la imposibilidad de un Universo abierto. Friedman señalaba que las ecuaciones de campo relativistas lo único que permitían, y exigían, era establecer la relación existente entre la representación métrica del espacio y el tiempo, no el cierre del espacio. Optar por un Universo abierto o cerrado, según Friedman, dependía de otras consideraciones, pero no era exigido por las ecuaciones de campo relativistas. La representación del modelo de Universo de curvatura negativa vendría ejemplificado por el siguiente símil: en un momento finito del tiempo, toda la materia del Universo estuvo concentrada en un volumen muy pequeño (podríamos decir en un punto), por algún motivo, que no viene al caso, dicho punto estalló en miles de millones de pedazos que comenzaron a dispersarse en todas las direcciones, en un proceso de expansión espacio-temporal que tendería hacia el infinito.

Einstein en un primer momento acogió con reservas los artículos de Friedman, al señalar que la densidad media del Universo no podía variar con el tiempo, intentó demostrar que la solución no estacionaria no era compatible con las ecuaciones de campo. Enseguida reconoció su error en las páginas de la revista *Zeitschrift für Physik*²³, el equivocado era él y no Friedman.

²¹ FRIEDMAN, A.: "Über die Möglichkeit einer Welt mit Konstanter negativer Krümmung", *Zeitschrift für Physik*, 21, 1924, p. 326.

²² Para hacernos una idea de la diferencia entre curvatura positiva y curvatura negativa, podemos recurrir al empleo de un símil. El caso de la curvatura positiva vendría representado por una colina o una hondonada, mientras que la representación de la curvatura negativa sería la cumbre de un puerto de montaña o el vértice de un triángulo.

²³ EINSTEIN, A.: "Bemerkung zu der Arbeit von A. Friedman, "Über die Krümmung des Raumes"", *Zeitschrift für Physik*, 11, 1922, p. 326; EINSTEIN, A.: "Notiz zu der Arbeit von A. Friedman, "Über die Krümmung des Raumes"", *Zeitschrift für Physik*, 16, 1923, p. 228.

Hubble: el descubrimiento del "red-shift" o la comprobación de la expansión del universo.

Fue en 1923 cuando Edwin Powell Hubble comprobó por vez primera que las nebulosas espirales constituían sistemas de galaxias compuestas por millones de estrellas, gracias a las observaciones realizadas en el telescopio de 100 pulgadas de Monte Wilson, en el sur de California. Terminaba así una polémica que había centrado la atención de los astrónomos durante más de medio siglo, el Universo no estaba formado exclusivamente por nuestra galaxia sino por miles de galaxias, que incrementaban de forma radical las dimensiones del Universo hasta entonces consideradas. A finales de 1923, tras analizar una serie de fotografías de la espiral de Andrómeda, tomadas en el observatorio de Monte Wilson, llegó a la conclusión de que se trataba de una galaxia situada a varios cientos de miles de años-luz del Sol, por lo que quedaba fuera de los confines de la Vía Láctea.

A partir de este momento y hasta su muerte en 1953, Hubble se dedicó a estudiar los espectrogramas de distintas galaxias y a medir sus velocidades radiales, en esta empresa estuvo acompañado por un numeroso grupo de astrónomos, entre los que destacaron: Vesto Melvin Slipher, del observatorio de Flagstaff, en Arizona, y Milton Lasalle Humason en Monte Wilson.

Las investigaciones de Hubble no se detuvieron en la comprobación de la existencia de miles de galaxias en el Universo, hecho que ya de por sí trastocó profundamente la visión del Universo que tenían los astrónomos de principios de siglo. También, y esto es lo más interesante para nuestro análisis, se dedicó a medir las velocidades radiales de las galaxias, lo que le llevó a comprobar, en 1928, que la luz procedente de las galaxias lejanas sufría un notable desplazamiento hacia el rojo. En las observaciones de Hubble, las rayas del espectro correspondientes a galaxias lejanas registraban longitudes de onda mayores comparadas con las rayas del espectro de nuestra galaxia, o de galaxias próximas a la nuestra; comprobando que cuanto más débil era la galaxia mayor era su corrimiento hacia el rojo, por lo que supuso que cuanto más débil era la luz recibida a mayor distancia se encontraba de nuestra galaxia. Hubble desarrolló una sencilla fórmula matemática, por la que el corrimiento hacia el rojo se relaciona con la distancia, mediante la introducción de una constante conocida como *constante de Hubble*. De esta forma, se pudo comprobar que las galaxias se alejaban de nuestra galaxia a una velocidad proporcional a su distancia, conocido dicho fenómeno como *red-shift*, fue la confirmación empírica de los resultados propuestos por Friedman, en 1922, de un Universo dinámico, en expansión.

Si bien ya antes de 1923 habían sido medidas varias velocidades radiales por Slipher, entre 1912 y 1921, su interpretación no había dado lugar a la consideración de un modelo del Universo en expansión. Fueron varias las razones para que esto no ocurriera. En primer lugar, la capacidad de observación de los telescopios hasta la entrada en funcionamiento del telescopio de Monte Wilson era bastante limitada. Los cálculos de las velocidades radiales, pues, se circunscribían a galaxias próximas a la Vía Láctea, por lo que sus velocidades de alejamiento eran pequeñas, siendo interpretadas como movimientos locales, sin entrañar grandes y graves consecuencias para la imagen de un Universo estático. En segundo lugar, y no menos importante, la consideración de un Universo en expansión chocaba frontalmente con la representación del Universo procedente de la cosmología moderna; por lo que, lógicamente, los datos recogidos tendían a ser interpretados dentro de los presupuestos de la existencia de un Universo estático. Por último, los primeros modelos relativistas, los universos de Einstein y el de De Sitter, eran modelos estáticos, o cuasi-estáticos en el caso del segundo; las interpretaciones del *red-shift* realizadas por Eddington²⁴ y Weyl²⁵ en 1923, en función del modelo de De Sitter no resultaron satisfactorias, al no considerar un Universo en expansión.

Fueron Friedman en 1922, desde el punto de vista teórico, y Hubble, desde la observación astronómica, quienes plantearon por primera vez el modelo de Universo en expansión. Entre 1923 y 1929, Hubble ayudado por Humason calculó 46 velocidades radiales y midió 18 distancias. Los resultados obtenidos planteaban sin lugar a dudas la pertinencia del modelo de Friedman, el corrimiento hacia el rojo observado no permitía seguir contemplando el Universo como algo estático, las velocidades de alejamiento eran de tal magnitud que no podían ser ya achacadas a movimientos locales, la expansión del Universo era comprobada por la observación astronómica. La publicación de los resultados en 1929 fue interpretada adecuadamente por Robertson ese mismo año, en su artículo "*On the foundations of relativistic Cosmology*"²⁶, en el que presentaba con claridad los fundamentos de la Cosmología relativista.

Tales resultados y, sobre todo, sus consecuencias no condujeron a una aceptación inmediata del modelo de Universo en expansión. Era demasiado revolucionaria la nueva representación, rompía tan radicalmente con la imagen tradicional del Universo como para que no levantase resistencias y recelos²⁷. El

²⁴ EDDINGTON, A. S.: *Mathematical Theory of Relativity*, Cambridge, Cambridge University Press, 1923.

²⁵ WEYL, H.: "Zur allgemeine Relativitätstheorie", *Physikalische Zeitschrift*, 24, 1923, pp. 230-232.

²⁶ ROBERTSON, H. P.: "On the foundations of relativistic Cosmology", *Proceedings of the National Academy of Sciences*, USA, 15, 1929, pp. 822-829.

²⁷ FIELD, G. B.; H. ARP, H. y BAHCALL, J. N.: *The Redshift Controversy*, W. A. Benjamin, Inc., Reading, Massachusetts, 1973, además de reproducir artículos originales es una magnífica obra sobre el debate e interpretación del *red-shift*.

propio Hubble rechazaba la imagen de un universo en expansión, en función de la representación cinemática del *red-shift* por él observada, aunque consideraba igualmente insatisfactorias las representaciones cosmológicas alternativas²⁸. *"Dos razones explican el que se terminase la controversia y la adhesión general a la explicación geométrica y estructural: Primeramente, que nunca se había podido, a pesar de las tentativas múltiples y variadas -en las que participaron los mejores físicos-, encontrar una explicación que la sustituyera con entera satisfacción; todas las que se propusieron, o bien no dan cuenta de todos los caracteres del fenómeno observado, o bien dejan prever, en la irradiación de las estrellas efectos importantes de los que no se ha sabido nunca nada. En segundo lugar, el mismo desarrollo del pensamiento cosmológico ha privado a las búsquedas de la solución sustitutiva su atractivo principal. Atractivo que consistía en que se confiaba en conservar, gracias a dicha solución, la imagen un Universo estático y euclídeano; pero, a medida que la teoría cosmológica cobraba fuerza y consolidaba sus principios, fue apareciendo, más claramente cada vez, que la hipótesis de un Universo estático y euclídeano se revelaba como excesiva, inútil y arbitrariamente restrictiva."*²⁹ Entre 1922 y 1930 la Cosmología relativista encontró los fundamentos teóricos, mediante los trabajos de Friedman, y empíricos, a través de las observaciones y cálculos de Hubble y Humason, que permitieron reemplazar la representación del Universo de la cosmología moderna. A ello contribuyeron de forma importante los trabajos de Robertson y Weyl aparecidos en 1929 y 1930 respectivamente³⁰.

La cosmología relativista en los años treinta.

Robertson daba solución, rigurosa y definitiva, a la representación geométrica de la cosmología relativista, en su artículo *"On the foundations of relativistic Cosmology"*, mediante la utilización de la geometría riemanniana y de grupos de representaciones; dando lugar a la expresión canónica de toda la métrica riemanniana, mediante la utilización de coordenadas *co-móviles*, en perfecto acuerdo con las *hipótesis geométricas* desarrolladas unos años antes por Friedman, en conformidad con los postulados y resultados de la teoría de la relatividad general.

