

Capítulo 1

EL MODELO ESTÁNDAR DE LA COSMOLOGÍA MODERNA

por Hjalmar Alexis De Greiff Acevedo¹ y Sergio Torres Arsayuz

En el buen tiempo viejo, un señor trabajaba un año en un escritorio, haciendo cálculos, y luego enviaba un telegrama a un observatorio: “Dirijan el telescopio a la posición tal y verán un planeta desconocido”. Los planetas eran muy corteses y tomaban lugar donde se les indicaba, como en un ballet bien organizado. Hoy las partículas elementales aparecen de súbito y como por escotillón, haciendo piruetas. La física de antaño tenía algo minué y de fiesta de salón con música de Mozart, mientras que ahora parece una feria de diversiones, con salas de espejos, laberintos de sorpresas, tiro al blanco y hombres que pregonan fenómenos. Los físicos viejos, escandalizados, prohíben a los pequeños que concurren a semejantes diversiones. Y la astronomía, que era una recatada niña de su hogar, laboriosa y modesta, le ha salido ahora un hermano menor que ensucia la casa, convierte el altillo en polvorín, hace preguntas insoportables e inventa cuentos descabellados.
Ernesto Sábato, en *Física escandalosa, Uno y el universo*.

1.1 Introducción

En este capítulo nos ocuparemos de los principales problemas de la cosmología contemporánea siguiendo, en donde consideramos pertinente, un hilo conductor histórico. Nuestra intención es proporcionar una idea general de lo que significa entender el universo como un sistema en evolución, con un pasado, un presente y un futuro. Un universo con una suerte de historia, en suma. Estas páginas son pues una invitación para estudiar esa apasionante historia, esa construcción intelectual humana que llamamos la cosmología moderna. Un modelo de una elegancia y belleza parangonable a la compleja mitología griega, aunque sus criterios de validación epistemológica, social e histórica guardan enormes diferencias con todos los anteriores intentos por responder a la omnipresente pregunta, ¿qué es todo esto que nos rodea que llamamos mundo?

¹El autor desea agradecer a COLCIENCIAS por la beca que le ha permitido también escribir el presente texto. Igualmente expresa su agradecimiento al Istituto di Fisica Generale Applicata de la Universidad de Milán por su hospitalidad durante la escritura de este texto.

1.2 El marco experimental y teórico de la cosmología moderna

Empecemos por revisar cuáles son los instrumentos materiales y conceptuales que se utilizan en cosmología. Desde el punto de vista experimental, el desarrollo de la espectroscopía tuvo un profundo impacto. Sin ella habría sido virtualmente imposible pensar en indagar por la constitución de los cuerpos celestes, incluidos nuestros vecinos más cercanos, los planetas. Tanto es así que, en 1840, antes de que inventaran las técnicas espectrográficas, el padre del positivismo y gran admirador de la física, Augusto Comte sostenía que: “en cuanto a aquellas innumerables estrellas esparcidas en el cielo, ellas tienen un escaso interés para la astronomía exceptuando su papel como puntos de referencia en nuestras observaciones... nosotros no podremos nunca, por ningún medio, investigar su composición química o su estructura mineral” (citado por Kragh, 1996: 4; traducción nuestra).

Sin embargo, hacia la mitad del siglo diecinueve se desarrolló la espectroscopía no sólo para el estudio de la química terrestre, sino que también que se adaptó para ser usada en telescopios y así investigar la composición química estelar y planetaria; nacería así una nueva rama de la astronomía, la astrofísica. Hasta ese momento, el trabajo de los astrónomos estaba concentrado en el desarrollo de complicadas técnicas de cálculo, basadas en la física newtoniana, aplicadas a la astronomía de posición y cruciales para la navegación. Podemos entonces afirmar que mientras que la cosmología como actividad especulativa sea quizá tan antigua como la más antigua de las civilizaciones, la cosmología experimental es muy reciente. Su nacimiento se puede prácticamente fechar en el año 1912, cuando el norteamericano Vesto Slipher detectó el corrimiento hacia el rojo en líneas del espectro de la luz proveniente de galaxias lejanas. Debemos sin embargo precisar el significado del término “experimental” cuando se habla de cosmología. Ciertamente no es posible, como lo hace el químico, ir a un laboratorio a repetir el experimento de la formación del universo, o someter una estrella a las condiciones controladas del laboratorio. Más bien lo que hace el astrónomo es observar el experimento del universo que ya está hecho. La razón por la cual este procedimiento tiene “validez” científica es muy sencillo, y consiste en que las cuatro interacciones en la naturaleza actúan de igual forma independientemente del lugar en el universo donde se encuentra. Esto quiere decir, por ejemplo, que un átomo de hidrógeno siempre absorbe y emite fotones de la misma frecuencia independientemente de si se encuentra en mi escritorio, en la casa del vecino, en otro planeta o en otra galaxia. Este hecho nos permite estudiar objetos lejanos sin tener que recrearlos en el laboratorio. Para sintetizar podríamos decir que la cosmología es una ciencia “observacional”.

Un ejemplo de efectos físicos observados en el laboratorio que pueden ser usados para estudiar objetos astronómicos lo constituye precisamente el espectro de la luz. La luz que pasa a través de un prisma o una rejilla de difracción se descompone en las diferentes frecuencias (colores) que la forman. Newton había establecido que la luz blanca se descompone en los colores del arco iris (aunque sobre la base de un modelo corpuscular de la luz). En 1814 el alemán Joseph Fraunhofer (1787 - 1826) observó que el espectro de la luz solar exhibía unas líneas oscuras a determinadas frecuencias siempre fijas. Hoy sabemos que este efecto es producido por la cuantización de los niveles de energía en los átomos. Cada elemento químico de la tabla periódica presenta un conjunto característico de frecuencias en su espectro, que sirve como huella para identificarlo. La existencia del elemento helio, por ejemplo, fue establecida de esta forma por primera vez en el Sol. De manera análoga, por medio del análisis espectral de la luz proveniente de galaxias, se pudo demostrar que la materia que constituye el universo es un 75 % hidrógeno y un 25 % helio, con la presencia de pequeñísimos porcentajes de elementos más pesados como los que se encuentran en los planetas. El origen del hidrógeno y del helio es cosmológico, es decir, éstos se formaron en épocas muy tempranas del universo. Este hidrógeno y helio constituyen la materia prima a partir de la cual se formaron

1.2. EL MARCO EXPERIMENTAL Y TEÓRICO DE LA COSMOLOGÍA MODERNA¹³

más adelante las galaxias y las estrellas. El calcio en nuestros huesos y el hierro en nuestra sangre se formaron en estrellas pesadas que al final de su vida explotaron en una supernova dispersando estos elementos pesados por una gran región del espacio.

Casi simultáneamente a la invención de la espectroscopía, en 1859, Charles Darwin publicaría en Londres *El origen de las especies*. Este libro cambiaría radicalmente la concepción del hombre occidental de la naturaleza. Su influencia sobre la astronomía, y lo que más tarde se llamaría la astrofísica, fue profunda e indeleble: la proposición implícita que mencionamos en la introducción acerca de que el universo ha evolucionado es la extensión cosmológica del paradigma darwiniano. El que el lector de este capítulo no se haya siquiera sobresaltado con tal afirmación es una demostración de cuán imbuídos estamos en esa visión del mundo. Hace tan sólo 150 años, dicha proposición habría sido arduamente contestada. Sin embargo, a partir de la segunda mitad del siglo diecinueve se mirará a un universo donde los planetas, así como las estrellas están en constante evolución. No sólo eso, sino que el paralelo con los fenómenos biológicos hará que se hable del “nacimiento” y “muerte” de planetas y estrellas. Con el advenimiento de los modelos cosmológicos, se empezará a hablar también del origen del universo y, también, de su eventual muerte. Sin embargo, tales modelos cosmológicos no empezaron a ser propuestos sino hasta las primeras décadas del siglo veinte. La razón no es muy difícil de vislumbrar, si pensamos que el programa newtoniano no permitía hacer conjetura alguna sobre el origen del universo. Para Newton, y con él los astrónomos y filósofos naturales de los siglos dieciocho y gran parte del diecinueve, la génesis era un (no-) problema teológico: Dios creó el mundo con sus correspondientes leyes naturales, el papel de la ciencia es estudiar el plan divino fijado por las condiciones iniciales que se traducen en las leyes de Newton, no tratar de urgar en el proceso de creación mismo². Con el impulso dado a la física por el positivismo, esta concepción vendría a ser sustituida por un nuevo tipo de preguntas y conjeturas respecto al pasado del universo. Dentro del nuevo paradigma, el estudio del universo sería incorporado a la historia natural. Y fue así como, un joven de origen judío, inspirado en los problemas de la coordinación de las medidas de tiempo en boga debido a su importancia durante el proceso de globalización de fines del siglo diecinueve, que obligaba a generar sistemas de sincronización (por ejemplo para las ferrovías), no tardaría en proponer una teoría que pondría en crisis a la cosmología newtoniana. Estamos hablando de las últimas dos décadas del siglo XIX y la primera del XX, años en que se vivía un ambiente general de cuestionamiento a los principios filosóficos sobre el espacio y el tiempo (los trabajos de Ernst Mach, sobre todo) no sólo en matemáticas, sino en el arte, la arquitectura y las ciencias sociales. Ese joven se llamaba Albert Einstein³.

