

El principio y el fin del Universo

Quinta parte: la creación de la materia

por Miguel Angel Herrera y Christine Allen

La motivación primordial de la presente serie de artículos sobre la cosmología moderna ha sido la de exponer, de la manera más breve y concisa posible, la sorprendente y maravillosa relación que se ha ido estableciendo durante los últimos años entre la física de las partículas elementales y la cosmología, esto es, entre la

física del micromundo y la física del Universo en su conjunto. Aunque la existencia de esta conexión entre dos de los aspectos aparentemente más lejanos de la naturaleza se subrayó desde el primer artículo, no fue sino hasta el segundo artículo, al hablar de la Gran Explosión, cuando se hizo evidente que la mencionada relación es una absoluta



El 30 de junio de 1908 tuvo lugar una violenta explosión en la región de Tunguska, en Siberia. Aunque durante algún tiempo estuvo en boga la teoría de que la explosión se había originado por la caída de un conglomerado de antimateria proveniente del espacio exterior, hoy se cree que se debió simplemente a la caída de un pedazo de cometa. (Sovfoto)



En junio y en agosto de 1976 el planeta Marte fue visitado por los laboratorios biológicos Vikingo 1 y Vikingo 2. Aunque la misión de estos laboratorios era la de buscar vida en el planeta, el hecho de que no se hallan aniquilado al ascender en él es una evidencia más de que no hay grandes conglomerados de antimateria en el Sistema Solar. Incidentalmente, ninguno de los Vikingos encontró ni el más leve rastro de actividad biológica. (*The Planetary Society*)

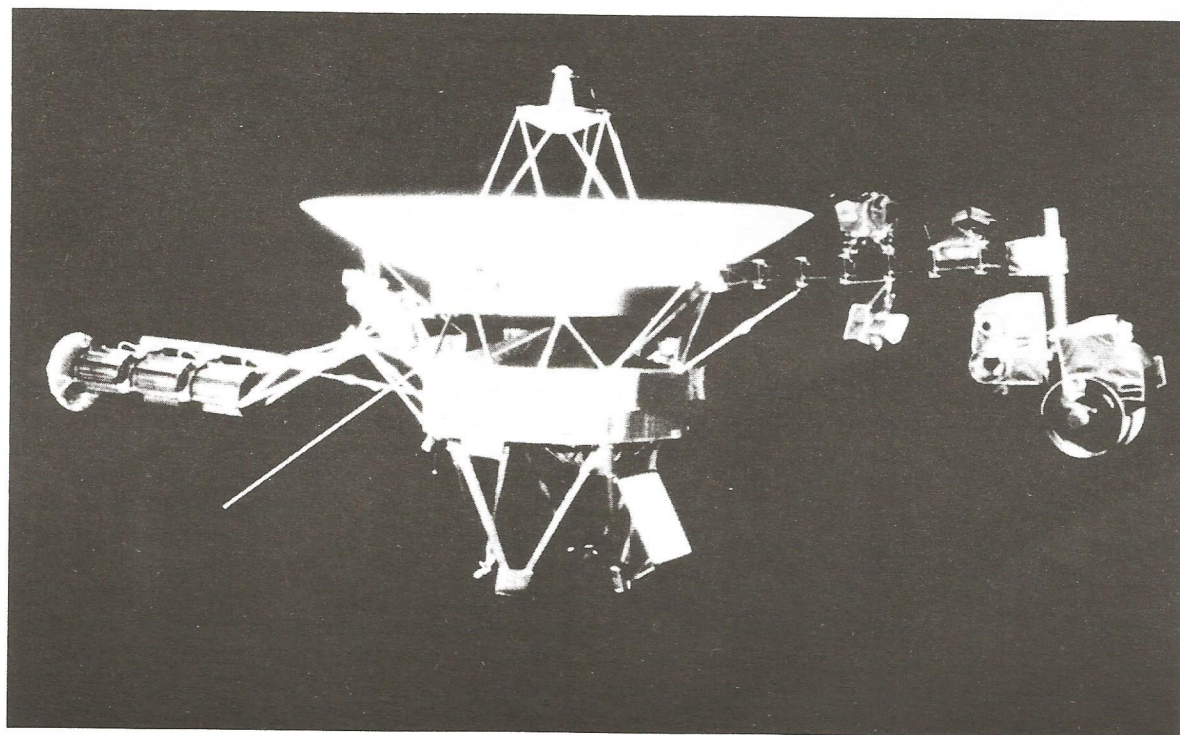
necesidad, y no un mero deseo estético, si nuestro objetivo es penetrar en los secretos de los primeros momentos de vida de nuestro Universo.

En vista de lo anterior, y para facilitar la comprensión de los modelos teóricos actuales que expondremos en lo que sigue, los dos artículos precedentes fueron breves exposiciones de las ideas básicas y de las teorías más en boga sobre las fuerzas (o interacciones) que actúan entre las partículas elementales y sobre el carácter y la estructura de las partículas mismas. Hicimos referencia, en particular, a los intentos que se hacen en la actualidad mediante las "Teorías de Gran Unificación" (*GUTS*) para explicar las interacciones electromagnéticas débiles y fuertes meramente como aspectos distintos de un mismo fenómeno natural; la "unicidad" de este fenómeno escaparía a nuestros sentidos debido a la aparición de una *ruptura espontánea* de la simetría inherente, ruptura que se presentaría a causa de las bajísimas energías que prevalecen en el Universo de nuestros días. Es, precisamente, la altísima magnitud de las energías a las cuales las simetrías subyacentes lucirían en todo su esplendor la que ha atraído a los físicos de partículas elementales al campo de la cosmología, ya que son tan elevadas estas energías que el único "laboratorio" capaz de albergarlas es el Universo en sus primeras etapas, recién nacido, por así decirlo.