Weyl volvió a insistir, en su artículo *"Red-shift and relativistic Cosmology"*, de 1930, en las conclusiones de un artículo anterior, aparecido en 1923³¹, en el que

²⁸ HUBBLE, E. P.: *The Realm of Nebulae*, Yale University Press, New Haven, 1936; reimpresso en Dover Publications, Inc., New York, 1958. El origen del libro se encuentra en las conferencias Siliman pronunciadas por Hubble en 1935 en la Universidad de Yale.

²⁹ MERLEAU-PONTY, J.: *Cosmología del siglo XX*, p. 33.

³⁰ ROBERTSON, H. P.: "On the foundations of relativistic Cosmology", *Proceedings of the National Academy of Sciences (USA)*, 15, 1929, pp. 822-829; WEYL, H.: "Red-shift and relativistic Cosmology", *Philosophie Magazine*, 9, 1930, p. 936.

³¹ WEYL, H.: "Zur allgemeine Relativitätstheorie", *Physikalische Zeitschrift*, 24, 1923.

demostraba, para el caso del Universo de De Sitter, que una métrica riemanniana implicaba una desviación espectral de la luz. Weyl estableció, además, una definición matemática precisa por la que el *tiempo cósmico* aparece como coordenada de referencia para el Universo como un todo; de esta forma, era posible simplificar enormemente la estructura a gran escala del Universo, permitiendo referirse a una coordenada temporal respecto de la cual se pueden describir los cambios en el Universo. Quedaba así restituida la hipótesis cosmológica de Einstein, frente a la crítica de De Sitter, aunque de ella había sido eliminada la exigencia de un Universo estático.

Similar importancia tuvo la publicación en 1930 del artículo de Eddington "*On the instability of Einstein's spherical Universe*"³²; en él señalaba que no era posible seguir manteniendo la idea de la existencia de un *reposo cósmico* desde el momento en que se aceptaba que el radio del espacio hiper-esférico de Einstein podía ser variable en el tiempo, tal como era considerado en la cosmología relativista desarrollada por Friedman y quedaba demostrado por las observaciones de Hubble.

Hubble había insistido en que de los resultados de sus observaciones se desprendía: la isotropía del Universo; que el sistema de galaxias se encontraba distribuido de forma uniforme en el Universo, por lo que no podía hablarse de un centro del Universo; que la homogeneidad geométrica no era incompatible con la diversidad de los objetos del Universo, tanto en sus formas como en sus dimensiones; y, finalmente, que el sistema de galaxias presentaba la apariencia uniforme e isótropa de una expansión que obedece a una ley de gran sencillez, por la que cada galaxia parece alejarse de la nuestra a una velocidad proporcional a su distancia³³.

La conjunción de estas consideraciones sobre la estructura del Universo con la teoría de la relatividad general permitía, por contra, dotar de contenido físico-matemático preciso a la representación del Universo. Dicha caracterización se encontraba configurada, en los años treinta, por los siguientes elementos: la métrica del espacio y del tiempo se encontraba condicionada por las propiedades físicas de la materia-energía en la vecindad local, expresada mediante las ecuaciones de Einstein; las irregularidades locales de la distribución de la materia desaparecían en el conjunto del continuum espacio-temporal, de manera que la materia se encontraba distribuida uniformemente en el conjunto del Universo; la existencia de movimientos locales no impedía la existencia de señales-referencia localmente en reposo, debido a que la velocidad de estos movimientos locales era pequeña respecto de la velocidad de la luz; los modelos físicos teóricos y

³² EDDINGTON, A. S.: "On the instability of Einstein's spherical Universe", *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 90, 1930, pp. 668-678.

³³ HUBBLE, E. P.: *The Realm of Nebulae*, Yale University Press, New Haven, 1936.

experimentales más cercanos al comportamiento de la materia en el Universo respondían al modelo teórico del fluido perfecto, en donde las únicas magnitudes físicas tomadas en consideración son las densidades uniformes, las presiones isotropas de materia y de radiación. De esta forma se impuso la imagen de un Universo uniforme frente a las diversidades observadas localmente³⁴.

La solución dada por Friedman a partir de la teoría de la relatividad general al problema cosmológico dejaba abiertos una serie de problemas muy importantes, tanto en lo referente al modelo de Universo como a su comportamiento temporal. Los diferentes modelos propuestos por Friedman resultaban todos ellos coherentes con la relatividad general y la observación astronómica no emitía un veredicto contundente a favor de ninguno de ellos. En este contexto, las propiedades del espacio-tiempo dependían del valor de la constante cosmológica, tal como había señalado Friedman, el valor crítico de Λ dependía del signo de la curvatura. Ni siquiera para un valor $\Lambda=0$ desaparece la indeterminación, porque en este caso la variación de la curvatura es monótona cuando el espacio es finito, y periódica si el espacio es cerrado. De esta manera, el problema del signo de la curvatura del espacio-tiempo y la introducción de la constante cosmológica permanecían separados entre sí; en contra de lo esperado por Einstein cuando la introdujo, al confiar que impondría una solución finita. En su artículo "*Relativistic Cosmology*" Robertson recogía este problema al señalar los modelos posibles del Universo: modelos estáticos; modelos en expansión no relativistas -modelo lineal de Milne y la *Steady State Theory* (teoría del estado estacionario)-; y modelos relativistas en expansión³⁵.

Einstein se encontraba a disgusto con la situación creada a pesar de haber aceptado explícitamente en 1923 la solución dada por Friedman³⁶, como puso de manifiesto en 1931 en su artículo "*Zum Kosmologischen Problem der allgemeinen Relativitätstheorie*"³⁷. En él abandonó la pretensión de que las ecuaciones de campo satisficieran plenamente el principio de determinación completa de la métrica por el contenido del espacio-tiempo, en este sentido Einstein se hizo eco de la crítica de De Sitter³⁸, admitiendo como representación del Universo los modelos en expansión. En este artículo, Einstein optaba por renunciar a la constante cosmológica que había introducido por vez primera en

³⁴ ROBERTSON, H. P.: "Relativistic Cosmology", *Reviews of Modern Physics*, 5, 1933.

³⁵ ROBERTSON, H. P.: "Relativistic Cosmology" *Reviews of Modern Physics*, 5, 1933.

³⁶ EINSTEIN, A.: "Notiz zur der Arbeit von A. Friedman, "Über die Krümmung des Raumes"", *Zeitschrift für Physik*, 16, 1923, p. 228.

³⁷ EINSTEIN, A.: "Zum Kosmologischen Problem der allgemeinen Relativitätstheorie", *Preussische Akademie der Wissenschaften, Phys.-math. Klasse, Sitzungsberichte*, 1931, pp. 235-237.

³⁸ DE SITTER, W.: "On the relativity of inertia, remarks concerning Einstein's latest hypothesis", *Proceedings of the Koninklijke Akademie van Wetenschappen*, 19, 1917, pp. 1.217-1.225.

su artículo de 1917³⁹, al no haber conseguido, mediante su introducción, que las ecuaciones de campo así modificadas determinaran un espacio finito. Sobre ello volvió a insistir en un artículo publicado conjuntamente con De Sitter en 1932⁴⁰, en el que proponían un modelo de Universo en expansión indefinida, donde el espacio era euclídeo, conocido con el nombre de "*Universo de Einstein-de Sitter*".

En el Universo de Einstein-de Sitter se obtenía un Universo en expansión a partir de las ecuaciones de Friedman suponiendo que la constante cosmológica, la curvatura del espacio y la presión cósmica eran nulas ($\Lambda = 0, k = 0, \rho = 0$). En este modelo el Universo presenta una singularidad en $t = 0$, de donde se deducía que la edad del Universo correspondía a dos tercios el valor de la constante de Hubble. Para el caso de una curvatura positiva del espacio ($k = 1$), el modelo preveía la existencia de un Universo cíclico (para $\Lambda = 0$ y $\rho = 0$), en el que el radio de curvatura R oscilaría entre 0 y un valor finito R_{\max} .

Einstein no se encontraba muy satisfecho con la introducción en la cosmología de la "*singularidad en $t = 0$* ", como señaló en un artículo posterior, "*On the Cosmological Problem*"⁴¹, en una nota confiaba que la solución llegase de la mano de una teoría del campo unificado, empresa a la que dedicó buena parte de sus esfuerzos intelectuales desde 1920 hasta el día de su muerte en 1955. Einstein esperaba que la observación astronómica lograra algún día determinar si el Universo es cerrado, mediante el cálculo de la densidad media del mismo, para lo cual ésta tiene que ser superior a cero ($\rho > 0$), no siendo concebible para Einstein la existencia de un Universo abierto, porque la hipótesis de que existe mucha materia aún no descubierta era difícilmente cuestionable⁴². De esta forma, Einstein confiaba que la determinación del Universo, a la que aspiraba en sus *Consideraciones Cosmológicas* de 1917, no desapareciese completamente del horizonte cosmológico. "*Einstein, gracias a ello -...- puede confiar en que la renuncia a su punto de vista inicial, a su intención de dar la determinación completa del concepto de Universo, no sea completamente definitiva...; esto confirma que, al envejecer, Einstein estaba aún más persuadido que en sus años de madurez de que toda la racionalidad de la naturaleza se concentra en las ecuaciones de campo y de que, dando a tales ecuaciones una forma más perfecta, aún podrá obtenerse el ideal de la ciencia física. Así pues, el repliegue teórico no era acaso más que provisional: que logre la teoría expresar mejor las*

³⁹ EINSTEIN, A.: "Kosmologische Betrachtungen zur allgemeine Relativitätstheorie", *Preussische Akademie der Wissenschaften, Phys.-math. Klasse, Sitzungsberichte*, 6, 1917, pp. 132-152.

⁴⁰ EINSTEIN, A. y DE SITTER, W.: "On the relation between the expansion and the mean density of the Universe", *National Academy of Sciences, Proceedings*, vol. 18, 1932, pp. 213-214.

⁴¹ EINSTEIN, A.: "On the Cosmological Problem", en *The Meaning of Relativity* (apéndice a la segunda edición, 1945), Princeton, Princeton University Press, reproducido también en EINSTEIN, A.: "On the Cosmological Problem", *American Scholar*, vol. 14, 1945, pp. 137-156.

