

Variación de los elementos en la naturaleza

por V.S. Venkatavaradan

En la naturaleza existe una variedad infinita de objetos e infinita también es la variedad de formas, colores y estados. A pesar de sus propiedades dispares, esta multitud de objetos está compuesta por alrededor de 90 elementos básicos, desde el hidrógeno al uranio. En la mayoría de los casos en su composición solo entran algunos de estos elementos. Esta rica diversidad de materiales de la naturaleza se debe a la relativa abundancia de elementos y a la manera en que se combinan. Por una parte observamos que existen materiales puros y extremadamente sencillos, tales como el diamante, formado exclusivamente por átomos de carbono, mientras que por otra, nos encontramos con rocas sumamente complejas en cuya composición entran casi todos los elementos, desde el hidrógeno al uranio.

¿Cuál es la razón de esta diversidad de materiales en la naturaleza? ¿Por qué no es homogénea la naturaleza? Incluso si se hallase una muestra de material homogéneo formado por todos los elementos, se disgregaría y se haría heterogénea. De concurrir las condiciones necesarias tales como una temperatura, presión y concentración adecuadas, el que una mezcla homogénea se transforme en otra heterogénea es solo una cuestión de tiempo. Se sabe que la causa de esta variación de los elementos en la naturaleza estriba en la acción de las fuerzas naturales: gravitatoria, electromagnética, nuclear, etc.

En términos generales, las principales causas pueden dividirse en físicas y químicas. Además de estas causas *naturales*, las hay sin duda alguna *artificiales*, que provocan cambios en la composición elemental de un sistema dado. Estas fuerzas naturales son las que originan la formación de planetas de composición muy diversa. Igualmente, son estas fuerzas las que dan lugar a que en la Tierra existan distintos tipos de rocas. Todas las variaciones que se observan en la Tierra, en el sistema solar, en las estrellas de nuestra galaxia, e incluso en el universo entero, pueden explicarse como resultado de la acción de una o de varias de estas fuerzas. A pesar de su distinto carácter, todos los objetos naturales presentan analogías generales en su configuración, trátase de rocas terrestres, o de muestras lunares, meteoritos o estrellas. En general, los elementos más ligeros abundan más, y la abundancia de elementos más pesados disminuye cuasi exponencialmente a partir del hierro, con fluctuaciones características. Existen desde luego variaciones individuales que son típicas: por ejemplo, las rocas lunares son ricas en titanio y hierro comparadas con las terrestres; los meteoritos son ricos en metales nobles tales como el oro, el indio y el osmio. Incluso en las rocas terrestres su composición difiere según la modalidad de su formación. Entre las estrellas algunas son ricas en metales mientras que otras son pobres. La *cosmoquímica* trata de explicar estas variaciones; en ocasiones, las variaciones observadas obedecen a una sola causa, pero es frecuente que dependan de más de una. El estudio de estas variaciones (isotópicas y elementales) proporciona indicaciones para conocer los procesos que tienen lugar hoy día en el sistema considerado o que se produjeron en un pasado remoto.

El Dr. Venkatavaradan es miembro del Tata Institute of Fundamental Research de Bombay. Este artículo se publicó primero en **Nuclear India**, Vol. 14, N^o 10.

INTERACCIONES NUCLEARES EN EL UNIVERSO

La causa más importante de la variación de los elementos en la naturaleza son las interacciones nucleares. Sin éstas es probable que el universo hubiese contenido hidrógeno solamente. Es precisamente a partir del hidrógeno como se crean todos los demás elementos mediante reacciones nucleares que tienen lugar en el interior de las estrellas. En el Sol y en las estrellas es la transmutación nuclear de elementos ligeros en otros más pesados la que mantiene la combustión. En la Tierra y en los demás planetas la transmutación de los radionucleidos de período largo es un proceso ininterrumpido. Sin el calor liberado durante su desintegración, la historia geológica de la Tierra sería diferente. Incluso en el supuesto vacío del espacio interestelar, los rayos cósmicos experimentan transmutaciones debido a una interacción con materia interestelar finamente dispersa con producción de luz y de nucleidos ligeros y de peso intermedio característicos que facilitan indicaciones acerca de su origen, edad, etc. Ahora bien, si a las fuerzas nucleares ha de imputarse la presencia de diferentes elementos en la naturaleza, es a las fuerzas químicas a las que se deben los compuestos, es decir, la variedad casi infinita de seres y objetos de universo. Las fuerzas bioquímicas crean largas cadenas de compuestos orgánicos que constituyen los elementos en que se basa y sostiene la vida.

