

FACULTAD DE FARMACIA
UNIVERSIDAD COMPLUTENSE



TRABAJO FIN DE GRADO

ELEMENTOS RADIACTIVOS DE LA
TABLA PERIÓDICA: Descubrimiento y
Nucleosíntesis Artificial

Autor: Luis Enrique García-Moreno César

Tutor: Antonio L. Doadrio Villarejo

Convocatoria: febrero 2018

RESUMEN

En este trabajo se aborda el descubrimiento de los distintos elementos radiactivos en función de las circunstancias en las que fueron descubiertos, clasificándolos en cuatro grandes grupos, en función al periodo en el que se realizó su descubrimiento.

Para llevar a cabo la identificación de los elementos clasificados en cada grupo, serían necesarios previamente, la realización de diversos descubrimientos, implementación de nuevos métodos de identificación, e invenciones que permitirían la caracterización de dichos elementos, al estar condicionado su descubrimiento a su presencia, formación o ausencia en la tierra, dependiendo esta del periodo de vida media de distintos isótopos.

Y es que la vida media de desintegración de cada isótopo condiciona su presencia (ya sea de forma natural o como producto de reacciones de desintegración de otros elementos) o su ausencia en la tierra, resultando necesaria su síntesis artificial para su identificación, en el caso de los elementos sintéticos, los cuales para su caracterización sería necesario el desarrollo de maquinaria capaz de acelerar núcleos atómicos con una energía suficiente como para propiciar la absorción nuclear.

INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES

En la estabilidad del núcleo atómico toman parte gran diversidad de fuerzas, determinantes en que este mantenga o no su integridad a lo largo del tiempo, hechos como el volumen del átomo, las fuerzas repulsivas entre sí de los protones, con carga positiva, las fuerzas nucleares, tanto la débil como la fuerte, intrínsecas de los nucleones, e incluso que el número de protones sea par o impar, condicionan la estabilidad nuclear y que el nucleido sea viable indefinidamente en el tiempo. Simplificaciones o fórmulas semiempíricas como el modelo de gota líquida describen e intentan predecir el comportamiento del núcleo y si este es estable o tenderá a la formación de otros, más permanentes.

Asimismo, resulta necesario para mantener la estabilidad del átomo, que exista un correcto balance entre el número de protones y neutrones presentes en el núcleo: Si el número de unos u otros es excesivo, el isótopo será inestable y tenderá a

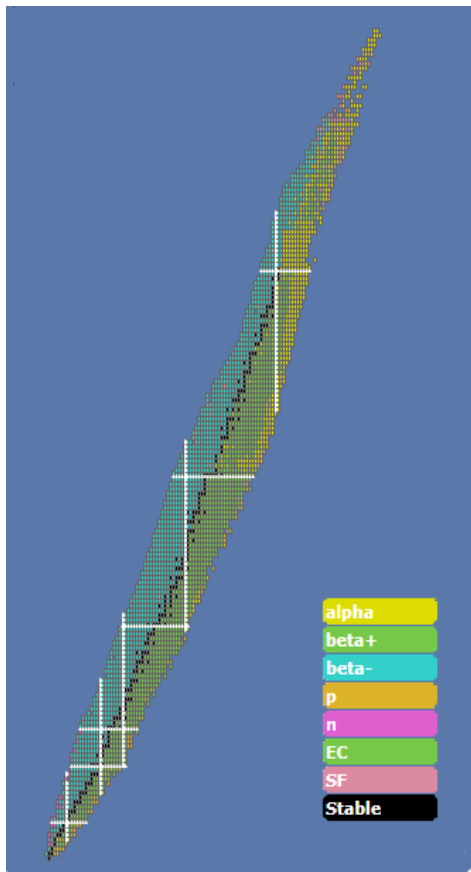


Figura 1. Diagrama de Segrè

desintegrarse. Razón por la cual no todos los isótopos de un elemento son igual de abundantes. En elementos ligeros (con un número atómico bajo), los valores de la relación neutrones/protones necesarios para aportar estabilidad al núcleo, guardan valores cercanos a uno, pero a medida que su número atómico va aumentando, esta relación se ve forzada a incrementar a favor de los neutrones. En elementos pesados, cuando los valores de dicha relación exceden un valor aproximado de 1,6, no es posible preservar la integridad nuclear del átomo a lo largo del tiempo, careciendo estos elementos, de isótopo alguno estable, y tenderán todos estos a decaer espontáneamente en elementos más livianos. Podemos observarlo

gráficamente en el Diagrama de Segrè (figura 1).

- **Desintegración y radiactividad de radioisótopos**

Los isótopos inestables se denominan también **radioisótopos**, debido a que estos tienden a decaer en un proceso denominado **desintegración nuclear**, durante el cual se emiten radiaciones ionizantes.

Pueden producirse también **series radiactivas**: Cuando la desintegración de un átomo conduce a la generación de un núcleo que es a su vez, inestable, se producirán una serie de **desintegraciones nucleares consecutivas** repitiéndose este proceso hasta la generación de un isótopo hijo estable, con el que se concluirá la serie.

Clasificamos estos procesos en función al tipo de reacción originada y tipo de radiación ionizante emitida, pudiendo ser de varios tipos:

1. **Desintegración α** : El núcleo emite una partícula α , similar al núcleo del Helio, con 2 neutrones y 2 protones, conllevando una pérdida de masa en el núcleo

correspondiente a 4 unidades. Ocurre típicamente en elementos pesados, con un peso atómico siempre mayor al Níquel.

2. **Desintegración β** : En ella no se produce la pérdida de masa en el núcleo del átomo, existen dos subtipos:
 - **Beta negativa**: El núcleo emite un electrón y un antineutrino, generados en el momento de la desintegración, conllevando la conversión de un protón a un neutrón, sin pérdida significativa de masa en el núcleo.
 - **Beta positiva**: Con la emisión de un antineutrino y un positrón, genera una pérdida de un protón, manteniendo su masa atómica, pero reduciendo en una unidad su número atómico.
3. **Radiación γ** : Emisión de fotones gamma por parte de un núcleo en estado excitado, dando como resultado un estado menos energético del núcleo sin conllevar esto un cambio en su masa ni número atómico.

