

Capítulo 3

La cosmología o la evolución del universo

En el universo visible hay unos 10^{90} fotones o partículas de radiación electromagnética viajando a la velocidad de la luz en todas direcciones; son unos cuatrocientos en cada centímetro cúbico de universo repartidos de manera extraordinariamente uniforme. Además de esta radiación cósmica hay también unos 10^{80} núcleos de átomos, casi todos de hidrógeno. Estas partículas pesadas no están repartidas tan uniformemente. Están concentradas en estrellas y gases interestelares, agrupados a su vez en galaxias que se agrupan cúmulos que se agrupan en estructuras filamentosas.

La obligación de la cosmología es darle sentido a estas y otras observaciones y no desfallecer en el intento. Es explicar el patrón de estructuras que atestiguamos en los cielos; es preguntarse (y responderse) cómo pudo haber sido el universo para que evolucionando de acuerdo a las leyes fundamentales de la física, haya desembocado en el universo que constatamos hoy. Se trata, en pocas palabras de construir un modelo del universo y su evolución, y que este universo “de papel” capture los aspectos más relevantes del universo real. Tan solo en términos de un modelo cosmológico podemos interpretar las observaciones e intentar responder preguntas fundamentales acerca del origen o del futuro del universo.

La construcción de un modelo que represente al universo parte de un principio de simplicidad, y es que mirado a una escala suficientemente grande, el universo es uniforme. Es claro que en rigor el universo no es perfectamente uniforme; por el contrario, hay una formidable diversidad de estructuras a muy variadas escalas, desde átomos hasta estrellas, galaxias y cúmulos de galaxias. Un universo sin estructuras y perfectamente homogéneo sería la mar de aburrido, entre otras cosas porque sería incompatible con la vida. Pero del mismo modo que cuando hablamos de la Tierra como una esfera, despreciamos montañas y valles por ser irregularidades pequeñas comparada con el radio terrestre, resultando la Tierra una esfera cuyas mayores irregularidades son del 0,15%; las estructuras del universo puedan ser consideradas grumosidades irrelevantes a partir de cierta distancia. Naturalmente que esto no tendría que ser necesariamente así. Un universo fractal, por ejemplo, con estructura a todas las escalas, no es uniforme a ninguna. Sin embargo, diversas observaciones nos advierten que nuestro universo no tiene una estructura fractal, y que a partir de unos 300 millones de años-luz, el universo luce homogéneo. En otras palabras, un cubo

imaginario de unos 300 millones de años-luz de arista contiene una muestra fiel y estadísticamente representativa de la distribución de materia del universo. Esta escala de uniformidad es pequeña comparada con el tamaño del universo visible. A gran escala el universo es isótropo, es decir, un observador verá en promedio lo mismo, independientemente de la dirección en que mire. Y es homogéneo, un observador verá esencialmente lo mismo independientemente del lugar en que se encuentre.

La radiación cósmica de microondas nos revela que el universo fue muchísimo más uniforme; con el pasar del tiempo la gravedad lo ha hecho más grumoso; de modo que no es una mala aproximación considerar modelos de universos uniformes. Adoptar esta estrategia no sólo simplifica el tratamiento matemático del presunto modelo de universo, sino que permite conocer propiedades del universo estudiando sólo una parte de él: cualquier región del universo es hoy como nuestra región; nuestra región fue como hoy vemos a regiones alejadas. El cosmólogo adopta la admonición literaria de Tolstoi: describe tu aldea y describirás el universo.

La relatividad y el universo

El siguiente paso es advertir que la gravedad es la fuerza dominante a grandes distancias. Las fuerzas nucleares son de corto rango, a distancias apenas mayores que el tamaño del núcleo de un átomo, ya no ejercen ningún efecto. La fuerza electromagnética es creada por partículas cargadas. Como la materia macroscópica es eléctricamente neutra, las fuerzas electromagnéticas no juegan ningún papel a gran escala. La gravedad, que en el mundo molecular, atómico o nuclear es insignificante, al considerar grandes masas es la fuerza que prevalece. La gravedad controla la dinámica del universo.