No se conoce con exactitud cómo empezó todo este proceso. Probablemente toda la materia del universo se hallaba concentrada en una "bola de fuego primitiva" a una temperatura del orden de muchos miles de millones de grados. Se ha formulado la hipótesis de que hace unos 15 000 millones de años esa bola de fuego hizo explosión y empezó a expandirse. Esta bola ígnea estaba constituida principalmente por hidrógeno y, durante la fase de expansión inicial, las reacciones nucleares pudieron haber producido helio a partir del hidrógeno. También podrían haber producido elementos más pesados en cantidades más pequeñas. (Incluso de ser correcta la teoría del estado estacionario del universo, los debates que siguen acerca de las variaciones elementales serían también esencialmente correctos).

Durante su expansión, esta bola se fue enfriando y la materia se dispersó finamente en todo el espacio. Sin embargo, en algunos lugares la materia experimentó una concentración originando así galaxias estelares. Estas estrellas pueden denominarse estrellas de la primera generación para indicar que nacieron de condensación de materiales de la primitiva bola de fuego formada principalmente por hidrógeno. Cuando la masa de hidrógeno comienza a contraerse (condensación) para formar una estrella, se calienta debido a la energía gravitacional. Ese calor es pronto suficiente para iniciar reacciones termonucleares en el interior de la estrella. La presión resultante de esta reacción detiene el proceso de contracción. La estrella alcanza un estado de equilibrio y su energía procede principalmente de la fusión de los núcleos de hidrógeno que se transforma en helio. En este estado, la estrella puede existir durante millones o miles de millones de años, según su masa inicial. Al agotarse el hidrógeno en el núcleo de la estrella no hay ninguna fuerza que contrarreste la contracción gravitacional y ese núcleo empieza a contraerse de nuevo. Esta contracción hace aumentar la temperatura del núcleo estelar hasta que se alcanzan condiciones aptas para la fusión de tres núcleos de helio para formar uno de carbono. (Normalmente sería difícil la fusión de tres núcleos de helio, pero debido a cierta coincidencia de parámetros nucleares esta reacción posee una alta sección eficaz — resonancia — y sin esta resonancia no habría mucho carbono en la naturaleza.) Este proceso libera energía suficiente para impedir que prosiga la contracción. Cuando el helio está a su vez casi agotado, el núcleo de la estrella vuelve a contraerse, iniciándose reacciones de fusión en las que participa el carbono, y así sucesivamente. Estas reacciones de fusión producirán elementos como el oxígeno, el neón, el magnesio, el silicio, etc., hasta el hierro inclusive. Es posible que durante este período se produzcan también neutrones que contribuirán a la producción de cierto número de nucleidos.

Las reacciones de fusión termonuclear pueden formar nucleidos solo hasta el hierro, inclusive, ya que la adición ulterior de partículas al hierro necesita una adición de energía (a diferencia de las reacciones precedentes, en las que se liberaba energía). Una vez que todo el material del núcleo de la estrella se ha transformado en hierro, las reacciones termonucleares pierden importancia y el núcleo empieza de nuevo a contraerse, dejando una capa envolvente de material enriquecido en elementos hasta el hierro inclusive. Esta contracción es catastrófica, liberándose una gran cantidad de energía y un elevado flujo de neutrones. Tiene lugar un gran número de reacciones inducidas por neutrones que producen elementos hasta el uranio y más pesados aún, en un breve período de tiempo que precede a la explosión de la estrella con proyección de gran cantidad de materia al espacio interestelar, enriqueciéndolo en elementos más pesados. Esta materia puede condensarse en una etapa posterior para formar estrellas de la segunda generación que evolucionarán de manera análoga. Las explosiones sucesivas seguirán enriqueciendo la materia interestelar para formar las futuras generaciones de estrellas. Nuestro Sol es probablemente una estrella de la tercera generación o posterior. Contiene, además del hidrógeno primordial (y helio), elementos más pesados producidos por generaciones precedentes de estrellas.

