LA RADIACTIVIDAD

Autor: SILVIA BULBULIAN

- COMITÉ DE SELECCIÓN
- EDICIONES
- DEDICATORIA
- PREFACIO
- I. EL DESCUBRIMIENTO DE LA RADIACTIVIDAD

- II. LA MATERIA
- III. ¿SE PUEDE PRODUCIR LA RADIACTIVIDAD?
- IV. RADIACTIVIDAD EN LA NATURALEZA
- V. ¿SE PUEDE TRANSFORMAR EL NÚCLEO DE UN ÁTOMO EN OTRO?
- VI. LA RADIACTIVIDAD Y LA ESTIMACIÓN DE EDADES
- VII. LA ENERGÍA Y EL NÚCLEO DEL ÁTOMO
- VIII. EL REACTOR NUCLEAR DE OKLO
- IX. LAS APLICACIONES DE LA RADIACTIVIDAD
- GLOSARIO
- BIBLIOGRAFÍA
- COLOFÓN
- CONTRAPORTADA

COMITÉ DE SELECCIÓN

Dr. Antonio Alonso

Dr. Juan Ramón de la Fuente

Dr. Jorge Flores

Dr. Leopoldo García-Colín

Dr. Tomás Garza

Dr. Gonzalo Halffter

Dr. Guillermo Haro †

Dr. Jaime Martuscelli

Dr. Manuel Peimbert

Dr. Juan José Rivaud

Dr. Emilio Rosenblueth †

Dr. José Sarukhán

Dr. Guillermo Soberón

Coordinadora Fundadora:

Física Alejandra Jaidar †

Coordinadora:

María del Carmen Farías

Indice

la

ciencia/42

desde méxico

Primera edición, 1987

Quinta reimpresión, 1996

La Ciencia desde México es proyecto y propiedad del Fondo de Cultura Económica, al que pertenecen también sus derechos. Se publica con los auspicios de la Subsecretaría de Educación Superior e Investigación Científica de la SEP y del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología.

D. R. © 1987, FONDO DE CULTURA ECONÓMICA, S. A. DE C. V.

D. R. © 1995, FONDO DE CULTURA ECONÓMICA

Carretera Picacho-Ajusco 227; 14200 México, D.F.

ISBN 968-16-2651-6

Impreso en México

Indice

DEDICATORIA

A mis amigos, sin cuya ayuda no hubiera podido hacer este libro.

Indice

PREFACIO

El descubrimiento de la radiactividad y de los elementos radiactivos naturales en los últimos años del siglo pasado marcó el inicio de una serie de descubrimientos importantes que cambiaron completamente la idea que se tenía sobre la estructura de la materia. Se tuvo que abandonar la noción que en el siglo XIX se tenía del átomo como un objeto simple, compacto e indivisible en favor del concepto de una estructura más compleja.

En 1896 el físico Henri Becquerel descubrió la radiación emitida por los minerales de uranio. Los estudios que realizaron en ese año Pierre y Marie Curie sobre los minerales de uranio y torio condujeron al descubrimiento de dos elementos: el polonio y el radio; estos elementos despertaron un gran interés por una de sus principales características: emitir radiaciones muy penetrantes, a semejanza del uranio y el torio. A esta propiedad del radio y otros elementos inestables de emitir energía en forma de radiación al desintegrarse Marie Curie la llamo "radiactividad".

La radiactividad es una manifestación de que los núcleos que presentan este fenómeno son inestables; por medio de ella esos átomos tienden a la estabilidad. En 1911, utilizando como herramienta una fuente de polonio emisora de radiación, Rutherford realizó experimentos que lo llevaron a proponer el modelo nuclear del átomo, modelo que sentó las bases del conocimiento que se ha desarrollado actualmente sobre la estructura de la materia.

Los años treinta fueron también muy ricos en descubrimientos: en un periodo de siete años, se descubrieron el electrón positivo, el neutrón, la radiactividad artificial y la fisión nuclear. La mayor parte de los estudios fueron hechos en Francia, Inglaterra y Alemania; pero esto era de esperarse, ya que los grandes descubrimientos no germinan repentinamente. Aunque el ingenio y la capacidad científica del sabio no se pueden sustituir, se requiere, además, que el dominio de la ciencia haya llegado a un grado de madurez suficiente y que se hayan formado investigadores en los institutos de investigación y universidades, que es donde se acumulan las tradiciones científicas. En este libro se desea presentar una breve historia de estas experiencias acumuladas en diversas instituciones del mundo, haciendo hincapié sobre todo en aquellos descubrimientos que han sido las piedras angulares sobre las que se han edificado las teorías fundamentales de la ciencia. El desarrollo de la historia que se presenta es secuencial, como los eslabones de una cadena; es decir, se van enlazando los conocimientos presentados en un capítulo con aquellos de que se trata en el siguiente, sin que eso signifique en manera alguna que el relato está desarrollado cronológicamente; todo lo contrario: en muchas ocasiones el lector tendrá que retroceder mentalmente muchos años para poder seguir la secuencia de la historia.

Indice

I. EL DESCUBRIMIENTO DE LA RADIACTIVIDAD

EN ESTE libro se reseña la historia de la *radiactividad;* su descubrimiento, hace menos de un siglo, fue el origen de un desarrollo científico extraordinario en el campo de la física y la química, y en particular en el conocimiento del átomo y la materia. Anteriormente a este descubrimiento y durante mucho tiempo, se dio escasa o ninguna importancia al conocimiento de la materia, a la forma en que está constituida y a sus componentes. El átomo significaba poco o nada aún a la mayoría de las personas que vivieron hace sólo 50 años. Demócrito, quien nació aproximadamente en el año 470 a.C., fue el primer hombre que pensó en el átomo. Conjeturó que la materia de la naturaleza debía de estar formada por partículas muy pequeñas, indivisibles e invisibles, a las que llamó "átomos" y que consideró indestructibles. Supuso que los átomos de cada elemento eran diferentes en tamaño y forma y que eran esas diferencias las que hacían que cada elemento tuviera diferentes propiedades. Esta manera de pensar, que ahora parece de gran actualidad, no trascendió en su época.

Los filósofos griegos no comprobaban experimentalmente sus teorías, sino que llegaban a sus conclusiones por razonamientos sistemáticos; y en parte fue debido a esto que los escritos de Demócrito desaparecieron y sólo quedaron fragmentos de ellos. Pero hubo otra razón por la que fue olvidado, y esa razón fue la teoría de Aristóteles sobre la materia. Aristóteles creía que la materia estaba formada por sustancias básicas llamadas "elementos": fuego, aire, tierra y agua, que, a diferencia de los átomos, sí se podían ver y se podían sentir por el tacto. Las ideas de Aristóteles tuvieron más peso que las de Demócrito y gobernaron el conocimiento sobre la materia por casi 2 000 años.

A mediados del siglo XVII un francés, Pierre Gassendi, pensó nuevamente en los átomos. Las ideas de Aristóteles estaban tan afianzadas en la mente de los escolásticos de esa época, que las obras de Gassendi no fueron publicadas hasta después de su muerte, cuando ya no podían causarle daño. Posteriormente, los grandes científicos europeos empezaron a creer cada vez más que toda la materia estaba formada por átomos tan pequeños que resultaban invisibles.

Ya en la última década del siglo pasado se conocía el electrón, y el alemán Roentgen hacía experimentos con la luz fluorescente producida por los electrones. Construyó la pantalla fluorescente, una pieza de cartón pintada con cierto compuesto químico de bario, de alta fluorescencia. Un día Roentgen descubrió que la pantalla brillaba aun cuando los electrones en ese momento no podían llegar hasta ella. Se dio cuenta de que la fuente que tenía era el origen de otra nueva clase de rayos que penetraban el cartón; luego colgó una hoja de metal entre el tubo y la pantalla de metal y siguió observando fluorescencia, aunque menos intensa. Después metió su mano entre el tubo y la pantalla. Lo que vio debió de asustarlo sobremanera: en la pantalla se veía el esqueleto de una mano. Al mover su mano el esqueleto se movía. Roentgen estaba viendo el esqueleto de su mano en vida. Fue enorme el impacto que causó el descubrimiento de estos rayos, que él llamó X por desconocer de qué se trataban. No debe, pues, sorprendernos que en esa época mucha gente se dedicara a estudiarlos. Este descubrimiento nos acerca al propósito de nuestro libro, que es la radiactividad.

LOS DESCUBRIDORES

Iniciemos nuestra historia con dos personajes que serán el origen de nuestro relato sobre la radiactividad; éstos son Martin Heinrich Klaproth, científico alemán, y Joens Jakob Berzelius, químico sueco. El primero descubrió a fines del siglo XVIII el elemento uranio, y el segundo fue el descubridor del elemento tono, a principios del siglo XIX.

Klaproth separó en 1789 del mineral pechblenda el uranio, que es un polvo negro. A pesar de que desde entonces se encontró que sus propiedades químicas eran muy diferentes a las de los elementos conocidos, durante mucho tiempo se le consideró, sin embargo, como un elemento de poca importancia y se utilizaba en raras ocasiones.

En esa época Klaproth se impresionó profundamente con el descubrimiento del planeta Urano, por lo que bautizó el elemento recién descubierto por él con el nombre de *uranío.*

Mucho tiempo después, en 1818, Joens Jakob Berzelius descubrió el torio al separarlo de un mineral conocido actualmente como torita. Ni Klaproth ni Berzelius sospecharon que los elementos descubiertos por ellos llegarían a ser tan importantes en el desarrollo del conocimiento de la ciencia y mucho menos que emanaran radiaciones de ellos. Este descubrimiento fue realizado en el uranio por Antoine Henri Becquerel en 1896.

Antoine Henri Becquerel

Este personaje de nuestra historia perteneció a una familia cuyos miembros se distinguieron en la investigación científica en los campos de la química y la física. Antoine Henri, hijo y nieto de dos científicos notables, nació en París en 1852; estudió en la Escuela Politécnica, donde después fue profesor.

En París, en 1896, Becquerel descubrió accidentalmente la existencia de unos rayos desconocidos que provenían de una sal de uranio. Notó que al poner en contacto el compuesto de uranio con una placa fotográfica envuelta en papel negro, se producía el mismo efecto que si la placa estuviera en presencia de los rayos X. Le pareció sorprendente que de las sales de uranio emanaran radiaciones que afectaban las placas fotográficas cuando éstas se encontraban protegidas de la luz.

Becquerel pronto se dio cuenta de que las radiaciones provenientes del compuesto de uranio no eran originadas por una reacción química, y que al aumentar la concentración del uranio en el compuesto químico se velaba más rápidamente la placa fotográfica que cuando la sal tenía menos uranio. Además, observó que el efecto producido no dependía de los otros elementos presentes en las sales de uranio. Todo esto lo hizo concluir que las emanaciones uránicas, como las llamó, eran independientes de la forma química en que se encontrara este elemento.

Era difícil para los científicos creer que emanaran radiaciones del uranio; pero esto fue sólo el principio: no sabían que todo se complicaría y que sería aún más difícil explicar los fenómenos que se seguirían descubriendo.

Así pues, transcurrieron 107 años entre el descubrimiento del uranio (por Klaproth, en 1789) y el hallazgo de que de este elemento emana radiaciones; a partir de entonces los nuevos descubrimientos se desarrollaron con mucha rapidez. Pero no nos adelantemos a los hechos y sigamos conociendo a los personajes de esta historia.

Cuando Becquerel publicó los resultados de sus investigaciones sobre los rayos provenientes del uranio, los esposos Pierre y Marie Curie, sus amigos, se interesaron mucho en este fenómeno tan misterioso. Madame Curie pensó que ese tema le sería útil para desarrollar su tesis doctoral, con que culminaría sus estudios en la Universidad.

Pierre y Madame Curie

Pierre Curie nació en París, Francia, en 1859. Fue hijo de un médico, Eugène Curie. El ambiente familiar en el que se crió le permitió desarrollar sus aptitudes de observación y de reflexión sobre los fenómenos naturales. La educación que recibió produjo sus frutos: fue bachiller a los 16 años, licenciado en física a los 18 y a los 19 ayudante de laboratorio del profesor Desains en la Universidad de la Sorbona en París. Con la ayuda económica que le proporcionaba su modesto sueldo, pudo dedicarse a la investigación científica, que tanto le interesaba. Su hermano Jacques, quien también era físico, pronto anunció el descubrimiento, que ambos hicieron, del fenómeno de la "piezoelectricidad", que permitía medir con precisión pequeñas cantidades de electricidad. Este fenómeno sería de gran utilidad en sus trabajos posteriores sobre la radiactividad. Posteriormente, dejó la Sorbona para trabajar como jefe de laboratorio en la Escuela de Física y Química de la ciudad de París. Allí continuó sus investigaciones, de gran

importancia; entre otras cosas, descubrió lo que ahora se conoce como la ley de Curie sobre el magnetismo.

A pesar del gran entusiasmo con que Pierre Curie realizó sus investigaciones, durante mucho tiempo no mostró interés alguno por obtener títulos ni honores. No presentó su tesis doctoral, basada en sus investigaciones sobre el magnetismo, hasta que cumplió 36 años, y eso sólo por la insistencia de su padre.

Pierre Curie conoció en París a Manya Sklodowska, quien en ese entonces estudiaba en la Sorbona, y poco tiempo después sería conocida en todo el mundo como Madame Marie Curie. (Fig. 1.)

Figura 1. Pierre y Marie Curie acompañados por su hija Irène y por el padre de Pierre, el Dr. Eugène Curie.

Manya Sklodowska nació en un antiguo barrio de Varsovia, Polonia, en 1867. Su madre había sido directora de una escuela para señoritas, y su padre profesor de física y matemáticas. Manya fue una niña muy precoz, en la escuela siempre fue la más pequeña de su grupo y además la que obtenía siempre el primer lugar. La opresión zarista la condujo, como a muchos de sus compatriotas, a participar en una organización revolucionaria de estudiantes. Después de muchas vicisitudes y cambios en su vida, decidió seguir su vocación científica; así, se trasladó a París para ingresar en la Facultad de Ciencias de la Universidad de la Sorbona. Con muchas privaciones obtuvo su licenciatura en ciencias físicas y un año después en ciencias matemáticas. Fue en ese tiempo cuando Pierre Curie y ella se conocieron, y en el verano de 1895 contrajeron matrimonio.

Mientras Pierre Curie continuaba con sus proyectos de investigación, Marie Curie empezaba a estudiar la radiactividad natural en diversos compuestos. Le interesaba investigar la posible existencia de otro elemento radiactivo en la naturaleza, y lo encontró: el torio. Las propiedades de este elemento fueron descubiertas simultáneamente por el alemán Gerhard Schmidt.

Marie presentó un informe en el que hacía constar que todos los compuestos de uranio y torio que había examinado emitían radiaciones. Los esposos Curie se dieron cuenta pronto de la importancia de estos experimentos y decidieron unir sus esfuerzos para investigar el fenómeno que producía las emanaciones de radiaciones de elementos como el uranio y el torio.

Todos los estudios que realizó Madame Curie sobre estas radiaciones le permitieron obtener su doctorado en ciencias físicas en la Universidad de la Sorbona.

EL POLONIO Y EL RADIO

Los esposos Curie buscaron radiaciones ya no en los elementos puros, sino en los minerales de uranio en que este elemento está mezclado con otros metales y minerales. Por algún tiempo midieron la intensidad de las radiaciones emitidas por los minerales de uranio. Algunas muestras emitían radiaciones con una mayor intensidad que los compuestos de uranio puros. Sabían que el uranio era sólo parte del mineral que estaban estudiando y que el material estaba formado también por otros elementos. Existía, pues, sólo una posibilidad: entre los materiales del mineral existía una sustancia que emitía radiaciones con una intensidad mayor que el uranio.

Al iniciar sus estudios de un mineral de uranio llamado "pechblenda", Pierre y Madame Curie se dieron cuenta de que las radiaciones emitidas por este mineral eran más intensas que las que habían observado en los compuestos puros de uranio. Así pues, Madame Curie empezó a separar por procesos químicos todos los elementos. En cada paso del proceso de eliminación su muestra se volvía más pequeña, pero se daba cuenta que la intensidad de la radiación emanada era mayor, quedando un producto cuyas radiaciones eran cientos de veces más intensas que las que emitía el uranio; se dio cuenta, además, de que las radiaciones emitidas eran capaces de atravesar el papel, la madera y hasta placas de metal.

Este producto contenía un elemento químico desconocido hasta entonces, que los Curie identificaron a mediados de 1898 y llamaron polonio, en honor de la patria de Marie.

Una vez separado el polonio de los residuos del mineral, éstos seguían emitiendo radiaciones, por lo cual los esposos Curie concluyeron que debían de contener aún otro elemento diferente al polonio y al uranio, pero con la misma propiedad de emitir radiaciones. Siguieron separando de estos residuos las fracciones de material que no despedían radiaciones de aquellas que sí lo hacían. Finalmente llegaron a encontrar, en el mismo año, el elemento desconocido que era la fuente de las radiaciones misteriosas, y lo denóminaron radio.

A la propiedad que poseen el radio y otros elementos inestables de emitir radiaciones espontáneamente al desintegrarse Marie Curie le dio el nombre de radiactividad.

La cantidad del compuesto de radio obtenido era tan pequeña y, además, tan impura, que no se podían determinar sus propiedades; ni siquiera pudieron encontrar su peso atómico. La única manera de resolver ese problema era purificar y concentrar una cantidad considerablemente mayor que la que tenían de ese nuevo elemento. Para llevar a cabo este proyecto era necesario partir de una gran cantidad del mineral de pechblenda, que era su materia prima, tarea gigantesca que daría lugar a un sinnúmero de problemas tanto prácticos como teóricos.

Pierre y Marie Curie consiguieron una tonelada de desechos de mineral de pechblenda. Esos desechos ya no tenían uranio, el cual se había eliminado previamente; pero allí se encontraba el radio todavía, y los esposos Curie iniciaron los trabajos para obtenerlo en la forma más pura posible. La extracción del nuevo elemento a partir del mineral era muy compleja y parecía más bien una labor industrial que de laboratorio científico. Para llevarla a cabo se requería un local muy grande, equipado adecuadamente y con personal altamente especializado. Pero no contaban con ninguno de estos requisitos, y se lanzaron solos a esta hazaña en un cobertizo desprovisto de comodidades, que les había proporcionado el director de la Escuela de Física y Química de la ciudad de París. La mayor parte del trabajo químico experimental fue realizado por Marie, ya que su esposo dedicaba más tiempo a la parte teórica del trabajo y a la enseñanza. Marie efectuaba manipulaciones muy pesadas y en ocasiones manejaba hasta 20 kilogramos de materia prima.

Después de reducir la tonelada del desecho del mineral a unas cuantas fracciones de gramo, encontraron que éstas emitían cientos de miles de veces más radiaciones que el uranio puro, y que la intensidad del radio era tal que se veía su suave resplandor en la oscuridad. Los esposos Curie descubrieron, además, que la muestra resplandeciente se mantenía a una temperatura ligeramente mayor que la del laboratorio.

Finalmente, lograron extraer un compuesto de radio de una tonelada de residuos de pechblenda. El proceso fue tan laborioso que se tardaron años en obtener una cantidad suficiente del elemento para determinar su

peso atómico y otras propiedades.

Como consecuencia de estos descubrimientos Pierre Curie fue invitado a Inglaterra a dar una conferencia sobre el radio, y también fueron condecorados él y su esposa, en Inglaterra, con la medalla "Davy". En 1903, Pierre y Marie compartieron el premio Nobel de Física con su amigo Henri Becquerel.

Pero después, en 1906, murió Pierre Curie en un accidente, y la humanidad perdió así a uno de sus más grandes científicos. Madame Curie, con el tesón que la caracterizaba, continuó sus investigaciones y tomó el lugar que había dejado su esposo. Desde el mismo año en que murió su esposo enseñó las materias que él daba, mereciendo con ello el honor de ser la primera mujer que impartía cátedra en la Sorbona. Recopiló todos los trabajos realizados hasta entonces, y en 1910 publicó su famosa obra: *Tratado de la radiactividad.* Logró aislar el radio en su estado más puro; fue un trabajo que requirió mucho esfuerzo y habilidad, en virtud de las dificultades inherentes en el proceso. Por este trabajo, Marie Curie recibió su segundo premio Nobel, en esta ocasión el de Química.

EL INSTITUTO DEL RADIO

Madame Curie luchó con ahínco para tener un laboratorio que respondiera a las necesidades de sus investigaciones: en 1914 se terminó la construcción del Instituto del Radio, pero en ese mismo año estalló la primera Guerra Mundial, y su inauguración tuvo que esperar hasta el final de ésta. En este laboratorio se hicieron trabajos de gran prestigio.

Marie siguió trabajando hasta el final de su vida con tesón y entusiasmo, a pesar de que sus problemas de salud eran cada vez más graves; ya durante la primavera de 1934 no le fue posible asistir al laboratorio, y murió a mediados de ese mismo año. Sus parientes, amigos y compañeros de trabajo la acompañaron hasta su última morada, junto a la tumba de Pierre, en el cementerio de Sceaux.

Indice

II. LA MATERIA

AL DESCUBRIRSE la radiactividad los científicos empezaron a preguntarse la razón por la que la muestra de radio que aislaron los esposos Curie se encontraba a mayor temperatura que el recinto en que se trabajaba. En realidad no comprendían el origen de las radiaciones emitidas por el uranio y los otros elementos radiactivos. Se dieron cuenta de que la energía se originaba en el átomo y que éste no tenía una estructura sencilla como se pensaba.

MODELOS DEL ÁTOMO

Fue Joseph John Thomson quien, en 1907, propuso un modelo del átomo, al que visualizó como una esfera con carga positiva, distribuida en el volumen del átomo de aproximadamente 0.000 000 01 cm de diámetro. Supuso que partículas con cargas negativas, electrones, estaban dispersos en alguna forma ordenada en esta esfera. Éste fue el primer modelo del átomo que trató de explicar su constitución. Pero este modelo no fue capaz de explicar los experimentos que realizaba Ernest Rutherford, científico neozelandés, quien utilizaba una fuente de polonio emisora de radiación alfa como herramienta para realizar sus estudios.

ERNEST RUTHERFORD

Aparece en nuestra historia este personaje, a quien se debe un gran número de descubrimientos que cambiaron el rumbo de la ciencia; se le mencionará en varias ocasiones en este libro, pues la humanidad está endeudada con él por su brillante imaginación y habilidad experimental demostradas en su interpretación de la radiactividad. Rutherford nació en 1871 en Nueva Zelanda. Estudió alli matemáticas y ciencia. Después ganó una beca para estudiar en Cambridge, Inglaterra. Tenía apenas 24 años cuando ya realizaba trabajo de postgrado en ondas electromagnéticas en el laboratorio Cavendish bajo la dirección del profesor Thomson, ya conocido en esta historia. Después de trabajar en universidades de varios países, finalmente regresó a Cavendish, Cambridge, donde tomó el lugar de su maestro Thomson como profesor de física.

LAS RADIACIONES EMITIDAS POR LOS ELEMENTOS RADIACTIVOS

Ernest Rutherford y su colaborador químico Frederick Soddy propusieron una teoría que describía el fenómeno de la radiactividad. A este proceso se le conoce ahora como decaimiento radiactivo. En 1902, explicaron la naturaleza de la radiactividad y encontraron que el átomo ya no podía considerarse como una partícula indivisible; estudiaron los productos del decaimiento de un material radiactivo separado químicamente del resto de los elementos de donde provenía, y descubrieron que los materiales radiactivos, al emitir radiación, se transforman en otros materiales, ya sea del mismo elemento o de otro.

La radiación emitida por el uranio y otros elementos radiactivos resultó ser bastante compleja; estaba constituida principalmente por tres componentes, a los cuales Rutherford les dio los nombres de alfa (α), beta (β) y gamma (γ), respectivamente, tomados de las tres primeras letras del alfabeto griego.

Cuando se hacía pasar un haz de la radiación a través de un campo magnético, los científicos encontraron que una parte, los rayos alfa, se desviaba ligeramente en un sentido; otra parte, los rayos beta, se desviaba fuertemente en el sentido contrario, y, finalmente, una tercera parte, los rayos gamma, no se desviaba.

