

El principio y el fin del universo

Segunda parte: La Gran Explosión

por Christine Allen y Miguel Angel Herrera

En el primer artículo de esta serie describimos los pasos que llevaron al descubrimiento de la expansión del universo; vimos cómo los corrimientos al rojo en los espectros de las galaxias observados por Slipher y Hubble condujeron al resultado de que el universo estaba en expansión —sin duda uno de los descubrimientos más sorprendentes e importantes en la historia de la ciencia. También presentamos una breve síntesis de la evolución de la física atómica y nuclear en las primeras décadas de nuestro siglo y vimos cómo llegó a establecerse una estrecha relación entre la física del micromundo y el comportamiento del universo en su conjunto. Asimismo, mencionamos que la teoría de la relatividad general de Einstein habría de proporcionar el marco teórico más adecuado para describir el universo.

Este inusitado desarrollo científico atrajo la atención de muchas de las grandes figuras de la ciencia, y los resultados de semejante concentración de talento no tardaron en manifestarse. Por un lado, los astrónomos proporcionaban, día con día, nuevas y más precisas observaciones. Por el otro, los relativistas generaban decenas de plausibles descripciones dinámicas del universo, y los físicos nucleares encontraban o inventaban maneras de producir en los interiores de las estrellas o en los primeros instantes de vida del universo algunos de los elementos químicos que constituyen el medio que nos rodea. Como consecuencia de esta efervescencia fue emergiendo, poco a poco y en medio de grandes controversias, una teoría que incorporaba de manera satisfactoria la mayor parte de los resultados observacionales y teóricos, y que, en nuestros días, ha llegado a ser el esquema más aceptado. Esta teoría se conoce como “la Gran Explosión” (la expresión original en inglés es el “Big Bang”). En el presente artículo veremos los aspectos de la teoría de la Gran Explosión que han resultado más convincentes; sobre ellos, la mayor parte de los científicos está de acuerdo, al grado que se ha dado en llamar a la Gran Explosión la teoría cosmológica o el modelo “estándar”.



Figura 1. El grupo de galaxias conocido como el Quinteto de Stephan. En el universo joven las galaxias estaban muy cerca unas de las otras, más que las de este conocido grupo. (Foto de los Observatorios Hale)

La Gran Explosión

Regresemos a la época en que, por primera vez en forma científica, fue planteada la posibilidad de que el universo hubiera tenido su origen en una gran explosión. Recordemos que esto fue una consecuencia de la recesión de las galaxias. En efecto, si todas las galaxias están alejándose unas de otras, entonces en el pasado tuvieron que estar más cercanas entre sí y, por ende, el universo tuvo que haber sido más pequeño; si nos remontamos a tiempos cada vez más lejanos, si "invertimos" la expansión cual una película que corre al revés, encontraremos un universo cada vez más compacto, en el cual las galaxias y los cúmulos de galaxias se acercan unos a otros cada vez más, hasta llegar a tocarse. Claro está que este proceso no puede continuar indefinidamente; después de cierto tiempo (unos 15 000 millones de años), las dimensiones del universo habrán alcanzado su valor mínimo, esto es, cero. En este momento, la película habrá llegado a su fin; desde el punto de vista de la teoría de la Gran Explosión, nos encontramos en el instante mismo del nacimiento del universo. En otras palabras, el universo no ha existido desde siempre, sino que tuvo un origen. En la época en que fue planteada por primera vez, la teoría de la Gran Explosión resultaba ser una idea demasiado radical para muchos científicos, al grado de parecer inaceptable. Pero George Gamow no sólo la aceptó, sino que inventó para ella el nombre de "Big Bang", e investigó algunas de sus consecuencias. En el año de 1949 Gamow publicó un artículo en el cual intentaba reproducir las abundancias de los elementos químicos del universo en nuestros días a partir de una mezcla muy caliente de partículas elementales (a la cual denominó *Ylem*), que es la situación que debe prevalecer en los primeros instantes de vida del universo. Otra idea fundamental de Gamow fue la predicción teórica de que el universo actual debe estar permeado por una "radiación de fondo" correspondiente a una temperatura de alrededor de 5 grados Kelvin (esto es, unos 268 grados Celsius bajo cero), predicción que confirmaron ampliamente las observaciones modernas

De hecho, el descubrimiento de la radiación de fondo de 3 grados Kelvin (270°C bajo cero), hecho por Penzias y Wilson, aportó una de las pruebas fundamentales de la teoría de la Gran Explosión, como ya habíamos mencionado en el artículo anterior. Y, ciertamente, fueron necesarias pruebas convincentes, pues los científicos no podían aceptar un resultado tan radical como la Gran Explosión sin demostraciones contundentes. En un momento veremos la razón por la cual la radiación de fondo es una prueba de que hubo tal explosión. Otra demostración viene dada por el hecho de que la abundancia observada del helio (una vez descontados los efectos "contaminantes" de las estrellas, que también son capaces de sintetizar este elemento) coincide exactamente con la que, según la teoría, debió haberse formado en los primeros instantes de vida del universo. Otra prueba más puede verse en el hecho de que los objetos más lejanos que conocemos —los cuasares— parecen ser radicalmente distintos de las galaxias cercanas a nosotros. Como la luz se propaga con una velocidad grande pero finita, vemos a los cuasares no como son ahora, sino como