NUCLEOSINTESIS

Esta imagen simplificada de la formación de los elementos en una estrella podrá tener muchas variantes según el tamaño de la misma y su abundancia inicial en elementos. Una estrella muy pesada explotará, — las denominadas supernovas — para quedar luego convertida en una estrella de neutrones. Estrellas de masa comparable a la del Sol pueden terminar como enanas blancas. En la atmósfera de las estrellas viejas, que se formaron cuando la materia interestelar era pobre en elementos pesados, predominarán los elementos ligeros. Las estrellas de generaciones posteriores poseerán más elementos pesados conforme puede deducirse de sus características espectrales. El proceso de creación de varios elementos se denomina “nucleosíntesis”. Resulta oportuno señalar, llegados a este punto, que los átomos de que estamos compuestos fueron en un tiempo sintetizados en el interior de estrellas muy calientes y proyectados violentamente en varias ocasiones al frío del espacio interestelar antes de terminar por formar el sistema solar.

En general podemos considerar la variación de los elementos atendiendo a dos categorías de sistemas: i) sistemas cerrados, ii) sistemas abiertos. En la naturaleza todos los sistemas son abiertos, pero en algunos casos pueden aproximarse a sistemas cerrados. Mientras que la variación de los elementos en sistemas cerrados se debe por completo a procesos que tienen lugar dentro de los sistemas, tratándose de sistemas abiertos puede tener su origen en una adición causada por fuentes externas o en un empobrecimiento por escapes desde el sistema.

En los análisis de sedimentos oceánicos profundos se observó que el contenido en níquel de los mismos ofrecía una curiosa distribución. Los sedimentos procedentes de formaciones de

Algunos de los grandes procesos del universo que alteran la composición de los elementos y de los isótopos en la naturaleza.



baja velocidad de sedimentación contenían más níquel que aquellos en los que la velocidad de sedimentación era elevada. Este fenómeno resultó inexplicable hasta que se propuso la hipótesis de que parte del níquel de los sedimentos podía ser de origen extraterrestre.

La Tierra recibe constantemente materia interplanetaria (meteorítica) que contiene abundante níquel. La precipitación de este polvo es más o menos uniforme en todo globo. Una región en la que la velocidad de sedimentación sea baja (la mayoría de los sedimentos son de origen terrestre) poseerá comparativamente una elevada fracción del componente extraterrestre con alto contenido de níquel y viceversa. En muestras lunares obtenidas en las misiones "Apollo" se observó el mismo fenómeno. En efecto, se comprobó que en nuestro satélite el suelo contenía más níquel que las rocas, y que este níquel suplementario del suelo era también de origen meteorítico. Sobre la superficie de la Tierra caen diariamente varios centenares de toneladas de polvo cósmico.

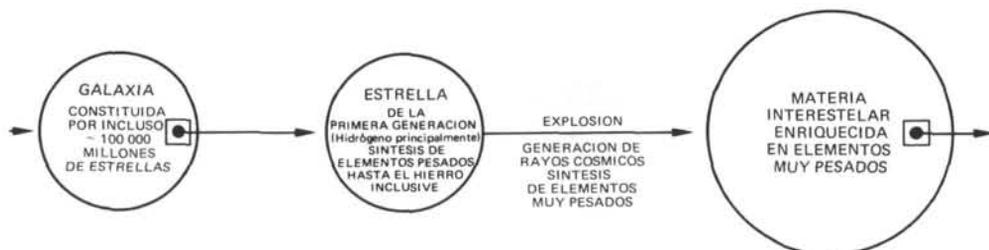
El helio es uno de los elementos que más abunda en el universo. De hecho es el más abundante después del hidrógeno. Sin embargo, la Tierra lo contiene en muy pequeña cantidad. Esto se debe a que en lo que se refiere al helio la Tierra es un sistema abierto. Por ser el helio un gas ligero, no es retenido por la fuerza de la gravedad terrestre y, por tanto, escapa al espacio. Todo el helio inicial que existía en la Tierra en la fase de su condensación tuvo que haber escapado hace ya mucho tiempo.

La pequeña cantidad de helio de la atmósfera terrestre procede de la desintegración de elementos radiactivos como el uranio y el torio de la corteza terrestre. El helio atmosférico se encuentra en equilibrio dinámico, ya que la cantidad que escapa al espacio queda compensada con la que se produce en la continua desintegración de nucleidos de las series del uranio y del torio. El hidrógeno también escapa de la atmósfera terrestre. Esto explica el porcentaje muy bajo de hidrógeno libre en ella. Sin embargo, el hidrógeno es reactivo y está ligado al oxígeno en forma de agua. Como las moléculas de agua son pesadas no escapan de la Tierra. Gracias a su reactividad química el hidrógeno existe en cantidades apreciables en la Tierra. En cambio, incluso los gases más pesados escapan de la Luna debido a su baja fuerza de gravedad. Esto explica la falta de atmósfera en este satélite.