Debemos recurrir entonces a la mejor teoría de gravitación disponible en el mercado, y esa es –qué duda cabe– la relatividad general. Además la relatividad general tiene la habilidad de describir el universo, aun en el caso de que sea infinito. Como señalamos arriba, a muy grandes distancias la materia está distribuida de manera uniforme. Debido a la profunda vinculación entre materia y geometría, esta última debe también ser uniforme, y por tanto su curvatura debe ser la misma en todos los puntos. Los matemáticos y las matemáticas nos aseguran que sólo existen tres geometrías posibles con curvatura constante:

- La geometría euclidiana usual, en la que se cumplen las propiedades que nos parecen naturales: las líneas más cortas son rectas, la suma de los ángulos internos de un triángulo es 180° , el espacio es infinito en sus tres direcciones y líneas paralelas se mantienen paralelas.

- La geometría esférica. Es más difícil de concebir este espacio. Su volumen total es limitado, las líneas más cortas entre dos puntos son arcos de círculo que eventualmente se cierran. La suma de los ángulos internos de un triángulo es mayor que 180° y líneas inicialmente paralelas convergen.
- Finalmente, en la geometría hiperbólica, las líneas más cortas son arcos de hipérbolas, el espacio es infinito y la suma de los ángulos de un triángulo es menor que 180° . En esta geometría, las líneas inicialmente paralelas divergen.

Cada una de las posibles geometrías anteriores está caracterizada por un valor de un número designado por la letra k , y asociado con la curvatura del espacio. Si $k = 0$, el espacio no tiene curvatura, es la geometría euclidiana. Si $k = 1$, la curvatura es positiva y la geometría es la esférica. Si $k = -1$, la curvatura es negativa y la geometría es hiperbólica.

Obtener el valor de k es uno de los deberes de la cosmología observacional, es decir, dictaminar cuál es la geometría de nuestro universo. Uno de los deberes de la cosmología teórica es explicar por qué es ese valor y no otro. Veremos que en ambos frentes ha habido importantes progresos en los últimos años.

La expansión del universo

Al aplicar las ecuaciones de Einstein a un universo uniforme surge una consecuencia asombrosa: el universo debe estar en expansión o en contracción, de la misma manera en todas direcciones. Dicho en otras palabras, las suposiciones hechas conducen de manera natural y necesaria a modelos de universo que no pueden ser estáticos. La noción de un universo dinámico, cambiante, era demasiado heterodoxa aun para un pensador irreverente como Einstein. Sucumbió al peso del prejuicio y por supuesto, a las evidencias de la época, de un universo siempre igual a sí mismo, inmutable y eterno y modificó sus ecuaciones originales para obligarlas a ser compatibles con un universo estático. Le agregó un término con una constante llamada constante cosmológica. El efecto de esa constante era producir una repulsión que se encargaría de balancear la atracción de la gravedad, y ‘detener’ sobre el papel, la expansión del universo.

Al poco tiempo se demostró que el ‘universo de Einstein’, es decir, su modelo, era inapropiado para representar al universo real. Resultaba estático gracias a un precario equilibrio, inestable como el de un lápiz parado sobre su punta, que la menor perturbación se encargaba de destruir. En 1922 Alexander Friedmann construyó

diversos modelos con y sin constante cosmológica que representaban universos en expansión: no había duda, la relatividad general predecía la expansión del universo. Pero la razón demoledora de la noción del universo estático fue el descubrimiento o mejor, la observación de Edwin Hubble en 1929 de la recesión de las galaxias. Einstein abjuró con amargura del momento en que modificó sus ecuaciones originales y habló del mayor error de su vida. De haber tenido más fe en sus ecuaciones y menos fe en su prejuicio, tal vez hubiese predicho uno de los más prodigiosos descubrimientos de ciencia, la expansión del universo. Pero el segundo error de su vida fue haber desechado la constante cosmológica con la misma veleidad con que se la sacó de la manga años antes. Los caminos de la ciencia suelen ser extraños. Como en la fábula del aprendiz de brujo, una vez liberada, la constante cosmológica ha sido difícil de controlar. Invocada en diversos contextos, muy recientemente los astrónomos alegan tener las pruebas de su existencia.

El descubrimiento de la expansión representa el cambio más importante en nuestro entendimiento del universo, desde Aristóteles hasta nuestros días, y coloca en el tapete de discusión el ancestral problema del origen del universo. Antes de su descubrimiento, la ciencia asumía tácitamente la postura de un universo eterno, postura en la cual el problema del origen ni siquiera se plantea. Lo importante del descubrimiento de la expansión del universo y de la revolución cosmológica, es que sienta las bases para atacar científicamente la evolución del universo y su posible origen.

