

Radiactividad

María del Pilar Trujillo García**

Hoy en día la radiactividad ocupa un gran campo en la investigación científica y tecnológica, ya que ha ayudado a ampliar los conocimientos acerca de los fenómenos y procesos tanto físicos como químicos.

La mayoría de los fenómenos que se verifican en la naturaleza, y los procesos artificiales que se realizan en los laboratorios y en la industria, están basados en el movimiento de los átomos y de las moléculas; y en la combinación química de estos para formar nuevos compuestos.

Antes de que se descubriera la radiactividad se afirmaba que el átomo, la partícula más pequeña de materia, era por definición indivisible e indestructible; pero con el concepto de radiactividad nació una ciencia nueva: *la física atómica*.

Por ello el objetivo de mi trabajo es seguir el curso histórico del descubrimiento de la radiactividad, ya que ha contribuido a demostrar definitivamente la existencia de los átomos y al mismo tiempo la complejidad de su estructura.

La historia de la química me parece importante: a través de ella podemos observar los obtáculos que se presentaron en el avance de la ciencia, y con esto darnos cuenta que el camino científico es largo y difícil; pero los pequeños logros se van acumulando hasta formular un descubrimiento en beneficio de la humanidad.

Descubrimiento de la radiactividad

Los descubrimientos de los años que cerraron el siglo XIX, tuvieron no sólo un efecto profundo sobre el progreso y el pensamiento científico en la primera mitad del siglo XX, crearon una nueva norma para el poder político internacional, e incluso para la vida misma.

Estos descubrimientos fueron los siguientes: el de los rayos X, por Röntgen, en 1895; el de la radiactivi-

* Este tesis histórica se realizó durante el segundo semestre de la Maestría en Química, del Depto. de Química del ICUAP; bajo la supervisión del Dr. Luis Rivera Terrazas, actual Coordinador del Departamento de Física del Estado Sólido del ICUAP.

** Departamento de Química, Instituto de Ciencias, UAP.



vidad, por Becquerel, en 1896; la postulación de la naturaleza corpuscular de los rayos catódicos, por J. J. Thomson, en 1897; y la introducción del concepto fundamental del "cuanto", por Planck, en 1900. Así, en el breve lapso de cinco emocionantes años se sentaron algunos fundamentos de gran importancia de la *era nuclear*, en cuyo umbral se encuentra actualmente el mundo.

La radiactividad fue descubierta como consecuencia directa de los rayos X, o rayos Röntgen. Estos rayos habían sido producidos por un tubo de descarga por la acción de los rayos catódicos que incidían sobre la pared de vidrio del tubo; la producción de rayos X iba acompañada de fuerte luminiscencia del vidrio y se especuló muchísimo sobre si esta luminiscencia o fluorescencia podría estar asociada necesariamente a la producción de rayos X.

Esta posibilidad condujo a una intensa investigación sobre la emisión de rayos X por sustancias que se volvían fluorescentes o fosforecentes por la luz visible.

En el curso de estas investigaciones, el físico francés Antoine Henri Becquerel experimentó con un sulfato doble de uranio y potasio, una sustancia cuya fosforescencia había sido investigada por él y su padre, Alexandre Edmond Becquerel. Así, los primeros atisbos de la desintegración de sustancias al parecer sólidas, o sea del fenómeno llamado *radiactividad* los tuvo Becquerel en 1896.

Becquerel escribió acerca de las radiaciones de uranio una monografía intitulada "Sur les radiation émises par phosphorescence", en *Comptes Rendus* (vol. XVII, p. 420, 1896).¹

Con cristales de sulfato doble de uranio y potasio, en forma de cáscara translúcida, hizo lo siguiente: envolvió una placa fotográfica Lumière con emulsión bromizada en dos hojas de papel negro y grueso, de modo que la placa no se empañara al exponerla al sol durante un día. Puso encima del papel una capa de sal de uranio y lo dejó todo expuesto al sol varias horas; al revelar la placa fotográfica se veía la silueta de sal de uranio sobre el negativo. Al colocar entre el papel y la sal una moneda, o una placa metálica con un dibujo, la imagen de estos objetos aparecía en el negativo.

Los mismos experimentos pueden hacerse con una lámina de vidrio delgada, puesta entre el papel y la sal de uranio; lo cual excluye la posibilidad de una acción química producida por vapores que emanase

de ella al calentarse con los rayos solares.

De estos experimentos dedujo que las radiaciones penetran al papel que es opaco a la luz y reducen las sales de plata.

Insistió de manera especial en el hecho siguiente: los mismos cristales de la sal de uranio colocados en las mismas condiciones, pero protegidos de la excitación de los rayos incidentes, y guardados en la oscuridad producen los mismos efectos fotográficos. Es importante advertir entonces que, según parece, este fenómeno no debe atribuirse a la radiación luminescente por fosforescencia, puesto que al cabo de un centésimo de segundo estas radiaciones se hacen tan tenues que son casi imperceptibles.²

A estas radiaciones se les llamó *rayos becquerel*, en honor a su descubridor, y posteriormente al fenómeno que las produce se le llamó *radiactividad*.

También demostró que, al igual que los rayos X las nuevas radiaciones poseían la propiedad de descargar cuerpos electrizados; esta propiedad fue, y sigue siendo, la base de la mayoría de los métodos de detección de radiación.

Finalmente, Becquerel guardó un trozo de uranio durante varios años en la oscuridad, y pudo demostrar que al cabo de ese tiempo su acción sobre la placa fotográfica no se había alterado. Con esto demostró que las radiaciones de uranio ocurrían independientemente del fenómeno de luminiscencia.

Aparte del descubrimiento de la radiactividad en sí, una de las contribuciones más importantes de Becquerel fue la de demostrar que las radiaciones de uranio producen la descarga de un cuerpo electrizado en el aire; además usó la forma elemental del electoscopio, ideado por Dragomir Hurmuzesén, para hacer medidas semicuantitativas de la intensidad radiactiva. Este método es mucho más rápido y cómodo que el de observar el efecto de la placa fotográfica.

Numerosos científicos se dedicaron al estudio de las radiaciones descubiertas por Becquerel. Especialmente fructíferos fueron los trabajos realizados dos años después por María Skłodowska-Curie y su esposo Pierre Curie, quienes establecieron que los rayos Becquerel eran emitidos exclusivamente por sustancias que contenían uranio o torio.