Figura 2. ¿La Gran Explosión? Créeme, fue muy, muy, muy, muy, muy pero muy grande... (S. Harris, 1980)

eran hace mucho tiempo, cuando salió de ellos la luz que en este momento nos llega. Y como algunos cuasares distan de nosotros casi 15 000 millones de años-luz, los vemos como eran en su juventud, cuando el universo acababa de empezar su expansión. Por lo tanto, concluimos que en ese tiempo no había galaxias, sino cuasares (o, más precisamente, que las galaxias estaban pasando por una fase muy activa, que corresponde al fenómeno cuasar). El universo de hoy no es igual al universo joven: ha evolucionado, tuvo un estado inicial y no es eterno.

El hecho de que el universo en que vivimos haya tenido un origen en el tiempo plantea problemas que, por el momento, no estamos en condiciones de resolver. ¿Qué había "antes"? ¿Qué sentido tiene un universo de densidad infinita, como la que existía al iniciarse la expansión? Estas preguntas y muchas otras que surgen están situadas, por ahora, fuera del dominio de la física, y no nos detendremos en ellas. ¿Cómo era el universo cuando nació? Por desgracia, tampoco podemos aún responder a esa pregunta; los físicos se refieren al estado inicial del universo como una "singularidad", lo cual no es sino una manera elegante de decir que nuestras ecuaciones no pueden representarlo. Pero la ciencia moderna ya es capaz de dar respuesta a otras preguntas, como: ¿cuándo se inició la expansión? Para contestar esta cuestión, basta con invertir los movimientos de las galaxias y ver en qué momento convergen sus distancias a cero; el resultado es que la expansión comenzó hace unos 15 000 millones de años; esto es, que el universo tiene una edad de aproximadamente 15 000 millones de años. ¿Cuándo

terminará la expansión?, o incluso, ¿terminará algún día y se convertirá en una contracción, para completar una especie de ciclo? La respuesta a estas preguntas es mucho más difícil. Como veremos más adelante, hay algunos datos que parecen indicar que la expansión del universo continuará indefinidamente, pero también hay evidencias de que podría convertirse eventualmente en una contracción. ¿Cómo era el universo recién nacido? No podemos describir tal singularidad, pero inmediatamente después de ocurrida, el universo comenzó a expandirse, y a partir de este momento se volvió susceptible de ser estudiado mediante las leyes de la física. Veamos qué podemos decir al respecto.

Las condiciones físicas en el principio

Para describir las fases más tempranas del Universo será necesario recordar un sencillo hecho de la física elemental y formular una hipótesis. El sencillo hecho es que un gas al contraerse se calienta, y al expandirse se enfría (este resultado es válido si no intercambia calor con sus alrededores). La hipótesis que formularemos es que el universo se encuentra en un estado de "equilibrio termodinámico". Los físicos dicen que un sistema está en equilibrio termodinámico cuando en él la temperatura y la presión son iguales en todos los sitios y cuando, además, todas las reacciones proceden con la misma rapidez en ambos sentidos. Es decir, si en algún sitio, por ejemplo, dos átomos de hidrógeno se combinan para dar una molécula, en otro sitio una molécula

de hidrógeno se disociará para dar dos átomos, y esto ocurrirá en todo el sistema de manera que el número total de átomos y de moléculas de hidrógeno permanezca siempre igual.

Es evidente que en la actualidad el universo no se encuentra en equilibrio termodinámico: hay regiones muy calientes (como las estrellas) y otras muy frías (como el polvo interestelar); también hay regiones donde se forman elementos nuevos que no se están destruyendo (los interiores estelares). Pero en el remoto pasado, en su infancia, el universo sí estuvo en equilibrio, pues su densidad era tan alta que las partículas en él interactuaban frecuentemente, e igualaban cualquier inhomogeneidad que pudiera aparecer. Gracias a esto, hoy podemos conocer las propiedades del universo joven.

En las condiciones que prevalecían en los primeros instantes del universo se daban fenómenos poco usuales en nuestra vida diaria. Así, por ejemplo, si tenemos fotones a muy alta temperatura, esta "luz" puede convertirse espontáneamente en materia. Recordemos la equivalencia entre masa y energía, uno de los resultados más famosos de la teoría de la relatividad especial. Así como en una bomba H se convierte masa en energía, así también la energía ("luz", o radiación electromagnética, esto es, fotones) puede convertirse en masa. Un fotón (sin masa, pero con gran energía) puede materializarse, y "crear" un par de partículas con masa. Es importante recalcar que las partículas creadas no son independientes entre sí, puesto que tanto en su creación como en su aniquilación deben respetarse ciertas reglas, conocidas en el lenguaje científico como "leyes de conservación". Entre las más importantes de estas reglas podemos mencionar la conservación de la carga, la del espín, la de la paridad, etcétera. El resultado neto es que por cada partícula creada, debe aparecer también su antipartícula; en nuestro caso, cada fotón se materializará en un par electrón-antielectrón (partícula esta última conocida como *positrón*). Para que esto ocurra, la temperatura debe ser altísima, de más de 8000 millones de grados. Por cierto que también ocurre el proceso inverso: cuando un electrón choca con un positrón, se aniquilan mutuamente, y se producen fotones, esto es, energía (véase la figura 3).