En lo que sigue quisiéramos dar una idea general de las principales características de este nuevo sistema en los aspectos más relevantes para la cosmología contemporánea. En 1905, Einstein publicó un trabajo en el que investigaba las profundas consecuencias que tenía suponer que la velocidad de la luz, y no el tiempo, es la única constante universal en los fenómenos cinemáticos (que involucran desplazamientos espaciales); es decir, asumir que, independientemente del marco de referencia en el que uno se encuentre, el resultado de medir la velocidad de la luz es siempre el mismo. La consecuencia más sobresaliente fue encontrar que las mediciones del tiempo y del espacio no son absolutas, sino que dependen del estado de movimiento de quien mide (“observador”). Este sorprendente fenómeno involucra que las mediciones de tiempo y espacio están inexorablemente conectadas.

²Esta fue de hecho una de las más duras críticas de Newton contra la cosmología cartesiana.

³Sobre los orígenes de la relatividad se han escrito innumerables libros. Sin embargo, sigue un tema de discusión sobre lo cual sólo hay consenso en que la historia estándar acerca del papel decisivo de los experimentos de Michelson-Morley es falsa, por cuanto Einstein no les dio el peso atribuido más tarde por su exégetas (ver por ejemplo, Sánchez-Ron, 1983). De otro lado, Peter Galison, físico e historiador de la ciencia de la Universidad de Harvard, está trabajando en un libro de próxima publicación acerca de la génesis de la relatividad y la expansión de las comunicaciones al final del siglo pasado (comunicación personal)



Figura 1.1: Ernst Mach (1838-1916)

Mientras en la física newtoniana un cambio de un marco de referencia a otro implica solamente una transformación de las coordenadas espaciales (transformaciones de Galileo), y el tiempo permanece como una coordenada independiente y universal, en la teoría de la relatividad este último debe tratarse como otra variable susceptible a transformarse de forma similar a las tres coordenadas espaciales. Se habla entonces del espacio-tiempo. Así, por ejemplo, una barra que mide un metro según un observador quieto respecto a la misma, medirá menos de un metro para otro que se está moviendo con respecto al primero. Pero no sólo esto, el lapso de tiempo entre dos eventos, por ejemplo la emisión y recepción de un rayo de luz, tiene una duración distinta para observadores en sistemas inerciales diferentes. A éstas se les llaman transformaciones de Einstein y la nueva teoría es la relatividad (en el sentido que las mediciones son relativas al estado de movimiento del marco de referencia). No menos anti-intuitivo es lo que se obtiene cuando se aplican las nuevas reglas de transformación del espacio-tiempo a la mecánica, es decir al estudio de las interacciones entre cuerpos. No sólo las leyes de Newton se ven afectadas dramáticamente por las transformaciones de Einstein, sino que los mismos conceptos de masa (m) y energía (E) cambian; surge una nueva relación entre ambas que se resume en la famosa fórmula $E = mc^2$, donde c^2 es la velocidad de la luz al cuadrado. Como la velocidad de la luz es una constante en la teoría de la relatividad, la nueva ecuación dice que la masa de un cuerpo es directamente proporcional a su energía. Más aún, siendo la velocidad de la luz una cantidad muy grande (300 000 km/s) inclusive el más pequeño cuerpo posee un gran potencial para producir trabajo (que es justamente la definición de energía). Los primeros trabajos de Einstein de 1905 se restringieron al caso especial de marcos de referencia a velocidades constantes, o inerciales, es decir, no tienen aceleración. Pero no tardaría en buscar en generalizar su teoría a sistemas acelerados. Entre 1915 y 1917, publicaría varios trabajos sobre una teoría de la relatividad general, o teoría del espacio-tiempo y la materia. Este último elemento es clave, ya que los cuerpos masivos interactúan gravitacionalmente produciendo aceleraciones. Recordemos que Newton había encontrado que la ley por la cual un cuerpo cae en la Tierra es la

1.2. EL MARCO EXPERIMENTAL Y TEÓRICO DE LA COSMOLOGÍA MODERNA¹⁵

misma por la cual la Luna gira alrededor de la Tierra en órbitas elípticas. Luego, siguiendo esta cadena de pensamiento, la teoría de la relatividad daría un salto crucial para no sólo concentrarse en estudiar fenómenos de los laboratorios. La teoría de la relatividad general podría competir con la teoría newtoniana para hablar de los objetos celestes y su dinámica. En los 60 años subsiguientes a 1915, la astronomía sufriría una revolución tan dramática como la producida por Copérnico más de tres siglos antes⁴.

Hemos dicho que la relatividad general es el estudio de el espacio-tiempo y la materia. Esta afirmación hay que examinarla con cuidado. No significa que el nuevo programa simplemente investiga el comportamiento de los cuerpos en el espacio-tiempo. De hecho en eso consiste el programa newtoniano, desarrollado en forma matemática, entre otros, por el francés Pierre Laplace (por lo que también se conoce como programa laplaciano). La teoría de la relatividad va aún más allá; se trata de estudiar cómo es la interacción no sólo de cuerpos masivos entre sí, sino de estos cuerpos con la estructura del espacio tiempo, con su geometría. De acuerdo con la relatividad general, la distribución de la materia determina la geometría del espacio-tiempo. Se dice pues que un cuerpo “deforma” el espacio cercano a él, lo curva. La gravedad de tal conclusión es que tiene consecuencias empíricas, es decir observables. En 1916, Einstein predijo que un rayo de luz que pasara cerca a una estrella muy masiva sería desviado, y calculó en cuántos grados se defectaría el rayo como consecuencia de la curvatura del espacio alrededor de la estrella⁵.



Figura 1.2: Sir Arthur Stanley Eddington (1882-1944)

En 1919, el astrónomo británico Arthur Eddington, coordina una expedición para hacer las observaciones correspondientes durante un eclipse de Sol (condición necesaria para el “experimento”). Los resultados de Eddington, profundo convencido de la relatividad, serían considerados como la

⁴Es importante recalcar esta neta diferencia de tiempos en los períodos de estabilización de cada una de estas teorías, lo que, contrario a lo que dice Thomas Kuhn, arroja serias dudas acerca de las semejanzas historico-sociológicas entre ambas “revoluciones”. Ver T. Kuhn (1980)

⁵En realidad había sugerido la existencia de este fenómeno en 1911, pero sin usar argumentos relativistas.

mayor prueba esgrimida a favor de las teorías einsteinianas. La geometría, y por consiguiente la dinámica local de los cuerpos celestes, es afectada por la presencia de materia. A partir de ese año, Einstein entraría a las páginas de periódicos y revistas, convirtiéndose en poquísimos tiempo en el símbolo del siglo veinte de la figura del científico⁶. El salto cualitativamente revolucionario del trabajo de Einstein consistió no sólo en la reconceptualización de nociones como espacio y tiempo, firmemente arraigadas en la cultura occidental sobre todo después de Emmanuel Kant. El poder de la teoría de la relatividad general es tal que permite, por primera vez, hacer especulaciones sobre la estructura del universo no sólo a nivel local, sino global, y por consiguiente trata de responder a una pregunta que antes carecía por completo incluso de sentido: ¿Podemos determinar cuál ha sido la “historia” del universo desde un punto de vista científico? En otras palabras, ¿es posible reconstruir el pasado del universo de modo que podamos, a partir de un número reducido de postulados, entender cuál ha sido la evolución de ese sistema que llamamos universo? ¿Tiene un origen el universo o ha sido siempre similar a sí mismo? ¿Cuál es la distribución de materia del universo? ¿Cuál es su composición? ¿Cuántos tipos de materia hay en el universo? Estas son las preguntas que trata de responder un campo que nació como disciplina científica a raíz de la institucionalización de la relatividad general, y que llamamos cosmología.

