

Energía en cosmología

11.1. Introducción histórica a la cosmología

11.1.1. Observaciones básicas del Universo

Se atribuye a Galileo el primer uso del telescopio para observaciones astronómicas. Previo a estos tiempos, el hombre sólo disponía de sus ojos como instrumentos para indagar sobre la naturaleza del cosmos. Las observaciones a simple vista nos muestran las fases diurnas y nocturnas del día; lo que logramos entender como la revolución de nuestro planeta sobre su eje y la presencia del Sol. En la fase nocturna es fácil distinguir la Luna, nuestro satélite, estrellas, agrupaciones de estrellas en diversas formas; siendo la más destacada la *Vía Láctea*.

Curiosamente, antes del uso del telescopio ya se distinguía la existencia de algunos de los planetas; aunque no se conociese bien su naturaleza en esa época. Ellos se podían diferenciar de las estrellas por su lento movimiento en el firmamento nocturno respecto del resto de las estrellas. Es así que Mercurio, Venus, Marte, Júpiter y Saturno se pueden distinguir fácilmente de esta forma.

Respecto de la Vía Láctea, llevó mucho tiempo el entender su naturaleza. La Vía Láctea es nuestra propia *galaxia* vista desde adentro.

Una galaxia es la agrupación de mayor tamaño que forman las estrellas. En las galaxias también se pueden encontrar gases y polvo; como así también agrupaciones menores de estrellas como los cúmulos estelares.

Sabemos que las otras estrellas son astros parecidos al Sol, pero que están mucho más lejos.

11.1.2. Sobre las unidades de distancia

En situaciones astronómicas se usan otras unidades de las que estamos acostumbrados para medir distancias, por lo que nos referiremos brevemente al tema.

La unidad de medida usual para longitudes es el metro, usado por el Sistema Internacional de Unidades. Sin embargo, para medir distancias astronómicas se usan otras unidades. La llamada unidad astronómica es, básicamente, la distancia media Tierra-Sol, denotada por u.a. y tiene el valor de $u.a. = 149.597.870,66 \text{ km}$.

El *año luz* es la distancia que recorre la luz en el vacío en el lapso de un año; es así que aproximadamente un año luz $= 9.454.000.000.000.000 \text{ m}$. Por ejemplo, la distancia del Sol al sistema estelar más cercano, Alfa Centauro, es de aproximadamente 4,3 años luz. La estrella más cercana, Próxima Centauro, está a 4,22 años luz de nuestro sistema.

Otra unidad de medida que usan los astrónomos es el parsec; con la relación de que

un parsec=3,26 años luz.

En lo que sigue usaremos la unidad de años luz para las distancias.

Ahora que hemos adoptado una unidad de medida podemos responder a la pregunta:

¿a qué distancia está el centro de nuestra galaxia?

Está a aproximadamente 25.000 años luz. Por otro lado el radio de la galaxia se estima en aproximadamente 50.000 años luz. La galaxia tiene una forma aproximada de disco con brazos espirales en su interior. El espesor de la galaxia es difícil de medir pero se estima que es algo más de 5.000 años luz.

11.1.3. Sobre la naturaleza de las galaxias

Una observación a simple vista del cielo nocturno, aquí en el hemisferio sur, nos permite ver la Vía Láctea y las nubes de Magallanes. Para poder verlas tenemos que estar en un lugar donde no haya iluminación artificial cercana y permitir que nuestros ojos se acostumbren a la visión nocturna. En la foto de la figura 11.1 se observa la Vía Láctea y la Nube Grande de Magallanes. Surge la pregunta natural:

¿qué clase de formación son las Nubes de Magallanes?

Por un lado, se podría creer que son agrupaciones de estrellas que están dentro de nuestra galaxia. Pero, un estudio detallado muestra que, en realidad, son galaxias menores, que están en la vecindad de la nuestra. En efecto, la distancia a la Nube Grande de Magallanes es de unos 169.000 años luz; lo que la ubica fuera de nuestra galaxia.

En el hemisferio norte se puede observar otro objeto nebuloso en la constelación de Andrómeda, que hoy reconocemos como la galaxia de Andrómeda, que está a unos 2.000.000 años luz de nosotros.

La clarificación sobre la naturaleza de los objetos nebulosos observados por los astrónomos, sólo comenzó hace menos de un siglo. En abril de 1920, en una reunión de la Academia Nacional de Ciencias en Washington D.C. se presentó un debate [Kip87] sobre si los objetos nebulosos que presentaban forma espiral eran objetos cercanos dentro de nuestra galaxia, o eran objetos lejanos similares a nuestra propia galaxia.

Pocos años después se pudo probar, de trabajos de Edwin Powell Hubble (1889-1953), que la nebulosa de Andrómeda, efectivamente, estaba fuera de nuestra galaxia aunque, originariamente, la ubicó más o menos a la mitad de su distancia real.

Se llegó así a la conclusión que, tanto había objetos nebulosos dentro de nuestra galaxia como galaxias que aparentan ser objetos nebulosos por la gran distancia a la que están. De esta manera se dedujo que la estructura del Universo a gran escala estaba dominada por la distribución de galaxias en el mismo. De la observación de las galaxias cercanas se puede encontrar que las mismas están separadas por una distancia promedio de unos 350.000 años luz.

A muy gran escala la distribución de galaxias parece ser más o menos homogénea. Pero a escalas menores se observan agrupaciones que forman estructuras. Un ejemplo es el llamado cúmulo de Virgo; éste es un *cúmulo de galaxias* que contiene aproximadamente unas 2.500 galaxias. El cúmulo de Virgo está aproximadamente a 60.000.000 años luz.



Figura 11.1. Visión del cielo nocturno sobre el cerro Paranal en Chile. Además de la Vía Láctea se observa la Nube Grande de Magallanes hacia la derecha de la foto.

11.1.4. La paradoja de Olbers

En las distintas estaciones del año, notamos que podemos ver distintas constelaciones; las cuales no cambian de forma. Tampoco se observa que la Vía Láctea cambie de forma ni lugar relativo respecto de las constelaciones. O sea, las estrellas distantes, la Vía Láctea, las nebulosas cercanas, las galaxias aparentan tener un lugar fijo en la esfera celeste.

Esta observación invita a pensar que tal vez el Universo está formado por una distribución estática de galaxias, cada una con sus millares de estrellas y nebulosas locales. Pero si esto es así; entonces surge también la llamada paradoja de Olbers. En 1823, Wilhelm Olbers (1758-1840) envía un artículo a publicar que plantea el

siguiente interrogante: si el Universo está formado por una distribución ilimitada y estática de galaxias, las cuales albergan estrellas; entonces en cualquier dirección que mirásemos tarde o temprano encontraríamos una estrella. Por lo tanto desde ese punto del firmamento vendría luz proveniente de la superficie de una estrella. Pero esto sería cierto para todo punto en la esfera celeste. Por lo que se esperaría que de todo punto del cielo, sea de día o de noche, deberíamos ver luz con la intensidad que vemos la luz del Sol.