Curiosamente, en el siglo XIX, algunos físicos habían advertido que las entonces recientes leyes de la termodinámica, como la ley de crecimiento de la entropía, aplicadas a un universo estático y eterno, confrontaban dificultades a la hora de explicar la emergencia de procesos de no equilibrio como la radiación de las estrellas: ¿Cómo mantener eternamente los limitados recursos energéticos de estrellas y galaxias? ¿Cómo era posible que en una eternidad los procesos irreversibles no hubiesen uniformizado la temperatura del universo, alcanzando la famosa muerte térmica que tan profundo impacto causó en los círculos intelectuales de la época. Los argumentos termodinámicos sugieren fuertemente un origen o al menos una evolución. Que no hayan sido usados para concluir que el universo evoluciona, y el episodio de Einstein de la constante cosmológica, ilustran lo duro de matar que pueden resultar los prejuicios en ausencia de hechos observacionales.

Imaginemos tres galaxias distantes formando un triángulo. A medida que pasa el tiempo y debido a la expansión, la distancia entre las tres será cada vez más grande, pero si todas las direcciones son equivalentes, el triángulo deberá seguir siendo semejante al inicial, para lo cual cada lado debe aumentar en la misma proporción.

Como consecuencia, las longitudes están controladas por una función $R(t)$ llamada factor de escala que depende exclusivamente del tiempo. Si en un lapso el factor de escala aumenta en digamos un 10%, entonces todas las distancias cosmológicas se habrán incrementado en un 10% y por tanto los puntos más lejanos se habrán separado una mayor distancia.

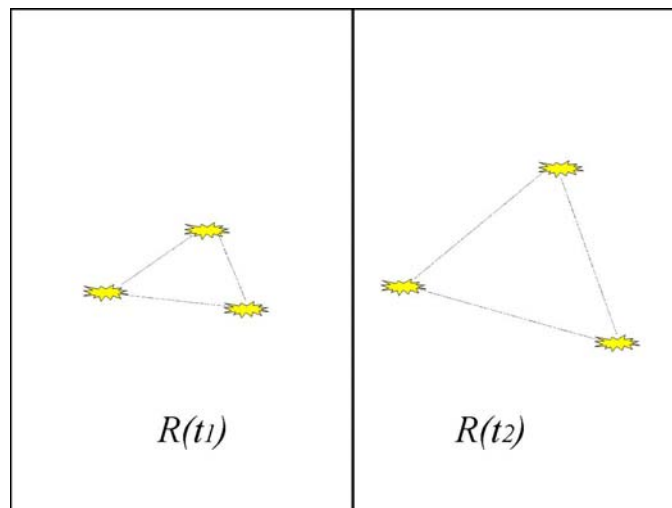


Figura 12. Tres galaxias en el instante t_1 y las mismas galaxias posteriormente en el instante t_2 . La expansión es igual en todas las direcciones, por eso basta una función $R(t)$ para saber cómo aumentan las distancias.

Ese es el contenido esencial de la ley que Hubble observó en 1929, el ritmo a la que se separan las galaxias es proporcional a su distancia.

Es importante hacer algunas precisiones. La expansión de las galaxias no debe imaginarse como la explosión de una granada cuyos fragmentos se dispersan de un centro y avanzan en un espacio preexistente. En el caso del universo ningún punto es el centro y no hay ningún borde. Es el espacio mismo entre las galaxias que se va 'estirando' a medida que el factor de escala crece.

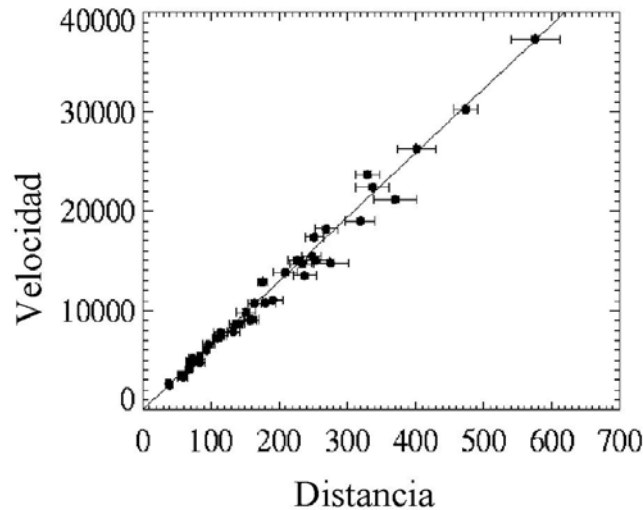


Figura 13. La velocidad a la que se alejan cada galaxia, depende linealmente de la distancia que nos separa de ella.

