

Capítulo 5

EL MODELO COSMOLÓGICO ESTÁNDAR Y SU BASE EMPÍRICA

5.0 Introducción

Hablamos de “modelos” cosmológicos, y entre ellos del **modelo estándar**, o “Friedmann-Lemaître-Robertson-Walker hot big-bang model”.¹ Tal nombre recuerda los trabajos del ruso Friedmann y el sacerdote belga Lemaître sobre las soluciones de la ecuación de la relatividad general de Einstein, así como los de H.P. Robertson y A.G. Walker sobre las simplificaciones del espacio-tiempo, impuestas por el “Principio Cosmológico” de homogeneidad e isotropía del universo. Por otra parte, el adjetivo “hot” expresa claramente que, a las altas temperaturas iniciales del universo, ha de dominar la “física de altas energías” nuclear y subnuclear.

El término “modelo” indica, que la actual cosmología no posee la solidez de otras ciencias empírico-formales,² en las que un cuadro teórico rigurosamente definido queda contrastado por multitud de hechos experimentales, repetibles en el laboratorio. Se trata más bien aquí de una **extrapolación de ciencia**, que utiliza hasta tres cuadros teóricos distintos –no siempre bien armonizables ni aplicables al universo– y que apenas cuenta con tres “hechos cósmicos” para contrastarla. Entrecomillamos esos hechos, porque exigen una gran dosis de teoría y de hipótesis, para poder ser interpretados como cósmicos. Pero el tema cosmológico es suficientemente interesante para que nos acercarnos a él, lo mejor que podamos. Y, por otra parte, el encaje sorprendente que ofrecen esos tres “hechos cósmicos” nos hace ver en ellos, por primera vez en la historia, una verdadera **contrastación empírica**.

Nos conformaremos aquí con hacer una elemental presentación histórica de esos cuadros teóricos y de esa contrastación empírica del modelo estándar (§5.1 y §5.2), para proponer después esquemáticamente algunas efemérides de la evolución cósmica que predice (§5.3), y hacer algunas reflexiones filosóficas que tal modelo cosmológico nos sugiere, especialmente en relación con el llamado “Principio Antrópico” (§5.4).

¹ El término inglés “Big Bang”, inventado por Fred Hoyle como un insulto al adversario de su modelo de la “Continuous Creation”, pronto fue aceptado sin ninguna connotación despectiva. Lo traducimos por “big-bang”; el *Vocabulario Científico* propone llamarlo “Gran Explosión”. Bibliografía divulgativa: WEINBERG 1977, actualizado por PADMANABHAN 1998 o ALLDAY 1998, o los más asequibles ELLIS 1993 y BARROW 1997; en castellano, *Mundo Científico* 2001.

² Sobre el “criterio de demarcación” científica según Popper o Kuhn, véanse §3.1 y §3.2.

5.1 Los cuadros teóricos de la cosmología³

5.11 La termodinámica y la mecánica estadística

El más antiguo de los cuadros teóricos utilizado en la cosmología, es el de **la termodinámica**, que hunde sus raíces en el siglo XIX, con sus dos principios: el de conservación y el de degradación de la energía en todo “sistema cerrado”.⁴

El primer principio concede a la energía una especie de substancialidad, como la concedida a la masa o “cantidad de materia” desde los tiempos de Lavoisier. Y el segundo le atribuye una cierta contingencia, una tendencia continua a degradarse. Mide esta degradación otra magnitud termodinámica, la entropía,⁵ que en un sistema cerrado nunca puede disminuir, sino que aumentará siempre hasta transformar toda la energía del sistema en calor, y dejar el sistema a una misma temperatura. Esta energía calorífica isoterma resulta irrecuperable como capacidad de producir trabajo. Se dice que el sistema cerrado alcanza su “muerte térmica”, en virtud de este **principio entrópico**.

La aplicación de los principios de la termodinámica al universo en su conjunto plantea la cuestión del origen de esa enorme cantidad de energía que descubrimos en el universo. Demuestra además que el universo, en la medida en que constituya un sistema cerrado, ha tenido necesariamente una duración finita; pues de lo contrario habría alcanzado ya su muerte térmica, contra lo que nos muestra la experiencia. La fuerza de este “argumento entrópico” era seriamente considerada en el siglo XIX, desde la misma elaboración y formulación de este principio (Sir William Thomson, barón del Kelvin, en el período 1848-1862). Actualmente, sin embargo, ha perdido su fuerza, pues en la perspectiva que estudiaremos de un universo en expansión, no es fácil defender su carácter de sistema termodinámicamente cerrado.

Al descubrirse la estructura molecular de la materia, la termodinámica da lugar a **la teoría cinética** de los gases y a **la mecánica estadística**. Con ello las magnitudes termodinámicas se reducen a magnitudes dinámicas de moléculas, estadísticamente promediadas dentro de grandes conjuntos. En concreto, un sistema posee entropía mayor cuando está “más desordenado” o, para el físico, cuando es “más probable”; y la probabilidad de un sistema “mesocósmico” viene dada por el número de “microsistemas” (supuestos equiprobables) que le corresponden. La entropía S de un sistema ha de ser justamente proporcional al logaritmo de su probabilidad W (“Wahrscheinlichkeit “ en alemán”):⁶

³ Véase una versión previa de §5.1 en DONCEL 2000, y una más amplia de §5.13 DONCEL 2002.

⁴ Es cerrado un sistema, si a través de sus fronteras no puede pasar ni materia ni energía.

⁵ La entropía tiene una definición termodinámica muy sencilla: Un sistema o subsistema (necesariamente abierto) que recibe (o pierde) una cantidad de calor ΔQ a la temperatura T , aumenta (o disminuye) su entropía en $\Delta S = \Delta Q / T$. La temperatura T ha de medirse en la escala absoluta de temperaturas (en “grados Kelvin”), cuyo cero corresponde a 273.15 “grados centígrados” bajo cero ($0^\circ\text{K} = -273.15^\circ\text{C}$).