⁴² EINSTEIN, A.: "On the Cosmological Problem" *op. cit.*, p. 130, 5ª ed. en inglés (1955).

*leyes de estructura del espacio-tiempo poblado de materia-energía superdensa, que la Astronomía descubra materia bastante para que se cierre el espacio, y entonces será posible llegar a la determinación completa de la geometría gracias a su contenido*⁴³.

La pretensión de Einstein de eliminar la constante cosmológica, que él mismo había introducido en 1917, de las ecuaciones de campo relativistas no fue secundada por la mayoría de los astrofísicos de la época, así los modelos de Lemaître y Eddington propuestos en los años treinta insistieron en su mantenimiento⁴⁴.

Los modelos de Lemaître y Eddington.

Tanto Georges Lemaître como Arthur Eddington partieron de presupuestos similares en la construcción de sus respectivos modelos cosmológicos; aunque no idénticos, compartían la visión de un Universo relativista finito en expansión, a partir del punto de equilibrio de Einstein, alcanzado en un momento temporal determinado. Lemaître, sacerdote católico, se mostraba firme partidario de la finitud del Universo, para él la existencia de una métrica definida del Universo físico y que fuese posible su conocimiento por el hombre revelaría la existencia divina; de esta forma el avance de la Ciencia era concebido como un don divino al que estar agradecidos *"por habernos dado la inteligencia para conocerla [la Verdad] y para leer un reflejo de Su gloria en nuestro Universo que El ha adaptado maravillosamente a las facultades de conocer con la que nos ha dotado."*⁴⁵

En su artículo *"Un Univers de masse constante et de rayon croissant"*⁴⁶, Lemaître buscaba una solución al problema cosmológico que permitiese compatibilizar el Universo de Einstein con el Universo de De Sitter, desconocía en ese momento el trabajo de Friedman; como resultado del postulado de un tiempo cósmico y un Universo finito se imponía la existencia de un valor crítico para la constante cosmológica, en la que el Universo se encontraría en equilibrio, de esta forma resultaba factible la transición desde el Universo de De Sitter al

⁴³ MERLEAU-PONTY, J.: *Cosmología del siglo XX*, p. 107-108.

⁴⁴ SHAPLEY, H. (recop.): *Source Book in Astronomy. 1900-1950*, Harvard University Press, Cambridge, Mass., 1960. Reimpresión de artículos originales sobre cosmología y astronomía, buena parte de los mismos se reproducen parcialmente; en cualquier caso es una obra que se constituye en un elemento muy valioso para conocer el desarrollo de la Cosmología del siglo XX. Igualmente interesante la obra de NORTH, J. D.: *The Measure of the Universe*, Claredon Press, Oxford, 1965, una obra que analiza el desarrollo de la cosmología desde el siglo XIX hasta 1950, deteniéndose especialmente en los inicios de la cosmología relativista.

⁴⁵ LEMAÎTRE, G.: "la grandeur de l'espace", *Revue des questions scientifiques*, marzo de 1929.

⁴⁶ LEMAÎTRE, G.: "Un Univers de masse constante et de rayon croissant", *Annales de la Société Scientifique de Bruxelles*, 1927, pp. 49-59; existe traducción al inglés en *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 91, 1931, pp. 483-490.

Universo estático de Einstein. Lemaître introdujo así la cosmología no estática de una manera bastante sencilla, dando a la constante cosmológica y a la expansión del Universo una formulación bastante realista, según la cual la fuerza de repulsión cósmica se encontraría en equilibrio con la fuerza gravitatoria en el modelo de Universo estático, hasta que sobrepasado un umbral la constante cosmológica incrementaría su valor en función de la distancia relativa de los diferentes elementos constitutivos de la materia, según las ecuaciones de campo relativistas, por la que la fuerza de repulsión incrementaba su valor respecto del de la fuerza atractiva (de gravitación) dando lugar a la expansión del Universo. *"Esta imagen es sencilla y para quienes prefieren las representaciones concretas tiene la ventaja de que muestra la expansión bajo un aspecto causal (lo cual, en el fondo, no hace adelantar nada pero puede dar la impresión de una comprensión más intuitiva y más realista); en Lemaître, semejante idea viene a incluirse con facilidad en una concepción de la Naturaleza más bien aristotélica"*⁴⁷.

Lemaître consideraba, por tanto, de vital importancia la introducción de la constante cosmológica en las ecuaciones de campo relativistas, pues ésta se constituía en la función que permitía el paso del Universo estático al Universo en expansión, imprescindible para su representación cosmológica, en la que el Universo comenzó con la repentina explosión de un *átomo primitivo*, que contenía toda la materia actual y cuyo radio no era mayor que la distancia existente entre el Sol y la Tierra, dando lugar al inicio de la expansión del Universo⁴⁸. Lemaître insistió de nuevo en la importancia de la constante cosmológica en su contribución al volumen colectivo de homenaje a Einstein, publicado en 1949, en *"The Cosmological constant"* afirmaba que la introducción de la constante cosmológica expresaba la forma más generalizada de las ecuaciones de campo relativistas⁴⁹.

Eddington no compartía la teoría de Lemaître del inicio del Universo en un momento singular, para el astrónomo británico el carácter finito del Universo y la importancia de la constante cosmológica se debían al hecho de que las propiedades de la estructura físico-matemática del Universo debían ser determinadas por la geometrización del espacio. Eddington rechazaba por demasiado grosera la interpretación de la expansión del Universo dada por Lemaître, según la cual ésta se debía al juego de las fuerzas de repulsión y atracción cósmicas. En fecha temprana Eddington expresaba sus reservas al modelo propuesto por Einstein,

⁴⁷ MERLEAU-PONTY, J.: *Cosmología del siglo XX*, p. 114.

⁴⁸ LEMAÎTRE, G.: "L'Hypothèse de l'atome primitif et le problème des amas de Galaxies", en *L'Estructure et l'Evolution de l'Univers*, reseña del XI Congreso de Física de Solvay, Bruselas, Stoops, 1958, pp. 1-30; también LEMAÎTRE, G.: *L'Hypothèse de l'atome primitif* Neuchâtel, Griffon, 1946.

⁴⁹ LEMAÎTRE, G.: "The cosmological constant", en SCHILPP, P. A. (ed.), *Einstein Philosopher-Scientist*, New York, Cambridge University Press, 1949 pp. 439-456.

en particular a la pretensión de determinación absoluta de la métrica espacial por medio de la materia⁵⁰; Eddington se sentía más atraído por la interpretación de Hermann Weyl, en la que encontraba la posibilidad de dar una solución más *natural* a la curvatura del espacio. En 1927 Eddington había establecido ya los fundamentos teóricos de su modelo cosmológico, en las *Gifford Lectures* expuso con claridad su interpretación sobre la constante cosmológica. Para él, la solución correcta de las ecuaciones de campo relativistas era la que contenía la constante cosmológica (y donde el valor de $\Lambda = \Lambda_e$)⁵¹, en la que Λ_e define el patrón absoluto de longitud, de donde deducía que el espacio era cerrado⁵². En su presentación del modelo de De Sitter como explicación posible del *red-shift* todavía no se mostraba convencido de la expansión del Universo, pero en cualquier caso afirmaba la necesidad de optar por un Universo cerrado, al considerar que la geometría esférica o elíptica era la única posible para el conocimiento aunque no fuese, o resultase difícilmente, imaginable.

En su artículo "*On the instability of Einstein's spherical world*"⁵³ volvió a insistir en su opinión de que las ecuaciones de campo relativistas correctas eran aquellas que habían sido modificadas por la introducción de la constante cosmológica, tal como hiciera Einstein en su artículo de 1917, en esa fecha, 1930, Einstein no era partidario de tal modificación⁵⁴. En 1933 Eddington había desarrollado de forma completa su teoría, expuesta en *The expanding Universe*⁵⁵, a lo largo de sus páginas ya no dudo en asignar a la constante cosmológica un valor positivo, por lo que el Universo debía tener una curvatura positiva y encontrarse, por tanto, en expansión. Eddington prefería antes regresar a una representación newtoniana del Universo que abandonar la constante cosmológica; fundamento, según él, de toda representación geométrica del espacio, posición en la que insistió en *Fundamental Theory*, en donde llegó a afirmar: "*el Universo infinito ya hace mucho que está muerto y enterrado; quienes se obstinan en querer exhumar el cadáver lo que lograrán es*

⁵⁰ EDDINGTON, A. S.: *Space, Time, Gravitation*, Cambridge, Cambridge University Press, 1920. Existe traducción al español EDDINGTON, A. S.: *Espacio, tiempo y gravitación*, Barcelona, Guinart y Pujolar, 1922.

⁵¹ Donde Λ_e es igual a la inversa del cuadrado del radio de la curvatura del Universo esférico de Einstein

⁵² EDDINGTON, A. S.: "The Nature of the Physical World" en *Gifford Lectures*, 1927, Cambridge, Cambridge University Press, 1929.

⁵³ EDDINGTON, A. S.: "On the instability of Einstein's spherical world", *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 90, 1930, pp. 668-678.

⁵⁴ En dicho artículo remite al capítulo VII de su obra *The Nature of the physical world*, en el que Eddington desarrolla de manera más detenida su argumentación en favor de la formulación de las ecuaciones de campo relativistas introducida por Einstein en sus *Consideraciones Cosmológicas*. EDDINGTON, A. S.: *The Nature of the physical world*, Cambridge, Cambridge University Press, 1929, pp. 138-146, existe traducción al español EDDINGTON, A. S.: *La naturaleza del mundo físico*, Buenos Aires, Sudamericana, 1945.

