

EVOLUCIÓN DE LA COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL UNIVERSO

I. INTRODUCCIÓN

Los astrónomos queremos conocer y explicar todo lo que existe, existió y existirá en el Universo.

En estas páginas me referiré someramente al problema de la evolución de la composición química del Universo. Los seis elementos más abundantes en la mayoría de los objetos del Universo son el hidrógeno, el helio, el oxígeno, el carbono, el neón y el nitrógeno. La composición química de los objetos en el Universo observable ha sido uno de los temas principales a los que me he dedicado a lo largo de mi carrera. En una primera aproximación se puede decir que todos los elementos de la tabla periódica se encuentran presentes en estrellas, galaxias y nubes de materia interestelar; sin embargo, si se hacen observaciones de gran precisión y si se utilizan parámetros atómicos de alta calidad se encuentran diferencias que indican que la composición química del Universo no es uniforme. A partir de estas diferencias surgen las siguientes preguntas: ¿dónde se originan los átomos?, ¿por qué existen diferencias en la composición química entre los objetos que pueblan el Universo?

Los átomos, incluyendo los que conforman a los seres humanos, se constituyeron durante los primeros cuatro minutos de evolución del Universo observable y en el interior de las estrellas.

Expondré brevemente los procesos de formación de los átomos, los resultados que hemos obtenido al respecto en México y algunas implicaciones de estos resultados. A partir de la composición química observada en diversos objetos es posible poner a prueba los modelos de evolución estelar, evolución química de las galaxias y evolución del Universo.

II. LA GRAN EXPLOSIÓN

Existen tres pilares en los que descansa la teoría de la gran explosión. El primero es la expansión del Univer-

so; el segundo, la radiación de fondo, y el tercero, la abundancia de los elementos ligeros.

1. *Expansión del Universo*

Desde los años treinta, Hubble descubrió que las líneas espectrales de la gran mayoría de las galaxias aparecen corridas hacia el rojo, y que el corrimiento es mayor entre más alejada de nosotros se encuentre la galaxia. Las observaciones que se han acumulado durante los últimos sesenta años indican que el corrimiento hacia el rojo se puede explicar por medio del efecto Doppler. Esta interpretación implica que la mayoría de las galaxias se está alejando de la nuestra y que las más distantes se alejan más rápidamente.

Se puede demostrar que nuestra galaxia no es el centro de la expansión y que desde otra galaxia observaríamos más o menos lo mismo. Una analogía en dos dimensiones sería la de un globo, con puntos en su superficie, que se esté inflando; cada punto representaría una galaxia y desde cualquier punto observaríamos alejarse a los demás; esto es, no habría un punto privilegiado.

Si las galaxias se alejan unas de otras, entonces se deduce que en el pasado estuvieron más cercanas entre sí, e incluso que hubo un momento en que todo el material del Universo observable se encontraba comprimido a grandes densidades y con muy altas temperaturas. En ese momento se produjo la gran explosión.

2. *Radiación de fondo*

Un segundo después de que empezó la expansión, la temperatura del Universo era del orden de diez mil millones de grados Kelvin y la densidad del orden de cien mil gramos por centímetro cúbico. El Universo estaría formado por fotones, neutrinos, positrones, electrones, protones y neutrones. Al expandirse, el Universo se enfría y la radiación electromagnética pro-



Nebulosa planetaria del Anillo en la constelación de Lira. Las nebulosas planetarias son envolturas gaseosas expulsadas por una estrella central que se encuentra en la etapa de transición entre gigante roja y enana blanca.

ducida por los fotones disminuye, ya que depende de la temperatura.

Cuando el Universo observable tenía una edad de trescientos mil años y una temperatura de tres mil grados Kelvin, aproximadamente, los electrones y los protones se combinaron por primera vez formando átomos de hidrógeno neutro. En ese tiempo el Universo se volvió transparente, lo que implica que la inmensa mayoría de los fotones empezó a viajar libremente sin interactuar con la materia. A la temperatura antes señalada el campo de radiación era similar al de una estrella de color rojo; el Universo se veía rojo en todas direcciones. Desde entonces el Universo se ha expandido por un factor de 1000 y, consecuentemente, la temperatura de la radiación ha disminuido por un factor de 1000, alcanzando un valor cercano a los tres grados Kelvin; la mayor parte de esta radiación se encuentra en la región de ondas de radio del espectro electromagnético. Esta radiación, que se conoce con el nombre de *radiación de fondo*, fue descubierta en 1965 por Penzias y Wilson y los llevó a obtener el premio Nobel en 1978. La radiación de fondo es la señal electromagnética más vieja que recibimos del Universo y se origina a distancias mayores que las de las galaxias y cuasares más lejanos.

