

Historia del Universo

Alexander Moreno Sánchez
Universidad Nacional de Colombia
Observatorio Astronómico Nacional
Bogotá D. C, Colombia.
amorenosa@unal.edu.co

Abstract

En este trabajo brevemente mostramos algunos aspectos relevantes de la historia del universo, se comentan algunas etapas de evolución del mismo, igualmente, se desarrolla el esquema teórico del modelo cosmológico estándar, finalmente se comentan algunos problemas inherentes al modelo del big-bang.

1 Cosmología Estándar

Existe algo misterioso, oculto, maravilloso, asombroso, evocador, cuando pensamos en el universo como un todo, cuando observamos las bastas y complicadas estructuras que nos rodean, cuando intentamos comprender esa enorme diversidad que constituye nuestro universo, en fin, observar y estudiar el universo produce emociones contradictorias, es profundamente emocionante pero también bastante preocupante, es una tarea apasionante pero también desorbitante, es bastante placentero pero igualmente inquietante, crea la sensación de magnificencia pero también de impotencia, de cierta manera esturdiar, comprender y analizar el universo requiere en verdad bastante decisión, bastante coraje. A diferencia de lo que la apreciación inmediata del universo nos ofrece según la cuál el mismo está lleno de indescifrables misterios, hoy en día contamos con impresionantes avances científicos los cuales nos han permitido llegar a un entendimiento muy profundo y completo sobre el cosmos, su origen, constitución y dinámica. No quiere decir esto que ya conocemos todas las fichas del rompecabezas, es bastante probable que sobrevengan alucinantes y espectaculares descubrimien-

tos en un futuro cercano. Los objetos astronómicos que llenan el universo no son sistemas muy complejos los cuales pueden ser estudiados con la misma rigurosidad aplicada en experimentos u observaciones de laboratorio. De hecho, un agujero negro o una estrella de neutrones es inmensamente menos complejo que una mosca o una célula. Que el universo no es susceptible al escrutinio racional es uno de los numerosos mitos que han surgido al momento de abordar el problema del origen del universo para una audiencia no iniciada en el tema. De forma similar, los medios de comunicación transmiten información incompleta y fuera de contexto presentado innumerables crisis o problemas del Big Bang, cuando en realidad se trata de las dificultades normales por las que pasa una teoría científica. Para disipar la confusión reinante se hace preciso hacer una revisión a los fundamentos que soportan la cosmología estándar, haciendo énfasis en los logros a nivel experimental u observacional[1, 2, 3, 4].

El universo se originó hace aproximadamente 15 mil millones de años en un colosal evento en el cual el espaciotiempo comenzó a expandirse rápidamente. No fue este singular evento una gran explosión, como los fuegos artificiales brotando sus luces quemadas en un espacio afuera que estaba listo ha recibirlas. Más bien fue el espaciotiempo mismo a quien le dio por hincharse, expandirse, crearse como una torta en el horno por acción de la levadura. 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 habían estrellas, ni galaxias ni planetas.

Justo después de pasados los tres primeros minutos se formaron los núcleos de los elementos primordiales más livianos, como el Hidrógeno y el Helio. Después, el espacio siguió en expansión mientras que la temperatura bajaba en igual proporción 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.

¿Por qué el Big Bang ha sido aceptado como el modelo estándar cosmológico? ¿Existen modelos alternativos? ¿Seguirá la expansión para siempre o se frenará para luego contraerse en un punto? ¿cuál es el origen del Big Bang? Preguntas fundamentales como éstas han atraído las mentes más brillantes de las diversas disciplinas que tocan el origen, la existencia y el destino de la humanidad[1, 2, 3, 4, 5].

La evolución del universo puede entenderse según el modelo estándar de la cosmología el cual parte de principios físicos básicos los cuales hasta la fecha se han verificado mediante la observación y constante exploración espacial. Este modelo conduce a diferentes etapas y períodos de evolución que permiten comprender y analizar múltiples facetas del universo. En consideración de lo anterior contamos los siguientes principios de la cosmología.

1.1 Espaciotiempo en expansión

El spaciotiempo está “expandiéndose”, el corrimiento al rojo de galaxias y la consecuente ley de Hubble lo indican así; la interpretación de tal fenómeno explica que tal corrimiento al rojo se debe a un efecto Doppler Cosmológico producido por la “expansión del mismo continuo spaciotiempo” que existe entre las galaxias. El concepto de un “spaciotiempo en expansión”, sugiere, que el Universo es el todo absoluto, un proceso de creación continua de espacio-tiempo, o un proceso de estiramiento infinito, o en el mejor de los casos el espacio-tiempo realmente “se crea” a partir de algo hasta ahora no explicado u observado[10, 11].

1.2 Principio Cosmológico

El Universo es isotrópico y homogéneo a gran escala, los datos observacionales sobre distribución de radiogalaxias, quasares, anisotropías en la RCF, entre otras, indican que tal hipótesis es cierta a escalas mayores a los 120 Mpc, a escalas menores se observa una distribución de galaxias en forma de ‘esponja’ con ‘filamentos’ y vacíos[11, 12, 13]. Se han estudiado modelos cosmológicos que postulan hipótesis alternas: por ejemplo el universo surgió de un estado isotrópico pero inhomogéneo y en su evolución se produjeron procesos dinámicos que dieron origen a la homogeneidad del mismo. También se han propuesto modelos radicalmente distintos a estos modelos, como es el caso del ‘Modelo Fractal del Universo’[13] en la distribución de galaxias. Puede decirse que se han desarrollado varios modelos alternos que se pueden contrastar con el modelo de la cosmología estándar, pero sus predicciones o presupuestos no son fáciles de incorporar o probar en la descripción u observación astronómica, por lo tanto, he allí la importancia y aceptación del modelo estándar[12, 13, 14].

Siendo un poco más rigurosos se conoce en la actualidad que la isotropía del universo conduce a la homogeneidad del mismo, por lo cual el principio básico es de que el universo es isotrópico, y hasta donde se tiene confirmación, mediante la observación de la radiación cósmica de fondo, este principio no se ha logrado desvirtuar.

