

Cosmología

Teoría del *Big Bang* y Origen del Universo

Docente: Dra. Andrea Sosa Oyarzabal
asosa@cure.edu.uy

Centro Universitario Regional del Este - Universidad de la República
URUGUAY

Curso de Geología y Geomorfología,
Licenciatura en Gestión Ambiental

- 1 **Introducción**
 - ¿Qué es la Cosmología?
 - Medición de distancias en Astronomía
 - El espectro electromagnético
 - El *Efecto Doppler*
 - La radiación de *Cuerpo Negro*
 - La naturaleza de las galaxias
 - Estructuras del Universo

- 2 **El modelo cosmológico estándar: Teoría del *Big Bang***
 - Evidencias observacionales
 - Fundamentos y predicciones
 - La evolución del Universo

Definiciones básicas

- *Astronomía* = “Ordenación de las estrellas”.
- la astronomía estudia el Universo más allá de la Tierra.
- Universo o *Cosmos* = totalidad de espacio, tiempo, materia y energía.
- La *Cosmología* es la rama de la astronomía (o astrofísica) que estudia el Universo a grandes escalas.



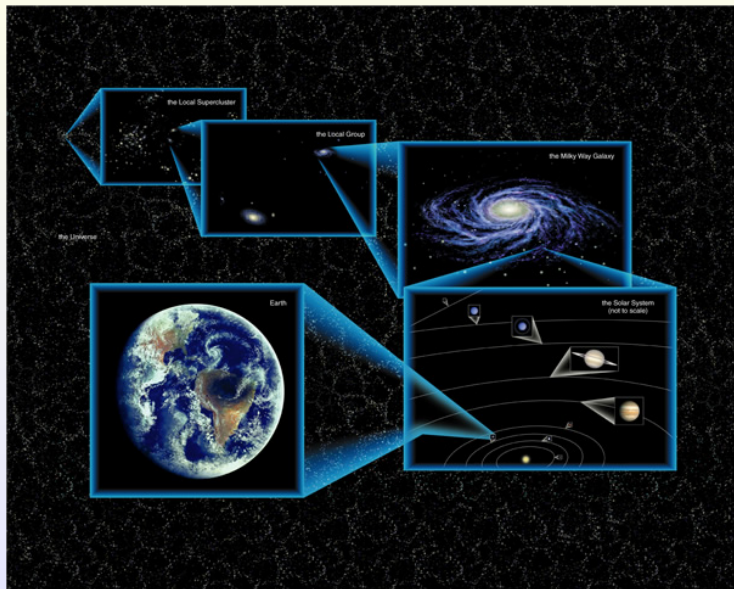
Cuestiones que aborda la cosmología moderna

- ¿Cuán grande es el Universo?
- ¿Cómo se formó?
- ¿Cuándo se originó?
- ¿Cómo se originó la materia (desde las partículas subatómicas hasta los cúmulos y supercúmulos de galaxias)?
- ¿Continúa la aglomeración jerárquica de materia más allá de la estructura a gran escala que conocemos hoy?
- ¿Cuáles son las principales componentes del Universo?
- ¿Cuál será el futuro del Universo?

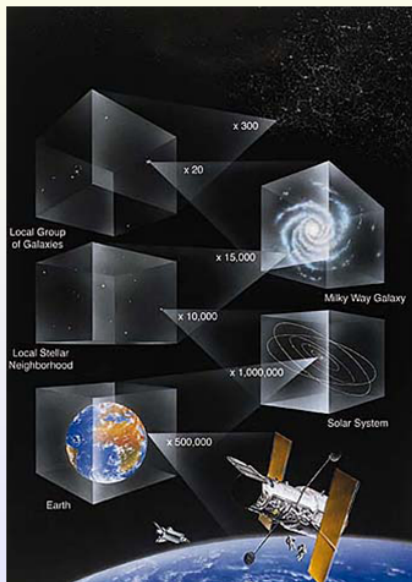
El modelo cosmológico estándar

La cosmología moderna se basa en un modelo de **Universo en expansión**. Sobre la base de este modelo ha sido posible empezar a abordar dichas cuestiones.

