



La memoria del universo

José Luis Pinedo Vega, Armilde Rivera Huizar,
Leopoldo Quirino Torres[†], Fernando Mireles García
e Ignacio Dávila Rangel

La Tierra comenzó a ser redonda y a dejar de ser el centro del universo hace apenas cinco siglos. A partir de entonces, con su satélite plateado comenzó a dar vueltas sobre ella misma y alrededor del Sol. Años más tarde resultó que el Sol era tan sólo una estrella más, entre más de cien mil millones de otras estrellas que conforman la galaxia –la Vía Láctea– y como no está situado en el centro de la galaxia resultó que viaja siguiendo una órbita elíptica que le toma varios cientos de millones de años. La galaxia misma resultó ser apenas un poblado más en un universo de diez mil millones de poblados como ella. La Tierra se hizo entonces tan pequeña, el sistema solar encogió tanto y se fundió entre la multitud de cuerpos celestes, que la dimensión del hombre a la escala del universo se redujo a proporciones ínfimas.

Catherine David (1999).

Introducción

Si el Sol se apagara en este momento, no pasaría nada especial en la Tierra en los siguientes ocho minutos y 18 segundos –tiempo que le toma a la luz del Sol llegar a la Tierra. Los últimos rayos de luz vendrían ya de camino y no nos enteraríamos de nada hasta que dejaran de llegar. De forma similar, si una galaxia se extinguiera repentinamente en alguna parte del universo en este mismo instante, en la Tierra nadie se enteraría hasta varios millones de años después.

La luz que llega a la Tierra desde cada una de las distintas galaxias y nebulosas lleva viajando por el espacio tiempos que pueden ser abismalmente distintos. En consecuencia, corresponden a eventos que ocurrieron en momentos muy diferentes. Este hecho

permite conocer diferentes etapas de la historia del universo: las imágenes que los especialistas captan constituyen la memoria del universo.

El desarrollo de telescopios gigantes montados en observatorios o en satélites ha permitido detectar imágenes totalmente invisibles al ojo humano y a los telescopios convencionales, algunas de las cuales pueden corresponder a etapas primitivas del universo. En el medio interestelar se han logrado observar nebulosas multicolores de formas extravagantes (Figuras 1, 2). Entre ellas, una de las más conocidas es la *Cabeza de caballo* (Figura 3).

De las interpretaciones del conjunto de observaciones y mediciones del universo surgen las diferentes teorías sobre su formación y evolución. La más popular entre ellas es la teoría del *big-bang*, denominada técnicamente *singularidad de la gran explosión inicial* del universo.

La teoría del *big-bang* fue propuesta en 1948 por el físico nuclear y cosmólogo norteamericano de origen ruso Georgy Antonovich Gamow (1904-1968). Tiene sus antecedentes en los trabajos de Alexander Friedman y Georges Lemaître, de 1922 y 1927, respectivamente, quienes concluyeron en forma teórica que el universo está en continuo movimiento. Sin embargo, la piedra angular de la teoría del *big-bang* fue la interpretación del *corrimiento hacia el rojo* del espectro de las galaxias lejanas, hecho por Edwin Powell Hubble en el año de 1929.

En 1965 Arno Penzias y Robert Wilson detectaron la radiación cósmica de fondo, a la que se ha llamado



Figura 1. Nebulosa de Orión. NASA/C.R. O'Dell (Rice University).

el vestigio de la *radiación fósil* del universo. La radiación de fondo resultó ser constante e isotrópica (igual en todas direcciones), y su espectro, analizado de acuerdo a la ley de radiación de Planck, correspondió a una tem-

peratura de 3 kelvins (las más recientes determinaciones arrojan un valor de 2.726 kelvins). Por el descubrimiento de la radiación de fondo cósmica, Penzias y Wilson fueron acreedores al premio Nobel de física en



Figura 2. Galaxia espiral NGC 4414. NASA/ESA Hubble Space Telescope.

1978. Este descubrimiento constituye la evidencia experimental más importante en la que se sustenta la teoría del *big-bang*.

Espectro de una galaxia

No bien nos adentramos en el tema, ya hay en juego demasiados términos científicos (espectro de una galaxia, corrimiento hacia el rojo, radiación fósil...). Recapitulemos un poco, tratando de explicar los conceptos centrales.

Aunque toda clasificación de la astronomía puede ser discutible, conviene asumir el riesgo de utilizar una definición, para situar el tema. Se puede decir que la

astronomía es la ciencia que estudia la estructuración y disposición de la materia en el universo. Puede dividirse en astronomía de posición, astronomía gravitacional, astronomía física o astrofísica, y cosmología. La astrofísica estudia la constitución física o las propiedades físicas de los objetos cósmicos. La cosmología, apoyada en la astrofísica, trata del origen y evolución del universo como un todo. Una de las líneas generales de la astrofísica es el estudio de las galaxias. Puede inferirse que la razón es que son justamente ellas las que contienen gran parte de la memoria del universo.

