

Cómo convertir el mercurio en oro: transmutación de elementos



Los alquimistas de la Edad Media buscaban, con métodos precientíficos, transformar el plomo en oro. Hoy, gracias a la física podemos entender cómo se transmutan los elementos a nivel del núcleo atómico.

Fabiola Monroy Guzmán

Según los alquimistas de la Edad Media, agregando y combinando mercurio y azufre en cantidades adecuadas, con un metal base como el plomo, éste se transmutaría en oro o plata. ¿Es esta idea una simple fantasía? Quizá no. ¿Podemos entonces transmutar un elemento en otro? Sorprendentemente, la respuesta a esta interrogante es afirmativa. ¡Sí es posible generar un elemento a partir de otro distinto! De hecho, la naturaleza lo hace continuamente: recordemos que el uranio, elemento inestable (radiactivo), se transforma espontáneamente en otro elemento, el torio. El Sol y las estrellas también producen continuamente transmutaciones al unirse átomos ligeros, como el hidrógeno, para dar origen a elementos más pesados. Es precisamente esta transmutación lo que se conoce como radiactividad, y va acompañada en general por la emisión de rayos gamma o partículas beta o alfa.

Recordemos que un átomo es una especie de sistema solar en miniatura, donde los “planetas”, los electrones, con carga negativa, giran alrededor del “sol”, el núcleo (figura 1), el cual está integrado a su vez por dos tipos de partículas: los neutro-

nes (sin carga) y los protones (con carga positiva). Cada elemento químico se caracteriza justamente por el número de protones que contienen sus átomos. Por ejemplo, un átomo de helio contiene dos protones, uno de litio contiene tres protones, uno de carbón, seis protones, uno de oro, 47, y uno de uranio, 92. En contraparte, el número de neutrones contenidos en el núcleo de un elemento, no es siempre el mismo. Por ejemplo, un átomo de oxígeno natural, posee ocho protones y puede presentar átomos con ocho, nueve o diez neutrones en el núcleo. Estos átomos hermanos, conocidos como *isótopos*, tienen las mismas propiedades químicas.

Así pues, la transmutación de un elemento exige que haya un cambio dentro de su núcleo, y en particular en el número de protones. Es suficiente, por tanto, quitarle un protón al átomo de mercurio (80 protones) o agregar-

