

# La evolución química del universo

## El hombre está hecho de polvo de estrellas

MANUEL PEIMBERT\*

**A** la evolución de las abundancias de los elementos atómicos en el medio interestelar, los astrónomos le llaman evolución química del universo.

La teoría más aceptada sobre la formación de la estructura del universo observable es la de la gran explosión. Cuatro minutos después de ocurrida la gran explosión terminaron las reacciones nucleares y el universo quedó formado por un 77% de masa de hidrógeno y un 23% de masa de helio. (Véase el artículo de Shahen Hacyan en este número.)

Los astrónomos, basados en observaciones recientes de los cuasares más lejanos, han llegado a la conclusión de que las galaxias se formaron aproximadamente dos mil millones de años después de la gran explosión. En este intervalo la composición química del universo no se modificó y las galaxias se formaron de nubes de gas con 77% de hidrógeno y 23% de helio. Estas nubes se contrajeron y fragmentaron dando origen a la primera generación de estrellas.

Para poder determinar la composición química inicial de las estrellas es necesario determinar la composición química del gas a partir del cual se forman. Esto se logra observando con telescopios el espectro del gas ionizado por

estrellas recién formadas; las nebulosas de gas ionizado por estas estrellas se llaman regiones H II.

El universo está formado fundamentalmente por átomos de hidrógeno y también las nebulosas gaseosas a partir de las cuales se forman las estrellas. A las nebulosas de hidrógeno neutro se les conoce como regiones H I. Las regiones H II son nubes de gas y polvo donde el hidrógeno es ionizado por estrellas jóvenes de muy alta temperatura. Se cree que las estrellas se forman durante el colapso gravitacional de una gran nube de gas y polvo; no todo el gas y el polvo se transforma en estrellas, lo que sobra se convierte en una región de hidrógeno ionizado, en caso de que se formen estrellas masivas y por lo tanto de alta temperatura.

En la figura 1 se muestra una fotografía de la nebulosa de Orión. Se trata de una región H II típica que forma parte de nuestra galaxia y que se encuentra a una distancia de mil quinientos años luz. En su centro contiene cuatro estrellas muy jóvenes, el Trapecio de Orión, que están proveyendo de energía a la nebulosa. La nebulosa de Orión se localiza en la parte central de la Daga de la Constelación de Orión, y se puede observar con binoculares.

Cuando un átomo se encuentra en la proximidad de una fuente muy intensa de energía, como es el caso de los átomos en la vecindad de estrellas muy calientes (con temperaturas mayores a los 30 000°C), la radiación de la fuente

\*Instituto de Astronomía, UNAM



*Fig. 1. La nebulosa de Orión se encuentra localizada alrededor de la estrella central de la Daga de Orión, y es una región activa de formación estelar.*

lo ioniza: le arranca un electrón, posteriormente un electrón libre se une a un ion produciéndose una recombinación; cuando se recombina el átomo, emite radiación. La radiación emitida durante la recombinación es característica del átomo en cuestión, lo cual permite identificarlo. La radiación emitida por una nebulosa consiste en un espectro con líneas de emisión en diferentes longitudes de onda, o sea de diferente energía; cada línea corresponde a una transición atómica de un elemento químico. A partir de las intensidades de las líneas de emisión es posible determinar la composición química de la nebulosa.

Con base en el estudio de regiones H II en galaxias donde ha habido poca formación estelar y donde el medio interestelar no ha sido contaminado por las estrellas, es posible encontrar la composición química inicial a partir de la cual se forman las galaxias.

## Las estrellas

Las estrellas son los grandes alquimistas del universo ya que en el interior de ellas se transmutan los elementos a partir de reacciones nucleares. Podemos dividir a las estrellas en dos grupos: las estrellas masivas, con masas mayores que 8 veces la masa del Sol, y las estrellas de

baja masa, con masas menores que 8 masas solares. Estos dos tipos de estrellas tienen historias diferentes y contaminan el medio interestelar de diversas maneras.

Las estrellas de baja masa, como el Sol, durante la mayor parte de su vida obtienen su energía de la transformación de hidrógeno en helio en su interior. La masa de un átomo de helio es un poco menor que la masa de los cuatro átomos de hidrógeno que se necesitan para formarlo; la diferencia de masa se transforma en energía, de acuerdo con la fórmula de Einstein,  $E = mc^2$ , donde  $c$  es la velocidad de la luz. Para que se den las reacciones nucleares se requiere que la temperatura en el interior de las estrellas alcance  $15\,000\,000^\circ\text{C}$ ; a estas temperaturas los átomos de hidrógeno tienen la suficiente velocidad para poder cruzar la barrera electromagnética de potencial y fusionarse para formar átomos de helio. Cuando el hidrógeno se agota en el centro de la estrella, ésta se transforma en una gigante roja. Posteriormente empieza a transformar su helio en carbono y, al agotarse el helio en su núcleo, expulsa las capas externas hacia el medio interestelar, dando origen a una nebulosa planetaria. La envoltura expulsada se expande a una velocidad aproximada de 20 kilómetros por segundo, y brilla debido a la radiación proveniente de la estrella

que se encuentra a una temperatura mucho mayor que la de las estrellas más calientes de las regiones H II. Las temperaturas típicas en la superficie de las estrellas de las nebulosas planetarias son del orden de 100 000° C.