Otro proceso implicado en la desintegración de núcleos atómicos, únicamente de elementos pesados, es la **fisión nuclear**, proceso espontáneo durante el cual, el núcleo se subdivide en otros dos o más, más ligeros, liberando además otros subproductos como neutrones libres, rayos gamma, partículas alfa o partículas beta (electrones y positrones).

- **Elementos radiactivos de la tabla periódica**

Como hemos visto, este tipo de reacciones no es exclusivo de un grupo de elementos, pudiendo darse en cualquiera, siempre que el isótopo sea inestable. No obstante, la radiactividad, este proceso de desintegración nuclear, es intrínseco a ciertos elementos, los cuales, por sus propiedades nucleares, carecen de isótopo alguno prevalente en el tiempo.

Denominamos a dichos elementos, **elementos radiactivos de la tabla periódica**, y, a pesar ser todos inestables, difieren entre sí en el **tiempo medio necesario para su desintegración**, el cual caracterizamos mediante la determinación de su vida media o periodo de semidesintegración de un radioisótopo (tiempo en el cual la cantidad de un radioisótopo pasa a ser de la mitad), variando en función de sus propiedades nucleares.

Esto explica la distinta rareza de algunos elementos en nuestro planeta, dado que desde la formación y llegada a la corteza terrestre, aquellos isótopos radiactivos con un periodo de semidesintegración considerablemente menor a la edad de la tierra, se habrán desintegrado, habrán decaído, no pudiendo encontrarse de manera natural, a excepción de su formación en forma de trazas como subproducto de reacciones de desintegración de otros elementos radiactivos, o mediante la síntesis artificial de estos núcleos, de la mano del hombre.

Entre estos elementos radiactivos se encuentran el Tecnecio-43, el Prometio-61 y todo elemento con un número atómico superior a 82.

OBJETIVOS

- Realizar una revisión bibliográfica del descubrimiento de los distintos elementos intrínsecamente radiactivos de la tabla periódica.
- Atender a las propiedades de los principales isótopos de estos elementos, o su formación natural en la tierra, para llevar a cabo una clasificación de estos elementos, correlacionando dichas propiedades elementales con el periodo en el que se llevó a cabo su descubrimiento.
- Incidir en inventos o descubrimientos que resultarían críticos en el avance de la conclusión de la tabla periódica hasta el momento actual.

MATERIAL Y MÉTODOS

Para llevar a cabo este trabajo se llevó a cabo una revisión bibliográfica de diversas fuentes, utilizando bases de datos como la presente en la página Web de la IUPAC, cartas de los distintos isótopos caracterizados hasta el momento con sus propiedades, y utilizando como base el trabajo realizado previamente por el profesor y tutor de este trabajo, Antonio L. Doadrio Villarejo, tanto en su libro *“Los Elementos Químicos: Un manual extenso”*, como en su proyecto *“Innova 2016”*.

Consultando, asimismo, cuando fuese posible, los artículos publicados por los propios descubridores de cada uno de los elementos, así como papers y publicaciones que

referencien el procedimiento de descubrimiento o, en caso de que la hubiese, controversia en torno al legítimo descubridor de cada átomo.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Como referimos en la introducción del trabajo, los elementos radiactivos tienen algo en común: Su volatilidad, que viene dada por la naturaleza inestable de sus núcleos. Todos tienden a desintegrarse, a formar núcleos de elementos diferentes, con fin de librar al átomo del excedente energético presente en el núcleo, responsable de su inestabilidad.

Difieren entre sí, no obstante, por el periodo de semivida de cada uno de estos, lo cual condiciona su presencia o no en la corteza terrestre, su origen, y en algunos casos, la necesidad de su síntesis artificial para llevar a cabo su descubrimiento y caracterización.

Atendiendo a esto, se realiza en este trabajo una recopilación del descubrimiento de dichos elementos, clasificándolos en función de su naturaleza y su vida media, ya que esta sería un factor muy condicionante para su descubrimiento a lo largo del tiempo. Resultando así en 4 grupos principales:

- **Elementos Primordiales**

Son aquellos que, a pesar de su radiactividad intrínseca, presentan formas metaestables (isótopos con semividas muy elevadas, en este caso, superiores a la edad de la tierra). Debido a esto, una elevada fracción de la masa primordial de estos elementos pueden encontrarse aún de manera inalterada en la corteza terrestre, y su relativa riqueza conllevó su descubrimiento y caracterización, relativamente temprana en comparación al resto de elementos radiactivos de la tabla periódica.

Bismuto ($^{209}_{83}\text{Bi}$): Este fue el primer elemento radiactivo en ser caracterizado, en 1753 (Francia), por el químico francés Claude François Geoffroy.

Este elemento metálico, ampliamente extendido en la naturaleza, no se creía radiactivo, a pesar de que, desde un punto de vista teórico, se sospechaba inestable [2], hecho que se demostraría cierto en 2003 en Osmium (Francia), al medir que su principal isótopo, el ^{209}Bi , tiende a desintegrarse emitiendo radiación alfa, con una semivida de

1.9×10^9 años ^[1], la más elevada conocida, lo que conlleva que su uso y manipulación sea segura desde un punto de vista radiactivo.

Uranio ($^{235,238}_{92}\text{U}$): Elemento presente de forma natural de manera relativamente elevada, dada la existencia de 3 isótopos metaestables: el ^{238}U , principal forma (semivida de 2.468×10^9 años), el ^{235}U (semivida de 7.04×10^8 años), y en menor medida el ^{234}U ^[3]. Se desintegran mediante emisión de partículas alfa, y de forma más reducida, en procesos de fisión. Es el elemento primordial más pesado, y a partir de su desintegración se descubrirían posteriormente gran cantidad de elementos desconocidos hasta ese momento.