Rutherford fue el primero en detectar los rayos alfa, y descubrió que, en presencia de campos magnéticos, se desvían en forma opuesta a la de los electrones. De aquí se concluyó que los rayos alfa tenían que estar cargados positivamente. Como además resultaban desviados sólo muy ligeramente, calcularon que debían de tener una masa muy grande; en efecto, resultó que tenían cuatro veces la masa del hidrógeno. Rutherford los identificó más tarde como átomos de helio cargados positivamente.

Becquerel demostró que los rayos beta consisten en electrones cargados negativamente, ya que se desvían en el mismo sentido y en la misma proporción que éstos.

Finalmente, Rutherford y Audiade, otro colaborador suyo, descubrieron que los penetrantes rayos gamma son en realidad radiaciones electromagnéticas parecidas a los rayos X y a la luz visible, pero de diferente energía.

¿Cómo podría explicarse la existencia de los elementos radiactivos si continuamente se están desintegrando? Era de esperarse que se hubieran acabado. Fueron Rutherford y Soddy quienes contestaron esta pregunta: observaron que para cada material radiactivo se podía asignar un tiempo en el que decaían la mitad de los átomos de la actividad original; este tiempo recibió el nombre de *vida media.* Después de haber transcurrido una vida media, sólo podían encontrar aproximadamente la mitad de la actividad que tenían originalmente; después de dos vidas medias, sólo la cuarta parte, y así sucesivamente, hasta que el material radiactivo se perdía en su mayor parte (Fig. 2). Graficando la actividad de las radiaciones, encontraron que disminuía en el curso del tiempo y tenía una forma que los matemáticos llaman exponencial decreciente (Fig. 3).

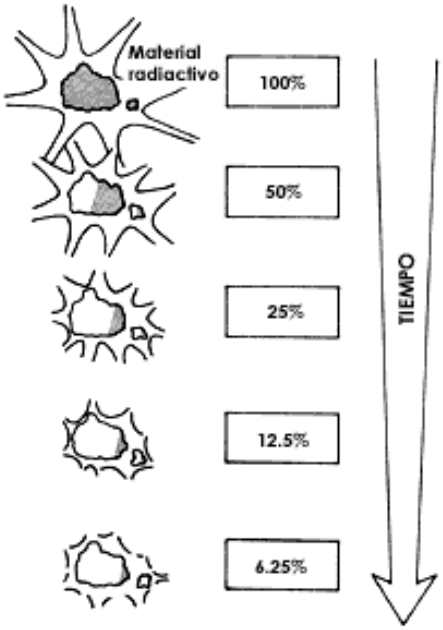


Figura 2. Después de una vida media sólo se tiene la mitad, el 50%, de la actividad del material radiactivo. Después de dos vidas medias sólo se tiene el 25%, y así sucesivamente, hasta que en la práctica no se puede medir la actividad del material radiactivo.

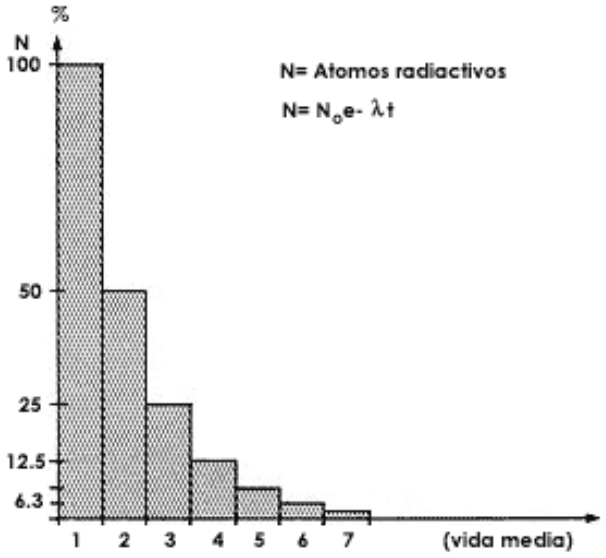


Figura 3. Actividad de un isótopo radiactivo en función del tiempo transcurrido. Después de una vida media el isótopo radiactivo le queda sólo la mitad de su radiactividad.

Esta curva y su relación matemática expresa la rapidez con la que se transforma el material radiactivo en otro material, el proceso se llama decaimiento o desintegración radiactiva.

EL MODELO NUCLEAR DEL ÁTOMO

Uno de los experimentos de más trascendencia de Rutherford y sus colegas, y el que tal vez ayudó más a los científicos a comprender la estructura atómica, consistió en utilizar partículas alfa emanadas de una fuente radiactiva para bombardear una lámina delgada de material. Las partículas alfa incidían en una placa fotográfica después de haber atravesado la placa de metal. Casi todas ellas traspasaban la hoja de metal sin cambiar su dirección, y pocas partículas rebotaban en diversas direcciones; esto último lo dedujo Rutherford por los bordes de las manchas en la placa, que no se veían nítidos, sino todo lo contrario: se observaba una zona difusa (Fig. 4).

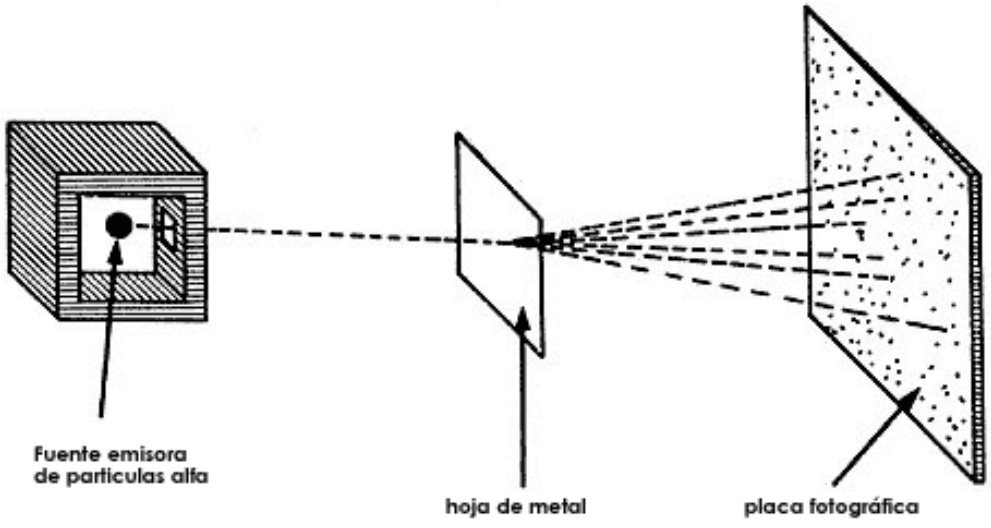
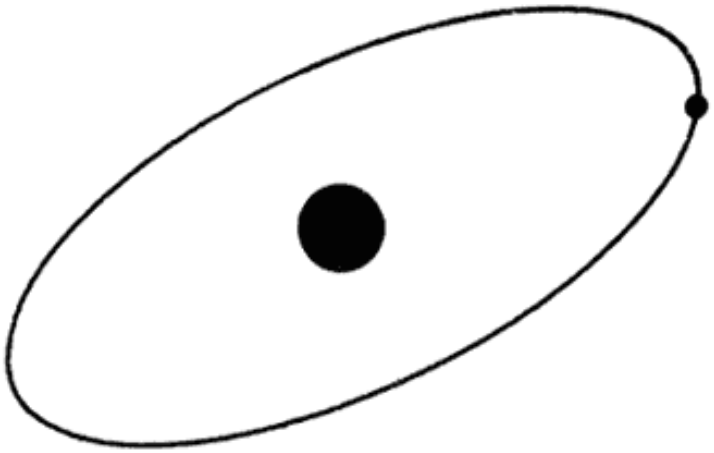


Figura 4. Las partículas emitidas por la fuente radiactiva se desvían al pasar a través de una hoja metálica. El grado de desviación queda registrado cuando las partículas chocan con la placa fotográfica.

Estos experimentos, aparentemente tan sencillos, cuyos resultados pudieron haber pasado inadvertidos

para muchos, fueron muy significativos para Rutherford, quien obtuvo de ellos resultados verdaderamente asombrosos; concluyó de sus experimentos que la mayoría de las partículas alfa pasaban a través de la hoja de metal sin afectarse ni desviarse, como si pasaran a través de un agujero, mientras que otras pocas se desviaban intensamente, causando esa difusión observada en la placa fotográfica. Si el modelo del átomo de Thomson fuera correcto, las cargas positivas y negativas estarían bien difundidas en todo el material y todas las partículas alfa pasarían desviándose muy poco. El hecho de que sólo algunas partículas alfa se desviaran enormemente significaba para Rutherford que en alguna parte del átomo debía de existir un núcleo muy denso y cargado positivamente, capaz de rechazar las partículas alfa, también cargadas positivamente.

Como consecuencia de sus experimentos y cálculos, Rutherford encontró algo que le debió de parecer sumamente extraño: la masa del átomo estaba encerrada casi toda en un núcleo; el átomo era como una esfera prácticamente hueca, y el tamaño del átomo debía de ser inmensamente mayor que el de ese núcleo. }



Su modelo del átomo que propuso en 1911, tenía un núcleo muy pequeño y muy denso cargado positivamente, rodeado de electrones cargados negativamente en movimiento alrededor del núcleo.

En la época en que Rutherford (Fig. 5) proponía su modelo nuclear del átomo, las únicas partículas conocidas que podían constituir la materia eran los protones, partículas de carga positiva, y los electrones, partículas de carga negativa. Rutherford pensó originalmente que el núcleo podría estar formado por protones; sin embargo, no pudo explicar su modelo del núcleo con la presencia de sólo estas partículas, ya que supuso que podría ser muy inestable, en virtud de la carga positiva tan condensada que tendría. Así fue como predijo, en 1920, la existencia de una partícula nuclear neutra, que, según supuso, era necesaria para la estabilidad del núcleo. Fue necesario esperar la llegada de los años treinta para que el "neutrón", como lo llamaron más tarde, fuera descubierto.

Figura 5. Ernest Rutherford.

EL NEUTRÓN

Durante mucho tiempo se trató de encontrar al neutrón postulado por Rutherford; pero fue una casualidad, como sucede muy a menudo con los descubrimientos científicos, lo que hizo posible este descubrimiento. En 1930, dos físicos alemanes, Bothe y Becker, observaron una radiación emitida por núcleos de boro, berilio y litio cuando eran bombardeados por la radiación alfa. Las partículas desconocidas que se emitían posteriormente a la irradiación eran muy penetrantes y capaces de atravesar capas gruesas de elementos pesados sin ser absorbidas en forma notoria. Poco después, en el Instituto del Radio en París, dos científicos franceses, a los que nos referiremos en este libro en muchas ocasiones al tratar la radiactividad artificial, Frédéric e Irène Joliot-Curie, estudiaron la absorción de los rayos que habían encontrado Bothe y Becker. Observaron la propiedad que tienen estas partículas de ser absorbidas rápidamente por substancias con un contenido alto de hidrógeno, como la parafina y el agua, y también de proyectar los átomos de hidrógeno de estas substancias a una gran velocidad. Los resultados de los trabajos publicados por los Joliot-Curie provocaron la sorpresa de los físicos del laboratorio Cavendish de Cambridge. James Chadwick, científico de este laboratorio, estudió la radiación observada por ellos y su propiedad de proyectar los átomos de hidrógeno fuera de la parafina.

Después de estudiar su naturaleza y las características de su recorrido a través de la materia, Chadwick concluyó que esta partícula nueva tenía una masa muy semejante a la del protón, pero sin carga eléctrica alguna, y era precisamente la partícula que él suponía presente en la materia y que estaba buscando sin éxito desde hacía muchos años: el neutrón. La radiación encontrada por Bothe y Becker estaba constituida por neutrones, partículas predichas por Rutherford en el mismo laboratorio. Fueron necesarios más de 12 años de trabajo sobre el mismo tema por físicos alemanes, franceses e ingleses para establecer la existencia del neutrón. El descubrimiento del neutrón permitió resolver los problemas que existían para explicar la constitución del átomo. Chadwick reconoció que el neutrón formaba parte de todos los núcleos, con excepción del de hidrógeno.

LO QUE SE SABE AHORA SOBRE LA MATERIA

Finalmente se fueron juntando las piezas del rompecabezas para formar una imagen del átomo. Con el descubrimiento del neutrón se fortaleció el modelo nuclear del átomo de Rutherford.

Posteriormente se presentarían cambios a este modelo para explicar con más exactitud los fenómenos observados; sin embargo, el concepto del modelo nuclear del átomo no cambió.

Según la teoría atómica, lo que nos rodea está formado de moléculas y éstas de elementos, sustancias sencillas que no pueden descomponerse en sustancias más sencillas por cambio químico. Los elementos, a

su vez, están formados por átomos, partículas extremadamente pequeñas que el ojo humano no puede distinguir. Es fácil darse cuenta de que debe de existir un gran número de ellos, ya que una gota de agua contiene aproximadamente 1 000 000 000 000 000 000 000 (10^{21}, es decir, mil trillones) de átomos. Esta cantidad tan grande da idea de la pequeñez del átomo y del gran número de ellos que existen en todo lo que nos rodea.

Los átomos, de acuerdo con la teoría de Rutherford, están constituidos por un núcleo de carga eléctrica positiva, rodeado por una nube de electrones o negatrones, con carga eléctrica total de igual magnitud que la del núcleo, pero de signo opuesto. Los electrones, que giran alrededor del núcleo a grandes velocidades, tienen carga eléctrica negativa y una masa muy pequeña; una dosmilésima parte de la masa de un protón.

El tamaño del núcleo es tan pequeño, comparado con el resto del átomo, que si el átomo fuera una esfera de 1 kilómetro de diámetro, su núcleo tendría apenas el tamaño de una canica de 1 cm y los electrones se verían apenas como puntos a los que difícilmente se les podría medir sus dimensiones. De hecho, el núcleo contiene casi toda la masa del átomo, y en muchos casos es aproximadamente 4 000 veces más pesado que los electrones periféricos, pero tiene dimensiones muy pequeñas.

Por ser precisamente la parte fundamental del núcleo, a los protones y neutrones se les llama nucleones. A pesar de su pequeñez, el núcleo del átomo es muy pesado: si se pudiera juntar materia nuclear en un volumen de 1 cm^3, su peso sería de doscientos millones de toneladas.

Una vez que se estableció el modelo nuclear del átomo, se hizo evidente que las transformaciones radiactivas son procesos nucleares. Todos los núcleos, excepto el del hidrógeno, están formados principalmente por protones y neutrones. El número de protones, que es también igual al número de electrones extranucleares en el átomo neutro, es su número atómico. Por otra parte, el número total de nucleones, es decir de protones y neutrones, se conoce como masa atómica.

Los números atómicos de los elementos conocidos van desde 1 para el hidrógeno hasta el 106 para el elemento más pesado conocido. Se conocen, además, núcleos con número de neutrones desde cero hasta 159. Los números de masa (masa atómica) de los elementos conocidos varían desde 1 hasta 263. Es importante notar que en el caso de los elementos más ligeros la masa atómica es aproximadamente el doble del número atómico. Esto es otra forma de decir que estos núcleos ligeros contienen aproximadamente números iguales de protones y neutrones. El helio-4, en particular, tiene 2 protones y 2 neutrones.

Los científicos acostumbran expresar en forma taquigráfica la nomenclatura de los núcleos con diferentes propiedades físicas. El símbolo utilizado para denotar las especies nucleares es el símbolo químico del elemento con el número de masa como superíndice izquierdo y el número atómico como subíndice izquierdo; así, el helio de masa 4 se transcribe: $^{4/}{}_{2}\mathbf{He}$. En la literatura antigua se utilizaba también poner el número de masa como superíndice derecho: ${}_{2}\mathbf{He}^{4}$, nomenclatura que en ocasiones aún se encuentra en la literatura. Sin embargo, el subíndice, que indica el número atómico, a menudo se omite, pues cada elemento químico tiene su número atómico característico. Existe también la costumbre de simplificar esta nomenclatura escribiendo el nombre del elemento seguido de un número que indica su número de masa: helio-4.

Las masas de los núcleos atómicos son tan pequeñas cuando se expresan en gramos (menos de 10^{-21} gramos), que se expresan en general en una escala diferente. La escala que se acepta universalmente en la actualidad está basada en la masa de un átomo de carbono-12 tomado exactamente como 12 000 000 unidades atómicas de masa. La información a este respecto para cada elemento se encuentra distribuida muy ampliamente en la literatura de tablas que dan la información; sin embargo, es importante hacer notar que esta información está dada en general para las masas atómicas y no sobre las masas nucleares. En otras palabras: las masas tabuladas incluyen las masas de los electrones extranucleares en los átomos neutros.

MENDELEIEV, SU TABLA PERIÓDICA DE LOS ELEMENTOS Y LA RADIACTIVIDAD

Mendeleiev, en 1864, clasificó los elementos conocidos en esa época en lo que llamó *tabla periódica* (Fig. 6).

Grupo		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	0
Periodo	Serie									
1	1	1 H								2 He
2	2	3 Li	4 Be	5 B	6 C	7 N	8 O	9 F		10 Ne
3	3	11 Na	12 Mg	13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl		18 A
4	4	19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe 27 Co 28 Ni	
	5	29.Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br		36 Kr
5	6	37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru 45 Rh 46 Pd	
	7	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I		54 Xe
6	8	55 Cs	56 Ba	57-71 S. Lántánida*	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os 77 Ir 78 Pt	
	9	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At		86 Rn
7	10	87 Fr	88 Ra	89 S. Actínida**	104 Rf	105 Ha				

* 57 La | 58 Co | 59 Pr | 60 Nd | 61Pm | 62 Sm | 63 Eu | 64 Gd | 65 Tb | 66 Dy | 67 Hc | 68 Er | 69 Tm | 70 Yb | 71 Lu

** 89 Ac | 90 Th | 91 Pa | 92 U | 93 Np | 94 Pu | 95 Am | 96 Cm | 97 Bk | 98 Cf | 99 Es | 100 Fm | 101 Md | 102 | 103 Lw

Figura 6. Tabla periódica de los elementos. Mendeleiev agrupó los elementos con propiedades semejantes uno junto a otro horizontalemente, mientras que en las tablas actuales, como la que se muestra, se colocan uno debajo del otro. Mendeleiev ordenó los elementos por sus pesos atómicos; ahora se ordenan conforme a sus números atómicos. Así pues, hay varias diferencias entre la tabla original del científico ruso y las actuales.

Para comprender la importancia de la tabla periódica de los elementos retrocedamos en el tiempo al año de 1815, cuando el científico y médico inglés William Prout observó que, al escoger el peso del hidrógeno como la unidad, las masas atómicas de la mayoría de los elementos ligeros eran muy aproximadamente cercanas a números enteros. Esto lo llevó a concluir que los átomos de todos los elementos deberían de estar formados por átomos de hidrógeno. De acuerdo con esta teoría, el átomo de oxígeno estaría formado por 16 átomos de hidrógeno, y el carbono por 12. Ahora sabemos que Prout estaba muy cerca de la realidad; sin embargo, su idea no fue aceptada en esa época. Sólo 54 años despúés, cuando estas ideas se cristalizaron, Dimitri Mendeleiev en Rusia y Lothar Meyer en Alemania, en el mismo año, publicaron tablas similares, en las que establecieron las leyes de las propiedades de los elementos, a los que ordenaron de acuerdo con sus masas atómicas, comenzando por el hidrógeno, el más ligero de ellos. Mendeleiev agrupó los elementos, por orden creciente de sus pesos atómicos, en periodos o series, de manera que quedasen ordenados por propiedades semejantes.

Huecos en la clasificación de Mendeleiev

En la época de Mendeleev faltaban aún numerosos elementos por descubrirse, y constituían los huecos en la tabla que elaboró. En vez de considerarlos como excepciones de su sistema de clasificación Mendeleiev supuso, con osadía, que los huecos de su clasificación correspondían a elementos desconocidos en esa época; y como si eso fuera poco, se lanzó a describir los elementos faltantes. Se puede decir que la

importancia de su tabla periódica de los elementos se basa más en los huecos que encontró que en la tabla misma. Mendeleiev se fijó de modo especial en tres huecos que quedaban junto a los elementos boro, aluminio y silicio y que correspondían a elementos aún no conocidos, sabiendo de ellos solamente el sitio que ocuparían en la tabla cuando fuesen descubiertos. Llegó incluso a ponerles nombres a los elementos que correspondían a esos huecos: ekaboro, ekaaluminio y ekasilicio.

Tomando en cuenta que las propiedades de los elementos en un mismo grupo son semejantes, Mendeleiev pudo predecir sus propiedades físicas y químicas. Quizás la tabla de Mendeleiev no habría tenido tanta importancia si no se hubieran verificado sus predicciones. Los diferentes elementos que faltaban dentro de la tabla fueron descubriéndose generalmente a partir de los minerales de los elementos vecinos, ya que las propiedades químicas similares tienden a reunir a los elementos del mismo grupo.

Los tres elementos mencionados, ekaboro, ekaaluminio y ekasilicio, fueron descubiertos en un periodo de quince años a partir de la descripción de Mendeleiev. Con el descubrimiento del germanio, la hipótesis se fortaleció, pues las propiedades de ese elemento se parecían asombrosamente a las del ekasilicio predicho por Mendeleiev. Igualmente sorprendentes resultaron los descubrimientos del galio, que correspondía al ekaaluminio, y del escandio, correspondiente al ekaboro. Nadie podía dudar después de esto de la validez o utilidad de la tabla periódica.

A pesar del gran éxito que había tenido el sistema de Mendeleiev, aún tenía que resistir la repercusión del descubrimiento de varios materiales radiactivos, para los que no parecía encontrarse sitio en la tabla periódica.

Todavía en los años veinte de este siglo quedaban por descubrirse varios elementos, entre ellos los análogos del manganeso, cuya existencia fue anticipada por Mendeleev, quien los llamó ekamanganeso y dvimanganeso. Transcurrieron más de 50 años hasta que se descubrió el renio, que correspondía al dvimanganeso de Mendeleiev. De hecho, el renio fue el último de los elementos estables descubiertos; y fue necesario el desarrollo de la física nuclear y de la radioquímica para descubrir, finalmente, que los elementos faltantes eran radiactivos de vida media bastante más corta que la vida de nuestro planeta y que, por consiguiente, no existían en la Tierra.

LOS ISÓTOPOS

Ya para el año de 1912 se habían encontrado un gran número de diferentes materiales radiactivos; pero ¿cómo se podían acomodar en la clasificación periódica de los elementos? Había docenas de estos materiales radiactivos, y en la tabla de Mendeleiev no había sitio para ellos.

Frederick Soddy, quien había colaborado anteriormente con Rutherford en la explicación del comportamiento de la radiactividad natural, sabía que el núcleo de un átomo radiactivo pierde peso y carga positiva al emitir una partícula alfa. No obstante, cuando un núcleo emite una partícula beta su peso permanece casi sin cambio, pero su carga aumenta. Así fue como Soddy pudo deducir los pesos y la carga nuclear de muchos productos radiactivos. En varios casos, dos productos radiactivos diferentes tenían la misma carga nuclear pero diferentes pesos. La carga positiva que posee un núcleo es la que determina la cantidad de electrones necesarios para neutralizar el átomo; la carga del núcleo es, por lo tanto, la responsable de sus características exteriores, o sea, las propiedades químicas del átomo.

Esta conclusión se confirmó cuando Soddy encontró que los diferentes materiales radiactivos no siempre se podían separar unos de otros por técnicas químicas, lo cual indicaba que eran partes de un mismo elemento químico, que cada grupo de especies inseparables correspondía a un solo elemento químico y que en el mismo sitio de la tabla periódica quedaban clasificados átomos químicamente iguales con núcleos diferentes y con propiedades físicas distintas. Soddy propuso el nombre de isótopo, del griego *iso* —igual— y *topos* —lugar—, para designar a las especies de un grupo; ese nombre indica, pues, que tales especies ocupan el mismo lugar en la clasificación de los elementos. Actualmente en cada casilla de la tabla de elementos se clasifican todos los átomos con el mismo número de protones, o sea, con el mismo número atómico, aun cuando su masa sea diferente como consecuencia de tener diferente número de

neutrones. De acuerdo con esta definición, todos los núcleos que tienen el mismo número de protones, pero con diversas combinaciones de neutrones, se llaman isótopos. Todos los isótopos de un elemento tienen la misma cantidad de electrones periféricos, y esta cantidad es igual al número de protones del núcleo. Como el comportamiento químico de los elementos depende de sus electrones, entonces se puede decir que todos los isótopos de un elemento se comportan químicamente en la misma forma. En la naturaleza se encuentran elementos que tienen varios isótopos.