Con esta breve síntesis de los artículos anteriores (mayor información en los cuatro números precedentes de *Ciencia y Desarrollo*), ya estamos preparados para proseguir.

Materia versus antimateria

A pesar de los arduos esfuerzos de los físicos teóricos, hasta la fecha no se ha logrado construir una teoría de "Gran

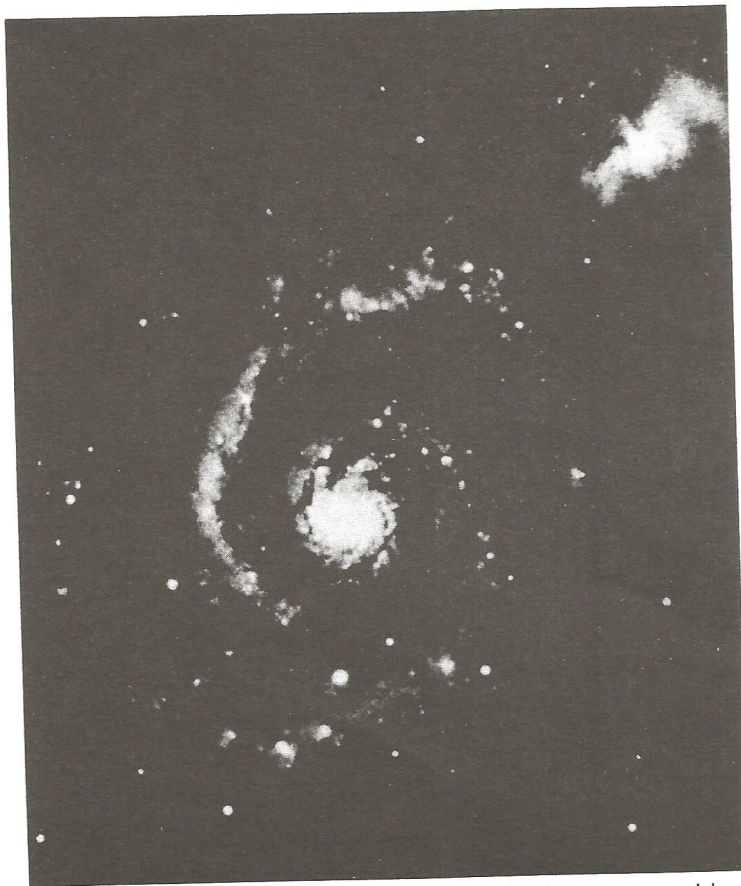


Las sondas espaciales Pionero 10, Pionero 11, Viajero 1 y Viajero 2 han recorrido el espacio interplanetario, visitando Júpiter, Saturno y Urano, sin toparse con un fragmento apreciable de antimateria. El Viajero 2, que aparece en esta fotografía, llegará a la vecindad de Neptuno en agosto del presente año

Unificación" que convenza a todo el mundo. En otras palabras, la teoría de la Gran Unificación aún está por venir (por eso se habla de "GUTS" y no de "la GUT"). Sin embargo, las diferencias entre los diversos esquemas que se han propuesto son más de detalle que de fondo. En particular, todas las GUTS conducen a una predicción que es fundamental para la cosmología: la no-conservación del número bariónico. De ser esto cierto, uno de los constituyentes fundamentales de la materia —el protón— no sería estable (esto es, no existiría eternamente), sino que después de cierto tiempo se convertiría en un mesón neutro (sin carga eléctrica) y en un positrón (con carga positiva). Para emplear el lenguaje de los físicos, el protón *decaería*. En consecuencia, la materia tal como la conocemos se esfumaría con el paso del tiempo. La importancia de esta predicción es evidente, y a ello se debe que numerosos laboratorios estén dedicados exclusivamente a la búsqueda del decaimiento del protón.

Como mencionamos en la parte final del artículo anterior, otra consecuencia de la no-conservación del número bariónico es que nos permite explicar una de las asimetrías de nuestro universo que más molestan a los científicos: el exceso de materia sobre antimateria. En lo que sigue plantearemos con mayor detalle el problema y expondremos la solución más aceptada hasta el momento.

