

2ej. 44



**Universidad Nacional Autónoma
de México**

Facultad de Ciencias

ANALISIS DE URANIO POR ESPECTROSCOPIA ALFA

T E S I S

Para obtener el título de:

FISICO

p r e s e n t a

DARIO OLIVERA SOLANO

México, D. F.

1987



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

INDICE

Introducción

CAPITULO I

La radiactividad

1.1 Radiación alfa.

1.2 Radiación beta.

1.3 Radiación gamma.

1.4 Decaimiento radiactivo.

1.5 Series radiactivas.

1.6 Interacción de la radiación con la materia.

1.7 Determinación del alcance L de las partículas alfa.

CAPITULO II

Parte experimental

2.1 Equipo y materiales.

2.2 Operación del equipo.

2.3 Calibración del multicanal.

2.4 Método de análisis

- a) Tratamiento de los minerales.
- b) Separación del uranio de otros elementos
- c) Proceso electrolítico.

CAPITULO III

Resultados y conclusiones.

Apéndice 1

Apéndice 2

Apéndice 3

Apéndice 4

Bibliografía.

INTRODUCCION

EL URANIO EN LA NATURALEZA

El uranio se encuentra en la corteza terrestre repartido en aguas y minerales como son silicatos, óxidos, carbonatos, fosfatos, sulfatos, en proporciones muy variadas -- desde cantidades muy pequeñas a nivel de partes por millón hasta cantidades considerables del orden de decenas de por ciento.

El uranio está constituido de un 99.27 % por el isótopo-
 ${}_{92}^{238}\text{U}$, 0.0057 % del isótopo ${}_{92}^{234}\text{U}$ y 0.72 % del isótopo --
 ${}_{92}^{235}\text{U}$ aproximadamente, los dos primeros pertenecen a la --
familia radiactiva $(4n+2)$ y el tercero pertenece a la fa-
milia $(4n+3)$, serie del actinio uranio.

Los métodos utilizados para separar el uranio de diferen-
tes materiales han cambiado considerablemente en los úl-
timos años, actualmente existen técnicas muy especiales,
como la fluorimetría o también la separación del uranio-

por técnicas de cromatografía por intercambio iónico o columna de reparto, técnicas que se utilizaron en el presente trabajo. Posteriormente se cuantifica el uranio por su espectro alfa.

El uranio se puede separar de los otros elementos de la serie radiactiva natural del uranio por medio de una columna de cromatografía de reparto (D_2 EHPA) o bien de una resina de intercambio iónico (Dowex).

Otra técnica utilizada en este trabajo es la de extracción por solventes, por medio de la cual se puede separar el uranio de impurezas como el hierro. Ambas técnicas, la de intercambio iónico y la de extracción por solventes, son aplicables al análisis del uranio en los minerales tanto de alto contenido como de bajo contenido de uranio.

Este trabajo presenta un método para determinar los isótopos del uranio provenientes de muestras naturales de pechblenda (óxidos de uranio) y autunita compuesta básicamente de fosfatos, los resultados obtenidos son de especial-

interés en estudios de desequilibrio radiactivo natural. Con este propósito se identificaron y cuantificaron los isótopos pertenecientes a la misma familia radiactiva determinándose en especial el cociente de actividades $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ y el porcentaje de uranio que contienen estos minerales utilizando las técnicas mencionadas anteriormente, técnicas que para la purificación y análisis de uranio en minerales involucran cuatro pasos principales:

- 1o. Preconcentración o extracción.
- 2o. Purificación.
- 3o. Preparación de las fuentes radiactivas.
- 4o. Análisis de las muestras por medio del espectrómetro alfa.

CAPITULO I

LA RADIOACTIVIDAD

A pesar de la gran magnitud de las fuerzas que mantienen unidas las partículas del núcleo atómico, algunos isótopos tales como el ${}_{93}^{237}\text{Np}$, ${}_{92}^{238}\text{U}$, ${}_{92}^{235}\text{U}$, ${}_{92}^{234}\text{U}$, ${}_{90}^{232}\text{Th}$ alteran espontáneamente sus núcleos emitiendo partículas o radiación electromagnética, transformando así el núcleo original en otro diferente.

Los isótopos radiactivos naturales decaen en general por emisión de partículas alfa (α), beta (β), o radiación gamma (γ) que es en realidad radiación electromagnética del mismo tipo de la luz visible pero con diferente longitud de onda.

