

“Yo quiero conocer los pensamientos de Dios; el resto son detalles”

A. Einstein

Índice:

- ✓ [Introducción](#)
- ✓ [Perspectivas históricas](#)
- ✓ [Física y Cosmología aristotélica](#)
- ✓ [La Tierra deja de ser el centro del Universo](#)
- ✓ [Copérnico, Kepler, Galileo y Newton](#)
- ✓ [Unión del cielo y la Tierra](#)
- ✓ [Relación entre la materia y la energía, y entre el tiempo y el espacio](#)
- ✓ [Extensión del tiempo - Edad de la Tierra](#)
- ✓ [Movimiento de los continentes](#)
- ✓ [Comprensión de la naturaleza del fuego](#)
- ✓ [División del átomo](#)
- ✓ [¿Qué es una onda?](#)
- ✓ [El efecto Doppler](#)
- ✓ [Radiación del cuerpo negro](#)
- ✓ [Variación de la temperatura en la expansión de un gas](#)
- ✓ [Aprovechamiento de la energía](#)
- ✓ [Cosmología científica](#)
- ✓ [El principio cosmológico](#)
- ✓ [El Universo en expansión](#)
- ✓ [Radiación Cósmica de Fondo \(CMB\)](#)
- ✓ [Abundancia de los elementos en el Universo](#)
- ✓ [Paradoja de Olber](#)
- ✓ [La teoría del Big Bang](#)
- ✓ [Calendario de C. Sagan](#)
- ✓ [Teoría del Universo estacionario y Teoría del Universo pulsante](#)
- ✓ [Calculo de la masa crítica del Universo](#)
- ✓ [Descubrimientos recientes – Materia oscura y energía oscura](#)
- ✓ [Conclusiones](#)
- ✓ [Bibliografía](#)
- ✓ [Referencias de Cosmología en la Web](#)

Nota: Este resumen o compilación de Cosmología, hace uso de las siguientes fuentes:

1. - *Project 2061 - Alfabetización científica para un futuro dinámico - Sitio de la Asociación Norteamericana para el avance de la ciencia.* <http://www.project2061.org/>
2. - [Cosmología - El Origen del Universo](#) - Breve Introducción - http://www.astrored.net/origen_del_Universo/
3. - [Curso básico de Cosmología](#)- de Pedro J. Hernández www.geocities.com/launchpad/2921/comolog.htm



El Universo en expansión

Edwin Powell Hubble nació en Marshfield, Missouri, en 1889. Obtuvo una beca Rhodes de la universidad de Oxford y fue un atleta consumado. Estudió Derecho y durante algún tiempo ejerció como abogado en Kentucky, aunque pronto dejó esta profesión. Su pasión era la astronomía. A pesar de su poco ortodoxa formación académica logró una posición en el observatorio Mount Wilson de California. Donde estaba el mayor telescopio del mundo con un espejo de 2.5 m de diámetro. Hubble era un astrónomo muy meticuloso que normalmente se abstenía de hacer afirmaciones que no estuviesen bien apoyadas en evidencias. Hubble fue un pionero en lo que podríamos llamar la astronomía extragaláctica. Estudió las propiedades *variables cefeidas*¹, estrellas variables que nos permiten conocer las distancias a las que ellas se encuentran de nosotros. Esta técnica permitió conocer como se distribuían las Galaxias en el espacio. Pero su mayor contribución fue sin duda el descubrimiento de la expansión del Universo, uno de los descubrimientos más importantes de toda la historia de la humanidad.

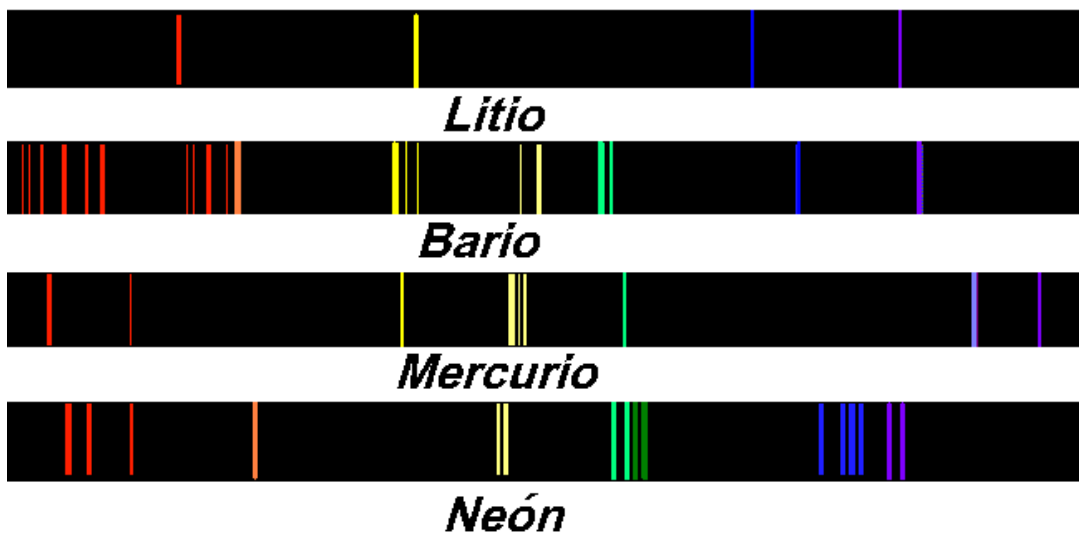


Figura 16. Espectros característicos de distintos elementos. Si una sal de una sustancia, se coloca en la llama de un mechero, y se hace pasar la luz que se produce por un prisma, se observa un espectro como los de la figura. Si se

¹ La cefeidas son estrellas pulsantes, su importancia radica en que presentan una relación definida entre su luminosidad media (o sea la potencia que irradian) y el periodo de pulsación. Esta relación fue descubierta en 1912 por la astrónoma estadounidense Henrietta S. Leavitt y se conoce como relación periodo-luminosidad. Leavitt encontró que la luminosidad absoluta o potencia de una cefeida aumenta de manera proporcional a su periodo de pulsación. Así, los astrónomos pueden determinar la luminosidad intrínseca o absoluta de una cefeida midiendo el periodo de pulsación. La luminosidad aparente de una estrella en el cielo (la intensidad de la misma que se observa con un telescopio) depende además de su distancia a la Tierra. Comparando esta luminosidad aparente con su luminosidad intrínseca se puede determinar la distancia a la que se encuentra. De este modo, las cefeidas pueden utilizarse como indicadores de distancias tanto dentro como fuera de la Vía Láctea. Este efecto es equivalente a observar lámparas de una misma potencia, distribuidas a distintas distancias. Claramente, las más lejanas se verán menos brillantes que las más cercanas. De este modo el brillo aparente nos permitiría conocer sus distancias.

tratase de un cuerpo incandescente se observaría un espectro continuo como el de la Fig. 13, en cambio en este caso se observan sólo algunas líneas discretas. Cada elemento químico tiene un espectro característico, es decir, una distribución determinada de la radiación electromagnética. Ese espectro particular permite identificar los elementos. Los espectros son como una especie de “código de barras” que la naturaleza puso en cada uno de los elementos. Esta técnica de identificación se llama espectroscopia. Los espectros de emisión, como los ejemplos que se muestran, están formados por varias líneas de longitudes de onda bien determinadas, separadas por zonas oscuras. Con esta técnica es posible conocer los elementos presentes en el Sol y otras estrellas.

En 1909, el astrónomo Percival Lowell (1855-1916) –más conocido por su extravagante interpretación de aparentes líneas que surcan la superficie de Marte como canales de agua construidos por una supuesta civilización marciana– instruyó a Slipher para que hiciera observaciones del espectro de las nebulosas espirales. Slipher constató el hecho de que la mayoría de las galaxias presentaban desplazamientos al rojo en sus espectros. Y aunque su trabajo fue muy bien recibido por la comunidad de astrónomos, nadie podía dar una interpretación del significado de estas observaciones.

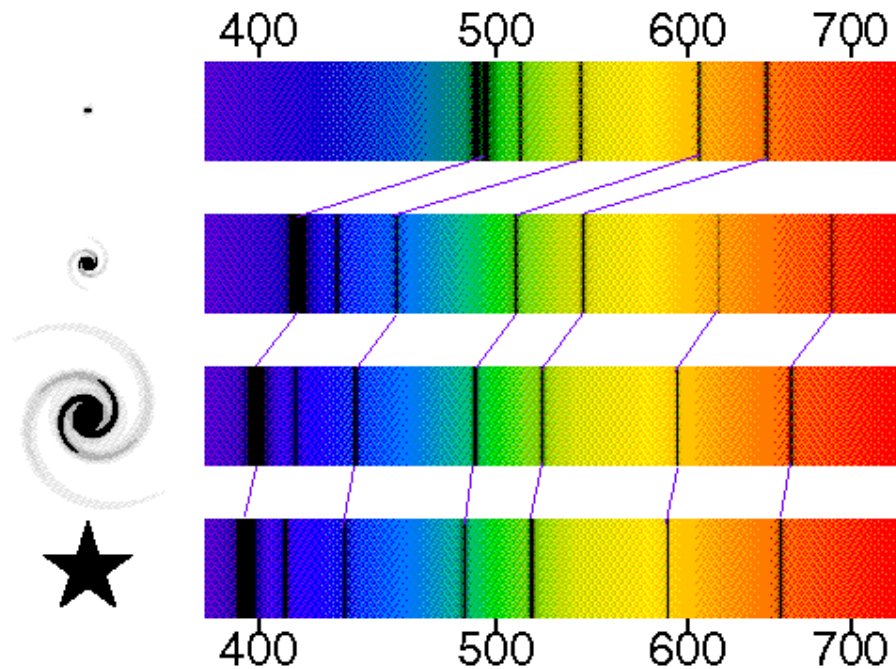


Figura 17. Espectro de H proveniente de distintas fuentes lejanas. El espectro inferior corresponde al de una estrella cercana. Siguiendo hacia arriba, tenemos los espectros de galaxias cada vez más lejanas. A medida que se aleja la galaxia, su tamaño aparente (indicado a la izquierda) disminuyen. Concomitantemente, las líneas oscuras se corren hacia la derecha (hacia el rojo).