Por otra parte, no debemos caer en el síndrome del personaje de Annie Hall, la película de Woody Allen, mortificado porque sentía que se expandía, al igual que Brooklyn y la Tierra... Obviamente que si todas las distancias se expanden, no habría manera de detectar la expansión. Ni la Tierra ni el sistema solar, ni la vía Láctea ni siquiera el grupo de galaxias al cual pertenece nuestra galaxia se expanden. Esas distancias ‘pequeñas’ están controladas por otras fuerzas y no participan de la expansión. El socorrido ejemplo de un globo inflable, con unas monedas pegadas en su superficie, ilustra adecuadamente lo que ocurre. Las monedas representan galaxias, la goma del globo representa el espacio entre ellas. A medida que el globo (espacio) se infla (expande), la distancia entre las monedas (galaxias) crece, sin embargo las dimensiones de ellas permanecen inalteradas.

El big bang

Gracias a la expansión, las galaxias se están separando y el universo se está enrareciendo. No es difícil entender entonces que en el pasado las galaxias estaban más juntas, y que a medida que consideramos instantes más y más alejados en el pasado, la materia y la radiación estaban más y más comprimidas, su densidad era

mayor. Mediante argumentos simples se puede demostrar que la temperatura de la radiación es inversamente proporcional al factor de escala; por ejemplo, cuando el universo era mil veces más pequeño su temperatura era mil veces mayor que ahora. De la misma manera, la densidad y la presión de la materia y la energía dependen del factor de escala. Es fundamental entonces, para la construcción de un modelo cosmológico conocer de manera precisa cómo el factor de escala cambia con el tiempo, porque los valores de la temperatura, de la densidad de materia y energía y de la presión en una época, determina cuáles procesos físicos ocurren en esa época, es decir, podemos saber lo que está haciendo el universo en ese momento.

Pero ¿quién controla al factor de escala? El factor de escala está gobernado por la gravedad creada por los propios constituyentes del universo. Con más precisión, el ritmo con que cambia el factor de escala está determinado por la densidad total de materia y energía y por la curvatura del espacio a través de las ecuaciones de Einstein. De allí la importancia de observar para saber qué y cuánto hay allá afuera, es decir, la necesidad de hacer el arduo inventario cósmico y de conocer la geometría del espacio. Curiosamente estas las observaciones deben ser interpretadas a través de un modelo cosmológico, de modo que estamos en un círculo: observamos para determinar el modelo, pero las observaciones las interpretamos en términos del modelo que deseamos determinar. Este tipo de circularidad no es novedosa en la ciencia: las mediciones de las posiciones de los planetas que hacían los astrónomos del siglo XVI pretendían conocer qué curva siguen los planetas alrededor del sol, pero las observaciones se hacían desde la Tierra, que también describe la curva que deseamos determinar. La historia demuestra que la combinación de datos observacionales, teorías exitosas, una que otra suposición y mucho de ingenio, permite romper el círculo perverso.

Es así como en las últimas décadas cosmólogos y físicos de partículas han ido afinando los detalles que permiten reconstruir la historia de nuestro universo, la descripción de los sucesivos procesos físicos que han ocurrido en el universo a medida que se expande y se enfría.

Algunos episodios relevantes de esa historia son los siguientes.

- Cuando han transcurrido una cien milésima parte de un segundo después del big bang la temperatura del universo es de unos 5 billones de grados Kelvin. El universo contiene partículas elementales llamadas quarks, electrones, neutrinos y fotones (radiación electromagnética), que interactúan violentamente a través de procesos relativamente bien conocidos porque la energía a esa temperatura es similar a la energía lograda en los grandes aceleradores de partículas. Lo más

relevante que ocurre es la formación de protones y neutrones a partir de los quarks