⁵⁵ EDDINGTON, A. S.: *The expanding Universe*, Cambridge, Cambridge University Press, 1933, existe traducción al español EDDINGTON, A. S.: *La expansión del Universo*, Madrid, Galo Sáez, 1933.

estar preocupados por un duende."⁵⁶ La posición de Eddington se encontraba fundamentada *"en una meditación acerca del sentido epistemológico de la teoría de la Relatividad"*⁵⁷

Desde una perspectiva diferente Richard Chace Tolman, empirista convencido, contemplaba la cosmología relativista como el final de un camino, iniciado en la teoría de la relatividad especial hasta desembocar en la representación de la estructura del Universo, tal como lo expresó en su obra *Relativity Thermodynamics and Cosmology*⁵⁸. Tolman al igual que Lemaître y Eddington incorporó la constante cosmológica a las ecuaciones de campo relativista. Las razones esgrimidas por Tolman para defender un valor de $\Lambda \neq 0$ descansaban en consideraciones cosmológicas, por las que si bien la Relatividad general no exigía la introducción de la constante cosmológica tampoco la impedía. *"Para justificar la extrapolación, sólo podemos apoyarnos, en primer lugar, en la racionalidad admirable y en la coherencia lógica interna de la Teoría de la Relatividad... y en segundo lugar, en la tendencia que se observa en las estrellas a agruparse en nebulosas y de las nebulosas a presentarse agrupadas hasta un cierto límite, lo cual hace que aparezca como menos probable, para distancias muy grandes, una acción gravitacional del tipo que la teoría relativista podría dejar prever."*⁵⁹

Tolman era consciente de que esta posición le alejaba de la ortodoxia empirista, trató de justificarse mediante el recurso a las observaciones efectuadas por Hubble y Humason, en las que se demostrada la isotropía del Universo y con ella su homogeneidad, aunque se mostraba cauteloso al respecto, hasta llegar a afirmar en un artículo publicado póstumamente, *"The age of the Universe"*, que la homogeneidad del Universo no estaba en absoluto demostrada, aunque ello no significaba un escollo para la solución del problema cosmológico dentro del contexto de la Relatividad General⁶⁰.

La situación de la Cosmología relativista en los años treinta podría resumirse de la siguiente manera: *"Por lo tanto, el aspecto dinámico del Universo se imponía; en compensación, la determinación exacta de una estructura geométrica singular adecuada al mundo real -con la aproximación de la hipótesis de uniformidad- parecía imposible o atrevida, entregada a las incertidumbres de la opinión y de la creencia. Paralelamente, la axiomática de la Cosmología seguía siendo*

⁵⁶ EDDINGTON, A. S.: *Fundamental Theory*, Cambridge University Press, 1948, 3ª ed. inglés 1953, p. 76.

⁵⁷ MERLEAU-PONTY, J.: *Cosmología del siglo XX*, p. 121.

⁵⁸ TOLMAN, R. C.: *Relativity Thermodynamics and Cosmology*, Oxford, Oxford University Press, 1934.

⁵⁹ TOLMAN, R. C.: *Relativity Thermodynamics and Cosmology*, Oxford, Clarendon Press, (1ª ed. 1934), 3ª ed. 1958, p. 331.

⁶⁰ TOLMAN, R. C.: "The age of the Universe", *Reviews of Modern Physics*, vol. 21, nº 3, 1949, pp. 374-378.

*filosóficamente insegura, aunque fuese técnicamente viable. La misma forma de las ecuaciones que había que aplicar era dudosa, sin que pudiese hacerse valer un argumento decisivo en favor o en contra respecto al término cosmológico del que tantas cosas dependían.*⁶¹

La polémica de los años treinta-cuarenta: universo estático - universo en expansión.

En los decenios de 1930 y 1940 subsistían numerosos problemas a la hora de optar por un determinado modelo cosmológico⁶². Los artículos de Friedman de 1922 y 1924 permitían la existencia de varios modelos de universo en expansión, tanto con curvatura positiva (universo cerrado) como negativa (universo abierto), en función del valor de la constante cosmológica (Λ). Robertson señaló en *Relativistic Cosmology*, publicado en 1933⁶³, que la separación existente entre el signo de la curvatura del espacio-tiempo y la constante cosmológica permitía la existencia de diferentes modelos de Universo, que podrían ser agrupados en: modelos estáticos; modelos en expansión no relativistas (modelo de Milne y modelo de la Teoría del Estado Estacionario) y modelos relativistas en expansión.

Por otra parte, los cálculos realizados por Hubble en 1929 habían determinado un valor para la *constante de Hubble* excesivamente bajo, que entrañaba una profunda contradicción entre la edad del Universo (obtenida en función de dicha constante) y la edad de la Tierra, lo que provocó graves dificultades para los defensores de la expansión del Universo. En 1936, Hubble y Humason calcularon la distancia y la velocidad del cúmulo de galaxias de Ursa Major II; la velocidad de alejamiento la estimaron en 42.000 km/s. y su distancia respecto de nuestra galaxia en 260 millones de años-luz, ambos cálculos constituían el límite de observación de Monte-Wilson, hasta entonces el mayor observatorio astronómico disponible. Con las estimaciones de las distancias disponibles Hubble calculó que las velocidades se incrementaban en 170 km/s. por cada millón de años-luz de distancia. Por lo que el tiempo en que las galaxias comenzaron a separarse se situaría en 2.000 millones de años (resultado de la división de un millón de años-luz por 170 km/s), edad estimada del Universo. Sin embargo, en aquellos años se sabía que la edad de la Tierra era mucho mayor, por los estudios realizados por Lord Rutherford. Se planteaba así una gravísima contradicción entre la edad estimada del Universo y la edad de la Tierra. Algunos astrónomos dudaron, fundadamente en aquellos años, de que el desplazamiento hacia el rojo reflejase la edad del Universo. Este problema no fue resuelto hasta el decenio de los años cincuenta, cuando entraron en funcionamiento observatorios más potentes que

⁶¹ MERLEAU-PONTY, J.: *Cosmología del siglo XX*, p. 130.

⁶² KRAGH, H.: *Cosmology and Controversy. The historical development of two theories of the Universe*, Princeton, Princeton University Press, 1996.

⁶³ ROBERTSON, H. P.: "Relativistic Cosmology", *Reviews of Modern Physics*, 5, 1933, p. 62

el de Monte-Wilson, como los de Monte Palomar y Monte Hamilton, que permitieron, junto con la reevaluación de la relación establecida por Henrietta Swan Leavitt y Harlow Shapley entre el período y la luminosidad de las estrellas Cefeidas (debido a Walter Baade), corregir los cálculos de Hubble, estableciendo como valor de la constante de Hubble 15 km/s. por cada millón de años-luz, permitiendo elevar la edad del Universo hasta los 20.000 millones de años-luz, eliminando, por tanto, las dificultades provocadas por la primera estimación del valor de la constante de Hubble.

Debido a la ausencia de otros elementos de juicio que permitieran apuntalar una u otra teoría cosmológica, se desarrollaron entre los años treinta y cuarenta diversas teorías sobre el Universo, entre las que destacaron los modelos de Edgard Milne y sus seguidores, la teoría del estado estacionario de Hermann Bondi y Thomas Gold, y los modelos estacionarios de Dennis William Sciama y Fred Hoyle, que en la actualidad se encuentran en desuso.

Entre 1932 y 1950 Edward Arthur Milne, Gerald James Whitrow y Arthur Geoffrey Walker desarrollaron una teoría cosmológica de carácter deductivo conocida como *relatividad cinematográfica*. La primera obra en la que se planteó este programa fue debida a Milne: *Relativity, Gravitation and World-Structure*⁶⁴. El modelo de Universo propuesto por Milne se caracterizaba por ser infinito; estar regido por el principio cosmológico; encontrarse en expansión, siendo ésta isotrópica, con velocidad proporcional a la distancia; a pesar de ser infinito, el Universo de Milne era de apariencia esférica, aunque completamente diferente de la hiperesfera riemanniana propuesta en los modelos de Eddington y Lemaître, en cuyo interior se encontraría situado el sistema de galaxias siendo inaccesibles sus límites, por lo que el Universo sería un conjunto topológicamente abierto y, por tanto, infinito, en contraposición con el modelo propuesto por Einstein⁶⁵. Desde presupuestos similares, aunque no idénticos, partía Whitrow, para él la *Relatividad cinematográfica* era la expresión más acabada sobre la que fundar la visión del Universo, la mecánica de Newton, la teoría de la relatividad general y la teoría de la relatividad cinematográfica serían aproximaciones cada vez más perfeccionadas de una Física ideal, tal como lo expresó en su artículo: "*The epistemological foundations of natural philosophy*"⁶⁶. Un año después de la aparición de la obra de Milne *Relativity, Gravitation, and World-Structure*, Robertson publicaba una serie de tres artículos en la revista *The Astrophysical Journal* de Estados Unidos, en los que analizaba bajo el título común "*Kinematics and World-Structure*" los fundamentos de la Relatividad cinematográfica⁶⁷. Para

⁶⁴ MILNE, E. A.: *Relativity, Gravitation and World-Structure*, Oxford, Clarendon Press, 1935.

⁶⁵ MILNE, E. A.: *Kinematic Relativity*, Oxford, Clarendon Press, 1948.

⁶⁶ WHITROW, G. J.: "The epistemological foundations of natural philosophy", *Philosophy*, XXI, 1946.

⁶⁷ ROBERTSON, H. P.: "Kinematics and World-Structure", *The Astrophysical Journal*, 82, 1935, pp. 284-301; 83, 1936, pp. 187-201; y 83, 1936, pp. 257-271.

Robertson la geometría del espacio-tiempo conduce necesariamente a la adopción de una métrica riemanniana, señalando que en las *Consideraciones Cosmológicas* de Einstein subyace un criterio epistemológico fundamental por el cual la métrica del espacio-tiempo debía ser considerada riemanniana. Con ello Robertson indicaba que la elección realizada por Milne y Whitrow no conducía, contra lo que éstos pensaban, a la superioridad de la representación del Universo procedente de la Relatividad cinemática. Para Robertson el programa establecido por Milne, según el cual las leyes físicas debían ser deducidas a partir de la descripción cosmológica establecida *a priori* no conducía a ninguna parte.

Diferente fue el camino emprendido por Hermann Bondi y Thomas Gold cuando publicaron en 1948 su artículo "*Steady State Theory of the expanding Universe*"⁶⁸, en el que se explicitaba por vez primera la Teoría del Estado Estacionario. Bondi y Gold compartían con Milne y Whitrow los presupuestos básicos de la *cosmología deductiva*. Propugnaban lo que ellos denominaron *principio cosmológico perfecto*, que estaría definido por la homogeneidad de la visión del Universo, independientemente de la posición ocupada en el mismo por el observador, y también por la independencia del observador respecto del tiempo, con ello perseguían eliminar la *historicidad* del Universo, éste no tendría edad y se encontraría en un proceso de renovación permanente.