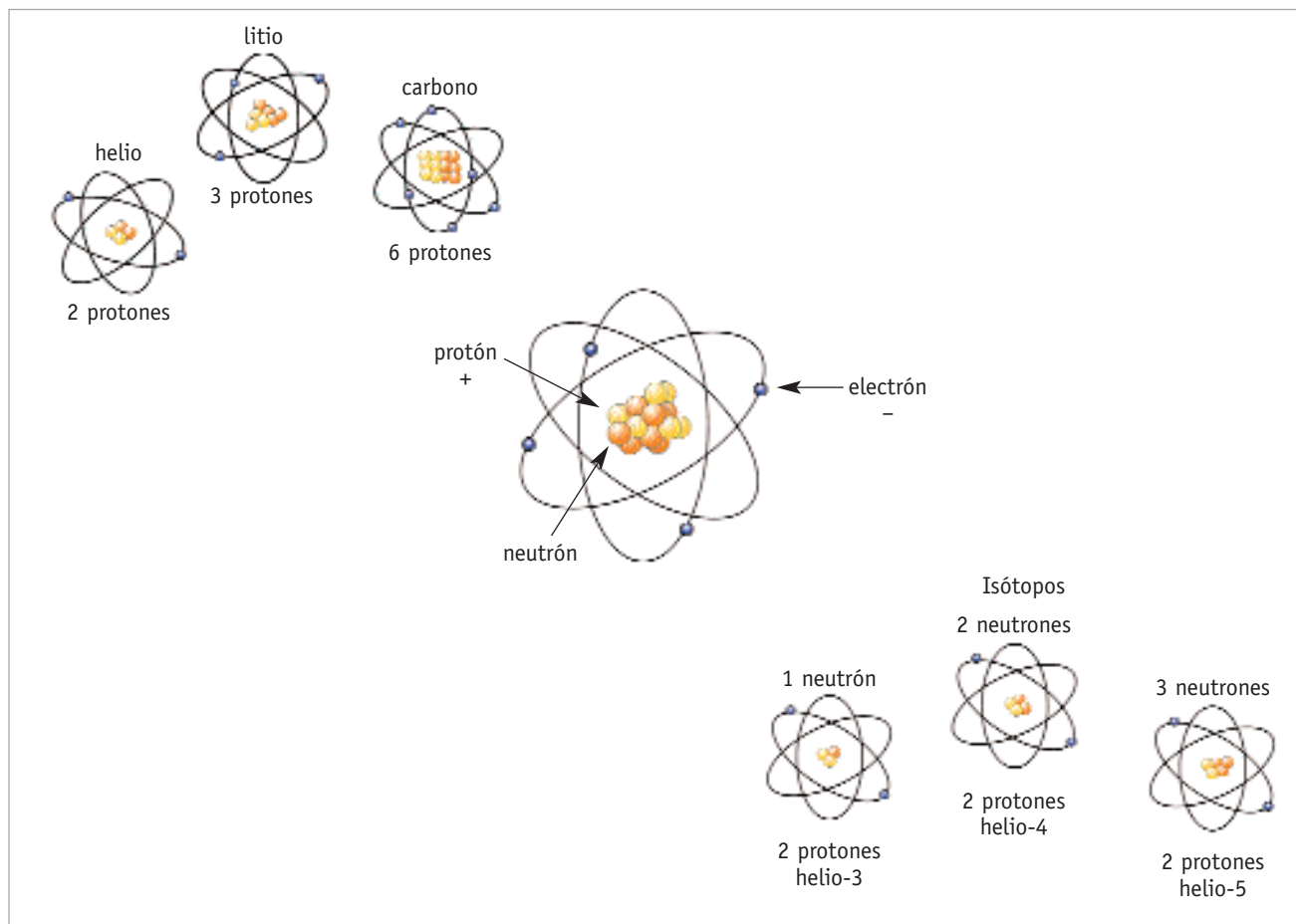


Figura 1. Estructura del átomo.

Acelerar una partícula es aumentar su velocidad por algún mecanismo que le imparta energía, como por ejemplo un acelerador de partículas o un reactor nuclear

le un protón a un átomo de platino (79 protones) para formar un átomo de oro (79 protones). Ahora bien, ¿cómo logramos incorporar o arrebatar protones dentro del núcleo de un átomo? Imaginemos que el núcleo es un vagón del metro completamente lleno, que al abrir sus puertas sólo aceptará más pasajeros (protones o neutrones), si éstos tienen la fuerza suficiente para empujar a sus ocupantes. Inversamente, un ocupante del vagón (protón o neutrón) podrá salir si tiene la fuerza necesaria para abrirse paso entre el resto de los pasajeros (protones y neutrones). En ambos casos se requiere que los pasajeros, es decir los neutrones o protones, posean la energía suficiente para vencer las fuerzas nucleares (pasajeros del vagón) que impiden su paso o salida del núcleo del átomo (vagón) que se desea transmutar.

Un átomo puede ser transmutado haciendo chocar sobre él partículas o átomos a gran velocidad. Acelerar una partícula es aumentar su velocidad por algún mecanismo que le imparta energía, como por ejemplo un acelerador de partículas o un reactor nuclear.

ACELERADORES DE PARTÍCULAS

Básicamente, un acelerador toma una partícula, la acelera empleando campos eléctricos y magnéticos, y la estrella contra el elemento que se desea transmutar (ver figura 2). Los aceleradores funcionan, en principio, de manera semejante a un televisor. En éste, un filamento a alta temperatura, como el de un foco, libera electrones, que son acelerados hacia un electrodo positivo. Finalmente, los imanes guían estos electrones para concentrarlos en un haz y llevarlos a la pantalla. Análogamente, un acelerador cuenta con un generador de iones (electrones en el caso del televisor), producidos a partir de la emisión de ondas de radio sobre átomos en forma gaseosa. Llamamos iones a los átomos que han perdido o ganado uno o varios electrones. Los iones son por lo tanto, átomos cargados positiva o negativamente. Estos iones son entonces conducidos y por tanto acelerados hacia un electrodo de signo contrario a la carga del ión, como consecuencia de las fuerzas de atracción y repulsión originadas por el campo eléctrico aplicado dentro del acelerador. La focalización o concentración de los iones hacia el material a transmutar se hace también mediante campos magnéticos; es decir, imanes. Finalmente, a la salida del acelerador, los iones chocan sobre el material blanco, produciendo la transmutación de sus elementos constitutivos. Este proceso se conoce comúnmente como reacción nuclear, y da lugar precisamente a la producción de radioisótopos artificiales, es decir, que no existen en