- Entre un segundo y varios minutos, la temperatura desciende de cien mil millones de grados a un millardo de grados. En esta fase la física es mucho más convencional porque las energías corresponden a las energías típicas de los procesos nucleares que entendemos razonablemente. La densidad del universo es de unos 500.000 gr/cm^3 . Los choques entre protones y neutrones hace que se sinteticen núcleos de deuterio (un protón y un neutrón), helio (dos protones y dos neutrones) y algunas trazas de litio. La densidad es suficientemente baja como para que los neutrinos, que interactúan muy poco con la materia, se desacoplen de la sopa cósmica y viajen imperturbable por el universo. El reactor nuclear que es el universo en esa fase, es sin embargo defectuoso. Deja de sintetizar núcleos de elementos más pesados porque se enfría demasiado rápido por la expansión.
- El siguiente episodio ocurre cuando ya han transcurrido 400.000 años. De la fase de síntesis nuclear a esta época se ha expandido unas 100.000 veces. Su temperatura es ahora de $4000 \text{ }^\circ\text{K}$, ya suficientemente baja como para que la radiación no disponga de la energía para impedir que los núcleos capturen electrones y formen átomos de hidrógeno y helio fundamentalmente. La física predominante en esta fase es física atómica. Antes de esta época la materia está fuertemente ionizada, es un plasma que interactúa con los fotones de la radiación electromagnética. Por eso el universo es opaco (por la misma razón no podemos observar el interior del sol). Sin embargo, una vez que la materia forma átomos y se hace neutra, se hace transparente a la radiación. Los fotones libres de la dictadura de la materia, viajarán imperturbables, sólo sintiendo los efectos de la expansión del espacio, estirándose, es decir disminuyendo su frecuencia, desplazándose hacia el rojo. Estos son los 10^{90} fotones a que nos referimos al comienzo de esta sección, se les conoce como radiación cósmica de microondas y hablaremos de ella con detalle más adelante. Poco antes la densidad de la materia se había hecho mayor que la de la radiación, y la física gravitacional de largo alcance comenzó a ser el fenómeno más relevante.
- Gracias a la gravitación, pequeñas fluctuaciones en la distribución de materia comenzaron a colapsar amplificando gravitacionalmente el contraste de la densidad. El universo comenzaba a hacerse heterogéneo y grumoso: estaban naciendo las primeras galaxias. La densidad de energía del vacío, reencarnación de la constante cosmológica de Einstein comenzó a hacerse importante y a

controlar la dinámica del universo. Por eso, es posible la expansión esté en una fase acelerada.

- Finalmente unos diez millardos de comenzada la expansión, los elementos pesados como oxígeno, nitrógeno, carbono... sintetizados en el interior de las estrellas y dispersados al medio interestelar a través de supernovas, comenzaron a formar complejas estructuras moleculares abriendo paso a la emergencia de fenómenos complejos como la vida.
- Recientemente las observaciones de la luz de supernovas muy alejadas evidencian que la expansión del universo habría entrado en una fase acelerada, debido tal vez a la existencia de una constante cosmológica o algo equivalente que produzca una repulsión gravitacional.

La descripción que hemos esbozado arriba es esencialmente el modelo del big bang. A pesar de lo que sugiere el nombre, no es precisamente una teoría del big bang sino de lo que ocurrió después del big bang. Ciertamente no comenzamos la historia en $t = 0$ porque las ecuaciones de Einstein colapsan cuando $t = 0$; el factor de escala se hace cero, las densidades, presiones y la temperatura se hacen infinitas al igual que la curvatura del espaciotiempo. Es la temible ‘singularidad’ asociada con el mass-mediático big bang, evento del que emergería el tiempo, el espacio, la materia, las leyes... y que se asocia con el origen del universo. Quisiéramos aquí ser algo más cautelosos y afirmar que en los instantes cercanos al big bang se inició la fase expansiva de nuestro universo observable. En una singularidad, el algoritmo que es la teoría se quiebra y por tanto se pierde toda capacidad predictiva por culpa de los infinitos. Le hemos exigido a la teoría más de lo que podía dar, la hemos empujado a un ámbito donde la teoría no vale y debe ser reemplazada por otra; el problema es que no tenemos a disposición esa otra teoría, y como dijo el cosmólogo James Peebles, “si las ecuaciones se niegan a decirlo, yo me niego a especular”. Dejaremos para más adelante los intentos de acercarse teóricamente al big bang y sobre terreno más seguro veamos cómo se confronta la cosmología estándar con las observaciones.

¿Es cierta la teoría del big bang?

¿Con cuánta confianza debemos tomar por correcta la historia de la evolución del universo que nos presentan la ciencia? ¿Cuán firmes son las bases de esta imagen que nos proponen? ¿Cuán persistente es, cambiará todo a la vuelta de un tiempo?

Podemos imaginar preguntas similares en 1700, acerca de la verosimilitud del funcionamiento del sistema solar provisto por Newton. Había buenas razones para

pensar que a pesar del salto conceptual que estaba dando, su modelo describía de manera real al sistema solar. En efecto, tres siglos después, la visión que tenemos del sistema solar es esencialmente la misma que nos legó Newton, aunque conocemos mucho mejor los detalles. La razón es que su concepción del sistema solar se basaba en una estupenda teoría y un apego a los hechos observacionales.