3. Formación de los elementos ligeros

El tercer pilar en favor de la teoría de la gran explosión nos lleva de regreso a los primeros minutos de la expansión. Cuando la temperatura era del orden de diez mil millones de grados Kelvin las reacciones nucleares producían átomos de deuterio a partir de neutrones y protones pero también los destruían y por lo tanto no era posible formar elementos más pesados. Al disminuir la temperatura del Universo, el deuterio se volvió estable y fue posible, a partir de reacciones nucleares de deuterio

con protones, formar partículas de helio tres. Éste es un isótopo del helio con dos protones y un neutrón. Finalmente, de un átomo de helio tres y un átomo de deuterio es posible producir un átomo de helio cuatro, el cual está formado por dos neutrones y dos protones. La mayoría de los átomos de helio del Universo son de helio cuatro. Una vez que se formó el helio cuatro la temperatura y la densidad del Universo disminuyeron y ya no fue posible que se realizaran reacciones nucleares para formar elementos más pesados. A los cuatro minutos del inicio de la expansión la temperatura disminuyó a unos ochocientos millones de grados Kelvin y las reacciones nucleares se suspendieron. A partir de este momento la composición química se mantuvo constante, formada fundamentalmente por átomos de hidrógeno y helio y por pequeñas cantidades de deuterio y litio. La composición química no volverá a modificarse sino hasta que se constituyan las galaxias y las estrellas, lo cual sucederá alrededor de dos mil millones de años después.

La abundancia relativa de hidrógeno y de helio, producida durante los cuatro primeros minutos después de la gran explosión, dependió fundamentalmente de dos parámetros: del número de familias de neutrinos y de la densidad bariónica del Universo en ese momento. A mayor densidad del Universo las reacciones nucleares ocurren un poco antes, cuando la cantidad de neutrones por unidad de masa es mayor, y ya que la producción de helio depende de la cantidad de neutrones, a mayor densidad mayor producción de helio. Igualmente, a mayor número de familias de neutrinos mayor densidad y, consecuentemente, mayor producción de helio.

Las galaxias se forman con aproximadamente un 23% de helio y un 77% de hidrógeno por unidad de masa, y prácticamente sin elementos más pesados. En las galaxias se originan estrellas con masas desde un décimo de masa solar hasta aproximadamente cien masas solares. La evolución de cada estrella dependerá de su masa y de si se trata de una estrella aislada o si pertenece a un sistema binario; al evolucionar, las estrellas enriquecen con elementos pesados el medio interestelar.

III. SUPERNOVAS

Ocurren explosiones de supernova de tipo II cuando las estrellas con masas ocho veces mayores que la del Sol desarrollan un núcleo de hierro y alcanzan temperaturas superiores a cinco mil millones de grados Kelvin en el núcleo. Bajo estas condiciones, el hierro 56 se puede fotodesintegrar produciendo 13 partículas de helio y cuatro neutrones. A diferencia de las reacciones nucleares de los elementos más ligeros que el hierro que son exoenergéticas, las de este elemento son endoenergéticas y en lugar de aumentar la energía in-

terna de la estrella la reducen produciéndose un colapso violento de la parte central. El colapso gravitacional ocurre en muy poco tiempo y libera una gran cantidad de energía que, a su vez, genera una onda de choque que se propaga hacia el exterior produciendo reacciones nucleares y elementos pesados en las capas externas. Los elementos pesados así producidos son expulsados al medio interestelar. En el centro de la estrella los núcleos atómicos se desintegran y las partículas de éstos se convierten en neutrones que forman lo que se denomina una estrella de neutrones. La densidad de las estrellas de neutrones es de 1000 millones de toneladas por centímetro cúbico.