María Curie dirigió su atención a la posibilidad de la existencia de otros elementos radiactivos, examinó muchos compuestos por el método de medicina eléctrica, en conjunción con el fenómeno de piezoelectricidad, que había sido descubierto por los hermanos Jackes y Pierre Curie. El aparato consistía en

¹ La traducción inglesa está tomada de *A Source book in physics*, editado por William Francis Magie; Nueva York y Londres: Mc Graw-Hill Book Company, 1935.

² Del libro *Autobiografía de la ciencia*, de Forest Ray Moulton y Justus J. Schifferes, traducción de Francisco A. Delpiante.

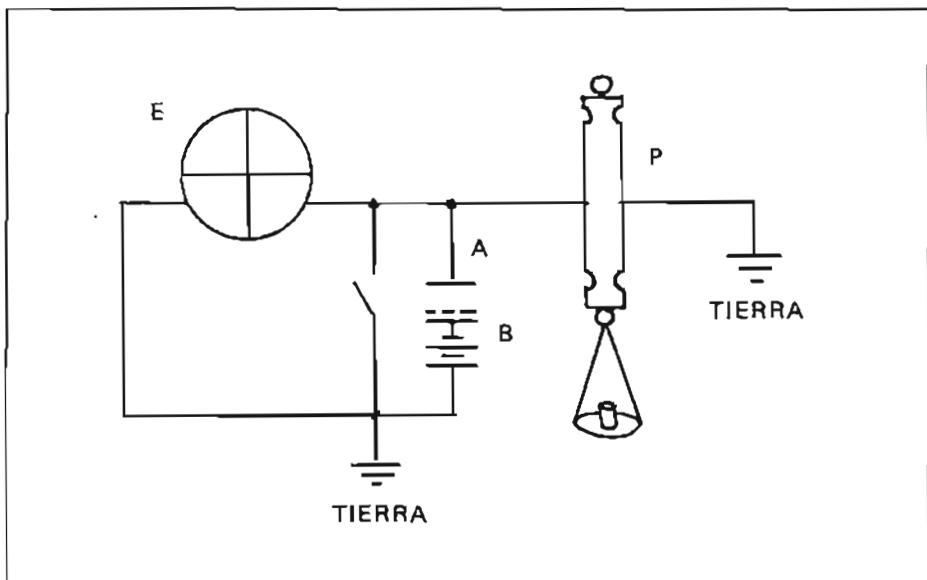


Figura 1

un condensador de placas paralelas AB (ver figura núm. 1); en la placa inferior se colocaba la sustancia objeto de ensayo, en forma de una capa de polvo, cuyo espesor era de 0.25 a 6.0 mm. El diámetro de cada placa era de 8 cm, y la distancia entre ellas era de 3 cm. La placa inferior B, estaba conectada a uno de los polos de la fuente de potencial, y el otro a tierra.

La placa A estaba colocada entre un par de placas de un electrómetro de cuadrante y conectada a un electrodo de un cristal piezoelectrónico de cuarzo, su otro electrodo estaba conectado a tierra.

Bajo la acción de las radiaciones, se ionizaba el aire entre las placas A y B, volviéndose al fluir entre las placas una corriente de 10^{-11} amperios. Así, un par de cuadrantes del electrómetro, E adquiría un potencial eléctrico, el cual a su vez, causaba la desviación de la aguja del electrómetro.

Al aplicar pesos al cristal piezoelectrónico, se desarrollaba un potencial de compensación que neutralizaba al potencial debido a la corriente que fluía por el condensador, y así podría reducirse a cero la desviación del electrómetro. En estas condiciones, la mesa agregada en un tiempo dado era la medida de la corriente que fluía por el condensador como consecuencia de haberse vuelto conductor del aire por acción de las radiaciones. Al comienzo de cada medida se conectaban a tierra tanto la placa A como el par de cuadrantes conectados a ella; por medio del interruptor K. Al aumentar el voltaje sobre la placa B, la corriente llega a un valor límite, llamado corriente de saturación que es una medida relativa aproximada de la intensidad radiactiva de la capa de sustancia sobre la placa B.

Con este método eléctrico, María Curie examinó muchos compuestos químicos y gran número de rocas y minerales para ver si otros elementos exhibían el mismo fenómeno de radiactividad hallado en el uranio. Como resultado de estos experimentos, halló que el torio era el único elemento que poseía una radiactividad del mismo grado que la del uranio; resultado al cual había llegado independientemente G. G. Schmith, quién lo había publicado unas semanas antes.

María Curie mostró también que la radiactividad de los compuestos de uranio y de torio eran proporcional a las cantidades de estos elementos presentes en ellos y, como se había demostrado que era independiente del estado físico o de la descomposición química, llegó a la conclusión de que se trataba de un fenómeno atómico.

También halló que algunos minerales, en especial pechblenda, calcolita, autinita y carnotita, eran más radiactivos que el propio uranio puro. Así, las medidas con estas sustancias daban las siguientes corrientes, en unidades de 10^{-11} amperios, a través del condensador AB.

Uranio	2.3
Pechblenda	1.6 a 8.3
Calcolita	5.2
Autinita	2.7
Carnctita	6.2

Entonces surgió la pregunta: si la radiactividad era un fenómeno atómico, ¿cómo era posible que minerales que contenían uranio y quizás indicios de torio

fueran más radiactivos que el propio uranio puro? Para confirmar este punto, María Curie preparó cristales de calcolita artificial (que es un fosfato doble de uranio y cobre, conocido también como tobernitá) que exhibió una radiactividad normal conforme a su composición; esto es, dos veces y media menor que la del uranio y llegó a la conclusión de que esos minerales debían contener indicios de un elemento radiactivo muchas veces más activo que el propio uranio. Los esposos Curie se impusieron la tarea de aislar este elemento hipotético, del cual no se conocía otra propiedad que su radiactividad. Sus métodos químicos se complementaron con la observación de la radiactividad y su investigación fue, en cierto modo, la primera aplicación de las técnicas de radioquímica.

