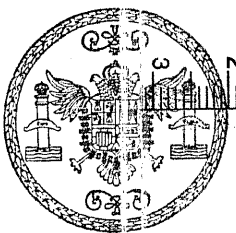
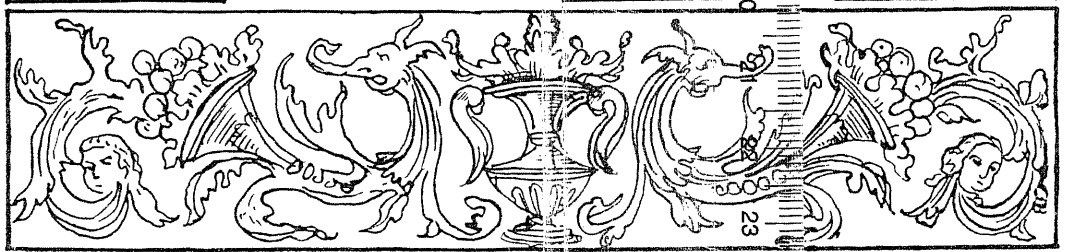
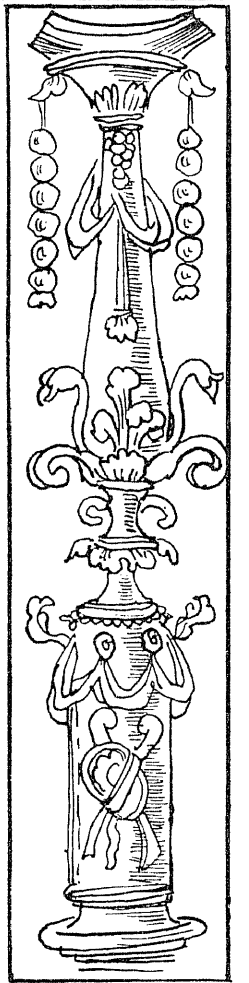
  
 DISCURSO  
 EN  
 APER  
 POR EL CATEDRÁTICO DE  
 LA FACULTAD DE FARMACIA  
 D. JOSÉ DORRONSORO VELLIDA  
  
 UNIVERSIDAD DE GRANADA





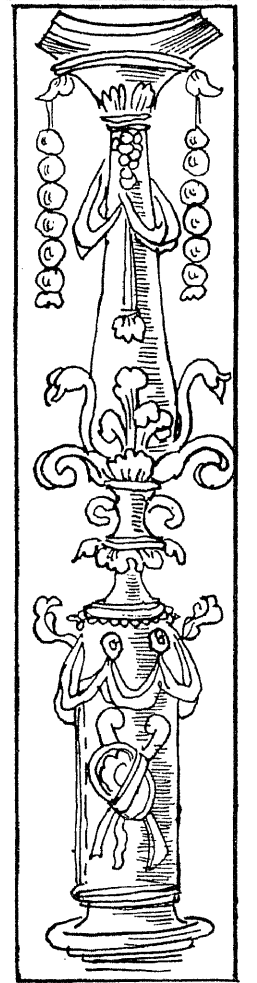
DISCURSO  
DE  
A P E R T U R A

POR EL CATEDRÁTICO DE  
LA FACULTAD DE FARMACIA

D. JOSÉ DORRONSORO VELILLA



UNIVERSIDAD DE GRANADA



33  
27(12)

BIBLIOTECA UNIVERSITARIA  
GRANADA  
N.º Documento 242191  
N.º Copia 242211

LOS NUEVOS ELEMENTOS QUIMICOS

DISCURSO  
DE  
A P E R T U R A

POR EL CATEDRÁTICO DE  
LA FACULTAD DE FARMACIA

D. JOSÉ DORRONSORO VELILLA



UNIVERSIDAD DE GRANADA

1952-1953

EXCMO. SR. RECTOR MAGNÍFICO:

EXCMOS. E ILMOS. SRES :

PROFESORES Y ALUMNOS DE ESTA UNIVERSIDAD:

SEÑORAS Y SEÑORES:

*«Cuantos me precedieron en este honroso sitio, comenzaron sus oraciones demandando benevolencia del ilustre concurso que les escuchaba, y esta rara unanimidad prueba bien, que la demanda no obedecía al deseo de emplear un recurso oratorio, sino a la necesidad sentida por todos ellos, al encontrarse frente a tantas ilustraciones, de fortalecer su espíritu con la indulgencia del auditorio».*

Con estas palabras y en este mismo lugar, empezaba su discurso de apertura del curso académico de 1899-1900, mi inolvidable padre D. Bernabé Dorronsoro al que de este modo me he permitido ofrecer aquí un ínfimo tributo de mi cariño y admiración imperecederos.

Y si él entonces, con sus excelsas dotes demandaba benevolencia, imagináos con qué sincera insistencia debo y quiero hacerlo yo hoy.

El tema elegido para esta primera lección del curso que hoy empieza, es el estudio de «LOS NUEVOS ELEMENTOS QUÍMICOS», tratando de exponer, lo más resumidamente posible, el estado actual de nuestros conocimientos a este respecto con la consiguiente conexión a los apasionantes problemas de la energía nuclear.

Pero antes de comenzar el tema apuntado, cúpleme, siguiendo la tradicional costumbre, dedicar unas palabras de despedida o saludo a los miembros del Claustro que se fueron o llegaron, en el pasado curso, a nuestra querida Universidad.

Desgraciadamente las frases de despedida han de ser en esta ocasión relativamente numerosas.

En primer lugar hemos de lamentar la pérdida irreparable de un insigne maestro de recia solera universitaria: Don José Pareja Yébenes (q. e. p. d.) Catedrático de Patología Médica que con su sólida y vasta cultura, y su tradicional y envidiable oratoria, difundió, dentro y fuera de su Cátedra, sus amplios conocimientos no sólo de su especialidad, sino otros muchos de Historia de la Medicina, por ejemplo, a los que dedicó preferente atención en los últimos años de su vida. Descanse en la paz del Señor que tantó ansió públicamente.

La Facultad de Farmacia ha sufrido la pérdida de uno de sus claustrales, D. Andrés López Prior, Profesor Adjunto encargado de la Cátedra de Bioquímica al que debemos rendir sincero tributo de admiración por su gran valía y decidida vocación hacia el Profesorado, en el que no dudamos hubiese ingresado definitivamente en un futuro próximo.

La inexorable ley de jubilación por edad, ha privado a nuestra Universidad del inestimable concurso de dos sabios maestros: D. Gonzalez Fernández de Córdoba y Morales, Catedrático de Derecho Internacional y D. Fernando Escobar Manzano, titular de la cátedra de Patología y Clínicas Médicas.

Dos sabios maestros que en sus respectivas especialidades supieron transmitir a numerosas generaciones universitarias el caudal de sus sólidos conocimientos y el creciente tesoro de su larga experiencia. Felizmente para todos siguen viviendo con aptitudes sobradamente suficientes para continuar laborando en provecho de la Ciencia.

Continuando el capítulo de despedidas hemos de decir no un «adiós», sino un esperanzador «hasta luego», a nuestro querido ami-

go D. Antonio Gallego Burín que por su elevación a la Dirección General de Bellas Artes, ha pasado temporalmente a la situación de excedente forzoso con reserva de su cátedra de Historia General del Arte. Creo expresar el sentir de todos al decir a D. Antonio Gallego que la alegría por su pujante carrera política no es capaz de aminorar nuestro egoísta deseo de volverle a ver algún día al frente su Cátedra para bien de nuestra Universidad.

En compleja mezcla de alegría y tristeza felicitamos y despedimos al Profesor D. Francisco González García, adjunto de la Facultad de Ciencias que tras brillantísima oposición, ha alcanzado la Cátedra de Química Inorgánica de la Facultad de Sevilla.

Yo, que tuve la fortuna de juzgar, sus ejercicios no puedo por menos que lamentar su marcha y me atrevo a felicitar a la Universidad de Sevilla por la llegada a ella del Prof. González García.

Nuestra Universidad recibe al Prof. D. José Bernal Montero, titular de Derecho Canónico que trasladado de Oviedo, sabrá, no lo dudamos, continuar aquí su valiosa labor docente.

Y como último llegado, demos la bienvenida al Prof. D. Juan Sánchez Montes que viene a ocupar la cátedra de Historia General de la Cultura, en la Facultad de Letras, con un prestigio y solvencia académica altamente prometedores.

Desde los tiempos mas remotos ha entrado en los hábitos del hombre el inquirir acerca de la naturaleza material asequible a nuestros sentidos. Lo hizo en un principio abandonándose a las mudables impresiones de su fantasía. Sin embargo, desde hace algunos siglos prefirió el camino de la investigación experimental, más árido y lento, pero indudablemente mucho más seguro.

Siguiendo los diversos caminos experimentales que sus ideas les trazaban y persiguiendo muchas veces utópicos objetivos, los alquimistas, los yatroquímicos, los flojistas, los químicos... fueron descubriendo nuevos elementos, que sumándose a los ya conocidos, formaron una larga lista, a la que de tiempo en tiempo iba agregándose un nombre más.

Congénito al afán de investigar, es también el de relacionar, comparar y ordenar. De aquí, que paralelamente al descubrimiento de nuevos elementos haya ido creciendo siempre el intento de su comparación y ordenación.

Repugnaba al lógico sentir que esa pléyade creciente de elementos descubiertos, fuese un montón informe de individualidades heterogéneas sin nexos concretos entre sí. Dentro del maravilloso orden universal y en consonancia con la frase bíblica de que: «Dios ha ordenado todas las cosas según medida, número y peso», no tenía cabida la idea de la existencia de ese gran número de sillares del



mundo material, sin que se conociese la esencia de su agrupación y posible ordenación.

Pero lo cierto es que poco o nada fructíferos habían sido los intentos en este sentido al comenzar el pasado siglo, que hemos de considerar clave en la consecución de estos fines.

Despreciando pues, por su escaso valor práctico, los intentos anteriores, vamos a reseñar brevemente los hechos concretos que influyeron decisivamente en dicha agrupación y ordenación tal como hoy la admitimos.

Döbereiner, en 1829, llama la atención acerca de sus «triadas» constituidas por grupos de tres elementos, en las que, las propiedades del elemento central resultaban aproximadamente un término medio entre las de los elementos extremos. El peso atómico del elemento intermedio es sensiblemente igual a la semisuma de los otros dos.

Beguyer de Chancourtois dibujó en 1862 su «vis tellurique», con el que demostró una indudable relación entre los pesos atómicos y el comportamiento físico y químico de los elementos conocidos; resumida esta relación en su frase de que: «les propriétés des éléments sont les propriétés des numeros».

Alexander Newlands, en 1864, formula su «ley de las octavas» que aunque al cabo de algún tiempo fué apreciada en su justo valor, por el momento fué objeto de crítica, desprecio y hasta burla general en la *Chemical Society* inglesa.

Y fué pocos años más tarde, en 1869, año crucial para la Química en cuanto a ordenación se refiere, cuando Lothar Meyer en Alemania y Dimitri Ivanowich Mendelejeff en Rusia, plantean y desarrollan independientemente y casi con simultaneidad (1) el llamado «Sistema periódico de los elementos».

La tabla periódica, en la que se ponían en evidencia las innegables relaciones entre los pesos atómicos y las propiedades físicas y químicas de los elementos, fué presentada por Mendelejeff a la Sociedad Química Rusa y constituyó el descubrimiento más sensacional de aquella época.

El sistema periódico de los elementos se basó en que ordenando todos ellos por su peso atómico creciente, las propiedades químicas

(1) Apesar de esta simultaneidad, que el propio Mendelejeff hizo patente públicamente en la *British Association* de Manchester, lo cierto es que el nombre que ha perdurado como autor de esta ordenación periódica ha sido y es el de Mendelejeff.

se repiten al cabo de un número determinado («período», constituido al principio por 8 luego por más elementos formando los «períodos grandes y pequeños»). Las propiedades químicas y muchas de las físicas resultan, por tanto, función periódica de su peso atómico.