Las galaxias se pueden clasificar en elípticas, espirales e irregulares. Las dos primeras son las más comunes. La observación de las galaxias cercanas muestra



Figura 3. Nebulosa: *Cabeza de caballo*. Nigel Sharp (NOAO), KPNO, AURA, NSF.

que están compuestas por estrellas individuales. Las galaxias pueden contener desde 10 millones hasta un billón de estrellas. Formando parte de una galaxia existen subestructuras como las nebulosas, los cúmulos estelares o grupos de estrellas atraídas entre sí por su gravedad mutua, así como sistemas estelares múltiples.

A diferencia de las galaxias cercanas, de las galaxias lejanas sólo se detecta una mezcla de la luz –o mejor dicho de la radiación electromagnética– proveniente del conjunto de estrellas y objetos cósmicos que las componen. Las galaxias lejanas se diferencian unas de otras por la naturaleza de la radiación que emiten. La luz visible, al ser tan sólo un componente de la radiación electromagnética que emiten, constituye una

especie de “huella digital” extremadamente valiosa que caracteriza cada galaxia.

El análisis de la luz visible de las galaxias lejanas, igual que el de cualquier haz de luz, requiere descomponer a éste, separando sus colores. El principio es similar a lo que ocurre con un haz de luz que se hace pasar por un prisma (Figura 4). La descomposición de cualquier haz de luz en sus componentes da lugar a lo que se ha llamado un *espectro*.

Los espectros se obtienen mediante instrumentos llamados *espectrógrafos*, o bien con *radiómetros*. Los espectrógrafos, al igual que un prisma, descomponen cualitativamente el haz de luz, es decir, muestran los colores, pero no dan cuenta de la intensidad de cada uno.



Figura 4. Espectro de la luz visible. ©Adam Hart-Davis.

En cambio, los radiómetros permiten medir con gran precisión la intensidad de cada componente del espectro. Éstos son los instrumentos apropiados para analizar el espectro de las galaxias.

El corrimiento hacia el rojo de un espectro de las galaxias

Los colores de los espectros de cualquier fuente de luz visible, proyectados sobre una pantalla, aparecen siempre en la misma posición, independientemente de cuál sea la fuente, siempre y cuando se midan con un mismo instrumento. Sin embargo, esto no sucede así con la luz que proviene de galaxias lejanas.

En 1912 el astrónomo norteamericano Vesto Melvin Slipher (1875-1969), analizando la luz de cuatro nebulosas, encontró que para tres de ellas, las líneas características del color rojo no aparecían en su posición normal, y en el caso de la cuarta nebulosa –la nebulosa de Andrómeda– las líneas características del color azul tampoco aparecían en su posición normal. El fenómeno que descubrió Slipher es justamente lo que se conoce como el *desplazamiento o corrimiento hacia el rojo* del espectro de las galaxias (Figura 5).