Descubrimiento del radio

Durante las investigaciones que hicieron los esposos Curie observaron la radiactividad de un compuesto que era sometido a descomposición química; determinaron las radiactividades de todos sus productos y pudieron seguir las sustancias radiactivas a través de todas las etapas del proceso químico.

Casualmente descubrieron dos nuevos elementos radiactivos, de los cuales uno era químicamente similar al bismuto y lo llamaron polonio, en honor de Polonia (patria natal de María Curie); el otro era químicamente similar al bario, y se separaba con él; lo habían descubierto en colaboración con G. Bernot y lo llamaron radio.

En 1898, publicaron sus resultados, donde comentaban que cuando se colocaba polonio o radio cerca de una sal luminiscente, la volvían fluorescente. Era importante, entonces, tener la seguridad de que sus

actividades se pudieran identificar como debidas a nuevos elementos; esto resultó difícil para el polonio, pero por cristalizaciones fraccionadas repetidas llegó a concentrarse finalmente cloruro de radio, que es menos soluble que el cloruro de bario.

Finalmente, en colaboración con A. Debierne y, con la ayuda de una donación que le hizo el gobierno austriaco de una tonelada de residuos de pechblenda, de Joachimstal, María Curie pudo separar unos 8 kg de cloruro de bario y radio, con una actividad de 60 veces la del uranio metálico. Al separar la pechblenda en fracciones para determinar su actividad, aisló una fracción de sulfuro de bismuto que era mucho más activo que el uranio; puesto que el sulfuro de bismuto puro no es radiactivo, supuso que un elemento de gran radiactividad y propiedades químicas análogas a las del bismuto estaba presente como impureza; así descubrió el polonio.

Por último, trabajando con sólo alrededor de 0.1 gr de cloruro de radio, en el que Demarcay había demostrado espectroscópicamente ligeros indicios de bario, María Curie determinó el peso atómico del radio que resultó ser de 225. Actualmente el valor aceptado es de 226.5 determinado por O. Honigschmidt en 1934.

En 1903 fue otorgado el Premio Nobel de Física a los esposos Pierre y María Curie y al físico Henri Becquerel.

En 1911, le fue otorgado el Premio Nobel de Química a María Curie por haber aislado el radio. Murió en 1934, como resultado de la prolongada exposición a las radiaciones del elemento que había logrado aislar.

El radio se extrae de diferentes materiales, por ejemplo, de la pechblenda de Bohemia, la carnotita

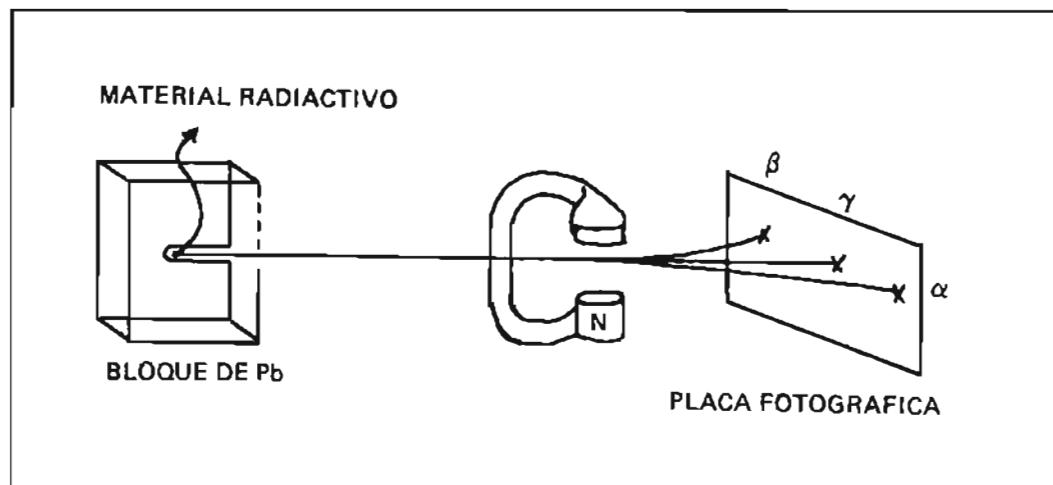


Figura 2

de Colorado y, la autinita de Portugal.

El radio emite radiaciones semejantes a las del uranio; pero son de mayor intensidad y desprenden calor espontáneo y permanentemente.

Hacia 1904 ya se habían descubierto más elementos radiactivos naturales, principalmente por los trabajos del físico neozelandés Ernest Rutherford y las investigaciones de Frederick Soddy.

Partículas alfa, beta y gamma

Becquerel continuó estudiando las propiedades de la nueva radiación y, aprovechando las preparaciones de los esposos Curie, en 1899 demostró que las radiaciones del radio pueden ser desviadas por un imán. También en ese año E. Rutherford, que trabajaba en el Cavendish Laboratory de Cambridge bajo la dirección de J. J. Thomson, dio a conocer que la radiación de uranio es, por lo menos, de dos tipos: alfa (α) y beta (β). Posteriormente un investigador francés, P. Villard, encontró una tercera clase de radiación llamada gamma (γ).

El aparato que sirvió para mostrar la presencia de estas tres radiaciones se indica en la figura 2.

Los rayos colimados al pasar por un estrecho orificio de un bloque de plomo atraviesan un campo magnético intenso, con lo cual son desviados de manera diferente, demostrando con esto que se tienen cargas eléctricas distintas.

Así se encontró que las radiaciones alfa están cargadas positivamente; posteriormente, Rutherford demostró que son partículas positivas de átomos de helio y que se mueven a una velocidad aproximada de 2.5×10^9 cm/s; a su paso por el aire gastan unos 35 eV de su energía, en promedio, por cada par de iones que se crean.

Las radiaciones beta se desvían en dirección opuesta a las radiaciones alfa; se encontró que eran electrones que se mueven a velocidades aproximadas de 1.6×10^10 cm/s.

Con esto podemos llamar a las radiaciones alfa y beta como partículas alfa y beta respectivamente. Así, las partículas beta difieren de las alfa en lo siguiente:

1. Experimenta muchas desviaciones en sus encuentros con electrones extranucleares, los cuales son "barridos a un lado" por las partículas alfa, más pesadas.

2. Pueden crear fotones, en forma de rayos X, cuando experimenta fuerte aceleración o desaceleración en el campo nuclear.

