

Introducción

En el marco de la búsqueda de los componentes fundamentales de la materia, los elementos químicos siempre han jugado un papel importante. El concepto de qué es un elemento, sin embargo, no ha sido el mismo a lo largo de nuestra historia. En las civilizaciones antiguas ya se había postulado la existencia de un número limitado de elementos básicos que formaban todo lo que nos rodea, y los filósofos griegos llegaron incluso a concebir la idea del átomo como la base indivisible de la materia. Pero solo mucho más tarde, con la adopción del método científico junto con la mejora de las técnicas de laboratorio, se produjeron los avances necesarios para desarrollar la idea moderna de elemento químico. En el inicio del siglo XIX, la teoría de Dalton asoció cada elemento a un tipo diferente de átomo, de tal manera que las reacciones químicas entre distintos compuestos pueden entenderse como intercambios de átomos que producían nuevas sustancias en el estado final. Así, cada elemento se identificaba por tener átomos iguales, que son los bloques fundamentales que forman las moléculas y, en general, todos los compuestos químicos.

Hasta una época relativamente reciente, a principios del siglo XX, los elementos seguían siendo aquellas sustancias puras que no podían descomponerse en otras más sencillas a través una reacción química. Al estudiar sus propiedades con

precisión creciente, la comunidad científica observó que ciertos grupos de elementos presentaban comportamientos parecidos. Estos estudios condujeron a la creación de las primeras versiones de la tabla periódica, donde el orden de los elementos se fijó en función de su peso atómico. La actual tabla periódica de los elementos, ahora ordenados de acuerdo al llamado número atómico, continúa siendo una herramienta fundamental de la química y, además, es un icono de la ciencia conocida por prácticamente cualquier persona.

La indivisibilidad de los átomos fue puesta en cuestión debido a ciertas medidas llevadas a cabo en los últimos años del siglo XIX y la primera década del XX. Se demostró que los átomos tenían una estructura interna casi totalmente vacía excepto en un volumen muy pequeño ocupado por su denso núcleo. Este acumula la masa del átomo, mientras que una nube de electrones forma el resto. De manera inesperada, resultó que los elementos ya no eran tan *elementales*, ya que sus átomos se componían de partículas más fundamentales. Por un lado estaban los electrones, que siguen siendo verdaderas partículas elementales, mientras que el núcleo atómico está constituido por protones y neutrones, que ahora sabemos que son partículas compuestas. Los electrones son trascendentales a la hora de explicar las propiedades químicas de un elemento como, por ejemplo, su comportamiento al reaccionar con otros para formar compuestos. Pero son las partículas del núcleo atómico las que identifican a un elemento: todos sus átomos poseen el mismo número de protones.

En cualquier reacción química se preserva el número de átomos de cada elemento que interviene. Incluso en los procesos más complejos cambia el modo en que esos átomos se combinan, pero no se crean nuevos. Tomemos, por ejemplo, la combinación de hidrógeno con oxígeno para formar agua, cuya molécula (H_2O) tiene un átomo de oxígeno (O) entre dos de hidrógeno (H). La reacción química que permite obtener los dos tipos de gas a partir del agua es la electrólisis ($2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{H}_2 + \text{O}_2$), donde vemos que el número de átomos de oxígeno o hidrógeno es idéntico en los estados inicial y final.

La generación de los elementos, imposible mediante reacciones químicas, es una cuestión científica fundamental. Es necesario, además, dar respuesta a por qué los elementos se encuentran en cantidades tan diferentes en la naturaleza. Por ejemplo, en la corteza terrestre abundan el oxígeno y el silicio, pero hay muy poco platino y el francio es extremadamente escaso. En cambio, en el universo en su conjunto son preponderantes los dos elementos más ligeros (hidrógeno y helio), mientras que el resto únicamente da cuenta de un 2% de la materia.

Los primeros indicios sobre el tipo de fenómeno que podía originar nuevos elementos se hallaron justo antes de comenzar el siglo pasado. Se demostró que algunos elementos pesados, como el uranio, podían sufrir un proceso físico que ocasionaba la emisión de radiación electromagnética o nuevas partículas. Tras estudiar en detalle este proceso, llamado radiactividad, se concluyó que la parte del átomo que sufría un cambio era el núcleo. A veces, la emisión de radiación se acompaña de la creación de un núcleo hijo con un número distinto de protones. Por tanto, la respuesta a cómo se transforma un elemento químico en otro se encuentra en las reacciones donde intervienen los núcleos atómicos.

El objetivo de este libro no es otro que mostrar cuándo y en qué situaciones pueden ocurrir los procesos físicos responsables de originar los distintos elementos. Este conjunto de procesos, llamados de nucleosíntesis, dan lugar a las abundancias observadas de los elementos, y no pueden suceder en cualquier parte. Lo habitual es que los nuevos núcleos surjan de la fusión (unión) de núcleos más ligeros, que deben situarse lo bastante cerca para vencer la fuerza de repulsión electromagnética entre sus protones. Las condiciones necesarias, que incluyen valores altísimos de la temperatura, no son frecuentes en la naturaleza. De hecho, en general solo se dan en el interior de las estrellas.