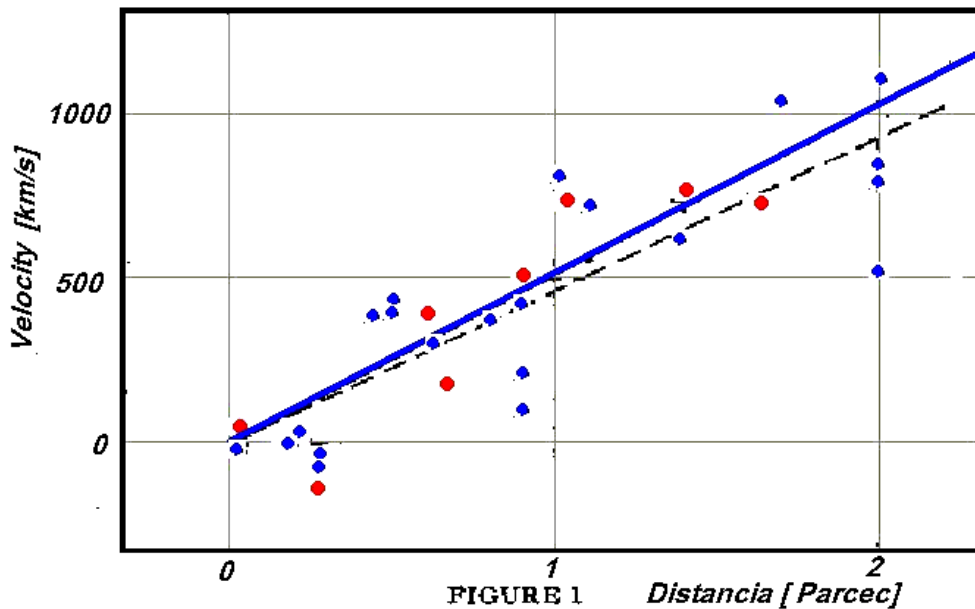


Figura 18. Representación de la velocidad en función de la distancia con los datos originales Hubble de 1929. Las distancias están medidas en la unidad $Mpc = \text{mega parsecs} = 3.26 \cdot 10^6 \text{ Ly} = 3.086 \cdot 10^{22} \text{ m}$. De estos datos se obtiene $H_0 = 550 \text{ km/s/Mpc}$.

En 1929 Hubble presentó sus investigaciones sobre los desplazamientos al rojo de los espectros de unas 46 nebulosas extragalácticas, con unos 24 datos muy bien medidos. Al graficar las velocidades de alejamiento de las 24 nebulosas (obtenidas de los enrojecimientos de sus espectros) en función de sus distancias, (ver Fig. 18) encontró una sugestiva relación lineal. Es decir:

$$V [km/s] = H \cdot d [\text{parsec}] \quad (14)$$

Esta relación, conocida como la ley de Hubble, fue la primera ley verdaderamente cosmológica y fue rápidamente aceptada en la comunidad astronómica por varias razones.

- ✓ El desplazamiento al rojo de las nebulosas había sido reportado por varios astrónomos antes que Hubble, de manera que la comunidad estaba preparada y expectante.
- ✓ Hubble tenía el mejor telescopio del momento, Mount Wilson. Sus estudios de la distancia a las nebulosas era conocido y su meticulosa determinación de distancias extragalácticas, hacía que sus resultados fueran confiables.
- ✓ La ley fue inmediatamente corroborada también por Willem de Sitter, otro prestigioso astrónomo, que constató independientemente las observaciones de Hubble.
- ✓ Para entonces comenzaba a surgir consenso en la comunidad científica que el Universo no era estático y se empezaba a aceptar el modelo del Universo en expansión de de Sitter.

Einstein fue uno de los que apoyó entusiastamente el modelo del Universo en expansión. Con esta hipótesis, sus ecuaciones de la Relatividad General recuperaban una simplicidad que no se podía lograr con un Universo estático. Einstein y Hubble fueron dos notables científicos, el primero un teórico y el segundo un agudo observador, en cuyo dialogo se forjó la cosmología científica, cuyas consecuencias han revolucionado la comprensión del Universo.

Sin embargo, Hubble no se sentía totalmente satisfecho con la relación encontrada. En el último párrafo de su artículo de 1929 escribió que la relación lineal era "una primera aproximación que representa un alcance restringido en distancia", de modo que él sospechaba que podía haber una relación más complicada, de la cual su ley era una primera aproximación.

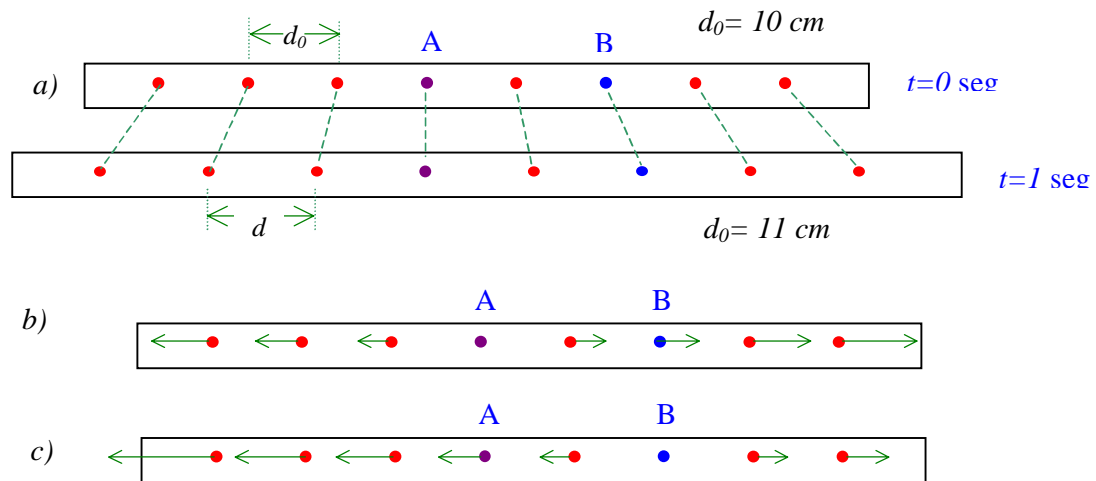


Figura 19. Modelo unidimensional de la Ley de Hubble. Imaginemos tener un espacio unidimensional, representado por un elástico como se muestra en la figura a). Aquí cada punto indica una "galaxia hipotética" uniformemente distribuidas, a una distancia d_0 ($=10\text{ cm}$) una de otra al instante $t=0$. Si la cinta se estira, digamos que un segundo después la distancia de las galaxias más próximas es ahora de $d=11\text{ cm}$. El observador de la galaxia A, verá que las galaxias más próximas (las que estaban a 10 cm) se alejan de él a $v=1\text{ cm/s}$. Las galaxias que estaban a 20 cm se alejan de él a $v=2\text{ cm/s}$ y así sucesivamente. Es decir él concluye que las galaxias se alejan de él siguiendo una ley de Hubble ($v=H \cdot d$), representado esquemáticamente como en la cinta b). Otro observador, como el B que vive en otra galaxia, digamos la B, al describir lo que le observa, también concluirá que las galaxias se alejan de él siguiendo la Ley de Hubble, como se muestra en c). Por lo tanto vemos que todos los habitantes de este Universo concluirán que las galaxias se alejan de cada uno de ellos siguiendo una ley del tipo Hubble como si cada uno fuese el centro del Universo, aunque claramente ninguno lo es o equivalentemente todos los son. La moraleja de este ejemplo, es que la ley de Hubble está estrechamente vinculada y es consistente con el principio cosmológico.

En 1931, extendió su estudio hasta objetos situados (según su calibración de distancias) a 32 Mpc, un enorme salto en distancias si se contrasta con el objeto más distante del esquema de 1929, situado a solo 2 Mpc. Había además muchos más puntos en el diagrama de 1931 y la correlación lineal entre desplazamiento al rojo y distancia parecía

ser incluso más nítida que antes. El colaborador de Hubble en el artículo de 1931, Milton Lasell Humason (1891-1972), ex mulero y ordenanza del Observatorio Mt. Wilson, interpretó el desplazamiento al rojo como debido al efecto Doppler por la velocidad de recesión de las galaxias. Sin embargo muchos astrónomos se mostraron incrédulos ante las magnitudes de tan enormes velocidades, de hasta 20000 km/s. El valor de la constante de Hubble ($H_0 \sim 550$ km/s/Mpc) deducida parecía implicar, si uno extrapola la expansión presente hacia atrás en el tiempo despreciando cualquier tipo de aceleración en la expansión, que hubo un tiempo, unos dos mil millones de años atrás, en que toda la materia del Universo se hallaba empaquetada mucho más densamente que en la actualidad. De ahí sólo distaba un pequeño paso para hablar de la edad del Universo. Pero alrededor de 1930 ya era conocida la técnica de datación por desintegración radiactiva y Ernest Rutherford (1871-1937) había establecido, de su estudio de la desintegración de los isótopos del uranio, una edad mínima aproximada de la Tierra de unos tres mil millones de años. Los estudios de la evolución estelar de aquella época también estimaban una edad de la Galaxia que era mucho mayor que el valor deducido a partir de la constante de Hubble. La polémica estaba servida: ¿Cómo podría ser el Universo más joven que los objetos que contiene?. Esto abrió una crisis en la cosmología, “the age crisis”, que desde entonces ha sido recurrente.