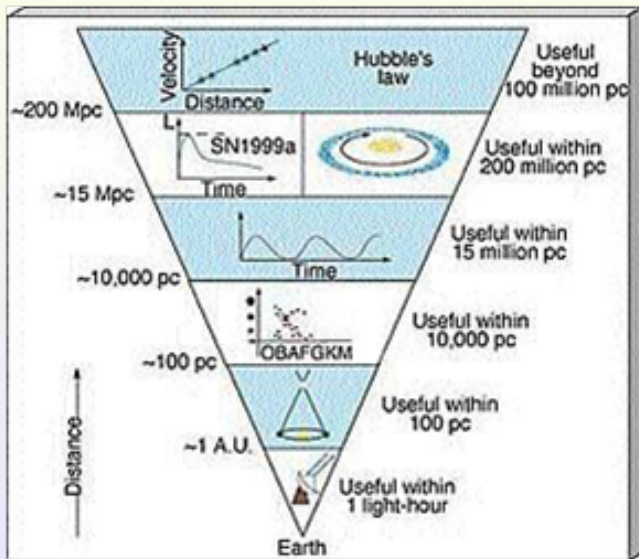
El Universo en diferentes escalas



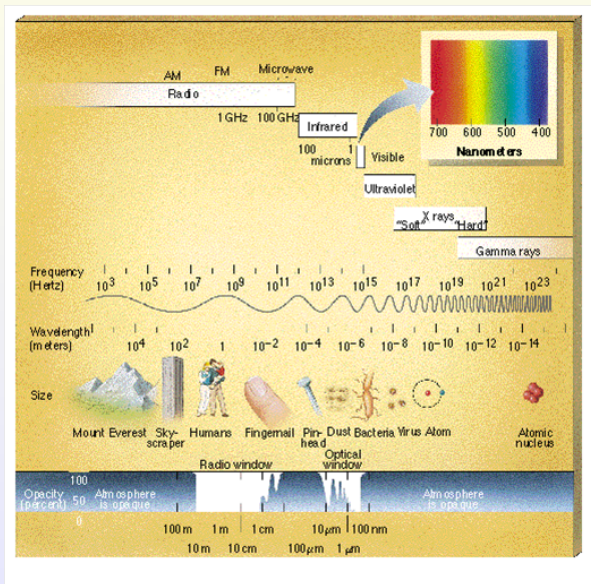
El Universo en diferentes escalas



“La escalera de distancias cósmicas”

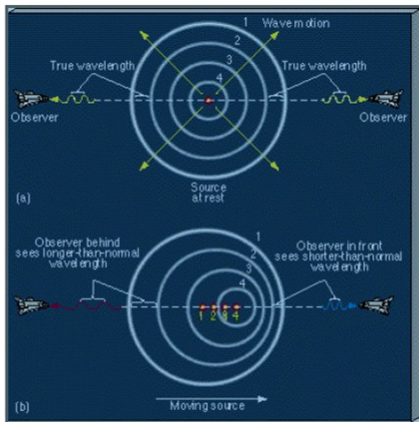


El espectro de la radiación electromagnética



El Efecto Doppler

- Es el desplazamiento observado en las líneas espectrales debido al movimiento relativo de la fuente con respecto al observador.
- Cuando la fuente se aleja la longitud de onda observada aumenta (“corrimiento al rojo”), y se acorta cuando la fuente se acerca (“corrimiento al azul”).