En esta sección revisaremos cuáles son los cuerpos del delito que nos convencen ‘más allá de toda duda razonable’ de que la historia contada por los cosmólogos y los físicos tiene suficientes asideros y que hay razones para entender por qué la cosmología estándar se ha erigido en el guión general sobre el cual afinar detalles y desde el cual plantear preguntas más fundamentales.

Apostar a favor del modelo del big bang no es descabellado porque al igual que en el caso del sistema solar, se apoya en teorías de reconocida solvencia y desde hace algunos años y cada vez más está en contacto cercano con las observaciones.

Las teorías que sirven de apoyo al modelo son la relatividad general, de la cual ya hemos hablado y la teoría cuántica de campos. Esta teoría representa nuestra mejor comprensión del mundo a pequeña escala. Nos explica por qué el cielo es azul y el agua transparente; el por qué de la tabla periódica, y la estabilidad de la materia. Predijo la antimateria o las tasas a las que ocurren las reacciones nucleares en las estrellas o en las bombas, Es capaz de predecir un valor teórico para una propiedad particular del electrón con una precisión equivalente al espesor de un cabello humano respecto de la distancia entre Caracas y Nueva York. Está en el centro de toda la tecnología digital actual.

De modo que los dos pilares teóricos sobre los que se apoya la cosmología estándar son pilares muy firmes. Pero además están muchas evidencias observacionales. Veamos.

La uniformidad del universo

Que el universo es aproximadamente uniforme a gran escala es uno de los supuestos básicos de la cosmología estándar, supuesto que por supuesto, debe ser corroborado. Una estrategia natural es contar galaxias en volúmenes cada vez más grandes. Si la materia está distribuida homogéneamente, el número de galaxias debería crecer de manera proporcional al volumen considerado. Las observaciones ratifican la uniformidad a gran escala del universo. Una demostración más contundente la provee la radiación cósmica de microondas, cuyas propiedades en diferentes direcciones difieren en apenas una parte en cien mil, asegurándonos que en su infancia el universo era muy simétrico y uniforme.

Evidencias de la expansión

Que el universo a gran escala se está expandiendo y que además lo hace siguiendo la ley de Hubble, el ritmo de separación es proporcional a la distancia, es una robusta predicción de la cosmología estándar. Esta predicción es constatable mirando galaxias cada vez más alejadas. Los fotones, es decir, la luz o la radiación electromagnética que nos llega de estas galaxias han estado viajando hacia nosotros por centenares o miles de millones de años y durante ese lapso han estado sintiendo los efectos de la expansión del espacio. Su longitud de onda se ha estirado en la misma proporción en que ha aumentado el factor de escala. La frecuencia disminuye en la misma proporción, porque el producto de la frecuencia por la longitud de onda está fijo, es la velocidad de la luz. Los astrónomos se refieren al cambio porcentual de frecuencia como el desplazamiento al rojo, porque el rojo corresponde en la luz visible a la menor frecuencia, aunque el desplazamiento ocurre en todo el espectro, incluyendo las frecuencias no visibles por nuestro ojo. Comparando la luz de un elemento químico de una galaxia, con la del mismo elemento pero emitida aquí en la Tierra, podemos determinar cuál es el corrimiento al rojo de esa galaxia. Una galaxia con un corrimiento al rojo de 1, por ejemplo, significa que la luz que viene de ella aumentó su longitud de onda en 100%, y por tanto el universo duplicó su tamaño durante el tránsito; cuando la luz fue emitida, el universo era la mitad de lo que es hoy.

Los sistemas sofisticados de detección de la luz de las galaxias permiten obtener el desplazamiento al rojo de centenares de miles de galaxias. Para galaxias cercanas hay una proporcionalidad entre el desplazamiento al rojo y la distancia (para galaxias muy alejadas no porque estamos viendo en universo en otra época con una tasa de expansión diferente). El parámetro de proporcionalidad se llama constante de Hubble, y es uno de los parámetros cosmológicos más importantes porque su valor determina indirectamente la edad del universo. Actualmente se estima que $H_0 = 68 \text{ Km/seg MPc}$, con un 10% de error. Un MPc significa un millón de *par sec*, y cada *par sec* equivale a 3,08 años-luz.