Hidrógeno

El elemento más sencillo, el hidrógeno, tiene un solo protón, pero se conocen tres isótopos de este elemento: el hidrógeno-l, el hidrógeno-2 o deuterio, y finalmente el hidrógeno-3 o tritio, cuyos núcleos están formados solamente por 1 protón; el primero de ellos no tiene neutrones, mientras que el segundo, el deuterio, tiene un solo neutrón, y el tritio tiene 2 neutrones (Fig. 7).

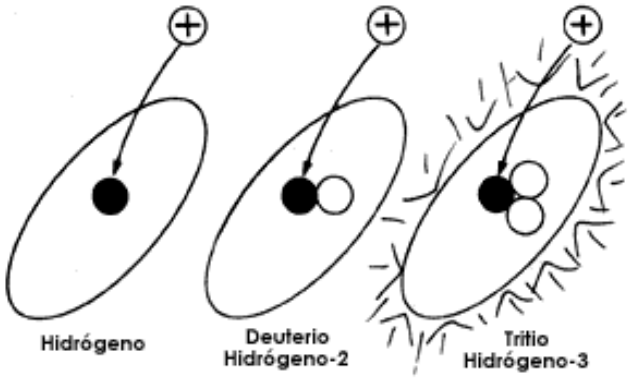


Figura 7. Isótopos de hidrógeno.

Agua. De acuerdo con el isótopo de hidrógeno que contengan, existen diferentes moléculas de agua:

El agua ligera está formada por dos átomos de hidrógeno y uno de oxígeno:

H_2O

el agua pesada tiene un átomo de deuterio:

HDO

y, finalmente, el agua tritiada tiene un átomo de tritio:

HTO

Uranio

El uranio que existe en la naturaleza también tiene varios isótopos: el uranio-234, el uranio-235 y el uranio-238. Todos ellos tienen 92 protones en el núcleo; el primero tiene sólo 142 neutrones, mientras que el segundo tiene 143, y el último tiene 146.

Los isótopos estables con pocos protones tienen, en general, un número igual de neutrones; pero a medida que aumenta el número de protones va aumentando la carga positiva concentrada, y para estabilizar el átomo aumenta también el número de neutrones; de otra forma, la repulsión entre las cargas positivas de los protones haría que el átomo fuera muy inestable. Esto se puede ver en la gráfica que muestra el número de neutrones de un núcleo en función de su número de protones (Fig. 8). A esta curva se le llama curva de estabilidad del núcleo, y muestra que los núcleos estables con pocos protones es tán a lo largo de una línea diagonal, donde existen igual número de protones y neutrones, pero a medida que aumenta el número de

protones la línea se va curvando, lo cual indica que en átomos con masas nucleares grandes los núcleos estables tienen muchos más neutrones que protones. Sin embargo, hay un límite para la estabilidad de los núcleos, ya que todos los que tienen 84 protones o más son radiactivos.

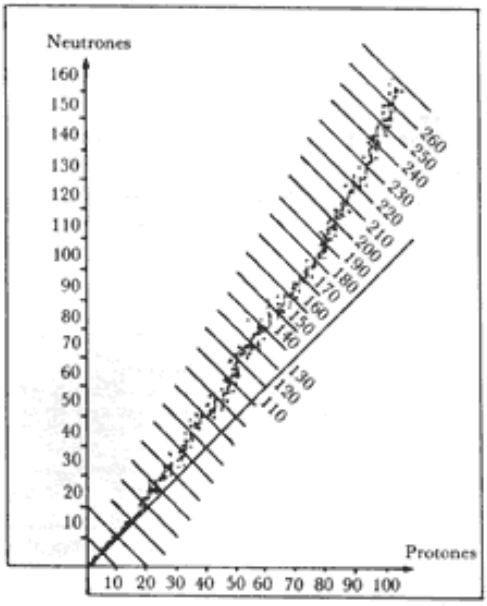


Figura 8. Respresentación del número de neutrones en función del número de protones de los diferentes núcleos. A lo largo de la línea oblicua se encuentran aquellos núcleos ligeros con igual número de protones y neutrones. (Referencia: Fernández-Valverde, M., *Ciencia y Desarrollo* 23, p. 880, 1978.)

LOS ISÓTOPOS RADIACTIVOS Y LAS RADIACIONES QUE EMITEN

Se ha comentado antes que algunos isótopos de elementos que se encuentran en la naturaleza son inestables. Esto significa que sus núcleos emiten radiaciones o partículas, o ambas, y se descomponen espontáneamente, formando átomos del mismo o de otros elementos. A estos isótopos inestables se les llama isótopos radiactivos. Mientras que el hidrógeno-l y el hidrógeno-2, o deuterio, son isótopos estables del elemento hidrógeno, el tritio es radiactivo y se desintegra emitiendo radiación beta. Asimismo, el carbono-12, isótopo estable, tiene 6 neutrones y 6 protones, mientras que el carbono-14, con 6 protones y 8 neutrones, es radiactivo. Estos isótopos radiactivos se encuentran fuera de la línea de estabilidad ya discutida anteriormente. La radiación alfa, beta y gamma provienen del núcleo atómico (Fig. 9).

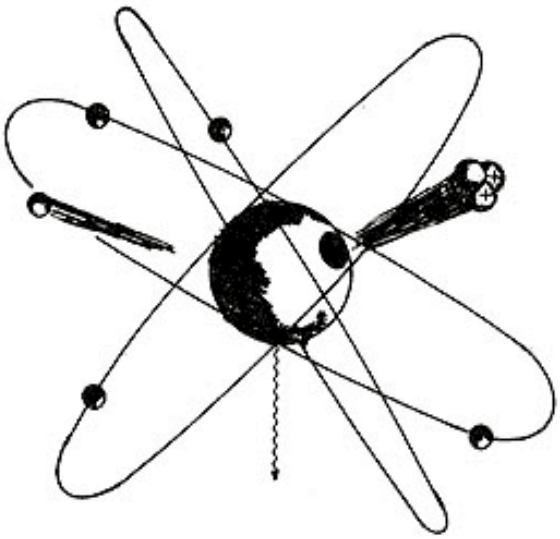


Figura 9. Las radiaciones alfa (α), beta (β) y gamma (γ) provienen del núcleo atómico. (Referencia: Segovia, *Naturaleza* 5, p. 107, 1974.)

Decaimiento alfa (α)

Soddy describió el modo en que un átomo cambia al emitir una partícula alfa, la cual está constituida por un núcleo de helio, formado por cuatro nucleones: dos protones y dos neutrones (véase, adelante, la Fig. 31).

Cuando un núcleo decae por la emisión de una partícula alfa su masa atómica disminuye en cuatro unidades, ya que pierde dos neutrones y dos protones, y su número atómico en dos unidades, pues pierde dos cargas positivas del núcleo. Como ejemplo de este decaimiento se tiene el caso de los átomos de radio-226 que tienen número atómico 88.

En un gramo de radio cada segundo se transforman 37 000 000 000 de átomos en átomos de otro elemento, el radón, que es un elemento gaseoso. A su vez, el número de masa del radón es 222 y su número atómico es 86. Difiere del radio por cuatro unidades de masa y dos unidades en su número atómico (Fig. 10). Estas 4 unidades de masa y dos unidades de número atómico no pueden desaparecer: se eliminan en forma de la partícula alfa. Si un átomo pierde una partícula alfa, con una carga +2, la carga total de su núcleo disminuye en dos. Si se grafica el número de neutrones en función del número de protones en una tabla como la del ajedrez, se puede observar cómo se transforma el núcleo del radio-226 en radón-222 durante la emisión de la partícula alfa (Fig. 11).

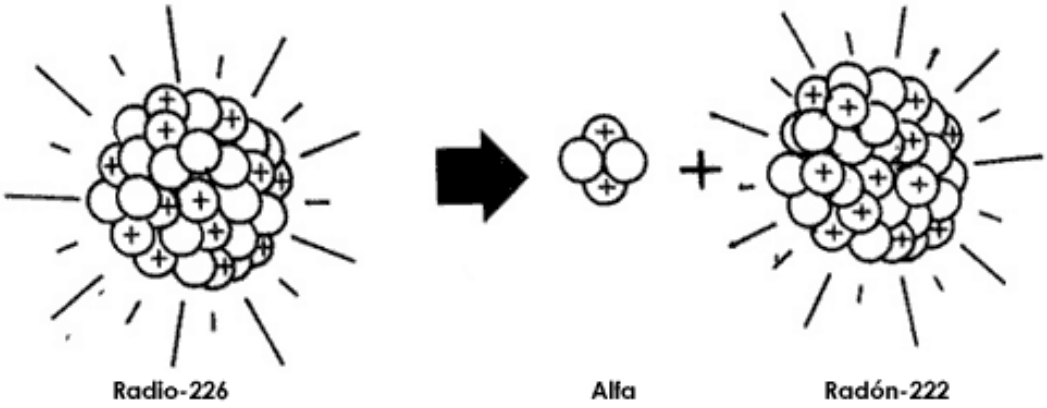


Figura 10. Decaimiento alfa del radio-226.

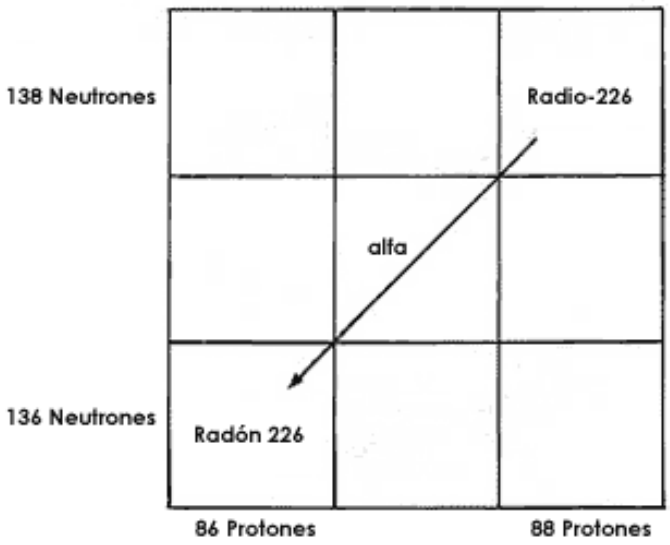


Figura 11. Decaimiento alfa del radio-226.

*Decaimiento beta (*β)

Existe otro tipo de decaimiento radiactivo, por emisión de las partículas beta. Las partículas beta emitidas por los núcleos son electrones. Las radiaciones emitidas por el uranio, torio y otros elementos naturales incluyen electrones de carga negativa; pero ahora se sabe que también existen núcleos inestables que emiten electrones positivos: a los primeros también se les llama negatrones; a los segundos se les denomina positrones. Estos electrones no deben confundirse con los electrones que se mueven a grandes velocidades alrededor del núcleo del átomo.

Ya que la masa del electrón es sólo una pequeñísima parte de la masa del átomo, la emisión de una partícula beta prácticamente no altera el número de masa de un núcleo radiactivo. Sin embargo, la emisión de una partícula beta negativa se lleva una unidad de carga negativa del núcleo. Como consecuencia, éste se carga positivamente y el número atómico del átomo aumenta en una unidad. La emisión de una partícula beta positiva tiene precisamente el efecto opuesto, el núcleo pierde una carga positiva y el número atómico disminuye en una unidad.

Cuando el yodo-131 decae el emitir una partícula beta negativa nace un núcleo de xenón-131, que es un gas noble. En la figura 12 se grafica en forma de tablero de ajedrez este decaimiento; ahí se indica cómo se transforma el yodo en xenón, cuyo núcleo tiene un protón más que el yodo.

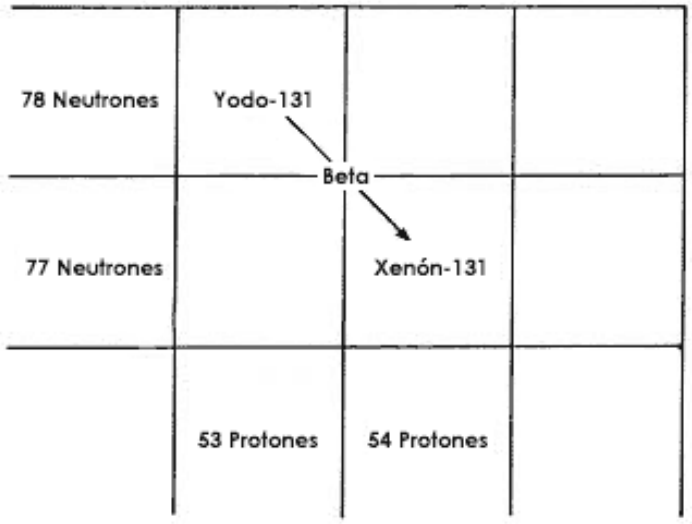


Figura 12. Decaimiento beta negativo.

Por otra parte, cuando el cobre-64 decae al emitir una partícula beta positiva nace también un núcleo nuevo, en esta ocasión el níquel-64. La gráfica de la figura 13 muestra este decaimiento e indica cómo se transforma el cobre en níquel, cuyo núcleo tiene un protón menos que el cobre.

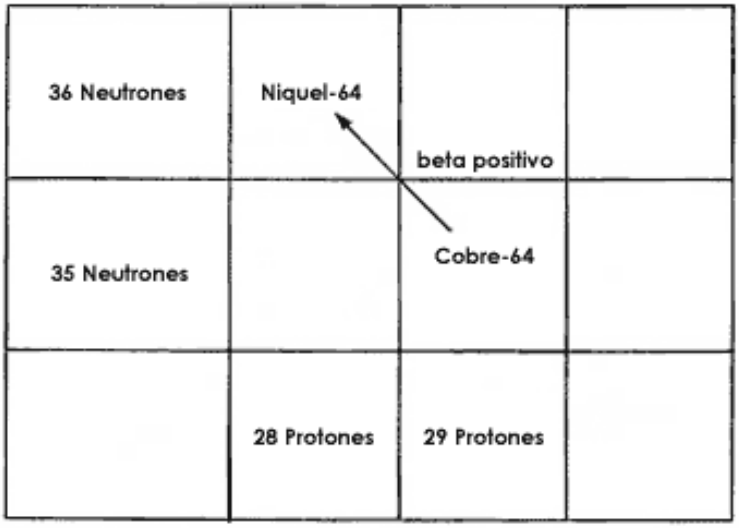


Figura 13. Decaimiento beta positivo.

Decaimiento gamma (γ)

Finalmente, los rayos gamma, en la mayoría de los casos, acompañan a la emisión de partículas alfa o beta y acarrean el exceso de energía que tiene el núcleo después de su decaimiento. Cuando un átomo emite un rayo gamma (sin carga), se altera su contenido energético pero no cambia el número de partículas, de modo que continúa siendo el mismo elemento y no cambia su posición en el tablero de ajedrez utilizado anteriormente.

Transición isomérica

Existen algunos isótopos radiactivos que tienen masas y cargas idénticas, es decir, que tienen el mismo número de protones y de neutrones, pero diferentes propiedades radiactivas, como son sus vidas medias y las energías de las radiaciones emitidas. Estos núcleos reciben el nombre de isómeros nucleares. El isómero que presenta el estado de mayor energía, el más excitado, recibe el nombre de isómero en estado metaestable, y al de menor energía, se le llama isómero en estado base. Un núcleo metaestable puede decaer, por emisión de rayos gamma, a su isómero en el estado base. La transición de un estado a otro se llama transición isomérica. Por ejemplo, el selenio 81 m emite radiación electromagnética y pasa a selenio 81 en el estado base. A menudo, estos isómeros nucleares en el estado base también son radiactivos.

LA PENETRACIÓN DE LAS RADIACIONES NUCLEARES EN LA MATERIA Y LOS EFECTOS QUE PRODUCEN

Cada una de las radiaciones nucleares alfa, beta y gamma se caracteriza por su diferente poder de penetración en la materia. Las partículas alfa son frenadas por una hoja de papel, que no les permite continuar su trayectoria, mientras que esta misma hoja sí permite pasar a las partículas beta y a la radiación gamma; una hoja delgada de aluminio como de 1 mm de espesor sólo deja pasar una pequeña fracción de la radiación beta y casi la totalidad de la radiación gamma; una placa de plomo intercepta la radiación gamma, dejando pasar solamente una fracción de ella (Fig. 14).

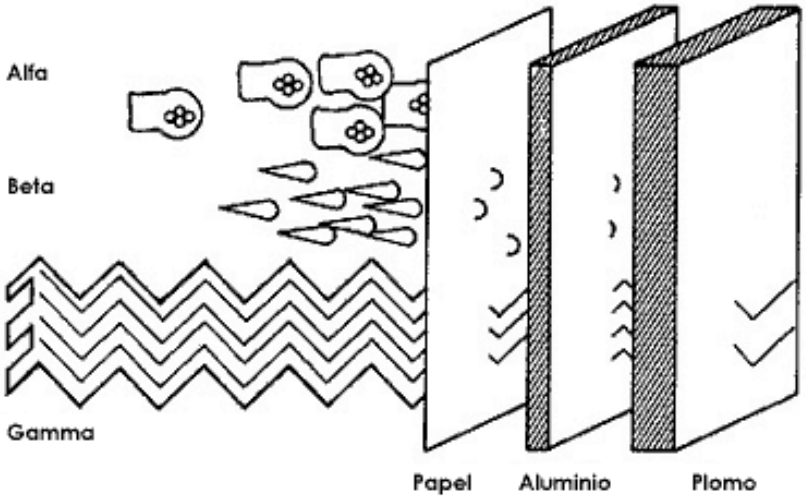


Figura 14. Las partículas alfa son frenadas por una hoja de papel, pero las partículas beta sí la atraviesan. Una hoja delgada de aluminio sólo deja pasar una fracción de las partículas beta y casi la totalidad de la radiación gamma. La placa de plomo es la única que intercepta la radiación gamma.

La poca penetración que tienen en la materia las radiaciones alfa y beta se debe principalmente a que son partículas cargadas eléctricamente y a que, por esto mismo, interaccionan con la materia. Existen dos tipos de interacción de las partículas cargadas con la materia: la ionización y la excitación. La ionización es el fenómeno en el que las partículas alfa y beta al recorrer el material le ceden parte de su energía arrancándole electrones de sus átomos y dejándolos cargados positivamente; a estas especies se les llama iones (Fig. 15). En este proceso también se liberan electrones, que, como sabemos, tienen cargas negativas. La excitación, por otra parte, consiste en que cuando las partículas cargadas, alfa o beta, atraviesan el material dejan a los electrones periféricos de sus átomos con mayor energía que la que tenían antes (Fig. 16). El átomo queda así con un exceso de energía, y puede volver a su estado original básico emitiendo en forma de luz la energía sobrante.

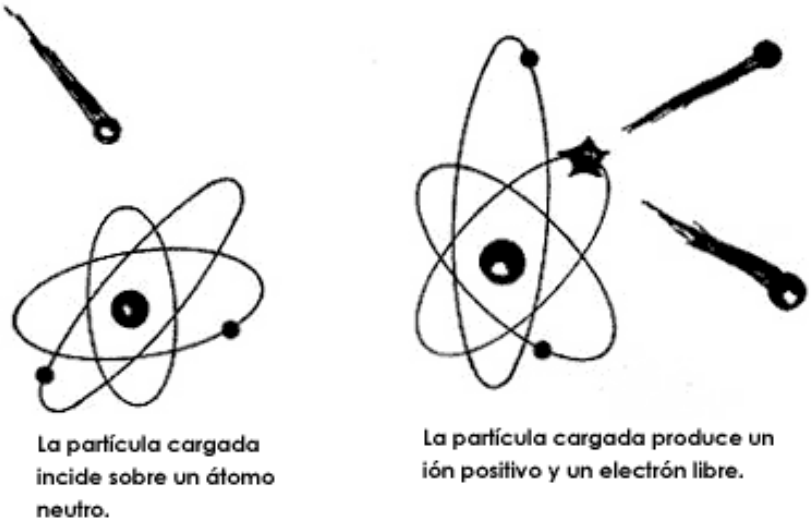


Figura 15. Fenómeno de ionización. (Referencia: Segovia, *Naturaleza* 5, p. 107, 1974.)

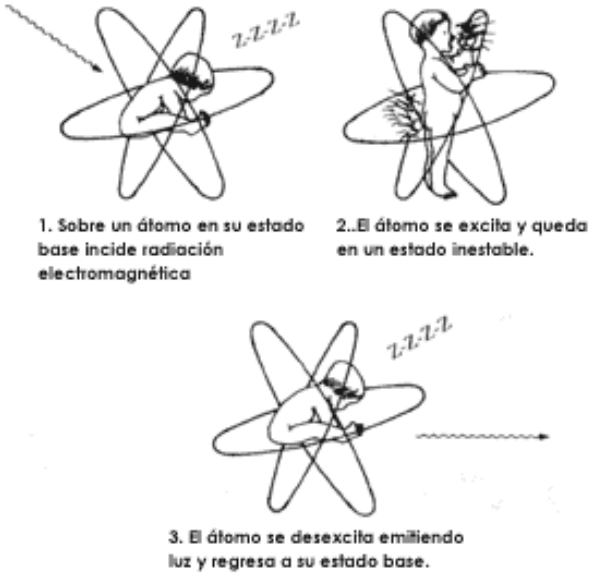


Figura 16. Fenómeno de excitación. (Referencia: Segovia, *Naturaleza* 5, p. 107, 1974.)

El número de iones liberados y el tipo de luz emitida en un material por el paso de la radiación dependen, entre otras cosas, de la energía que pierden las partículas cargadas alfa y beta al atravesarla. Pero ¿y la radiación gamma? No tiene carga ni masa y su poder de penetración en la materia es muy grande; sin embargo, esta radiación puede producir otros tres fenómenos, denominados efecto Compton, efecto fotoeléctrico y creación de pares (Fig. 17). Lo más importante de estos tres efectos es que en todos ellos aparecen partículas cargadas eléctricamente; las que producen a su vez, como fenómenos secundarios, la ionización y la excitación. Así pues, se puede generalizar diciendo que la radiación nuclear interacciona con la materia que atraviesa y produce de manera directa o indirecta ionización o excitación de los átomos y por este efecto se pueden medir.

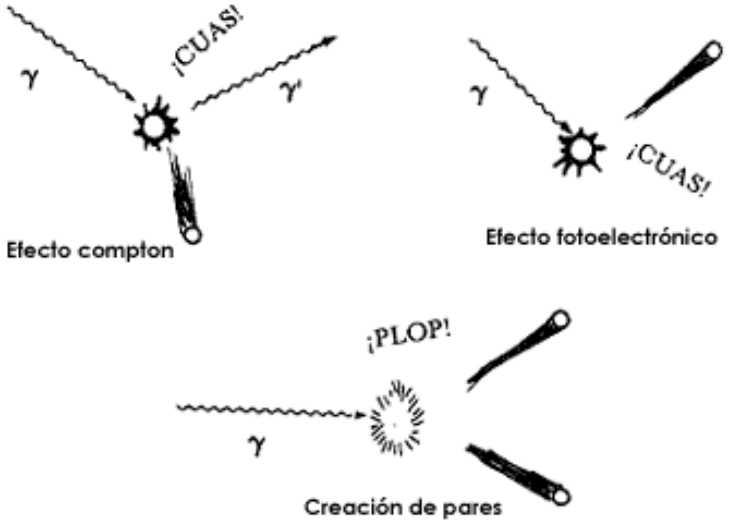


Figura 17. Tres fenómenos provocados por la radiacion gamma. (Referencia: Segovia, *Naturaleza* 5, p. 107, 1974.)

