

DETERMINACION DE EDADES EN FUNCION DE LA RADIOACTIVIDAD

Pocos años después del descubrimiento de la radiactividad, Rutherford comenzó a efectuar mediciones de los elementos radiactivos pesados existentes en la naturaleza para determinar la edad de rocas (1904). Sin embargo, las investigaciones sobre determinación de edades en función de la radiactividad no recibieron verdadero impulso hasta que el Profesor Willard Libby pronunció su disertación durante la primera Conferencia de las Naciones Unidas sobre la Utilización de la Energía Atómica con Fines Pacíficos, celebrada en Ginebra en 1955, en la que explicó cómo él y su equipo de investigadores habían elaborado el procedimiento de determinación de edades basado en el carbono-14. Desde entonces, los laboratorios de diferentes países han efectuado rápidos progresos y los geólogos, geofísicos, geoquímicos y arqueólogos han aunado sus esfuerzos con los de los científicos nucleares a fin de perfeccionar los métodos y ampliar el campo de sus aplicaciones.

El Profesor Libby elaboró primero la teoría del método de determinación de edades en función del radiocarbono; su equipo de colaboradores había descubierto y extraído este elemento radiactivo de lodos de aguas residuales en Baltimore, realizando un estudio mundial de las edades de los bosques y preparando los procedimientos y equipo de recuento necesarios. Seguidamente efectuaron varias determinaciones, tanto con muestras de edad conocida -con lo que se demostró que el método daba resultados satisfactorios- como con objetos de edad desconocida hasta entonces. El Profesor Libby publicó los resultados de sus descubrimientos en 1952. En los años subsiguientes, el interés se centró principalmente en torno al método de Libby en el que se utiliza carbono-14 como "cronómetro", y a la determinación de la edad de objetos arqueológicos y de otros objetos relativamente recientes. Ultimamente, el interés y los procedimientos se han orientado hacia la determinación de edades del pasado más remoto, llegando incluso al origen mismo de nuestro sistema solar y a la aplicación del método a otros problemas de las ciencias geológicas, tales como el movimiento de masas de aire y de agua, el origen y naturaleza de las formaciones rocosas y la historia de los meteoritos.

Esa evolución se puso claramente de manifiesto en un simposio internacional, de cinco días de duración, que bajo el patrocinio del OIEA se celebró en Atenas del 19 al 23 de noviembre de 1962 y en el que, si bien se trató también del carbono-14 y de la arqueología, se estudiaron principalmente problemas relacionados con la geología y los meteoritos. El sim-

posio fue patrocinado también por la Comisión Mixta de Radiactividad Aplicada del Consejo Internacional de Uniones Científicas (CIUC), actuando la Comisión de Energía Atómica de Grecia como organización invitante.

Métodos y posibilidades

El principio general de la determinación de edades en función de la radiactividad consiste en medir la desintegración de determinados radioisótopos y/o el ritmo de acumulación de otros radioisótopos que forman parte de cadenas de desintegración. Para obtener resultados con escaso margen de error, es necesario conocer con la máxima precisión el período de semidesintegración del radioisótopo de que se trate y tener la seguridad de que, en la muestra que haya de medirse, la actividad del radioisótopo disminuye exclusivamente como consecuencia de la desintegración natural. También han de medirse actividades muy bajas, lo que plantea complicados problemas, pues existe siempre una radiactividad ambiente emitida por otras fuentes. Para determinar edades en función de la radiactividad, se utilizan tanto radioisótopos naturales de período muy largo, que han perdurado desde la formación de la tierra y del sistema solar (nucleosíntesis), como radioisótopos formados por acción directa de los rayos cósmicos en la superficie terrestre, en la atmósfera y en otras regiones.