Los autores de la Teoría del Estado Estacionario tuvieron que romper con la Teoría de la Relatividad, al postular la creación continua de materia *ex-nihilo*, en clara contradicción con los postulados de la relatividad y, en general, con el conjunto de la Física, por cuanto transgredían las leyes de conservación. Dicha consecuencia se derivaba de la conjugación del *principio cosmológico perfecto* con la expansión del espacio observada por Hubble y por ellos admitida. Bondi y Gold sostenían que la relación entre las leyes físicas y la estructura cósmica conducía necesariamente a un Universo estable. Ahora bien dicha estabilidad debía encontrarse en concordancia con el fenómeno del *red-shift* observado por Hubble, por lo que el Universo estático debía ser excluido. Para hacer compatible la expansión del Universo con el estado estacionario exigido por el *principio cosmológico perfecto* era preciso admitir la creación de materia *ex-nihilo*; la creación de materia necesaria era de una magnitud tan pequeña, del orden de un protón por litro y cada mil millones de años, que compensaba la pérdida de energía debida a la expansión, de esta manera según estos autores era posible mantener el principio de conservación de materia-energía, "*el aspecto a gran escala del Universo tiene que ser independiente, no sólo respecto a la posición del observador, sino también a la época en que realizó sus observaciones.*"⁶⁹ El *principio cosmológico perfecto* propugnado por Bondi y Gold sólo tenía validez,

⁶⁸ BONDI, H. y GOLD, T.: "The Steady State Theory of the expanding Universe", *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 108, 1948, pp. 252-270.

⁶⁹ BONDI, H.: *Cosmology*, Cambridge, Cambridge University Press, 1952, p. 141.

por tanto, a escala cósmica y su aplicación no era posible a escala local, lo que imposibilitaba la deducción de las leyes Físicas a partir de la cosmología procedente de la Teoría del Estado Estacionario.

Fred Hoyle fue el más firme defensor de la Teoría del Estado Estacionario, aunque no compartió la metodología deductiva de Bondi y Gold. Hoyle no rechazaba los resultados alcanzados por la Teoría de la Relatividad General, al contrario aceptaba las ecuaciones de Einstein, mediante la introducción de una modificación cuyos efectos sólo se percibirían a escala cósmica; lo esencial de la teoría del Estado Estacionario no radicaría en el *principio cosmológico perfecto* sino en el hecho de la creación de materia, en contraposición con la postura defendida por Bondi y Gold. Para Hoyle el Universo era eterno y autosuficiente; en él la materia se encontraría en un proceso permanente de renovación, siendo infinitas las posibilidades de su representación formal en el Universo, para Hoyle la materia no podía ser considerada como inerte y uniforme, *"la idea de que la materia es algo que se presenta inerte y sin interés no cabe duda de que es una gran tontería"*⁷⁰

En su artículo *"A new model of the expanding Universe"*⁷¹, aparecido en 1948, Hoyle mantenía que la creación de materia era posible defenderla mediante una ligera modificación de las ecuaciones de Einstein, sin que ello supusiese la renuncia de las leyes físicas hasta entonces sostenidas. El modelo de Universo resultante conjugaría así la pluralidad de sus partes con la estabilidad a escala cósmica, de manera que resultase compatible la edad de las diferentes galaxias con la existencia de un Universo estacionario en el que carecería de significado el concepto de tiempo cósmico. Hoyle identificaba así cuatro campos de interacción física, que explicarían el comportamiento del Universo, tanto a escala cósmica como local: el campo nuclear, el campo electromagnético, el campo gravitatorio y el *campo de creación*. Este último expresaría la existencia de una acción universal ligada a la expansión cósmica, en función de la creación continua de materia⁷².

Hoyle trató de eliminar los inconvenientes de su teoría del Estado Estacionario en sucesivas publicaciones⁷³. En 1960 publicó un artículo en la *Monthly Notices*

⁷⁰ HOYLE, F.: *Aux frontières de l'Astronomie*, Paris, Corrêa, 1956, p. 242

⁷¹ HOYLE, F.: "A new model of the expanding Universe", *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 108, 1948, nº 5, pp. 372-382

⁷² HOYLE, F.: *Aux frontières de l'Astronomie*, p. 368, sobre el asunto ver NARLIKAR, J.: *La estructura del Universo*, Madrid, Alianza, 1987, pp. 148-152

⁷³ HOYLE, F.: "On the cosmological problem", *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 109, 1949, pp. 364-371. HOYLE, F.: "Stellar evolution and the expanding universe", *Nature*, 163, 1949. HOYLE, F.: *La Nature de l'Univers*, Paris, Presses Universitaires Francais, 1952. HOYLE, F.: *Aux frontières de l'Astronomie*, Paris, Corrêa, 1956. HOYLE, F.: "The Steady state theory" en *La Estructura el l'Evolution de l'Univers*, XI Conseil de Physique Solvay, Bruxelles, Stoops, 1958. N.C.

titulado "*A covariant formulation of the law of creation of matter*"⁷⁴, en el que además de propugnar la existencia de un campo de creación a través de una reserva de energía negativa, Hoyle se acercaba a la visión relativista hasta el punto de aceptar sin modificación las ecuaciones de Einstein; intentaba, además, que el formalismo de la teoría del Estado Estacionario respetase el principio de co-variación exigido por la relatividad general. De esta forma, Hoyle trataba de dar satisfacción a las objeciones señaladas por Weyl respecto del modelo de Universo estacionario propuesto por De Sitter, mediante la búsqueda de una solución a la contradicción existente entre las propiedades de co-variación de las ecuaciones de campo relativistas y las propiedades no invariantes del Universo que deben ser descritas por las primeras. Para Hoyle la creación de materia respondía a un proceso físico y no era simplemente un posicionamiento epistemológico, como lo era para Bondi y Gold; por tanto, dicho proceso de creación de materia debía ser expresado bajo un formalismo matemático de las mismas características de co-variación que expresan los demás fenómenos físicos elementales.

En última instancia lo que trataba de evitar por todos los medios la Teoría del Estado Estacionario era el reconocimiento de la existencia de una singularidad en la representación del Universo, conocida como la *gran explosión* o teoría del "*big-bang*", implícito en la formulación de Friedman. La razón fundamental estribaba en que la aceptación de la existencia de una singularidad implicaba la alteración esencial de las condiciones del Universo y, por tanto, la inestabilidad de las leyes físicas. A juicio de los autores de la Teoría del Estado Estacionario, esta objeción sólo podía ser salvada mediante la eliminación del tiempo cósmico en el modelo de Universo, dando lugar a un modelo estacionario en el que no fuese preciso postular la existencia de una singularidad que diera origen al Universo actual. Bondi y Gold se alejaron de la Cosmología relativista por considerar que no era posible desde su interior resolver dicha objeción; optaron, pues, por establecer un modelo de Universo estacionario, que se fundara en una Cosmología deductiva mediante la adopción de un *principio cosmológico perfecto*, en el que el Universo no cambiase con el tiempo. Hoyle compartía las mismas preocupaciones teóricas que Bondi y Gold, pero disentía del método empleado por ambos, excesivamente especulativo para su gusto; trató, pues, de fundar la teoría del Estado Estacionario desde la Física, de manera que fuese acorde con los resultados de la relatividad general y de los principios de la física⁷⁵.

WICKRAMASINGHE, N. C., BURBIDGE, G. y NARLIKAR, J. V. (eds.): *Fred Hoyle's Universe*, Dordrecht, Kluwer Academic Publishers, 2003.

⁷⁴ HOYLE, F.: "A covariant formulation of the law of creation of matter", *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 120, 1960, n° 3, pp. 257-262.

⁷⁵ HOYLE, F.; BURBIDGE, G. y NARLIKAR, J. V.: *A Different Approach to Cosmology: From a Static Universe through the Big Bang towards Reality*, Cambridge, Cambridge University Press, 2000.

Con el desarrollo durante el decenio de los veinte de la mecánica cuántica, algunos astrofísicos y físicos cuánticos como Arthur Eddington, Paul Dirac y Pascual Jordan se percataron de la íntima relación que existía entre la física de las partículas elementales y la astrofísica, producto de la similitud de los procesos físicos ocurridos en el mundo de la microfísica y en el Universo cósmico.

Eddington era un firme partidario de la existencia de una singularidad, que definía un estado inicial del Universo a partir del cual se iniciaría la expansión del Universo, en contraposición con los defensores de la teoría del Estado Estacionario. En el modelo por él propugnado el Universo habría permanecido durante un lapso de tiempo indeterminado en una situación de equilibrio inestable, similar al modelo estático propugnado por Einstein en 1917, hasta que en un momento, determinado por la constante de Hubble, inició su expansión. Tal como propugnaba en su obra *The Expanding Universe*⁷⁶. Eddington era consciente de las dificultades teóricas que implicaba la aceptación de un estado inicial del Universo, lo que había llevado a algunos astrofísicos de la categoría de Hoyle a decantarse por un modelo estacionario de Universo. Para vencer dichas dificultades Eddington se sintió atraído por los desarrollos de la mecánica cuántica, en especial por los trabajos de Dirac. El resultado fue la publicación de una obra en 1936 titulada *Relativity Theory of Protons and Electrons*⁷⁷, que posteriormente desarrolló en su *Fundamental Theory* aparecida en 1948⁷⁸.