⁶ En virtud de sus conceptos, la entropía total de dos subsistemas ha de ser la suma de sus entropías, y su probabilidad total el producto de sus probabilidades; por ello, la relación entre entropía y probabilidad ha de ser logarítmica. La constante de proporcionalidad k es una constante física universal, denominada “constante de Boltzmann”. Ha de tener dimensiones de entropía, y su valor, $k = 1.34 \cdot 10^{-23}$ julios $^\circ\text{K}^{-1}$, coincide con el cociente $k = R/N$ entre la “constante de los gases perfectos” R (recuérdese su ecuación $PV = RT$) y el “número de Avogadro” N (número de moléculas en una molécula gramo, o de átomos de C^{12} en 12 gr).

Ley de Boltzmann (1877)

$$S = k \log W$$

La muerte térmica se explica ahora por la propensión de todo sistema aislado a alcanzar su estado más probable. El “principio entrópico”, como la mayor parte de las leyes físicas, adquiere así carácter estadístico.

Dentro de la termodinámica de fin de siglo se estudiaba con especial interés el espectro de la **radiación térmica**, o sea, la distribución de intensidades correspondientes a cada una de las frecuencias, para la radiación electromagnética emitida por un cuerpo en equilibrio térmico con ella, a una temperatura dada.⁷ Tal estudio resulta especialmente significativo para un “cuerpo negro”, es decir, un cuerpo cuya superficie absorbe todas las radiaciones que incidan sobre ella.⁸ Resulta entonces una distribución de frecuencias que es independiente de la substancia del cuerpo negro emisor, dependiendo tan sólo de su temperatura. Cada temperatura posee así una curva espectral característica, que expresa la intensidad ρ en función de la frecuencia ν para radiación a la temperatura T . Tales curvas presentan una curiosa forma de campana, cuya interpretación teórica obligó a Planck, en las últimas semanas del siglo XIX, a introducir su famoso “cuanto de acción” h (k es la constante de Boltzmann que acabamos de ver, y c la velocidad de la luz):

Radiación de Planck (diciembre 1900)

$$\rho(\nu) = \frac{8\nu}{c^3} \frac{h\nu^3}{\exp(h\nu/kT) - 1}$$

5.12 La relatividad especial y general

Elas constituyen el segundo gran cuadro teórico de nuestra cosmología. **La relatividad especial** fue introducida conceptualmente por Albert Einstein en 1905, para dar la misma simetría física a las leyes de la mecánica y del electromagnetismo. Realiza para ello una profunda crítica conceptual de las magnitudes físicas básicas de espacio y tiempo. E introduce entre ellas cierta relación física, de forma que la velocidad de la luz en el vacío sea una constante c , la misma para todo observador –aunque éste se mueva, o aunque se mueva la fuente luminosa–. Esta constante enorme resulta ser una velocidad límite: ningún cuerpo en movimiento, ninguna transmisión informativa pueden superarla (“principio de causalidad” relativista). La nueva relación física “tiempo-espacio” suele visualizarse en un espacio cuatridimensional (Herrmann Minkowski 1907);

⁷ Un hierro muy caliente se pone “al rojo” y luego “incandescente”. Al elevarse su temperatura, el máximo de intensidad de la luz emitida pasa de la frecuencia del rojo a la del amarillo.

⁸ Para un cuerpo cualquiera, lo que resulta independiente es el cociente entre la intensidad de emisión y la de absorción. Para el cuerpo negro, ésta última es total (igual a la unidad), y basta medir las intensidades de emisión. En el laboratorio se construye el cuerpo negro en forma de una cavidad oscura sólo accesible a través de una pequeña ventana. Ésta, vista desde fuera, actúa como una superficie emisora y totalmente absorbente.

un destello luminoso se propaga en él según un “cono de luz”, y un cuerpo masivo describe una “línea de universo” interior a este cono. Entre la energía y el momento lineal (o cantidad de movimiento) existe una relación física análoga, que puede visualizarse análogamente en otro espacio cuadrimensional idéntico, de “energía-momento”.

Consecuencia importante de la relatividad especial es la equivalencia entre la masa m y la energía E , fijada por la famosa fórmula de Einstein mediante el cuadrado de la velocidad de la luz:

Equivalencia masa-energía (Einstein 1905)

$$E = m c^2$$

Una pequeñísima cantidad de masa puede transformarse en una enorme cantidad de energía, como lo patentizan las bombas atómicas o los reactores nucleares. Así que ya no hay dos principios de conservación, para la masa y para la energía. Hay uno sólo, digamos, el de la conservación de la energía, considerando la masa como una nueva forma condensadísima de energía.

La relatividad general, introducida por Einstein en 1915, reduce la acción gravitacional de la masa –o energía– a una curvatura geométrica del espacio circundante, fijada por una sencilla ecuación tensorial:⁹

Ecuación de la relatividad general (Einstein, 20 noviembre 1915)

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}, \quad \mu, \nu = 0, 1, 2, 3.$$

El primer miembro de esa ecuación es puramente geométrico, y representa la curvatura del espacio-tiempo, mientras que el segundo es físico, y describe la distribución de energía-momento que causa esa curvatura. Como ya vimos en el contexto de Popper, esa curvatura del espacio se consideró comprobada en 1919, al observar durante un eclipse de sol el aparente distanciamiento de dos estrellas.¹⁰ La enorme masa solar curva en sentidos opuestos dos rayos provenientes de esas estrellas, y hace aumentar el ángulo aparente entre ellas ¡en un segundo de arco!, respecto al que presentan las mismas estrellas cuando las vemos alejadas del sol.

Esa ecuación de Einstein y la curvatura del espacio son de enorme interés para nuestro tema cosmológico. Supongamos, por ejemplo, una distribución de masa o energía homogénea en el universo; esa ecuación impondrá una curvatura aproximadamente constante a todo el espacio. Así que nuestro mundo podemos visualizarlo, a dos dimensiones, como la superficie constantemente curvada de

⁹ La curvatura del tiempo-espacio viene expresada en geometría diferencial por el tensor $R_{\mu\nu}$, y su métrica por el $g_{\mu\nu}$ (el escalar R no es más que la contracción R_{μ}^{μ} de ese mismo tensor). En el segundo miembro figuran un factor constante (que incluye la constante de la gravitación newtoniana G , y la velocidad de la luz c) y el tensor de energía-momento $T_{\mu\nu}$, que representa el sistema físico en cada punto del tiempo-espacio (por ejemplo, su componente T_{00} representa la densidad de energía, incluida la masa; los índices tensoriales 0 y 1, 2, 3 refieren al tiempo y a las tres direcciones del espacio, respectivamente, y también a la energía y a las del momento).