La radiación de Microondas

La observación del universo de las galaxias nos permite someter a prueba y a la vez afinar detalles del modelo desde cuando el universo era unas seis veces más pequeño que ahora. En escalas de tiempo eso corresponde desde un millardo después del big bang hasta ahora. Para corroborar las predicciones de la teoría del big bang en tiempos anteriores la luz de las galaxias no es adecuada, simplemente porque las galaxias no existían. Debemos recurrir entonces al fondo de radiación cósmica de microondas.

En 1949 el grupo de Georges Gamow predijo que si alguna vez el universo fue muy caliente debía sobrevivir una tenue radiación de apenas unos 5°K , ese fue su cálculo, llenando el universo. La predicción pasó inadvertida; no existían las posibilidades experimentales para detectar la presunta radiación. En los 60's James Peebles y Robert Dicke reincidieron en la predicción teórica y comenzaron a construir una antena capaz de captar la radiación, cuando supieron que a pocas millas Arno Penzias y Robert Wilson, de Bell Lab, la habían detectado ¡por azar! Mientras calibraban una antena para seguimiento de satélites. Este azar les deparó el Premio Nobel a Penzias y a Wilson.

El descubrimiento en 1965 de la radiación cósmica fue el descubrimiento observacional más importante en cosmología desde cuando Hubble constató la expansión del universo, y desde ese momento el estudio minucioso de sus propiedades han convertido la radiación cósmica en la consentida de los cosmólogos en trance de revelarnos las intimidades del universo en sus primeros momentos.

¿Cómo se interpreta esta radiación? ¿Cuál es su origen? El universo temprano era una sopa caliente de radiación en equilibrio térmico con la materia. El equilibrio se mantenía gracias a los constantes choques de los fotones de la radiación con las partículas cargadas de la materia ionizada. A pesar de que los fotones se mueven a la velocidad de la luz (son la luz) debido a las repetidas dispersiones con los electrones, literalmente no iban a ninguna parte, y la sopa era ópticamente opaca. Justo por esa misma razón no podemos mirar al interior del sol, su superficie es un plasma y por tanto opaco a la radiación. Cuando debido a la expansión la temperatura de la radiación fue de unos 3000°K , los fotones ya no tenían la energía necesaria para impedir que los electrones fueran capturados por los núcleos de hidrógeno y helio para constituir los primeros átomos. Una vez que la materia se ha hecho atómica, se hace neutra y por tanto no afecta ni es afectada por la radiación. El universo repentinamente se hizo transparente, los fotones viajarían imperturbables, sólo disminuyendo su temperatura desde los 3000°K que tenían en el momento del divorcio hasta los $2,7^{\circ}\text{K}$ que tienen ahora.

Es posible calcular que el universo tendría unos trescientos mil años expandiéndose cuando ocurrió el desacoplamiento, de modo que mirar esta radiación significa mirar el universo cuando tenía el 0,02% de su edad. Es como mirar una fotografía de un hombre de 50 años cuando tenía cuatro horas de nacido. De ese momento para acá el universo es mil cien veces más grande, el mismo factor por el que ha disminuido la temperatura. La densidad de la materia en esa época es mil millones de veces la que es hoy.

Los fotones de la radiación cósmica han viajado durante el 99,98% de la historia del universo sin demasiadas alteraciones. Son por tanto portadores de valiosísima información acerca de los parámetros que caracterizan nuestro universo, y en los últimos años los científicos están aprendiendo a decodificar parte de esta información. Los resultados no pueden ser más alentadores.

A diferencia de la radiación de un horno microondas o de una emisora de radio o televisión, cuya frecuencia está concentrada en una estrecha banda, la radiación en equilibrio térmico con la materia tiene una manera distinta de repartir sus frecuencias, lo hace siguiendo una curva llamada curva de Planck que codifica las propiedades del equilibrio y cuyo descubrimiento en 1900 disparó la revolución cuántica. El espectro de Planck es la huella digital de la radiación térmica; midiendo la frecuencia que corresponde al máximo de la curva podemos determinar la temperatura. Las observaciones realizadas en 1992 por el satélite COBE (COsmic Background Explorer) permitieron obtener el espectro térmico más perfecto conseguido en la naturaleza. La temperatura resultó ser de $2,786 \pm 0,010$ °K, que corresponde a las microondas, la longitud de onda típica es entre 2 y 5 mm, longitud de onda que se superpone con las de las emisoras de televisión, de modo que cuando un televisor no está sintonizado en ningún canal en esa nieve caótica estamos viendo parte de los fotones de la radiación cósmica.