Los éxitos obtenidos por Mendelejeff con el establecimiento de su tabla fueron realmente sorprendentes.

Afirmó audazmente que alguna de las anomalías que se observaban en su tabla, eran debidas a errores en los pesos atómicos atribuidos a ciertos elementos en relación con su valencia. Y en efecto, las revisiones experimentales confirmaron en varios casos sus rotundas afirmaciones.

Predijo proféticamente la existencia de elementos no descubiertos aún de los que, por la situación del lugar vacío en su tabla, anticipó casi exactamente sus propiedades físicas y químicas. Y efectivamente, al correr del tiempo, algunos de estos nuevos elementos fueron descubriéndose y encajando perfectamente, por su naturaleza y propiedades, en el lugar predicho.

Fácil es pues comprender que el sistema periódico fuese adquiriendo de día en día mayor crédito y solidez. Sin embargo, persistían dentro de él ciertas anomalías imposibles de subsanar. En algunos sitios era preciso lesionar el principio del sistema para evitar contradicciones manifiestas: argon y potasio, telurio y yodo, cobalto y níquel, estaban desplazados, en cuanto a sus pesos atómicos, respecto a su colocación en armonía con sus propiedades. Las revisiones cuidadosísimas de sus pesos atómicos no consiguieron sino confirmar la existencia de esas inexplicables anomalías.

Por otra parte, la colocación de las tres «hojas de trébol» y la de los elementos de las «tierras raras», restaban homogeneidad a la tabla.

#### ESTRUCTURA ATOMICA Y REACCIONES NUCLEARES

El primer paso en el camino de conocer esa ley natural que se vislumbraba como fundamento de la ordenación periódica, fué la elaboración de las ideas sobre la estructura atómica.

Apoyándose en ensayos experimentales, el físico inglés Ernest Rutherford afirma en el año 1911, la existencia en el átomo de un núcleo en el que radica la carga positiva y la casi totalidad de su

masa, alrededor del cual giran, a modo de pequeños sistemas planetarios, las cargas negativas o electrones.

Dos años más tarde, el físico danés Niels Bohr, basándose en las ideas de Rutherford, desarrolla un modelo atómico perfeccionado que aún hoy, a pesar de sus muchas insuficiencias, permite obtener una imagen muy instructiva y utilizable de la estructura atómica.

Conforme a los postulados de Bohr, el núcleo atómico está rodeado de un número limitado de órbitas o estados estacionarios de diferente energía potencial, que pueden ser ocupados por los electrones. El salto del electrón, de uno a otro de estos estados, produce la emisión o absorción de energía cuya frecuencia está regida por sus diferencias con arreglo a la siguiente ecuación:  $E - E' = h\nu$ .

Como es sabido, desde el punto de vista de la mecánica ondulatoria, el concepto del electrón como partícula negativa que describe una órbita determinada, ha sido sustituido por la idea actual de que la carga del electrón no está localizada en un pequeño elemento de espacio, sino que hay una función de probabilidad que representa su distribución en cualquier momento dado. Sin embargo, la idea de los electrones moviéndose en órbitas de diferentes energías, tal como la estableció Bohr, es una aproximación suficiente para la mayor parte de los problemas químicos.

Los electrones ocupan, en el estado fundamental del átomo los niveles de menor energía potencial. El estado energético de cada electrón viene determinado por una cuaterna de números cuánticos (principal  $n$ , azimutal  $l$ , magnético  $m$  y de spin  $s$ ) con sujeción al principio de Pauli.

Ahora bien, puesto que el átomo es eléctricamente neutro, los electrones de la corteza extranuclear están indudablemente compensando a un número igual de cargas positivas del núcleo.

Este número de cargas positivas del núcleo es el denominado «número atómico» que, en general, coincide con el número de orden asignado a cada elemento en la clasificación periódica de Mendelejeff basada en los pesos atómicos crecientes.

Sin embargo, el verdadero significado del «número atómico» se dió por primera vez como resultado de las investigaciones realizadas en 1913-14 por el físico inglés Henry J. Moseley quien, estudiando los espectros de rayos X de numerosos elementos metálicos, encontró que había una relación casi lineal entre la frecuencia característica de estos elementos y sus números atómicos:  $\nu = a(z - b)^2$ ; donde  $\nu$  es la frecuencia,  $Z$  el número atómico y  $a$  y  $b$  dos constantes.

La representación gráfica de esta ley ha proporcionado el mejor criterio para conocer la existencia de elementos no descubiertos hasta entonces, así como para la verdadera ordenación de éstos en la tabla periódica; en efecto, si se llevan en un sistema de ejes los números de onda de las  $K\alpha$  de los espectros correspondientes, frente al número atómico  $Z$ , los elementos quedan situados sobre una misma línea recta; un hueco en esta línea indica la falta de un elemento.

Esta sugerencia de Moseley fué comprobada por Chadwick midiendo la desviación de partículas  $\alpha$  al pasar a través de delgadas láminas metálicas, quedando establecido de una manera concreta que el número atómico representa el número de cargas positivas del núcleo.

El núcleo de los átomos está formado por neutrones y protones. El número de ambos aumenta al aumentar el peso atómico del elemento; desde un punto de vista numérico la constitución gradual de los núcleos al aumentar el número atómico es sencilla, estando formado cada núcleo por un número de protones igual al número atómico  $Z$  del elemento y el número de neutrones necesario para dar el valor total de la masa nuclear. En los primeros elementos de la tabla periódica la relación protones neutrones es aproximadamente de 1:1; a medida que va aumentando la complejidad atómica esta relación va creciendo hasta llegar a ser, en los más pesados, de 1:1,5.

No se conoce claramente la disposición de estas partículas dentro del núcleo. Hay pruebas abundantes sobre la existencia de niveles energéticos nucleares cuya distribución sería en cierto modo análoga a la existente en la corteza electrónica. La emisión por los elementos radiactivos de radiaciones  $\alpha$ , y de partículas que difieren en cuantos discretos de energía, la existencia de isómeros nucleares y de efectos de resonancia en la captura de partículas, apoya esta suposición.

También parece probable la idea de la existencia de partículas complejas preformadas, como sugiere la frecuente emisión de heliones en los procesos radiactivos.

Ahora bien, las propiedades químicas de los elementos están vinculadas a la corteza electrónica, y por ende, al número atómico  $Z$  de quien depende la cuantía y distribución de los electrones de aquella. El número de masa  $A$  apenas ejerce influencia en este sentido (salvo en los elementos muy ligeros).

De aquí que los elementos denominados isotopos, de igual  $Z$  y distinto  $A$  tengan prácticamente, con la salvedad anotada, las mismas propiedades químicas.

El concepto de isotopía ha tenido una gran importancia en el conocimiento de los pesos atómicos de los elementos naturales, establecimiento de una escala física de pesos atómicos y ha permitido, con el perfeccionamiento de las nuevas técnicas de trabajo, aprovechar las pequeñas diferencias en las propiedades físicas e incluso químicas entre isotopos para su separación práctica.

Puesto que no se conoce con certeza la distribución de partículas en el núcleo, no pueden establecerse con precisión las condiciones de que depende la estabilidad nuclear. Es un hecho conocido desde hace tiempo que todos los elementos muy pesados son radioactivos. No existen prácticamente isotopos estables de número atómico superior a 83. Sin embargo, el hecho de que se hayan identificado isotopos radioactivos de elementos ligeros (K-40, Rb-87, Sm-148, Lu-176) y sobre todo la preparación artificial de isotopos radioactivos de practicamente todos los elementos, pone de manifiesto que además de la magnitud del número atómico, otros factores influyen en la estabilidad nuclear.

Probablemente el factor más importante a tener en cuenta, es la relación protones/neutrones. Para cada elemento existe un valor crítico de esta relación que representa la máxima estabilidad nuclear. Valores superiores o inferiores conducen en general a isotopos inestables.

Otro factor importante en la determinación de dicha estabilidad, es el conocimiento de la energía de enlace entre las partículas nucleares. Esta energía puede calcularse, de una manera aproximada, teniendo en cuenta el equivalente en energía de la masa que desaparece en la formación de los núcleos a partir de sus partículas elementales.

En la práctica se obtiene un número que representa la energía media de enlace por partícula nuclear, dividiendo el defecto total de masa por el número de masa  $A$  del isotopo correspondiente. Estos números, o los obtenidos de un modo analogo por Aston, son los denominados «*packing fractions*».

La representación gráfica de los valores de «*packing fractions*» nos muestra claramente la inestabilidad de los elementos muy pesados y la gran cantidad de energía que se desprende en su desintegración.

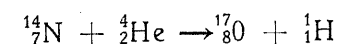
Como hemos indicado anteriormente, todos los elementos de número atómico superior al 83 (Bi) encontrados en la naturaleza, son radioactivos y se desintegran espontáneamente dando lugar a

tres largas cadenas formadas por los productos de transformación, cada una de las cuales constituye una familia radioactiva. En la actualidad se conocen perfectamente las características radioactivas y las propiedades químicas de la generalidad de estos elementos. Pero como también hemos señalado anteriormente, la desintegración espontánea no es una propiedad exclusiva de los elementos pesados, existiendo isotopos radioactivos naturales de algunos elementos ligeros.

Por otra parte, es posible provocar la inestabilidad nuclear de los átomos, alterando fundamentalmente el estado energético del núcleo; haciendo entrar en él partículas de energía suficiente o provocando su excitación por otro medio.

Los nuevos núcleos originados en estos procesos pueden estabilizarse inmediatamente, por emisión de alguna partícula o radiación, o evolucionar progresivamente hacia la estabilidad con arreglo a las leyes de la desintegración radioactiva.

Esta posibilidad de producir elementos nuevos por reacciones nucleares fué descubierta como es bien sabido, por Rutherford en el año 1919 al bombardear nitrógeno con partículas  $\alpha$  procedentes de RaC; reacción en la que observó la emisión de partículas de gran recorrido libre que se identificaron como protones



Desde aquella fecha más de un millar de reacciones nucleares han sido estudiadas utilizando como proyectiles: *neutrones, protones, deuterones, partículas  $\alpha$ , electrones, fotones  $\gamma$  y  $x$ .*

Las reacciones nucleares como las químicas, van siempre acompañadas de una absorción o emisión de energía, con la diferencia de que el orden de magnitud de estas tonalidades térmicas es muy superior al de las reacciones químicas más energéticas.

Este elevado orden de magnitud de la energía puesta en juego en las reacciones nucleares se debe, como es sabido, a que en las mismas tienen lugar importantes cambios de masa que se transforma en energía, según la concepción einsteniana.

Se puede pues calcular la energía de la reacción si se conocen, por datos obtenidos en el espectrógrafo de masa, la de todas las partículas que intervienen. Así, en la reacción anterior, la suma de las masas de  ${}^{14}_7\text{N}$  y  ${}^4_2\text{He}$  es 18,01141 y la de las masas  ${}^{17}_8\text{O}$  y  ${}^1_1\text{H}$  es 18,01262; representa por consiguiente una diferencia de 0,00121, o lo que es lo mismo, una absorción de energía de  $Q=0,00121 \times 931 \text{ Mev.} = 1,13 \text{ Mev.}$

Recíprocamente, si se conoce experimentalmente la tonalidad térmica (a partir de la energía cinética de las partículas bombardeantes y de los productos de reacción) es posible calcular la masa desconocida de uno de los núcleos participantes. Prácticamente este método se ha aplicado para calcular la masa de numerosos núcleos radioactivos.

En el ejemplo que estamos comentando, podría pensarse que serían suficientes partículas de 1,13 Mev. para producir la reacción nuclear. Sin embargo, deben tenerse en cuenta en la práctica otros dos factores.