1.3 Etapa Inflacionaria

La etapa Inflacionaria del universo, fue propuesta para resolver algunos problemas originales del Big-Bang, se asume que durante la evolución del universo, el mismo paso a través de un período de expansión superluminica¹, modificando las condiciones del Big-Bang, y haciendo que el universo alcanzará una geometría plana a través de fluctuaciones de densidad de energía, necesarias para crear las estructuras observadas hoy en día. Los datos astronómicos recopilados por experimentos observacionales con satélites y otros, representan un apoyo muy fuerte a favor de la existencia de

¹Esta expansión superluminica, no entra en contradicción con el límite de velocidad máxima postulada por la relatividad especial, ya que lo que se expande es el spaciotiempo mismo, no se involucra la materia sobre la que se impone tal límite.

tal período. Sin embargo, tales evidencias no son concluyentes, es decir no se conoce evidencia fundamental del campo energético que produce la inflación en el universo, más aun, el universo en la época actual atraviesa una segunda fase de inflación, conduciendo a lo que se conoce como expansión acelerada del universo, la cual se atribuye en principio a la constante cosmológica, pero, existe una fuerte contradicción porque los valores de dicha constante no se ajustan con los resultados conocidos de la física de altas energías, estos son algunos elementos que hacen desconocido el período inflacionario del universo[14, 15, 16, 17, 18].

2 Etapas de evolución del Universo

En consideración de los principios que fundamentan la cosmología estándar y bajo la fuerte consideración observacional se pueden formular las siguientes etapas de evolución del universo, donde cada una de ellas da origen a elementos y características observadas en el universo las cuales al final determinan la configuración del universo actual.

2.1 Origen del Universo

Se considera que el universo se ‘originó’ a partir de un estado hasta ahora desconocido, el cual es objeto de un gran número de especulaciones de tipo teórico que intentan determinar su estructura y esencia. Se puede interpretar tal estado como una "singularidad", surgiendo el universo de la misma, hoy en día existen algunas razones teóricas y experimentales, que hacen pensar que tal singularidad no debió haber existido[14, 15].

Al “instante” en que nuestro universo surgió se le llama "tiempo cero" , es decir $t = 0$, aun cuando la noción de "tiempo", tal como se entiende en física convencional, pierde su sentido; según algunas teorías de Gravitación Cuántica (como Quantum Loop Gravity, Supercuerdas, Teoría M, Non-Commutative Geometry) el espaciotiempo pierde su sentido convencional cuando nos acercamos al origen del universo[16, 17, 18].

Inmediatamente, después del origen del universo nuestro universo empieza a expandirse y a sufrir una

serie de "transiciones de fase" , las cuales dan origen a las diferentes estructuras y condiciones físicas, que definen estadios de evolución posteriores.

2.2 Era de Planck

Esta etapa del universo está fuertemente dominada por efectos cuánticos, la descripción más apropiada de las condiciones físicas imperantes durante esta era, provienen de la Cosmología Cuántica, pero la teoría en sí misma aún se encuentra en etapa de desarrollo y su progreso depende de nuevas teorías como Supercuerdas, Teoría-M, Quantum Loop Gravity, entre otras, con la salvedad de que todos los modelos sobre Cosmología Cuántica, presuponen que el modelo de la cosmología estándar es correcto[19, 20, 21, 22, 23, 24].

Según algunos modelos, basados en teorías de Supercuerdas y/o teoría-M, nuestro universo tenía 10 u 11 dimensiones y podría haber estado formado por un "mar" de cuerdas y branes que interactuaban entre si mediante una sola fuerza, en un espaciotiempo, no conmutativo. Al final de esta era el universo sufrió nuevamente una transición de fase, en la cual el universo paso de 10/11 dimensiones a tener 4 dimensiones extendidas y 6 dimensiones compactas, y la única fuerza se dividió en dos fuerzas, la gravedad y una fuerza ‘unificada’[22, 23].

En otros modelos basados en Quantum Loop Gravity, el espaciotiempo presentaba cuatro dimensiones y las entidades físicas presentes se movían e interactuaban en un espacio no continuo, fluctuante, cuya topología cambiaba rápidamente, en la cual al final de la era, el universo sufre una transición de fase y la fuerza fundamental debió haberse dividido en dos[24, 25].

2.3 Era Intermedia

El universo atraviesa por una nueva etapa en la cual la fuerza ‘unificada’ se divide en dos partes, la interacción fuerte y la interacción electrodébil. En esta transición de fase surgen varios ‘defectos topológicos’ en la estructura del universo, estos defectos no son más que regiones que no realizan la transición de fase correspondiente quedando ‘atrapada’ materia en la fase o estado anterior. Los defectos topológicos, que se consideran que surgieron son : los Monopolos Magnéticos (estructuras puntuales), Cuerdas Cómicas (estructuras uni-

dimensionales), Paredes de Dominio (estructuras bidimensionales), Texturas (estructuras más complejas). Puede pensarse que estas estructuras formaban ‘burbujas’ en la estructura del universo, y en la medida en que este se expandía, dichas burbujas se juntaban quedando atrapadas éstas formaciones entre las paredes[27].

2.4 Era Inflacionaria

La era inflacionaria es una era o etapa introducida, por conveniencia, para solucionar algunos de los problemas que presenta el Modelo FLRW Estándar. La etapa inflacionaria predice que el universo se originó en un estado muy pequeño y que subitamente sufrió una "inflación", a una velocidad superlumínica, la cual hizo que el universo alcanzara un tamaño extraordinariamente mayor o macroscópico, en contraste al tamaño infinitesimal que tenía al comienzo[28]. Se considera que el ‘universo observable’, es sólo una pequeña porción del universo total luego de la inflación. Se estima que la inflación fue causada por un campo escalar conocido como "Inflatón"[29].

