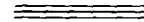


13/1

MEMORIAS
DEL
INSTITUTO GEOLÓGICO Y MINERO
DE
ESPAÑA

URANIO

CURSO DE CONFERENCIAS



MADRID
TIP.-LIT. COULLAUT
MARIA DE MOLINA, 58
1946

El Instituto Geológico y Minero de España hace presente que las opiniones y hechos consignados en sus Publicaciones son de la exclusiva responsabilidad de los autores de los trabajos.

PROLOGO

La importancia de los problemas candentes acerca de la energía que se puede obtener de los minerales de uranio y otros radiactivos, no debía pasar inadvertida a los que nos ocupamos de aumentar y conservar nuestro tesoro mineral, una de las funciones más importantes del Instituto Geológico y Minero de España. Comprendimos la necesidad no sólo de catalogar y examinar todos los yacimientos de minerales radiactivos, sino también de recoger todas las observaciones y enseñanzas que acerca de las cualidades de dichos minerales se van haciendo, para llegar a conocer las existencias y cualidades en España de las primeras materias, de donde—se vislumbra y hasta se palpa—ha de crearse una gran fuente de energía que ha de revolucionar, con el tiempo, toda la industria. No hay más que la investigación científica para poder seguir las palpitaciones de la ciencia y poder acomodar a nuestro país los progresos que, dentro y fuera, se hayan en tan interesante materia.

El caso actual de la bomba atómica, que no es sino un proceso de laboratorio convertido en industrial, sin las limitaciones económicas que las marchas industriales requieren, demuestra, una vez más, el mágico poder de la investigación científica, que todo lo domina y lo subvierte.

Pasada esta primera etapa de aplicación destructora, y amortiguadas las naturales pasiones que la guerra ha suscitado, es de esperar que el espíritu humano—tal vez ahora más retrasado, psicológicamente, que la propia investigación atómica—avanzará hasta ponerse en vanguardia de los sentimientos elevados que deben regirle, preocupándose más de la especie que del individuo, y de análoga manera que la pólvora, la dinamita y cuantas liberaciones rápidas de energía la ciencia ha descubierto, llevaron en sus primeros tiempos el estigma de una simplista aplicación, que fué trocada en otra bienhechora y utilitaria, también la desintegración atómica será utilizada como fuente de beneficios en la paz, tal como España desea y proclama con las más sinceras y unánimes palabras.

No es nada fácil para los estudiosos penetrar en secretos que se guardan en el misterio; pero nos parece que debe estar admitido, para quienes han seguido la corriente mundial de la investigación, realizar conjeturas y formular hipótesis, que tal vez se aproximen algo a la realidad, aunque no sea más que simplemente, para analizar los medios de que puede disponer nuestro país y saciar la curiosidad del espíritu, toda vez que la verdadera investigación atómica se halla actualmente reservada, por razones económicas de producción, a los colosos del mundo. Sabido es que incluso alguno de ellos no ha podido contribuir a la fabricación de las bombas atómicas más que con el concurso de sus ilustres hombres de ciencia.

Nuestra ocupación en el laboratorio es, por consiguiente, mucho más modesta. Nos interesan los criaderos de uranio, toda vez que España, siguiendo el ejemplo de muchos países, había optado por importar el radio que requería para sus clínicas y hospitales y porque el descubrimiento de la radiactividad artificial había llegado a desva-

lorizar los minerales uraníferos. Pero cuando el mundo comenzó a preocuparse de las existencias de uranio, nuestro país no había de constituir una excepción, y por ello, con bastante anterioridad a que estallase la primera bomba atómica, nos pareció oportuno que se creara en este Centro una Comisión integrada por Ingenieros del mismo, para que realizasen los estudios concernientes a nuestros criaderos, de análoga manera a como los viene realizando con los demás metales y con otras substancias útiles al hombre.

Esta Comisión interna del Instituto, que continúa actualmente sus trabajos, se halla constituída, bajo la presidencia del Jefe del Laboratorio Sr. Romero Ortiz de Villacián, por los Sres. Ingenieros Moya, Meseguer, Comba, López de Azcona y Abbad, y el Ayudante Facultativo Sr. Melián. En sus primeras actuaciones, fué invitada por el ilustre Presidente de la Asociación de Ingenieros de Minas y Profesor de Geología y Criaderos Minerales de la Escuela de Ingenieros de Minas, D. Pedro de Novo, para desarrollar un curso de conferencias en la Asociación, con objeto de orientar a los compañeros que siguen una vida profesional desviada de estas cuestiones y, en general, a cuantas personas pudieran mostrar interés por ellas. Esto requería que el curso tuviese un carácter de divulgación de los conocimientos que poseían o que iban adquiriendo los miembros de la Comisión. Cada conferenciante eligió su tema dentro de la especialización que, preferentemente, cultiva en el Instituto, y de aquí que se pronunciaran en primer término las de exposición de criterios y métodos científicos, y en último lugar las de carácter industrial relacionadas con los criaderos. El Sr. Romero Ortiz prefirió quedar intercalado entre sus compañeros, sirviendo de lazo de unión entre los temas físicos y los mineros, a pronunciar un resumen final del curso, con objeto de que éste

quedase abierto para que pudieran acudir a aquella tribuna del Instituto de Ingenieros Civiles cuantas personalidades, sea cual fuere su profesión, quisieran aportar nuevas luces a los temas tratados. Pero, de hecho, el curso quedó cerrado, y aun cuando la prensa informó a los lectores con extractos y entrevistas, parece oportuno reunir estos trabajos en un volumen, que es el que me complazco en presentar al lector con estas líneas, constituyendo una Memoria de las que publica el Instituto cuando juzga interesante un tema determinado.

Para quien, como yo, comparte cotidianamente con los autores sus inquietudes y desvelos, prologar una obra de esta naturaleza, en la que se presentan aspectos diversos de las disciplinas que en este Centro se cultivan, ha de ser motivo de permisible satisfacción, que se renueva al observar la armonía que dichos Ingenieros han guardado en sus conferencias. Dentro de la unidad temática del uranio han sido tratados diversamente los varios aspectos científicos e industriales que la cuestión suscita, conservando cada autor su propia individualidad, pero sacrificando a veces sus propios conocimientos para no romper la unidad de exposición, por lo que me atrevo a decir que a cada uno corresponde el éxito de procurar el éxito de los demás. Si lo lograron o no es cosa que, desde el momento de pronunciarse las conferencias, entraron de lleno en el terreno de la crítica científica, pues aparte de la labor divulgadora y, por consiguiente, sancionada, no faltan algunas opiniones propias y originales que dan matices personales a la labor de conjunto. Justo es decir que tal crítica les ha sido favorable.

El lector encontrará en la conferencia de López de Azcona, Jefe de los Laboratorios de Espectroscopia y Radiactividad, cuanto puede exponerse en el limitado marco de

una conferencia acerca de la síntesis y desintegración nuclear, como de la medida de tiempo, que tan seductoras aplicaciones presenta en el campo de la geología, y sobre las manifestaciones energéticas a base de la materia equivalente, como consecuencia de los fenómenos radiactivos naturales y provocados. El estudio de las transformaciones radiactivas ha requerido delicados métodos experimentales, cuya exposición es el tema de la conferencia de Abbad, Jefe del Laboratorio de Rayos X, abordando, como es lógico, el de la propia transformación nuclear y los agentes capaces de producirla. Romero Ortiz expone sus puntos de vista originales, razonándolos y defendiéndolos, acerca de la génesis de los criaderos de uranio, teniendo en cuenta los conocimientos actuales de física-química y física-atómica, tema que aún no había sido tratado en la literatura metalogénica, y cuando pudiera dar por terminada su conferencia, sale en defensa de la geología y de ella extrae el concepto filosófico que lleva en sí toda ciencia, esa filosofía natural de continuo renovada por la investigación, pero jamás revolucionada, porque cuanto más nos acercamos al conocimiento íntimo de la materia, más claramente vemos que el mundo, como se ha dicho, está escrito en caracteres matemáticos, incompatibles con la torpeza y la ceguera de una fuerza irresponsable.

La mineralogía del uranio es tratada por Comba con gran amplitud. Enumera 108 minerales, y sus descripciones y anotaciones acerca de los de mayor rendimiento industrial es labor digna de encomio. Considera el aspecto técnico-económico de esta minería, y al hacer el recuento de las reservas mundiales de uranio metal, coincidiendo con la opinión de otros ilustres Ingenieros de Minas, cita a España en quinto lugar. La metodología industrial, la metalurgia y las aplicaciones, así como la política

comercial del uranio, sirven de remate a su conferencia.

Moya presenta una verdadera información de temas científicos e industriales. Habla de la obtención del plutonio; pasa revista a los minerales uraníferos expuestos en el Museo de Ciencias Naturales y en el de nuestro Instituto, señalando la existencia de la carnotita y de la plumbogummita en la provincia de Almería. Describe los criaderos extranjeros y españoles, observando la existencia del de génesis secundaria en Montanuy y su posible analogía con los de carnotita de los Estados Unidos.

Ningún aspecto del complejo y difícil tema del uranio ha quedado sin tratar en este curso, por lo cual le consideramos completo. Ello nos permite esperar que esta nueva publicación del Instituto sea bien recibida por la opinión científica a la que va dedicada.

Es lógico que nunca de primeras, por claro que sea un entendimiento, puede enfocar una idea con toda precisión, pero es posible que si el lector quiere internarse en este mundo infinito del átomo, y hasta si pretende perforar el porvenir, las notas y observaciones que se dan en este libro le hayan servido aunque no sea más que para tomar afición a estos estudios y para iniciar el camino que han de seguir para llegar a la entraña de la materia.

Ciencia joven, del 1896, de donde parte el primer descubrimiento de Becquerel sobre la radiactividad en los compuestos del uranio, hasta los momentos actuales de la desintegración del átomo, pasando por los estudios de los esposos Curie, Bohr y Rutherford, ¡cuánto se ha avanzado en esta ciencia! El mundo se llena de laboratorios para enfrentarse con estos grandes problemas de la Naturaleza. El Instituto Geológico observa y se asombra,

y en la modestia de sus fuerzas trata de aportar un pequeño grano de arena para la divulgación de la gran ciencia de la radiactividad, que esperamos ha de constituir, en el progreso de la humanidad, una era como la de la máquina de vapor y la de la electricidad.

Agustín Marín.

**SINTESIS Y DESINTEGRACION
NUCLEAR DE LOS ATOMOS Y LA
MEDIDA DE TIEMPOS**

POR

JUAN MANUEL LOPEZ DE AZCONA

**CONFERENCIA PRONUNCIADA EN EL INSTITUTO DE INGENIEROS
CIVILES EL 18 DE DICIEMBRE DE 1945**

RESUMEN

Pretendemos dar a conocer en esta conferencia el estado actual del problema del aprovechamiento de la energía atómica, desde el doble punto de vista científico e industrial. Incidentalmente se trata de la inmutabilidad de los métodos radiactivos de medidas de edades a pesar de los fenómenos conocidos de desintegración. Se trata a continuación del proceso formativo de los diversos elementos, fijando la distancia en tiempo a nuestros días. Como conclusión se establece la esperanza de que las desintegraciones de los elementos pesados sean las fuentes de la energía de hoy y las síntesis de los más ligeros las del mañana.

LOS ATOMOS

Su constitución

Se admite hoy que el átomo está formado por un pequeño núcleo pesado, cargado siempre positivamente, al que rodea una atmósfera eléctrica negativa constituida por tantos electrones como cargas eléctricas tiene el núcleo.

El núcleo del átomo, al que están asociados el peso y las propiedades radiactivas, está constituido únicamente por dos clases de partículas indivisibles: protones y neutrones, que giran alrededor de sí mismos con el mismo momento de giro, denominado «spin», análogo a los del electrón y positón, y de valor $1/2$. Los protones, cuyo nombre fué propuesto por Ernesto Rutherford en 1920, son los elementos positivos del núcleo, en los cuales reside la masa fundamental del átomo, análogos a los átomos de hidrógeno ionizado. En ellos la carga eléctrica es una y positiva; la masa en unidades másicas vale 1,007581, o en peso $1,6725 \cdot 10^{-24}$ gramos y son análogos a los átomos de hidrógeno ionizados. Los neutrones, que los suponían como la asociación de un protón y un negatón, por dar lugar a estas partículas al desintegrarse, fueron descubiertos en 1932 por Chadwick; no tienen carga alguna y su masa

es 1,00895. Estas dos clases de partículas, protón y neutrón, están ordenadas y agrupadas en el núcleo de los átomos, donde forman partículas alfa, deutones y neutrones. Las partículas alfa están integradas por dos protones y dos neutrones; su masa vale cuatro y tienen dos cargas positivas. Los deutones los forman un protón y un neutrón; su masa vale dos y tienen una carga positiva.

La dificultad aparente que esta constitución del núcleo presenta para las emisiones β , se aclara al suponer que los electrones son originados en los núcleos en el momento de la emisión. La masa del electrón es 0,0005486, o en peso $9,106 \cdot 10^{-28}$ g.; la relación a la del protón 1/1837.

Su desintegración

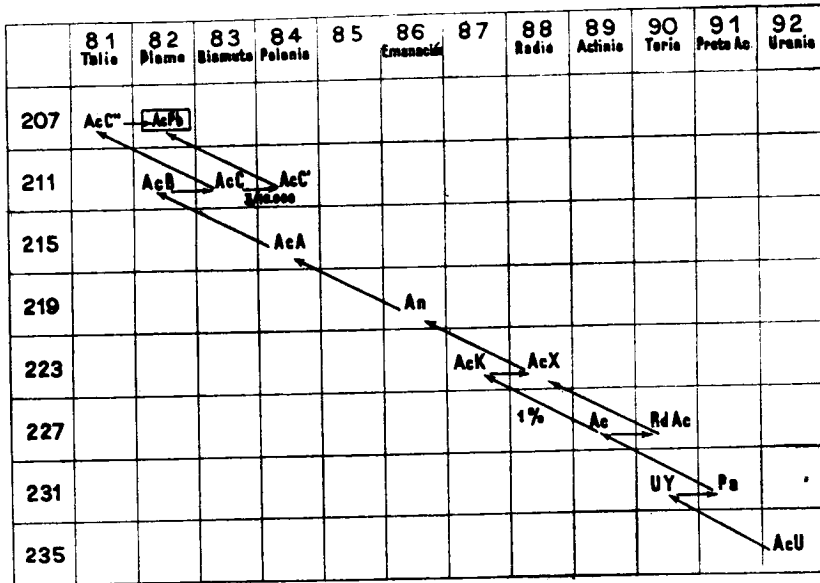
Gracias a los progresos de la física nuclear, se ha comprobado la existencia de dos tipos de desintegraciones, según sean espontáneas o provocadas, a las que se asigna los calificativos de natural y artificial; la primera siempre da núcleos de elementos cercanos en la tabla periódica; el mismo, por emisión de un neutrón; el siguiente, cuando se produjo por emisión β , o dos anteriores si lo fué por α , mientras que la radiactividad artificial puede originar elementos cercanos o lejanos del que se desintegra.

La desintegración natural.—En los últimos años del siglo pasado, quedó de manifiesto la desintegración natural de los átomos, al comprobar que algunos emiten partículas atómicas; los estudios que se hicieron con tal motivo dieron lugar a una nueva rama de la ciencia.

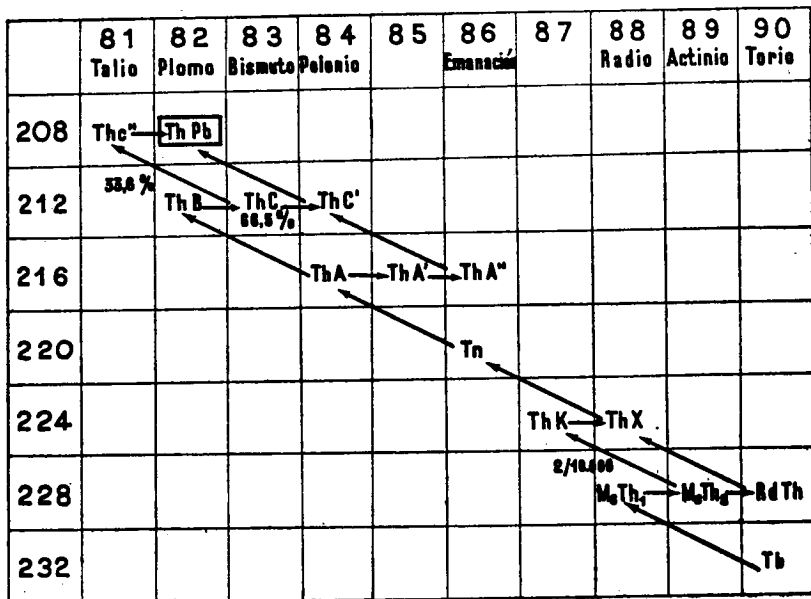
También se comprobó, años después, que hay cuerpos que tienen radiactividades α , β y γ ; el número de los que tienen actividad α conocida es 29, y el mismo los de β ; algunos la tienen doble, como Ra C, Ra A, Ac C, Th C, Th A, Ac y Ms Th₂; todos se agrupan en ocho familias, que por orden de la masa del elemento originario son: uranio y radio, actinio, torio, lutecio¹⁷⁶, samario¹⁴⁸, cesio¹³², rubidio⁸⁷ y potasio⁴⁰. Debemos observar que el elemento de emisión α de número másico inferior es el Sm¹⁴⁸. Reproducimos los cuadros representativos de las tres familias radiactivas largas.

	81 Talio	82 Plomo	83 Bismuto	84 Polonio	85	86 Emisión	87	88 Radio	89 Actinio	90 Torio	91 ProtoAc	92 Uranio
206		Ra Pb										
210	Ra C''	Ra D	Ra E	Ra F								
214	^{3/1000} Ra C'	Ra B	Ra C	Ra C'								
218				Ra A	Ra A'	Ra A''						
222						Rn						
226							Ra					
230									Th			
234										UX ₁	UX ₂	UII
238												UI

Familia del uranio y del radio.



Familia del actinouranio.



Familia del torio.

Esta desintegración obedece a leyes perfectamente conocidas, así como el número de átomos de cada elemento que evolucionan en un momento determinado. Queda un punto por aclarar: el correspondiente a qué átomos, de los muchos de cada elemento, son los que deben emitir en el instante que consideramos, o en los elementos de doble emisión atómica, cuáles emiten partículas α y cuáles β . Al evolucionar los átomos de un elemento, disminuye el número de éstos, como ocurre con los cabeza de familia radiactiva; pero si el átomo que consideramos es radiogénico, coexiste con su antecesor, y ambos están en equilibrio radiactivo; los átomos que desaparecen son continuamente reemplazados por otros que se forman simultáneamente.

Un ejemplo de producción natural de átomos lo tenemos en las ampollas de vidrio que encierran sales de radio. Al evolucionar este elemento hacia el plomo, lo hace con emisión de heliones; algunas veces, los átomos de helio generado llegan a causar, dentro de la ampolla, una presión suficiente para romperla; en este proceso hemos tenido un aumento de cinco átomos por cada cinco de radio 226 que sufrió la desintegración completa, produciendo al año cada gramo de radio, y a la presión ordinaria, 125 mm.⁸ de helio.

Al evolucionar los átomos de un elemento, disminuye el número de éstos, como ocurre con los cabeza de familia radiactiva; pero si el átomo que consideramos es radiogénico, y si, además, coexiste con su antecesor y ambos están en equilibrio radiactivo, los átomos que desaparecen son continuamente reemplazados por otros. El primer caso corresponde a una población en la que hubiese fallecimientos continuos; el segundo, a la que tuviera fallecimientos y nacimientos en número análogo. La primera po-

blación se quedaría deshabitada; la segunda se mantendría invariable en su estadística total.

Vemos inmediatamente, de acuerdo con el símil anterior, dos importantes consecuencias geoquímicas. El número de átomos de U, AcU, Th, Lu¹⁷⁶, Sm¹⁴⁸, Cs¹³², Rb⁸⁷ y K⁴⁰ disminuyen incesantemente, dándose entre éstos el caso de que el Cs¹³² prácticamente ha desaparecido, pues con los espectrógrafos de masa que se dispone, a pesar de su gran sensibilidad no ponen de manifiesto este isótopo en los minerales de cesio. La otra consecuencia geoquímica es el aumento ininterrumpido de los elementos finales de familia Ra Pb, Ac Pb, Th Pb, Hf¹⁷⁶, Sm¹⁴⁴, Ba¹³² (el de este último aparentemente ya cesó), Sr⁸⁷ y Ca⁴⁰, así como el de gas helio, éste con mayor rapidez que la de los otros elementos.

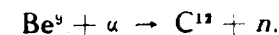
La desintegración artificial. — Además de la desintegración que hemos denominado natural, sobre la que no podemos actuar con los medios de que disponemos en la actualidad, pues no conseguimos ni acelerarla ni retardarla, existe otra sobre la que podemos actuar a nuestro placer: es la denominada desintegración artificial, que no fué conseguida por los investigadores de los siglos pasados, por disponer únicamente de reacciones térmicas vulgares; de ella se tienen pruebas palpables desde los experimentos de Rutherford, de 1919, que demostraron ser una realidad los sueños de los antiguos alquimistas.

Los fenómenos de desintegración son nucleares; para lograrla artificialmente hemos de alcanzar el núcleo; esto se puede conseguir de dos maneras: una por el impacto de partículas de gran velocidad, que hoy se consiguen fácilmente; la otra, que sólo se sospecha, pues de momento no

hay medio de obtenerla, es por la elevación de temperatura a decenas de millones de grados.

La desintegración artificial queda reducida a deducir las condiciones de los proyectiles adecuados para atravesar la protección electrónica del núcleo, y a estudiar la manera de conseguirlos. En los proyectiles hay tres condiciones sobre las que se debe actuar; estas son: velocidad, masa y carga eléctrica. Las partículas atómicas que se consideran como proyectiles tienen, por lo general, velocidades superiores a los 10.000 km/s.; la de los neutrones lentos suele ser de 1,5 km/s. y, como su energía cinética es proporcionada al cuadrado de la velocidad ($1/2 mv.^2$), alcanza valores elevadísimos. Las masas de las partículas atómicas que se utilizan como proyectiles son 4, 2 y 1, según que se trate de partículas α , deutones, protones y neutrones. Las cargas de los proyectiles que empleamos en la desintegración son 2, 1 y 0, respectivamente. También se consiguen reacciones nucleares por la acción de las partículas β e incluso de las radiaciones γ .

La manera de conseguir los proyectiles atómicos puede ser natural o artificial. La primera la logramos, por ejemplo, con una partícula α de radio, como en el caso de un supuesto cebo de las pilas de uranio; esta partícula hiere a un átomo de berilio y da lugar a la formación de un átomo de carbono y un neutrón libre, partícula que es un nuevo proyectil.



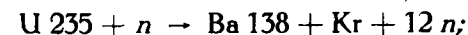
El número de proyectiles que se obtienen por estos métodos naturales es muy pequeño; debemos ingeniarnos la manera de elevarlo. Esto se consigue con el empleo del gas radón en lugar del radio, que, para igual número de átomos, el de disparos queda aumentado en 200.000, dis-

poniendo en el mismo preparado de elementos tan activos como emanación y polonio.

Los proyectiles obtenidos por métodos naturales, como es el caso de los neutrones conseguidos por la reacción Be y partículas α , deben acondicionarse para que atraviesen fácilmente la barrera electrónica del uranio y sea más eficaz su actuación; deben ser frenados, lo que se consigue con retardadores como el agua pesada, helio, berilio, carbono, este último de gran aplicación en las centrales de energía nuclear.

Supongamos que llegó un neutrón al núcleo del átomo de uranio; éste puede dar lugar a tres procesos diferentes, sobre los que vamos a razonar. El impacto del neutrón puede acelerar la desintegración natural de la familia radiactiva, lo que no se ha comprobado, aparte de la pregunta inmediata, caso de ser cierto, de ¿adónde va el neutrón? El otro efecto producido por el neutrón podía ser la obtención de trasuránicos isobaros, como lo consiguió Fermi en 1934, y que actualmente se produce en plan industrial a partir del uranio 238, obteniéndose el plutonio, que puede tener, según la teoría de Bohr-Wheeler, una excisión comparable a la del U 235. Por último, el neutrón lento puede dar lugar a la excisión del átomo de uranio en elementos ligeros; suposición hecha hace años por Soddy y plenamente admitida desde que Hahn y Strassmann, comprobaron la existencia de cripton y bario después de haber tenido lugar estas reacciones, a las que acompañaba el desprendimiento de elevada cantidad de energía procedente de la diferencia de masas entre los elementos que originan la excisión y los resultantes.

La reacción de U 235 con el neutrón lento puede dar lugar, como productos finales:



estos productos no se obtienen directamente, ya que la reacción inmediata es a base de otros isótopos de Ba y Kr inestables, que emiten los neutrones antes indicados, como proceso previo y rapidísimo para llegar a los estables consignados en la ecuación.

De los neutrones liberados, si suponemos exageradamente 4 el factor de multiplicidad, cuatro actúan sobre otros tantos átomos de U 235, dando lugar a cuatro reacciones, las que dejan en libertad, para actuar nuevamente, a 16 neutrones, y así sucesivamente, produciendo una reacción de las denominadas de cadena. Los ocho neutrones restantes de la primera reacción transforman su energía cinética en equivalente y se manifiesta por desprendimiento de calor y otros efectos mecánicos.

La reacción nuclear se debe encauzar y estabilizar con el objeto de que todos los neutrones sean utilizados en nuevas excisiones atómicas; esto se consigue con dos condiciones simultáneas: una masa considerable de uranio 235 y el empleo de retardadores. Si la masa de uranio está considerablemente enriquecida en uranio 235, y es de suficientes dimensiones, puede llegar un momento en que la casi totalidad de los neutrones reaccionen con un átomo de uranio 235, dando lugar a una reacción acelerada, adquiriendo caracteres imponentes el desarrollo de la reacción en cadena. Por lo tanto, como seguridad para que ésta no se inicie espontáneamente y sea moderada, es decir, tenga factor de multiplicidad superior a uno, deberemos poner un límite al volumen; estas dimensiones críticas se determinan teóricamente para cada concentración de uranio 235. Se tiene que recurrir a intercalar moderadores en las masas reaccionantes, cuando el volumen es

grande o se quiera frenar o amortiguar la reacción; estos suelen ser el cadmio y el boro; unas décimas de milímetro de cadmio metálico son suficientes para detener los neutrones térmicos.

La existencia de átomos de uranio 238 entre los de uranio 235 tiene el inconveniente de que cada neutrón que dé un átomo de aquéllos interrumpe la correspondiente cadena, aunque si el neutrón es rápido puede dar lugar, por emisión de dos partículas β y una α al U^{235} , pasando por el U^{239} , N_p^{239} y P_u^{239} , de acuerdo con el cuadro adjunto.

	92 Uranio	93 Neptunio	94 Plutonio
235	Ac U		
238	U I		
239	U $\xrightarrow{239}$	N_p^{239} $\xrightarrow{239}$	P_u^{239}

Paso del UI al Ac U, por la acción de un neutrón.

Vemos la importancia que tiene para un buen factor de multiplicidad el conseguir una perfecta separación de los diversos isótopos del uranio; las primeras que se hicieron en Norteamérica fueron por medio del espectrógrafo de masas de Nier, lográndose un aumento de concentración en U^{235} . Los métodos más conocidos de

separación del U^{235} y U^{238} se agrupan en cuatro, que son: difusión térmica, difusión gaseosa por barreras, centrifugación y electromagnético, todos sumamente costosos; la concentración de un kilogramo de U^{235} a la proporción de 10%, se calcula cuesta unos 75.000 dólares.

Daremos algunas ideas acerca de los métodos seguidos para la separación de isótopos de uranio. El método de la difusión térmica, estudiado independientemente por Enskog (1911) y Chapman (1916), radica en el traspaso de una gran cantidad de calor a través de capas finas de líquidos o gases, lo cual requiere un lado a elevada temperatu-

ra, que en las columnas concéntricas del Dr. Abelson es el interior, por la que circula vapor de agua saturado, y otro a la temperatura ambiente, que es un depósito anular exterior de cuatro pulgadas de espesor, por el que circula agua fría. En el depósito intermedio es por donde circula el exafluoruro de uranio, dando lugar a corrientes de convección que arrastran el exafluoruro ligero a la parte superior y el pesado a la inferior. Las instalaciones industriales constan de varias columnas que actúan en paralelo, y se consigue mejorar notablemente el rendimiento si el producto es concentrado previamente por métodos electromagnéticos.

El fundamento de la separación isotópica por difusión gaseosa puede decirse que se conoce desde 1829; fué estudiado detenidamente por Rayleigh en 1896, y ahora se han establecido instalaciones industriales en gran escala. Está basado en el paso de moléculas al estado gaseoso a través de una membrana con 2.000.000 de poros por pulgada cuadrada, es decir, poros submicroscópicos, la cual divide el espacio en dos compartimientos de alta y baja presión. El primero, alimentado por medio de bombas, que produce la presión. La membrana deja pasar, por difusión, los compuestos ligeros, que se recogen en el compartimiento de baja presión. El rendimiento de cada unidad está dado por la relación en que se encuentran los pesos moleculares de los dos cuerpos que se trata de separar; en este caso es bajo, debido a que el producto que se utiliza es el exafluoruro de uranio, compuesto que ataca a casi todos los cuerpos metálicos, no metálicos, orgánicos, e incluso reacciona violentamente con el agua, pero con la enorme ventaja de que al reducirse la presión se solidifica a menos de 40° C.; los pesos moleculares de los exafluoruros a base de uranio²³⁵ y de uranio²³⁸ son 349 y 352 res-

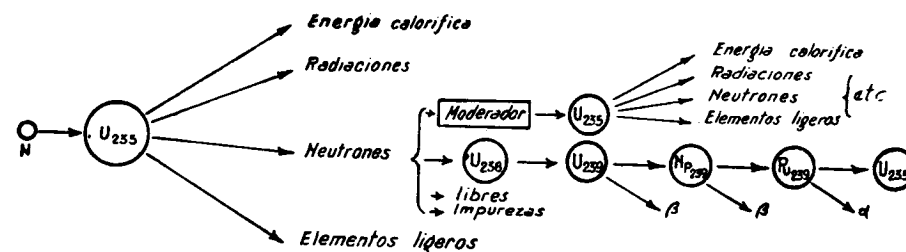
pectivamente, los que dan una relación de concentraciones de 1,0043; por este motivo, son necesarios muchos miles de escalones, como tiene la factoría de Clinton, para conseguir una concentración que sea interesante.

El método de centrifugación, como es uno de los más conocidos, no lo trataremos, y el electromecánico tampoco, por ser, en resumidas cuentas, la aplicación en gran escala de los espectrógrafos de masas, tema sobre el que hemos dado otras conferencias, ya publicadas (1). Únicamente recordamos que, para operar en este método, las partículas ionizadas se deben manipular en un ambiente de alto vacío, así como la enorme importancia de mantener constante el voltaje de la corriente para que sean invariables las condiciones de los campos magnéticos y eléctricos y, por consiguiente, las trayectorias del U^{235} y el U^{238} . Este último método exige un elevado consumo de energía eléctrica. Se puede decir que, en general, todos los métodos de reparación isotópica, salvo el electromagnético, dependen de pequeñas diferencias en el comportamiento medio de las moléculas.

Podemos decir, según los informes oficiales referentes a la instalación norteamericana para utilización de la energía atómica, que de los 2.000 millones de dólares gastados en los primeros meses, los dos tercios del presupuesto se invirtieron en los métodos de separación isotópica del uranio; problema difícil, ya que se trata de elementos con una diferencia de tres unidades másicas sobre 235.

Las reacciones que se pueden producir por la acción de los neutrones lentos sobre el uranio²³⁵ las esquematizamos a continuación:

(1) Revista de Geofísica. III, pág. 328 a 370. 1944.



Reacciones a que da lugar la acción del neutrón lento sobre el U_{235} .

La reacción indicada conduce a la obtención del plutonio como subproducto, si es que el fin primordial perseguido con ella es la obtención de energía, o recíprocamente, teniéndose en cualquiera de los dos casos una fuente de energía nuclear y de elementos transuránicos.

Al analizar la organización del núcleo atómico, supuesto formado por protones y neutrones, vemos que el número de éstos pasa gradualmente de 0 para el protio, a 146 para el uranio²³⁸ (fig. 1). Se observa un aumento rápido de los neutrones en los elementos más pesados, causa de que siempre se liberen algunos al escindir los núcleos de los átomos pesados y de la dificultad momentánea de las síntesis por requerir aportación de neutrones.

El conseguir proyectiles nucleares artificiales, tiene por objeto utilizar, en lugar de uno aislado, producido por un átomo, un gran número de proyectiles, o sea concentrar el bombardeo y aumentarlo en rapidez: este deseo fué una franca realidad con el ciclotrón inventado en 1937 por el físico Lawrence, de la Universidad de Berkeley (California). El primer modelo de ciclotrón permitía bombardear la materia con energías de $40 \cdot 10^6$ electrovoltios; como comparación indicamos que la energía de las partículas α puede llegar a $8 \cdot 10^6$ electrovoltios y la de las emisiones γ a $2,5 \cdot 10^6$

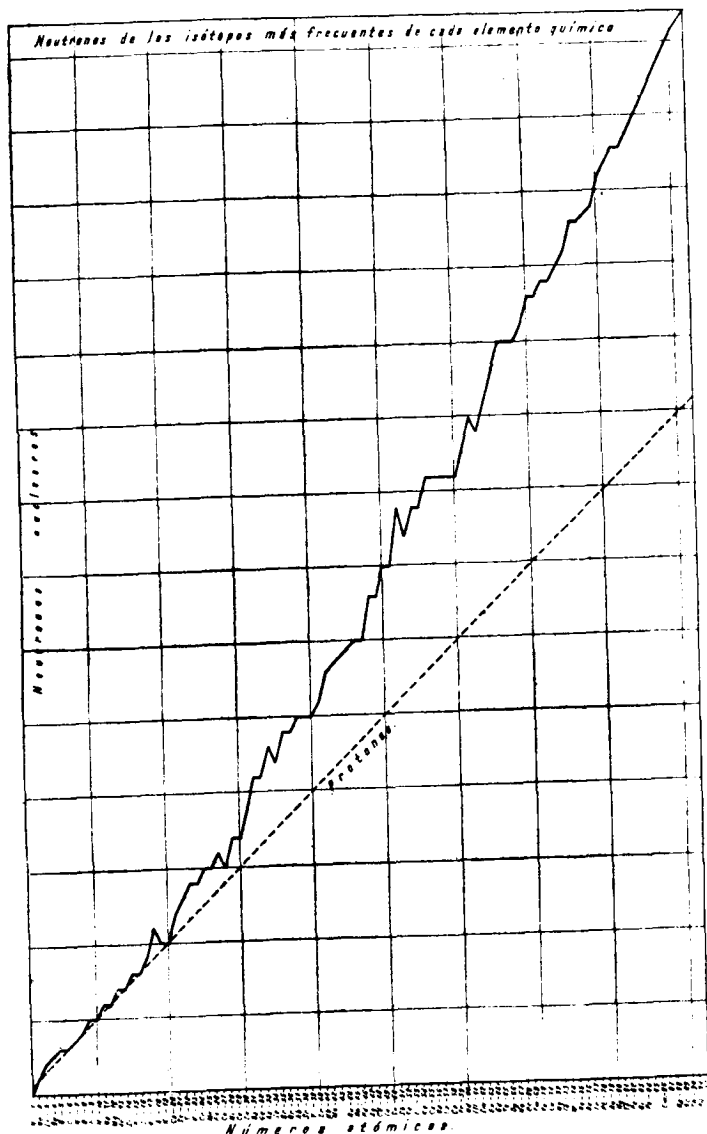
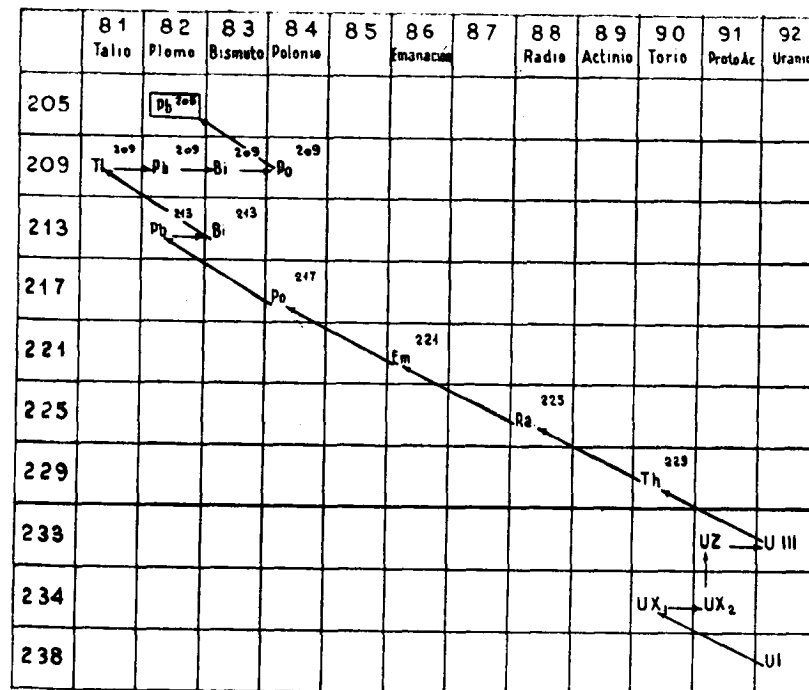


Fig. 1.—Protones y neutrones de los isótopos más frecuentes de cada elemento químico. La cuadrícula tiene equidistancias de 10 unidades.

electrovolts. El mismo sabio ha construido, en el año 1942, otro modelo de ciclotrón de 5.000 toneladas.