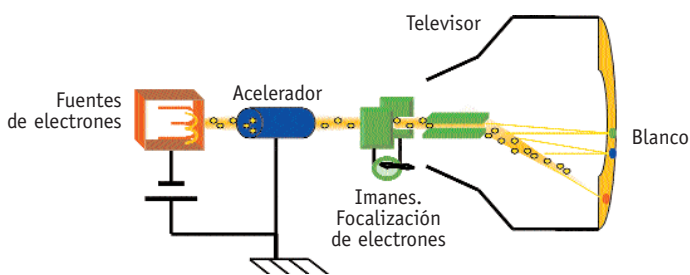


Figura 2. Comparación entre una televisión y un acelerador de partículas.

Los reactores nucleares generan neutrones que al chocar con un material, producen la transmutación de los elementos presentes en éste

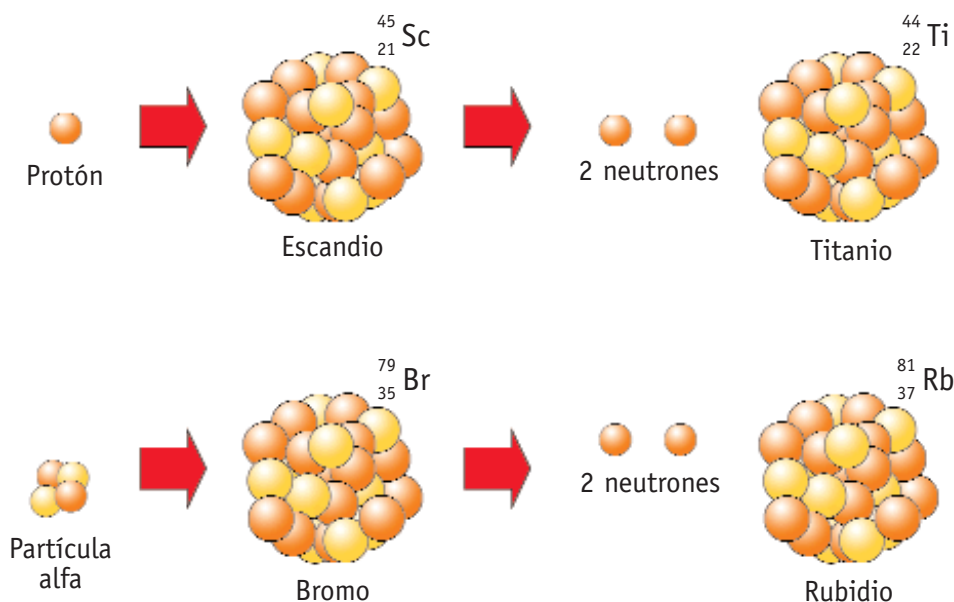
la naturaleza y son creados por el hombre. En particular, cuando se unen dos átomos diferentes para transformarse en un elemento más pesado, se hace referencia a una reacción de *fusión*.