1.3 De Einstein a Hubble: la expansión universal

La base de la teoría general de la relatividad es la así llamada “ecuación de campo de Einstein”. Dicha formulación matemática establece una equivalencia entre la geometría del espacio-tiempo y la distribución de materia, es decir su masa y, a su turno, su energía (dada la fórmula famosa de la relatividad especial). Sobre esta ecuación y su interpretación reposa la cosmología del siglo veinte (y de lo que va del veintiuno). Permitamos mostrar en forma esquemática la forma de la ecuación. Sin preocuparnos demasiado por el momento en el tipo de cantidades que hay a cada lado de la igualdad (que de hecho son unas estructuras matemáticas llamadas “tensores”), podemos describir la ecuación de Einstein de la siguiente manera:

$$G = T. \tag{1.1}$$

A la izquierda tenemos un término (G) que depende exclusivamente de las propiedades geométricas dentro del cual se propaga la materia (o campos)⁷. A mano derecha, el término T depende tan solo de la distribución o densidad energética de la materia (o campos). El problema de la cosmología es reproducir la dinámica del sistema, conocer su estructura geométrica espacio-temporal (o topología), y desvelar la composición de la materia (campos) que lo integra. Más allá, si se logra establecer la correspondencia entre estas tres cuestiones, y llegar a predicciones en principio observacionalmente verificables (o refutables), los cosmólogos piensan que se habrá dado un paso importante en la pregunta acerca de dónde venimos. La ecuación (1.1) es una ecuación general, que requiere ser solucionada, de igual manera en que lo es, por ejemplo, la ley de la gravitación universal de Newton $F = GMm/r^2$. Luego, la ecuación de Einstein admite diferentes soluciones dependiendo de las condiciones particulares del sistema bajo estudio. Dicho de otro modo, hay muchos tipos posibles de universo que respetan la ecuación (1.1). El problema de los cosmólogos es encontrar el que más se parezca al nuestro. No obstante, una peculiaridad de la ecuación, es que

⁶Einstein recibiría el Premio Nobel de Física en 1921, pero no por estos trabajos, sino por explicar, con base en la teoría de los cuantos de Max Planck, el así llamado “efecto fotoeléctrico”. Para un interesante estudio sobre la percepción de la prensa sobre Einstein, ver Crelinsten (1980).

⁷Desde el siglo pasado, los físicos, en su afán por unificar su conocimiento de la naturaleza, han tratado de buscar un lenguaje (matemático) común para describir todos los fenómenos. Por esta razón, la materia viene descrita por “campos”, conceptualmente no muy distintos al campo electromagnético (aunque sus propiedades sean radicalmente distintas).

prácticamente todas sus posibles soluciones implican un universo en expansión, o en contracción. Eso quiere decir que, bajo cualquier condición de distribución energética de la materia, la distancia entre dos puntos del espacio-tiempo tenderá a aumentar o a disminuir conforme pasa el tiempo.

Vale la pena hacer una advertencia. No es que el universo se expanda dentro de un espacio dado. La pregunta ¿dónde está contenido el universo? no es lícita en este contexto. Es la expansión misma del espacio a la que nos referimos cuando hablamos de expansión universal. Irónicamente, el resultado de un universo en permanente expansión (o contracción) reñía profundamente con las convicciones filosóficas de Einstein. Para conciliar el modelo y su visión del mundo, Einstein introdujo un nuevo término a la ecuación, la así llamada “constante cosmológica”. Este recurso matemático le permitiría prevenir la expansión, pero presentaba una desventaja: esta era una solución *ad hoc* para obtener el tipo de universo deseado. Se trataba de un ajuste del modelo a los designios de preferencias filosóficas. Este truco no es en general bien recibido por los físicos, aunque en ausencia de otros candidatos, no objetan demasiado. Einstein justificó esta movida aduciendo que en algún tiempo futuro el significado e identidad de la constante cosmológica sería entendido. De una cosa estaba convencido y era que la constante era de carácter geométrico, de modo que la asignó al correspondiente lado de la ecuación. La “nueva ecuación de Einstein” quedaría entonces expresada de la siguiente manera:

$$G + \Lambda = T, \tag{1.2}$$

donde Λ es la constante cosmológica. La particularidad interesante de esta nueva formulación es que, para cierto valor de Λ , llamado $\Lambda_{Einstein}$, las distancias relativas entre objetos permanece constante, aparte obviamente de los movimientos locales provocados por la gravitación (como el movimiento de la Tierra alrededor del Sol). En consecuencia, el universo de Einstein es un universo estático (aunque fuertemente inestable, es decir con tendencia a precipitarse en un estado de expansión o contracción). Naturalmente, no sería esta la única propuesta. Aunque la cosmología siguió siendo un campo marginal hasta no bien entrados los años 1950s, cuando la relatividad entraría a hacer parte de los currículos en los departamentos de física (antes era parte de los cursos de matemática), durante los años 1920s y 30s algunos astrónomos y físicos atraídos por lo que la mayoría de los astrónomos consideraba excéntricas especulaciones teóricas (palabra que en la época tenía una connotación marcadamente negativa entre los físicos) propusieron otras alternativas.

Aparecieron así los modelos de Eddington, de de Sitter y de Friedmann-Lemaitre, para citar los más conocidos. De acuerdo con su dinámica, ellos se clasificaron geoméricamente en: planos, en el caso de universos en eterna pero lenta expansión, si respetan la geometría clásica de Euclides; abiertos, si como en el caso anterior se expanden pero esta vez de forma mucho más rápida y dando origen a una geometría no-euclidiana; y cerrados, si después de una etapa de expansión su densidad energética en forma de grandes campos gravitacionales los obligaba a volverse a contraer en un gran colapso universal, en cuyo caso son también curvos, pero a diferencia de los abiertos no son hiperbólicos sino más bien “convexos” (OJO referimos al lector la sección 12.4 del presente volumen). Otros más propusieron universos oscilatorios, es decir que pasaban por etapas de contracción y expansión de forma alterna.

La ecuación (1.2) admite, en principio, cualquiera de estas soluciones. Pero, ¿cuál es el “verdadero” universo? La imagen del universo actual surgió en el contexto de una discusión interesante: comenzando los años veintes nuestro universo visible se limitaba a la Vía Láctea. No obstante, algunas nebulosas sobre ese fondo estrellado habían permitido plantear una hipótesis sugestiva: ¿Todo el universo estaría conformado por ese conglomerado de estrellas (con un ancho de aproximadamente 100 000 años luz) o quizá, una nebulosa como M31 (situada en la constelación de Andrómeda) sea



Figura 1.3: Izquierda: Willem de Sitter (1872-1934). Centro: Alexander Friedmann (1888-1925). Derecha: George Henri Lemaitre (1894-1966)

otro conglomerado de estrellas y esté muy lejos de nuestra Vía Láctea? ¿Estaría el universo constituido de islas estelares (galaxias en el lenguaje actual)? Entre estas preguntas de fondo, una muy específica revolucionaría la astronomía: ¿A qué distancia está situada verdaderamente M31? ¿Hace parte de la Vía Láctea? A finales de 1923, el astrónomo estadounidense Edwin Hubble, teniendo acceso al más poderoso telescopio del mundo en ese momento (el reflector de 100 pulgadas de Monte Wilson), descubre en uno de los brazos espirales de M31 una variable cefeida (ver sección ??, pág. ??); calcula el período de variación de la luminosidad y encuentra la distancia a la que se encuentra. Su primer cálculo arrojó una distancia algo menor a 1 000 000 de años luz (hoy sabemos que esta distancia es aproximadamente el doble del valor estimado por Hubble). Considerando que a la Vía Láctea se le estimaba un tamaño aproximado de 100 000 años luz, definitivamente la “nebulosa” de Andrómeda no pertenecía a nuestra galaxia. La hipótesis acerca de un universo constituido por islas estelares comenzaba a imponerse. Hubble en 1929 ya había calculado las distancias a varias galaxias y estudiado también los espectros de las mismas. La técnica empleada usaba un efecto que permite calcular la velocidad a la cual viaja un objeto que emite una señal en forma de onda, tal como un rayo de luz, o un sonido. La frecuencia de la luz que sale de una estrella en movimiento aparece aumentada o disminuida ante el observador, según si la estrella se acerca o se aleja, respectivamente. El corrimiento de la frecuencia, o efecto Doppler, es proporcional a la velocidad relativa entre emisor y fuente, por lo tanto puede ser usado para medir la velocidad de un objeto remoto. Este principio fue utilizado por Slipher, y más tarde por Hubble, para medir la velocidad de galaxias lejanas. Las observaciones del corrimiento hacia el rojo comenzaron a dar las primeras indicaciones sobre la expansión del universo. Observando galaxias en todas las direcciones, Hubble en 1929, pudo probar que las galaxias se están alejando de nosotros con una velocidad proporcional a la distancia. Cuanto más alejada se encuentra una galaxia, mayor será su velocidad (como se puede ver en la figura 1.4).