El primero de ellos es que aproximadamente  $4/18$  de la energía cinética de las partículas incidentes ha de ser transferida a los productos de reacción, es decir, solamente son utilizables para dicha reacción los  $14/18$  de la energía de las partículas  $\alpha$ . Por consiguiente la energía mínima de dichas partículas capaces de producir la reacción sería:  $18/14 \times 1,13 \text{ Mev} = 1,45 \text{ Mev}$ .

Pero por otra parte, hay que tener en cuenta que las partículas incidentes han de vencer una barrera de potencial, debida a la repulsión electrostática por la carga de los núcleos bombardeados. La magnitud de esta barrera puede calcularse por la fórmula  $V = \frac{Z_1 Z_2 e^2}{R_1 + R_2}$  que da para la reacción estudiada un valor aproximado de 3,4 Mev.

Claro está que para otras reacciones nucleares el valor mínimo energético de las partículas incidentes varía ampliamente con su propia naturaleza y la de los núcleos donde se les intenta hacer entrar.

La altura de la barrera de potencial aumenta al aumentar el número atómico  $Z$  del núcleo bombardeado y es aproximadamente proporcional a él. Para protones y deuterones el valor de dicha barrera es aproximadamente la mitad que para partículas  $\alpha$ .

En los elementos más pesados, las barreras de potencial son de unos 15 Mev. para protones y deuterones y de 30 Mev. para partículas  $\alpha$ .

Sin embargo, desde el punto de vista de la mecánica ondulatoria es posible prever la penetración de barreras de potencial por partículas de más baja energía, debido a fenómenos de «resonancia».

Es evidente que partículas desprovistas de carga eléctrica, como son los neutrones, pueden penetrar o salir de los núcleos con mayor facilidad. Este hecho fué estudiado ampliamente por Fermi que utilizó los neutrones en numerosos procesos nucleares.

El mismo Fermi y sus colaboradores pudieron comprobar en el transcurso de sus continuadas experiencias, que neutrones «*lentos*» (neutrones «*térmicos*») es decir, de muy baja energía, tienen, por su especial longitud de onda, mucho mayor que las dimensiones nucleares, probabilidades excepcionales de penetrar en los núcleos.

Este hecho, de enorme interés en los trabajos de química nuclear ha dado motivo al estudio teórico y práctico de las sustancias más adecuadas para frenar las energías de los neutrones hasta reducir las a los límites citados. Estas sustancias, que omitimos detallar en razón de la brevedad, se llaman «*moderadores*».

La probabilidad de las reacciones nucleares se expresa generalmente por lo que se denomina «sección eficaz».

Suponiendo que fuera necesario el choque de la partícula incidente con el núcleo bombardeado, para que tuviera lugar la reacción se podría calcular la probabilidad de que esta ocurriese teniendo en cuenta la relación entre las áreas de las secciones presentadas por los núcleos y las de los átomos. Teniendo en cuenta la gran diferencia entre los diámetros nuclear y atómico, esta probabilidad tendría un valor de  $Nr^2$  (para  $N$  átomos que ocuparan  $1 \text{ cm}^2$  de superficie, siendo  $r$  el radio del núcleo) es decir, aproximadamente  $10^{-24}$ .

En la práctica, no es necesario el choque directo de la partícula con el núcleo, sino que basta que el proyectil llegue a situarse dentro de cierta distancia, que es mayor que el radio nuclear. Por esta causa para muchas partículas y reacciones nucleares la sección eficaz tiene valores muy superiores al anteriormente calculado.

Para un proceso determinado la sección eficaz puede definirse por la ecuación  $N = In \sigma x$ , donde  $N$  es el número de procesos que tienen lugar,  $I$  el número de partículas incidentes,  $n$  los núcleos por  $\text{cm}^2$ ,  $\sigma$  la sección eficaz de la reacción en  $\text{cm}^2$  y  $x$  el espesor del «blanco» en cm.

La sección eficaz para reacciones con partículas rápidas no es por lo general mayor que  $10^{-24} \text{ cm}^2$ , por lo cual este número se toma como unidad para expresar esta magnitud y se le denomina «*barn*».

Cuando pueden tener lugar varias reacciones nucleares simultáneas, cada una de ellas tiene su sección eficaz, denominada «*sección eficaz parcial*» y la suma de todas las parciales se llama «*sección eficaz total*».

Esta sección eficaz total para neutrones rápidos es aproximadamente igual a  $1 \text{ barn}$ . Para rayos  $\gamma$  varía de  $10^{-4}$  a  $10^{-1} \text{ barn}$ . En cambio para neutrones lentos tiene valores mucho más elevados, debido,

como ya se ha indicado, a la absorción de estas partículas en procesos de resonancia.

Citemos como ejemplo algunos de los mayores valores observados: para el Gd alcanza la cifra de 30.000 *barn*, para el Sm 6.500, el Cd 2.900 y para el isótopo Cd-113 sube a 23.000.

\* \* \*

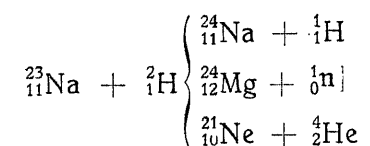
Decíamos antes que a partir de aquella primera reacción nuclear de Rutherford, a la que debemos asignar ya un profundo valor histórico, un elevadísimo número de experiencias análogas han sido intentadas viéndose muchas de ellas coronadas por el más completo éxito. La química nuclear, nacida en 1919, es hoy la rama más interesante de la físico-química. Sus tangibles resultados y sus posibles horizontes absorben, por sus sensacionales resultados, la máxima atención, no solo de los investigadores y hombres de ciencia, sino del mundo entero que vive atento a sus ininterrumpidos y trascendentales progresos.

No intentamos hacer un estudio detallado de los posibles tipos de reacciones nucleares que por su prolijidad resultaría desorbitado y agobiador en este sitio. Haremos, como venimos haciendo en esta primera parte de nuestro trabajo, un comentario de conjunto sobre ellas para llegado el momento podernos referir concretamente a algunas de particular interés para nosotros.

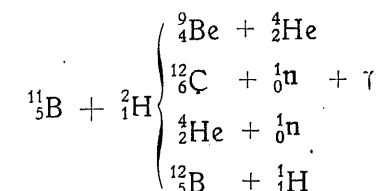
Puesto que son numerosos los posibles proyectiles: neutrones, protones, deuterones, heliones, núcleos de tritio, electrones y fotones  $\gamma$  y  $x$ ; y estos mismos o su asociación, los que en la reacción pueden ser emitidos, podemos considerar en principio un crecidísimo número de tipos distintos de reacciones nucleares. Bien es verdad que en la práctica algunos de estos posibles tipos no tienen realidad experimental, por lo que el número distinto de reacciones es inferior al que se pudiera deducir por un sencillo cálculo numérico.

Pero en cambio la posibilidad de que con los mismos productos reaccionantes el proceso pueda discurrir por varios caminos diferentes y no aislada sino simultáneamente, es un factor importante en pro de la complejidad antes anotada.

Así por ejemplo, bombardeando sodio (CINa) con deuterones acelerados se producen las siguientes reacciones:



o bien, boro igualmente con deuterones



Además, como los productos resultantes no suelen ser elementos estables sino isótopos radioactivos sujetos a nuevas transformaciones la complejidad que venimos señalando se nos hace bien patente.

Séanos pues permitido referirnos solamente, aunque con el mismo criterio general, a algunos tipos de reacción que interesan directamente a nuestros fines.

#### REACCIONES CON PARTÍCULAS $\alpha$

Recordemos una vez más que Rutherford utilizó partículas  $\alpha$  como proyectiles para provocar su primera reacción nuclear.

Hasta el año 1932 fueron estas partículas  $\alpha$  las únicas empleadas en la transmutación de los átomos y con ellas se logró transmutar todos los elementos de peso atómico bajo hasta el calcio (40) a excepción del He, C y O los cuales poseen una estabilidad particular. Los elementos pesados se resistían a la desintegración por partículas  $\alpha$  ya que su elevada barrera de potencial les hacía invulnerables.

Aumentando la densidad del haz de proyectiles se consiguió un notable avance. Pero el hecho que podemos considerar como decisivo en el progreso de la química nuclear fué la consecución de la aceleración en la velocidad de los proyectiles, mediante los dispositivos bien conocidos llamados «ciclotrones» «betatrones» «sincrociclotrones»... ideado y realizado el primero de ellos por el Profesor Lawrence de la Universidad de Berkeley en California.

En la actualidad merced a estos dispositivos, alguno de los cuales recibe fundadamente el calificativo de gigante, pueden producirse heliones cuya energía cinética es del orden de 400 Mev., es decir, mi-

llones de veces mayor que la de los procedentes de radio elementos naturales utilizados como fuente de partículas  $\alpha$  en un principio.

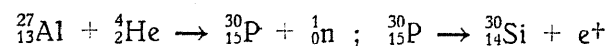
Con estos heliones acelerados todos los núcleos, tanto ligeros como pesados, son atacados; aumentándose por tanto extraordinariamente las posibilidades de nuevas transmutaciones.

Otro resultado de gran importancia práctica deducido de las experiencias realizadas con partículas  $\alpha$ , fué el descubrimiento realizado en 1934 por I. Curie y M. Joliot de la «radioactividad artificial» al observar que en estos procesos se obtienen con frecuencia isotopos inestables de los elementos ligeros que se transmutan con arreglo a las leyes de la desintegración radioactiva con emisión de positrones.

Sometiendo una lámina de aluminio al bombardeo con heliones procedentes de una potente fuente de polonio, observaron dichos investigadores que, después de haber cesado el bombardeo, la lámina de aluminio emitía radiaciones, comprobando después por vía química, que la radioactividad se debía a un isotopo inestable del fósforo.

Los esposos Joliot-Curie sacaron de su experimento la siguiente conclusión: «Nos encontramos en presencia de nuevos elementos radioactivos y de un nuevo tipo de radioactividad»

Continuando sus experiencias pudieron concretar que el proceso transcurre con arreglo a las siguientes reacciones:



Como tendremos ocasión de ver más adelante las técnicas de bombardeo con partículas  $\alpha$  muy aceleradas han adquirido una gran importancia práctica para la preparación de elementos químicos artificiales e isotopos radioactivos de un gran número de elementos químicos.

#### REACCIONES CON PROTONES Y DEUTERONES

Por razón de su más pequeña carga, los protones convenientemente acelerados son proyectiles especialmente aptos para remontar las barreras de potencial de los núcleos.

Y en efecto, los protones se emplean análogamente en la obtención de numerosos isotopos artificiales.

El descubrimiento del deuterón abrió nuevas posibilidades para

la química nuclear al utilizarse deuterones acelerados como proyectiles.

Por tener carga igual y masa superior a la del protón, resultan los deuterones proyectiles muy agresivos para provocar desintegraciones.

En la práctica las reacciones con deuterones son también de extraordinario interés para la producción de radioisotopos artificiales.

#### REACCIONES CON NEUTRONES

Siguiendo los ensayos de Bothe y Becker en Alemania, y de los esposos Joliot-Curie en Francia, el físico inglés James Chadwick descubrió en 1932 el «neutrón»

Sus características de ser una partícula rápida desprovista de carga eléctrica, hicieron fijar sobre él la atención de los químico-nucleares entreviendo sus excelentes posibilidades como proyectil atómico.

Y con esta idea, Fermi y sus colaboradores ensayaron el uso del neutrón que resultó en efecto un proyectil extremadamente penetrante, puesto que no sufría repulsión electrostática de los núcleos.

Fermi, en 1934, utilizando fuentes neutrónicas de escasa potencia, consiguió isotopos radioactivos de 40 elementos de los 68 experimentados. En la generalidad de los casos estos radioisotopos se desintegran con emisión de partículas  $\beta$ .

Señalemos aquí la gran importancia de este hecho ya que como veremos mas adelante a él se debe fundamentalmente la obtención de nuevos elementos artificiales, cuando el progreso de la técnica en la química nuclear ha permitido disponer de las grandes densidades neutrónicas que se manejan en las pilas de uranio.