Distribución espectral de energía de un cuerpo negro

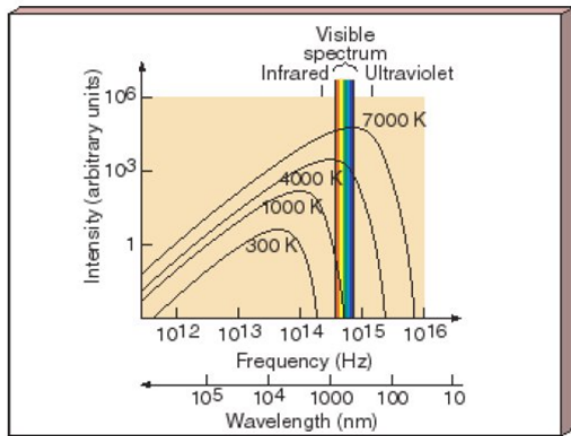


Figure 3.13 As an object is heated the radiation it emits peaks at higher and higher frequencies. Shown here are curves corresponding to temperatures of 300 K (room temperature), 1000 K (beginning to glow deep red), 4000 K (red hot), and 7000 K (white hot).

Galaxias

- Las galaxias son conglomerados gravitacionalmente ligados de estrellas, gas, polvo y materia oscura.
- La luz que estamos recibiendo de las galaxias más distantes fue emitida antes que la Tierra existiera.
- Las galaxias están separadas unas de otras por distancias promedio de millones de años luz.



Galaxia del Remolino.



Galaxia de Andrómeda.

La Materia Oscura

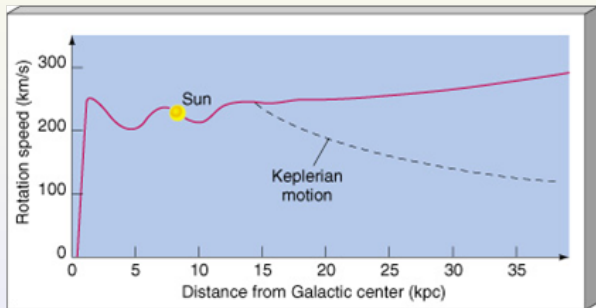


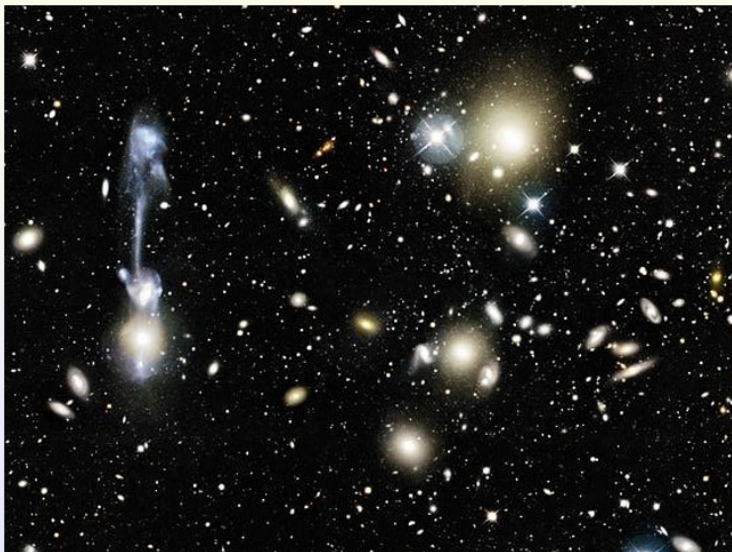
Imagen de Cielo Profundo (*NASA/HST*)



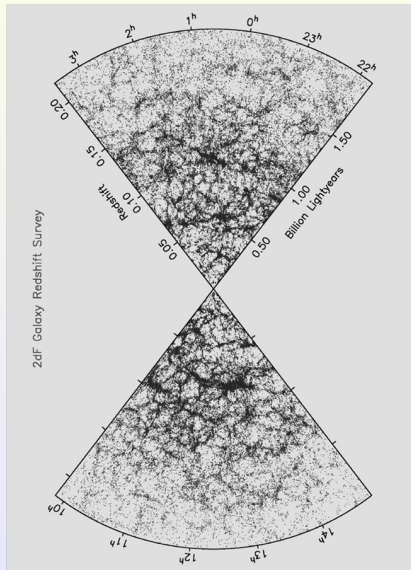
Imagen de Cielo Profundo (*NASA/HST*)

- La imagen *Hubble Deep Field* muestra objetos hasta la magnitud 30, o sea unos cuatro mil millones de veces más débiles que los visibles a simple vista.
- Salvo unas pocas estrellas de campo, todos los objetos son galaxias, y algunas de ellas son los objetos más lejanos jamás observados, tal vez galaxias en formación, a menos de mil millones de años tras el *Big Bang*.
- Gracias a estas observaciones hoy sabemos que en el Universo existen decenas o centenas de miles de millones de galaxias.