Todo esto obviamente contradice el hecho que el cielo nocturno (o sea cuando no está el Sol) es oscuro. Por lo cual se deduce que el Universo no puede estar formado por una distribución ilimitada y estática de galaxias.

En realidad, estas ideas fueron presentadas previamente [Kip87] por el astrónomo suizo Jean-Philippe de Loys de Cheseaux (1718-1751) en un libro; por lo que probablemente no se le debería haber puesto el nombre de la paradoja de Olbers; que nosotros no elegimos, sino que mencionamos con su nombre usual.

Una situación análoga, para entender la paradoja de Olbers, es pensar en un bosque como muestra la figura 11.2. Si se tratase de un bosque infinito, entonces, no importa qué dirección mirásemos siempre nuestra vista encontraría un árbol.



Figura 11.2. Fotografía del bosque de los arrayanes. Si el bosque fuese infinito, tarde o temprano nuestra vista encontraría la visión de un tronco (fotografía tomada por el autor).

Se podría pensar que la explicación más fácil para resolver esta paradoja sería asumir que existe algún tipo de materia entre las galaxias que, a pesar de ser muy tenue, absorbe la luz y especialmente oscurece la luz proveniente de las galaxias más lejanas. Pero en realidad, esto no resolvería el tema, dado que esta materia alcanzaría un equilibrio termodinámico con la radiación proveniente de las estrellas hasta alcanzar una temperatura semejante. De esta forma, terminaría emitiendo radiación similar a la que emiten las estrellas; por lo que nuevamente todo el cielo brillaría como la superficie de una estrella.

11.1.5. La expansión del Universo: la ley de Hubble

La explicación de la paradoja de Olbers llegaría por otro lado. Pero antes de presentarla debemos recordar el llamado efecto Doppler. Un ejemplo clásico del efecto Doppler es el que se detecta por un observador estacionario cuando pasa una locomotora, u otro vehículo, tocando una sirena. Mientras la locomotora se acerca al observador, notamos que el sonido se siente más agudo. En cambio, cuando se aleja, se nota que el sonido se percibe más grave. Esto se puede entender de la siguiente manera; el sonido emitido por una sirena se puede asumir como una perturbación periódica del aire, que tiene crestas y valles. Cuando la locomotora se acerca al observador, éste detecta digamos más crestas por segundo, que cuando la locomotora está quieta. En cambio, cuando la locomotora se aleja, el observador detectará menos crestas por segundo que cuando está quieta. Los mismos efectos se detectarían si la locomotora estuviese quieta y fuese el observador el que se mueve. En general, cuando la distancia entre observador y emisor disminuye con el tiempo, las frecuencias detectadas aumentarán y viceversa si las distancias aumentan con el tiempo, las frecuencias detectadas disminuirán.

Con la luz sucede un fenómeno análogo; de tal manera que cuando un emisor se aleja de un observador, éste detecta la luz más rojiza que la original. Mientras que si la distancia entre emisor y observador va disminuyendo con el tiempo, el observador verá una luz más azulada que la original. En la vida cotidiana, estos efectos sobre la luz son imperceptibles, debido a que las velocidades a que estamos expuestos son muy bajas. Pero estos efectos pueden ser notables si las velocidades involucradas son altas.

Todo esto quiere decir que se puede inferir el movimiento de acercamiento o alejamiento de las galaxias mediante el efecto Doppler. Esto es, en la medida que la luz proveniente de las galaxias tengan un corrimiento hacia el rojo o hacia el azul, podremos medir su velocidad. En general se observa que la mayoría de las galaxias muestran un corrimiento al rojo.

La pregunta que surge es:

¿muestran las distintas velocidades de las galaxias algún patrón?

Por ejemplo, se podría intentar relacionar la velocidad de recesión con su distancia. Esto nos lleva al problema de estimar las distancias a las galaxias. Esto no es una tarea fácil; pero la primera aproximación al problema podría ser suponer que las galaxias tienen más o menos el mismo tamaño. Luego, las galaxias más lejanas deberían verse más pequeñas. En 1924, Carl Wilhem Wirtz publicó un artículo donde anunciaba que había encontrado que las velocidades de recesión de las galaxias

aumentaban con la distancia a las mismas.

Posteriormente, en 1929, E. P. Hubble, usando un método más preciso para medir distancias, publica un artículo en el cual muestra que la relación entre velocidad y distancia es muy sencilla; es una relación lineal, de la forma:

$$\text{velocidad de recesión} = H \times \text{distancia}; \quad (11.1)$$

donde H es la misma constante para todas las galaxias. A la constante H se la conoce desde entonces como la constante de Hubble y a la ecuación (11.1) como la ley de Hubble.

En aquel tiempo, se determinó el valor de la constante con mucho error. Al presente, el valor de la constante de Hubble observado es de aproximadamente 72 kilómetros por segundo por mega parsec, que se escribe como 72 km/s/Mpc. Notar que la unidad final del parámetro de Hubble es 1/s; dado que las unidades de distancia se cancelan.

¿Cuán universal es la ley de Hubble?

Se debe entender que la ley de Hubble es una ley fenomenológica aproximada. Las galaxias que están más lejos la cumplen en mayor medida. En cambio las galaxias que están más cerca y que por lo tanto deberían tener poca velocidad de recesión; están afectadas fuertemente por las interacciones gravitacionales entre sus vecinos cercanos. A modo de ejemplo se puede notar que la galaxia de Andrómeda se mueve hacia nosotros. Se dice que las galaxias tienen velocidades peculiares, debido a las interacciones cercanas, las que provocan pequeños desvíos de la ley de Hubble.

11.1.6. El principio cosmológico

A primera vista, esta observación del Universo, pareciese indicar que estamos en una situación privilegiada del mismo; pues todo parece alejarse de nosotros, como si tuviésemos alguna clase de repelente cósmico. Pero pensándolo un poco vemos que no tenemos motivo para pensar que estamos en una ubicación privilegiada. Como analogía pensemos que en un globo desinflado, como los que se usan en las fiestas de cumpleaños, hacemos marcas con una fibra, esparcidas por todo el globo. Supongamos que enchufamos el globo a un tubo de gas para inflarlo y observamos la posición de las marcas respecto de una de ellas en particular, a medida que el globo se está inflando. Lo que veremos es que las otras marcas se alejan de la elegida; sin que ninguna esté en el centro de nada. Si elegimos otra marca como punto de referencia, observaremos lo mismo.