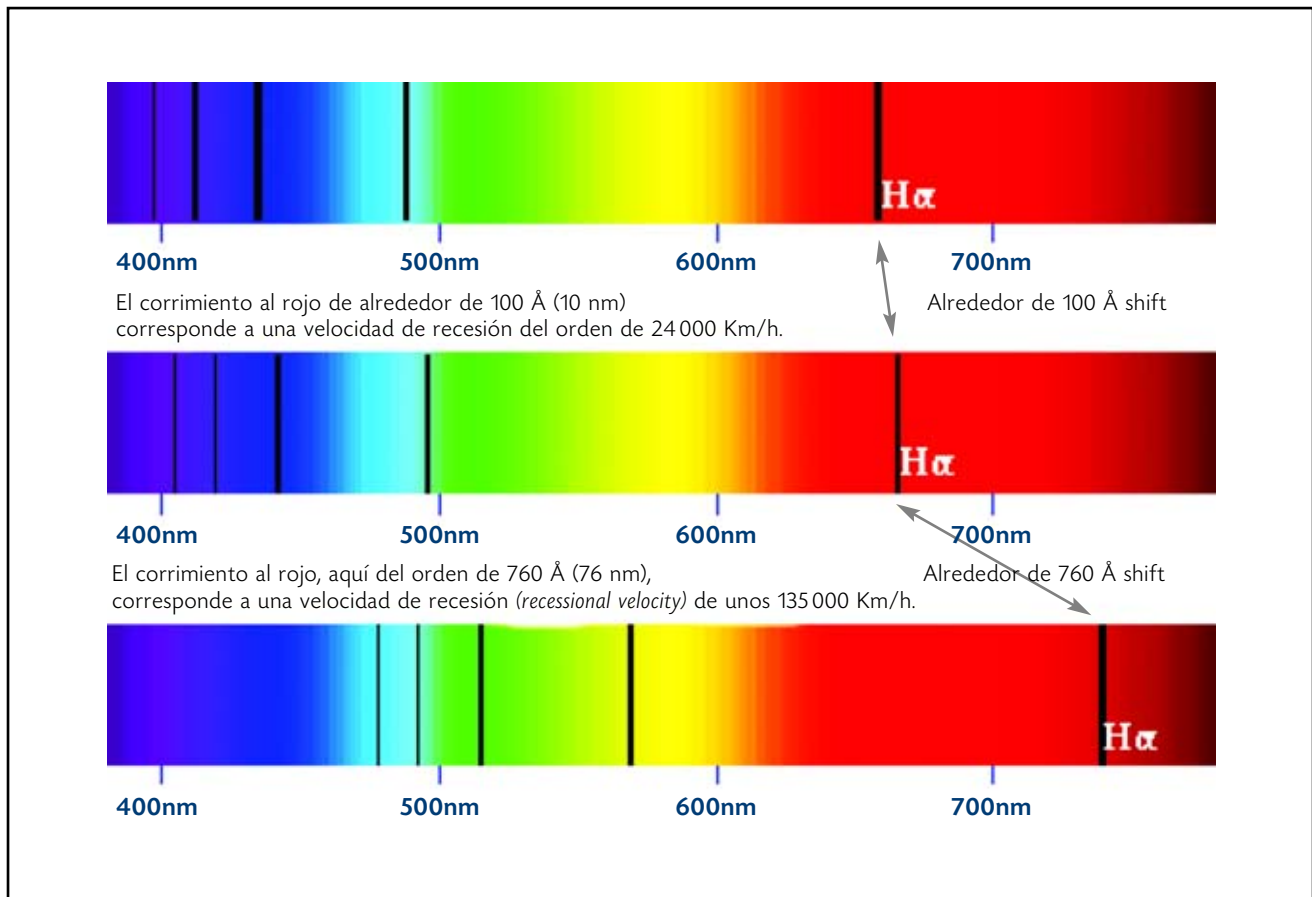


Figura 5. Desplazamiento de las líneas espectrales hacia la zona roja del espectro. Fuente: www.astrocosmo.cl/anexos/l-hubble.htm.

Slipher encontró también el corrimiento hacia el azul, aunque de éste se habla mucho menos en la literatura. El rojo y el azul son los extremos del espectro de la luz visible.

En 1914, después de realizar el análisis de 16 nebulosas –de las cuales todas, menos una, presentaban desplazamiento hacia el rojo– Slipher presentó los resultados ante la Sociedad Astronómica Estadounidense.

El fenómeno llamó la atención de otros astrónomos. En 1918, Edwin Powell Hubble comenzó a estudiar las nebulosas y, entre otras cosas, descubrió en 1923 que las nebulosas espirales en realidad son galaxias –Andrómeda entre ellas.

Para 1925 se habían ya analizado 45 galaxias, y se había encontrado que 43 de ellas presentaban corrimiento hacia el rojo, mientras que dos presentaban corrimiento hacia el azul.

Hubble observó que en unas galaxias el corrimiento hacia el rojo era mayor que en otras. Pero una cosa es observar un fenómeno y otra explicarlo. La interrogante central a la que se enfrentaban los astrónomos a partir de tales observaciones era, ¿cuál es la causa del corrimiento hacia el rojo?

En 1929 Hubble interpretó el corrimiento como producto del *efecto Doppler* de la luz. Hasta entonces el efecto Doppler sólo se había observado en ondas de sonido. Su manifestación más cotidiana es la deformación del sonido de un vehículo en movimiento (por ejemplo, el de la sirena de una ambulancia que pasa frente a nosotros). La deformación es mayor a medida que la velocidad del vehículo es mayor. Cuando éste se acerca, el sonido es más agudo o más alto, porque las ondas sonoras se comprimen por efecto de la velocidad del vehículo; por ello, la distancia entre una onda y otra, o la longitud de onda del sonido, se reduce. Cuando el vehículo se aleja, las ondas sonoras se alargan, y el sonido es más grave o bajo; en este caso, porque la longitud de onda aumenta.