Cúmulos y Supercúmulos de Galaxias



La Estructura a Gran Escala



Hitos decisivos

Dos hitos fueron decisivos en el desarrollo de una teoría que explicara cómo se formó en Universo y cómo evolucionó hasta el presente:

- El desarrollo de la Teoría General de la Relatividad por Albert Einstein en 1910.
- El descubrimiento de la naturaleza de las galaxias en la década de 1920.

El Gran Debate: ¿Nebulosa o Galaxia?

- En la década de 1920 dos astrónomos, Harlow Shapley y Herbert Curtis, se enfrentaban en un debate histórico sobre la naturaleza misma de nuestro hogar galáctico: *La Vía Láctea*.
- Shapley: *“La evidencia se opone a la opinión de que las espirales son galaxias individuales comparables a la nuestra. No parece haber ninguna razón para modificar la hipótesis de que las espirales no están compuestas de estrellas típicas, sino que son objetos nebulosos.”*
- Curtis: *“La evidencia apunta fuertemente a la conclusión de que las espirales son galaxias individuales, o islas de galaxias, comparables con nuestra propia galaxia en dimensión y en número de unidades componentes.”*
- Cuando se realizó la primera medición de la distancia a una de esas “espirales” (la galaxia de Andrómeda) se comprobó que Curtis tenía razón.

La ley de Hubble-Lemaître

- En 1929 las observaciones de Edwin Hubble y colaboradores mostraron que cuanto más distantes se encontraban las galaxias, más rápido se alejaban.

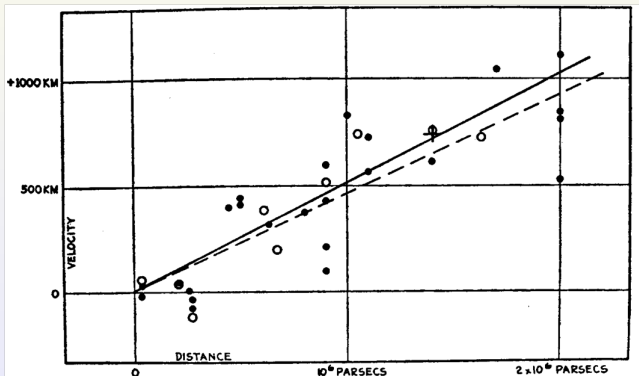


FIGURE 2.4 Edwin Hubble's original plot of the relation between redshift (vertical axis) and distance (horizontal axis). Note that the vertical axis actually plots cz rather than z , and that the units are accidentally written as km rather than km/s.

La ley de Hubble-Lemaître

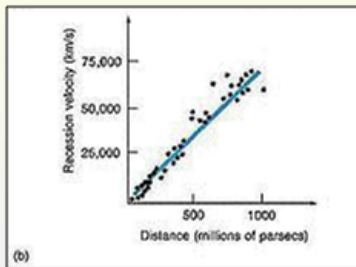
“La velocidad de recesión de cada galaxia es directamente proporcional a su distancia.”

$$v = H_0 r, \quad (1)$$

donde v es la velocidad de recesión o alejamiento de la galaxia, r su distancia respecto al observador, y H_0 es un parámetro conocido como la “Constante de Hubble”.

- Hubble atribuyó el corrimiento al rojo observado en las líneas espectrales de las galaxias lejanas al Efecto Doppler causado por el movimiento relativo de las galaxias respecto al observador.
- Georges Lemaître sugirió que el espacio se estaba expandiendo: las galaxias se alejan cada vez más entre sí a medida que pasa el tiempo.
- El corrimiento al rojo debido a la expansión del Universo se conoce como *corrimiento al rojo cosmológico* y es la causa de que observemos alejarse a las galaxias lejanas.

