

DE LA GRAN EXPLOSIÓN A LA FORMACIÓN DE LA TIERRA

Gustav Andreas Tammann*

Instituto de Astronomía
Universidad de Basilea

Hace unos 16 mil millones de años, con la así llamada Gran Explosión, comenzó la existencia del Universo. Desde aquel entonces, en que era extremadamente denso y caliente, el Universo se ha estado expandiendo y enfriando. A pesar de esta continua expansión, la materia, que en su origen estaba distribuida uniformemente, bajo la influencia de la gravitación se ha aglomerado localmente formando galaxias y estrellas.

Las primeras estrellas estaban constituidas por los elementos más simples, el hidrógeno y el helio. En el interior de las estrellas se formaron eventualmente todos los elementos más pesados retornando parcialmente al espacio interestelar cuando las estrellas se aproximaban a su muerte. Al formarse el Sol y con él nuestra Tierra, hace 4.500 millones de años, se habían "cocinado" todos los elementos posibles.

Muchos de estos elementos son necesarios para la formación de la vida. Sin embargo, antes de que la vida fuera posible, en la joven Tierra tuvo lugar una cadena de complejos procesos físicos y químicos. La vida terrenal se encuentra, por lo tanto, mucho más estrechamente ligada con los procesos cósmicos que lo que normalmente nos imaginamos.

Introducción

En los últimos setenta años ha habido

un esfuerzo sistemático por desarrollar y perfeccionar un modelo físico del Universo en su conjunto. De acuerdo con este modelo vivimos en un Universo que tuvo un comienzo y que crece y evoluciona desde entonces.

Muchas partes de este modelo están más allá de nuestra imaginación. A menudo se ha pensado que ello es una desventaja. En ocasiones el modelo se ha reemplazado por otros "más imaginables". Todos ellos tienen la desventaja de incurrir en contradicciones lógicas, matemáticas o físicas. Un modelo que evite contradicciones es muy superior a todos los otros modelos del universo, aunque carezca de la propiedad altamente subjetiva de ser imaginable.

Si nos pudiéramos imaginar todas las partes del Universo éste sería increíblemente primitivo y aburrido, por no decir feo. Nuestra imaginación está enteramente limitada por nuestra experiencia cotidiana. Si jamás hubiéramos estado en la alta montaña no podríamos imaginarnos el "mal de altura". Quien goza de una visión normal de colores no puede imaginarse que un daltónico no pueda distinguir el rojo del verde. Un ciego de nacimiento no puede imaginarse color alguno. Desde que en el curso de la evolución perdimos nuestro sentido de los campos magnéticos, corrientemente no tenemos mucha sensibilidad frente a las fuerzas magnéticas. Sin embargo, existen peces que pueden localizar su presa gracias a mínimos cambios en el campo magnético que no podemos imaginar.

* Traducido por el Dr. Björn Holmgren a partir de la versión en inglés del Dr. G. Rupprecht.

Estos ejemplos muestran que experimentamos la Naturaleza en una forma muy subjetiva e imperfecta. Existen fenómenos reales que usualmente no percibimos y que, por lo tanto, permanecen inimaginables para nosotros. Esto es particularmente cierto cuando pensamos acerca del Universo. Su enorme tamaño es inimaginable, simplemente porque nuestras vidas transcurren a escalas pequeñas. No podemos imaginar las altas temperaturas del centro del Sol o de las estrellas porque sólo podemos sobrevivir dentro de limitados márgenes de temperatura. Nos parecen extrañas las fuerzas gravitacionales enormes porque la materia en nuestro sistema solar no se encuentra en sitio alguno tan densamente compactada como, por ejemplo, en un hoyo negro.

Por ello, no debemos juzgar a un modelo de mundo de acuerdo con su imaginabilidad, sino en función de su carencia de contradicciones. ¿Es la falta de contradicciones la propiedad única y fundamental que debemos esperar de un modelo de mundo? No. Existe otra clave, aún más poderosa, acerca de la corrección de una teoría. Es la predicción correcta de un fenómeno, no observado hasta entonces, pero que

es demostrado con posterioridad. El modelo de mundo que se concibe actualmente ha sido capaz de realizar unas cuantas predicciones que se han podido verificar. Esta es la razón principal por la que podemos afirmar con confianza que hoy entendemos algunas propiedades básicas de nuestro Universo y de su evolución.

Pero ello no debe tornarnos arrogantes. Existen muchos fenómenos que aún hoy día no podemos explicar suficientemente, en particular el origen de la vida. Es también posible que cosas que hoy consideramos indudablemente correctas, en el futuro las consideremos sólo como aproximaciones. Seguramente existen leyes importantes en el cosmos que aún no han sido reconocidas como tales. Por lo tanto, debemos estar siempre preparados, si no para demoler del todo nuestros modelos, para revisarlos continuamente. La mejor comprensión del Universo es un desafío permanente para la mente humana.

La Gran Explosión

Ya hemos anotado que nuestro Universo crece de tamaño. El Universo comenzó su existencia en una explo-



Mural en el techo de la tumba del faraón Seti I. Ilustra las intrincadas relaciones entre la astronomía y la mitología egipcia. El alma del faraón era una estrella viviente y su tumba, un vehículo para viajar en los cielos.

sión gigantesca, la Gran Explosión (conocida en inglés como el *Big Bang*). Desde entonces se ha estado expandiendo. Esto se sabe desde 1929, cuando Hubble demostró que todas las galaxias se alejan de nuestra Vía Láctea. La velocidad de alejamiento es tanto mayor cuanto más distantes se encuentran estas galaxias de nosotros. Esta recesión determina que las líneas espectrales de dichas galaxias se desvien hacia el rojo. La desviación hacia el rojo y, por lo tanto, la velocidad de alejamiento, puede medirse con relativa facilidad y sin dudas mayores. Las mayores velocidades se observan en galaxias muy luminosas que se encuentran a las distancias más extremas (las así llamadas quasares); ellas alcanzan velocidades superiores a los 200 mil km/seg.

Del hecho de que todas las galaxias se alejen de nosotros podríamos concluir que nos encontramos en el centro de dicha expansión. Esta sería una conclusión errónea, que nos muestra cuán propensos somos a que nuestra imaginación nos haga equivocarnos. Una simple consideración geométrica demuestra que la misma ley de Hubble es válida para cualquier observador, en cualquier galaxia. ¡No tenemos que preocuparnos de estar sentados en el centro de la expansión y adheridos a una visión pre-copernicana del mundo!