1.1) LA RADIACION ALFA (α)

Las partículas alfa son núcleos de Helio (${}_{2}^{4}\text{He}$) de masa atómica 4 y número atómico 2 y en consecuencia poseen una carga eléctrica positiva Q_{α} de magnitud igual al doble

de la de el electrón. Debido a su masa bastante grande y a su carga 2^+ , la partícula alfa interacciona en cualquier medio perdiendo su energía muy rápidamente. En el medio ambiente su recorrido es de unos cuantos centímetros. La desintegración alfa permite aumentar la estabilidad de los núcleos pesados ya que aumenta la energía de enlace entre sus nucleones al disminuir la masa de cada uno de ellos.

La relación de Einstein

$$E = \Delta M C^2 \quad (1)$$

permite calcular la energía producida como consecuencia de la pérdida de masa de cada nucleón.

La energía es equivalente a la diferencia de las masas inicial y final multiplicado por el cuadrado de la velocidad de la luz en el vacío.

$$E = [M_i - (M_f + M_\alpha)] C^2$$

Donde

M_i es la masa del núcleo inicial

M_f es la masa del núcleo final

M_{α} es la masa de la partícula alfa

C es la velocidad de la luz

La masa de cada nucleón de la partícula alfa emitida es menor que la masa de cada nucleón en el átomo inestable emisor de la partícula alfa. La diferencia de masas se transforma en energía que es igual a la suma de las energías cinéticas de las partículas finales, es decir:

$$E_L = K_f + K_{\alpha} \quad (2)$$

Donde K_{α} es la energía cinética de la partícula alfa y K_f es la energía cinética de la partícula final "hijo" después de la desintegración. No se toma en cuenta la energía cinética de la partícula original "padre" ya que se considera que está en reposo. De la ecuación (2) podemos ver que la energía de liberación E_L es diferente a la energía cinética de la partícula alfa K_{α} por un factor indicado en la siguiente ecuación:

$$K_{\alpha} = \frac{A-4}{A} E_L \quad (3)$$

Donde A es el número de masa atómica del núcleo original --
(ver apéndice 1).

1.2) LA RADIACION BETA (β)

La desintegración beta consiste esencialmente en la transformación espontánea de un neutrón en un protón y un electrón, es decir:



Donde

n= neutrón

p⁺= protón

e⁻= electrón

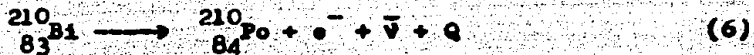
de manera que las partículas beta son partículas emitidas por los núcleos radiactivos, con masa y carga igual que la del electrón.

Las partículas beta no existen en el núcleo pero se originan al ser emitidas (ver apéndice 2). Para hacer válidas las leyes de la conservación en la desintegración beta, -- Pauli en 1930 propuso la existencia de una partícula extre-

madamente pequeña o con masa cero que se emite junto con el electrón llamado el neutrino, ahora sabemos que esta partícula tiene masa cero y que además existen dos tipos de ellos el neutrino ν y el antineutrino $\bar{\nu}$. Por lo que se consideran dos tipos de desintegración β , desintegración $\bar{\beta}$ y β^+ . En la desintegración $\bar{\beta}$ se emite un antineutrino de acuerdo con la siguiente reacción:



Como la masa del neutrino es cero la interacción con la materia es sumamente débil, sólo interacciones por medio de un proceso conocido como desintegración beta inversa. Como ejemplo de la desintegración $\bar{\beta}$ es el $^{210}_{83}\text{Bi}$ que decae por medio de la siguiente reacción:

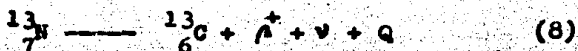


donde Q es la energía desprendida del orden de 1.117 MeV. Los electrones positivos, llamados normalmente positrones se descubrieron en 1932 y se comprobó que eran emitidos por

ciertos núcleos y sus propiedades son las mismas que las del electrón excepto que posee una carga de e^+ , en la desintegración β^+ se emite un neutrino de acuerdo con la siguiente reacción:



Como ejemplo de la desintegración β^+ es el ${}^{13}_7\text{N}$ que decae por medio de la siguiente reacción:



La energía del electrón en la desintegración β de un núcleo determinado varía desde cero hasta un valor máximo característico del núcleo. La energía del electrón en la desintegración β^+ proviene de la diferencia de masa entre los núcleos padres e hijos multiplicada por C^2 de acuerdo con la ecuación de Einstein mencionada anteriormente. La energía se emite como energía cinética de las partículas obtenidas en la desintegración, es decir:

$$E = K_e + K_p + K_\nu \quad (9)$$

donde K_α es energía cinética del hijo.

