

**E**l modelo homogéneo de la expansión del Universo basado en la teoría general de la relatividad, ahora conocido como la Teoría de la gran explosión, predice que durante los primeros cuatro minutos, contados a partir del principio de la expansión del universo, se produjeron reacciones nucleares basadas en hidrógeno que generaron helio y trazas de deuterio y litio. Durante la expansión, la temperatura del Universo iba decreciendo, y tras estos cuatro minutos no fue lo suficientemente alta para producir los otros elementos de la tabla periódica a partir de reacciones nucleares. Muchos millones de años después se formaron las primeras estrellas con hidrógeno y helio nada más, a este último se le llama helio primordial. Los otros elementos de la tabla periódica se formaron a partir de reacciones nucleares en el interior de las estrellas y una fracción de ellos



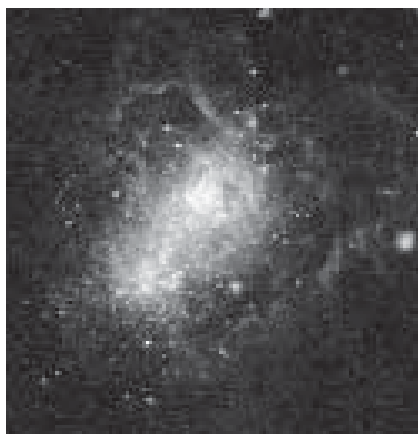
# La **abundancia** primordial de **helio**

**Manuel Peimbert**

fue expulsada después al medio interestelar.

La formación de los elementos es un problema clave para entender la evolución del Universo. En particular la formación de helio ha sido fundamental para el estudio de la cosmología y la evolución química de las galaxias. A lo largo de los años el aumento en la precisión de la determinación de la abundancia del helio por unidad de masa ( $Y$ ) en objetos diferentes, y el aumento en la precisión de las predicciones de la abundancia primordial del helio ( $Y_p$ ) obtenidas a partir de la nucleosíntesis de la gran explosión nos ha conducido a una mayor comprensión del Universo.

Para obtener  $Y_p$  es necesario determinar la composición química de nebulosas gaseosas en galaxias con diferentes fracciones de elementos pesados. La composición química se normaliza por medio de la relación  $X + Y + Z = 1$ , donde  $X$ ,  $Y$  y  $Z$  son la abundancia por unidad de masa de hidrógeno, helio y demás elementos respectivamente.  $Y_p$  se determina por medio de una extrapolación a  $Z = 0$  de los valores de  $Y$  determinados en galaxias con distintos valores de  $Z$ . Se requieren observaciones de mucha calidad de galaxias que hayan tenido muy poca formación estelar y que por lo tanto



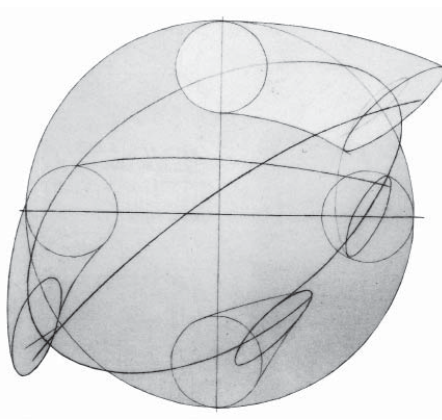
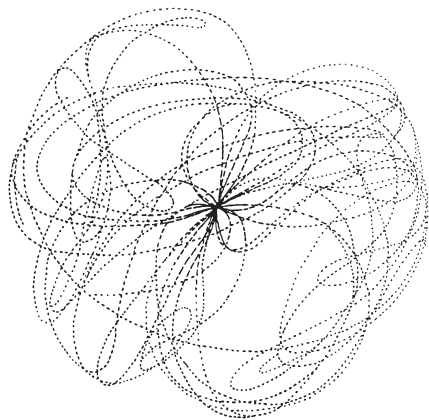
hayan enriquecido el gas con poco helio y elementos pesados desde su formación. Estas galaxias son galaxias irregulares, con una fracción muy alta de su masa en forma de gas y una fracción de su masa muy pequeña en forma de estrellas.