El período inflacionario produce, entre otros efectos, que la densidad de materia/energía de aquel universo infinitesimal se diluya, decayendo casi a cero, y que la geometría del espaciotiempo, paulatinamente fuera adoptando una forma plana, ésto predice y explica porque los datos observacionales hoy día indican que el universo es plano, lo cual no puede ser explicado por el Big-Bang original, también, permite comprender la homogeneidad e isotropía de la RCF, ya que el período inflacionario conserva el equilibrio térmico del universo infinitesimal, y permite explicar la formación de la estructura a gran escala del universo, ya que durante el período inflacionario cualquier inhomogeneidad en la densidad de materia/energía es amplificada, y son las que dan origen a las estructuras observadas, las mismas que no pueden ser explicadas por el Big-Bang original[28, 29].

Luego de la época inflacionaria, el universo se sigue expandiendo de la forma prescrita por el Big-Bang, ocasionando que el Inflatón decaiga homogéneamente en forma de partículas elementales produciendo un recalentamiento del universo[29].

2.5 Era Post-Inflacionaria

En esta era el universo evoluciona como es descrito por el Big-Bang. El universo presenta nuevamente una transición de fase durante la cual la fuerza electrodébil se divide en dos: la interacción débil y la electromagnética, y los constituyentes fundamentales del universo son la energía y materia oscura, como también los fermiones (como quarks, leptones y sus antipartículas, entre otras partículas, descritas por modelos GUT's, SUSY, Supercuerdas) y los bosones (como, fotones, gluones, bosones vectoriales, etc)[27, 28, 29].

2.6 Era Hadrónica

Ocurre otra transición de fase, la transición de Quarks a Hadrones, en la cual los quarks y gluones se agrupan para formar los Hadrones (mesones y bariones), y la aniquilación entre éstos y los antihadrones empezaba a dominar la evolución. La aniquilación no se daba de forma equilibrada, respecto a la creación de pares, debido a que la temperatura disminuía rápidamente, no había energía suficiente para favorecer la creación, originándose la asimetría materia-antimateria, considerándose, según algunos modelos de unificación, que la asimetría se da por el decaimiento de cierto tipo de partículas. Mientras estas condiciones físicas se daban, el universo se expandía, la separación entre partículas se hacía cada vez mayor, produciendo que las interacciones de corto alcance (fuerte y débil) ya no se hicieran sentir, empezando a dominar en el Universo la interacción gravitacional y electromagnética[27, 28, 29].

2.7 Era Leptónica

El residuo de la aniquilación partícula-antipartícula de materia hadrónica es mucho más pequeño que la materia leptónica (electrones, neutrino, etc.), haciendo que la densidad de materia esté dominada por éste tipo de partículas. Es durante esta era que se produce la nucleosíntesis, ya que las condiciones de temperatura permiten que se den procesos de recombinación entre las partículas. La expansión del universo continua y la aniquilación leptón-antileptón es mucho mayor que la creación de los mismos ya que la temperatura y densidad de energía siguen bajando[27, 28, 29].

2.8 Era de Radiación

Durante las diferentes etapas de aniquilación de pares o de materia-antimateria, se ha producido una gran cantidad de residuos conformados en su mayoría por fotones y neutrinos, siendo la cantidad de ellos mucho mayor que la cantidad de materia hadrónica y leptónica, de tal manera que ahora la evolución del universo esta gobernada por la densidad de radiación. El contenido del universo es de energía oscura, materia oscura, fotones, neutrinos, protones, neutrones, electrones, ondas gravitacionales, y algunos otros residuos de la inflación y de otras etapas[27, 28, 29].

2.9 Era de la formación de Estructura

En la medida en que la temperatura sigue bajando, ocurre un período de recombinación, la temperatura es lo suficientemente baja como para permitir que los electrones se combinen con los núcleos estables de la era anterior, dándose la formación de átomos neutros estables. Debido a este tipo de formación la radiación electromagnética ya no interactuaba con la materia, quedando libre y se dice que el universo se vuelve transparente a la radiación, conociéndose este residuo electromagnético como radiación cósmica de fondo, la cual en el momento de desacople de la materia tenía una temperatura de unos $3000K$, llegando a una temperatura de $2.79K$. Durante este período es que se da la formación de estructuras (galaxias, cúmulos, supercúmulos, filamentos, vacíos, etc.) a gran escala en el universo: el modelo aceptado hoy día que describe la formación de estructura, es el modelo Λ -Cool Dark Matter [Λ CDM].

En esta etapa, la densidad de materia se hace mucho más grande y la evolución del universo ahora esta gobernada por la materia. Los halos de Materia Oscura, de diferente tamaño se forman y en el centro de los mismos, existen gigantescas nubes de materia normal que comienzan a fragmentarse y a colapsar bajo la acción de la gravedad[25, 26, 27, 28, 29].

2.10 Era Actual

La edad actual del universo depende de que tipo de modelos son usados para determinarla. El valor

numérico recientemente obtenido de esta edad, es de alrededor de 13500 millones de años, como mínimo[29].

Según las observaciones recientes y según las posibilidades del modelo, se necesitan conocer varios parámetros (velocidad de expansión, densidad de materia, desaceleración, entre otros) para poder conocer el estado actual del universo y para poder hacer predicciones sobre su evolución futura. Observaciones recientes indican que la densidad de materia del universo es igual a la densidad crítica, por lo que mostraría que vivimos en un universo plano, y también que estamos viviendo en una nueva época: la densidad de Energía Oscura domina sobre la densidad de Materia, por lo cual el universo está en una etapa de expansión acelerada[25, 26, 27, 28, 29].

3 Modelo de Robertson-Walker

El modelo de la cosmología estándar fundamentalmente considera que el universo a gran escala se puede considerar como un fluido ideal, es decir galaxias, cúmulos galácticos, polvo interestelar, entre otros, se encuentran distribuidos de manera homogénea e isotrópica, describiendo la evolución de tal fluido mediante un parámetro denominado factor de escala, el cual depende del tiempo, dicho tiempo se denomina ‘comoving time’², cuando el tiempo transcurre el factor de escala crece, y a su vez si el tiempo retrocede, el factor de escala disminuye, se puede retroceder en el tiempo hasta el origen sin encontrar, aparentemente, ningún impedimento físico para hacerlo, lo cual nos lleva al origen mismo del Universo.