K_β es energía cinética de la partícula β .

K_ν es energía cinética del antineutrino ó neutrino.

De esta última ecuación (9) podemos ver que la energía máxima de la partícula β será cuando $K_\alpha=0$ y $K_\nu=0$, entonces:

$$E_{\max.} = K_\beta \quad (10)$$

1.3) RADIACION GAMMA (γ)

Cuando un núcleo excitado pasa a su estado base se emite, - por lo general, (en el proceso) fotones o radiación gamma - que es radiación electromagnética.

En el decaimiento gamma se conserva el momento lineal y el principio de conservación de masa-energía. De manera que - si E^* es la energía asociada en el estado excitado y E la energía del estado base entonces la radiación gamma tiene una energía:

$$E^* - E = h \cdot f \quad (11)$$

donde f es la frecuencia del rayo gamma y h es la constante de Planck. ($h = 6.63 \times 10^{-34}$ J-S).

Cuando un núcleo está inicialmente en reposo, al emitir radiación la conservación del momento lineal requiere que deba retroceder con un momento P_d igual y opuesto en dirección al momento del fotón emitido y de magnitud

$$P_d = \frac{h}{\lambda} = \frac{h f}{c} \quad (12)$$

donde λ es la longitud de onda del fotón gamma. Una alternativa de la desintegración gamma es que un núcleo excitado puede volver en determinados casos a su estado fundamental cediendo la energía de excitación a uno de los orbitales que lo rodean, por medio de TRANSICIÓN ISOMÉRICA, estos procesos son transmisiones de baja energía y se llevan a cabo cuando hay una diferencia grande entre los momentos angulares de los estados base y excitados.

En ocasiones la energía de la transición isomérica se emite por medio de un electrón orbital, siendo el más común un electrón de la capa "K", a este proceso se le conoce con el nombre de CONVERSION INTERNA. Después de la emisión de un electrón de conversión interna, los orbitales quedan en su-

estado normal por medio de la emisión de rayos X, caracte -
 rístico del elemento. Estos rayos X pueden sin embargo in -
 teraccionar con los electrones orbitales y expulsan electro -
 nes con energías discretas que no van acompañadas por la e -
 misión de neutrinos; en todos los casos, la radiación gamma
 es emitida con energías discretas debido a que estas ener -
 gías representan las diferencias entre niveles nucleares.
 Como los fotones no tienen carga eléctrica, no pueden inter -
 accionar con campos magnéticos o eléctricos. Los rayos --
 gamma no se frenan fácilmente pero a medida que pasan a tra -
 vés de la materia su intensidad se atenúa de acuerdo con la
 ecuación :

$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad (13)$$

donde I_0 es la intensidad inicial.

μ es el coeficiente de absorción del medio de propa -
 gación.

x Es el espesor del material absorbente.

1.4) DECAIMIENTO RADIATIVO

La actividad R de una muestra de material radiactivo es la proporción en que los núcleos de sus átomos se desintegran al transcurrir un tiempo determinado y está expresada en la fórmula (14).

$$R = - \frac{dN}{dt} \quad (14)$$

donde el signo menos tiene por objeto hacer que R sea una cantidad positiva ya que dN/dt es intrínsecamente negativo. De la ecuación (14) se puede observar que la actividad tiene como unidades, desintegraciones/tiempo.

La unidad más conocida de la actividad R es el curie (Ci) y los submúltiplos que se definen de la siguiente manera:

1 curie = 3.70×10^{10} desintegraciones/segundo.

1 milicurie = 3.70×10^7 desintegraciones/segundo.

1 microcurie = 3.70×10^4 desintegraciones/segundo.

La experiencia ha demostrado que todos los elementos decaen

proporcionalmente al número de núcleos iniciales (N_0), es decir:

$$-\frac{dN}{dt} \propto N_0 \quad (15)$$

Esto se puede expresar de la siguiente forma:

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N_0 \quad (16)$$

donde λ en este caso es llamada constante de desintegración y es característica para cada material. Resolviendo la ecuación (16) tenemos que:

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \quad (17)$$

La ecuación (17) es la ecuación fundamental para el decaimiento radiactivo, donde N_0 es igual al número de núcleos iniciales al tiempo $t = t_0$. N es igual al número de núcleos no desintegrados en el tiempo t .