Las experiencias de Fermi se dirigieron después hacia los núcleos pesados, especialmente torio y uranio, con la esperanza de obtener elementos superiores. Y comprobó que en efecto el torio y el uranio al ser bombardeados con neutrones lentos, se activaban, si bien «las curvas de desintegración de estas actividades denotaban que el fenómeno era algo complejo».

Por su parte los investigadores alemanes Hahn y Meitner con la cooperación de Strassman produjeron en los años 1935-38, por idénticos caminos, varios isotopos radioactivos que consideraron como representantes de los buscados transuránidos.

En efecto, hasta aquel momento los centenares de reacciones nucleares provocadas artificialmente habían conducido siempre a la formación de isotopos o elementos muy próximos a los irradiados, y la  $\beta$ -emisión era indicio seguro de la producción de un elemento superior.

No es pues de extrañar que los investigadores alemanes que bombardeaban por primera vez el uranio y comprobaban la emisión de partículas  $\beta$ , tratasen de ajustar la interpretación de sus resultados a esta idea e intentasen identificar como elementos superiores al uranio, los «nuevos» elementos obtenidos.

Sin embargo, tras laboriosísimas experiencias encaminadas a confirmar sus primeras ideas, los citados investigadores hubieron al fin de rendirse, en el año 1939, ante la sensacional realidad de que aquellos pretendidos transuránidos no eran otra cosa que isotopos radioactivos de los «viejos» elementos bario y cripton, que fueron los primeros identificados.

Esta identificación indiscutible echaba por tierra todo el edificio transuránido, pero al mismo tiempo era la primera piedra de otro nuevo, cimentado en el trascendental fenómeno que acababa de descubrirse: *El uranio al ser bombardeado con neutrones se había escindido en dos núcleos de peso intermedio.*

Paralelamente a estas investigaciones otras análogas realizadas por Savitch, Joliot, Fermi, etc., contribuyeron a aclarar el problema de los pretendidos transuránidos.

Pero la idea concreta de la ruptura del átomo de uranio en fragmentos de peso mediano, va vinculada a los nombres de Fritsch y Meitner que fueron los primeros en explicar el proceso a base del modelo de estructura nuclear de Bohr y a ellos se debe el nombre de «*escisión nuclear*» o más corrientemente «*fisión*» que es hoy admitida y adoptada universalmente para denominar este extraordinario proceso.

Fritsch y Meitner interpretaban este proceso a base del modelo nuclear de «*gota líquida*» de Bohr, el cual había supuesto que al absorber el núcleo una partícula incidente, forma con ésta un sistema inestable sostenido por la «*tensión superficial*» del núcleo excitado. La ruptura del equilibrio encaminada a la formación de un sistema más estable, puede ocurrir por emisión de nuevas partículas o radiaciones, o bien, por este nuevo camino de la fisión, cuando la energía de excitación sobrepasa a la energía de formación crítica del núcleo.

Por la disminución en la relación  $n/p$  al pasar del uranio a elementos ligeros sospechó Fermi que en el proceso de fisión debía haber liberación de algunos de los neutrones excedentes.

A partir de esta primera sospecha de Fermi, los investigadores redoblaron sus esfuerzos para comprobar experimentalmente esta expulsión de neutrones, ya que con ello se vislumbraba la posibilidad de que la fisión fuese un proceso capaz de proseguir por sí sola una vez iniciada, puesto que los nuevos neutrones emitidos podrían provocar nuevas fisiones con liberación de neutrones y así sucesivamente.

Y en efecto, Joliot y Kowarski en Francia y el grupo de investigadores americanos dirigidos por Fermi, demostraron experimentalmente la emisión de nuevos neutrones («*neutrones secundarios*») en los procesos de fisión.

Con este descubrimiento se inició el camino de la utilización práctica de la reacción en cadena como fuente de producción de enormes cantidades de energía cuyo aprovechamiento podía imaginarse de dos maneras: bien como una reacción regulada para la producción continuada de dicha energía y subsiguiente obtención de elementos artificiales, o bien como reacción noregularizada, extraordinariamente progresiva, liberadora en un tiempo pequeñísimo de enormes cantidades de energía, en una palabra, como reacción explosiva de una magnitud infinitamente superior a todas las hasta entonces conocidas.

Y en este sentido y por el decidido apoyo de los altos poderes, que hicieron suya la esperanza de los hombres de ciencia de llegar a poseer nuevas armas ofensivas de incalculable valor, se emprendió el estudio intensivo de los problemas a resolver para conseguir la fabricación de estos posibles nuevos explosivos.

Por ello, tanto en estas vigiliadas de guerra en que se produjeron estos últimos esperanzadores descubrimientos, como durante la marcha de ella, una vez comenzada, a la carrera de producción y mejoramiento de los armamentos ya conocidos, siguió de un modo silencioso y secreto, pero en ritmo febril, la carrera de las investigaciones nucleares a las que se dedicaba atención preferentísima, a la que no se negaba esfuerzo material alguno y en cuyo desarrollo, cada día más apasionante, se enfrascaban sin descanso pléyades de pacientes investigadores.

Debido a estas excepcionales circunstancias, el impulso y el progreso de la química nuclear fueron indudablemente muy superiores

a lo que en una época de normalidad hubiesen sido. Y el gigantesco esfuerzo dió como resultado, tras ser vencidos escollos aparentemente insuperables, que no hemos de señalar, la consecución del aprovechamiento práctico del proceso de fisión en las dos posibilidades que antes señalábamos, que no resultaron independiendes, sino jalones de un mismo camino: la pila de uranio con reacción en cadena autosostenida, realizada por Fermi y puesta en marcha el día 2 de diciembre de 1942, y la fabricación después, de la primera «bomba atómica» ensayada con el más completo éxito en las llanuras de Nuevo México el día 16 de junio de 1945.

Señalemos para terminar esta parte general, que si bien es verdad que la consecución de la bomba atómica fué el acontecimiento más sensacional y trascendente, para nosotros, lo es mucho más la puesta en marcha de la pila de uranio en cuanto representa la posible obtención de nuevos elementos, unos totalmente desconocidos y otros tan solo obtenidos anteriormente en cantidades casi imponderables.

#### NUEVOS ELEMENTOS QUIMICOS

Una vez establecido con rigurosidad el concepto de número atómico, se tuvo con ello un criterio seguro para establecer definitivamente la situación de todos los elementos conocidos en la tabla periódica. Existían como únicos problemas principales, la búsqueda de los elementos destinados a ocupar las lagunas existentes, correspondientes a los números 43, 61, 72, 75, 85, 87 y 91, y la cuestión tan debatida relativa al número de elementos químicos, con la posible prolongación de la tabla más allá del elemento número 95, uranio.

Ambas cuestiones aparecen hoy definitivamente resueltas y el estudio monográfico de los elementos que han venido a llenar las lagunas citadas y a prolongar la tabla periódica, va a ser el tema fundamental que nos proponemos en este trabajo.

El progreso realizado en los últimos 20 años en el conocimiento de la estructura nuclear y el de los principales factores de que depende la estabilidad de los núcleos, así como el enorme desarrollo de las técnicas experimentales empleadas en la producción de reacciones nucleares (aceleración de partículas, técnicas radioquímicas, etc.), junto con el descubrimiento de la fisión nuclear, cuestiones de las que hemos hecho referencia en la primera parte de este traba-

jo, ha dado lugar al descubrimiento de numerosos isotopos de un grupo de elementos transuránidos, acercándose al centenar el número de los elementos químicos conocidos en la actualidad.

Este mismo progreso de la química nuclear, al hacer posible la obtención de isotopos artificiales de prácticamente la totalidad de los elementos químicos conocidos, ha permitido rellenar con isotopos artificialmente preparados algunas de las lagunas existentes en la tabla periódica, correspondientes a elementos no identificados en la naturaleza (elementos 43 y 61).

El perfeccionamiento alcanzado en el conocimiento de las características atómicas, carga, radio y configuración electrónica de los iones y la elaboración del cuerpo de doctrina que forma el contenido de la Cristalquímica y de la Geoquímica, junto con el desarrollo de las nuevas técnicas fisico-químicas, ha encauzado de un modo racional y científico la búsqueda en la naturaleza de los elementos ausentes de la tabla, que en un principio se realizó de un modo empírico.

Aquellas características de que depende el comportamiento químico de los iones respectivos, son asimismo responsables de la distribución geoquímica de los elementos. En la construcción de las redes cristalinas naturales juegan de esta manera un papel destacado la carga, radio y configuración electrónica de los iones. Estos tres factores determinan de un modo muy importante la estabilidad de los respectivos compuestos y por ende, el orden de su deposición en la consolidación magnética y de su evolución en el ciclo natural de los elementos químicos.

Los mismos factores determinan ampliamente la posibilidad de sustituciones isomorfas en los compuestos naturales, fenómeno de extraordinaria importancia en la distribución geoquímica de los elementos.

El conocimiento de todos estos hechos ha orientado de una manera eficaz la búsqueda de los elementos ausentes entre los productos naturales, proporcionando criterios científicos para realizarla. A la luz de estos conocimientos resulta perfectamente lógica la búsqueda del elemento 72 hafnio, en los minerales de zirconio, realizada con pleno éxito por Hevesy y Coxter, la del renio en minerales de manganeso, etc.

A la solución definitiva de las lagunas de la tabla periódica, se ha llegado de manera conjunta por el progreso de los conocimientos cristalquímicos, el de la química nuclear y el avance poderoso de las técnicas modernas de trabajo.



LAGUNAS DE LA TABLA PERIODICA

ELEMENTOS 43 Y 75

Hasta el año 1925, la séptima columna del sistema periódico presentaba dos huecos correspondientes a los elementos 43 y 75 homólogos superiores del manganeso bien conocido.

Aunque se había anunciado repetidas veces, por diversos investigadores, la identificación de estos elementos (etapa a la que pertenecen los nombres de «davyum», «ilmenyum», «lucium», «nipponium», da dos para el supuesto 43 y los de «uralium» y «pluralium» para el 75) su descubrimiento real se anunció por Noddack, Tacke y Berg en el año 1925.

Con arreglo al criterio cristalquímico su búsqueda se realizó en minerales de manganeso, molibdeno y platino.

Para su concentración se tuvo en cuenta la probable volatilidad de sus óxidos (por analogía con Ru  $O_4$  y Os  $O_4$ ) y su precipitación como sulfuros.

La primera investigación roentgenespectroscópica de ambos elementos efectuada sobre concentrados procedentes de minerales de Pt, permitió la identificación de las rayas  $K\alpha_1$ ,  $K\alpha_2$  y  $K\alpha_3$  del supuesto elemento 43, al que denominaron «MASURIO», observándose respectivamente las longitudes de onda 0,672; 0,675 y 0,601. La concordancia con los valores calculados (0,6734; 0,6779 y 0,600) no es perfecta teniendo en cuenta el alto grado de precisión del método empleado.

En los mismos minerales y en otras fuentes (columbita, sperrillita, gadolinita, etc...) identificaron sin lugar a duda la presencia del elemento 75 para el que propusieron el nombre de *Renio* (Re), dedicado al Rhin, que ha quedado definitivamente aceptado.

Pocos meses más tarde del descubrimiento de Noddack y sus colaboradores, Loring y Druce encontraron este elemento en las sales comerciales de manganeso identificándolo por roentgenespectrografía y simultáneamente Heyrovsky y Dolejšek por estudios polarográficos en idénticas sales.

La existencia de este elemento en la naturaleza quedó definitivamente establecida y su química se conoce en la actualidad perfecta-

mente tanto en estado metálico como en sus compuestos que se han estudiado con extraordinaria precisión habiéndose publicado numerosos trabajos y monografías a este respecto.

No ocurrió lo mismo con el anunciado masurio. La discrepancia señalada en las longitudes de onda observadas y calculadas, y el de que ni el elemento ni sus compuestos hayan podido aislarse entre los productos naturales, a pesar de los repetidos intentos realizados en este sentido, y de que por sus descubridores se supuso tratarse de un elemento tan frecuente como el Re, dió lugar a que su existencia en la naturaleza se considere hoy como muy dudosa.