Como consecuencia de la aplicación del principio cosmológico y de algunas consideraciones de simetrías se obtiene la conocida métrica de Robertson-Walker³, la cual permite hacer una descripción física de la evolución del universo como también posibilita la explicación de algunas de las observaciones astronómicas actuales.

Escogiendo coordenadas esféricas (r, θ, ϕ, t) , la métrica toma la siguiente forma

²El comoving time es el tiempo que mide un observador comóvil, es decir un observador en un sistema solidario a la expansión cosmológica.

³La métrica FRW, es la métrica del modelo estándar.

$$ds^2 = dt^2 - R^2(t) \left[\frac{dr^2}{1 - kr^2} + r^2 d\theta^2 + r^2 \text{sen}^2 \theta d\phi^2 \right], \quad (1)$$

Donde $R(t)$ es el factor de escala, k es el índice de curvatura que puede tomar los siguientes valores $+1, 0, -1$. Según lo anterior las componentes del tensor métrico son:

$$g_{00} = t, \quad (2)$$

$$g_{rr} = \frac{R^2(t)}{1 - kr^2}, \quad (3)$$

$$g_{\theta\theta} = r^2 R^2(t), \quad (4)$$

$$g_{\phi\phi} = R^2(t) r^2 \text{sen}^2, \quad (5)$$

En consideración del fluido ideal para el Universo a gran escala se puede construir el correspondiente tensor energía-momentum, el cual adopta la siguiente forma

$$T_{\mu\nu} = (\rho + p)u_\mu u_\nu + pg_{\mu\nu}, \quad (6)$$

expresión en la cual u_μ es la cuadrivelocidad, ρ es la densidad de energía, p es la presión del fluido cosmológico.

Se puede encontrar que $\rho(t) R^3(t) = Cte$, indicando que la energía permanece constante.

Haciendo uso de la ecuación de campo de Einstein, se obtienen las siguientes expresiones

$$3\ddot{R} = -4\pi G(\rho + 3p)R, \quad (7)$$

$$R\ddot{R} + 2\dot{R}^2 + 2k = 4\pi G(\rho - p)R^2, \quad (8)$$

de las cuales se puede obtener la siguiente expresión

$$\dot{R}^2 + k = \frac{8\pi G}{3}\rho R^2, \quad (9)$$

ecuación que permite conocer la dinámica que presenta el factor de escala, que junto con la ecuación de conservación de la energía, se obtiene la expresión siguiente

$$\dot{p}R^3 = \frac{d}{dt} [R^3(\rho + p)], \quad (10)$$

Nos proporciona la forma de determinar la densidad de energía y el factor de escala para distintas etapas en la evolución del Universo, con el conocimiento de una función de estado, $p = p(\rho)$, por ejemplo, la etapa de dominio de materia, en la cual la presión es despreciable, se encuentra que $\rho \sim R^{-3}$; o el caso de dominio de radiación en la cual se puede considerar que la presión tiene la forma $p = \frac{1}{3}\rho$, de tal manera que $\rho \sim R^{-4}$, con los resultados anteriores, y considerando un Universo plano, $k = 0$, se puede determinar la forma aproximada que tendría el factor de escala, para las etapas consideradas, con lo cual para dominio de materia $R(t) \sim Cte$, y para dominio de radiación $R(t) \sim t^{\frac{1}{2}}$ [5].

4 Dominio de Materia

Se conoce hoy día que la densidad de energía de las formas conocidas de radiación en el universo presente es menor de un centésimo de la densidad de la masa restante. lo cual puede indicar que la evolución del universo ha estado regida por materia no relativista, al menos desde el comienzo del tiempo cuando $R(t)$ tenía un centésimo de su valor presente. El estudio de las relaciones empíricas entre corrimiento al rojo, luminosidades, diámetros angulares, y otros, revelan el amplio dominio de materia en el universo⁴.

Las ecuaciones dinámicas que gobiernan el universo durante esta era son ecuaciones donde la densidad de energía toma la forma apropiada para un universo dominado por la materia

$$\frac{\rho}{\rho_0} = \left(\frac{R}{R_0}\right)^{-3}, \quad (11)$$

lo cual nos permite encontrar la densidad actual y el parámetro de curvatura en términos de H_0 , y q_0

$$\frac{k}{R_0^2} = (2q_0 - 1)H_0^2, \quad (12)$$

$$\frac{8\pi G\rho_0}{3} = 2q_0 H_0^2, \quad (13)$$

⁴Si se considera sólo la existencia de materia ordinaria, sin tomar en consideración las observaciones recientes y los nuevos contenidos del universo.

de las cuales podemos obtener una expresión para la dinámica del factor de escala

$$\left(\frac{\dot{R}}{R_0}\right)^2 = H_0^2 \left[1 - 2q_0 + 2q_0\left(\frac{R_0}{R}\right)\right], \quad (14)$$

la solución general de la anterior ecuación es

$$t = \frac{1}{H_0} \int_0^{\frac{R}{R_0}} \left[1 - 2q_0 + 2q_0\left(\frac{R_0}{R}\right)\right]^{-1/2} dR, \quad (15)$$

expresión que nos permite conocer el tiempo, en particular, la edad presente del universo

$$t_0 = \frac{1}{H_0} \int_0^1 \left[1 - 2q_0 + 2q_0\left(\frac{R_0}{R}\right)\right]^{-1/2} dR, \quad (16)$$

concluyendo que para cualquier q_0 positivo, la edad del universo debe ser menor que el tiempo de Hubble[5, 6, 7, 8]

$$t_0 < \frac{1}{H_0}. \quad (17)$$

5 Densidad y presión del Universo actual

En el universo actual se puede determinar la densidad de energía y la presión tomando las siguientes expresiones

$$\rho_0 = \frac{3}{8\pi G} \left(H_0^2 + \frac{k}{R_0^2}\right), \quad (18)$$

$$p_0 = -\frac{1}{8\pi G} \left[\frac{k}{R_0^2} + H_0^2(1 - 2q_0)\right], \quad (19)$$

donde $H = \frac{\dot{R}}{R}$, $q = -\frac{\ddot{R}R}{\dot{R}^2}$, el sub-índice cero indica la época actual.