No debemos olvidar el descubrimiento efectuado hace algunos meses, por Marieta de Silveira (1), de la emisión neutrónica por el uranio X₂, para dar lugar al uranio Z, que por emisión de una partícula β origina el uranio III. La



Familia del uranio, rama del UZ.

emisión de neutrones por los uranios y sus derivados era conocida por los trabajos de Maurer y Pose (2); es de

(1) Marieta de Silveira: «Contribuição para o estudo das radiações de urânio X complexo». Lisboa, 1945.

(2) Z. Phys CLVI. 285 a 292. 1943.

interés la detenida comprobación del descubrimiento referente al UX_2 , de gran importancia, tanto por su emisión natural de neutrones, como por ser esta posible rama de la familia del uranio y del radio la que puede originar los plomos 205 y 209, conocidos por los trabajos de Wahl, Aston y Nier, así como el 213, únicas lagunas existentes acerca del origen de los plomos conocidos entre 204 y 214. En esta supuesta ramificación se observa la particularidad de que puede existir un isómero del único bismuto estable, que tendrá emisión natural β como consecuencia de un exceso de energía de la emisión β del plomo 209. El plomo estable 205, que lo encontramos en la naturaleza en la proporción aproximada de 0,02 %, nos indica la posibilidad de que la ramificación del UX_2 tenga lugar con emisión de neutrones para $0,02/23,5 = 85/10,000$, siendo de gran interés una valoración precisa en los plomos comunes u ordinarios incontaminados, de las proporciones de los isótopos 205 y 209, para conocer lo más exactamente posible la cifra que hemos indicado, por servir sólo como orientación el valor deducido.

ENERGIA Y MASA

Los problemas de síntesis y desintegración nuclear dentro de la teoría de conservación de la materia se reducen a cambios de energía en masa equivalente y recíprocamente, tema que hoy es familiar, ya que hace años dejó de confundirse la masa con la materia (1).

Equivalencia entre energía y masa

Los estudios de física nuclear pusieron de manifiesto la energía subatómica, consecuencia de la transformación parcial o completa de la masa en energía.

La masa, velocidad y energía están relacionadas por una función en la que la energía posee una masa igual a su cociente entre el cuadrado de la velocidad de la luz, concepto resumido por Einstein en su generalización de la ley

(1) En la última edición del Diccionario de la Lengua Española, editado por la Real Academia, y en la 7.^a acepción del vocablo *masa* se continúa con la idea anticuada de «cantidad de materia que contiene un cuerpo».

de la inercia de la energía: «Toda forma de energía, posee cierta inercia, y la masa de una cantidad de energía, está determinada por el cociente de esta energía, entre el cuadrado de la velocidad de la luz». De acuerdo con esta ley, y si además tenemos en cuenta la comprobación efectuada de la conversión energía radiante en masa mecánica ponderable, y recíprocamente, podremos decir, que en todo cuerpo que irradia o absorbe energía, en la forma de luz, calor, etc., se produce una pérdida o aumento de su masa, igual al cociente de esta energía entre el cuadrado de la velocidad de la luz, equivaliendo lg. masa a 25.10^6 KW/h. y recíprocamente.

Síntesis y desintegración.—Sería interesante una revisión de los núcleos atómicos para el establecimiento de algunas conclusiones; si empezamos por los más elementales, protio y helio, veremos que la suma de las masas de cuatro átomos del primero es mayor que la correspondiente a uno del segundo elemento. Al formarse un átomo de helio, a partir de cuatro de protio hubo pérdida de masa nuclear, con emisión de la energía equivalente a esta pérdida de masa, por lo cual nunca podremos presenciar la desintegración espontánea de un átomo de helio, pero sí su síntesis o integración a partir del protio o del deuterio, si se reúnen determinadas condiciones.

Si admitimos que los átomos están formados por neutrones, protones y electrones, al determinar la masa de cada átomo, veremos es diferente de la suma de las correspondientes a las dos clases de constituyentes, denominando Aston «fracción de compacidad» a la pérdida de masa por unidad másica del núcleo.

En los trabajos de Aston, se considera como patrón de

unidad de masa, el isótopo más frecuente del oxígeno, al que se asigna el número 16. Si trazamos aproximadamente la curva de fracción de compacidad (fig. 2) con los datos de Aston y Dempster (1), vemos que el máximo de los valores negativos es cercano a -8.10^{-4} , perteneciente a la

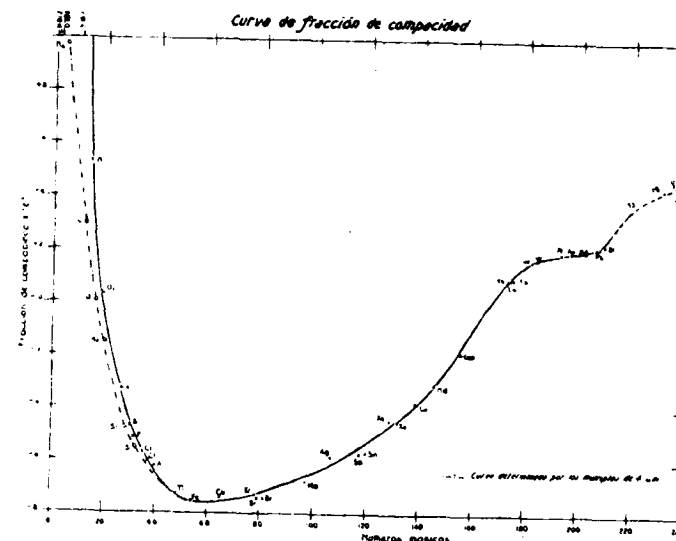


Fig. 2.— Curva de fracción de compacidad, según los datos de Aston y Dempster.

masa 50 (Ti, Cr, V); los valores nulos son los de átomos que tienen por masa 165 (Dy, Ho, Er) y que los positivos aumentan rápidamente a partir del plomo, correspondiendo el máximo a los uranios, con cerca de 5.10^{-4} como fracción de compacidad. Fácilmente podemos decir cuáles son los elementos más estables y cuáles los extraordinariamente inestables; los primeros son los de mayores valores negativos de la fracción de compacidad, los segundos los de

(1) F. W. Aston: «Mass Spectra and Isotopes». London, 1942.

mayores valores positivos. También se aprecia en la gráfica, que la curva de fracción de compacidad determinada por el He⁴, C¹², O¹⁶, Ne²⁰, Si²⁸ y S³², es inferior a la correspondiente a los demás elementos, lo que puede indicar una organización nuclear muy estable a base de heliones.

Como consecuencia de estas observaciones se pueden establecer cuatro conclusiones: 1.^a La emisión natural de partículas alfa sólo puede tener lugar en elementos de elevado número másico; actualmente el de menor número másico con dicha emisión reconocida, es el Sm¹⁴⁸. 2.^a En otras ocasiones hemos sostenido nuestra opinión contraria acerca de la existencia actual de elementos transuránicos naturales (no artificiales), fundada en diversos razonamientos; además podemos suponer, por la gráfica, la gran cantidad de energía necesaria para su formación, así como la gran inestabilidad para poder subsistir, ya que rápidamente evolucionarían los núcleos transuránicos hacia otros más estables, con una disminución de la energía potencial. 3.^a La escisión total de los núcleos pesados es ruinosa; debe quedar limitada, como máximo, a elementos finales de masas no muy alejadas de 50, bien en su primera o subsiguientes transformaciones. 4.^a La liberación de energía por síntesis sólo puede tener lugar con elementos de masas inferiores a 50 u. m. y que, además, produzcan elementos con menor masa que la suma de las correspondientes a los dos elementos y neutrones que reaccionan.

Independientemente de los modernos superexplosivos atómicos en cadena, en los que los beligerantes ya tenían puestas sus esperanzas en 1940 (1), las actuales teorías fi-

(1) En España se tuvieron noticias públicas de los mismos en el mes de agosto por «El Calpense», de Gibraltar, y por el «A B C», de Sevilla, del día 1 de septiembre de 1940, pág. 5.

sicas del volcanismo parece se orientan, aunque con fundamentos no muy seguros, hacia un origen nuclear por explosión en cadena, mereciendo especial mención los trabajos del Profesor I. Noetzelin, iniciador de estas teorías. También se fundan en las reacciones en cadena las teorías de Hans Bethe y Carlos Weiszäcker acerca del mantenimiento del calor solar, y algunas de las actuales acerca de la energía para la producción de novas y supernovas. La energía libertada, productora del fenómeno, se ha de calcular, como hicimos anteriormente, por la diferencia de la masa inicial de los elementos que produjeron la reacción y la suma de las masas de los neutrones, protones y electrones resultantes.

MEDIDA DE EDADES POR DESINTEGRACION

Los procesos de desintegración dan lugar a aplicaciones técnicas de gran importancia, como son las manifestaciones energéticas, utilizadas con fines bélicos o industriales, pero también tienen un gran número de aplicaciones en el campo científico, y en éste, además de las específicas de la clínica, que son las más popularizadas, figura la medida de tiempos.

Fundamento

Existen tres métodos generales de medida de edades, fundados en la propia desintegración de los átomos. Estos son: 1.º Las partículas alfa dan lugar a un oscurecimiento de los puntos donde terminan sus recorridos; si relacionamos estos ennegrecimientos con el número de partículas alfa necesario para producirlos, tendremos una marcha para valorar edades. 2.º Las partículas alfa son heliones doblemente ionizados; por cada partícula alfa originada por el producto que se desintegra se obtiene un átomo de helio; como conocemos qué elementos dan lugar

a emisiones alfa y cuál es su período, es fácil deducir las edades, método como el anterior, aplicable únicamente a elementos de la familia del uranio y radio, actinio, torio y samario¹⁴⁸. 3.º Los elementos cabezas de familias radiactivas se están transformando continuamente, hasta que llegan a convertirse en elementos estables. Es fácil deducir la edad si conocemos el número de los átomos que se han transformado y el número de los que permanecen inalterables.

Inmutabilidad de los métodos

Al estudiar los métodos radiactivos de medidas de edades, además de las inexactitudes específicas de cada marcha puede haber dos causas de error: las debidas a que las constantes de desintegración no sean inmutables, y las debidas a posibles reacciones nucleares en los elementos de las familias radiactivas, diferentes a las naturales y normales de cada familia.

Así como las radioaureolas, como base de métodos para medir edades son muy imprecisas, tienen gran importancia como testigos a través de más de 10^9 años de la constancia de la velocidad de desintegración atómica; al observar que los radios de las aureolas, o alcances de las partículas α , no han variado con la edad, y como el alcance es función de la duración de la desintegración, podemos sostener que el período no sufrió alteración a través de los tiempos geológicos.

Se podría decir que es fácil se produjese espontáneamente en la naturaleza la reacción indicada anteriormente

de los neutrones lentos con el U^{235} , como la consiguiente disminución de este elemento y como consecuencia un aumento del valor calculado para la edad. En la naturaleza es frecuente encontrar el uranio y radio en las proximidades o en contacto del berilio, como en la Sierra de la Albarrana, lo que podría dar lugar a neutrones libres. Nuestra opinión es de que existen grandes dificultades para que se produzca la reacción nuclear indicada para el U^{235} , por las razones siguientes:

1) El número de átomos de radio es pequeño con respecto a los del uranio; su valor máximo en los minerales más ricos es de $4 \cdot 10^{-7}$. Aunque en la familia del uranio y radio hay otros elementos anteriores al radio que tienen emisión α , es la frecuencia de este elemento la que debe servir como orientación para el estudio de la probabilidad de una posible reacción a base de neutrones.

2) El alcance máximo en el aire de las partículas α de los derivados del radio es 6,97 centímetros, correspondientes al Ra C'.

3) Los neutrones lentos, hoy sólo producirán la reacción, como máximo, en un impacto de cada 140 que den en núcleos de uranio, por ser esta la frecuencia actual del U^{235} ; anteriormente tenía más probabilidad por estar disminuyendo continuamente la proporción del U^{235} ; además, en los minerales de uranio hemos de tener en cuenta la coexistencia de su pléyade con los demás elementos que los integran y con sus impurezas.

4) Son necesarias determinadas condiciones, difíciles de que se den simultáneamente en la naturaleza, como es el frenado de los neutrones, para que se produzca espontáneamente la reacción nuclear.

Si admitimos que se produce el fraccionamiento natural de algún átomo U^{235} , sólo será de una manera esporádica

y sin que los neutrones liberados puedan dar lugar a reacción alguna en cadena. Los errores máximos producidos en las valoraciones de edades por estas escisiones del U^{235} son considerablemente menores que los límites de precisión de los métodos radiactivos de medición de tiempo.

FORMACION DE LOS ELEMENTOS

Vamos a seguir el proceso de formación de los elementos, ayudados por los conocimientos actuales de la Física, tal como suponemos sucedió para un observador situado en nuestro planeta. En primer lugar asistimos a la creación de la materia, que podía componerse sólo de masa, o de masa y energía; con el tiempo esperamos se pueda aclarar este aparente dualismo. La masa, cuando se creó, ocupaba todo el espacio, dando lugar a un estado superdenso.

Marcha seguida en las síntesis atómicas

Creada la materia, paso fundamental de la creación desde el punto de vista material, se inicia inmediata, pero lentamente, la síntesis nuclear; aquella materia tenía que estar en la forma de máxima sencillez; la que hoy conocemos es la de protones. Casi toda la materia hoy existente se reducía a una cantidad enorme de partículas atómicas, con una carga positiva o sin carga y masa uno.

A partir de los protones y neutrones, los elementos se fueron formando por orden de complejidad nuclear; la pri-

mera síntesis que tuvieron lugar fueron las del deutón y helion, con un gran desprendimiento de calor a costa de la pérdida de masa. Al estar entremezclados los núcleos de hidrógeno y helio se produce una nueva síntesis, para dar lugar al núcleo de litio; los núcleos atómicos se van complicando, llega un momento, después de considerable número de miles de millones de años, que se forman los núcleos de potasio, con masas diferentes, la del más abundante es 39, la del otro isótopo es 40 y tiene radiactividad β ; el K^{40} es el elemento más ligero que se conoce con esta actividad. Las síntesis exotérmicas continúan; llegamos a los elementos de masa 50, a los que corresponde el máximo de pérdida de masa y, por consiguiente, a la época en que el calor desprendido por átomo, a expensas de la masa inicial, es mayor. Los núcleos se siguen complicando; unos cinco mil millones de años después de la formación del potasio, tuvo lugar la síntesis del rubidio, de masa 87, segundo elemento que conocemos con actividad natural β ; cada vez el calor desprendido es mayor y la temperatura alcanza cifras que no podemos imaginarnos. Continúan las reacciones exotérmicas y pasamos a un momento de coexistencia con las endotérmicas, correspondiente al máximo supercalentamiento de la materia; de este tipo es la formación del núcleo del Sm^{148} , elemento de masa menor entre los de actividad α ; el calor de la materia inicial va disminuyendo lentamente y, por lo general, es mayor la cantidad de energía calorífica transformada en su masa equivalente cuanto más pesados son los núcleos formados; con el transcurso del tiempo, se llegan a formar los núcleos del uranio, con sus dos isótopos, el más frecuente o uranio, uno, o el más raro, denominado actinouranio, del que tanto se habla en estos días.

No tendría nada de particular que la energía sobrante

fuese tan elevada todavía que diese lugar a las síntesis endotérmicas de los núcleos transuránicos, los que requerían cantidades enormes de energía, causa de su grandísima inestabilidad, por lo que según nuestra opinión debieron desintegrarse antes de formada la corteza terrestre.

Los átomos, en aquel inmenso laboratorio natural, tan admirablemente regido, estaban reducidos a su núcleo con movimientos violentos e irregulares que ayudaban a su separación y esparcimiento. Al faltarles la protección de las capas electrónicas se facilitaron enormemente los procesos sintéticos indicados, sucediéndose las transformaciones nucleares con más sencillez que ahora conseguimos las corticales. Conforme la temperatura fué bajando, los electrones iban ocupando el puesto que les correspondía, dando lugar a los átomos que hoy manejamos tan familiarmente; se ordenaba el caos que aparentemente reinaba.

Sería fácil suponer que el mantenimiento del calor solar es a costa de la desintegración exotérmica de los elementos pesados, que hoy consideramos como estables, a los que acompañaría una pérdida de masa en los astros, o la síntesis exotérmica de los elementos ligeros. Las energías liberadas, de tener lugar estos procesos, podrían alcanzar magnitudes imponentes, análogas, como dijimos antes, a las que dan lugar a los cataclismos de las novas, y aun más a los de las supernovas.

Para el físico se presenta un interesantísimo campo de investigación, que es el estudio isotópico con el espectrógrafo de masas, de todos los materiales procedentes de otros astros que llegan a nuestro planeta. Parece ser que las investigaciones dan como resultado la misma composición isotópica de los diversos elementos que denominamos estables, procedan las muestras de nuestro planeta o de otro astro; en este caso los partidarios de los criterios

acerca de las teorías termonucleares de los astros tendrían que salvar este escollo, el cual confirma la existencia de una organización atómica común y con las mismas alteraciones nucleares para los diversos astros.

Edad de sus formaciones

En la corteza terrestre quedaron una serie de testigos que nos permiten fijar la fecha en que tuvieron lugar algunos de estos acontecimientos, por lo que tomaremos nuestros días como origen de los tiempos.

Vimos que, entre los elementos con radiactividad natural, el primero que se formó fué el K; también se admite hasta hoy que los procesos de desintegración natural no son alterados; por tanto, independientemente de las síntesis a que pudieron dar lugar el calcio y el potasio, el K^{40} se iba transformando en Ca^{40} , y, a base del equilibrio entre ambos isóbaros, dedujo Branley que el potasio se formó hace $2 \cdot 10^{10}$ años.

Dato más cercano es el de formación de los núcleos de rubidio, que, según los cálculos de Brewster, tuvo lugar hace $1.5 \cdot 10^{10}$ años.

Nos interesa conocer cuándo se formó el átomo de síntesis más endotérmica entre los hoy existentes en nuestro planeta, o sea del U; este acontecimiento tuvo lugar hace $3,75 \cdot 10^9$ años, según el valor que dedujimos el año 1939 (1), fundándonos en la hipótesis de Wilkins, de que originariamente estuvieron en equilibrio radiactivo el acti-

(1) Anal. Real Soc. Esp. de Fís. y Quím. XXXV, pág. 7 a 9. 1939.

nouranio con el uranio uno y de la relación $139,0 \pm 1,0$ en que se encuentran hoy ambos elementos.

El caos atómico, en los elementos que constituyen nuestro planeta, duró poco después de la síntesis del uranio; para establecer la fecha en que cesó recurrimos a la mencionada hipótesis de Wilkins y a la relación $\frac{23,5}{22,7}$ en que se encuentran, en el plomo denominado común, el radioplomo y el actinioplomo. El valor deducido por nosotros (1939) es $3,66 \cdot 10^9$ años.

Pasemos al primer valor, que ya tiene carácter geológico, o sea el mayor de los deducidos hasta la fecha para algún terreno; esto corresponde a una uraninita de Karelia del Norte, que tiene una edad de $1,8 \cdot 10^9$ años, según las valoraciones de Khlopin y Valdimirova (1940). De todos modos, hay minerales en nuestro planeta con edades superiores a ésta, pero que la sensibilidad de las técnicas que hoy utilizamos no permite deducir sus edades.

Entre las dos últimas edades reseñadas se produjo el gran desequilibrio que dió lugar, como consecuencia de las fuerzas gravitatorias, a concentraciones de la materia que originaron los diversos sistemas planetarios.

CONCLUSIONES

El campo de la física nuclear es enorme y de gran interés para los que dedicamos nuestras actividades al buscamiento, laboreo y beneficio de los minerales. El gran interés es tanto desde el punto de vista científico, por las importantes consecuencias que se pueden establecer, como desde el industrial, donde se ha alcanzado la transformación de materia en energía equivalente, utilizada en el calentamiento del agua, fácilmente transformable después en eléctrica; proceso localizado hasta hace unos meses en los laboratorios. Es de esperar, que con el tiempo se pueda disponer de neutrones, en condiciones para producir síntesis de elementos ligeros en plan industrial, así como la posibilidad de desintegraciones diferentes de las conocidas del uranio 235 y plutonio 239. La utilización de esta energía, existente desde el primer acto de la creación, que en el caso de la escisión del uranio 235 es 5.10^7 veces la de combustión del carbono, nos hace que podamos considerar los elementos extremos, es decir, los más pesados y los más ligeros, como las fuentes de energía del porvenir.

Estas afirmaciones son contrarias a la posibilidad de prescindir de las grandes centrales hidroeléctricas, así como de la utilización de la electricidad y carbón, como medio de caldeo en los procesos metalúrgicos; tanto los saltos como

las minas de carbón son indispensables para la economía universal. Al optimismo indicado de las aplicaciones de la energía atómica, hemos de oponer los criterios restrictivos dominantes en estos momentos, algunos de los cuales son pasajeros, como el peligro de explosión de las grandes masas de uranio metálico, así como de la radiactividad y política nacional e internacional de los diversos países, etc.; pero la fundamental dificultad de la utilización de la energía atómica, a partir del uranio, está en la enorme difusión de este metal, que impide el aprovechamiento industrial de gran parte de las reservas, que representan el 0,0008 % de la corteza terrestre.

En esta conferencia quedan expuestos varios puntos de vista de este amplio campo de la investigación y de la industria, para el que deseamos disponer de material adecuado que permita a nuestro país ponerse a la cabeza de esta rama de la física.

METODOS EXPERIMENTALES EN EL ESTUDIO DE LAS TRANSFORMACIONES RADIATIVAS

POR

MANUEL ABBAD Y BERGER

CONFERENCIA PRONUNCIADA EN EL INSTITUTO DE INGENIEROS
CIVILES EL DIA 29 DE ENERO DE 1946

RADIATIVIDAD Y ESTRUCTURA ATOMICA

El fenómeno de la radiactividad natural fué descubierto por Becquerel en 1896. A los cincuenta años de su descubrimiento, que no parecía entonces de gran trascendencia práctica, se habla, ya, de su aprovechamiento industrial y ha sido utilizado para fines de guerra.

Radiactividad, tanto natural como artificial, y transmutaciones, son fenómenos íntimamente ligados dentro del campo de la física nuclear, y las técnicas de laboratorio que se emplean para su estudio están basadas en los mismos principios.

Antes de exponer las técnicas de laboratorio que se utilizan en estos estudios vamos a resumir, de una manera elemental, los conocimientos que tenemos de la estructura del átomo, aunque esta exposición resulte, para todos ustedes, repetición de ideas conocidas.

En todos los átomos conocidos se puede distinguir un núcleo que tiene una cierta carga eléctrica positiva y, a su alrededor, un conjunto de partículas cuya carga es negativa.

Las partículas que rodean al núcleo son los electrones negativos y contienen, cada una de ellas, la menor carga eléctrica que se puede aislar, o sea el cuánto de electrici-

dad negativa cuyo valor es el de $4,77 \times 10^{-10}$ unidades electrostáticas. La palabra electrón fué sugerida por primera vez por Stoney, en 1891, para designar precisamente la «unidad natural de electricidad». En el estado actual de nuestros conocimientos, podemos considerar los electrones como partículas indivisibles, pues la hipótesis del sub-electrón de Ehrenhalt está hoy día desechada.

El núcleo, cuya carga total es positiva y numéricamente igual a la suma de la carga de los electrones, ha resultado más complejo que las partículas que le rodean.

Como elementos fundamentales constitutivos del núcleo, se pueden admitir los protones y los neutrones.

Los protones son partículas de masa mucho mayor que el electrón (alrededor de 1.850 veces mayor) y con una carga eléctrica positiva, pero de igual magnitud que la del electrón.

Los neutrones son partículas sin carga eléctrica y de una masa muy parecida a la de los protones. Fueron descubiertos por Botte y Becker, en 1930, en Giesen (Alemania), al bombardear elementos ligeros (B, Li y Be) con rayos X, encontrando una radiación mucho más penetrante que la de los rayos más duros que se conocían.

Chadwick dió una interpretación correcta al origen y naturaleza de estos rayos y supuso, además, que estaban constituidos por la asociación de un protón y un electrón negativo.

El electrón positivo

Unos meses después de la publicación del trabajo de Chadwick, merced a una fotografía obtenida por Anderson al experimentar con los rayos cósmicos, puso en evi-

dencia, la existencia de unas partículas, que procedían de un núcleo desintegrado, cuya masa era análoga a la del electrón y su carga igual y contraria. Se había descubierto el electrón positivo o positrón.

Disponemos, para construir el núcleo, de los siguientes materiales: protones, neutrones y electrones positivos, y ya hemos hablado de que Chadwick supone que el neutrón se compone de la asociación de un protón y un electrón negativo. Otra hipótesis, también verosímil, consiste en suponer que el protón sea el elemento complejo, y entonces los constituyentes del núcleo serán: neutrón y electrón positivo, asociado a un neutrón, que constituirá lo que llamamos el protón. Esta hipótesis es la que cuenta, en estos momentos, con mayor número de adeptos.

En el terreno teórico, se supone la existencia de una partícula también neutra, pero de masa no sólo inferior a la del neutrón, sino también del electrón, que se denomina *neutrino* y que permite explicar el reparto continuo de los espectros producidos por los cuerpos de radiactividad natural β .

Isotopos

Cualquiera que sea el carácter de protones y neutrones, es decir, que se trate de partículas simples o asociadas, los núcleos están constituidos por la asociación de esas partículas.

Puesto que el átomo es neutro, el número de protones y electrones negativos que contiene ha de ser el mismo. El número de neutrones será aquel que forme una configuración estable con el número de protones del núcleo.

Hasta hace unos cuantos años se suponía que el número máximo de elementos distintos en estado natural eran 92. El hidrógeno, primero de la serie, tiene un protón en su núcleo, y el uranio 92 protones, y los intermedios un número igual al lugar de orden que ocupan. Al estudiar las desintegraciones radiactivas, y más tarde con los trabajos de Thomson, Aston y otros, se puso en evidencia que un mismo elemento químico puede tener diversas clases de núcleos; núcleos caracterizados por contener el mismo número de protones, y diferenciados entre sí por el número de neutrones. Es decir, que para un número dado de protones pueden presentarse diversas configuraciones estables con distinto número de neutrones.

Así, por ejemplo, el uranio natural es una mezcla de tres uranios: el 238, cuyo núcleo tiene 92 protones y 146 neutrones; el 235, con 92 y 143 y 31, y el 234, con 92 y 42.

Estos tres uranios químicamente idénticos son, sin embargo, distintos desde el punto de vista físico. De que consideremos un punto de vista u otro encontraremos que el número de elementos hasta el uranio inclusive es el de 92, o el de cerca de 300, si consideramos los isótopos que se encuentran en estado natural.

El conjunto de elementos que tienen igual número de protones, y por ello ocupan el mismo lugar en la tabla periódica, y tienen las mismas propiedades químicas, cualquiera que sea su masa atómica, se les denomina isótopos.

ESPECTROGRAFO DE MASAS

Entre los procedimientos físicos que son objeto de esta conferencia citaremos el espectrógrafo de masas, tanto por la utilidad que rinde a la investigación de los isótopos, como por la que ha sido también utilizada en pequeña escala para la reparación de aquéllos. Todos ustedes conocen que uno de los procedimientos de aprovechamiento de la energía nuclear consiste en la desintegración del U 235, isótopo que se encuentra en el uranio natural en la proporción del 0,7 %, pues bien, el espectrógrafo de masas sirve para analizar las diversas fases de su separación y para separarle en cantidades pequeñas.

Al análisis de isótopos no se pueden aplicar procedimientos químicos, porque ya hemos dicho que todos los isótopos de un mismo elemento tienen idénticas propiedades químicas; tampoco le podemos aplicar el análisis espectral ordinario, ni la espectroscopia de rayos X, porque nos sucede lo mismo.

Con estos métodos no tenemos más información que la que nos proporcionan los electrones que rodean el núcleo y tanto su número como sus estados de energía son invariables para todos los isótopos de un elemento químico.

Algunos elementos de radiactividad natural nos pueden

dar hecha la separación de isotopos en el curso de su desintegración. Así sucede en el proceso de desintegración de las familias radiactivas. Entre éstos los que emitan radiación gamma, como ésta es característica del núcleo, también nos pueden dar indicio de su presencia. Pero para los elementos que no sean radiactivos es preciso recurrir al espectrógrafo de masas.

Del mismo modo que las radiaciones luminosas de diversas longitudes de onda se analizan en un espectrógrafo óptico utilizando el fenómeno de dispersión de la luz, en el espectrógrafo de masas se analizan las partículas nucleares también por el mismo procedimiento, difiriendo en que los métodos que ahora se utilizan ya no son los de la óptica de la luz, sino como es natural los de óptica corpuscular.

El espectrógrafo de masas utiliza como radiación a los iones positivos de los átomos, y consiste, en esencia, en lo siguiente (véase figura 1):

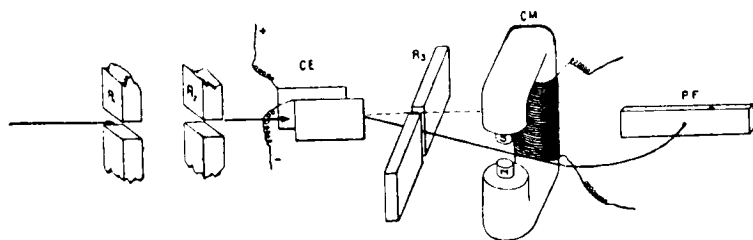


Fig. 1. — Esquema general del espectrógrafo de masas. R_1 , R_2 y R_3 , representan diafragmas; CE , un campo eléctrico; CM , un campo magnético, y PF , la película fotográfica.

Un tubo de rayos positivos o rayos canales en el cual los iones positivos de la substancia objeto del análisis salen a través de los orificios del cátodo; estos rayos son desviados sucesivamente por un campo eléctrico y por un

campo magnético, normal al anterior, y entonces, cuando se cumplen condiciones de enfoque, todas las partículas cuya relación de carga eléctrica e/m es constante van a parar al mismo punto de la placa fotográfica, donde se produce una raya espectral característica del núcleo que la ha impresionado.

Cuando se trata de productos en estado sólido se substituyen el tubo de rayos positivos por un tubo, en que el ánodo, provisto de la substancia problema, se hace incandescente.

DIFERENTES CLASES DE RADIACIONES Y MEDIOS DE PRODUCCION

Las sustancias radiactivas nos proporcionan tres tipos de radiación:

La radiación α , constituida por partículas positivas que son de la misma naturaleza que los núcleos de helio.

La radiación β , constituida por electrones.

La radiación γ , de naturaleza electromagnética análoga a la de los rayos X.

Artificialmente se puede provocar la radiación α , la β y rayos X de longitud de onda mayor, igual o menor que la de los rayos γ , neutrones, protones y deuterones o núcleos de hidrógeno pesado.

Recientemente en Portugal, Marieta da Silveira ha comprobado que el elemento protactinio 234, o UX 2, además de su desintegración por radiación β , dando lugar al U 234, presenta otro tipo de desintegración natural, emitiendo neutrones y dando lugar al protactinio 233. Es el primer elemento en que se reconoce la emisión espontánea de neutrones.

Respecto al modo de producir estas radiaciones, nada hemos de decir de las naturales, puesto que éstas son espontáneas.

Procuraremos, pues, resumir la técnica empleada en la producción de partículas aceleradas artificialmente.

PARTÍCULAS POSITIVAS.—De éstas hemos citado los protones o núcleos de hidrógeno ligero, los deuterones o núcleos de hidrógeno pesado constituídas por un protón y un neutrón, y las partículas α o núcleos de helio compuestas de dos protones y dos neutrones asociados.

Su producción puede hacerse en un tubo de dos electrodos, que para potenciales elevados es un tubo en cascada en que los dos electrodos extremos tienen una diferencia de potencial constante que suele ser de un mínimo de 400.000 V. El de la Institución Carnegie, de Wáshington, es de 1.200.000 V. En el interior del tubo se introduce el gas enrarecido, hidrógeno para obtener protones acelerados,

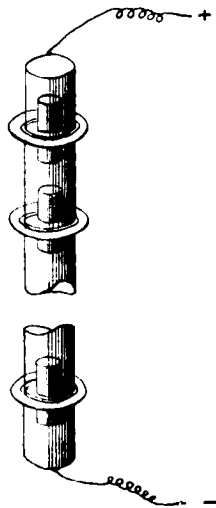


Fig. 2.—Tubo en cascada para la aceleración de partículas eléctricamente cargadas.

deuterio para deuterones y helio para partículas α . El artificio de cascada, utilizado para grandes tensiones, tiene por objeto producir una distribución gradual a lo largo del tubo, evitando sobretensiones locales muy elevadas que podrían dar lugar a accidentes (véase figura 2).

Modernamente se utilizan el acelerador múltiple lineal y el ciclotrón o acelerador magnético de resonancia. Por el interés que ha despertado este último, vamos a describirlo someramente:

Supongamos que en el interior de un recipiente cerrado, tenemos un gas ionizado. Los iones, si no

existe ningún campo de fuerza, describirán las trayectorias, correspondientes a un movimiento cinético desordenado. Si sometemos este recinto a la acción de un campo magnético, las trayectorias de los iones que se muevan en dirección normal al campo, se curvarán dando lugar a trayectorias circulares cerradas (véase fig. 3).

Si sometemos estas partículas en movimiento, con tra-

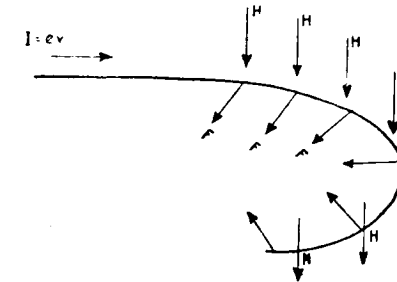


Fig. 3.— H . Representa el campo magnético.— I . La intensidad de corriente, que equivale al movimiento de una partícula de carga eléctrica e y velocidad v .—El radio de curvatura descrito por la partícula será $r = \frac{mv}{He}$, donde m es la masa de la partícula.

yectoria circular cerrada, a la acción de su campo eléctrico de dirección igual a la del plano de giro de las partículas, éstas experimentarán una desviación de su trayectoria. Operando de manera que la acción de este campo actúe solamente durante una fracción de tiempo muy pequeña respecto del período de giro de las partículas, se consigue aumentar gradualmente su radio de giro, y como la velocidad angular de las partículas se mantiene constante, de este modo se aumenta de un modo gradual la velocidad lineal de las partículas (véase fig. 4).

Para la interrupción sincrónica del campo eléctrico se utiliza un circuito electrónico de alta frecuencia, frecuencia que depende del período de giro de las partículas y de los detalles constructivos del ciclotrón.

El ciclotrón es un artificio que nos permite aumentar la velocidad de los iones sin necesidad de alcanzar tensiones elevadas, como en el caso de los aceleradores electrostáticos.

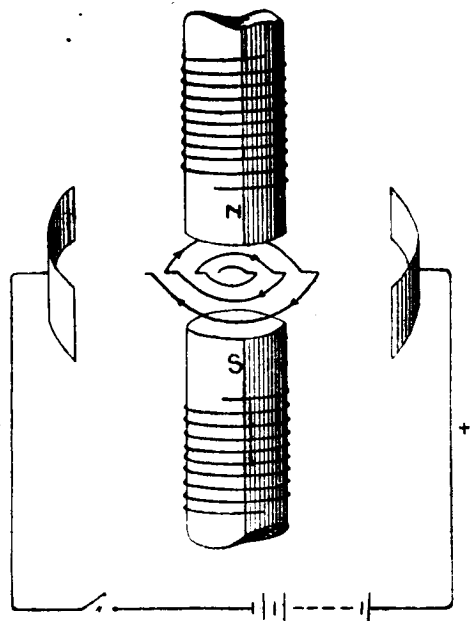


Fig. 4.—Esquema del ciclotrón.

Así, en un ciclotrón que tuviese entre placas una diferencia de potencial de 20.000 voltios, y las partículas experimentasen 150 aceleraciones, la velocidad final sería la equivalente a la que le hubiesen comunicado 3.000.000 de voltios.

A medida que aumenta el tamaño del ciclotrón puede aumentar el recorrido de las partículas y su número de impulsiones, siendo mayor la energía final alcanzada. Por esto se ha llegado a un tamaño, para el diámetro polar, de 37 pulgadas, en el de la Universidad de Columbia, que

lleva en su construcción 40 toneladas de peso de hierro y nueve de cobre, utiliza un campo magnético de 18.000 gausios, y donde la potencia de salida de su circuito oscilante es de 50 KW., análoga a la de las buenas emisoras de radio. En estos últimos años estaba en construcción en Berkeley (California) uno de 184 pulgadas, y que lleva en su construcción 3.700 toneladas de acero y 300 toneladas de cobre.

Para dar una idea de las energías que se consiguen con el ciclotrón hemos de consignar que las ya alcanzadas, superiores a los 20 MV., requeriría, en el caso de utilizar tubos de descarga, instalaciones de 5 a 20 MV. y tubos de longitud astronómica.

Los artificios que acabamos de describir sólo sirven para la aceleración de partículas con carga eléctrica, es decir, electrones, protones, deuterones y núcleos de helio.

Para la obtención del chorro de neutrones será preciso recurrir a reacciones nucleares, pues estas partículas, por no tener carga eléctrica, no se pueden acelerar por los procedimientos descritos. Cabe también que algún día se puedan emplear elementos de radiactividad natural neutrónica, como el ya citado UX 2.

Tanto para utilizar las partículas aceleradas, obtenidas por los procedimientos descritos, como para conseguir neutrones, hemos de pasar al estudio de las reacciones nucleares.