Por tanto la pretendida prioridad de Noddack y el nombre de masurio fueron perdiendo de día en día solidez hasta prácticamente quedar relegados a un discreto olvido.

La primera identificación clara del elemento 43 se debe a Perrier y Segré que en 1937 y a partir de una placa de molibdeno bombardeada en Berkeley durante varios meses con deuterones acelerados a 5 Mev., consiguieron identificar por su espectro de rayos X la presencia de un isotopo radioactivo del elemento buscado.

A principios de 1939 Hahn y Strassman señalaron al masurio—101 como posible pareja del bario—138 en la fisión del uranio. Y efectivamente así es en realidad y en la pila de uranio se producen cantidades relativamente importantes del elemento 43.

Además del primer isotopo de Perrier de período de 5,9 horas, se ha conseguido la obtención de otros isotopos de vida más larga y entre ellos citaremos el de masa 99 de larga vida (4 millones de años) al que se llega partiendo del molibdeno-99 y que se va transformando lentísimamente en rutenio, producto estable final de este proceso.

La circunstancia de que se produzca el elemento 43 en la fisión, del uranio, encontrándose por tanto en cantidades ponderables en las cenizas de la pila y la larga vida de su isotopo 99, hacen que este elemento, cuya existencia en la naturaleza sigue en duda, pueda considerarse merced a su citada obtención artificial, como un elemento químico ordinario.

A propuesta de sus descubridores Perrier y Segré se le ha denominado Tecnecio (Tc), del griego *technetos*, artificial.

La obtención del tecnecio en cantidades ponderables ha permitido establecer de una manera bastante completa la química de este elemento que presenta grandes analogías con la de su homólogo superior renio, y ambos, manifiesta semejanza con el manganeso.

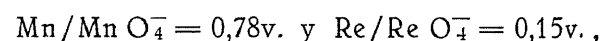
Tecnecio y renio metálicos poseen estructura exagonal compacta

semejante a la del Os y Ru. Se preparan en estado metálico por reducción de su sulfuro o de sus óxidos en corriente de hidrógeno a elevada temperatura.

Como el manganeso, muestran estos elementos valencia variable, habiéndose identificado en el Tc las valencias IV, V y VI y en el renio las III, IV, V, VI y VII, siendo las IV, VI y VII las más estables y habiéndose postulado también la existencia de compuestos de renio mono y divalente.

Los óxidos de estos elementos en sus valencias más elevadas tienen carácter ácido, de un modo semejante al manganeso. Cuando el tecnecio se disuelve en la mezcla  $\text{N O}_3\text{H} + \text{Cl H}$ , ó,  $\text{N O}_3\text{H} + \text{S O}_4\text{H}_2$ , se forma una sal de color rosado donde existen iones  $\text{Tc O}_4^-$ .

Se conocen numerosas sales de oxiácidos del renio; renitos, hiporenatos, renatos y perrenatos, muchas de las cuales poseen caracteres análogos a las correspondientes de manganeso; los renatos como los manganatos tienen color verde y solo son estables en solución alcalina, descomponiéndose en solución ácida en dióxido de renio y perrenato. Estos últimos tienen grandes analogías con los permanganatos. Flagg y Bleidner han medido por el método de Hevesy y Paneth el potencial normal del electrodo  $\text{Tc/Tc O}_4^- = +0,41\text{v}$ . Este potencial es intermedio entre los de



concluyendo que el tecnecio en su comportamiento químico, se encuentra más próximo al renio que al manganeso.

#### ELEMENTO 61

En el compacto grupo de las tierras raras quedaba con arreglo a la ley de Moseley, un hueco que llenar correspondiente a un elemento con número atómico 61.

El criterio cristalquímico orientaba a los buscadores del elemento desconocido hacia los minerales que contienen esas tierras raras, y en especial a los de sus vecinos neodimio y samario.

Y en efecto, en 1926 el profesor Hopkins de Illinois y sus colaboradores proclamaron haber identificado con seguridad el elemento buscado, examinando fracciones intermedias (separadas por cristalizaciones fraccionadas) entre neodimio y samario, y propusieron para él el nombre de *Ilinio*.

Casi simultáneamente el Prof. Luigi Rolla de Florencia pretendió igualmente la paternidad del ausente y le bautizó con el nombre de *Florencio*.

Sin embargo Prandtl criticó severamente las conclusiones de Hopkins, indicando que probablemente las líneas  $L\alpha$  y  $L\beta$  observadas en el espectro del supuesto 61 se deberían a pequeñas cantidades de Pt, Ba y Br. Noddack examinó asimismo el espectro de rayos X de varios concentrados de tierras raras, en las que debía encontrarse este elemento, con resultados totalmente negativos. Estos hechos así como la imposibilidad de patentizar la existencia del citado elemento en muestras de minerales alcalino-térreos y de tierras raras, donde debiera seguramente encontrarse, hicieron perder crédito al pretendido descubrimiento quedando el asunto sumido en una nebulosa duda.

Con el desarrollo de la radioquímica se intentó por los investigadores Pool y Quill y más tarde por C. S. Wu y Segré, la obtención de radioisotopos artificiales del 61, bombardeando con deuterones y neutrones acelerados en ciclotrón, un óxido de neodimio de pureza espectroscópica y parece indiscutible que lograron producir isotopos del elemento buscado, pero sin que pudiesen ofrecer ninguna prueba radioquímica ni afirmar concretamente cual de las actividades detectadas era atribuible a isotopos del 61. Quill en recuerdo de la ciencia nuclear quiso imponer al nuevo elemento el nombre de *Ciclonio*.

Y fué, como el caso del 43, la pila de uranio la fábrica de este discutido elemento. Es producto de fisión directa del uranio, y en las cenizas de la pila fueron identificados por Marinsky, Glendinin y Coryell, en el año 1947, dos isotopos de masas 147 y 149 con períodos de 3, 7 a. y 47 h. respectivamente.

Su aislamiento se realizó utilizando la técnica de cambio iónico con resinas artificiales, método que se había revelado de una gran utilidad para la separación de tierras raras. La mezcla de elementos se absorbe en la banda superior de una columna de cambio, realizándose luego la elución con una disolución de citrato amónico, ajustada a pH conveniente. Las diferencias en el campo electrostático y en el poder de formación de complejos de los iones respectivos, determinan la separación práctica de los elementos. El orden de elución de las tierras raras es inverso al número atómico. Consecuentemente puede determinarse la naturaleza de un elemento desconocido, a partir de las curvas de elución de un grupo de tierras raras que lo contienen.

Este procedimiento permitió la identificación con toda certeza de los isotopos citados del elemento 61, que se producen en cantidad de varios miligramos por día en una pila de 1.000 KW.

Sus descubridores propusieron el nombre de PROMECIO (Pm) dedicado a Prometeo, titán de la Mitología griega.

Las propiedades del promecio concuerdan perfectamente con su posición en la tabla y es, como era de esperar, extraordinariamente parecido en su comportamiento químico a sus lantánidos vecinos.

Lentz y Parker han obtenido cantidades macroscópicas de cloruro amarillo y de un nitrato de color rosado. Otros compuestos han comenzado a estudiarse confirmándose en todos ellos las analogías señaladas.

#### ELEMENTO 72

En realidad, en el momento de situar la tabla periódica con arreglo a la ley de Moseley, el lugar 72 no aparecía como laguna, sino ocupado por el elemento *celtio*, cuyo espectro de arco había sido descrito por Urbain (en 1911), al que se había atribuido la paternidad de dicho elemento.

Pero el propio Urbain tuvo que desdecirse después de sus primeras afirmaciones, pues las rayas atribuidas al nuevo elemento eran en realidad perfectamente propias del lutecio e iterbio.

Según la antigua teoría de Langmuir el elemento buscado debía ser el último de las tierras raras. Pero Bohr predijo que debería ser el homólogo superior al zirconio, y por tanto el *celtio* de Urbain obtenido de las tierras raras no podía ser el elemento 72. Y en esta convicción instó a los profesores Hevesy y Coxter a la búsqueda del nuevo elemento en los minerales de circonio.

Y en efecto en 1923, estos investigadores consiguieron el descubrimiento sin lugar a dudas del elemento buscado, para el que propusieron el nombre de HAFNIO (Hf) dedicado a la ciudad de Copenhague, donde habían realizado sus felices trabajos.

Lo curioso del caso es que el hafnio es un elemento químico natural perfectamente estable y no raro. Su mantenida constancia a ser descubierto y aislado se debe exclusivamente a su extraordinario parecido con el zirconio.

Por ser elementos homólogos su configuración electrónica más externa es análoga. Por otra parte, el hafnio arrastra la contracción

lantánida, por lo cual los iones de ambos elementos tienen la misma carga y radios casi idénticos. Por consiguiente los dos principales factores de que dependen las propiedades químicas, configuración y radios atómico e iónico, son prácticamente iguales. Este hecho conduce a esa extraordinaria semejanza en el comportamiento químico de ambos y es la causa de la presencia constante del Hf en los minerales de Zr por lo cual se encuentra «camuflado» según la expresión de Goldschmidt.

Es tan abundante en la litosfera como el torio y su frecuencia respecto al zircornio es de 1 : 10.

Este contenido de Hf explica las anomalías encontradas por muchos investigadores al determinar el peso atómico del Zr, ya que, por la gran diferencia de masa entre ambos ( $Zr = 91,2$  y  $Hf = 178,6$ ), un 1% de Hf en el Zr es suficiente para elevar el peso atómico de este último en 0,6 unidades.

Existen sin embargo algunas diferencias en su comportamiento químico en las que están basados los procedimientos de su separación.

Las más notables son:

- a) diferencias de solubilidad en sus sales (fluorzirconatos y fluorhafniatos, oxiclорuros, fosfatos y arseniats).
- b) en la estabilidad de los complejos. En general los de Zr son más estables que los de Hf.
- c) en su basicidad. El Hf es ligeramente más básico que el Zr.
- d) en la estabilidad de algunos compuestos (sulfatos, peroxi-compuestos).
- e) en la solubilidad de complejos orgánicos. Se utiliza modernamente la distinta solubilidad de los compuestos tetracoordinados con la tenoilfluoracetona en bromuro de etileno y en benceno.
- f) de volatilidad en sus compuestos de adición con haluros y oxihaluros de fósforo, y
- g) de comportamiento en su absorción y desorción por cambiadores aniónicos y catiónicos.

Una vez conseguido su aislamiento la química de este nuevo elemento es hoy ya perfectamente conocida

ELEMENTO 85

Por su posición en la tabla periódica se le denominó eka-yodo y durante largos años siguió existiendo su laguna en dicha tabla.

El primero que pretendió haberle descubierto fué Allison, que dijo había conseguido su identificación en la arena monacítica por un método magneto óptico de dudosísima validez. Quiso bautizarlo con el nombre de *Alabama*, pero sin que perdurase ni el nombre ni la prioridad.

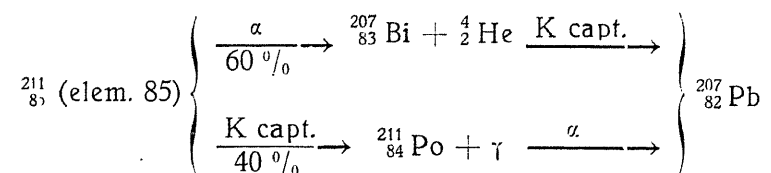
Los profesores Minder y Leigh-Smith y Minder anunciaron en 1940 y 1942 la probable formación de isotopos del elemento 85 por  $\beta$ -desintegración del Ra A y Th A, y propusieron el nombre de *Helvetio*.

Las investigadoras austriacas B. Karlik y T. Bernert han comprobado por ingeniosos ensayos que en la desintegración de los miembros A de las tres series radioactivas se originan, en reacciones secundarias, isotopos radioactivos del elemento 85.