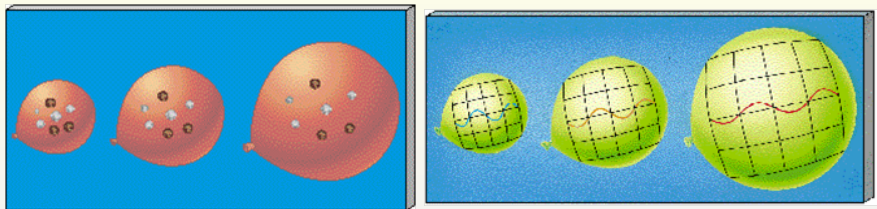
La constante de Hubble y la edad del universo



- El valor original de Hubble fue $H_0 = 65 \text{ km/s/Mpc}$. A medida que se agregan más y mejores observaciones, se refina el valor de H_0 . Actualmente se tiene $H_0 \sim 71.0 - 73.5 \text{ km/s/Mpc}$.
- El *tiempo de Hubble* t_H (Ec. 2) es independiente de la distancia.
- Suponiendo que la velocidad de recesión de las galaxias se ha mantenido constante, t_H representa el tiempo que le ha llevado a una galaxia alcanzar su distancia actual.

$$t_H = \frac{r}{v} = \frac{r}{H_0 r} = \frac{1}{H_0} \quad (2)$$

La expansión del Universo

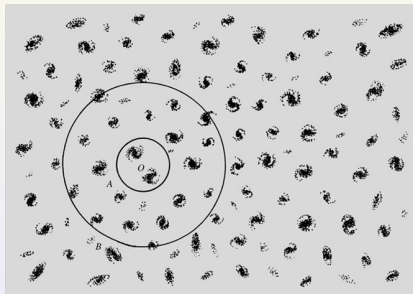
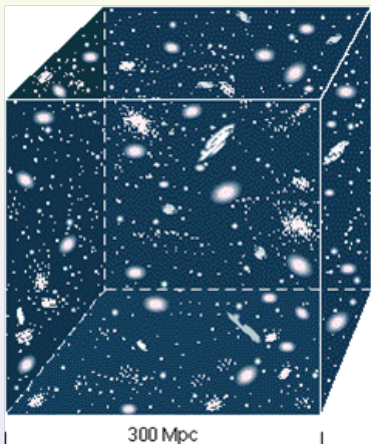


- La ley de Hubble-Lemaître implica que en algún momento del pasado toda la materia y la radiación que forman las galaxias estaban concentradas en un único “punto”.
- Las ubicaciones y velocidades actuales de las galaxias serían consecuencia de esa explosión primordial conocida como “Big Bang”, en la cual se habría originado el Universo.
- Podemos contestar a la pregunta de *cuándo* se originó el Universo, pero la pregunta *dónde* no tiene sentido; no existió un punto donde se generó el Universo pues el Universo era el punto: **el Big Bang no ocurrió en un lugar determinado, sino que ocurrió en todas partes al mismo tiempo.**

La expansión del Universo y el Principio Cosmológico

- La cosmología moderna se apoya en el *Principio Cosmológico*, según el cual el Universo es homogéneo e isotrópico a grandes escalas (cientos de Mpc).
- *Homogeneidad*: el Universo luce igual independientemente del lugar desde donde lo observe.
- *Isotropía*: el Universo luce igual independientemente de la dirección según la cual lo observe.
- El Principio Cosmológico implica que el Universo no tiene un “borde” ni un “centro”.
- El principio cosmológico es compatible con la ley de Hubble-Lemaître: independientemente de dónde esté ubicado el observador, éste ve alejarse a las galaxias a una misma velocidad compatible con H_0 .