REACCIONES NUCLEARES

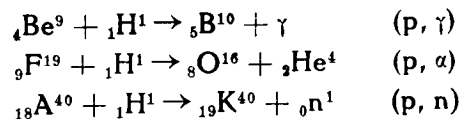
Bombardeo por partículas positivas

No es ninguna idea nueva la de asimilar los bombardeos nucleares a una acción de artillería. Así como el cañón es el acelerador de partículas, el proyectil la partícula y el blanco será el núcleo que tratamos de escindir. En nuestro caso, sin embargo, hemos de señalar que no es suficiente acertar el blanco.

De todos los proyectiles que llegan al núcleo, solamente una parte penetrarán en su interior y serán eficaces para la transformación que se intenta. La probabilidad que tiene una partícula que golpea el núcleo de penetrar en su interior es pequeña debido a la barrera de potencial positivo que lo defiende. Por tanto no esperamos, de momento, buenos rendimientos con este procedimiento.

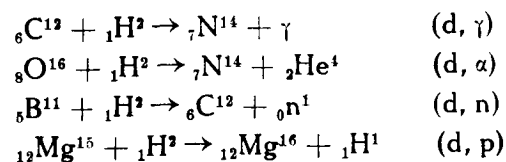
A continuación mostraremos algunas reacciones nucleares, entre las más conocidas.

A) BOMBARDEO DE PROTONES.—Existen tres tipos diferentes de reacciones, de las cuales exponemos una reacción característica de cada tipo:



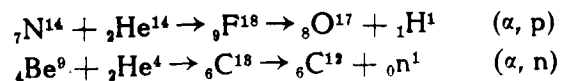
Donde los signos que van entre paréntesis, al margen de las reacciones, indican, el primero, la partícula que bombardea, que en este caso es un protón, y el segundo la radiación que se desprende, que puede ser γ , α o neutrones.

B) BOMBARDEO CON DEUTONES. —Existen cuatro tipos distintos que, como en el caso anterior, expresamos con un ejemplo:



En esta clase de reacciones, aparece una nueva posibilidad, que es la de la aparición de protones.

C) BOMBARDEO CON PARTÍCULAS α . —Sólo da lugar a dos tipos, que son:



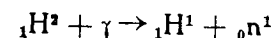
La primera de estas dos fué la primera desintegración nuclear, que se obtuvo artificialmente en el laboratorio.

La última es también de gran importancia, porque en ella está basado uno de los supuestos detonadores de la bomba atómica.

D) BOMBARDEO POR NEUTRONES. —A causa de las barreras de potencial ya hemos dicho que las partículas cargadas eléctricamente son muy poco eficaces en los bombardeos. En el caso de un intento de aprovechamiento de la energía nuclear con las actuales piezas de artillería, el balance final de energía sería negativo, es decir, es mayor la energía consumida que la que se produce.

El neutrón, por su masa igual a la del protón, y por no ser detenido por las barreras de potencial del núcleo, es actualmente el proyectil ideal para las desintegraciones atómicas.

Los medios para obtener la fuente de neutrones se desprende de las reacciones que acabamos de citar. Observamos que en un laboratorio de física nuclear se puede utilizar cualquiera de ellas, pero donde no existen esas instalaciones, de tanto coste y volumen, se puede utilizar la del Be con las partículas α de una sustancia radiactiva, o también la siguiente:



en la que no son precisos más que hidrógeno pesado, y una substancia de radiactividad natural γ .

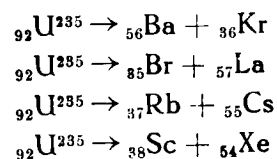
El rendimiento obtenido en la producción de neutrones parece ser muy bajo; se necesitan millones de partículas α para obtener algunas decenas de neutrones.

Desintegración con neutrones

Con arreglo a su velocidad debemos considerar dos clases de neutrones: los rápidos y los lentos. Los primeros tienen velocidades muy próximas a la de la luz, mientras

que los neutrones lentos tienen velocidades del orden de los movimientos brownianos. Estos últimos resultan muy adecuados para la desintegración de algunos núcleos, que presentan gran avidez para estos neutrones de poca velocidad.

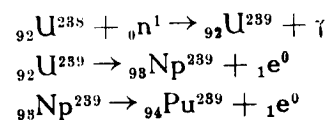
Entre las reacciones nucleares de más actualidad con neutrones lentos, citaremos algunas entre las muchas que se atribuyen a la desintegración del uranio 235:



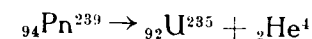
En 1934, Fermi, al bombardear el uranio con neutrones, observó la formación de varios elementos, entre los que se contaban dos cuyo número atómico era superior a 92, es decir, descubrió dos elementos que eran transuránicos.

Hahn, Lise Meitner y Strassmann revisaron con detalle estas investigaciones, y comprobaron en esta reacción la formación de varios transuránicos. Uno de ellos, de número atómico 93, se le denominó neptunio, y tiene un período de 13 minutos; los otros tenían períodos de 59 minutos, seis horas y tres días, respectivamente.

Después de una cuidadosa revisión experimental parece que, como resultado de esa reacción, no han de admitirse más que dos elementos transuránicos: el neptunio y el plutonio, de números 93 y 94, cuyo proceso de formación viene sintetizado en las reacciones:



Este último de radiactividad α dará lugar a la reacción:



Tanto el U^{239} , como el Pu^{239} , son elementos vulnerables al bombardeo por neutrones lentos. Ellos parecen ser actualmente los dos elementos más aprovechables para obtención de energía nuclear para fines industriales.

PROCEDIMIENTOS PARA DETECTAR PARTICULAS ACELERADAS Y RADIACIONES

Entre los diversos artificios para detectar los efectos de una desintegración, voy a describir los de mayor aplicación en el estudio de las transformaciones nucleares:

I. Pantalla fluoroscópica

Procedimiento en que la radiación o partícula incidente provoca la fluorescencia de una substancia sensible a la radiación, haciéndose así perceptible al ojo humano. Detector muy poco sensible, muy utilizado para flujos concentrados e intensos, como, por ejemplo, rayos X y haz de electrones del tubo de rayos catódicos.

II. Procedimiento fotográfico

Los fotones o partículas incidentes producen ennegrecimiento en la emulsión fotográfica, de un modo análogo al que produce la luz ordinaria en la fotografía. Es bastante

más sensible que la pantalla fluoroscópica, pero no se utiliza más que en radiaciones muy intensas o en reacciones nucleares muy violentas. En los experimentos que se proponen efectuar los Estados Unidos en el Océano Pacífico, para estudiar los efectos de la bomba atómica, se ha divulgado, en periódicos y revistas, que entre los aparatos de medida dispuestos serán incluidos muchos aparatos fotográficos y cinematográficos, con emulsiones sensibles a distintas radiaciones y filtros apropiados, con objeto de impresionar las reacciones sucesivas que se produzcan.

III. Tubos contadores de partículas.

Son detectores de partículas, sensibles incluso a partículas ionizantes *individuales*.

La corriente de carga (excepto en los proporcionales) es independiente del número de iones que da lugar la partícula incidente. (Así en muchos de ellos una partícula α da lugar a 10^2 a 10^3 más iones que una partícula β y, sin embargo, el contador sólo registra una partícula.)

A) CONTADORES PUNTUALES GEIGER (véase figura 5).— Consiste en un tubo cerrado, con aire, gas o vapor enrarecido, en cuyo interior existe un hilo conductor aislado. El cilindro es positivo respecto del electrodo interior y con diferencia de potencial de 1.500 a 5.000 V.

Los impulsos se encuentran con los electrómetros de hilo. En su interior puede penetrar una partícula o una radiación electromagnética.

En el primer caso, la partícula al penetrar en choques sucesivos genera un gran número de iones, los cuales, a su

vez, también por choques, multiplican el número de iones. Si lo que penetra en el interior del tubo es una radiación electromagnética (radiación γ , X, etc.), los fotones, en el choque con las paredes del tubo o con los electrodos, liberan electrones, los cuales producen un efecto análogo al que acabo de describir. En el tubo, los iones, según el sentido de sus cargas y merced al gran potencial del campo,

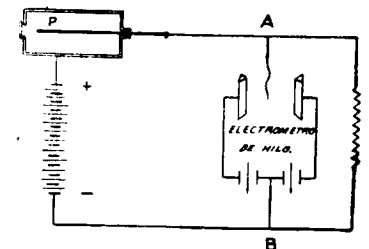


Fig. 5.

se dirigen selectivamente a uno u otro de los dos electrodos, que desempeñan el papel de las armaduras de un condensador. A medida que aumenta el número de partículas que depositan su carga eléctrica en los electrodos, aumenta la carga distribuida en la capacidad de este circuito y, por tanto, la diferencia de potencial entre electrodos, hasta un punto en que alcanzada la tensión disruptiva del tubo contador, éste descarga a través de esta resistencia produce un aumento de la diferencia de potencial entre los puntos A y B del circuito, que puede medirse con un electrómetro de hilo. Efectuada la descarga el contador recobra estado inicial, y está dispuesto para medir nuevos impulsos.

En estos contadores se mide el número de partículas que penetran en el tubo y no el poder ionizante de éstas. Así, este aparato no permite distinguir la clase de partículas, a pesar de que las partículas α , por su masa, tienen mucho mayor poder de ionización que una partícula β

(una partícula α da lugar a 10^2 y a 10^3 mayor número de iones que una β).

B) CONTADORES DE GEIGER-MÜLLER.—En este tipo de contadores el número de impulsos que se miden puede depender, según condiciones del trabajo, del número de partículas o del poder ionizante de éstas.

El tubo contador Geiger-Müller consiste en un tubo metálico, análogo al tubo Geiger, ya descrito, pero con la polaridad invertida. El tubo tiene ahora el potencial de signo negativo o, con respecto al electrodo interior y su funcionamiento, no presenta en esencia ninguna novedad respecto del tubo Geiger (véase fig. 6).

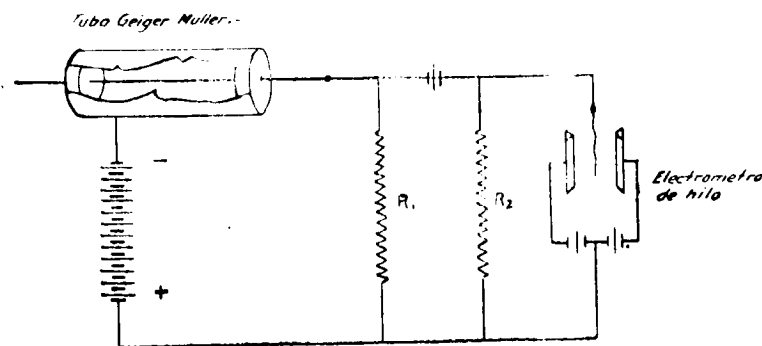


Fig. 6.

La curva característica de este tubo (véase fig. 7) presenta un tramo horizontal, en el cual una variación pequeña en la tensión del circuito de alimentación no altera los resultados en las medidas. Cada tubo tiene su curva característica, y la tensión de funcionamiento normal se regulará dentro de los límites V_1 y V_2 , que en un buen tubo diferirán en unos 100 voltios o más.

Para detectar directamente las descargas producidas

en el tubo Geiger-Müller puede utilizarse un electrómetro de Wülf, como en el tubo Geiger ya descrito, o bien un oscilógrafo de rayos catódicos. Si se intercala entre el tubo y el registrador un circuito de ampliación con válvulas elec-

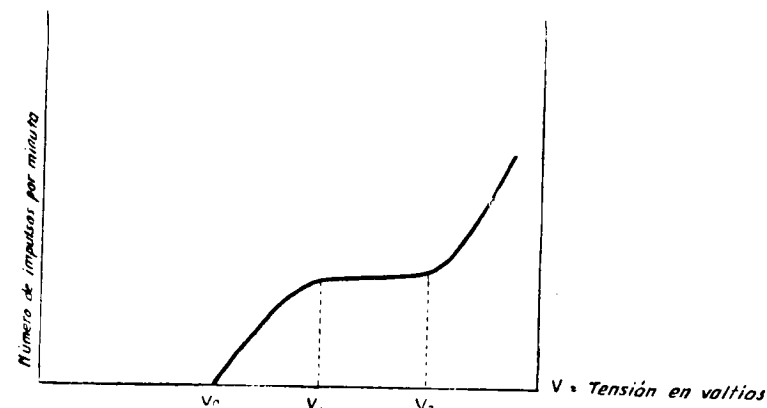


Fig. 7.

trónicas, ya no es necesario que el registrador sea tan sensible, y para medidas cuantitativas se utiliza, generalmente, un registrador electromecánico.

IV. La Cámara de Wilson.

La utilidad que rinden los tubos contadores, que permiten medidas en partículas aisladas, viene complementada con la cámara de Wilson, que permite la observación de las trayectorias de tales partículas.

En un sentido abstracto, ambos mecanismos tienen un principio común, que es la obtención de un estado de equilibrio metastable, en el cual el fenómeno de ionización,

producido por una partícula, es suficiente para producir la rotura del equilibrio.

En los tubos contadores el equilibrio se establecía entre dos electrodos, con diferencia de potencial próxima a la tensión de ruptura. En la cámara de Wilson, por un vapor en estado de saturación.

El artificio de la cámara de Wilson consiste en un recinto cilíndrico cerrado por un émbolo. El interior del recinto está lleno de aire limpio de partículas de polvo, y sobre el émbolo se pone una gota de agua. Al verificarse la expansión del espacio comprendido entre el cilindro y el pistón, por evaporación del agua que descansa sobre el pistón, se produce un estado de sobresaturación del vapor de agua, que tan pronto como existan núcleos de condensación se precipitarán en forma de gotas. Cualquier partícula que penetre en el interior de la cámara hará el papel de germen de condensación, a lo largo de su trayectoria, materializándose en forma de niebla que puede fotografiarse, por la persistencia de esta niebla, producida en la trayectoria de la partícula.

LA METALOGENIA DEL URANIO A LA LUZ DE LA FISICA ATOMICA

POR

JOSE ROMERO ORTIZ DE VILLACIAN
INGENIERO JEFE DE LOS LABORATORIOS DEL INSTITUTO

CONFERENCIA PRONUNCIADA EN EL INSTITUTO DE INGENIEROS
CIVILES EL DIA 12 DE FEBRERO DE 1946

EXCMOS. SEÑORES:

SEÑORAS Y SEÑORES:

Quisiera exponer a ustedes la génesis de los criaderos de uranio desde el punto de vista de la ciencia actual, pero si para ello acudiese a lo poquísimo que existe publicado sobre la metalogenia del uranio, tendría que ejercer la crítica, y esto, ciertamente, no sería muy airoso, porque los escritores que tratan estas cuestiones no siempre padecen sus propios errores, sino que sufren los de su época y resulta innecesario decir la rapidez con que se suceden hipótesis y teorías en los tiempos que vivimos; por todo lo cual me limitaré a exponerles mis ideas, que son al propio tiempo mis dudas, para que ustedes las contrasten con sus valiosas opiniones.

La metalogenia, como hija que es de la geología, ha seguido siempre las huellas maternas, apoyándose también en sus hermanas la mineralogía y la petrología, así como en la física y en la química. Pero, el paso incesante de la investigación por el campo de la física, ha trazado dos caminos que conducen a dos floridos vergeles, insospechados hace algunos años y que son: el de la física atómica y el de la física química, de manera que al metalogenista ya

no le bastará observar sus fenómenos en la penumbra de la física clásica, sino que habrá de estudiarlos a la luz de la física atómica y sin perder de vista las enseñanzas de la física química.

El metalogenista partía, no ya de un supuesto, ni siquiera de un principio, sino de un verdadero axioma, como era para él que el plomo que explotamos en las minas ha sido siempre plomo, y el manganeso, manganeso, pero desde el momento en que se le dice y se le demuestra que ese plomo ha podido ser un uranio o un torio, por ejemplo, y que el manganeso puede proceder del hierro, para no citar más que dos de las muchas transmutaciones actualmente conocidas, y de las más numerosas que fundamentalmente se suponen, claro es que ha de revisar todo lo actuado.

El propio elemento uranio nos acarrea la primera dificultad, puesto que sabemos, desde las experiencias de Fermi, proseguidas por Hahn, Meitner y Strassmann, que bombardeando los átomos, de un modo persistente, con radiaciones β , pueden obtenerse, artificialmente, otros elementos del sistema periódico de Mendeleieff, cuyos números atómicos serían los ordinales 93, 94, 95 y 96, de los que, al menos los dos primeros, corresponderían a un neptunio o a un plutonio, pudiendo tal vez existir elementos transplutónicos, que por su propia inestabilidad hayan sido dotados de una vida natural muy corta, por lo cual dentro de la vida larga de la geología nos los encontremos ahora al estado más estable del elemento uranio, o como uno de sus isotopos. En la preciosa conferencia pronunciada en este mismo curso por mi colega el ingeniero Sr. Abbad, ya expuso cómo puede llegarse a la obtención de un U 235 por arteificio de laboratorio.

En mi opinión, también la Naturaleza ha podido llegar,

en su función integradora, a la formación del uranio partiendo del protactinio, Pa 231, que figura al lado del uranio en el lugar 91, por un bombardeo análogo, y me fundo para ello no sólo en el eterno construir de nuestro mundo, sino también en que de los ocho elementos que figuran en la misma columna vertical o serie del uranio y que, por consiguiente, gozan de propiedades químicas análogas, encontramos al U en la Naturaleza formando compuestos con sólo cuatro de ellos, el Po, W, S y O; mientras que lo hallamos combinado con siete de la serie del protactinio, Bi, Ta, Nb, As, V, P y N, cuestión ésta que también nos aclarará la física atómica, porque a nosotros, actuando como metalogenistas, lo que más nos interesa es la génesis de los minerales de uranio actuales.

Son éstos más de 100, y claro es que no he de pretender explicar la génesis de todos ellos en una conferencia. Muchos constituyen meras curiosidades mineralógicas de colección o de museo, otros son productos secundarios de alteración y, algunos, han recibido diversos nombres en la terminología mineralógica, cuando, en rigor, no difieren más que en el número de moléculas de agua que contienen, lo cual, en el caso de un gel, depende, como es sabido, de su edad y de las vicisitudes térmicas que haya experimentado, según expuse al considerar los geles silíceos en mi conferencia del curso pasado. Sus génesis son sencillas, después de conocer las ideas fundamentales, por todo lo cual únicamente me ocuparé de aquéllos que constituyen verdaderas menas, es decir, de los que son objeto de beneficio industrial actualmente, sin que esto quiera decir que no lo sean en el futuro los restantes, cuando los métodos mineralúrgicos y metalúrgicos se perfeccionen.

Desde mis estudios acerca del estaño, que no he publicado por falta material de tiempo, me ha quedado la cos-

tumbre, no sé si buena o mala, cuando me encuentro con muchos minerales —que es casi siempre que se realizan estudios genésicos—, de no formar con ellos cuadros sinópticos, que dicen muy poco, y mucho menos encasillarlos en relaciones de fórmulas químicas, a las que, a veces, no responden con toda fidelidad los minerales, sino agruparlos en una sinopsis gráfica, sumamente sencilla, que paso a exponer a ustedes, por si encuentran en ella alguna originalidad. (Figura 1.)

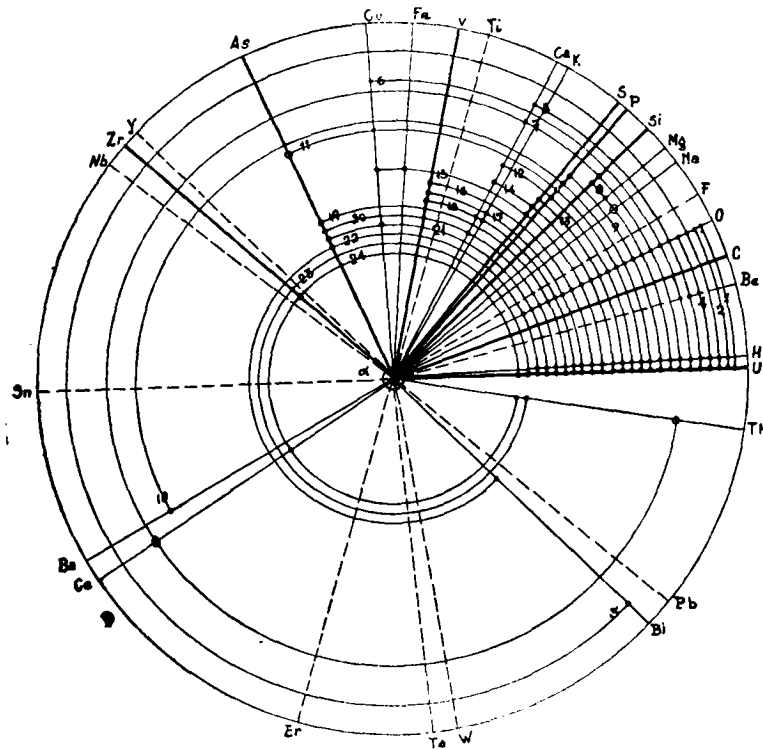


Fig. 1.

Tomo como eje de las x el elemento en cuestión, en este caso el U 238, y voy trazando unos radios, en los que

cada uno me representa un elemento, pero trazados de tal modo que su coeficiente angular, o sea el ángulo que forman con el radio αU , sea proporcional a su peso atómico, con lo cual también resultan, en cierto modo, ordenados según su número atómico. El ángulo correspondiente al hidrógeno, $H \alpha U$ es, por tanto, el ángulo unidad, y los 360° recorridos en sentido inverso del reloj, en el que construyo la figura, a partir de αU , representan 238, que es el peso atómico del U. Obtengo así todos los radios de la figura, algunos de los cuales he dibujado de trazos, porque no forman compuestos en ella, sino en otra que ahora proyectaré y que constituye como una segunda parte de la actual, con objeto de que pueda verse de una ojeada que el uranio entra a formar compuestos con 30 elementos, ateniéndonos solamente al análisis químico macroponderal, pues si recurriésemos al espectroquímico los resultados serían todavía más complejos, pero sin ventaja para el estudio genésico. En esta sinopsis cada mineral viene representado por un arco en la figura, limitándome a marcar en él con un punto cada elemento contenido. Todos los arcos o circunferencias van numerados, y su número respectivo corresponde al nombre del mineral que figura en el estado correspondiente.

Lo primero que resalta en la figura es que todos los minerales, salvo los dos más próximos al centro, que he consignado para contraste, contienen hidrógeno y oxígeno, porque acusan la presencia de agua, bien sea de combinación, bien retenida mecánicamente, por adsorción, en el caso de los geles. He figurado con líneas más gruesas aquellos radios que corresponden a elementos a los cuales cabe atribuir que entran a formar parte de un radical ácido en los compuestos minerales, resaltando así que en la Naturaleza encontramos hidrogenocarbonatos, hidrosilicatos,

hidrofosfatos, hidrosulfatos, hidrovandatos e hidrose-niatis combinados con el uranio, así como zirconiatos, deteniendo aquí la construcción de la figura para proseguirla en otra, ya que, de otro modo, resultaría excesivamente complicada con tanto arco (fig. 2), en la cual se observa, por el contrario, que no contienen hidrógeno,

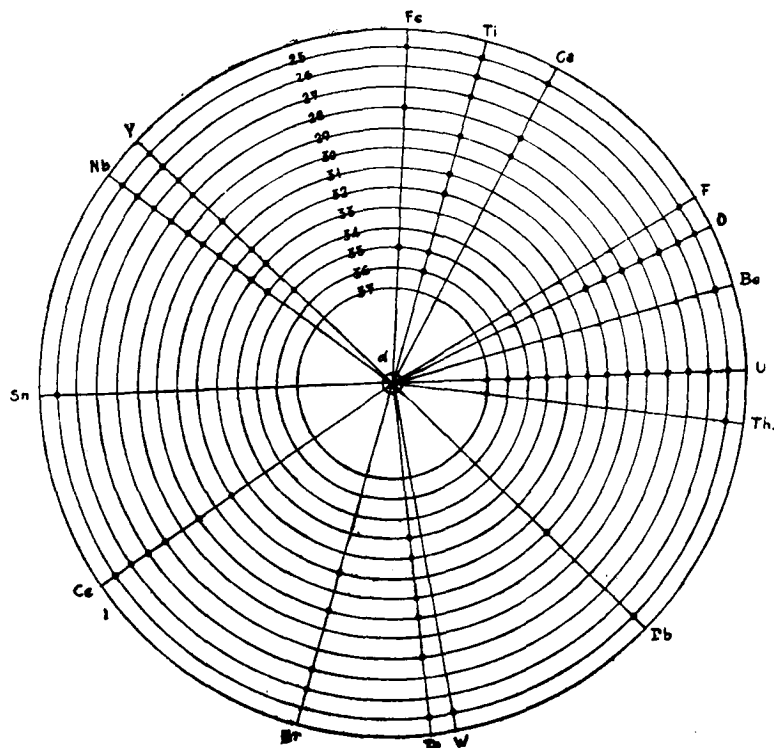


Fig. 2.

porque son minerales anhidros, llamando la atención que muchos contienen niobio e itrio. No proseguiré sin decir que este itrio es un elemento sospechoso, porque los experimentadores Hahn y Strassmann, prosiguiendo lo que ya había sido previsto por Irene Curie, llegaron a la conclusión

de que en el bombardeo de sales de uranio se desprende un fragmento bastante grande del núcleo atómico que corresponde a un núcleo de bario, Ba 56, y el otro producto de la disociación debe ser un elemento con carga nuclear $92 - 56 = 36$, o sea el gas noble criptón. Pero la masa del núcleo de este criptón es mucho mayor que la de sus isótopos conocidos hasta ahora, por lo que se supone que contienen un exceso de neutrones, parte de los cuales pueden convertirse en protones, y que por la acción de los rayos β éstos pasen del gas criptón al rubidio, de número atómico 37, y de éste, probablemente, a estroncio, 38, y luego al itrio, 39, según demuestran los análisis químicos de las sales de uranio bombardeadas con neutrones, que acusan la presencia de todos estos elementos.

Los componentes que algunos analizadores consideran como accidentales los he marcado con un pequeño círculo en vez de un punto y, como prueba de la poca confianza que deben inspirarnos los análisis químicos antiguos, he consignado el plomo que, según los tratados de mineralogía de uso frecuente para el principiante, no figura más que en dos minerales, cuando lo cierto es que se halla en todos, puesto que al expirar un gramo de uranio ha dejado en el mundo, como únicos herederos, los expresados en la igualdad:

1 gramo de U = 0,8653 gramos de Pb + 0,1345 gramos de He + 0,0002 gramos de radiación.

De esta manera quedan agrupados unos 60 minerales de uranio, porque prescindo de los más raros, toda vez que la recopilación total será efectuada, en otra conferencia, por mi querido amigo y compañero Sr. Comba. Los considerados por mí figuran en la siguiente relación:

Oxidos de uranio

Arco n.º 1.—Uraninita. Variedades: Nievenita y Lambertita.

Oxidos agua

- 2.—Iantinita.
Becquerelita.
Shoepita.
Fourmarierita.
Clarkeita.
Cleveita.
Curita.
Pechblenda. Var.: Yttrogummita y Brögerita.
- 3.—Uranosferita, hidróxido con bismuto.

Hidrocarbonatos

- 4.—Rutherfordina.
- 5.—Uranothallita.
- 6.—Voglita.

Hidrosilicatos

- 7.—Uranofano, uranotilo o uranolita.
- 8.—Sklodowskita.
Soddita.
Kasolita.

Hidrofosfatos

- 9.—Renardita.
Parsonsita.
Dumontita.
Dewindita.
- 10.—Uranocircita.
- 11.—Torbernitita.

Arco n.º 12.—Autunita.
Uranospatita.
Bassetita.
Fosfuranolita.

Hidrosulfatos

- 13.—Zippeita.
Voglianita.
Uranocanita.
- 14.—Uranopilita.
- 15.—Johannita.

Hidrovanadatos

- 16.—Uranita.
Ferghanita.
- 17.—Carnotita.
- 18.—Tiuyamunita.
Rauvita.

Hidroarseniatos

- 19.—Troegerita.
- 20.—Uranospinita.
- 21.—Zeunerita.

Niobiatos, tantalatos, etc.

- 23.—Uranniobita.
- 24.—Thorianita.

Circunferencia n.º 25.—Hattchettolita.

- 26.—Euxenita.
- 27.—Blomstrandina, priorita.
- 28.—Samarskita.
- 29.—Mendelejevita.
- 30.—Fergusonita.

- Circunferencia n.º 31.—Samiresita.
 — 32.—Policrasa.
 — 33.—Yttrotantalita.
 — 34.—Ampangabeita.
 — 35.—Delorenzita.
 — 36.—Braunerita.
 — 37.—Urannobita.

A nosotros únicamente nos interesan como menas los hidrouranifosfatos, denominados *autunita* cuando contienen calcio y *torbernita* o *calcolita* cuando contienen cobre, en los que a veces el arsénico substituye, en escasa proporción, al fósforo; el hidrouranivadanato *uvanita*; la *carnotita*, hidrouranivadanato de potasio, que a veces es reemplazado por el calcio, dando lugar a la *tiuyamunita* o *carnotita* cálcica; y los minerales que son verdaderos geles desecados y que constituyen, con el nombre de *uranita* o *pechblenda*, *uranio píceo*, *pechurano*, etc., la mena general y universal del uranio. Respecto a esta última, recuérdese que es de una composición sumamente compleja, aunque para simplificar no he marcado en su gráfico más que los elementos esenciales, que son el óxido uranoso-uránico, denominado uranato de uranio U_3O_8 , con proporciones variables de los óxidos UO_3 y UO_2 , además de agua, pero también contiene Zr, Ce, Y, así como Pb, Pa, Th, Ac, Ra, He, N, etc., y bastantes impurezas. No penetro en la parte descriptiva de minerales ni de minas, así como en su aspecto industrial, porque estos temas han sido reservados en este curso de conferencias a nuestros compañeros señores Moya y Comba, los cuales disertarán acerca de ellos con la maestría a que nos tienen acostumbrados. Por mi parte, el problema genésico le trataré en toda su generalidad, viniendo después a considerar los casos particulares.

De las observaciones de campo, comprobadas experimentalmente, al menos en parte, por los trabajos de laboratorio de Niggli, admitimos actualmente tres períodos en la consolidación de un batolito granítico, caso que ahora considero. Dichos períodos los denominamos, como ustedes saben, ortomagmático, neumatolítico o pegmatítico e hidrotermal, de cuya teoría ha dado cuenta en una notable conferencia mi colega Roso de Luna. También ha disertado ampliamente sobre el tema mi admirado amigo y respetado jefe señor Gavala, quien me hace el honor de sentarse esta noche en el sillón presidencial con su investidura de Director General de Minas, cargo que en este caso no es más que el velo con que se adorna la sabiduría.

Puedo, por consiguiente, intentar la respuesta a la pregunta: ¿Es posible que en el período ortomagmático se consoliden minerales de uranio?

Evidentemente. Durante tal período se constituyen como elementos de primera consolidación diversos minerales radiactivos, y por ello encontramos muchos granitos, sienitas, dioritas, etcétera, que presentan dicho fenómeno, siendo notable que el proceso ha dejado marcado gráficamente su acción, porque tratándose de un bombardeo de una artillería de igual alcance ha determinado en algunos minerales una serie de esferas concéntricas de ionización, que al seccionarlas para formar la preparación se nos presentan luego al microscopio como unas coronas, que denominamos «aureolas pleocroicas», en cuyo centro, a poco que se investigue, encontramos siempre un mineral radiactivo, que puede ser un zircón, un apatito, una magnetita, una turmalina, etc., etc. Lo que sucede es que la radiactividad resulta muy pequeña, pues varía entre $3,30 \cdot 10^{-12}$ a $4,78 \cdot 10^{-12}$ gramos de radio por gramo de roca entre los granitos y alguna sienita, por lo cual no debemos prestarles

ahora mayor atención, toda vez que no constituyen actualmente verdaderas menas.

Consideraré, por consiguiente, el período neumatolítico o pegmatítico, y para ello partiré de una investigación realizada en nuestro laboratorio. Para la tesis doctoral de la señorita Pérez Mateos que, a petición de la interesada, tuve el gusto de dirigir, propuse como tema una investigación de ciencia pura, claro es, que cito, además, para que pueda verse cómo una investigación de este tipo suele llevar aparejada alguna consecuencia de carácter práctico. Yo había observado que algunas turmalinas, en la platina del microscopio, ofrecen una mancha azul, como habrán también visto muchos mineralogistas y petrólogos, pero nadie había investigado la causa de este fenómeno. Se estudiaron muchas turmalinas de las más variadas procedencias y en algunas de ellas, mi colega de laboratorio López de Azcona, que dirigía los análisis espectrales, encontró por primera vez el plomo, lo que constituye un éxito de este investigador. Nos colocamos un poco en guardia, por si se trataba de un polizón que se hubiese introducido en el navío. Se repitieron los ensayos y se realizaron contraensayos, hasta que tuvimos la seguridad de que se trataba de un pasajero con todos sus derechos. Esto era una complicación ajena a la tesis, en la que se puso en claro, según ha sido publicado, la procedencia y naturaleza de las manchas azules, terminando así la antedicha señorita su trabajo, que dicho sea en su obsequio, ya que ha tenido la delicadeza de venir a escucharme, mereció la calificación de sobresaliente y el premio extraordinario del doctorado. Después, López de Azcona y yo hubimos de pensar un poco sobre la existencia del plomo.

No puede existir ninguna duda de que la turmalina es un mineral esencialmente neumatolítico, mientras que el

plomo corriente es hidrotermal, de manera que no cabe más que formular una hipótesis que aúne ambos criterios tan dispares. Ese plomo tiene que ser un residuo uránico o tórico, ha de ser la última etapa de desintegración de un mineral radiactivo, lo que, actualmente, no podemos demostrar experimentalmente, porque carecemos de un espectrógrafo de masas, el cual aspiramos conseguir, así como un microscopio electrónico, si la Superioridad nos ayuda, porque no en vano nos dirige don Agustín Marín, bondadoso maestro de todos, quien por hallarse actualmente de viaje no asiste a esta conferencia, lo que celebro, porque así puedo decir con mayor libertad que por haber trabajado muchos años en nuestro laboratorio, con el éxito de todos conocido, siento nuestras propias inquietudes y está tan convencido como nosotros de que estas curiosidades científicas de hoy son el pan de la industria del día de mañana. Al fin y al cabo la industria no es más que poner al alcance de muchos, la curiosidad satisfecha por unos pocos.

De todos modos, podemos comprobar nuestra hipótesis, porque si es cierto que ese plomo procede de un uranio neumatolítico, en aquellas rocas que la Naturaleza nos ofrece como formadas durante este período de consolidación del magma, en las que sabemos se halla la turmalina, debemos encontrar también, alguna vez, minerales de uranio. Y en efecto, dentro de la pegmatita granítica hallamos consolidados todos los que figuran en la segunda agrupación gráfica que he proyectado y casi la totalidad de los de la primera.

De manera que las condiciones magmáticas correspondientes a este período neumatolítico, que como saben ustedes se caracteriza por una temperatura que varía de unos 450° a unos 700° como máximo (de lo cual podemos dar-

nos cuenta utilizando los minerales como termómetros geológicos y también porque su cuarzo lo es de baja temperatura, ya que se trata del estado que no ha llegado al punto de inversión), reinando en la cámara fuera de la fase sólida, un estado casi general de vaporización o de gasificación, con bastantes materias volátiles, y con una extraordinaria tensión interna de tales gases y vapores que pugnan por salir al exterior, son condiciones aptas, según revelan los criaderos, para la fijación del uranio.

Considero, finalmente, el período hidrotermal. Tengo aquí un ejemplar de pechblenda, procedente de Sierra Albarrana, de la provincia de Córdoba, donde ha realizado notables estudios y trabajos un querido compañero mío de promoción, Carbonell, cuyo ejemplar es una fuente de filosofía. Filosofía *de campo*, diría un geólogo, bien distinta por cierto, de esa otra filosofía *de cátedra*, donde el sabio tanto sutaliza y especula.

La inmensa mayoría de los fenómenos naturales son polifásicos, incluso la vida, que no depende de sí misma, sino también del medio que la rodea, con sus caracteres de temperatura, presión, composición química, etc., etc. Así, nuestra vida, aparte de sostenerse por el favor de la Naturaleza, establece unas relaciones físicas y químicas del hombre con el mundo y del mundo con el hombre, presididas por la inteligencia, que quiere arrancar al mundo el concepto científico que secretamente encierra. Pero, a poco que analicemos el comportamiento mutuo en estas relaciones, veremos que el hombre actúa como un catalizador o si ustedes me permiten que hable a la moda frívola diré que el hombre «es un gran animador». Acelera todas las reacciones y precipita todos los fenómenos naturales. Por esto quema la madera sin esperar a que carbonice y la hulla sin aguardar a que se convierta en antracita,

y cuando inventa la carbonización, como todas sus grandes síntesis industriales, parece que tiene fija la idea de un rápido envejecimiento. Visto está que en una hora de angustia quisiera desintegrar todo el uranio que a la Tierra le ha costado mucho tiempo integrar y conservar, pues para este ejemplar de pechblenda ha calculado mi colega López de Azcona, por el método de medida que actualmente se emplea y que expuso en su notable conferencia, una edad de 511 millones de años, correspondiente al final del Culm, determinación que ha sido aceptada por la Comisión internacional de medida del Tiempo Geológico, de Washington. Para otro ejemplar de pechblenda del Katanga, en el Congo Belga, que como saben ustedes ha estado casi monopolizando la producción de radio antes de la guerra, se ha calculado, análogamente, una edad de 650 millones de años. Vejez respetable, pero no respetada. El hombre tiene prisa, porque ha de vivir deprisa quien se siente perseguido por la muerte.

De manera que ese «quehacer del hombre con las cosas», al que Ortega y Gasset llama *la vida*, es un «quehacer de deshacer». No es responsable, porque Dios ha puesto el mundo en sus manos para que juegue con él, infantil diversión que ya nos descubrió Lavoisier con su célebre aforismo, porque el hombre transforma y cataliza, pero nada más, ya que le ha de ser muy difícil destruir a quien no tiene la facultad de crear.