¹⁰ Véase § 3.1 y su nota 3.

una esfera. La densidad del universo varía enormemente de un punto a otro –por ejemplo, del interior de la tierra a los espacios intergalácticos–; sin embargo, para una escala espacial de distancias intergalácticas, como la que utiliza el “principio cosmológico” podemos considerarlo estadísticamente homogéneo. Nuestra imagen bidimensional de universo no es pues una superficie esférica lisa, sino rugosa, como la de la piel de una naranja. Resultará ser, de todas maneras, un **universo ilimitado pero finito** (sin fronteras pero con volumen medible). Así lo describía Einstein en sus “Meditaciones Cosmológicas” de 1916, y en esa concepción einsteniana se basan los actuales modelos cosmológicos.

Einstein en 1916 hubo de introducir en el primer miembro de su ecuación un término artificial de la forma $-\Lambda g_{\mu\nu}$, y ajustar su “constante cosmológica” Λ , para obtener como solución un universo estacionario, según se suponía entonces. Más tarde Alexander A. Friedmann estudió soluciones de la ecuación de Einstein, sin el término artificial, que correspondían a un universo en expansión (1922). Georges Lemaître confirmó las soluciones de Friedmann, y demostró que la solución de Einstein con el término cosmológico era ciertamente estacionaria, pero inestable: una pequeña perturbación obligaría al universo a expandirse o contraerse indefinidamente (1927). Años más tarde Einstein mismo denominará la introducción de ese término: “la mayor torpeza de mi vida”.

Consecuencia de las ecuaciones de Einstein es el “colapso gravitacional”. Si en una zona del espacio se concentra una enorme cantidad de masa o energía, la curvatura allí producida puede ser tan grande que se llegue a formar un **agujero negro**, es decir, un sumidero que absorbe gravitacionalmente toda materia que se le acerque, y aun toda luz (de ahí que resulte negro). Con ello irá aumentando la densidad todavía más, y si ésta sobrepasa cierto límite crítico, como consecuencia inevitable de la ecuación de Einstein, se producirá el “colapso”, es decir, la densidad y la curvatura resultarán estrictamente infinitas en aquel punto, lo que resulta físicamente inconcebible. Este estudio teórico tiene gran interés cosmológico, aplicado al estado primordial o final del universo.¹¹

5.13 Física cuántica del átomo, del núcleo y de las partículas

El tercer cuadro teórico de la cosmología es **la física cuántica: atómica** y subatómica. La primera nace con el modelo atómico de Niels Bohr en 1913. Cuantificando la acción de las órbitas de los electrones en torno al núcleo, Bohr daba cuenta de los espectros atómicos, es decir, de las rayas características de la luz emitida o absorbida por cada átomo, que habían sido pacientemente estudiadas por los espectroscopistas (por ejemplo, para el átomo de hidrógeno las rayas de la “serie de Balmer” H_{α} , H_{β} , H_{γ} ...). Estos espectros nos permiten conocer la composición atómica del universo, analizando la luz recibida de estrellas y galaxias mediante telescopios (o las ondas hercianas recibidas de ellas, mediante radiotelescopios). Así fue descubierta la gran abundancia de hidrógeno (aproximadamente un 75% de la materia atómica), seguida de la del helio (25%), y mucho después por el litio (una parte por cada millardo). La comparación de esos espectros astronómicos con los de nuestros laboratorios nos permite además

¹¹ En el big-crunch, o etapa final de una posible (aunque improbable desde 1998) contracción del universo, éste se comportaría globalmente como un gran agujero negro; y el big-bang no es sino la imagen temporalmente invertida de ese mismo proceso.

conocer propiedades físicas de los astros, como su movimiento relativo de acercamiento o alejamiento a la tierra.¹²

La **física cuántica nuclear** comienza a desarrollarse en los años treinta. Ella nos da cuenta de los diversos tipos de radiactividad propia de algunos núcleos atómicos, y las posibles transmutaciones de unos núcleos en otros. Descubre en ellos dos nuevos tipos de fuerza (nuclear fuerte y nuclear débil) y una variedad de partículas subatómicas: las constituyentes del núcleo o “nucleones” (el protón p y el neutrón n), y las curiosamente “creadas” en el momento de salir de él (el electrón e^- y el neutrino $\bar{\nu}$ de la radioactividad β). Llega a descubrir los fenómenos de fisión y de fusión nuclear, y con ello puede imaginar los posibles procesos de “nucleosíntesis” o producción de los núcleos de los diversos elementos a partir de simples núcleos de hidrógeno (protones).

Los rayos cósmicos en los años treinta-cuarenta, y los aceleradores en los años cincuenta-sesenta descubren toda una fauna de **partículas elementales**, subatómicas. Unas pocas son de la familia del electrón (electrón e^- , muón μ^- , y tauón τ^- , con sus correspondientes neutrinos $\bar{\nu}_e, \bar{\nu}_\mu, \bar{\nu}_\tau$), y se llaman “**leptones**”, por tener “corta” masa. Otras muchas son de la familia de los nucleones, y se denominan “hadrones”, o capaces de interactuar con fuerza nuclear “fuerte”. Llegan a identificarse centenares de hadrones. En los aceleradores resulta evidente que tales partículas “se crean”, o sea, se producen a partir de energía, en concreto de la energía cinética de las partículas aceleradas. Pero se crean siempre en parejas partícula-antipartícula, acabando por “aniquilarse” en forma de energía las antipartículas, al encontrarse con partículas de nuestro mundo.

A mitad de los años sesenta, la clasificación de esos centenares de hadrones sugirió que todos ellos estaban compuestos de unas pocas (entonces sólo tres) sub-partículas, llamadas “**quarks**” (el quark “up” u, el “down” d y el “strange” o extraño s). A lo largo de los años setenta-noventa se descubrieron tres quarks más (el “charmed” o encantado c, el “boton” o “beauty” b, y el “top” o “truth” t). Según el actual “modelo estándar de partículas elementales”, todo el universo imaginable estaría formado por esas tres de parejas de quarks, que se asocian a las tres parejas de leptones, formando las **tres familias** siguientes:

Subpartículas del universo

Familia	1 ^a	2 ^a	3 ^a
Leptones	$e^-, \bar{\nu}_e$	$\mu^-, \bar{\nu}_\mu$	$\tau^-, \bar{\nu}_\tau$
Quarks	u, d	s, c	b, t

Nuestro universo ordinario está constituido por las cuatro subpartículas de la primera familia –con sus anti-subpartículas– (por ejemplo, la “fórmula química” del protón es “uud” y la del neutrón “udd”).

