

Comentario 3

Texto

“La característica más novedosa de esta teoría es la creación de materia. A pesar de que este proceso no sea directamente observable, es de gran interés discutir la física del mecanismo creativo. En primer lugar, resulta claro que la velocidad de creación por unidad de volumen y por unidad de tiempo no puede variar ampliamente de un punto a otro, y en todo caso menos de lo que varía, por ejemplo, la densidad de la materia. Si la velocidad de creación fuera, pongamos por caso, proporcional a la densidad de la materia, la nueva materia sería creada en el interior de las estrellas a una velocidad muy elevada (su masa se doblaría cada $3 \cdot 10^9$ años) y no en el espacio vacío donde es necesaria para la formación de nuevas galaxias. En virtud del principio cosmológico perfecto las nuevas nebulosas deben condensarse en los espacios dejados por el crecimiento de las mayores. Debido a esto no puede eliminarse por completo un pequeño grado de variación. Por razones de simplicidad parece mejor en el estado actual suponer que la velocidad de creación es constante en el espacio y tiempo. Por lo tanto, la cantidad de materia creada en un pequeño elemento cuatridimensional del espacio-tiempo es proporcional al volumen del elemento con un factor de proporcionalidad en tres veces el producto de la constante de Hubble por la densidad media de materia en el universo.”

H. Bondi, Cosmología, Barcelona: Labor, 1970, pp. 168-169. Ed. orig. Londres: Cambridge Univ. Press, 1960 (2ª ed., 1ª ed. en 1951).

Sir Hermann Bondi fue un físico austriaco-británico nacido en Viena en 1919 y fallecido en 2005. De familia judía acomodada no practicante. A los 17 años, seguramente por la creciente corriente de antisemitismo de Austria y alentado por Abraham Fraenkel, un pariente lejano, y Sir Arthur Eddington, se mudó para estudiar en el *Trinity College* de Cambridge. En 1942 se unió a la investigación de tecnologías de radar para la segunda guerra mundial y conoció a Hoyle y a Gold, amistad que continuó al retornar a Cambridge al fin de la guerra. En 1952 escribió su primer libro, *Cosmology*, cuyo extracto vamos a comentar, y empezó a trabajar de profesor de matemáticas en el *King's College* de Londres, en donde ganaría la cátedra. Después dirigiría el *Churchill College*, en Cambridge. Famoso por ser un gran divulgador de la física, notable es su *Review of Cosmology*, escrito para la Real Sociedad Astronómica en 1948, y sus libros y charlas en radio y televisión. Seguidor de Popper, tanto él como su mujer, la astrónoma Christine Stockman, fueron activistas en asociaciones humanistas. Ocupó muchos cargos administrativos en su vida, destacando su dirección de la Asociación Europea para la Investigación Espacial (ESRO) y siendo asesor del ministro de defensa. Le fue concedido el título de sir en 1973 (Sterken 2007; Roxburgh 2007).

La espectroscopía estelar reveló que ciertos “objetos nebulares”, nuestras galaxias, se alejaban de nosotros, como puso de manifiesto ya desde 1912 Vesto Slipher. Según estas observaciones la

mayoría de los espectros de las galaxias experimentaban un corrimiento al rojo que indicaría una velocidad de alejamiento respecto de la Tierra¹. Desde los primeros años veinte, habían sido halladas soluciones a las ecuaciones de Einstein de la Relatividad General (RG) que correspondían a un universo en expansión independientemente por Alexander Friedmann y Georges Lemaître, pero fue en 1929 cuando Edwin Hubble estableció su conocida ley lineal entre la distancia de las galaxias y su velocidad de alejamiento, y en 1931 junto a su ayudante Milton Humason calcula la constante de proporcionalidad, conocida desde entonces como *constante o parámetro de Hubble*², encontrando que las galaxias se alejaban a una velocidad de 558 km/s por cada millón de parsecs³ (Kragh 2008, p. 236). Aunque en un principio se pensó que estos datos eran de origen cinemático (efecto Doppler), fue calando la idea de que eran consecuencia de una evolución de la métrica del universo derivada de los modelos de la RG que requerían una expansión del mismo (Friedman-Lemaître). En 1931 Lemaître propuso su hipótesis del *átomo-primordial* al suponer que el universo tuvo que tener un comienzo catastrófico, sugerida por la coincidencia en magnitud entre las vidas medias de ciertas sustancias radiactivas y la supuesta edad del universo que se deducía de la inversa de la constante de Hubble (*tiempo de Hubble, T*). El primer problema que tenía que afrontar la cosmología era la llamada “paradoja de la edad” (*time-scale difficulty*), consistente en que la edad del universo deducida a partir de la constante de Hubble era más pequeña que la que se atribuía por aquel entonces a los astros. El tiempo de Hubble estaba entre los 1800 y 2000 millones de años, y las observaciones de decaimiento radiactivo terrestre atribuían a la Tierra una edad de al menos 2000 millones de años, y por cálculos de astrofísica a las estrellas no menos de 5000 millones de años (Bondi y Gold 1948, p. 263).