La suposición de que no estamos ubicados en un punto especial del Universo, y que el mismo debe tener la misma apariencia desde cualquier punto de observación se lo conoce como el *principio cosmológico*.

11.2. Pasando la película para atrás: la gran explosión

11.2.1. La edad del Universo

Si la ley de Hubble, expresada en la ecuación (11.1) fuese constante en el tiempo, tendría una consecuencia inmediata. Esto surge de considerar la distancia a las otras

galaxias que satisfacen dicha ley. Inmediatamente concluimos que habrá un tiempo en el pasado en el cual todas las galaxias estaban juntas. Dicho de otra manera si las velocidades a las distintas galaxias es constante en el tiempo; entonces existe un único tiempo en el pasado en el cual las distancias a cualquiera de las galaxias nos darían cero.

¿Cuándo ocurrió esto, en que todas las galaxias estaban juntas?
¿Cuándo ocurrió esta gran explosión, el llamado “Big Bang”?

El cálculo de este tiempo ha ido variando al perfeccionarse nuestro conocimiento del Universo.

Actualmente se calcula que la gran explosión ocurrió hace unos 13.700.000.000 de años. Esto es probablemente uno de los conocimientos más notables que haya alcanzado el hombre.

El Universo tiene un comienzo.

La idea de que el Universo tiene un comienzo, causa mucho escozor en general, tanto en la gente común como en los letrados. A tal punto que muchos han intentado salvar esta imagen con alguna teoría que pueda evitar este hecho.

11.2.2. El tamaño del Universo

Recordando que existe una velocidad máxima para las interacciones, y por lo tanto para la materia; y tomando en cuenta que existe un tiempo de origen del Universo, llegamos a la conclusión que no podemos obtener información de distancias infinitas, sino de una distancia finita. Esta distancia máxima es aproximadamente el producto de la edad del Universo, multiplicada por la velocidad de la luz. Ya hemos mencionado la edad del Universo anteriormente, por lo que deducimos que esta distancia máxima es 13.700.000.000 años luz. Este es el tamaño del Universo observable. Se cree que hay aproximadamente 10^{11} galaxias en el Universo observable.

11.3. La radiación cósmica de fondo

¿Cuáles serían las consecuencias de que la gran explosión cósmica fuese asociada a una época de gran temperatura?

En la década de 1940, George Gamow, sugirió la posibilidad de que la gran explosión estuviese asociada a un evento de altas temperaturas. En una situación así se tendría que la materia y la radiación electromagnética tendrían la naturaleza del estado térmico determinado por la temperatura.

Sucede que la materia, a una dada temperatura, emite y absorbe radiación electromagnética caracterizada por dicha temperatura. Más aún, la radiación tiene una estructura particular, con un espectro cuyo máximo está determinado por la temperatura. Esto está asociado a la denominada *radiación de cuerpo negro* y al espectro se lo conoce como *espectro de Planck*. Así, por ejemplo, el Sol emite como un cuerpo negro cuya superficie está como a unos 6.000 grados centígrados. El máximo del espectro de radiación, para un cuerpo negro a esta temperatura, es casualmente dentro del espectro visible. Esto es, nuestro organismo se ha adaptado a vivir en un planeta cerca de

una estrella como el Sol; por lo que desarrolló un sistema de órganos sensoriales visuales que tienen detección máxima en el máximo del espectro de radiación.

Si bien al presente observamos una estructura en el Universo donde sobresalen las estrellas, los cúmulos estelares, las galaxias y los cúmulos galácticos; es concebible que en una época anterior el Universo mostraba una estructura distinta donde materia y radiación electromagnética estaban en equilibrio termodinámico y donde no se habían formado todavía estas grandes estructuras. Esto también está sugerido por el hecho de que las interacciones gravitatorias son atractivas; por lo que uno infiere que si al presente se tienen grandes concentraciones de materia, en un tiempo anterior, esta materia estaba desperdigada por el espacio de una manera más homogénea.

Cuando la temperatura es muy alta la materia no está en forma de átomos, sino que se la puede considerar una mezcla en que protones, neutrones, electrones y fotones están libres, chocando unos con otros. En un gas que se expande, sin perder calor, la temperatura va bajando. A medida que baja la temperatura se van formando los núcleos atómicos más livianos. Cuando la temperatura llega a unos 3.000 grados centígrados, gran parte de los electrones se asocian con los núcleos livianos que se han formado. En ese momento, las partículas que forman la materia son neutras; o sea, no tienen carga eléctrica. Cuando esto pasa, los fotones ya casi no chocan con la materia y el Universo se torna transparente. De esta forma los fotones forman un gas de radiación que no interacciona con el gas de la materia desde ese momento.

Si uno pudiese observar estos fotones, estaría obteniendo información de la época en que la radiación se desacopló de la materia. En particular, como el Universo está en expansión, obtendríamos información de materia que se está alejando de nosotros a gran velocidad; dado que está muy lejos. Debido al corrimiento al rojo, veremos la radiación de un cuerpo negro no a 3.000 centígrados, sino a una temperatura mucho menor.

La pregunta natural es, entonces:

¿se observa esta radiación cósmica?

La respuesta es afirmativa; pero la primera observación fue inesperada, como relatamos a continuación.

Un par de científicos, Arno Penzias y Robert Wilson, trabajando para la Bell Laboratory en Holmdel, Nueva Jersey, encontraron un exceso de ruido en una antena de micro ondas que estaban probando. Esta antena estaba diseñada para recibir señales del satélite Echo. En julio de 1965, estos autores publican en el *Astrophysical Journal*, un artículo de una página y media donde anuncian haber encontrado un exceso de ruido que se puede atribuir a una fuente con temperatura de 3,5 grados Kelvin [K]. Se usan los grados Kelvin para denotar la temperatura absoluta; que pone el cero en -273,15 grados centígrados.

Se le llama escala absoluta pues -273,15 grados centígrados es la temperatura mínima que puede tener un objeto, lo que en la escala absoluta coincide con 0 K. Un cuerpo a 0 K tendría todos sus átomos sin ninguna vibración térmica; por lo que alcanzada esta situación no se lo puede enfriar aún más.

En la Universidad de Princeton, también en el estado de Nueva Jersey, un grupo de investigación liderado por Robert H. Dicke había estado buscando esta radiación cósmica. Entre sus colaboradores estaba P. James E. Peebles. Otros dos investigadores del grupo,

Peter G. Roll y David T. Wilkinson se embarcaron en la tarea de medir la radiación cósmica de fondo. Cuando Penzias se enteró de esta iniciativa del grupo de Princeton, se pone en contacto con ellos y les informa de lo que habían medido. El grupo de Princeton se dio cuenta que Penzias y Wilson habían observado la radiación cósmica de fondo. Por este motivo en la misma revista del *Astrophysical Journal*, aparece un artículo, firmado por Dicke, Peebles, Roll y Wilkinson, precediendo al de Penzias y Wilson, donde argumentan que el exceso de ruido detectado por Penzias y Wilson es la radiación cósmica de fondo, proveniente con igual intensidad desde distintas direcciones del espacio. El grupo de Princeton parece no haber tenido información del trabajo de Gamow, por lo que ellos no mencionaron a Gamow, ni a las investigaciones de su grupo.