Pero, a la voz del hombre que grita «todo en seguida», nuestra Tierra responde «poco a poco», porque realiza todos sus procesos íntimos con tal lentitud, con tan escasa velocidad, que hace falta ser geólogo para medirla o apreciarla. Su función es constructiva, como lo prueba este ejemplar de pechblenda, que en manos del hombre hubiera podido ser una bomba atómica y en el regazo de la Tierra no ha

pasado de ser un bello ejemplar para la vitrina de nuestro museo.

De manera que el «quehacer de la Tierra con sus cosas» es un «quehacer de construir», lo cual, dentro de esa doctrina filosófica, nos representa *la muerte*; de perfecto acuerdo con mi modo de pensar, porque recordarán ustedes que en mi última conferencia expuse cómo, a mi juicio, por un mero proceso de deshidratación todo evoluciona en el mundo hacia un estado cristalino de perfección, y por ello llegaba a la natural consecuencia de que el hombre eterno sería un hombre de cristal. Dicho estado general sólo es compatible con la muerte.

La Tierra quiere morir, pero callándolo, ocultándolo, disimulándolo. Parece que es ella quien ha dictado al oído de nuestra Mística del Siglo de Oro aquellas palabras, tan llenas de armonía:

Ven muerte, tan escondida,
que no te sienta venir,
porque el placer de morir,
no me vuelva a dar la vida.

lo cual, no sólo es la imagen de una llama que inflama una conciencia, sino que responde, como vemos, a un concepto filosófico del mundo y de la vida.

Este ejemplar llegó a nuestro laboratorio envuelto en la duda de si sería una especie nueva, dada su forma exagonal. Fué estudiado por mis colegas López de Azcona y Abbad, pues descarto la insignificante participación que tomé observando algunas preparaciones microscópicas y queda todo el mérito para mis colaboradores. Se averiguó que era una pseudomorfosis de berilo, esto es, una pechblenda que se nos presentaba con un disfraz de berilo. Pero el laboratorio le ha quitado el antifaz. Y aquí viene ya la primera maravilla.

Decir berilo, es decir estructura cristalina, estructura reticular, constituida en este caso por tenues celdillas exagonales, íntimamente acopladas y dispuestas cada una a dar aposento a los átomos, los cuales, por intercambios electrónicos, se enlazan mutuamente para constituir la molécula, y no hemos de perder de vista que la dimensión atómica es del orden de 10^{-8} centímetros, o sea de la diezmillonésima de milímetro. Ha de resultar maravilloso cómo en un edificio constituido para tales pigmeos, han podido venir a alojarse después todos los saurios, elefantes, mastodontes y hasta los grandes monstruos ideados por la mitología, puesto que así son, y aún peco mucho por defecto, las partículas que llegaban de esta pechblenda. Dada su naturaleza coloide, demostrada por Abbad con su análisis röntgenográfico y por mí examinada al microscopio, sabemos que es un gel desecado y que, por consiguiente, ha sido un hidrosol, esto es, una suspensión coloidal de finas partículas dispersas en el agua. De modo que en este caso, como en tantos otros, no podemos hablar de una sustitución de molécula a molécula, como antes se decía, para explicar el fenómeno metasomático, sino de una sustitución de partícula a partícula, en la que el hidrosol ha procedido con cierta delicadeza al adueñarse totalmente del edificio, porque tuvo el rasgo de respetar el contorno cristalino exagonal de la cuna donde nació su rival, el berilo primitivo. Obsérvese, que en este caso, por tratarse de una sustitución, venía impuesta la forma, pues de haber coagulado el gel libremente, claro es que lo hubiera hecho en una de las formas de crecimiento de la materia coloide, que ya expuse en mi conferencia anterior.

Y llegamos de nuevo a otro fenómeno admirable. Como saben ustedes, el berilo es un silicato de alúmina y berilio, o mejor un silico-aluminato de berilio con varias impure-

zas. Sabemos también, por las experiencias del matrimonio Joliot-Curie, que bombardeando átomos de berilio con partículas α procedentes del polonio se desprenden unos corpúsculos que estudiados después por Chadwick recibieron el nombre de «neutrones», los cuales, por carecer de carga eléctrica, son sumamente aptos para penetrar en los átomos complejos, y son, por tanto, excelentes percutores o detonadores para los átomos de uranio. Igualmente sabemos por las experiencias de Fermi, proseguidas por Hahn, Meitner, Strassmann y otros operadores, que cuando se bombardean los átomos de uranio con ruptura de núcleo, se desprende una gran cantidad de energía y que resulta ventajoso, por varias razones, el frenado de los neutrones, la primera para dar más tiempo a que pueda ser absorbido por el núcleo. Pues bien, con estos conocimientos elementales, podemos pensar que los átomos de berilio que el berilo posee, cuando llegase una partícula del polonio contenido en la pechblenda, recibirían el bombardeo de las partículas α y desprenderían neutrones, que incluso frenados por el hidrógeno y hasta por el deuterio que el agua contiene, con el consiguiente efecto de los deuteriones, podrían haber hecho estallar a los núcleos de un U 235, o quien sabe si de un plutonio natural contenido en esta pechblenda, con tal energía que teóricamente bastaría un cubo de 0,40 metros de lado para sustituir durante un año a todas nuestras centrales eléctricas, térmicas e hidráulicas, cuya producción puede cifrarse en unos 5.000 millones de kilowatios-hora.

Nada de esto ha sucedido, porque la Naturaleza no ha querido tener la picardía del hombre. El berilo estaba en enlaces moleculares complicados y con varias impurezas; no se han producido sólo las radiaciones α sino también las β y las γ ; son necesarios muchos proyectiles para lograr

un impacto; el uranio no era todo él inestable y también estaba muy impuro en la pechblenda, etc. En resolución, que se han producido muchos fenómenos de compensación y amortiguamiento, lo cual prueba, a mi juicio, y dicho sea para tranquilizar a las damas, que tanto me favorecen dando la única nota de color y de belleza en esta monótona conferencia, la imposibilidad de que el hombre incendie la Tierra.

El incendio de la Tierra ya ha sido tema explotado en la novela de nuestro tiempo, porque hay que convenir que cuando la ciencia se hace popular se convierte en literatura. Si ustedes me permiten una digresión yo les recordaré que los literatos y pensadores de todas las épocas han discurrido, sutilmente, para idear nuevas definiciones que pudieran añadirse, como prendidos o adornos, a la natural del hombre y, a mi juicio, no están muy lejos de la realidad los que nos dicen que el hombre es un «animal trágico». Es natural que lo sea, porque desde cualquier punto de su efímera existencia que quiera contemplar el ayer o el mañana, siempre se encara con la muerte. Por esto, en sus primeros balbuceos literarios inventa la tragedia, en la que si es cierto que canta la sangre, no es menos que también glorifica a los dioses, con lo cual nos demuestra que si no es excesivamente bueno, tampoco es infinitamente malo. Ya decía Platón, que si se organizase un concurso de crímenes sería muy difícil otorgar el premio, dando a entender que no existiría ninguno ni máximo ni perfecto. Y como quiera que el hombre apenas ha evolucionado en ese insignificante lapso geológico de veinticuatro siglos, yo creo que podemos seguir pensando lo mismo, a pesar de la bomba atómica.

Es cierto que Nernst, el sabio físico alemán, dijo hace años, viendo el rumbo que tomaba la investigación del

átomo, que vivimos en una isla de algodón-pólvora, para la que el hombre no había encontrado la cerilla. Ya la encontró, pero ahora resulta que la cerilla se apaga antes de inflamar al algodón. Es natural que así sea, porque el hombre fué creado por Dios en el momento preciso para que no pudiera cometer tales diabluras, entregándole una Tierra que no es más que las cenizas de un incendio, en el que ha quedado muy poco uranio por arder.

El hombre podrá destruir lo suyo, porque, evidentemente, quien hace una cosa tiene poder bastante para deshacerla, y así podrá borrar ciudades y países de su mapa, e incluso la civilización actual con falaz preocupación, porque la historia nos dice que las civilizaciones se estratifican y que por encima de todos los escombros se alza siempre una nueva Roma.

Terminando con este ejemplar de pechblenda, ya queda dicho que se ha formado en una suspensión acuosa, y aunque quisiéramos ignorar que la temperatura aumenta a medida que profundizamos en la Tierra, y aunque olvidásemos que existen manantiales termales, hemos de admitir que por tratarse de un proceso radiactivo se ha producido calor. Se ha formado en agua caliente. Es, por tanto, una génesis hidrotermal.

Cabe considerar, todavía, otros modos de formación, pero sólo como génesis secundaria, puesto que ya he consignado los tres períodos magmáticos. Por mi experiencia de laboratorio me parece ver en los geles de uranio propiedades análogas a los de estaño, y singularmente la propensión a peptizar, esto es, a ponerse de nuevo en suspensión, y claro es que a formar una disolución verdadera cuando el agua contiene elementos aptos para provocarla. Cuando el fenómeno se produce en el seno del mismo filón se obtienen concentraciones secundarias, re-

mociones internas que ya extrañaban a De Launay, y a todos los tratadistas que nos han hablado del célebre criadero de Joachimsthal, en Checoslovaquia, y otros análogos.

Cuando este fenómeno se ha producido en los grandes crestones que han debido existir en la Naturaleza, a los que el agua ataca fácilmente por una acción de superficie que tan en alto grado presenta la materia coloide, o formando, como he dicho, verdaderas disoluciones, además de los fenómenos internos del filón las aguas superficiales arrastran partículas o sales disueltas, dispuestas a depositarse en cuantas pequeñas fisuras o fracturas encuentren a su paso y de esta manera se forman, a mi juicio, algunas costras de pechblenda, que podemos encontrar en el seno de algunas rocas, cuya génesis uranífera pudiera ser también primaria, por lo cual será preciso un estudio especial en cada caso particular.

Tales aguas mineralizadas irán, por otra parte, a desembocar en un lago o en un mar, y si es cierta la hipótesis genésica que vengo considerando, en esas aguas y en las formaciones sedimentarias correspondientes hemos de encontrar fenómenos de radiactividad. En efecto, el agua de mar contiene $0,94.10^{-12}$ gramos de radio por kilogramo, según Eve, y encontramos calizas, areniscas, pizarras, etc., que también son radiactivas, en términos que varían de $0,12$ a $2,92.10^{-12}$, siendo digno de señalar que la caliza oolítica es la que parece presentar más acusadamente el fenómeno. Como dato también curioso citaré que, según Moore y Kithil, la arenisca del techo de la región de la carnotita de Colorado y Utah varía entre 3.10^{-12} y 262.10^{-12} gramos de radio por gramo de roca, y la arenisca situada a $0,90$ m. por encima de la capa del mineral de Skull Creek contiene $262,8.10^{-12}$ gramos de radio por gramo de roca.

En cuanto a la génesis de la autunita es necesario, además, el concurso del fósforo y del calcio. El primer elemento ya sabemos lo abundante que es y que se consolida en los tres períodos magmáticos, lo mismo que el calcio. Se la considera como secundaria, ya que suele presentarse con la uranita y otros minerales de uranio, en ocasiones acompañando a la plata, estaño, wolframio y menas de Fe, etc. Se presenta en las pegmatitas, en las que se disemina, como también en las aplitas y pórfiros, concentrándose a veces en las hendiduras de tales rocas o en otras con ellas relacionadas.

Para la torbernita, que también suele acompañar a la autunita y a otros minerales de uranio, en formaciones geológicas análogas a la primera, también se la considera como secundaria, y debe serlo, porque a 100° se deshidrata y se convierte en metatorbenita, de propiedades ópticas algo diferentes, demostrando que es un mineral de baja temperatura. Esto explica que se encuentre tanto en zonas de fosforita como en zonas de cobre, bastando en ambas la presencia del uranio para su formación hidrotermal. Para una torbernita de Colmenarejo ha determinado López de Azcona una edad de 434 millones de años, más joven que la autunita y que la pechblenda antes citada.

Dedicaré, finalmente, unas palabras a la génesis de la carnotita, para cuya formación es necesario el concurso del vanadio. Este último elemento se hace digno de alguna sospecha, porque es abundantísimo en la Naturaleza sin que tenga formaciones genésicas de grandes masas. Claro es que se halla en alto grado de dispersión, pero los biólogos nos dicen que le poseen los seres orgánicos, e incluso se ha pensado en acciones bacterianas de fijación, y nosotros le encontramos profusamente repartido, si bien, como he dicho, en escasa proporción, en diversos coloides

como la bauxita, la arcilla, etc.; en las capas de carbón retenido por un proceso de fácil explicación y produciendo acciones superficiales en algunos filones de plomo, de cobre y de cinc y otros metales, en forma de vanadatos que desaparecen, generalmente, a cierta profundidad, etcétera, etcétera.

Su génesis, por el contrario, es bastante limitada, porque su fuente primaria es la segregación magmática profunda en los magmas básicos, tales como las noritas de Ilmenita, de Ekersund, en las que se han formado nódulos de hierro titanado con espinela cromífera; o como la hiperita de olivino de Taberg, que ha segregado magnetitas titaníferas con vanadio (0,12 a 0,40 % de ácido vanádico), encajadas en una peridotita de magnetita; como también le contienen las titanomagnetitas de Adirondacks (New York) y otros criaderos análogos. Todo esto quiere decirnos que el vanadio tiene una gran simpatía con el titanio y con el hierro, porque sabemos que también se encuentra, aunque como meros indicios, en diversos minerales ferromagnésicos de primera consolidación, como algunas micas, piroxenos, anfíboles, ilmenitas, titanitas, etc., que suelen ser titaníferos y, desde luego, las dos últimas lo son.

Esto quedará justificado si acudimos al sistema periódico donde encontramos al vanadio entre el titanio y el cromo, así como debajo del fósforo, con el que guarda íntimas analogías químicas, como con aquellos dos posee relaciones genésicas. Pero como antes indicaba, si el vanadio que existe en la Naturaleza ha de proceder del lavado y desintegración de tan escasos criaderos y si tal vez los seres vivos consumen algo en el recambio, parece a primera vista —y claro es que no se trata más que de una hipótesis sin comprobación posible—, que si se efectuase un balance se hallaría un superávit a favor del vanadio super-

ficial. La explicación podríamos hallarla en el hecho siguiente: sabemos que un



isotopo del V 51, absorbiendo electrones, se transforma en



y como quiera que muchos de estos fenómenos son reversibles, cabe pensar que el titanio, por absorción de un protón lento y modificando su estructura, pudiera convertirse en un vanadio. Como el titanio es mucho más abundante en la Naturaleza quedaría justificada también la frecuente presencia del vanadio.

Por un proceso metasomático, las aguas vanadíferas pueden producir la roscoelita, que no es más que una moscovita en finas escamas, en las que el vanadio ha reemplazado parcialmente al aluminio, que una vez concentrada por la Naturaleza en bordes costeros de un lago o de un mar, puede servir de cemento a una arenisca y producir un criadero de vanadio, como los de Colorado, por ejemplo.

Llego ya a la génesis de la carnotita. La asociación del vanadio con el uranio se ha puesto de manifiesto en diversos criaderos, y ya se conocía en Joachimsthal, por ejemplo. Justificada la existencia de las aguas, conjuntamente vanadíferas y uraníferas, en un proceso secundario análogo al de la roscoelita citada, claro es que el depósito que llevan potencialmente en su seno puede constituir el cemento de una arenisca como formación original o sustituir metasomáticamente al que existía en dicha arenisca. Carezco de experiencia acerca de los criaderos de carnotita, porque no los he visitado y, por consiguiente, cuanto digo

acerca de ellos está basado en lecturas, tal vez insuficientes y confusas, porque no les acompañan fotomicrografías, e ignoro si la carnotita se presenta siempre cristalizada o si se halla también como un coloide, aunque por la variedad de los resultados de análisis químicos y singularmente de la carnotita cálcica, parece que se trata, a veces, de lo segundo, y que tal vez la carnotita ha sustituido al primitivo cemento, que pudiera ser un carbonato cálcico, por un proceso análogo al de algunos criaderos de hierro oolítico.

Puesto que los criaderos en Colorado y Utah se presentan en bolsadas, dentro de una arenisca jurásica, parece lógico pensar que se trata de criaderos epigenésicos, esto es, que las aguas metalíferas llegaron después del depósito de la arenisca, lo que viene a confirmar el razonamiento anterior. Una formación análoga encontramos en las areniscas cupríferas, que pueden ser singenésicas, como las de Biel, o epigenésicas, como una de Marruecos, de cuyos estudios, realizados en mi laboratorio, pude pronosticar lo que luego ha sancionado la investigación de los criaderos.

* * *

Pudiera creerse que siendo tan diversos los modos de formación de los criaderos de uranio, ha de ser sumamente difícil su prospección. Nada de eso. En cuanto a los secundarios, tenemos arquitecturas geológicas en España que tal vez pudieran contenerlos y que han sido ignorados, porque a decir verdad, los electroscopios y electrómetros no habían figurado hasta ahora en nuestros equipos de campo; y en cuanto a los primarios están relacionados, en todo el mundo, con rocas graníticas, donde pueden estar encajados, o bien hallarse en las pizarras contiguas, que ge-

neralmente son cristalinas por el metamorfismo sufrido y a las que han llegado apófisis en forma de diques o filones.

Es lástima que haya hablado de la pegmatita granítica sin más tiempo que el necesario para citarla, ya que su estudio podría llenar por entero toda una conferencia. Sólo añadiré que nos es conocido el proceso en virtud del cual un residuo pegmatítico puede convertirse en aplítico, o sea, que en vez de consolidarse una pegmatita se obtenga una aplita, como también en su lugar podemos encontrar un dique de feldespato y mica, o de cuarzo y mica, o de cuarzo y feldespato como productos binarios, y hasta el caso límite de un dique de cuarzo, de modo que en todas estas rocas, bien sea encajadas en el granito o en las pizarras, podemos encontrar los minerales de uranio. Lo propio sucede con los diques porfíricos graníticos.

Intimamente relacionada con tales apófisis existe una roca, a la que los petrólogos franceses del siglo pasado dieron el nombre inoportuno de *granulite*, toda vez que en la escuela petrológica alemana existe también otra roca denominada *granulit*, que ningún parentesco tiene con aquélla, ya que corresponde a nuestra *leptinita* —nombre que tomamos también de la terminología francesa—, por todo lo cual, y para evitar confusiones, yo prefiero denominarla según su constitución mineralógica: *granito de dos micas* o *granito de mica blanca*, pero me agradaría denominarla *granulita*, porque estoy convencido que responde a un estado especial de un magma granítico, al que por ello debiéramos considerar como magma *granulítico*. Desde luego, es una roca metamórfica por endomorfismo primario, que en España se caracteriza porque generalmente es cataclástica, y por haber sufrido una recristalización, como lo prueba, entre otros detalles, el que los feldespatos contengan inclusiones de cuarzo, lo que no sucede

en un granito normal, donde el cuarzo, como saben ustedes, es el último mineral que se consolida, y viene a rellenar los huecos existentes entre los demás minerales. Es abundante en Galicia, en todo el NO. y en otras regiones españolas.

Además, estarán ustedes conformes conmigo en que tiene un modo peculiar de yacer en la Naturaleza, pues siempre la habrán encontrado, bien dentro de los macizos graníticos, formando masas más o menos considerables, bien al borde de dichos macizos. Es también muy frecuente que cuando la encontramos como facies de aureola se haga porfiroide, lo cual no deja de ser extraordinario, porque precisamente en los bordes es donde mayor ha debido ser la pérdida de calor por conductibilidad. Es este un fenómeno que creo tener estudiado, pero que no dispongo de tiempo para exponerle. Baste decir que no debe ser ajeno al mismo la radiactividad, porque es muy frecuente que esta roca, cuya relación con los criaderos de estaño, wolframio, molibdeno, uranio, etc., es evidente, contiene helio, litio y, a veces, berilio, elementos que figuran en los primeros lugares del sistema periódico y que pueden obtenerse por diversas transmutaciones, actualmente bien conocidas.

Por su composición química estas rocas también están muy ligadas a las pegmatitas, aplitas y pórfiros graníticos, de manera que, en mi opinión, tienen gran importancia para la génesis que vengo considerando.

* * *

Expuesto, a grandes pinceladas y con tosco pincel, este boceto genésico de los criaderos de uranio, aquí debiera

terminar mi conferencia. Pero han visto ustedes, que para hablar un poco de génesis, he tenido que referirme a la mineralogía, petrología, física, química y geología, por lo cual los geólogos que tienen la amabilidad de escucharme, entre los que se encuentran los más eminentes de España, pudieran creer que yo no atribuyo a la geología más que un mero papel secundario o auxiliar, y como esto se halla en el polo opuesto de mi pensamiento, me veo precisado a seguir beneficiándome de su atención unos minutos.

Las relaciones entre la geología y la física ofrecen múltiples y variados aspectos, pero yo intentaré considerar el más elevado de todos desde esa cimera que culmina a todas las ciencias, o sea, desde el punto de vista de la *filosofía natural*. Yo entiendo que el ingeniero de minas está obligado a estudiar no sólo la génesis de los criaderos minerales, sino también otros muchos problemas que la geología le plantea, a la luz de la física atómica y de la físico-química y a todas las luces del progreso humano; pero sólo allí, donde tanto los métodos que emplea como el instrumental que utiliza —microscopios, espectrógrafos, rayos X, etc.— le advierten a cada paso que está manejando el microcosmos y que es un físico. Pero, fuera de su laboratorio, cuando contempla un filón alumbrado por una lámpara de mina o una montaña iluminada por el sol, es un andariego del mundo, y su brújula, su martillo y lo rudimentario de su equipo le dicen que allí no puede experimentar, que puede consignar en su diario cuanto de notable advierta, pero nada más, porque su ciencia es un puro observar y un puro discurrir. Es un geólogo.

Desde esa altura, a poco que reflexione verá, que en la composición vectorial en la que cada vector nos representa una ciencia o un saber, y cuya resultante denominamos *filosofía natural*, el geólogo está profundamente capacita-

do para trazar el vector predominante, el vector principal. No diré tanto como que él deba ser el único rector o director de dicha filosofía, pero sí me atrevo a afirmar, que no tiene por qué aceptar la que algunos físicos actuales tratan de imponer, porque ni la física ni la química podrán aclararle jamás el misterio de un filón —que no es un mero vaso de precipitados—, para no citar más que un fenómeno de los mil que el geólogo contempla y estudia.

Desde esa cima podrá también compulsar lo que él lee en el magno libro de la Naturaleza, que no le dice más que de canon, orden y medida, con sus lecturas de laboratorio, donde unos físicos le hablan de quiebra del determinismo, del azar, del caos, y hasta algún historiador de la ciencia —que se anticipa a los acontecimientos— de «caprichos» de la Naturaleza.

Combatir al determinismo no es cosa nueva, y en atención a aquellos de mis compañeros, que por su vida profesional están algo alejados de estos conflictos filosóficos que a veces la investigación científica plantea, expondré el fondo de la cuestión con palabra clara y desnuda. Combatir al determinismo, que es la traducción epistemológica del principio de causalidad, es querer destruir una de las célebres «vías» de Santo Tomás; es querer anular ese razonamiento deductivo por el cual el hombre se eleva al conocimiento de la causa primera; es querer derrumbar la prueba ontológica de la existencia de Dios. Y esto no es nuevo. Ya le combatió el empirismo, el materialismo y el positivismo extremistas, pues los moderados ha de practicarlos todo el que cultiva una ciencia, pero con la moderación que impone la razón, lo cual conduce a nuestro intelectualismo. Y tales combates no han sido óbice para que el hombre haya seguido discurriendo con el único modo de pensar de que dispone, desde que Aristóteles analizó «la

causa» hasta nuestros días, y a cuyo método se debe todo el progreso humano.

Impugnar al determinismo es una actitud filosófica, y no puede constituir una posición científica. Por ello, lo que sí es nuevo es que le niegue una ciencia, porque el principio de causalidad, como el de contradicción y otros varios, son fuentes de conocimiento que llevan muchos siglos manando allá en el campo de la filosofía, para que en ellas sacie su sed el sediento que guste del agua cristalina, pero sin que se obligue a nadie, de la misma manera que cada ciencia tiene sus propios y peculiares principios a disposición de las demás que quieran utilizarlos, sin imponérselos a ninguna. Lo que está prohibido a una ciencia es decidir la validez o invalidez de un principio que le es ajeno, porque ese juicio ha de carecer de certeza por carecer de suficiencia. Y es aun más anómalo que le contradiga la física, porque a petición de las antedichas doctrinas filosóficas, se había convenido que todo cuanto no sea objeto de experimentación queda al margen de dicha ciencia, y el principio de causalidad es metafísico. Y todavía resulta más inadmisibile que se establezca un razonamiento en que cada frase y casi cada oración gramatical es pleno reconocimiento de la existencia de la causa, puesto que refiriéndose al «experimento ideal»—que en realidad ya no es físico— de la «imposible iluminación» de un electrón, se reconoce la aberración como *causa* de una perturbación; el efecto Doppler, como *causa* de la variación de la longitud de onda; el efecto Compton, como *causa* del impulso, etcétera, para acabar negando dicho principio.

La física no podrá decretar el indeterminismo del mundo atómico, único que se considera, hasta que disponga de una geometría de 276 dimensiones, y esto es tanto como

decir que existen causas tan íntimas, tan ocultas, que el hombre no puede descifrar.

Si a la geología se le privase de la investigación de la causa, perdería todos sus bellos atractivos y nadie cultivaría esta ciencia. En la Naturaleza nos son dados hechos reales: un filón, una capa de carbón. Podríamos explotarlos sin más reflexiones, pero procederíamos entonces como el topo, a quien también se le da la Tierra para que mine y viva de su minería. Pero el hombre siente el noble deseo de satisfacer el ansia de su espíritu, y no sólo por este impulso, que pudiera ser egoísta, sino con la mirada tendida hacia los demás, abriga la creencia evidente, aunque esto no figure en el principio de causalidad, de que conociendo la causa es más dueño del fenómeno y podrá predecir otros análogos, por todo lo cual se remonta a su investigación. Así nosotros nos elevamos al estudio de la génesis, porque conociéndola estaremos en mejores condiciones de descubrir nuevos criaderos de uranio, de los cuales puedan beneficiarse todos los españoles y toda la humanidad. De esta manera se crea una metalogenia, una geología, una ciencia universal en la que todavía no ha nacido, gracias a Dios, un geólogo que sostenga que un criadero se haya formado sin causa.

Por otra parte, la indeterminación lleva consigo el azar y el caos. Esta es, igualmente, una cuestión filosófica, pero puesto que a ella se nos invita a entrar, entremos como geólogos. Para Kant y los conceptualistas, limitándome a estas doctrinas, porque son las que han tenido gran influencia en la ciencia de este siglo, la Naturaleza se nos muestra como un caos y el orden le introducimos nosotros. Dificilmente puede compartir esta opinión un geólogo, porque sabe que en la Tierra ha existido un orden en sus movimientos, un orden en sus sedimentaciones, un orden

de equilibrio entre sus mares y continentes y que cuando algún orden se ha perturbado, ha vuelto a restablecerse. Y todos estos órdenes y otros muchos más, ya regían antes de que el hombre apareciera. La geología de los asirios y de los caldeos era muy diferente a la actual, y la Tierra, como su orden, continúa siendo la misma. No; la realidad no se nos ofrece nunca como un caos, sino que somos nosotros los que le introducimos cuando queremos *interpretar* los fenómenos, que es el verdadero papel de la ciencia. Si yo, para estudiar una roca compacta y homogénea hago explotar un barreno, con el fin de obtener una muestra, no debe extrañarme que al observar su preparación microscópica, se me presente la indeterminación de si las fisuras que contemplo serán naturales en la roca o si serán debidas al barreno. Si estrangulamos un río para practicar un aforo, o la luz para estudiar la difracción, no debe extrañarnos que encontremos un fenómeno perturbado. Si yo, en la superficie de un lago, tensa y tranquila, arrojo un puñado de arena cuarzosa, en el fondo obtendré un orden de sedimentación, cuya causa puedo investigar y conocer, y hasta tratar matemáticamente el fenómeno, pero es porque no he intervenido en él y se ha verificado como si nadie le observase. Pero si para observarle, me veo precisado a agitar el agua, o dar a cada grano de arena un impulso, yo podré calcular el error que cometo, pero lo que no podré evitar es que en el fondo del lago obtenga una sedimentación confusa, un desorden, un caos, que yo he introducido y del cual soy el único responsable. Un caso bastante análogo a éste es el que, como ustedes saben, se presenta en la «iluminación» del electrón. Es de esperar que la ciencia salve la aparente dualidad del mundo físico.

Dejando aparte la física nuclear, que ya va siendo el nuevo nombre de la física (aunque a la atómica le aguar-

dan, ciertamente, muchos días de gloria, y actualmente está pasando por ellos, porque hace muy pocas horas que se ha dado la noticia de que en Estados Unidos ha sido obtenido el *mesotrón*, la célebre «partícula de Yukawa» o electrón pesado, con más de 100 masas electrónicas, que este sabio físico japonés profetizó hace unos años en los rayos cósmicos, diciendo que era de tan corta vida que pasaba inadvertida por el hombre, lo que ya se había comprobado en dos experiencias distintas, resultando que, en efecto, su vida no es más que de 4 ó 5 millonésimas de segundo), la física de la «ondícula» del sabio Eddington, o sea, de la envoltura electrónica, está tocando a su fin, porque no pudiendo ser experimental, ha sido entregada a un simbolismo matemático, que se muestra inexorable con los viejos conceptos. Como no se conocen, experimentalmente, más que frecuencias espectrales e intensidades, y no es posible conocer la trayectoria del electrón, han tenido que renunciar a estudiarla, porque no es lo malo que el electrón hubiese dejado de ser un ente material para convertirse en ente de razón, sino que goza de ambos caracteres a la vez, toda vez que es corpúsculo y onda, o como dijo gráficamente Plank, hablando de la luz: «tiene naturaleza de centauro». Si la geología hubiera de prescindir de la trayectoria, incluso de la caída de los graves, habría de renunciar a la estratigrafía y a la tectónica y no podría ser una ciencia. Hartas dificultades se le presentan con el enigma de la trayectoria de los magmas internos, y todos sabemos que no son pocas las complicaciones que le ofrece el estudio de una capa de arrastre, cuando no se vislumbra su camino recorrido.

Tampoco puede, ni podrá jamás, tener el físico una imagen del átomo, porque para que el hombre pudiera tener una idea del átomo de uranio tendría que vivir en un mun-

do de 276 dimensiones. ¡La física de las realidades positivas ni siquiera puede ofrecer imágenes de sus fenómenos!

Forzoso es reconocer que todo ha ido bien en la ciencia hasta que el hombre ha querido investigar esos misteriosos linderos que existen entre la materia —o la energía— y la nada (puesto que el electrón es casi la nada y hasta se ha hablado de una masa cero en el neutrino), o entre la célula y la vida, en cuyos casos es la propia ciencia quien dice que no se puede observar el electrón sin alterarle, como tampoco puede observarse la vida sin matarla. El empirismo, el materialismo y el positivismo omnipotentes y omniscientes, para los que no existían enigmas ni secretos, se hallan ahora estrellados ante la barrera impenetrable de «un más allá». Hay que conformarse con una onda de probabilidad, con un tratamiento racional, matemático. La realidad tangible se ha recluso en el misterio, pero en un misterio estadístico, probable, matemático.

Esto ha tenido una saludable reacción. Muchos hombres de ciencia, algunos de ellos eminentes, han roto garfios y ligaduras de viejos prejuicios, y han venido corriendo a nuestro campo, al que llegan, no atraídos por un fideísmo torpe y ciego, sino por la clara reflexión de la ciencia, donde, en medio de tantas aflicciones, de tantas amarguras, de tantos dolores que constituyen la atmósfera sentimental del mundo de nuestros días, pueden serenar su conciencia pensando que el hombre, como la Tierra, no están perdidos, no están desamparados, sino que están regidos por un Ser inteligente, por un Sabio matemático que es el único que puede contemplar cómo se mueven los electrones en el átomo y cómo hierven las ideas en el cerebro del hombre.

Y así trazamos nosotros el vector geológico de la filosofía natural.

Dentro de nuestra formación espiritual encontramos sumamente lógico cuanto sucede, porque si el hombre fuese capaz de obtener de la nada unos electrones, de los electrones un poco de materia o energía, de ésta una célula, de la célula la vida y de la vida un pensamiento, sería Dios.

A consecuencia de estas conmociones del espíritu, se habla hoy de Fausto en la ciencia, pero yo creo que cuando evoquemos a Goethe debe ser para pedir: ¡Luz! ¡Más Luz!, como el genio inmortal. Se poetiza sobre los números, principalmente desde la teoría de los quanta; se vuelve a Pitágoras, y hasta se quiere oír la armonía de las esferas, pero nadie se acuerda de la «vida teórica» de los pitagóricos. Max Plank, un héroe de la etapa heroica de la física, preguntó hace pocos años: ¿A dónde va la ciencia? Cada cual a cumplir su destino, que en el caso de la física atómica ya se ha visto cuál es. De un lado a la bomba atómica, pero del otro a un conceptismo que eleva al hombre sobre las cosas, porque es científico, porque es matemático. El eterno contraste del mal y del bien.

Ciertos hombres han creído que a fuerza de estudiar las vibraciones de las cuerdas sonoras podían llegar a ser excelentes músicos. Han olvidado, no han querido creer, que son necesarias las manos de un Beethoven divino para que vibre el alma con toda la ternura de una dulce melodía.

He dicho.

LOS MINERALES DE URANIO Y SU TRATAMIENTO INDUSTRIAL

POR

ANTONIO COMBA Y SIGÜENZA

CONFERENCIA PRONUNCIADA EN EL INSTITUTO DE INGENIEROS
CIVILES EL DIA 19 DE FEBRERO DE 1946

EXCMO. SR.:

SEÑORES:

Sean mis primeras palabras para dar las gracias a las ilustres personalidades que presiden este acto, así como al distinguido auditorio, por honrarme con su presencia y, en especial, a nuestro querido compañero D. Pedro Novo, Presidente de esta Asociación, que con su proverbial bondad y cariño hacia mí, se ha excedido en los elogios que me ha dedicado, al hacer mi presentación en esta Cátedra.

Esto me obliga más aún a corresponder con ustedes, aunque mucho temo se vean defraudados, sobre todo después de haber escuchado la cálida oratoria de nuestro sabio y querido compañero D. José Romero Ortiz, y de los oradores que le han precedido.

Ya que yo ni soy orador, ni soy sabio, ni el tema que he escogido se presta a hacer amena esta charla, llena de datos empíricos y monótonos, sin más aspiración que la de dar una orientación práctica a los que se interesen por la minería del uranio, y dejar colocados unos cuantos jalones para el futuro desarrollo de esta industria en España.

Por lo que espero de su benevolencia, no vean en mí más que un buen deseo de orientarles con mi ya larga experiencia minera, en las posibles dudas que pudieran tener

en esta materia, y un gran amor a nuestra Patria, a la que desearía ver algún día a la cabeza en la técnica de esta industria.

Y una vez descargada mi conciencia con estas advertencias, vamos a entrar de lleno en el tema que me propongo desarrollar.

I. ESPECIES MINERALOGICAS DEL URANIO, SU VALOR INDUSTRIAL Y POSIBLES RESERVAS

Comenzaremos por dar una relación lo más completa posible de todas las especies minerales que contienen uranio.

Aunque antes de entrar en esta cuestión, he de advertir que en la relación de los minerales de uranio que doy en este capítulo van incluídos también los del torio, es decir, todos los del grupo que pudiéramos llamar de *minerales radiactivos*, ya que en los minerales de torio casi siempre se encuentra el uranio.

Por esta razón, en la industria del *radio 226*, cuyas aplicaciones terapéuticas exigen una gran pureza, se emplean menas uraníferas, a ser posible libres de torio, ya que de existir éste en apreciable proporción no podría evitarse que el *radio 226* fuera mezclado con *mesotorio 1*, que debido a su corta vida (1) desprecia notablemente su valor.

(1) El período del *mesotorio* es solamente de 5,70 años, mientras que el del *radio* es prácticamente ilimitado, ya que alcanza un período de 1.600 años.

Y análogamente para la industria del *mesotorio 1* deben elegirse minerales de torio pobres en uranio, dado lo costoso que resulta separar los isótopos *mesotorio 1* y *radio 226*, que inevitablemente se presentarían juntos en el producto final, de existir el uranio en estas menas en apreciable proporción.

Según pudieron darse cuenta en la conferencia del señor Romero Ortiz, los minerales de uranio se presentan de muy diferentes formas.

Cuando se trata de minerales de origen primario, se presentan formando nódulos muy diseminados en la roca de caja. Unas veces con formas perfectamente cristalizadas, de especies raras, constituyendo lo que podríamos llamar los «yacimientos pobres de uranio». Y otras en masas compactas arriñonadas, formando verdaderos concentrados, de formas amorfas o criptocristalinas, presentándose estas concentraciones, a veces, en forma de cristales bastante voluminosos, los cuales constituyen lo que pudiéramos llamar los «yacimientos ricos de uranio».

Cuando se trata de minerales de origen secundario, éstos suelen presentarse sumamente dispersos, generalmente mezclados con los elementos de constitución de las rocas de caja —que suelen ser de tipo sedimentario—, soldándose estos elementos unos con otros por medio del mineral, que hace de cemento.

Estos suelen encontrarse generalmente repartidos en zonas lenticulares, lo que hace difícil su explotación, a no ser que se trate de una formación lo suficientemente extensa para poder hacer en ella una elevada cubicación.

Estos criaderos son mucho más pobres que los de origen primario, dada la baja ley en uranio de sus minerales, aunque por ser su composición menos compleja, su tratamiento industrial es mucho más sencillo, debido a

lo cual constituyen en muchos casos una gran reserva minera.