Con todo lo anterior, ya estamos en condiciones de describir la evolución del universo en sus primeras etapas.

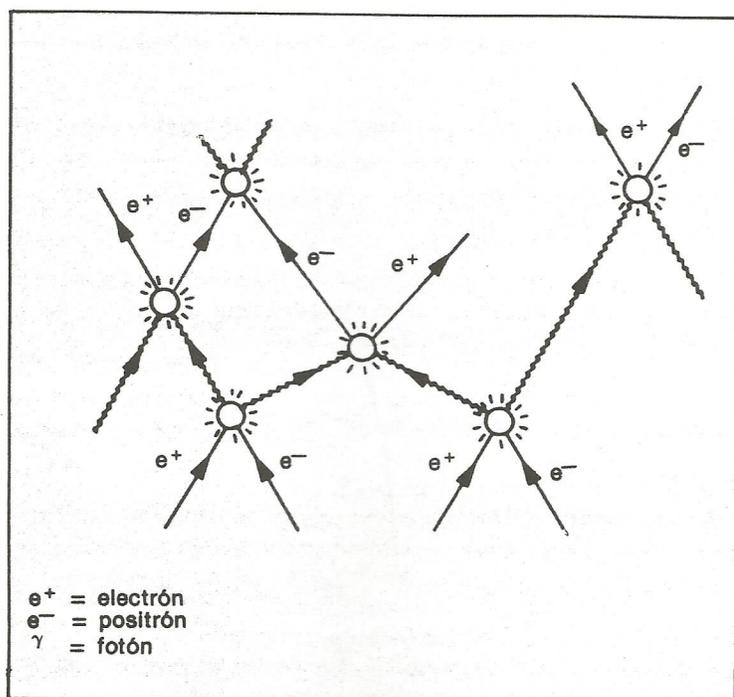


Figura 3. La materialización de fotones en pares electrón-positrón. Para que estas reacciones ocurran, se requieren temperaturas muy altas, del orden de 8000 millones de grados. (S. Hacyan, 1986)

Los primeros instantes de la Gran Explosión

En el modelo "estándar", la descripción del universo principia alrededor de una diezmilésima de segundo (10^{-4} segundos) después de su "nacimiento". Esto puede parecernos un tiempo brevísimo, pero hay teorías modernas que se remontan a instantes aún más tempranos, a menos de 10^{-35} segundos, y que tienen consecuencias que pueden relacionarse con hechos presentes.

Empezamos nuestra descripción poco antes que transcurra la primera diezmilésima de segundo desde la explosión. En esta época, era frecuente la creación de pares electrón-positrón a partir de los fotones (radiación). Antes de esto, se habían aniquilado casi todos los protones con sus

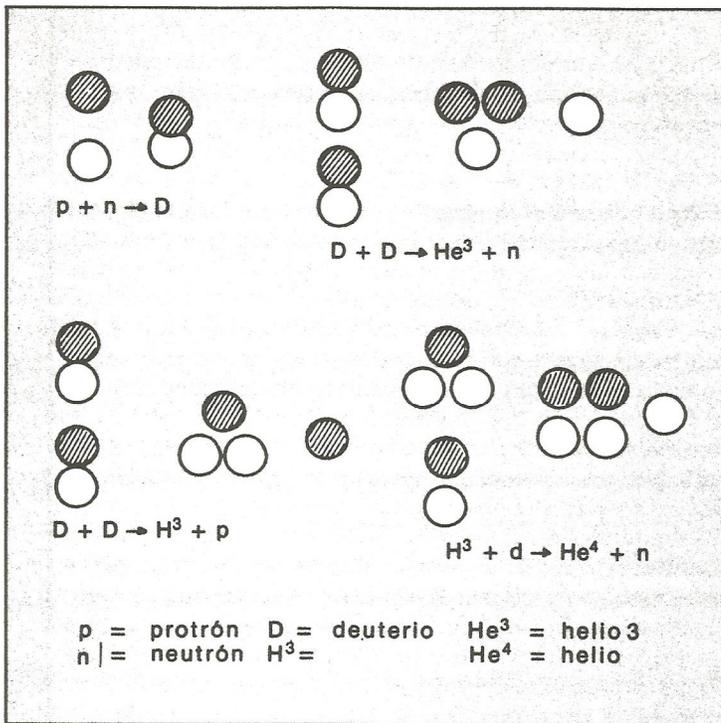


Figura 4. Una manera de formar núcleos de helio a partir de protones y neutrones. Un núcleo de hidrógeno captura a un neutrón y se convierte en deuterio; el deuterio, a su vez, interactúa con otro deuterio y produce un núcleo de tritio. El tritio, finalmente, captura a un deuterio y produce un núcleo de helio. (S. Hacyan, 1986.)