3. Produce diferentes fenómenos de interferencia en colisiones con partículas idénticas.

4. Las partículas beta son emitidas por el núcleo con energías variables, mientras que diferentes grupos de partículas alfa son homogéneas en energía.

Los rayos gamma son fotones semejantes a la luz visible, pero de una longitud de onda más corta; son muy semejantes a los rayos X. Hasta 1912 se estableció su naturaleza electromagnética, por los experimentos de M. Von Laue en colaboración con W. Friedrich y P. Knipping, y por los de W. H. Bragg y W. L. Bragg en 1913.

Rutherford y E. N. da C. Andrade, en 1914, efectuaron experimentos de difracción de rayos gamma, con el uso de un cristal de gama; con esto demostraron que eran de naturaleza similar a la de los rayos X.

Con la emisión de partículas alfa y beta de los átomos radiactivos surgió la idea de que éstos estaban constituidos por unidades menores, conduciendo al concepto nuclear del átomo, fundamental en la actual teoría atómica.

Las transformaciones que se verifican en los átomos de los elementos radiactivos, al emitir partículas alfa y beta y rayos gamma, modifican el núcleo atómico transformándolo en otro distinto: a este fenómeno se le llamó "desintegración radiactiva".

La cantidad de átomos que se desintegran en una unidad de tiempo es proporcional a la cantidad de átomos radiactivos inalterada existente en cada momento. Esto significa que en la unidad de tiempo se desintegra siempre una cantidad determinada y constante para cada elemento radiactivo y se le llama "constante de desintegración".

Basándose en sus experimentos (acerca de una "sustancia radiactiva emitida por compuestos de torio", comunicado en enero de 1900 en el *Philosophical Magazine*) Rutherford dedujo la rapidez de formación de iones al desintegrarse una sustancia radiactiva:

$$dn / dt = q - \lambda n$$

donde n es el número de iones producidos por segundo al tiempo t por las desintegraciones radiactivas; q es el número de iones suministrados por segundo por la emanación que se difundía desde el torio; λ es una constante; $q = 0$ cuando la fuente de emanación se separa.

En esta comunicación Rutherford describe también cómo la emanación se comportaba más bien como un gas, por cuanto podía atravesar tapones de algodón y agua caliente o fría, o ácido sulfúrico concentrado o diluido, sin perder su radiactividad. También demostró en su comunicación de febrero de 1900, que la rapidez del decaimiento de la actividad excitada (la cual fue observada en cuerpos sólidos en la proximidad del torio) era menor que la emanación, pues disminuía a casi la mitad de su actividad en 11 horas. Además, la actividad excitada se debía a un depósito

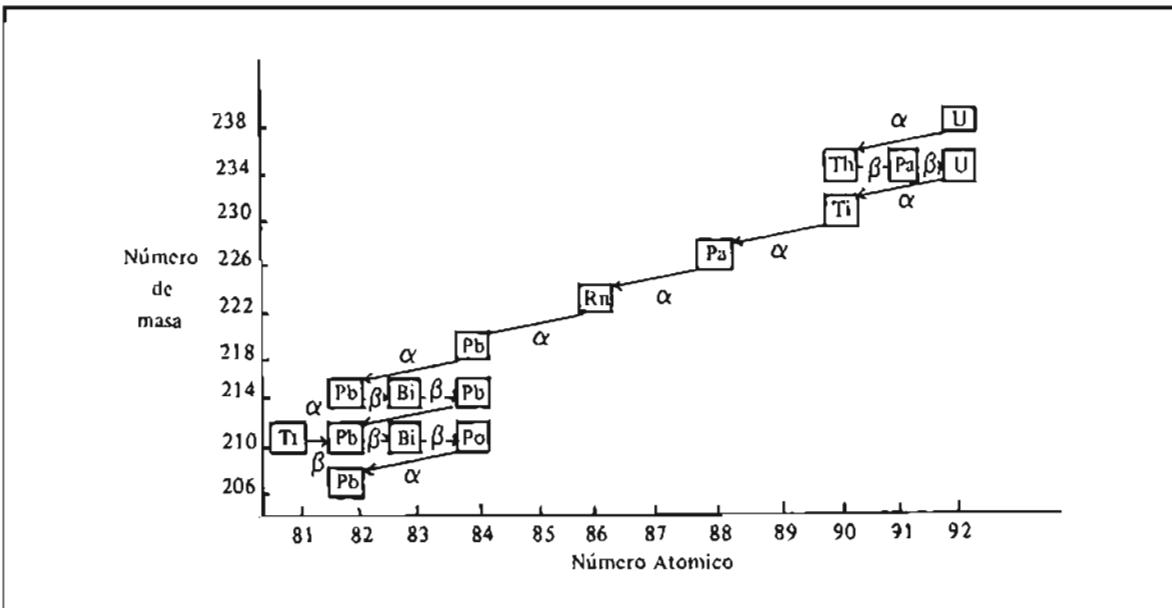


Figura 3. Serie del uranio 238 al plomo estable 206.

que podía separarse de un alambre de platino por ácido sulfúrico, pero que se encontraba posteriormente en el residuo al evaporar el ácido.

Con esta introducción, que da una idea de los métodos científicos empleados, podemos pasar a la conclusión expresada por Rutherford y Soddy en su comunicación acerca de "La causa y naturaleza de la radiactividad", que apareció en el número de noviembre de 1902 de la revista *Philosophical Magazine*, y que dice así: "la interpretación de los experimentos mencionados tiene que ser, por consiguiente, que la emanación es un gas químicamente inerte, de naturaleza análoga a los miembros de la familia del argón". En la misma comunicación hacen especulaciones acerca de la asociación del helio con la radiactividad y, en su conclusión, dicen que:

La ley de la declinación de la radiactividad con el tiempo aparece como la expresión de la ley simple del cambio químico, en la cual una sustancia sólo se altera a velocidad proporcional a la cantidad de ella que queda.

En 1908, cuando Rutherford y Geiger llegaron a la conclusión de que la partícula alfa era idéntica al átomo de hielo, pudieron deducir, en el caso del radio —y con el uso del peso atómico más recientemente obtenido por María Curie para el radio, 226—, que el peso atómico de la emanación de radio (*radón*), debía ser 222, y el de la forma de depósito de *radón* debía ser de 218.