Hasta hace poco solamente se consideraban beneficios los minerales de uranio que tuviesen como mínimo 50 miligramos de radio por tonelada, ya que en realidad este elemento era el que daba verdadero valor comercial a las menas de uranio, dado el poco precio a que se cotizaba este elemento en el mercado (1). Cuya proporcionalidad, aun cuando no deja de tener interés desde el punto de vista de poder considerar el límite de explotabilidad de estos minerales como menas de radio, no excluye el que especies mineralógicas más pobres se puedan explotar algún día como menas de uranio, dadas las nuevas aplicaciones de este gran elemento. Pudiendo llegar fecha en que incluso las rocas ígneas, que se calcula tienen una cantidad de uranio equivalente a 8,50 gramos por 10^{-5} por gramo de roca, puedan constituir una fuente de radiactividad uranífera.

Por esta razón me ha parecido interesante presentar una relación lo más completa posible de los minerales de uranio y torio que se conocen hasta el día, en la cual puede verse la composición química de los mismos, aspecto físico y localidades donde se encuentran en el extranjero. No citando los puntos donde pueden encontrarse en España, por ser este el tema que ha de desarrollar ampliamente mi colega D. Miguel Moya.

Para seguir un orden racional en este cuadro, dichas

(1) La proporción en uranio es fácil de determinar si se tiene en cuenta que en los minerales primarios la relación entre el radio y el uranio es una constante, representada por la cifra 3,70 por 10^{-7} , y en las de origen secundario 3 por 10^{-7} , aunque la cantidad de radio aprovechable suele ser solamente de 2,50 por 10^{-7} .

especies minerales van clasificadas por grupos de análoga composición química.

Al final de esta sinopsis mineralógica se da una lista de los mismos, clasificados por orden alfabético para facilitar su busca en cada caso particular, siguiendo el criterio expuesto por el insigne radiólogo Holmes (1).

A. Óxidos y uranatos

1. *Uraninita*.—Es un complejo de óxidos anhidros cristalizados, cuya especie puede clasificarse como un uranato de uranilo, plomo, torio, circón y casi todos los metales del grupo del itrio y lantano, y tierras raras, conteniendo siempre nitrógeno, en proporciones variables entre el dos y el seis por ciento, y a veces más, en la variedad conocida con el nombre de *uranomolita*.

Es una especie sumamente rara en la naturaleza, por lo que más que mena industrial es un mineral de Museo Mineralógico. Su contenido en UO_2 excede siempre al correspondiente al U_3O_8 . Probablemente porque fué UO_2 (*ulrichita*) al principio, pasando en parte por desintegración y auto-oxidación al UO_3 .

Localidades donde se encuentra: Moss y Arendal (Noruega); Carelia (U. R. S. S.); Branchville y Glastonbury Connecticut (U. S. A.); Carolina, Norte y Sur; Llano Co., Texas; Black Hills, Dakota Sur; Ontario (Canadá); Méjico; Morogoro, en territorio de Tanganyka; Singar, India; Ceylán y Borneo.

(1) Holmes: «Radiactivity and Geological time». 1931.

Cristaliza en el sistema cúbico, en cubos y octaedros. Peso específico: 9,0-9,7. Dureza: 5,50. Fractura concoidea. Brillo submetálico o grasiento. Color negro de terciopelo, generalmente con un matiz grisáceo, verdoso o castaño. Rayada con la navaja da una raya color castaño a negro oscuro o gris, a veces verdosa. Se presenta en las pegmatitas de las localidades mencionadas, y cerca de Adrianópolis, en los Balcanes; también en Gordonia, en Africa del Sur.

2. *Ulrichita* (nombre del radio-químico austriaco Carlos Ulrich).—Nombre propuesto por Kirsch para el elemento inicial, que llega a ser uraninita por la auto-oxidación. Cristalización cúbica.

3. *Bröggerita*.—Así llamada por C. W. Blomstrand, del nombre del geólogo sueco W. C. Brögger. Es una variedad de uraninita en la que la relación entre el UO_3 y los otros óxidos está en la proporción de 1 a 1. Cristaliza en el sistema cúbico, en cristales octaédricos. Peso específico: 8,3-9,0. Localidad donde se encuentra: Moss, Noruega.

4. *Cleveita*.—Una variedad hidratada de la uraninita, en la que las tierras de Itr entran en un 10 % y el PbO en un 10 %, formando sus principales constituyentes. Blomstrand da la fórmula $3UO_3 \cdot 2UO_3$ para la *cleveita* de Arendal, y Schoep la misma fórmula para la *pezblénda* Katanga. Localidad: Arendal, Noruega. Cristaliza en el sistema cúbico. Peso específico: 7,49. Se encuentra en las pegmatitas de las canteras feldespáticas de Garta y en otras localidades cerca de Arendal, Noruega.

5. *Nivenita*.—Variedad de la *cleveita* menos cristalizada y más fácilmente soluble. Localidad: Llano So., Texas (Estados Unidos). Cristalización de aspecto amorfo. Peso específico: 8,01. Dureza: 5,5. Color negro de terciopelo. Se

encuentra en Baringer Hill, Llano So., Texas, en combinación con la *fergusonita* y *torogumita*.

6. *Coracita*.—Es una variedad de la *uraninita*, transformada en parte en *gumita*, con venas de *calcita*. Peso específico: 4,38-4,50. Se halló en una localidad de la parte Norte del Lago Superior, a unas 90 millas más arriba del Salto de Santa María. Dice el descubridor que el mineral se encontró en una vena de dos pulgadas de anchura, en una roca sienítica.

7. *Pezblenda*.—Probablemente *uranato* de *uranilo* hidratado con U_2O_3 en no mayor proporción de lo que se requiere para formar el U_3O_8 , formando un producto final homogéneo con ausencia absoluta de ThO_2 y tierras raras, o solamente indicios de ellas. De aspecto cripto-cristalino o amorfo, aunque en general está formado por pequeños cristales microscópicos. Semejante a un trozo de pez. Localidades donde se encuentra: Colorado; Wyoming, Joachimsthal (Jáchymov) de Checoslovaquia; Johanngeorgenstadt, Sajonia; Cornwall (Inglaterra); Katanga (Congo Belga). Peso específico: 6,5 a 8,1. Su bajo peso específico es debido, parcialmente, a hidratación y alteración y, en parte también, a la mezcla con otros sulfuros y sustancias extrañas. Suele presentarse en filones de *cuarcita* metalífero, pero se la encuentra también en *pegmatitas*, probablemente porque el término de *pezblenda* no siempre se empleó con la necesaria discriminación para poder distinguir este mineral de la *uraninita*. En Joachimsthal se presenta en unión de la *pirita*, *chalcopirita* y *galena*, con *ganga* de *cuarcita* y *dolomía*.

En Annaberg (Sajonia), se presenta en masas *esferulíticas* y capas superficiales con *siderosa* y *espatofluor*, de formación más reciente que los filones *argentíferos* y *cobaltíferos*, donde se presenta.

En Johanngeorgenstadt (Sajonia), se encuentra muy diseminada, formando capas superficiales con *galena*, *chalcopirita* y *bismuto nativo*, en los filones *argentíferos*, *cobaltíferos* y *niquelíferos*, de aquella comarca. La *ganga* es *siderosa manganesífera*.

En Schneeberg (Sajonia), se presenta en masas *reñiformes*, con *chalcopirita*, *galena* y *siderosa*, en filones de mineral *argentífero*, con *cobalto* y *níquel*.

En Cornwall (Inglaterra), se presenta en filones *arsenicales* de *cobalto* y *níquel*, de formación más reciente que los de *estaño* y *cobre* que en esta localidad se han explotado.

En el Condado de Gilpin (Colorado), se presenta con *pirita*, *chalcopirita* y *cuarcita*. Algunas muestras se encuentran con intercalaciones en forma de *venillas* de *blenda*, *pirita* y *galena*. En cambio no se ha visto que contenga *cobalto* ni *níquel*.

En Katanga, se presenta con *gomita* y numerosos productos secundarios, en filones de *estaño*, cortando, a veces, otro de *cobre*.

8. *Torianita*.—Contiene, principalmente, ThO_2 con UO_2 isomorfo, algo de *OPb* y tierras raras. $U_3O_8 = 15$ a 30 %. ThO_2 alrededor del 75 %. Localidades: Ceylán y Madagascar. Cristalización: cúbica. Fractura: desigual. Brillo: apagado o submetálico. Peso específico: 9,5. D. = 6. Color: negro castaño a negro puro; rayado da un castaño oscuro. Se encuentra en las *pegmatitas* de Campola e Hinidum Puttu, Ceylán; pero su primer hallazgo ha sido en las *areniscas aluviales*, donde existe en abundancia. También se encuentra en Madagascar y en Transbaikalia, Siberia.

B. Productos de hidratación derivados de la uraninita y de la pezblenda

9. *Gumita*.—Es un producto de hidratación de la uraninita y la pezblenda, con Fe, Ca, Pb y algo de SiO₂, UO₃ = 61-75 %, conocida también con el nombre de *eliasita*. Localidades: Carelia, Carolina del Norte, Joachimsthal y Katanga. Cristalización: amorfa, en trozos redondos y aplastados, parecidos a la goma. Peso específico: 3,9-4,2. D. = 2,5-3. Color: amarillo rojizo a castaño rojizo. En el corte su raya es amarilla. Se presenta con la uraninita y pezblenda en muchas localidades.

10. *Pillinita*.—Es un óxido de uranio hidratado isomorfo de la *gumita*, de análogos caracteres físico-químicos.

11. *Bequerelita*.—UO₃ 2H₂O, isomorfa de la *schepita*. Cristalización: ortorrómbica, en cristales pequeños y geodas cristalinas. Color: amarillo canario. Se encuentra con la *curita* y la *sodita* en las *pezblendas* de la mina Kasola, de Katanga (Congo Belga).

12. *Schoepita*.—UO₃ 2H₂O, isomorfa de la *bequerelita*. Cristalización, ortorrómbica. Brillo: adamantino. Color: amarillo de azufre. Se halla en la mina Kasola (mina Chinkolobwe), del Congo Belga.

13. *Lantinita*.—UO₂ H₂O, con algo de Fe₂O₃. Cristalización: ortorrómbica. Brillo: semimetálico. D. = 2-3. Negro, con matiz violeta. Raya violeta tirando a pardo. Existe en pequeños filones de pezblenda y formando geodas en la pezblenda de la mina Kasola, Katanga, del Congo Belga. El mineral se transforma fácilmente en *bequerelita*.

C. Silicatos de uranio y otros elementos

14. *Uranofano y Uranotilo*.—Es un silicato de uranio hidratado, con hierro y cal. Producto de alteración de la *cleveita* y la *gumita*. U = 60-63 %. Localidades: Carolina del Norte; Katanga. Cristalización: ortorrómbica, en agregados aciculares con estructura fibrosa. Brillo: vidrioso. Peso específico: 3,81-3,9. D. = 2-3. Color: en diversos matices de amarillo.

15. *Sklodovskita*.—MgO 2UO₃ 2SiO₂ 7H₂O. Igual a la *uranotila* pero con MgO en lugar de CaO. Se ha demostrado que la *chincolobvita* es idéntica a la *sklodovskita*, manteniéndose esta última denominación. Cristalización: ortorrómbica, en cristales aciculares, en masas esferulíticas y formas radialmente fibrosas o en masas compactas. Color: amarillo pálido de limón. Se presenta en una brecha silícea con *kasolita* en Chinkolobwe, del Congo Belga.

D. Fosfatos de uranio y otros elementos

16. *Autunita*.—Fosfato hidratado de U y Ca: CaO 2(UO₃) P₂O₅ 8H₂O, conocida también con el nombre de *uraninita*. Cristalización: ortorrómbica (casi tetragonal), en placas tabulares, escamas y agregados micáceos. Brillo: de perlas. Peso específico: 3,05-3,19. D. = 2-2,50. Color: amarillo limón y amarillo de azufre. Raya amarillo pálido. Se presenta como mineral secundario de la pezblenda y en filones de *uraninita*. Principalmente en Cornwall (una

variedad llamada *bassetita* se halla en la mina Basset, de Redruth, Cornwall); en Guarda, distrito de la parte Norte de Portugal, y en Mount Painter, Sur de Australia.

17. *Uranocircita*.—Es un fosfato hidratado de U y Ba: $BaO_2 (UO_3) P_2O_5 \cdot 8H_2O$. Cristalización: ortorrómbica, en placas y escamas de agregados micáceos. Color: amarillo verdoso. Peso específico: 3,5.

18. *Torbernita*.—Fosfato hidratado de U y Cu: $CuO_2 (UO_3) P_2O_5 \cdot 8H_2O$, conocida también con el nombre de *chalcolita*. Cristalización: tetragonal, en placas pequeñas y agregados micáceos. Crucero: perfecto. Brillo: de perla; otras facetas adiamantinas. Peso específico: 3,4-3,6. D. = 2-2,5. Color: verde esmeralda y diversos matices de verde. Raya verde pálido. Se suele encontrar en los depósitos uraníferos, sobre todo en Cornwall y Joachimsthal, pero su aparición es menos común que la de la autunita.

E. Urano-vanadatos

19. *Carnotita*.—Es un urano-vanadato hidratado de potasio. Localidades: Colorado, Utah, Arizona y Sur de Australia. Cristalización: ortorrómbica, en polvo cristalino, o placas diminutas. Se presenta rellenando cavidades en las areniscas y molasas o en forma de masas lenticulares superficiales. Color: amarillo de limón o amarillo canario y a veces con matices verdes. Se encuentra en las areniscas de Colorado, Utah y Arizona, así como en un depósito de ilmenita que encaja en el gneis, en Radium Hill, cerca de Clary, Australia del Sur. En Colorado y Utah los depósitos comerciales dieron un promedio de 2-3 % de U_3O_8 , constituyendo la fuente principal de radio para América.

20. *Tyuyamunita*.—Es un urano-vanadato hidratado de Ca. Probablemente isomorfo con la *carnotita*. Se encuentra en Fergana. Peso específico: 3,41. D. = 2. Polvo amarillo. Raya en amarillo pálido. Se presenta en forma de estalactitas y estalacmitas formando drusas en las calizas, en Tyuya-Muyun de Fergana, Turkestán ruso; en el distrito de Minunsinsk, de Yenisei; en Colorado y Utah; y también en Radium Hill, cerca de Clary, Australia del Sur.

20. *Perganita*.—Es un mineral análogo al anterior de la misma localidad, prácticamente sin CaO; probablemente una variedad deshidratada de la tyuyamunita.

F. Minerales de torio, uranio y otros elementos

21. *Monazita*.—Fosfato de Ce, La, Di, con Yt, Th y algo de Si y U. Th = 1-20 %, generalmente 3-10 %. Localidades: Arendal, Noruega; Sur de Australia; Minas Geraes, Brasil. Cristalización: monoclinica. Presentándose generalmente en fragmentos irregulares de granos redondos. Fractura: desigual, concoidea. Brillo: resinoso o vítreo. Peso específico: 4,9-5,3. D. = 5-5,5. Color: amarillo tirando a veces a castaño rojizo. Se encuentra como accesorio en las pegmatitas en muchos sitios, formando grandes cristales mal desarrollados y en masas irregulares, a veces diseminados en el granito y el gneis. Los granos se concentran en las arenas de monazita, de las que algunos criaderos han sido y están siendo actualmente explotados como fuente comercial de torio. Se encuentra en Banta y Espíritu Santo, del Brasil ($ThO_2 = 6,2-6,4$); Travancore, India ($ThO_2 = 9-10$); Ceylán ($ThO_2 = 10$); Carolina del Norte;

Idaho. También hay depósitos en la tierra de Queensland y en Swasiland.

22. *Xenotimo. Hussakita*.—Se ha visto que es un xenotimo de forma prismática. Fosfato de Yt y Er con Ce, Th y Si. U = tr.-3. Th = 0,5-3. Localidad: Arendal, Noruega. Cristalización: tetragonal. Isomorfo con el circonio y la torita. Fractura: irregular. Brillo: vítreo. Peso específico: 4,45-4,56. D. = 4-5. Color: amarillo y pardo rojizo. Raya amarilla o amarillo claro. Se encuentra en las pegmatitas, en Hitterö y Aro, Noruega, Madagascar y otras partes; y como accesorio eventual en ciertos granitos y algunos gneis. Como mineral detrítico se presenta abundantemente en las arenas diamantíferas de Diamantina, Brasil.

23. *Pisekita*.—Agregados fibro-laminares formados por cristales que parecen de monacitas. Color: negro y a veces amarillento. D. = 5,5 a 6. Se encuentran en las pegmatitas y en los berilos de Pisek, Checoslovaquia.

24. *Auerlita*.—Un fosfato de torio hidro-silíceo. $\text{ThO}_2 = 70,13$. Tetragonal, probablemente pseudomorfo de la torita o el circonio. Brillo: resinoso. Peso específico: 4,42-4,77. D. = 2-3,5. Color: rojo-oscuro de naranja a blanco sucio. Se encuentra en unión con el *circón* y *xenotimo* en granitos disgregados, en el distrito de Henderson Country, Carolina Norte.

25. *Torotungstita*.—Es un wolframato hidratado de torio, con Al, Ce, Zr, etc. Cristaliza en pequeños cristales aciculares de color amarillo de miel. Peso específico: 5,55. Se encuentra en drusas, en la base de un depósito aluvial por encima del granito, en la mina de estaño de Kramat Pulai, distrito de Kinta, Perak. Parece ha podido formarse en un proceso de hidratación al liberarse el torio y circonio, para combinarse con productos de descomposición de la wolframita y la scheelita.

G. Silicatos

26. *Torita*.—Un silicato de torio hidratado (ThSiO_4), con tierras raras, U, Fe, etcétera. U = 0,4-2. Th = 47-65. Las variedades más ricas en uranio se distinguen con el nombre de *uranotorita*. Localidades: Brevik, Fiordo de Langesund, Noruega; Arendal, Noruega. Cristalización: tetragonal, como el circonio, pero generalmente en fragmentos irregulares y redondos. Fractura: concoidal. Brillo: resinoso. Peso específico: 4,4-4,8. D. = 4,5-5. Color: amarillo a pardo oscuro. Raya parda. Se encuentra en las pegmatitas de Noruega; Ceilán; Madagascar y en el Cáucaso, en Batum.

27. *Orangita*.—Una variedad, color amarillo de naranja, de la *torita* o *uranotorita*. U = 1-7,5. Th = 45-63. Localidades: Arendal, Noruega; Fiordo de Langesund, Noruega; Peso específico: 5,2 a 5,4.

28. *Uranotorita*.—Una variedad de torita muy rica en uranio: U = 8-15, Th = 43-45. Localidades: Fiordo de Langesund, Noruega; Arendal, Noruega; Ontario. Cristalización: tetragonal. Peso específico: 4,1. D. = 5. Color: pardo oscuro rojizo. Raya pardo-amarillenta. Se encuentra entre las pegmatitas de Noruega; Madagascar; Ontario; así como en una localidad perdida de la región ferrífera del Lago Champlain, New York.

29. *Calciotorita*.—Una variedad de *torita* rica en calcio ($\text{CaO} = 7$). $\text{ThO}_2 = 59-35$. Fractura: concoidal. Brillo: vítreo. Peso específico: 4,11. D. = 4,5. Color: granate muy oscuro. Se halla en masas reñiformes en la región del Fiordo de Langesund, Noruega.

30. *Mackintoshita*.—Un silicato hidratado de Th, U y Pb. Difiere de la *uranotorita* por contener un porcentaje más elevado de uranio. $UO_2 = 22$ a 4. $ThO_2 = 45$ a 3. Localidades: Llano Co., Texas; Oeste de Australia. Cristalización: tetragonal. Peso específico: 5,42. D. = 5,5. Color: negro. Se halla con la *torogummita*, que se considera es una derivación suya alterada, en las pegmatitas de Blufon, Llano County, Texas, y en las regiones Oeste de Australia.

31. *Torogummita*.—Un silicato hidratado y uranato de Th, Ce, Yt y Pb. Es un producto de alteración o sustituto de la *mackintoshita*. $UO_2 = 22-43$. $ThO_2 = 41-44$. Localidades: Fiordo de Langesund, Noruega; Condado de Llano, Texas, y Oeste de Australia. Peso específico: 4,43 a 4,54. D. = 4-4,5. Color: pardo oscuro a pardo amarillento. Se encuentra, en unión de la *mackintoshita*, *fergusonita* y *cirtolita*, en el Baringer Hill, del Condado de Llano, Texas.

32. *Ytriogummita*.—Un silicato hidratado de Th, U, Yt y Er. Cristalización: tetragonal. Peso específico: 4,43 a 4,54. D. = 4,5. Color: pardo amarillo. Se encuentra en Noruega con la *cleveita*, de la que es un producto de alteración, y en la región de Baringer Hill, Condado de Llano, Texas.

33. *Hidrotorita*.—Es una torita muy hidratada. $ThSiO_4 \cdot 4H_2O$, con algo de Ca, U, Pb. $UO_2 = 2,98$. $ThO_2 = 57,79$. $H_2O = 15,1$. Localidad: Oeste de Australia. De contextura terrosa y deleznable. D. = 1-2; Color: rosa pálido o lechoso. Se halla con la *pilbarita* y la *torogummita* como producto de alteración de la *mackintoshita* en las pegmatitas de Wodgina, Australia occidental.

34. *Eucrasita*.—Un silicato hidratado de Th, Ce, Yt e Y. Variedad de la *torita* alterada, rica en tierras raras. $ThO_2 = 35,96$. De aspecto amorfo. Fractura: irregular. Brillo: grasiento. Peso específico: 4,39. D. = 4,50 a 5. Co-

lor: negro pardo. Raya parda. Se encuentra en las pegmatitas, cerca de Brevik, Fiordo de Langesund, Noruega.

35. *Freyalita*.—Un silicato hidratado de Th, Ce, U = 0,05. Th = 6,3-22. Localidad: Fiordo de Langesund, Noruega. Contextura: amorfa. Brillo: resinoso. Peso específico: 4,06-4,17. D. = 6. Color: pardo. Raya gris amarillenta. Se encuentra entre pegmatitas, cerca de Brevik, del Fiordo de Langesund, Noruega.

36. *Circón*.—Un silicato de Zr: $(ZrSiO_4)$. *Torita*, *naegita* y *xenotimo*, son isomorfos con el circón. U = 0-0,9. Th = 0-1,96. Localidades: Brevik, en el Fiordo de Langesund; Ontario; Mozambique; Ceylán. Cristalización: en prismas tetragonales, cubiertos por pirámides, y en forma de cristales redondos y guijarros en la grava. Fractura: concoidal. Brillo: diamantino. Peso específico: 4,0-4,5 cuando tiene color humo; 4,68-4,70 cuando tiene color pardo, y llegando a 4,86 en algunas variedades. D = 7,5. Generalmente pardo, pero varía desde cristales incoloros a matices de amarillo, rosa, malva, purpúreo, a un pardo humo o negro. Se le encuentra generalmente en las rocas hipogénicas como mineral accesorio, principalmente en los granitos, sienitas y sienitas nefelínicas, así como en las pegmatitas. Se presenta casi siempre en las arenas de playa cuando proviene de minerales detríticos en rocas hipogénicas, particularmente abundante en depósitos de piedras preciosas de Ceylán y en los depósitos de monacita de la India y del Brasil, y aluviones de terrenos eruptivos.

37. *Cirtolita*.—Es un silicato hidratado de Zr con Yt, Ce, Ca, Th y U, como para el *circón* y a veces más alto; por ejemplo: $U_3O_8 = 2,42$ en las *cirtolitas* de Nellore, India. Cristalización: tetragonal; probablemente es una pseudomorfosis del circonio. Brillo: adiamantino.

Peso específico: 3,85-4,04. $D. = 5-5,5$. Color: rojo pardusco. En la raya, también rojo pardo. Se le encuentra en las pegmatitas, con minerales de tierras raras en Escandinavia; en Connecticut (EE. UU.); Carolina del Norte; Colorado, Condado del Llano de Texas; Ontario, y en muchas otras localidades. La *alvita* es una variedad de la *cirtolita*.

38. *Naegita*.—Un silicato (y parcialmente niobo-tantalato) de Zr, con Yt, Th, U. $UO_3 = 2-3$. $ThO_2 = 2-5$. Cristalización: tetragonal, isomorfo con el *circón* y *torita*. Se presenta generalmente en forma de agregados esferoidales, con cristales mal formados en la superficie. Peso específico: 4,09. $D. = 7,5$. Color: verde oscuro a pardo. Se encuentra con la *fergusonita* en los aluviones de estaño del Japón.

39. *Cadolinita*.—Un silicato de Be, Yt, Fe. $U = tr.-2$. $Th = 0,3-0,7$. Strutt encontró $ThO_2 = 8,6$ en un mineral de Ytterby, que le fué suministrado como *gadolinita*. Localidad: Ytterby, Suecia. Cristalización: monoclinica, en toscos cristales prismáticos y masas irregulares. Fractura: concoidal y astillosa. Brillo: vítreo a grasiento. Peso específico: 4,36-4,47. $D. = 6,50-7$. Color: pardo a negro verdoso o negro. En la raya gris verdoso. Resplandece fuertemente a los $430^\circ C.$, adquiriendo un notable cambio de propiedades. Se le encuentra, unido con la *fergusonita*, en pegmatitas, principalmente en Ytterby, Suecia; cerca de Arendal, Noruega, y en masas muy extensas en Baringer Hill, Condado del Llano, Texas.

40. *Ytrialita*.—Un silicato de Yt, Th. Probablemente una pseudomorfosis de la *gadolinita*. $UO_3 = 0,83$. $ThO_2 = 12,00$. Localidad: Condado del Llano, Texas. Contextura: amorfa. Fractura: concoidal. Brillo: vítreo a grasiento. Peso específico: 4,57. $D. = 5-5,50$. Color: verde olivo en la fractura fresca, cambiando a amarillo de naranja, mien-

tras que la *gadolinita* cambia a un color de rojo ladrillo. Se la encuentra con la *gadolinita* en Baringer Hill, Condado del Llano, Texas.

41. *Homilita*.—Borosilicato de Ca, Fe. $U = 0,2$. $Th = 2,9$. Una variedad llamada *erdmannita* contiene $ThO_2 = 9,93$. Localidad: Fiordo de Langesund, Noruega. Cristalización: monoclinica. Fractura: concoidea. Brillo: resinoso a vidrioso. Peso específico: 3,34-3,38. $D. = 5$. Color negro pardusco a negro. Raya gris. Se le encuentra en las pegmatitas, augitas y sienitas, en el Fiordo de Langesund, Noruega.

42. *Helandita*.—Un silicato de aluminio hidratado con Yt, Er, Ca, Fe, Mn. $ThO_2 = 0,62$. Cristalización: monoclinica. Peso específico: 3,70. $D. = 5,5$. Color: pardo de nuez a rojo pardusco. Se encuentra en las pegmatitas, con *torita*, en Kragero, Noruega.

43. *Tritomita*.—Es un silicato y fluo-borato hidratado de Ce y otras tierras raras con Th, Ca, Fe y U $= 5-8$. Localidad: Fiordo de Langesund, Noruega. Cristalización: romboédrica. Brillo: resinoso. Peso específico: 4,15-4,25. $D. = 5,5$. Color: pardo oscuro. Raya gris amarillenta. Se halla en las sienitas nefeliníticas del Fiordo de Langesund, Noruega.

44. *Melanocerita*.—Un fluosilicato hidratado de Ce, Yt, La, Di, Ca y U. $ThO_2 = 1,66$. Cristalización: romboédrica en cristales tabulares. Fractura: concoidal. Brillo: grasiento a vidrioso. Peso específico: 4,13. $D. = 5,6$. Color: pardo muy oscuro a negro. Raya pardo claro. Se halla en las pegmatitas del Fiordo de Langesund, Noruega.

45. *Steenstrupina*.—Es un silicato hidratado de Ce, La, Di, Th, Fe, Mn, Na, Ca y U. $ThO_2 = 2,13$ a $7,09$ (Groenlandia). Cristalización: romboédrica. Brillo: apagado. Peso específico: 3,38. $D. = 4$. Color: pardo. En la ras-

padura gris pardusco y pálido. Se encuentra en las pegmatitas de augita y sienitas del Fiordo de Langesund, Noruega, y en las sienitas de *sodalita* de Kangerdluarsuk, Groenlandia.

46. *Allanita* y *Ortita*.—Es un alúmino-silicato hidratado de Ce, La, Di, Fe, y Ca. Miembro del grupo del *epidoto*, rico en tierras raras. $U = \text{tr.}-5$. $\text{ThO}_2 = \text{tr.}-5,60$. Localidad: pegmatitas de Blueberry, cerca de Boston, Mass. Cristalización: monoclinica, tabular o en forma de cristales largos, delgados. Fractura: concoidal o irregular. Brillo: submetálico a resinoso. Peso específico: 3,5-4,15. $D. = 5-5,50-6$. Color: pardo a negro pardusco o verdoso. En la raspadura gris. Se halla como accesorio corriente en muchos granitos, sienitas y muchas otras rocas ígneas; así como en los gneis, pero particularmente en las pegmatitas.

H. Titano-silicatos

47. *Titanita* o *Esfena*.—Es un titano-silicato de Ca, muy a menudo con Fe, Al. Algunas variedades contienen Yt, $U = \text{tr.}-0,04$. $\text{Th} = \text{tr.}-0,15$. Cristalización monoclinica. Fractura: concoidal. Brillo: adiamantino. Peso específico: 3,4-3,56. $D. = 5-5,5$. Se encuentra generalmente con matices pardos o pardo rojizos, pero también existen variedades de matiz verdoso y amarillento. En la raspadura blanco. Existe como accesorio muy corriente en las rocas ígneas, especialmente las que contienen hornablenda y en las rocas metamórficas, incluyendo las calizas cristalinas metamórficas.

48. *Johnstrupita*.—Es un titano-silicato de Ce, Ca, Na, Zr, etc. $\text{ThO}_2 = 0,79$. Cristalización: monoclinica, se-

mejante en su forma a la *zoisita*. Brillo: vítreo. Peso específico: 3,29. Color: verde pardusco. En la raspadura verde amarillento. Se encuentra en las sienitas nefeliníticas cerca de Barkevik, Fiordo de Langesund, Noruega.

49. *Mosandrita*.—Es un titano-silicato de Ce, Ca, Na, Zr, etc. $U = 0,04$. $\text{Th} = 0,3$. Localidad donde se encuentra: Fiordo de Langesund, Noruega. Cristalización: monoclinica, en largos prismas con estrías verticales (relacionado con el grupo *epidoto*). Color: pardo rojizo y rojo vivo. Raspadura amarillo pálido a gris pardo. Se encuentra en las sienitas nefeliníticas del Fiordo de Langesund, Noruega.

50. *Tschefkinita*.—Es un titano-silicato de Ce, La, Di, Th, Fe, Ca, etc. $\text{ThO}_2 = 0$ (India) - 20,91 (Urales). Es amorfa. Brillo: vidrioso. Peso específico: 4,51-4,55. $D. = 5-5,5$. Color: negro pardusco a negro. En la raspadura pardo oscuro. Localidad: en los montes de Ilmen, Ural; Salem, Madras, India; y el Condado de Nelson, Virginia.

I. Titanatos

51. *Branerita*.—Un titanato hidratado de U y tierras raras. Contiene más uranio que ningún otro mineral similar, excepto la uranita. $U = 37$. $\text{Th} = 3,6$. Se encuentra en Idaho. Cristalización: ortorrómbica. Fractura: concoidal, muy brillante. Peso específico: 4,5-5,43 (muestra analizada, 5,42). $D. = 4,5$. Color: negro, descompuesto en un amarillo pardusco. Localidad: se halla en forma de cristales incompletos en la arenisca aurífera de la parte alta de Kelly Gulch, de la pertenencia situada a 300 pies de la baja división entre Kelli Gulch y Stanley Basin. El lecho de

roca donde se encuentra es de granito, cortado por pegmatita (1).

52. *Ytirocrasita*.—Es un titanato hidratado de Yt, Ce, Ti, Th, U, Fe, etc. $UO_2 = 1,98$. $ThO_2 = 8,75$. Se encuentra en el Condado de Llano, Texas. Cristalización: ortorrómbica. Fractura: desigual o concoidal. Brillo: resinoso. Peso específico: 4,8. $D. = 5,5-6$. Color: negro, semejante a *euxenita*. Localidad: Burnet County, Texas, donde fué descubierto por Baridger precisamente frente al río Colorado, en Baridger Hill, Condado de Llano.

53. *Delorenzita*.—Es un titanato hidratado como la *ytirocrasita*, pero más rico en Ti y en U y más pobre en Ce. Cristalización: ortorrómbica. Fractura: concoidal. Brillo resinoso. Peso específico: 4,7. $D. = 5,5$ a 6. Color: negro. Se encuentra con la *struvita* en las pegmatitas de Piamonte, Italia.

J. Titano-tantalo-niobatos

54. *Aeschinita*.—Es un titanato-tantalo-niobato de Ce, Th, U, Ca, Fe, Zr, etcétera. $U = 1,9$. $Th = 8,17$. Cristalización: ortorrómbica. Fractura: concoidal. Peso específico: 4,9-5,2. $D. = 5,5$. Brillo: submetálico. Color: pardusco oscuro a negro. Raya gris a pardusco amarillo. Localidad: se encuentra en las pegmatitas, sobre todo en el Ural y en Noruega.

55. *Polimignita*.—Una variedad de la *aeschinita*, rica en Zr y en Yt. $ThO_2 = 2,92$. Peso específico: 4,8-6,3,

(1) A esta especie debe corresponder la *guadarramita* encontrada en la Sierra de Guadarrama, cerca de San Rafael (Segovia).

según el grado de hidratación. $D. = 6,5$. Localidad: se encuentra en las pegmatitas de Noruega y de Siberia.

56. *Euxenita*.—Es un titanato hidratado de tantalio y niobio, de Yt, Ce, U, Th, etcétera, con Nb_2O_5 . $TiO_2 = 1-3$ o menos. $U = 5,20$. $Th = 1-3$. La *euxenita* y la *priorita* forman una serie isomorfa, de composición variable entre $Nb_2O_5-TiO_2$, en la escala de 1 : 2 a 1 : 6. Son todas externamente ortorrómbicas. Localidades: Fiordo de Langesund, Noruega; Arendal, Noruega; Ontario; Volhynia, Ucrania. Cristalización: ortorrómbica prismática. Fractura: concoidal. Brillo: vítreo. Color: negro pardusco a negro. Raya pardusco amarilla. Se encuentra en las pegmatitas en forma de concentrados.

Una variedad de la *euxenita* muy rica en Ta_2O_5 fué descrita por E. S. Simpson bajo el nombre de *tanteuxenita*. Conforme a su composición, tiene el peso específico: 5,4-5,9. ThO_2 trazas; $UO_3 = 3,35$; PbO , trazas. Aparece en los campos de estaño de las minas de oro de Pilbara, en Australia Occidental.

57. *Policrasa*.—Isomorfa con la *euxenita*, pero con $Nb_2O_5 : TiO_2$ en la proporción de 1 : 4 a 6. $U = 5,18$. $Th = 2,5$. Localidad: Ontario; Minas Geraes. Peso específico: 4,8-5,1.

58. *Blomstrandina*.—Ortorrómbico. Isomorfo con la *policrasa* y de composición similar. Isomorfa también con la *priorita*. No se la debe confundir con la *blomstrandita*. $UO_2 = 4,01-5,35$. $ThO_2 = 7,69-4,28$. Localidad: Arendal, Noruega; Volhynia, Ucrania; Miask, Ural. Aparece en las pegmatitas de Hitterö y Arendal, en Noruega.

59. *Priorita*.—Ortorrómbica, diamorfa con la *euxenita* y de composición similar. Isomorfa con la *blomstrandina*. $UO_2 = 0,49$; $UO_3 = 2,14$; $ThO_2 = 0,61$. Peso específico: 4,6-5,0. $D. = 6$. Aparece en cristales tabulares suel-

tos en aluviones estanníferos, en Swaziland, Africa del Sur, y a veces en las pegmatitas.

60. *Linaochita*.—Es un niobato-tantalo-titanato de Yt, Ce, Th, Ca. Es en realidad una *euxenita* con torio y calcio y un poco de uranio. $U = 0,63$, $Th = 4,35$. Localidad: Lyndoch, Ontario. Cristalización: ortorrómbica, en perfectos cristales. Fractura: concoidal, Brillo: vítreo. Peso específico: 4,9. $D. = 6,5$. Color: negro brillante, pardo rojizo en la fractura. Raya amarilla. Se presenta en la pegmatita unida a la *columbita*. Localidad: Lyndoch, Condado de Renfrew, Ontario.

61. *Pirocloro*.—Es un titano-niobato de Ca, Ce, Th, Na, etc. $U = 0,19$. $Th = 4,7$. Localidad: en el Fiordo de Langesund, Noruega. Cristalización: cúbica en octaedros. Fractura: concoidal. Brillo: vítreo o resinoso. Peso específico: 4,2-4,36. $D. = 5,5,5$. Color: pardusco rojizo oscuro hasta negro. Raya color pardusco claro. Se encuentra en las pegmatitas de Miask en Pikes Peak, Colorado, y en las *nefelinitas sientificas* del Fiordo de Langesund.

62. *Kopita*.—Es un mineral similar al anterior, que contiene un bajo porcentaje de ThO_2 .

63. *Hatchettolita*.—Tantalo-titanato hidratado de U, Ca, Fe, etc. $U = 9-15$. Localidad: Ontario. Cristalización: cúbica, en octaedros. Fractura: concoidal. Brillo: resinoso. Peso específico: 4,77-4,90. $D. = 5$. Color pardo amarillo con matices oscuros. Se la encuentra en las pegmatitas de Mitchell County, Carolina del Norte; en la mina Woodcox de Hybla, Ontario; Mesa Grande, California; Travancore, India; Madagascar.