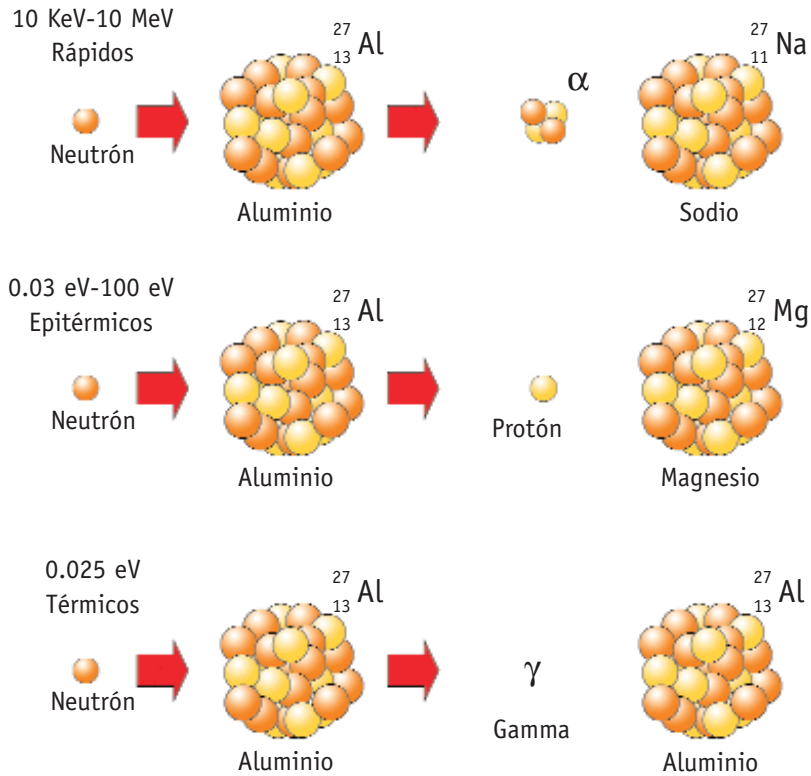
Obviamente, la posibilidad de que una reacción nuclear se produzca con ayuda de un acelerador de partículas depende fundamentalmente de la energía que se aplique a las partículas “proyectil” y del tipo de material que se desea transmutar. Es posible, por tanto, producir un mismo radioisótopo mediante el bombardeo de blancos diferentes, como lo muestra la figura 3. Los proyectiles más usuales son los protones, los deuterones (1 protón + 2 neutrones) y las partículas alfa (2 protones + 2 neutrones) o átomos de helio ionizados. Sin embargo, también son utilizados átomos de oxígeno, flúor, carbono, etcétera; podríamos llamarlos proyectiles “pesados”, que requieren de aceleradores más potentes que los utilizados para los protones, deuterones o partículas alfa.

REACTORES NUCLEARES

Los reactores nucleares generan neutrones que al chocar con un material, producen la transmutación de los elementos presentes en éste. La reacción nuclear producida por un reactor nuclear tiene como proyectil a los neutrones, cuya energía, como en el caso de las partículas aceleradas en los aceleradores de partículas, determinará el tipo de reacción nuclear producida. Esquemáticamente consideraremos el efecto que produce la in-

Figura 3. Comparación entre una televisión y un acelerador de partículas.





teracción de un neutrón sobre un átomo de aluminio, el cual contiene en su núcleo 13 protones y 14 neutrones ($13+14=27$). Se trata pues del aluminio-27, que químicamente se representa simplemente como ^{27}Al , único isótopo natural del aluminio (figura 4). Cuando un neutrón muy energético (rápido) interactúa con el átomo de aluminio, produce un átomo de sodio-24 (^{24}Na) y la emisión de una partícula alfa. Si este mismo átomo es irradiado con neutrones menos energéticos, tendremos la formación de un átomo de magnesio-27 (^{27}Mg) más la emisión de un protón, pero si es irradiado con neutrones *térmicos* (llamados así porque su energía promedio es semejante a la energía térmica de los átomos del medio que los rodea), tendremos entonces la formación de un átomo de aluminio-28 (^{28}Al) y la emisión de un rayo gamma. Todos los isótopos formados después de irradiar el aluminio con neutrones de diversas energías (^{24}Na , ^{27}Mg y ^{28}Al) son inestables, es decir, radiactivos, y se transmutarán a su vez en nuevos elementos que pueden ser radiactivos o estables. Por ejemplo, el aluminio-28 es inestable debido a su exceso de neutrones; es pues un átomo radiactivo, y por tanto tenderá a transformarse a fin de estabilizarse. Esta transmutación estará acompañada por la emisión de dos diferentes tipos de radiación: la emisión de partículas beta negativas y la

Figura 4. Reacciones nucleares producidas en un reactor nuclear.