Esta polémica referida a la edad del Universo se produjo nuevamente en los años 90. La ley de Hubble ha sido confirmada por nuevos y mejores datos, pero el valor definitivo de la constante permanece como un problema abierto en la cosmología moderna. Existen dos equipos que trabajan con las observaciones de cefeidas del HST (Telescopio espacial Hubble) y obtienen un valor de 73 ± 5 , mientras que otro grupo obtienen un valor de 57 ± 4 [km/s/Mpc].

La Teoría del Big Bang

El hombre, desde el principio de los tiempos, ha tratado de resolver el misterio de la creación del Universo. Innumerables han sido los mitos y las leyendas que, en las diversas culturas, han surgido como fiel testimonio de esta búsqueda incansable. Actualmente, el desarrollo acelerado de la ciencia y la tecnología nos ha dado una visión más esclarecedora de la evolución cósmica, permitiéndonos incluso conjeturar no sólo sobre su historia, sino también sobre el posible futuro que pueda acaecernos.

La teoría del Big Bang, que en Inglés quiere decir la gran explosión, es una de las teorías científicas más populares y actualmente goza de un alto grado de aceptación. Ella se basa fundamentalmente en acontecimientos físicos como la expansión del Universo, las cantidades relativas de hidrógeno y helio, y la existencia de la radiación térmica cosmológica (radiación de fondo).

Como vimos antes, el efecto Doppler (ver figuras 10-12), consiste en que:

- ✓ Cuando una fuente se acerca la frecuencia emitida aumenta (sonido más agudo, color más azul)
- ✓ Cuando una fuente se aleja, la frecuencia emitida disminuye (sonido más grave, color más rojo)

$$\Delta \text{frecuencia} = k \cdot \text{Velocidad}$$

$$\Delta f = k \cdot V \quad (15)$$

Este se presenta cuando una fuente de ondas se desplaza en forma radial (esto es, alejándose o acercándose) a un espectador o receptor. Como vimos antes, este fenómeno afecta a todo tipo de ondas, inclusive a las electromagnéticas, por lo tanto, lo mismo ocurrirá con la luz visible, que es, en esencia, un tipo particular de una onda electromagnética.

Las ondas más largas del espectro luminoso corresponden a la luz de color rojo, mientras que las más cortas, al violeta. Slipher, un astrónomo del observatorio Lowell en Estados Unidos, descubrió que las ondas de luz provenientes de la mayoría las galaxias observadas por él se alargaban (se corrían hacia el rojo del espectro). Infirió que todas ellas se alejaban de nosotros, exceptuando aquellas pertenecientes al grupo local. Parecía que las galaxias huían del sistema solar como si se tratase de una enorme fuga. Esto, en un principio, desconcertó a los científicos. ¿Por qué las galaxias se alejaban unas de otras?. Se llegó a la conclusión que el Universo en que vivimos se está expandiendo. Esta apreciación fue respaldada en 1929 cuando el astrónomo estadounidense Edwin Hubble trabajando en el observatorio de Monte Wilson estableció su "ley de recesión de las galaxias", según la cual, la velocidad con que las galaxias se alejan es directamente proporcional a la distancia a la que se encuentran.

$$V = H \cdot d \quad (16)$$

Como en toda proporción, existe una constante, a la que se le llamó “*constante de Hubble*” (H), cuyo valor actual es

$$H \approx \frac{1}{1.5 \cdot 10^{10} \text{ y}} = 4.7 \cdot 10^{17} \text{ s}^{-1} \approx 60 \text{ km/s.Mpc}$$

$$H = v/d = 65 \text{ kilómetros/segundo} \times \text{Mpc} \quad (17)$$

$$1 \text{ pc} = 3.26 \text{ l.y} = 3,086 \cdot 10^{16} \text{ m}$$

$$1 \text{ l.y} = 9.46 \times 10^{15} \text{ m}$$

$$1 \text{ Mpc} = 3,260,000 \text{ l.y} = 3,086 \cdot 10^{22} \text{ m}$$

Esto significa que las galaxias se alejan de nosotros a unos 65 kilómetros por segundo cada 3 millones de años luz de distancia. Otra consecuencia importante de la Ley de Hubble es que si retrocedemos en el tiempo, podemos deducir que antes las galaxias estaban más cerca que hoy. Por lo tanto si tomamos una Galaxia arbitraria que está a una distancia d actualmente, ¿hace cuánto tiempo (T_{BB}) estaba contigua a la nuestra? (que tomamos como referencia). Suponiendo que la velocidad fue constante, podemos calcular ese tiempo T_{BB} como:

$$T_{BB} = \frac{d}{v},$$

siendo v la velocidad de la Galaxia. Según la Ley de Hubble, la velocidad de dicha Galaxia viene dada por $v=H \cdot d$. Por lo tanto, el tiempo que pasó desde que la Galaxia en cuestión estaba contigua a nosotros es:

$$T_{BB} = \frac{d}{v} = \frac{d}{H \cdot d} = \frac{1}{H} \approx 1.5 \times 10^{10} \text{ años} . \quad (18)$$

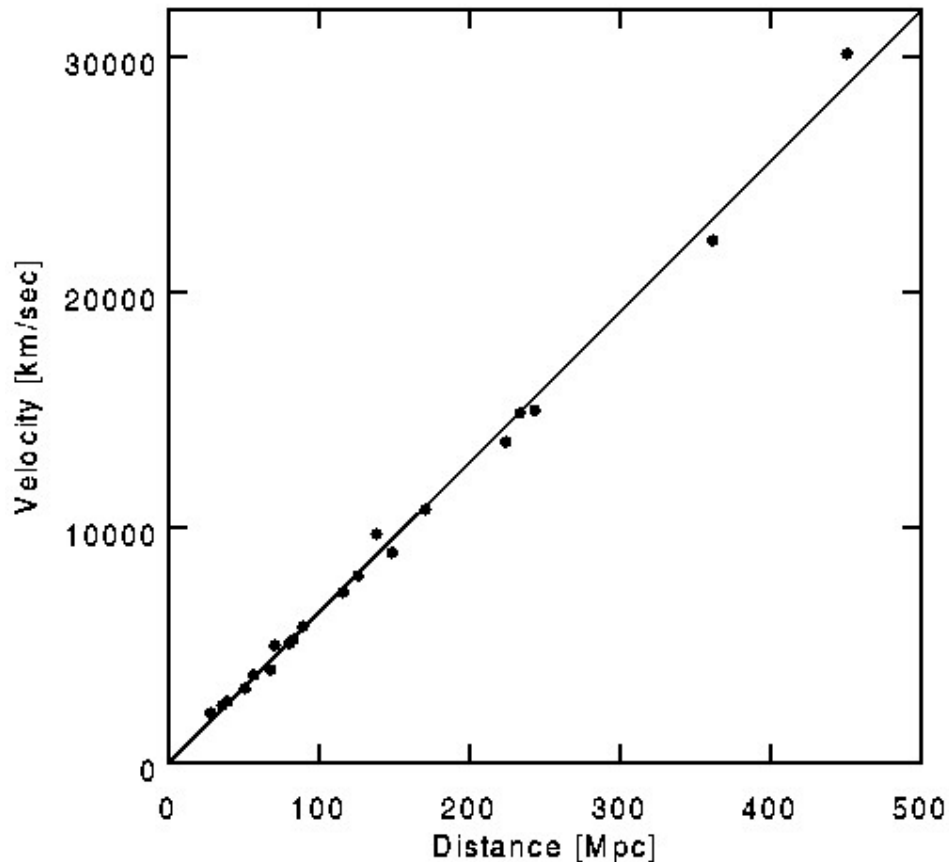


Figura 20. Datos de valores medidos de velocidades de recesión en función de la distancia para varias Super Novas Tipo Ia (Type Ia SNe from Riess, Press and Kirshner (1996)). La relación lineal observada está de acuerdo con la Ley de Hubble. Los datos originales de Hubble (figura 19) mostraban mucha más dispersión que esta versión más moderna.

Nótese que este tiempo es el mismo para cualquier galaxia e indica, por lo tanto, el tiempo que transcurrió desde el instante singular en el tiempo en que todo el Universo estuvo junto o sea éste sería el tiempo transcurrido desde el instante del Big Bang hasta hoy. Además este tiempo (T_{BB}) es simplemente la inversa de la constante de Hubble H que se determinó experimentalmente.

Albert Einstein enunció entre 1915 y 1917 un marco teórico adecuado para estudiar la estructura del Universo. De Sitter trabajó sobre él y planteó el primer modelo

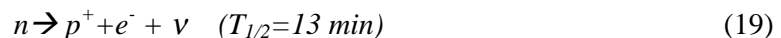
del Universo en expansión. Otros científicos que también buscaron una interpretación relativista de la expansión del Universo fueron Alexander Friedmann y George Henri Lemaître. El modelo de Lemaître postulaba que el Universo se expandía no sólo por las evidencias matemáticas encontradas por Einstein, sino también debido a un fenómeno físico: una gran explosión. El científico ruso-americano George Gamow bautizó el modelo de Lemaître como "teoría del Big Bang" y fue uno de sus más asiduos defensores.