Cuando se comenzó a practicar la determinación de edades en función de la radiactividad, se suponía que el período de semidesintegración del carbono-14, formado en la atmósfera al absorber el nitrógeno los neutrones emitidos por los rayos cósmicos y transformarse en dicho isótopo radiactivo del carbono, era de unos 5 500 años. En una memoria presentada por dos investigadores suecos de la Universidad de Upsala (Olsson y Karlén), se señaló que las recientes investigaciones efectuadas en Upsala, en el National Bureau of Standards de los Estados Unidos y en Aldermaston (Reino Unido), cuyos resultados son concordantes, parecen demostrar que el valor de dicho período es más bien de 5 700 años. La determinación del período de semidesintegración del carbono-14 reviste particular importancia, pues este radioisótopo constituye el principal instrumento para las mediciones que alcancen hasta 50 000 años de antigüedad constituyendo, por tanto, la base del método más utilizado en arqueología. Para determinar edades mucho mayores aún, se recurre a los radioisótopos existentes en la naturaleza. Una memoria presentada por

un científico alemán y otro suizo (Herr y Hirt), se refirió al empleo del uranio-187 (período: 48 millones de años) para medir la edad de sideritos. Los resultados concuerdan muy satisfactoriamente con una hipótesis de carácter general, basada en las conclusiones deducidas de otros métodos de determinación de edades en función de la radiactividad, según la cual los meteoritos y la corteza terrestre se formaron aproximadamente en la misma época, a saber, hace unos 4 500 millones de años. Antes de empezar a aplicarse el método de determinación de edades en función de la radiactividad, no había medio de calcular la época de formación de la tierra con cierto grado de seguridad, e incluso este método no ha alcanzado hasta hace poco una precisión razonable.

Algunos elementos de la cadena de desintegración del uranio emiten partículas alfa (núcleos de helio). El helio puede medirse por espectrometría de masas; sobre este método presentaron una memoria dos científicos de la Universidad de Arizona (Damony Green). Una de las principales dificultades que plantea es determinar las pérdidas del helio de la muestra debidas a causas distintas de la desintegración natural, por ejemplo, al "escape" originado por la elevada velocidad de emisión de las partículas alfa, a daños provocados por las radiaciones y a la difusión térmica.

En dos memorias se examinó el método de termoluminiscencia. Consiste en medir la luminiscencia de una muestra expuesta a la acción del calor. Ciertos elementos experimentan un reordenamiento electrónico cuando se irradian, acumulándose los electrones en "trampas". Este reordenamiento es estable a la temperatura normal del medio que rodea al elemento, pero cuando éste se expone a la acción del calor, los electrones vuelven a la posición en que se encontraban antes de la irradiación y en el curso de este proceso emiten una luminiscencia medible cuya intensidad es directamente proporcional a la dosis de radiación recibida.

El primer método que se utilizó corrientemente para determinar la edad de rocas uraníferas consistía en medir la acumulación de plomo-206, que es un isótopo estable en el que el uranio se convierte al final de su cadena de desintegración, y comparar dicha acumulación con la cantidad de uranio-238 contenida en la muestra. Este mismo principio puede aplicarse para comparar la cantidad de plomo-206 con otros radionúclidos que le preceden en la cadena de desintegración. Los experimentos descritos por científicos yugoeslavos (Gojkovic, Deleon y Cervenjak), muestran que determinando la razón $^{206}\text{Pb}/^{210}\text{Pb}$, se obtienen resultados que concuerdan satisfactoriamente con los proporcionados por otros métodos.

Una de las principales tareas hoy día necesarias para la determinación de edades en función de la radiactividad es perfeccionar métodos y equipo de recuento capaces de medir las debísimas actividades que por lo general han de evaluarse. El Sr. H. Oesch-

ger, del Instituto de Física de la Universidad de Berna, pasó revista a los detectores de radiaciones para baja intensidad actualmente utilizados (contadores de gas y de centelleo) y expuso varios métodos para eliminar la actividad de fondo. Señaló que si bien los procedimientos que ahora suelen emplearse son apropiados para muestras de antigüedad no superior a 50 000 años, el perfeccionamiento de las técnicas y del equipo -que parece perfectamente posible- abrirá nuevas e interesantes posibilidades. Por ejemplo, permitiría utilizar carbono-14 para determinar la edad de muestras de 60 000 a 70 000 años, no se necesitaría reunir muestras de tamaño tan grande como en la actualidad y se facilitaría el estudio de los procesos de circulación en los mares, así como el de la radiactividad de los materiales terrestres. El Sr. Oeschger dijo también que es muy probable que con métodos de recuento de mayor sensibilidad se descubran radioisótopos de período muy largo hasta ahora desconocidos.