La evidencia a favor de una enorme preponderancia de

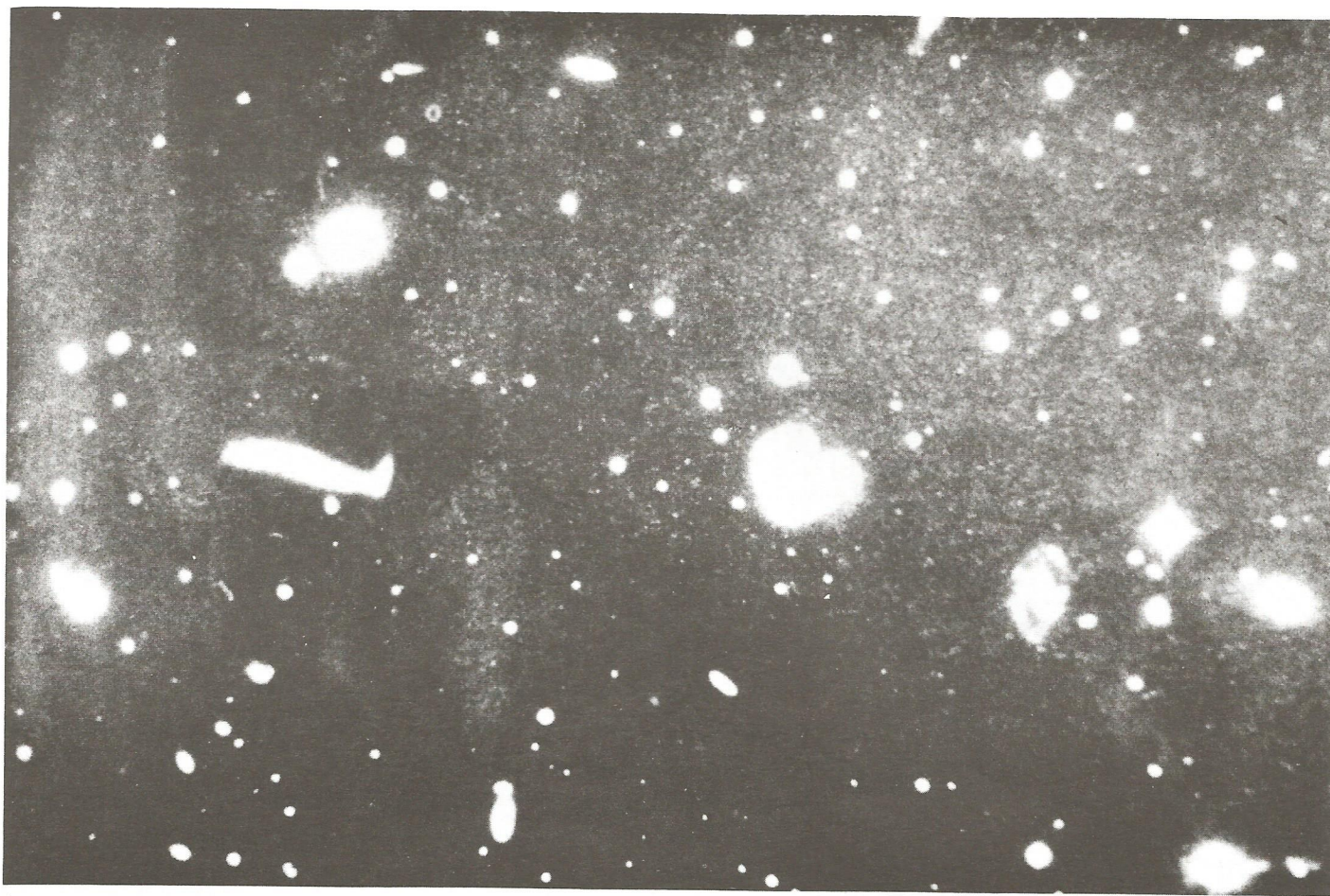


Todo parece indicar que en nuestra galaxia, muy parecida a la de la fotografía, la cantidad de materia es abrumadoramente superior a la del antimateria. (*Sky and Telescope*)

materia sobre antimateria en el Universo es muy convincente. En nuestro Sistema Solar, para empezar por lo más cercano, no se han encontrado concentraciones apreciables de antimateria. Si las hubiera, su interacción con el viento solar generaría inmensas cantidades de rayos gamma, como consecuencia de la aniquilación de las partículas del viento con las antipartículas del supuesto "antiobjeto"; estos rayos gamma no se han observado. Más evidente aún, ninguno de los vehículos espaciales que han viajado por el Sistema Planetario ha sido aniquilado por un encuentro con una cantidad apreciable de antimateria. Aunque no nos hemos trasladado aún fuera del Sistema Solar, contamos con una muestra de material que *sí* lo ha hecho, ya que proviene de los lejanos confines de nuestra galaxia (o quizás, incluso, de fuera de ella): los rayos cósmicos. Ahora bien, en la radiación cósmica los protones superan a los antiprotones en razón de 3000 a 1, y las partículas alfa a las anti-alfa por un margen aún mayor, de 100 000 a 1.

Si llevamos nuestra búsqueda a regiones más remotas, podríamos suponer que fuera de nuestra propia galaxia existen cantidades apreciables de antimateria, quizás antigalaxias enteras. Los cálculos indican, sin embargo, que si éste fuera el caso, las aniquilaciones producirían nuevamente rayos gamma en cantidades fácilmente detectables. Esta radiación no ha sido observada. Vayamos más lejos todavía, a los cúmulos de galaxias. ¿Habrán anticúmulos? Aquí, la respuesta no es tan clara. Si bien aún no es posible excluir en definitiva la existencia de cúmulos de galaxias formados esencialmente por antimateria, las enormes separaciones que tendrían que haberse producido entre los agregados de materia y los de antimateria antes de que estos cúmulos se formaran, hacen que esta alternativa sea poco probable. En síntesis, la preponderancia de la materia sobre la antimateria en el Universo parecería estar fuera de duda. No obstante, debemos mencionar que mucho se ha dicho sobre la pobreza de nuestros métodos para detectar la antimateria, dado que prácticamente toda la información que tenemos del Universo se deriva de la radiación electromagnética; ahora bien, los fotones, por ser sus propias antipartículas, son incapaces de revelarnos si provienen de una fuente de materia o de antimateria. Esta crítica es válida; habrá que esperar a que podamos detectar eficientemente neutrinos y antineutrinos —partículas que *sí* pueden informarnos sobre la composición de su fuente de origen— antes de poder excluir de manera definitiva la existencia de algunas concentraciones de antimateria en el Universo.