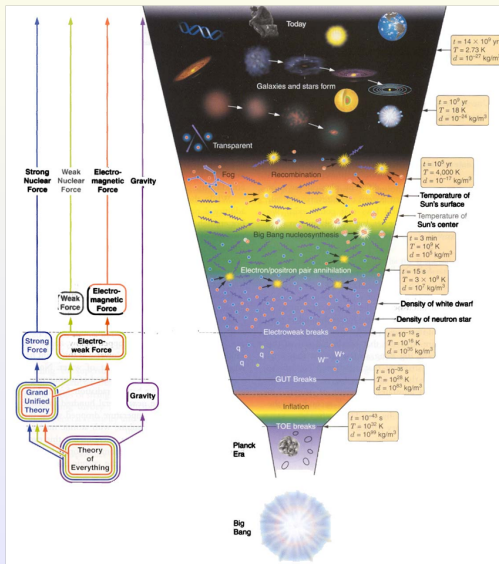
La expansión del Universo y el Principio Cosmológico



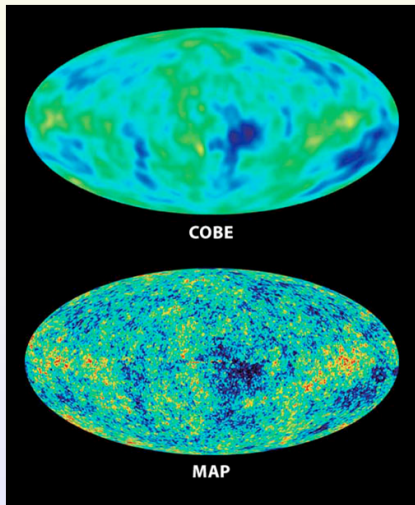
El “Big Bang”

- Luego, t_H puede considerarse como la *edad del Universo*.
- Para $H_0 = 71$ km/s/Mpc se tendría, mediante la Ec. 2, que la edad del Universo sería de unos 14 Giga años (14 mil millones de años).
- El “Big Bang” fue una singularidad en el espacio-tiempo: un “punto” donde de acuerdo a las leyes actuales de la física el Universo tendría un tamaño nulo y temperatura y densidad infinitas.
- La física actual solamente puede describir el Universo a partir de 10^{-43} s luego del *Big Bang*.
- Inicialmente el Universo consistía de energía pura, a temperaturas inimaginablemente altas.
- A medida que el Universo se fue expandiendo se fue enfriando, y de la energía fueron surgiendo las partículas elementales, luego los núcleos atómicos y los electrones, luego los átomos, y finalmente las estructuras que vemos hoy.

El “Big Bang”

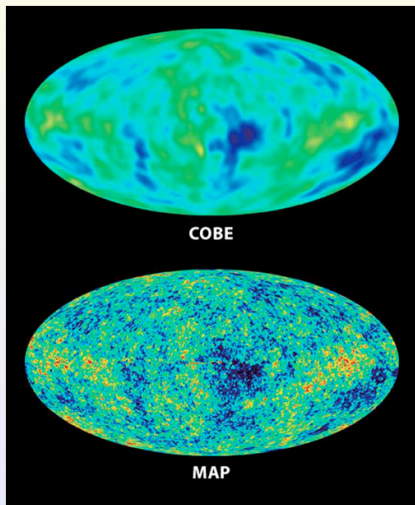


La Radiación del Fondo Cósmico de Microondas



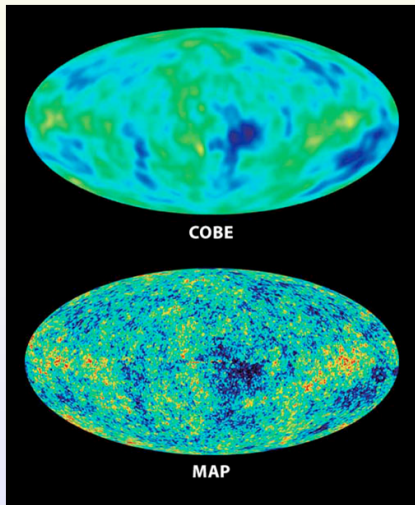
- La Radiación del Fondo Cósmico de Microondas (Cosmic Microwave Background Radiation - CMBR) fue descubierta accidentalmente en 1964 por los ingenieros Arno Penzias y Robert Wilson cuando probaban una antena en los Laboratorios Bell de Nueva Jersey, EE.UU.
- Hoy es considerada una reliquia del “Big Bang”, la memoria de un pasado muy lejano cuando no existían estrellas ni galaxias, y sólo existía una “sopa cósmica” de partículas de luz y materia.