Es posible que muchas supernovas de tipo II produzcan agujeros negros que atrapen a los elementos pesados producidos en las reacciones nucleares. No se sabe cuál es la fracción de estrellas masivas que termina su vida como estrellas de neutrones ni la fracción que termina como agujeros negros. La mayor parte de los elementos pesados como el oxígeno, neón, magnesio, sodio y aluminio se produce en supernovas de tipo II.

Una supernova de tipo Ia se genera en una estrella enana blanca que forma parte de un sistema binario y que tiene una masa inferior a 1.4 masas solares, el límite de Chandrasekhar. Cuando esta enana blanca captura masa de su compañera y se acerca al límite de Chandrasekhar se genera una inestabilidad termonuclear en su interior, responsable de la explosión de la supernova. Las supernovas de tipo Ia producen la mayor parte de elementos como el hierro, el manganeso y el cromo. La densidad de las enanas blancas es mucho menor que la de las estrellas de neutrones ya que sólo alcanza el valor de una tonelada por centímetro cúbico.

IV. NEBULOSAS PLANETARIAS

Las nebulosas planetarias son nubes de gas lanzadas al medio interestelar por estrellas que tuvieron masas de entre una y ocho masas solares cuando se formaron y que se encuentran en transición entre la etapa de gigantes rojas y la etapa de enanas blancas. De acuerdo con Chandrasekhar, las enanas blancas deben de tener menos de 1.4 masas solares; la gran mayoría de ellas tiene entre 0.5 y 0.7 masas solares. La diferencia entre la masa que tienen las estrellas al formarse y la masa que presentan al llegar a la etapa de enanas blancas se debe a que pierden parte de esta masa en forma de vientos estelares y de envoltentes de gas, envoltentes que reciben el nombre de nebulosas planetarias. Éstas enriquecen el medio interestelar con carbono, nitrógeno y helio.

El Universo, durante los primeros cuatro minutos después de la gran explosión, y las estrellas son los al-

quimistas que han transformado los elementos ligeros en elementos pesados. En nuestros árboles genealógicos debemos incluir nebulosas planetarias y supernovas ya que han sido las responsables de la producción de los elementos pesados que forman nuestros organismos.

V. REGIONES H II

Las regiones H II son conglomerados de gas y polvo donde se están formando estrellas; las estrellas masivas recién constituidas tienen temperaturas suficientemente altas como para ionizar átomos de hidrógeno. Se les llama regiones H II porque casi todo el gas está formado por hidrógeno ionizado. La composición química de estas regiones es el resultado de la acumulación de elementos pesados debida a todos los procesos que a lo largo del tiempo han enriquecido el medio interestelar.

Las regiones H II son muy luminosas y es posible estudiarlas en detalle, ya sea que se encuentren en nuestra galaxia o en galaxias a centenas de millones de años luz de distancia. A partir del estudio de su espectro electromagnético es posible determinar sus condiciones físicas y, en particular, su composición química. Por otro lado, la determinación de la composición química de estrellas aisladas solamente se puede realizar en el caso de objetos de nuestra galaxia y de las galaxias más cercanas; a esto se debe que la mayoría de los resultados sobre la evolución química de las galaxias se haya obtenido a partir del estudio de las regiones H II.

VI. COMPARACIÓN DE LAS OBSERVACIONES CON LOS MODELOS

Para determinar la composición química de las regiones H II, las nebulosas planetarias y los remanentes de supernova es necesario medir con gran precisión el cociente



Nebulosa de la Laguna en la constelación de Sagitario. Se trata de una región de formación estelar. En el medio interestelar el hidrógeno se encuentra ionizado y por lo tanto a este tipo de objetos se les llama regiones H II.

de intensidades de líneas de emisión producidas por distintos elementos; además, es necesario conocer los parámetros atómicos que nos indican cuál es la probabilidad de que un átomo emita un fotón que corresponda a la línea de emisión medida. La probabilidad de emisión de un fotón también depende de la temperatura y densidad electrónicas del gas que produce la emisión; la temperatura y la densidad se obtienen a partir de mediciones muy precisas de cocientes de líneas de emisión del mismo elemento. Una vez que se determinan las composiciones químicas por medios observacionales es posible compararlas con modelos teóricos. A continuación mencionaré algunos resultados que hemos obtenido a partir de dichas comparaciones.