correspondientes antipartículas. Cuando el universo tenía una edad de una diezmilésima de segundo, su temperatura era de aproximadamente un billón de grados, y estaba constituido principalmente por fotones, electrones, positrones, neutrinos, antineutrinos y unos cuantos protones y neutrones (decimos unos cuantos pues realmente eran pocos: por cada diez mil millones de fotones había apenas cinco protones y neutrones). Todas estas partículas interactuaban vigorosamente, impidiendo que se formaran átomos como los de nuestra materia ordinaria. Así, se tenía una especie de sopa de partículas elementales en violenta agitación, algo muy parecido al *Ylem* originalmente imaginado por Gamow.

En condiciones normales, los neutrones aislados son partículas inestables: transcurridos algunos minutos, un neutrón libre se convierte en un protón, liberando un electrón y un antineutrino; el protón, a su vez, es estable. Pero a temperaturas superiores a los 10 000 millones de grados, como las que reinaban en los primeros instantes del universo, los protones y los neutrones tienen suficiente energía para transformarse fácilmente unos en otros. Es decir, un protón puede atrapar a un electrón y transformarse en neutrón, emitiendo un neutrino. Pero para que esto ocurra, es necesario que haya electrones en abundancia.

Al enfriarse el universo a causa de su expansión, las reacciones entre las partículas se hacen cada vez más lentas. Cuando la temperatura hubo descendido a 40 000 millones de grados —unos 0.27 segundos después de la explo-

sión — llegamos al momento en que los neutrinos dejan de interactuar con el resto de la materia; en el lenguaje de los físicos “los neutrinos se desacoplan”. Desde entonces hasta la fecha, el universo ha estado permeado por esta especie de mar de neutrinos y antineutrinos, el cual, por efectos de la expansión, se ha enfriado independientemente de las demás componentes.

El universo continúa expandiéndose, y su temperatura sigue en descenso. Al llegar a unos 8000 millones de grados —alrededor de 1.65 segundos después de la explosión— la energía de los fotones se vuelve insuficiente para que sigan materializándose en pares electrón-positrón. Dado que los electrones y positrones presentes continúan aniquilándose cada vez que se encuentran, y que el proceso de creación de pares ya ha cesado, después de algún tiempo se agotan estas partículas. Solamente sobreviven unos cuantos electrones (5 de cada 10 000 millones de los que había originalmente). La carga negativa de estos pocos electrones compensa la carga positiva de los pocos protones que antes habían sobrevivido, y asegura la neutralidad de carga del universo. A partir de este momento, la formación de

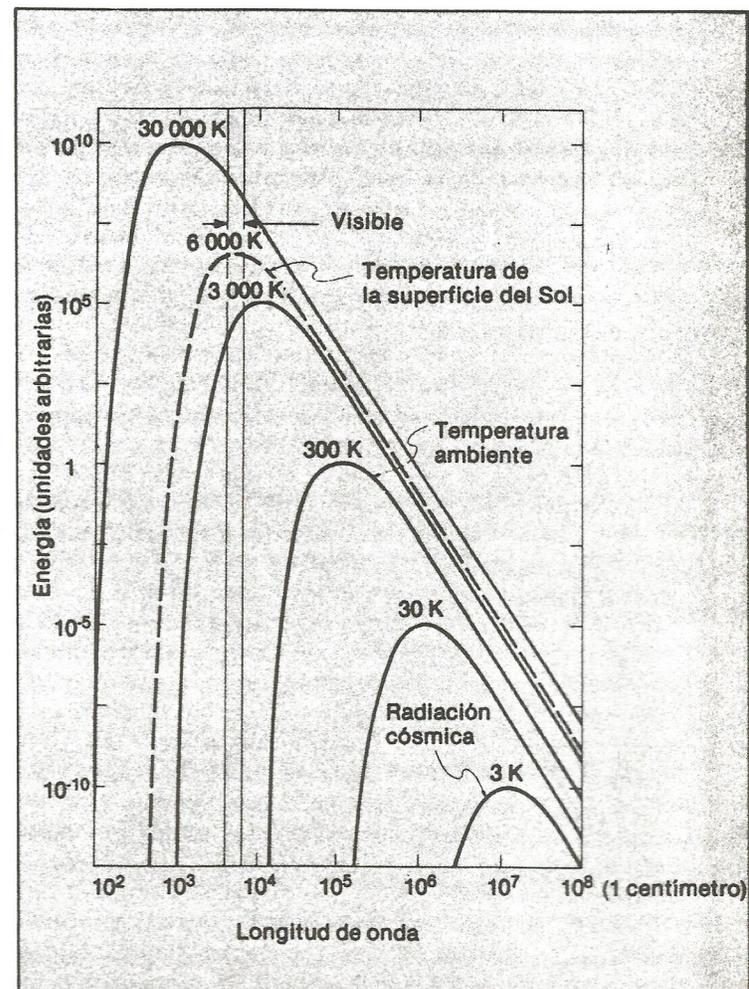


Figura 5. La distribución de longitudes de onda de la radiación emitida por un cuerpo en equilibrio termodinámico (llamada radiación de “cuerpo negro”), para distintos valores de la temperatura. (E. Harrison, 1981)