Hubble postuló que, de manera semejante al sonido, si una fuente de luz está en movimiento, la luz que emite debe experimentar un efecto Doppler. Si la fuente de luz se acerca, la longitud de onda se reduce, y en consecuencia la luz tendrá un corrimiento hacia el azul, dado que el azul es el color de longitud

de onda más pequeña en el espectro visible. Por el contrario, si la fuente de luz se aleja, las ondas se separan; la longitud de onda aumenta y la luz tendrá un corrimiento hacia el rojo, dado que el rojo tiene la longitud de onda más grande en el espectro visible.

La expansión del universo

La interpretación del corrimiento hacia el rojo como un efecto Doppler condujo a la conclusión de que las galaxias se alejan unas de otras en el universo. A su vez, de esta conclusión surgió la idea de la expansión del universo. Por ello, la interpretación del corrimiento hacia el rojo como efecto Doppler fue la piedra angular de la teoría del *big-bang*.

El corrimiento hacia el rojo, designado mediante la letra z , se define como el cambio relativo de la longitud de onda de la luz (λ). Si $\lambda_{observada}$ es la longitud de onda del color rojo de una galaxia y λ_{normal} es la longitud de onda característica del color rojo en la Tierra, z se puede escribir en cualquiera de las siguientes tres formas:

$$z = \frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{\lambda_{observada} - \lambda_{normal}}{\lambda_{normal}} = \frac{\lambda_{observada}}{\lambda_{normal}} - 1$$

Hubble observó que el corrimiento hacia el rojo (z) es proporcional a la distancia (d) a la que se encuentran las galaxias respecto a la Tierra. Esto es:

$$z \propto d$$

Luego estableció que la relación entre el corrimiento hacia el rojo y la velocidad de recesión –o fuga– debida a la expansión del universo (generalmente medida en kilómetros por segundo), está dada por:

$$v = zc$$

donde c es la velocidad de la luz en el vacío ($c = 2.99792458 \times 10^8$ metros por segundo).

A partir de esto, postuló la relación entre la velocidad de recesión de las galaxias y la distancia de ellas respecto a la Tierra. Dado que la velocidad de las galaxias (v) es proporcional al corrimiento hacia el rojo

(z) y éste a su vez es proporcional a la distancia (d) de las galaxias, Hubble dedujo que la velocidad de recesión de las galaxias es proporcional a su distancia a la Tierra. Esta relación es conocida como la *ley de Hubble*:

$$v = H_0 d$$

La constante de proporcionalidad H_0 se conoce como *constante de Hubble*, y representa la tasa de expansión del universo. Una de las connotaciones más sorprendentes de la ley de Hubble es que la velocidad de las galaxias es tanto más grande cuanto más alejadas se encuentren éstas.

Hasta 1994 el valor reconocido de la constante de Hubble era $H_0 = 80 \text{ km/s/Mpc}$ (kilómetros por segundo por megaparsec; un megaparsec es igual a 3.26 años luz, es decir, 30.84 billones de kilómetros). La astrónoma Wendy Freedman –directora de los Observatorios

Carnegie, líder del equipo que trabaja con el Telescopio Espacial Hubble– presentó el 25 de mayo de 1999, en una conferencia de prensa en la NASA, un nuevo valor de la constante de Hubble: $H_0 = 70 \text{ km/s/Mpc}$, con una incertidumbre del 10 por ciento. En mayo del 2001 reportó un nuevo valor: $H_0 = 72 \pm 8 \text{ km/s/Mpc}$.

En 2003, haciendo uso del satélite de la NASA Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (Sonda Wilkinson de Anisotropía de Microondas), se obtuvo un valor de $H_0 = 71 \pm 4 \text{ km/s/Mpc}$. En 2006 este valor fue rectificado, dando $H_0 = 70 \pm 2.4/-3.2 \text{ km/s/Mpc}$.

Considerando el radio del universo propuesto por Arp Halton, del Instituto de Astrofísica de Garching, Alemania ($10.4 \times 10^{22} \text{ km} = 1.099 \times 10^{10}$ años luz), y utilizando el valor más reciente de la constante de Hubble, $H_0 = 70 \text{ km/s/Mpc}$, la velocidad de expansión del universo es del orden de 0.786 veces la velocidad de la luz. Esto es:

$$v = Hd = \left(70 \frac{\text{km}}{\text{s} \cdot \text{Mpc}}\right) \left(\frac{10^3 \text{ m}}{\text{km}}\right) \left(\frac{1 \text{ Mpc}}{3.261 \times 10^6 \text{ años luz}}\right) 1.099 \times 10^{10} \text{ años luz} = 2.359 \times 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}} \left(\frac{c}{3 \times 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}}\right) = 0.786 c$$