Conocido desde la antigüedad, fue caracterizado en 1789 por el químico alemán Martin Heinrich Klaproth, responsable de la caracterización de otros elementos como el Telurio o el Circonio, aisló presumiblemente Diuranito de Sodio, de una muestra de mineral de Pechblenda, y denominó al elemento en referencia al planeta Urano, descubierto sólo 8 años antes.

Sería en 1841 cuando Eugène-Melchior Péligot, en París, aisló por primera vez muestras de Uranio puro, en forma de metal.

Torio ($^{232}_{90}\text{Th}$): El Torio fue identificado y caracterizado por Jacob Berzelius, químico sueco, en 1828, y aislado en 1914 como Torio metálico por el Dr. Dirk Lely Jr., y Lodewijk Hamburger. Su presencia en la tierra se explica dada la elevada vida media de su principal isótopo, el ^{232}Th , equiparable a la edad del universo, pudiendo así encontrarse naturalmente en distintos minerales como la Ekanita.

El Torio sería, además, el segundo elemento en ser caracterizado como radiactivo, por Gerhard Carl Schmidt y Marie Curie, independientemente, en 1898.

- **Productos de la desintegración de Elementos Primordiales**

Cronológicamente, los siguientes elementos radiactivos en ser descubiertos fueron los subproductos resultantes del decaimiento de elementos radiactivos primordiales: resultantes en las **series radiactivas** de la desintegración alfa y beta de los isótopos ^{232}Th , el ^{235}U y el ^{238}U , de procesos de absorción neutrónica, y de reacciones de fisión espontánea del ^{238}U .

Los isótopos resultantes pueden ser encontrados así, a nivel de trazas, en minas o muestras de minerales que contienen o han contenido en su composición isótopos de estos elementos primordiales, teniendo los radioisótopos formados a partir de estos un periodo de semidesintegración variable, pero más corto que la edad de la tierra, no siendo los suficientemente estables como para que exista algún rastro natural de estos en nuestro planeta de procedencia distinta.

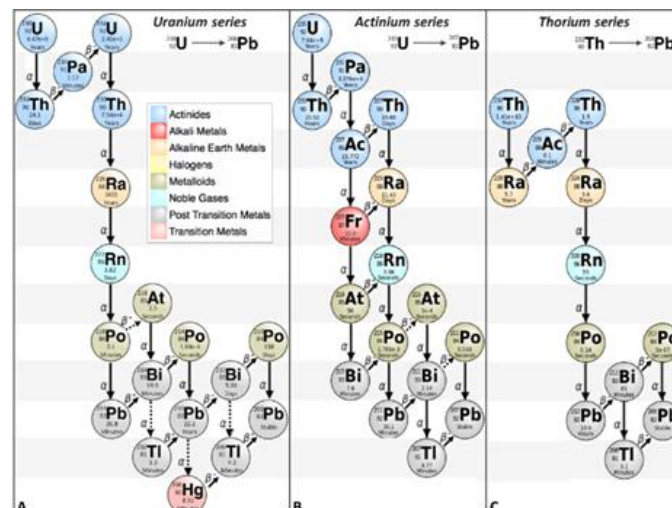


Figura 2. Cadenas de desintegración de los principales elementos primordiales

Hallazgos llevados a cabo por Marie Curie y su marido Pierre: El matrimonio Curie llevó a cabo un trabajo indispensable para la caracterización de diversos elementos y las propiedades radiactivas de estos, a de finales del Siglo XIX, en el territorio de la actual Polonia, que en aquellos tiempos pertenecía a diversos estados.

Continuaron los descubrimientos llevados a cabo por el físico francés Henri Becquerel, observador de las propiedades radiactivas de compuestos de Uranio extraídos de muestras del mineral conocido como Uraninita o Pechblenda.

Polonio ($^{210}_{84}\text{Po}$) y Radio ($^{226}_{88}\text{Ra}$): Ambos elementos fueron descubiertos por el matrimonio Curie en 1898^[4], en su búsqueda de la causa primordial de la radiactividad del mineral de la Pechblenda, dado que al retirar de este el Uranio y el Torio que contenían, observaron que el material remanente seguía teniendo unas propiedades de emisión de radiación mayor que el de los elementos aislados conjuntamente.

Así, los Curie aislarían por primera vez el Polonio del mineral, en Julio de 1898, y 5 meses más tarde, el Radio. El matrimonio denominó a estos elementos,

respectivamente, en referencia al por entonces territorio carente de independencia de Polonia, de donde eran los Curie, y por el término francés “radius” o rayo, por la apariencia luminiscente y eléctrica del Radio.

El isótopo principal del Polonio presente en menas de Uranio es el ^{210}Po , con una semivida de 138.39 días, a pesar de tener dos núcleos más estables, el ^{209}Po y el ^{208}Po , con periodos de semivida de 125.2 y 2.9 años respectivamente. Además, es un isótopo excepcionalmente peligroso, con una DL_{50} inferior a un microgramo en un adulto, debido a que es un muy potente emisor de partículas alfa (5×10^3 veces más que el radio).

El Radio, por su parte es un elemento alcalinotérreo, más estable, siendo su isótopo ^{226}Ra el más longevo, con una vida media de 1602 años.

Radón ($^{222}_{86}\text{Rn}$): Existe controversia al descubrimiento de este gas noble [5]. Son Ernest Rutherford y Robert B. Owens a quienes se acredita su descubrimiento, en 1900[6], durante su estudio de la radiación emitida por los elementos radiactivos, descrita previamente por Henri Becquerel y Marie Curie.

Rutherford y Owens observaron, al igual que Ernst Dorn previamente, la formación de un gas radiactivo de minerales que contenían Uranio, gas que, asimismo, poseía propiedades radiactivas, aunque distintas a los elementos del propio mineral, por lo que presumiblemente, se debería a la formación un nuevo elemento, difícil de aislar por sus pequeñas concentraciones, pero a su vez, radiactivo.

Este hecho fue constatado por Sir Williams Ramsay y Robert Withslaw-Gray, en 1910 al ser capaces de aislar por primera vez gas Radón y determinar algunas de sus propiedades.