¿CÓMO SE MIDE LA RADIACTIVIDAD?

La radiactividad es un fenómeno que tardó mucho en descubrirse, pues el ser humano no puede ver ni oler ni oír las radiaciones emitidas por los elementos radiactivos: por lo general, sus sentidos no pueden percibirla. Pero en cuanto se descubrió que el uranio emitía radiaciones se empezaron a fabricar

instrumentos que ayudaran a los sentidos a detectar lo imperceptible. Las radiaciones nucleares sólo se pueden observar indirectamente a través de los efectos que producen al atravesar la materia, y los aparatos diseñados para medir su energía e intensidad están basados en estos efectos: 1) La producción de iones cargados eléctricamente, 2) la producción de excitación que se emite en forma de luz.

El primer método para medir la radiactividad precisamente fue el que le permitió a Becquerel descubrirla. En efecto, la placa fotográfica es un detector de radiactividad que se ennegrece en menor o mayor grado cuando la radiación nuclear incide en ella. Mayor ennegrecimiento indica presencia de mayor cantidad de radiaciones nucleares. Becquerel se dio cuenta del carácter ionizante de las emanaciones del uranio y utilizó para medirlas un aparato ya conocido en su época, el electroscopio, que se utilizaba para medir corriente eléctrica.

El fenómeno de ionización puede observarse gracias a que los iones cargados positivamente y los electrones cargados negativamente pueden ser acelerados por un campo eléctrico, pasar por un filamento y generar así una corriente eléctrica que se mide con un aparato apropiado. Mayor corriente eléctrica indica la presencia de fuentes radiactivas de mayor intensidad. La respuesta del equipo detector puede observarse en otro dispositivo que registre las radiaciones detectadas: un escalador, una bocina o una bombilla eléctrica (foco).

El fenómeno de excitación electrónica puede observarse gracias a los destellos luminosos que se producen al desexcitarse los átomos excitados. Estos destellos luminosos se pueden observar en ocasiones directamente y en otras ocasiones requieren de ayuda de dispositivos que puedan analizar la luz de esos destellos.

Para detectar partículas alfa se requieren ventanas extremadamente delgadas, pues de otra forma estas partículas se frenan en la ventana y no la pueden penetrar. También se utilizan ventanas especiales para detectar partículas beta, cuando no se requiere que sean tan delgadas como las utilizadas para detectar las partículas alfa.

La radiación gamma es mucho más penetrante. Puede pasar a través de las paredes de un contador ordinario, por lo que no requiere de ventanas especiales. La facilidad o dificultad con que una radiación pasa a través de una pared o una ventana de un detector ayuda para identificarla. Por ejemplo, la partícula alfa no atraviesa las ventanas que se emplean para detectar partículas beta. Una lámina delgada de metal colocada sobre la ventana para medir partículas beta excluirá a estas partículas beta, pero no detendrá a la radiación gamma.

Como ejemplo de detectores, mencionaremos el inventado por Geiger y que por ello lleva su nombre; se basa en el fenómeno de la ionización. Se puede construir en muchas diferentes formas y tamaños; la forma cilíndrica es generalmente la más sencilla de construir.

El material que se usa para fabricar un detector de este tipo es un gas confinado en un recipiente cubierto con una capa metálica en el interior. Al aplicarse una diferencia de potencial en los electrodos se pueden medir tanto los electrones como los iones positivos producidos durante el proceso de ionización al pasar la radiación nuclear por el gas confinado. La figura 18 muestra un cilindro lleno de un gas; el electrodo negativo es el alambre central, y el positivo la capa metálica del tubo mismo. Al conectarse el sistema a una fuente de voltaje se crea una diferencia de potencial. Cuando el voltaje aumenta, también aumenta la cantidad de electrones que pasan por el alambre (Fig. 18).

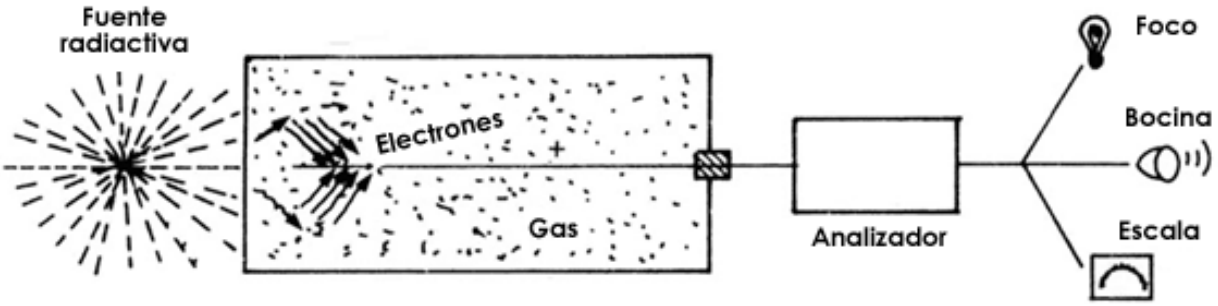


Figura 18. El detector Geiger mide la radiactividad. (Referencia: Segovia, *Naturaleza* 5, p. 109, 1974.)

Cada isótopo radiactivo emite radiación de energía característica; y gracias a que esta radiación es siempre la misma, se pueden identificar los átomos que las emiten. En la actualidad se utiliza un detector apropiado acoplado a un equipo que se conoce con el nombre de analizador multicanal, el cual, además de detectar la radiación emitida por cada isótopo radiactivo, puede determinar la energía de ésta. Cuando la radiación incide en el detector se produce una señal o pulso eléctrico, y el tamaño de este pulso depende de la energía absorbida por el detector. El analizador multicanal tiene una serie de pequeñas ventanas, denominadas canales; cada una de ellas acepta sólo los pulsos que poseen una altura determinada y los acumula. La información que se obtiene después de un cierto tiempo se traduce en un espectro de energías, que se construye haciendo una gráfica del número de cuentas acumulado en cada canal en función del número de éste, es decir, de la energía (Fig. 19).

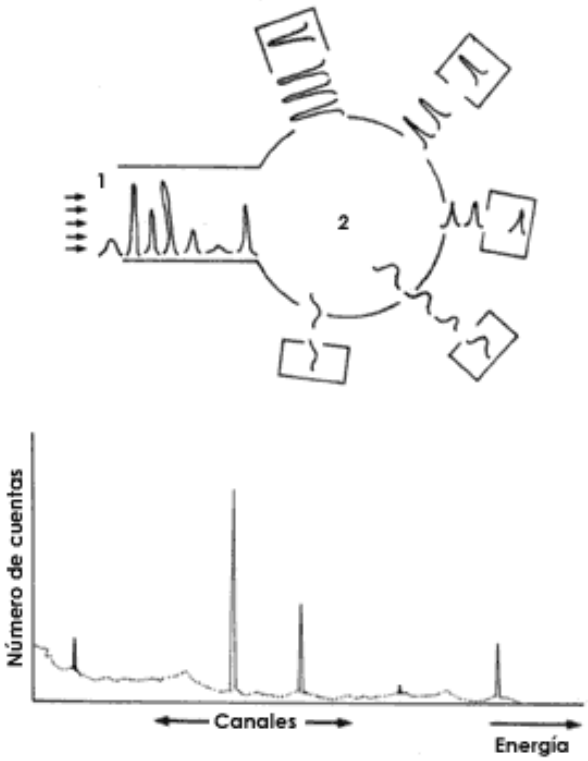


Figura 19. ***Arriba:*** **Esquema de una analizador multicanal.** ***1)*** **Llegan todos los pulsos.** ***2)*** **Los pulsos se acumulan en los canales después de ser clasificados en función de su altura, es decir, de la enregía.** ***Abajo:*** **Espectro gamma característico del sodio de masa 24. Este espectro fue obtenido con un detector de germanio-litio acoplado a un analizador de 4 000 canales. (Referencia: Jiménes Reyes, *Ciencia y Desarrollo* 23, p. 67, 1978.)**

III. ¿SE PUEDE PRODUCIR LA RADIACTIVIDAD?

UNO DE los eslabones de la cadena de descubrimientos del siglo XX, y que tuvo consecuencias muy importantes en el desarrollo de la ciencia, fue encontrar que la radiactividad, descubierta por Becquerel y los esposos Curie en la naturaleza, se podía producir en forma artificial.

LOS DESCUBRIDORES DE LA RADIACTIVIDAD ARTIFICIAL: JEAN FRÉDÉRIC E IRÈNE JOLIOT-CURIE

Jean Frédéric Joliot fue el hijo menor de la familia Joliot; nació en París, Francia en 1900. En la universidad fue alumno de Paul Langevin, quien influyó mucho en él. Al salir de la universidad, trabajó en la industria; sin embargo, después de realizar su servicio militar, pudo dedicarse a su verdadera vocación: la ciencia. Langevin le ofreció una beca, la cual Frédéric aceptó de inmediato, y fue así como realizó uno de sus más grandes anhelos: trabajó de técnico de Marie Curie en el Instituto del Radio.

Irène Curie, primogénita de los científicos Pierre y Marie Curie, nació en París, Francia en 1897. Durante la primera Guerra Mundial, a los 17 años, ya ayudaba a su madre en los servicios radiológicos que proporcionaba ésta en los hospitales. Marie Curie pudo observar la capacidad de su hija mayor y, después de la guerra, le dio la oportunidad de trabajar en el Instituto del Radio con ella: así nació una colaboración muy estrecha entre madre e hija.

En 1926 se casaron Frédéric Joliot e Iréne Curie. En 1931 Frédéric logró tener un puesto para realizar investigación, lo que le permitió continuar su trabajo, justo en el momento en que se le vencía su beca en el Instituto del Radio.

El primer trabajo en colaboración de Irène y Frédéric consistió en la obtención de una gran cantidad de polonio, uno de los elementos radiactivos descendientes del radio, acumulado en el transcurso de los años en el radio que el Instituto del Radio disponía gracias a Madame Curie. Utilizaron esta muestra en la preparación de una muestra de polonio de gran pureza y de actividad específica elevada, empleando todo el que extrajeron del radio.

La colaboración científica de Irène y Frédéric fue ampliamente conocida; sus nombres aparecieron en muchos artículos de la Academia de Ciencias, y fueron conocidos en todo el mundo científico como Frédéric e Irène Joliot-Curie.

LA RADIACTIVIDAD ARTIFICIAL

Uno de los experimentos que realizaron los esposos Joliot-Curie (Fig. 20) en esa época consistió en utilizar su fuente de polonio, elemento emisor de partículas alfa. Bombardearon con partículas alfa una lámina delgada de aluminio y, para determinar la interacción de estas partículas con el aluminio, midieron la forma en que variaba la intensidad de la radiación en el otro lado de la hoja de aluminio. Su sorpresa fue grande cuando encontraron que aún después de interrumpir el bombardeo la placa de aluminio seguía emitiendo radiación; se dieron cuenta, además, de que la intensidad de la radiación emitida por la placa de aluminio disminuía siguiendo la ley del decaimiento radiactivo encontrada por Rutherford y Soddy, y que la vida media de este material radiactivo era muy corta. ¿Qué era lo que estaban observando? Los Joliot-Curie habían descubierto que la radiactividad se puede producir artificialmente. En realidad, en este experimento habían encontrado una pieza más del rompecabezas del panorama nuclear. Descubrieron que partiendo del aluminio, que tiene 13 protones y 14 neutrones, terminaron con fósforo-30 (15 protones y 15 neutrones).

Figura 20. Frédéric e Irène Joliot-Curie con sus hijo Pierre y Hélène.

Pero el fósforo presente en la naturaleza, está constituido por una sola variedad atómica, el fósforo-31, con 15 protones y 16 neutrones. Así pues, habían descubierto el fósforo-30, el cual es un isótopo artificial que no se presenta en la naturaleza. La razón por la que no lo encontraban era evidente: es radiactivo, con una vida media de solamente catorce días. Su radiactividad era la fuente de la continua radiación de partículas que los Joliot-Curie habían observado.

Los Joliot-Curie habían producido el primer caso de radiactividad artificial. De hecho, habían descubierto la radiactividad artificial al producir un isótopo radiactivo del fósforo, que decae por emisión de una partícula beta de carga eléctrica positiva (β^+). Lo que observaron fue la desintegración del fósforo-30.

Así fue como el fenómeno misterioso, que Pierre y Marie Curie habían observado sin poderlo modificar, fue producido artificialmente por su hija y su yerno por medio de una reacción nuclear en la que el núcleo de un átomo había interactuado con una partícula alfa. La Academia de Ciencias de Suecia dio el premio Nobel de Química a Frédéric e Irène Joliot-Curie por sus trabajos sobre la síntesis de elementos radiactivos, siendo éste el tercer premio Nobel concedido a la familia.

La producción artificial de la radiactividad provocó una serie de nuevos descubrimientos. Inmediatamente se hizo evidente que, además de las partículas utilizadas por los esposos Joliot-Curie, podría existir otro tipo de proyectiles para producir la radiactividad artificial con más ventajas que las partículas alfa, que tienen cargas positivas y que son fuertemente repelidas por el núcleo del átomo. Uno de los descubrimientos más importantes fue el de Enrico Fermi, quien consideró la posibilidad de bombardear los núcleos con neutrones, partículas descubiertas en esa época por Chadwick, hecho que no sólo enriqueció el trabajo iniciado por los esposos Joliot-Curie, sino que sentó las bases de un fenómeno que cambiaría completamente el concepto que se tenía sobre el núcleo del átomo. Este fenómeno se conoce como fisión nuclear, y se volverá a hablar de él posteriormente en este libro.

El descubrimiento de la radiactividad artificial permitió ir llenando poco a poco los huecos que todavía existían en la tabla periódica de los elementos.

Así, después de casi 70 años de búsqueda infructuosa del elemento que Mendeleiev llamó ekamanganeso, los físicos italianos Perrier y Segre obtuvieron por primera vez, en forma artificial, trazas de este elemento. Por ser el primer elemento creado artificialmente se le dio el nombre de "tecnecio" originado en la palabra griega que significa artificio, creación (Fig. 21).

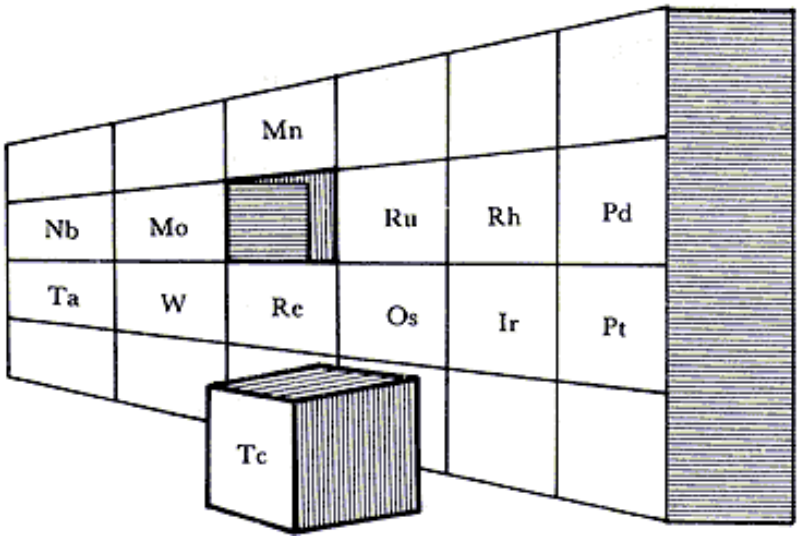


Figura 21. El primer elemento creado artificialmente fue un elemento radiactivo, el tecnecio, que llenó uno de los huecos de la tabla periódica de elementos.

Indice

IV. RADIACTIVIDAD EN LA NATURALEZA

LA NATURALEZA es una fuente inmensa de radiactividad, en donde, como ahora sabemos, existe un gran número de radisótopos, algunos de ellos de una vida media larguísima, quizás tan larga como la vida de la Tierra misma o más, y, por otro lado, radisótopos de vida media muy corta. La presencia de algunos de los radisótopos se liga a la radiación cósmica, proveniente del Universo.

¿QUÉ ES LA RADIACIÓN CÓSMICA?

La radiación cósmica primaria es aquella que se origina en el espacio exterior; está constituida por protones y partículas alfa de energía muy elevada. Al pasar a través de la atmósfera interactúa con elementos presentes en ésta, y como consecuencia de esta interacción se originan radiación gamma, electrones, neutrones, mesones y otras partículas energéticas, cuyo conjunto constituye lo que se conoce con el nombre de radiación cósmica secundaria (Fig. 22).

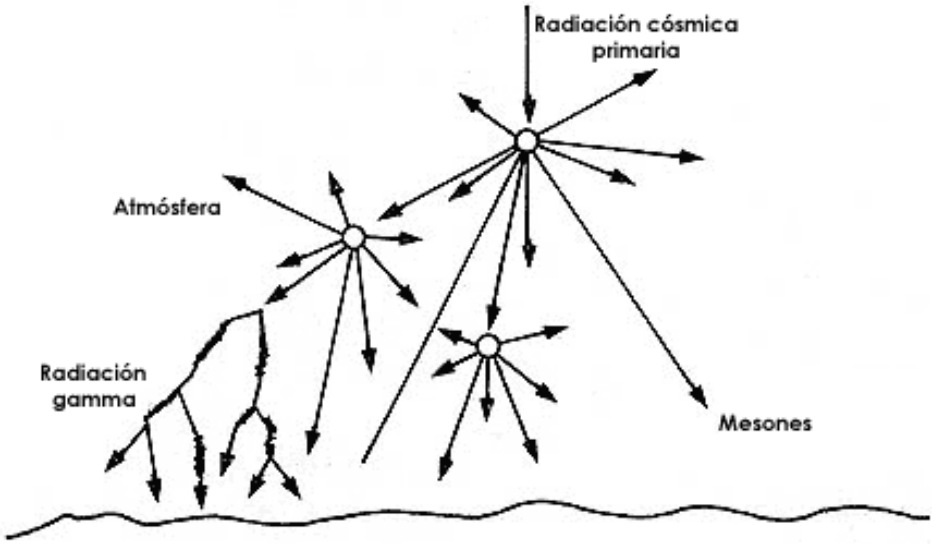


Figura 22. Efecto de la radiación cósmica al interactuar con los constituyentes de la atmósfera, (Referencia: Segovia y Bulbulian, *Ciencia y Desarrollo* 23, p. 75, 1978.)

La intensidad de la radiación cósmica es mayor en los sitios más elevados que en el nivel del mar: cuanto mayor es la altitud mayor es también la incidencia de los rayos cósmicos; contrariamente, la intensidad de la radiación cósmica disminuye considerablemente en las minas profundas.

LA MUERTE Y EL NACIMIENTO DE ÁTOMOS. LAS SERIES RADIACTIVAS NATURALES

Los materiales radiactivos naturales se pueden clasificar en tres categorías. La primera categoría está formada por los radisótopos primarios, que se llaman así por existir desde que se formó la Tierra, hace cinco mil millones de años, y son aquellos que tienen una vida media muy larga, quizás como la edad de la Tierra o más. El potasio tiene un isótopo radiactivo de vida muy larga y es parte importante de la radiactividad natural; el rubidio, el samario y el lutecio también tienen isótopos radiactivos y contribuyen a la radiactividad natural, pero en menor escala.

El torio y el uranio se encuentran en cantidades variables tanto en el suelo como en las rocas. Cerca de los yacimientos de uranio y torio, la radiactividad se encuentra en concentraciones muy superiores a la normal. La mayoría de los radisótopos primarios proviene del uranio-238, el torio-232 y, finalmente, el uranio-235.

Ya desde 1900 se había descubierto que los compuestos de uranio recién preparados eran sólo débilmente radiactivos, pero que su radiactividad aumentaba con el tiempo. Fueron Ernest Rutherford y su colaborador Frederick Soddy quienes encontraron que cuando un átomo de uranio emite una partícula alfa su naturaleza cambia. Se convierte en un nuevo tipo de átomo, con diferentes características radiactivas, produciendo radiaciones más intensas que las del propio uranio.

Este segundo átomo se descompone a su vez formando un tercer tipo de átomo, y así sucesivamente. Mostraron que existen cadenas de núcleos emparentadas entre diversos cuerpos radiactivos, que un átomo muere y da lugar al nacimiento de uno o varios átomos de especies diferentes. Estos nuevos átomos radiactivos son los radisótopos que pertenecen a la segunda categoría; se denominan radisótopos secundarios y se van formando por el decaimiento de otros isótopos radiactivos. Como tienen vidas medias muy cortas comparadas con la edad de la Tierra, no podría explicarse su existencia si no fuera porque se están formando continuamente por desintegración de los isótopos primarios.

Las investigaciones sobre las desintegraciones sucesivas han permitido agrupar las sustancias radiactivas en series o familias. Gracias a la observación de estos átomos y sus productos de decaimiento se han podido conocer varios elementos desconocidos hasta hace relativamente poco.

En general, las sustancias que son las cabezas de estas series tienen una masa muy elevada. Una serie radiactiva completa se inicia con el *padre*, o cabeza de serie, y termina en el isótopo estable; los isótopos generados por desintegraciones sucesivas son los descendientes o *hijos.*

El uranio-238 tiene una vida media enorme, de cuatro mil quinientos millones de años; en toda la historia de la Tierra, sólo una parte de la reserva original de uranio ha tenido posibilidades de desintegrarse. Este isótopo del uranio es padre o cabeza de una de las series radiactivas naturales que incluye el radio y el polonio y acaba finalmente en el plomo, que no es radiactivo. Ahora se sabe que la "radiación uránica" observada por Becquerel se debe a la inestabilidad del uranio-238. Al desintegrarse, emite una partícula alfa y se transforma en torio-234; éste origina otro núcleo inestable, y así sucesivamente (Fig. 23(a)).

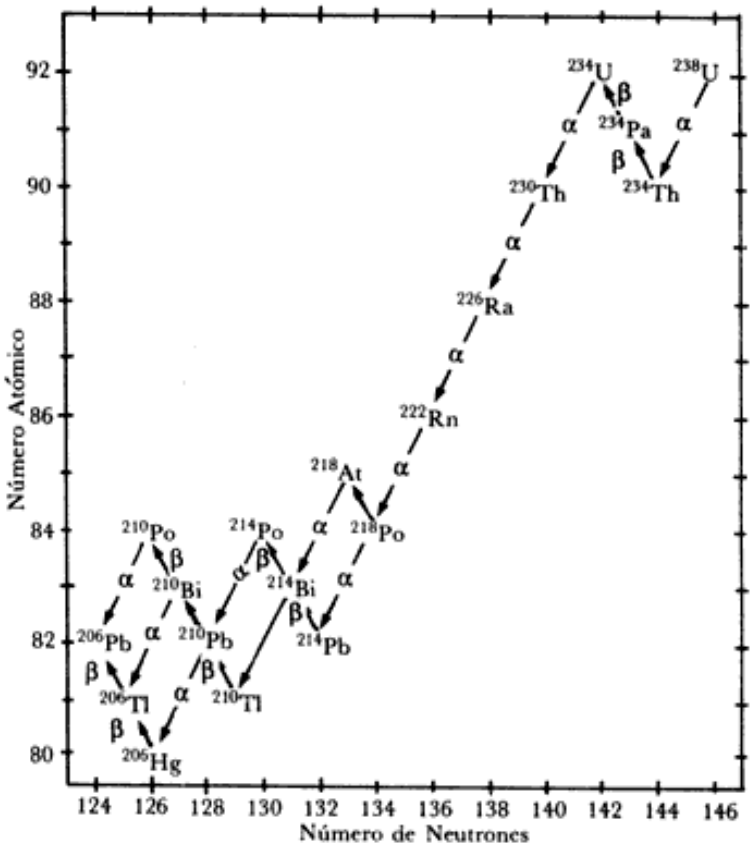


Figura 23. (a) Serie radiactiva del uranio-238. (Collins, C. H., J.C. Andrade y K.E. Collins, *Química Nova* 4, p. 57, 1981.)

La vida media del radio es poco menor de mil seiscientos años. Al cabo de varios miles de años no quedaría nada de radio en la corteza terrestre de no ser porque se forma constantemente a través de la desintegración del uranio. Esto mismo es cierto para otros productos del decaimiento del uranio cuyas vidas medias equivalen en algunos casos a fracciones de segundo solamente.