Utilizando un espectrómetro de masas de alta sensibilidad, es posible obtener resultados seguros con el método basado en la evaluación del contenido de potasio y argón, aunque la concentración de tales elementos sea baja o la edad de las muestras relativamente corta. Sobre ello informaron dos científicos alemanes (Gentner y Lippolt) que han realizado experimentos con huesos fósiles de la Selva Negra y minerales volcánicos del monte Eifel.

Geología y aplicaciones en meteorología e hidrología

En el simposio de Atenas se puso de manifiesto que en los últimos años no sólo ha aumentado la sensibilidad del método de determinación de edades en función de la radiactividad, sino también su alcance en el tiempo en uno y otro sentido. Por ejemplo, los progresos efectuados en los procedimientos de determinación de la razón $^{434}\text{U}/^{438}\text{U}$ han permitido medir con mayor precisión la edad de muestras de 100 000 a más de un millón de años (Thurber). Por otra parte, se señaló que el plomo-210, formado en la atmósfera por desintegración del radón-222 (gas de período corto), es útil para establecer la cronología de los procesos geofísicos ocurridos en los últimos cien años aproximadamente. A este tema se refirió una memoria presentada por la Universidad de California (Goldberg), en la que se dio cuenta de estudios efectuados en los glaciares de Groenlandia y en los ríos Colorado y Sacramento. Esos estudios muestran que la composición de las aguas fluviales está determinada no sólo por la geología de la cuenca respectiva, sino por las reacciones químicas que tienen lugar en las aguas.

Se estudió el empleo del carbono-14 y de otros radionúclidos formados por acción de los rayos cósmicos para investigar el movimiento de grandes masas de aire en la atmósfera. En una memoria presentada por un científico indio (Lal), se señaló que



Espectrómetros multicanal para mediciones de rayos alfa y gamma, del Centro nuclear de Fontenay-aux-Roses (Francia)

ahora es posible determinar el ritmo de acumulación de polvo extraterrestre sobre la tierra durante los últimos millones de años midiendo la concentración del aluminio-26 y del manganeso-53 en esos sedimentos. En la actualidad, se calcula que diariamente se depositan sobre la tierra un millar de toneladas de polvo.

Según la misma memoria, la radiactividad formada en la superficie terrestre por los rayos cósmicos puede también utilizarse para efectuar estudios sobre la erosión, aunque las velocidades normales de erosión son tan elevadas que los estratos que ahora se encuentran al descubierto podrían haber estado a decenas de metros de la superficie hace varios cientos de miles de años. Por ello, este método sólo permite medir la velocidad de erosión en épocas relativamente recientes. El estudio de los radioisótopos producidos por los rayos cósmicos también ha resultado útil para investigar los procesos de circulación en los mares y la cronología de la sedimentación marina.

Por ejemplo, en una memoria (Bien, Rakestraw y Suess) se calculó que la velocidad de desplazamiento del agua del océano Pacífico en el sentido sur-norte es de 0,04 cm/s, es decir, se necesitan unos 400 años para que el agua situada a 40° de latitud sur llegue a los 40° de latitud norte.

El Sr. K.O. Münnich, de la Universidad de Heidelberg, estudió la medición del carbono-14 de origen artificial presente en la estratosfera y estimó que el antiguo "modelo de la caja", al que se recurría para explicar la lenta mezcla de las masas de aire en el sentido norte-sur y a diferentes altitudes, debería sustituirse por un "modelo continuo" basado en la teoría de la difusión.