Rutherford, junto a Frederick Soddy, caracterizaron también las distintas radiaciones emitidas durante procesos radiactivos, y dedujeron que estos se debían a su transmutación a otros elementos.

Actinio ($^{227,228}_{89}\text{Ac}$): Primer actínido, dando nombre a este grupo de elementos, existe, al igual que con el Radón, controversia en torno a quien es el legítimo descubridor de este elemento.

Por una parte, el químico francés André-Louis Debernie, en 1899, continuando con el trabajo de los Curie, aisló de residuos de mineral de Pechblenda a los cuales se le había extraído el radio, un nuevo elemento, del cual refirió, poseía unas propiedades similares al Titanio y al Torio [7].

Independientemente, Friedrich Oskar Giesel, aisló varios compuestos de este elemento en 1902, y los denominó “*emanium*”. Debido a la anterioridad del descubrimiento, se le concede a Debernie el descubrimiento, y que el elemento mantenga el nombre sugerido por este, a pesar de que estudios posteriores parecen sugerir que el elemento que identificó no se correspondía con el Actinio, sino más bien con muestras de Protactinio, y que no sería hasta 1904 cuando Debernie aislara e identificaría el Actinio, posteriormente a Giesel.

Se producen 2 isótopos del Actinio de forma natural, productos de las cadenas de desintegración de ^{235}U (el ^{227}Ac , con una semivida de 21.772 años), y el ^{228}Ac , subproducto de la desintegración del Torio.

Protactinio ($^{234}_{91}\text{Pa}$): Predicha su existencia en 1871 por Mendeleev, no es hasta 1913, cuando Kasimir Fajans y Oswald Helmuth Göhring se topan con el isótopo ^{234}Pa durante su estudio de las series reactivas resultantes de la desintegración del ^{238}U , denominando a este elemento “*brevium*”, en referencia a su corta semivida (6.7 horas).

En 1918 se descubrieron isótopos con una semivida mucho mayor (unos 32.000 años) como parte de la desintegración del ^{235}U , previo al Actinio, hecho tras el cual se le nombró. A día de hoy se han caracterizado 29 isótopos de este elemento.

Francio ($^{221}_{87}\text{Fr}$): Último metal alcalino conocido. Es el último elemento en ser descubierto presente en la naturaleza, en 1937, en vez de ser sintetizado en un laboratorio.

Es la francesa Marguerite Perey advierte que, en una muestra de ^{227}Ac , existían valores energéticos resultantes de una desintegración alfa, no esperados para este elemento, llevándola a pensar en la posibilidad de que se debiese a la presencia de otro producto previo de desintegración, no identificado hasta el momento [8].

Perey aísla y observa muestras de este elemento, y tras eliminar otras posibilidades, observa comportamientos propios de metales alcalinos, que posteriormente se

demonstraría, pertenecían a este nuevo elemento, particularmente al isótopo ^{221}Fr , al que se denominó Francio en referencia al lugar de descubrimiento.

- **El invento del Ciclotrón: El inicio de la Nucleosíntesis Artificial**

El descubrimiento de los siguientes elementos de la tabla periódica, viene de la mano de su generación de la mano del hombre, a pesar de que 4 de los elementos descubiertos por este método, se observan como subproducto de desintegraciones espontáneas de elementos primordiales.

Su generación se lleva a cabo, fundamentalmente, mediante el bombardeo con partículas^[9] (núcleos o iones de elementos, preferiblemente ligeros), a un núcleo de un elemento determinado, para formar otro diferente, en un proceso denominado **nucleosíntesis artificial**, siendo el pionero en generar el primer isótopo con este método Rutherford, originando, isótopos de ^{17}O a partir del bombardeo de ^{14}N con partículas alfa (Núcleos de Helio), en 1919.

Desde Rutherford se idearon varias maneras para obtener nuevos núcleos de elementos usando este método, pero el principal problema que planteaba era, que conforme el núcleo fuese más pesado, había que acelerar más la partícula a bombardear, para conseguir la transmutación. Por ello, se emplearon los denominados

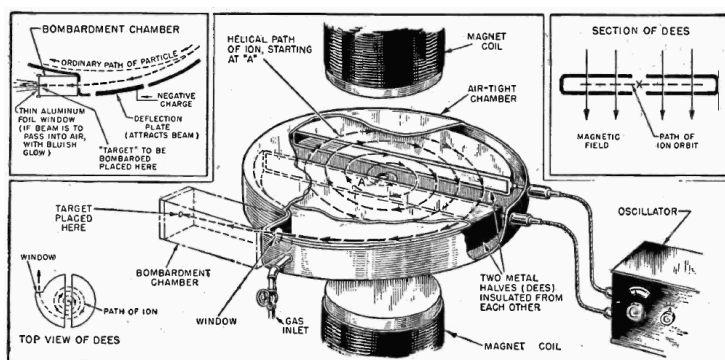


Figura 3. Diagrama del funcionamiento del Ciclotrón

suelen estar cargadas.

El **ciclotrón** (figura 3) fue uno de los primeros aceleradores de partículas, con un radio de tan sólo 1.60 metros.

aceleradores de partículas, los cuales, mediante el uso de campos electromagnéticos consiguen aumentar la velocidad de choque de las partículas, que

Es desarrollado y patentado por Ernest Lawrence en 1932, en la Universidad de California (Berkeley), y estaría estrechamente ligado a la síntesis artificial y descubrimiento de diversos elementos.

Tecnecio ($^{95,97}_{43}\text{Tc}$): Elemento más ligero carente de isótopos estables, ninguno de ellos con una vida media superior a 4,2 millones de años, siendo muy raro en la tierra, tanto que durante años fue considerado como un elemento perdido en la tabla periódica.