La edad del universo

A partir de la constante de Hubble, puede derivarse la edad del universo. En virtud de que la expansión del universo experimentó una desaceleración, el cálculo riguroso de esta edad debe tomar en cuenta un parámetro de desaceleración (q). En forma simplificada, puede suponerse que $q = 0$. En tal caso la edad

del universo –o edad de Hubble– está definida como el inverso de la constante de Hubble:

$$t_0 = \frac{1}{H_0}$$

Para $H_0 = 70 \text{ km/s/Mpc}$:

$$t_0 = \frac{1}{H_0} = \frac{1}{70 \frac{\text{km}}{\text{s} \cdot \text{Mpc}} \left(\frac{1 \text{ Mpc}}{30.84 \times 10^{18} \text{ km}}\right) \left(\frac{3.153 \times 10^7 \text{ s}}{\text{año}}\right)} = 13.973 \times 10^9 \text{ años}$$

o 13 mil 973 millones de años.

Una de las primeras estimaciones de la constante de Hubble, reconocidas como muy confiables, la realizó Allan Sandage, astrónomo del Instituto Carnegie, en 1958: $H_0 = 75 \text{ km/s/Mpc}$. Sin embargo él mismo, en años recientes, es uno de los astrónomos que ha repor-

tado los valores más pequeños. En 1999 reportó un valor de $H_0 = 59 \text{ km/s/Mpc}$. Con este valor, la edad del universo sería del orden de 16 mil 578 millones de años (16.578×10^9 años).

El proyecto Wilkinson Microwave Anisotropy Probe de la NASA reportó, en marzo de 2008, la edad del uni-

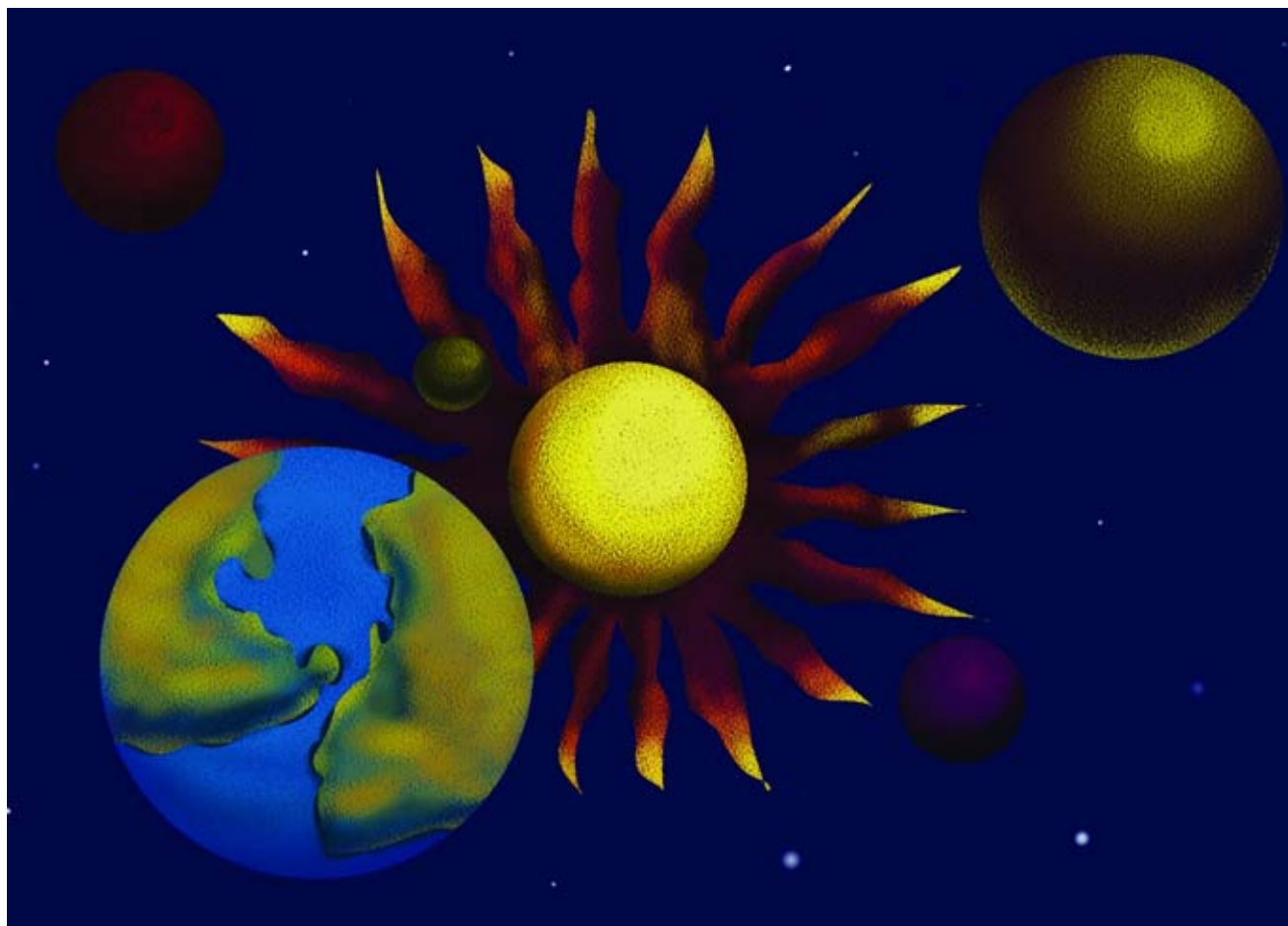
verso como: $(13.7 \pm 0.2) \times 10^9$ años. Paradójicamente, de acuerdo con la revista del *Centre National de la Recherche Scientifique* de Francia (*CNRS Info*), investigadores del *European Southern Observatory* reportaron en 1999 el descubrimiento de dos estrellas enanas blancas con una edad de entre 10 y 12 mil millones de años (10×10^9 y 12×10^9) años.