Sin embargo, el hidrógeno y el helio no escapan de planetas gigantes como Júpiter y Saturno. Como en ellos la fuerza de la gravedad es muy alta y la temperatura atmosférica muy baja, estos gases quedan retenidos y conservan su composición primordial. El análisis de los gases de la atmósfera de estos planetas nos proporcionará muchos datos acerca de las condiciones que existían en los comienzos de nuestro sistema solar.

FORMACION DEL NUCLEO

La gravitación desempeña también un importante papel en la distribución relativa de los elementos en los planetas. En el caso de planetas formados por pequeños fragmentos



capturados por acreción gravitatoria su composición debería ser más o menos uniforme (probablemente análoga a la de los meteoritos denominados *condritos carbonáceos* que se supone que son los objetos más antiguos del sistema solar). La acreción de toda la masa podría haberse realizado así a una temperatura relativamente baja. Se ha formulado una hipótesis según la cual, por lo menos en el caso de la Tierra, cierto tiempo después de esta acreción, la desintegración de elementos radiactivos como el ^{40}K , ^{235}U , ^{238}U y ^{232}Th contribuyó al calentamiento de la masa planetaria. Esto provocó primero su fusión parcial. Una vez fundida la masa, los metales más pesados, por ejemplo el hierro y el níquel, descendieron, mientras que los silicatos más ligeros sobrenadaron. El descenso del hierro originó una nueva fusión debido a la energía gravitacional adicional disponible a causa del hundimiento de este elemento en la masa planetaria. Esta fusión hizo descender todavía más al hierro y a otros metales pesados. Esto provocó una formación catastrófica del núcleo planetario con una concentración en su centro de los elementos más pesados.

En el caso de la Tierra, el núcleo fundido de hierro y níquel se debe a este mecanismo, causante también de su campo magnético. Si la masa planetaria no tiene una temperatura suficientemente elevada es posible que esta separación no tenga lugar. La Luna y Mercurio son dos ejemplos de cuerpos de composición más o menos uniforme.

DESINTEGRACION RADIATIVA

Otra causa de la variación de los elementos de un sistema es la desintegración radiactiva. Hemos dicho que el helio atmosférico procede de la desintegración del uranio y del torio de la litosfera. Otro importante constituyente de la atmósfera terrestre, el argón, procede también de la desintegración del potasio-40 de las rocas de la corteza terrestre.

El argón forma aproximadamente el 1% de la atmósfera de la tierra y casi todo él procede de la desintegración radiactiva. La abundancia universal de argón-40 es muy baja. La razón de abundancias de $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ en el Sol es de 0,01 aproximadamente, mientras que en la atmósfera terrestre es de alrededor de 300. Este aumento tan acusado de la razón se debe a la acumulación de argón radiogénico a lo largo de miles de millones de años. De hecho, el análisis de rocas sedimentarias ha demostrado que el contenido en argón-40 de la atmósfera primitiva era mucho más bajo. En la atmósfera primordial de la Tierra la abundancia relativa de argón-40 debe haber sido muy pequeña, típica de la abundancia solar.

El helio y el argón procedentes de la desintegración de núcleos radiactivos son retenidos en su mayor parte por las rocas, y la cantidad de esos gases es proporcional a la edad de las mismas. Por tanto, la medición del helio y del argón nos permitirá datar distintas rocas. En el caso de las rocas terrestres esta determinación ha demostrado que las más viejas tienen unos 3 500 millones de años. Se han datado también por este método rocas lunares y meteoritos. La edad de las rocas lunares está comprendida entre los 4000 y los 2000 millones de años aproximadamente. La de algunos meteoritos es de alrededor de 4600 millones de años, es decir, la misma que la de la Tierra y la Luna.