Se han definido otros parámetros tales como vida media $T_{1/2}$ de una muestra radiactiva que es el tiempo que tarda una muestra radiactiva en disminuir a la mitad del total de los núcleos radiactivos iniciales, es decir cuando $t = T_{1/2}$,

$N = N_0/2$. La vida media, está relacionada con la constante λ de la manera siguiente.

De la ecuación (17) tenemos que:

$$\frac{N_0}{2} = N_0 e^{-\lambda T_{1/2}}$$

es decir

$$e^{\lambda T_{1/2}} = 2$$

por lo que

$$T_{1/2} = \frac{0.693}{\lambda} \quad (18)$$

Esta ecuación permite conocer la vida media de un radioisótopo y a partir de esta característica se puede identificar el elemento.

1.5) SERIES RADIOACTIVAS

Cuando se desintegra un núcleo llamado cabeza de serie o núcleo padre por decaimiento alfa o beta, se forma un nuevo núcleo, llamado hijo, que puede ser también radiactivo.

La mayoría de los elementos radiactivos encontrados en la naturaleza son miembros de cuatro series radiactivas y cada

serie está formada por una sucesión de productos que proceden, de un sólo núcleo.

La razón por la que se encuentran solamente cuatro series radiactivas naturales se debe a que la desintegración alfa reduce el número de masa de un núcleo en cuatro unidades, por ejemplo los núcleos cuyos números de masa están dados por

$$A = 4n \quad (20)$$

donde n es un entero positivo.

Se pueden desintegrar unos en otros disminuyendo el orden del número de masa en múltiplos de cuatro. Los núcleos que obedecen la ecuación (20) se dice que son miembros de la serie $4n$ conocido también como serie del torio.

En la tabla 1 se presenta una lista de las cuatro series principales en la cual se anota, la forma de desintegración de la masa nuclear, serie, núcleo padre, vida media y elemento final.

Forma de desintegración de la masa nuclear.	serie	padre	$T_{1/2}$ (en años)	elemento final
4n	Torio	${}_{90}^{232}\text{Th}$	1.39×10^{10}	${}_{82}^{208}\text{Pb}$
4n+1	Neptunio	${}_{93}^{237}\text{Np}$	2.25×10^6	${}_{83}^{209}\text{Bi}$
4n+2	Uranio	${}_{92}^{238}\text{U}$	4.51×10^9	${}_{82}^{206}\text{Pb}$
4n+3	Actinio	${}_{92}^{235}\text{U}$	7.07×10^8	${}_{82}^{207}\text{Pb}$

Tabla 1.- Series radiactivas naturales.

Como la vida media del ${}_{93}^{237}\text{Np}$ es muy corta comparada con la de la tierra (de aproximadamente 5×10^9 años), los miembros de esta serie prácticamente no se encuentran en la naturaleza, - sin embargo se han producido artificialmente mediante reacciones nucleares.

La figura 1 muestra la desintegración del ${}_{92}^{235}\text{U}$, en los diferentes elementos en los que decae por desintegración de las partículas alfa y beta.

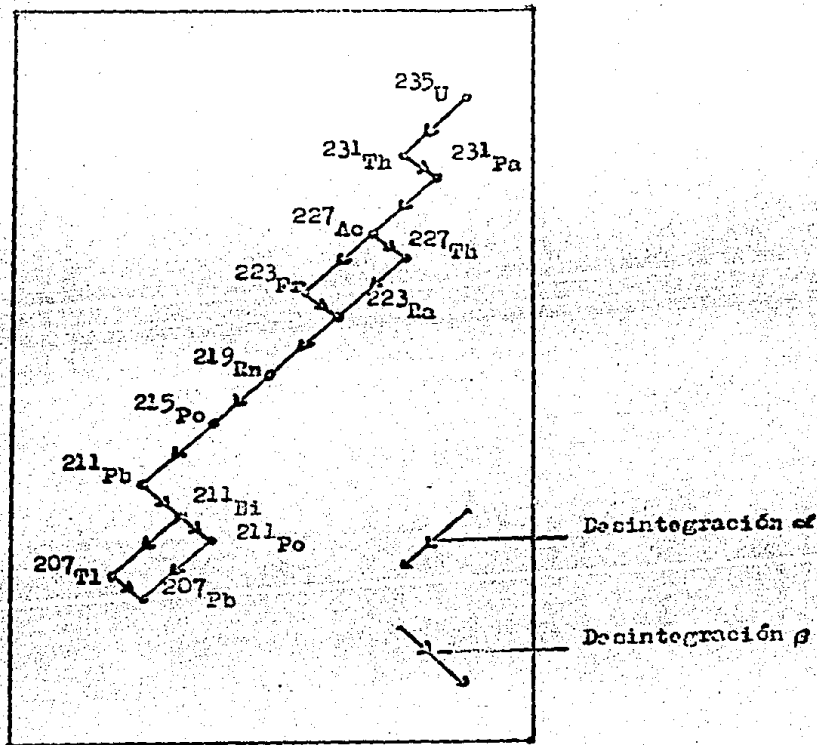


Fig. 1 .- Representación esquemática de la serie radiactiva del ^{235}U , (4n+3) serie del Actinio.