El método comúnmente utilizado para determinar la edad de las rocas es el de medir por separado diferentes isótopos de una misma muestra. Este método tiene el defecto de que algunos de los productos de desintegración del isótopo que ha de determinarse se pierden durante el enfriamiento de la roca. Ahora bien, parece que el estroncio-87, isótopo descendiente del rubidio, permanece en la roca y, por ello, tal vez sea interesante un método basado en la medición de toda la muestra de roca, y no de los distintos isótopos por separado, para hallar las concentraciones relativas del rubidio y del estroncio. En una memoria presentada por el Instituto de Tecnología de Massachusetts (Hurley, Fairbairn, Faure y Pinson) se describió el desarrollo de este método. Su éxito depende en parte de la determinación de la razón inicial $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ en la roca, correspondiente al momento de su formación. Los autores señalaron que en la mayoría de las rocas este valor es del orden de 0,708, y puede utilizarse sin tener que efectuar mediciones separadas para cada muestra.

Los resultados de la determinación de edades de minerales uraníferos en formaciones rocosas graníticas de Baviera del Norte revelan que el uranio se había formado mucho después que los yacimientos de la zona en general, lo que se debe probablemente a que el uranio disuelto en agua ácida atravesó calizas alcalinas y precipitó en forma de sal de uranio (Lenz y Wendt).

El método K-A se ha utilizado para determinar la edad de tectitas (Zähringer) que se encuentran principalmente en América del Norte, Checoslovaquia y Australia. Las australitas parecen ser de origen muy reciente (unos 600 000 años); las tectitas de Checoslovaquia tienen unos 15 millones de años y las de América del Norte más de 30 millones de años. Las tectitas son cuerpos esféricos, de color verdoso oscuro y aspecto vítreo; en general, se supone que son de origen cósmico. Sin embargo, el Profesor Vinogradov (Unión Soviética) hizo observar en la discusión que los datos físicos y químicos obtenidos, en particular el elevado contenido de uranio y potasio, análogo al de las rocas ácidas de origen terrestre, parece indicar que las tectitas se han formado en la tierra.

El señor J.L. Kulp, de la Universidad de Columbia, señaló que las discrepancias observadas en la aplicación del método radioisotópico de determinación de edades geológicas dependen en gran medida de las variaciones de la temperatura y del intercambio catiónico con las aguas subterráneas. Describió experimentos recientemente efectuados a fin de estudiar las propiedades de intercambio catiónico de la biotita, pues en el caso de ésta los resultados obtenidos son particularmente discrepantes. El Sr. Kulp llegó a la conclusión de que los efectos térmicos rara vez originan discrepancias superiores a 10 por ciento, mientras que los intercambios causados por las

aguas subterráneas podrían explicar las diferencias observadas según se aplique el método Rb-Sr o el K-A. De todas formas, estas discrepancias son útiles, pues proporcionan valiosa información sobre los antecedentes geofísicos de la región considerada.

El Sr. A.P. Vinogradov, del Instituto de Biogeoquímica de la Academia de Ciencias de la Unión Soviética, examinó las determinaciones, efectuadas con carbono-14, de la edad de los yacimientos de turba existentes en el curso inferior del Indighirka (río de la Siberia oriental), de la antigüedad del mamut fósil (12 000 años) y de la época en que las aguas del Mar Negro se transformaron de dulces en salobres (8 000 años).

Meteoritos

La determinación de las épocas de formación y caída de los meteoritos y el origen de la radiactividad de los satélites artificiales constituyeron el tema de una serie de memorias. Se prestó especial atención a la determinación de la intensidad de los rayos cósmicos en función del tiempo y del espacio y a la formación de partículas penetrantes en el espacio.

En una memoria de los Estados Unidos (Fisher), se manifestó que los datos obtenidos recurriendo al plomo como instrumento cronometrador demuestran que los meteoritos pétreos tienen una edad de 4 500 millones de años, es decir, del mismo orden de magnitud que la de la corteza terrestre. Las pruebas relativas a los sideritos, obtenidos por evaluación de la razón K-A, indican que su edad es casi doble de la anterior. No se dispone de otros datos que confirmen la hipótesis comúnmente admitida de que los sideritos, los meteoritos pétreos y la tierra se formaron al mismo tiempo. De los resultados obtenidos hasta ahora, se desprende que los sideritos son mucho más antiguos que los meteoritos pétreos.