Si el Universo se compone esencialmente de materia —como todo parece indicar— el número total de bariones que contiene resulta ser del orden de 10^{79} , que es un número enorme; más que "astronómico", podríamos llamarlo un número "cosmogónico". Pero si lo comparamos con el número de fotones, encontramos que este último es mucho mayor aún: hay aproximadamente mil millones de fotones por cada barión. Este resultado es muy interesante, pues nos indica que el exceso de materia sobre antimateria en el Universo no es tan grande como aparenta. La razón es la siguiente: cuando una mezcla de partículas y radiación se encuentra a una temperatura muy elevada (más precisamente, a una temperatura a la cual la energía promedio de



Si la materia y la antimateria coexistieran en cantidades comparables en los cúmulos de galaxias, deberíamos detectar en ellos violentos destellos de rayos gamma producidos en los procesos de aniquilación materia-antimateria. Como ésta no se observa, los cúmulos de galaxias deben estar constituidos totalmente por materia o por antimateria. Los astrofísicos se inclinan por la primera posibilidad, en virtud de que no se conoce un mecanismo eficiente para separar a grandes distancias cantidades "astronómicas" de materia y de antimateria

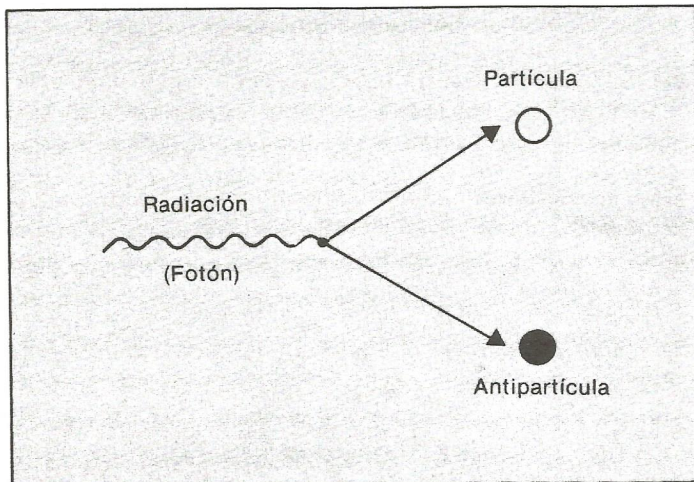
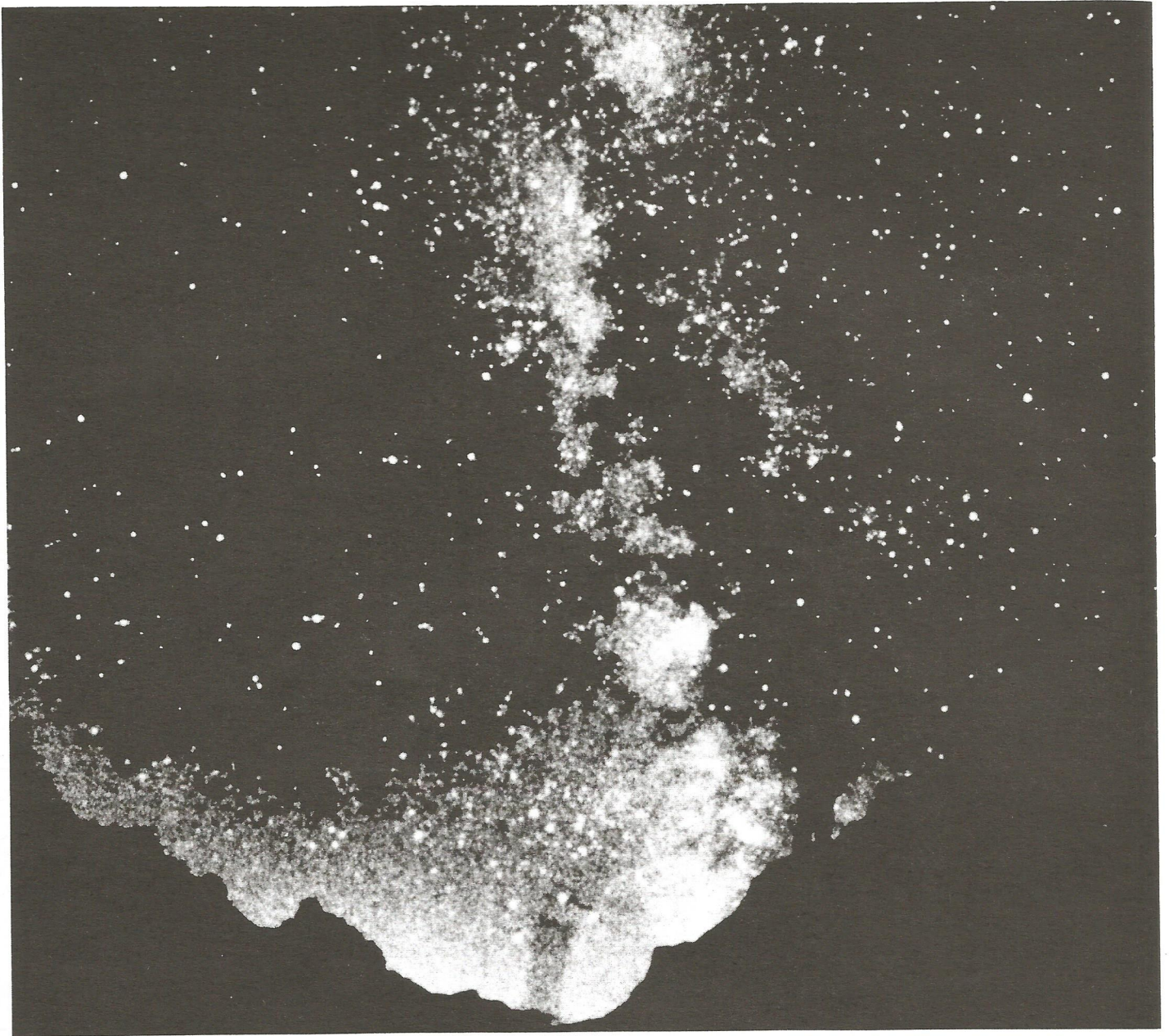
los fotones es mayor que la energía en reposo de los bariones), los fotones crean continuamente pares partícula-antipartícula, puesto que tienen energía suficiente para ello. Por otro lado, es sabido que las partículas y las antipartículas se aniquilan mutuamente cuando chocan unas con otras, de manera que, a la larga, y como consecuencia de los procesos de creación y aniquilación, se establece una situación de equilibrio (llamado "equilibrio termodinámico"); en esta situación, el número de partículas, el de antipartículas y el de fotones es prácticamente igual. En pocas palabras, en el remoto pasado del Universo hubo una etapa en la que el número de bariones, el de antibariones y el de fotones era prácticamente el mismo. Los cálculos indican que en esa fase había alrededor de 10^{35} bariones por cm^3 , y otros tantos antibariones y fotones. Y ahora viene lo importante. Al descender la temperatura, como consecuencia de la expansión del Universo, llegó un momento a partir del cual los fotones ya no tuvieron energía suficiente para crear pares barión-antibarión; después de ese momento, las aniquilaciones ya no pudieron ser contrarrestadas por las creaciones y, en consecuencia, el número de bariones y de antibariones comenzó a disminuir. Si hubiera habido *exactamente* el mismo número de bariones que de antibariones, *todos* los bariones se habrían aniquilado con *todos* los antibariones (excepto, quizás,