Quando un neutrón muy energético (rápido) interactúa con el átomo de aluminio, produce un átomo de sodio-24 (^{24}Na) y la emisión de una partícula alfa

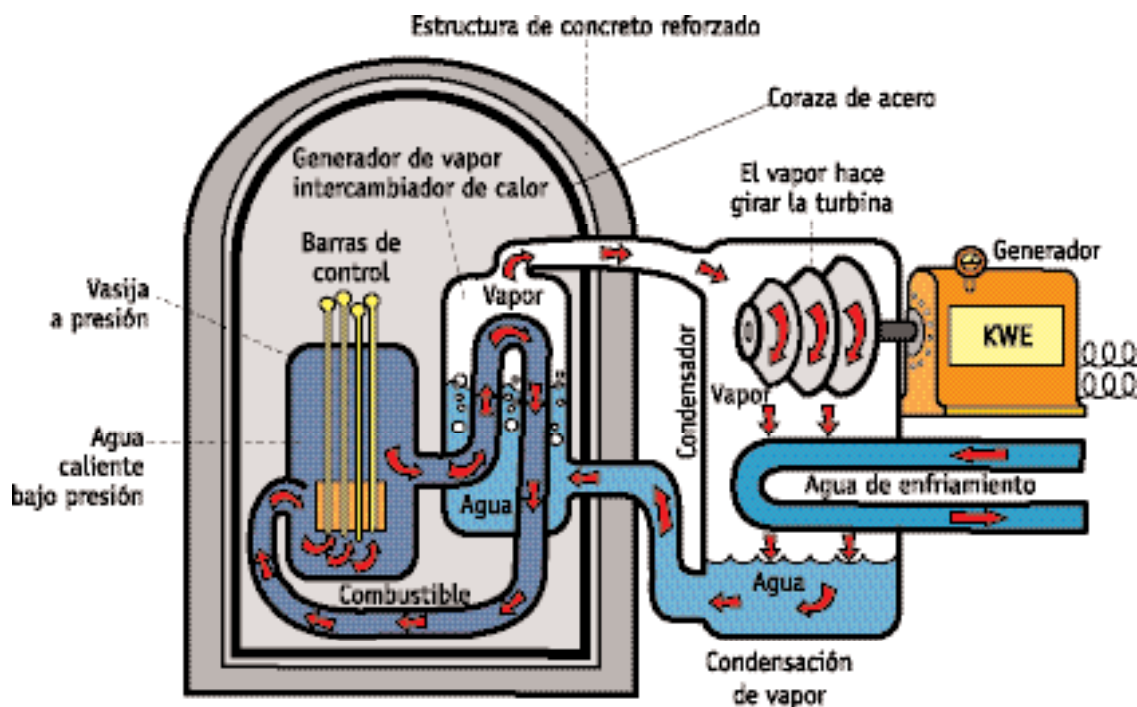
La fisión se produce excepcionalmente de manera espontánea; sin embargo, en general es provocada por el choque de un neutrón hacia un núcleo fisible

emisión de rayos gamma. Las partículas beta son generadas por la transformación (desintegración) de un neutrón en un protón y un electrón. La partícula beta es entonces arrojada del átomo, causando el aumento de un protón dentro de su núcleo y transformando al átomo inicial, en este caso aluminio-28, en un nuevo elemento, el silicio 28 (^{28}Si), que posee 14 protones y es uno de los tres isótopos naturales del silicio.

FUNCIONAMIENTO DE UN REACTOR NUCLEAR

Un reactor nuclear está formado por un elemento combustible, contenido en una vasija e inmerso, por lo general, en agua (figura 5). El elemento combustible constituye el corazón del reactor nuclear, y está conformado por elementos que poseen la capacidad de *fisionarse*, es decir, de romperse en varios fragmentos, liberando una gran cantidad de energía. Los elementos fisibles poseen un gran número de protones y neutrones en su núcleo, lo que los hace altamente inestables, causando su rompimiento en núcleos más estables, conocidos como productos de fisión. La fisión se produce excepcionalmente de manera espontánea; sin embargo, en general es provocada por el choque de un neutrón hacia un núcleo fisible. A este choque se le conoce como reacción de fisión, y podemos considerarla como una reacción nuclear o de trans-

Figura 5. Funcionamiento de un reactor nuclear.



mutación, puesto que hay un cambio en el núcleo del elemento fisible.