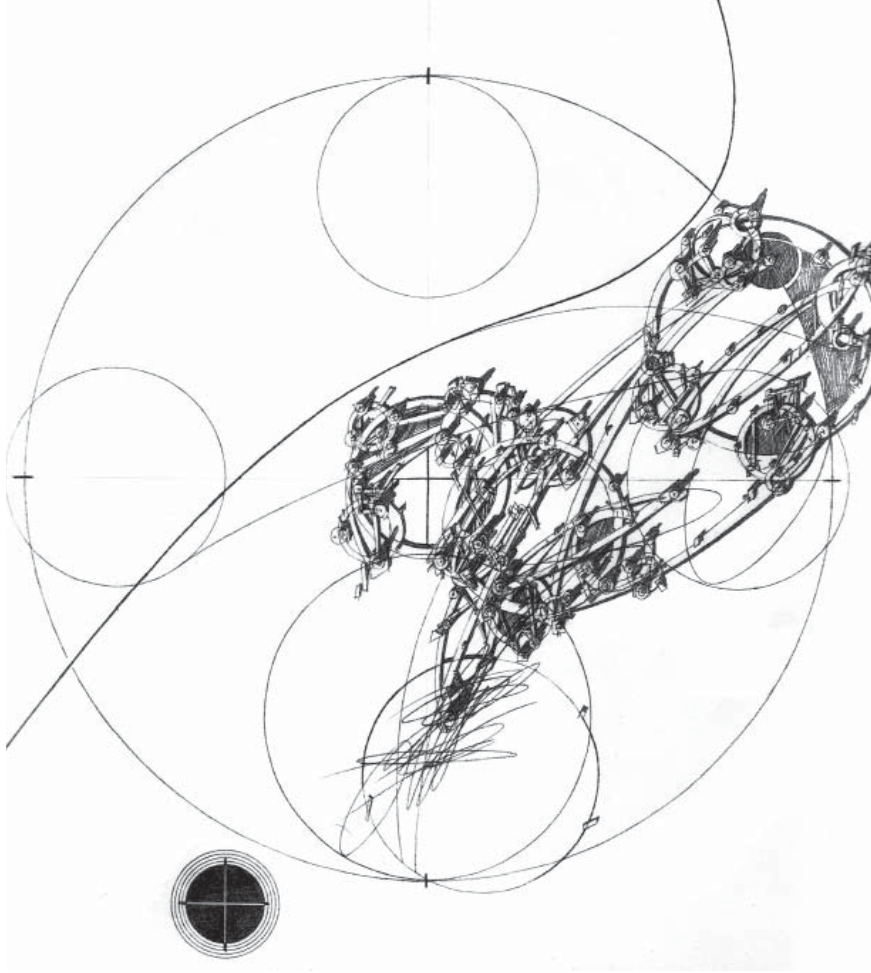
La determinación de  $Y_p$  es importante, entre otras razones porque: a) es uno de los pilares de la Teoría de la gran explosión, b) nos permite verificar la Teoría estándar de la gran explosión, c) los modelos de evolución química de las galaxias requieren un valor inicial de  $Y$ , el cual está dado por  $Y_p$ , d) los modelos de evolución estelar necesitan un valor inicial de  $Y$ , que está dado por  $Y_p$  más el valor adicional de helio producido por la evolución química de la galaxia a partir de la gran

explosión y hasta el momento en que se forma la estrella en cuestión.

Hace cincuenta años la falta de precisión en las determinaciones de la abundancia de helio y la falta de conocimiento sobre los procesos de asentamiento gravitacional del helio en las estrellas había permitido la existencia de dos posturas radicalmente diferentes en cuanto a los valores observados de  $Y$ : a) las galaxias se habían formado a partir de un gas de hidrógeno sin helio y la relativamente alta abundancia de helio que se observa en estrellas jóvenes y en el gas interestelar había sido producida por estrellas normales durante la vida de las galaxias, y por estrellas supermasivas al principio de la formación de las galaxias; o bien, b) las galaxias se formaban con una cantidad apreciable de helio, probablemente producido durante las etapas iniciales de la expansión del Universo, como lo predecía la Teoría de la gran explosión. La primera posibilidad implica que el valor de  $Y$  para las estrellas muy viejas debería ser considerablemente menor de 0.2, mientras que la segunda implica valores de  $Y$  en el intervalo de 0.2 a 0.3 para todas las estrellas viejas.