unos cuantos, que hayan tenido la suerte de no encontrarse nunca con su antipartícula). Entonces, ¡en nuestros días no habría materia! Por lo tanto, el hecho de que las galaxias, las estrellas y nosotros mismos estemos hoy aquí indica que cuando se inició la etapa de aniquilación había en el Universo *más* bariones que antibariones.

Pero, ¿cuántos más? La respuesta no es difícil de calcular. Si hoy en día hay un barión por cada mil millones de fotones, y si en el pasado ambos números eran casi iguales, tiene que haber sobrevivido un barión por cada mil millones de aniquilaciones. En otras palabras, el exceso de materia que observamos tan claramente en el presente hubiera sido imposible de detectar en el pasado, cuando había 1 000 000 001 (mil millones más uno) bariones por cada 1 000 000 000 (mil millones) de antibariones. Es a esta pequeña diferencia a la que nos referimos cuando mencionamos que el exceso de materia no es tan grande como parece.

La creación de la materia

Es evidente que la (relativa) pequeñez del exceso de materia sobre antimateria no disminuye, ni con mucho, la importancia de la pregunta que uno se plantea inmediata-

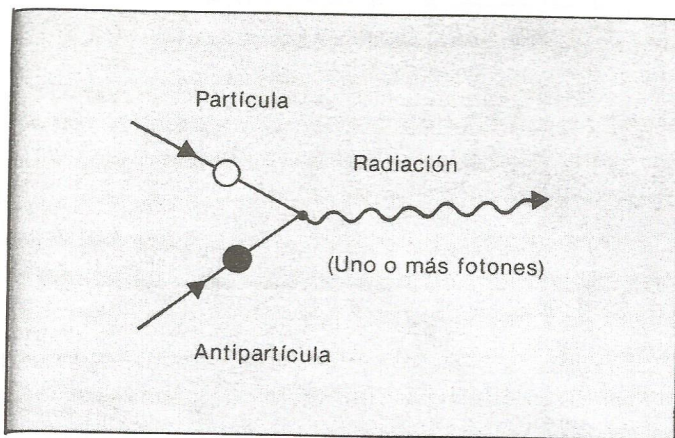


Un fotón puede convertirse en una partícula-antipartícula, si su energía es mayor o igual a la energía en reposo que corresponde a las masas de las partículas creadas

La idea dominante en nuestros días es que el Universo está constituido esencialmente por materia; pero, en lo que se refiere a los cúmulos de galaxias, esto dista mucho de ser un "hecho científico". A fin de cuentas, la composición del Universo sigue siendo un misterio. (*Sky and Telescope*)

mente: ¿De dónde proviene ese exceso? ¿Estuvo allí desde el principio? Y, si no lo estuvo, ¿cómo se originó? Ya dijimos que la mayor parte de los científicos rechaza la salida cómoda de postular que la asimetría materia-antimateria estuvo presente "desde el principio". En su lugar, se prefiere dar por hecho que la asimetría se generó en alguna etapa de la evolución del Universo como consecuencia irremediable e ineludible de las leyes de la física.

Pero, ¿cómo generar una asimetría donde no la hay, cuando — como en este caso — implica la violación de una de las leyes más sagradas de la física, la conservación del número de bariones? La respuesta — ya lo hemos dicho — la proporcionaron las teorías de Gran Unificación (*GUTS*).