Como una curiosidad, mencionamos que el Profesor Peebles ha venido a Córdoba en un par de ocasiones invitado por investigadores del Observatorio Astronómico de la Universidad Nacional de Córdoba. El autor ha tenido la oportunidad de asistir a uno de los cursos que dictó.

Como la observación de Penzias y Wilson fue realizada a una sola longitud de onda, lo que es lo mismo a una dada frecuencia; todavía quedaba por determinar si la radiación cósmica que se estaba detectando tenía el aspecto de la radiación termalizada; o sea, la correspondiente a la llamada radiación de cuerpo negro, mencionada anteriormente.

Posteriormente se hicieron una serie de observaciones con diferentes técnicas para confirmar la hipótesis de que verdaderamente se trataba de una detección de la radiación de fondo. Para ello era necesario corroborar que la radiación coincidiese con la “radiación de cuerpo negro”. En los primeros años de la década del 90 finalmente se hicieron observaciones espectaculares que sin lugar a dudas confirmaron las sospechas. Estas observaciones se realizaron con un conjunto de instrumentos a bordo del satélite COBE (Cosmic Background Explorer). En 1992 tuvimos la oportunidad de recibir la primicia directamente de uno de los encargados de la observación, John C. Mather, durante el congreso GR13 (13th International Conference on General Relativity and Gravitation), llevado a cabo en La Falda, Argentina, que organizó nuestro grupo de investigación. Posteriormente, en 2006, George F. Smoot y John C. Mather recibieron el Premio Nobel de Física por estas observaciones.

Las observaciones del satélite COBE dejaron en claro varios puntos:

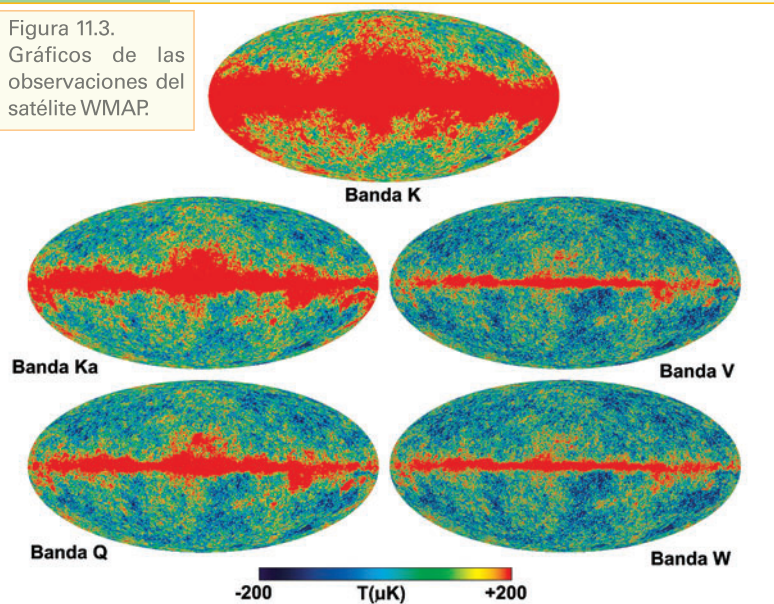
- que la radiación cósmica de fondo correspondía a la de un cuerpo negro.
- que la temperatura de la radiación era de $2,728 \pm 0,004$ K.
- que tenía una componente dipolar; la cual se puede entender debido a que nos movemos respecto de la radiación cósmica de fondo.
- que sustraída la componente dipolar se observan variaciones de la temperatura de la radiación cósmica de fondo del orden de un cienmilésimo.

Esta última contribución se la entiende como proveniente de la estructura de la distribución de materia al momento en que la radiación se separó de la misma.

Las últimas observaciones satelitales de la radiación cósmica de fondo se han realizado con el satélite que se lo conoce con el nombre de WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe). Este satélite fue lanzado al espacio en junio de 2001. De las observaciones del WMAP y de los modelos teóricos se entiende que:

- la edad del Universo de 13.700.000.000 años.
- la constante de Hubble tiene un valor de 71,9 km/s/Mpc

Figura 11.3.
Gráficos de las
observaciones del
satélite WMAP.



Los gráficos de las observaciones de WMAP usando la proyección Mollweide se muestran en la figura 11.3. En estos gráficos se ha elegido como línea horizontal media al determinado por el plano de la galaxia; o sea, de la Vía Láctea. En el mismo se pueden ver las observaciones del satélite en distintas bandas; donde, debido a que estamos en el interior de nuestra galaxia, se dificultan las medidas cerca del plano de la misma; por ello aparecen las zonas rojas cerca de la línea horizontal media. Las observaciones fuera de la zona ecuatorial de nuestra galaxia muestran una estructura con variaciones del orden de un cienmilésimo de la temperatura media de la radiación cósmica de fondo.

Los cosmólogos suelen graficar la información de la radiación cósmica de fondo de la esfera celeste haciendo uso de la llamada 'proyección de Mollweide'. Esta proyección, introducida por Karl Brandan Mollweide (1774-1825), permite graficar los puntos de una esfera en una porción de una superficie plana.

Por ejemplo, cuando se usa la



Figura 11.4.
Proyección Mollweide de la superficie terrestre.

proyección Mollweide para los puntos de la esfera terráquea, se obtiene la figura 11.4. En este gráfico se toma como línea media horizontal al Ecuador; mientras que los polos pasan a estar en los puntos superior e inferior.

11.4. La abundancia cósmica de los elementos y la densidad de materia

11.4.1. Procesos nucleares a altas temperaturas

La imagen que tenemos del Universo es que en el pasado hubo una gran explosión donde las temperaturas eran extremadamente altas; digamos más de 10^{12} K. En tales condicio-

nes la materia estaba disociada en las partículas que la forman, para fijar ideas pensemos en una mezcla principalmente de protones, neutrones, electrones y otras partículas elementales. Los protones y los neutrones son las partículas que encontramos en los núcleos atómicos; los protones con carga eléctrica positiva y los neutrones con carga cero. Por otro lado los electrones forman en los átomos, una nube con carga eléctrica negativa, que hace que los átomos sean neutros.