Los leptones interactúan con interacción electromagnética y nuclear débil, y sólo los quarks interactúan además con interacción nuclear fuerte. Unos y otros interactúan también con interacción gravitacional, pero dada la

¹² Efectivamente, un corrimiento global de las rayas espectrales hacia el violeta o hacia el rojo –un aparente aumento o disminución de su frecuencia– indica un acercamiento o alejamiento de la fuente luminosa. Análogamente a como percibimos el pitido de una locomotora más agudo cuando se acerca y más grave cuando se aleja de nosotros (efecto Doppler).

pequeñez de sus masas ésta resulta imperceptible. La **teoría cuántica de campos** –siguiendo el modelo de la “electrodinámica cuántica”, que explica las interacciones electromagnéticas por el intercambio de fotones “virtuales”– ha ido elaborando teorías para los otros tres tipos de interacción entre las partículas elementales, mediante el intercambio de “bosones intermediarios” apropiados. Para la interacción nuclear fuerte, la teoría se llama “cromodinámica cuántica” –por introducir una compleja magnitud cuántica denominada “color”–, y requiere ocho bosones intermediarios de diferentes “colores”. La interacción nuclear débil se trata hoy conjuntamente con la electromagnética en una “teoría electrodébil” que requiere, además del fotón γ otros tres bosones intermediarios, W^+ , W^- , Z^0 , que fueron detectados en 1983. Más problemáticos son aún los intentos de elaborar una teoría cuántica para el campo gravitacional y su compatibilidad con la relatividad general; el eventual bosón intermediario ha sido llamado gravitón.

Ciertas “**teorías de gran unificación**” y de “super-simetría” intentan unificar esas interacciones, para situaciones de gran densidad de masa-energía, como las que parecen haberse dado en los primeros estadios del universo. De ahí el interés de los físicos de partículas por el big-bang, como “laboratorio” de sus modelos de unificación. Las indicamos también en la tabla siguiente, junto con las teorías cuánticas y los bosones intermediarios antes mencionados:

Teorías cuánticas entre las partículas elementales

Interacción	Bosones intermediarios	Teoría cuántica	Intentos de unificación	
Fuerte	8 gluones	Cromodinámica	Teorías de gran unificación (GUTs) ¹³	Supersimetrías (Susys) ¹⁴
Electromagnética	γ	Electrodébil		
Débil	W^+ , W^- , Z^0			
Gravitacional	Gravitón (?)	Campo gravitacional		

5.2 La contrastación empírica del modelo del big-bang

Ese conjunto teórico es contrastado empíricamente por tres coherentes “hechos cósmicos”. El primero de ellos es la **expansión del universo**, descubierta por Edwin P. Hubble al final de los años veinte. Propiamente Hubble, analizando los espectros luminosos de todo un conjunto de galaxias, descubrió que las rayas espectrales de la mayor parte de ellas estaban corridas hacia el rojo respecto a las de nuestros átomos terrestres. Pronto se llegó así a establecer que

¹³ Se basan en un gran grupo de simetrías, que incluye los de la cromodinámica y la teoría electrodébil. Su confirmación experimental resulta hoy decepcionante. Predicen una ligerísima inestabilidad del protón, estimando su vida media en 10^{30} años, ¡muy superior a la edad del universo (unos 10^{10} años a partir del “big-bang”)! Pero delicadas experiencias pueden controlar, por ejemplo, la desintegración espontánea de un protón por año en una masa de 10^{30} protones (de las ya realizadas resulta que, si el protón es inestable, su vida media es 100 ó 1000 veces mayor de la predicha).

¹⁴ Tienen aún menor base experimental y mayor enredo conceptual: eliminan la distinción entre fermión y bosón, pues cada fermión tiene asociado en el mismo supermultiplete un doble que es bosón y viceversa. Para estas “Susys” se habían elaborado ciertas teorías de “Tecnicolor”, hoy abandonadas.

—si se hacían las correcciones correspondientes a nuestros movimientos locales— resultaban estarlo las de todas las galaxias, y para cada una el corrimiento hacia el rojo era proporcional a su distancia.¹⁵ Así que Hubble mismo interpretó sus observaciones como una estricta proporcionalidad entre la velocidad de alejamiento de las galaxias y su distancia a nosotros. Y obtuvo un primer valor de la constante de proporcionalidad, hoy llamada constante de Hubble (y estimada en unos 70 Km/s de velocidad por cada Megaparsec de distancia).

Si las velocidades son proporcionales a las distancias, todas esas galaxias han tardado lo mismo en salir de un centro común. Ese tiempo de la expansión, que suele llamarse “edad del universo”, resulta inmediatamente de la constante de Hubble, y según las observaciones actuales se estima en quince o veinte millardos de años ($18 \pm 3 \cdot 10^9$ años).

Para una concepción clásica del espacio-tiempo, eso parecería sugerir un cierto modelo tolomaico de universo, en el que nosotros ocupamos el centro, ya que las demás galaxias se alejan de la nuestra en todas direcciones. Pero en una concepción einsteniana del espacio curvo, se interpreta fácilmente como una expansión, en la que todas las galaxias se alejan igualmente de todas ellas, porque el espacio mismo, conservando su masa-energía, aumenta su volumen y disminuye a la vez su curvatura. Es semejante, en tres dimensiones, a lo que pasa cuando un niño infla un globo de goma que tenga pegadas pequeñas etiquetas: todas ellas se apartarán unas de otras, al aumentar la superficie del globo por aumentar su radio. Esta concepción del mundo recibió un fuerte apoyo teórico con la relatividad general. Ya hemos indicado que Einstein (1916) había introducido en sus ecuaciones un término cosmológico artificial para obtener un universo estacionario como entonces se imaginaba, y que Friedmann (1922) y Lemaître (1927), sin ese término, habían obtenido soluciones en las que la curvatura disminuye en el tiempo. Muy pronto se relacionaron con las observaciones de Hubble, y así nació la idea del big-bang, de momento “frío”, puramente geométrico-relativista.