Cuando una partícula choca contra su correspondiente antipartícula, ambas se aniquilan entre sí y la energía que portaban se convierte en uno o más fotones (es decir, radiación electromagnética)

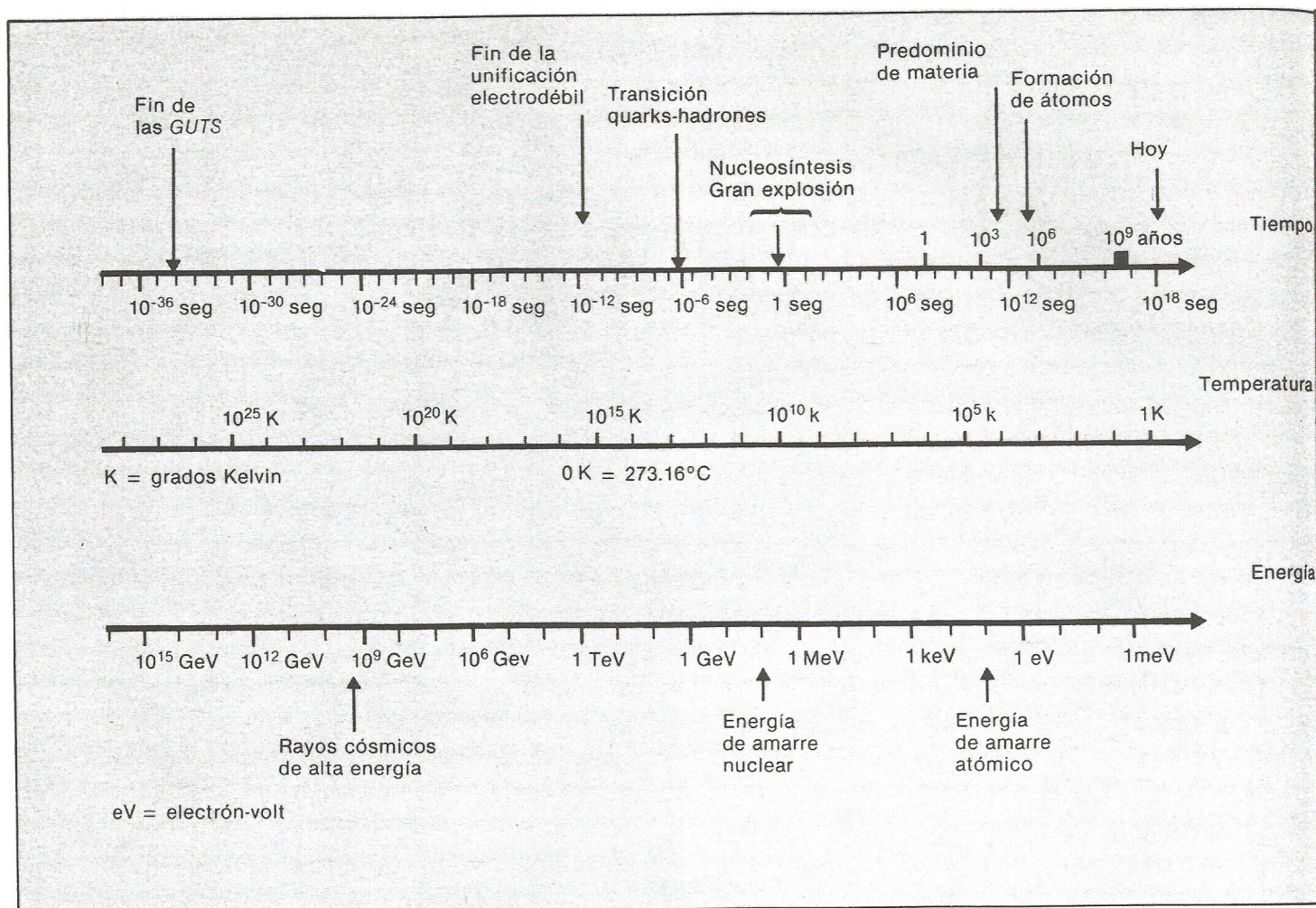
En ellas no se conserva el número bariónico y, en consecuencia, es posible hacer “desaparecer” bariones o antibariones a nuestra conveniencia. La manera de lograrlo, empero, no es tan sencilla. El primer científico en derivar las condiciones necesarias para que un proceso físico plausible condujera al resultado deseado fue el físico soviético Andrei Sajarov (hoy más conocido entre el público por motivos políticos que por sus contribuciones científicas). En un fundamental artículo publicado en 1967, Sajarov demostró que sólo puede conducir al resultado deseado un proceso que cumpla con cuatro condiciones, a saber: que comprenda interacciones en las que no se conserve el número de bariones, que viole la conjugación de la carga (operación que consiste en el cambio de signo de la carga, y que se denota técnicamente por “C”), que viole al mismo tiempo la conjugación de la carga y la conservación de la paridad (operación que técnicamente se denota por “CP”) y que ocurra fuera de equilibrio termodinámico. La necesidad de la primera condición es clara: si queremos partir de una situación con número bariónico cero (igual número de bariones que de antibariones) y llegar a una situación con un número bariónico positivo (más bariones que antibariones), el número bariónico no se puede conservar. La necesidad de las otras tres condiciones, en cambio, no es tan evidente, ya que tienen su origen en detalles técnicos complicados. Sin embargo, es fácil darse cuenta de que no basta con exigir la no-conservación del número bariónico para generar un exceso de bariones a partir de una situación simétrica. Podría ocurrir, por ejemplo, que por cada barión que decayera también desapareciera un antibarión, lo cual nos dejaría al final con el mismo número de bariones que de antibariones. Para decirlo en palabras sencillas, las tres condiciones adicionales propuestas por Sajarov tienen por objetivo asegurar que no ocurra, de hecho, ningún proceso como el que acabamos de describir.