En fecha reciente, los procedimientos utilizados para determinar la edad de los meteoritos se aplicaron también a los fragmentos de satélites artificiales. En una memoria presentada por un grupo de investigadores del Smithsonian Astrophysical Observatory (Fireman, de Felice y Tilles) se examinan los trabajos efectuados en dicha Institución. En ella se señala que la producción de radiactividad en los satélites es muy diferente del fenómeno análogo en los meteoritos. En éstos, la radiactividad es uniforme; en los satélites, en cambio, se han observado considerables variaciones debidas a la excentricidad de sus trayectorias y a sus interacciones con la cintura de Van Allen. Se indicó que se habían analizado muestras de algunos satélites del tipo Discoverer para determinar cuantitativamente el tritio contenido en el plomo, acero y aluminio utilizados en su construcción. Estas investigaciones tienen una repercusión directa en los planes para el lanzamiento de vehículos espaciales tripulados.

En otras memorias se describieron los procedimientos basados en el uso del carbono-14 u otros radionúclidos producidos por los rayos cósmicos, para determinar la época de la caída de meteoritos en la tierra. Los resultados obtenidos hasta ahora tienden a demostrar que muchos meteoritos poseen "vidas terrestres" más prolongadas de lo que se creía. En general, se convino en que el carbono-14 constituye un buen instrumento para determinar la antigüedad de los meteoritos y que el perfeccionamiento de esta técnica aumentaría su precisión y campo de aplicaciones, lo que sería de especial interés para determinar la edad de cráteres abiertos por meteoritos prehistóricos.

Si se quisiera obtener por observación "directa" el mismo tipo de información lograda gracias al estudio de meteoritos recientemente caídos, sería necesario efectuar un viaje de dos años por el espacio ultraterrestre en un vehículo especialmente construido.

En diversas memorias se trató de la distribución de la intensidad de las radiaciones cósmicas en el espacio y en el tiempo. En un trabajo del Brookhaven National Laboratory (Davis, Stoenner y Schaeffer), se describió un método para comparar la actividad de un radioisótopo de período corto con la de uno de período largo a fin de determinar la intensidad espacial de las radiaciones cósmicas. Se utilizaron argón-37, con un período de 35 días, y argón-39, con un período de 325 años. De los resultados se desprende que la intensidad actual de los rayos cósmicos a la distancia de una unidad astronómica (la órbita terrestre) no difiere en más de un 15 por ciento de la intensidad a una distancia de varias unidades astronómicas. Los resultados también demuestran que la formación de radionúclidos por acción de los rayos cósmicos es independiente de la órbita del meteorito. También se han efectuado estudios especiales de los efectos de las manchas solares, por ejemplo, de la observada en noviembre de 1960, comparando el contenido en argón-37 de muestras de acero inoxidable del Discoverer 17 lanzado en esa misma época, con muestras de los Discoverer 18 y 26.

En otra memoria de los Estados Unidos (Goel y Kohman) se examinaron las variaciones de la intensidad de los rayos cósmicos en función del tiempo. En general, se supone que los rayos cósmicos tienen su origen en las estrellas o sistemas estelares y como éstos varían en el tiempo y en su posición dentro de las galaxias, es posible que se produzcan alteraciones a largo plazo. En la memoria se llega a la conclusión, basada en las investigaciones realizadas con cloro-36 y argón-36, de que la intensidad de los rayos cósmicos ha ido decreciendo en los últimos centenares de millones de años. El estudio indica también que en su recorrido a través del espacio, los meteoritos sufren una erosión general e intensa.