De la expresión para la densidad de energía se sigue que la curvatura espacial $\frac{k}{R_0^2}$ es negativa o positiva, de acuerdo a si el valor de ρ_0 es menor o mayor que un cierto valor de densidad crítica, $\rho_c = \frac{3H_0^2}{8\pi G} \sim 1.1 \times 10^{-29} \left(\frac{H_0}{75 \text{ Km/sec/Mpc}}\right)^2 g/cm^3$.

Considerando que el universo en el tiempo presente se encuentra dominado por materia no relativista, se puede asumir que $p_0 \ll \rho_0$, si esto es así, se puede deducir la expresión que permite encontrar la curvatura espacial en términos de los parámetros observables H_0 , y q_0

$$\frac{k}{R_0^2} = (2q_0 - 1)H_0^2, \quad (20)$$

también se puede obtener, una expresión que relacione la densidad actual con la densidad crítica, mediante el parámetro observable q_0

$$\frac{\rho_0}{\rho_c} = 2q_0, \quad (21)$$

para $q_0 > \frac{1}{2}$ el universo es positivamente curvo, mientras que para $q_0 < \frac{1}{2}$ el universo es negativamente curvo. Si por ejemplo consideramos $q_0 \simeq 1$ y $H_0 \simeq 75 \text{ km/sec/Mpc}$, valores deducidos de la observaciones de corrimiento al rojo y luminosidad, encontraríamos que la densidad del universo es alrededor de $2\rho_c$, es decir $2 \times 10^{-29} g/cm^3$. Pero desafortunadamente este resultado no está de acuerdo con la densidad observada de masa galáctica, encontrando que $\rho_G \simeq 3.1 \times 10^{-31} g/cm^3 \left(\frac{H_0}{75 \text{ km/sec/Mpc}}\right)^2$, esto es menor que el valor anotado anteriormente, por un factor de $\frac{\rho_G}{\rho_c} \simeq 0.028$.

Si la masa del universo principalmente fuera la masa de las galaxias, en tal caso $q_0 \simeq 0.014$ si $\rho_0 \simeq \rho_G$ lo cual implica que el universo sea negativamente curvo o abierto. Pero este valor de desaceleración no esta de acuerdo con los resultados encontrados mediante observaciones de luminosidad y corrimiento al rojo, lo cual da $q_0 \simeq 1$. Sin embargo, si se acepta tentativamente que q_0 es del orden de la unidad, se puede concluir que la densidad de masa es de alrededor de $2 \times 10^{-29} g/cm^3$ que se debe de encontrar en algo fuera de las galaxias normales.

Si la densidad de energía del universo es dominada por partículas altamente relativistas, entonces la presión es $p_0 = \frac{\rho_0}{3}$, obteniéndose las siguientes relaciones

$$\frac{k}{R_0^2} = (q_0 - 1)H_0^2, \quad (22)$$

$$\frac{\rho_0}{\rho_c} = q_0, \quad (23)$$

el parámetro de desaceleración, para el cual $k = 0$ y $\rho_0 = \rho_c$, es ahora $q_0 = 1$, en contraste con $q_0 = \frac{1}{2}$, y la densidad requerida para un q_0 y H_0 es la mitad de lo necesario para un universo lleno de polvo, donde la densidad de energía toma la forma apropiada para un universo dominado por la materia

$$\frac{\rho}{\rho_0} = \left(\frac{R}{R_0}\right)^{-3}, \quad (24)$$

lo cual nos permite encontrar la densidad actual y el parámetro de curvatura en términos de H_0 y q_0

$$\frac{k}{R_0^2} = (2q_0 - 1)H_0^2, \quad (25)$$

$$\frac{8\pi G\rho_0}{3} = 2q_0H_0^2, \quad (26)$$

de las cuales podemos obtener una expresión para la dinámica del factor de escala[29].

Para hacer algunas consideraciones y análisis en el estudio y confrontación de otros modelos cosmológicos, es conveniente tener presente las siguientes ecuaciones claves de la cosmología estándar

$$H^2 = \left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = \frac{8\pi G}{3}\rho - \frac{k}{a^2} + \frac{\Lambda}{3}, \quad (27)$$

$$\frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{4\pi G}{3}(\rho + 3p) + \frac{\Lambda}{3}, \quad (28)$$

$$\omega_i = \frac{p_i}{\rho_i} \quad \rho_i \propto (1+z)^{3(1+\omega_i)}, \quad (29)$$

$$q(z) = -\frac{\ddot{a}}{aH^2} = \frac{1}{2}(1+3\omega), \quad (30)$$

el parámetro de desaceleración esta definido como una cantidad negativa, de tal forma que $q > 0$, implica una desaceleración de la expansión cósmica, $q < 0$, implica una aceleración de la expansión cósmica. Como se mostro anteriormente, la densidad crítica de materia-energía se define como $\rho_c = \frac{3H^2}{8\pi G}$, con la cual tenemos, $\frac{\rho}{\rho_c} = 1$, implica un universo plano $k = 0$, $\frac{\rho}{\rho_c} > 1$, implica un universo positivamente curvo $k = +1$, y si $\frac{\rho}{\rho_c} < 1$, implica un universo negativamente curvo, $k = -1$.