neutrones cesa, y el número de éstos irá en descenso. Los cálculos teóricos muestran que en este momento había un neutrón por cada seis protones, número que resultará de crucial importancia para la nucleosíntesis del helio primigenio, la cual ocurrirá unos minutos más tarde.

La nucleosíntesis del helio y del deuterio

En el intervalo de tiempo comprendido entre 1.65 segundos y 190 segundos —un lapso relativamente largo— nada violento ocurre. El universo continúa expandiéndose y enfriándose. Cuando su temperatura llega a unos 900 millones de grados —unos 190 segundos después de la explosión— se inicia el importantísimo proceso de las reacciones termonucleares. En esta fase, prácticamente todos los neutrones que aún sobreviven se combinan con protones, para darnos núcleos de deuterio (elemento también conocido como hidrógeno pesado). Estos, a su vez, pueden interactuar con otras partículas y, a través de varias reacciones nucleares, producir núcleos de helio. En la figura 4 se ilustra una de las posibles secuencias de reacciones que sintetizan helio.

Es importante remarcar que estas reacciones sólo pueden ocurrir cuando la temperatura es de unos 900 millones de grados, ni mucho menor ni mucho mayor. En efecto, si la temperatura es mucho mayor, los núcleos de helio recién formados se destruyen por impactos con electrones y neutrones; si es mucho menor, los núcleos de tritio y los protones no pueden acercarse lo suficiente como para reaccionar, y el proceso que sintetiza helio no puede llevarse a cabo. También es importante notar que el proceso de nucleosíntesis en el universo temprano procede paso a paso, por capturas sucesivas de protones o neutrones. Ahora bien, el núcleo de masa 5 (que se obtiene cuando el helio captura un protón o un neutrón) no es estable; decae antes de poder capturar otra partícula. Por esto, en el universo temprano sólo se fabrica helio, y no elementos más pesados. Para poder sintetizar estos últimos, es necesaria una densidad mucho mayor, condición que se da actualmente en la región central de las estrellas.

El proceso que hemos descrito para la formación del helio supone que al continuar el descenso de temperatura a causa de la expansión del universo, los núcleos de helio ya formados no podrán destruirse; en otras palabras, la abundancia del helio queda establecida en los procesos que ocurren cuando el universo tiene aproximadamente tres minutos de edad; de ahí en adelante, la abundancia de helio en el universo sólo podrá modificarse en el interior de las estrellas. Por esto, si en la actualidad nos fijamos en las estrellas más viejas del universo (cuyas regiones externas reflejan aún fielmente las abundancias químicas que prevalecían en el momento de su formación, esto es, cuando el universo era joven), y si observamos que la abundancia de helio en ellas coincide con la predicción de la teoría de la Gran Explosión, esta observación constituirá una prueba convincente de la veracidad de la teoría. Veamos cuál es la abundancia de helio que se predice.

Habíamos mencionado que cuando el universo tenía

una edad de aproximadamente 1.65 segundos había en él un neutrón por cada seis protones. Esta proporción depende sólo de la pequeña diferencia entre las masas de estas partículas, y no está ligada a ninguna condición específica de la Gran Explosión. La proporción sigue siendo prácticamente la misma cuando se inicia la nucleosíntesis del helio, cuando han transcurrido poco más de tres minutos de vida del universo. Ahora bien, en este proceso casi todos los neutrones libres terminan formando parte de núcleos de helio, que están compuestos de dos protones y dos neutrones. Tomemos una muestra representativa de la mezcla de partículas, respetando la proporción en que se dan, digamos, dos neutrones y doce protones. Al finalizar las nucleosíntesis tendremos un núcleo de helio, diez protones sobrantes y ningún neutrón; es decir, tendremos un núcleo de helio por cada diez protones (o, equivalentemente, por cada diez núcleos de hidrógeno). Esta es la abundancia de helio que predice la teoría de la Gran Explosión, la cual concuerda sorprendentemente bien con la que se observa en las estrellas más viejas que conocemos. Además, ésta parece ser la misma en todos sitios, trátese de estrellas viejas en nuestra pro-