Fue el primer elemento en ser descubierto mediante su obtención de manera artificial, confirmándose su formación en 1937 en la Universidad de Palermo (Sicilia, Italia) por Carlo Perrier y Emilio Segrè. Este último sospechaba que la formación de este elemento podía tener lugar en el ciclotrón, por ello, convenció a su inventor, Lawrence, para que le cediera algunas muestras descartadas de este que se hubiesen vuelto radiactivas. Así, Lawrence le cedió una hoja de Molibdeno que formaba parte del deflector, y mediante su análisis, Segrè y Perrier detectaron que su actividad y comportamiento difería del que se esperaría del Molibdeno, lo que les conducía a pensar que podía deberse a la presencia de este nuevo elemento ^[10].

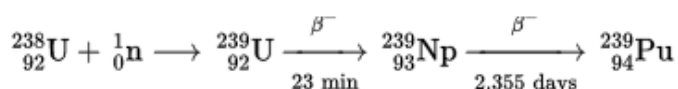
Así, ambos aislaron tres periodos de desintegración distintos de dicha hoja, dos de ellos correspondiéndose a isótopos de Tecnecio (^{95}Tc y ^{97}Tc), confirmando así su formación y descubrimiento, al que seguirían muchos otros. Su existencia sería respaldada al confirmar su formación a nivel de trazas en minerales de Pechblenda a nivel de trazas (0.2 ng/Kg) como producto de la fisión espontánea de ^{238}U .

Ástato ($^{211}_{85}\text{At}$): Elemento natural más escaso de la corteza terrestre, dándose únicamente como resultado de la desintegración de otros elementos radiactivos, y no teniendo ningún isótopo de vida media superior a 193 días.

Su existencia se predijo en 1869, cuando Mendeleev publicó su tabla periódica. No obstante, no sería hasta 1940, cuando el equipo formado por Segrè, K.R. MacKenzie y D.R. Corson aislarían por primera vez el isótopo ^{211}At , tras su generación mediante bombardeo con partículas alfa de un núcleo de ^{209}Bi en el ciclotrón de Berkeley. Segrè denominó a este elemento en referencia al griego “*Astatos*”, que significa inestable.

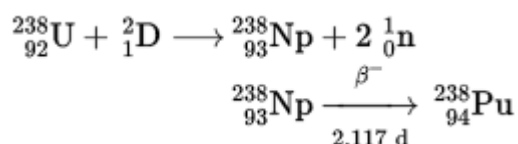
Posteriormente, Berta Karlik y Traude Bernert lo encontrarán en la naturaleza, como producto de las series reactivas del Uranio y Actinio, a día de hoy se conoce que se forma, asimismo, en la cadena de desintegración del Neptunio.

Neptunio (${}^{239}_{93}\text{Np}$) y Plutonio (${}^{238}_{94}\text{Pu}$): En 1939, Edwin McMillan llevó a cabo un experimento en el Ciclotrón de Berkeley, en el cual bombardeó muestras de ${}^{238}\text{U}$ (Trióxido de Uranio) con neutrones, separando y observando posteriormente, con la ayuda de Segrè, los productos producidos de esta reacción, detectando 2 nuevos periodos de semivida por decaimiento Beta: Uno, correspondiente al ${}^{239}\text{U}$, y otro, de 2.3 días, desconocido, el cual se demostraría posteriormente, se debía a la producción de ${}^{239}\text{Np}$, que, además, al desintegrarse, a través de emisión Beta generaría, como producto secundario, otro elemento nuevo, el Plutonio:



A pesar de tratarse de la primera síntesis de estos elementos, en aquel momento no se pudo llevar a cabo su aislamiento ni identificación, al ser la muestra demasiado pequeña ^[11]. No obstante, la formación del Neptunio en este procedimiento fue confirmada completamente en 1945, tras la repetición de este procedimiento por el propio McMillan y Philip H. Abelson con una muestra mayor de Uranio, dándoles el mérito del descubrimiento a ambos.

El descubrimiento del Plutonio debería esperar hasta 1940, año en el que Glenn T. Seaborg y su equipo, como parte del proyecto Manhattan, identificaron el isótopo ${}^{238}\text{Pu}$, tras el bombardeo de ${}^{238}\text{U}$ con Deuterio también en el ciclotrón, generando ${}^{238}\text{Np}$, que posteriormente decaería en ${}^{238}\text{Pu}$, y publicando sus hallazgos posteriormente, en 1945, tras la finalización de la II Guerra Mundial.



Tanto el Neptunio como el Plutonio se producen de forma natural a muy baja concentración en minas de Uranio, resultado de la captura por núcleos de ${}^{238}\text{U}$ de neutrones emitidos durante la desintegración de otros elementos.

El Plutonio tiene tres isoformas muy estables, su isótopo ^{244}Pu , cuenta con una semivida de 80.8 millones de años, y es un elemento fundamental para posteriores nucleosíntesis, uso bélico y desarrollo de energía nuclear.

Prometio ($^{147}_{61}\text{Pr}$): Su búsqueda se remonta a 1902, cuando Bohuslav Brauner, un químico checo, descubre que las diferencias entre el Neodimio y el Samario eran las más pronunciadas entre lantánidos consecutivos, y siendo confirmado la existencia de un elemento intermedio en 1914, al descubrirse el número atómico de los elementos como una propiedad mensurable de estos.

En 1945, en los laboratorios Clinton (Tennessee), J.A. Marinsky, L.E. Glendenin y C.D. Coryell corroboraron su identificación tras su separación y análisis producidos en reacciones de fisión de Uranio irradiado en el X-10 Graphite Reactor, y publicando sus hallazgos en 1947.

El descubrimiento de nuevos elementos, y su vinculación al proyecto Manhattan:

Vinculados al proyecto Manhattan, y posteriormente, a raíz de los descubrimientos llevados a cabo durante su desarrollo, entre los 1942 y 1946, se lleva a cabo la identificación de diversos elementos hasta entonces desconocidos, entre ellos el Plutonio, previamente mencionado. Vinculados a estos descubrimientos cabe destacar las figuras de científicos como Glenn T. Seaborg o Albert Ghiorso, responsables de los equipos que, principalmente en el ciclotrón del laboratorio de Berkeley, llevaron a cabo el hallazgo de los nuevos elementos.