Éstas y otras consideraciones tenían divididos a los astrónomos en dos grupos: los que estaban a favor de la





Teoría de la creación continua de materia, que consideraban que  $Y_p$  era igual a cero, y los que estaban a favor de la Teoría de la gran explosión, que consideraban que  $Y_p$  era distinto de cero. Para decidir entre estas dos posibilidades era importante tratar de encontrar si había diferencias significativas entre las estrellas más viejas, en particular, si el valor de  $Y$  para éstas era de 0.27 o cercano a cero.

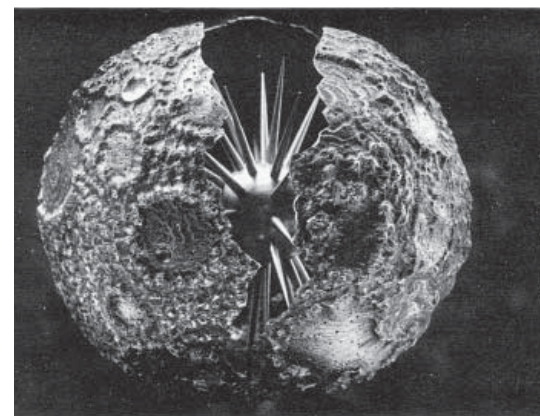
El descubrimiento en 1965 de la radiación fósil o de fondo por medio de radio observaciones proporcionó un apoyo fundamental a la Teoría de la gran explosión y llevó a los cosmólogos a producir un nuevo conjunto de reacciones nucleares con mayor precisión que antes; Jim Peebles encontró que, para una temperatura de la radiación de fondo de 3 grados Kelvin y dos familias de neutrinos, el valor de  $Y_p$  está comprendido entre 0.26 y 0.28.

De acuerdo con la Teoría estándar de la gran explosión, la abundancia primordial de helio depende de un parámetro únicamente, del cociente que resulta del número de bariones entre el número de fotones, donde el número de bariones está dado por la suma de todos los protones y neutrones que forman los átomos de la tabla periódica. Si conocemos el cociente entre bariones y fotones con gran precisión, entonces esta teoría nos indica el valor de  $Y_p$  con gran precisión.

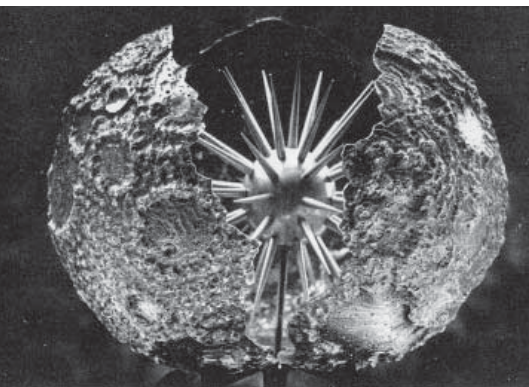
Al final de la década de los sesentas y durante los setentas, los astrónomos encontramos que era relativamente más fácil y preciso determinar la abundancia de helio a partir de observaciones de nebulosas gaseosas en galaxias poco evolucionadas, en lugar de hacerlo en estrellas viejas. Así, los valores que obtuvimos para  $Y_p$  están comprendidos entre 0.20 y 0.30.

En el siglo XXI hemos entrado a la llamada cosmología de alta precisión. Así, gracias al lanzamiento del satélite WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe), David Spergel y su grupo encontraron que el cociente entre fotones y bariones en el Universo observable es de mil seiscientos millones, o sea por cada barión existen mil seiscientos millones de fotones. Este número se obtiene estudiando la distribución de la temperatura de la radiación de fondo en la bóveda celeste. Combinando este número con la Teoría estándar de la gran explosión, la cual adopta tres familias de neutrinos ligeros, se encuentra que  $Y_p$  es igual a 0.2484 para un tiempo de vida del neutrón de 886 segundos y de 0.2466 para un tiempo de vida del neutrón de 879 segundos. Llama la atención que las últimas dos determinaciones del tiempo de vida del neutrón difieran por siete segundos y que los dos grupos independientes que hicieron las determinaciones presenten un error menor a un segundo.

Por otro lado, a partir de observaciones de nebulosas de gas ionizado en galaxias pobres en elementos pesados, quien esto escribe, junto con Valentina Luridiana y Antonio Peimbert, encontramos que  $Y_p = 0.2477 \pm 0.0029$ , donde el error depende prin-







principalmente de la precisión con que se conocen los parámetros atómicos que producen las líneas de emisión necesarias para calcular la abundancia de los elementos y la distribución de la temperatura en las nebulosas gaseosas observadas.