Las eras del universo

De acuerdo a la teoría del *big bang* descrita por Stephen Hawking, el universo se desarrolló en cuatro etapas o eras: *La primera era* duró tan sólo un segundo. A pesar de su breve duración, infinidad de estudios se han consagrado a esta primera era. La densidad del universo en ese primer momento era enorme en relación con las proporciones que la materia tiene en la actualidad. En estas condiciones, el universo, por razones cuya explicación no existe –dicen los astrofísicos,

“por razones que no están a nuestro alcance”– experimentó una gran explosión que debió durar segundos (un tiempo inimaginablemente breve, alrededor de una décima de septillonésima de segundo). Después de la gran explosión, el universo continuó aún muy denso y con una temperatura sumamente elevada, del orden de varios miles de millones de grados centígrados. Luego, la temperatura descendió abruptamente hasta unos cuantos miles de millones de grados centígrados y en esas condiciones se produjo lo que se ha llamado *la inflación del universo*, en la cual la tasa de expansión del universo se duplicó frenéticamente. Al final de este primer segundo, la temperatura del universo era aún del orden de varios miles de millones de grados.

La segunda era duró tres minutos. La temperatura del universo bajó hasta llegar a diez millones de grados centígrados, temperatura a la cual aparecieron los primeros núcleos de deuterio y helio. A este proceso se le ha llamado *la nucleosíntesis primordial*.



La tercera era duró un millón de años, y se le ha llamado *era radiativa*. En un primer momento existió una vasta neblina de gas y un plasma opaco que emitía radiación electromagnética. El universo se enfrió paulatinamente hasta llegar a una temperatura del orden de diez mil grados centígrados, temperatura a la cual el universo llegó a ser transparente. La materia dejó de moverse en forma relativista, y la energía gravitacional empezó a predominar sobre la radiación. Los electrones fueron atraídos por los protones y comenzaron a girar alrededor de ellos y en consecuencia comenzaron a emitir los primeros fotones de luz –los llamados *fotones de fondo difuso*–, compuestos fundamentalmente de radiación ultravioleta extrema o altamente energética. La energía se desacopló de los átomos y continuó por el espacio prácticamente sin obstáculo, convirtiéndose en lo que hoy conocemos como *radiación de fondo*. Poco a poco comenzaron a juntarse los grumos del puré cósmico, del cual comenzaron a emerger grupos de galaxias. Así se inició *la era material o estelar*, que es la que conocemos.

De acuerdo a la teoría del *big-bang*, el estado del universo, desde entonces y hasta nuestros días, constituye la *cuarta era* del universo.

Los retos de la astrofísica

Antes del descubrimiento de la radiación de fondo por Penzias y Wilson, la teoría del *big-bang* tenía un número de adeptos similar al de su competidora, la teoría del universo con grupos de galaxias cuasiestacionario o cuasiestático. Esta teoría, formalizada por los británicos Hermann Bondi, Thomas Gold y Fred Hoyle en 1948, postula entre otras cosas, que existen procesos permanentes que crean materia en el universo.

Pero tras el descubrimiento de la radiación de fondo, las cosas cambiaron radicalmente, al grado de que prácticamente la totalidad de trabajos en cosmología están hoy enfocados a entender el universo en el contexto de la teoría del *big-bang*, o a cotejar las observaciones con esta teoría.