En el transcurso de dos años, a partir de los experimentos de dispersión con partículas alfa, Rutherford propuso la explicación de que el átomo debería tener un núcleo central muy pequeño, donde estaba concentrada toda la carga positiva y casi toda la masa del átomo; y los electrones de ese átomo estaban distribuidos en el espacio que rodeaba al núcleo. Este centro se llamó posteriormente núcleo atómico. Esto se publicó en el *Journal of the Literary and Philosophical Society of Manchester*, donde, un siglo antes, Dalton había expuesto su concepto del átomo.

Hacia 1911, varias especies radiactivas se apiñaban en un lugar que parecía ser el propio por sus propiedades físicas y químicas, según la Tabla Periódica.

En 1913, T.W. Richards, de la Universidad de Harvard, encontró dos pesos atómicos diferentes para el plomo obtenido de dos fuentes distintas. En el mismo año, F.W. Aston separó los átomos de neon en dos especies con diferentes pesos atómicos. Estos resultados fueron interpretados por F. Soddy, en Gran Bretaña: dio el nombre de *isótopos* a los átomos del mismo elemento que tienen las mismas propiedades químicas, pero diferente número de masa.

Así, para entender el proceso de desintegración radiactiva, es necesario considerar el modelo del átomo nuclear para definir el número de masa y número atómico; y con ello explicar la formación de isótopos.

Número atómico: (Z) es igual al número de protones que hay en el núcleo.

- Número de masa:** (A) es igual al número de protones y neutrones que hay en el núcleo.
La diferencia A-Z nos da el número de neutrones en el núcleo.
- Emisión α :** A decrece en 4 unidades, Z decrece en dos unidades.
- Emisión β :** A no cambia, Z crece en una unidad.
- Emisión ϕ :** A y Z no cambian.

Esto se representa gráficamente en la figura 3.

Actualmente se conocen unos trece isótopos del radio, cuyo peso atómico varía desde 204 hasta 222. Todos estos isótopos son radiactivos. En ellos pensaba Soddy cuando inventó el término; pero, como mostraron posteriormente los trabajos de J.J. Thomson y F.W. Aston, hay también muchos isótopos estables. Así, ahora sabemos que el hidrógeno 2 (deuterio) es un isótopo estable del hidrógeno 1, mientras que el hidrógeno 3 (tritio) es un isótopo radiactivo del hidrógeno 1. Hay diez isótopos estables del estaño y 15 isótopos radiactivos, cuyos pesos atómicos varían desde 108 hasta 132.

En 1903, en la comunicación titulada "Cambio radiactivo", publicada en *Philosophical Magazine*, Rutherford y Soddy presentaron la *Ley del cambio radiactivo*. Señalaban que en todos los casos investigados, la actividad de una sustancia radiactiva disminuye en proporción geométrica con el tiempo. Así, la ley que determina la rapidez de desintegración (que es igual a la transformación de una sustancia radiactiva) es: "La cantidad de sustancia que decrece en el tiempo, D t es proporcional a la cantidad presente de la sustancia N (t)."

Si la cantidad presente de sustancia es N (t), entonces

$$-\frac{dN}{dt} = \lambda N(t)$$

integrandos

$$\begin{aligned} \frac{dN}{N} &= -\lambda dt \\ \ln N &= -\lambda t + C \end{aligned}$$

para $t = 0$ y $C = \ln N_0$

$$\ln N/N_0 = -\lambda t$$

despejando N

$$N = N_0 e^{-\lambda t}$$

Donde N_0 es la cantidad de sustancia presente para el tiempo 0 y λ es la constante de desintegración y es característica de cada sustancia.

Además de las tres clases de radiación que fueron observadas, al terminar el siglo XIX y comenzar el siglo XX, se ha encontrado que los radionúclidos (o sea el elemento radiactivo) pueden desintegrarse con emisión de positrones (es decir, emisión β^+). En este caso, el elemento "hijo" está una unidad más abajo

en número atómico, en la tabla periódica. Pero igualmente, esta misma transmisión, de la que resulta la pérdida de una unidad en el número atómico, puede ser efectuada por la captura de un electrón orbital por el núcleo atómico, con la emisión consiguiente de un rayo X característico. Esta energía de excitación puede de entrar asimismo en interacción con los electrones más externos de un átomo y darles la energía cinética suficiente para abandonar el átomo como electrones de baja energía —o electrones Auger, como se les llama por su descubridor.

Del proceso conocido como conversión interna, surge un nuevo producto de desintegración. Este proceso ocurre cuando, después de la transición de un radioelemento por la emisión de una partícula, por ejemplo de una partícula alfa, un electrón, un positrón o por captura de un electrón orbital, el núcleo hijo queda en estado excitado; es decir, con una cantidad de energía en exceso, de la cual se libera en forma de un rayo gamma. La conversión interna ocurre cuando, en vez de ser emitido un rayo gamma del núcleo el exceso de energía es transferido a un electrón orbital que abandona el átomo a una velocidad correspondiente al resto de energía disponible en la transición.

Esta digresión acerca de los modos de desintegración es necesaria para enunciar lo referente a la constante de desintegración (λ) de un radionúclido: es característica fundamental de una sustancia radiactiva, que no se afecta en casi ninguno de los estados físicos o químicos en que pueda hallarse, y es por ello de máxima utilidad para identificar elementos radiactivos. Pero si la desintegración implica intervención de electrones atómicos orbitales —como en el caso de la captura interna del electrón o de conversión interna—, entonces, todo cambio que afecte la proximidad de estos electrones afectará también la velocidad de desintegración. Así, en los dos casos mencionados pueden efectuarse cambios bastante pequeños de la constante, por cambios en la composición química, y cambios mucho mayores en condiciones de ionización completa, como son las que pudieran prevalecer en las estrellas. De otro modo, la constante de desintegración es una propiedad única característica de un radionúclido, como lo es también una cantidad conocida como vida media de la sustancia radiactiva.

En el caso de emisión alfa o beta, λ y la vida media son completamente independientes de los estados físicos o químicos de las sustancias.

La vida media, concepto introducido por Rutherford en 1904, es el tiempo necesario para que un elemento radiactivo se disintegre desde una actividad dada a la mitad de esta actividad.