Sin embargo en esa época, aunque la Relatividad General había pasado ya por varias pruebas, no era tan mayoritariamente aceptada como lo es hoy en día. Y si nos referimos concretamente al marco cosmológico, en donde el propio Einstein había puesto su semilla en 1917 con el primer modelo basado en su teoría, la comunidad científica estaba muy dividida. Por esos tiempos todavía había una teoría cosmológica no basada en la RG que tenía sus adeptos, la teoría cinemática

¹La galaxia *Andrómeda* sería la única que supuestamente se estaba acercando de un total del orden de la cuarentena, en observaciones hechas hasta 1925. El corrimiento al rojo es una cantidad adimensional denotada por z que mide el incremento relativo de las longitudes de onda de la radiación observada, λ , respecto de la que se mediría en un laboratorio (estrellas cercanas), λ_0 , es decir, $z \equiv (\lambda - \lambda_0)/\lambda_0$. En esa época esta variación se interpretaba como *efecto Doppler*, que relaciona la variación en la longitud de la onda con la velocidad relativa al observador.

²La constante de Hubble se denota por H o H_0 (los cosmólogos ponen el subíndice “0” refiriéndose a valores actuales, no a valores de origen), con dimensiones de velocidad por unidad de distancia (inversa del tiempo o hercio). Así, la ley de Hubble quedaría establecida como $v \approx H_0 d$, siendo v la velocidad de recesión y d la distancia a la galaxia, o como $z \approx (H_0/c)d$, para distancias “pequeñas”, si nos referimos a la relación con los desplazamientos al rojo.

³El parsec (símbolo “pc”) es una unidad astronómica, de uso no oficial, que corresponde a la distancia a la cual el diámetro medio de la órbita terrestre abarca un ángulo de 2”, aproximadamente $3 \cdot 10^{13}$ km.

de Milne, que había publicado en 1948 su última obra al respecto, *Relatividad Cinemática*. De hecho, el *principio cosmológico* de Milne, enunciado en 1933, un postulado basado en el método racionalista-deductivo que empleó para desarrollar su cosmología, ha subsistido hasta nuestros días. Es esta una expresión del omnicestrismo, especie de antinomia de los principios antrópicos o “principio extendido de la relatividad”, según el cual se supone que cualquier observador en el universo ve las mismas leyes independientemente de su posición y de la dirección en la que observe. Se trata por tanto de aceptar la homogeneidad e isotropía del espacio cósmico a grandes escalas (del orden de unos cientos de megaparsecs). A partir de este principio y el *postulado de Weyl* se podían definir ciertos observadores *fundamentales* para los que se definiría un tiempo propio llamado *tiempo cósmico* que verían las mismas leyes en sistemas de referencias de coordenadas co-móviles respecto de los cuales las extensiones de materia asociadas se consideraban en reposo⁴. En el universo de Milne se aceptaba la expansión y un origen a la Lemaître a costa de suponer una variación temporal de la constante gravitatoria. Este método racionalista-deductivo de la cosmología, defendido por Milne y otros físicos como Dirac, fue combatido por otra corriente de tipo más empirista, heredera de la física nuclear, liderada por el ruso-americano George Gamow en los años cuarenta, que defendía el modelo del Big Bang caliente según el cual el universo primitivo se habría formado a partir de una nube de neutrones a muy alta densidad y temperatura, lo que se conoce como *nucleosíntesis primordial*. Sin embargo, el segundo gran problema de la cosmología de los años cuarenta era el llamado “hueco de masas”, según el cual el modelo de Gamow no podría explicar la formación de elementos más pesados que el hidrógeno y el helio.