A estas altas temperaturas no era posible tener núcleos atómicos pesados pues estos hubiesen sido desintegrados por los choques con las otras partículas. Pero a medida que el Universo se iba expandiendo y la temperatura descendía, fue termodinámicamente posible la formación de algunos núcleos atómicos livianos. En la tabla 11.1 mencionamos algunos de los núcleos atómicos livianos.

La llamada nucleosíntesis del Big Bang parece ofrecer uno de los métodos más confiables para obtener información de los primeros minutos del Universo. En ese tiempo se cristalizó la química cósmica que proviene de la gran explosión; siendo los elementos más abundantes el hidrógeno con una abundancia de aproximadamente el 75%, y el helio con una abundancia de aproximadamente el 25%; con muy poca incidencia del resto de los elementos.

Debido a que en las reacciones nucleares que se producen en las estrellas normales como el Sol, se generan núcleos más pesados que el hidrógeno; como así también en las explosiones estelares como las supernovas se producen núcleos más pesados todavía, cuando uno quiere observar la abundancia de los elementos primordiales se debe tener cuidado de observar en regiones que no presenten contaminación por la producción de estrellas o explosiones de estrellas.

El ajuste de la observación de los elementos primordiales con la teoría permite determinar parámetros que caracterizan la evolución del Universo. En particular por medio de estos cálculos se estima la cantidad de materia normal, llamada en cosmología materia bariónica; pues a los nucleones se los llama bariones, desde el punto de vista de las clases de partículas. Se denomina Ω_B a la relación entre la densidad de masa bariónica ρ_B y la llamada *densidad crítica del Universo* ρ_c , que estudiamos a continuación.

11.4.2. Densidad crítica del Universo

En los modelos más sencillos del Universo, la densidad crítica es la que caracteriza la distinción entre densidades menores para los cuales la expansión sería ilimitada en el tiempo. En contraposición, para densidades mayores que la densidad crítica se tendría una expansión seguida de una etapa de colapso; dado que la alta concentración de materia no permitiría el ‘escape’ ilimitado entre vecinos. Para entender esto con un poco más de detalle, pensemos en la situación análoga del tiro vertical de un proyectil disparado por un cañón, en la superficie de un planeta. Esto nos conduce a la noción de *velocidad de escape*. Se llama así a la velocidad necesaria para que el proyectil se pueda alejar indefinidamente del planeta; por ejemplo, para la Tierra la velocidad de escape es de alrededor de 11 km/s. Esto quiere decir que si tuviésemos un cañón que pudiese disparar un proyectil a 14 km/s, entonces este proyectil no volvería a la superficie de la Tierra. Pero ahora supongamos que pudiésemos achicar al tamaño de la Tierra, o sea, disminuir su radio. Como la fortaleza de la aceleración gravitatoria en la superficie depende del

Núcleo	protones	neutrones
hidrógeno	1	0
deuterio	1	1
tritio	1	2
³ He	2	1
helio [He]	2	2
⁶ Li	3	3
litio [Li]	3	4

Tabla 11.1.
La segunda y tercera columna indican el número de protones y neutrones. El ³He es un isótopo del helio; cuyo símbolo es He. En forma similar ⁶Li es un isótopo del litio.

radio del planeta, a medida que lo achicamos, crece la aceleración gravitatoria en la superficie. De la misma manera, crece el valor de la velocidad de escape. Esto quiere decir, que existirá un radio, lo suficientemente pequeño, tal que la velocidad de escape sea mayor que la velocidad que provee nuestro cañón. A medida que achicamos al planeta, le estamos aumentando la densidad media; por lo que vemos que existirá una densidad media crítica tal que por encima de la misma, nuestros proyectiles no podrán escapar del planeta. Si bien esta es una analogía, nos da la idea básica de por qué debe existir una densidad crítica del Universo asociada a una velocidad de expansión; que está determinada por la llamada constante de Hubble. La densidad crítica está dada en término de la constante de Hubble H por $\rho_c = \frac{3}{8\pi G} H^2$ donde G es la constante de la gravitación y π el número pi, cuyo valor es aproximadamente 3,14159. Recordando que anteriormente vimos que $H = 72 \text{ km/s/Mpc}$, se tiene que el valor de la densidad crítica es aproximadamente de $\rho_c = \frac{(3 \times (2,3334 \times 10^{-18})^2)}{(8 \times 3,14159 \times 6,674 \times 10^{-11})} \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 9.738 \times 10^{-27} \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$. Éste es un número extremadamente pequeño; tomando en cuenta que la masa de un protón es $m_p = 1,673 \times 10^{-27} \text{ kg}$, vemos que la densidad crítica del Universo equivale a tener unos 6 átomos de hidrógeno por metro cúbico. Estos niveles de baja densidad no se pueden lograr ni en los más avanzados laboratorios de la Tierra cuando se desea hacer el mejor de los vacíos. Siendo que la densidad crítica parece ser tan baja cuando se compara con densidades de la vida cotidiana, en primera instancia uno pensaría que seguramente la densidad media del Universo es mayor que esta densidad crítica. Pero, en realidad debemos considerar que estamos en la superficie de un planeta, que está en un sistema solar, en una galaxia y que hay mucho espacio sin materia visible entre las galaxias. Volviendo a la densidad de la materia normal, o bariónica, el cálculo y las observaciones de la abundancia cósmica de los elementos, daría un valor de:

$$\Omega_B = \frac{\rho_B}{\rho_c} \approx 0,04. \quad (11.2)$$

Esto indica que no hay densidad de materia normal suficiente para provocar un recolapso del Universo.

Sin embargo hay indicaciones que sugieren que hay en el Universo más materia que la materia bariónica. Por ello es que es frecuente escuchar sobre la llamada materia oscura. Las indicaciones de que probablemente hay más materia que la bariónica provienen de varios tipos de estudios. En escalas galácticas, de la observación de las velocidades de rotación en galaxias espirales. En escalas mayores, de la dinámica de galaxias en cúmulos galácticos. Además hay evidencias que provienen de las llamadas *lentes gravitacionales*.

El fenómeno de lentes gravitacionales se produce cuando la luz pasa muy cerca de una gran concentración de masa, de tal forma que afecta la trayectoria de los rayos luminosos; ocasionando un efecto parecido al que produciría una lente ubicada en el mismo sitio. Recordar las discusiones de la sección 10.1.4.

Además de la materia oscura, en los últimos tiempos también se está hablando de energía oscura. Con este último término se señala la posible necesidad, aún de otra clase de fuente que probablemente esté afectando la geometría y expansión del Universo. La manera más sencilla de incluir estos fenómenos es por medio de una constante cosmológica en las ecuaciones de campo. Los primeros argumentos, para la necesidad de otra clase de materia, provienen del estudio que relacionan la luminosidad con el corrimiento al rojo de supernovas muy distantes. Pero recientemente también parece haber indicios que provienen del estudio

de luminosidad de galaxias distantes [Me08, Ge08].