Cálculo de la vida media de una sustancia radiactiva

El número de átomos que decaen entre t y $t + dt$ es igual a $dN = \lambda N dt$; pero

$$N = N_0 e^{-\lambda t}$$

Que es igual al número de átomos que decaen en el tiempo t , luego:

$$dN = \lambda N_0 dt$$

Como el proceso es estadístico, y un sólo átomo puede tener una vida desde 0 a ∞ , entonces la vida media es

$$\begin{aligned} t' &= \frac{1}{N_0} \int_0^{\infty} \lambda N_0 t e^{-\lambda t} dt \\ &= \lambda \int_0^{\infty} t e^{-\lambda t} dt \end{aligned}$$

Pero esta integral es del tipo $\int_0^{\infty} x e^{-ax} dx = (e^{-ax} / a^2)(ax - 1)$, por lo tanto:

$$t' = \lambda \frac{e^{-\lambda t}}{(-\lambda)^2} (-\lambda t - 1)$$

Para $t = \infty$; $t' = 0$

$$\text{Para } t = 0; t' = \frac{\lambda}{(-\lambda)^2} = \frac{1}{\lambda}$$

Por lo tanto, la vida media es el recíproco de la constante de desintegración λ .

También es útil el concepto de vida media T , que es el tiempo en que una sustancia se reduce a la mitad de su cantidad inicial.

Así, tenemos

$$\frac{N(T)}{N_0} = \frac{1}{2} = e^{-\lambda T}$$

$$\log \frac{1}{2} = 0 - \log 2 = -\lambda T (\log 2)$$

$$-0.3010 = -0.4343 \lambda T$$

$$\text{Reduciendo } 0.6930 = \lambda T$$

$$\text{Despejando } T = 0.6930 = \lambda T$$

$$\text{y } T = 0.6930 t'$$

Las vidas medianas de los radionúclidos varían desde el orden de 10^{-9} seg al orden de 10^9 años; una gama de valores enormemente grande.

Un ejemplo del uso de la ley de Desintegración ra-

dactiva sería el cálculo del número de átomos que se desintegran por un segundo en un gramo de radio:

$$\begin{aligned} N_0 &= 2.025 \times 10^{23} / 226 \\ &= 2.666 \times 10^{21} \end{aligned}$$

$$\text{Vida media} = 1622 \text{ años}$$

$$\begin{aligned} \lambda &= 0.69315 / 1622 \times 3.157 \times 10^7 \\ &= 0.1354 \times 10^{-10} / s \end{aligned}$$

La rapidez de desintegración de un gramo de radio 226 es:

$$\frac{-dN_0}{dt} = dN/dt = \lambda N = 3.61 \times 10^{10} \text{ partículas alfa por segundo.}$$

Esta cantidad estuvo estrechamente ligada con la definición original de la unidad de radiactividad, el curie, que fue definido como la cantidad de radón en equilibrio con un gramo de radio 226 y se ha convertido así en la base de la definición actual del curie, que se define como la actividad de una sustancia radiactiva tal, que esta sustancia se desintegre a una razón de 3.700×10^{10} desintegraciones por segundo.

En los primeros días de la radiactividad, los investigadores se interesaban por saber no sólo cómo se desintegra un radionúclido progenitor, sino también las leyes que gobiernan las cantidades de generaciones sucesivas de progenie radiactiva presente en todo momento. Rutherford derivó las relaciones entre estos miembros de una familia radiactiva y las publicó en 1904 en la revista *Philosophical transactions* de la Royal Society.

Actualmente se han encontrado cuatro series de elementos radiactivos clasificados de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} \text{Serie 4n} &= \text{Serie del torio} \\ \text{Serie 4n} + 1 &= \text{Serie del neptunio} \\ \text{Serie 4n} + 2 &= \text{Serie uranio-radio} \\ \text{Serie 4n} + 3 &= \text{Serie uranio-actinio} \end{aligned}$$

donde n es un número entero.

Cada serie de desintegración radiactiva tiene como producto final el isótopo estable del plomo 82.

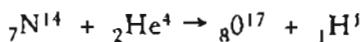
El periodo de semidesintegración en cada serie es muy variable.

Después de un periodo de tiempo determinado, el conjunto de una serie dada se mantiene casi invariable; es decir, que el número de átomos que se obtienen es igual al de los que se desintegran. Si se elimina del conjunto un elemento en equilibrio, se altera; sin embargo, al cabo de cierto tiempo se restablece nuevamente.

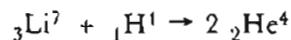
Radiactividad artificial

Anteriormente, se ha hablado de radionúclidos producidos artificialmente por medio de reacciones nucleares y con esto, se ha adelantado un poco la revisión histórica del desarrollo de la radiactividad.

La primera reacción nuclear producida artificialmente, o desintegración artificial, fue observada por Rutherford en 1919, cuando usó una fuente de radio C + C' (Bi 214 + Po 214) con energías de partícula alfa de 7.5 MeV, para bombardear nitrógeno. Como resultado de ello, se produjeron partículas de largo alcance, correspondientes a protones (que fueron identificados por desviación magnética), cuyo alcance en el aire, en condiciones TPN, era de 28 cm. Se tuvo cuidado de purificar el nitrógeno para privarle del más mínimo indicio de hidrógeno, a fin de eliminar la posibilidad de rebotes de hidrógeno. Posteriormente Rutherford y Chadwick observaron que los protones de largo alcance tenían en el aire, en condiciones TPN, un alcance de 40 cm, en comparación con 29 cm, máximo alcance posible de cualquier protón de rebote. Estas observaciones se representan por la reacción nuclear:

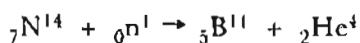


El siguiente progreso en este campo llegó en 1932, cuando J. D. Cockcroft y E. T.S. Walton, en el laboratorio de Rutherford, bombardearon litio con protones de 300 KeV, producidos en tubo de descarga, y observaron en una cámara de niebla que se producían partículas alfa de acuerdo a la reacción



Las partículas alfa aparecían en pares en direcciones opuestas, y así conservaban energía e impulso con alcances iguales en el aire, en condiciones TPN, de alrededor de 8.3 cm. Estos alcances correspondían a una energía cinética inicial de las partículas alfa de unos 8.55 MeV. Con el balance de masa y energía de esta reacción se comprobó experimentalmente la aplicabilidad de la relación de Einstein, $E = mc^2$, a las reacciones nucleares, como había supuesto antes Chadwick al determinar la masa del neutrón.