64. *Betafita*.—Titano-niobato hidratado de U con Ca, Fe, Th, etc. $UO_3 = 26,6-28,6$. $ThO_2 = 1,12-1,30$. Peso específico: 3,75-4,47. Color: pardo-verde a amarillo. Localidad: aparece con el *berilo* y la *euxenita* en las pegma-

titas de Madagascar. La *betafita* constituye el mineral radiactivo más abundante de Madagascar, habiendo sido exportada a Francia para la extracción de radio.

65. *Samiresita*.—Pertenece al grupo de las *betafitas* ricas en Pb y agua. $UO_3 = 21,2$. $PbO = 7,35$. Estando el mineral asociado con galena. Un mineral semejante a la *samiresita* contiene $UO_3 = 27,2$ y $ThO_2 = 1,40$, pero solamente trazas de plomo. Cristalización: cúbica, en octaedros. Color: amarillo. Peso específico: 5,24. Va asociado con el *berilo* y el *circonio* en las pegmatitas que contienen *galena* y *piromorfita*, en Madagascar.

66. *Blomstrandita*.—Es un niobato-titano-tantalato de U con Ca, Fe, etc. Pertenece al grupo de *betafita*, relativamente rico en Ti y Ta. $U = 15-20$. No se debe confundir con la *blomstrandina* ortorrómbica. Cristalización: cúbica, en octaedros. Brillo: vítreo. Peso específico: 4,17-4,79. $D. = 5,5$. Color: desde el negro al amarillo, o bien verde pardo, con aumento de agua. Localidad: aparece con la *nolita* en Suecia, y con la *euxenita*, *columbita* y *samarskita* en Madagascar. También se presenta en Volhynia y en los Urales.

67. *Ellsworthita*.—Es una especie del grupo de *betafita* rica en calcio. $CaO = 8,94-11,62$. $U = 15-18,5$. $Th = 0-1$. Localidad: Ontario. También se presenta en las pegmatitas de Hastings y Haliburton, de Ontario. Cristalización: cúbica, en cubos y octaedros. Fractura: concoidea. Brillo: adiamantino. Peso específico: 3,6-3,76. $D. = 4-5$. Color: negro pardo o negro. En la raya de color amarillo pálido.

68. *Mendelyevita*.—Es una especie del grupo de la *betafita*, pero más rico en Ca ($CaO = 15$) que la *ellsworthita*. $U_3O_8 = 23,5$. Cristalización: cúbica, presentándose en rombododecaedros en masas cristalinas. Brillo: metálico. Peso específico: en cristales, 4,76; en masas, 4,44 a

4,51. $D. = 4,5$. Color: negro pardusco. En la raya da color pardo rojizo. Aparece en unión con la *allanita* en las pegmatitas de Lake Baikal, Siberia.

69. *Wikita*.—Silico-titano-tantalo-niobato de Ce, Yt, U, Fe y Ca, algunas variedades con Zr, U y Th. Localidad: Finlandia. Cristalización: ortorrómbica, en masas amorfas. La *wikita* es isomorfa con la *samarskita*. Color: negro tirando a pardo y amarillo paja cuando está hidratada. Aparece con la *alanita* y *monacita* en las pegmatitas de las cercanías de Impilati, orilla Norte del Lago Ladoga, Finlandia.

K. Tantaloniobatos

70. *Columbita*.— $(\text{FeMn})(\text{TaNb})_2\text{O}_6$, que gradualmente se convierte en *tantalita* por el aumento de Ta_2O_5 . A veces contienen cantidad apreciable de U_3O_8 (por ejemplo: 2,28 %, Madagascar; 0,80 %, Gaya, India). ThO_2 (por ejemplo: 3,44 %, Hybla, Ontario); y PbO (Iviglut, Groenlandia). Cristalización: ortorrómbica, en cristales prismáticos. Fractura: concoidea. Brillo: adiamantino. Peso específico: 5,36-6,13, según la composición, siendo las más bajas las variedades ricas en Nb_2O_5 , y aumentando el valor con el Ta_2O_5 . $D. = 6$. Color: gris, negro, pardo. Raya oscura, negro rojizo. Se encuentra en las pegmatitas, con tantalita, tomando forma de granos y guijarros.

71. *Tantalita*.— $(\text{FeMn})(\text{NbTa})_2\text{O}_6$, convirtiéndose en *columbita* por el aumento de Nb_2O_5 . Algunas variedades contienen uranio y torio. Cristalización: ortorrómbica, en cristales prismáticos. Fractura: desigual, Brillo: adiamantino. Peso específico: 7,03 a 8,0. $D. = 6,5$. Color: negro. Raya negra. Localidad: aparece en las pegmatitas con

columbita, siendo uno de los principales sitios donde se encuentra en Black Hills, al Sur de Dakota; Greenbushes y Wodgiun, Australia occidental, Rodesia del Sur, en forma de cantos rodados y guijarros.

72. *Microlita*.— $\text{Ca Ta}_2\text{O}_3$, que es en realidad una variedad del anterior; se encuentra en Rodesia del Sur ($\text{U}_3\text{O}_8 = 0,70$).

73. *Toddita*.—Tantalo-niobato de Fe, U, Mn, Yt. Es esencialmente una *columbita* rica en uranio. Está comprobado que no se trata de una mezcla de *columbita* y de *uraninita*. $\text{U} = 9,65$. $\text{Th} = 0,41$. Localidad: Ontario. Se encuentra en masas redondas y ovaladas que actúan como núcleo del sistema de fracturas radiales, que suelen presentarse en la roca circundante. Fractura: concoidal. Peso específico: 5,04. $D. = 6,5$. Brillo: metálico. Color: negro de pez. Raya gris pardo. Localidad: aparece en las pegmatitas del distrito portuario de Dill, Sudbury, Ontario.

74. *Samarskita*.—Es un tantaloniobato de Yt, Ce, con U, Ca, Fe. $\text{U} = 9,16$. $\text{Th} = 0,2$. Conocida también con el nombre de *anerodita*. Localidad: Moss, Noruega; Colorado; Nueva México; Volhynia, Ucrania; Minas Geraes, Brasil. Cristalización: ortorrómbica, prismática. Fractura: concoidal. Peso específico: 5,6-5,8. $D. = 5,5$. Brillo: vídrioso, a veces metálico. Color: negro. Raya color pardo oscuro y rojiza. Se encuentra en las pegmatitas y se hallaron grandes cantidades en la mina de Sankara, del distrito de Nellore, Madrás.

75. *Ishikawaita*.—Es una especie del grupo de las *samarskitas*, rico en U y Fe. $\text{UO}_2 = 21,88$. Cristalización: ortorrómbica. Fractura: concoidea. Peso específico: 6,2 a 6,4. $D. = 5,6$. Color: negro. Raya color pardo oscuro.

76. *Calcio-Samarskita*.—Es una variedad hidratada de la *samarskita* rica en Ca. $\text{U} = 9,32$ y $11,35$. $\text{Th} = 2,93$ y

1,90. Peso específico: 4,49-4,74. D. = 6,5. Localidad: se presenta en las pegmatitas de Hybla y Parry Sound, Ontario.

77. *Nolita*.—Variedad hidratada de la *samaraskita* $UO_3 = 14,43$. Fractura: concoidea. Brillo: vidrioso. Peso específico: 5,4. D. = 4,5 a 5. Color: pardo oscuro. Raya color pardo. Localidad: se encuentra en las pegmatitas de Nohl, cerca de Kungälv, Suecia.

78. *Plumboniobita*.—Niobato de Yt, U, Pb, Fe, Ca. Es un mineral parecido a la *samaraskita*, rico en plomo $UO_3 = 13,7$. Es amorfa. Fractura: concoidea. Raya color pardo de cuero. Peso específico: 4,8-4,81. D. = 5 a 5,5. Color: pardo oscuro a negro. Localidad: se presenta en las pegmatitas micáceas de Morogoro, Montañas de Uluguru, territorio del Tanganyka.

79. *Ytriotantalita*.—Un tantalato-niobato hidratado de Yt, con algo de Ca, Fe. $U = 0,5-1,5$. $Th = 0,7-0,8$. Se encuentra en Arendal, Noruega. Cristalización: ortorrómbica, isomorfa con la *samaraskita*, prismática o tabular. Fractura: concoidea. Brillo: submetálico. Peso específico: 5,7. D. = 5,5. Color: amarillo, pardo o negro. Raya color gris. Se halla en las pegmatitas de Ytterby, Suecia y Noruega.

80. *Hjeimita*.—Es un niobato-tantalato de Fe, Mn, Yt, Ca, Sn, U, íntimamente relacionado con la *ytriotantalita*. $U = 2-4,5$. Localidad: Falun, Suecia. Cristalización: ortorrómbica. Brillo: metálico. Color: negro. Raya color negro y gris. Peso específico: 5,8. D = 5.

81. *Ampangadeita*.—Es un tantalato-niobato hidratado de U, Th, Fe y tierras raras. Se distingue de la *euxenita* y la *aeschinita* por su bajo contenido de Ti. $U = 10-16$. $Th = 1,2$. Cristalización: ortorrómbica. Peso específico: 3,97-4,29. D. = 4. Fractura: concoidea. Brillo: grasiento. Color: rojo pardo. Localidad: en las pegmatitas de Madagascar.

82. *Fergusonita*.—Es un niobio-tantalato de Yt, Er, Ce, con cantidades pequeñas de U, Fe. $U = 1-8$. $Th = tr-4$. Localidad: Ytterby, Suecia; Condado del Llano, Texas; Coogleglong, Australia Occidental. Cristalización: tetragonal, piramidal o prismática. Fractura: concooidal. Peso específico: 5,8. D = 5,3-6. Brillo: vítreo, a veces metálico en la fractura. Color: pardo a negro. Raya color pardo pálido. Al calentarla (500° - 600° C.) pierde su helio y produce calor.

Se presenta en el granito y en las pegmatitas, en muchas localidades, notablemente en Baringer Hill, Condado del Llano, Texas; y en Coogleglong, Australia Occidental.

83. *Rutherfordita*.—Constituye una variedad de la *fergusonita* y no se la debe confundir con la *rutherfordina*, que es un carbonato hidratado de uranio.

84. *Sipylita*.—Es un niobato de Er, con pequeñas cantidades de muchos elementos más. $U = 3$. $Th = 4,5$. Cristalización: tetragonal; raramente piramidal. Se presenta generalmente en masas glandulares. Fractura: concoidea, desigual. Peso específico: 4,89. D. = 6. Brillo: resinoso. Color: pardo a negro. Raya color pardo claro o bien gris. Localidad: se presenta con la *allanita* en las pegmatitas de la montaña Little Friar Mt., Condado de Amherst, Virginia, y en una pegmatita micácea del distrito de Nellore, India.

85. *Risorita*.—Es un niobato hidratado (con algún Ta y Ti) de Yt, semejante en su composición a la *fergusonita*. $U = 0,1$. $Th = trazas$. El mineral contiene $Pb = 0,2$ y es rico en He. Este mineral se distingue por la particularidad de que su principal constituyente radiactivo se precipita con el plomo. Fractura: concoidea. Peso específico: 4,18. D. = 5,5. Color amarillento a pardo verdoso. Raya color blanco amarillento. Se presenta en las pegmatitas de Risör, Noruega.

86. *Eschwegeita*.—Es un niobato-titano-tantalato hidratado de Yt. $UO_2 = 1,96$. $ThO_2 = 0,57$. Cristalización: tetragonal. Fractura: concoidea. Peso específico: 5,87. D. = 5,5. Color: gris oscuro rojizo. Localidad: se encuentra entre los aluviones, a semejanza del *rutilo*, en la parte superior del río Doce, Minas Geraes, Brasil.

L. Otros minerales secundarios de uranio

87. *Fourmarierita*.—Es un hidróxido de urano con plomo y otros metales.

88. *Curita*.—Es un uranato de plomo hidratado.

89. *Uranosferita*.—Es un hidrouranato de varios metales con bismuto.

90. *Sodita*.—Es un silicato hidratado de varios metales, entre otros el plomo.

91. *Kasolita*.—Es un hidrosilicato de plomo, como la *lambertita*.

92. *Rutherfordina*.—Es un hidrocarbonato de uranio y otros metales.

93. *Voglita*.—Es un hidrocarbonato de uranio con calcio y cobre.

94. *Uranothalbita*.—Es un hidrocarbonato de uranio y calcio, análogo a la *liebigita*.

95. *Voglianita*.—Es un sulfato de uranio y otros metales, esencialmente plomo.

96. *Uraconisa*.—Es un sulfato de uranio y calcio, análogo a la *uranopilita* y la *medjidita*.

97. *Johanita*.—Es un sulfato de cobre y uranio análogo a la *zipeita* y a la *gilpinita*.

98. *Fosforanilita*.—Es un hidrofosfato de uranio y otros metales.

99. *Stasita*.—Es un hidrofosfato de uranio y otros metales, esencialmente plomo, análoga a la *dumontita*, *parsonsita*, *renardita* y *dewindtita*.

100. *Trögerita*.—Es un arseniato hidratado de uranio y otros metales, esencialmente plomo.

101. *Uranospinita*.—Es un arseniato hidratado de uranio y cal.

102. *Zeunerita*.—Es un arseniato de uranio y cobre.

103. *Walpurgita*.—Es un arseniato de uranio hidratado con bismuto y otros metales.

M. Substancias asfálticas y carbonosas uraníferas

Strutt, en 1905, hizo la primera determinación del porcentaje de uranio en el material asfáltico cuando encontró el U_3O_8 en la proporción del 0,377 % en el Kolm Sueco. Intentó también encontrar torio, pero no lo consiguió.

Desde entonces, la presencia del uranio en semejantes substancias ha sido reconocida frecuentemente.

En 1926, David hizo un análisis cuidadoso de una «asfaltita» (104) del lado Norte de Temple Mountain, a cuarenta y cinco millas al SO. del río Verde, de Utah.

La *asfaltita* se halla, en granos redondos de alrededor de un octavo de pulgada de diámetro, en unas areniscas y conglomerados de Shinarump, del período Triásico, como si fuera un depósito más reciente, que las aguas sulfurosas termales la hubiesen precipitado. La substancia analizada contiene un 22,35 % de volátiles y 3,28 % de U_3O_8 .

Otra substancia analizada es el *kolm* (105), que es una pizarra bituminosa del último período cambriano, y en ella Wells ha encontrado 0,44 % de uranio.

Otras substancias de verdadera importancia para la investigación son las *anthraxolitas* (106), con el 95 % de carbono, de Sudbury, Ontario, y del distrito de Mackenzie, NE. del Canadá.

Estas se presentan en las rocas del precambriano y contienen uranio. Hablando del sedimento de Sudbury, Coleman escribe: «Se llegó a la conclusión de que el esquistoso era, en origen, una pizarra oleosa, y que la substancia, semejante al carbón, había alcanzado su actual posición en capas cortadas a través del lecho de la pizarra, como un fluido o una fase plástica del petróleo. Más tarde, las partes volátiles habían desaparecido, y los residuos carbonosos habían ocupado un espacio más reducido, tanto que se contrajeron en formas planas o cúbicas».

Finalmente, a causa del deslizamiento de las aguas, depositaron cuarzos y pequeñas piritas en los espacios vacíos. Es posible que la avenida eruptiva contuviera níquel, el cual yace debajo de los sedimentos de la cuenca de Sudbury, causando roturas, por las que se debieron escapar los hidrocarburos de las capas bituminosas.

El *anthraxolito* del Great Slave Lake fué descrito por Rutherford como un filón en las rocas sedimentarias metamorfoseadas. También contiene cuarzo y sulfuros, y su historia probablemente ha sido similar a la de los *anthraxolitas* de Sudbury. El período geológico, no obstante, no ha sido determinado.

De diferente origen se considera la *thucholita* (107), que se presenta en unas pegmatitas en Pany Sound, recientemente reconocida por Ellsworth. Esta importante substancia se describe como un mineral de carbón azabache de

brillante lustre y perfecta fractura concoidea. $D. = 3,5$ a $4,5$; contiene carbón de 45 a 50 %, agua 2-13 % y cenizas 24-28 por ciento. Las volátiles son, principalmente, CO y H. Con pequeñas proporciones de H_2O , CO_2 , N_2 y CH_4 y algo de Cl_2 y S_2 . Las cenizas contienen $Th_2 = 48,48$ % y $U_3O_8 = 5,8$, así como trazas de los grupos de tierras raras de la Ce e Yt, y sílice y pequeñas cantidades de otros óxidos. La uraninita se encuentra algunas veces completamente incrustada en la *thucholita* y la ceniza de ésta y otras especies íntimamente asociadas con la uraninita, siendo ella misma altamente uranífera.

El nombre consiste en la fórmula química Th, U, C, H y O, con *l*, añadida por fonética a la usual terminación *ita*.

El mineral se presenta en su primera constitución como una pegmatita asociada con la uraninita *calcio-samaraskita* y *zyrsolita* o incrustado en feldespato, cuarzo o mica, en forma de irregulares y redondas prominencias de un milímetro a una pulgada de diámetro.

Una substancia similar ha sido anteriormente descubierta en Suecia y Canadá. Ellsworth tiene muestras de otras localidades del Shield Canadiense.

Spena ha descrito recientemente una pizarra muy interesante de *thucholita* en una pegmatita explotada para beneficiar feldespatos, en la mina Besner, cerca de la estación de Britl, en la C. P. línea Sudbury-Toronto.

Su distintivo más importante es la forma cúbica de algunas especies aparentemente pseudomórficas, análogas a la uraninita. El último mineral se presenta, relativamente, en grandes cantidades como mineral asociado con la *thucholita*, y no se observó en ninguna otra parte.

Contiene también el filón un aceite muy parecido a petróleo y cuerpos semejantes a guisantes, de una substancia que se asemeja a la *elaterita*.

La *thucholita* parece haber sido una de las últimas formaciones de la corriente, y su testimonio coincide con las fuertes alteraciones de algunos de los minerales asociados.

Spence observa que un origen ígneo en el yacimiento oleaginoso no está excluído. El origen ígneo se sostiene más ampliamente por el hecho de que la *thucholita* ha sido recientemente descubierta en las pegmatitas de la Carcha rusa.

También en Australia se ha encontrado uranio en ciertas turberas, cuyas *turbas uraníferas* (108) contienen en sus cenizas una apreciable proporción de U_3O_8 , por lo que han sido explotadas con este objeto.

LISTA DE MINERALES

<i>M I N E R A L</i>	Núm.	<i>M I N E R A L</i>	Núm.
Aeschynita	54	Coracita	6
Allanita	46	Cupro-uranita	18
Alvita	37	Curtia	88
Ampangabeita	81	Delorenzita	53
Anerodita	74	Dewindtita	99
Anthraxolita	106	Dumontita	99
Asphaltita	104	Eliasita	9
Auerlita	24	Ellsworthita	67
Autunita	16	Erdmannita	41
Bassetita	16	Eschwegeita	86
Becquerelita	11	Esfena	47
Betafta	64	Eucrasita	34
Bloomstrandina	58	Euxenita	56
Bloonstrandita	66	Ferganita	20
Brannerita	51	Fergusonita	82
Brögerita	3	Fourmanerita	87
Calcio-samaraskita	76	Freyalita	35
Calcio-thorita	29	Gadolinita	39
Calcio-uranita	16	Gilpinita	97
Carnotita	19	Guadarramita	51
Chalcolita	18	Gumita	9
Chinkolobwita	15	Hatchettolita	63
Cleveita	4	Hellandita	42
Columbita	70	Hjelmita	80

<i>M I N E R A L</i>	Núm.	<i>M I N E R A L</i>	Núm.
Hemilita	41	Sklodovskita	15
Hussakita	22	Sodita	90
Hydrothorita	33	Sphena	47
Ianthinita	13	Stasita	99
Ishikawaita	75	Steenstrupina	45
Johanita	97	Tantalita	71
Johnstrupita	48	Tanteuxenita	56
Kasolita	91	Thorianita	8
Kolm	105	Thorita	26
Kopita	62	Thorogummita	31
Lambertita	91	Thorotungstita	25
Liebigita	94	Thucholita	107
Lyndochita	60	Titanita	47
Mackintoshita	30	Todita	73
Medjidita	96	Torbernita	18
Melanocerita	44	Tritomita	43
Mendelyeovita	68	Trogerita	100
Microlita	72	Tscheffkinita	50
Monazita	21	Tyuyamunita	20
Mosandrita	49	Turba uranífera	105
Naegita	38	Ulrichita	2
Nivenita	5	Uranocircita	17
Nohlita	77	Uraconisa	96
Nuclaita	69	Uraninita	1
Orangita	27	Uranophano	14
Ortita	46	Uranosphaerita	89
Parsonita	99	Uranospinita	101
Pezblenda	7	Uranothallita	94
Phosphoranylita	98	Uranothorita	28
Pisakita	23	Uranotilo	14
Pillinita	10	Voglianita	95
Plumboniobita	78	Voglitita	93
Polycrasa	57	Walpurgita	103
Polymignita	55	Wikita	69
Priorita	59	Xenotimo	22
Pyrocloro	61	Ytrialita	40
Ronardita	99	Ytriocrasita	52
Risorita	85	Ytriogummita	32
Rutherfordina	92	Ytriotantalita	79
Rutherfordita	83	Zeunerita	87
Samaraskita	74	Zippeita	97
Samirésita	65	Zircón	36
Schoepita	12	Zyrtolita	37
Sipylita	84		

Todos estos minerales contienen la serie completa de los elementos radiactivos, desde el uranio hasta el torio, con sus isótopos correspondientes.

Haciendo un examen bien detenido de la anterior relación, no es difícil llegar a juzgar qué tipos de menas han de ser más interesantes para la industria del uranio, del radio y del torio.

Comprendiéndose perfectamente que en la metalurgia del uranio las menas de mayor rendimiento han de ser las del grupo de los óxidos e hidróxidos, que además de su elevada ley en uranio tienen la gran cualidad de que la relación entre el torio y el uranio no pasa del orden de 10^{-5} , habiendo muchos ejemplares de *pezblenda* que no acusan más que trazas de torio, lo que aumenta notablemente su valor para la extracción del radio, según ya se ha indicado anteriormente.

Los minerales del grupo de los fosfatos conocidos con el nombre de *micas de uranio*, son también buenas menas, pero como minerales de tipo secundario; se presentan muy diseminadas en los campos uraníferos, por lo tanto son de escaso rendimiento.

Otra de las menas más apreciadas en el mercado del uranio es la *carnotita*, que ha dado lugar en América y otros países a una gran producción de radio, pues aunque es una mena francamente pobre en uranio, es en cambio rica en vanadio, cuyo subproducto le da un gran valor comercial a estas menas, por ser este metal muy apreciado en la industria de las ferroaleaciones y aceros especiales.

También ha dado lugar a explotaciones de cierta extensión la *betafita* de Madagascar, pero ésta tiene un gran inconveniente, y es que contiene del 1 al 4 % de torio, lo que es un mal enemigo para la extracción del radio.

La existencia del vanadio también favorece a la *tyuya-*

munita de Ferghana (Rusia), que a pesar de ser un mineral sumamente pobre en uranio y radio, su tratamiento resulta bastante económico, debido a la sencilla composición química de esta mena, ya que no es más que un urano-vanadato de cal, con el carbonato de cal como ganga.

En cuanto a las reservas de uranio metal, que hoy se conocen, poco puede decirse, ya que hasta hace poco tiempo nadie se había preocupado de hacer un recuento de esta riqueza mineral.

No obstanté esto, es curioso dar a conocer los datos que hoy se encuentran sobre las mismas, ya que a pesar de no poderse reunir datos muy concretos sobre este particular, al hacer un estudio comparativo de los mismos, se destaca nuestra nación como una de las más importantes.

Cuadro comparativo de las posibles reservas de uranio, metal que se calcula existe en las cinco partes del mundo (1).

PUNTO DE PROCEDENCIA	Reservas en toneladas de uranio metal
Congo Belga.....	11.000 toneladas
Canadá.....	7.500 »
Checoslovaquia.....	1.500 »
Estados Unidos.....	1.000 »
España.....	850 »
Portugal.....	250 »
Rusia Asiática.....	200 »
Africa Oriental.....	100 »
Madagascar.....	50 »
Varios países.....	50 »
Total.....	22.500 toneladas

Cuyos datos son lo bastante elocuentes para compren-

(1) Parte de estos datos han sido tomados de un artículo publicado por la revista «Ejército», en el número 72, titulado «Nota sobre los minerales de uranio», del que es autor D. Antonio Carbonell, Ingeniero de Minas.

der la importancia que puede tener el aprovechamiento de estos criaderos en España, cuyos métodos de explotación y concentración de minerales deben ser cuidadosamente estudiados, ya que dadas las características de estos yacimientos, si se sometieran a una explotación anárquica e intensiva se agotarían muy rápidamente.

Con lo que damos por terminada esta exposición de datos sobre el panorama mineralógico del uranio, para pasar a hacer algunas consideraciones de tipo técnico y económico, relacionadas con las posibles dificultades que pueden presentarse en la explotación de estos criaderos.

II. ASPECTO TECNICO-ECONOMICO DE ESTA MINERIA

La minería del uranio presenta serias dificultades, ya que a pesar de la profusión con que se encuentra este elemento en la naturaleza, sus campos de explotación son muy limitados.

Para darnos cuenta de esto, basta fijar un poco la atención en el adjunto *mapa mundial* en el que figuran los principales yacimientos que se conocen hasta la fecha.

Los más ricos, sin duda alguna, son los del Congo Belga, que se vienen explotando desde el año 1923, situados en la región de Schikolobe (Alto Katanga), en los que se presenta como mineral de profundidad la *pezblenda* y en superficie, como productos de alteración de ésta, la *curita* y *kasolita*, cuyos minerales son todos ellos de alta ley en óxido uranoso-uránico, acusándose en algunos sitios la presencia del cobalto, aunque en general son de muy sencilla composición.

También se encuentra a veces la *becquerelita*, con el 86,5 % de U_3O_8 , el 5,25 de O Rb y un 5,82 % de H_2O ; y la *sodita*, con el 85,33 % de U_3O_8 , 7,83 de SiO_2 y el 3,59 % de H_2O .

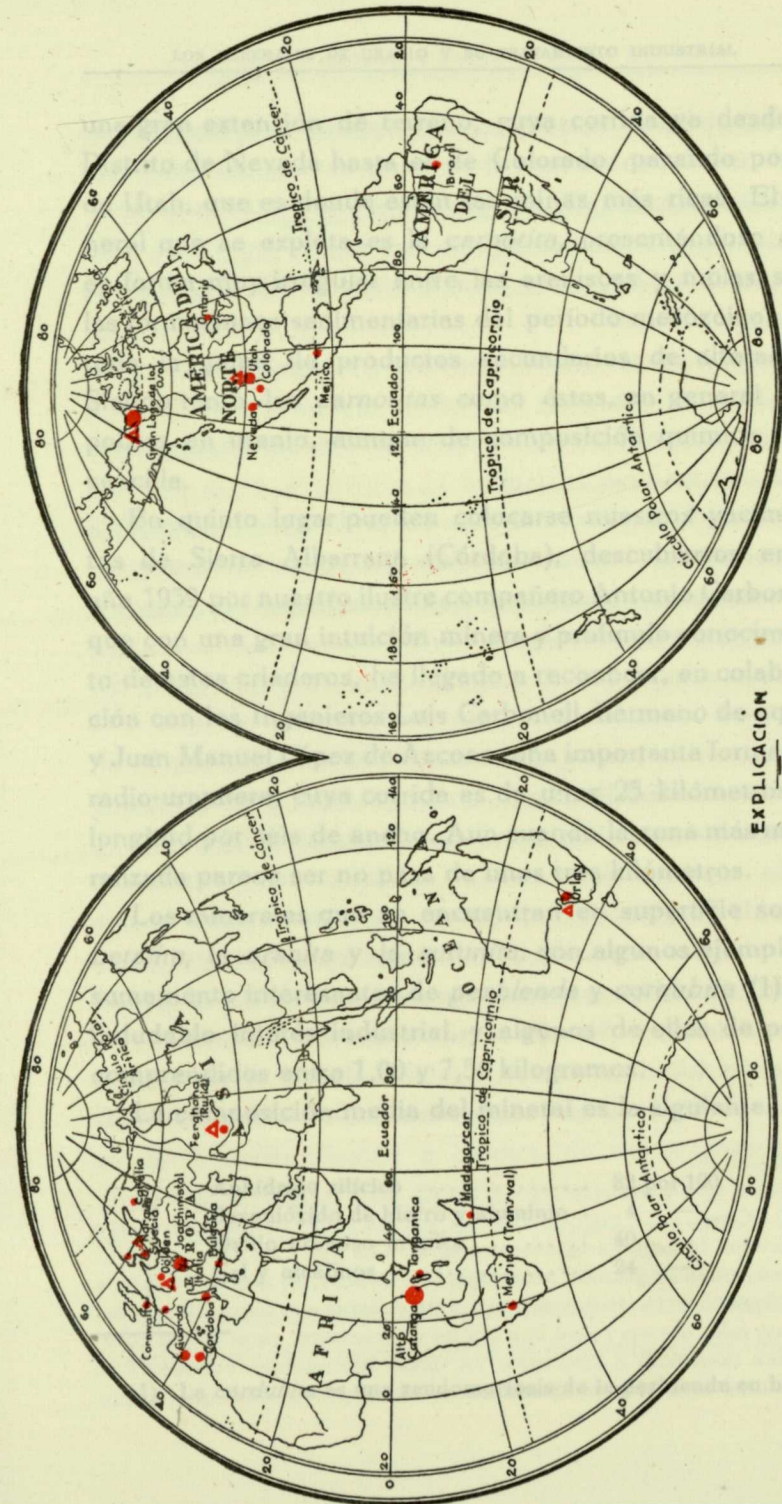
En segundo lugar pueden colocarse los yacimientos

del Canadá, cuya explotación se inició en el año 1931, situados en la región del Gran Lago de los Osos y en Ontario, siendo sus características muy parecidas a las del criadero que acabamos de citar, pues se explotan a profundidad las *pezblendas* y en superficie los hidróxidos de uranio, de alta ley comercial. La explotación de estas minas presenta en invierno serias dificultades por encontrarse cerca del mar Artico, dentro de la zona conocida por *la región de los hielos*.

En tercer lugar vienen los yacimientos de Joachimsthal, Checoslovaquia (1), que son los criaderos de uranio más antiguos del mundo. Fueron descubiertas estas minas en el siglo xvi, habiendo sido explotadas en aquella época como minas de plata, hasta el año 1853, que se descubrió la presencia del uranio, comenzando entonces su beneficio y explotación como minas de uranio, aunque su desarrollo ha sido muy lento. No pudiendo competir en cantidad de mineral, ni en calidad, con los anteriores, a pesar de que su formación es de tipo muy parecido al de éstos, tanto en lo que se refiere a las *pezblendas*, como a los hidróxidos de uranio que en él se presentan, aunque son menas mucho más complejas que las del Congo Belga y Canadá, ya que éstas suelen ir íntimamente ligadas con varios sulfuros de otros metales. Este gran yacimiento, que puede decirse fué el origen de las explotaciones de uranio, se encuentra hoy día bastante agotado, pues sus labores han llegado en algunas minas hasta los 500 metros de profundidad.

En cuarto lugar vienen los importantes yacimientos de Norteamérica, explotados desde el año 1917, que ocupan

(1) Estos ocupan un campo de fractura de cinco kilómetros (E.-O.) por tres kilómetros (N.-S.), y sus explotaciones han llegado en algunos sitios a los 500 metros de profundidad.



una gran extensión de terreno, cuya corrida va desde el Distrito de Nevada hasta el de Colorado, pasando por el de Utah, que es donde están las minas más ricas. El mineral que se explota es la *carnotita*, presentándose ésta en forma muy irregular entre las areniscas y molasas de las formaciones sedimentarias del período mesozoico, con toda la gama de productos secundarios de alteración. Siendo tanto las *carnotitas* como éstos, en general muy pobres en uranio, aunque de composición química muy sencilla.

En quinto lugar pueden colocarse nuestros yacimientos de Sierra Albarrana (Córdoba), descubiertos en el año 1939 por nuestro ilustre compañero Antonio Carbonell, que con una gran intuición minera y profundo conocimiento de estos criaderos, ha llegado a reconocer, en colaboración con los Ingenieros Luis Carbonell, hermano de aquél, y Juan Manuel López de Azcona, una importante formación radio-uranífera, cuya corrida es de unos 25 kilómetros de longitud por seis de ancho. Aun cuando la zona más mineralizada parece ser no pasa de unos tres kilómetros.

Los minerales que se encuentran en superficie son la *betafita*, la *uranita* y la *autunita*, con algunos ejemplares sumamente interesantes de *pezblenda* y *cordubita* (1), de indudable interés industrial, y algunos de ellos de pesos comprendidos entre 1,00 y 7,50 kilogramos.

La composición media del mineral es la siguiente:

Anhídrido silíceo	32	por 100
Sexquióxido de hierro y aluminio..	4	—
Oxido uranoso-uránico ..	40	—
Cal y alcalinos	24	—

(1) La *cordubita* es una pseudomorfofisis de la *pezblenda* en berilo.

Que, como puede verse, corresponde a un buen mineral de uranio, sobre todo si se tiene en cuenta que hasta ahora solamente se han explotado minerales de superficie. No dando más detalles de esta formación, porque de todo esto ha de hablar, como ya dije antes, nuestro compañero D. Miguel Moya.

En sexto lugar puede colocarse Portugal, cuya formación alcanza una gran extensión, que va desde Viceu a Guarda, llegando en algunos puntos hasta nuestra frontera.

El mineral que se explota en superficie es la *autunita* y la *torbernita*, encontrándose en profundidad la *pezblendita*, como suele suceder en todos los yacimientos que encajan en rocas hipogénicas, habiendo llegado en algunos puntos la explotación hasta los 100 metros.

Estas minas, que vienen explotándose desde 1923, tienen para nosotros una gran importancia, ya que esta misma corrida parece ser se introduce en España a la altura de Ciudad-Rodrigo, prolongándose probablemente hasta la Sierra de Gata, en la provincia de Cáceres (1).

En séptimo lugar pueden colocarse los yacimientos rusos de Ferghana (Turquestán), que tienen también una gran corrida, aunque con minerales pobres (del 1,00 al 1,50 % de U_3O_8), que desaparecen entre los 40 y 60 metros de profundidad. Siendo la mena que se explota la *tyuyamunita* (nombre de la localidad donde se encuentra, Tyuya-Muyun), la cual se presenta en forma de estalactitas

(1) Como dato curioso diremos que las zonas donde se presenta en Portugal la *pezblendita*, suele verse en una serie de filones radiales, que arman en granito, acompañados, a veces, de menas de estaño y wolframio; pero de los dos tipos de granito que hay en la región, uno con mica blanca y otro con biotita y muscovita, en el que el cuarzo tiene tendencia a cristalizar en forma bipiramidal, solamente en este último se encuentra el uranio.

y estalacmitas de bellos colores en las cavernas de las calizas paleozoicas.

En octavo lugar vienen los yacimientos de Africa Oriental, de análogas características que los del Congo Belga, en los que se han llegado a encontrar ejemplares de *pezblendita* de 30 kilogramos de peso.

En noveno lugar vienen los yacimientos de Madagascar, en los que se encuentran la *uraninita*, en espléndidos cristales, aunque de interés solamente mineralógico, y la *betafita*, con un 26 al 27 % de U_3O_8 y un 1,00 a 1,50 por 100 de ThO_2 .

En décimo lugar pueden colocarse los yacimientos de Australia del término de Olary (Adelaida), que vienen trabajándose desde 1926, cuyos minerales tienen solamente del uno al dos por ciento de U_3O_8 .

OTROS YACIMIENTOS.—Como yacimientos de menor importancia se pueden citar: los de Cornwall (Inglaterra), en los que la *pezblendita* se presenta en los filones de cobre y estaño y no profundiza más de 40 metros, y los de Africa del Sur, Méjico, Brasil, Noruega, Italia, Francia, Suiza, Suecia, Bulgaria y Finlandia.

Como puede verse, todos los criaderos de *pezblendita* en superficie presentan análogos caracteres, no obstante lo cual, dada la variedad de minerales secundarios que hay por encima del nivel de las aguas freáticas como producto de la autooxidación e hidratación de la *pezblendita*, suelen presentarse con gran irregularidad y de muy diferentes formas, por lo que es sumamente difícil reconocerlos.

Lo mismo ocurre con los yacimientos de *carnotita*, en los que el mineral en superficie se presenta de las más variadas formas, aunque siempre formando masas lenticula-

res, que encajan en las areniscas, en las que su tonelaje difícilmente es superior a las 100 toneladas.

Por lo que es preciso hacer un reconocimiento previo, muy detenido, en ambos casos.

En el *primer tipo de criaderos*, la existencia del mineral, unas veces se acusa por los colores vivos del polvo amorfo de color verde y amarillo canario, si se trata de hidróxidos, conocido por los mineros con el nombre de *ocre de uranio*, el cual se suele presentar rellenando las grietas y diaclasas de la roca de caja. Y otras veces por la presencia de *micas de uranio* de fuertes tonos verdosos, cuyos cristales, de pequeñas dimensiones, van tapizando normalmente las paredes de las grietas de las rocas hipogénicas donde se encuentran.

El *segundo tipo de criaderos* se debe buscar en los bancos de molasas y conglomerados de canto menudo, más o menos fisuradas, que encajan entre las areniscas, por ser en este tipo de roca donde se suele encontrar siempre la *carnotita*.

Asimismo, la presencia de la calcita y materias carbonosas es también un buen indicio.

Pero lo que más orientación da al minero, en estos casos, es el colorido del terreno.