Albert Einstein, hasta la década de los veinte, fue partidario de la teoría del estado cuasiestacionario.

Incluso, al verificar que su teoría general de la relatividad no admitía soluciones estáticas (sino que describe un universo o en expansión o en contracción) intentó corregirla postulando su “constante cosmológica”, Λ . Años después se retractó, calificando a esta constante como “el más grande error de su vida”.

La primera era duró tan sólo un segundo. A pesar de su breve duración, infinidad de estudios se han consagrado a esta primera era. La densidad del universo en ese primer momento era enorme en relación con las proporciones que la materia tiene en la actualidad

Los partidarios de la teoría del universo cuasiestacionario interpretan el corrimiento hacia el rojo como *efecto Compton*: un mecanismo de interacción entre fotones y electrones (o entre fotones y positrones). Los positrones son partículas de masa similar a los electrones, pero con carga positiva. Al interactuar un fotón con un electrón, pierde una fracción de su energía, misma que se transfiere al electrón. Al perder energía, los fotones presentan una longitud de onda más grande que la original. Como ya se había señalado, en el caso de la luz visible los fotones de mayor longitud corresponden al color rojo.

Para que el corrimiento hacia el rojo de las galaxias lejanas pudiera explicarse como efecto Compton, era necesario demostrar la existencia de electrones libres y de positrones en el espacio intergaláctico. Las observaciones de los rayos gamma de aniquilación electrón-positrón, efectuadas por el segundo laboratorio espacial más grande de la NASA –el *Compton Gamma Ray Observatory* (Observatorio de Rayos Gamma Compton, puesto en órbita en 1991, dotado de cuatro instrumentos con una gran sensibilidad, entre otros el telescopio Compton, que lleva este nombre en honor a Arthur Holly Compton, a quien se otorgó el premio Nobel de física en 1926 por descubrir el efecto Compton)– confirmaron la existencia de nubes de electrones y positrones en el espacio intergaláctico. La observación



Fotos digitales por cortesía del equipo de mecánicos del *Fuse* (digital photos courtesy of *Fuse* mechanical team, June 11-13, 1999).

de fotones de aniquilación provenientes de las estrellas fue para los partidarios de la teoría del universo cuasiestacionario, una evidencia de la presencia de electrones y positrones, y ésta a su vez un argumento para explicar el corrimiento hacia el rojo como efecto Compton.

El 24 de junio 1999, como resultado de una colaboración franco-canadiense con la NASA fue lanzado y puesto en órbita el satélite *Fuse*, dotado de un telescopio con longitud de onda en el ultravioleta extremo, justamente para detectar la radiación de fondo difuso, emitida en la tercera era, previa a la formación del puré cósmico.

Fuse se ocupará también de medir la cantidad de deuterio que está en todos los rincones del universo. ¿Por qué interesa medir el deuterio? Porque de acuerdo a la propia teoría del *big-bang* el deuterio, junto con el helio, fue producido en el momento de la gran explosión, durante la “nucleosíntesis primordial”, y como el deuterio es consumido por completo por las estrellas, su presencia sería una prueba de que, en su ruta de expansión del universo, éstas no han tenido tiempo de consumir todo el deuterio formado durante la gran explosión. Midiendo la cantidad de deuterio restante, los astrofísicos esperan obtener otro método para medir la velocidad de expansión del universo.

Paralelamente, la Agencia Espacial Europea planea, para el 31 de octubre del 2008, enviar al espacio la sonda *Planck Surveyor*, con el fin de observar en la forma más precisa posible la anisotropía de la radiación fósil, las radioondas emitidas por el puré cósmico. Se espera que sus resultados aporten argumentos que confirmen la teoría del *big-bang*.

A lo largo de la historia de la humanidad, las observaciones cosmológicas han escapado de manera reiterada a la lógica del sentido común. Una cosa es la observación de un fenómeno y otra su interpretación. No se puede asegurar la infalibilidad de ninguna teoría y menos a corto plazo. Pero independientemente de ello, las observaciones astronómicas representan avances científicos y tecnológicos extraordinariamente valiosos, que tendrán la posibilidad de incidir en otras disciplinas y podrán ser objeto de interpretaciones cada vez más acabadas.