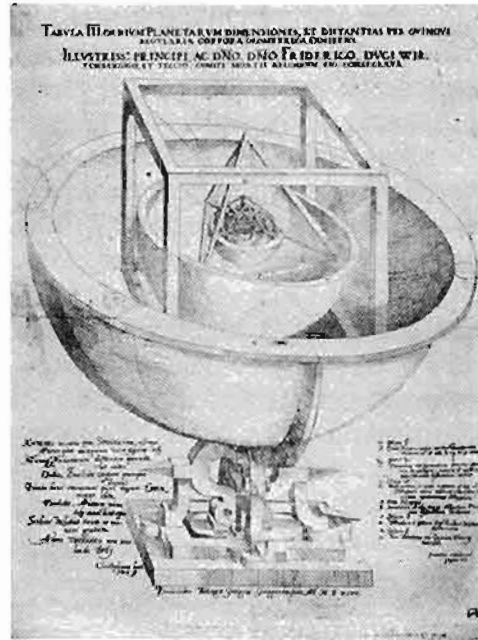
Esta expansión no puede haber estado sucediendo desde un tiempo indefinido, porque en ese caso las distancias entre las galaxias serían ahora infinitas. Por el contrario, conociendo la velocidad actual de expansión (la así llamada constante de Hubble) podemos calcular el tiempo en que todas las galaxias (más exactamente, la materia que constituye las galaxias de hoy) se encontraban reunidas en un punto. Las mejores determinaciones de la constante de Hubble indican que nuestro Universo se ha estado expandiendo durante aproximadamente 20 mil millones de años.

Este valor de 20 mil millones de años no puede ser exacto ya que supone (equivocadamente) que el ritmo de expansión ha sido siempre uniforme. De hecho, la fuerza de atracción gravitacional exige la realización de trabajo durante la expansión. Por ello, la expansión, muy rápida en el comienzo, fue haciéndose más lenta, y el Universo ha alcanzado su tamaño actual en menos de 20 mil millones de años. Se ha invertido mucho esfuerzo en la determinación observacional directa de este frenado, pero hasta ahora sin éxito alguno. Puede hacerse una deducción indirecta estimando la densidad material promedio en el Universo (es decir, en un volumen muy grande que todavía puede observarse) y de dicha estimación calcular el frenado por acción gravitacional. Siguiendo este procedimiento se llega a una edad del Universo de 15 mil millones de años, cuya incertidumbre es de aproximadamente 3 mil millones de años. Esto significa que la Gran Explosión probablemente ocurrió entre 12 y 18 mil millones de años atrás. Por razones de simplicidad, desde ahora en adelante, utilizaremos una edad de 15 mil millones pero recordando siempre que se trata de una cifra que requiere una ligera revisión.

A primera vista, este tiempo de 15 mil millones de años, parecería inimaginablemente largo. Podría incluso dudarse de si es permisible extrapolar nuestro vocablo "tiempo" para extenderlo a estos eones tan largos. Sin embargo, este tiempo es muy corto si lo comparamos con la edad de nuestro planeta Tierra. Las rocas más antiguas de la Tierra tienen una edad de 4 mil millones de años. Es muy impresionante que la edad del Universo sea apenas cuatro veces mayor que la de algunas piedras que podemos encontrar en la superficie de la Tierra. La juventud de nuestro Universo es tanto más sorprendente considerando lo desamparado y perdido que se encuentra nuestro planeta en el espacio. Nuestro Universo obser-

vable es trillones de veces mayor que el diámetro de la Tierra, pero su tiempo ha sido apenas cuatro veces mayor a la edad de la Tierra. Cabe preguntarse: ¿Cómo pudo el Universo dar origen a un cuerpo tan complejo y diverso como la Tierra en tan corto tiempo? A menudo la gente se pregunta por qué hubo una Gran Explosión. Aunque nos sorprenda, quizás los científicos jamás puedan responder a tal interrogante. Parece paradójico que podamos señalar la fecha de la Gran Explosión sin ser capaces de describir el estado del mundo en aquel momento. La razón de ello es que la materia en ese joven Universo, indefinidamente denso y caliente, existía en estados energéticos completamente desconocidos para nosotros, respecto a los cuales la física de hoy no tiene ni la más mínima idea. En el momento en que el Universo tenía la edad de sólo 1 segundo ($t = 1 \text{ s}$) era extremadamente caliente y denso, pero su estado físico puede describirse porque dichas temperaturas y densidades aún pueden producirse experimentalmente en grandes aceleradores de partículas como el del Centro Europeo de Investigación Nuclear (CERN) en Ginebra, Suiza. A $t = 0.1 \text{ s}$ la situación ya es más difícil, y las dificultades crecen exponencialmente a medida que uno se aproxima al centésimo, milésimo o millonésimo de segundo de la Gran Explosión. Finalmente, a $t = 10^{-35}$ segundos la densidad es tan alta que la materia obedece a leyes totalmente nuevas. Muchos teóricos trabajan hoy en dichas leyes, pero como no se pueden realizar experimentos ni observaciones relativas a época tan temprana y remota, la situación sigue cargada de especulaciones. Se podría argumentar que el Universo se originó a partir de una fluctuación cuántica accidental, pero entonces estaremos enfrentados a la pregunta de si las leyes de la mecánica cuántica ya existían a $t = 0$.

Las teorías de hoy acerca del Universo neonato favorecen la idea de una



En 1596, Johannes Kepler (1571-1630) publicó este esquema de las órbitas planetarias basado en la combinación de la idea de Platón de los cinco poliedros irregulares, con la hipótesis de los planos esféricos en los cuales se suponía viajaban los planetas.

asi llamada fase de inflación. De acuerdo con estas teorías la expansión del Universo durante los primeros 10^{-35} no fue lineal como lo es hoy día, sino muchísimo más rápida. Esta fase exponencial o inflacionaria podría explicar causalmente algunas propiedades del Universo de hoy, que de otro modo debieran aceptarse como accidentales. Más aún, el modelo inflacionario predice la existencia de más materia en el Universo que la observada en las estrellas y galaxias luminosas. Esto significa que debe haber más materia oscura que hasta ahora no es observable. Esta es una clara predicción de la teoría de la inflación que debiéramos ser capaces de comprobar con instrumentos modernos. Es realmente posible abrigar alguna esperanza de poder verificar o rechazar nuestros conceptos acerca del Universo a la edad de 10^{-35} segundos. Pero será siempre imposible ofrecer una descripción exacta del Universo a la edad precisa de 0 segundos.