Matemáticamente esto significa que la ley de Hubble es una relación lineal de la forma:

$$d = HV, \quad (1.3)$$

donde d es la distancia, V la velocidad y H la constante de Hubble (pendiente de la recta). El

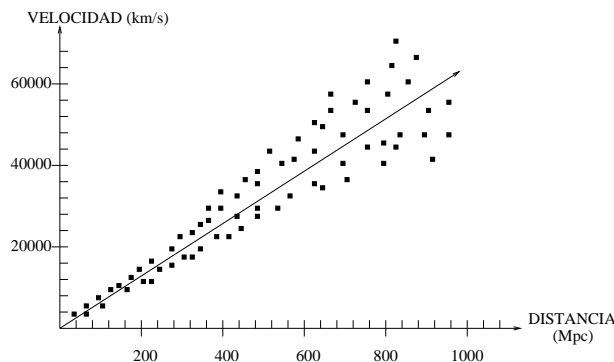


Figura 1.4: Velocidad con que se aleja una galaxia en función de su distancia al observador. La pendiente de la recta es la constante de Hubble $H = 65 \text{ km/s/Mpc}$

trabajo de Hubble tiene, y tuvo, consecuencias fundamentales para la cosmología moderna. Primero, obligaba a desechar la constante cosmológica, o al menos con el valor tan especial asignado por Einstein para frenar la expansión, dado que la evidencia parecía mostrar que el universo no era estático, y que dicha dinámica no era producto de fuerzas locales, sino que era un fenómeno global. Segundo, si todos los puntos del universo se alejan uno del otro, es fácil extrapolar hacia el pasado y darse cuenta de que todos los puntos se acercan, de tal forma que cuando nos devolvemos miles de millones de años nos encontramos con todas las galaxias concentradas en un mismo punto. Además, la edad del universo se puede estimar de dicha ley, ya que es inverso proporcional de la constante de Hubble (como puede fácilmente verificar el lector).

1.4 El Big Bang y los primeros segundos del universo

Varios de los modelos cosmológicos de los años 1920s predecían el corrimiento hacia el rojo, pero fue a fines de los años 40s e inicios de los 50s que el físico ruso George Gamow y sus colegas norteamericanos Ralph Alpher y Robert Herman propusieron el modelo del Big Bang mientras trabajaban en el problema de explicar la existencia en el universo de hidrógeno y helio en la proporción observada (75 % y 25 % respectivamente). Que la mayoría de las galaxias, independientemente de la dirección hacia la cual observamos, estén constituidas por los mismos elementos primordiales en las mismas proporciones, indica que se formaron a partir de un gas común de origen cosmológico. Partiendo de la ya conocida expansión del universo, el grupo de Gamow estudió la posibilidad de formar todo el helio existente en el universo por medio de un mecanismo de fusión nuclear, posible gracias a las altas temperaturas que ha debido tener el universo en sus épocas más tempranas. Para explicar las condiciones existentes durante los primeros segundos y minutos del universo, se hace necesario conocer la naturaleza de las partículas elementales y sus interacciones.

En un universo en expansión, la temperatura necesariamente se hace más alta a medida que nos acercamos al origen. Esto es así porque, tal como sucede con un gas, al disminuir el volumen aumenta la presión, y la temperatura. A temperaturas mayores a los mil millones de grados Kelvin ($\text{Kelvin} = ^\circ\text{C} + 273.15$), los protones y neutrones existentes no se pueden ligar para formar núcleos, porque los choques entre las partículas, que resultarían a estas temperaturas, inmediatamente romperían cualquier núcleo que se llegara a formar. El universo se va enfriando a medida que se expande; es preciso esperar que pasen los primeros tres minutos para que la temperatura



Figura 1.5: George Anthony Gamow (1904-1968)

baje a niveles que permitan la formación de núcleos de deuterio y de helio. Los cálculos de “nucleosíntesis” del helio y otros elementos livianos, que aparecen en muy pequeñas proporciones en el universo primigenio, están de acuerdo con las cifras observadas experimentalmente. De acuerdo con las estimativas actuales, el universo se originó hace aproximadamente 15 mil millones de años. La imagen de su origen es la de un colosal evento en el cual el espacio comenzó a expandirse rápidamente a partir de un punto infinitamente denso de energía. No sobra insistir: no fue este singular evento una gran explosión, como los fuegos artificiales brotando sus luces quemadas en un espacio “afuera” que estaba listo a recibirlas. Más bien fue el espacio mismo a quien le dio por hincharse como una torta en el horno por acción de la levadura. Después de la explosión el universo pasó por varias fases de rapidísimos y dramáticos cambios en la composición de la materia. Durante los primeros segundos la temperatura era tan alta que no permitía la formación de núcleos atómicos, lo único que existía era una sopa de partículas elementales y luz, mucha luz. La radiación era la componente dominante en el universo recién nacido. No había estrellas, ni galaxias, ni planetas. Conforme pasó el tiempo, el espacio siguió en expansión mientras que la temperatura continuó disminuyendo dejando un difuso trasfondo de estática de radio que flota en todo punto del espacio. Pequeñas perturbaciones en la distribución de la materia lograron más adelante, amplificadas por la fuerza gravitacional, formar los sistemas astronómicos que observamos hoy tales como las galaxias, las estrellas y los planetas. En forma muy simple y compacta, esta es la teoría cosmológica que goza de mayor sustento experimental, la cosmología del Big Bang.

1.5 La radiación cósmica de fondo

Veamos ahora los aspectos teóricos y observacionales de esa antigua radiación que testimonia el origen caliente del universo. Comencemos con la teoría. Una importante predicción que se desprende de este mecanismo de formación del helio en el universo es la existencia de una “radiación de fondo”. Acompañando a los protones y neutrones en ese gas a alta temperatura que era el universo recién formado, existían fotones (luz) en equilibrio térmico. La temperatura de esta radiación es la misma

del gas de partículas hasta el momento en el que la radiación y la materia ya no pueden interactuar; es decir cuando el medio se vuelve transparente a la luz. Esto ocurre aproximadamente a los 700 mil años de edad del universo, cuando la temperatura era de unos 4000 K. A partir de este momento toda la radiación existente comienza a propagarse libremente en el universo. Esta radiación se conoce con el nombre de radiación cósmica de fondo (RCF). En 1948 aparece un artículo de Herman y Alpher en la revista *Nature* con la predicción de la RCF con una temperatura actual calculada en 5 Kelvin. Este valor tan pequeño se debe a que, al expandirse el universo, la temperatura de la RCF debe disminuir en igual proporción. La teoría también predice los atributos de la RCF. Debido a que la radiación de fondo se desprendió de un gas en equilibrio térmico ésta debe tener la distribución espectral característica de los cuerpos en equilibrio termodinámico. Tal radiación fue estudiada por el físico alemán Max Planck (1858 - 1938) quien explicó en el año 1900 la forma de su espectro, mediante el principio de cuantización de la energía. Según Planck, el espectro de la radiación emitida por un cuerpo en equilibrio térmico tiene una distribución en frecuencias caracterizada únicamente por un parámetro: su temperatura. Los físicos identifican este tipo de radiación con el nombre de “radiación de cuerpo negro”. En síntesis, la RCF debe manifestarse como radiación de cuerpo negro con una temperatura aproximada de 3 Kelvin. Otra importante característica de la RCF debe ser la aparición de pequeñas variaciones dependiendo de la dirección de observación. Deben existir algunas regiones con temperatura ligeramente mayor y otras con temperatura algo menor que el valor promedio. La aparición de “anisotropías”⁸ en la RCF se debe a que antes de la época del desacople de la radiación y la materia, debieron desarrollarse en el plasma primordial pequeñas perturbaciones que dieron origen a las galaxias y cúmulos de galaxias. Como la radiación y la materia estaban en equilibrio térmico durante esa época, cualquier perturbación que pudiera aparecer en la materia debió propagarse también a la componente de radiación.

Pero, ¿ha sido observada y medida la RCF? En 1964, los radioastrónomos estadounidenses Arno Penzias y Robert Wilson, mientras hacían mediciones del ruido emitido por la atmósfera a frecuencias correspondientes a microondas, se dieron cuenta de que existía una componente residual de la señal de ruido en sus receptores que no dependía de la dirección a la cual apuntaban su antena. La intensidad de la señal de ruido detectada correspondía a una temperatura de 3 Kelvin.