Así, por ejemplo, el mineral rico del 5 al 6 % de U_3O_8 , es inconfundible por su color brillante de amarillo canario.

En cambio, los minerales de ley media (2 a 3 % de U_3O_8), tienen los más variados aspectos, color naranja, amarillo, verde, café tostado y a veces negro.

Cuando la calcita acompaña al mineral, éste suele tomar un tono amarillo rubio y a veces blanco.

La presencia del cobre los hace tomar tonos verdosos, y en cambio, cuando predomina el vanadio, les da un color azul lustroso, café tostado, negro o de tintes grisáceos, y

si el elemento predominante es el ácido vanádico le da un color rojo ladrillo.

Como regla general, los minerales de textura fina que se asemejan a la arena mineralizada, son los mejores, aunque difíciles de encontrar.

A veces los minerales de tonos amarillos que parecen ricos, no tienen más que el 1 % de U_3O_8 .

En cambio, hay una variedad de la arenisca de tonalidad parecida a la del cacao, que da el 5 % de U_3O_8 .

Por todo lo cual, tanto en uno como en otro caso, es aconsejable hacer una prospección sobre el terreno, lo más detenida posible, con el electroscopio de campo, o mejor aún con el contador de partículas de auriculares radiofónicos, que registran la mayor o menor ionización del aire, producida por las radiaciones de los minerales radiactivos.

También puede emplearse en algunos casos la lámpara de cuarzo para descubrir las zonas mineralizadas, fundándose esta prospección en la fluorescencia de ciertas sales de uranio, pero esto no siempre da buenos resultados, pues la *pezblenda* no la acusa y solamente da indicaciones en ciertos minerales secundarios, a base de cloruros, nitratos y *ocres de uranio*.

Una vez hecho este estudio, deben tomarse una serie de muestras para su análisis inmediato en el electroscopio de laboratorio, tomándose en todos los casos la precaución de que el polvo del mineral que se vaya a analizar haya pasado previamente por una criba de 40 a 60 mallas, y que esta misma operación haya sido hecha con la muestra tipo que haya servido de patrón, ya que la diferencia de tamaños influye grandemente en los resultados, debiéndose pesar en una y otra, a ser posible, la misma cantidad para el ensayo.

Después de seleccionado el mineral, deberá hacerse de

él un ensayo volumétrico, microscópico y gravimétrico, para estudiar el tipo de lavadero que más convenga para su tratamiento mineralógico, en la obtención de concentrados.

En unos casos, puede ser a base de *concentración en seco*, por medio de molinos Reimond de trituración, aspirando el mineral con ventiladores y colocando conos de absorción, intercalados en las tuberías que recogen los productos tratados. Completándose esta recuperación, por orden de tamaños y densidades, con unas cámaras de sacos o con un aparato Cottrell electrostático, para la recuperación de polvo.

Este procedimiento debe emplearse siempre que donde se vaya a montar la planta de concentración el agua sea escasa, como ocurre, por ejemplo, en Australia, que tiene sus minas en un gran desierto.

En cambio si el agua es abundante, es preferible hacer el *tratamiento húmedo*, pues el polvo de los minerales de uranio es muy perjudicial para la salud, produciendo trastornos de nariz, garganta y oídos, y a veces inflamaciones de vísceras.

En estos casos, el tipo de lavadero deberá adaptarse a la mena que se vaya a concentrar, siendo el más sencillo el de mezclar con agua el mineral triturado y molido, después de clasificarlo en cascada en sus diferentes tamaños, para obtener la concentración, por decantados sucesivos, para lo cual suelen emplearse los mezcladores y decantadores Dorr.

Otras veces conviene más emplear los métodos gravimétricos o de flotación, que gastan mucha menos agua y suelen dar altos rendimientos.

Asimismo conviene estudiar con todo detenimiento el método de explotación más adecuado a cada caso, siste-

ma de transporte y cuantos servicios puedan tener una influencia directa en los precios de coste.

Sin cuyas precauciones puede fracasar la parte financiera de estas explotaciones, elemento esencial para el buen desarrollo de una industria.

III. BENEFICIO DE ESTOS MINERALES PARA LA OBTENCION DE SALES DE URANIO Y RADIO

Dadas las pocas aplicaciones que hasta la fecha ha tenido este metal, la concurrencia de las sales de uranio en el mercado siempre ha sido muy limitada, encontrándose éste generalmente en forma de diuranato de sodio, uranato amónico y pentafluoruro de uranio, que son las primeras materias que se emplean para la obtención de los colores de uranio, ferroaleaciones y uranio metal.

Dichas sales se obtenían, hasta hace poco, como sub-productos de las operaciones de extracción del radio de estos minerales; pero hoy, dadas las nuevas aplicaciones que se quiere dar a este elemento, han pasado a ocupar un primer plano en el mercado.

Los principales minerales que se han beneficiado en gran escala, después de haberse descubierto las aplicaciones del radio, han sido, según ya hemos visto, la *pezblenda* y la *carnotita*, habiéndose mezclado los hidróxidos y fosfatos de uranio con estas menas para su tratamiento, siempre que han concurrido en el mercado.

Por lo que solamente a dichos tipos de menas hemos de referirnos al describir los procedimientos químicos y

metalúrgicos que se han seguido para beneficiar estos minerales, con el fin de no hacer demasiado extensa esta conferencia, citando casos particulares.

A. Tratamiento industrial de la pezblenda

El tratamiento industrial que se sigue con estos minerales viene a ser, con ligeras modificaciones, el mismo que inventó Patera para tratar los minerales de Joachimsthal.

En el cual se obtiene, como productos finales: de una parte, el uranato de amonio, del cual se parte para obtener las sales de uranio comerciales y materias primas para obtener el uranio metal, y de otra, el cloruro y bromuro de radio, que es la sal radifera que se vende en el mercado para usos radioterapéuticos.

En el tratamiento de este mineral se debe partir de concentrados que tengan, como mínimo, del 45 al 50 % de U_3O_8 , los cuales vienen a dar un gramo de radio por cada 10 ó 20 toneladas.

Estos concentrados, convenientemente triturados, se someten después a una tostión, a fuego lento, en un horno de reverbero.

Para cargas de unos 200 kilogramos, esta tostión dura de 10 a 12 horas, según la proporción de azufre y arsénico que contenga el mineral.

Cuando la carga deja de desprender vapores de SO_2 y As_2O_3 , se eleva la temperatura del horno hasta el rojo oscuro, cuidando de hacerlo con suma lentitud para evitar la aglomeración del mineral.

Después se deja enfriar un poco la carga en el horno,

agregando un 15 % de su peso de carbonato de sosa y un 2 % de nitrato sódico, elevándose de nuevo la temperatura hasta la completa torrefacción del mineral, que pasa de su color gris primitivo al amarillo pardo, con lo cual todo el uranio pasa al estado de uranato sódico y el arsénico, antimonio, wolframio, molibdeno y vanadio al de sales sódicas de los ácidos respectivos.

El producto tostado, una vez enfriado, se tamiza y muele a fondo, de nuevo, en molinos de bolas, lavándose con agua el producto obtenido por porciones de 30 kilogramos, filtrándose en *filtros prensa* para separar la parte insoluble que contiene, además del uranato de sodio, las sales correspondientes formadas con los otros metales, plomo, plata, níquel, cobalto, cobre, hierro y las de los metales térreos.

Con la pulpa que se obtiene, se forma una pasta con agua caliente, a la cual se agregan 15 kilogramos de ácido sulfúrico y un kilogramo de ácido nítrico, este último para acabar de oxidar las porciones de mineral cuya tostación no haya sido completa.

La parte preparada se lava de cuatro a cinco veces, para arrastrar en la parte disuelta todo el uranio en forma de sulfato de uranilo, mientras que en la parte insoluble queda el radio, *radio D* y *protoactinio*, con el ácido silíceo, óxido de hierro y sulfatos de cal, bario y plomo. Siendo esta parte la que sirve para obtener las sales de radio por tratamiento ulterior, según veremos después.

Al sulfato de uranilo disuelto, se le agrega agua de la procedente del lavado de la carga del horno, que contiene sosa, agregando a estas aguas una nueva cantidad de dicha sal, para precipitar el uranio en forma de carbonato de uranilo, junto con los óxidos de los metales, tierras raras y otros cuerpos extraños, el cual, en un exceso

de sosa, se redisuelve en forma de carbonato de sodio y uranilo.

Esta solución se hierve durante dos o tres horas para descomponer el bicarbonato cálcico, carbonato de hierro y otras sales que haya podido arrastrar la disolución, la cual debe retirarse sin enturbiamiento alguno, neutralizándola con ácido sulfúrico, con lo cual se precipita el diuranato de sodio puro, de color amarillo brillante, que se lava con agua, mientras que la sal de Glauber se mantiene disuelta.

Dicho diuranato de sodio se seca y trata por lavados sucesivos para separar completamente el sulfato de cal y magnesia que se adhiere persistentemente, teniendo en cuenta que el agua de todos estos lavados, tratada con ferrocianuro potásico, no debe acusar el menor indicio de uranio.

Si a la solución de carbonato de sodio y uranilo se les agrega en caliente lejía sódica, se precipita el uranato de sodio de color amarillo naranja.

Y finalmente, si la solución de carbonato de sodio y uranilo se hierve con sulfato amónico o cloruro amónico, se obtiene el uranato de amonio, que siempre contiene algo de sodio, por ser éste de difícil separación.

En el caso que esta sal sea demasiado impura, se debe emplear para obtener el óxido de uranio negro, o el nitrato de uranio, como productos comerciales para pinturas y otros usos. Para lo cual bastaría calcinar a fondo el uranato de amonio, para obtener el óxido de uranio.

El cual puede convertirse en nitrato, disolviéndolo en ácido nítrico y agua destilada a razón de 0,68 centímetros cúbicos de ácido por gramo de óxido de uranio, calentándolo después por espacio de 4 a 6 horas, al cabo de las cuales se filtra para eliminar las impurezas, concentrándolo seguidamente para provocar su cristalización.

También puede obtenerse el uranio en forma de nitrato de uranilo, partiendo directamente de la *pezblenda*.

Para lo cual, Peligot trataba el mineral tostado con ácido nítrico y filtraba, evaporando el líquido filtrado a sequedad, lavando con agua, de nuevo, el nitrato de uranilo y evaporando la solución.

Con lo cual se consigue depurar bastante esta sal, que se recristaliza con éter y agua. Aun cuando este procedimiento, por ser más caro que el anterior, no ha sido sancionado por la práctica industrial.

Sobre todo si se tiene en cuenta, que las sales de radio obtenidas con el primer procedimiento indicado, son mucho más puras que las de este último.

Para obtener el cloruro de radio comercial, una vez purificados por lavados sucesivos, los sulfatos de radio, bario, plomo y cal, que contienen algo de sílice y óxido férrico, se ataca con ácido clorhídrico para separar el cloruro de bario radífero de los otros elementos.

Después de filtrado dicho cloruro se somete a la práctica de fraccionamientos sucesivos para activar su cristalización y suprimir impurezas, con lo que se obtiene un cloruro bastante puro.

El procedimiento que se sigue en Córdoba con los minerales de Sierra Albarrana por la *Sociedad Berilio y Radio Español*, S. A. —según los datos que amablemente me ha proporcionado su Consejero-Delegado D. Antonio Carbonell—, con el que se obtiene una sal de radio sumamente pura, es el siguiente:

1.º Con 1.000 gramos de mineral bien porfirizado se hace una papilla con 600 centímetros cúbicos de ácido nítrico concentrado y 1.500 a 2.000 centímetros cúbicos de agua destilada, sin dejar de agitar un momento para que el ataque sea completo, evaporando después a sequedad.

2.º Este residuo se diluye e hierve después con agua acidulada con ácido nítrico al 5%, dejándolo en reposo para que sedimenten los estériles, los cuales se separan por decantación. Esta operación se repite varias veces (4 a 6) hasta que dé agua sin vestigio de sales.

3.º Los líquidos decantados se filtran al «buckner» y seguidamente se separa la sílice que llevan, por neutralización con una solución de sosa, volviéndose a filtrar a la tromba y dejándolos en reposo para su concentración.

4.º Reducidos estos líquidos a volumen conveniente, se precipita el radio que lleva disuelto en forma de *sulfato de bario radífero*, para lo cual se le añaden 48 a 50 gramos de cloruro de bario, se hierve durante 20 a 30 minutos y se deja enfriar. Después se le agregan de 60 a 80 centímetros cúbicos de ácido sulfúrico concentrado, se hierve y agita de nuevo durante media hora y se deja en reposo durante 12 horas, para filtrarlo después.

5.º Este sulfato de Ba - Ra se filtra y se lava con agua acidulada con ácido clorhídrico, para disolver el uranio que pueda llevar, y una vez seco se convierte en cloruro de radio por el método Soddy, sometiéndolo después a cristalizaciones fraccionadas.

Para obtener dicho cloruro de radio se hacen las siguientes operaciones:

1.ª El sulfato doble de Ba y Ra se convierte en carbonato, diluyéndole en agua y agregándole carbonato sódico y sosa cáustica, hirviéndolo después durante seis a ocho horas, sin dejar de agitar.

2.ª Este carbonato se filtra a la tromba y se lava con agua caliente, hasta que quede exento de sulfato sódico.

3.ª Ya seco el carbonato de Ba y Ra, se transforma en cloruro en una cápsula con ácido clorhídrico concentrado, hasta que no dé efervescencia, y entonces se diluye en

agua destilada, se calienta y se filtra al «buckener», lavando los insolubles con agua acidulada por clorhídrico y después con agua caliente y, finalmente, se pone a concentrar para que cristalice, pasando luego a las cristalizaciones fraccionadas.

B. Tratamiento de la «carnotita»

El tratamiento de este mineral se practica, hoy en día, en gran escala en América, donde se obtiene, por término medio, un gramo de radio por cada 170 a 200 toneladas de mineral de este tipo, que se beneficia con el 1,75%, por término medio, de uranio.

La concentración del mismo es muy difícil, por ir íntimamente ligado con la arenisca que constituye su roca de caja, no obstante lo cual se llegan a obtener, por los procedimientos descritos, concentrados del 6 al 7% de U_3O_8 , que mezclados con los mixtos y minerales pobres, dan una ley media del 2% de ácido uranoso-uránico y el 4% de ácido vanádico, que es el tipo de mineral que generalmente se utiliza en este tratamiento, cuya marcha general es la siguiente:

El mineral, pulverizado, se va echando por paladas sucesivas en unos recipientes vidriados que contienen ácido nítrico de 38%, calentado a punto de ebullición con vapor de agua, cuyo líquido se agita constantemente.

Una vez que se ha completado la carga se calienta el líquido durante quince minutos y se aspira, haciéndole pasar por un filtro de barro, tratando la parte insoluble con un tercio de su peso de ácido nítrico de la misma concentración y se lava después con agua caliente.

En el líquido filtrado se encuentra casi todo el uranio, un 50 % del vanadio que contiene el mineral y prácticamente todo el radio.

Una vez retirado el líquido filtrado, se le agrega una solución de lejía sódica hasta que éste quede lo más neutro posible, sin que llegue a dar grumos de precipitado, ya que si hubiese demasiada lejía sódica se precipitaría el hierro y el vanadio, mientras que estando en defecto quedaría en la disolución parte del sulfato de bario y radio, que habría que precipitar en una nueva operación. Para lo cual se agrega cloruro de bario en la proporción de uno por mil, y ácido sulfúrico en la proporción de siete por mil, del mineral tratado, a no ser que este mineral contuviese ya bario, en cuyo caso la proporción de cloruro de bario debería ser menor.

Esta solución se deja en reposo de tres a cuatro días, al cabo de los cuales se retira con un sifón y se la deja caer en una solución hirviente de sosa en exceso, consumiéndose, por término medio, unos 325 kilogramos de sosa por cada tonelada de mineral tratado del 2,5 al 3 % de U_3O_8 , dejando entrar la solución en el recipiente donde está la sosa, lentamente y en constante agitación, terminando por hervir el líquido al final de la operación, durante algún tiempo.

En la nueva solución que se forma, debe encontrarse el uranio en forma de carbonato de sodio y uranilo, y el vanadio en forma de vanadato de sodio, mientras que el hierro, el aluminio y el calcio quedan en el precipitado, el cual se separa de la solución por medio de filtros prensas.

El líquido filtrado se neutraliza cuidadosamente con ácido nítrico hasta que se vea que empieza a formarse un precipitado amarillo, en cuyo caso se deja de añadir el

ácido y se hierve el líquido, precipitándose después el diuranato sódico con lejía de carbonato sódico.

Este precipitado contiene todavía, aproximadamente, un 7 a 9 % de óxido de vanadio, por lo que conviene purificarlo fundiéndolo con sal común en un crisol, tratando después la masa fundida con agua para disolver el vanadato de sodio, con lo que queda sin disolver el diuranato de sodio, casi puro.

Con este procedimiento se puede llegar a obtener un rendimiento en uranio contenido en el mineral tratado, del 75 al 94 %, quedando un 2 a 3 % en el residuo insoluble del ácido nítrico y un 10 a 15 % en el precipitado de las sales de hierro, aluminio y calcio.

IV. METALURGIA DEL URANIO

El uranio fué aislado por primera vez, en el año 1789, al estado de óxido, por el químico alemán Klaproth, al hacer el análisis de una pezblenda de Bohemia.

Pero en realidad, hasta el año 1840 no se llegó a obtener en forma de metal, siendo Peligot el primero que lo consiguió, reduciendo por fusión el tetracloruro de uranio con el potasio, en un crisol de platino.

Posteriormente se sustituyó el potasio de este procedimiento, por el cloruro de sodio y luego por el magnesio, obteniéndose así grandes ventajas en calidad y precio.

Pero así y todo, el producto obtenido resultaba demasiado impuro, debido a que el Cl_4U es muy higroscópico, por lo que se recurrió al horno eléctrico, fundiendo en un tubo de carbón una mezcla formada por 500 partes de óxido uranoso uránico (U_3O_8) puro con 40 de carbón de azúcar, a pesar de lo cual se obtenía un producto demasiado impuro, dada su afinidad por el carbono.

Por lo que es preciso refinarlo calentándolo de nuevo en un crisol revestido interiormente de una capa de óxido de uranio, que a su vez se coloca dentro de otro crisol de mayores dimensiones, separando las paredes de ambos con polvo de *ilmenita* (Ti Fe), O_3 , con lo que se evita

la producción del metal amarillo, recubierto de nitrógeno, que lo impurifica.

También se ha intentado obtenerlo por *aluminoterapia*, partiendo de sus óxidos, cuyo procedimiento ha sido desechado en la práctica por su mal rendimiento industrial.

Pero el procedimiento más eficaz y que mejores resultados ha dado en la práctica es el ideado por Driggs y Lillienthal, que consiste en obtener por electrolisis, en un horno de resistencia de carbón, la fusión a 775° de temperatura de una mezcla, en partes iguales, de cal y cloruro de sodio, a la cual, una vez fundida, se le va añadiendo poco a poco el uranio en forma de fluorurano potásico, precipitándose este metal en polvo en el cátodo.

El cual después de lavado dos o tres veces con agua, se le seca y vuelve a fundir de nuevo, para su refinado, en horno de inducción de alta frecuencia, con lo que se obtiene un botón del 99,88 % de uranio metal.

Partiendo del hexafluoruro de uranio, que rebaja notablemente la temperatura de disociación de los isótopos del uranio, se puede separar el *uranio 235*, tan en boga hoy día, del *uranio 238* por el sistema que ya nos indicó nuestro compañero Abbad, basado en la teoría del *espectrógrafo de masas*.

Antes de efectuar esta operación, conviene separar del *uranio 238* el *uranio 234*, conocido también con el nombre de *uranio X*, que en realidad no es más que un *torio* que se presenta en ciertos casos, lo que se consigue fácilmente enfriando una solución concentrada de *nitrato de uranilo*, en unos cristalizadores. Separando con todo cuidado los cristales que se hayan formado, con lo que quedará en las aguas madres más del 85 % del *uranio X* existente en el *nitrato de uranilo*, del que se ha partido.

Otro procedimiento consiste en agitar con éter el *ni-*

trato de uranilo hidratado, dejándolo reposar, con lo que se verá formarse en el fondo una capa acuosa, en la que queda separado todo el *uranio X*.

Cuando se trata una disolución de una sal de uranilo cualquiera con un exceso de carbonato amónico, para precipitar el hierro, el aluminio y otros elementos que la impurifican, el precipitado que se forma contiene, junto con estas impurezas, el *uranio X*.

Por lo tanto, si se disuelve este precipitado con ácido clorhídrico concentrado, al agitar de nuevo la disolución con éter saturado de gas cloro, el éter se apodera del cloruro férrico, quedando en el líquido el *uranio X*.

Se recomienda para activar la operación, añadir una pequeña cantidad de una sal de torio cualquiera a la sal de uranilo y precipitar luego la disolución con ácido fluorhídrico, con lo que se forma un precipitado que contiene todo el *uranio X*.

V. APLICACIONES INDUSTRIALES DEL URANIO

Las principales aplicaciones industriales del uranio son:

a). En la industria de las vidrieras artísticas y de la porcelana, donde sus sales se emplean como colorantes, debido a los brillos fluorescentes y maravillosas tonalidades que se obtienen en estas industrias, en los tonos de amarillo claro y amarillo limón, que dan los uranatos sódico y potásico, con los que se fabrican estos colores.

b). En la pasada guerra mundial se han empleado muchas pinturas fluorescentes fabricadas a base de sales de radio y uranio, para las inscripciones del material de a bordo de las aeronaves, para vuelos nocturnos.

c). También se han empleado sus sales en fotografía, como reforzador de negativos, para obtener las imágenes de nitrato de plata y uranio.

d). Como elemento radiactivo para la fabricación artificial de aguas y medicamentos radiactivos.

e). En forma de ferro-uranio, en la industria del acero, aunque esta aplicación no haya sido sancionada en la práctica.

No obstante lo cual, daremos una somera idea de la forma en que se han obtenido estas ferro-aleaciones y los aceros al uranio.

Para obtener un ferro-uranio del 20 %, basta adicionar al uranato de sodio, coque y espato flúor en determinadas proporciones, introduciendo todo esto en un crisol con acero fundido, se les agrega suficiente coque para formar un doble carburo de hierro y uranio ($CFe_3 - U_3O_3$).

Según Keeney se puede obtener una aleación del 50 % de uranio y menos del 5 % de carbono, mezclando torneaduras de acero, óxido de uranio, coque y espato flúor, en el horno eléctrico de electrodos móviles de carbón, elevando en éste la temperatura hasta los 1.490 grados, a partir de la cual comienza la reducción del óxido de uranio.

Si el baño está formado de 14 partes de torneaduras de hierro fundidas, en la cual se añaden lentamente 40 partes de UO_2 o de U_3O_8 , 7 de coque y 15 de espato flúor, se obtiene una aleación del 50 % de U, 4,95 % C y 1,18 % de Si, con un rendimiento en uranio del 60 al 75 % y un gasto de energía de 7 a 11 kilovatios hora por kilo de ferro-aleación.

El ferro-uranio es frágil, de corte brillante y elevado peso específico.

Para obtener un acero al uranio, se funde en el horno eléctrico revestido de ladrillos de magnesia, chatarra de hierro y acero, con cal y espato flúor, y una vez que se retiran las primeras escorias de descarburación y desfosforación, se les agrega el ferro-uranio, con cal, espato flúor y coque de petróleo, agregando en la última parte de la operación ferromanganeso y ferrosilíceo, para desulfurar, obteniéndose así un ferro-uranio del 50 % de uranio y un 2 a 4 % de carbono, con un 70 % de rendimiento, siempre que el acero empleado contenga menos del 2 % de carbón.

f). Como catalizador se ha empleado también en algunos casos, con excelentes resultados.

g). Aprovechando la propiedad que tienen los carbu-

ros de uranio (UC_2 y UC_3) de descomponer el agua formando metano, etano, propano, butano, propileno y toda la serie de hidrocarburos acetilénicos, se ha empleado en esta industria, obteniéndose este producto fundiendo en vacío en el horno eléctrico una mezcla de U_3O_8 con carbón de azúcar.

h). Y por último, como elemento esencial en la fabricación de la *bomba atómica*, ya que partiendo del uranio metal se puede obtener el *uranio 235* y los nuevos elementos *plutonio* y *neptunio*, que tan vasto campo presentan en las aplicaciones industriales de aprovechamiento de la energía atómica nuclear.

VI. EL DESARROLLO DE ESTA INDUSTRIA Y SU POLITICA COMERCIAL

El desarrollo de esta industria ha sido muy lento, de una parte debido a la gran escasez de materias primas en el mercado y, de otra, a haber estado supeditado éste a las demandas del radio, cuyo elemento es de almacenamiento muy delicado, sin contar la inmovilización de capital que un depósito de radio, por pequeño que sea, representa.

Para justificar esto basta fijarse en los precios que éste ha tenido en diferentes fases de su desarrollo.

En los primeros años en que madame Curie descubrió las propiedades radiactivas del radio, cuya escasez mundial era manifiesta, llegó a cotizarse el gramo de este elemento por encima del millón de pesetas.

Esto dió lugar a que el óxido negro de uranio, que en el año 1880 valía a 80 pesetas el kilogramo, se revalorizara, llegando a alcanzar un precio, en el año 1913, de 1.000 a 1.500 pesetas el kilogramo.

Posteriormente, debido al descubrimiento del importante yacimiento de uranio del Alto Katanga, del que hemos hablado, se estabilizaron los precios, ya que a par-

tir del año 1923 el Gobierno belga obtuvo prácticamente el monopolio de la venta del radio y uranio, bajo su inmediata intervención, sufriendo éstos ligeras variaciones. Hasta el año 1932, en cuya fecha comenzaron a explotarse los importantes yacimientos del Canadá, con lo que se estableció entre estas dos naciones la natural competencia. En el año 1941, en que, debido a las aplicaciones del uranio en la industria de guerra, llegaron a un acuerdo, se fundó con estas dos naciones, Estados Unidos e Inglaterra, el denominado *Cartel del Uranio*, que maneja hoy, prácticamente, todo cuanto se refiere a precios y reparto de la producción de los minerales radiactivos de estos países.

Debido a lo cual y al hermético secreto con que se ha llevado desde esta fecha hasta el día, todo cuanto a operaciones de uranio se refiere, nos es completamente imposible dar una idea, aunque no sea más que aproximada, de este mercado.

No obstante esto, voy a dar unas cifras, aunque no sea más que a título de información, de la cantidad de radio y uranio metal que se ha producido hasta la fecha.

Hasta 1926 se calcula se habían producido 507 gramos de radio, que a razón de $2,5 \text{ por } 10^{-7}$, que puede calcularse como rendimiento industrial la relación entre el radio y el uranio, equivale a 2.028 toneladas de uranio metal. De las cuales la mitad, aproximadamente, correspondió a la producción de los Estados Unidos, un 30 % al Congo Belga y el 10 % a Checoslovaquia, quedando el resto repartido entre Portugal, Madagascar, Rusia, Inglaterra y Sur de Australia.

Desde el año 1926 hasta el año 1938, se han producido 2.267 toneladas de uranio metal, equivalentes a 566,75 gramos de radio. Cuya producción, en más de un 90 %, ha co-

rrespondido al Gobierno belga, un 5 % al Canadá (cuyas explotaciones comenzaron el año 1935), y el resto a las otras naciones antes mencionadas. Por lo que se puede calcular una producción de radio en dichos años de 1926 a 1938 de unos 1.073 gramos.

En cuanto a los datos de los años comprendidos entre 1938 y 1941, son bastante incompletos, a pesar de lo cual puede calcularse que se han producido en estos años unas 650 tons. de uranio metal, equivalentes a unos 167,50 gramos de radio.

Los precios que han regido en estos años han sido bastante bajos, ya que en 1927 llegó a cotizarse el óxido negro de uranio a 20 pesetas el kilogramo —cuyo valor ha ido en aumento paulatinamente—, siendo la última cotización que hemos encontrado, la cual se refiere al año 1941, de 56 pesetas el kilogramo.

En cuanto al radio, que se cotizaba en el año 1927 alrededor de las 750.000 pesetas el gramo, ha obtenido una importante baja en estos últimos años, ya que en 1941 se cotizaba entre 275.000 y 330.000 pesetas el gramo.

En lo referente a medios de producción, cada nación ha procurado montar sus propias refinerías.

Así, por ejemplo, tan pronto como el Gobierno belga tuvo conocimiento de la importancia del yacimiento del Alto Katanga, de lo primero que se preocupó fué de montar su propia refinería, que instaló en Oölen (Bélgica). Cuya capacidad de tratamiento es de unas 100 toneladas día de mineral del 40 al 50 % de U_3O_8 , siendo hasta hace poco la más importante de todo el mundo.

Asimismo, el Gobierno del Canadá, dándose cuenta de la importancia de sus propios yacimientos, adquirió en el año 1941 las acciones de todas las sociedades mineras que explotaban este mineral, así como la refinería que las Em-

presas explotadoras habían montado en Port Hope. Cuya capacidad de tratamiento es de unas 50 toneladas día, de minerales de análoga ley a la anteriormente mencionada.

El Gobierno de los Estados Unidos tiene hoy día también intervenidas las explotaciones de uranio de toda Norteamérica. Habiendo montado en Montivello (Utah) una importante refinería en el año 1941, dedicada exclusivamente a fines de guerra. Cuya capacidad es de unas 100 toneladas día para minerales del 45 al 50 % de U_3O_8 .

Rusia tiene también montada su propia refinería en Bolshaya, próxima a Potenkino, cuyas características se desconocen por las razones de todos sabidas.

Asimismo, Suecia acaba de intervenir la producción del uranio en su nación y la refinería de Narke, donde se tratan estos minerales.

Existen otras muchas refinerías de uranio de menor importancia repartidas por todo el mundo, y principalmente fábricas de pinturas y otros productos de transformación, de las que no voy a hacer mención para no hacer demasiado extensa esta conferencia.

Nuestro Gobierno, dándose cuenta de la importancia que ha de tener en el futuro para el desarrollo económico de esta industria e independencia nacional las explotaciones de uranio, se preocupa actualmente de hacer un recuento de nuestras propias reservas minerales. Cuya misión le ha sido encomendada al Instituto Geológico y Minero de España, como complemento de las que ha efectuado, en la provincia de Córdoba, «Berilio y Radio Español», S. A., debido a las cuales, como habrán ustedes visto por el cuadro de reservas que antes hemos expuesto, figura España en quinto lugar.

Por lo que es de esperar que, con la ayuda de Dios, el

éxito acompañe a estos trabajos y no esté lejos el día en que podamos contar con nuestra propia industria nacional del uranio, pudiendo con esto ocupar el lugar que debe correspondernos en el concierto universal de las naciones productoras de este precioso elemento.

CRIADEROS DE URANIO

POR

MIGUEL MOYA Y GASTON

INGENIERO DE MINAS

CONFERENCIA PRONUNCIADA EN EL INSTITUTO DE INGENIEROS
CIVILES EL DIA 26 DE MARZO DE 1946

CRIADEROS DE URANIO

Doy gracias al ilustre Presidente de la Asociación de Ingenieros de Minas por haberme invitado a ocupar esta tribuna y a cuantos me habeis hecho el honor de venir a escucharme.

La Asociación ha tenido el acierto de organizar una serie de conferencias sobre el uranio. La actualidad del tema y el aspecto profesional y fundamental que ofrece lo requería así.

Han dado ya sus conferencias mis queridos compañeros López de Azcona, Abbad, Romero Ortiz y Comba. El alto valor científico de cuanto ellos han dicho y la singular elocuencia con que lo han dicho, constituye un éxito indiscutible para la iniciativa de nuestra Asociación. Y significa para mí, por el respeto que me inspirais, la tranquilidad y la ventaja de que las faltas, graves algunas, que advirtais en mi conferencia, no han de amenguar en lo más mínimo el satisfactorio resultado del curso en que figura.

Uranio. Aplicaciones

Desde que el 6 de agosto de 1945 estalló sobre Nagasaki la bomba atómica, no se ha dejado de hablar del uranio.

La historia del metal se inicia en 1789, cuando Klaproth lo descubre en un mineral de los criaderos de Joachimsthal y le da nombre en honor de Herschel, descubridor en aquel año del planeta Urano.

De la pezblenda separa el uranio metálico Peligot, y 13 años más tarde se instala en Joachimsthal una fábrica para la obtención de sales de uranio. El nitrato de uranio y los uranatos sódico, potásico y amónico tienen colores amarillos de diversos tonos; el sesquióxido de uranio es verde, el protóxido es negro. Se empleó el uranio para dar coloración a vidrios y cerámica.

Se lograba dar al vidrio un aspecto opalescente incorporando a su composición un 15 % de uranio. Por cierto que recientemente, en 1942, el Gobierno de los Estados Unidos prohibió el empleo del uranio en estos menesteres. En 1896, Becquerel descubre la radiactividad como una propiedad intrínseca y enteramente nueva del uranio, y en el 1898 el matrimonio Curie descubre el radio, al analizar unas muestras de pezblenda y encontrar en ellas una radiactividad superior a la correspondiente a su ley en uranio.

Se hicieron entonces las más atrevidas profecías sobre el progreso técnico que se lograría con el nuevo elemento. Se veía a una generación futura en la que un pequeño trozo de sal de radio reemplazaría las lámparas: en los rayos del radio se vislumbraban todos los secretos; todas las máquinas y fábricas serían substituídas por un pequeño

trozo de radio metálico, que suministraría toda la energía necesaria. En el orden práctico sólo ha servido, y es bastante, para alivio y curación de algunas enfermedades, para efectos de luminescencia y, ahora, en relación con la bomba atómica, para iniciar, según se dice, el proceso de obtención del plutonio.

En el orden científico, el descubrimiento del radio ha tenido importancia trascendental. El uranio, después de haber suministrado el radio, pasa a la categoría de subproducto, del que dice Rutley, en sus «Elementos de mineralogía», que no tiene cotización en el mercado. Las aplicaciones terapéuticas del radio fueron causa de que alcanzase rápidamente un extraordinario valor, cerca de dos millones de pesetas el gramo. Y ello hizo que se intensificase la explotación de criaderos de uranio ya conocidos, y fué incentivo para el descubrimiento y puesta en marcha de otros nuevos; así, por ejemplo: en 1908, los de Portugal; en 1910, los del Oeste de Estados Unidos; en 1923, los del Congo Belga; en 1931, los del Canadá y, en 1940, los españoles de la provincia de Córdoba.

El uranio, desde principios de siglo, es objeto de la investigación científica. El genio creador de una legión de físico-químicos y matemáticos, gloria y orgullo de la Humanidad, prepara el descubrimiento y aplicación de la «fuerza básica del Universo», como ha llamado el Presidente Truman a la energía producida por la desintegración nuclear atómica. El ruido y el fuego de la bomba atómica parecen sacar del silencio y penumbra del laboratorio, para colocarlos en el primer plano de la actualidad informativa, a los hombres de ciencia que han estudiado desde principios de siglo la constitución y transformaciones del átomo.

La fórmula de Einstein, que iguala a la energía con la masa multiplicada por el cuadrado de la velocidad de la

luz, los trabajos de Rutherford y Soddy, Bohr, Joliot Curie, Hahn y Lise Meitner, Fermi, Lawrence y Oppenheimer, son temas casi populares.

El uranio ocupa la cabeza de la tabla de Mendeleieff, con 234, 235 y 238 unidades másicas y número atómico 92.

El uranio metálico está compuesto por tres uranios de diferentes masas: el uranio 238, el uranio 235 y el 234, en las siguientes proporciones, según las valoraciones efectuadas por Nier en 1938.

Uranio 234.....	0,006 por ciento
Uranio 235.....	0,71 >
Uranio 238.....	99,28 >

Una rapidísima mención histórica nos hace ver cómo el uranio y sus derivados inauguran una nueva Era de posibles aplicaciones al progreso de la Humanidad y a la paz del Mundo.

En 1932, Cockroft y Walton, bajo la dirección de Rutherford, desintegran el átomo. En 1934, Fermi, consigue, al parecer, el nuevo elemento neptunio, con número atómico 93, mediante bombardeo del uranio. Lise Meitner y Hahn, desintegran el átomo de uranio obteniendo bario y kriptón y una liberación de energía de 200 millones de electrón voltios. En 1939, Nier, aisla el uranio 235. En 1940, Joliot, Halban y Kowarski, descubren la reacción en cadena en el 235. Y en ese año se obtiene artificialmente el nuevo elemento, el plutonio, número atómico 94, partiendo del uranio (1).

El Presidente Roosevelt crea la Comisión del Uranio y

(1) En varias publicaciones científicas se ha discutido la existencia de algunos elementos transuránicos; al corregir las pruebas de esta conferencia, se publica, en una noticia de prensa, la obtención de dos nuevos elementos: el americium 95 y el curium 96.

se pone en ejecución el plan Manhattan para la producción de la bomba atómica.

Dos mil millones de dólares se invierten en la obra; ciento veinticinco mil hombres trabajan en ella. Se levantan las ciudades industriales de Clinton, Hanford y Los Alamos, con centenares de fábricas y miles de viviendas. Y la primera materia para el más gigantesco ensayo industrial que registra la historia es el uranio. El uranio, que había servido hasta entonces como colorante y para la producción del radio, pasa a ser fuente de energía de posibilidades que exceden a los límites de lo imaginable. Al romperse el átomo de uranio 235 y al actuar tres o cuatro de los neutrones liberados sobre el resto de la masa, originando la llamada reacción en cadena, la energía liberada por cada kilogramo de uranio 235 es equivalente a 23 millones de kilovatios hora.

Mr. Smythe, Presidente del Departamento de Física de Princeton, publicó un informe en junio del año pasado sobre la fabricación de la bomba atómica.

El material que se emplea es el uranio metálico con los isotopos de que ya hemos hablado. El 235 se separa del 238 mecánicamente por difusión de gases (hexafluoruros de uranio) a través de membranas porosas, o por desviación electromagnética en el calutrón de Lawrence.