6 Historia térmica del universo

Como sabemos hoy día se observa una radiación cósmica de fondo la cual era más energética en el pasado, debido al efecto de corrimiento al rojo. Es decir el universo tiene una historia térmica, y de los varios aspectos que se pueden considerar, esta por ejemplo el hecho de que la expansión comológica preserva las propiedades de cuerpo negro de una distribución de fotones, de este modo la etapa anterior a los fotones también tiene un espectro Planckiano, pero con alta temperatura $T(z) = T_0(1+z) = 2.73(1+z)K$. Esto, implica que el universo estaba muy caliente en el pasado, y el factor de escala debería estar extremadamente cercano a cero, esto implica que justo después del Big-Bang, el universo debía encontrarse muy caliente: De tal modo, que en esta etapa, se puede esperar que ocurran procesos de muy alta energía; por ejemplo, cuando la temperatura era alrededor de $k_B T \sim 1MeV$, pueden crearse los pares electrones-positrones. Por lo tanto, las partículas de masa m pueden ser generadas a temperaturas $T \gtrsim m$ debido a la producción de pares. Si estas partículas están en equilibrio térmico, la producción y aniquilación de los pares será tal que una especie de partículas tengan una abundancia en equilibrio, caracterizada por la temperatura T [25].

6.1 Equilibrio en el universo temprano

Hoy día se tiene bastante conocimiento de la física a altas energías, ya que se han observado y explorado en los aceleradores desarrollados para tal efecto, es así como conocemos energías del orden de $\leq 100GeV$. A estas temperaturas, la evolución de la expansión cósmica puede ser seguida retrocediendo en el tiempo, asumiendo de hecho que las leyes físicas eran las mismas que tenemos en el presente.

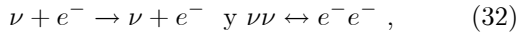
Por ejemplo, a temperaturas de unos pocos MeV , las partículas que eran bastante ligeras para ser producidas por la creación de pares foton-foton son electrones, positrones, neutrinos; estas pueden estar en equilibrio termodinámico con los fotones. De otra parte, protones y neutrones están por ahí, pero con su masa en exceso de $1GeV$, no pueden ser producidas mayormente, y su abundancia mucho menor que la de otras partículas. Estas partículas son mantenidas en equilib-

rio, donde el equilibrio se refiere a equilibrio químico y cinético, y quiere decir que las partículas en el espacio de las velocidades sigue una distribución de equilibrio (distribución de Maxwell-Boltzman). A altas temperaturas, $T \sim 200MeV$, se pueden encontrar piones cargados y neutros y muones y antimuones.

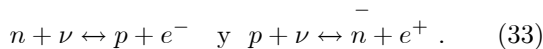
Cuando el universo se expande, la distribución de equilibrio continuamente cambia en el tiempo, ya que la temperatura varía. Pero, como las partículas deben permanecer en equilibrio termodinámico, sus ratas de reacción deben ser suficientemente rápidas para permitir un ajuste al cambiante equilibrio. Como $T \propto a^{-1}$, la rata a la cual cambia T queda bien descrito por la rata de expansión $H = \dot{a}/a$. De tal modo, que la rata de reacción Γ a la cual las partículas interactúan es mayor que la rata de expansión para mantener el equilibrio. Por ejemplo, los electrones se encuentran en equilibrio con los fotones mediante la reacción



la cual describe la creación y aniquilación de los pares; esto sólo puede ocurrir para $T \gtrsim 1MeV$. La energía puede ser intercambiada entre fotones y electrones mediante la dispersión Compton. De otra, parte los fotones pueden ser creados vía bremsstrahlung de pares de partículas cargadas, o vía el doble proceso de dispersión Compton, $\gamma + e^- \rightarrow 2\gamma + e^-$, además los fotones pueden también ser destruidos, es decir por absorción libre-libre. Los neutrinos son mantenidos en equilibrio a través de



y para nucleones, las reacciones típicas incluyen



Como el universo se expande, la densidad de partículas decrece, $n \propto a^{-3}$, de esta forma las rtas de reacción decrecen.

A continuación se mencionarán algunas temperaturas características importantes por algunos hechos:

1. Para $T \sim 1.4MeV$, la rata de reacción de los neutrinos llega a ser menor que la rata de expansión. Ellos por tanto se desacoplan del resto de las partículas y se propagan sin interacción a través del universo hasta la época presente.

2. Para $T \sim 0.7MeV$, los nucleones p y n no están en equilibrio, lo cual tiene varias consecuencias para la constitución química del universo.

3. Con $T \sim 0.5MeV$, los pares e^-e^+ no pueden ser creados por mucho tiempo, ya que la temperatura baja hasta la masa en reposo, por tanto sólo la reacción de aniquilación de los pares será procedente y la energía, más precisamente la entropía, de los pares será transferida a los fotones.

4. Con $T \sim 0.1MeV$, los núcleos atómicos más livianos son producidos vía fusión, siendo el más notable el 4He .

5. Finalmente cuando $T \sim 0.3eV$, los núcleos atómicos y los electrones restantes se combinan en átomos neutros, principalmente H , hasta el punto de la llamada recombinación, donde la materia bariónica en el universo llega a ser neutra. Posteriormente, muy pocos electrones están por ahí, y así los fotones no interactúan mucho más con la materia bariónica. Por tanto, ellos pueden propagarse libremente sin interacción, siendo este el origen de la radiación cósmica de fondo[25, 26, 27].

7 Exitos y Problemas del Big-Bang

El Modelo Estándar de la Cosmología durante su desarrollo ha contado con varios aciertos o predicciones frente a la observación astronómica, entre sus principales aciertos o éxitos, podemos citar los siguientes:

1. Expansión del Universo: el modelo incorpora dentro de su estructura matemática, la expansión cosmológica que se observa en el Universo.

2. Homogeneidad e Isotropía : esta característica del Universo ha sido confirmada por las mediciones a muy grandes distancias de la distribución de galaxias (en el rango óptico), de radio galaxias (en el rango de ondas de radio), de cuasares (en el rango de rayos X y gama) y por las mediciones de la RCF (Radiación Cósmica de Fondo).