El segundo “hecho cósmico” es el de la **nucleosíntesis primordial**. Conocida espectralmente la abundancia relativa de elementos (75% H, 25% He, 10^{-10} Li...), físicos nucleares propusieron en los años cuarenta mecanismos de nucleosíntesis, o formación de los núcleos de esos elementos a partir del simple protón o núcleo de hidrógeno. Se sabía bien que el sol realiza esa fusión de núcleos de hidrógeno en helio (“helio” en griego significa sol). Pero resulta inconcebible que ese 25% de helio en el universo provenga de esa fusión nuclear en estrellas aisladas. Se requería una nucleosíntesis primordial del helio y otros elementos ligeros mucho más abundante, realizada en todo el universo, durante un estado inicial muy denso y muy caliente (de millardos de grados). Así nació la idea del big-bang “caliente”.

George Gamow y su colaborador Ralph A. Alpher estudiaban en 1948 cómo sería la radiación térmica correspondiente a ese estado inicial,¹⁶ tras la enorme expansión ulteriormente sufrida por el universo hasta nuestros días

¹⁵ Para estimar distancias galácticas se requiere hacer ciertas hipótesis teóricas, como las del periodo de pulsación de las estrellas cefeidas.

¹⁶ La radiación acompañaría la heliosíntesis a los tres minutos del big-bang, pero se desacoplaría de la materia atómica centenares de millones de años más tarde.

(durante decenas de millardos de años). Esa expansión habría enfriado enormemente la radiación, que debería permanecer en nuestros días como radiación térmica de unos 5 grados Kelvin de temperatura (5 °K; recordemos que el cero absoluto corresponde a unos 273.15 grados centígrados bajo cero). Ese “fósil” de la radiación térmica inicial debería aparecer por todo el universo, como radiación electromagnética con una distribución de frecuencias dada por la curva espectral de Planck, correspondiente a ondas hercianas milimétricas.

El tercer hecho es la **radiación de fondo cósmica**. La historia de su descubrimiento comienza con un episodio tecnológico, aparentemente desconectado y perturbador. En 1965 Arno Penzias y Robert Wilson, técnicos de la casa Bell-Telephone-Telegraph, descubren un ligero ruido de fondo que perturbaba su telefonía inalámbrica. El ruido resultaba inevitable, y parecía debido a una misteriosa radiación electromagnética, que parece idéntica en todas partes y corresponde a microondas de pocos milímetros de longitud.

La historia continúa a muy corta distancia geográfica y cronológica. En la Universidad de Princeton, R.H. Dicke y sus colaboradores —P. Peebles, P. Roll y D. Wilkinson—estaban investigando la radiación fósil predicha veinte años antes por Gamow. Inmediatamente interpretaron como tal la radiación descubierta por Penzias y Wilson, y mediante medidas precisas de su curva espectral determinaron la temperatura correspondiente de 2.7° K, que resultaba siempre la misma independientemente de la dirección de procedencia. Esta radiación de fondo se consideró un argumento sólido de la cosmología del big-bang caliente. Pero su total isotropía, que representaba fosilizada la total homogeneidad del universo en un estadio inicial de centenares de millones de años, presentaba dificultades para explicar el origen de las galaxias.

Este tercer “hecho cósmico” ha sido puntualizado recientemente con la sonda espacial COBE (COsmic Background Explorer), que va equipada con sofisticados detectores de microondas, capaces de analizar la radiación de fondo cósmica proveniente de seis mil zonas angulares del universo extragaláctico. En 1992 nos sorprendió con un primer “mapa cósmico”, en el que se apreciaban amplias zonas angulares en las que la temperatura correspondiente a la radiación de fondo era unas pocas millonésimas de grado más elevada que en el resto. Tales anisotropías se interpretan como el reflejo fosilizado de estructuras iniciales del universo, que permitirían explicar la formación de galaxias, estrellas, planetas, vida y ¡vida humana!

5.3 Efemérides del universo, según el modelo del big-bang

Cabe reconstruir las etapas del universo, bajo las hipótesis del big-bang (la solución dada por Friedmann-Lemaître a la ecuación de Einstein, junto con la homogeneidad e isotropía impuesta por los espacios de Robertson-Walker). La reconstrucción se basa sobre la física de altas energías, para las enormes temperaturas (T , en grados Kelvin °K o centígrados °C, indistinguibles para esos valores) correspondiente a los primeros estadios del universo (tiempo t , medido a partir del big-bang). Distinguiremos claramente lo que es conjetura teórica para la primera centésima de segundo ($t \leq 10^{-2}$ s), y lo que tiene mayor corroboración empírica, basada en experiencias con grandes aceleradores, para los estadios sucesivos ($t \geq 10^{-2}$ s).

Descripción teórico-conjetural¹⁷

$$\begin{array}{l} t \leq t_{\text{pl}} \approx 10^{-43} \text{ s} \\ T \geq 10^{32} \text{ }^\circ\text{K} \end{array}$$

Para antes del tiempo de Planck,¹⁸ no tenemos formalismo físico. El espacio-tiempo de la relatividad general no tiene sentido; sólo cabe imaginar fluctuación cuántica, y unificación de fuerzas supersimétrica. Comienza **era dominada por la radiación**, expansión lenta ($R \propto t^{1/2}$).

$$\begin{array}{l} t = 10^{-35} \text{ s} \\ T \approx 10^{28} \text{ }^\circ\text{K} \end{array}$$

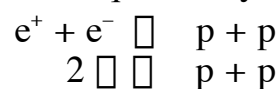
Tamaño 6 cm, densidad 10^{75} g/cm^3 (la del núcleo es 10^{15} g/cm^3). **“Sopa”:** quarks-antiquarks, leptones-antileptones, bosones GUT. Exceso enigmático de partículas sobre antipartículas (1 por millardo). La gravedad desacoplada. Comienza “inflación” (de 10^{-35} a 10^{-32} s).

$$\begin{array}{l} t = 10^{-13} \text{ s} \\ T \approx 10^{16} \text{ }^\circ\text{K} \end{array}$$

Tamaño menor que nuestra órbita terrestre, densidad de 10^{27} g/cm^3 . **Unificación electrodébil:** Interacción fuerte desacoplada.

$$\begin{array}{l} t = 10^{-6} \text{ s} \\ T \approx 10^{13} \text{ }^\circ\text{K} \end{array}$$

Formación de nucleones-antinucleones (por combinación de quarks) tan abundantes como leptones-antileptones y fotones, pues la energía permitía procesos de equilibrio “químico” y termodinámico del tipo:



Al disminuir energía, esos procesos sólo son posibles hacia la izquierda: **Aparición de nucleones libres** en proporción reducida (exceso 10^{-9}), por aniquilación de antinucleones = Concluye la era hadrónica.