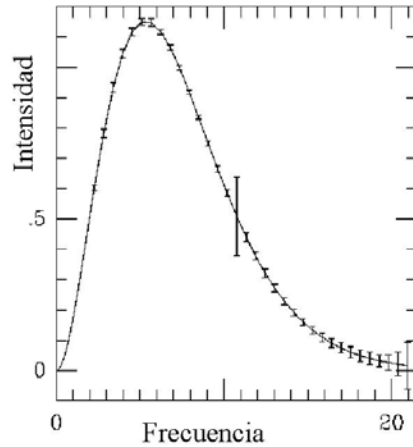


Figura 14. El espectro de la radiación de microondas es perfectamente térmico, evidenciando que materia y radiación estuvieron en equilibrio termodinámico.

El COBE pudo constatar que el espectro de Planck de la radiación de fondo es el mismo independientemente de la dirección en que esté dirigida la antena, la temperatura es la misma al menos en una parte en 100.000, ilustrando que el universo era tremendamente uniforme cuando la radiación fue emitida. De ser la superficie de la tierra así de uniforme la irregularidad más alta no tendría más de 1,60 metros de altura. La isotropía de la temperatura es indicio además de que la expansión es muy simétrica: si el universo se expandiera más en una dirección que en otra la radiación tuviera un desplazamiento al rojo diferente y una temperatura diferente.

Es bueno que el universo sea uniforme, eso lo hace simple. Pero no demasiado porque si no estuviésemos en problemas a la hora de explicar cómo se formaron las grandes estructuras como galaxias y cúmulos de galaxias. Mirado con una mejor lupa, de mayor resolución, el universo tendría que mostrar su lado irregular. La idea es suponer que había unas leves irregularidades en la distribución de la materia, pequeñas fluctuaciones en donde la materia era un poco más densa que el promedio. Una vez liberada de la influencia perturbadora de la radiación, estas fluctuaciones se amplificaron por atracción gravitacional y generaron las actuales estructuras. Los

fotones de la radiación sienten estas fluctuaciones, los que pasan por una zona más densa pierden energía y su frecuencia disminuye respecto de la media. Esto se manifiesta como una diferencia de temperatura.

En 1992 el satélite COBE realizó un detallado mapa de la temperatura de la radiación cósmica y aparecieron en escalas angulares de 7° , diferencias de temperaturas de unas cuantas cien milésimas de grados Kelvin. Era el retrato del patrón de irregularidades del universo, con el tamaño previsto y este resultado legitimaba la teoría de formación de estructuras por inestabilidad gravitacional. Los medios reseñaron con alborozo la noticia, se comentó que era como mirar la “huella de Dios”.

La síntesis de elementos ligeros

La radiación de microondas es la radiación electromagnética más antigua que disponemos. No hay manera de ver a través de señales electromagnéticas cómo era el universo antes de sus 300.000 años de edad porque antes era opaco. Como aun no disponemos de telescopios de neutrinos (que fueron emitidos antes que los fotones) o de ondas gravitacionales, debemos buscar un plan B con miras a someter a prueba las predicciones del big bang y a la vez afinar sus detalles.

La estrategia a mano nos la da la síntesis de elementos ligeros. En efecto, como hemos señalado, entre 1 seg. y unos cuantos minutos después del big bang el rango de temperatura es apropiado para la síntesis nuclear. En instantes anteriores la energía térmica es demasiado grande e impide que se formen núcleos. Después de varios minutos los protones no tienen suficiente energía para acercarse a las distancias en la que actúa la fuerza nuclear. Entre esos instantes las leyes de la física nuclear permiten predecir qué cantidad se produce de helio-4 (2 protones y 2 neutrones), helio-3 (2 protones y 1 neutrón), deuterio (1 protón y 1 neutrón) y litio-7. Esas proporciones de elementos ligeros son las que se observan en el universo, sobre todo en regiones alejadas.

El caso del deuterio es relevante porque no hay mecanismos astrofísicos capaz de sintetizarlos. El núcleo del deuterio es muy inestable y tiende a disgregarse o a agruparse con otro y formar un núcleo de helio. De modo que el deuterio que existe viene de la nucleosíntesis primordial. Los cálculos teóricos se ajustan asombrosamente bien a lo observado de modo que estos elementos, fósiles de la evolución, le dan credibilidad al modelo del big bang al menos hasta tiempos de 1 seg. después de iniciada la expansión.