Así fue como Penzias y Wilson, quienes recibieron el premio Nobel en 1978, con su hallazgo fortuito descubrieron la radiación cósmica de fondo. Las ondas recogidas por la antena de Penzias y Wilson son la señal más remota que nos viene del universo. Esta señal es la radiación electromagnética emitida por el plasma caliente que era el universo cuando éste tenía Solo 700 mil años de existencia. Por eso se dice que la radiación de fondo es una fotografía del universo primigenio. Veinticuatro años más tarde, los instrumentos a bordo del satélite COBE (Cosmic Background Explorer) de la NASA, del cual uno de los autores (Torres) fue miembro del grupo, demostraron que la RCF efectivamente es radiación de cuerpo negro a 2.7 Kelvin (figura 1.6) y descubrieron la presencia de anisotropías a un nivel de una parte en 100 mil (figura 1.7). Es decir, la temperatura de la RCF exhibe pequeñas desviaciones de su valor medio, tal como se espera del modelo de formación de galaxias y cúmulos por colapso gravitacional.

Los hallazgos del COBE fueron inmediatamente comprobados por un experimento de la Universidad de British Columbia (Canadá) usando un cohete, e independientemente por el experimento CMB de Tenerife, una colaboración Anglo-Española con base en el observatorio de Canarias (España). Más adelante surgieron tecnologías nuevas que han permitido hacer observaciones desde globos, multiplicando el número de mediciones precisas de la RCF. Con más de una docena de experimentos (tales como FIRS, TEN, MAX, PYTH, ARGO, OVRO, ATCA, MSAM, SASK, etc)

⁸La palabra isotropía significa igual en todas direcciones.

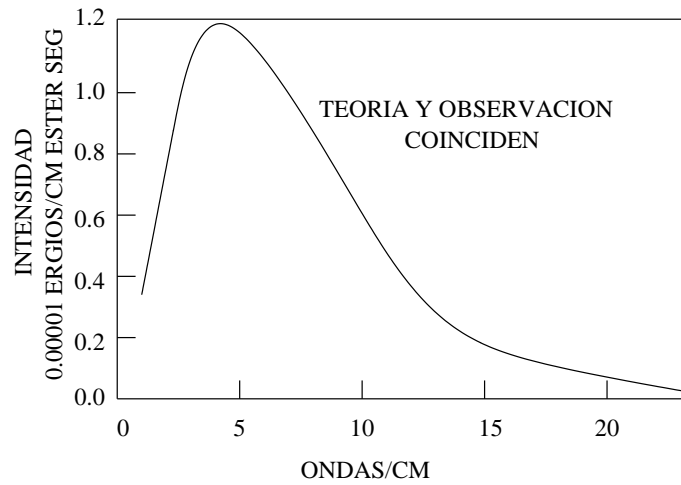


Figura 1.6: Curva planckiana de la RCF

generando datos precisos de la RCF, la cosmología experimental queda firmemente establecida. Se esperan avances significativos con los proyectos PLANK de la Agencia Espacial Europea y MAP de la NASA, los cuales planean poner en órbita plataformas satelitales con sofisticados instrumentos para medir las anisotropías de la RCF con una precisión sin precedentes.

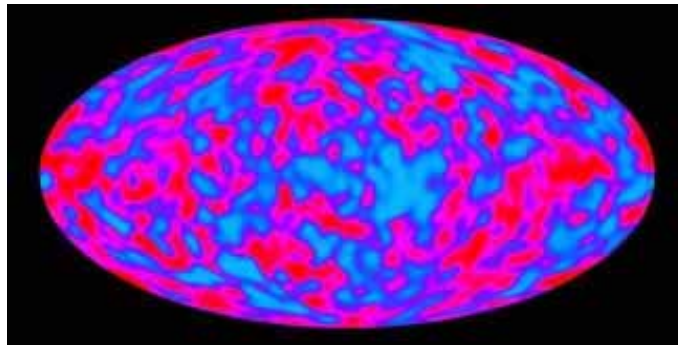


Figura 1.7: Las variaciones en tonalidad de las manchas indican la anisotropía de la RCF medida por el satélite COBE. Tales variaciones corresponden a pequeñas modificaciones de la temperatura (del orden de las diezmilésimas de un grado Kelvin) a la cual se encuentra la RCF, revelando las fluctuaciones cuánticas del vacío que dio origen al universo. La imagen registrada por el COBE es entonces una fotografía del universo primigenio

En un reciente episodio (abril, 2000) en el desarrollo de la cosmología experimental, un grupo de investigadores de la Universidad de Roma y del Instituto Tecnológico de California anunciaron la detección de oscilaciones acústicas en el plasma primordial, mediante precisas mediciones de la RCF usando su instrumento Boomerang (Observatorio de Radiación Extragaláctica Milimétrica y

Geomagnetismo), ver figura 1.8. En virtud de su estado elástico, la bola primordial de plasma denso y caliente soporta modos vibracionales que se propagan como ondas acústicas. A su vez, el efecto que estas ondas producen en el campo gravitacional se propaga a la componente de radiación y por lo tanto debe dejar una marca en la RCF. Es decir, una vez más, la teoría del Big Bang viene reforzada por haberse confirmado experimentalmente (o mejor, “observacionalmente”) la predicción de la existencia de ondas acústicas. Con la base de datos experimentales sobre el universo los cosmólogos se pueden dar el gusto de refinar y extender sus teorías para aproximarse progresivamente a una cosmología que abarca mayor número de fenómenos astrofísicos y un rango más extendido de épocas cosmológicas hasta llegar a la meta de explicar lo que ocurrió al tiempo cero, en lo cual el modelo inflacionario ha obtenido los mayores logros.

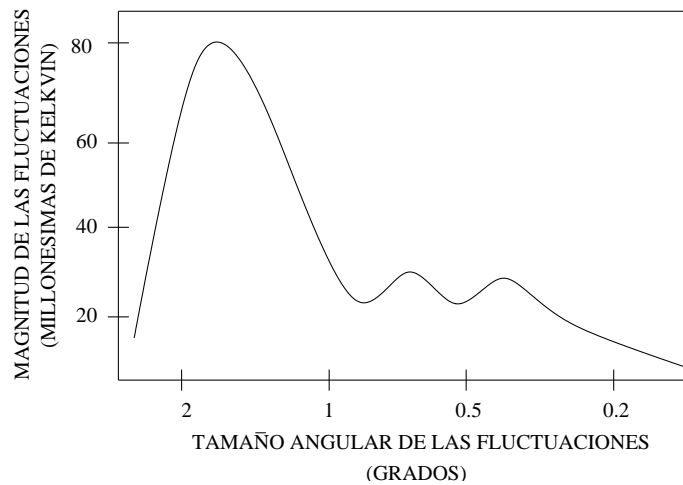


Figura 1.8: Ondas acústicas en el plasma primordial

1.6 La inflación como mecanismo para solucionar los problemas del Big Bang

Para recapitular, el éxito del modelo estándar de la cosmología, o “Modelo del Big Bang caliente”, se puede remitir a la explicación de las siguientes evidencias observacionales fundamentales:

1. la expansión universal (flujo de galaxias de Hubble);
2. la abundancia de elementos livianos (con una proporción de hidrógeno:helio:todos los otros elementos = 2500 : 450 : 8);
3. la RCF es isotrópica hasta por lo menos un orden en la diferencia de temperaturas de 10^{-5} , y su temperatura media es de 2.7 K;
4. el espectro de la RCF es la de un cuerpo negro;

5. la RCF tiene pequeñas anisotropías en su distribución angular;
6. el universo tuvo oscilaciones acústicas en sus etapas tempranas. Sin embargo, al modelo no le va tan bien con respecto a otros importantes resultados experimentales. En el vocabulario de los cosmólogos, a éstos se les suele llamar problemas de “suficiente Inflación”. En los próximos párrafos vamos a intentar hacer una breve introducción de estos problemas, para después pasar a la propuesta que se ha hecho para solucionarlos.

1.6.1 El problema de horizonte

Como hemos dicho, la energía de la RCF es prácticamente igual en todas las direcciones de la esfera celeste. Además, nuestras medidas de la edad del universo (o medidas de la constante H) implican que puntos alejados más que una distancia correspondiente a 0.8° (en distancia angular), medidos desde un punto fijo, no pudieron estar en contacto causal, ya que la luz no ha tenido suficiente tiempo para viajar más que una distancia equivalente a un arco subtendido por dicho ángulo. El problema es que, si las señales no se pueden propagar a una velocidad mayor que la de la luz, ¿cómo es entonces posible que la RCF sea isotrópica? En otras palabras, ¿cómo puede ser que, según las mediciones de la RCF, exista una correlación entre puntos separados distancias mayores a 0.8° ? Esquemáticamente el problema se puede ver en la figura 1.9.