Además del uranio-238, que, como hemos visto, tiene una vida media muy larga, existe un isótopo radiactivo del elemento torio, el torio-232, que se desintegra aún más lentamente que el uranio-238, siendo su vida media de catorce mil millones de años, mientras que el torio-234, que pertenece a la serie del uranio-238, tiene una vida media de sólo 24 días. Con el torio-232, precisamente, empieza también una segunda serie radiactiva. El torio-232 encabeza esta segunda serie radiactiva conocida corno serie del torio, cuyo último miembro es el plomo de masa 208, que es estable (Fig. 23(b)).

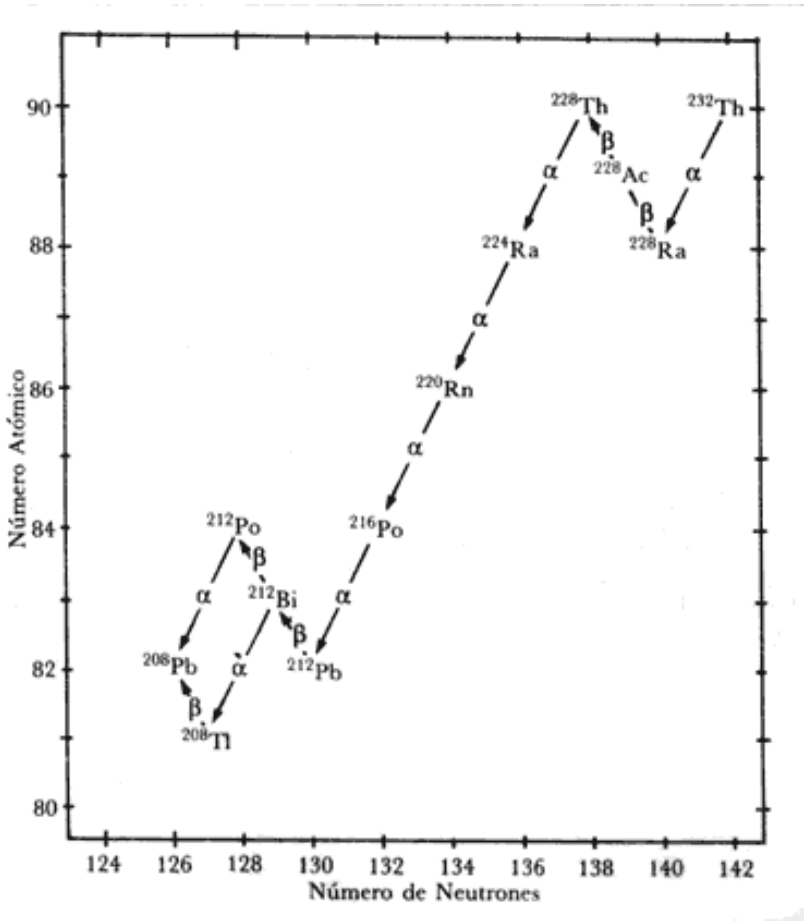


Figura 23. (b) Serie radiactiva del torio -232.

El uranio-235, de una vida media de sólo 700 000 000 de años, encabeza una tercera serie y su último miembro de la familia es también otro isótopo estable del plomo, de masa 203 (Fig. 23(c)).

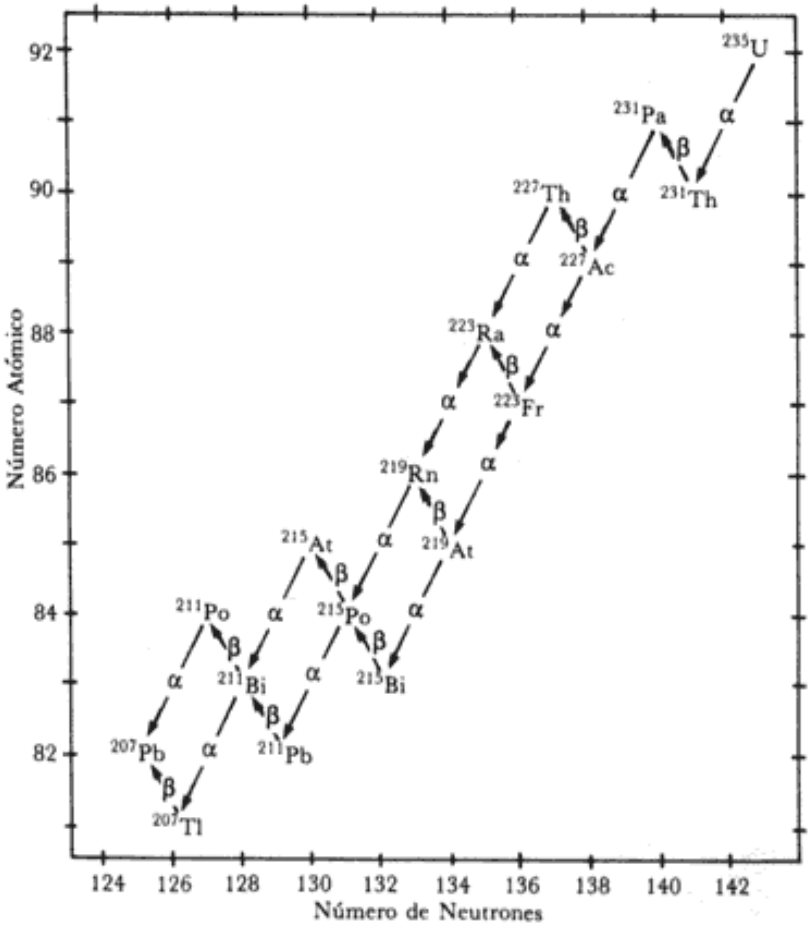


Figura 23 (c) Serie radiactiva del uranio-235.

En cada una de las series radiactivas existe un isótopo del gas noble radón que escapa del material natural y se incorpora a la atmósfera. Estos gases radiactivos son el radón-220, el radón-222 y el radón-219.

RADISÓTOPOS INDUCIDOS

Finalmente, la tercera categoría de radisótopos pertenece a los radisótopos inducidos, los cuales se están produciendo continuamente en la naturaleza por medio de reacciones nucleares. Ahora sabemos que un fenómeno que se repite continuamente en la naturaleza es la producción de isótopos radiactivos. Los radisótopos inducidos se producen en la Tierra por el efecto de la radiación cósmica sobre los elementos en la Tierra. Entre los isótopos radiactivos formados por la interacción de los rayos cósmicos con diversos elementos se encuentra el carbono-14.

El carbono-14 es un isótopo radiactivo inducido. Desde la formación de la Tierra, el carbono-14 se ha creado en la atmósfera superior a causa de la transformación del nitrógeno por las reacciones de los rayos cósmicos. Los rayos cósmicos producen un gran número de partículas al entrar a la atmósfera; entre ellas, neutrones muy energéticos, los cuales reaccionan con los elementos existentes en la Tierra. En este caso particular, reaccionan con el nitrógeno-14, convirtiéndolo en otro elemento: el carbono-14, primero por medio de la captura de un neutrón y después por medio de un decaimiento beta. Este carbono reacciona con el oxígeno de la atmósfera y se convierte en bióxido de carbono, y a medida que el carbono-14 se desintegra nuevamente, transformándose en nitrógeno-14, se alcanza un estado de equilibrio entre las velocidades de producción y la de desintegración.

Cada gramo de materia viva contiene suficiente carbono radiactivo para dar alrededor de 16 desintegraciones por minuto. Al morir el organismo, deja de asimilar el carbono-14 y el radisótopo existente en el organismo decae con una vida media de más de 5 000 años.

LA RADIACTIVIDAD Y EL HOMBRE

La radiación natural a la que está expuesta la población proviene de la desintegración de isótopos radiactivos en la corteza terrestre, de la radiación cósmica y de los isótopos radiactivos que forman parte de los seres vivos, también llamada radiación interna. La primera depende del tipo de rocas que existen en el lugar, la segunda, de la altura sobre el nivel del mar, y la tercera, de la edad del ser humano y su dieta. Existen además otras fuentes de radiación que afectan a la población: las que se utilizan en equipo médico, o bien las que provienen de concentraciones muy elevadas de radisótopos en recintos cerrados y, en general, del extenso uso que se ha dado en este siglo a la energía nuclear. Es importante conocer el origen, la concentración y los efectos de las radiaciones nucleares, ya que producen modificaciones en la materia que atraviesan y, por lo tanto, pueden afectar el desarrollo y la estructura de las células vivas. En particular nos referimos a la radiación que recibe la población en forma continua y no a aquella que se debe a accidentes derivados del uso de la energía nuclear o a la aplicación de tratamientos médicos.

Actualmente se realizan nuevas investigaciones sobre el efecto de las radiaciones naturales en los seres vivos. Desde que se encontró que los isótopos radiactivos se pueden producir artificialmente, se han multiplicado en todo el mundo los centros de trabajo que laboran con estos isótopos. Simultáneamente aumentó el interés de los científicos por conocer los efectos de estas radiaciones. Se han formado comités internacionales que tienen a su cargo el estudio y la constante revisión de las dosis de radiación que recibe el personal que labora con dichos materiales.

A diferencia de la radiación artificial, la natural se consideró durante décadas como un fenómeno normal que existía en la naturaleza, de manera que el hombre estaba condicionado a ignorarla. Aunque en la literatura especializada aparecían en ocasiones informes de altas intensidades de radiación en casas y en ciertas zonas habitadas, éstos se consideraban como curiosidades de conversación. Esta forma de pensar cambió al finalizar la década de los setenta, pues la radiación natural se habia duplicado, y ciertos laboratorios, preocupados por sus efectos, iniciaron estudios en particular sobre los daños provocados por radiación de los descendientes del radón en los pulmones.

Radiactividad en la corteza terrestre

Los elementos radiactivos naturales se encuentran distribuidos en forma bastante uniforme en las rocas y suelos de la corteza terrestre, la cual está constituida principalmente por basalto y granito. La mayor parte de esta radiactividad proviene de las series radiactivas naturales, tiende a escapar de la corteza terrestre y puede ser arrastrada por el agua o algún otro fluido para migrar hacia la superficie terrestre y pasar finalmente a la atmósfera. El uranio es mucho más abundante en la naturaleza que otros elementos comunes; se encuentra en una proporción 40 veces mayor que la plata y 800 veces mayor que el oro. En la corteza, los granitos contienen una concentración de uranio que varía de 2 a 6 partes por millón aproximadamente y una concentración de torio de tres a cinco veces mayor. Existen regiones en las que, por distintas causas geológicas y geoquímicas, las concentraciones de los elementos radiactivos son anormalmente altas: es en los yacimientos de minerales radiactivos donde existen mayores cantidades de uranio y torio.

Radiactividad en la atmósfera

Los elementos radiactivos que se encuentran en la atmósfera se originan en la corteza terrestre y en el espacio exterior. Ya se ha visto que aquellos que provienen de la corteza terrestre son básicamente los isótopos del radón, que son gases y se incorporan a la atmósfera.

Además del radón que emana continuamente de la superficie terrestre, existen fenómenos como las erupciones volcánicas que pueden arrastrar hacia la atmósfera grandes cantidades de gases radiactivos, provenientes del magma. Los gases se incorporan a la atmósfera y se dispersan en mayor o menor grado dependiendo de las condiciones meteorológicas imperantes; al difundirse en el aire el material radiactivo se desintegra y origina una serie de hijos, en muchas ocasiones también radiactivos, que se fijan en partículas suspendidas en la atmósfera. En los recintos cerrados, como las casas habitación, la radiación

proviene principalmente del radón y de sus hijos (Fig. 24).

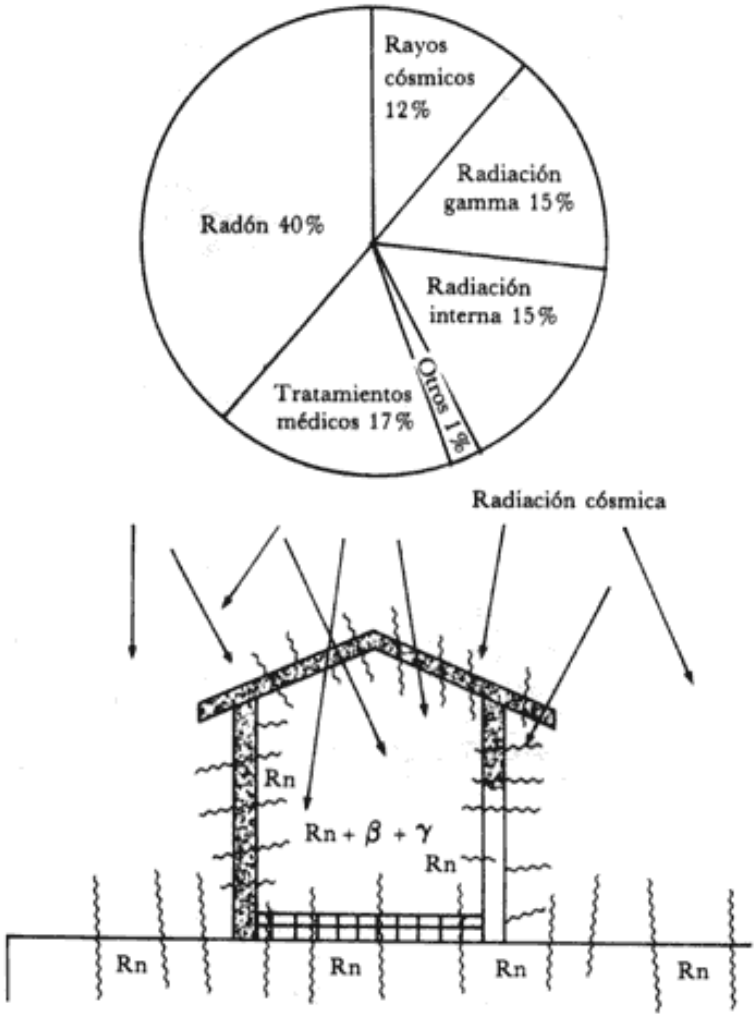


Figura 24. ***Arriba:*** **Porcentajes de dosis universal.** ***Abajo:*** **Fuente de radón en casas habitación. (Referencia: Segovia y Bulbulian,** ***Ciencia y Desarrollo*** **70, p. 41, 1986.)**

Radiación interna

La radiación interna proviene de las sustancias radiactivas presentes en los alimentos, en el agua y en el aire, las cuales, al ser ingeridas o inhaladas, se absorben en los tejidos vivos. Los principales isótopos radiactivos que contiene el cuerpo humano son el potasio-40, el carbono-14 y el tritio, pero también pueden encontrarse cantidades menores de algunos elementos pesados como el radio, el plomo o el uranio.

Los efectos del radón en los seres vivos

La radiación que existe en el *habitat* se encuentra clasificada en forma esquemática en la figura 24. En ésta puede apreciarse que el mayor porcentaje de la dosis de radiación que recibe la población lo proporcionan el radón y sus descendientes, y es precisamente este elemento el que ha mostrado la importancia que puede tener la radiación natural para el hombre y la urgencia de estudiar sus efectos en los seres vivos.

El radón o cualquiera de sus descendientes al ser inhalados se adhieren a las paredes y membranas del sistema respiratorio de los seres vivos, y su desintegración es una fuente de radiación en el epitelio pulmonar. El radón es un gas, por lo tanto podrá eliminarse por exhalación, y sólo sus hijos, que se desintegran dentro del pulmón, podrán producir algún efecto en el ser humano. Aunque las concentraciones promedio del radón en la atmósfera no son particularmente dañinas, cuando este elemento

queda atrapado en algún recinto cerrado como una cueva, una mina, un sótano o una casa, su concentración puede aumentar considerablemente y causar daño en los seres vivos.

Las minas de uranio son las que generan mayor cantidad de radón; pero otros tipos de minas también pueden atrapar, en los túneles subterráneos, gran cantidad de este elemento. Así, en países como Suecia, antes de iniciar la industria minera de uranio, se consideró necesario imponer normas de seguridad para evitar que los trabajadores de las minas recibieran exceso de radiación emitida por los hijos del radón.

Radón en casas habitación

La gran mayoría de los materiales que el hombre utiliza en la construcción de casas habitación proceden de elementos que existen en la corteza terrestre, los cuales serán radiactivos en mayor o menor grado, dependiendo de su naturaleza y procedencia. Los isótopos radiactivos presentes en los materiales de construcción son principalmente los de uranio, del torio, los descendientes de ambos y el potasio-40. Como consecuencia, el hombre, que habita en el interior de edificios, se halla sometido a radiación, cuyo valor depende del tipo de materiales empleados (Fig. 24). A través del tiempo, el ser humano ha aumentado el lapso de permanencia en los edificios. Estudios recientes realizados muestran que los empleados y las amas de casa pasan 85 y 90% del día, respectivamente, dentro de edificios. En los países con climas extremosos, donde se aislan los recintos para evitar cambios de temperatura, el radón se incorpora al ambiente del recinto no ventilado y aumenta la concentración de los descendientes del radón. Las fuentes de radón en el aire de las casas se encuentran en el suelo y rocas sobre las cuales está construida la vivienda, en el agua, en el gas doméstico y los materiales de construcción.

La radiactividad en el habitat ha sufrido transformaciones, principalmente a causa de los cambios de costumbres del ser humano. Cada vez existe más conciencia sobre la importancia de conocer los contaminantes que circundan nuestra vida, y, en el caso de la radiactividad natural, se están estudiando sus alcances y el riesgo que ésta implica para los seres vivos. Aunque se trata de dosis bajas de radiación, éstas pueden ser importantes porque afectan a toda la población.

A medida que se avance en el conocimiento de las radiaciones naturales a las que se encuentran expuestos los seres vivos, se podrá investigar sistemáticamente su efecto sobre las células y la transferencia de la información genética.

V. ¿SE PUEDE TRANSFORMAR EL NÚCLEO DE UN ÁTOMO EN OTRO?

EFECTIVAMENTE, el núcleo de un átomo radiactivo, por ser inestable, se transforma, al decaer, en otro núcleo. Sin embargo, los átomos estables también pueden transformarse; esto se logra a través de las reacciones nucleares cuando los núcleos interactúan con otros núcleos, con partículas o con radiaciones de elevada energía. La primera reacción nuclear provocada por el hombre fue la transformación o transmutación de un elemento en otro: el sueño de los alquimistas.

EL SUEÑO DE LOS ALQUIMISTAS Y LA FÍSICA NUCLEAR

Durante la Edad Media el deseo de encontrar algún método de convertir un metal ordinario en oro era el estímulo principal de la investigación. Muchos alquimistas se esforzaron por encontrar la piedra filosofal, que, según suponían ellos, convertiría minerales y metales, como el mercurio y antimonio, en oro; querían encontrar la forma de transmutar un elemento en otro. Pero en el siglo XVII la alquimia entró en plena decadencia y ya en el siglo XVIII se transformó en la ciencia que ahora llamamos química. A finales del siglo pasado los científicos ya no pensaban en la transmutación de la materia y creían que los elementos químicos descubiertos eran definitivamente estables, que el mercurio y antimonio serían siempre mercurio y antimonio y el oro sería siempre oro. Nunca imaginaron que la transmutación de un elemento en otro volvería a ser un tema de actualidad.

Cuando se estableció que las propiedades químicas del átomo dependen del comportamiento del núcleo y se comprendieron los cambios y las transformaciones que acompañan a la radiactividad, muchos investigadores concibieron una idea verdaderamente fascinadora. Pensaron que el hombre podría, tal vez, alterar el núcleo de un átomo estable convirtiendo deliberadamente un elemento en otro distinto.

Una vez más aparece en esta historia ese famoso personaje ya bien conocido en las páginas de este libro, Ernest Rutherford. Este científico pensó que era posible que el núcleo de un átomo pudiera alterarse al ser bombardeado con partículas alfa, como las que emite la materia radiactiva. Bajo condiciones favorables, estas partículas debieron de pasar muy cerca del núcleo, en cuyo caso podrían o bien desarreglar su forma original, o bien, tal vez, combinarse con el mismo. Con esta idea bombardeó diversos gases con partículas alfa, y halló que en ocasiones una partícula alfa se combinaba con un núcleo de nitrógeno y que la combinación resultante emitía inmediatamente un protón y se transformaba finalmente en uno de los isótopos de oxígeno. Ésta fue la primera vez que se produjo deliberadamente la transmutación de un elemento químico estable en otro. Desde entonces, casi todos los elementos conocidos han sido transmutados por medio de bombardeo con diversas partículas. En esta forma, Rutherford llevó triunfalmente a cabo la primera reacción nuclear hecha por el hombre.

Esto es un auténtico ejemplo de transmutación, de conversión de un elemento en otro. En cierto modo, es la culminación de los viejos anhelos alquimistas, pero, desde luego, implica elementos y técnicas que los alquimistas desconocían por completo. Esta rección ahora se puede expresar en forma taquigráfica:

$$^{14}N\ (\alpha, p)^{17}\ 0$$

queriendo decir con esto que el átomo de nitrógeno-14 al capturar una partícula alfa, forma un núcleo compuesto muy inestable que al buscar su estabilidad emite inmediatamente un protón transformándose así en un átomo de oxígeno-17.

Hoy en día, el mercurio puede transformarse de hecho en oro, mediante técnicas nucleares; pero el costo actual de esta transmutación sería tan elevado que el proceso resultaría un fracaso económico. Como muchos sueños, el de los alquimistas resultó finalmente no ser económicamente tan prometedor como parecía.

Ahora se conocen gran número de reacciones nucleares, entre ellas la reacción de captura de un neutrón. Los núcleos al capturar un neutrón forman primero un núcleo compuesto excitado que a su vez, por emisión de rayos gamma de muy elevada energía, decae a un estado menos excitado. Esta interacción se conoce con el nombre de reacción nuclear (n, γ)

LA FISIÓN NUCLEAR: EL ROMPIMIENTO DEL NÚCLEO DEL ÁTOMO

Otra reacción nuclear sumamente importante en la serie de descubrimientos científicos es el rompimiento del núcleo del átomo. Para hablar de este fenómeno, situémonos en el ambiente científico de los años treinta. En 1934 ya se había descubierto la radiactividad artificial. Los científicos de esta época se pusieron a trabajar inmediatamente en producir nuevos núcleos en forma artificial. En particular en estas áreas se distinguieron tres grupos de investigadores encabezados por científicos notables: en Italia, Enrico Fermi; en Francia, los esposos Frédéric e Irène Joliot-Curie; en Alemania, Otto Hahn y su tía Lise Meitner.

Las primeras partículas utilizadas para bombardear los núcleos atómicos fueron las partículas alfa, que, por estar cargadas positivamente, eran rechazadas por los núcleos atómicos cargados también positivamente, ya que las cargas eléctricas del mismo signo se repelen entre sí.

El descubrimiento del neutrón abrió nuevas posibilidades; por no tener carga se aceptó con verdadero entusiasmo entre los investigadores nucleares, pues era el proyectil ideal para bombardear núcleos y producir reacciones nucleares, con la ventaja de poder dispararse hacia el núcleo cargado sin temor a ser repelido por las cargas presentes, lo cual era una de las dificultades que presentaba la partícula alfa cuando se utilizaba como proyectil. En otras palabras, la trayectoria del neutrón en general no se afecta por los electrones negativos del átomo, y no se desvía como una partícula cargada y sólo lo hace ocasionalmente a través de colisiones con los electrones de la corona. Sin embargo, cuando se acerca mucho al núcleo, el neutrón queda sujeto a las fuerzas muy intensas que existen entre los protones y neutrones en el núcleo.

El primero que investigó en detalle el bombardeo con neutrones fue Enrico Fermi (Fig. 25). Comenzó su trabajo casi inmediatamente después de enterarse del descubrimiento del neutrón. Él y sus colaboradores produjeron radiactividad en forma artificial, bombardeando los núcleos de los átomos ya no con partículas alfa sino con neutrones.

Figura 25. Enrico Fermi (al centro) acompañado por Ernest Lawrence e Isidor Rabi.