La *teoría del estado estacionario*, que es como se conoce a la tesis defendida por el escrito que nos ocupa, surgió así de nuevo en Inglaterra a partir de consideraciones postulacionales de tipo racionalista-deductivo. Se trataba de resolver la paradoja de la edad y los problemas físicos que surgían a la hora de considerar una singularidad de materia inicial a alta temperatura. Esta tesis fue defendida en sendos artículos aparecidos en 1948: en julio el titulado “The steady-state theory of the expanding universe”, por Hermann Bondi y Thomas Gold, y en agosto “A new model for the expanding universe”, por Fred Hoyle. El método heurístico de Bondi empieza por preguntarse si el hecho de que en tiempos anteriores el universo tuviera más densidad de materia no implicaría que las leyes físicas no fueran las mismas, aludiendo al *principio de Mach* según el cual la inercia de un cuerpo depende de la masa total distribuida en el exterior del mismo. Mantener la validez de las leyes físicas pasaba por aceptar el llamado *principio cosmológico perfecto*, según el cual no solo el universo debía presentar el mismo aspecto a gran escala desde cualquier lugar o dirección, sino

⁴Todas estas suposiciones generan grandes restricciones en los modelos matemáticos, permitiendo en este caso factorizar la coordenada temporal respecto de las espaciales y simplificar por tanto el estudio de la evolución del universo. En este caso ya se podría hablar de una curvatura estrictamente espacial (Sellés García 2007, p. 263)

también en cualquier instante en el que se analizara. Bondi consideraba este principio innegociable si uno quería seguir haciendo ciencia en cosmología: **“We do not claim that this principle must be true, but we say that if it does not hold, one’s choice of the variability of the physical laws becomes so wide that cosmology is no longer a science”**(Bondi y Gold 1948, p. 255). Para que el universo tuviera una densidad de materia también constante en el transcurso del tiempo, compatible con la RG⁵ y la expansión del universo, se tendría que aceptar la creación continua de materia, **“característica novedosa”** a la que alude el texto. Pero, como también se afirma, era inobservable la violación de la conservación de la masa que suponía, dado que equivaldría a que se creara en media como máximo un átomo de hidrógeno por metro cúbico cada trescientos mil años (Bondi y Gold 1948, p. 266). De esta manera se resolvían los problemas del comienzo cósmico, dado que se trataba de un universo eterno, y con ello el de la edad del universo (las nebulosas más alejadas no tenían por qué ser las más antiguas).

El hecho de que el universo de Bondi fuera estacionario no quiere decir que fuera estático. Tampoco que no pudiera haber pequeñas fluctuaciones locales, la materia nueva se crearía en el espacio vacío. El principio cosmológico perfecto implica que el *aspecto* del universo es fijo, no que sus objetos fueran fijos, las funciones que no son directamente observables o no forman parte de leyes pueden evolucionar (Bondi 1960, p. 146). En particular, el factor de escala, $R(t)$, del universo, cantidad que representa el alejamiento medio de las nebulosas, era en efecto función del tiempo, pero lo que no podía ser variable era el parámetro de Hubble, $H_0 \equiv \dot{R}/R$ ⁶, por ser una cantidad observable perteneciente a una ley, lo que hacía que el universo de Bondi se expandiera exponencialmente como un universo de De Sitter. Las propiedades geométricas tampoco deberían variar con el tiempo, y dada su expansión solo podía tratarse de un universo de curvatura nula (euclídeo). La velocidad de creación de materia, o materia creada por unidad de volumen y de tiempo, debería ser constante, dado que si fuera proporcional a la densidad, por ejemplo, la densidad del interior de las estrellas haría las diferencias de creación entre un punto y otro demasiado grandes. Por tanto, la densidad media del universo, ρ_0 , protagonista de las ecuaciones de estado, tampoco debería variar. De este modo, sabiendo que $\rho_0 = M/V$, siendo M una masa y V el volumen que la contiene, su derivada con respecto al tiempo debería anularse, lo que lleva a que el ritmo de creación de materia