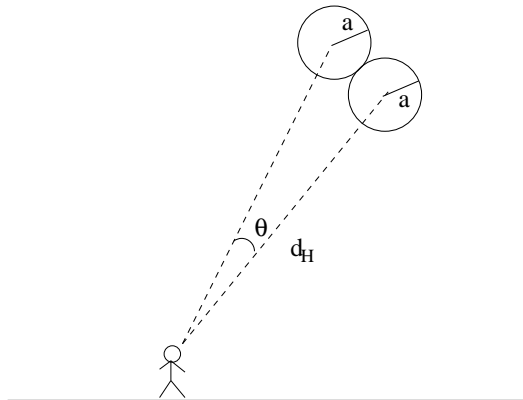


Figura 1.9: En el modelo estándar no inflacionario, dos puntos separados una distancia angular mayor a 0.8° no habrían estado en contacto causal, en tal caso sus temperaturas deberían ser diferentes. Sin embargo, la radiación cósmica de fondo es isotrópica.

No es difícil ver que la distancia máxima que puede viajar un rayo de luz, desde el momento del Big Bang hasta hoy, puede entenderse como el radio (a) de una esfera cuya superficie define el horizonte observable, más allá del cual no es posible tener información alguna.

Hay otra manera de ver el problema. Sabemos que, si no nos preocupamos demasiado por los defectos topológicos que pudiera haber debido a la curvatura del espacio (es decir, asumiendo un universo euclidiano), la distancia al horizonte, o radio del horizonte, se puede calcular como la

1.6. LA INFLACIÓN COMO MECANISMO PARA SOLUCIONAR LOS PROBLEMAS DEL BIG BANG²⁵

velocidad de la luz multiplicada por el tiempo transcurrido desde el Big Bang (edad del universo)⁹:

$$d_H = ct. \quad (1.4)$$

Del otro lado, existe una relación cuadrática entre el tiempo (edad del universo) y la función que mide cómo varía la distancia entre dos puntos en un universo en expansión, más conocida en el lenguaje cosmológico como el “factor de escala” $R(t)$. Luego,

$$R(t) \propto \sqrt{t}. \quad (1.5)$$

Las dos distancias se pueden ver en la figura 1.10.

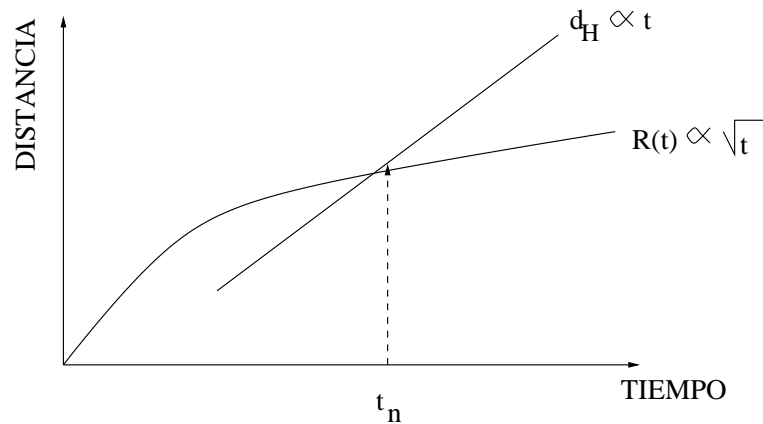


Figura 1.10: En algún momento t_n durante el universo primigenio el radio del horizonte es menor a la distancia entre dos puntos que, de acuerdo a la isotropía de la RCF, debieron estar en contacto casual

La relación lineal con el tiempo en el caso del radio del horizonte y no lineal para la distancia entre puntos implica que, si retrocedemos en el tiempo, habrá un momento en que las dos curvas se cruzan (t_n). Desde ese momento hacia atrás $R > d_H$ y, por consiguiente, esos puntos estaban causalmente desconectados (ninguna señal los pudo poner en contacto). La cuestión es que la temperatura de la RCF fue fijada antes de ese momento t_n , ¿cómo es entonces posible que hoy haya “coordinación” entre las temperaturas de los puntos a una distancia calibrada por el factor de escala R , si en el momento del desacople entre materia y radiación no estaban en contacto? La isotropía de la RCF pareciera indicar que los radios de horizonte son mayores de lo que nuestro modelo de Big Bang indica o, al menos, que los puntos que hoy están por dentro del horizonte lo estuvieron también en el momento del desacople, lo que habría permitido fijar de modo idéntico la temperatura de todos los puntos dentro de nuestro radio de observación. Éste es el “problema del horizonte”.

1.6.2 El problema de planitud

De nuevo, si tomamos las mediciones de la RCF podemos asignarle una temperatura al sistema universo de aproximadamente 2.7 K. Recordemos que a todo sistema en equilibrio térmico (y la

⁹Así, por ejemplo, podemos hacer un cálculo sencillo para hoy, sabiendo que $c = 3 \times 10^5$ km/s = 3×10^{10} cm/s y suponiendo que la edad del universo es aproximadamente 10^{18} segundos. Luego, nuestro radio del universo, o máxima distancia a la que podemos observar es $d_H \approx 10^{18} \times 10^{10}$ s.cm/s = 10^{28} cm.

distribución de la RCF parece respetar esta condición) es posible calcularle una cantidad llamada “entropía”, que mide varias cosas, por ejemplo, el grado de desorden de los objetos que lo componen, o la cantidad de información que podemos obtener del sistema. Para nuestros propósitos, no vamos a discutir el problema del significado de la noción de entropía del universo. En cambio, gracias a la rama de la física llamada termodinámica, sabemos que existe una relación matemática que nos permite relacionar la entropía de un sistema a temperatura conocida con su densidad de energía. Esta relación nos permite relacionar la entropía total del universo con su geometría, reemplazando T en la ecuación 13.1 por la función correspondiente en términos de la entropía. Pues bien, el problema es que a través de otras mediciones astronómicas todo parece indicar que vivimos en un universo plano. Por ejemplo, para citar la reciente medición hecha por Boomerang, la masa del universo corresponde a una densidad igual a 1.02 (con un error de sólo 0.05 unidades) veces la densidad crítica, la cual es la densidad correspondiente a un universo plano. Para que el valor de la entropía a partir de las medidas de la RCF sea compatible con tal observación, se requiere ajustar dicho valor a un número enorme, cercano a 10^{88} (!). ¿Qué justifica este valor tan grande en la entropía? Una anotación final. Dado que el valor de la entropía debe ser constante en el tiempo, éste debió haber sido fijado al comienzo de la expansión. Por esta razón a éste problema de planitud¹⁰ se le conoce también como el problema de condiciones iniciales.

1.6.3 El problema de los monopolos magnéticos

Mencionaremos brevemente este problema, sobre todo porque históricamente fue el primero que se propusieron quienes comenzaron a considerar seriamente alternativas para solucionar las anomalías del modelo del Big Bang. Henry Tye, de la Universidad de Cornell, estaba trabajando en problemas relacionados con teorías de gran unificación de partículas elementales y cosmología. Fue él quien convenció a un joven estudiante de post-doctorado en la misma universidad, Alan Guth, a investigar cuántos monopolos magnéticos se debieron haber producido durante el Big Bang. Guth no mostró mayor entusiasmo por el asunto. Según recordaría más tarde, durante esos años, sintió que “el universo era un problema miedosamente abierto, y muy diferente a lo que había trabajado anteriormente en física de partículas”¹¹. Los monopolos magnéticos son unas partículas cuya existencia es materia de debate entre los físicos dado que, al menos en algunos modelos, tienen un asiento tan válido como los protones o los electrones. Su función es la de ser transportadores del “quantum de magnetismo.” Así como existe un quantum de electricidad (el electrón), en principio podría existir una partícula que juegue el papel del electrón en los fenómenos magnéticos. Es decir que, en vez de tener como unidad del magnetismo un sistema con dos polos (norte y sur), podríamos tener sólo el norte, o sólo el sur (con líneas de campo no cerradas).

No sólo es un concepto difícil de imaginar, sino que además el grandísimo inconveniente es que nadie hasta el momento ha logrado detectar ninguno de estos entes¹². En forma reacia, Guth finalmente aceptó la propuesta, y los dos se pusieron a calcular el número de monopolos que debía haberse producido y, luego, cuántos debía haber dentro de cada radio del horizonte. La dificultad del problema provenía de las endeables bases sobre las cuales había que trabajar. Guth recuerda: “A

¹⁰En la literatura a éste se le llama también el problema de entropía. Por razones de espacio y de simplicidad no vamos entrar en los detalles de la formulación termodinámica. Para los interesados, (ver De Greiff & Tejeiro, 1995).

¹¹La anécdota es contada en la entrevista con Guth en Lightman y Brawer (p. 470; la traducción es nuestra). Sin embargo, vale la pena señalar que una historia del modelo inflacionario es aún un proyecto abierto para un eventual trabajo académico.