¹⁷ La mayor parte de los datos siguientes están tomados del “Álbum de fotos” de la conferencia audiovisual de divulgación *El “Big Bang”*, preparada por el Dr. Josep Antoni Grífols, catedrático en el Departamento de Física Teórica de la UAB. Le agradezco vivamente una copia del CD-R que contiene toda una colección de tales conferencias.

¹⁸ El “tiempo de Planck” se define como la raíz cuadrada, de la constante gravitacional de Newton puesta en unidades de tiempo al cuadrado, o sea:

$$t_{\text{pl}} \equiv \sqrt{G\hbar/c^5} = 0.5 \cdot 10^{-43} \text{ s.}$$

Descripciones con base empírica

$$\begin{array}{l} t = 10^{-2} \text{ s} \\ T \approx 10^{11} \text{ }^\circ\text{K} \end{array}$$

Desacoplo de los neutrinos: permanecen con interacción muy débil.
Densidad: $4 \cdot 10^9 \text{ g/cm}^3$

$$\begin{array}{l} t = 1 \text{ s} \\ T \approx 10^{10} \text{ }^\circ\text{K} \end{array}$$

Aparición de electrones libres en proporción reducida (exceso 10^{-9}), por aniquilación de los positrones: $e^+ + e^- \rightarrow 2\gamma$.
Este exceso ha de ser idéntico al de los protones, para que el universo sea eléctricamente neutro.
La “sopa cósmica”, de densidad $4 \cdot 10^5 \text{ g/cm}^3$, está ahora formada por protones, neutrones, electrones y fotones.

$$\begin{array}{l} t = 3 \text{ min} \\ T \approx 10^9 \text{ }^\circ\text{K} \end{array}$$

Formación de núcleos = Nucleosíntesis primordial: de D, He³, He⁴, Li, por fusión de H, sin que los destruya la radiación.
Obtención de un 25% de He, en unos 13 min.

$$\begin{array}{l} t = 3 \cdot 10^5 \text{ años} \\ T \approx 10^4 \text{ }^\circ\text{K} \end{array}$$

Formación de átomos = “Recombinación” del hidrógeno atómico. Universo eléctricamente neutro, “transparente”, de unos 10^7 años luz.
Era dominada por la materia (densidad de materia > de radiación), en la que se acelera el ritmo de expansión (de $R\mu t^{1/2}$ pasa a $R\mu t^{2/3}$).
Desacoplo de la radiación de fondo.

$$\begin{array}{l} t = 10^9 \text{ años} \\ T \approx 10^2 \text{ }^\circ\text{C} \end{array}$$

Formación de protogalaxias, a partir de fluctuaciones de densidad. Nubes de gas hidrógeno se condensan en **estrellas** (2.5 a $5 \cdot 10^9$ años), que producen por fusión nuclear los **elementos de la vida** C, N, O, ..., y se forman **sistemas planetarios** como el nuestro ($8 \cdot 10^9$ años).

5.4 Reflexiones filosóficas: el principio antrópico

Este modelo cosmológico estándar suscita cuestiones científicas, que no podemos desarrollar aquí.¹⁹ Pero suscita también cuestiones filosóficas, sobre algunas de las cuales, a modo de ejemplo, quisiera reflexionar aquí.

Para mí, la primera cuestión filosófica que aquí se plantea es la leibniziana: **¿por qué existe algo** en vez de nada? La moderna idea del big-bang, como auto-producción de espacio y tiempo, parece disimular la magnitud de ese algo. Mas por otra parte, las altas temperaturas primordiales del big-bang “caliente”, cuyo fósil seguimos presenciando en la radiación de fondo, pone de manifiesto esa grandiosa “substancialidad” energética, que aparece de repente en el big-bang, sin muchas esperanzas de explicación científica.

Próxima a esta cuestión está la de **la contingencia cósmica**, que no habría de confundirse con su temporalidad, por más que ésta resulte utilísima para introducir didácticamente aquella. En realidad lo importante es la contingencia. Y a mi juicio, dado que la cosmología —con su multiplicidad de cuadros teóricos y su escasez de “hechos cósmicos”— no es más que una extrapolación de ciencia, la duración finita del universo, que el modelo estándar fija en unos quince a veinte millardos de años, no podemos imponerla como resultado científico definitivo, sino a lo más una extrapolación científica seria. Hemos de considerar también que otros científicos como Fred Hoyle o Stephen W. Hawking (¿quizás movidos por prejuicios científicistas!) son capaces de inventar otros modelos cosmológicos en que la temporalidad del mundo se niega, o no tiene sentido.²⁰

Podemos evidenciar lo problemático de esa **temporalidad del cosmos** desde otro punto de vista: el de la extrapolación de nuestras leyes y conceptos físicos al nivel cósmico. Preguntémonos, por ejemplo: ¿Qué movimiento periódico regular podemos imaginar como unidad de tiempo antes de que existan sistemas planetarios y aun estructuras atómicas? ¿Cómo podemos justificar a esta escala cósmica nuestro concepto de tiempo físico uniforme? E.A. Milne, un buen cosmólogo y pensador razonable, describe en un artículo científico un mismo modelo expansivo como a dos columnas, con dos escalas diferentes de tiempo: la

¹⁹ De entre esos problemas científicos, mencionemos en esta nota los dos siguientes.