La relación de derivación en el Ra A y Th A es solamente de 3 a 1 diez milésimas y todavía menor en el Ac A. Los pesos atómicos determinados por estudio de la desintegración  $\beta$  posterior son respectivamente 218, 216 y 215.

Corson, Mackenzie y Segré obtuvieron por primera vez en 1940, un isotopo artificial del elemento 85, bombardeando Bi-209 con partículas  $\alpha$  de 32 Mev.

La reacción transcurre probablemente así:  $^{209}_{83}\text{Bi} (\alpha, 2n) ^{211}_{85}(\text{elem. 85})$  El nuevo radioelemento tiene un período de 7,5 h. y sufre desintegración en estas dos direcciones:



Segré y sus colaboradores propusieron para este isotopo el nombre de ASTATO (At) del griego «astatos» (inestable) y análogo en inglés a los de los otros halógenos.

En posteriores estudios de desintegración nuclear con el ciclotrón de 184 pulgadas, se ha encontrado el astato-211 en el grupo de ele-

mentos pesados nacidos del bombardeo de uranio con heliones de 400 Mev.

Y Templeton y Perlman han conseguido prepararlo por bombardeo del plomo con heliones de 380 Mev., síntesis esta de gran interés pues representa un tipo de reacción poco frecuente con salto de tres lugares en la tabla periódica.

El astato constituye uno de los eslabones de la nueva serie radioactiva artificial denominada  $4n + 1$ , serie del neptunio.

Como corresponde a su posición en la tabla posee algunas propiedades químicas que le asemejan a los halógenos. Como estos es soluble en el tetracloruro de carbono, precipita su ión aunque incompletamente con el ión plata, y por la acción del calor destila con relativa facilidad. Presenta ya muy acentuado el carácter metálico que comienza a manifestarse en su homólogo anterior, el yodo, y se asemeja a su vecino el polonio. Y así le vemos precipitar por el  $\text{SH}_2$ , aún en medio fuertemente ácido. Los agentes reductores, sulfato de zinc, cloruro estannoso, etc. lo precipitan cuantitativamente (dif. Po).

Resumiendo, el astato es un halógeno pesado con características metálicas muy acusadas, pudiendo decirse con Haysinsky que «no solo es el más noble de los halógenos sino que es un verdadero metal noble».

ELEMENTO 87

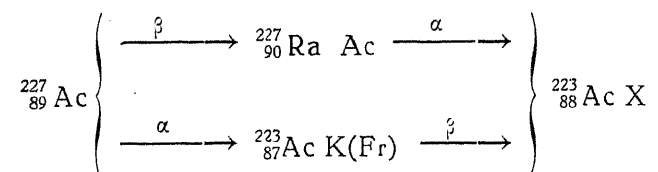
Los investigadores Meyer, Hess y Paneth, en 1914 estuvieron a punto de descubrir este elemento al observar una débil emisión de partículas  $\alpha$  junto al proceso principal de  $\beta$  desintegración del actinio-227.

Horia Hulubei quiso más tarde atribuirse su paternidad denominándolo *Moldavio*.

Pero realmente fué la investigadora francesa Mlle. Perey la que a principios de 1939, estudiando cuidadosamente la desintegración del actinio identificó con exactitud un isotopo radioactivo de masa 223 y período de 21 m., al que denominó primeramente Actinio K y al que luego bautizó con el nombre de FRANCIO (Fr), totalmente confirmado y admitido universalmente.

Al conocerse la génesis radioactiva de este elemento se comprendió la dificultad con que se tropezaba para caracterizarlo en la desintegración del actinio.

Esta, en efecto, no tiene lugar de una manera única sino que sigue simultáneamente dos caminos distintos: una  $\beta$ -emisión al Ac-223, y otra  $\alpha$ -emisión, extraordinariamente débil (1 %) y difícil de detectar, que conduce al Ac K-223 (Francio), y de éste por  $\beta$ -emisión al mismo Ac-223.



Mlle. Perey consiguió, tras una laboriosísima investigación química, aclarar este doble proceso de desintegración del actinio atribuyéndose así el descubrimiento del francio.

Además de este primer radioisotopo natural se han preparado modernamente otros cuatro isotopos artificiales de masas 218, 219, 220 y 221 de vida muy breve, el último de los cuales es miembro como el astato de la cadena de desintegración  $4n + 1$  del neptunio.

El francio es, como cabía esperar, un metal alcalino, el más electropositivo de los metales y con propiedades concordantes con el lugar ocupado.

Es coprecipitado prácticamente en su totalidad con el  $\text{Cl O}_4$  Cs,  $\text{Cl}_6$  Pt Cs<sub>2</sub>,  $\text{Cl}_5$  Bi Bs<sub>2</sub>,  $\text{Cl}_6$  Sb Ds<sub>2</sub>, así como por las sales análogas de Rb. Aunque las correspondientes sales sódicas y potásicas cristalizan en los mismos sistemas (rómbo para los percloratos y cúbico para los cloroplatinatos), estas no arrastran prácticamente el francio, lo que probablemente se debe a su gran diferencia de radios.

#### ELEMENTO 91

En el orden cronológico este fué el primer hueco que se llenó de los señalados al principio.

En efecto, en 1917 Hahn y Meitner de una parte y Soddy y Cranstoun de otra, descubrieron el elemento 91 que por ser generador del actinio, ya conocido, en su desintegración se le denominó PROTACTINIO (Pa).

No obstante, la obtención de este elemento en cantidades ponderables no tuvo lugar hasta 1927 y 1934 por A. von Grosse y por Graue y Kading respectivamente, a partir de residuos de minerales

de uranio, en los cuales se encuentra en proporción de 8 grs. de Pa por 10 de Ra.

El isotopo natural tiene un período de semidesintegración de  $3 \cdot 10^4$ a.

Irradiando torio con neutrones retardados consiguieron, en 1938, Meitner, Hahn y Strassman obtener un isotopo del 91 de masa 233. Se conocen otros isotopos de masas 226, 227, 228, 229, 230, 231, 232 y 234, todos ellos inestables.

En la pila de uranio se produce también el isotopo 233 por emisión  $\alpha$  del neptunio 237, siendo por consiguiente otro eslabón de la serie radioactiva artificial  $4n + 1$ .

En sus propiedades químicas muestra gran semejanza con sus homólogos V, Nb y Ta. Sin embargo, como podía presumirse, es notablemente más básico que ellos; el  $\text{Pa}_2\text{O}_5$  no manifiesta el carácter ácido propio de los pentóxidos de los citados homólogos. Así cuando se funde la mezcla Ta-Pa con carbonato sódico, parte al menos del Ta pasa a la solución mientras que el Pa permanece en el residuo.

El peróxido de hidrógeno precipita  $\text{Pa}_2\text{O}_5$  desde sus soluciones sulfúricas, mientras que el Ta no precipita de este modo.

El peso atómico del Pa ha sido determinado por von Grosse, encontrando el valor  $230,6 + 0,5$ . Este valor es inferior al del torio (232,1) que le sigue, representando por consiguiente esta pareja de elementos una nueva anomalía que añadir a las tres ya conocidas de Ar — K, Co — Ni y Te — I.

#### TRANSURÁNIDOS

Dijimos al hablar de la fisión, que como resultado de las experiencias de Fermi, Hahn, Strassmann y Meitner relativas al bombardeo neutrónico del uranio, se creyó haber conseguido la preparación de elementos superiores al 92. Y señalamos cómo al identificarse como elementos inferiores los realmente producidos en la ruptura del átomo de uranio, vaciló la naciente estructura de los pretendidos transuránidos, para derrumbarse íntegramente poco tiempo después.

Por el momento el sensacional proceso de la fisión acaparó de un modo absoluto la atención de los investigadores quedando en el olvido el empeño de la prolongación de la tabla.

Sin embargo las múltiples experiencias nucleares derivadas del proceso de fisión, volvieron a llevar a los nucleo-físicos a la consecución de esta vieja idea, como vamos a comprobar en las siguientes monografías dedicadas a los verdaderos transuránidos.

#### ELEMENTO 93

Ya en 1936 Hahn había descubierto una reacción que había de conducir a un isótopo del elemento 93: se trataba de la conversión del isótopo artificial del uranio -239, que al ser  $\beta$ -emisor debía formar un isótopo del 93.

Este elemento fué descubierto por primera vez por Mc. Millán y Abelson en 1940, en Estados Unidos, bombardeando uranio con neutrones acelerados a 8 Mev.

El proceso es el siguiente:  ${}_{92}^{238}\text{U} (n, \gamma) {}_{92}^{239}\text{U} \xrightarrow[\beta]{23m} {}_{93}^{239}\text{Np}$

Este isótopo del 93 es a su vez  $\beta$ -emisor, con un período de 2,3 d. y produce elemento 94 que por emisión  $\alpha$  se transforma por último en uranio. En realidad estas dos últimas reacciones no fueron por entonces conocidas pues el elemento 94 formado es muy estable (período de semidesintegración de 24.100 a.) y por tanto su intensidad de radiación muy pequeña.

Al nuevo elemento le impuso su descubridor el nombre de NEPTUNIO (Np) por analogía a la secuencia de los planetas en el sistema solar.

Se conocen otros isótopos del 93. En 1940 se descubrió el Np-238 irradiando uranio con deuterones. La reacción es:

${}_{92}^{238}\text{U} + {}_1^2\text{H} \rightarrow 2 {}_0^1\text{n} + {}_{93}^{238}\text{Np}$  que tiene un período de semidesintegración de 2 d. y se convierte en Pu-238.

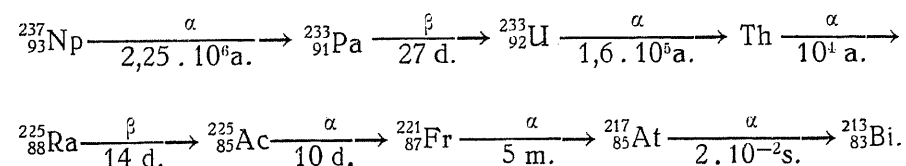
Pero el de mayor interés es el Np-237 originado en un nuevo proceso de transmutación del uranio, descubierto en 1940 por un grupo de investigadores dirigidos por Nishima. Haciendo actuar neutrones muy enérgicos sobre el U-238, éste no los asimila sino que lo despojan de otro neutrón originándose el U-237,  $\beta$ -emisor, con un período de 7 d. que debe convertirse en Np-237:  ${}_{92}^{238}\text{U} (n, 2n) {}_{92}^{237}\text{U}$ .

Sin embargo este isótopo no se identificó de un modo definitivo hasta la pila de uranio, debido a su alto período de semidesintegración,  $2,25 \cdot 10^6$  a., que le hace comportarse desde este punto de vista como un elemento normal.

Como en la pila de uranio existen neutrones de muy variada energía, antes de que estos sean frenados por el moderador, puede tener lugar la misma reacción anterior por la acción de neutrones rápidos sobre el U-238.

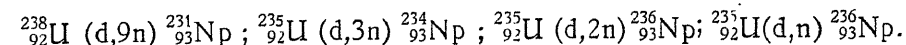
Aunque esta reacción queda muy por bajo en probabilidad de la captura de un neutrón por el U-238 para dar U-239, ha bastado para reconocer y estimar el citado isótopo de masa 237. A pesar de la corta cantidad que se forma de él en la pila de uranio, en la actualidad se ha preparado ya en cantidad suficiente para estudiar la química del Np de una manera completa.

Es un  $\alpha$ -emisor que se convierte en un isótopo de Pa de masa 233. Del Np-237 derivan numerosas especies de átomos radioactivos que han permitido construir una nueva serie radiactiva artificial:



en la que existen representantes de los elementos artificiales Fr y At como indicamos anteriormente.