La teoría del Big Bang supone que toda la materia del Universo estuvo, en un comienzo, concentrada en un mismo lugar del espacio. Esta masa de volumen pequeño (comparado con la extensión del Universo) fue bautizada como "huevo cósmico" por Gamow o "átomo primitivo" por Lemaître. Si toda la materia existente en el Universo estuvo concentrada en una sola estructura, su densidad debió ser inimaginablemente grande. De igual forma, se estima que su temperatura alcanzó unos 100 mil millones de grados Celsius. En tales condiciones, ni siquiera existirían los átomos como los ha definido la química. Al explotar, la energía fue transformándose paulatinamente en materia, a medida que se alejaba en todas direcciones. En un instante *nacían tiempo y espacio*.

Formación de los elementos livianos: ^1H , ^2D , ^4He , ^7Li , ^9Be – Los primeros tres minutos del Universo

Como vimos, toda la materia ordinaria, es decir la materia de la que esta hecha la Tierra y nosotros mismos, esta formada por átomos. En la naturaleza existen 92 elementos o especies de átomos. Cuando ellos se combinan, forman todas las sustancias que conocemos, ADN, piedras, agua, aire, etc.

Dado que en los primeros instantes del Universo la temperatura era muy alta, no era posible que estuvieran presentes átomos o núcleos. Sabemos que a altas temperaturas, como las que hay en el Sol los átomos se rompen en sus componentes. A temperaturas aún más elevadas, lo mismos núcleos se rompen en sus componentes más básicos. Por lo tanto, la hipótesis es que los elementos se formaron poco después del Big Bang, comenzando por las partículas que forman los núcleos (protones y neutrones) y continuando por los núcleos de los átomos mismos. Los átomos se formaron mucho después, cuando las temperaturas eran suficientemente frías ($t=300.000$ años). El problema para la formación de los núcleos es que el neutrón es inestable y decae (se desintegra) en 13 minutos, siguiendo la reacción siguiente:



Para que se formen los elementos livianos hay sólo unos escasos minutos, más específicamente 3 minutos después del Big Bang. Después de esos 3 minutos no quedan suficientes neutrones para formar más elementos. Por lo tanto los elementos livianos en el Universo actual son una especie de fósil del Big Bang. Equivalentemente podríamos decir que estos elementos son una especie de huella digital, o mejor aún, una mancha de sangre con toda la información de ADN del asesino en la escena del crimen, que nos permite resolver el caso. Además, la abundancia actual de los elementos livianos (H, D, ^4He , etc) en la naturaleza datan de esa época, los primeros tres minutos después del Big Bang. Por lo tanto esta información experimental es un dato bien conocido que permite poner a prueba los modelos que describen los escenarios existente en ese momento. De nuevo

tenemos aquí otra ilustración de cómo la cosmología actual se construye sobre evidencias observables.

Tabla Periódica de los elementos

IA																				VIII B															
1	H																			2	He														
3		4																		5	6	7	8	9	10										
Li		Be																		B	C	N	O	F	Ne										
11		12																		13	14	15	16	17	18										
Na		Mg																		Al	Si	P	S	Cl	Ar										
III A										21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	VIII A										31	32	33	34	35	36
19		20		Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr																
37		38		39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54																
Rb		Sr		Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe																
55		56		57	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86																
Cs		Ba		La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn																
87		88		89	90	91	92																												
Fr		Ra		Ac	Th	Pa	U																												

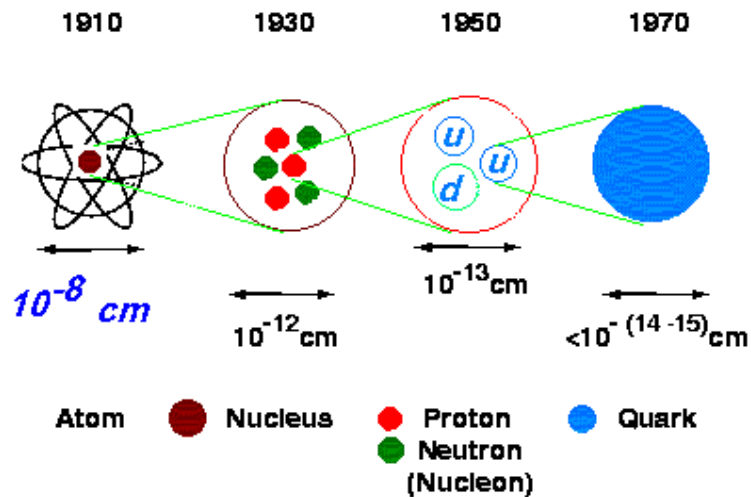


Figura 21. Arriba, tabla periódica de los elementos químicos, donde se ven todos los átomos clasificados de acuerdo a sus propiedades. Abajo, diagrama esquemático de los constituyentes del átomo.

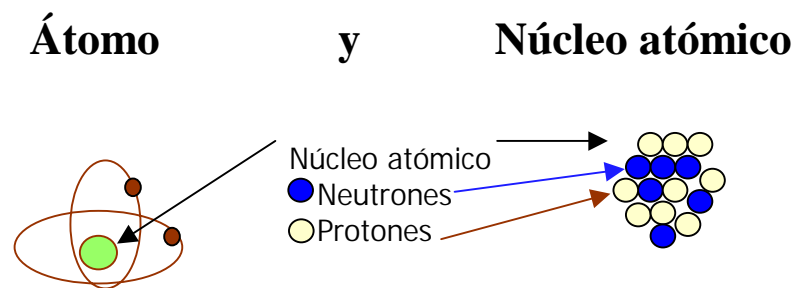


Figura 22. Diagrama esquemático de un átomo y su núcleo.

Al transcurrir los primeros tres minutos, recién comienzan a aparecer los núcleos de los átomos más sencillos, hidrógeno y helio. Los modelos predicen que la formación de estos átomos, se hizo a razón de cuatro átomos de hidrógeno por uno de helio. Las mediciones actuales confirman estos porcentajes de 75% para el hidrógeno y 25% para el helio. Los átomos más pesados, como el hierro, el carbono, el cobre y el resto de los elementos de la tabla periódica, fueron creados en el interior de las estrellas de gran masa. Posteriormente ellos fueron esparcidos por el cosmos al explotar dichas estrellas, en forma de una supernova. Podemos decir, que la fase supernova de una estrella masiva constituye algo así como el último estertor de la misma. De este modo, la Tierra, el Sol y los planetas, incluyéndonos a nosotros mismos, somos polvo de estrellas.

Debieron pasar cientos de miles de años desde la gran explosión para que la temperatura y los consiguientes choques entre las partículas elementales disminuyera, lo que permitió que los núcleos atómicos capturaran sus electrones y se formen los primeros átomos. Al mismo tiempo, la temperatura fue descendiendo gradualmente y la velocidad de expansión de la materia fue cada vez menor. Los átomos diseminados en todas direcciones, se fueron condensando y formaron lo que hoy son galaxias, estrellas, planetas y todos los cuerpos celestes conocidos.

Radiación Cómica de Fondo (CMB)

Figura 22. Penzias y Wilson recibirían el premio Nóbel de Física en 1978 por el descubrimiento de la radiación cósmica de fondo (CMB). G.Gamov, uno de los primeros en predecir su existencia en los años 40, murió unos diez años antes.



Haciendo una analogía, podemos decir que la evolución del Universo equivaldría, en cierta forma, a lo que ocurre con una nube de vapor de agua que se expande al subir por la atmósfera. A medida que se expande se enfría, el vapor se transforma en líquido, el líquido se condensa en gotitas de agua que finalmente precipitan en forma de lluvia. La relación entre expansión y enfriamiento es tan estrecha, que los científicos han logrado, a partir de ella, calcular con gran exactitud la temperatura teórica a la que debería encontrarse el Universo en la actualidad. Tal temperatura es de 3 K (en la escala absoluta de Kelvin) ó -270 grados Celsius bajo cero. Como vimos antes, un cuerpo a una temperatura determinada, emite radiaciones electromagnéticas características de esa temperatura (ver figura 13) y era de esperarse que existiese algún tipo de radiación que confirmase los 3 K calculados para el Universo. No fue sino hasta 1964 cuando los ingenieros de la Bell Telephone Arno Penzias y Robert Wilson, efectuando mediciones de ondas de radio en New Jersey, descubrieron una radiación de fondo que interfería con su trabajo y que no podían eliminar, ya que parecía provenir de todo el Universo. Inmediatamente dieron la noticia a los físicos de la Universidad de Princeton que trabajaban en la teoría del Big Bang.