1. Evolución estelar

Los modelos referentes a estrellas con masas de entre una y ocho masas solares predicen cuál debe ser la composición química durante toda la evolución de estos cuerpos celestes y cómo se va modificando debido a las reacciones nucleares que ocurren en su interior. En particular, predicen cuál debe ser la composición química de las capas exteriores que son expulsadas al medio interestelar como nebulosas planetarias. Esta predicción de los modelos puede compararse con la composición química de las nebulosas planetarias determinada a partir de observaciones. Hemos encontrado tres inconsistencias: los cocientes observados de carbono a hidrógeno, de helio a hidrógeno y de nitrógeno a oxígeno son mayores que los predichos por la teoría de la evolución estelar. Estos resultados indican que los modelos tienen que mejorarse tomando en cuenta distintos valores para la tasa de pérdida de masa por vientos estelares y para el cociente de longitud de mezcla convectiva sobre la escala de presión; estos dos parámetros pueden depender de la edad y de la cantidad de elementos pesados de la estrella. En los modelos se ha supuesto que estos parámetros no varían con el tiempo y no se ha he-



Galaxia M74 en Piscis.

cho una exploración exhaustiva de su posible variación respecto a la composición química inicial.

En 1971 Sidney van den Bergh y yo estudiamos el remanente de supernova llamado Casiopea A y encontramos que sí está enriqueciendo el medio interestelar con elementos pesados de acuerdo con la teoría para supernovas de tipo II. Los remanentes de supernova muy viejos, con edades de miles de años, han barrido el medio interestelar y los elementos pesados producidos por la supernova se han mezclado con gas que no ha sido contaminado; al diluirse los elementos pesados no es posible verificar las predicciones de los modelos. Casiopea A tiene una edad del orden de trescientos años y el gas expulsado por la supernova todavía no ha sido diluido por el gas del medio interestelar.

A partir de observaciones de regiones H II hemos encontrado que el efecto integrado del enriquecimiento del medio interestelar debido a nebulosas planetarias y a supernovas es tal, que por cada gramo de elementos pesados se producen tres gramos de helio. La teoría predice que debe formarse un gramo de helio por cada gramo de elementos pesados, una discrepancia de un factor de tres con las observaciones. Hay cuando menos dos posibles soluciones a esta discrepancia: o los modelos de evolución estelar todavía necesitan mejorarse, o aproximadamente dos terceras partes de las estrellas con masas mayores a ocho masas solares generan agujeros negros que atrapan a los elementos pesados en su interior y les impiden enriquecer el medio interestelar. Para explicar esta contradicción Maeder y Mallik han sugerido que todas las estrellas con masas superiores a veinticinco masas solares producen un agujero negro que atrapa a los elementos pesados. Todavía no se han elaborado modelos de evolución estelar que demuestren cuantitativamente esta sugerencia.

2. Evolución de galaxias

Lequeux, Fierro, Serrano, Torres y yo encontramos en 1979 una correlación entre la masa de las galaxias y la fracción de elementos pesados en las regiones H II. Este resultado es una restricción a la evolución química de las galaxias y tiene tres posibles explicaciones: a) la eficiencia con la cual una generación de estrellas produce elementos pesados es mayor al aumentar la abundancia de elementos pesados con la que se forman las estrellas, b) la tasa de captura de material intergaláctico dividida entre la tasa de formación de estrellas disminuye al aumentar la masa de la galaxia, y c) la tasa de pérdida de masa hacia el medio intergaláctico entre la tasa de formación de estrellas disminuye al aumentar la masa de la galaxia. Estas tres posibilidades se encuentran todavía en estudio para decidir cuál de ellas es la principal.

Un grupo de investigadores formado, entre otros, por Dufour, Torres y yo, basado en observaciones obtenidas con el satélite ultravioleta internacional y con el telescopio espacial Hubble, ha encontrado que el cociente de carbono a oxígeno aumenta con el cociente de oxígeno a hidrógeno. Hay dos posibles explicaciones para este resultado: a) cada generación de estrellas enriquece el medio interestelar primero en oxígeno y después en carbono, o b) las generaciones de estrellas que se forman con un mayor cociente de oxígeno a hidrógeno son más eficientes para producir carbono.