El material expulsado por una estrella de baja masa en forma de nebulosa planetaria tiene una composición química diferente de la que tenía al formarse la estrella. Las nebulosas planetarias muestran materia que ha sido procesada en el interior de las estrellas progenitoras y son responsables de la mayor parte de los átomos de carbono y nitrógeno que se encuentran en el medio interestelar.

En la figura 2 se muestra una fotografía de la nebulosa planetaria del Esquimal, tomada con el telescopio de 2.1 m de San Pedro Mártir, Baja California.

## Las nebulosas planetarias y las supernovas

Se conocen aproximadamente 1 400 nebulosas planetarias en nuestra galaxia, de las cuales más de 100 han sido descubiertas por astrónomos mexicanos en el Observatorio de Tonantzintla.

El nombre de nebulosas planetarias se acuñó en el siglo pasado y tiene su origen en la similitud de color entre las nebulosas planetarias y los planetas exteriores Urano y Neptuno. Ambos conjuntos aparecen con un color verdoso en el telescopio. La luz verde de las nebulosas planetarias proviene de las líneas de emisión del oxígeno dos veces ionizado, que son muy intensas. Ahora sabemos que los planetas y las nebulosas planetarias no tienen nada que ver entre sí.

Cuando una estrella de alta masa termina de transformar su hidrógeno en helio y su helio en carbono sufre un colapso gravitacional y se produce una explosión muy violenta (supernova); las capas externas son expulsadas a velocidades de 1 000 a 10 000 kilómetros por segundo. Durante la explosión de una supernova, la estrella aumenta considerablemente su luminosidad; antes y durante la explosión se generan todos los elementos más pesados que el hidrógeno, los cuales son arrojados al medio interestelar modificando la composición química del mismo. Se puede determinar la composición química de los remanentes gaseosos de una explosión de supernova a partir del estudio de su espectro. Se encuentra que las



*Fig. 2. La nebulosa planetaria del Esquimal muestra claramente la estrella central y la envolvente gaseosa que se encuentra en expansión. La envolvente está constituida por las capas exteriores de la estrella que fueron expulsadas hacia el medio interestelar.*

supernovas producidas por estrellas de 8 a 12 masas solares enriquecen el medio interestelar fundamentalmente con helio, mientras que las supernovas producidas por estrellas con más de 12 masas solares lo enriquecen con oxígeno y elementos más pesados como el argón, el silicio, el calcio, el potasio, etcétera.

En la figura 3 mostramos la nebulosa del Cangrejo que es el remanente de la explosión de la supernova ocurrida en el año 1054 de nuestra era. En este caso el remanente estelar de la supernova es un pulsar visible como una estrella azul muy débil en el centro de la nebulosa.

A diferencia de las regiones H II y de las nebulosas planetarias, los remanentes gaseosos de supernova no reciben su energía por fotoionización debida a una fuente estelar de alta temperatura, sino de energía cinética que obtuvo la materia durante la explosión.

A partir del estudio de las regiones H II en distintas partes de nuestra galaxia, podemos analizar la distribución de la composición química en el presente. Al observar galaxias con

una alta fracción de su masa en forma de gas, podemos encontrar las abundancias iniciales; mientras que al estudiar galaxias con una alta fracción de su masa en forma de estrellas y casi sin gas, podemos estudiar el efecto colectivo de la contaminación del medio interestelar debida a todas las supernovas y nebulosas planetarias que han existido en esas galaxias. En nuestra galaxia se ha encontrado que la contaminación del medio interestelar y el helio disminuye con la distancia al centro de la misma.

Todos los átomos más pesados que el hidrógeno y el helio que forman la Tierra y a los seres humanos han estado en el interior de las estrellas y han participado en reacciones nucleares, de lo que se infiere que las nebulosas planetarias y las supernovas son nuestras antepasadas. Se puede concluir entonces que el hombre está hecho de polvo de estrellas.

La totalidad de los átomos de hidrógeno en nuestros cuerpos se formó durante los cuatro primeros minutos que siguieron a la gran explosión, y son los decanos de los elementos químicos que nos integran.



*Fig. 3. La nebulosa del Cangrejo es el remanente de la explosión de una supernova ocurrida en el año 1054 de nuestra era. El medio interestelar, después de la explosión, se enriqueció con el material procesado en el interior de la estrella.*