⁵En realidad es en el trabajo de Hoyle, del que no nos ocupamos aquí, en donde se usan las ecuaciones de Einstein en todo su potencial, añadiendo un tensor de creación de materia. Bondi matiza que esto pertenecería a otra clase de teorías de tipo inductivo, aceptando en primer lugar la RG, al contrario que la suya que se encuadraría, con las de Milne y otros, en teorías que parten de propiedades generales y principios y deducen propiedades observables, pero no cabe duda de que aceptaba la RG (Bondi 1960, pp. 97, 152-156). A Hoyle también se debe el término “Big Bang”, en su origen despectivo, para las teorías de origen explosivo del universo, cuando lo acuñó en un programa de radio de la BBC en 1949, ridiculizando el trabajo de Gamow.

⁶En física la variación o derivada con respecto al tiempo de una magnitud se denota poniendo un punto encima, $\dot{R} = dR/dt$.

por unidad de volumen propio sea en efecto $\dot{M}/V = 3H_0\rho_0$, como nos cuenta el autor al final de este extracto. En unidades cegesimales la cantidad mencionada era 10^{-43} g/s/cm³, lo suficientemente ridícula para que no se pudiera observar ninguna violación a cualquier ley de conservación.

En la segunda edición del libro cuyo texto estamos comentando ya se incluye una corrección al parámetro de Hubble⁷ que resolvería la paradoja de la edad, desactivando así uno de los problemas que dio lugar a la teoría del estado estacionario. En cualquier caso, la teoría subsistió veinte años a base de luchar contra las observaciones experimentales que parecían cuestionarla, la más famosa de ellas el descubrimiento, a partir de 1964, de las radiaciones de fondo de microondas, que daba un espaldarazo a la teoría del Big Bang. Es conocida la frase de inicio de Bondi en sus conferencias: “**the data in cosmology are so likely to be wrong that I propose to ignore them**” (Anónimo 1992), pero el principal problema de esta teoría era precisamente la radicalidad del principio cosmológico perfecto, que exigía la constancia temporal de muchas de las magnitudes asociadas con muchas otras observaciones astrofísicas de la época, y que obligaban a arrojársela de suposiciones e hipótesis *ad hoc*. Nunca fue, no obstante, del todo aceptada, especialmente por la violación teórica de leyes de conservación que suponía y por la suposición de la creación de materia de la nada (aunque la hipótesis del Big Bang, como contraatacaban los autores, suponía supuestamente una mayor creación de la nada todavía). La cosmología entre 1935 y 1965 se situó “**en una especie de espectro metodológico que va desde un pragmatismo extremo a un racionalismo extremo**” (Kragh 2008, p. 295). Pero se puede afirmar que a partir de 1970 la batalla la había ganado su teoría rival (Sellés García 2007, p. 290).

Referencias

- Anónimo. 1992. “Big Bang brouhaha.” *Nature* 356:731.
- Bondi, H. 1960. *Cosmology. Second Edition*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Bondi, H., y T. Gold. 1948. “The Steady-State Theory of the Expanding Universe.” *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 108:252–270.
- Kragh, Helge. 2008. *Historia de la cosmología*. Barcelona: Crítica.
- Roxburgh, I. W. 2007. “SIR HERMANN BONDI KCB.” *Biogr. Mem. Fell. R. Soc.* 53:45–61.
- Sellés García, Manuel. 2007. *Introducción a la historia de la cosmología*. Madrid: UNED.
- Sterken, V.J. 2007. “Sir Hermann Bondi.” *Acta Astronautica* 61:514–525.

⁷Gracias a la recalibración, por Walter Baade, en 1952, de la luminosidad de las cefeidas utilizadas como indicadores de distancias (más alta que la supuesta), Allan Sandage dio un valor de 13000 millones de años a la edad del universo, lo que correspondía con una constante de Hubble de 75 km/s/megaparsec (Bondi 1960, pp. 39,165).