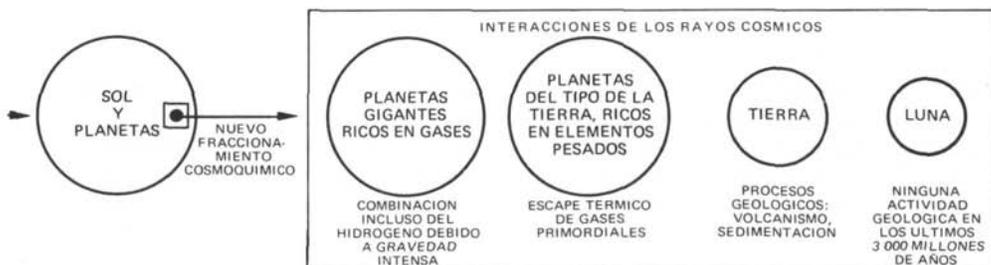
Los productos de desintegración del uranio, potasio-40, etc., se acumulan durante miles de millones de años debido a que su período medio es largo. Sin embargo, hay otros nucleidos radiactivos de período más corto comparado con la edad del sistema solar. Los productos de desintegración de isótopos como el plutonio-244 (período = 82 millones de años), el yodo-129 (período = 17 millones de años) solo pueden acumularse en las rocas si éstas se enfrían poco tiempo después de la formación de nucleidos en el proceso de nucleosíntesis examinado anteriormente. Midiendo los gases resultantes de esta desintegración (el yodo-129) se transforma por desintegración en xenón-129 y la fisión del plutonio-244 produce diversos isótopos del xenón) es posible incluso determinar la época en que se formaron cuerpos de nuestro sistema solar después del último proceso de nucleosíntesis. Se cree que los objetos sólidos se condensaron transcurridas varias decenas de millones de años después de un suceso que originó nucleidos radiactivos como el plutonio-244 y el yodo-129.

RAYOS COSMICOS

Los rayos cósmicos son partículas energéticas procedentes del espacio extraterrestre. La mayoría de estas partículas son protones. Alrededor del 1% del flujo está formado por electrones. En los rayos cósmicos hay también helio y núcleos pesados. En realidad, los rayos cósmicos contienen todos los elementos que se encuentran en la naturaleza pero con abundancias distintas. El estudio de la abundancia isotópica y elemental de los núcleos de los rayos cósmicos facilita datos con respecto a su origen (supernovas, pulsares, etc.) y también acerca del espacio interestelar. Los rayos cósmicos interactúan con la materia interestelar y experimentan cambios típicos y diferenciables. Por ejemplo, las fuentes de rayos cósmicos poseen en general una elevada razón de $^4\text{He}/^3\text{He}$. Cuando los núcleos del helio-4 interactúan con el hidrógeno interestelar, parte del mismo se transforma en helio-3 (y también en helio-2). Por tanto, la razón $^3\text{He}/^4\text{He}$ aumentará con la cantidad de materia atravesada. Basándose en la medición de esta razón se ha estimado que los núcleos de los rayos cósmicos han atravesado una materia de unos 4 g/cm^2 durante el tiempo invertido en llegar a la Tierra desde su fuente de emisión.

Recientemente hemos estudiado rayos cósmicos de muy baja energía utilizando detectores colocados en el laboratorio orbital "Skylab". Los datos obtenidos indican variaciones anormales en la composición de los núcleos pesados en comparación con los rayos cósmicos de alta energía. Estos resultados hacen pensar en una fuente distinta para este componente de baja energía.

Al atravesar el espacio interplanetario, las partículas de los rayos cósmicos interactúan con polvo interplanetario, meteoritos, la Luna y la atmósfera terrestre. Estas interacciones provocan transmutaciones cuyo resultado son nucleidos radiactivos de período comprendido entre un segundo y miles de millones de años, así como nucleidos estables típicos. La medición de estas actividades en los meteoritos ha puesto de manifiesto que la intensidad de los rayos cósmicos se ha mantenido casi constante en los últimos cientos de millones de años y probablemente incluso miles de millones de años.



Al chocar un meteorito con la superficie de la Luna se forma un cráter y cierto número de rocas se dispersan sobre la superficie lunar. Cuando las rocas están enterradas a gran profundidad los rayos cósmicos no interaccionan con ellas. Por el contrario, las expuestas a los rayos cósmicos en la superficie experimentan cambios en su composición isotópica debido a interacciones nucleares. Por ejemplo, la cantidad de helio-3 aumenta con el tiempo de exposición. La medición de estas variaciones (por ejemplo, la cantidad de helio-3 o de isótopos de neón) indica el tiempo que estas rocas han estado expuestas. Gracias a dichas mediciones se sabe que en la Luna las rocas han estado expuestas en su superficie por espacio de varios millones de años. La dinámica de la superficie debido a los impactos meteoríticos y los subsiguientes procesos de sedimentación en el regolito lunar limitan la exposición a millones de años únicamente.