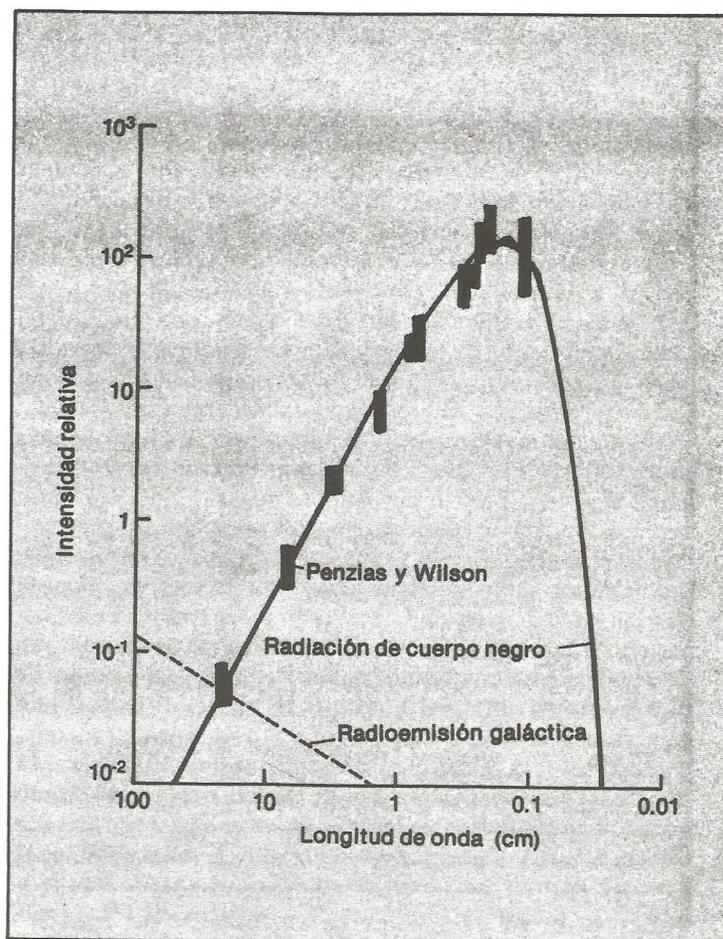


Figura 6. La radiación de fondo de 3 grados Kelvin. Los rectángulos indican los errores en las observaciones; la curva es la distribución de longitudes de onda correspondiente a una temperatura de 2.9 grados Kelvin. Nótese la buena concordancia entre la teoría y las observaciones. (E. Harrison, 1981)

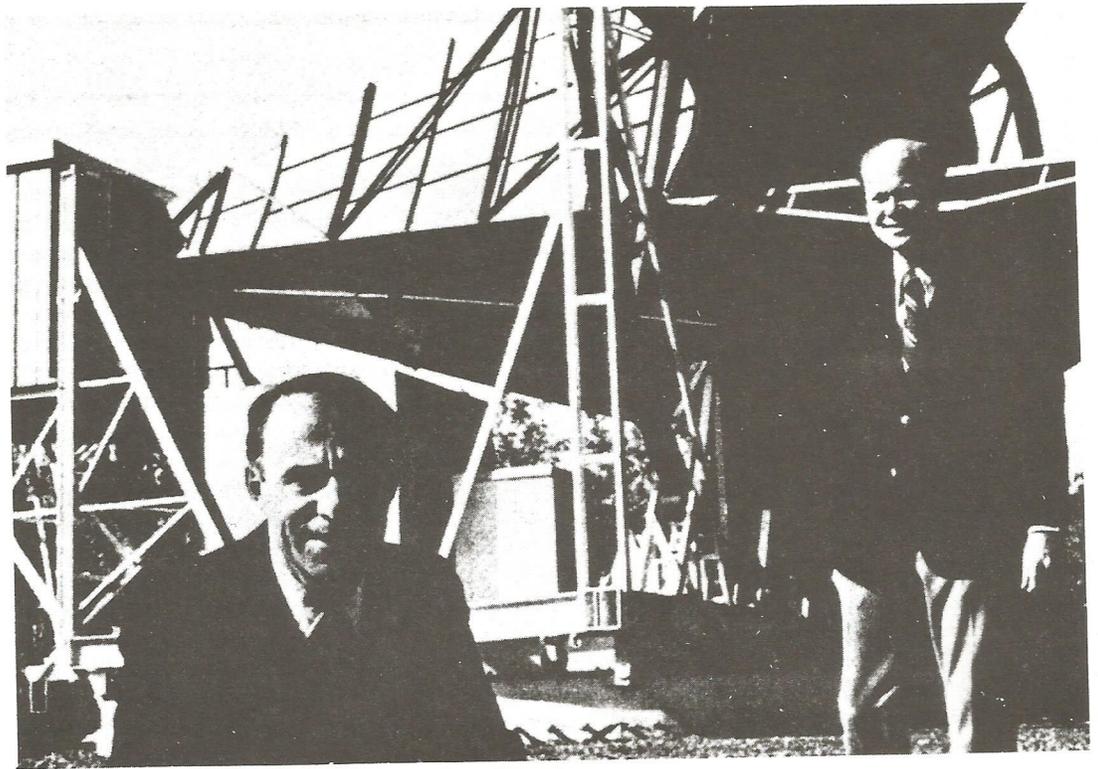


Figura 7. Arno Penzias (izquierda) y Robert Wilson, con la antena que emplearon para descubrir la radiación de fondo de 3 grados Kelvin en 1965. (E. Harrison, 1981)

pia Galaxia, de otras galaxias, o incluso de cuasares, objetos que, como hemos dicho, se encuentran extremadamente lejos de nosotros. Esta gran uniformidad también concuerda con las predicciones del modelo "estándar".