Se conocen más isótopos del Np hasta un total de siete. Así, además de los anteriores, se han identificado los siguientes formados en los procesos que se indican:



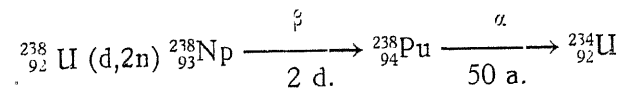
#### ELEMENTO 94

Es sin duda alguna el elemento 94 el de mayor interés entre todos estos transuránidos de que venimos ocupándonos.

Comprobada por Mc. Millan y Abelson la  $\beta$ -emisión del isótopo de 2,3 d. del neptunio, se anunció por dichos investigadores la segura obtención en este proceso de un isótopo del nuevo elemento

94. Pero a pesar de sus continuados esfuerzos no consiguieron su identificación radio-química, lo cual les hizo suponer que se trataba de un isotopo muy estable y por ende, de escasísima radioactividad.

Por ello el propio Mc. Millan, y después Seaborg y sus colaboradores, dirigieron sus trabajos hacia la preparación de un isotopo menos estable, lo que consiguieron bombardeando con deuterones acelerados a 16 Mev. un óxido de uranio:



Este isotopo del elemento 94 se transforma con un período de 50 a. en U-234, uno de los componentes del uranio natural en el que se encuentra en proporción de 0,006 %.

Las especiales características de este isotopo del 94, permitieron realizar el primer estudio, por métodos radioquímicos, del nuevo elemento.

Siguiendo un criterio análogo al sustentado para el 93, se le dió el nombre de PLUTONIO (Pu).

El conocimiento de las propiedades de este isotopo aumentó considerablemente el interés por el desconocido de masa 239, ya que por una parte por su longevidad debía comportarse como un elemento químico normal y por otra los estudios nucleo-físicos predecían que se conduciría en su desintegración por neutrones, de un modo análogo al 235, en el que en aquel momento se cifraban las esperanzas de obtención de un alto explosivo.

De aquí que se dedicaran grandes esfuerzos a su obtención en cantidades ponderables, por pequeñas que fuesen, que permitieran estudiar de una manera completa y detallada la química del nuevo elemento, no por métodos radioquímicos, sino por vía puramente química.

Irradiando centenares de kilos de uranio con los mayores ciclotrones de que se disponía en los Estados Unidos, se obtuvieron al cabo algunas décimas de miligramo de plutonio, con las que Seaborg en un maravilloso trabajo microquímico en el que utilizó pipetas de  $\frac{1}{100.000}$  de cc. microbalanzas de potencia de 0,5 mgrs. con sensibilidad del orden de  $2 \cdot 10^{-8}$  gr.. operando con micromanipuladores adecuados y casi siempre en visión microscópica, puntualizó

la química del nuevo elemento con una precisión y certeza que no alcanzamos a saber elogiar.

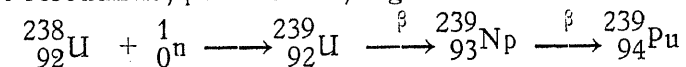
El enorme interés despertado desde el punto de vista de la química nuclear por el isotopo 239, junto al perfecto conocimiento de las características ya estudiadas de los diversos isotopos naturales del uranio, orientaron las investigaciones hacia la posible obtención de grandes cantidades de dicho isotopo.

La realización práctica de estos propósitos constituye como es sabido la presta en marcha de la pila de uranio.

De los tres isotopos del uranio natural, de masas 234, 235 y 238, que existen en proporción de 0,006 , 0,7 y 99,3 % respectivamente, el U-235 tiene una gran sección eficaz de fisión para neutrones térmicos, fisionándose, como se sabe, en núcleos de peso intermedio con liberación simultánea de neutrones.

El isotopo 238 tiene una pequeña sección eficaz de fisión para neutrones rápidos, pero en cambio la posee en gran escala para la captura por resonancia para neutrones de energía intermedia y no se escinde por los térmicos.

La acción de los moderadores en la pila rebaja la energía de gran parte de los neutrones al grado necesario para la captura con fisión del U-235, con lo que la cadena se mantiene. Otra parte importante de los neutrones quedan en el nivel conveniente para ser capturados, por resonancia, por el U-238, según la reacción:



a la cual se debe la producción de las grandes cantidades de plutonio que se obtienen en la pila de uranio.

Con los resultados prácticos obtenidos por Seaborg, coloso de la ultramicroquímica, estudió Thompson el método más adecuado para la separación del plutonio y de las cenizas de la pila; y de acuerdo con sus proyectos se instalaron las plantas industriales de Clinton y Hanford que marcharon desde el primer momento con rendimientos superiores a los previstos.

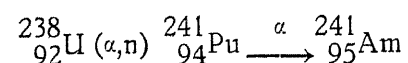
Con estas instalaciones se obtuvo plutonio a un ritmo de miles de gramos diarios y con él se preparó aquella primera bomba que ensayada en Nuevo México con el más rotundo éxito, constituyó la culminación real del gigantesco esfuerzo realizado para el aprovechamiento como alto explosivo de la energía nuclear.

Se conocen, además de los isotopos, otros de masas 232, 234, 236, 240 y 241.

ELEMENTO 95

Con el funcionamiento normal de las pilas, y resueltos casi por completo, los problemas surgidos en la fabricación de la bomba atómica, los investigadores pudieron dedicar de nuevo su atención al ensayo de reacciones nucleares sobre los elementos más pesados (que dichas pilas ponían en sus manos en cantidades manejables), tratando de identificar nuevos elementos que añadir a la tabla periódica.

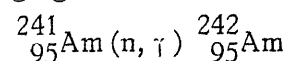
Y en efecto, Seaborg, Hamilton y sus colaboradores consiguieron en 1944, identificar el primer isótopo radioactivo del elemento 95, como producto de desintegración del Pu-241, obtenido a su vez por bombardeo del U-238 con partícula  $\alpha$  aceleradas a 40 Mev.; y por su correspondencia dentro de la serie actínida con el europio de la lan-tánida, se le dió el nombre de AMERICIO (Am).



Este isótopo Am-241 es  $\alpha$ -emisor con un período de semidesinte-gración de 500 a., transformándose en Np-239.

Como no resulta de un proceso neutrónico, no puede obtenerse en la pila de uranio, por lo que no es de esperar se llegue a producir, por ahora, en cantidades apreciables.

Se conocen otros isótopos de masas 238, 239, 240 y 242. Este últi-mo se ha logrado por agregación de neutrones al Am-241:



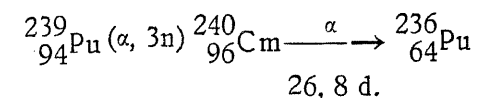
ELEMENTO 96

El Am-242, antes citado, da por emisión beta un nuevo elemento, descubierto por Seaborg y Ghiorso en 1944, y al que se ha denomina-do CURIO (Cm) dedicado a los esposos Curie por analogía al gadoli-nio, su par entre los lantánidos, dedicado al descubrirse, a Gadolin, conocido investigador de tierras raras.

Es un isótopo alfa-emisor con período de 150 d. transformándose en Pu-238.

Irradiando Pu-239 con heliones altamente acelerados, se obtiene otro isótopo del curio por un proceso nuclear poco frecuente ( $\alpha, 3n$ )

en el cual la acción de una partícula  $\alpha$  libera tres neutrones, resul-tando pues un isótopo de masa 240, que a su vez por alfa-emisión y con un período de 26,8 d., se transforma en Pu-236:



No es el curio elemento que se produce en la pila y por tanto su obtención artificial es de escasa cuantía.

ELEMENTO 97

Preparado por Seaborg y Thomson por bombardeo del Am-241 con heliones de 35 Mev. en el ciclotrón de 60 pulgadas del Laborato-rio Crocker, se le ha designado con el nombre de BERKELIO (Bk) en honor al Lab. de Berkeley de tanto rango en las investigaciones nu-clearas.

La reacción es probablemente:  ${}_{94}^{241}\text{Am} (\alpha, 2n) {}_{97}^{243}\text{Bk}$  y el isótopo obtenido tiene un período de 4,6 h. y se destruye principalmente por captura K, y en proporción de un 0,1 %, por emisión de partículas alfa.

ELEMENTO 98

Fué preparado por bombardeo del Cm-242 con heliones acelera-dos a 35 Mev. y dedicado a California. Se le ha bautizado con el nombre de CALIFORNIO (Cf).

Su formación probable es  ${}_{96}^{242}\text{Cm} (\alpha, 2n) {}_{98}^{244}\text{Cf}$  siendo un alfa-emi-sor con período de semi- desintegración de 45 m.

A pesar de haber habido algún anuncio casi oficial del descubri-miento de isótopos artificiales de los dos elementos 99 y 100, no te-nemos noticia concreta, hasta la fecha, de que este descubrimiento se haya confirmado.



Intencionadamente hemos prescindido hasta este lugar de considerar las propiedades químicas del grupo de elementos transuránidos ya que es de gran interés el tratarlas conjuntamente para poner de manifiesto sus analogías y diferencias, y en especial la variación gradual de muchas de ellas, que con otras consideraciones teóricas y experimentales conducen a la existencia de una serie «actínida» de elementos.

Las propiedades de los transuránidos son hoy en la práctica casi completamente conocidas.

Neptunio y plutonio se obtienen en la pila de uranio, y por tanto, en la cantidad necesaria para cualquier investigación química (Pu se fabrica hoy en grandes cantidades). Las propiedades químicas de ambos elementos —que por lo que se refiere a su estabilidad pueden, como ya hemos indicado, considerarse prácticamente como elementos normales— se conocen hoy con toda precisión.

El americio se ha obtenido artificialmente en cantidad suficiente para estudiar, por cuidadosos métodos microquímicos, las propiedades del elemento y sus compuestos.

Curio, berkelio y californio en fin, producidos hasta ahora solo en ínfima proporción, se han estudiado en escala de trazadores, que ha permitido no obstante conocer su conducta química fundamental.

El único transuránido que ha sido reconocido hasta ahora en la naturaleza es el plutonio, en la carnotita y en la pechblenda, en esta última en proporción de 1 en  $10^{11}$ , formado probablemente por captura de algunos neutrones libres por el U-238.

Neptunio y plutonio debieran comportarse como homólogos de Re y Os. Sin embargo, difieren profundamente de estos elementos y muestran por el contrario un sorprendente parentesco con su antecesor, el uranio. Como él, pueden formar compuestos en diversos estados de oxidación, habiéndose identificado con seguridad los III, IV, V y VI. Forman iones simples hidratados  $M^{3+}$  y  $M^{4+}$  y oxiones de los tipos  $M O_2^+$  y  $M O_2^{2+}$ , pero difieren en la estabilidad relativa de unos y otros.

El uranio forma, como es sabido, dos series importantes de sales: las de uranilo ( $U O_2^{2+}$ ) y las uranosas ( $U^{4+}$ ), las primeras notablemente más estables que las segundas. La existencia del ion  $U O_2^{2+}$  se comprueba por la misma fórmula de las sales de uranilo, por el estudio de los correspondientes espectros de vibración y por la electroquímica de sus soluciones. La reducción electrolítica de las sales de uranilo, pone también de manifiesto la existencia del ión  $U O_2^+$ , y

existen también compuestos de  $U^{3+}$ ; ambas clases de iones se oxidan muy fácilmente al aire y los compuestos correspondientes son muy inestables.

Neptunio y plutonio forman las mismas series de iones, pero la estabilidad respecto a los estados inferiores de valencia de los oxiones  $M O_2^{2+}$  decrece en el sentido  $U O_2^{2+} \rightarrow Np O_2^{2+} \rightarrow Pu O_2^{2+}$ , siendo por lo tanto en este mismo sentido más difícil la oxidación al estado exavalente: las sales uranosas se transforman fácilmente en sales de uranilo; la oxidación del  $Np^{4+}$  a  $Np O_2^{2+}$  requiere agentes oxidantes energéticos (bromato en medio ácido, persulfato, permanganato, peryodato, dicromato, etc.), y la oxidación del  $Pu^{4+}$  a  $Pu O_2^{2+}$  es aún más difícil, por lo que algunos de los agentes que oxidan al  $Np^{4+}$  no oxidan al  $Pu^{4+}$  (bromato, permanganato, dicromato). Esto es de gran importancia en la separación de estos elementos. Inversamente la reducción al estado de  $M^{4+}$  es más fácil en el sentido  $U \rightarrow Np \rightarrow Pu$ , hasta el punto de que en este último el grado de valencia más estable es el  $Pu^{4+}$ .