Con el descubrimiento del neutrón en 1932, Fetherer, en sus experimentos con nitrógeno en la cámara de niebla, observó inmediatamente que algunos de los rebotes de nitrógeno no procedían de colisiones elásticas, sino que se producían dos estelas, correspondientes a la reacción



Pronto se halló que el neutrón, sin carga, que no se afectaba por el campo columbiano del núcleo, era muy eficaz para producir transformaciones nucleares.

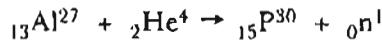
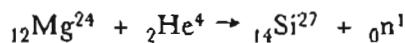
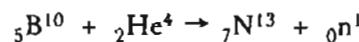
En 1933, Federic Joliot e Irene Joliot-Curie, al investigar los efectos del bombardeo de núcleos ligeros con partículas alfa procedentes de polonio 210, observaron que eran emitidos positrones y neutrones. Esto en sí no era sorprendente, pues parecía tratarse de la reacción nuclear descubierta por Rutherford en 1919, ya que el positrón y el neutrón juntos podían considerarse equivalentes al protón observado por Rutherford.

Pero el hecho sorprendente observado por los esposos Joliot-Curie fue que cuando se separaba la fuente de partículas alfa cesaba la emisión de neutrones, pero seguían siendo emitidos los positrones, y lo que es más, su actividad decrecía exponencialmente!

De esta forma los esposos Joliot-Curie demostraron que los elementos radiactivos pueden ser obtenidos por vía artificial, descubriendo así la *radiactividad artificial o inducida*.

Confirmaron plenamente esta suposición obteniendo fósforo radiactivo partiendo de aluminio ordinario: una plaquita de aluminio previamente sometida a un bombardeo de partículas alfa, se disolvía en ácido; en la disolución se encontraban átomos de aluminio no alterados, así como los de fósforo obtenidos a partir de la desintegración. Después a base de una reacción química, el fósforo pasaba a ácido fosfórico ordinario como precipitado; este precipitado contenía ácido fosfórico ordinario (adicionado a la solución como agente portador para precipitar la pequeña cantidad de ácido fosfórico radiactivo) y, un número insignificante de átomos de fósforo radiactivo (10^{-18} a 10^{-19} g). Para comprobar la existencia de fósforo radiactivo en el precipitado usaron la propiedad de emisión de positrones.

En particular, los esposos Joliot-Curie hallaron que los elementos que daban origen a este fenómeno, al ser bombardeados con partículas alfa, fueron boro, magnesio y aluminio, con las siguientes reacciones



Los núcleos N¹³ (10 min), Si²⁷ (4.1 sec) y P³⁰ (2.5 min) son activos en cuanto a emisión de positrones y se desintegran hasta formar C¹³, Al²⁷ y Si³⁰ estables.

Desde el descubrimiento de los esposos Joliot-Curie se han hallado muchísimos emisores de electrón y po-

sitrón, y se conocen unos cuantos radionúclidos que se desintegran por emisión beta positiva y negativa. Uno de estos radionúclidos es el cobre 64.

En 1936, J. L. Livingood produjo artificialmente, por primera vez, un elemento radiactivo que ocurre en la naturaleza (radio E o bismuto 210) a partir de un núcleo estable, por bombardeo de bismuto 209 con deuterones.

En 1935, Fermi, E. Amaldi, O. D'Agostino, B. Pontecorvo, F. Rasetti y E. Segré descubrieron (y patentaron) el modo de producir neutrones lentos. En general, un neutrón que experimenta una colisión elástica con un núcleo pesado no pierde mucha energía. Fermi y colaboradores hallaron, sin embargo, que cuando neutrones rápidos (reacciones nucleares) se dejan pasar por una sustancia hidrogenada, como agua o parafina, los neutrones se vuelven más lentos y se hacen mucho más eficaces para producir reacciones nucleares. Cuando los neutrones entran en colisiones elásticas con átomos de hidrógeno, las colisiones son entre partículas cuya masa es casi igual y, en promedio, cada colisión reduce a la mitad la energía del neutrón.

Así, en diversos países los científicos se dedicaron a la obtención de nuevos elementos radiactivos artificiales y, con esto, todos los elementos de la tabla periódica fueron sometidos a la acción de neutrones conseguidos a base de partículas alfa, emitidas por radio o radón sobre berilio.

El análisis de las reacciones químicas entre los distintos elementos radiactivos dio como resultado el descubrimiento de los isótopos.

Aplicaciones de la radioactividad

La radioactividad tiene un número muy considerable de aplicaciones en casi todos los campos de la ciencia y de la técnica.

Las reacciones nucleares de los isótopos radiactivos se emplean como medios de control en varias ramas de la técnica; se aprovecha, sobre todo el hecho de que las propiedades químicas de un elemento radiactivo son las mismas que la de los isótopos no radiactivos del mismo elemento. Las moléculas que tienen un determinado número de átomos radiactivos se llaman moléculas marcadas. A continuación se presenta una forma condensada de las aplicaciones de éstas moléculas.

• *En química:* para la obtención de polímeros deben emplearse fuentes radiactivas muy intensas; frecuentemente se utiliza cobalto 60. Los isótopos radiactivos también se emplean para medir las velocidades y la cinética de las reacciones; en el análisis por activación, en química analítica, consistente en



exponer la materia desconocida a un haz de partículas produciéndose isótopos radiactivos que se miden por detectores de rayos beta o gamma.

• *En biología y agricultura:* en el estudio del metabolismo de las plantas se utiliza carbono 14. La reactividad origina cambios biológicos importantes como las mutaciones en organismos vivientes, así se han obtenido nuevas variedades de vegetales y nuevas formas de penicilina. También se han usado para combatir las plagas de insectos.

• *En metalurgia:* en el mecanismo de solidificación del acero en moldes, difusión de metales en una aleación, con cobalto 60 se pueden obtener radiografías de grandes piezas metálicas para descubrir sus defectos.