3. Origen de la RCF: El modelo predice la existencia de tal radiación, y explica su origen dentro de la evolución del universo.

4. Nucleosíntesis: Los cálculos realizados, dentro del modelo, de los procesos nucleares responsables de la

formación de los primeros elementos en el Universo, indican que debe de existir una cierta proporción o cantidad de elementos primordiales, las cuales han sido confirmadas a lo largo de muchos años de observación.

5. Formación de galaxias y estructuras a gran escala: las simulaciones numéricas realizadas en el marco de la cosmología estándar muestran la formación de estructuras similares a las observadas en el Universo a grandes escalas.

También, durante el desarrollo del modelo estándar y frente al mayor número de observaciones, se ha venido encontrando que tal esquema presenta una serie de inconvenientes, no resolubles dentro del marco convencional, entre los que podemos citar los siguientes[29]:

1. Planitud del Universo, ¿Por qué el Universo es plano?

La densidad de materia determina la geometría promedio del universo, mediciones recientes de la densidad de materia muestran que la misma se encuentra en el valor crítico, es decir tiene el valor justo para que la geometría sea plana, sin embargo este estado es en principio inestable, por lo que se esperaría que la geometría fuese abierta o cerrada, no plana. Esto no puede ser explicado dentro del Big-Bang original, en el cual se recurre a la inflación para explicarlo.

2. Problema del Horizonte:

Mediciones de la Radiación Cósmica de Fondo indican que regiones diametralmente opuestas en el universo tienen la misma temperatura, es decir que la CMB es homogénea e isotrópica en su temperatura, si se lleva este hecho hasta el pasado resulta que es imposible que ocurriese este fenómeno, ya que las regiones diametralmente opuestas nunca estuvieron en contacto, ya que el factor de escala no tiene el mismo valor durante toda la evolución del universo.

3. Fluctuaciones de densidad Primordiales:

En el Big-Bang original las inhomogéneidades en la densidad de energía -materia que dieron origen a las estructuras del universo, no tienen un claro origen, es decir no se tiene una clara explicación de como surgen las inhomogéneidades. La idea de que ocurrió una etapa inflacionaria puede explicar y predecir un amplio espectro de inhomogéneidades, las cuales bajo condiciones especiales dan origen a las estructuras observadas.

4. Sobreproducción de Reliquias Exóticas:

Durante las diferentes transiciones de fase del uni-

verso se produjeron defectos topológicos, que según los cálculos de la física de altas energías predicen una gran producción de ellos, lo cual contradice lo que se observa. Pero si se considera nuevamente la etapa inflacionaria, conduce a que la densidad de tales defectos debió reducirse a cero, lo cual lo haría compatible con las observaciones.

5. Problema del Estado Inicial de Equilibrio Termodinámico y Máxima Entropía:

En el Big-Bang original el universo debió haberse originado en un estado de equilibrio termodinámico y por lo tanto con una entropía máxima, pero surge la pregunta de como pudo originarse el universo en tal estado si no se conoce ningún mecanismo que pueda mantener ese estado a muy altas temperaturas. Asumiendo que el universo es un sistema cerrado, en ese estado se encontraría con máxima entropía lo cual conduciría a que no se diera ningún proceso evolutivo

6. Problema de la Constante Cosmológica:

Según los resultados obtenidos por la teoría de campos cuánticos, la energía del vacío cuántico en el universo debe tener un valor de $\sim 10^{120}$ o $\rho_{vacío} \approx 10^{12} eV$, este vacío cuántico está directamente asociado con la constante cosmológica, la cual según las observaciones astronómicas indican que el valor real de tal constante es cero o un valor muy pequeño $\rho_{\Lambda} \approx 10^{-3} eV$, lo cual contradice lo anotado anteriormente.

7. Problema de la Singularidad Inicial:

El big-bang original lleva a encontrarse con lo que se conoce como singularidad inicial, en tal singularidad las leyes físicas pierden su validez y no se tiene al presente una teoría o mecanismo que permita entender o extrapolar la física hasta la singularidad misma.

8. Problema de las Escalas de Tiempo:

Se han encontrado estructuras en el universo que por su grado de evolución tuvieron que tomar un mayor tiempo que el mismo tiempo que ha tardado en evolucionar el universo hasta la fecha actual, por lo cual no se tiene claridad en las escalas evolutivas del universo.

Estos son algunos de los problemas fundamentales que enfrenta la teoría del Big-Bang original, varios de los cuales son resueltos por el mecanismo de inflación, u otros mecanismos propuestos en los últimos tiempos, en tanto que otros muchos no se explican de forma clara, y allí es donde tiene asidero las nuevas formas de concebir el nacimiento y evolución del Universo.

8 Conclusiones

En este breve trabajo se han mencionado algunos aspectos notables de la cosmología estándar, no pretende ser un trabajo exhaustivo, que los hay muchos, más bien reseñar aspectos importantes que contribuyan a comprender y entender la cosmología, es menester del lector hacerse a buenas lecturas e intentar comprender la evolución y estado actual del universo y por que no atisbar el futuro del mismo.