La estabilidad de las combinaciones trivalentes, muy precaria en U, aumenta en Np y Pu; y el ión  $Pu O_2^+$  tiene una estabilidad intermedia entre el muy inestable  $U O_2^+$  y el  $Np O_2^+$  estable en solución acuosa.

Estos hechos quedan aclarados cuando se consideran los potenciales de oxireducción:

| Sistema | U<br>(Sol. ClH/N) | Np<br>(Sol. ClH/N) | Pu<br>(Sol. ClO <sub>4</sub> H/N) | Pu<br>(Sol. ClH/N) |
|---------|-------------------|--------------------|-----------------------------------|--------------------|
| III/IV  | + 0,63            | — 0,14             | — 0,96                            | — 0,97             |
| IV/V    | — 0,55            | — 0,74             | — 1,20                            | — 1,13             |
| V/VI    | — 0,06            | — 1,14             | — 0,93                            | — 0,91             |
| IV/VI   | — 0,34            | — 0,94             | — 1,01                            |                    |

En sus estados inferiores de oxidación, Np y Pu se asemejan a las tierras raras y son coprecipitados por  $F_3La$  en presencia de un reductor.

Se conocen en la actualidad un gran número de compuestos de estos elementos: haluros, oxihaluros, haluros complejos, óxidos, sulfuros, hidruros, carburos, nitruros, etc... que omitimos detallar en razón de la brevedad, así como numerosas sales de neptunilo y plutonilo, isomorfas con los correspondientes compuestos de uranio.

Se poseen menos detalles de la química del americio y curio. El Am se ha obtenido en cantidad de microgramos al estado de  $\text{Am}(\text{OH})_3$ . Su estado de oxidación más estable en solución acuosa es el  $\text{Am}^{3+}$ , en el cual se asemeja mucho a los lantánidos. Su oxidación a estados superiores es muy difícil, pero se realiza con  $\text{S}_2\text{O}_8(\text{NH}_4)_2$  en  $\text{NO}_3\text{H}/0,2$  M. formándose iones  $\text{AmO}_2^{2+}$ . En solución acuosa existe también el ión  $\text{AmO}_2^+$  de Am pentavalente y la amalgama de sodio reduce las disoluciones de  $\text{Am}^{3+}$  a  $\text{Am}^{2+}$ . Se conocen numerosos compuestos de  $\text{Am}^{3+}$ , isomorfos en su mayor parte con los de La; óxidos  $\text{AmO}$  y  $\text{AmO}_2$  y un acetato de  $\text{AmO}_2^+$  y Na isomorfo con el análogo de uranio.

El curio se ha obtenido hasta ahora solo al estado de compuestos trivalentes y no es afectado por los reactivos que oxidan o reducen al Am.

Berkelio y californio se han podido separar del Am y Cm (de los que se obtienen, como ya indicamos, por bombardeo con partículas  $\alpha$ ) por cambio iónico sobre una resina Dowex 50. Las diferencias entre Bk-Cm-Am en radio iónico y estabilidad de complejos cítricos, permite la separación del Bk a la cabeza de la triada en la desorción con solución de citrato amónico de pH 3,5 a 87°. Un procedimiento análogo permite la separación del Cf. Estos resultados serán comentados más adelante.

El californio se ha identificado hasta ahora solo como elemento trivalente. El berkelio por el contrario se ha podido oxidar por dicromato y permanganato en medio nítrico a  $\text{Bk}^{4+}$ .

Los hechos indicados han tenido una gran trascendencia desde el punto de vista teórico y han servido para resucitar la hipótesis de Bohr de que en la ordenación periódica podría surgir, tal vez a la altura del uranio, una serie de elementos análogos a las tierras raras.

Al pasar del actinio al torio y siguientes, caben dos posibilidades en cuanto a la distribución electrónica:

1.<sup>a</sup> La entrada de los nuevos electrones en el subnivel  $6d$ , con lo que Ac, Th, Pa, U. etc... formarían una cuarta serie de elementos de transición.

2.<sup>a</sup> Que los nuevos electrones entren a llenar el subnivel  $5f$ , como se llena el  $4f$  en los lantánidos. Resultaría así una serie de elementos muy semejantes entre sí, cuyas configuraciones electrónicas serían:

|            |        |                |          |
|------------|--------|----------------|----------|
| Ac . . . . | $5f^0$ | , $6s^2p^6d^1$ | , $7s^2$ |
| Th . . . . | $5f^1$ | »              | »        |
| Pa . . . . | $5f^2$ | »              | »        |
| U . . . .  | $5f^3$ | »              | »        |
| Np . . . . | $5f^4$ | »              | »        |
| Pu . . . . | $5f^6$ | »              | »        |
| Am . . . . | $5f^6$ | »              | »        |
| Cm . . . . | $5f^7$ | »              | »        |
| Bk . . . . | $5f^8$ | »              | »        |
| Cf . . . . | $5f^9$ | »              | »        |

Esta cuestión ha sido ampliamente discutida por Seaborg que sitúa en el Ac el comienzo de la serie y la denomina «serie actínida». Con esta concepción están de acuerdo las siguientes propiedades de estos elementos, algunas de las cuales hemos expuesto anteriormente:

a) Estabilidad creciente de los estados inferiores de valencia, acentuada en los últimos elementos que prácticamente solo muestran valencia 3. En estos estados inferiores de oxidación se asemejan a los lantánidos.

b) Existencia de una contracción en los radios iónicos semejante a la de la serie lantánida, pero de mayor importancia todavía.

Este hecho introduce diferencias apreciables en basicidad y poder de formación de complejos, que se ponen de manifiesto en procesos de cambio iónico. La diferencia en las velocidades de desorción con soluciones cítricas es aún mayor que en los lantánidos, como era de esperar.

c) De acuerdo con la hipótesis actínida, el Am, como el Eu en la serie lantánida, puede reducirse al estado divalente. El Bk correspondiente al Tb, debe presentar análogamente la contracción anómala de radios que presenta este elemento. Así se ha comprobado efectivamente al examinar las curvas de desorción de las triadas Tb — Gd — Eu y Bk — Cm — Am: la separación anormalmente grande del Tb respecto a Gd — Eu, la presenta aún más acentuada el Bk respecto al Cm — Am.

d) El Tb, primer elemento más allá del Gd, puede oxidarse a  $\text{Tb}^{4+}$  en forma de  $\text{TbO}_2$  sólido. Se predijo que el  $\text{Bk}^{3+}$  se podría oxidar análogamente incluso en solución acuosa, lo cual se confirmó brillantemente como ya hemos indicado.

e) Finalmente están de acuerdo con la hipótesis actínida la se-

mejanza entre U y siguientes, en especial Np y Pu, la creciente dificultad en la oxidación a estados elevados de valencia al aumentar el número atómico y los datos experimentales de susceptibilidades magnéticas de los iones del Pu en solución acuosa.

La hipótesis actínida ha sido sin embargo severamente impugnada, ya en cuanto al comienzo de la serie, ya respecto a la existencia de la serie misma.

Mac Millan y Abelson señalan al uranio como primer elemento de la serie, pudiendo, según ellos, hablarse de un grupo de uránidos.

Goldschmidt y Ephraim, basándose en analogías espectroanalíticas, hacían comenzar la serie en el Th.

Los principales ataques a la existencia de la serie actínida se han formulado a propósito de las propiedades químicas de sus primeros elementos Ac, Th, Pa y U, en especial de los tres últimos.

La química del Ac se ha conocido con precisión solo en fecha muy reciente. El elemento es siempre trivalente y sus compuestos son en general isomorfos con los de La. Las características químicas y cristalquímicas de sus compuestos encajan hoy muy bien en la idea de que encabeza la serie actínida.

No está tan clara la cuestión en el Th y Pa que se comportan en lo esencial como homólogos del Zr y Hf el primero, y del Ta el segundo. El Th es fundamentalmente tetravalente; sus compuestos son isomorfos con los de Zr y Hf, y aunque en fecha reciente se han aislado combinaciones de  $\text{Th}^{3+}$ , y  $\text{Th}^{2+}$  éstas se asemejan a las análogas de Zr y Hf y no a las de las tierras raras. El único dato que encaja en la hipótesis actínida es su tetravalencia, semejante a la del Ce su homólogo lantánido. El Pa funciona como pentavalente y su comportamiento químico desentona en la serie actínida.

También la variabilidad en la valencia del U sería más propia de un miembro de una serie de transición donde se estuviera llenando el subnivel  $6d$  que de un actínido. Sin embargo los compuestos de  $\text{U}^{3+}$  muy reductores serían ya característicos de la configuración  $6d^1, 7s^2$  actínida.

Estas dificultades disminuyen notablemente al pasar al Np y Pu, en los que como hemos indicado anteriormente se acentúa la estabilidad de los estados inferiores de valencia; y desaparecen totalmente en el Am y siguientes que se comportan francamente como miembros de dicha serie actínida.

El conocimiento cada vez más preciso de la química de estos transuránidos pesados ha dado tanta solidez a la hipótesis actínida, que hoy ésta se admite de un modo casi general.

Por otra parte, como el propio Seaborg indica, el comportamiento de los elementos Th al U, no es incompatible con la existencia de una configuración actínida, ya que la diferencia de energía entre los electrones  $5f$  y  $6d$  es escasa y muy fácilmente pueden ocurrir transiciones o resonancias.

En definitiva, las razones de más peso y las pruebas experimentales más numerosas y brillantes están hoy a favor de la existencia de una serie de elementos actínidos que comienza en el Ac y cuyo último término conocido es, por ahora, el elemento 98, californio.

Y para finalizar nuestro trabajo, echemos una ojeada a la primitiva tabla periódica de Mendelejeff, modificada por el exacto criterio de Moseley, en la que han venido encajando perfectamente cada uno de los nuevos elementos, descubiertos, como ya hemos indicado anteriormente, gracias al establecimiento de las ideas cristalquímicas y geoquímicas y al enorme progreso de las técnicas de trabajo en el apasionante campo de la física nuclear.

Todas las lagunas antaño existentes, han desaparecido y los elementos transuránidos han venido a prolongar la tabla sin que por el momento nos atrevamos a afirmar cual ha de ser su último término. Sin embargo, por el estado actual del conocimiento de la estabilidad nuclear no creemos aventurado asegurar que estamos muy cerca de su probable fin.

Señalemos también que el gran progreso que ha conducido al descubrimiento de los nuevos elementos químicos no representa tan solo un éxito de índole puramente científico. La técnica aprovecha estas nuevas enseñanzas y la fabricación artificial de elementos desconocidos hace escasos años, es hoy una realidad.

La vieja idea de la transmutación de unos elementos en otros, no es ya el utópico objetivo que escapaba un día y otro de las manos temblorosas de aquellos magos subterráneos. Hoy el hombre de un modo consciente dirige la transformación de los átomos, al menos en un buen número de ocasiones.

Pero el balance de la situación actual parangonada con la de aquellos viejos tiempos, no deja de ser bien amarga. Los alquimistas perseguían en sus pretendidas transmutaciones la posesión de la riqueza y el bienestar. Los nucleofísicos, por el momento, solo han

conseguido como resultado práctico de sus desvelos, la destrucción y la muerte.

Confiemos no obstante, en que en un futuro próximo, sea también realidad el tan anunciado aprovechamiento de la energía nuclear en bien de la Humanidad.

HE DICHO.