El Origen de los primeros elementos

Cuando el Universo contaba con una edad de sólo una fracción de segundo,

la materia existía en una forma que no podemos imaginar. Los teóricos hablan de partículas exóticas a las que llaman "bosones" o "partículas de Higgs". Que estos conceptos no son del todo absurdos lo demuestra la predicción de los así llamados bosones W y Z (cuyo descubrimiento fue honrado con el premio Nobel de Física de 1984, otorgado a C. Rubbia y a S. van der Meer, del CERN). Las propiedades de estas partículas, que nos parecen un tanto locas, son responsables de una buena parte de las enormes y finalmente insuperables dificultades que hemos mencionado en la sección anterior.

Una vez que el Universo había alcanzado la edad de un minuto, habiéndose enfriado hasta unos mil millones de grados, ya era comparativamente simple. En ese entonces toda la materia que más tarde habría de condensarse en estrellas y galaxias existía en forma de partículas nucleares normales (protones y neutrones). Hoy estamos acostumbrados a su combinación en los núcleos de los elementos químicos. Sin embargo, a temperaturas superiores a los mil millones de grados, dichas partículas se desplazan a tales velocidades que cualquier tendencia a combinarse se hace obsoleta debido a una colisión subsiguiente. Sin embargo, si la temperatura cae bajo este límite se pega un protón con un neutrón para formar el deuterio (^2D), isótopo del hidrógeno. Si otro protón se une a este núcleo se forma Helio liviano (^3He) y con otro neutrón adicional, Helio normal (^4He).

Estas reacciones son tan bien conocidas para un físico atómico moderno que él puede calcular exactamente las velocidades de formación de ^2D , ^3He y ^4He . El resultado es una mezcla de 76% de protones puros (que se combinan más tarde con electrones para formar hidrógeno normal), 24% de Helio (^4He), y las partículas intermedias ^2D y ^3He constituyen solamente una fracción minúscula. La primera síntesis de elementos ha terminado tres minutos después

de la Gran Explosión.

Este escenario lleva a la predicción de que las nebulosas gaseosas entre las estrellas (cuya composición química original se ha alterado sólo muy levemente) consisten esencialmente en un 76% de hidrógeno y 24% de helio. Esta predicción está muy bien confirmada por observaciones de nebulosas brillantes tanto de nuestra Vía Láctea como de otras galaxias externas. Los espectros observados incluso demuestran las cantidades calculadas de ^2D y ^3He . El caso del deuterio es particularmente importante porque parece imposible producir este frágil isótopo en las fases posteriores del Universo. Las observaciones actuales de los elementos más simples y livianos requieren ineludiblemente de una fase temprana, extremadamente densa y caliente del Universo. Esto debiera llevar a la conclusión de la necesidad de una Gran Explosión aunque todavía no se hubiera observado expansión alguna.

Para comprender mejor la síntesis de los elementos más livianos tenemos que considerar dos cuestiones adicionales. La primera: ¿por qué hay un exceso de 76% de protones (vgr. hidrógeno), y por qué no se transformó toda la materia en helio en las fases iniciales del Universo? Esto se explica por el hecho de que son necesarios dos protones y dos neutrones para la formación de un átomo de helio; sin embargo, los dos tipos de partículas no son igualmente abundantes. El neutrón es ligeramente más pesado que el protón; por consiguiente, se requiere más energía para crearlo, originándose menos neutrones que protones en el campo energético del joven Universo. La abundancia de helio es, por lo tanto, una simple consecuencia de las diferentes cantidades de protones y neutrones.

La segunda pregunta se refiere a por qué se detuvo la síntesis inicial de elementos en el helio y todos los protones y neutrones disponibles no se combinaron para formar los demás ele-

mentos hasta el (^{56}Fe). Esto habría sido atractivo, porque se habría liberado energía. Pero el átomo que consiste en cinco partículas es, "por azar", altamente inestable, decae antes de que se pueda unir otra partícula. Lo mismo es válido para un átomo formado por ocho protones/neutrones. La inestabilidad de estos dos átomos constituyó una barrera infranqueable para la formación de los elementos más pesados.

El hecho de que la síntesis temprana de elementos, también llamada sín-

tesis primordial de elementos, deje una gran fracción de protones libres, es de máxima importancia para la evolución ulterior del Universo. La mayor parte de la luminosidad de las estrellas se produce por conversión del hidrógeno en helio en el centro de las mismas. Nuestro Sol se gana la vida de igual modo. Si todo el hidrógeno del Universo se hubiera transformado en

helio a los tres minutos de la Gran Explosión, el Universo habría carecido de su principal fuente de energía y habría permanecido en la oscuridad. Del hecho de que el neutrón es ligeramente más pesado que el protón ha surgido una de las incontables condiciones para la existencia de la vida en la Tierra.

El Universo se torna transparente

En la sección anterior describimos que el Universo se había enfriado suficientemente como para hacer posible que los protones y los neutrones se combinaran formando los elementos más simples. Pero estaba aún demasiado caliente para que los electrones pudieran

entrar en órbitas alrededor de los núcleos atómicos. A $t = 3$ minutos volaban aún libremente en el Universo y chocaban continuamente con cuantos de luz (fotones). Ello impedía que la luz se propagara haciendo que el Universo joven fuera opaco.

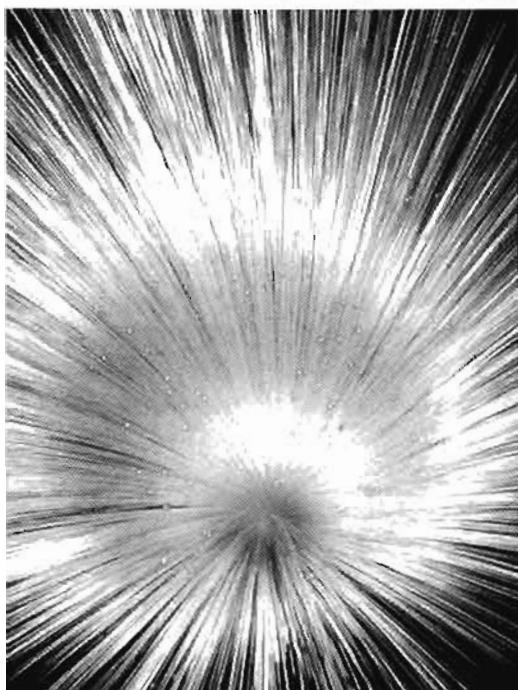
Después de aproximadamente medio millón de años, con la expansión correspondiente, la temperatura del Universo había caído a unos cuantos miles de grados; era suficientemente fría como para que los electrones entraran a los

sitios que hoy ocupan. La materia del Universo, que hasta entonces estaba ionizada, se hizo neutra y la luz pudo propagarse libremente en el Universo.