¹²A decir verdad, hace varios años, el sobresaliente físico experimental español, Blas Cabrera, reportó la detección de uno de estos objetos. Sin embargo, ante la imposibilidad de replicar el experimento, el resultado no ha gozado de mayor credibilidad.

mí la idea me sonó una locura. Yo nunca había trabajado en cosmología. Todos los problemas en los que había trabajado hasta ese momento habían sido claros, bien definidos y matemáticamente fundamentados. Éste era todo lo contrario¹³. La sorpresa sería mayor cuando encontraron que el número de monopolos magnéticos debía ser enorme. ¿Dónde estaban? De acuerdo con sus cálculos, ya se debían haber detectado en innumerables experimentos. Y sin embargo, nadie los había visto. El problema era entonces generar un mecanismo para explicar su baja densidad hoy.

1.6.4 La inflación como solución a los problemas

En el intento por diluir los monopolos se propuso, a inicios de la década de los 80s, el modelo inflacionario. Desde el punto de vista empírico, dicho modelo es compatible con todas las anteriores observaciones, teniendo la gran virtud de proporcionar una Solución plausible a los problemas del modelo estándar del Big Bang. Veamos en qué consiste, su relación con la física de partículas, y qué alternativa ofrece a los problemas planteados. Dijimos anteriormente que desde el punto de vista geométrico el universo podía ser abierto, plano o cerrado. Similarmente, desde el punto de vista energético, existen varios tipos de universos dependiendo de dónde se encuentra almacenada la energía (mano derecha de la ecuación (1.1)). Se habla entonces de “dominios del universo”. En la historia del universo se distinguen claramente dos tipos de dominios. Así pues, si la mayor parte de la energía del universo está concentrada en los campos gravitacionales, como es el caso de nuestro universo actual, se dice que existe “dominio de materia”. Este caso es distinto al de “dominio de radiación”, típico de las primeras etapas del universo en que la temperatura es todavía demasiado alta para permitir que se formen átomos estables, y desde luego elementos químicos u otro tipo de conglomeraciones. Lógicamente en este sistema la gravitación juega un papel menor, mientras que la energía cinética de las partículas que componen este “gas primordial” da cuenta de la altísima temperatura del universo. De hecho, el universo en esta etapa se comporta energéticamente como un gas de partículas que no interactúan entre sí, o “gas perfecto”. Es posible entonces asignarle una densidad de energía a partir de nuestros conocimientos termodinámicos de este tipo de sistemas gaseosos.

Resulta que los sistemas cuánticos admiten otro tipo de dominio, así llamado “dominio de vacío”. Contra toda intuición cotidiana, el “vacío” se presenta en el mundo subatómico como una posible fuente de energía. Si uno hace un promedio en el tiempo, la energía de un sistema “vacío” es cero, lo que nos permite definirlo, casi tautológicamente, como tal. Sin embargo, debido a las llamadas desigualdades de Heisenberg, o leyes de incertidumbre de la mecánica cuántica, en instantes muy breves de tiempo, puede haber en el sistema una fluctuación enorme de energía. Este fenómeno le da pie a los físicos a aseverar con cierta ironía que “el vacío no es tan vacío”. En los primeros instantes del universo, mucho antes del primer segundo, y cuando aún es sumamente pequeño, los fenómenos cuánticos que suceden en breves lapsos de tiempo, tales como este tipo de fluctuación, pueden ser significativos dados los dramáticos cambios que están ocurriendo de forma rápida. Más aún, una fluctuación producida por los efectos cuánticos del “vacío” puede dominar durante tiempos muy cortos pero determinantes en la historia del universo. Ésta fue la hipótesis propuesta por Guth primero (1981), y A. Albrecht y P. Steinhert (1982) más tarde. Su razonamiento consistía en insertar una breve etapa en la historia del universo en la que dominara la “energía del vacío”. En principio había bases para pensar que el vacío en efecto era susceptible de acarrear energía, sobre todo dados algunos resultados en la física del estado sólido y, de forma particular, del así llamado “efecto Casimir”¹⁴. No obstante, resultaba mucho menos claro entender cómo operar con

¹³Lightman y Brawer (p. 471; traducción nuestra).

¹⁴Las “fluctuaciones del vacío” son una posibilidad teórica de gran importancia desde el punto de vista experimental. El efecto Casimir consiste en un raro efecto en el que dos placas conductoras y eléctricamente

este elemento en la teoría general de la relatividad.



Figura 1.11: Alan Guth (1947)

¿Dónde podría introducirse la energía del vacío en la ecuación de campo? No era una pregunta trivial. Sin embargo, la respuesta provino de la variante propuesta por Einstein para frenar el universo. La energía del vacío no era otra cosa que la constante cosmológica, pero trasladada al otro lado de la ecuación (ver ecuación (1.2)). Ya dijimos que Einstein había pensado que dicha constante, si existía, debía tener una interpretación geométrica, y por eso la puso al lado izquierdo. Pues, la sugerencia de Guth fue asignar una energía del vacío al universo de modo que, desde el punto de vista matemático, se acomodaría en la ecuación de campo como lo hacía la antigua constante de Einstein, sólo que como era un factor de tipo energético debía ir al lado derecho. Ahora bien, si uno admite la existencia de la etapa del dominio de vacío, la cuestión es la siguiente: ¿cómo se comporta dinámicamente un universo en expansión cuando la energía es una constante? Nos es imposible trasladar aquí los detalles de la correspondiente derivación matemática, pero en compensación el resultado no es difícil de entender. Lo que Guth notó cuando calculó el factor de escala $R(t)$ bajo estas condiciones es que su relación con el tiempo no era ya cuadrática (ver ecuación (1.5)), sino exponencial. Es decir que

$$R(t) \propto \exp[(\sqrt{\Lambda})t],$$

donde Λ es el valor de la constante cosmológica, o la energía del vacío, obviamente con un valor distinto a cero (y por supuesto al asignado por Einstein para que $R(t) = \text{constante}$).

Curiosamente esta solución a la ecuación de Einstein había sido ya sugerida en los años veinte, por el astrofísico holandés de Sitter, pero fue poco apreciada por la dificultad en interpretar la constante cosmológica. La principal razón para la amplia y rápida recepción del modelo de Guth fue la solución de los problemas de monopolos, horizonte y planitud. Su sencillez a este respecto es

neutras a muy pequeña distancia sufren una atracción no atribuible a otra cosa más que a la energía del vacío entre las dos placas.

1.6. LA INFLACIÓN COMO MECANISMO PARA SOLUCIONAR LOS PROBLEMAS DEL BIG BANG 29

francamente extraordinaria. El problema del horizonte se soluciona ya que, dado que la distancia entre objetos depende proporcionalmente del factor de escala, un crecimiento exponencial de este último implica un alejamiento muy rápido durante la fase inflacionaria. Así pues, los puntos que vemos hoy separados una distancia mayor que la del radio del horizonte estuvieron en realidad, antes de la inflación, dentro del mismo radio, y por consiguiente causalmente conectados.

Tomemos por ejemplo de nuevo las siguientes dos magnitudes: la separación entre dos puntos cualesquiera, L , y el radio del horizonte. Durante la inflación el comportamiento de L (proporcional al factor de escala R de la figura 13.3) es exponencial. Esto implica que durante la inflación todos los objetos que estaban dentro de un solo radio del horizonte (es decir térmicamente correlacionados) salen de éste con enorme rapidez. Una vez termina la inflación, la rata de alejamiento es mucho menor y similar a la que observamos hoy, es decir cuadrática. En otras palabras, antes de que la inflación los alejara, los puntos que entran dentro de nuestro radio del horizonte ya han estado en contacto con nosotros. Esto explica que la RCF sea tan homogénea, en virtud del hecho de que hubo un momento en el pasado en que todos los puntos dentro del universo observable actual estuvieron térmicamente relacionados.

Gráficamente, el problema se puede ver en la figura 1.12.