En esa forma produjeron nuevos núcleos de casi todos los elementos, muchos de ellos radiactivos, y descubrieron un gran número de isótopos radiactivos. En su primera publicación sobre estos trabajos, Fermi reconoció que 47 de los 68 elementos que examinó al ser irradiados con neutrones se activaron transformándose en isótopos radiactivos.

Fermi descubrió en esa época un fenómeno que estaba muy relacionado con estos experimentos. Halló que los neutrones eran particularmente eficaces para producir radiactividad si primero se hacían pasar a través de agua o parafina. Los átomos de estos compuestos absorbían parte de la energía de los neutrones y éstos reducían su velocidad al atravesar los materiales ricos en carbono e hidrógeno. De este modo, los neutrones eran frenados hasta que se movían sólo con la velocidad normal de las moléculas a la temperatura ambiente. Tales neutrones lentos permanecían en las proximidades de un núcleo determinado durante un tiempo más largo, y eran absorbidos con más probabilidad que los neutrones rápidos. Los neutrones lentos, así conseguidos, inducían más fácilmente la radiactividad al incidir sobre los elementos. Encontraron que en algunos casos la captura de un neutrón por un núcleo iba acompañada por la emisión de una partícula beta. Esta reacción producía un átomo cuya carga nuclear positiva había aumentado en una unidad y, por consiguiente, pertenecía en el próximo puesto más elevado en la tabla periódica.

Fascinados por estos resultados, Fermi y sus colaboradores concibieron la idea de hacer un ensayo parecido con uranio, el último elemento hasta entonces conocido en la tabla periódica. Así, bombardearon el uranio con neutrones, para ver si podían producir átomos más pesados que el uranio (elementos transuránicos), ya que en aquella época el uranio tenía el mayor número atómico de la tabla periódica, con 92 protones. Fermi y sus colaboradores pensaban que el núcleo del uranio-238 al capturar un neutrón aumentaría su masa en una unidad y al decaer por una o varias desintegraciones beta podría producir elementos de 93, 94 o 95 protones.

Sin embargo, mucho después se tendría que reconocer que lo que estaban observando no eran los elementos transuránicos, como pensaba Fermi. De lo que sí se dio cuenta Fermi es que al bombardear el uranio y torio con neutrones lentos las radiaciones emitidas eran muy intensas; advirtió, además, que en estos dos elementos el fenómeno de activación era complejo y que en vez de producir un isótopo nuevo se producía una mezcla de isótopos radiactivos.

El estudio de los efectos producidos por el bombardeo de uranio con neutrones resultó ser una tarea complejísima. Los resultados formaron un laberinto tan difícil e intrigante que se trabajó arduamente por varios años tratando de resolverlo.

Muchos laboratorios en esa época se dedicaron a buscar los elementos de más de 92 protones. Durante cuatro años, principalmente en laboratorios de Italia, Francia y Alemania, se bombardeaban los materiales con neutrones y se identificaban los productos radiactivos. Durante todo este tiempo se encontraron muchos isótopos radiactivos, pero los resultados obtenidos confundían cada vez más a los investigadores, pues como consecuencia de bombardear el uranio con neutrones se encontraban continuamente nuevos productos.

En esa época se multiplicaron las publicaciones sobre este tema, inclusive se consideró la posibilidad de que la creencia de Fermi respecto a haber obtenido elementos con 93, 94 o 95 protones era débil, y se hizo ver la posibilidad de que el uranio estallara y formara elementos más ligeros. ¡Cuánta razón tenían! Pero esta observación no fue tomada en cuenta. De haberse considerado, se hubieran evitado varios años de esfuerzo.

En el grupo francés también se analizaron estas posibilidades; los esposos Joliot-Curie y sus colaboradores se quedaron asombrados de encontrar como producto del bombardeo del uranio con neutrones un elemento como el lantano, el cual, como ellos sabían, solamente tiene 40 protones, mientras que el uranio tiene 92.

Cambiar el uranio en lantano significaba una disminución de... ¡52 protones! Sería como pensar que el átomo de uranio se hubiese partido aproximadamente por la mitad. Discutieron largamente este resultado y trataron de explicarlo como producido por el rompimiento del uranio irradiado en dos fracciones, pero finalmente desecharon esta hipótesis y publicaron únicamente que habían encontrado un elemento radiactivo, que se podría separar junto con el elemento lantano.

Las controversias y discusiones que tuvieron los Joliot-Curie con el grupo alemán, particularmente con

Lise Meitner, excelente radioquímica berlinesa, y con su sobrino Otto Hahn (Fig. 26), fueron conocidas en todo el medio científico. Los científicos alemanes no podían creer que el experimento realizado en Francia al irradiar el uranio con neutrones pudiera dar lugar al lantano. Sin embargo, para confirmar sus propios resultados, Otto Hahn con sus colaboradores repitieron los experimentos en Alemania. Encontraron, por su parte, que el elemento radiactivo separado se comportaba como el bario, pero al verificar la técnica utilizada por el grupo encabezado por los esposos Joliot-Curie encontraron también, como ellos, lantano en la mezcla.

Figura 26. Otto Hahn (1) y Lise Meitner acompañados por un grupo de eminentes científicos.

El panorama científico en esa época era bastante confuso. Cada grupo científico obtenía gran número de isótopos radiactivos al bombardear el uranio con neutrones, pero nadie había podido dar una explicación correcta.

Fermi y sus colaboradores, en su búsqueda de elementos con un número mayor de protones que el uranio habían encontrado algo que nunca pudieron explicar correctamente. Por su parte los esposos Joliot-Curie y sus c741adores se acercaron mucho a la verdad al pensar que el uranio podría dividirse en dos fracciones, pero no se atrevieron a definir y a apoyar su idea, que estaría de acuerdo con las predicciones hechas anteriormente. Por fin, en el año de 1939 Otto Hahn y sus colaboradores anunciaron la solución del problema.

Su mérito principal fue el de interpretar correctamente el fenómeno. Efectivamente, los científicos alemanes encontraron que cierto núcleo de uranio —el uranio-235, como después se supo— se rompía al ser bombardeado con neutrones lentos; es decir, se partía en dos fracciones que a su vez producían elementos más ligeros, por lo general radiactivos.

A este fenómeno se le llamó *fisión nuclear,* siendo los *productos de fisión* los elementos ligeros formados.

La reacción en cadena

El artículo sobre la fisión nuclear del uranio, publicado por el grupo de Otto Hahn, llegó a manos de Frédéric Joliot unos diez días después. Es fácil imaginar la disilusión de los científicos franceses al saber que la idea que habían desechado era la respuesta a sus experimentos.

Como consecuencia del descubrimiento de la fisión nuclear se publicaron muchos artículos, principalmente en Alemania, Japón y Francia.

La noticia de este descubrimiento creó gran agitación entre los científicos, pues pensaban que un proceso nuclear de esta naturaleza liberaría inmensas cantidades de energía.

La agitación fue aún mayor cuando se dieron cuenta de que el proceso de la fisión del núcleo iba acompañada de la liberación de varios neutrones nuevos.

El grupo francés, en particular, se dedicó a investigar el recién descubierto fenómeno de la fisión nuclear. Frédéric Joliot en pocos días llegó a dos conclusiones de primordial importancia: que cada fisión nuclear debía liberar una cantidad de energía considerable y que junto oon los productos de fisión, tales como el bario o el lantano, con menos neutrones que el átomo de uranio original, debía emitirse uno o varios neutrones en cada fisión. Para realizar estas investigaciones Joliot formó un grupo de trabajo en el Colegio de Francia.

Los investigadores del Colegio de Francia compararon el conjunto de neutrones formado durante la fisión nuclear con el de la población humana, en que ciertos individuos tienen descendencia mientras otros no la tienen. Los neutrones que producen más fisiones son como los individuos que tienen descendientes, mientras que aquellos que no producen fisión y que sólo son absorbidos por la materia los compararon con los individuos que no tienen descendencia. Para que la población de neutrones en el material fisionable se mantenga constante, cada una de las fisiones debe dar origen por lo menos a una nueva fisión.

Joliot y sus colaboradores evaluaron la tasa de natalidad de los neutrones, es decir, el número de neutrones emitidos por cada fisión. Ahora se sabe que en cada fisión se liberan en promedio dos o tres neutrones. Sus resultados mostraron la posibilidad de que, usándose un material de número pequeño, como el hidrógeno, para frenar a los neutrones generados en la reacción de fisión a fin de volverlos lentos, pudieran producir más fisiones, y dar origen a más neutrones, y así sucesivamente, lo cual haría posible la generación de reacciones nucleares de fisión en cadena. Estos estudios mostraron la posibilidad de usar la fisión para producir energía.

De esta manera, el grupo formado por Joliot llegó a una nueva etapa en su trabajo: después de verificar el fenómeno de la fisión y la producción de neutrones, estudiaron la energía aprovechable producida por las reacciones de fisión nuclear en cadena. En esta nueva etapa, el grupo del Colegio de Francia competía en una carrera científica en la que participaban los países más poderosos de esa época. Después de muchos estudios llegaron a la conclusión de que podrían mantener una reacción en cadena en forma constante utilizando uranio enriquecido en uranio-235 o bien uranio natural. Se dieron cuenta de que para hacer funcionar un reactor nuclear con uranio natural era necesario contar con un material que les permitiera frenar los neutrones de la fisión hasta convertirlos en neutrones lentos, y consideraron que el agua pesada era el material adecuado.

Cada átomo de uranio fisionado provocaría la fisión de varios más (Fig. 27), en una reacción nuclear en cadena, con un resultado semejante al de la reacción química en cadena. Pero como las reacciones nucleares implicaban intercambios energéticos mucho mayores que las reacciones químicas, los resultados de una reacción nuclear en cadena serían mucho más formidables. Partiendo de unos cuantos neutrones, con una insignificante energía, podrían liberarse reservas enormes de energía.

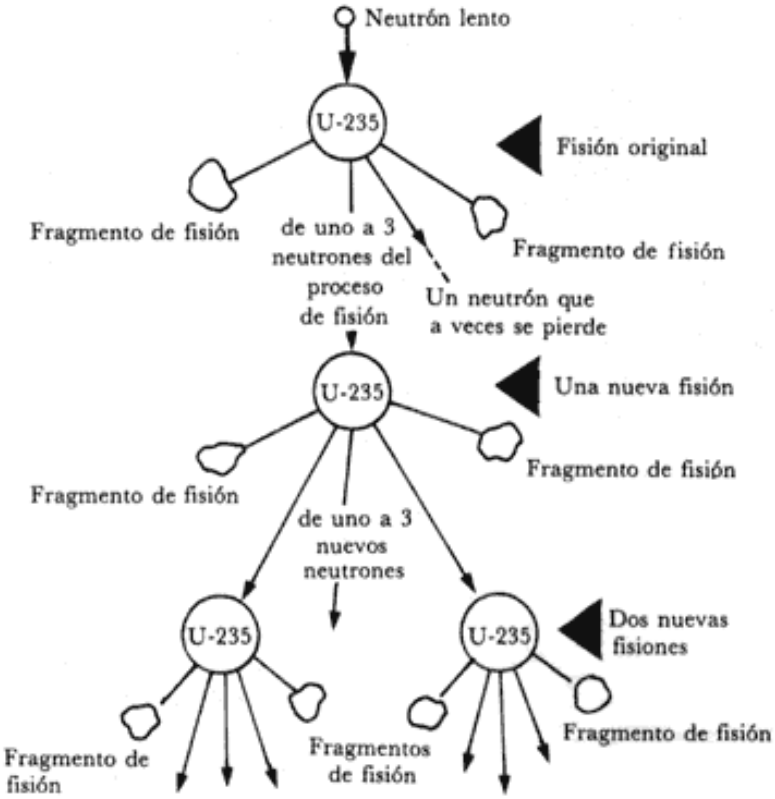


Figura 27. Diagrama de una reacción en cadena como resultado de la fisión de los átomos de uranio-235.

La enorme energía que se libera en el proceso de la fisión nuclear en cadena es aprovechada hoy día en muchos países para producir energía eléctrica mediante reactores nucleares, los cuales también se usan para otros propósitos, como son la producción de isótopos radiactivos y la investigación científica (Figs. 28 y 29).

Figrua 28. Exterior del Centro Nuclear de Salazar, Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares. (Fotografía: Roberto Campos.)

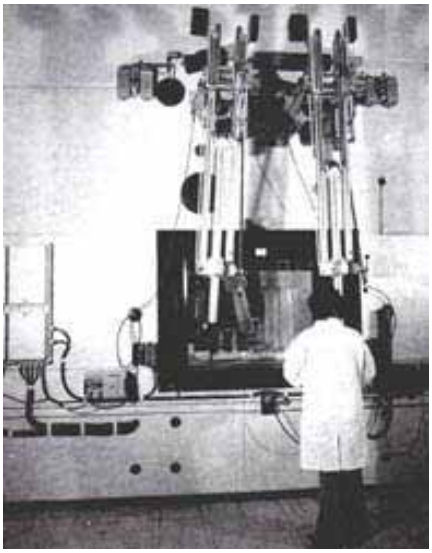


Figura 29. Interior del Centro Nuclear de Salazar, ININ.

REACCIONES SZILARD-CHALMERS

La ciencia se ve enriquecida continuamente con descubrimientos que permiten desarrollar nuevas técnicas que son factores decisivos para llegar a conocer mejor la estructura de la materia.

Este es el caso del descubrimiento que hicieron Fermi y sus colaboradores al descubrir que era posible preparar isótopos radiactivos bombardeando elementos químicos con neutrones. Sin embargo, los isótopos formados, en muchos casos, siendo isótopos del mismo elemento irradiado, no podían ser separados y aislados utilizando técnicas químicas. Esto indujo a Szilard y a Chalmers a buscar la forma de separar un isótopo radiactivo de otros isótopos del mismo elemento utilizando técnicas químicas.

La separación de los isótopos de un mismo elemento

En 1934 Szilard y Chalmers bombardearon una solución de yoduro de etilo (I-etilo) con neutrones, propiciando así una reacción de captura de neutrón por el núcleo del yodo y observaron que una parte del yodo-128, formado por la reacción de captura de un neutrón por el núcleo del yodo-127, se encontraba en forma de yodo libre y no en la forma del yoduro de etilo original.

Este experimento demostró que las consecuencias de la reacción nuclear en el átomo de yodo son capaces de romper el enlace I-etilo. Este efecto, conocido después como "Szilard-Chalmers", proporcionó en esta forma una manera muy simple de separar isótopos de un mismo elemento, por vía química. En general dos formas químicas diferentes de un mismo elemento se pueden separar fácilmente por técnicas químicas; en este caso la técnica utilizada para separar el yodo y el yoduro de etilo fue la de extracción por solventes que se lleva a cabo por la agitación del producto bombardeado con neutrones en una mezcla de dos líquidos, uno acuoso y otro orgánico. En la fracción orgánica encontraron el yodo-128 separado completamente de su isótopo el yodo-127. Este ejemplo muestra la forma de separar dos isótopos de un mismo elemento por medio de una operación química muy sencilla, mientras que la mayoría de los métodos físicos para separar dos isótopos de un mismo elemento están basados en la diferencia de masa de ellos, que es en general una diferencia pequeña. Esto hace que el procedimiento sea costoso y que precise de instrumentos muy complejos.

Fermi y sus colaboradores explicaron el efecto Szilard-Chalmers como la consecuencia del retroceso del núcleo debido a la emisión del fotón en el proceso que conocemos como (n, γ).

En general todas las transformaciones nucleares se acompañan de retrocesos nucleares más o menos intensos que pueden dar lugar a un cambio del sistema electrónico del átomo, causando de esta forma

modificaciones químicas en la molécula en que se encuentra el núcleo transformado.

Si el átomo que sufre alguna de las transformaciones nucleares se encuentra formando parte de una molécula, la energía de retroceso del núcleo transformado puede romper el enlace químico y quedar todavía con una energía muy elevada; a menudo, esta energía cinética es tan alta, que el átomo energético no puede inicialmente formar combinaciones químicas. La energía se disipa por colisiones con otros átomos del medio; y finalmente, después de que se frena parcialmente, tienen gran capacidad de reaccionar con compuestos y radicales del Medio y formar por último un compuesto químico diferente al compuesto original del que partió.

La probabilidad de formación de nuevos núcleos por cualquiera de los procesos nucleares es, en la mayoría de los casos, muy pequeña: quizás uno de un millón de átomos pueda transformarse en otro núcleo; y en general es muy difícil detectarlo por los métodos analíticos tradicionales. Estos átomos nuevos, por lo general, son radiactivos; esto permite que se puedan detectar fácilmente por la radiación que emiten. En esta forma se puede estudiar su paso por la materia y su comportamiento.

Los efectos mencionados fueron usados en la práctica inmediatamente después de su descubrimiento; la primera aplicación fue en la separación de isótopos radiactivos de los demás isótopos de un elemento. Un ejemplo clásico está dado por la separación del radisótopo del cromo-50, que es uno de los isótopos del cromo que existen en la naturaleza; sometiendo este elemento a la acción de un flujo de neutrones se obtiene cromo-51.

Para que esta reacción nuclear produzca un cambio químico, es necesario que el cromo forme parte de un compuesto químico adecuado. En el cromato de potasio, el cromo es hexavalente, es decir, utiliza seis de sus electrones extranucelares. Al analizar el producto después de su irradiación con el cromo, parte del cromo-51 formado se encuentra en forma de cromo trivalente. Éste es un procedimiento sencillo para separar el isótopo de peso 51 de los otros isótopos del cromo, ya que la fracción del cromo-51 en forma trivalente se puede separar del cromo original por medio de técnicas químicas.

La separación química de isómeros nucleares

La misma técnica que se utiliza para separar isótopos se puede aplicar a la transición isomérica, y puede emplearse para separar isómeros nucleares. Los isómeros nucleares son aquellos núcleos que tienen masas y cargas idénticas, pero diferentes propiedades radiactivas.

El núcleo metaestable puede decaer por emisión de radiación gamma a su isómero en el estado básico; el estado básico es el de más baja energía del isómero nuclear. A menudo estos isómeros nucleares en el estado básico también son radiactivos.

Un ejemplo muy interesante está dado por la separación del isómero nuclear en el estado base del selenio-81b, de su correspondiente isómero nuclear metaestable, selenio-81m, y los otros isótopos del selenio. El selenio natural tiene varios isótopos, entre ellos el selenio-80. Las reacciones nucleares de captura de neutrones en los núcleos del selenio-80 producen los dos isómeros del selenio-81. Con la mezcla de isómeros nucleares del selenio, es necesario formar un compuesto adecuado como el selenato de potasio. El selenio-81 m, al emitir radiación y decaer así por transición isomérica a selenio 81b, rompe sus ligaduras y se estabiliza en la forma de selenio-81b tetravalente. Como el selenio tetravalente se puede separar del selenio hexavalente por técnicas químicas, este efecto permite también separar, por métodos químicos, los isómeros nucleares selenio-81b de los otros isótopos del selenio.

VI. LA RADIACTIVIDAD Y LA ESTIMACIÓN DE EDADES

PARA MEDIR la edad de las piezas arqueológicas, fósiles, yacimientos o la de la Tierra misma, se requiere de un reloj que permita medir el tiempo transcurrido desde que se fabricaron las piezas, desde que murió la planta o animal que luego quedó en forma de fósil, desde que se depositaron los minerales en un yacimiento o desde que nació la Tierra misma.

En ocasiones, estos tiempos sólo son de miles de años, y en otras de miles de millones de años. El reloj requerido debe variar con el tiempo en una forma muy bien conocida. El decaimiento radiactivo posee precisamente estas características, ya que se puede considerar que decae en forma constante a través del tiempo, en ocasiones con una vida media relativamente corta, como la del carbono-14, de menos de 6 000 años, y en otras con vidas extremadamente largas, como la del uranio-238, de 4 500 000 000 de años. La vida media de cada radisótopo es una constante y se mantiene invariable a través del tiempo.

Para poder utilizar ese reloj se requiere conocer la concentración del material radiactivo cuando se inició el proceso cuya edad se desea estimar. También se requiere conocer esa concentración de material radiactivo en el momento actual. Utilizando la vida media del isótopo se puede calcular el tiempo transcurrido. El problema principal en la aplicación de estas técnicas es conocer la concentración inicial del material radiactivo.

Cuanto mayor sea la vida media de un radisótopo es mayor su utilidad para estimar edades de piezas o acontecimientos más antiguos. Los radisótopos que se utilizan más a menudo para este propósito son el carbono-14, el uranio-238, uranio-235, torio-232, rubidio-87 y potasio-40.

EL CARBONO- 14

El método del carbono-14 para determinar edades ha sido de gran importancia para encontrar la antigüedad de restos de animales de diferentes culturas, fósiles, etc. Aunque actualmente se utilizan otros isótopos radiactivos de otros elementos con más éxito que éste, aquí se presenta al lector esta técnica porque tuvo mucho éxito desde que fue propuesta por Libby hace ya muchas décadas.

¿En qué se basa esta técnica? Son varios los procesos naturales que permiten aplicarla:

•Los neutrones producidos por la radiación cósmica reaccionan con el nitrógeno de la atmósfera a elevadas altitudes sobre la superficie de la Tierra y forman el isótopo radiactivo carbono-14.

•Este carbono-14, a su vez, reacciona con el oxígeno de la atmósfera para formar el bióxido de carbono-14, que se mezcla uniformemente con el bióxido de carbono existente en la atmósfera.

•Las plantas utilizan y asimilan el bióxido de carbono-14 mezclado con el bióxido de carbono normal.

•Todo material viviente contiene, pues, carbono-14, que asimila de las plantas.

•Finalmente, cuando el ser viviente muere deja de asimilar carbono-14 y éste va decayendo de acuerdo con las leyes del decaimiento radiactivo, de tal manera que una pieza se reconoce como antigua cuanto menos carbono-14 contenga.

La proporción de radiactividad del carbono-14 en cualquier fracción de materia orgánica da así una medida del tiempo transcurrido desde que dejó de existir como materia viviente.

La estimación de edades de materia orgánica utilizando el carbono- 14 ha encontrado aplicación en muchos campos, pero las mediciones más espectaculares que se han logrado con este método han sido en muestras arqueológicas. Por otra parte, la vida media relativamente corta de este isótopo radiactivo y

varias dificultades técnicas hacen que este reloj sea bueno únicamente para tiempos menores de unos sesenta mil años.

ESTIMACIÓN DE EDADES GEOLÓGICAS POR LOS MÉTODOS RADIACTIVOS

Para la medida de edades geológicas, como la edad de ciertos yacimientos o la edad de la Tierra, se utilizan isótopos radiactivos de vidas medias muy largas.

Son muy pocos los átomos radiactivos con vidas medias del orden de la duración de tiempos geológicos. Los geocronologistas usan principalmente tres relojes, los cuales se caracterizan por su par de átomos: el padre, siempre radiactivo, y el hijo, que puede o no ser radiactivo. Estos métodos son conocidos con los nombres de potasio-argón, rubidio-estroncio y uranio-plomo, en virtud de que el primer isótopo de cada par es el átomo padre, y el segundo su descendiente.

El potasio-40 al decaer da lugar al nacimiento del argón-40, que tiene una vida media de más de 1 260 000 000 de años; el rubidio-87, por su parte, da lugar al nacimiento del estroncio-87, con una vida media de 48 000 000 000 de años; y finalmente, el uranio-235 y el uranio-238 tienen por descendientes dos isótopos estables del plomo, de peso 204 y 206, respectivamente.

Estos isótopos radiactivos padres generan a sus descendientes muy lentamente, en el transcurso de millones y millones de años. Al analizar una muestra de acuerdo con la presencia del isótopo hijo, sea radiactivo o no, puede determinarse, con ayuda de las leyes del decaimiento radiactivo, el tiempo transcurrido desde la formación del yacimiento o de la Tierra. En este caso, una mayor cantidad del isótopo hijo indica una mayor antigüedad de la muestra.

Simples en principio, estos métodos para estimar edades deben ser aplicados con mucha precaución. En efecto, se puede calcular la edad por estos métodos si, a partir de la fecha en que se depositó el yacimiento o se formó la Tierra, no ha habido movimiento de los descendientes y los padres del par radiactivo en la muestra; es decir, si no ha habido aporte ni pérdida de los elementos allí presentes.