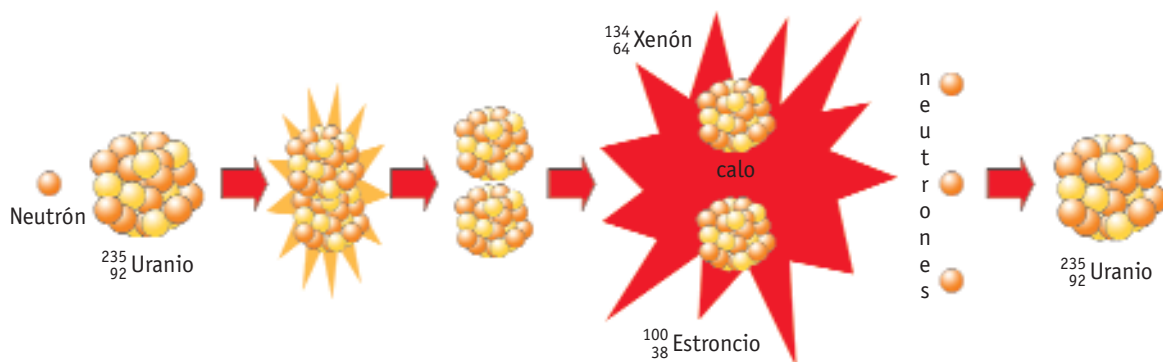
El elemento combustible más utilizado es el uranio, dado que uno de sus isótopos naturales, el uranio-235, es el único elemento fisionable existente en la naturaleza. La figura 6 muestra la fisión de un átomo de uranio-235, que genera una gran cantidad de energía, dos nuevos elementos y la emisión de dos neutrones. Estos neutrones generan a su vez nuevas fisiones, produciendo una *reacción en cadena*, es decir, originando continuamente más neutrones, calor y productos de fisión. Si esta reacción no es controlada, estaremos formando una bomba atómica.

En los reactores nucleares, la reacción en cadena es estabilizada para obtener un ritmo de fisión constante, utilizando para tal efecto un material “devorador” de neutrones, que permite reducir su número durante la fisión. En la práctica, los materiales “devoradores” de neutrones, son colocados en dispositivos conocidos como barras de control, que pueden ser incrustadas o extraídas del corazón del reactor, es decir, del combustible nuclear. Por otra parte, a fin de favorecer la reacción de fisión, se disminuye la velocidad de los neutrones mediante su frenado por colisiones con otros átomos o moléculas (moderadores), que circundan a los núcleos fisibles, como por ejemplo agua, grafito o algunos líquidos orgánicos. El moderador más utilizado es el agua. El efecto producido entre los neutrones y los moderadores es parecido al generado entre las bolas de marfil de un juego de billar. En ese caso, la bola que recibe el golpe del taco choca con una o varias bolas en reposo, lo que causa que la velocidad de la bola impactada por el taco disminuya.

Así pues, en un reactor nuclear el combustible nuclear se encuentra inmerso en agua, la cual posee una doble función en el reactor: frenar los neutrones, para favorecer la reacción de fisión, y mantener la temperatura del reactor a nivel adecuado, dado que durante la reacción de fisión se generan grandes cantidades de calor.

En los reactores nucleares, la reacción en cadena es estabilizada para obtener un ritmo de fisión constante, utilizando para tal efecto un material “devorador” de neutrones

Figura 6. Combustible nuclear: reacción de fisión.



Gracias a los aceleradores de partículas y los reactores nucleares, se han podido sintetizar alrededor de mil 400 nuevos isótopos radiactivos de elementos encontrados en la naturaleza

De hecho, el calentamiento que sufre el agua es aprovechado para producir energía eléctrica en las plantas nucleoelectricas, como la que se encuentra operando en la Central Nuclear de Laguna Verde, en Veracruz. En este tipo de instalaciones, el calor liberado por el núcleo del reactor es cedido al agua, que se transforma en vapor. Este vapor es entonces enviado directamente a una turbina, en donde la energía del vapor se transforma en movimiento, y cuya rotación se transmite a un generador que produce energía eléctrica.

Los reactores nucleares no son exclusivos de la manufactura humana: en Oklo, Gabón, se han descubierto varios reactores nucleares formados naturalmente, cuyo funcionamiento es similar al descrito para los reactores artificiales.