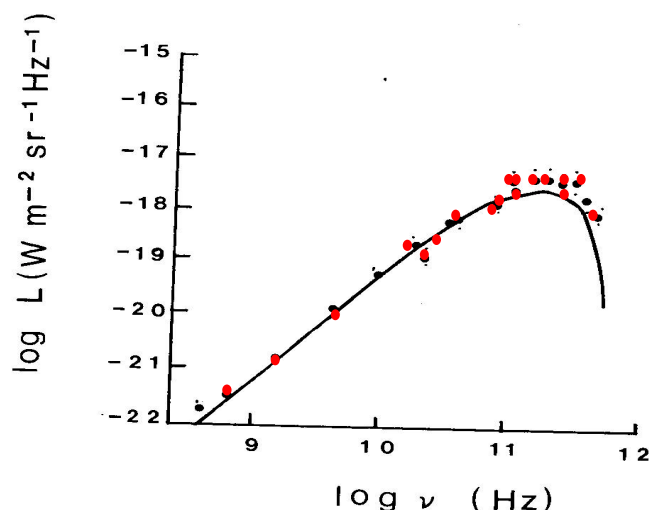


Figura 23. Espectro de radiación de fondo cósmica medida por Penzias y Wilson. Los puntos discretos son los valores medidos. La curva continua es la predicción de la radiación de un cuerpo negro a la temperatura $T=3 \text{ k}$ ($= -270 \text{ }^\circ\text{C}$). Ver Fig. 13.

Ellos confirmaron que dicha radiación era el “fósil físico” buscado por los científicos que correspondería a la radiación electromagnética que emite un cuerpo a 3 grados Kelvin. Naturalmente, este descubrimiento, uno de los más importantes de la radio astronomía, significó un fuerte respaldo a la teoría del Big Bang. Penzias y Wilson recibieron el premio Nóbel de física por el descubrimiento de lo que posteriormente se denominó "radiación térmica cosmológica" o CMB. De hecho, se estima que cerca del 10% del ruido de fondo que se observa en un televisor común, al sintonizar en un canal no ocupado por una señal de una emisora, esa especie de lluvia, es consecuencia de la radiación de fondo.

En resumen:

- ✓ El espectro de la radiación de fondo (CMB) corresponde al de un cuerpo (negro) a la temperatura de 2.725 Kelvin.
- ✓ La CMB es una reliquia del momento en que el Universo estaba muy caliente, era muy denso y muy opaco. Mas precisamente del instante en que la temperatura era tal, que los fotones interactuaban fuertemente con los átomos de H ionizándolos. A mediada que el Universo se enfrió, la radiación no pudo seguir ionizando los átomos, es decir la radiación se desacopló de la materia y siguió viajando hasta el presente.
- ✓ Los puntos más calientes o “Hot spots” en la CMB resultan de fluctuaciones en la temperatura del Universo en el momento del desacople de la radiación con la materia.

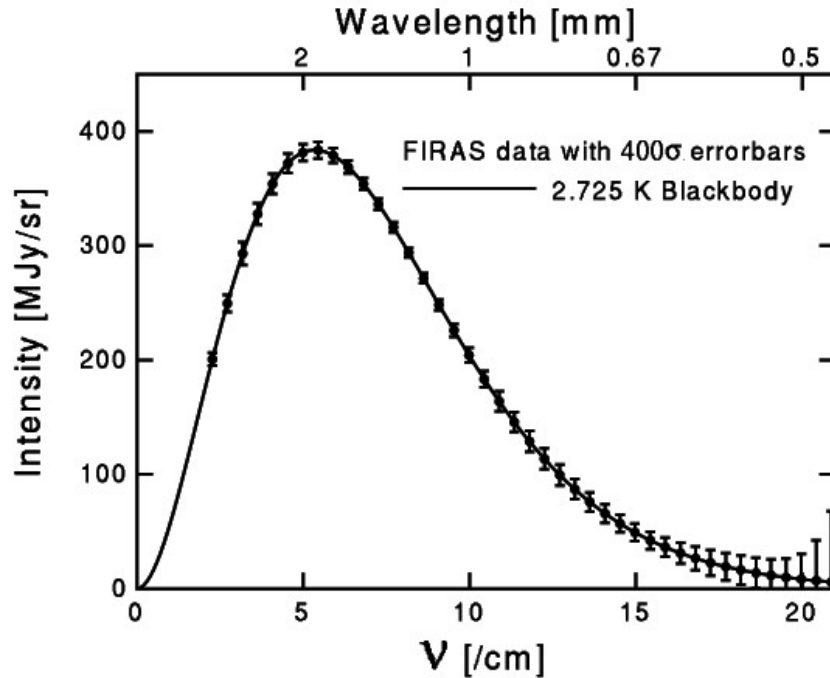


Figura 24. Espectro de radiación de fondo cósmica obtenido en la década de los 90 con el instrumento FIRAS del Satélite COBE de la NASA. La línea continua corresponde a la radiación de un cuerpo negro a $T=2.725$ K. Comparar con figuras 13 y 23.

Teoría del estado estacionario

La teoría del Big Bang tiene actualmente el rango de un paradigma de la cosmología. Sin embargo no todos los científicos comparten sus postulados. Algunos científicos consideran que el Universo no tiene principio ni fin. Para ellos el Universo no comenzó con el Big Bang, y en esencia el Universo siempre fue igual a como lo observamos en la actualidad. Esta hipótesis se conoce como “teoría del estado estacionario”. Tuvo su origen a comienzos del siglo XX e incorpora en ella la expansión de Universo y la homogeneidad del mismo. Los representantes más destacados de esta teoría son los astrónomos británicos Herman Bondi, Thomas Gold y Fred Hoyle, que propusieron este modelo en los años posteriores a la segunda guerra mundial. Según esta hipótesis el Universo se expande por siempre y la materia se crea continuamente de modo que en promedio la densidad del Universo permanece constante. La nueva materia se acumula y forma nuevas estrellas y galaxias, las cuales reemplazan a las que se van apagando o muriendo. Según esta hipótesis no sólo el Universo es homogéneo, sino que además las galaxias más alejadas son estadísticamente idénticas a las galaxias más cercanas a nosotros. Esto se conoce como el “principio cosmológico perfecto”. La teoría del Big Bang difiere significativamente en este punto. En esta última teoría las zonas más lejanas del Universo son más jóvenes, ya que la luz tardó más tiempo en llegar a nosotros. Por consiguiente, las galaxias en esas zonas deben estar en un estadio de desarrollo más temprano que el nuestro, con más estrellas grandes y de corta vida (estrellas jóvenes) que las galaxias cercanas a nosotros. Otra característica de esta teoría, es que no necesita del fondo de radiación cósmica (CMB) y por supuesto sí requiere que la materia se cree continuamente.

Sin embargo, cuando se descubrió la radiación de fondo, impresionados por el inesperado descubrimiento, los partidarios del modelo estacionario retrocedieron durante algún tiempo, para volver a la carga y contraatacar utilizando el mismo descubrimiento contra sus rivales. La radiación de fondo observada era extraordinariamente pareja (isotrópica) en todas las direcciones, revelando un Universo homogéneo. ¿Cómo podían entonces explicarse las enormes estructuras que se ven en el Universo actual, cómo galaxias y cúmulos de galaxias?. La radiación observada debía tener otro origen, decían.

Los partidarios del modelo del Big Bang salieron entonces a buscar esas irregularidades, que tenían que existir en alguna parte. Se hicieron numerosas observaciones y se montaron sofisticados detectores en globos y satélites para analizar más detalladamente la radiación de fondo. En 1992 cuando se comenzaron a analizar los datos obtenidos por el observatorio orbital COBE (Cosmic Background Explorer) un satélite de la NASA, se encontraron irregularidades en la temperatura de la radiación de fondo (CMB), consistentes con lo que se esperaba según el modelo del Big Bang. Estas imágenes fueron mejoradas por el Satélite WMAP (ver Fig. 27). Stephen Hawking, dijo sobre estas imágenes: “Es como mirar hacia atrás, al origen mismo del Universo”.

Hasta el momento, ningún instrumento creado por el hombre ha sido capaz de detectar la creación de un sólo átomo de hidrógeno en un espacio tan grande, además el descubrimiento de la radiación de fondo (CMB) junto a las pequeñísimas fluctuaciones detectadas recientemente por los satélites COBE y WMAP (ver Fig. 24) falsean la hipótesis del estado estacionario y avalan las predicciones del modelo del Big Bang.

Descubrimientos recientes – Materia oscura y energía oscura

En la actualidad se dispone de mapas confiables del Universo, que fueron recogidos con diversas técnicas que hacen uso de distintas zonas del espectro electromagnético, que van desde las ondas de radio hasta los rayos gama, incluyendo desde luego las microondas. Para explicar teóricamente estos mapas los científicos necesitan introducir en sus cálculos y modelos mucho más masa de la que cabría esperar si toda la masa proviniese de las estrellas visibles. En otras palabras, parecería haber mucho más masa en el Universo de la que vemos. Esto es parecido a lo que a veces observamos en la escuela. Por los ruidos provenientes de un aula contigua podemos inferir que la misma está muy concurrida, aunque no podamos realmente ver a ninguna persona, es decir tenemos evidencia indirecta de su presencia.

Con el término “materia oscura” se designa comúnmente a aquella parte de la masa que debería haber en el Universo para que nuestras observaciones sean consistentes con las teorías, pero que en realidad no vemos. Sabemos que hay “materia”, porque podemos ver los efectos de su influencia gravitacional. Sin embargo, la materia no emite una radiación electromagnética que sea detectable, por lo tanto es “oscura”. Por ejemplo, sabemos que existen muchos sistemas de estrellas dobles. Una de las características de éstas es que ambas giran alrededor de un punto llamado su centro de masa o de gravedad. A veces se observa una sola estrella que parece rotar alrededor de un punto, similar a una estrella doble, pero no podemos ver a su compañera. Esto nos lleva a suponer que seguramente hay una compañera, que por alguna razón no brilla y por consiguiente no vemos. Existen muchas hipótesis sobre la naturaleza de la masa perdida, que van desde exóticas partículas subatómicas hasta planetas, estrellas de neutrones y agujeros negros.