• *En historia y geología:* puede fijarse la edad de objetos de madera o restos de tejidos, determinando la cantidad de carbono 14 que contienen; lo que resulta de gran utilidad en el estudio de las civilizaciones antiguas; también la edad de minerales, de la Tierra y de las estrellas.

• *Aplicaciones industriales:* se construyen aparatos para medir el nivel de un líquido en recipientes de paredes opacas, por ejemplo viscosímetros; en el control de espesor de piezas planas fabricadas en serie, midiendo la absorción de la radiación que es función del espesor de la pantalla interpuesta entre las fuentes y el detector. La esterilización de la carne y otros productos perecederos han sido objeto de intenso estudio.

• *En medicina:* los radioisótopos han encontrado extenso uso en terapia médica. El radio 226 y el radón

fueron usados como fuente de radiación para controlar el cáncer, pero ahora han sido remplazados por cobalto 60. En 1969, Glenn T. Seaborg, químico nuclear de la U.S. Atomic Energy Commission, hizo un estatus de aplicaciones médicas, notando que el cobalto 60 (y Ce 137) era usado en el tratamiento para cáncer y suprimir algunas reacciones de inmunización que se presentan después de un trasplante de órganos humanos; el iodo 131 (y en algunos casos iodo 125) era usado para diagnosticar varios desórdenes de la tiroides, tratamiento de hipertiroidismo, embolia pulmonar, detección de tumores, volumen de sangre y estudios cardíacos; el carbono 14 fue usado para estudiar anomalías del metabolismo que producen diabetes y anemia y acromegalia; galio 68, estroncio 85 y 87, flúor 18 y calcio 47 fueron usados para suspender males y desórdenes metabólicos; el cromo 51 para medir masas de células; arsénico 74 para localizar tumores; ítrio 90, para tratar desórdenes en las glándulas pituitarias; oro 198, como un paliativo en el cáncer; mercurio 197 y 203, para pruebas de funciones renales; selenio 75 (selenomethionine), para detectar cáncer en el páncreas; sodio 23 y 24 para medir el intercambio de sodio y desórdenes de circulación; fósforo 32, para leucemias y policitemias; hierro 59 y 55, para medir la velocidad de formación de células rojas, su tiempo de vida y velocidad de absorción intestinal; y cobalto 57 (y Co 60), para pruebas de absorción de vitamina B12. Seaborg también notó el uso de 6 Hrs de tecnecio 99 m, para diagnóstico en la tiroides y enfermedades de Kidney.

• *Fuente de energía solar:* la cuestión de la producción de energía a través de la conversión de hidrógeno en helio fue discutida y esencialmente resuelta por H. A. Bethe: *Phys. Rev.*, núm. 55, p. 434, 1939; por H.A. Bethe, C.L. Critchfield: *Phys. Rev.*, núm. 54, p. 248, 1938; y por C. F. von Weizsäcker: *Phys. Zs.*, núm. 39, p. 633, 1938; y *Ap. J.*, núm. 114, p. 165, 1951.

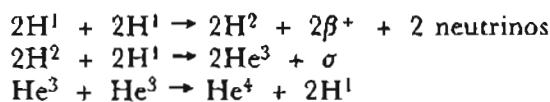
Consideremos materia bajo las condiciones que prevalecen cerca del centro del Sol. La temperatura es del orden de 15×10^6 grados Kelvin, correspondiente a una energía cinética media de partículas atómicas de cerca de 2 KeV. La densidad es de alrededor de 10^2 g/cm³ y la composición química de la materia del interior solar es tal que consiste principalmente de H y He, con una mezcla relativamente pequeña de elementos pesados: C, N, O, Ne, Mg, Si y Fe.

La velocidad de reacción entre cualquier par de núcleos, dentro de un intervalo dado de temperatura, depende en forma muy sensible del producto de las cargas nucleares. Si este es grande la reacción será extremadamente pequeña, pues sólo una muy pequeña fracción de núcleos tendría la suficiente energía cinética para vencer las repulsiones de Coulomb.

Se demuestra que las velocidades de reacción son despreciables desde el punto de vista de la producción de energía termonuclear, para todos los núcleos de carga Z = 7 (nitrógeno).

El siguiente es el proceso termonuclear conocido como proceso protón-protón que se supone es el que predomina en el interior del Sol y de estrellas parecidas al Sol en masa y tamaño.

El ciclo se representa así:



Luego, el resultado neto es la producción de un núcleo He⁴, dos positrones y dos neutrinos a partir de cuatro protones H¹.

Los dos positrones se autoaniquilan en dos electrones, de modo que, finalmente, el proceso resulta en la producción de un núcleo de He⁴ y dos neutrinos, a partir de cuatro protones y dos electrones. Se forma un núcleo He⁴ por cada reacción de dos protones.

Además se demuestra que en la producción de cada núcleo de He⁴ se libera una cantidad de energía igual a 4.3×10^{-5} ergios equivalentes a 28 MeV

La radiación σ liberada en la segunda etapa se transforma rápidamente en energía térmica local. Los neutrinos se escapan del Sol sin agregar nada a su luminosidad o producción de energía, por lo que hay que restar al anterior valor de la energía producida, un 5% que es parte de la energía que escapa del Sol en los neutrinos.

Con esto podemos observar la enorme variedad de aplicaciones que tiene la radiactividad, y con ello ver que es una fuente inagotable de recursos para investigar todo aquello que nos rodea.

Bibliografía

1. Andrei Nesmeianov, *Elementos radiactivos y sus aplicaciones*, Ediciones en lenguas extranjeras, URSS, 1956.
2. Academia de Ciencias de la URSS, *Las ideas básicas de la Física. Ensayos sobre su desarrollo*, Ed. Pueblos Unidos, Montevideo, 1962.
3. W.B. Mann y S.B. Garfinkel, *Radiactividad y su medida*, Ed. Reverté Mexicana, México, 1968.
4. *Antología de Física*, Lecturas universitarias núm. 9, UNAM, México, 1971.
5. Linus Pauling, *Química General. Una introducción a la química descriptiva y a la moderna teoría química*, Ed. Aguilar, Madrid, 1971.
7. *Encyclopédia británica*, tomo XV, 1980.
8. *Gran encyclopédia Larousse*, tomo VIII, Ed. Planeta, Barcelona, 1980.