3. Cosmología

Al determinar la abundancia de helio en galaxias con distinto contenido de elementos pesados Silvia Torres y yo, en 1974 y 1976, encontramos que a mayor cantidad de elementos pesados mayor cantidad de helio. Al extrapolar estos resultados al caso de objetos sin elementos pesados hallamos que cuando las galaxias se formaron tenían un 23% de su masa en forma de helio y un 77% de su masa en forma de hidrógeno. Al valor del 23% de helio se le denomina *helio pregaláctico* o helio primordial. Este resultado es el mismo para galaxias que se encuentran separadas entre sí por cientos de millones de años luz, lo cual quiere decir que se requiere un proceso muy general que sea responsable de la producción del helio pregaláctico. Esta observación cumple con las predicciones del modelo de la gran explosión y por lo tanto lo sustenta.

Al comparar el valor observado del helio pregaláctico con los cálculos teóricos de la producción de helio durante los primeros cuatro minutos después de la gran explosión, realizados por Steigman, Schramm y Gunn en 1977, se encuentra que existen únicamente tres familias de neutrinos ya que si existiesen más familias se produciría más helio; aproximadamente un 1% más de helio por familia de neutrinos. Esta predicción del número de familias de neutrinos hecha por la cosmología fue comprobada en 1990 cuando gracias a los aceleradores de Stanford y del centro Europeo de Investigación Nuclear (CERN) se encontró que la tasa de decaimiento de la partícula Z implica que nada más hay tres familias de neutrinos ligeros. Este resultado establece una conexión muy importante entre la cosmología y la física de las partículas elementales.

Para determinar en qué tipo de Universo vivimos y predecir su futuro, es necesario conocer la densidad del Universo en un volumen lo suficientemente grande para que sea representativa.

Se puede definir una densidad crítica que corresponde a un Universo plano o euclidiano. Si la densidad del Universo fuese igual a la crítica, la velocidad de expansión de éste tendería a cero cuando su edad tendiese



Galaxia peculiar en la constelación de Centauro.

a infinito, esto es, la masa del Universo produciría el campo gravitacional necesario para frenar la expansión en un tiempo infinito.

Si la densidad fuese mayor que la densidad crítica, el campo gravitacional sería capaz de frenar la expansión y en el futuro el Universo se hallaría en contracción. Viviríamos en lo que se denomina un Universo cerrado.

Si la densidad del Universo es menor que la crítica, el campo gravitacional no sería suficiente para detener la expansión y viviríamos en un Universo abierto que estaría siempre en expansión.

Comparando los valores del helio, el deuterio y el litio pregalácticos con los cálculos teóricos de los primeros cuatro minutos posteriores a la gran explosión se encuentra que la masa bariónica (esto es, la constituida por la suma de las masas de todos los átomos presentes) del Universo es nada más del 5 al 10% de la masa crítica del Universo. Este resultado implica que si el Universo está formado únicamente por bariones, entonces es abierto, estará siempre en expansión.

Se está tratando de determinar la densidad del Universo por métodos directos. La materia luminosa cuando mucho es responsable del 2 o 3% de la masa crítica, sin embargo hay estimaciones que indican que la masa en materia oscura es cuando menos diez veces mayor que la masa en materia luminosa; no se sabe de qué está hecha la materia oscura ni cuánta hay. Los cosmólogos teóricos basados en la teoría del Universo inflacionario favorecen la idea de que vivimos en un Universo euclidiano. Si esto se demuestra habría dos posibilidades: a) la abundancia del helio pregaláctico implicaría que del 90 al 95% de la masa del Universo no es bariónica, por lo tanto la mayor parte de su masa debería estar formada por neutrinos, axiones u otro tipo de partícula elemental, o b) hay que modificar el modelo estándar de la gran explosión.

Seguramente dentro de algunos años tendremos observaciones más precisas y teorías más elaboradas, lo que nos llevará a una visión distinta y más completa del Universo y ciertamente a nuevas preguntas. ■