La Radiación del Fondo Cósmico de Microondas



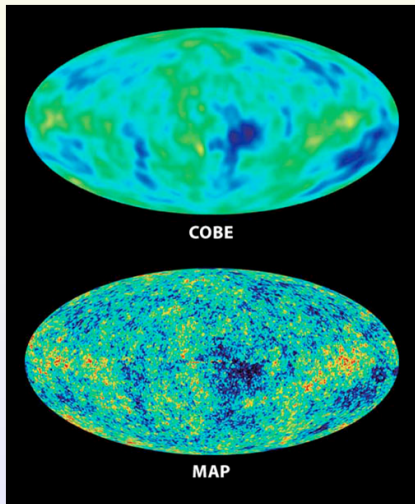
- Observaciones de los satélites COBE (1992) y WMAP permitieron ajustar la distribución isotrópica del CMBR a la distribución espectral de energía radiada por un cuerpo negro a una temperatura $T = (2.725 \pm 0.001)$ K, correspondiente a fotones con longitudes de onda $\lambda \sim 2$ mm en promedio.
- Las imágenes muestran mapas de todo el cielo con variaciones de hasta $\pm 200 \times 10^{-6}$ K respecto a la temperatura promedio. Las regiones más calientes se muestran en rojo y las más frías en azul.

La Radiación del Fondo Cósmico de Microondas



- Según la Teoría del Big Bang, en el Universo primigenio la materia se encontraba muy caliente y densa - ionizada - y por tanto el Universo se encontraba poblado únicamente por electrones libres.
- En esa época el Universo era opaco, y al expandirse, pudo enfriarse lo suficiente para volverse transparente.
- El CMBR se remonta entonces a unos 379,000 años después del Big Bang, cuando la materia y la radiación se “desacoplaron” y empezaron a formarse los primeros átomos.

La Radiación del Fondo Cósmico de Microondas



- La temperatura de la radiación emitida en esa época ha venido disminuyendo hasta alcanzar el valor actual de unos 3 K.
- Las primeras estrellas se habrían formado 200 millones de años luego del Big Bang.
- El descubrimiento del CMBR fue una fuerte evidencia a favor de la Teoría del “Big Bang” para explicar el origen del Universo.

La nucleosíntesis primordial

- La teoría del Big Bang explica el surgimiento de la materia.
- Elementos químicos: distintas especies de átomos.
- Átomos: constituidos por un núcleo (protones + neutrones) y electrones.
- Toda la materia ordinaria está constituida por estas tres partículas fundamentales.
- *La conexión cósmica.* La mayoría de los elementos químicos que forman la materia de la cual estamos hechos fueron creados en los núcleos calientes de estrellas que desaparecieron hace mucho tiempo.
- Solamente el Hidrógeno y el Helio se formaron en la nucleosíntesis primordial del Big Bang. El resto de los elementos químicos se originó (y sigue originándose) a partir de reacciones termonucleares en las regiones centrales de las estrellas.

Modelo estándar actual del Universo

Actualmente, el modelo de Universo que mejor ajusta a las observaciones es el de un Universo en expansión acelerada, homogéneo e isotrópico, espacialmente plano, y que contiene materia (tanto normal como oscura) y energía oscura en las siguientes proporciones:

- *Materia Normal* (interactúa con la radiación): 5 %.
- *Materia Oscura* (se detecta únicamente por su efecto gravitacional en la materia normal): 27 %.
- *Energía Oscura* (fuerza repulsiva que sería generada por el *Vacío*, y que se opone a la gravedad): 68 %.