11.4.3. La química cósmica

Con el objeto de abordar otro aspecto de la química cósmica, aquí volvemos al proceso de nucleosíntesis en el Universo temprano.

En los primeros cuatro minutos del Universo se formaron varios núcleos atómicos primordiales que han marcado la química del mismo. Los cálculos detallados del proceso llamado nucleosíntesis del Big Bang, muestran que el remanente de la gran explosión es, como dijimos anteriormente, de aproximadamente 75% de hidrógeno, un 25% de helio y una muy pequeña cantidad de otros elementos livianos. Impresionantemente estas son las proporciones medidas en las observaciones.

La expansión fue lo suficientemente rápida como para que no hubiese tiempo para que se formasen núcleos muy pesados. Esto conduce a la pregunta:

¿cómo es que en la superficie de la Tierra encontramos núcleos pesados?

La explicación proviene del entendimiento de la vida de las estrellas. En las estrellas se produce una reacción nuclear que inicialmente transforma hidrógeno en helio. Cuando el hidrógeno se agota, comienza otra reacción nuclear en donde el helio se transforma en elementos más pesados. Cuando se agota el combustible nuclear, la estrella colapsa, y debido al colapso gana energía que se aprovecha para otras reacciones nucleares, en las cuales se producen elementos más pesados. Estos procesos ocurren en explosiones espectaculares llamadas novas y supernovas. Luego de una explosión de una supernova, se expele mucho material a los alrededores de la estrella. En general este material luego colapsa nuevamente debido a la atracción gravitatoria, formando un disco planetario que a su turno da formación a posibles planetas. En el centro de este sistema, en general se forma una nueva estrella, con los elementos que quedaron de la vida de la estrella anterior.

Todo esto nos conduce a pensar que nuestro sistema planetario proviene de la explosión de una estrella anterior. Es así que la muerte de una estrella anterior es lo necesario para que existamos ahora.

11.5. La singularidad inicial y el horizonte cosmológico

Históricamente, la primera teoría que describió las interacciones gravitacionales, fue formulada por Newton hace más de tres siglos atrás. Isaac Newton además presentó una teoría para los problemas mecánicos en general. El éxito contundente de la teoría newtoniana para describir, en particular, las observaciones del sistema planetario hizo pensar que se estaba al borde del conocimiento científico posible en estos temas. Sin embargo, luego se pudo formular una teoría para los fenómenos electromagnéticos, asociada a trabajos de Maxwell y Lorentz entre otros. Hacia fines del siglo diecinueve, se pudo notar que las ecuaciones de Maxwell que describen los fenómenos electromagnéticos, denotaban una estructura para el espaciotiempo distinta a las sugeridas por el marco teórico de la mecánica newtoniana.

Esta situación paradójica, incentivó la imaginación de los investigadores para hallar posi-

bles respuestas al tema. No fue hasta comienzos del siglo veinte que la situación se clarificó debido al trabajo de Albert Einstein. Por un lado Einstein aclaró la noción de espaciotiempo que se debía usar en el marco teórico del electromagnetismo; esto condujo a lo que hoy llamamos la *relatividad especial*. Pero además Einstein formuló las bases de una teoría relativista de la gravitación, que se conoce con el nombre de *relatividad general*. En esta teoría, la distribución de materia provoca alteraciones de las características geométricas del espaciotiempo; apareciendo así la llamada curvatura del mismo. A modo de ejemplo de una superficie de dos dimensiones con curvatura, podemos mencionar la superficie de una esfera. Al ser el espaciotiempo una variedad de cuatro dimensiones, es difícil hacer una representación concreta de dicha curvatura. Sin embargo es fácil conocer sus efectos. Por ejemplo, los rayos luminosos deben ser alterados por la presencia de un cuerpo masivo. Esto fue predicho por Einstein y en 1919, en un eclipse solar, se pudo observar que efectivamente la luz proveniente de estrellas, casi detrás del Sol, se curvaban un poco. Este fue uno de los experimentos que convencieron a la comunidad científica de la realidad de la teoría de la relatividad general.

Alrededor de la década de 1960, mediante trabajos de Roger Penrose y Stephen Hawking, se pudo probar que la teoría de la relatividad general, predecía la posible aparición de singularidades en el espaciotiempo. Cualitativamente podemos distinguir dos tipos de singularidades: aquellas que aparecen en los fenómenos de colapso, cuando se forma un agujero negro, y las singularidades cósmicas.

Pues bien, sucede que cuando tomamos en cuenta la distribución de materia observada y su movimiento, el uso de la relatividad general predice que en el pasado hay una singularidad del espaciotiempo.

¿Qué significa la existencia de una singularidad en el pasado?

Seguramente, no implica ningún peligro para nuestra vida cotidiana. Pero implica que el tiempo tuvo un comienzo. Esto es; uno por ejemplo puede pensar en que va al cine y comienza a ver una película a las 12:00 horas. Si bien la película comenzó a las 12, uno puede pensar y aún acordarse, de tiempos anteriores; o sea, uno siempre puede concebir tiempos anteriores a un suceso dado. El tema con la singularidad inicial del espaciotiempo, es que cuando uno usa la estructura matemática de la teoría, se puede probar como teorema que no se pueden extender curvas temporales hacia el pasado indefinidamente. Con esto queremos decir que existió un comienzo cósmico del tiempo. O sea que no tiene sentido preguntar, por ejemplo, en qué estado estaba la materia antes del comienzo del tiempo; ¡pues no había ni tiempo ni espacio donde pudiese estar ni existir esa materia!

Esto que conmueve a cualquier ser con raciocinio, es uno de los desafíos intelectuales a que nos ha sometido el avance del conocimiento de la física en el siglo veinte. Otro desafío es el provocado por el marco teórico de la física cuántica.

Si consideramos la existencia de la singularidad cósmica inicial con el hecho de que existe una velocidad máxima de las interacciones, llegamos a la conclusión de que en cada momento un observador sólo puede 'ver' una región limitada del Universo. Esto es debido a que cuando observamos un objeto que está digamos a n años luz, debido a que la información viene viajando con velocidad c , la información nos llega de una época anterior, más en concreto un tiempo $\Delta t = n \text{ años luz}/c = n \text{ años}$. Pero si existe un límite para nuestro pasado, debido a la existencia de la singularidad inicial, significa que Δt no puede

ser mayor que la edad del Universo y por ende la distancia máxima n en años luz que podemos observar coincide con el número que da la edad del Universo en años. O sea, si la edad del Universo es alrededor de 13.700.000.000 años, entonces la distancia máxima que podemos observar es 13.700.000.000 años luz. Es por esto que a pesar que nuestra concepción del Universo es que el espacio es ilimitado, la región observable es limitada; por lo que en ocasiones se habla del radio del Universo observable. Notar que este radio crece segundo a segundo, pues el Universo se sigue haciendo más viejo (por decirlo de alguna forma biológica); esto es, el tiempo sigue avanzando.