En esta forma se calculó que la corteza sólida de la Tierra debe de haber existido desde hace aproximadamente cuatro mil quinientos millones de años.

VII. LA ENERGÍA Y EL NÚCLEO DEL ÁTOMO

YA A PRINCIPIOS del siglo, en 1902, Pierre y Marie Curie habían notado que cada átomo de una sustancia radiactiva funciona como una fuente constante de energía; y poco después, en 1903, Rutherford y Soddy habían hecho ver que esa energía salía del interior del átomo y que debía de ser enorme comparada con la producida por cambios químicos. Ahora se sabe que esa energía proviene del núcleo de los átomos.

Pero ¿cuál es el origen de toda esa energía del núcleo del átomo? Fue Albert Einstein (Fig. 30) quien en 1905 propuso una teoría en la que se asevera que la energía y la masa son diferentes aspectos de lo mismo, y que la relación se puede expresar por la siguiente ecuación:

E = mc2,

donde E representa la energía, m la masa y c la velocidad de la luz en el vacío. Esta ecuación indica que la masa se puede transformar en energía y la energía en masa y, además, que una pequeña cantidad de masa se transforma en una cantidad de energía verdaderamente asombrosa, pues el valor de c es una cantidad muy grande, y al elevarla al cuadrado se vuelve enorme.

Figura 30. Albert Einstein.

Como los núcleos de los átomos están formados de protones y neutrones, es de esperarse que la masa del núcleo pudiera determinarse sumando la masa de ellos. Sin embargo, se demostró, con gran sorpresa de los científicos, que la masa total de un núcleo es diferente de la suma de la masa de los protones y neutrones. Todos los núcleos de los elementos ligeros, excepto el del hidrógeno, pesan menos que la suma de las masas de sus neutrones y protones.

Esta diferencia se conoce como defecto de masa. Y ¿en qué se convierte el defecto de masa? Al fusionarse los nucleones para formar un átomo de helio-4 se desprende una enorme cantidad de energía, conocida como energía de fusión. (Véase la Fig. 31.)

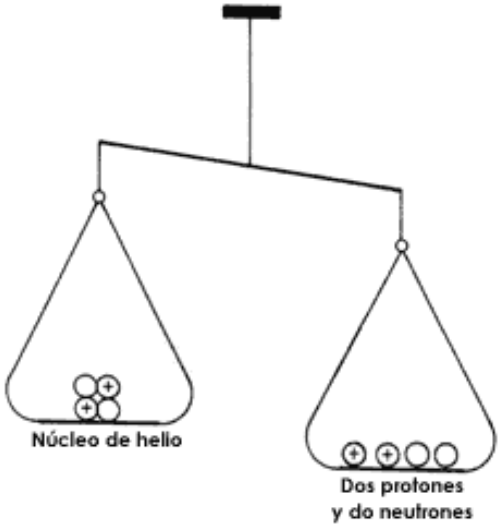


Figura 31. Dos protones y dos neutrones son más pesados que el núcleo del helio, que está formado precisamente por dos protones y dos neutrones; la diferencia se transforma en energía.

Si en una reacción nuclear se produce una pérdida de masa, la masa que ha desaparecido debe, de acuerdo con la ecuación de Einstein, presentarse en forma de energía. Estas relaciones de masa y energía muestran la inmensa importancia del hecho de que la masa atómica exacta de la. mayoría de los isótopos no es un número entero.

En el proceso de la desintegración del radio, la energía se desprende muy poco a poco. La masa de los productos hijos es ligeramente menor que la masa del radio, pero esa pequeña fracción de masa se convierte en una cantidad enorme de energía.

De acuerdo con Einstein, para obtener la energía equivalente de un miligramo de materia nuclear, se requiere la combustión de más de 2 000 kilogramos de carbón.

En general, la energía nuclear es millones de veces mas eficiente que la energía obtenida por la combustión al carbón, pero el tiempo que se requiere para aprovecharla es muy largo. Habría que esperar 1 600 años para extraer la mitad de la energía proveniente de una muestra de radio, mientras que el calor producido por la combustión del carbón se puede obtener mucho más rápidamente. Sin embargo, la energía nuclear se puede liberar en forma muy rápida mediante reacciones nucleares; una de ella es la reacción de fisión nuclear del uranio-235, de que ya hablamos (pp. 80-85), y otra es la reacción de fusión de los núcleos ligeros, como los núcleos de hidrógeno para formar núcleos de helio.

¿SE PUEDE APROVECHAR LA ENERGÍA ENCERRADA EN EL ÁTOMO?

La energía nuclear se ha aprovechado en la Tierra desde hace miles de millones de años. Esta energía proviene principalmente del Sol, de la energía geotérmica y, mucho más recientemente, se aprovecha la energía de la fisión del uranio-235.

Energía solar

La energía solar es en realidad energía nuclear que se produce en el centro del Sol y es irradiada a todo el sistema planetario.

Una teoría afirma que la energía solar se deriva, en parte por lo menos, de una reacción en la que los núcleos de helio se construyen directamente a partir de los núcleos de hidrógeno y es, probablemente, la responsable de la generación de energía en la mayoría de los astros. En algunas estrellas, sin embargo, se cree que existen otras reacciones nucleares más importantes que son la causa de la energía de estos astros.

En estas reacciones nucleares participan otros elementos ligeros. El interior de tales estrellas, aunque muy caliente, no lo es suficientemente para permitir que el hidrógeno se convierta en helio.

La Tierra aprovecha sólo una pequeñísima fracción de esta energía solar: menos de 1 parte de cada 10 000 de las radiaciones que emite el Sol.

Energía geotérmica

Sin el calor de la radiactividad es probable que no existiera en la Tierra ni atmósfera ni océanos. La historia de la Tierra es una historia de calor en la que se ha gastado una cantidad inmensa de energía en la construcción de montañas, volcanes y otros fenómenos que han formado los continentes, los océanos y la atmósfera. Exceptuando la energía superficial que proviene del Sol, el resto de la energía de la Tierra proviene de su interior. Esta energía térmica tiene su origen en dos fuentes principales: el calor heredado de la formación de la Tierra y el calor generado por transformaciones nucleares.

Esta energía geotérmica proviene del centro de la Tierra; su temperatura aumenta en profundidad a partir de una línea llamada isogeoterma. A partir de ella, la temperatura aumenta a razón de 1 grado centígrado por cada 33 metros de profundidad, lo cual provoca la formación del magma, que es un fluido a temperaturas enormes que se encuentra en las profundidades de la Tierra. La energía nuclear que permite este calentamiento del magma y esa enorme energía encerrada en la Tierra es producida por la radiactividad de los isótopos inestables, que al irse desintegrando depositan su energía en sus alrededores, calentando así las vecindades del núcleo desintegrado.

Energía producida por la fisión del uranio-235

Seguramente cuando Einstein encontró la ecuación que relaciona la masa y la energía nunca imaginó que se pudiera comprobar algún día si era válida; pero ahora la cantidad de energía que se produce en el proceso de fisión nuclear de un átomo de uranio-235 proporciona la prueba de su ecuación.

La energía contenida en un kilo de uranio equivale a la producida por la combustión de millones de kilogramos de carbón. Sin embargo, no es tan sencillo utilizar esta energía como parece a simple vista.

La manera de extraer energía del uranio es muy diferente a aquella utilizada tradicionalmente para extraer energía de la combustión de carbón, gasolina, madera, etc. Si esperamos a que la radiación alfa que emite el uranio libere la mitad de la energía que tiene encerrada en su núcleo, se requerirían miles de millones de años de espera. Para extraer en forma eficiente la energía del uranio se requieren los reactores nucleares, en donde, en forma controlada, por medio del proceso de fisión del uranio-235 se libera una enorme cantidad de energía del núcleo del átomo. Así pues, sólo si se dispone de los reactores nucleares adecuados y de otras instalaciones es posible aprovechar este elemento.

El uranio-235 se fisiona mucho más fácilmente que el uranio-238, ya que este último isótopo del uranio sólo suele capturar neutrones sin producir fisión; pero desafortunadamente el uranio natural está formado principalmente por uranio-238 en un 99.27% y uranio-235 en un 0.72%.

URANIO NATURAL	
99.27%	0.72%
uranio-238	uranio-235

De hecho, el núcleo del uranio-235 es bastante inestable: esto es, se encuentra bajo una tensión próxima a la rotura interna; por esto, un neutrón que se le acerque puede fisionarlo rápidamente.

A fin de hacer posible el aprovechamiento del uranio para producir energía, en ocasiones se requiere

aumentar el porcentaje de uranio-235, procedimiento que se denomina enriquecimiento de uranio en uranio-235.

El reactor nuclear libera la energía nuclear del uranio-235 en forma de calor, el calor se emplea para producir vapor de agua y el vapor para generar electricidad con un equipo eléctrico convencional.

Indice

VIII. EL REACTOR NUCLEAR DE OKLO

DESPUÉS DE haber realizado un recorrido de 90 años a través de la historia de la radiactividad, ahora trataremos de un hecho descubierto hace poco tiempo.

La compañía de minas de uranio de Franceville, Gabón, África (Fig. 32), concentraba el uranio proveniente de las minas de uranio con el propósito final de producir combustible para reactores nucleares. En el mercado de uranio enriquecido, la concentración de uranio-235 en la naturaleza es un valor de referencia que se expresa en un porcentaje de la masa total de uranio, y es de poco menos de 0.72%. Se utiliza en los contratos de enriquecimiento para evaluar el trabajo de separación. Esta norma parece ser representativa del contenido isotópico del uranio-235 de la mayor parte del uranio natural conocido. Pero en el año de 1972 se dio a conocer un fenómeno realmente curioso en la compañía de minas: se encontró un contenido demasiado bajo de uranio-235 en su producto. Rastreando el fenómeno, se descubrió que ese mineral provenía precisamente de la cantera de Oklo. Este yacimiento de uranio abarca una superficie de aproximadamente 35 000 km2.

El impacto de este descubrimiento fue tan grande que se tomó la decisión de interrumpir la explotación del mineral para permitir estudios científicos del fenómeno. Como consecuencia de estos estudios, en 1975 se realizó en Libreville, Gabón, un coloquio internacional, que fue el primero de una serie, ya que este hecho notorio fue el objeto de numerosos trabajos y muchos coloquios consagrados a los aspectos geológicos, geoquímicos y nucleares del fenómeno.

Los estudios permitieron realizar una evaluación muy completa sobre el fenómeno, incluyendo la cantidad del uranio-235 faltante de los depósitos del mineral de uranio. ¿Cómo se podría explicar la pérdida de uranio-235? ¿Podría deberse a un consumo de este isótopo del uranio en un proceso de fisión nuclear?

De hecho, hacía ya varios años, en 1956, mucho antes del descubrimiento realizado en Oklo, un físico norteamericano, P. K. Kuroda, había considerado la posibilidad de que la fisión nuclear pudiera haberse presentado hace miles de millones de años.

Ya es bien conocido por el lector que el uranio en la naturaleza está formado de varios isótopos, pero son dos los que existen en mayor cantidad: el más abundante por mucho es el uranio-238, y el menos el uranio-235, pues el uranio-235, siendo más inestable, tiene -una vida media más corta que el uranio-238. Ya se ha visto también la propiedad que tiene el uranio-235 de fisionarse mucho más fácilmente que el uranio-238 al interactuar con los neutrones lentos. De hecho, se requiere el combustible de uranio enriquecido en uranio-235 para extraer comercialmente la energía de su núcleo en un proceso en cadena.

El uranio no ha tenido siempre la misma relación isotópica en la naturaleza, ya que hace aproximadamente 700 000 000 de años existía dos veces más de uranio-235, pero la cantidad de uranio-238 era muy poco mayor a la que existe actualmente. Por esto, la cantidad de uranio-235, que es el que se puede fisionar más fácilmente, ha disminuido de modo constante en el transcurso de los tiempos. Se puede decir que el uranio natural de eras geológicas pasadas era más rico en el isótopo uranio-235 que el uranio natural actual.

De acuerdo con estas ideas, Kuroda supuso que en la naturaleza pudiera haber habido reacciones de fisión nuclear espontánea de uranio-235 en un pasado muy lejano, cuando el contenido del uranio-235 era suficientemente elevado en los yacimientos de uranio. Pero era necesario que se reunieran varias condiciones para que la fisión nuclear espontánea se pudiera realizar: fuertes concentraciones de uranio, presencia de un moderador de neutrones, es decir de material que frenara neutrones para hacerlos lentos, la ausencia de boro, que tiene una capacidad enorme de absorber neutrones lentos. De acuerdo con Kuroda, la probabilidad de que tal fenómeno pudiera haber sucedido aumentaba a medida que aumenta la antigüedad del evento. Cuando se descubrió el fenómeno de Oklo, era, pues, muy importante precisar toda la información sobre estos yacimientos para poder decidir si la pérdida del uranio-235 se debía a un fenómeno de fisión nuclear natural.

Efectivamente, como consecuencia de los estudios sobre los yacimientos de minerales de uranio en Oklo y para explicar el fenómeno presentado en la relación isotópica del uranio natural, los científicos llegaron a la conclusión de que en el pasado lejano del depósito, ese isótopo del uranio de masa 235 había sido consumido por una reacción de fisión nuclear en cadena en un reactor natural cuyo funcionamiento transformó profundamente la composición química e isotópica de los minerales presentes en las zonas de reacción. El fenómeno se confirmó principalmente por el estudio de los productos de fisión característicos en los minerales. Estos productos de fisión, en particular el neodimio, tienen una composición isotópica muy diferente que la de los elementos naturales. Los estudios detallados realizados desde el descubrimiento del fenómeno permitieron localizar las zonas de reacción que constituyen los reactores fósiles. Se demostró que este fenómeno extraordinario fue muy extenso, pues aparentemente faltan más de 500 kg de uranio-235 en estos yacimientos.

La estimación de la antigüedad del sitio fue determinada por los métodos rubidio-estroncio y potasio-argón, mencionados anteriormente, en distintos tipos de rocas existentes en diferentes puntos del yacimiento. Para precisar la edad de la mineralización del uranio del yacimiento de Oklo, se aplicó el método de uranio-plomo sobre los minerales situados en el exterior de las zonas de reacción, que contiene, por lo tanto, el uranio de composición isotópica normal. Se concluyó, además, que las condiciones del funcionamiento de los reactores de Oklo se encontraban probablemente reunidas desde que se depositó el uranio, ya que, en esa época, la composición química e isotópica del mineral consistía en una mezcla de 93% de uranio-238, 3% de uranio-235 y 4% de plutonio-239. Esta composición se determinó por el estudio de los productos de fisión allí presentes. Todas estas medidas permiten atribuir a estos yacimientos una edad de aproximadamente 1 800 000 000 de años.

Actualmente está ya bien establecido que las condiciones que se reunieron en Oklo hace 1 800 000 000 de años cumplían con lo previsto por Kuroda: una concentración elevada de uranio, abundancia isotópica suficiente de uranio-235, la presencia de agua como moderador, la ausencia de venenos, como las tierras raras. La abundancia de uranio-235 era entonces de 3%. Su valor actual en otros yacimientos es de 0.72%, pero ha sido considerablemente disminuido en los yacimientos de Oklo hasta 0.3%. Todos estos datos permitieron evaluar la amplitud del fenómeno, localizar el sitio con precisión y predecir la fecha en que se produjo el fenómeno. De acuerdo con estos estudios, se encontró que el reactor nuclear de Oklo estuvo operando durante 500 000 años, desde la época en que se mineralizó el uranio en esa zona; es decir, desde hace 1 800 000 000 de años, como ya hemos visto.

Actualmente se conocen varios reactores nucleares, los cuales fueron encontrados en los mismos yacimientos muy cerca unos de otros, y representan un campo de investigación extremadamente fructífero.

Estos descubrimientos probaron en todos los casos que los fenómenos de la aparición de reactores

naturales no fueron fenómenos aislados en los yacimientos, y que aparecían cada vez que había una concentración local suficientemente elevada de uranio.

Indice

IX. LAS APLICACIONES DE LA RADIACTIVIDAD

LA PROPIEDAD de los isótopos radiactivos de emitir espontáneamente radiación alfa, beta y gamma ha encontrado amplia aplicación, se emplea como herramienta para hacer estudios en la investigación científica y, desde el punto de vista práctico, se utiliza en muchas áreas, como en ecología, medicina, agricultura, industria y biología.

La utilidad que brindan los isótopos depende de sus propiedades, en particular del tipo de radiación que emiten, la energía de ésta y su vida media. Como ejemplo, presentamos las siguientes aplicaciones:

Análisis de elementos que se encuentran en concentraciones muy bajas.

Trazadores en estudios de procesos físicos, químicos, biológicos y médicos.

Control del espesor de hojas y láminas en las industrias del papel, del hule, etc.

Control del llenado de líquidos en frascos y latas en industrias como la cervecera y la de envasado de alimentos.

Fuentes intensas de radiación en radiografías industriales y de la medicina nuclear.

Esterilización de material quirúrgico desechable.

Esterilización de productos químicos y biológicos.

ANÁLISIS POR ACTIVACIÓN

La sensibilidad de las técnicas químicas en general varía grandemente. Algunas de ellas son sensibles tan sólo para algunos elementos, ya que no existe el método perfecto para analizar todos los elementos con la máxima sensibilidad. Ahora sabemos que los minerales de uranio tienen fracciones de menos de una parte de radio en un millón de partes del mineral. Es fácil comprender la razón de que se desconociera la existencia del radio en el siglo pasado: no existía una técnica suficientemente sensible para analizarlo. Las técnicas químicas tradicionales se basan en los procedimientos utilizados durante mucho tiempo de separar los diversos elementos en fracciones químicas, como lo hizo Madame Curie, hasta dejar aislados los elementos polonio y radio. Actualmente estas técnicas tradicionales se usan poco, ya que aparecen cada día técnicas nuevas, la mayoría de ellas instrumentales.

Entre estas técnicas se encuentra el análisis por activación, que, teniendo una sensibilidad muy alta, puede determinar hasta centésimas de partes por millón de ciertos elementos, como la plata. En esta técnica se produce radiactividad artificialmente, tal como lo hizo Fermi, irradiando los elementos con proyectiles, principalmente con neutrones. Las radiaciones emitidas por estos isótopos radiactivos y su vida media permiten encontrar indirectamente la concentración del elemento original sometido al análisis.

Encontrar el elemento por los efectos que produce la irradiación con neutrones es como encontrar el llavero que toca unas notas musicales cuando el distraído dueño que lo ha perdido emite un silbido.

En esta comparación, el silbido del dueño del llavero es análogo al flujo de neutrones, que penetran en algunos elementos con mayor probabilidad que en otros, por lo tanto los activan y emiten radiaciones: el equivalente de las notas musicales del llavero. El símil del oído del dueño del llavero es un detector de radiaciones que registra los elementos que se han radiactivado (Figura 33).

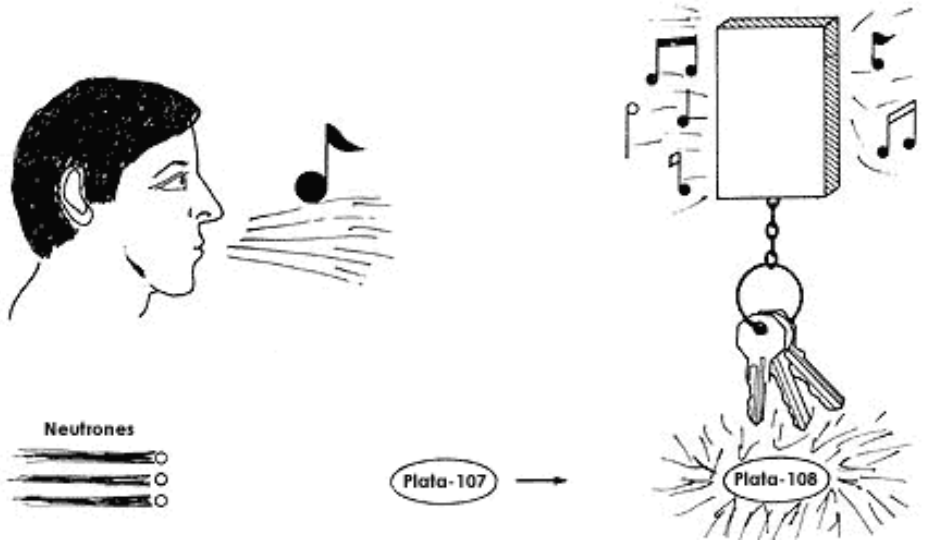


Figura 33. Los elementos se vuelven radiactivos cuando se les bombardea con neutrones, y entonces se pueden identificar y medir por las radiaciones que emiten. Esto es semejante al llavero que al percibir un silbido produce una tonada y por este sonido se le puede encontrar.

Arsénico en un cabello de Napoleón

El análisis por activación ha sido muy útil para encontrar ciertos elementos en pequeñas cantidades.

El cabello humano contiene pequeñísimas cantidades de elementos, como sodio y cobre. El análisis por activación ha demostrado que las cantidades de estos elementos presentes en cada cabello varían de un individuo a otro, pero son relativamente constantes en cada persona. En Canadá se acusó a una persona de asesinato porque se probó que un cabello encontrado en las manos de la víctima era semejante al cabello del acusado; este resultado se obtuvo por el análisis de las trazas de los elementos obtenidos por la técnica de análisis por activación en los cabellos tanto del acusado como de la víctima.

Si una persona muere por envenenamiento puede a veces determinarse con análisis por activación la razón de su muerte. Dosis de arsénico, aunque no letales, pueden detectarse en ocasiones en el cabello del individuo que lo ha tomado. Este veneno se distribuye de la raíz del cabello a las extremidades. Cabellos aun muy antiguos pueden analizarse con éxito para determinar la presencia de arsénico y otros residuos por medio de este análisis.

Unos científicos ingleses descubrieron excesos de arsénico en una reliquia consistente en cabellos de la cabeza de Napoleón. En virtud de este descubrimiento, existe ahora la sospecha de que Napoleón fue envenenado lentamente con arsénico.

El análisis por activación no se aplica solamente en estas actividades siniestras relacionadas con casos de asesinatos. Además de facilitar la identificación del cabello humano, también puede utilizarse para comparar manchas de grasa muy pequeñas, partículas de polvo invisibles a simple vista y partículas de pintura de automóvil, también casi invisibles, en casos de accidente. Dichos estudios se pueden hacer de dos maneras: identificando partículas de material abandonadas en el lugar del delito por el supuesto criminal, o partículas del lugar del crimen llevadas consigo por el presunto criminal. Otra ventaja de este análisis es que las muestras sometidas a examen no sufren daño alguno y pueden, por lo tanto, admitirse como prueba en los tribunales.

ISÓTOPOS RADIACTIVOS PARA MARCAR ÁTOMOS

Quizás el uso más importante de los isótopos radiactivos producidos artificialmente es como "trazadores", que es el nombre que se emplea más a menudo.

Tanto en los procesos naturales como en los artificiales, se acostrumbra marcar algunas especies de un grupo grande para estudiar sus movimientos y sus desplazamientos. Estas especies marcadas se conocen con el nombre de trazadores, y en particular nos interesan aquellos que son radiactivos.

Un trazador radiactivo en los procesos físicos, químicos o biológicos se puede comparar con la marca que se coloca en la pata de un ave, que permite determinar la ruta que siguen las aves de su especie durante sus vuelos. De una cantidad muy grande de aves se les pone la marca sólo a un cierto número conocido de ellas. Después de que las aves se desplazan, se busca a las que tienen marcas, y los lugares en donde se encuentran indican la ruta que van siguiendo y el número de ellas que se encuentran permite calcular el número de aves que se han desplazado. Este mismo método se utiliza para determinar el número de peces de cierta especie en un lago. Se marca un número determinado de peces y se dejan libres en el lago. Después de un tiempo se pesca una muestra. La proporción de peces marcados y no marcados permite medir el número de peces del lago. Los trazadores radiactivos se comportan como las aves o peces marcados (Fig. 34(a)).