APLICACIONES GEOFISICAS

La interacción de los rayos cósmicos con la atmósfera terrestre produce radionucleidos cuyo análisis nos ha permitido comprender varios procesos de la circulación atmosférica, por ejemplo, y otros procesos oceanográficos e hidrológicos. El carbono-14, isótopo producido por interacción de neutrones del nitrógeno atmosférico, se utiliza no solo en hidrología y oceanografía sino también en datación arqueológica. En geofísica, se utilizan como trazadores radioisótopos que se producen sobre todo en las capas superiores de la atmósfera. El ^7Be , ^{22}Na y ^{32}Pa se han empleado en estudios de la circulación atmosférica. Los sistemas cerrados se han estudiado mediante nucleidos de período muy corto. Para el análisis de estas actividades se recurre a muestras de agua de lluvia o a filtros de aire. El tritio, isótopo del hidrógeno, se utiliza para la datación de aguas subterráneas.

El radón-222, gas radioactivo liberado durante la desintegración de la cadena del uranio-238, tiene un período de unos cuatro días. Penetra en la atmósfera por difusión lenta a partir de la corteza terrestre. La cantidad presente en la atmósfera está en equilibrio con la que se desintegra y la liberada por la corteza. Como las tierras emergidas contienen más uranio que las masas acuosas, hay más radón en la atmósfera de las primeras que encima del agua. Basándose en un estudio del contenido de radón (que se observó que era excepcionalmente alto) de la masa de aire monzónico sobre Bombay, se sugirió la posibilidad de que esta masa procediera de las costas africanas y de Arabia y no directamente del Océano Indico, como se había supuesto hasta entonces. Existe discrepancia de opiniones con respecto a esta hipótesis. Un estudio detallado de la distribución del radón facilitará un gran volumen de datos acerca de la circulación monzónica.

Se sabe también que el contenido en radón de la atmósfera aumenta antes de iniciarse un terremoto. Esto se debe a que antes de un sismo las rocas quedan sometidas a tensiones gracias a las cuales este elemento se difunde con mayor rapidez. Por tanto, el análisis del contenido de radón de las masas de aire sobre regiones de alto potencial sísmico ayudará a predecir los terremotos.

ISOTOPOS ARTIFICIALES

Aparte de la radiactividad natural y de la inducida por los rayos cósmicos en la atmósfera, la presencia de radionucleidos en ella puede obedecer a otra causa. Se trata de las explosiones nucleares en la atmósfera. En una explosión nuclear se producen muchos radioisótopos, por ejemplo, estroncio-90, tritio y carbono-14. Observando la variación del carbono-14 atmosférico durante un cierto tiempo, se ha comprobado que el tiempo de mezcla del aire estratosférico (en el que se inyecta la radiactividad) con el de la troposfera es de unos pocos años.

Hasta la Edad de Piedra todos los cambios de la variación de los elementos eran principalmente obra de la naturaleza. Con la civilización, el hombre ha pasado a ser un important factor modificativo de la distribución natural de los elementos. Aprendió a explotar minerales, concentrar metales y producir objetos industriales. Hasta la aparición de la física nuclear estas modificaciones eran exclusivamente de carácter químico. Con las modernas técnicas nucleares — aceleradores y reactores — el hombre ha empezado a desempeñar un papel muy importante en la transmutación de los elementos. Los reactores nucleares modifican constantemente los constituyentes elementales e isotópicos durante la generación de energía. Se producen constantemente gran número de radioisótopos artificiales, es decir, isótopos que nunca existieron en la Tierra en concentraciones tan altas. Con las bombas de fusión el hombre ha provocado transformaciones que hasta ahora se sabía que solo ocurrían en el interior de las estrellas.