Esta conclusión debe entenderse literalmente: si se supone que los fotones, es decir la luz, emitidos por el Universo a una temperatura de unos 3 mil grados, viajan libremente desde esa época,

algunos de ellos debieran llegar a la Tierra hoy. Ello implica que debiéramos ser capaces de observar un "punto caliente" - la Bola de Fuego Primordial en el cielo.

De esto surge de inmediato una primera pregunta: ¿En qué dirección debemos mirar para observar esta Bola de Fuego? Tendremos la respuesta si consideramos que mirar hacia esta lejana distancia significa que estamos mirando hacia el pasado, debido a la velocidad finita de la luz (300 mil km/s). A los objetos distantes no los vemos como son hoy, sino como eran cuando emitieron la luz que hoy vemos en nuestros telescopios. Vemos a nuestras galaxias vecinas con el aspecto que te-



nían hace un millón de años; las más distantes se nos aparecen como eran hace mil millones de años, y los quasares más distantes nos dan cuenta sobre el estado original de galaxias que existieron hace más de 10 mil millones de años. No importa en qué dirección aparezcan. Miramos hacia el pasado en todas direcciones. Cuando queramos ver a la Bola de Fuego Primordial, que existió hace unos 15 mil millones de años sólo tenemos que mirar hacia el pasado; la dirección no es importante. Por el contrario: la Bola de Fuego Primordial debe verse igual en todas las direcciones.

La siguiente pregunta no se hace esperar: ¿Por qué todo el cielo de noche (y también de día) no resplandece de rojo como correspondería a una temperatura de 3 mil grados? La razón es simple. La expansión del Universo estira a las ondas de luz en su largo viaje a través del espacio y el tiempo. Ellas nos llegan con longitudes de onda muchísimo mayores que cuando fueron emitidas por la Bola de Fuego Primordial. Hablando en términos de fotones, ellos han perdido la mayor parte de su energía. Esperamos entonces que el cielo resplandezca como un cuerpo cuya temperatura se encuentre a algunos grados sobre el cero absoluto (-273° C). Por lo tanto debemos buscar a estos fotones primordiales no en la región visible del espectro sino mediante una antena de radio, en la región de longitudes de onda de milímetros.

Estos conceptos fueron vagamente reconocidos por George Gamow en 1946. Él predijo que los fotones de la Bola de Fuego Primordial debieran ser observables en el rango de las longitudes de onda de milímetros. En 1965 Arno Penzias y Robert Wilson tuvieron éxito en demostrar la existencia de la así llamada Radiación Cósmica de Fondo (RCF) (en inglés *Cosmic Background Radiation*, CBR). Con ello se confirmó el modelo de la Gran Explosión y su descubrimiento fue honrado

con el premio Nobel de 1978.

Actualmente se invierten muchos esfuerzos en medir con precisión la RCF. Se encuentra en operación un satélite, el COBE, cuyo único objetivo es medir dicha radiación. La RCF corresponde a un cuerpo radiante a una temperatura de sólo 2.75° Kelvin (es decir, 2.75 grados sobre el cero absoluto), pero hay increíblemente muchos fotones de fondo. A una densidad de aproximadamente 400 fotones por centímetro cúbico el número de fotones de la RCF sobrepasa con mucho a otras fuentes de "luz" en el Universo. Esta es una de las razones básicas por las cuales es imposible explicar la RCF de otro modo que como resultado de la Bola de Fuego Primordial. Mas aún, la RCF tiene las propiedades que se le habían predicho: un espectro que corresponde exactamente al de un "cuerpo negro" y el de ser completamente independiente de la dirección de observación, es decir de ser "isótropa". Su intensidad permanece uniforme, en diferentes direcciones, hasta una precisión de un cienmilésimo. Volveremos a este punto más adelante.

El origen de las estructuras

Tal como vimos en la sección anterior, el Universo es transparente desde hace 500 mil años. La transición desde ser opaco a ser transparente no tuvo consecuencias para su expansión. El Universo continuó expandiéndose, lo que llevó necesariamente a ulterior enfriamiento y enrarecimiento de la materia en él contenida. Como ya hemos visto, esta materia consistía casi exclusivamente de hidrógeno y de helio (podemos aquí ignorar la posible existencia adicional de materia exótica). Sin embargo, estos dos elementos no pueden formar entre sí compuesto químico alguno, lo que en otras palabras significa que el Universo en aquel entonces, desde el punto de vista de un químico, habría sido de lo más aburrido. Más

aún, el hidrógeno y el helio se encontraban distribuidos “regularmente” en el espacio y cada vez más diluidos. ¿Cómo podría la materia condensarse formando objetos del tamaño de una bola de tenis, una estrella o incluso una galaxia?