References

- [1] Sergio Torres Arzayús, *Exploremos el universo*, 1998 - 2007.
- [2] Xavier Amador, *El Modelo Estándar Cosmológico*, http Xavier Amador, (2004)
- [3] Xavier Amador, *El Modelo Estándar Cosmológico y modelo Λ CDM*, http Xavier Amador, (2004)
- [4] Peebles, P. J. E. 1993, *Principles of Physical Cosmology*. Princeton: Princeton University Press
- [5] Coles, P. and Lucchin, F. (1995). *Cosmology-the Origin and Evolution of Cosmic Structure*. Chichester: John Wiley and Sons.
- [6] Guth, A. (1997). *The Inflationary Universe. The Quest for a New Theory of Cosmic Origins*. Reading, MA: Addison-Wesley.
- [7] Turner, M. S. (1997). In *Relativistic Astrophysics*, (eds. B.J.T Jones and D. Markovic), 83. Cambridge University Press.
- [8] Kolb, E.W. and Turner, M.S. (1990). *The Early Universe*. Redwood City, California: Addison-Wesley Publishing Co.
- [9] Longair, M.S. (1994). *Theoretical Concepts In Physics*. Cambridge: Cambridge University Press.
- [10] Weinberg, S. (1997). In *Critical Dialogues in Cosmology*, (ed. N. Turok), 195. Singapore: World Scientific.
- [11] Smith, R.W. (1982). *The Expanding Universe: Astronomy's "Great Debate" 1900-1931*. Cambridge University Press.
- [12] Peebles, P.J.E. (1980). *The Large-Scale Structure of the Universe*. Princeton: Princeton University Press.
- [13] Calzetti, D., Giavalisco, M., Ruffini, R., *The Fractal Distributio off Matter in the Universe*. International Center for Relativistic Astrophysics, Roma.
- [14] A. H. Guth, *Phys. Rev.* **D23**, 347 (1981)
- [15] Peebles, P. J. E., Scramm, D. N., Turner, E. L., and Kron, R.G. 1991, *Nature*, **352**, 769
- [16] Narlikar, J. V. 1992, *Bull. Astr. Soc.India*, 20, 1.
- [17] Peebles, P. J. E. 1993, *Principles of Physical Cosmology*. Princeton: Princeton University Press, Princeton, ch 7.
- [18] Wright, E. W., <http://www.astro.ucla.edu/wright/errors.html>
- [19] Narlikar, J. V., and Padmanabhan, T. 2001, *Ann. Rev. Astron. and Astroph.*, **39**, 211
- [20] G. Veneziano, *Phys. Lett.* **B265** (1991), 287
- [21] M. Gasperini and G. Veneziano, *Astropart. Phys.* **1** (1993), 317
- [22] J. E. Lidsey, D. W. Wands, and E. J. Copeland, *Phys. Rep.* **337** (2000), 343
- [23] G. Veneziano, in *String Gravity and Physics at the Planck Energy Scale*, Erice, 1995, eds. Sanchez and A. Zichichi (Kluwer Academic Publishers, Boston, 1996), p 285; M. Gasperini, *ibid.*, 305.
- [24] E. W. Kolb and M. S. Turner, *The Early Universe* (Addison-Wesley, Redwood City, CA, 1990); A. D. Linde, *Particle Physics and Inflationary Cosmology* (Harwood, New York, 1990).
- [25] Padmanabhan. T, (1993), *Structure Formation in the Universe*. Cambridge: Cambridge University Press

- [26] Longair. M. S, (1991), *Theoretical Concepts in Physics*. Cambridge: Cambridge University Press
- [27] Bahcall. N, (1997), In *Critical Dialogues in Cosmology*, (ed. N. Turok), 221 Sigapore: World Scientific.
- [28] Weinberg. S, *Gravitation and Cosmology*, John Wiley and Sons, 1972
- [29] Martín. L. C, *Observacional Cosmology: Caveats and open questions in the standar model*, Astron Ins der Unv Basel, 2003.

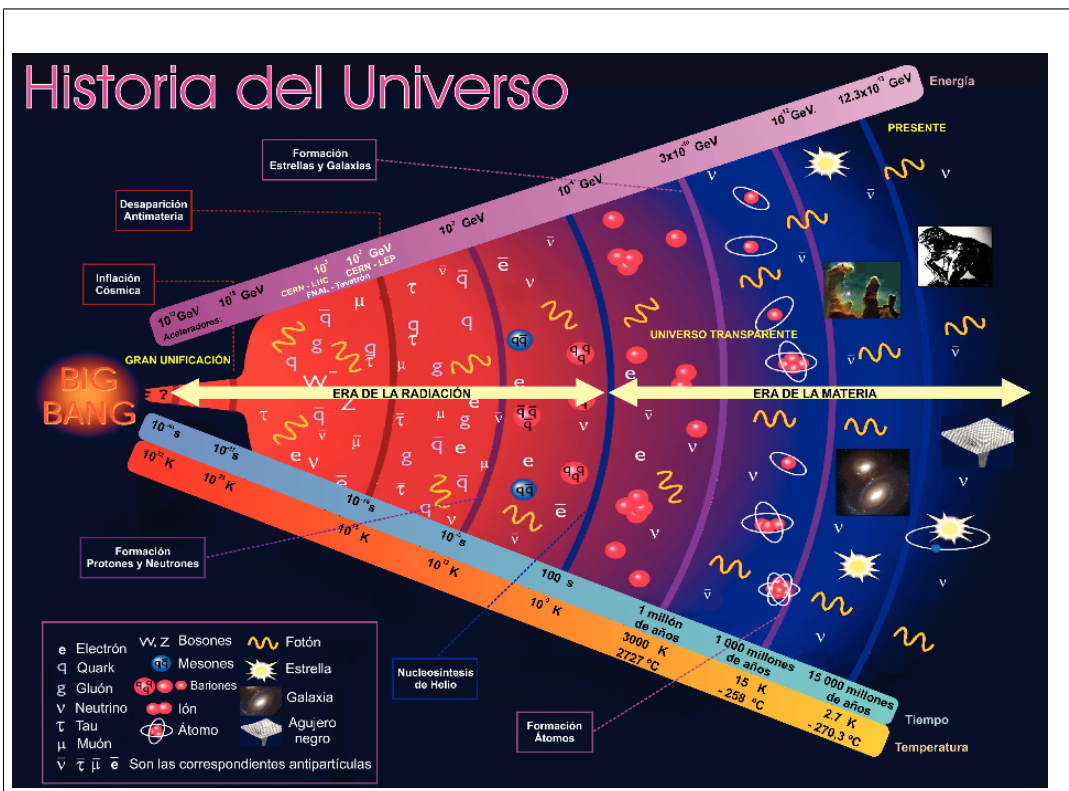


Figure 1: Imagen conceptual de la evolución del universo, puede apreciarse algunas etapas de evolución. Imagen tomada de Google imagenes.