Eddington partió de la existencia de dos relaciones numéricas independientes entre el radio de curvatura espacial, procedentes de las ecuaciones de campo relativistas modificadas por Einstein en sus *Consideraciones Cosmológicas*, y el número de protones existente en el Universo, número de una enorme magnitud pero finito, como correspondería a un Universo de curvatura positivo y, por tanto, espacialmente cerrado. Una de dichas relaciones numéricas es cosmológica, mientras que la otra es microfísica. La primera viene determinada por las ecuaciones de campo relativistas modificadas (esto es, con la presencia de la constante cosmológica), debido a que el número de protones del Universo se encuentra en relación con la masa total del Universo que determina el campo gravitatorio. La segunda relación, microfísica, vendría determinada por la relación existente entre la unidad microfísica de longitud $\frac{e^2}{mc^2}$ y la relación entre el radio de curvatura del Universo y el número de protones del Universo; el resultado de esta relación es un valor de una enorme magnitud que determinaría la relación

⁷⁶ EDDINGTON, A. S.: *The Expanding Universe*, Cambridge, Cambridge University Press, 1933, existe traducción al español . EDDINGTON, A. S.: *La expansión del Universo*, Madrid, Galo Sáez, 1933.

⁷⁷ EDDINGTON, A. S.: *Relativity Theory of Protons and Electrons*, Cambridge, Cambridge University Press, 1936.

⁷⁸ EDDINGTON, A. S.: *Fundamental Theory*, Cambridge, Cambridge University Press, 1948.

entre el campo eléctrico y el campo gravitatorio existente entre un protón y un electrón⁷⁹. Dicho razonamiento condujo a Eddington en su obra *Fundamental Theory* a deducir veintisiete constantes físicas a partir de tres de ellas, además de determinar el valor del número de protones del Universo y la relación de masa existente entre el protón y el electrón⁸⁰.

Paul Dirac, destacado impulsor de la mecánica cuántica, se sintió fuertemente atraído por la obra de Eddington *Relativity Theory of Protons and Electrons*, como expresó en el artículo de *Nature* "*The Cosmological Constants*"⁸¹. Dirac consideraba que Eddington no había sido capaz de resolver el problema de los *grandes números* físicos, al no lograr derivar una estructura lógico-matemática clara que diese respuesta a la relación numérica entre el macrocosmos y el microcosmos. Dirac invirtió los términos del razonamiento de Eddington, y optó por considerar a las constantes numéricas *pequeñas* como las constantes fundamentales, mientras que las constantes numéricas *grandes* deberían ser constantes proporcionales a la edad del Universo. Se mostró de acuerdo con Eddington en que existía una relación esencial entre la esfera del microcosmos y el macrocosmos. Dirac estableció un *principio fundamental* por el cual ponía en relación la existencia de un estado inicial del Universo con la relación existente entre las constantes microfísicas y las medidas cosmológicas⁸².

Para Dirac este *principio fundamental* permitía deducir el tiempo cósmico, así como el receso de las galaxias; además los resultados obtenidos por la relatividad general a escalas locales del Universo permitían pensar que dicha teoría era válida a escala cósmica; aunque la aplicación de la relatividad general a las ecuaciones deducidas por Dirac presentaba problemas importantes, pues exigían que la constante gravitatoria variase con el tiempo, debido a la relación existente entre campo eléctrico y campo gravitatorio, de donde se deducía que el campo gravitatorio tendía a disminuir conforme aumentase la expansión del Universo.

Pascual Jordan intentó integrar el principio fundamental de Dirac en una teoría ampliada de la Relatividad, planteando la hipótesis de la creación de materia *ex-nihilo*. Para Jordan la estructura métrica del Universo estaría definida por una solución de las ecuaciones de campo gravitatorio diferente de la propugnada por Einstein, en las que encontrase cabida el principio de Dirac⁸³. Jordan trataba de

⁷⁹ EDDINGTON, A. S.: *Relativity Theory of Protons and Electrons*, Cambridge, Cambridge University Press, 1936.

⁸⁰ EDDINGTON, A. S.: *Fundamental Theory*, Cambridge, Cambridge University Press, 1948.

⁸¹ DIRAC, P. A. M.: "The Cosmological Constants", *Nature*, n° 139, 1937, p. 223.

⁸² DIRAC, P. A. M.: "A new basis for Cosmology", *Proceedings of the Royal Society*, London, 165 A, 1938, pp. 199-208.

⁸³ JORDAN, P.: "Formation of the stars and development of the Universe", *Nature*, 164, 1949, pp. 631-640.

conciliar la creación de materia *ex-nihilo* con el principio de conservación materia-energía, mediante un recurso similar al propugnado por Hoyle.

Durante los años cuarenta, varios autores se plantearon la posibilidad de abandonar el *principio cosmológico* o el postulado del tiempo cósmico, o incluso los dos simultáneamente, vistas las dificultades que ambos introducían a la hora de elaborar una teoría cosmológica consistente, basándose para ello exclusivamente en la teoría de la relatividad general. Fueron Kurt Gödel y G. C. Omer los dos primeros que se plantearon abandonar los postulados sistematizados por Robertson. Dicho intento no respondía a idénticos criterios y preocupaciones. Kurt Gödel en su artículo "*An example of a new type of cosmological solutions of Einstein's field equations*"⁸⁴, aparecido en 1943, pretendía encontrar una solución al problema del tiempo cósmico que respondiese a una filosofía idealista del tiempo, en la que desapareciese toda realidad objetiva del mismo. Mientras que Omer en su artículo "*A non-homogeneous cosmological model*"⁸⁵, aparecido en 1949, pretendió establecer un modelo de Universo que permitiese un perfecto acuerdo entre la teoría de la relatividad y las medidas de Hubble, aunque para ello fuese preciso renunciar a la homogeneidad del Universo.

Otros autores como Amitava Raychaudhuri, Otto Heckmann, Engelbert Schücking o Bruce B. Robinson trataron de disminuir la rigidez de los postulados de Robertson de manera que la relatividad general determinase con claridad el modelo de Universo, evitando en la medida de lo posible los problemas del estado inicial del Universo⁸⁶. Mientras que Richard W. Lindquist, John Archibald Wheeler y Jaroslav Pachner entre otros propugnaron el abandono de la homogeneidad aunque conservando la isotropía, con el fin de permitir que la estructura métrica del Universo no entrase en contradicción con las soluciones de campo relativistas de Einstein⁸⁷.

Las teorías cosmogónicas de los años 50: Lemaître, Gamow, Hoyle.

⁸⁴ GÖDEL, K.: "An exemple of a new type of cosmological solutions of Einstein's field equations", *Reviews of Moderns Physics*, 21, 1943, n° 3, pp. 447-50.

⁸⁵ OMER, G. C.: "A non-homogeneous cosmological model", *The Astrophysical Journal*, 109, 1949, pp. 164-176.

⁸⁶ RAYCHAUDHURI, A.: "Relativistic Cosmology", *Physical Reviews*, 98, 1955; HECKMANN, O. y SCHÜCKING, E.: "Newtonsche und Einsteinsche Kosmologie" en *Handbuch der Physik*, vol. III, Astrophysik IV, Sternsysteme, Berlin, Springer, 1959; ROBINSON, B. B.: "Relativistic universes with shear" *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 47, 1961, pp. 1852-1857.

⁸⁷ LINDQUIST, R. W. y WHEELER, J. A.: "Dynamics of a lattice universe by the Schwarzschild cell method" *Reviews of Modern Physics*, 29, 1957, pp. 432-443; PACHNER, J.: "Dynamics of the Universe", *Acta Physica*, 19, 1960, pp. 662-673 y "Zur relativistischen Kosmologie", *Annalen der Physik*, 8, 1961, pp. 60-75.

En la formulación de Friedman y Robertson de los modelos de Universo procedentes de la Relatividad General aparecía la figura de una singularidad, de un instante inicial originario del Universo actual. La aparición de una singularidad origen del Universo no dejaba de plantear graves problemas teóricos, centrados en las condiciones que debieron existir para que el Universo actual se desarrollase a partir de un estado anterior por completo desconocido y, sobre todo, por la ruptura de la vigencia de las leyes físicas entre ambas etapas; pues en el estado anterior a dicha singularidad las leyes físicas por las que se rige el Universo actual dejarían de tener sentido. Surgieron así dos grandes teorías cosmogónicas enfrentadas entre sí, que trataban de dar una explicación coherente del origen del Universo. De una parte, los defensores de la existencia de un estado inicial o gran explosión, representados por Georges Lemaître y George Gamow. De otra parte, los defensores de la Teoría del Estado Estacionario, representados por Fred Hoyle y Jayant Narlikar, que propugnaban que los elementos químicos presentes en el Universo encontraban su origen en las estrellas.

Para Lemaître el problema cosmogónico se encontraba profundamente ligado al problema cosmológico, al problema de la estructura del Universo actual. En el modelo de Universo propugnado por Lemaître la cuestión del instante inicial aparecía como un elemento de primer orden; en efecto, se trataba de un Universo cerrado y elíptico, regido por las ecuaciones de campo modificadas por Einstein, y en expansión indefinida cuyo inicio se remontaría en el tiempo hasta un instante inicial originario. Tanto Lemaître como Eddington se decantaron por la opción expansiva del Universo. Para Lemaître el movimiento general del Universo podía haberse generado a partir de una ruptura accidental de la uniformidad cósmica, debida a la formación de una condensación local provocada por efecto de la gravitación. La expansión se habría iniciado indirectamente por la condensación, su origen más directo se encontraría en lo que él denominaba "*estancamiento*", por el cual la condensación ya formada absorbería energía cinética, provocando la disminución de la presión en las regiones vecinas dando lugar, finalmente, a la expansión⁸⁸.

Dicha formulación chocaba con una seria dificultad, a saber: ¿cómo conjugar la expansión global del Universo con los procesos de condensación locales, como las galaxias, las estrellas y los amontonamientos de galaxias? Parecía, pues, que se producían en el Universo dos procesos simultáneos: la expansión global del Universo y, por otra parte, la condensación en regiones locales del Universo. Además, se añadía una dificultad accesoria planteada por Eddington en su artículo "*On the instability of Einstein's spherical world*", por la cual los procesos

⁸⁸ LEMAÎTRE, G.: "The Expanding Universe", *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 9, 1931, pp. 490-501.

cósmicos sólo pudieron haberse iniciado recientemente, o lo que es lo mismo el Universo tuvo que permanecer en un estado muy próximo al equilibrio, aunque inestable durante un lapso de tiempo casi infinito⁸⁹.