Si el valor de  $Y_p$  obtenido por medio de la observación de nebulosas gaseosas coincide con el valor de  $Y_p$  derivado por medio de la Teoría estándar de la gran explosión y las observaciones del WMAP, entonces diríamos que

esta teoría es correcta. En caso de diferir tendríamos que recurrir a teorías no estándar de la gran explosión.

La posibilidad de tener el caso de una física no estándar ha sido discutida por muchos investigadores; el artículo pionero en el tema fue publicado por Dirac en 1937. Mencionaré dos ejemplos de lo que podríamos llamar física no estándar. La Teoría estándar de la gran explosión asume que el número de familias de neutrinos ligeros que se encuentra en el laboratorio en el presente es igual al que había hace trece mil setecientos millones de años, cuando se produjo la gran explosión. Si el número de familias de neutrinos ligeros hubiese sido igual a cuatro du-



rante la gran explosión, tendríamos una Teoría no estándar de la gran explosión que predeciría un valor de  $Y_p = 0.26$  contrario al valor observado. El segundo ejemplo es la variación de la constante gravitacional de Newton ( $G$ ) con el tiempo, ya que los cálculos de la nucleosíntesis de la gran explosión se hacen suponiendo el valor actual de  $G$ , y si  $G$  hubiese sido mayor o menor durante el periodo de la nucleosíntesis primordial, el valor de  $Y_p$  obtenido sería menor o mayor al predicho por la teoría estándar.

Para restringir aún más los distintos tipos de física no estándar, sigue siendo importante el tratar de disminuir el error en los dos tipos de determinaciones de  $Y_p$ , tanto en el basado en la Teoría estándar de la gran explosión, como el basado en las observaciones de nebulosas gaseosas en galaxias que hayan sido poco contaminadas por los productos de la evolución estelar.

#### Manuel Peimbert

Instituto de Astronomía,  
Universidad Nacional Autónoma de México.

#### IMÁGENES

Pp. 44-45: Fluctuaciones de temperatura observadas en la luz más antigua del universo como se ven ahora

con el satélite WMAP, cortesía de Max Tegmark, Angélica de Oliveira Costa y Andrew Hamilton, Wilkinson Microwave Anisotropy Probe, WMAP; Fluctuaciones de temperatura observadas en la luz más antigua del universo como se ven ahora con el satélite WMAP situando al observador en el centro de la esfera, cortesía de Max Tegmark, Angélica de Oliveira Costa y Andrew Hamilton, Wilkinson Microwave Anisotropy Probe, WMAP;

Lebbeus Woods, The New City, 1984. P. 46: Región de formación estelar en la galaxia irregular I Zwicky 18, Imagen del Telescopio Espacial Hubble de la NASA; Lebbeus Woods, The New City, 1984; Lebbeus Woods, The New City, 1984; Rosa Vartukian [Dibujo], Libreta escolar, 1929. P. 47: Lebbeus Woods, The New City, 1984; Clovis Prevost. P. 48: Clovis Prevost; Rosa Vartukian [Dibujo], Libreta escolar, 1929.

#### THE PRIMORDIAL ABUNDANCE OF HELIUM

**Palabras clave:** helio primordial, abundancia del helio por unidad de masa.

**Key words:** primordial helium, helium abundance by unit of mass.

**Resumen:** las primeras estrellas formadas, contenían sólo hidrógeno y helio. A partir de las reacciones nucleares en el interior de las estrellas se formaron el resto de los elementos de la tabla periódica. Este trabajo presenta resultados sobre el estudio de la abundancia del helio por unidad de masa, fundamental para el estudio de la cosmogonía y la evolución química de las galaxias.

**Abstract:** the first stars formed contained only hydrogen and helium. The other elements in the periodic table were formed from nuclear reactions in the stars' interior. This article presents the results of a study of helium abundance by unit of mass, which is fundamental to the study of cosmogony and the chemical evolution of galaxies.

Manuel Peimbert es investigador emérito del Instituto de Astronomía de la UNAM, también obtuvo el Premio Universidad Nacional en Ciencias Exactas en 1988, fue elegido miembro asociado de la Sociedad Astronómica Real de Inglaterra en 1989 y de El Colegio Nacional (México) en 1992.

Recibido el 12 de mayo de 2009, aceptado el 20 de mayo de 2009.