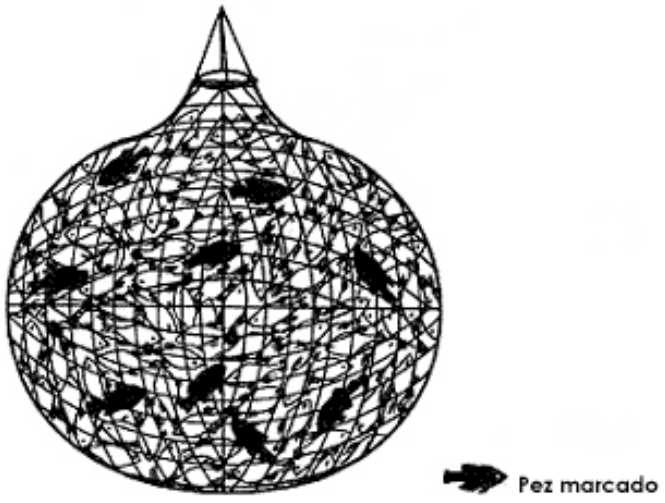


Figura 34 (a). Si se marcan 1 000 peces y se depositan en un estanque y un tiempo después se pescan sólo 9 de los marcados y 580 no marcados, el estanque tiene aproximadamente 580 x 1 000 / 9 = 64 444.

La mayoría de los fenómenos que se efectúan en la naturaleza y los procesos que se realizan en los laboratorios y en la industria están basados en el movimiento de los átomos y de las moléculas: por ejemplo, la corriente de los ríos, el movimiento de las masas aéreas, la fabricación de productos químicos, la explosión de la dinamita, etc. Para investigar las trayectorias de un elemento y su forma química a través de los procesos se necesita conocer los cambios de posición de los átomos y las moléculas. Si éstos se marcan como las aves, se puede seguir su trayectoria durante las diferentes transformaciones.

Sin embargo, surge una duda: ¿se pueden marcar los átomos y moléculas con material radiactivo como se marcan los peces en un estanque? Efectivamente, sí se pueden marcar.

Los radisótopos de un elemento son idénticos a los isótopos estables del mismo; por lo general, químicamente es imposible diferenciar un átomo radiactivo de otro que no lo es. Gracias a esto, se les ha encontrado múltiples aplicaciones como trazadores en la industria, en la medicina, en la agricultura, en la biología y en varios campos de la investigación científica. Estas aplicaciones se basan en la posibilidad de detectar fácilmente la radiación emitida por una cantidad muy pequeña de un isótopo radiactivo, arrastrado por el isótopo inerte del mismo elemento, lo cual permite determinar la trayectoria de este último en determinado proceso químico, físico o biológico.

Los isótopos radiactivos se emplean en varios procesos industriales. Se utilizan en algunas reacciones catalíticas en la industria química. Los investigadores los han encontrado muy útiles en los estudios de las

moléculas.

Pequeñas cantidades de sustancias radiactivas se mezclan con los materiales que se mueven a través de sistemas complicados. Su paso a través del sistema puede ser detectado por un medidor de radiación Geiger-Muller. Los trazadores se utilizan, además, para detectar fugas en tanques, válvulas y otros contenedores. También permiten determinar la cantidad de gasto al que se le ha sometido a una parte de un equipo. Gracias a la alta sensibilidad de las técnicas para medir radiaciones, se puede conocer las cantidades pequeñísimas de un catalizador utilizado en el proceso si se marca éste con un isótopo radiactivo. (Fig. 34(b)).

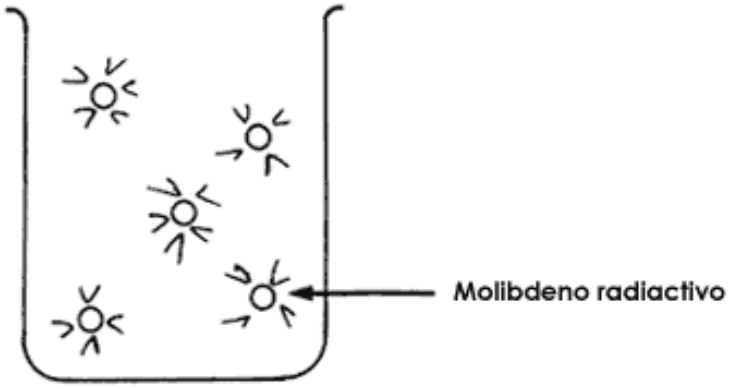


Figura 34 (b). Si para producir 1 000 kg de un producto químico se utiliza 1 g de un catalizador de molibdeno marcado con 10 µCi* de molibdeno radiactivo y después del proceso un muestreo indica que se recupera 9.9999 µCi de este radisótopo, entonces la cantidad de catralizador utilizado en el proceso es: 10 - 9.9999 / 10 = 0.00001 g

Los sistemas vivientes también pueden ser estudiados por trazadores radiactivos. Por ejemplo, los científicos agregan trazadores a los alimentos absorbidos por las plantas. Por medio de la utilización de los detectores de radiación se puede seguir el paso de los alimentos a través de los tejidos de la planta. Los investigadores han aprendido mucho acerca de la fotosíntesis —la "manufactura" de alimentos en la planta con la ayuda de la luz, por decirlo así— utilizando isótopos radiactivos de carbón como trazadores.

Los isótopos radiactivos han hecho posible grandes avances en el conocimiento médico. Los trazadores han ayudado a realizar estudios sobre el cáncer, sistemas que forman la sangre, metabolismo del hierro y actividad de las hormonas. Asimismo, han permitido conocer el funcionamiento del hígado y riñón. Por otra parte, con la ayuda de estos trazadores se ha podido determinar, por ejemplo, la formación de vitaminas, drogas y leche.

Se han realizado gran número de investigaciones en procesos bioquímicos; por ejemplo: el estudio del metabolismo de las grasas y formación del colesterol, la biosíntesis de aminoácidos en el interior de las células y estudios de genética.

El isótopo radiactivo más utilizado en medicina nuclear es el yodo-131, que se aplica para realizar gran número de estudios en el ser humano, como la medición del volumen sanguíneo, detección de problemas del corazón, hígado, tiroides, metabolismo de las grasas, tumores cerebrales, etc.

El segundo isótopo radiactivo más importante en medicina nuclear es el tecnecio-99m, se utiliza para el diagnóstico de tumores; el cromo-51 también se utiliza en medicina nuclear para determinar el volumen total de eritrocitos; el arsénico-74 para localizar tumores cerebrales; el cobalto-60 para el estudio de la anemia perniciosa, y el sodio-24 se ha utilizado para determinar el flujo sanguíneo.

En la agricultura se han empleado los radisótopos de fósforo, nitrógeno y potasio para investigar el

metabolismo y la nutrición de las plantas. Se descubrió que las plantas asimilan una proporción mayor de fertilizantes a través del follaje que a través de las raíces. Cuando se deposita el fertilizante en el suelo se pierde al ser arrastrado por el agua.

Los radisótopos han sido utilizados como trazadores para estudiar la acción de los herbicidas y también la relación de insectos y plantas, como en el transporte del polen por los insectos y la dispersión de insectos benéficos o dañinos para la agricultura. Los isótopos radiactivos también se han utilizado como trazadores para estudiar la contaminación de alimentos por insecticidas y herbicidas; en algunos casos, se demostró que ciertos compuestos se degradan en poco tiempo y dejan de ser un peligro para la salud de los consumidores.

ISÓTOPOS RADIACTIVOS COMO FUENTES INTENSAS DE RADIACIÓN

Las fuentes muy intensas de isótopos radiactivos, en particular de cobalto-60, se utilizan también para varios propósitos. Se emplean fuentes intensas tanto para esterilizar material quirúrgico de polietileno, el cual no puede ser esterilizado con calor, como en las radiografías industriales.

Algunas enfermedades han sido combatidas con éxito con la ayuda de los isótopos radiactivos. Por ejemplo, varios tumores cancerosos pueden ser destruidos por la radiación producida por estos isótopos; en particular, para este propósito, se utiliza la radiación que emite el cobalto-60.

Las radiaciones intensas se han utilizado también en la agricultura para producir nuevas especies vegetales; asimismo, han resultado muy útiles en la conservación de los alimentos por una o más semanas, según el alimento. La esterilización efectuada con dosis mucho mayores conserva algunos alimentos por meses.

ISÓTOPOS RADIACTIVOS PARA MEDIR ESPESORES DE HOJAS Y LÁMINAS

Las radiaciones de los isótopos radiactivos, por lo general emisores beta, se utilizan en la industria para la medición del espesor de hojas de papel, plástico y hule y otros materiales. La fuente radiactiva se coloca en un lado del material que se quiere medir y del otro lado se coloca un detector que mide la radiación beta emitida por la fuente radiactiva. Como la radiación beta no es muy penetrante, la indicación dada por el detector dependerá del espesor del material. Cuanto más débil sea la señal, el espesor es mayor.

El fenómeno de la radiactividad permitió al científico adentrarse en una aventura maravillosa. Al tratar de comprenderla realizó diversos descubrimientos fundamentales en el desarrollo de la ciencia; pero su importancia principal radica en haber abierto la ruta a una serie de hallazgos que fueron piedras angulares de la física y la química.

En este libro se han relatado diversos hechos relacionados con la radiactividad, su descubrimiento, su desarrollo y sus consecuencias. Entre éstas la más importante consiste en haber llegado a conocer la estructura del átomo, misterio que había permanecido oculto para el hombre durante miles de años. A partir de esto, investigaciones posteriores mostraron que la radiactividad se encuentra distribuida abundantemente en la naturaleza, pero que también puede ser producida por el hombre en forma artificial. Como consecuencia de este último descubrimento, los científicos comenzaron a alterar los núcleos de los átomos con la esperanza de encontrar nuevos elementos, y en su afán de lograrlo lo dividieron en fracciones, dándose cuenta en esta forma de la enorme cantidad de energía que podía desprenderse de él.

El propósito de este libro fue el de mostrar cómo una serie de experimentos realizados a fines del siglo pasado y que pudieron pasar desapercibidos desencadenaron una serie de descubrimientos que llevaron al mundo, en menos de medio siglo, a la era científica más destacada de la historia.

NOTAS

* µCi es la milonésima parte de un *curie*(Ci), unidad de radiactividad originalmente basada en la rapidez de desintegración de un gramo de radio.

Indice

GLOSARIO

alfa: nombre dado a la radiación o partícula emitida por un núcleo inestable; está formada por dos neutrones y dos protones, o sea, un núcleo de helio-4. Se representa por el símbolo α.

átomos: corpúsculos eléctricamente neutros que constituyen los elementos químicos. Cada átomo consta de un núcleo, formado esencialmente por neutrones y protones, y de electrones, que se mueven velozmente alrededor del núcleo.

beta: nombre dado a la radiación o partícula que consiste en un electrón, positivo o negativo, emitido en la desintegración de un núcleo átomico. Se representa por el símbolo ß..

centelleo: véase detector por centelleo.

decaimiento radiactivo: transformación de un núcleo por emision espontánea de radiación o partículas o por captura de uno de sus electrones.

detector: dispositivo destinado a detectar la radiación.

detector Geiger-Muller: detector de radiación que consta de un tubo en el que se encuentra confinado un gas de un ánodo y de un cátodo. Mide las radiaciones por el efecto de la ionización que producen en el gas al pasar a través de él. Se mide la corriente de los iones producidos.

detector por centelleo: detector de radiaciones cuyas señales son los destellos producidos por la radiación en una sustancia luminiscente.

deuterio: isótopo natural del hidrógeno cuya masa es de 2 u. Se representa por el símbolo D. Su núcleo, el deuterón, contiene un protón y un neutrón. Su abundancia es muy pequeña en la naturaleza.

deuterón: núcleo del deuterio. Se representa por el símbolo d.

electrón: partícula elemental estable que forma parte de los átomos y que posee la mínima carga de electricidad negativa detectada hasta ahora.

elemento químico: sustancia formada por átomos que tienen el mismo número de protones en el núcleo. Por lo general tiene varios isótopos naturales.

enlace químico: véase energía de enlace.

energía de enlace de una partícula: energía mínima necesaria para lograr su extracción del sistema al que pertenece.

fisión nuclear: reacción nuclear en la que tiene lugar la rotura de un núcleo pesado, generalmente en dos fragmentos, cuyos tamaños son del mismo orden de magnitud. Esta reacción se acompaña de emisión de neutrones y radiaciones, con liberación de una gran cantidad de energía. Por lo general, se produce como consecuencia de la captura de un neutrón.

fotón: partícula elemental, con masa en reposo y carga nulas. Es el cuanto elemental de energía electromagnética y es responsable de la interacción electromagnética. Su símbolo es γ. Véase radiación gamma.

Geiger-Muller:véase detector Geiger-Muller.

isómero: en física nuclear se llama así a cada uno de los núcleos que tienen los mismos números de masa y atómico pero que tienen diferente estado energético.

isótopo: los distintos núcleos que tienen el mismo número atómico y, por lo tanto, pertenecen al mismo elemento químico, pero que tienen diferentes números de masa. Valor de la masa atómica cuando se toma como unidad la dozava parte de la masa atómica del núcleo del carbono-12.

(n, γ) [reacción (n, γ)]: reacción nuclear consistente en la captura de un neutrón por un núcleo y la emisión de una cantidad de energía de unos 6 a 8 Mev. en forma de uno o varios fotones.

neutrón: nucleón cuya carga eléctrica es nula. Su masa en reposo es 1.00136 veces la del protón. Interviene en la constitución de los núcleos atómicos y es inestable fuera de ellos. Su símbolo es n.

núcleo atómico: parte del átomo que está formada por todos sus protones y neutrones.

nucleón: nombre que se da a los protones y neutrones por ser los constituyentes de los núcleos atómicos.

número atómico: en cuanto a lo que se refiere a un elemento químico dado, número de protones contenidos en su núcleo. Coincide con la carga eléctrica positiva del núcleo y con el número de orden del elemento en la tabla periódica. Su símbolo es Z.

polonio: elemento químico de número atómico 84 y símbolo Po. No tiene ningún isótopo estable. Varios de sus isótopos pertenecen a las series radiactivas naturales. Su isótopo más importante es el polonio-210 que es un emisor alfa y se obtiene normalmente bombardeando el bismuto con neutrones; se emplea como fuente alfa de referencia y como fuente de energía.

positrón: nombre del electrón con carga eléctrica + 1.

protón: nucleón cuya carga eléctrica es, en magnitud, igual a la del electrón, pero positiva. Interviene en la constitución de todos los números atómicos y constituye por sí solo el núcleo del hidrógeno. Su símbolo es p.

radiación: energía o partículas materiales que se propagan a través del espacio. Forma de propagarse la energía o las partículas.

radiación gamma: radiación electromagnética emitida durante una desexcitación nuclear; es extraordinariamente penetrante. Se representa por el símbolo γ.

radiactividad: propiedad que presentan algunos núcleos de desintegrarse espontáneamente.

radio: elemento químico de número atómico 88 y símbolo Ra. Todos sus isótopos son radiactivos. Varios de ellos se encuentran en la naturaleza en las series radiactivas naturales. El isótopo principal es el radio-226, que pertenece a la serie del uranio (véase la Fig. 22a), en cuyos minerales se encuentra. Tiene una vida media larga de 1 600 años y constituye prácticamente el 100% del radio existente en la naturaleza. Desempeñó un papel importante en los comienzos de la física y la medicina nucleares.

radisótopo: isótopo radiactivo.

rayos X: radiación electromagnética producida en la desexcitación de los niveles electrónicos de los átomos.

reacción en cadena: reacción de fisión nuclear en la que se producen partículas idénticas a las que la provocan y que son causa de nuevas fisiones.

reacción nuclear: reacción entre partículas en las que las fuerzas que intervienen son de naturaleza

nuclear.

reactor nuclear: instalación en la que puede iniciarse, mantenerse y controlarse una reacción nuclear en cadena.

reactor de potencia: reactor nuclear destinado a producir energía eléctrica.

serie radiactiva: grupo de núcleos en el que cada uno se forma por desintegración del anterior. El primer núcleo de la serie recibe el nombre de padre o cabeza de la serie, el último, que es estable, el de producto final de la serie. Cada serie suele designarse por el nombre del primer núcleo de vida media más larga.

torio: elemento químico de número atómico 90 y símbolo Th. Pertenece a la serie de los actínidos. Todos sus isótopos son radiactivos; varios de ellos existen en la naturaleza. Destaca el torio-232, que constituye prácticamente el 100% del torio existente y es la cabeza de la serie radiactiva del torio.

transición isómerica: desexcitación de un estado nuclear mediante la emisión de la radiación gamma.

transmutación: cambio de la identidad de un núcleo al ser sometido a irradiación.

trazador: isótopo de un elemento que tiene alguna peculiaridad, tal como la masa o la radiactividad, por la que se puede determinar el paso del elemento a través de un proceso biológico, físico o químico.

tritio: isótopo radiactivo del hidrógeno cuyo número másico es 3. Se representa por el símbolo T. Su núcleo contiene un protón y dos neutrones. Se emplea para marcar moléculas y como trazador.

unidad atómica de masa unificada: dozava parte de la masa de un átomo de ^{12}C. La unidad de masa atómica, cuyo símbolo es u.

uranio: elemento químico de número atómico 92 y símbolo U. Pertenece a la serie de los actínidos. Todos sus isótopos son radiactivos. Existe en la naturaleza como mezcla de tres isótopos: ^{238}U, ^{235}U y ^{234}U. Los dos primeros tienen vidas medias muy largas y son las cabezas de las series radiactivas naturales del uranio y del actinio, respectivamente; el ^{234}U pertenece a la serie del uranio. Es un material fisionable y el combustible por excelencia de los reactores nucleares, gracias a su isótopo natural ^{235}U. En algunos reactores se utiliza uranio que contiene este último isótopo en mayor proporción que la natural.

vida media; intervalo de tiempo necesario para que el número de átomos de un núcleo inestable se reduzca a la mitad por desintegración espontánea.

Indice

BIBLIOGRAFÍA

Albarrán, G., M. T. Olguín y M. Fernández-Valverde, "Intercambio isotópico", *Ciencia y Desarrollo* 48, 1983.

Alonso, S. A., G. M. Barrachina, A. J. A. Cerrolaza, G. C. Granados, R. M. López, S. L. Palacios, y H. F. de Pedro, *Léxico de términos nucleares*, Publicaciones Científicas de la Junta de Energía Nuclear, Madrid, 1973.

Asimov, I., *Breve historia de la química*, Alianza Editorial, Madrid, 1984.

Bulbulian, S., "La química nuclear", *Naturaleza* 5, p. 231, 1974.

----------, "¿Qué es la radiactividad?", *Ciencia y Desarrollo* 23, p. 52, noviembre-diciembre de 1978.

----------, y M. Jiménez-Reyes, "Pierre y Marie Curie", *Naturaleza* 10 (3), pp. 179-184,1979.

----------, *La radiactividad y algunas de sus aplicaciones*, Cuadernos del INI, Serie de Divulgación General, México, 1982.

---------, y S. Fernández-Valverde, "Irène y Frédéric Joliot.Curie", *Ciencia y Desarrollo* 48,1983.

---------, y M. Navarrete, "La radiactividad en México", *Ciencia y Desarrollo* 48, p. 77,1983.

Collins, C., J. C. de Andrade, E. Collins E., "Informacões Elementares sobre Radinuclideos", *Quimica Nova* 4, p. 57, 1981.

Fernández-Valverde, S., "Transformaciones nucleares", *Ciencia y Desarrollo* 23, 1978.

Jiménez-Reyes, M., "La medición de la radiación nuclear", *Ciencia y Desarrollo* 23, p. 67, 1978.

Lezama, J., "Producción de radisótopos", *Ciencia y Desarrolío* 23, p. 87, 1978.

Mann, W., *Radiactividad y su medida*, Editorial Reverté Mexicana, México, 1968.

Martínez, A. M., y S. Bulbulian, "Los isótopos radiactivos", *Naturaleza* 5 (2), p. 85, 1974.

---------,"La transmutación de los elementos", *Naturaleza* 5 (4), p. 174, 1974.

Ordóñez-Regil, E., "Contribution á l'étude des effets consecutifs à la desintegration alpha de l'uranium 238 dans quelques composes d'uranium et dans des minerais uranifères", tesis doctoral, Estrasburgo, Francia, 1985.

Ramírez de Arellano, M. E., y S. Bulbulian, "El tecnecio, creación humana", *Ciencia y Desarrollo* 67, pp. 129-134, 1986.

Segovia, N., "La medición de la radiactividad", *Naturaleza* 5 (3), p 107, 1974.

---------, "Trazas nucleares en dieléctricos", *Ciencia y Desarrollo* 23, p. 75, 1978.

---------, y S. Bulbulian, "Radiactividad en el habitat", *Ciencia y Desarrollo* 70, pp. 41-49,1986.

Solache, M. J., "La radiactividad natural", *Ciencia y Desarrollo* 48, 1983.

Tejera, A., "Energía nuclear: producción de radisótopos y electricidad", *Ciencia y Desarrollo* 23, p. 59, 1978.

---------, "Los elementos transuránicos", *Ciencia y Desarrollo* 48, p. 24, 1983.

Indice

COLOFÓN

Este libro se terminó de imprimir y encuadernar en el mes de diciembre de 1996 en Impresora y Encuadernadora progreso, S A. de C. V. (IEPSA), Calz. de San Lorenzo, 244,; 09830 México, D.F.

Se tiraron 2000 ejemplares

La Ciencia desde México es coordinada editorialmente por MARCO ANTONIO PULIDO Y MARIA DEL CARMEN FARÍAS

Indice

Anterior Previo

CONTRAPORTADA

Hacia 1896 los famosos investigadores, Pierre y Marie Curie iniciaron sus estudios sobre el uranio y el torio que condujeron a dos resultados notables, 1) al descubrimiento de dos elementos, el polonio y el radio y 2) a encontrar que los elementos estudiados emitían, al desintegrarse, energía en forma de radiación. Marie Curie llamó a este fenómeno radiactividad. El conocimiento de este fenómeno —como ahora casi todo mundo sabe— permitió a los científicos adentrarse en una aventura que es, al mismo tiempo, maravillosa y terrorífica según el ángulo desde el cual se observe. Los científicos, al tratar de comprenderla, llegaron al descubrimiento de un mundo nuevo en el campo de la física que cambió radicalmente la concepción que el hombre tenía del universo que lo rodea. A la vez, y este es el lado oscuro del asunto, utilizaron el nuevo conocimiento para fabricar bombas nucleares.

El estudio de la estructura atómica de la materia ha llevado a una serie impresionante de descubrimientos. Ya en 1919 Rutherford propuso el llamado modelo nuclear del átomo, avance considerable si se tiene en cuenta que en el siglo XIX se consideraba al átomo como un objeto simple, compacto. Mas el avance ha sido vertiginoso: los cientificos se lanzaron a alterar el núcleo de los átomos con la esperanza de encontrar elementos nuevos y, al fraccionarlo, se dieron cuenta de la enorme cantidad de energía que almacena. Asimismo, comenzaron a localizar —aparte de radiaciones de tipos diversos: rayos alfa, gamma y beta— todo un zoológico de partículas cuya vida, en ocasiones, alcanza apenas fracciones de segundo.

Como se ve, el estudio de la radiactividad es de una amplitud considerable. "El propósito de este libro —dice la doctora Silvia Bulbulian— es el demostrar cómo una serie de experimentos efectuados a finales del siglo, pasado y que bien pudieron pasar desapercibidos, desencadenaron una serie de descubrimientos que llevaron al mundo, en menos de medio siglo, a la era científica más destacada de la historia."

Silvia Bulbulian estudió química en la Facultad de Química Berzelius y física en la UNAM, donde también alcanzó la maestría y el doctorado. Desde 1961 trabaja en la Comisión Nacional de Energía Nuclear, denominada ahora Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares. Trabaja en el Centro Nuclear de México, en Salazar y, a partir de 1970, se le encargó formar un grupo de investigación muy selecto en las áreas de química nuclear y radioquímica.

En la portada Nucleo del reactor nuclear TRIGA MARK III en operación, Centro Nuclear de Mexico. Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares.

Indice