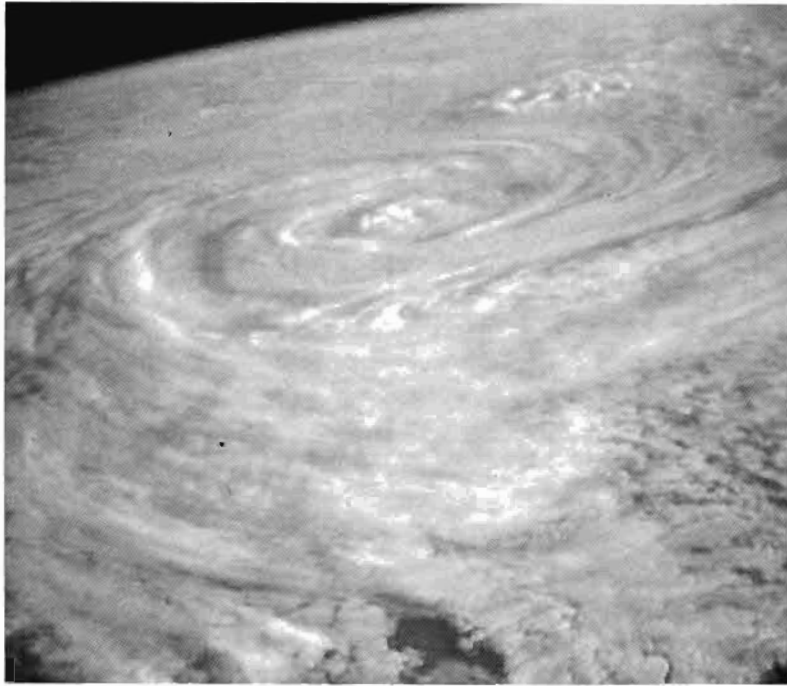
La respuesta a esta pregunta estriba en el hecho de que en realidad la materia no estaba distribuida regularmente, es decir, de acuerdo a reglas estrictas, sino de acuerdo al azar. Esto significa que había sitios en que la densidad era mayor que el promedio y otros en que la densidad era menor que el promedio. En las áreas relativamente más densas, una fuerza gravitatoria adicional se ejercía permanentemente en contra de la expansión, produciendo finalmente una contracción local. Por lo tanto, es muy factible que se formen condensaciones locales aun en un gas en expansión global. Uno puede simular en grandes computadoras la formación de condensaciones o “estructuras”, como yo las llamaré de ahora en adelante.

El principal problema para comprender el origen de las estructuras consiste, sin embargo, en que se dispone de un tiempo menor que el calculado de acuerdo con el modelo. Veremos inmediatamente por qué hay sólo 2 mil millones de años disponibles para la formación de las galaxias y las primeras estrellas. Pero parece que las condensaciones no crecen suficientemente rápido en el computador. Debieran existir procesos adicionales no lineales, más complejos, que aceleren la formación de estructuras. Aquí podría ser de alguna ayuda la antes mencionada “materia exótica”. Esta es otra razón por la que a muchos astrofísicos les gusta creer en la existencia de esta materia, aún no demostrada. Para ser honestos: debemos aceptar que todavía no entendemos la fase de formación de estructuras en todos sus detalles.

Otra observación nos muestra, sin embargo, que nuestra visión actual acer-

ca de la formación de estructuras es correcta, por lo menos en su concepto básico. Si el gas, que originalmente se encontraba distribuido en forma regular, se aglomerara lentamente en condensaciones mayores, esto ocasionaría alteraciones sustanciales en el ritmo de expansión. Debieran incluso existir sitios en que la materia no se está expandiendo sino confluyendo. Uno de los éxitos de los últimos años ha sido la observación de la disminución en la velocidad de fuga de las galaxias en la vecindad de grandes cúmulos de galaxias. Nuestra Vía Láctea, por ejemplo, debería tener una velocidad de recesión relativa al cúmulo de Virgo, que es el gran cúmulo de galaxias más cercano, de 1200 km/seg, de acuerdo con su distancia de 22 Megaparsec (= 72 millones de años luz). Sin embargo se observa una velocidad de sólo 980 Km/seg. La gravedad adicional del cúmulo de Virgo, por lo tanto, nos desacelera en 220 km/seg. ¿Nos atrapará finalmente el cúmulo de Virgo? El cálculo nos demuestra que esto no sucederá, porque aunque Virgo nos atrae continuamente, la desaceleración disminuye, lo que nos da una oportunidad de escapar de Virgo. Sin embargo, muchas de las galaxias situadas entre nosotros y el cúmulo de Virgo serán eventualmente tragadas por éste.

Vemos que la gravedad es una fuerza increíblemente poderosa. Parece que nunca será capaz de conquistar a la expansión en su conjunto, pero domina en la determinación de fluctuaciones de densidad. Pero ¿hasta donde alcanzará la contracción gravitacional? ¿Hasta el colapso total, es decir a la etapa del hoyo negro? Aunque pareciera que los hoyos negros pudieran originarse bajo circunstancias especiales, generalmente hay otras fuerzas que se oponen a la contracción, balanceando al cuerpo en contracción. En los cúmulos de galaxias esta fuerza resulta del calentamiento causado por la contracción. Esto significa que las gala-



Ahora bien, ¿por qué se ha dispuesto de sólo 2 mil millones de años para la formación de estructuras? Simplemente porque nuestra Vía Láctea tiene una edad de 13 mil millones de años. Debe haberse formado ya a 2 mil millones de años de la Gran Explosión. La diferencia de 2 mil millones de años es todavía bas-

xias vuelan girando en un cúmulo tanto más rápido cuanto mayor es la contracción del cúmulo. De acuerdo con la ley de conservación de la energía, las galaxias tienen sus máximas velocidades cuando vuelan hacia el centro de sus cúmulos. Por lo tanto no hay peligro de que se queden pegadas en el centro. Las galaxias en contracción están siendo balanceadas por su rotación: una galaxia que está disminuyendo de tamaño comienza a rotar cada vez más rápido como un patinador realizando una pirueta sobre el hielo. En las estrellas y, por lo tanto también en nuestro Sol, es la energía nuclear producida en su centro la que actúa oponiéndose a la contracción ulterior. Finalmente, en “piedras frías”, como nuestra Tierra, la gravedad está balanceada por la repulsión de electrones cargados negativamente que circundan a los núcleos atómicos. Vemos que la Naturaleza tiene a varios oponentes de la gravedad que pueden evitar o, por lo menos, posponer el colapso gravitacional total. Podemos considerarnos muy afortunados; de otro modo se habrían formado puros hoyos negros en vez de estructuras, y las estrellas nunca se hubieran encendido.

tante incierta: puede tratarse de mil o 4 mil millones de años. En todo caso el tiempo invertido en la formación de estructuras es muy corto. El problema se agrava por el hecho de que la RCF primordial es tan isotrópica. Si las semillas para la formación de galaxias y cúmulos de galaxias ya hubieran estado presentes a $t = 500$ mil años, seríamos capaces de reconocerlas como una suerte de “granulosidad” en la bola de fuego primordial. La uniformidad (isotropía) de la RCF nos obliga a concluir que en aquel tiempo a lo sumo habrían mínimas fluctuaciones de densidad. Esto complica mucho las cosas: a $t = 500$ mil años las fluctuaciones de densidad serían despreciablemente pequeñas. ¡A los 2 mil millones de años nuestra Vía Láctea ya había nacido!