REACTORES NUCLEARES NATURALES

Probablemente muchas personas creen que un reactor nuclear es una obra del hombre que la naturaleza no puede duplicar. Sin embargo, se ha observado que en ciertos minerales uraníferos la razón $^{235}\text{U}/^{238}\text{U}$ era inferior a 1/137, que es la razón normal en la mayoría de los minerales. Esto hace pensar que el uranio-235 ha sido separado de modo preferente del criadero de mineral. Este proceso es posible durante una fisión inducida en un reactor alimentado con uranio natural. El uranio-235 se fisiona mientras que el uranio-238 es estable frente a los neutrones térmicos. La razón $^{235}\text{U}/^{238}\text{U}$ disminuirá, pues, con el tiempo. Ahora bien ¿cómo podría disminuir en el propio mineral? La única explicación es que en el pasado había probablemente en la Tierra una concentración tal de uranio que hacía posible el mantenimiento de una reacción en cadena. El agua subterránea pudo haber actuado de moderador creando un reactor natural. Se ha especulado también que estos reactores nucleares naturales — o en ocasiones explosiones nucleares naturales — podrían haber aportado en el pasado energía para mover los continentes, es decir, para la denominada deriva de los continentes.

VARIACION BIOLOGICA DE LOS ELEMENTOS

Los procesos biológicos son causa también de la variación de los elementos en la naturaleza. En la fotosíntesis, las plantas toman dióxido de carbono de la atmósfera y liberan oxígeno. Gracias a su compleja química biológica concentran también muchos elementos del suelo. Determinados organismos marinos concentran calcio del agua del mar fijándolo en forma de cal en su caparazón. Otros organismos concentran silicio.

Se ha observado que la distribución de los oligoelementos en la sangre humana se asemeja a la que ofrecen las rocas. Se sabe asimismo que el cabello concentra muchos oligoelementos de la sangre. Por tanto, los elementos presentes en el cabello dependen de los hábitos dietéticos del hombre, de la región y medio ambiente de que procede, de sus enfermedades, etc., todo lo cual influye en la concentración de oligoelementos en la sangre. Por tanto, la distribución de los elementos en el cabello puede utilizarse en esferas tan distintas como la arqueología, la geofísica y la medicina, incluida la medicina forense. Últimamente se ha comprobado que las células cancerosas concentran grandes cantidades de oligoelementos en comparación con las normales. De hecho, el análisis de elementos tales como el cobre presentes en las células del ser humano, hace posible el diagnóstico precoz del cáncer.

LA ANTIMATERIA

Hasta ahora hemos examinado la variación de los elementos en la materia normal. Es probable que en algunos lugares del universo los objetos estén formados por antimateria. Es difícil, tal vez imposible, distinguir estos objetos de la luz que emiten. Sin embargo, si la antimateria

interacciona con materia normal, se aniquila creando partículas elementales. Se han buscado antipartículas en los rayos cósmicos, pero no se han conseguido pruebas positivas de su presencia (no obstante, en los rayos cósmicos se han observado positrones que son partículas inversas o antipartículas de los electrones, producidos quizá por interacciones secundarias al atravesar los rayos cósmicos el espacio interestelar).

Si una masa de antimateria interaccionase con la atmósfera terrestre podría provocar una modificación de la distribución de los elementos suficiente para ser observada. Cuando la antimateria interacciona con núcleos presentes en la atmósfera se forman muchos mesones K que, con nuevas interacciones, producen neutrones. Estos neutrones pueden producir carbono-14 a partir del nitrógeno atmosférico. Por tanto, si se produce un nuevo impacto de antimateria en una determinada región se registrará en ella un enriquecimiento en carbono-14. El impacto meteorítico de Tunguska (Unión Soviética) en 1908 ha sido atribuido a la antimateria. Sin embargo, el análisis radiactivo de carbono-14 en esa región no ha confirmado tal hipótesis. Hoy día, la existencia de grandes cantidades de antimateria para formar estrellas y galaxias es solo una posibilidad, más aún, solo una hipótesis. Las futuras observaciones astrofísicas facilitarán posiblemente indicaciones sobre esta apasionante teoría.

ALGUNAS CAUSAS DE LAS VARIACIONES ELEMENTALES E ISOTOPICAS

PROCESOS NATURALES

Físicos: gravitacionales, electromagnéticos, reacciones nucleares y desintegración, erosión.

Químicos: cosmoquímicos, biológicos, geobotánicos.

ARTIFICIALES

Procesos industriales, por ejemplo, beneficio de minerales y fabricación de productos químicos

Contaminación por procesos industriales

Empleo de combustibles fósiles

Reactores y bombas nucleares.