Regresemos a la figura 4, y recordemos que el primer paso de la nucleosíntesis del helio produce deuterio. No todo el deuterio así formado se emplea en hacer helio. En forma similar a como lo hicimos para el helio, puede calcularse la abundancia de deuterio que produce la Gran Explosión. También en este caso se obtiene una buena concordancia con la abundancia de deuterio observada. Pero, además, la cantidad de deuterio que se forma en el universo temprano depende muy sensiblemente de la densidad, lo cual nos permite determinar ésta; si bien los resultados son aún muy preliminares, parecen indicar una densidad muy baja para el universo, lo cual significaría (según veremos en otra ocasión) que su expansión continuará eternamente.

Por ahora, volvamos al universo joven. Retomemos nuestra historia poco después de la época de la nucleosíntesis del helio; esto es, cuando el universo tenía poco más de tres minutos de edad. Al igual que ocurre al detonar una bomba de hidrógeno, la síntesis del helio en el universo joven libera una gran cantidad de energía. Pero el universo continúa en expansión, y si bien se calienta temporalmente a causa de la energía liberada por las reacciones nucleares, pronto vuelve a su paulatino enfriamiento.

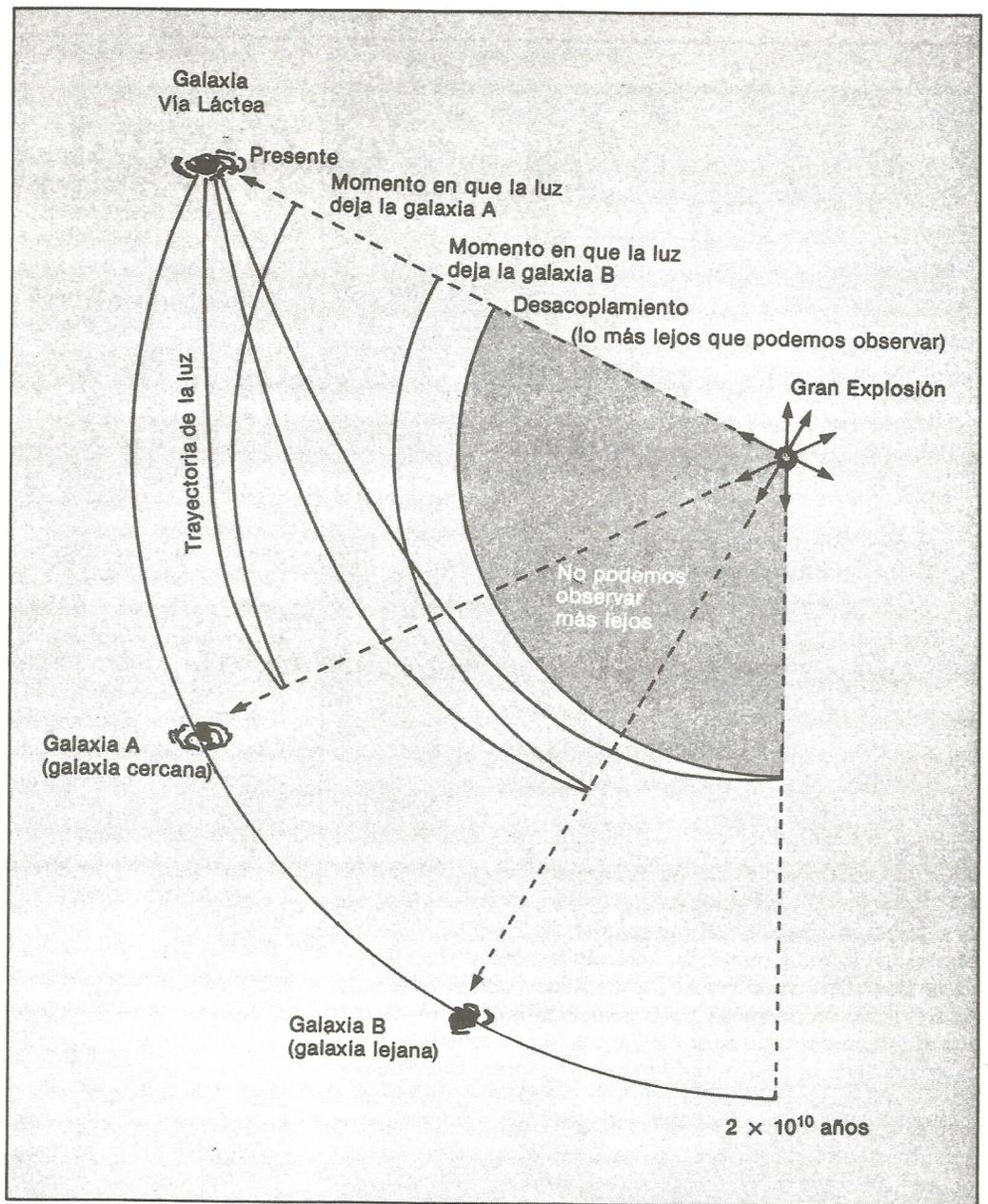
La "bola de fuego" y la radiación de fondo de 3 grados Kelvin