Conocemos la edad de nuestra Vía Láctea con bastante confiabilidad con base en observaciones de sus objetos más antiguos, los así llamados cúmulos de estrellas globulares. Varios métodos permiten asignarles una edad de unos 13 mil millones de años. La edad de nuestra Vía Láctea determinada de este modo es tanto más importante cuanto nuestras galaxias vecinas también contienen cúmulos globulares muy

semejantes. Éstos están tan distantes como para ser resueltos en estrellas individuales, pero sus propiedades globales coinciden tan bien con los de nuestra Vía Láctea que por lo menos algunos de ellos deben tener aproximadamente la misma edad. Otras observaciones apoyan la idea de que una gran parte de todas las galaxias se formaron en un margen de tiempo relativamente corto. Este resultado concuerda razonablemente con el cuadro que hemos bosquejado de la formación de estructuras.








Una consecuencia del hecho de que las galaxias y sus estrellas se formaron alrededor de 2 mil millones de años después de la Gran Explosión es la siguiente: si miráramos suficientemente lejos al interior del Universo -lo que significa que miramos suficientemente lejos hacia el pasado- debiéramos ver al Universo en un estado en que aún no contenía galaxias luminosas. Por lo tanto no debemos ver galaxia alguna más allá de una cierta distancia límite (correspondiente a una edad del Universo de 2 mil millones de años). Es fascinante darnos cuenta que posiblemente ya hemos alcanzado este límite.

Como hemos mencionado anteriormente, los cuasares pueden observarse en gran número y hasta distancias enormes. Sin embargo, hasta ahora no ha sido detectado, a pesar de todos los esfuerzos que se han hecho, ni un solo cuasar con una desviación hacia el rojo correspondiente a una velocidad de recesión equivalente a más del 90% de la velocidad de la luz. El "tiempo de la mirada al pasado" hasta este límite corresponde justamente a los 13 mil millones de años esperados. Una de las tareas más importantes para la nueva generación de telescopios con espejos de diámetros superiores a los 10 m será el de decidir si este límite es real o ha sido simulado por efectos de selección no controlados. En todo caso ¿este límite debe encontrarse en algún lugar en el pasado!

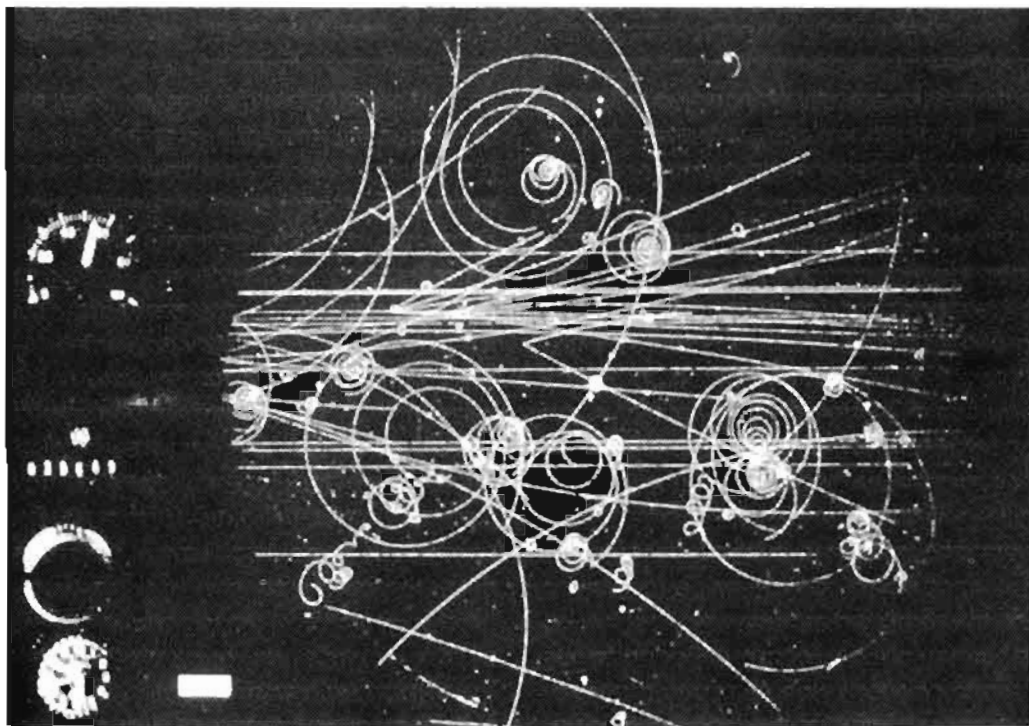
La síntesis de los elementos pesados

Las galaxias que se formaron alrededor de 2 mil millones de años después de la Gran Explosión por supuesto estaban constituidas casi exclusivamente por hidrógeno y helio. Las primeras estrellas en las galaxias estaban formadas a partir de estos gases, como ya lo hemos visto en el caso de los cúmulos globulares. Extrañamente, el ritmo de conversión del gas en estrellas fue muy diferente en distintas galaxias. En algunas galaxias prácticamente la totalidad del gas se condensó rápidamente en innumerables estrellas; éstas son las galaxias a las que hoy, por su aspecto, denominamos "elípticas". En muchas galaxias menores la fuerza gravitatoria sólo lentamente logró formar estrellas a partir de nubes gaseosas únicas; a éstas las denominamos galaxias "irregulares". Las nubes magallánicas, en nuestra inmediata vecindad, son ejemplos típicos de galaxias irregulares. En estas galaxias existe aún abundante gas disponible para la formación de estrellas. Las galaxias espirales, una clase a la que pertenece nuestra Vía Láctea, forman parte de un grupo intermedio,

ELEMENTS

	Hydrogen	1		Strontian	46
	Azore	5		Barytes	68
	Carbon	54		Iron	50
	Oxygen	7		Zinc	56
	Phosphorus	9		Copper	56
	Sulphur	13		Lead	90
	Magnesia	20		Silver	190
	Lime	24		Gold	190
	Soda	28		Platina	190
	Potash	42		Mercury	167

Trazos dejados en una cámara de niebla por las partículas resultantes de la colisión de dos núcleos atómicos.



en las que alrededor de un 10% de su masa se encuentra en forma de gas, lo que permite que en ellas se formen estrellas, aunque a un ritmo reducido.