Fue en 1931 en un coloquio sobre la evolución del Universo, cuando Lemaître expuso por vez primera su teoría cosmogónica, conocida como *teoría del átomo primitivo*⁹⁰, en ella se trataban de solventar las dificultades anteriormente mencionadas, mediante la postulación de que el Universo no arrancaría del estado de equilibrio, sino que sobrepasaría dicho estado por lo que la causa de la expansión se encontraría en la persistencia de un proceso inicial, cuyo origen se encontraría en un estado singular de condensación extrema de la materia-energía, obviando de esta manera el problema de la ruptura del equilibrio. Surgió así la idea de un *átomo primitivo* en el que se concentraría toda la masa del Universo en un núcleo originario, cuya estructura energética vendría definida por un *quantum* único, que condensaría la energía cósmica en su nivel más alto. De esta forma, la singularidad prevista en los modelos cosmológicos relativistas se identificaría con el átomo primitivo de Lemaître. Su autor encontró la solución en la isotropía y en las altas energías de los rayos cósmicos, éstos serían los residuos de la primera etapa del Universo, de la fase explosiva en la cual la materia habría existido como un haz de rayos cósmicos⁹¹. Posteriormente, Lemaître distinguió dos clases de rayos cósmicos: los rayos cósmicos fósiles de la gran explosión y los rayos cósmicos originados en diferentes tipos de objetos del Universo⁹².

Según la teoría cosmogónica de Lemaître, el *átomo primitivo* contendría toda la materia del Universo en forma de partículas nucleares, sus dimensiones serían las de una esfera de radio igual a la distancia que separa la Tierra del Sol; la forma de la materia en el *átomo primitivo* sería un haz de rayos cósmicos, del que aún subsistirían algunos restos⁹³; esta fase constituiría, según Lemaître, la primera etapa cosmogónica, en la que la materia se encontraría bastante diluida: una parte en forma de nubes gaseosas, y, otra parte, en forma de rayos cósmicos (que recorrerían el espacio en todas las direcciones). Una segunda fase cosmogónica se desarrollaría a partir de las nubes cósmicas, que darían lugar a la formación de las galaxias, las estrellas y los amontonamientos de galaxias. El proceso de formación de las galaxias y estrellas vendría determinado por los

⁸⁹ EDDINGTON, A. S.: "On the instability of Einstein's spherical world", *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 90, 1930, pp. 668-678.

⁹⁰ COUDERC, P.: *Discussions sur l'évolution de l'Univers*, Paris, Gauthier-Villars, 1933. Friedman, A.; Lemaître, G. y Luminet, J.-P.: *Essais de Cosmologie*, Paris, Seuil, 1997. Godart, O.: *Cosmology of Lemaître*, Tucson, Pachard Pub House, 1985.

⁹¹ LEMAÎTRE, G.: *L'Hypothèse de l'atome primitif*, Neuchatel, Griffon, 1946, pp. 87-89.

⁹² LEMAÎTRE, G.: "L'Hypothèse de l'atome primitif et le problème des amas de galaxies" en VV.AA.: *La Structure et l'Évolution de l'Univers*, XI Conseil de Physique Solvay, Bruxelles, Stoops, 1958, p. 29.

⁹³ LEMAÎTRE, G.: "L'Hypothèse de l'atome primitif et le problème des amas de galaxies", *op. cit.*, p. 13.

movimientos locales de condensación en aquellas regiones en que la densidad de la nube cósmica sobrepasase la densidad de equilibrio, dando lugar a las proto-galaxias en cuyo interior se formarían las estrellas. Los amontonamientos de galaxias constituirían, para Lemaître, regiones del Universo en las que se habría conservado el estado de equilibrio, cuya expresión se encontraría en la ausencia de condensaciones centrales netas y en su densidad media (mil veces superior a la densidad cósmica). La etapa actual del Universo se caracterizaría, según la teoría del *átomo primitivo*, por la aceleración del proceso de expansión y por el fin de los grandes procesos cosmogónicos, aunque persistiesen formaciones gaseosas, tanto en las galaxias como en el espacio intergaláctico, que podrían dar lugar todavía a la formación de nuevas estrellas, por efecto de la condensación de dicho gas cósmico.

Otro firme defensor de la teoría de la *gran explosión*, fue George Gamow, creador del modelo cosmológico del *big bang*. Gamow era un claro partidario de la Relatividad General y de sus implicaciones cosmológicas⁹⁴. En la teoría cosmogónica de Gamow, al igual que en la de Lemaître, el Universo actual encuentra su origen en una singularidad inicial caracterizada por un estado singular de la materia-energía, a partir de la cual se iniciaría la expansión del mismo, fruto de lo que denominó *big bang*. Según Gamow se distinguirían tres etapas del Universo, por lo demás bastante similares a las etapas de la teoría de Lemaître. En la primera, caracterizada por la *gran explosión (big bang)*, dominaría el proceso de *nucleosíntesis* (de formación y reparto cuantitativo de los distintos elementos químicos a partir de la agregación de partículas elementales); la segunda etapa sería la de la condensación de la materia en estrellas y galaxias; y, finalmente, la tercera y última etapa, coincidiría con el estado actual del Universo, en la que los grandes procesos cósmicos habrían finalizado y el Universo se encontraría dominado por la expansión, en un proceso que terminaría con la dispersión indefinida del sistema de galaxias y la lenta extinción de las estrellas⁹⁵.

Gamow centró sus estudios en las primeras etapas del Universo. Pretendía desarrollar una teoría consistente de la *gran explosión* que explicase el origen y la abundancia o escasez relativa de los diferentes elementos químicos en el Universo actual, como fruto del proceso de *nucleosíntesis* que tuvo lugar durante el *big bang*, dicho trabajo fue realizado en colaboración con Ralph A. Alpher y Hans A. Bethe⁹⁶. Posteriormente Ralph Alpher y Robert Herman publicaron un largo e importante trabajo sobre este tema, titulado *"Theory of the origin and*

⁹⁴ GAMOW, G.: "On relativistic Cosmology", *Reviews of Modern Physics*, 21, n° 3, 1949, pp. 367-373.

⁹⁵ GAMOW, G.: *The Creation of the Universe*, New York, Viking Press, 1952. GAMOW, G.: *Theory of Atomic Nucleus & Nuclear Energy*, Oxford & Clarendon Press, 1949.

⁹⁶ ALPHER, R. A., BETHE, H. A. y GAMOW, G.: "The origin of the chemical elements", *Physical Review (letters)*, vol. 73, 1948, p. 803.

*relative abundance distribution of the elements*⁹⁷. Para Gamow la idea de un instante inicial se imponía con fuerza no sólo porque se encontrase contenida en las ecuaciones de la cosmología relativista, sino también porque explicaba las abundancias cósmicas de los distintos elementos químicos, mediante la aplicación de la física nuclear, constituyéndose este último argumento en la más firme defensa de la teoría del *big bang* según su autor.

Con objeto de dar una respuesta satisfactoria a la desigual abundancia de los elementos químicos en el Universo actual, Gamow, Alpher y Herman propugnaron la existencia de un gas homogéneo de neutrones, que dominaría las etapas iniciales del Universo inmediatamente después del *big bang*. La *nucleosíntesis* se desarrollaría así a partir de la captura de neutrones y la degeneración de los neutrones en protones y electrones. El modelo cosmológico vendría determinado en las etapas iniciales del Universo por el nivel de la temperatura, de la densidad de materia y de la densidad de radiación, conforme nos acercásemos al momento de la *gran explosión* estos tres indicadores irían aumentando exponencialmente. De tal manera que, en las etapas iniciales del Universo, después del *big bang* la materia contenida en el mismo se encontraría en forma de una nube indiferenciada de neutrones; en esta situación la única reacción posible es la degeneración del neutrón, para posteriormente proceder a la captura de un neutrón por un protón dando lugar a un núcleo de deuterio. Los elementos químicos se formarían así mediante la captura de sucesivos neutrones y por la degeneración del neutrón en un protón y un electrón, mientras que simultáneamente la densidad y la temperatura disminuirían rápidamente a consecuencia de la expansión del Universo. El proceso finalizaría en un intervalo de tiempo no superior a unas cuantas veces la vida media del neutrón, es decir, unos cuantos miles de segundos⁹⁸.

Dicha teoría de la *nucleosíntesis* no dejaba de presentar dificultades, ¿cómo explicar dentro de la teoría la escasez relativa de determinados elementos ligeros (como el boro, el berilio y el litio)?, o ¿la existencia del denominado "*pico del hierro*"?, ¿cómo explicar la abundancia relativa del helio?, y, algo que surgiría posteriormente, ¿cómo explicar el *atasco* del deuterio? La teoría cosmogónica del *big bang*, desarrollada por Gamow, Alpher y Herman entre 1946 y 1950 fue la que finalmente se impuso, una vez que fue reformulada en 1965 por Philip James Edwin Peebles y Robert Henry Dicke, eliminando las dificultades que subyacían en la teoría originaria⁹⁹. Sin embargo entre 1953 (fecha en la que

⁹⁷ ALPHER, R. A. y HERMAN, R. C.: "Theory of the origin and relative abundance distribution of the elements", *Reviews of Modern Physics*, vol. 22, nº 2, 1950, pp. 153-218.

⁹⁸ ALPHER, R. A. y HERMAN, R. C.: "Theory of the origin and relative abundance distribution of the elements", *Reviews of Modern Physics*, vol. 22, nº 2, 1950, pp. 153-218.

⁹⁹ DICKE, R. H.; PEEBLES, P. J. E. y DICKE, R. H.: "Evolution of the Solar System and the Expansion of the Universe", *Phys. Rev. Lett.* 12, 435-437 (1964). DICKE, R. H.; PEEBLES, P. J.

Alpher y Herman junto con James W. Follin Jr. publicaron un artículo en el que reconocían que la conversión de neutrones en protones era debida fundamentalmente a las colisiones entre electrones, positrones, neutrinos y antineutrinos¹⁰⁰) y 1965 la teoría cosmogónica del *big bang* sufrió un cierto abandono, del que sólo salió a partir del descubrimiento del fondo de radiación de microondas por Arno Allan Penzias y Robert Woodrow Wilson en 1965¹⁰¹.