Decimos, entonces que existe un horizonte cósmico, al que se le da el nombre de *horizonte de partículas*. La existencia de este horizonte indica que, en todo momento, existen partículas (galaxias) que no podemos observar, pero que eventualmente en un tiempo futuro, dado que el horizonte crece con el transcurrir del tiempo, se lo podrá hacer.

Ahora retomemos el hecho de que la radiación cósmica de fondo sea tan suave en la esfera celeste. Luego de que se sustrae el efecto dipolar, debido a nuestro movimiento respecto de la radiación cósmica de fondo, lo que resta es una radiación de cuerpo negro con temperatura constante, salvo por pequeñas variaciones del orden de un cienmilésimo. Esas últimas variaciones tienen información de la estructura del Universo al momento en que la radiación electromagnética se desacopló de la materia. Consideremos la radiación cósmica de fondo que proviene de dos direcciones opuestas en la esfera celeste. Esta radiación ha venido viajando, por casi la edad del Universo, proveniente de dos puntos ubicados a casi dos veces el radio del Universo observable. Al momento del desacople de la radiación con la materia, estos dos puntos, origen del viaje de la radiación, tenían un horizonte de partículas determinado por la corta edad del Universo en esa época. Estos horizontes no tenían ninguna zona en común. La pregunta natural que surge es:

¿cómo es posible que la radiación cósmica de fondo proveniente de dos direcciones opuestas en la esfera celeste tiene las mismas características físicas, si provienen de dos zonas que no tenían conexión causal entre ellas?

Para entender un poco más esta pregunta, avancemos un poco más en lo que se entiende por conexión causal. El principio de causalidad es probablemente el principio más básico en toda ciencia fáctica. En su concepción más sencilla el principio de causalidad dice que todo evento sólo puede ser afectado por eventos en su pasado. Ejemplo: el vidrio de la ventana se rompió pues, previamente tiré la pelota en dirección hacia la ventana. El tema es que, como vivimos en un Universo con una singularidad inicial, nuestro pasado es finito. Cuando consideramos los eventos de emisión de radiación cósmica provenientes de dos puntos opuestos en la esfera celeste, estos se hallan tan separados que sus pasados, más precisamente, sus pasados causales, no tienen ningún punto de intersección en común. O sea que todo lo que afectó a un evento de emisión, no tenía conexión causal con lo que pudo afectar al otro evento de emisión.

Algunos cosmólogos han encontrado en esto un problema lo que ha provocado la aparición de modelos especulativos para intentar resolverlo.

Pero en realidad, hay otra manera de mirar esta situación en la que el problema desaparece. Sin entrar en detalles técnicos intentaremos dar una idea intuitiva de la resolución. Consideremos un sistema concreto. El sistema que tenemos en mente es el de un televisor en colores en el presente. Uno se puede preguntar:

¿cómo es que hoy podemos tener en frente nuestro un aparato como un televisor en colores, desde el punto de vista causal?

La respuesta a esta pregunta la podemos hacer tan larga como queramos. Por ejemplo, si en mi casa tengo un televisor es probablemente debido a que lo compré. Si lo compré es porque es útil; esto es si existe un sistema de emisión de imágenes que de algún modo tengo interés en ver. Además si lo compré es porque alguien lo fabricó. La fábrica supo qué hacer. El conocimiento empleado por la fábrica necesitó de la evolución tecnológica de la sociedad; lo que a su vez necesita de la evolución de toda la vida en la Tierra para que se llegue a la situación en que aparece la especie humana con algo de inteligencia para hacer cosas como televisores. Esto requiere de la formación de todo el sistema planetario que, como ya vimos, proviene de la explosión de una estrella anterior que estaba en esta zona de la galaxia. Pero una estrella como el Sol vive por algo así como 8.000 millones de años; que es probablemente lo que necesitó de vida la estrella anterior antes de explotar. Como el sistema solar tiene aproximadamente unos 4.500 millones de años de existencia, concluimos que para tener un sistema tan complejo como nuestro televisor en colores, se necesita un pasado de algo así como 12.500 millones de años. Estamos induciendo a pensar que la complejidad necesita explicación y que la misma requiere en general de un desarrollo temporal. Claro que podríamos tener la visión de imaginar un televisor en colores en el primer segundo del Universo; pero entonces no tendríamos cómo explicar su existencia, a no ser que se acuda a creencias dogmáticas, que no es lo que intentamos seguir en este escrito. En definitiva, es natural que muy en los comienzos del Universo la descripción de los sistemas físicos fuese cada vez más y más sencilla; lo que no contradice la existencia de altas temperaturas en aquellas épocas tempranas. El hecho que, por un lado, la teoría relativista de la gravitación prediga la existencia de una singularidad inicial cósmica y, por el otro, de que los datos que tenemos del Universo temprano, nos indican una gran homogeneidad e isotropía inicial; son hechos que concuerdan y se dan fortaleza mutua de consistencia y realidad.

11.6. Evolución de la densidad de energía

Luego que la materia y la radiación electromagnética se desacoplan, cuando el Universo tenía unos 400.000 años de edad, la ulterior evolución de la densidad de energía de materia y la densidad de energía de la radiación tienen un comportamiento temporal disímil.

Si denotamos con \mathcal{E}_m y \mathcal{E}_r las densidades de energía de la materia y radiación respectivamente, se tiene que

$$\mathcal{E}_m(t)A(t)^3 = \text{constante} \quad (11.3) \quad \text{y} \quad \mathcal{E}_r(t)A(t)^4 = \text{constante}; \quad (11.4)$$

donde $A(t)$ es el llamado parámetro de expansión, que básicamente es proporcional a la distancia entre los objetos cosmológicos.