Después del gran despliegue de violentos fuegos cósmicos de los primeros minutos, transcurren unos 500 000 años sin que nada nuevo ocurra. En esta fase, el universo consta de

materia (núcleos de hidrógeno y helio, principalmente) y radiación térmica (fotones), ambas en íntimo contacto. Se calcula que existían unos 100 millones de fotones por cada protón. El universo es una especie de "bola de fuego". Su temperatura, inicialmente de unos 900 millones de grados, desciende hasta aproximadamente 4000 grados. La hipótesis de equilibrio termodinámico que formulamos al principio nos permite calcular las características de la radiación que corresponde a cada temperatura. Sabemos así que a medida que la temperatura del universo disminuye por su expansión, el "color" de la radiación varía desde el correspondiente a los rayos gamma hasta el de las ondas de radio, pasando por el ultravioleta, el visible, el rojo y el infrarrojo. Cuando la temperatura llega a unos 4000 grados, las condiciones empiezan a ser propicias para que los núcleos de hidrógeno y helio se combinen con electrones libres formando átomos. Anteriormente, cualquier átomo que se hubiera formado hubiera sido destruido por la radiación aún muy caliente; ahora, la formación de átomos procede con rapidez. Puede calcularse que antes de que el universo llegue al millón de años de edad prácticamente todos los núcleos de hidrógeno ya han atrapado a los electrones y formado átomos. La existencia de éstos trae consigo una dramática alteración en las condiciones del universo: éste se vuelve transparente a su propia radiación. La razón para ello es que los electrones libres dispersan con gran eficiencia a los fotones, y generan una gran opacidad en el medio; una vez que los electrones han sido capturados para formar átomos, la neblina se disipa, por así decirlo, y el universo se vuelve transparente. Debido a esto, en adelante, la materia y la radiación ya casi no van a interactuar; ambas se "desacoplan", y a partir de entonces proseguirán enfriándose independientemente una de la otra.

Sabemos que cuando observamos objetos cada vez más lejanos, estamos observando objetos cada vez más jóvenes, puesto que su luz tarda cada vez más en llegar a nosotros.

Figura 8. En el momento en que la radiación y la materia se desacoplaron el universo se volvió transparente. Cuando estudiamos una galaxia cercana, A, la vemos como estaba hace algunos millones de años. Una galaxia más lejana, B, nos aparece como era hace cientos o miles de millones de años. La radiación de fondo nos llega directamente del instante cuando el universo se volvió transparente. No podemos observar directamente instantes anteriores a éste. El corrimiento al rojo que le corresponde a la radiación de fondo es de más de 1000. (E. Harrison, 1981)



Es claro que de esta manera podemos acercarnos progresivamente al inicio de la explosión, siempre y cuando el universo sea transparente. Pero acabamos de ver que antes de los 500 000 años el universo era opaco; por ende, la época anterior no es directamente observable. En la actualidad los radiotelescopios nos permiten llegar hasta ese límite: podemos observar directamente el momento en que la radiación y la materia se desacoplaron, el momento en que el universo se hizo transparente y a partir del cual la radiación comenzó a enfriarse separadamente de la materia. Desde entonces, aquella se ha enfriado hasta una temperatura de 3 grados Kelvin, pero presenta todavía las características de la radiación térmica en condiciones de equilibrio. La observamos en todas direcciones, como un fondo uniforme (véase la figura 6). La identificación del fondo de 3 grados Kelvin con la radiación procedente de la "bola de fuego" que era el universo cuando se volvió transparente es bastante segura, puesto que la radiación observada presenta todas las características esperadas: se observa en todas di-

recciones, es uniforme (las irregularidades que se observan en ella son de menos de una parte en 1000), tiene la temperatura correcta y su distribución de energía corresponde a la de un gas en equilibrio termodinámico. Por estas razones, el descubrimiento de la radiación de fondo de 3 grados Kelvin, realizado por Penzias y Wilson en 1965, constituyó una prueba triunfal de la teoría de la Gran Explosión.

La materia, por su parte, también continuó enfriándose. La ausencia de irregularidades que se observa en la radiación de fondo nos indica que antes de tener un millón de años de edad el universo era aún completamente uniforme; no había estructuras en él. Pero poco tiempo después, debieron haberse dado fluctuaciones de densidad, que más tarde se condensarían para formar las galaxias y los cúmulos de galaxias tan notables en la actualidad. El proceso de formación de estructuras en el universo es causa de considerables dificultades teóricas. En el próximo número de *Ciencia y Desarrollo* volveremos sobre este importante problema. ●