Curio ($^{242}_{96}\text{Cm}$): A pesar de su probable producción previa en experimentos nucleares, fue sintetizado intencionalmente por primera vez en 1944 en Berkeley, e identificado en el laboratorio de Metalurgia de la Universidad de Chicago, tras su generación mediante la irradiación de Óxido de Plutonio (^{239}Pu) con partículas alfa^[12], obteniendo el isótopo ^{242}Cm , el cual tiene un periodo de semidesintegración de 26.7 días, corto frente a las 5 formas metaestables que presenta este isótopo, siendo el ^{247}Cm el más longevo, con una semivida de 15.6 millones de años.

Se denominó a este elemento en honor al matrimonio Curie y sus imprescindibles aportes al conocimiento de la radiactividad y elementos radiactivos.

Americio ($^{241}_{95}\text{Am}$): Producido poco después que el Curio, en el mismo año, siendo publicado posteriormente su descubrimiento en 1945 (Seaborg filtraría el descubrimiento de los elementos 95 y 96 en un programa de radio infantil “Kid Quiz” [13]).

Se sintetizó a partir de ^{239}Pu , implicando su síntesis previa, y posterior bombardeo con neutrones, a fin de provocar la absorción artificial de 2 neutrones por parte del núcleo, originando ^{241}Pu , que decae espontáneamente en ^{241}Am mediante una desintegración Beta negativa, con una vida media de 432.2 años, algo menor que el isótopo más estable, el ^{243}Am , con 7370 años [14].

Berkelio ($^{243}_{97}\text{Bk}$) y Californio ($^{245}_{98}\text{Cf}$): Descubrimientos consecutivos, en 1949 y 1950 respectivamente, por el equipo de Seaborg y Ghiorso. Ambos elementos son generados mediante el bombardeo con partículas alfa de ^{241}Am y ^{242}Cm , respectivamente [15].

Mientras que el primero genera isótopos de ^{243}Bk y formación de dos neutrones libres, el segundo método dará, también mediante un proceso también directo, unas 5.000 partículas de ^{245}Cf (con una vida media inferior a una hora y desintegración beta positiva mayoritaria), además de la generación de un neutrón libre.

Se nombró a estos elementos tras los nombres de la ciudad y estado del descubrimiento.

Einstenio ($^{253}_{99}\text{Es}$) y Fermio ($^{255}_{100}\text{Fm}$): Descubiertos ambos elementos en 1952 por el equipo de la universidad de California, al frente de A. Ghiorso y los laboratorios de Argonne y de Los Alamos, como producto secundario producido durante la detonación de la bomba Ivy Mike (primera bomba de hidrógeno detonada) en la isla de Elugelab, que quedaría totalmente destruida, en las islas Marshall.

Entre los escombros de la detonación, recogidos en el coral circundante, se detectaron isótopos hasta entonces desconocidos: el ^{244}Pu , y unos 200 átomos de ^{253}Es y ^{255}Fm , resultantes de la absorción consecutiva de neutrones por núcleos de ^{238}U , (15 y 17 respectivamente) posible debido a la elevada densidad neutrónica generada durante la detonación, y posteriores desintegraciones Beta de los núcleos generados [16].

El equipo de Ghiorso entraría en competición por el descubrimiento de estos elementos con el Nobel Institute for Physics, en Estocolmo, dándosele el mérito al equipo americano por la anterioridad de sus descubrimientos.

Mendelevio (${}_{101}^{256}\text{Md}$): Descubierta por Ghiorso, Seaborg y su equipo, a principios de 1955, al producir e identificar el isótopo ${}^{256}\text{Md}$, con una vida media de 77 minutos, mediante el bombardeo con partículas alfa de ${}^{253}\text{Es}$, en el ciclotrón de Berkeley, produjeron únicamente 17 átomos del isótopo. Para llevar a cabo su síntesis, tuvieron que llevarse a cabo mejoras en el ciclotrón ^[10].

Átomo de muy difícil generación, no siendo aún posible a día de hoy, su síntesis a escala macroscópica. Su nombre se debe al químico ruso Dmitri Mendeleev, creador de la tabla periódica.

- ***El Desarrollo de Aceleradores de Partículas más potentes; Elementos transférmicos***

Los elementos descubiertos a partir de este punto son todos isótopos de vida media muy corta, sin aplicaciones fuera del campo de la investigación, y de los cuales, aún a día de hoy no podemos generar volúmenes elevados.

La síntesis de estos elementos requiere de equipos mucho más potentes que los empleados hasta este punto, y es con el desarrollo de aceleradores de partículas de mayor energía, como a partir de la década de los 60, diversos laboratorios apuntan a la síntesis de elementos con un número atómico muy elevado, entrando, en muchos casos, en competición entre ellos por quien es el legítimo equipo descubridor.

En 1992, la IUPAC nombra a un equipo encargado de la investigación y antecedentes de la síntesis de los elementos trans-Fermio, a fin de legitimar sus descubrimientos, acreditar su hallazgo, y nombrar a estos elementos, en función al elegido por el propio equipo descubridor.

Lawrencio (${}_{103}^{257}\text{Lr}$): Descubierta en 1961 mediante el bombardeo de una diana de 3 isótopos de Californio con ${}^{10}\text{B}$ y ${}^{11}\text{B}$, generando lo que se creía ${}^{257}\text{Lr}$, en el acelerador lineal de iones pesados (HILAC) del Lawrence Berkeley National Laboratory, por el equipo de física nuclear liderado por Ghiorso.

Estudios posteriores contradecirán los resultados de los americanos, al no coincidir los valores medidos con los reportados por el ^{257}Lr y ^{258}Lr , sintetizados en 1967 por los investigadores de física nuclear de Dubna (URSS), luego se dedujo que debía tratarse del isótopo ^{256}Lr , el generado en California. En 1992, la IUPAC asignó definitivamente al Lawrence su nombre, y concedió los créditos a su descubrimiento a ambos equipos ^[17].