Por otro lado, de la ecuación 7.23, hemos visto que la densidad de energía de la radiación electromagnética termalizada es proporcional a la cuarta potencia de la temperatura; por lo que para la temperatura de la radiación se tiene la relación

$$T(t)A(t) = \text{constante}. \quad (11.5)$$

Para simplificar, supongamos que al tiempo cósmico $t_0 = 400.000$ años, la densidad total de la energía \mathcal{E}_T estaba constituida en 50% por densidad de energía de materia y otro 50% por densidad de energía de radiación. Además, también tomemos que la temperatura de la radiación a este tiempo era de $T(t_0) = 3.000$ K. Luego tendremos que

$$T(t_0) A(t_0) = T(t) A(t) = \text{constante}; \quad (11.6)$$

de donde se obtiene

$$3.000A(t_0) = 2,728A(t) \quad (11.7)$$

Luego, deducimos que vale la relación

$$\begin{aligned} \mathcal{E}_T(t) &= \mathcal{E}_m(t) + \mathcal{E}_r(t) \\ &= \left(\frac{A(t_0)}{A(t)} \right)^3 \mathcal{E}_m(t_0) + \left(\frac{A(t_0)}{A(t)} \right)^4 \mathcal{E}_r(t_0) \\ &= 0,5 \mathcal{E}_T(t_0) \left[\left(\frac{A(t_0)}{A(t)} \right)^3 + \left(\frac{A(t_0)}{A(t)} \right)^4 \right] \\ &= 0,5 \mathcal{E}_T(t_0) [7,519 \times 10^{-10} + 6,837 \times 10^{-13}]; \quad (11.8) \end{aligned}$$

lo que implica que la densidad de energía total desde el momento del desacople de materia y radiación ha disminuido en un factor 10^{-10} y además que al presente la contribución de la radiación cósmica de fondo a la densidad de energía total es del orden de 10^{-3} ; por lo cual se dice que estamos en una era dominada por la evolución de la materia. La figura 11.5 muestra un esquema de la evolución cósmica de la densidad de energía de la radiación.

11.7. Resumen de la historia del Universo

En la siguiente tabla se enumeran algunos eventos a lo largo de la historia del Universo desde la gran explosión.

Tiempo	Temperatura [K]	Evento	Descripción
$10^{-43} s$	10^{30}	Era de Planck	A estas escalas no sólo no tenemos información sobre los estados de la materia, sino que no se conoce la estructura del espaciotiempo, que incluso podría ser discreta.
menor a 0,01 s	mayor a 2×10^{12}	interacciones fuertes dominan	Gran cantidad de mesones π sometidos a la llamada interacción fuerte; se conoce poco del estado de la materia en estas condiciones; la física de épocas tempranas cosmológicas ha dado origen a muchas especulaciones, como por ejemplo el fenómeno de inflación.
0,01 s	10^{11}	balance térmico de nucleones	Electrones y positrones igual en número; protones y neutrones igual en número; la radiación domina; hay alrededor de 10^9 fotones por nucleón.

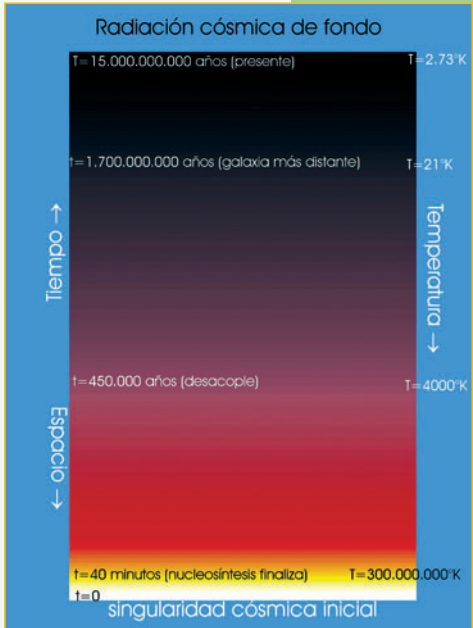


Figura 11.5. Esquema de la evolución temporal de la densidad de energía de la radiación. El tiempo aumenta verticalmente, mientras que la temperatura disminuye; esto es debido a que a medida que evoluciona el Universo con tiempos cada vez mayores, la expansión provoca que la temperatura de la radiación vaya disminuyendo. Por otro lado, si obtenemos información, por medio de la radiación, de tiempos cada vez menores, implica que estamos observando espacios cada vez más lejos de nosotros. Los colores de fondo intentan dar una idea de la coloración de la radiación termalizada; pero es, solamente, indicativo. Así, mientras al presente el cielo nocturno es oscuro, cuando el Universo tenía aproximadamente 400.000 años de edad, el cielo correspondía a un cuerpo a una temperatura aproximada de 3.000 K, lo que lo hacía incandescente con una tonalidad rojiza.

Tiempo	Temperatura [K]	Evento	Descripción
0,12 s	3×10^{10}	neutrones decaen a protones	Hay un 38 % de neutrones y 62 % de protones entre los nucleones.
1,1 s	10^{10}	neutrinos se desacoplan	Se crea la radiación de neutrinos cósmica de fondo.
14 s	3×10^9	cesa creación de pares	Debajo de esta energía térmica la radiación de fotones deja de producir pares electrón positón; hay 17 % de neutrones y 83 % de protones.
3 m 2 s	10^9	nucleosíntesis de átomos livianos	Se forma tritio, helio 3 y helio.
3 m 46 s	9×10^8	nucleosíntesis está terminada	Los núcleos de deuterio son estables.
34 m 40 s	3×10^8	nucleosíntesis ha finalizado	La temperatura es demasiado alta para que los electrones se ligen a los núcleos, por lo que no hay átomos estables todavía.
400.000 años	3.000	combinación (recombinación)	La llamada era de recombinación es cuando los núcleos de hidrógeno y de helio capturan electrones y el Universo se torna transparente; se forma la radiación cósmica de fondo. Hasta esta época el Universo estaba dominado por radiación. A partir de esta época el Universo estará dominado por materia (o sea, la densidad de energía debida a materia es mayor que la radiación).
10^9 años	20	formación galaxias	Alrededor de este tiempo la distribución de materia caracteriza la formación de estructura que conduce a las galaxias.
14×10^9 años	2.7	vida inteligente	Seres vivos estudian cosmología.

Tabla 11.2. Tabla de algunos eventos cósmicos.

11.8. Recapitulación

La imagen que tenemos del Universo, por un lado es extremadamente sólida en términos de cuestiones gruesas; esto es, **tenemos certeza en una serie de temas, como por ejemplo:**

- el Universo está en expansión; siguiendo en primer orden la ley de Hubble;
- a escalas muy grandes el Universo tiene propiedades de homogeneidad e isotropía;
- hay una radiación cósmica de fondo a una temperatura de 2,7 K;
- la gran explosión cósmica fue a altísima temperatura;
- el espaciotiempo tiene una singularidad inicial cósmica.

Al mismo tiempo hay otras cuestiones que todavía no se entienden bien, entre las que podemos mencionar:

- no tenemos suficiente información para describir confiablemente el primer centésimo de segundo del Universo;
- la formación de estructura, esto es, estrellas, galaxias y su distribución;
- la relación materia-antimateria;
- la naturaleza de la materia oscura.

De todas formas la imagen que ya está corroborada constituye uno de los avances más significativos en la historia de la ciencia y ha redefinido profundamente el entendimiento que tenemos del cosmos.