El proceso comienza con la desintegración del 235 mediante la acción de neutrones lentos que pueden producirse por la acción del radio sobre el berilio en polvo. En el 235 se origina la reacción en cadena y los neutrones resultantes atacan el núcleo del 238, que se convierte en el isotopo uranio 239 y de éste, con pérdida de dos electrones nucleares, que convierten dos neutrones en protones, al plutonio Pu_{239}^{94} . El plutonio, de distinto número atómico que el uranio, puede separarse de éste químicamente. De

una tonelada de U_{238} , sólo se obtienen algunos gramos de plutonio. El plutonio es uno de los dos elementos explosivos que pueden usarse en la bomba atómica; el otro es el uranio 235. Uno de los secretos es la forma, tamaño y disposiciones de las pilas o moderadores de grafito en que se obtiene el plutonio; otro, el de la separación del plutonio, de propiedades químicas parecidas a las del platino, del uranio 238, etc. Muchos secretos que unos guardan y otros espían y algún día serán revelados por quienes los poseen.

Si hemos hablado de la bomba atómica, y os pido que me perdonéis por esta digresión, es porque demuestra que el uranio es hoy el metal más codiciado y más temido. No nos contentábamos con repetir las características que lo definen en cualquier tratado de mineralogía: «El uranio es un metal blanco acerado, parecido al níquel, etc., etc.»

Muestras

No voy a leeros yo tampoco una lista de ochenta o más variedades de minerales uraníferos, no quiero fatigaros. Pero sí pudiéramos pasar revista a los que están expuestos en el Museo del Instituto Geológico y en el Museo Nacional de Ciencias Naturales; no son muchos, y aunque los ingenieros de minas los conocen de sobra, quiero brindar a los aficionados a la Mineralogía que me escuchan, una rápida enumeración de los ejemplares, que pueden contemplar cuando quieran.

En las etiquetas que acompañan a los minerales se indican el nombre y procedencia de cada ejemplar. Sólo añá-

diré la coloración que ofrecen y la composición fundamental de cada uno de ellos.

MUSEO DEL INSTITUTO

Uraninita.—Uranato de uranio con Pb, To, etcétera. Gris verdosa. De Hornachuelos (Córdoba).

Pezblenda.—Misma composición. U_3O_8 y H_2O . Negra. De Monasterio (Badajoz).

Autunita o *uranita*.—Hidrofosfato de uranio y calcio. Amarillenta. De Hornachuelos (Córdoba).

Schoepita.—Oxido de uranio hidratado, procedente de la descomposición de la pezblenda. Tiene un tinte rojizo. De Hornachuelos (Córdoba).

Torbernita o *chalcólita*.—Hidrofosfatos de uranio y cobre. Verde, más o menos intenso. Varios ejemplares de Valencia de Alcántara y Alburquerque (Cáceres), San Rafael (Segovia), Torreledones y Colmenar Viejo (Madrid) y Sierra Albarrana (Córdoba).

En el grupo de los minerales extranjeros hay varios ejemplares de:

Pezblenda.—Procedente de los Urales, Przibram, Joachimsthal y Schnnember.

Y muestras de:

Samarskita.—Niobitantalato de uranio, calcio, hierro y tierras raras. Negra. Carolina del Sur (E. U.).

Fergusonita.—Metaniobato y tantalato de uranio, ytrio, cerio, etcétera. Negra. Sterby (Inglaterra).

Parsonita.—Hidrofosfatos de uranio y plomo.

Becquerelita.—Oxido de uranio hidratado. Amarillenta-rojiza. Del Congo Belga.

Uranotilo.—Silicato de uranio y otros. Amarillento. De Baviera.

Y, finalmente, unos ejemplares de *torbernita*, *autunita* y *samaraskita*, procedente de Vizeu (Portugal).

De las menas principales de uranio falta la carnotita, de la que podemos ver una muestra si visitamos el Museo de Ciencias Naturales. En este Museo se exhiben los siguientes minerales de uranio:

Carnotita.—Hidrovanadato de uranio y potasio. Terrosa amarillenta. De Colorado (Estados Unidos).

Curita.—Hidrouranato de plomo. Amarillento-rojiza. Congo Belga.

Autunitas.—De Viariz y Sabugal (Portugal), Limoges (Francia) y Madagascar.

Plumbogumita y *casolita*.—Silicatos de uranio y plomo. Amarillentos. Congo Belga.

Y varios ejemplares de

Pezblendita.—De Sierra Albarrana (Córdoba) y Fuente de Cantos (Badajoz).

Las variedades de minerales de uranio son numerosísimas, pero entre ellas son muy características y sería conveniente conseguir ejemplares de

Uranocircita.—Fosfato de uranio y bario.

Trögerita.—Hidroarseniato de uranio.

Uranospinita.—Hidroarseniato de uranio y calcio.

Zeunerita.—Hidroarseniato de uranio y cobre.

Lo que hemos encontrado más interesante en este Museo, además del ejemplar de *carnotita*, es una muestra de *plumbogumita*, con el mismo aspecto terroso y coloración rojizo-amarillenta de los ejemplares del Congo Belga, a que nos hemos referido.

La muestra procede de la Sierra de las Estancias, provincia de Almería. Es un indicio de que en el Triásico de dicha Sierra puedan existir criaderos de uranio. Si así

fuera, habría que añadir la provincia de Almería a las que ya figuran como reservadas al Estado.

Habréis de perdonarme también, el que saliéndome un poco del tema, haya girado esta visita a los Museos.

Me ha parecido, sin embargo, que al hablar de la procedencia de esas muestras iba anticipando alguna información sobre los más importantes criaderos de uranio, a los que voy a referirme ahora.

Criaderos extranjeros

El uranio, como el wolframio y el estaño, se presenta en forma oxidada en el granito, pegmatitas, aptitas y rocas de este tipo.

Existe una relación entre la circulación de aguas superficiales y los depósitos uraníferos. Estas acciones superficiales se acentúan cuando se trata de la autunita o de la carnotita, que llegan a formar criaderos casi contemporáneos.

En las zonas graníticas, en las pizarras metamórficas paleozoicas surcadas por filones y diques pegmatíticos, hay posibilidad de encontrar criaderos explotables de uranio; lo mismo que en los terrenos sedimentarios que se derivan de esas rocas genéticas.

Son muy contados los países en que dejan de darse zonas de las características apuntadas y, por tanto, en los que no existan criaderos uraníferos de mayor o menor importancia.

Los más conocidos son los de Joachimsthal, Prizbram y Schönbühel, en Bohemia y Sajonia; Cornwall, en Inglaterra; Vale, en Noruega; Falun, en Suecia; Autun, en

Francia; Sabugal y Guarda, en Portugal; Miansk, Siberia; Utah, Colorado y Carolina, en Estados Unidos; los de Méjico, Perú y Argentina; los de Mont Painter, en Australia; los de Madagascar; los del Alto Katanga, en el Congo Belga; los del Gran Lago del Oso, en el Canadá.

Los de Joachimsthal son los primeros que se explotaron. Las fracturas que han dado origen a la formación filoniana, cortan las micacitas, pizarras calcíferas y calizas cristalinas. El gneis que aparece al Este y Nordeste de la zona, presenta interestratificaciones de cuarzo posteriores al depósito metalífero. En todos los criaderos de Sajonia y Bohemia se presenta siempre la caliza dolomítica blanca o amarillenta que cambia este color por el pardo rojizo, cuando empieza a aparecer la pezblenda, y se hace gris oscura cuando está en contacto con la mena de uranio, pezblenda. Esta se presenta en vetillas muy estrechas de tres a cuatro centímetros; en bolsadas, entremezclada con piritita de cobre y, a veces, se encuentra diseminada en pequeños granos entre la micacita formando menas de baja ley. Estos criaderos, que empezaron a ser explotados por plata y cobalto hace cuatro siglos, no son actualmente criaderos uraníferos de primera categoría; los hemos citado solamente por su valor histórico.

Por tratarse de un país vecino, con el que geológicamente no hay fronteras, diremos algo sobre los criaderos de uranio portugueses.

Todo el Norte de Portugal, provincias de Beira, Minho y Traz-os-Montes, como la parte antigua de Galicia, está formado por terrenos primarios y un gran macizo de granito y gneis, ricos en wolframio y estaño. Desde 1908 se comenzaron a explotar los depósitos de autunita, entre

Guarda y Sabugal, en la extremidad Sur de este granito, que, cerca de Sabugal, aparece en recubrimiento anormal sobre las pizarras.

La autunita con uranocircita se encuentra en filones irregulares de pegmatita que cortan el granito y las pizarras cambrianas, por consiguiente, en las condiciones naturales de los minerales del grupo estannífero. La corrida de uno de estos filones ha podido seguirse más de ocho kilómetros. Es posible que la acción de los gases o el arrastre por las aguas de minerales profundos, reaccionando sobre la apatita y la barita hayan originado la torbernitita y la uranocircita, respectivamente. Los depósitos son de poco espesor, pero el color verde de la mena facilita el estrío y la explotación. Hay, sin embargo, partes arcillosas en las cuales la presencia del uranio sólo puede comprobarse con el electroscoPIO. La explotación más importante ha sido la mina «Baracao».

Era posible en aquella época explotar minerales de uranio con una ley del 0,5 y hasta el 0,3 % de U_3O_8 .

Por haber dado nombre a una de las menas de uranio, la autunita, diremos que los criaderos de uranio franceses del Macizo Central se descubrieron a fines del siglo pasado, a pocos kilómetros al Norte de Le Creusot y en la vecindad de la ciudad de Autun.

La autunita se encuentra en el granito, en las granulitas y pizarras antiguas, con torbernitita y uranocircita, así como en Gruy (Sena y Loira), en Chaux y en Puy de Dome. En Maignon y Busse, se encuentran en las calizas y en diferentes canteras de Saint Voieux, Chandebout y Ambassac, en forma de fosfatos de uranio.

Como es país poco dispuesto a facilitar información,

creo interesante consignar que en la Unión Soviética, además de los yacimientos de los Urales, Cáucaso y Miansk, se han descubierto recientemente importantes criaderos de cobre, níquel, titanio, niobio, tántalo y uranio en la península de Kila, cerca del puerto de Murmansk. Y a 150 kilómetros de este puerto, por el que los rusos recibieron durante la guerra importantes envíos de material británico, se ha establecido, en Kirovsk, para el tratamiento de estos minerales, el mayor centro industrial del Círculo Ártico.

En Estados Unidos se explotan diferentes minerales de uranio, entre ellos la pezblenda, en Carolina del Sur y otros Estados, pero los criaderos más importantes son los de carnotita, en Utah y Colorado. Las explotaciones de estos criaderos comenzaron en 1910. Aunque hay varias especies de vanadatos de uranio, como, por ejemplo, la *uvanita* y la *ferganita*, y vanadatos de uranio y calcio, como la *tyuyamunita* y la *rauvita*, etc., y aunque en la zona en que se encuentran criaderos de esta índole tiene una extensión mayor que la de la Península Ibérica, y es de suponer que aparezcan esas y otras variedades de vanadatos de uranio, se emplea, para los minerales que allí se explotan, el nombre genérico de *carnotitas*, hidrovandato de uranio y potasio.

El mineral se presenta en lechos de impregnación de las areniscas, blancas y rojas, mesozoicas. Existen en estas areniscas depresiones y bolsas (bug-holes), en las que penetra el mineral en depósitos de enriquecimiento. Se observa en todos los criaderos de Utah y Colorado la presencia de restos vegetales y fajas interestratificadas de una substancia negruzca, de aspecto carbonoso. En la proximidad o contacto con estas materias aparecen las máximas

concentraciones de mineral. Los yesos envuelven frecuentemente a las areniscas mineralizadas. Cuanto mayor es la sobrecarga de areniscas estériles, mayor es la ley de las mineralizadas, lo que parece indicar la influencia que han tenido las aguas descendentes en la concentración del mineral. Las vetillas mineralizadas tienen generalmente de un espesor 0,03 a 0,04 cm. Cuando se arranca la carnotita el mineral es tan blando que puede moldearse con los dedos; expuesto al aire se hace duro y quebradizo. Consecuencia de esto es que el tanto por ciento de mineral pulverulento sea muy crecido, lo que hace delicada y que esté sujeta a ciertas especificaciones la toma de muestras, y exige especiales cuidados en los procedimientos de concentración. Muchas muestras, que no parecen contener carnotita, acusan la presencia de ésta y toman un color amarillo intenso sometidas a la acción del calor.

En los frentes de trabajo los obreros suelen encender hogueras para que esta propiedad de amarillear, por la acción del calor, les vaya mostrando las zonas o fajas de enriquecimiento.

En todas las minas de Utah y Colorado se explotan menas con una ley inferior al 1,5 % de uranio y 2,5 % de vanadio. Los minerales concentrados a un mínimo del 2 % de uranio (U_3O_8) se vendían a razón de cuatro dólares por kilo. Todavía no se habían puesto en explotación los criaderos del Congo Belga, y el radio obtenido de las carnotitas, en los años 1910 a 1918, era más del 50 % del obtenido en todos los demás criaderos explotados entonces.

Los anteriores datos, tomados de un trabajo publicado por Moore y Kithil en el Boletín del Bureau of Mines, guardan estrecha relación con los aportados en un informe, del que luego hablaremos, sobre areniscas cupríferas con uranio y vanadio en nuestro país.

En 1920 empiezan a ser explotados los criaderos del Congo Belga, que hasta 1930, con el descubrimiento de los criaderos canadienses, conservan prácticamente el monopolio del uranio, por la abundancia y riqueza de sus minerales.

Se encuentran estos yacimientos en la cuenca del Alto Katanga, rellena transgresivamente con una serie de formaciones, de las cuales, la más importante, está constituida por el conglomerado de Kundelungu, entre un tramo inferior de calizas y uno superior de pizarras, muy feldespáticas.

En el centro de la cuenca, en una potente formación dolomítica, se encuentra la llamada zona de las minas. En la base se explotan los yacimientos de cobre, con leyes del 10 al 14 %. La parte alta o cúpula del criadero, tiene una longitud de unos 20 kilómetros, por 10 ó 12 de anchura, y está constituida por mineral rico (cobre nativo), dejado en reserva, y cuya explotación dicen que podrá satisfacer durante siglos las necesidades mundiales de cobre.

La Unión Minera explota los minerales de oxidación, que provienen de criaderos de enriquecimiento secundario. A los minerales de cobre se asocian los de cobalto, hierro, manganeso, níquel, plata, vanadio, a veces platino y el uranio. En el enriquecimiento secundario pueden haber jugado gran papel las masas calcáreo-dolomíticas de los anticlinales, cuya corrosión habrá dejado paso a las aguas mineralizadoras descendentes.

En el criadero de Kasolo se presentan los minerales uraníferos enclavados en la roca calcáreo-dolomítica. Como productos hidrotermales y pneumatolíticos surcan la roca agregados fibrosos de prehnita (zeolita), y delgadas capas de muscovita y flogopita. Los trozos de pezblenda están, a veces, empastados en un cemento amarillo o verdoso,

producto de la descomposición del mineral. Se encuentran cristales de uraninita de brillo craso y color negro, más intenso que el de la pezblenda. En las salbandas, gumita y uranofilo. Los yacimientos del Congo Belga han suministrado el mayor número de variedades de minerales de uranio. La pezblenda, especie mineral, tiene un contenido en uranio metálico del 65 al 80 %. Las menas explotadas en Katanga tienen una ley del 20 al 40 % de U_3O_8 .

En 1930, Gilberto y Carlos Labine, descubren los criaderos de pezblenda y ocre de uranio en la provincia de Yukon, al Oeste del gran Lago del Oso.

Cerca de Labine Point, explota la Compañía de Eldorado la pezblenda y la plata nativa.

En los primeros años, con estrío a mano, se obtenían minerales con el 60 % de U_3O_8 . A medida que la explotación se fué mecanizando, la producción, unas 60 toneladas en 1934, fué aumentando y el precio del radio fué bajando.

En 1939, el precio del radio había descendido de 120.000 a 60.000 dólares el gramo. Fué entonces cuando Boris Pregel, Presidente del Uranio y Radio Corporation, fusionó los intereses mineros del Congo Belga con los del Canadá.

La región está constituida por el Paleozoico, Precambriano o Cambriano, y los filones asoman en diques pegmatíticos.

En las minas de oro de Eldorado, como en las de Lone Star, se presenta un gran número de lentejones de cuarzo que, formando una especie de filones capas, se ramifican en la masa de pizarras cloríticas y sericiticas, muy rotas, plegadas y metamorfozadas. Estas concentraciones cuarzosas contienen piritas de hierro y cobre, carbonatos de cobre, algo de galena y plata y pezblenda.

En un trabajo publicado en el año 1929 por la Comisión Geológica del Canadá, Joung predice la importacia de estos criaderos: «Las pegmatitas —dice— contienen berilo y zircón y minerales radiactivos en cantidades suficientemente importantes para abrigar la esperanza de que serán económicamente explotables».

En dos de los criaderos que se explotan actualmente, la pezblenda, que ofrece una apariencia arriñonada, está asociada a una ganga silícea. En otro de ellos, este aspecto de la pezblenda es más pronunciado y está asociada a carbonatos de hierro y manganeso con calcita y barita, como un producto de enriquecimiento secundario. En 1944, la Corona inglesa expropió las minas de uranio canadienses indemnizando a los concesionarios con (no sabemos el número de acciones) 1,35 dólares por acción. Se dice que hay cubizadas seis millones de toneladas de uranio.

En un informe publicado en 1944 por Mr. Camsell, Ministro de Minas canadiense, en el que se dan detalles referentes a la planta de tratamiento en las minas de Eldorado y a la de refinado, en Labine Point, se omite, por considerarlo información confidencial, cuanto respecta al tonelaje extraído, tratado y embarcado. Por la ley de los minerales (un 30 ó 40 %) y la cubicación, los criaderos canadienses son considerados actualmente como los más importantes del mundo.

Criaderos españoles

Han sido los ilustres ingenieros de minas Sres. Egozcue y Mallada, quienes primero han testimoniado la existencia de minerales de uranio en España.

En su «Memoria Geológica y Minera de la provincia de Cáceres» (año 1878) se cita la torbernita (urano fosfatado, dice Mallada) en los filones de fosforita que asoman en las pizarras cambrianas, pero sobre todo en el granito, en los términos de Valencia de Alcántara, Alburquerque, Montánchez, Trujillo y Trebejo. Hay una nota del Sr. Hernández Pacheco, que en 1910 visita Montánchez y Albalá, y en la que describe las intrusiones pegmatíticas y granulíticas y diques de pórfido cuarífero que envían sus apófisis y venillas a los terrenos paleozoicos que rodean al batolito. En ellas recoge varias muestras de torbernita, de color verde intenso, que se presenta en laminillas cuadradas de uno a cuatro milímetros de lado.

Los filones de fosforita se presentan en las diversas variedades del granito y lo surcan en todas direcciones. El criadero de Albalá ofrece todas las características generales de los criaderos cacereños. Consiste en un filón de cuarzo lechoso, recorrido por vetas irregulares de fosforita dura y compacta. Se presenta el apatito en granos cristalinos y el hierro y el manganeso tiñen abundantemente los materiales del filón. Hay también pequeños granos alargados de zircón. Hernández Pacheco explica la génesis de los filones fosfatados en el granito «mediante simples transportes moleculares por las aguas circulantes en la corteza terrestre. El material radiactivo —dice— abunda entre los materiales descompuestos del granito en contacto con el filón, lo que parece indicar que la calcolita es posterior al granito y también al cuarzo y fosforita del filón».

En el granito y pizarras cambrianas metamorizadas de Fuente de Cantos y Monasterio (Badajoz), encontró Mr. Szilard (actualmente profesor de la Universidad de

Chicago y cuyas declaraciones sobre la bomba atómica han aparecido en la prensa), varios ejemplares de pezblenda o pezurana, y de torbernita. Hay una referencia de los análisis efectuados y del modo de presentarse la pezblenda en una ganga feldespática, en el artículo publicado por Mr. Szilard en la «Revista Minera» (año 1918). El autor dice en este informe que el mineral es de «una pureza y riqueza notables que rivalizan con las del mineral de Joachimsthal».

En la misma provincia de Badajoz, al Sur, en Segura de León, en las pizarras cambrianas de dirección N. 20° O., aparecen unos diques de granito, de grano fino, muy descompuestos, con impregnaciones de uranio y vanadio. La composición media del granito da un 0,60 % de óxido de uranio y 0,75 % de óxido de vanadio. Estos criaderos fueron estudiados en el año 1921 por nuestro compañero Sr. Prieto, y en ellos se efectuaron algunos trabajos de reconocimiento.

En los términos de Valdemorillo, Colmenarejo, Galapagar, Torreldones, Hoyo de Manzanares y Colmenar Viejo, vertiente meridional de la Sierra de Guadarrama, se han practicado, en distintas épocas, numerosos reconocimientos de radiactividad, por los Sres. Muñoz del Castillo, Díaz de Rada, Naranjo y otros. De Díaz de Rada son los análisis de las aguas radiactivas de Valdemorillo, que por su riqueza en emanación, pueden colocarse en tercer lugar (después de las de Joachimsthal y Brambach) entre las más radiactivas del mundo, y a la cabeza de otras estudiadas por el Sr. Rada, en La Toja (Pontevedra), Trillo (Guadalajara) y Alhama (Granada). Muñoz del Castillo publicó en 1905, una nota sobre la radiactividad de algunos ejemplares de torbernita encontrados en la mina

«Antigua Pilar», de Colmenarejo, en la que desde la época romana se han explotado minerales de cobre. También se han estudiado ejemplares de torbernita procedentes de Torreldones y Colmenar Viejo.

Entre los minerales uraníferos de la vertiente Norte de la Sierra de Guadarrama (provincia de Segovia), merecen señalarse los encontrados, en 1916, por nuestro compañero Sr. Comba, en las minas de cobre de San Rafael, entre la margen izquierda del río Gudillos y la línea férrea, en la trinchera del túnel, en El Estepar y El Cabezo Reina. Minerales uraníferos como los ya citados, que aparecen en los diques porfídicos y pegmatíticos que arman en el granito y en el gneis. De los trabajos realizados por nuestro compañero, se da cuenta detallada en una Memoria publicada por el que fué Ingeniero Jefe de Madrid D. Pedro Pérez, en el «Boletín de Minas y Metalurgia» (año 1929). Las torbernitas, de las que se han recogido y analizado numerosas muestras, aparecen mezcladas con sulfuros de hierro y cobre, carbonatos de cobre, níquel, estaño, wolframio y plata, en cantidad de alguna importancia esta última.

En Cataluña tenemos una referencia de minerales de uranio. La presencia de la pezblenda, señalada por los Sres. Calderón, Heux y otros, en Santa Coloma de Gramanet (provincia de Barcelona), en un criadero próximo a la capital, de cuyas características no tenemos datos.

En la provincia de Córdoba, términos de Hornachuelos y Fuenteovejuna, existen criaderos de minerales de uranio y berilo que han sido descubiertos, estudiados y explotados, por nuestro compañero señor Carbonell. En una Nota publicada por él, en la revista «Las Ciencias», año 1941, se hace historia de dichos criaderos y mención

de sus circunstancias geológicas y su aprovechamiento industrial.

En el año 1917, se encontraron en el término de Fuenteovejuna, con minerales de cobre y plomo, algunas bolsadas de torbernita. En los contactos del gran batolito granítico de Los Pedroches con el Paleozoico, se encontró también bismutina radiactiva. Las pegmatitas se alinean en dos zonas: la de Villaviciosa, desde el Sur de Espiel hasta las inmediaciones de Cerro Muriano y la de Fuenteovejuna-Hornachuelos o Sierra Albarrana. Las pegmatitas encajan en terrenos metamórficos estrato-cristalinos: gneis, micacitas y talquitas que arman a su vez en otras formaciones de granito y pizarras cambrianas. Estas pegmatitas son ricas en minerales de berilo y uranio. Los cristales de berilo son abundantes, algunos de gran tamaño. Los minerales de radio que se han reconocido en más de 300 lugares, en los contactos de las pegmatitas y zonas periféricas, son: pezblenda, autunita, betaftita (niobiotantalato de uranio y calcio) y otras especies. La emisión de minerales uraníferos, de cuya presencia —dice Carbonell— es indicio la turmalina, se supone inmediata y posterior a la de las pegmatitas.

El 10 % de las pegmatitas están mineralizadas, según nuestros informes. En estas pegmatitas mineralizadas se separan, por fácil estrío, unos tres kilogramos de mineral de uranio por tonelada, con el 40 % de óxido U_3O_8 , que corresponde a 33,9 % de uranio metálico. A las determinaciones de radiactividad hechas en 1933 por el Sr. Díaz de Rada, han seguido recientemente los notables estudios efectuados por nuestros compañeros Sres. López de Azcona y Abbad.

Pegmatitas

Suele buscarse en las pegmatitas criaderos de uranio. Y sobre este hecho quisiéramos hacer algunas consideraciones. Es posible seguir el paso progresivo de la masa fluido-ígnea de la pegmatita al diferenciarse sus elementos mineralógicos principales. El cuarzo tiene, en general, un color blanco lechoso, y algunas veces con partes transparentes, hialinas; toma en ocasiones color amarillento o rosado debido a impregnaciones de sales de hierro, manganeso, etcétera. En algunos casos, el cuarzo es cavernoso por corrosión, indudablemente epigenética, producida por la acción disolvente enérgica de ciertos agentes pneumatolíticos, flúor, cloro o agua a fuerte presión y temperatura. Estas circulaciones póstumas de los agentes mineralizadores, han sido las causas fundamentales de la mayor alteración de las pegmatitas (carbonatación, formación de óxidos hidratados y silicatados, sílice coloidal, vermiculitas y óxidos metálicos en general). La alteración meteórica es superficial y poco enérgica.

Los componentes de las pegmatitas se desprenden de la masa ígnea abisal hasta la parte más alta de la litosfera sin salir al exterior (consolidación intratelúrica) y van depositándose en el largo recorrido de su ascensión en función de su masa o cantidad, de las presiones y temperaturas variables, de la velocidad ascensional, etcétera.

Así se comprende la variación en cantidad y calidad de los minerales incluidos en la pegmatita, que al precipitarse han seguido también líneas de menor resistencia, formando zonas de enriquecimiento y tramos estériles.

Elementos esenciales de las pegmatitas que relacionan

a éstas con las rocas graníticas y que responden a un magma ácido o de predominio de sílice, son: el silicio, oxígeno, aluminio, calcio, sodio y magnesio. Como elementos accesorios figuran otros metales y metaloides de origen magmático-ígneo, que se desprenden al estado de elementos o compuestos pneumatolíticos, como son: el fósforo, cloro, flúor, azufre, estaño, wolframio, titano, tántalo, niobio, molibdeno, cromo, níquel, vanadio, zirconio, manganeso, uranio, etcétera. Estos elementos se desprenden del magma como compuestos halógenos sulfurados y fosfatados de la base respectiva. Al entrar en la zona hidatógena (por debajo de los 365°, temperatura crítica del vapor de agua) o antes, en presencia del oxígeno ocluido en el magma, estos compuestos volátiles o gaseosos se transforman en los derivados oxigenados respectivos, originando la casiterita, la pezblenda, la columbita, la triplita, el apatito, etc., que se engloban como minerales de enriquecimiento en las pegmatitas. Hay también en las pegmatitas penetraciones filonianas posteriores que aprovechan las fisuras de retracción preexistentes. Influyen en la mineralización de las pegmatitas, las circulaciones o exhalaciones pneumatolíticas-hidatógenas posteriores, que, además de depositar nuevos minerales, alteran los preexistentes (caolinización, corrosión, etcétera). Forman también la mineralización de las pegmatitas las alteraciones hidrotermales que arrastran sales disueltas o en suspensión y las depositan como minerales epigenéticos, generalmente oxidados. Y por último, las alteraciones por meteorización con acarreo de productos externos o por modificación *in situ*.

Establecida así la formación de las pegmatitas, tenemos en ellas minerales esenciales, de un modo general: cuarzo, feldespato y mica. Como minerales accesorios: triplita,

fluorita, apatita, autunita, turmalina, etc. Combinaciones oxigenadas: berilo, pezblenda, ocre de uranio, magnetita, titanita, etc. Compuestos sulfurados: piritita, calcopiritita, piritita arsenical. Compuestos de contacto: granates, micas ferromagnesianas, etc. Productos de alteración interna y externa: caolín, limonita, etcétera.

Las pegmatitas son, pues, como un museo de mineralogía. En ellas se pueden encontrar distintos minerales de uranio y, a veces, en cantidades que permiten su explotación, como ya hemos visto.

Los yacimientos más productivos, los Estados Unidos (Colorado y Utah), los del Congo Belga y los del Canadá, en una gran parte, son yacimientos de enriquecimiento secundario.

Dentro de ciertos límites, no para separarlos, ya que en la naturaleza se unen muchas veces, sino para agruparlos de algún modo, una clasificación de los criaderos de uranio pudiera establecerse así:

Criaderos de uranio hipogénicos, en las rocas de consolidación profunda (batolitos-lacólitos). Minerales de uranio en el granito de la provincia de Cáceres.

Criaderos singenéticos primarios: En las pegmatitas, aplitas, etc. Minerales de Córdoba y Sierra del Guadarrama.

Criaderos epigenéticos primarios: En los terrenos paleozoicos, concentraciones de calizas y calizas magnesianas por metamorfismo y enriquecimiento por agentes pneumatolíticos e hidrotermales, con subsiguientes fenómenos de sustitución. Minerales de Badajoz y Córdoba.

Criaderos epigenéticos secundarios: Enriquecimiento de calizas y areniscas por aguas meteóricas descendentes, etcétera. Minerales de Montanuy (Huesca). A este últi-

mo grupo pertenece el criadero de que nos vamos a ocupar.

MONTANUY.—Uno de los cortes que publica Mallada en su Memoria de la provincia de Huesca es el de la cuenca del Noguera-Ribagorzana, y se aprecia en él: primero, el granito en el Pico de Aneto y, después, pasando por Pont de Sort y Mas de Anert, las pizarras metamórficas del Devoniano y manchón triásico. Y en un corte, desde Pont de Sort a Vilaller y Montanuy, podemos ver representado al Triás por tramos de calizas, arcillas y yesos, conglomerados con cantos gruesos de cuarzo y, en la base, areniscas rojas y areniscas con mica plateada descansando sobre el Devoniano.

Hace cuarenta años, Mr. Caralp, geólogo francés, publicó en el Boletín de la Sociedad de Francia (1908) una «Nota sobre las areniscas cupríferas con uranio y vanadio». Dice en este informe que las areniscas cupríferas con uranio y vanadio de Montanuy, se colocan sensiblemente sobre el horizonte de las areniscas cupríferas y vanádíferas de Perm (Ural), y define a las areniscas de Montanuy como permotriásicas. El espesor de las capas mineralizadas es de tres o cuatro centímetros. Se observa: 1.º Que del lado del techo las areniscas son estériles y, por el lado del muro, la arenisca está muy mineralizada, constituyendo un verdadero criadero de impregnación. 2.º Que del lado del techo la superficie de separación es sensiblemente plana; por el contrario, el muro ondulado presenta depresiones y bolsas, en las cuales penetra el mineral. 3.º En las areniscas, y asimismo en las concentraciones de mineral, existen en cierta abundancia restos de vegetales. Hay una serie de vetas de una materia negruzca, de apariencia carbonosa, en la que aparecen elementos de brillo resino-

so y forma rectangular, y laminillas y manchas amarillas en la superficie. Las muestras analizadas han dado de uranio el 2,5 % y el 3,1 % de vanadio. También un 35 % de cobre. Nos parece esta Nota de Mr. Caralp una descripción de cualquiera de los criaderos de Utah y Colorado, de que hemos hablado anteriormente; tal es la identidad de datos aportados. En 1908 no se explotaban todavía los hidrovanadatos de uranio (*carnotitas* genéricamente) en Estados Unidos. «Es de presumir —dice Caralp, en vista del resultado del análisis y refiriéndose al cobre y al uranio— que estén al estado de óxidos *melanconites* y *pezblendas*» El mismo y cualquier otro hubiera podido suponer, vista la identidad entre los criaderos estadounidenses y los de Montanuy, que se trataba de criaderos típicos de *carnotita*.

El estudio y la comprobación de que esta hipótesis es cierta está por hacer, y ha pasado ya cerca de medio siglo. Queda por averiguar si el criadero tiene o no tiene importancia minera y, si no la tiene, si pueden obtenerse de él algunas muestras de hidrovanadatos de uranio españoles para nuestros Museos. Los trabajos encaminados a resolver estas incógnitas servirán, en todo caso, de orientación para reconocer los criaderos de uranio de este mismo tipo que puedan existir en otras provincias españolas. La presencia de minerales de uranio en las pegmatitas, por ejemplo, se acusa fácilmente; las *carnotitas*, hidrovanadatos de uranio sedimentarios son, por su aspecto terroso y su coloración poco definida, de más difícil identificación. En estos casos es cuando más indicado está, para la prospección de criaderos uraníferos, el empleo de los métodos y aparatos que utilizan algunas propiedades específicas de los radioelementos: la ionización de gases en el electroscopio; la fluorescencia, con longitudes de onda inferiores a 3.600 unidades Angstrom, mediante las lámparas de radiación ultra-

violeta. Estos fenómenos de fluorescencia pueden activarse, como han hecho Melkov y Sverdlov (Academia de Ciencias de la U. R. S. S., 1941), tratando la pezblenda con ácido acético y con ácidos más enérgicos las carnotitas. La emisión de partículas α puede comprobarse mediante el empleo del tubo Geiger en contadores visuales, mecánicos o acústicos.

Precios

Nos faltan datos relativos a la producción actual del uranio. Ya hemos dicho que los países productores reservan estos datos como confidenciales. Respecto a precio, se dice que el kilogramo de uranio metálico se vende al precio de 20 dólares. El precio de 140 kilogramos, que contienen un kilogramo de U 235, sería, pues, de 2.800 dólares. El precio del uranio U 235, separado y concentrado hasta un 10 %, se estima en 500.000 pesetas por kilogramo. A este precio podría competir, para suministrar energía en aplicaciones industriales, con el carbón a 300 pesetas tonelada y con la gasolina a peseta el litro.

Una casa inglesa hace oferta de compra de minerales de uranio a dos chelines seis peniques el kilogramo de U_3O_8 , en minerales conteniendo un mínimo del 12 al 14 % a ferrocarril o barco puerto español. No habría ni para atender los gastos de transporte.

Pero sean cuales sean los precios, altos o bajos, ningún país estará dispuesto a entregar al extranjero sus reservas de uranio. ¿Cuáles serán en el futuro las aplicaciones del uranio a fines guerreros o pacíficos? ¿Hasta qué punto se abaratarán y simplificarán los métodos de producción de

la energía atómica? Mientras tanto, todos los países se apresurarán a catalogar y valorar sus reservas de uranio.

En nuestro país, la Dirección General de Minas y Combustibles, en 4 de octubre de 1945, reservó al Estado provisionalmente, y hasta tanto que técnicamente se estudie la importancia uranífera de cada una de ellas, las siguientes provincias: Madrid, Toledo, Avila, Badajoz, Cáceres, La Coruña, Lugo, Orense, Pontevedra, Zamora, Salamanca, Sevilla, Córdoba y Huelva. Reserva inicial hecha con criterio científico, ya que en dichas provincias existen grandes extensiones de granito y terrenos paleozoicos.

Don Agustín Marín, Director del Instituto Geológico y Minero de España, había ya nombrado una Comisión de ingenieros para el estudio del problema, y el 5 de noviembre, a propuesta de dicha Comisión, fué ampliada la reserva a las provincias de Barcelona, Gerona, Tarragona, Huesca, Guadalajara, Segovia, Oviedo y Granada.

La Comisión del uranio tiene la misión de estudiar cuantos aspectos técnicos y económicos se relacionan con los criaderos de uranio en España y está presidida por el ilustre Ingeniero Don José Romero Ortiz, Jefe de los Laboratorios del Instituto Geológico, quien ha sabido hacer compatible el altísimo grado de su valer científico con su modestia. Hay con él un grupo de Ingenieros de Minas, y el último de todos, y todos, desde el primero al último, justamente orgullosos de acompañarle en su trabajo.

He pretendido ofreceros una información breve y ordenada de los criaderos de uranio. No he utilizado la cámara de proyecciones. Así, si en algún punto habeis encontrado oscuro este relato, la culpa es mía; porque en ningún momento se ha apagado la luz.

Perdón y muchas gracias.

INDICE DE MATERIAS

	<u>Páginas</u>
PRÓLOGO, por Agustín Marín	I
SÍNTESIS Y DESINTEGRACIÓN NUCLEAR DE LOS ÁTOMOS Y LA MEDIDA DE TIEMPOS, por Juan Manuel López de Azcoña (conferencia pronunciada en el Inst. de Ing. Civ. el 18-XII-45)..	I
MÉTODOS EXPERIMENTALES EN EL ESTUDIO DE LAS TRANSFORMACIONES RADIATIVAS, por Manuel Abbad y Berger (conferencia pronunciada en el Inst. de Ing. Civ. el 29-I-46).....	39
LA METALOGENIA DEL URANIO A LA LUZ DE LA FÍSICA ATÓMICA, por José Romero Ortiz de Villacián (conferencia pronunciada en el Inst. de Ing. Civ. el 12-II-46)	67
LOS MINERALES DE URANIO Y SU TRATAMIENTO INDUSTRIAL, por Antonio Comba y Sigüenza (conferencia pronunciada en el Instituto de Ingenieros Civiles el 19-II-46) ...	105
CRIADEROS DE URANIO, por Miguel Moya Gastón (conferencia pronunciada en el Inst. de Ing. Civ. el 26-IV-46) ...	179