Una vez aclarada la razón de ser de las cuatro condiciones de Sajarov, veamos cómo éstas permiten hacer “desaparecer” más bariones que antibariones. De hecho, hay varias maneras de lograrlo; el proceso que describiremos es el más aceptado en la actualidad, y se conoce como el



El físico soviético Andrei Sajarov (n. 1921), fue el primero en derivar las condiciones que debía satisfacer un proceso subatómico para generar un exceso de materia sobre antimateria, a partir de una situación simétrica. (Sajarov recibió el Premio Nobel de la Paz en 1975)

“escenario estándar”. Supongamos que en algún momento del pasado, cuando la temperatura del Universo era increíblemente alta (mayor que 10^{25} grados), existían ciertas partículas superpesadas (que llamaremos, sin entrar en mayores detalles, partículas X), cuyas interacciones no conservaban el número bariónico. Supongamos también que tanto las partículas X como sus antipartículas podían decaer de dos maneras diferentes —a través de dos canales, como suele decirse. De hecho, existen en nuestros días partículas con esta propiedad: los llamados mesones K-cero; cuando uno de estos mesones decae por un canal, lo hace respetando ciertas leyes de conservación, que no respeta cuando decae por otro canal. Mientras la temperatura del Universo fue lo suficientemente alta como para que los fotones crea-



Momentos culminantes de la evolución del Universo de acuerdo con las predicciones de las GUTS. (Basado en un diagrama del Fermilab)

ran pares X-anti-X, las partículas X se mantuvieron en equilibrio termodinámico con el resto del Universo. Pero llegó el momento en que la temperatura descendió tanto que las aniquilaciones ya no fueron compensadas por creaciones. Pronto las X se encontraron fuera de equilibrio termodinámico, pues existía un número mucho mayor de ellas que el que debería haber a determinada temperatura. En estas condiciones, y debido a la no-conservación de C y CP ya mencionada, el número de decaimientos por unidad de tiempo de las X a través de un canal se volvió diferente al número de decaimientos de las anti-X a través del anti-canal correspondiente. Y eso es precisamente lo que deseamos que ocurra, ya que al decaer, digamos, más X que anti-X por cierto canal, se producirá un exceso de los productos del decaimiento de las X sobre los del decaimiento de las anti-X. En síntesis, se habrá creado una asimetría como la que hemos estado buscando.

El panorama que acabamos de describir es, evidentemente, muy complicado, pero no existe por el momento ningún otro esquema para destruir la simetría partícula-antipartícula que sea básicamente diferente, o más sencillo. Por otra parte, los cálculos que se han hecho conducen a resultados muy razonables, esto es, predicen el exceso

de materia observado. En resumen, el problema del origen de la materia, aunque no resuelto a entera satisfacción, parece comenzar a disiparse.

El modelo estándar con GUTS

La incorporación de las GUTS a la cosmología da como resultado un nuevo "modelo estándar" cuyos principales eventos detallaremos a continuación.

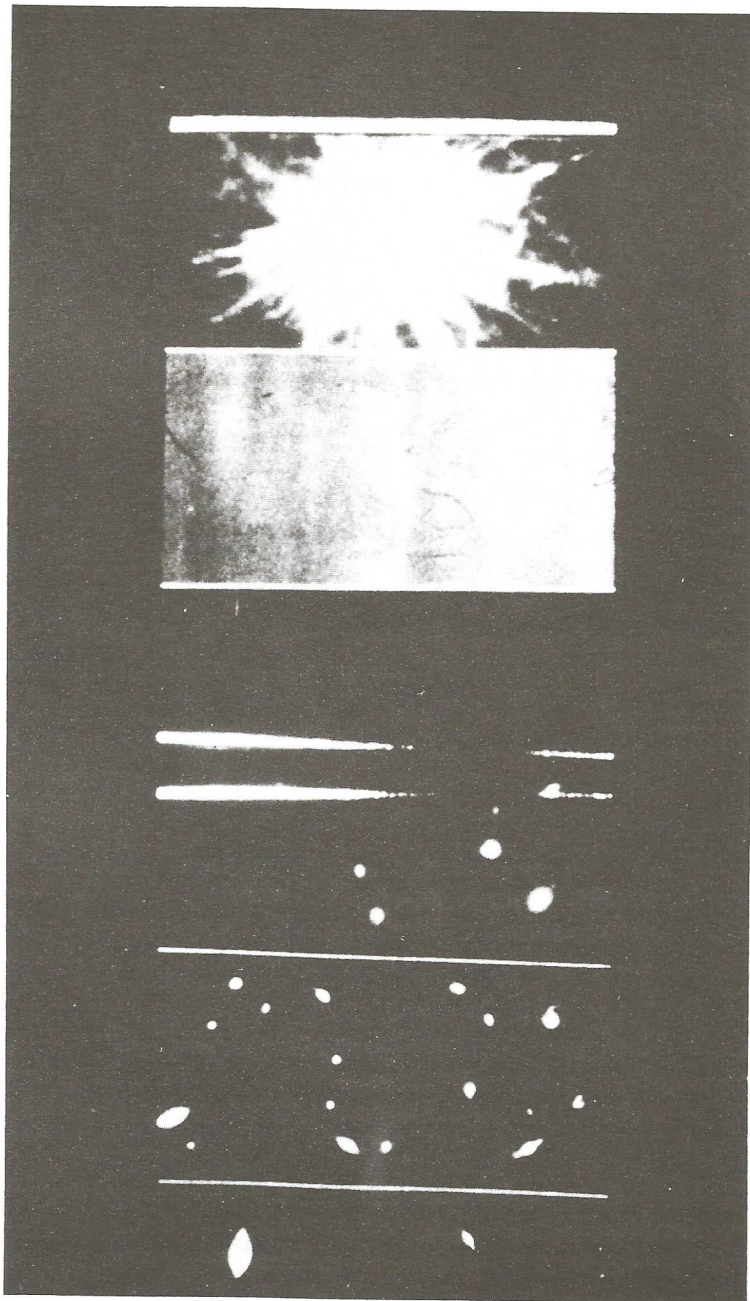
En el principio ocurrió la Gran Explosión. Como consecuencia de ella, el Universo comenzó a expandirse y a enfriarse a partir de un tamaño muy pequeño y de una temperatura inimaginablemente elevada. Durante esta fase, se mantuvo siempre en equilibrio termodinámico, como consecuencia de su altísima densidad. Su composición química durante estos primeros momentos escapa a nuestros conocimientos actuales. Sólo sabemos con certeza que abundan los fotones y todas las partículas subatómicas que hoy conocemos (quarks, electrones, protones, etcétera), puesto que los fotones tenían energía más que suficiente para generar pares partícula-antipartícula de estas espe-