A veces se habla de enanas blancas y marrones. Lo notable de este tipo de materia, es que según las estimaciones actuales, la llamada “energía oscura” constituiría el 74 % de toda la masa del Universo (recordar que masa y energía son equivalentes) y la materia oscura propiamente sería un 23%, siendo la materia ordinaria solo el 0.5% de la materia del Universo. En realidad a lo que nos referimos con materia oscura es una materia cuyos efectos observamos (escuchamos los ruidos de los estudiantes del ejemplo anterior) pero no observamos su brillo (no vemos a los estudiantes). Lo que parece haberse perdido es la luz asociada a estos objetos. El desafío actual de la ciencia es conocer la naturaleza de este tipo de materia y lograr evidencia adicional e independiente de su existencia.

Alrededor de los años 30, el astrónomo Fritz Zwicky estaba estudiando el movimiento de cúmulos masivos, de galaxias distantes, en concreto el cúmulo Coma y el cúmulo Virgo. Zwicky calculó la masa de cada galaxia en el cúmulo basándose en su luminosidad. Luego trató de estimar la masa basándose en la que sería necesario tener en el cúmulo para contrarrestar la fuerza centrífuga que las tendía a apartar y encontró que la masa era 400 veces mayor que la masa estimada basándose en el primer cálculo. Esta anomalía desde entonces permanece sin ser resuelta.

Más tarde, en los años 70 y 80, se observaron nuevas anomalías en algunas galaxias espirales que rotan. Las estrellas que están en la periferia, al igual que las órbitas planetarias, deberían obedecer la tercera ley de Kepler ($T^2 = k.R^3 \Rightarrow \text{velocidad} = 2\pi R / T \propto 1/\sqrt{R}$) que llevaría a concluir que las estrellas más alejadas del centro de la galaxia deberían de tener velocidades decrecientes con su distancia al centro. Sin embargo se observa que las velocidades orbitales de estas estrellas permanecen casi constantes. La única explicación razonable es que en la galaxia hay más masa que la que vemos brillar. Otra forma de entender la anomalía es la siguiente. Si las estrellas cercanas al perímetro de una galaxia espiral, con velocidades orbitales en torno a los 200 kilómetros por segundo, fuesen retenidas por la fuerza gravitatoria de la materia que vemos, esta no sería suficiente para contrarrestar el efecto centrífugo, y las galaxias espirales deberían estar en pleno proceso de desintegración, cosa que no se observa.

Para explicar éstas y otras muchas anomalías, se propusieron diversas hipótesis, como la existencia de WIMPs (partículas elementales masivas que interactúan débilmente, por ejemplo neutrinos masivos), MACHOs, objetos masivos y compactos, especies de planetas, agujeros negros primordiales, etc. Sin embargo, ninguna de estas hipótesis ha sido demostrada observacionalmente ni aceptada por la comunidad científica.

No obstante, su búsqueda continúa arduamente, ya que nuestro destino final como Universo depende del valor de la masa o densidad promedio del Universo. Si la masa es menor que un cierto valor, llamado densidad crítica, ρ_{crit} , el Universo se seguirá expandiendo y enfriándose hasta apagarse por completo (un destino a veces conocido como el Big Chill), el Universo tendría un destino similar al de las creencias religiosas judeo-cristianas. Si la densidad de Universo es mayor que ρ_{crit} , en algún momento la expansión concluiría y comenzaría a contraerse para terminar en los que se conoce como el Big Crunch, que llevaría posiblemente a un nuevo Big Bang. En este caso, el Universo sería de carácter pulsante, con Big Bangs seguidos de Big Crunchs, en una especie de ciclos de muertes y “reencarnaciones” indefinidos, similares a los mitos Hindúes o sería

eterno como sostenían los antiguos Griegos. Finalmente, es posible que la densidad del Universo sea justamente la crítica, en cuyo caso estaríamos a mitad del camino entre estas dos alternativas extremas.

Teoría del Universo pulsante

¿Qué hacía Dios antes de crear el mundo? Esta es una antigua pregunta que preocupó a algunos teólogos en la antigüedad y ha sido objeto de estudio y preocupación de la ciencia. Se dice que algunos irónicos solían responder que antes de crear el mundo, Dios estaba ocupado haciendo los infiernos, para todos aquellos que realizan este tipo de preguntas. Según S. Hawking, al igual que para muchos otros científicos, esta pregunta es engañosa, ya que según la teoría general de la relatividad a medida que la masa se concentra más, el tiempo transcurre más lentamente. De modo que en el instante justo del Big Bang, al ser la densidad infinita, el tiempo se detiene. En otras palabras no hay antes del Big Bang, el Big Bang es también el comienzo del tiempo.

Otros científicos se inclinan a pensar que la evolución del Universo abarca una dimensión temporal que va mucho más allá de la explosión primordial y de la actual expansión. Actualmente las agrupaciones de galaxias y los cúmulos estelares, se mueven separándose unos de otros en franca expansión. Si la densidad del universo es mayor que su valor crítico, la teoría del Big Bang supone que la velocidad de recesión de dichos objetos era mayor en el pasado que hoy. La teoría del Universo pulsante sostiene que en un futuro inminente, la fuerza gravitatoria resultante del Universo será capaz de frenar su expansión, hasta el punto de iniciar el proceso contrario, es decir, una contracción. Todos los cuerpos celestes comenzarían a acercarse unos a otros a una velocidad cada vez mayor, hasta encontrarse en un mismo punto y constituir otra vez el huevo cósmico. (Big-crunch). Este huevo, después de cierto lapso de tiempo, volvería a estallar, dando origen a otro Universo expansivo.

El ciclo se repetiría eternamente, perpetuándose en el tiempo. Nuestro Universo sería el último de muchos surgidos en el pasado, luego de sucesivas explosiones y contracciones (pulsaciones). El momento en que el Universo se desploma sobre sí mismo atraído por su propia gravedad es conocido como "Big Crunch" en el ambiente científico. El Big Crunch marcaría el fin de nuestro Universo y el nacimiento de otro nuevo, tras el subsiguiente Big Bang que lo forme. Si esta teoría llegase a ser correcta, el Big Crunch ocurriría dentro de unos 150 mil millones de años. Si nos remitimos al [calendario de Sagan](#), esto sería dentro de unos 10 años a partir del 31 de diciembre.

Estimación de la densidad crítica de Universo (opcional)

Subyacente en esta historia, está la cuestión de la masa crítica de Universo, o mejor dicho la densidad crítica del Universo, es decir cual es la densidad que divide las aguas entre el Universo tipo A y B. Usaremos para esto el mismo argumento que usamos para saber si cuando arrojamos una piedra verticalmente hacia arriba la misma vuelve al suelo o nunca regresara. Como sabemos en el momento de arrojar la piedra, el sistema piedra-Tierra tiene energía potencial gravitatoria E_G y energía cinética E_C :

$$E_T = E_G + E_c = -G \cdot \frac{m_p \cdot M_T}{R_T} + \frac{1}{2} \cdot m_p \cdot v_0^2 = -G \cdot \frac{m_p \cdot M_T}{r} + \frac{1}{2} \cdot m_p \cdot v^2 \quad (20)$$

Aquí, m_p es la masa de la piedra, M_T y R_T la masa y radio de la Tierra respectivamente, G la constante universal de la Gravedad y v_0 la velocidad inicial de la piedra. El segundo miembro corresponde al estado cuando la piedra deja nuestra mano, el tercero se refiere al estado en que se ha alejado a una distancia r . A medida que la piedra sube, se aleja de la Tierra, r aumenta, y la energía potencial gravitatoria disminuye en valor absoluto, como E_p es negativa, al aumentar r , ella aumenta, por lo tanto la energía cinética debe disminuir para que la suma sea constante. Si la energía total E_T es negativa, significa que la energía cinética (siempre positiva) es menor que el valor absoluto de la energía potencial gravitatoria. Por lo tanto, a medida que la piedra se aleja de la Tierra, llegará a una distancia R_{max} , donde la energía cinética será nula y toda la energía será potencial. Este será el punto de máximo alcance de la piedra y a partir de allí comenzará su descenso. Si por el contrario, la energía total E_T es nula o positiva, la piedra nunca regresará. Tomemos un pedazo del Universo, digamos una esfera de radio r , centrada en una dada galaxia por ejemplo la nuestra. Como sabemos, las galaxias se alejan unas de otras siguiendo la ley de Hubble. Por lo tanto las galaxias que estén dentro de la capa (como una especie de cebolla) de radio r y espesor dr , se alejaran del centro con una velocidad $v(r)$ dada por:

$$v(r) = H \cdot r \quad (21)$$

Por lo tanto dicha capa tendrá asociada una energía cinética:

$$dE_c = \frac{1}{2} \cdot dm \cdot v^2 = \frac{1}{2} \cdot (\rho \cdot 4\pi \cdot r^2 \cdot dr) \cdot (H \cdot r)^2 \quad (22)$$

Aquí, ρ es la densidad promedio del Universo. La energía potencial de esta capa de cebolla será:

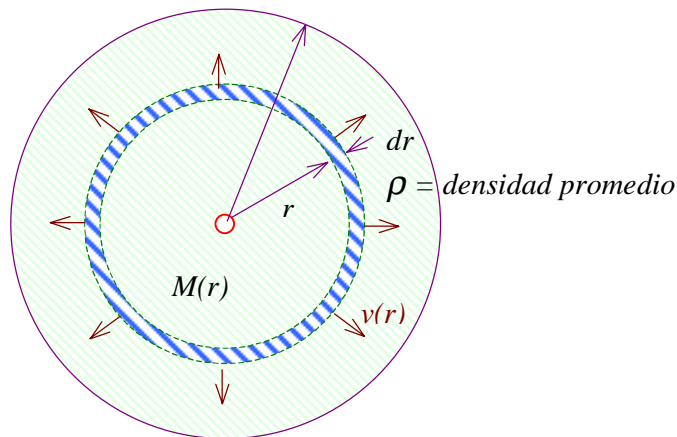


Figura 25. Muestra del Universo, centrada en una dada galaxia, por ejemplo la nuestra, ρ es la densidad de materia promedio. r es el radio de una capa infinitesimal, de espesor dr (cáscara de la cebolla) de masa dm . $v(r)$ es la velocidad de recesión de dicha capa, vista desde el centro.

$$dE_G = -G \cdot \frac{dm \cdot M(r)}{r} = -G \cdot \frac{(\rho \cdot 4\pi \cdot r^2 \cdot dr) \cdot \rho \cdot \frac{4\pi}{3} \cdot r^3}{r} = -G \frac{(4\pi)^2}{3} \cdot \rho^2 \cdot r^4 \cdot dr \quad (23)$$

Donde $M(r)$ es la masa dentro de la esfera de radio r , o sea $M(r) = 4/3 \pi \rho r^3$. Combinando las expresiones (21), (22) y (23), la energía total de la capa (de cebolla) en consideración será:

$$\begin{aligned} dE_T &= -G \frac{(4\pi)^2}{3} \cdot \rho^2 \cdot r^4 \cdot dr + 2\pi \cdot \rho \cdot H^2 \cdot r^4 \cdot dr = \\ &= 2\pi \cdot \rho \cdot \left(-G \cdot \frac{8\pi}{3} \rho + H^2 \right) \cdot r^4 \cdot dr \end{aligned} \quad (24)$$

La energía total de la esfera en consideración de radio R , será la suma (Integral) de las contribuciones de cada capa. El resultado puede obtenerse fácilmente y es:

$$E_T(R) = \frac{2\pi}{5} \cdot \rho \cdot \left(-G \cdot \frac{8\pi}{3} \rho + H^2 \right) \cdot R^5 \quad (25)$$

Notese que el signo de la expresión (25) esta determinado por el termino entre paréntesis que es el mismo que el de la ecuación (24). Ahora bien, a igual que en el caso de la piedra, esta muestra arbitraria del Universo que hemos elegido para nuestro análisis, continuará expandiéndose para siempre o alcanzará una grado de expansión máxima según su energía total $E_T(R)$ sea positiva o negativa. Claramente el valor crítico que divide las aguas es cuando $E_T = 0$. Si aplicamos esta condición a la ecuación (25), obtenemos el valor de la densidad crítica, ρ_c :

$$\rho_c = \frac{3}{4\pi} \cdot \frac{H^2}{G} \quad (26)$$

Usualmente se define el parámetro Ω como el cociente de la densidad a su valor crítico:

$$\Omega = \frac{\rho_{real}}{\rho_c} = \frac{\rho_{real}}{3} \cdot \frac{8\pi \cdot G}{H^2} \quad (27)$$

Usando los valores aceptados para $G (= 6.6 \times 10^{-11} \text{ N.m}^2/\text{Kg}^2)$ y la constante de Hubble $H (\approx 4.7 \cdot 10^{-17} \text{ s}^{-1} \approx 1/1.5 \times 10^{10} \text{ años})$, obtenemos:

$$\rho_c \approx 10^{-29} \text{ g/cm}^3 \approx 5 \text{ atomos de H/m}^3 \quad (28)$$

Este valor es muy pequeño, pero aun es casi 10 veces mayor que el valor observado. Sin embargo, hay muchos indicios muy sugestivos de que hay más masa en el Universo de lo que observamos o conocemos.

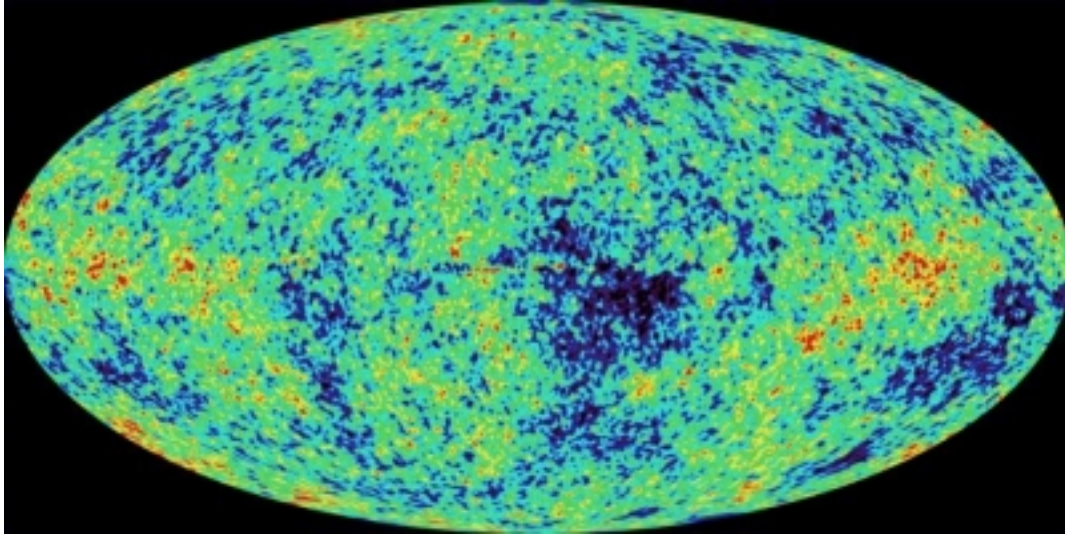


Figura 26. Imagen obtenida por el satélite Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) de la Nasa de la radiación de fondo (MCB). Aquí se amplificaron las variaciones de temperatura. Las variaciones de temperatura son del orden de 1 en 100000. Esto sería una especie de imagen de cómo el Universo lucía cuando tenía unos 300.000 años. Este sería la imagen más antigua del Universo que disponemos.

Conclusiones y consideraciones finales

Tanto el satélite COBE, como posteriormente lo hizo el WMAP de la NASA muestran que la radiación de fondo (CMB), es extremadamente homogénea, pero que presenta una serie de pequeñas irregularidades, que son consistentes con hipótesis del Big Bang. En gran medida podemos decir que las observaciones recientes, corroboran en gran medida las hipótesis básicas del modelo del Big Bang y que en el Universo hay mucha más materia oscura que materia ordinaria. Además, cuando ya nos estábamos acostumbrando a esta incómoda situación de ser una pequeña minoría en el Cosmos, y desconocer que es exactamente que es la materia oscura, los datos de WMAP y otras observaciones recientes, nos trajeron una nueva sorpresa. Resulta que el Universo no solo se está expandiendo, sino que además su tasa de expansión está aumentando (se está acelerando la expansión). Para explicar este hecho, los científicos se vieron obligados a introducir una nueva componente del Cosmos, la “Energía Oscura”, cuya naturaleza tampoco conocemos, pero que tendría un efecto gravitatorio repulsivo, que sería lo que causaría la aceleración de la expansión. Pero lo más sorprendente, es que ésta componente desconocida, constituiría la mayor parte del Universo (74%), un 23% sería materia oscura, también de naturaleza desconocida y que sólo un 0.4 % es materia ordinaria, de la que está hecha la Tierra y nosotros mismos.

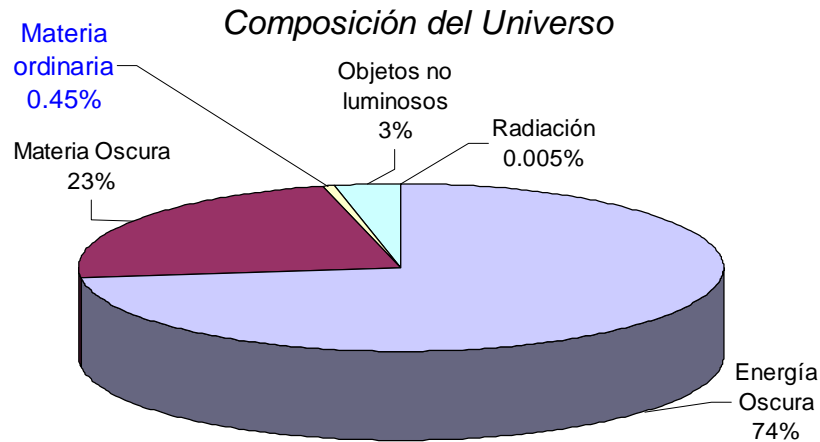


Figura 27. Composición del Universo. La materia ordinaria, parecería constituir menos del 1% de toda la materia del Universo.

Como vemos, hemos recorrido un largo camino en la comprensión del Cosmos, todo nuestro conocimiento se centra sólo en menos del 1% de mismo. Aun de esa pequeña fracción nos es mucho lo que conocemos. Todavía nos queda un tramo considerable para comprender los datos y observaciones que ya tenemos. Además, el camino parece estar llenos de sorpresas y desafíos.

“One thing I have learned in a long life: that all our science, measured against reality, is primitive and childlike- and yet it is the most precious thing we have ”
A.Einstein

“Somos los ojos del universo; la pequeña pieza conocida más despierta del cosmos”
Teilhard de Charden.