1. ¿Es eliminable la discontinuidad inicial del big bang? Según ya indicamos al hablar del colapso gravitacional, en pura relatividad general, no es eliminable. El teorema de Penrose de 1965 demostró rigurosamente que, aplicando las ecuaciones de Einstein a un agujero negro que ha superado el límite crítico de densidad, resulta inevitable que densidades y curvaturas se hagan estrictamente infinitas. Lo mismo ocurre al aplicar esas ecuaciones al big-bang primordial o a su simétrico temporal, el big-crunch final. Es justamente para evitar tales situaciones que escapan a la física, que el científicista **Stephen W. Hawking** elaboró su teoría cuántico-relativista —tan bella como gratuita— para la que, según él mismo ha divulgado, “los agujeros negros no son tan negros”, ya que emiten una radiación cuántica (la llamada “radiación de Hawking”). Elaboró así un modelo de “universo oscilante”, a través de big-bangs y big-crunchs cuánticos. El mismo Hawking ha elaborado todavía otro modelo en el que debe utilizarse un “tiempo imaginario”, para el que no tiene sentido hablar de inicio y fin, sino que el tiempo, como el espacio einsteniano, resulta ilimitado pero finito. Véase HAWKING 1988, especialmente cap. 7.

2. ¿Cómo se explica la homogeneidad global del universo, dado que no existe un horizonte desde el que pueda dominarse globalmente, sin violar el “principio de causalidad” relativista? Este problema es teóricamente resuelto con la idea de “**inflación**”. Se postula un universal campo escalar, que resuelve el problema, y produce en un estadio inicial del universo un breve periodo de “expansión inflacionaria”, o más acelerada.

²⁰ Sobre el papel secundario de esa temporalidad finita, véase RUSSELL *et al.* 1993, p. 293.

de nuestro tiempo ordinario (t_1) y la de un tiempo (t_2), definido por el logaritmo de ese tiempo ordinario. Según la primera escala, el universo resulta temporal, con un origen ($t_1 = 0$) hace 15 ó 20 millardos de años. Para la segunda escala el universo tiene una duración infinita ($t_2 = \log 0 = -\infty$). No es un juego matemático, sino una forma concreta de mostrar la dificultad que supone extrapolar a nivel cósmico nuestros conceptos cotidianos.

Otra manera de reflexionar sobre la contingencia cósmica, es pensar en la **evolución futura del cosmos**. Ella depende críticamente de la densidad media actual del universo. Pues, la solución de las ecuaciones relativistas del modelo estándar, para valores de esta densidad media inferiores a un cierto valor crítico, es un universo en expansión indefinida hacia estadios más y más fríos y vacíos. Y para valores superiores al crítico, la expansión, tras alcanzar un límite, se transforma en un proceso de compresión, y acaba en un ardiente “**big crunch**”, o “gran implosión” –temporalmente inversa del big-bang–. Las estimaciones experimentales dan un valor de esa densidad media muy próximo al crítico y con amplios márgenes de error; o sea que no permiten decidir la alternativa. Pero ciertos estudios recientes (1998) basados en observación de galaxias muy lejanas –es decir, muy antiguas, pues su luz tarda mucho en llegarnos– parecen favorecer **la expansión indefinida y la exclusión del big-crunch**. Nos amenaza, pues, una muerte global por congelación, dentro de decenas de millardos de años. Pensando a nuestra escala local del sistema solar, conocemos perfectamente el proceso evolutivo de una estrella ordinaria como el sol y sabemos que, dentro de unos 5 millardos de años, experimentará una enorme dilatación y llegará a englutir en la ardiente masa solar los planetas próximos a él como la tierra. Para esos futuros remotos nuestras condiciones de vida son, pues, muy contingentes.

Relacionando el modelo cosmológico estándar con la ulterior evolución de la vida y del hombre, los cosmólogos mismos han planteado un discutidísimo “**principio antrópico**” (o relativo a la aparición del hombre, “ánthropos”).²¹ Ese proceso evolutivo global, desde los estadios de radiación y leptones-quarks primordiales hasta las estructuras orgánicas complejísimas del cerebro humano, exige entre otras cosas un enorme desarrollo de endebles estructuras químicas, y para ello una etapa favorable de larguísima duración temporal. Que ésta se dé, depende críticamente de ciertas **constantes cosmológicas** (como la relación entre las masas de los leptones y los quarks, o entre las intensidades de los diversos tipos de interacción fundamental). Rehaciendo los cálculos del modelo estándar, es posible comprobar que, si esas constantes se varían ligerísimamente, el proceso que conduce a la complejidad de nuestros organismos, es totalmente inconcebible. Suele decirse que esas constantes están “muy bien afinadas”, tienen “una sintonización muy fina” (“a very fine tuning”). La “versión débil” del principio antrópico, exige que observemos constantes cosmológicas que permitan el hecho innegable de la existencia de observadores. Pero la “versión fuerte” es más atrevida: ¿Están esas constantes “fijadas para” que la evolución hacia seres humanos, inteligentes y libres, resulte necesaria? ¿Cabe hablar hoy de un argumento teleológico (¿de finalidad?, ¿de diseño?) de la existencia de Dios?

²¹ Sobre el principio cosmológico antrópico, véase: el texto clásico BARROW & TIPLER 1986, y los más recientes GRIBBIN & REES 1991, ELLIS 1993, DELSEMME 1944 y REES 2000. BALASHOV 1991 es una bibliografía exhaustiva de lo publicado hasta su tiempo.

Veamos cómo formulan John Barrow y Frank Tipler ambas versiones, débil y fuerte, en su obra ya clásica:²²

BARROW Y TIPLER, sobre WAP (1986)

Principio Antrópico Débil (WAP [W de “Weak” = Débil]): Los valores observados de todas las cantidades físicas y cosmológicas no son igualmente probables, sino que toman valores restringidos por la exigencia de que existan emplazamientos donde pueda desarrollarse vida basada-en-carbono y por la exigencia de que el universo sea suficientemente viejo para que ya haya sido desarrollada. ...