cies. Pero deben haber existido también abundantes partículas mucho más pesadas, totalmente desconocidas para nosotros, creadas por los superenergéticos fotones. Durante toda esta fase, la fuerza fuerte, la débil y la electromagnética estaban "unificadas", esto es, eran esencialmente indistinguibles entre sí; la fuerza gravitatoria, en cambio, seguía existiendo por separado; de esta manera, había sólo dos tipos de interacción: la gravitatoria y la fuerte-electrodébil. Los bariones se podían convertir libremente en leptones y viceversa, y fue aquí, por ende, donde se generó la asimetría entre los bariones y los antibariones. Esta época suele llamarse la "Era de las GUTS".

Esta situación prevaleció durante más o menos los primeros 10^{-34} s a partir del momento de la Gran Explosión. Una vez transcurrido este lapso, la temperatura había descendido ya hasta alcanzar unos 3×10^{26} grados, temperatura a la cual se "rompe" la simetría entre fuerzas fuertes y fuerzas electrodébiles; por lo tanto, a partir de ese momento las fuerzas fuertes se diferenciaron de las electrodébiles, al menos en apariencia. (Para mayores detalles sobre simetrías manifiestas y ocultas véase el número anterior de *Ciencia y Desarrollo*.) El Universo prosiguió su evolución con tres tipos de interacciones: la gravitatoria, la fuerte y la electrodébil. Esta fase evolutiva (la llamada "Era Electrodébil") también llegó a su fin. Unos 10^{-11} s después de la explosión, la temperatura había bajado hasta unos 10^{15} grados, y a estos valores la simetría entre la fuerza electromagnética y la fuerza débil desaparece, y deja al Universo con las cuatro interacciones aparentemente distintas que observamos hoy en día: gravitatoria, fuerte, débil y electromagnética.

Al proseguir la expansión y el enfriamiento, llegó el momento en que los quarks, que hasta entonces habían permanecido libres, comenzaron a unirse para formar los bariones que hoy conocemos (protones y neutrones), así como los mesones. Esto ocurrió aproximadamente un millonésimo de segundo más tarde. El resto de la historia que contamos en el segundo artículo de esta serie no varía: cuando el Universo tenía un segundo de edad se inició la nucleosíntesis, esto es, la formación de los elementos químicos; más tarde, ocurrió la formación de las galaxias, y así, sucesivamente, hasta llegar a nuestros días.

Este proceso se puede comparar, en cierto sentido, con el comportamiento de un cubo de hielo cuando se le calienta cada vez más. Al principio se tiene un cubo sólido de hielo; después éste se funde y se convierte en agua líquida y, por último, se evapora y pasa a ser un gas. Cada una de estas transiciones se denomina un *cambio de fase*, y tiene un nombre especial: el cambio de la fase sólida a la fase líquida se conoce como *fusión*, y el de la fase líquida a la fase gaseosa, como *evaporación*. Si el proceso se realiza a la inversa, los cambios de fase son, primero, *licuefacción* (de gas a líquido) y, después, *congelación* (de líquido a sólido). Podría suceder también que existieran cambios de fase para los cuales no tuviéramos nombres específicos, en cuyo caso hablaríamos sólo de "congelaciones", por ejemplo, para referirnos a los cambios de fase debidos a una disminución de la temperatura. En el caso del agua, podríamos decir que el vapor primero se "congela" en líquido y que después el líquido se "congela" en sólido. En el caso de la evolución del Universo, partimos de un gas de partículas y



Representación esquemática de la evolución del Universo. Para los detalles, véase el texto del presente artículo y del segundo artículo de la serie

radiación que se enfría debido a su expansión. El primer cambio de fase fue una "congelación" en núcleos; el segundo, una "congelación" en átomos, y así, sucesivamente, hasta llegar a estructuras muy complejas (como nosotros). En resumen, podemos contemplar la historia del Universo como una sucesión de "congelaciones" de ciertos materiales primigenios en estructuras cada vez más complejas. La ventaja de este enfoque es que revela, en cierto sentido, una unidad subyacente en todo lo que existe. Al final de cuentas, las componentes del Universo, tan distintas entre sí, serían sólo diferentes "fases" en las que se "congelaron" unos cuantos materiales primigenios. ☉