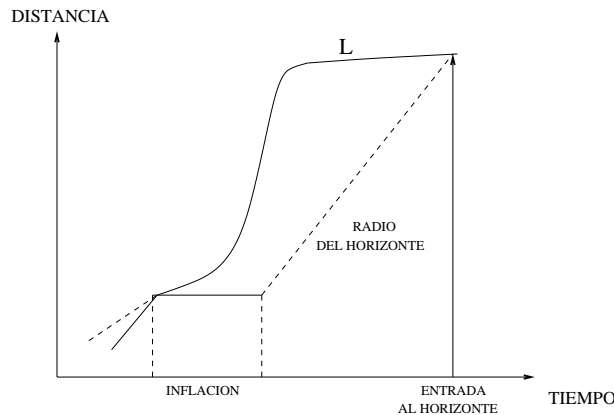


Figura 1.12: Regiones que antes de la inflación se encuentran causalmente conectadas, salen del radio del horizonte durante la expansión exponencial. Después de algún tiempo, estos puntos vuelven a entrar al horizonte y, ya que han quedado en contacto causal, han quedado termalizados

Si acercamos todos los puntos que se encuentran dentro de nuestro radio del horizonte hoy, y suponemos un decrecimiento exponencial del factor de escala, entonces habrá un momento a partir del cual todos estos puntos queden separados por una distancia igual o menor a la necesaria para que haya contacto causal entre ellos. El problema de planitud o entropía también parece solucionarse si se tiene presente que durante la inflación la entropía también crece rapidísimamente como consecuencia de la expansión exponencial (proceso adiabático). Más exactamente, ésta crecerá proporcionalmente al cubo del factor de escala, que no es otra cosa que el volumen. Para ser más exactos, la entropía crecerá durante la inflación de un valor del orden 1 a un valor cercano a 10^{88} , es decir consistente con un universo plano. Finalmente, si uno se imagina que durante la inflación todos los puntos dentro de un radio de horizonte salen disparados de forma exponencial en razón de la expansión, resulta claro que la densidad de objetos dentro de cualquiera de esos radios decrecerá en

igual medida. El truco de Guth, como dijimos al inicio, fue diluir el número de monopolos, pero no suprimiendo su existencia, sino expandiendo dramáticamente el tamaño del universo. En promedio, según los cálculos de Guth, no habría más de un monopolo magnético por volumen observable, lo que explica la baja probabilidad de detectarlos. Por esto también se dice que la inflación borra toda información del universo anterior a ésta. Para terminar, podemos decir que con Guth se volvía a poner sobre el tapete la solución de De Sitter sesenta años más tarde, pero esta vez cubierta con el elegante ropaje de las teorías del vacío de la física de partículas. En poquísimos años esta solución entró a ser parte de la cosmología estándar. Los años 80s y 90s se caracterizaron por la minuciosidad con la que los cosmólogos se dedicaron a explorar distintos aspectos de la inflación. Con el tiempo, el modelo inflacionario ha sido adoptado como el nuevo estándar y los debates hoy se concentran en las características específicas de un modelo con una etapa llamada inflacionaria.

1.7 A modo de conclusión: más preguntas que respuestas

Debemos empezar señalando cuán joven es la cosmología moderna. Si tenemos en cuenta que las primeras propuestas no surgieron sino hasta la segunda década del siglo pasado, que la teoría de la relatividad no sería institucionalizada sino hasta los años 50s, que el establecimiento del modelo del Big Bang no data sino hasta la segunda mitad de los años 60, tras la detección de la RCF, y que el modelo sería fuertemente modificado cerca de 15 años más tarde con la propuesta inflacionaria, se puede concluir que es un campo de rapidísima evolución. Dichos cambios se manifiestan no sólo en la cantidad y variedad de tests que se han propuesto para determinar el tipo de universo que habitamos, sino en significativas modificaciones en el modelo teórico mismo. No menos llamativo es la curiosa dinámica del proceso científico. Hemos visto cómo nociones que aparecen en una determinada época, como la constante cosmológica, vienen inicialmente barridas bajo el tapete, para volver a aparecer con una interpretación completamente nueva. Hay que ser cuidadosos a este respecto, porque no se trata de un “re-descubrimiento”, precisamente porque los significados en ambas teorías son completamente diferentes. Es el apego a recursos utilizados en el pasado y que por conveniencia, y cierta dosis de oportunismo, los físicos aprenden a integrar a su práctica. Esta capacidad para usar recursos de origen inesperado es parte de lo que hay que aprender cuando se entrena como científico. Las características del modelo del Big Bang inflacionario las podemos resumir en seis puntos que además parecen no haber sido rebatidos empíricamente, aún:

1. El universo se expande,
2. está constituido primordialmente por 75 % hidrógeno y 25 % helio,
3. posee una RCF con una temperatura de 2.7 Kelvin,
4. la RCF presenta un espectro de radiación de cuerpo negro,
5. la RCF tiene pequeñas anisotropías en su distribución angular y
6. en sus épocas primordiales cuando era una bola de plasma caliente y densa, el universo soportó oscilaciones acústicas.

Pero, vale la pena preguntarse, ¿Por qué el Big Bang ha sido aceptado como el modelo estándar cosmológico? ¿Existen modelos alternativos? Pues de hecho existió un modelo alternativo del universo, elaborado en 1948 por Fred Hoyle, sir Herman Bondi y Thomas Gold: el llamado *modelo estacionario*, según el cual el universo es infinito y no tuvo comienzo. Este modelo implica que el universo es homogéneo no solamente en el espacio sino también en el tiempo.



Figura 1.13: Fred Hoyle (1915)

Al aceptar un comienzo (como en el modelo del Big Bang) ya estamos de alguna manera introduciendo una asimetría en el tiempo, un antes y un después que rompe la homogeneidad del universo en el tiempo. La expansión del universo observada por Hubble fue explicada dentro del modelo como el efecto de generación espontánea de materia que necesita de un espacio siempre en expansión para poder albergar esta materia nueva. La radiación de fondo no pudo ser explicada dentro de este modelo, y cuando ésta fue descubierta, los proponentes del modelo lo abandonaron. Después de dejarlo a un lado por varias décadas, un grupo de cosmólogos, entre ellos personajes tan destacados como Halton Arp, Geoffrey Burbidge, el mismo Hoyle y Jayant V. Narlikar, han reciclado el modelo estacionario original modificándolo para permitir ciclos de expansión y contracción compatibles con la ley de Hubble y proponiendo explicaciones alternativas a las observaciones que sirven de evidencia al Big Bang. La nucleosíntesis de los elementos primordiales no ocurre a los tres minutos del Big Bang sino en los núcleos estelares, el alto corrimiento hacia el rojo observado en los cuásares no es de origen cosmológico sino consecuencia de una propiedad intrínseca de éstos, y el espectro de cuerpo negro de la radiación cósmica de fondo no se debe al equilibrio termodinámico existente en el Big Bang antes de la época del desacople sino al equilibrio térmico con granos exóticos de polvo.

La teoría del Big Bang no está acabada y aún presenta algunos huecos. Las críticas al modelo son favorables en cuanto permiten refinar los argumentos que lo sustentan, pero hay que decir que, desafortunadamente, las propuestas del modelo alternativo cuasi-estacionario parecen introducir más inconsistencias de las que desean resolver. Esto, de ningún modo significa que el Big Bang esté exento de ser reconsiderado en un futuro. Por razones de espacio, no hemos incluido posteriores

elaboraciones del modelo inflacionario, tales como la “inflación caótica” o las teorías de supercuerdas. Confiamos en que este artículo haya servido para abrirle el apetito intelectual a una generación que tiene ante sí más preguntas que respuestas. Para tan sólo citar algunas, ¿por qué el valor de la constante cosmológica, después de la inflación, es tan extraordinariamente pequeño? ¿A quién le debemos atribuir exactamente el que después de la inflación el universo volviera a recalentarse? Más grave aún es el hecho de que los astrónomos no parecen haber podido encontrar una gran cantidad de la materia necesaria para ser consistente con el aparente hecho de vivir en un universo plano. ¿Dónde está esa materia? ¿De qué está compuesta? Pareciera que navegamos en un mar de objetos que no podemos ver. ¿Acaso nos satisface un modelo en el que el 90% de lo que lo compone es invisible?

Bibliografía

- Crelinsten, J. (1980) *Einstein, relativity and the press*, The Physics Teacher, Feb. 1980a, p. 115-122.
- Galison, P. (2000) *Einstein's Clocks: The Place of Time*, Critical Inquiry, 26, Winter 2000, p. 355.
- De Greiff, A. & Tejeiro, J.M. (1995) *Nueva inflación y restricciones al potencial efectivo $SU(5)$* , Rev. Acad. Colomb. Cienc., Vol. 20, No. 76, p. 93.
- Kragh, H. (1996) *Cosmology and Controversy: the Historical Development of Two Theories of the Universe*, Princeton, 1996.
- Kuhn, T (1980) *La estructura de las revoluciones científicas*, Ciudad de México.
- Lightman, A & Brawer, R. (1990) *Origins: lives and worlds of modern cosmologists*, Cambridge (MA).
- Sánchez-Ron, J.M. (1983) *El origen y el desarrollo de la relatividad*, Madrid.
- Torres, S. *Exploremos el Universo* en el web: <http://home.earthlink.net/~umuri>
- von Klüber, H. (1960) *The Determination of Einstein's Light-Deflection in the Gravitational Field of the Sun*, Vistas in Astronomy, Vol. 3, Part I, p. 47.