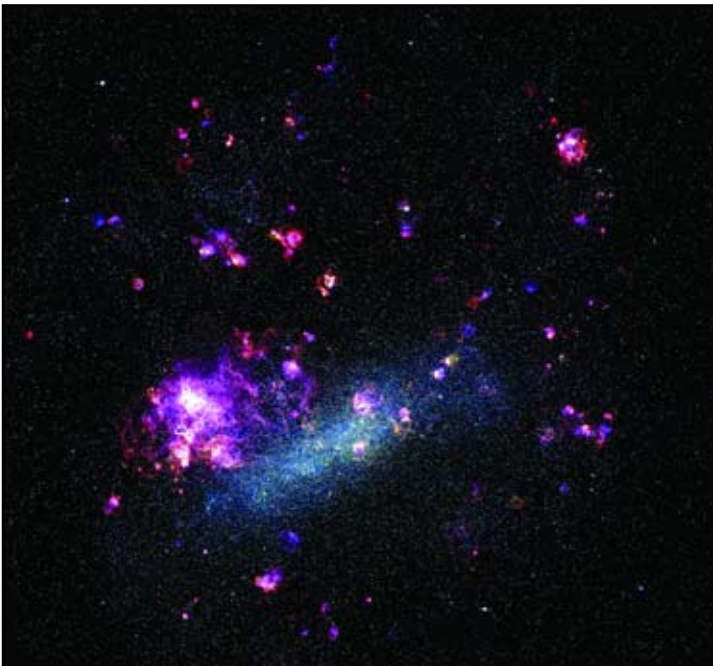


Imagen tomada por el *Fuse*. http://archive.stsci.edu/prepds/fuse_mc/overviewimages.html#colimages

José Luis Pinedo Vega es doctor en física, egresado de la Universidad Joseph Fourier - Grenoble I (Francia). Es coordinador del grupo Física de la Energía y responsable del laboratorio de espectrorradiometría de la Universidad Autónoma de Zacatecas (UAZ).

jlpinedo@auz.edu.mx

Armilde Rivera Huizar es doctora en química, egresada de la Universidad Joseph Fourier - Grenoble I (Francia). Es profesora e investigadora del programa de Ingeniería Química de la Facultad de Ciencias Químicas de la UAZ. Su línea de estudio actual son los problemas didácticos de la física.

armilde@auz.edu.mx

Leopoldo Quirino Torres fue doctor en ingeniería nuclear, egresado de la Universidad de Missouri, profesor e investigador del la Unidad de Estudios Nucleares de la UAZ. Era especialista en dosimetría del radón. Falleció en marzo de 2007.

Fernando Mireles García es doctor en ingeniería nuclear, con especialidad en seguridad física. Es egresado de la Universidad de Missouri y profesor e investigador del la Unidad de Estudios Nucleares de la UAZ. Se especializa en dosimetría ambiental.

fmireles@auz.edu.mx

Ignacio Dávila Rangel es doctor en ciencias nucleares, egresado de la Universidad Autónoma del Estado de México. Es profesor e investigador del la Unidad de Estudios Nucleares de la UAZ, especialista en radiación ambiental y tratamiento de desechos radiactivos.

idavilara@auz.edu.mx

Bibliografía

- American Institute of Physics, *Physical news in 1999*, p. 2.
- David, Catherine, "La folle aventure de l'univers", *Le nouvel observateur*, 1811, pp. 4-9.
- Chown, M. (1993), "All you ever wanted to know about the big-bang", *New scientist*, vol. 38, núm. 1869.
- CNRS INFO (2008), "Matière noire et naine blanche" núm. 383.
- Gamow, G. (1948), "The origin of elements and the separation of galaxies", *Physical review*, 74, 505.
- Halton, A. (1976), "Extragalactic distance scale", *Science*, 264, 603.
- Hawking, Stephen (2001), *El universo en una cáscara de nuez*, Barcelona, Crítica/Planeta.
- Hubble, E. (1929), "A relation between distance and radial velocity among extra-galactic nebulae", *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 15;3, pp. 168-173.
- Hubble, E. (1937), *Observational approach to cosmology*, Oxford University Press.
- Kaufmann, William J. (1977), *Relatividad y cosmología*, segunda edición, Harla.
- Miley, G. K. et al. (1972), "Extragalactic radio sources", *Nature*, 257, pp. 269-272.
- Mitchell, W. C. (1997), "Big bang theory under fire", *Physics essays*, 10, 2.
- Narlikar, J. V. (2004), "Croir au big-bang est un acte de foi", *La recherche*, 372, pp. 65-68.
- Penzias, A. A. y R. W. Wilson (1965), "A measurement of excess antenna temperature at 4080 Mc/s", *Astrophysical journal*, 142, 419.
- Stewart, J. M. y D. W. Sciama (1967), "Peculiar velocity of the sun and its relation to the cosmic microwave background", *Nature*, 216, p. 748f.
- Thuan, T. X. (1999), "La querelle du big-bang", *Le nouvel observateur*, 1811, pp. 10-11.