La clave para entender los procesos de nucleosíntesis reside en las propiedades de los núcleos. Algunas combinaciones de neutrones y protones son estables, pero otros muchos

núcleos se desintegran tras periodos que pueden ser tan largos como miles de millones de años o tan breves como diminutas fracciones de segundo. Por otra parte, la famosa ecuación de Einstein que relaciona masa y energía es fundamental para comprender los procesos nucleares, donde la ley de conservación de la energía debe incluir la contribución de las masas. De hecho, en las reacciones nucleares, que se escriben de manera muy similar a las químicas, la conservación de la masa debe tener en cuenta las transformaciones de masa en energía y viceversa.

La primera teoría establecía el origen de los elementos químicos en las primeras fases de la evolución del universo, cuando solo tenía algunos minutos de edad. Actualmente sabemos que no es el caso para todos los elementos, pero sí conocemos que existió una etapa llamada nucleosíntesis primordial que creó la mayor parte de los elementos más ligeros, como el hidrógeno y el helio. De acuerdo con la teoría del Big Bang, la expansión del universo provocó su enfriamiento, de tal manera que la temperatura no era lo suficientemente grande para continuar los procesos de fusión nuclear. La generación de núcleos de elementos más pesados no fue posible, más allá de pequeñas trazas de litio. Las actuales observaciones de las abundancias primordiales de los elementos más ligeros concuerdan bien con las predicciones y son uno de los pilares que afirman el modelo cosmológico.

La época de la nucleosíntesis primordial fue muy anterior a la formación de las primeras estrellas, que no surgieron hasta unos cientos de millones de años más tarde. Además de los elementos ligeros primordiales, con muy pocas excepciones, el resto de elementos del cosmos se producen en el interior de las estrellas. La vida de una estrella recorre una serie de fases donde las reacciones de fusión nuclear, partiendo primero del hidrógeno, suceden en su región central y crean núcleos de helio y de otros elementos. La energía resultante de los procesos de fusión es el origen de la presión necesaria para mantener la estabilidad de la estrella frente a la de la gravedad que produce su enorme masa.

En la actualidad, la disciplina científica conocida como astrofísica nuclear estudia los modelos de síntesis estelar. El tipo y la cantidad de núcleos que una estrella puede crear dependen de factores como su tamaño y su edad. Por ejemplo, una estrella de tamaño medio, como el Sol, quemará hidrógeno para producir helio durante varios miles de millones de años. Sufrirá después una fase de gigante roja, y en sus últimos 100 millones de años de vida transformará parte de su helio en núcleos algo más pesados como el carbono, para terminar su existencia convertida en una enana blanca. En cambio, estrellas más grandes que la nuestra pueden llegar a crear muchos más elementos hasta llegar al entorno del hierro, a partir del cual la formación de núcleos aún más pesados ya no produce energía, sino que necesitaría un aporte externo.

El origen de los elementos por encima del hierro está en los procesos de absorción de neutrones libres, presentes en ciertas fases de la evolución de algunas estrellas. Esta reacción puede crear núcleos tan pesados como el del plomo, aunque la producción de los elementos que le siguen en la tabla periódica parece ser exclusiva de situaciones astrofísicas tan singulares como las explosiones de supernova o la fusión de estrellas de neutrones.

Las estrellas no son solo la principal fuente de producción de los elementos, sino que también se encargan de dispersarlos por el medio interestelar. Los vientos de gas que escapan de las estrellas se llevan parte de la materia originada en su interior, en general de un modo continuo y tranquilo, pero a veces de manera violenta cuando se trata de una supernova. El material interestelar se nutre de estos nuevos elementos y sus regiones más densas pueden condensarse hasta crear las estrellas de la siguiente generación, como en el caso de nuestro Sol y su sistema de planetas. La Tierra y la misma existencia de la vida son consecuencia directa de la sucesión de nacimientos y muertes de estrellas.

Hoy en día la tabla periódica comprende 118 elementos, pero de ellos solo alrededor de 90 pueden hallarse en la naturaleza. Los que faltan, en general los más pesados, son

inestables y sufren procesos de desintegración tras periodos que suelen ser más breves al aumentar la masa del núcleo correspondiente. El estudio de las propiedades de estos elementos ha sido posible mediante nuevos métodos de producción a partir de ciertas reacciones nucleares. La competición por lograr sintetizar los núcleos de los elementos más allá del uranio comenzó en la década de 1940. Desde entonces, laboratorios de varios países han tomado parte en la carrera por conseguir crear nuevos elementos, cada vez más pesados. Esta interesante historia de colaboración y rivalidad ha tenido episodios polémicos, como cuando distintos equipos se disputaron el descubrimiento de un cierto elemento y, en consecuencia, la prioridad a la hora de elegir su nombre. La última parte de este libro está dedicada a repasar los principales hitos de la producción de estos núcleos superpesados.