No parece que un 10% de materia prima para formar nuevas estrellas sea mucho. ¿Es que las galaxias espirales están cerca de su fin? La respuesta es que no, y que incluso en las galaxias espirales, hoy carentes de gas libre, no se puede excluir la posibilidad de que aún haya cierta generación de estrellas. La razón para ello es que el envejecimiento y la muerte de las estrellas hace retornar parte de su masa al espacio interestelar. Parte de la materia que hoy vemos ligada a las estrellas es devuelta al reservorio original, del cual pueden nacer futuras generaciones de estrellas. La fracción de masa estelar que retorna es fuertemente dependiente de la masa original. Estrellas más livianas o tan pesadas como nuestro Sol se llevan la mayor parte de su masa a sus tumbas, es decir, a su estado de estrellas enanas blancas. Las estrellas más pesadas, sin embargo, pueden devolver la mayor parte de su masa. Una estrella siete veces más pesada que el

Sol devuelve alrededor del 80% de su masa original antes de convertirse en una enana blanca. Además, estas estrellas masivas devuelven su material con rapidez, porque agotan su "combustible" muy violentamente y sufren una muerte prematura.

El aspecto más importante es que el material retornado es cualitativamente diferente al material de construcción original. Ya hemos mencionado que las estrellas reponen la mayor parte de sus pérdidas energéticas por la transformación de ^1H (hidrógeno) en ^4He (helio). Esto significa que el ^4He se acumula primero en el centro de la estrella y más tarde también en sus capas exteriores, a expensas del ^1H , del que finalmente no quedará nada. La estrella entonces encenderá su núcleo, consistente en su totalidad por ^4He , y en esta fase de ignición tres núcleos de ^4He se combinan para formar ^{12}C (carbono). Fijaciones adicionales de núcleos de ^4He forman, paso a paso los elementos más pesados ^{16}O (oxígeno), ^{20}Ne (neón), ^{24}Mg (magnesio), ^{28}Si (silicio), ^{32}S (azufre) y más allá, hasta el ^{56}Fe (hierro). En cada paso se libera algo de

energía, lo que pospone la muerte de la estrella. Pero ninguno de estos pasos es completo, lo que significa que al término de su vida la estrella contendrá remanentes sustanciales de los diversos elementos nombrados. Lo mismo vale para las "cenizas" que la estrella devuelve al espacio interestelar y que se mezclan con los gases originales ^1H y ^4He . Con ello se modifica la química de la galaxia total, aumentando su contenido de elementos más pesados.

Salta a la vista que la serie de elementos arriba enumerada contiene sólo núcleos cuyo número de partículas constituyentes es divisible por cuatro. Especialmente llama la atención que el ^{14}N (nitrógeno), que es crucial para la vida, no esté siendo producido. Este elemento, así como muchos otros, son producidos por procesos nucleares en estrellas de la segunda generación que desde su comienzo contenían no sólo ^1H y ^4He sino, además, algunas de las cenizas de la primera generación. El hecho de que nuestro Sol y todos los planetas del sistema solar contengan prácticamente todos los elementos de la tabla periódica significa que por lo menos dos generaciones de estrellas tienen que haber retornado sus cenizas al espacio interestelar antes de que pudiera formarse nuestro Sol (hace 4,550 millones de años, como veremos más adelante). Esto es de máxima importancia para la vida terrestre.

Este escenario no vale para los elementos más pesados que el ^{56}Fe , porque su formación no aporta, sino que demanda energía. Esta energía en exceso sólo aparece disponible bajo condiciones extremas, como las que prevalecen en el interior de algunas explosiones de supernovas. Las supernovas son estrellas muy masivas, con masas mayores a ocho masas solares, que no pueden encontrar una muerte pacífica como enanas blancas, sino que explotan cuando se agota su combustible. Ellas no sólo forman los elementos

pesados hasta el ^{238}U (uranio), sino que sacuden al medio interestelar asegurando una buena mezcla de elementos.

Por supuesto que los astrónomos querían encontrar en nuestra Vía Láctea las primerísimas estrellas que contengan exclusivamente ^1H y ^4He , pero hasta ahora no han tenido un éxito convincente. Obviamente la formación de estrellas muy masivas se vio favorecida, durante la fase temprana de la Vía Láctea, por alguna razón desconocida. Estas estrellas devolvieron su material procesado (cenizas) casi inmediatamente al medio interestelar y hoy son apenas observables como estrellas enanas blancas. Otras observaciones también dan apoyo a la idea de que la química de la Vía Láctea evolucionó mucho más rápidamente en sus comienzos que en sus fases más tardías. La explicación de esto en detalle sigue siendo una tarea para el futuro.

Los elementos más pesados que los ^1H y ^4He primordiales juegan un papel fundamental en nuestra Tierra y en la vida que en ella se sustenta. Por lo tanto, la síntesis nuclear previa es una condición básica para su mera existencia. El silicio contenido en un peñasco, así como el fierro que usamos para hacer clavos o el oro del anillo que usted porta en algún dedo, se formaron en el interior de una estrella. La energía depositada por una supernova en el uranio podemos hoy liberarla por fisión nuclear. De hecho, como seres humanos, aparte del hidrógeno proveniente de la Gran Explosión, consistimos sólo de materia elemental preparada una vez en las estrellas.

El origen del sistema solar y de la Tierra

Alrededor de 10 mil millones de años después de la Gran Explosión, es decir, hace aproximadamente 5 mil millones de años, había una nube en el lugar en que hoy se encuentra nuestro sol, y que consistía en su mayor parte

de hidrógeno y helio. Esta nube ya estaba enriquecida con todos los elementos pesados que se formaron gracias a los procesos descritos en la sección anterior. Accidentalmente comenzó a predominar la gravedad en esta nube, y ella comenzó a contraerse, transformándose en una bola de gas cuya densidad creció y su temperatura se elevó debido a esta misma contracción. Finalmente la temperatura en el centro de esta bola de gas alcanzó el valor necesario para la ignición y conversión del ^1H ardiente en ^4He . La bola de gas se convirtió en una brillante estrella. Nuestro Sol había nacido. La contracción del sol primordial enfrentó un problema substancial. Originalmente la nube gaseosa estaba rotando lentamente; los físicos dicen que poseía momento angular. Debido a una ley fundamental de conservación, el momento angular no puede simplemente desaparecer, por lo que una nube de gas que se está encogiendo tiene que rotar cada vez más rápidamente. Finalmente, el sol primordial, en su proceso de contracción y rotación perdió sus capas más externas, las cuales contribuyeron a formar los planetas del sistema solar. Físicaicamente, el sentido de los planetas es hacerse cargo del exceso de momento angular. De hecho, el 90% del momento angular total del sistema solar está contenido en el movimiento orbital de los planetas.