“We are all in the gutter, but some of us are looking at the stars”
A. O. Wilde

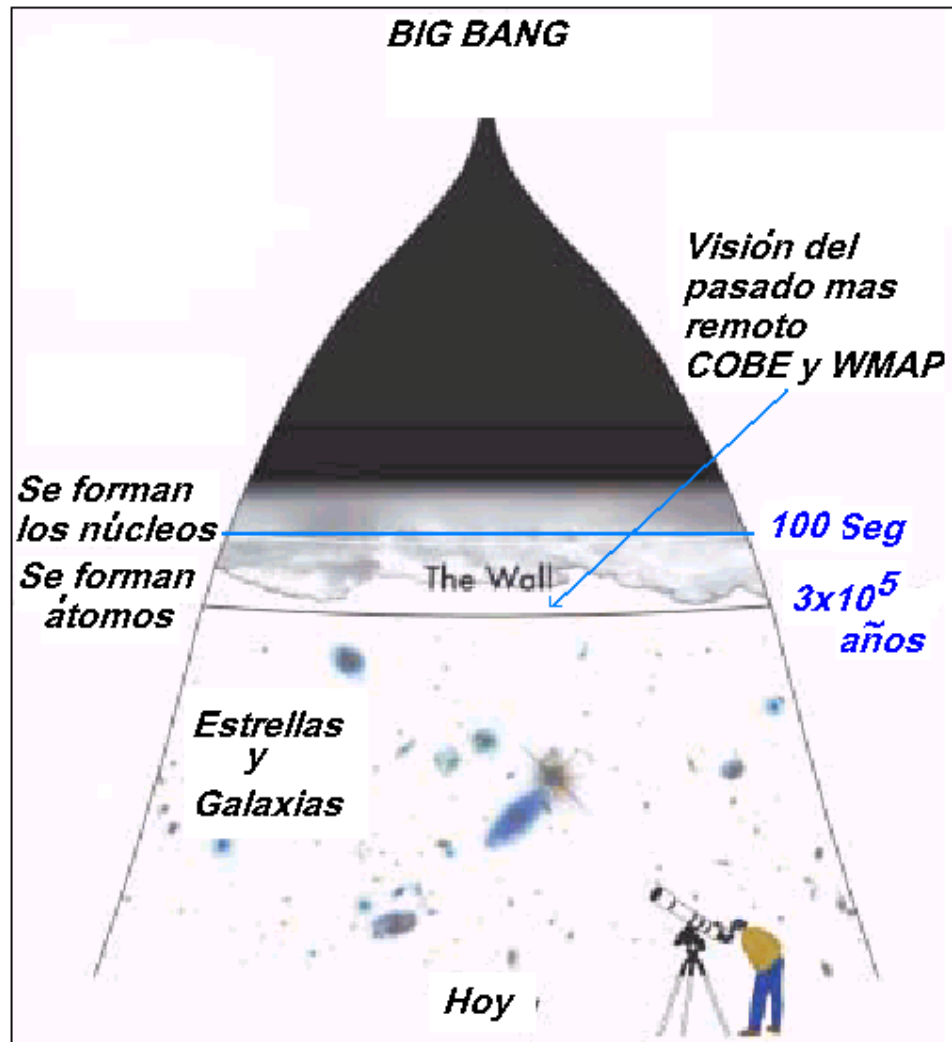


Figura 28. Imagen esquemática del Universo. Al mirar galaxias más lejanas, miramos hacia el pasado (hacia arriba en el grafico). Finalmente observamos la radiación de fondo que proviene de la pared (wall), unos 300000 años después de Big Bang, instante en que la radiación de dejó de interactuar con la materia. A este instante corresponde la imagen de la Fig. 26.

Bibliografía

1. - "Comparación de entre la Física Aristotélica y la Mecánica Clásica" O. Lombardi, *Educación en Ciencias 1* (3), 62-70, (1997) - *Revista de la Universidad Nacional de San Martín- Buenos Aires, Argentina*
2. - *Breve Historia de Tiempo* – S. Hawking – Drakontos Buenos Aires 1997.
3. - *El Big Bang* - H. Umerez - Ed. Norma - Buenos Aires 1992
4. - *Luz antigua* - Alan Lightman Ed. A. Bello Santiago de Chile 1997 (Ancient Light - Harvar Univ. Press, Mass 1991)
5. - *Cosmos*. Sagan, Carl. Ed. Planeta S. A. Barcelona, 1986.
6. - *Los Primeros Tres Primeros Minutos de Universo-* S. Weinberg- Madrid - Alianza 1996.
7. - *El Origen del Universo* – J.J. Sanguineti – UCA – Buenos Aires 1999.

8. - *La aventura del Universo (Coming of age in the milkyway) T. Ferris* Barcelona – Grijalbo Mondadori 1997.
9. - *The History and Fate of the Universe*. Lawrence M. Krauss, [The Physics Teacher Vol. 41, March 2003](http://ar.geocities.com/udesa_fisica/cosmologia/origen-fate-univ_2k3.pdf) - http://ar.geocities.com/udesa_fisica/cosmologia/origen-fate-univ_2k3.pdf
10. - *Dark energy* - Ian Morison *Physics Education* 38 (3) 205, 2003- Excelente artículo– Recomendado. http://ar.geocities.com/udesa_fisica/cosmologia/dark_energy.pdf
11. - *The Evolution Of The Universe*- P. James E. Peebles, David N. Schramm, Edwin L. Turner and Richard G. Kron - *Scientific American* 271, 52 (1994). Excelente articulo, muy facil de leer – Recomendado.
12. - *Making sense of modern cosmology* - P. Peebles. *Scientific American* January 2001- El número de Enero de 2001 de la revista *Scientific American* está dedicado a los avances recientes de cosmología -Excelente articulo, muy fácil de leer – Recomendado.
13. - *New Light on Dark Matter* – J. P. Ostriker and P. Steinhardt – *Science* Vol.300, p. 1909, June 2003 – El número de Junio de 2003 (Volumen 300) de la revista *Science* está dedicado a los avances recientes de cosmología.

Referencias de Cosmología en la Web

1. - [Cosmología - El Origen del Universo](http://www.astrored.net/origen_del_universo/) - Breve Introducción - http://www.astrored.net/origen_del_universo/
2. - [Curso básico de Cosmología](http://www.geocities.com/launchpad/2921/comolog.htm)- de Pedro J. Hernández <http://www.geocities.com/launchpad/2921/comolog.htm>
3. - *De Proyecto 2061- Project 2061 - Alfabetización científica para un futuro dinámico - Sitio de la Asociación Norteamericana para el avance de la ciencia.* <http://www.project2061.org/>
4. - [Clase interactiva de cosmología](http://ar.geocities.com/udesa_fisica/cosmologia/cosmo2/index.htm)- Breve introducción, con gráficos y figuras, del los conceptos básicos de Cosmología y Astronomía. Nivel introductorio. http://ar.geocities.com/udesa_fisica/cosmologia/cosmo2/index.htm
5. - [Astronomy Course Note Websites](http://members.aol.com/gca7sky/course.htm)- Sitio de Astronomía en Ingles <http://members.aol.com/gca7sky/course.htm>
6. - [An Introduction to Cosmology](#) - NASA. The [MAP Home Page](#)
7. - [Making sense of modern cosmology](#) P. Peebles. *Scientific American* January 2001, p.44
8. - [Introduction to cosmology](http://www.astro.virginia.edu/~jh8h/Foundations/contents.html) J. Hawley, Univ. of Virginia. Con preguntas. <http://www.astro.virginia.edu/~jh8h/Foundations/contents.html>
9. - [Cosmología: La evolución del Universo](#) P. Peebles, D. Schramm, E. Turner y R. Kron THE EVOLUTION OF THE UNIVERSE- P. James E. Peebles, David N. Schramm, Edwin L. Turner and Richard G. Kron - *Scientific American* 271, 52 (1994). http://ar.geocities.com/udesa_fisica/tutoriales/cosmology_peebles.htm
10. - [Curso básico de astronomía](#) Astronomy Course Note Websites Univ. of Virginia. Muy completo en Ingles, con preguntas. <http://members.aol.com/gca7sky/course.htm>
11. - [Introducción a la teoría de la relatividad](http://fisica.usac.edu.gt/public/tesis_lic/enrique_p/node6.html) - Enrique Pazos 2000 http://fisica.usac.edu.gt/public/tesis_lic/enrique_p/node6.html
12. - [La teoría de la RELATIVIDAD](http://www.geocities.com/angelto.geo/bhole/relativi.htm) (Ángel Torregrosa Lillo) <http://www.geocities.com/angelto.geo/bhole/relativi.htm>
13. - [El Universo y su origen](http://home.earthlink.net/~umuri/ /Main/M_origen.html) Clase interactiva. http://home.earthlink.net/~umuri/ /Main/M_origen.html
14. - [Cosmology: origin, evolution, fate of material universe](http://background.uchicago.edu/~whu/beginners/introduction.html) Clase interactiva. <http://background.uchicago.edu/~whu/beginners/introduction.html>
15. - [Ned Write's cosmology tutorial](http://www.astro.ucla.edu/~wright/cosmolog.htm) de UCLA, USA. Muy completo en Ingles. <http://www.astro.ucla.edu/~wright/cosmolog.htm>
16. - [MARTIN WHITE Professor of Physics Professor of Astronomy UC Berkeley](http://astron.berkeley.edu/~mwhite/welcome.html) - and the [Hubble expansion](http://astron.berkeley.edu/~mwhite/welcome.html) by Matin White <http://astron.berkeley.edu/~mwhite/welcome.html>