La exigencia de que haya pasado suficiente tiempo para que la expansión cósmica se haya enfriado después del big-bang cuanto se requiere para permitir la existencia de carbono, asegura que el universo observable tiene que ser relativamente viejo, y por consiguiente –puesto que el límite del universo observable se expande a la velocidad de la luz– muy grande. Los núcleos de carbono, nitrógeno, oxígeno y fósforo de los que estamos hechos, son cocinados a partir de los núcleos ligeros primordiales de hidrógeno y helio mediante reacciones nucleares en el interior de las estrellas. Cuando una estrella se aproxima al fin de su vida, dispersa esos precursores de vida por todo el espacio. El tiempo requerido para que las estrellas produzcan de esta manera carbono y otros elementos bioactivos, es aproximadamente la vida media de una estrella sobre la “secuencia principal” de su evolución, dada por

$$t^* \approx \frac{G m_N^2}{h c} \frac{h}{m_N c^2} = 1.5 \cdot 10^8 \text{ años,}$$

donde G es la constante de gravitación newtoniana, c es la velocidad de la luz, h es la constante de Planck, y m_N es la masa del protón.²³ Así que, para que el universo contenga los sillares básicos de la vida, tiene que tener al menos la edad t^* , y por consiguiente –en virtud de su expansión– al menos la extensión ct^* (unos diez millardos de años luz). Nadie debería sorprenderse de que el universo sea tan grande como es. En uno que fuera notablemente menor, no podríamos existir.

Esta relación entre cuatro constantes fundamentales –que simbolizan la física newtoniana G , la relativista c , la cuántica h , y la nuclear m_N –, resulta un ejemplo didáctico de lo que podemos denominar una “**ligadura antrópica**”. Para divulgarla mejor, vamos a reescribirla, simplificando las fracciones y desarrollando y precisando el resultado:

²² Barrow & Tipler 1986, pp. 16-18 y 21-23.

²³ Corrijo pequeñas erratas de la fórmula original, que omite el exponente del término c^2 en el segundo denominador, y escribe el último término $\cdot 10^{10}$ años. La corrección es coherente con otra expresión de la misma fórmula, dada por el autor en la p. 246. Aquí indica la idea del cálculo: Basta dividir la energía que posee la estrella al formarse, en forma de combustible de fusión nuclear (básicamente hidrógeno fusionable en helio), por la energía producida mediante esa fusión que logra salir anualmente de la superficie de la estrella en forma de radiación (“luminosidad absoluta”). La vida media no depende de otros factores como el tamaño de la estrella, y vale aproximadamente $1.5 \cdot 10^8$ años. El autor escribe de esa manera la expresión, porque el primero de sus términos es el inverso de la constante gravitacional sin dimensiones (que vale $1.1 \cdot 10^{39}$), y el segundo el inverso de la masa del protón en las “unidades naturales” (en las que se toma $\hbar \equiv h/2\pi = c = 1$; su expresión vale $1.4 \cdot 10^{-31}$ años).

$$t^* \approx \frac{h^2}{G c m_N^3} = 149.000.000 \text{ años,}$$

Así depende de esas constantes básicas la vida media de una estrella ordinaria, que ha de transcurrir para que aparezcan en nuestro universo elementos como carbono, nitrógeno, oxígeno y fósforo, necesarios para iniciar el proceso de evolución biológica. Eso implica que si los físicos cuánticos que medían el pequeñísimo cuanto de acción h hubiesen encontrado un valor diez veces mayor, o los físicos nucleares para la gran masa m_N del proton un valor cinco veces menor, los seres humanos no podríamos existir todavía. Centenares de ligaduras de este tipo entre las constantes fundamentales, relacionadas en gran parte con nuestro complejo proceso de evolución biológica, son las que hacen admirarse ante “la sintonización muy fina” de las constantes cosmológicas.

Pero veamos ya cómo formulan la versión fuerte, con sus diversas variantes (teleológica, cuánticas participativa y de muchos mundos, y final):

BARROW Y TIPLER, sobre SAP (1986)

...[Brandon] Carter introdujo el más especulativo Principio Antrópico Fuerte ...; formulamos su SAP como sigue:

Principio Antrópico Fuerte (SAP [S de “Strong” = Fuerte]): El universo tiene que tener aquellas propiedades que permitan que la vida se desarrolle en él dentro de alguna etapa de su historia.

Una implicación del SAP es que las constantes y leyes de la naturaleza tienen que ser tales que la vida pueda existir. Esta afirmación especulativa lleva a varias interpretaciones muy distintas de naturaleza radical: en primer lugar, la más obvia es continuar en la tradición del clásico argumento de diseño, y proclamar que:

(A) *Existe un posible universo “diseñado” con el objetivo de generar y mantener “observadores”.*

Esta concepción hubiera sido defendida por los teólogos naturales de los pasados siglos ... Más recientemente ha sido tomada en serio por científicos que incluyen al químico de Harvard Lawrence Henderson y al astrofísico inglés Fred Hoyle, por lo impresionados que estaban con la serie de “coincidencias” que existen entre valores numéricos concretos de constantes adimensionales de la naturaleza sin los cuales quedaría excluido todo tipo de vida. ...

Eso es todo lo que hemos de decir ahora sobre la versión “teleológica” del SAP. Sin embargo, la inclusión de la física cuántica en el SAP, produce interpretaciones muy diferentes. [John A.] Wheeler ha acuñado el título “Principio Antrópico Participativo (PAP) para una segunda interpretación posible del SAP:

(B) *Los observadores son necesarios para hacer que exista el universo.*

Esta afirmación recuerda de alguna manera el punto de vista del obispo Berkeley ... Está íntimamente relacionada con otra posibilidad:

(C) *Es necesario un conjunto de otros universos distintos, para la existencia de nuestro universo. ...*

Supóngase que, por ciertas razones desconocidas, el SAP es verdad y que la vida inteligente tiene que venir a la existencia en cierta etapa de la historia del universo. Pero si desaparece en nuestra etapa de desarrollo, mucho antes de haber ejercido una influencia no-cuántica detectable en el universo en su conjunto, es difícil de ver por qué *tiene que haber venido* a la existencia en primer lugar. Esto motiva la siguiente generalización del SAP:

Principio Antrópico Final (FAP): El procesamiento-de-información inteligente tiene que venir a la existencia en el universo, y una vez venido, nunca se extinguirá.

Tal discusión filosófico-científica del “principio antrópico” ciertamente repugna a una concepción actual de las ciencias, que pretende liberarlas metodológicamente de toda reflexión finalística y trascendente. Pero, como veremos en el §9.4, desde un punto de vista teológico cabe muy bien hablar de un profundo “**Principio Antrópico Cristiano**” (CAP). Él puede incluso dar una respuesta teológica a la cuestión metafísica leibniziana.