ELEMENTOS SINTÉTICOS

Gracias a los aceleradores de partículas y los reactores nucleares, se han podido sintetizar alrededor de mil 400 nuevos isótopos radiactivos de elementos encontrados en la naturaleza, así como elementos que no existen en la Tierra, es decir, sintéticos. De hecho, se han producido familias enteras de nuevos elementos, conocidos como actínidos y transactínidos, que en general son radiactivos y poseen núcleos de un gran tamaño (más de 92 protones); de ahí su inestabilidad. Ejemplos de este tipo de elementos es el plutonio (93 protones), actínido que se produce por la irradiación de átomos de uranio en un reactor nuclear, o el elemento 112, transactínido que aún no tiene un nombre y se le designa únicamente por su número de protones; este elemento ha sido sintetizado al bombardear átomos de plomo con átomos de cinc, con ayuda de un acelerador de partículas.

Es importante hacer notar que únicamente una ínfima parte de los materiales expuestos al bombardeo con partículas (neutrones, protones, etcétera) son transmutados, y en casos extremos, como en la producción de los elementos transactínidos, elementos con núcleos cuyo número de protones es superior a 104, se generan únicamente una decena de átomos nuevos. Para que se tenga una idea clara sobre los órdenes de magnitud a los que nos referimos al decir “ínfima parte”, imaginemos que bombardeamos a todo el planeta Tierra (510 millones de kilómetros cuadrados) con neutrones, y el resultado de este bombardeo es la transmutación de sólo una canica de 1 centímetro cuadrado de superficie. Así pues, aún cuando técnicamente es posible transmutar el mercurio, el platino, el plomo o el bismuto en oro, la cantidad de oro producido mediante reacciones nu-

cleares es despreciable y poco rentable, considerando el costo de un acelerador de partículas o un reactor nuclear, necesarios para la transmutación.

La pregunta obligada es entonces: ¿para qué nos sirve transmutar un elemento en otro, si la cantidad producida del nuevo isótopo o elemento es despreciable? Recordemos que, en general, los elementos producidos por una reacción nuclear (transmutación) son inestables, es decir radiactivos, y al tratar de estabilizarse emiten rayos gamma, rayos X o partículas beta negativas, positivas o alfa, que pueden ser fácilmente identificadas, aun cuando tengamos unos cuantos átomos radiactivos. Adicionalmente, cada isótopo radiactivo posee una vida promedio que puede variar desde unos cuantos segundos, como es el caso de los elementos transactínidos, hasta millones de años. Son precisamente estas características las que permiten el uso de los elementos radiactivos producidos artificialmente por el hombre en una gran gama de actividades.

Entre las numerosas aplicaciones de los isótopos radiactivos tenemos su uso como “rastreadores” o trazadores, que permiten seguir el curso de numerosos procesos biológicos, químicos, geológicos, industriales, etcétera, sin perturbar el comportamiento físico y químico de dichos procesos. La emisión de radiaciones gamma o X, producto de la desintegración (estabilización) de los isótopos radiactivos, son también aprovechados para esterilizar alimentos, modificar las propiedades mecánicas de algunos materiales, localizar fallas en equipos mecánicos o diagnosticar enfermedades.

En México, sólo dos instituciones cuentan con las instalaciones necesarias para llevar a cabo la transmutación de elementos (reacciones nucleares): el Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares, que posee un reactor nuclear de investigación y dos aceleradores de partículas, y la Universidad Nacional Autónoma de México, que dispone de cuatro aceleradores de partículas, tres en el Instituto de Física y uno (ciclotrón) en la Facultad de Medicina.

Bibliografía

- Bulbulian, S., (2001), *La radiactividad*, Colección “Ciencia para todos” núm. 5, México, Fondo de Cultura Económica.
Centenario del descubrimiento de la radiactividad, <http://www.ccr.jussieu.fr/radiactivite>.
Pour la Science: Noyaux atomiques et radiactivité (Francia), octubre, 1996.
 International Atomic Energy Agency (1971), *Radioisotope Production and Quality Control* (Technical Reports Series núm. 128), Viena.

Reuss, P. (1999) *L'énergie nucléaire*, 2ª edición, París, PUF (Que sais-je? No. 317).

Fabiola Monroy Guzmán obtuvo el doctorado en la Universidad de París, trabajando en la producción de los elementos transactínidos 104 y 105. Es investigadora de tiempo completo en el Departamento de Materiales Radiactivos del Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares. Sus investigaciones se centran en la producción de radioisótopos para uso principalmente médico, así como en el área de arqueometría. Pertenece al Sistema Nacional de Investigadores y es presidenta de la División de Química Nuclear de la Sociedad Química de México. fmg@nuclear.inin.mx