Nobelio ($^{259}_{102}\text{No}$): Reportado su descubrimiento en 1957 en el Nobel Institute de Estocolmo, el equipo retractaría posteriormente su reclamación, aunque el elemento retuvo el nombre que estos pusieron al elemento.

Existe controversia en torno a cuál fue el primer equipo responsable de su síntesis, pero en 1992 la IUPAC reconoce al equipo de Dubna como legítimos descubridores ^[17].

Rutherfordio ($^{257,259}_{104}\text{Rf}$): Fue detectado por primera vez en el Instituto Central de Investigaciones nucleares de Dubna, mediante el bombardeo de ^{242}Pu con iones de ^{22}Ne , resultando en un producto que presumiblemente, era un compuesto de ^{259}Rf , con actividad de fisión espontánea. Posteriormente en 1969, por su parte, el equipo de Berkeley sintetiza ^{257}Rf mediante el bombardeo con iones de Carbono-12 partículas de ^{249}Cf , siendo su síntesis confirmada en 1973.

La IUPAC, en 1992 refiere que ambos equipos proveen de evidencias contemporáneas de su generación, y que el mérito debe ser compartido por ambos grupos.

Dubnio ($^{260}_{105}\text{Db}$): El primer reporte sobre este elemento es llevado a cabo por científicos del instituto Central de Investigaciones Nucleares de Dubna en 1968, mediante el bombardeo de un blanco de ^{243}Am con iones de ^{22}Ne , detectando la generación de un nuevo isótopo, con una vida media de entre 0.1 y 3 segundos, que se achacó al núcleo de ^{260}Db , y siendo sintetizado de nuevo en 1970, en esta ocasión el isótopo ^{261}Db , por el equipo de Ghiorso, en Berkeley ^[18].

Se denominó a este elemento Dubnio, en referencia al lugar de descubrimiento.

Seaborgio ($^{260,263}_{106}\text{Sg}$): En el caso de este elemento, es reportado su descubrimiento en 1974, por dos equipos distintos, el de Dubna, mediante el bombardeo de una diana de Plomo-207 y Plomo-208 con ^{54}Cr , y con unos meses de posterioridad, por el equipo americano, mediante el bombardeo de ^{249}Cf con iones de ^{18}O . Generando isótopos de ^{260}Sg y ^{263}Sg , respectivamente, con vidas media de tan sólo segundos.

En 1992 la IUPAC concederá el crédito del descubrimiento al grupo americano liderado por Ghiorso, por ser los resultados del equipo soviético poco convincentes, otorgando el nombre del elemento propuesto por los americanos, en referencia a Glenn T. Seaborg, que como hemos visto con anterioridad, fue co-descubridor de 12 elementos.

Elementos con número atómico 107 → 112: Descubrimientos posteriores serán acreditados al equipo alemán del GSI (Centro de Investigaciones de Iones Pesados), con centro en Darmstadt (Alemania), gracias a la presencia de un acelerador lineal de partículas.

Durante la década de los 80 y los 90 los elementos Bohrio, Meitnerio, Hassio, Darmstadtio, Roentgenio y Copernicio, serían sintetizados a nivel de pocos átomos por equipos liderados por Gottfried Münzenberg y, posteriormente, Sigurd Hofmann.

Existe controversia en torno al descubrimiento de algunos de estos elementos, como es el caso del Hassio, que había sido sintetizado con anterioridad por el laboratorio de Dubna, pero al carecer sus pruebas de suficiente consistencia, la IUPAC concede el mérito definitivo del descubrimiento de estos elementos en 1992 al equipo alemán ^[19].

Isótopo generado	Año	Procedimiento
²⁶² Bh	1981	Bombardeo de ²⁰⁹ Bi con un núcleo de ⁵⁴ Cr
²⁶⁶ Mt	1982	Bombardeo de ²⁰⁹ Bi con un núcleo de ⁵⁶ Fe
²⁶³ Hs	1984	Bombardeo de ²⁰⁸ Pb con un núcleo de ⁵⁸ Fe
²⁶⁹ Ds	1995	Bombardeo de ²⁰⁸ Pb con un núcleo de ⁶² Ni
²⁷² Rg	1995	Bombardeo de ²⁰⁹ Bi con un núcleo de ⁶⁴ Ni
²⁷⁷ Cn	1996	Bombardeo de ²⁰⁸ Pb con un núcleo de ⁷⁰ Zn

Nihonio (²⁸⁶₁₁₃Nh): Este elemento es sintetizado presumiblemente en 1998 mediante una colaboración entre los laboratorios de Dubna y Livermore, mediante el bombardeo de ²⁴⁴Pu con núcleos de ⁴⁸Ca. No obstante, la generación de este isótopo no pudo ser repetida, y la formación de este elemento no confirmada.

Sería en 2003, cuando el equipo del RIKEN, en Japón, liderado por Kōsuke Morita, que previamente se había dedicado estudiar la formación de elementos pesados mediante reacciones de fusión fría, produce definitivamente el nuevo elemento mediante el bombardeo de ^{209}Bi con ^{70}Zn , concediendo la IUPAC en 2015 el principal descubrimiento al equipo japonés.

Elementos con número atómico 114 → 118: Los últimos elementos conocidos hasta la fecha. A partir de 1998, la síntesis de estos elementos fue ampliamente estudiada, y en numerosas ocasiones se intentan llevar a cabo por distintos laboratorios y equipos, e incluso distintas colaboraciones entre estos [20].

Debido a la dificultad implicada en su generación, y su difícil identificación, que viene de la mano del estudio de los isótopos hijos generados durante su desintegración, así como las radiaciones emitidas durante este proceso, dada su baja vida media, la IUPAC crea el grupo JWP o Joint Working Party (2011-2016), que se encargaría de valorar la validez y la reproducibilidad de los resultados vertidos por los distintos equipos que claman la síntesis de estos, hasta ahora desconocidos elementos [21].