Estas conclusiones difieren de las formuladas en otras dos memorias. En una presentada por dos científicos del Instituto de Química Max Planck de Maguncia, República Federal de Alemania (Voshage y Hintenberger), se llega a la conclusión de que la intensidad de los rayos cósmicos en el último millón de años ha sido superior al promedio correspondiente a toda la existencia de los meteoritos. En otra memoria del mismo Instituto (Vilcsek y Wänke), se estima que la erosión en el espacio ha sido bastante débil. Según esta memoria, la vida relativamente corta de los meteoritos pétreos no se debe a la erosión, sino a los choques en el espacio, que ejercen

efectos catastróficos sobre la piedra, pero no sobre el hierro. En una memoria de Bélgica y los Estados Unidos (Crèvecoeur y Schaeffer) se estudió asimismo esta cuestión y se afirmó que para deducir conclusiones concretas en cuanto a la variación de la intensidad de los rayos cósmicos en función del tiempo, hay que resolver primero problemas tales como la erosión de los meteoritos en el espacio y el ritmo de producción de radioisótopos en los meteoritos, si bien las mediciones de la razón $^{26}\text{Al}/^{10}\text{Be}$ indican que la intensidad de las radiaciones cósmicas ha permanecido constante durante los últimos 10 millones de años.

APLICACION DE LAS RADIACIONES EN FITOGENETICA EN LA REPUBLICA ARABE UNIDA

Dentro del marco de su programa de asistencia técnica, el Organismo Internacional de Energía Atómica ha enviado a la República Árabe Unida un experto en las aplicaciones de los radioisótopos en agricultura y más concretamente en fitogenética. Se trata del Profesor Alois Tavčar, de la Universidad de Zagreb (Yugoeslavia).

El Profesor Tavčar prestará sus servicios durante un período total de siete meses. Ha pasado ya cuatro meses en El Cairo (de enero a mayo de 1962), y en breve regresará para otra estancia de tres meses. El Profesor Tavčar ha presentado al Organismo un informe sobre la primera parte de su misión, en el que explica la naturaleza y alcance de las actividades emprendidas en la República Árabe Unida bajo su dirección.

En el aspecto puramente científico, la finalidad principal de la misión encomendada al Profesor Tavčar es ayudar a las autoridades a organizar el estudio de los efectos genéticos de diferentes tipos de radiación en los tejidos celulares y de la influencia de la irradiación de semillas o de plantas en desarrollo sobre la velocidad de crecimiento de las especies agrícolas. Se supone además que el Profesor Tavčar colaborará en el programa general del Centro Nacional de Formación en las Aplicaciones de los Radioisótopos (El Cairo) y que organizará un programa especial de formación en las aplicaciones agrícolas.

Buena parte de la labor fue realizada en la primera fase de su misión; es de esperar que durante su próxima estancia en El Cairo sea posible juzgar los resultados de su labor y consolidar y ampliar las

actividades aprovechando la experiencia adquirida. Si bien la mayoría de las mutaciones se manifiestan a partir de la segunda generación o en las generaciones subsiguientes de las plantas, también se pueden hacer observaciones interesantes en la primera generación de plantas nacidas de semillas irradiadas.

Experimentos de irradiación

En cuanto llegó a El Cairo, el Profesor Tavčar estableció el programa de trabajo en consulta con el Dr. Ismail Hazza, Director del Centro Nacional de Radioisótopos. Una parte importante de la labor consistió en irradiar varias especies agrícolas.

Bajo su dirección se irradiaron semillas de algunas plantas importantes para obtener mutaciones beneficiosas y, en particular, para mejorar la calidad del producto, aumentar su rendimiento y su resistencia a la enfermedad y al encamado, y reducir el período de vegetación y la altura de la planta. Se consultó a fitotécnicos del Ministerio de Agricultura para determinar cuáles eran las especies agrícolas más importantes del país y según su dictamen se seleccionaron las mejores variedades de semillas de maíz, sésamo, cacahuete, sorgo y haba panera para irradiarlas con rayos gamma. Se prescindió de la semilla de algodón porque ya se había comenzado a investigar su irradiación con fines fitotécnicos en el Instituto de Investigaciones sobre el Algodón del Ministerio de Agricultura.

La irradiación se efectuó con una fuente de cobalto-60 y a continuación se examinaron las semillas para determinar el grado de germinación alcanzado. La