El problema del momento angular es un problema general durante la formación de las estrellas. Muchas de ellas lo resuelven formando pares, las denominadas estrellas dobles o binarias. Sin embargo, muchas estrellas únicas probablemente lo resolvieron formando planetas, como fue el caso del Sol. Por lo tanto, probablemente los planetas no son una rareza en nuestra Vía Láctea. Se especula mucho si pudiera haberse formado vida también en estos planetas. Nuestros conocimientos actuales, de que no hay vida en ningún otro planeta, ni en las numerosas lunas

que existen en el sistema solar, nos muestran que para el origen de la vida, en todo caso, es necesario algo más que un simple y frío cuerpo celestial.

Aunque la formación de los planetas ocurrió en época relativamente reciente y en nuestra inmediata vecindad, aún no la entendemos completamente; creemos hoy que los planetas no se desprendieron del sol primordial como objetos únicos; probablemente hubo al comienzo un gran número de fragmentos, llamados planetésimos, que chocando entre sí formaron cuerpos mayores -los actuales planetas y lunas.

Es claro que estos pequeños planetésimos enfrentaban problemas para la conservación de sus elementos gaseosos más livianos. Tan pronto como el Sol empezó a brillar, su radiación contribuyó al escape de sus elementos volátiles. En aquel tiempo la materia que habría de convertirse más tarde en nuestra Tierra, perdió la mayor parte de su hidrógeno y su helio. Esto explica por qué dichos elementos no abundan hoy en la Tierra, aunque sigan siendo, y con mucho, los elementos más abundantes del Universo, a pesar de las síntesis nucleares en las estrellas. También explica por qué los planetas más cercanos al Sol (Mercurio, Venus, Tierra y Marte) son pequeños y densos, mientras que los externos (Júpiter y los demás) pudieron conservar mucho de su material volátil siendo, por lo tanto, grandes y de baja densidad.

Después de que los planetésimos se combinaron para formar nuestra Tierra, ella constituía, al comienzo, una masa fundida y caliente, en la cual pronto se formó una corteza dura. En esta corteza también encontramos los elementos muy pesados, como el ^{238}U , ^{232}Th (torio) y todos los demás, hasta el ^{207}Pb (plomo). Sabemos que estos elementos se formaron en una o más supernovas que estallaron antes de que el Sol se condensara separándose del medio interestelar. Más aún, los elementos más pesados son inestables: por

decaimiento radioactivo se transforman gradualmente en plomo. El hecho de que aún haya elementos radioactivos en la Tierra es una demostración obvia de que la edad de la corteza terrestre es finita. Ya que conocemos exactamente la vida media típica de los elementos radioactivos y podemos determinar las cantidades de estos elementos y de sus productos de degradación, se puede determinar con mucha precisión que la edad de la corteza de la Tierra es de 4,550 millones de años. Esta es exactamente la misma edad determinada para las rocas que se trajeron de la Luna y de los meteoritos que caen sobre la Tierra. Por lo tanto sabemos cuándo los cuerpos del sistema solar comenzaron a solidificarse. El tiempo cuando el Sol comenzó a contraerse debe ser un poquito más temprano.

Se puede presumir que la superficie de la Tierra ya era apropiada para la vida hace 4,550 millones de años. Pero esto no es verdad. Fueron necesarios numerosos procesos físicos y químicos, especialmente los referentes a la formación de los océanos, de la atmósfera y de la capa de ozono (que te-

nemos y necesitamos hoy), antes de que la Vida pudiera originarse. Es muy impresionante ver cómo la Tierra se convirtió en un planeta habitable al cabo de la primera mitad de su existencia gracias a una multitud de procesos que fueron totalmente diferentes en los otros planetas. La evolución biológica completa, desde los microorganismos más simples hasta las formas de vida más complicadas, ha transcurrido en solamente 2 mil millones de años.

El cuadro que aquí hemos bosquejado nos muestra que el Hombre está íntimamente conectado con procesos cósmicos muy antiguos y muy distantes. Nuestra misma existencia requiere de que una Gran Explosión diera origen, hace por lo menos 10 mil millones de años, a un Universo en expansión durante un margen de tiempo suficientemente largo para la generación de galaxias y estrellas, para la producción de los elementos químicos y su transporte a un lugar tibiamente calentado por el Sol, y para los procesos subsecuentes que convirtieron a la Tierra en un planeta habitable.

Si la meta del Universo hubiera sido producir las moléculas orgánicas más complicadas, y capaces de contemplar su propia existencia, por lo menos en un lugar del Universo, no cabe duda de que fue muy generoso en el uso del espacio y de la materia. El Universo ha sido, en realidad, muy eficiente en el uso del tiempo.

Lecturas recomendadas

Ferris, T., "Galaxies", Sierra Club, San Francisco, 1980.

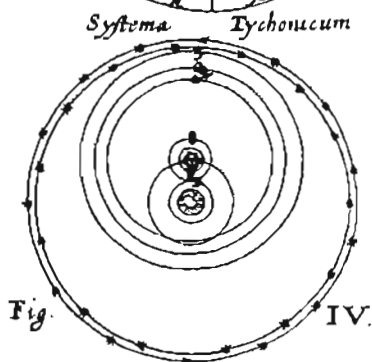
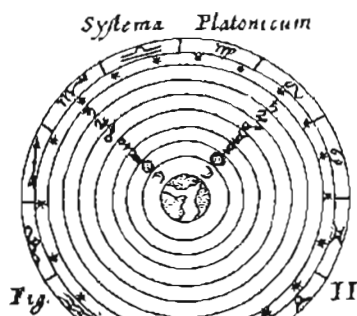
Gribbin, J., "Génesis", Biblioteca Científica Salvat, No. 48, Barcelona, 1986.

Harrison, E. R., "Cosmology", Cambridge University Press, Cambridge, 1981.

Longair, M. S., "The origins of our universe", Cambridge University Press, Cambridge, 1990.

Silk, J., "The Big Bang. The creation and evolution of the universe", Freeman, New York, 1989.

Weinberg, S., "Los tres primeros minutos del universo", Alianza Editorial, Madrid, 1991.



Cosmologías de Platón y Tycho Brahe.