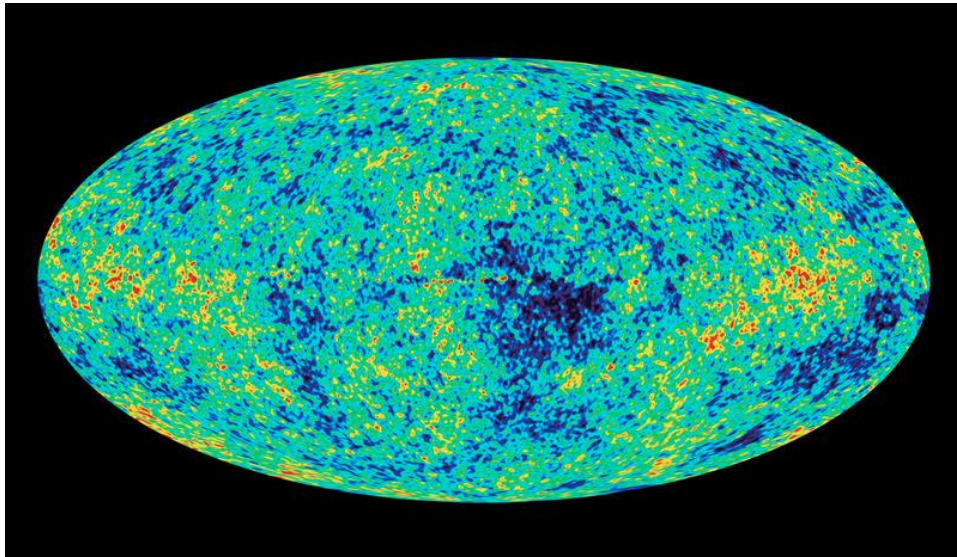


Imagen del fondo de radiación de microondas

En contraposición a las teorías cosmogónicas propugnadas por Lemaître y Gamow, se situaba la teoría de Hoyle, partidario de la Teoría del Estado Estacionario. Hoyle se dedicó a elaborar una teoría cosmogónica fundada en la *creación continua de materia-energía*. En su teoría Hoyle trataba de hacer compatible la creación continua con el principio de conservación, postulando para ello que lo que se conserva es la cantidad de materia-energía en la unidad de volumen propio y no en la unidad de volumen-coordenada, pues para él en un Universo infinito no tiene sentido hablar de la totalidad de la materia. De esta forma, según Hoyle, cambiaría solamente en la teoría del Estado Estacionario la naturaleza de la cantidad conservada, no violando el principio de conservación¹⁰².

E. y DICKE, R. H.: PEEBLES, P. J. E.; ROLL, P. G., y WILKINSON, D. T.: "Cosmic Black-Body Radiation", *Astrophysical Journal*, vol. 142, 1965, pp.414-419. WEINBERG, S.: *Los tres primeros minutos del Universo*, Madrid, Alianza, 1982, (1ª ed. en inglés 1977).

¹⁰⁰ ALPHER, R. A.; FOLLIN, Jr., J. W. y HERMAN, R. C.: "Physical Conditions in the Initial Stages of the Expanding Universe", *Physical Review*, 92, 1953, pp. 1.347-1.361.

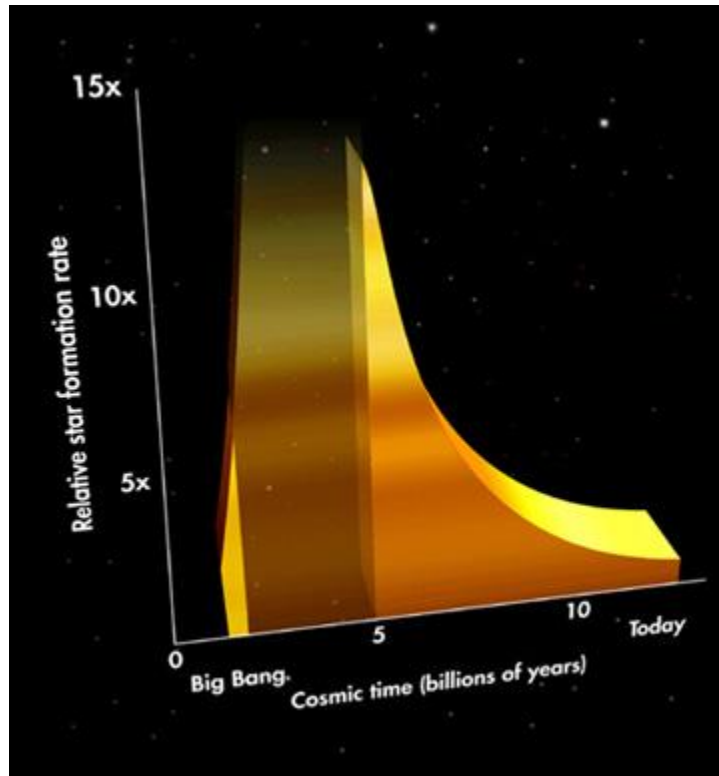
¹⁰¹ PENZIAS, A. A. y WILSON, R. W.: "A measurement of excess antenna temperature at 4080 Mc/sec" ("Una medición de un exceso de temperatura de antena a 4.080 Mc/s"), *Astrophysical Journal*, 1965.

¹⁰² HOYLE, F.: "The Steady Theory", en VV.AA.: *La Structure et l'Evolution de l'Univers*, XI Conseil de Physique Solvay, Bruxelles, Stoops, 1958, p. 80.

Para Hoyle después de la creación de materia no se formarían los elementos químicos sino las galaxias, a partir del hidrógeno originario. Por tanto, para que se pudiesen formar los elementos químicos era preciso que existiesen con anterioridad las estrellas. De ahí la importancia que adquiere, dentro de la cosmogonía de Hoyle, el proceso de formación de las galaxias; este último, vendría determinado por la existencia de una *nube* intergaláctica, en cuyo interior estuviese la materia de un número muy elevado de galaxias, de tal forma que la fragmentación de dicha nube en partes cada vez más pequeñas y más condensadas diese lugar a la formación de las galaxias mediante un proceso acelerado¹⁰³. Hoyle trataba de explicar la existencia de los rayos cósmicos dentro del modelo de un Universo estacionario, en donde sus altas energías no serían el residuo fosilizado de una gran explosión originaria¹⁰⁴.

¹⁰³ HOYLE, F.: "On the fragmentation of gas clouds into galaxies and stars", *The Astrophysical Journal*, 118, nº 3, 1953, pp. 513-528.

¹⁰⁴ Sin embargo, las observaciones astronómicas de radiofuentes, efectuadas por los radioastrónomos de Cambridge, Ryle y Schever en 1955, señalaban fuertes desviaciones de las previsiones establecidas por la Teoría del Estado Estacionario respecto del número e intensidad de las radiofuentes. A dicha dificultad trataron de dar respuesta Hoyle y Narlikar en un artículo publicado en 1961: HOYLE, F. y NARLIKAR, J. V.: "On the counting of radio-sources in the Steady State Cosmology", *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 123, 1961, pp. 133-166. Posteriormente dichos resultados no sólo se han confirmado sino que han acentuado las dificultades de la teoría del Estado Estacionario, inclinándose a favor de la teoría del *big bang*, sobre este particular ver: SCIAMA, D. W.: "El renacimiento de la cosmología de observación", *La Recherche*, junio 1970, recogido en VV.AA.: *Astrofísica. Recopilación de artículos de la Recherche*, Orbis, Barcelona, 1987, pp. 181-190.



En la cosmogonía de Hoyle la nucleosíntesis se desarrollaba en las estrellas, y dependía de la propia evolución estelar. En la teoría del Estado Estacionario, el Universo en su globalidad es estacionario, pero ello no obsta para que las galaxias evolucionasen, dando lugar a un proceso continuado de dispersiones y condensaciones, en las que la materia de las estrellas previamente condensadas sería dispersada por efecto de una explosión (supernova), librándola para nuevas condensaciones, en las que se agregarían a la nueva materia creada¹⁰⁵.

Entre 1950 y 1965 coexistieron dos teorías cosmogónicas diferentes, la que propugnaba la teoría del *big bang*, y la que defendía el modelo de Universo estacionario. Cada teoría propugnaba una interpretación de la *nucleosíntesis* diferente, y en aquellos años enfrentada. Para Gamow la nucleosíntesis tenía lugar en los instantes inmediatamente posteriores a la *gran explosión*, para Hoyle la formación de los elementos químicos se efectuaba en las estrellas. Entre 1955 y 1965 gozó de mayor aceptación la teoría de la nucleosíntesis defendida por Hoyle. La situación cambió cuando Penzias y Wilson descubrieron el fondo de radiación de microondas, que fue interpretado por Dicke y Peebles como un fuerte argumento en favor de las tesis defendidas por Gamow, Alpher y Herman, aunque para ello fue necesario introducir importantes modificaciones a su teoría.

¹⁰⁵ BURBIDGE, E. M. y C. R.; FOWLER, W. y HOYLE, F.: "Synthesis of the elements in stars", *Reviews of Modern Physics*, 29, 1957, pp. 446-560; GREENSTEIN, J. G.: "Stellar evolution and the origin of chemical elements", *American Scientist*, 49, 1961, n° 4, pp. 449-473.

Las observaciones astronómicas posteriores reforzando tales argumentos, siendo en la actualidad la teoría aceptada para explicar el Universo actual, integrada en la teoría del *big bang*¹⁰⁶.

¹⁰⁶ ALPHER, R. A. y HERMAN, R.: *Genesis of the Big Bang*, New York, Oxford University Press, 2001. WEINBERG, S.: *Los tres primeros minutos del Universo*, Madrid, Alianza, 1982, (1ª ed. en inglés 1977). HAWKING, S. W.: *Historia del tiempo: del big bang a los agujeros negros*. Madrid, Alianza, 1997. THORNE, K. S.: *Agujeros negros y tiempo curvo*. Barcelona, Crítica, 1995. HAWKING, S. W.; THORNE, K. S.; NOVIKOV, I.; FERRIS, T. y LIGHTMAN, A.: *El futuro del espaciotiempo*. Barcelona, Crítica, 2003.