El crédito de la síntesis e identificación de estos elementos es compartido entre los equipos de Livermore y Dubna, bajo la supervisión de Yuri Oganessian, que trabajarían de manera conjunta para llevar a cabo un trabajo de síntesis e identificación lo suficientemente convincente como para confirmar la generación de los nuevos elementos Flevorio, Moscovio, Livermorio, Teneso y Oganesión.

Isótopo generado	Año	Procedimiento
^{287}Fl	2004	Bombardeo de ^{242}Pu con núcleos de ^{48}Ca .
^{291}Lv	2004	Bombardeo de ^{245}Cm con núcleos de ^{48}Ca .
^{294}Og	2006	Bombardeo de ^{249}Cf con núcleos de ^{48}Ca .
$^{289,290}\text{Mc}$	2010	Identificado a través de desintegración alfa del Tenesio
$^{297,294}\text{Ts}$	2010	Bombardeo de ^{249}Cf con núcleos de ^{48}Ca .

CONCLUSIONES

Las características de cada uno de los elementos condicionan el periodo en el cual se lleva a cabo su descubrimiento, es así, que se han realizado en este trabajo la subdivisión de estos elementos en cuatro grupos, principalmente.

El primero, los elementos primordiales, son aquellos los cuales poseen al menos, un isótopo que cuenta con una vida media lo suficientemente elevada como para que su presencia en la corteza terrestre pueda ser elevada de forma natural, estos elementos fueron los primeros en ser caracterizados al no necesitar de ningún procedimiento de síntesis ni identificación específicos.

Posteriormente, y gracias a los descubrimientos llevados a cabo por Henri Becquerel y Marie Curie, condujeron a la caracterización de la radiactividad, y el posterior estudio de compuestos resultantes de las reacciones de desintegración de los elementos radiactivos primordiales.

A partir de mediados del Siglo XX, se llevarían a cabo el descubrimiento de varios elementos gracias al desarrollo de aceleradores de partículas, necesarios para la generación de partículas que no se producen de forma espontánea en la tierra.

En este periodo cabe destacar científicos con un gran peso como Ernest Lawrence, desarrollador del ciclotrón, gracias al cual se llevarían a cabo la síntesis de un gran número de elementos. Emilio Segré, pionero del desarrollo de elementos nuevos a partir de este método, y figuras como la de Glenn T. Seaborg y Albert Ghiorso, codescubridores de muchos elementos.

A partir de la década de los 60 del pasado siglo, la síntesis de nuevos elementos mediante absorción neutrónica alcanza su límite, siendo a partir de este punto, necesario el desarrollo de maquinaria más potente para permitir la absorción por parte de núcleos pesados, de núcleos de iones menos livianos que en procedimientos anteriores.

Son varios laboratorios los que, a partir de este punto, llevan a cabo la síntesis e identificación de diversos elementos, en muchas ocasiones, a partir de colaboraciones entre estos.

BIBLIOGRAFÍA

Doadrio Villarejo, A. L. (2016). *“Los Elementos Químicos: Un manual extenso”*

Livechart - Table of Nuclides - Nuclear structure and decay data: www-nds.iaea.org

Turner. J.E; *“Atoms, Radiation and Radiation protection”* (2008)

Loveland, W. D.; Morrissey, D. J.; & Seaborg, G. T. (2006). *Modern nuclear chemistry*. John Wiley & Sons.

[1] De Marcillac, P., Coron, N., Dambier, G., Leblanc, J., & Moalic, J. P. (2003). Experimental detection of α -particles from the radioactive decay of natural bismuth. *Nature*, 422

[2] Carvalho, H.G.; Penna M. *“Alpha activity of ^{209}Bi ”*(1972).

[3] Morss L. *“Uranium”*. Encyclopedia Britannica (1998-2017)

[4] J.M. Sánchez Ron *“Marie Curie y la radiactividad”* (2011)

[5] Garzón Ruiperez L. (1992). *“Radón y sus riesgos”*

[6] Marshall, J. L.; Marshall V. R. (2003). *“Ernest Rutherford, The “True Discoverer” of Radon”*. Bulletin for the History of Chemistry.

[7] Debierne, A. (1900) *“Sur un nouvel element radio-actif, Comptes Rendus, Academie des sciences.*

[8] Jean-Pierre A.; Kaufman G.B. (2005) *“Francium (Element number 87), the last discovered natural element”*.

[9] Fermi, E., Amaldi, E., D'Agostino, O., Rasetti, F., Segrè, E. (1934). *“Artificial radioactivity produced by neutron bombardment”*

[10] Holden N.E. (2001) *“History of the origin of the chemical elements and their discoverers”*

[11] Segrè, E. (1939) *“An unusuccesful Search for Transuranium elements”*

[12] Hall N. *“The New Chemistry”* (2011)

[13] Pepling, R.S. *“Americium”* American Chemical Society (2003).

[14] Silva R.J., G. Bidoglio P.B., Robouch I. Puigdomenech H., Wanner M.H. Rand *“Chemical Thermodynamics of Americium”* (1995).

[15] Thompson S.G., Ghiorso A., Seaborg G. T. *“The new element Berkelium (Atomic Number 97)”* (1950).

[16] Ghiorso, A. *“Einsteinium and Fermium”*. Chemical and Engineering news (2003).

[17] Greenwood N.N. *“Recent developments concerning the Discovery of elements 101-111”* (1997).

[18] Wilkinson D.H. et al *“Discovery of the transfermium elements”* (1997).

[19] *“The Transfermium wars”* Bulletin of the atomic Scientists (1995).

[20] Y.T. Oganessian et al. *“Of Cross Sections and Decay properties of the isotopes of elements 112, 114 and 116 produced in the fusión reactions $^{233,238}\text{U}$, ^{242}Pu and $^{248}\text{Cm} + ^{48}\text{Ca}$ ”* (2004).

[21] Barber R.C.; Karol P.J.; Nakahara H.; Vardaci E.; Vogt E.W. *“Discovery of the elements with atomic numbers greater than or equal to 113 (IUPAC Technical Report)”* (2011).