1.6) INTERACCION DE LA RADIACION ALFA CON LA MATERIA.

Cuando las partículas alfa se mueven a través de un medio absorbente, van perdiendo energía por excitación e ionización de los átomos del medio, pero debido a que las masas de las partículas alfa son mucho más grandes que las de los electrones, es decir $m_{\alpha} \gg m_e$, se necesita una gran cantidad de estos choques para lograr detener a la partícula alfa. Además por la misma causa la deflexión en cada colisión es muy pequeña por lo que las trazas observadas en la cámara de niebla representan una longitud bien definida que se propaga prácticamente en la misma dirección del movimiento inicial. La pérdida de energía por colisión es muy pequeña y cuando una partícula alfa interacciona con un electrón en reposo la pérdida de energía de la partícula alfa está dada por la siguiente relación:

$$\Delta E = E \left[\frac{4m_e}{\square} \right] \quad (21)$$

donde m_e = masa del electrón

m_α = masa de la partícula alfa

E = energía inicial de la partícula alfa

1.7) DETERMINACION DE LA LONGITUD L RECORRIDA POR LAS PARTICULAS - ALFA

Existen varias formas para determinar la longitud L recorrida por las partículas alfa.

a) Método de absorción.

Consiste en colocar una fuente radiactiva en un medio de absorción y un detector a diferentes distancias de ella, de tal manera que se pueda medir el alcance máximo de cada partícula radiactiva de esta manera se obtiene una curva de absorción como se muestra en la fig. 2.

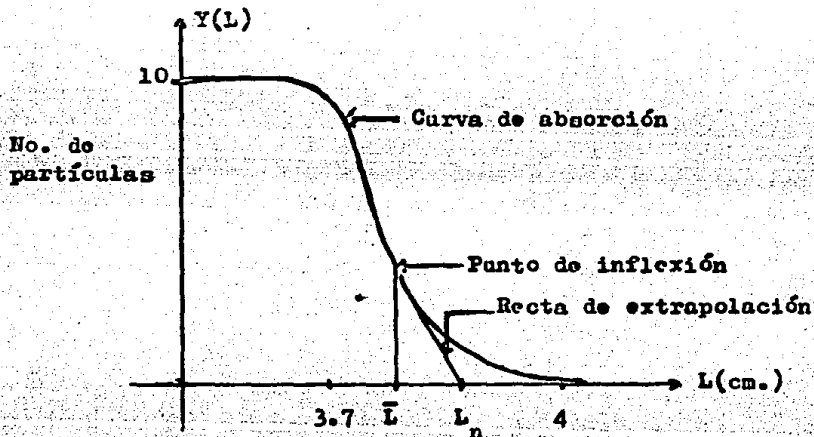


Fig. 2.- Número de partículas alfa en función de la distancia recorrida.

De esta gráfica se puede definir un alcance medio \bar{L} que corresponde a la abscisa del punto de inflexión de la (fig. 2), también se puede definir el alcance extrapolado L_n como la abscisa correspondiente donde la recta de extrapolación corta al eje de las abscisas y es tangente al punto de inflexión.

La relación entre estas dos medidas es la siguiente:

$$L_n - \bar{L} = \frac{1}{2} \pi^{1/2} \sigma \quad (22)$$

donde σ es conocida estadísticamente como una medida de dispersión, respecto a la media (alcance medio).

Esta dispersión de partículas a diferentes distancias se debe a que todas las partículas tienen diferente número de choques durante su recorrido. Una medida conveniente de dispersión para estas partículas está dada por la función de densidad de Gauss.

$$Y(L) = (\pi^{1/2} \sigma)^{-1} e^{-\left(\frac{L - \bar{L}}{\sigma}\right)^2} \quad (23)$$

Esta función se define para $0 \leq L \leq \infty$ en este caso y la gráfica de densidad la podemos ver en la (fig.3).

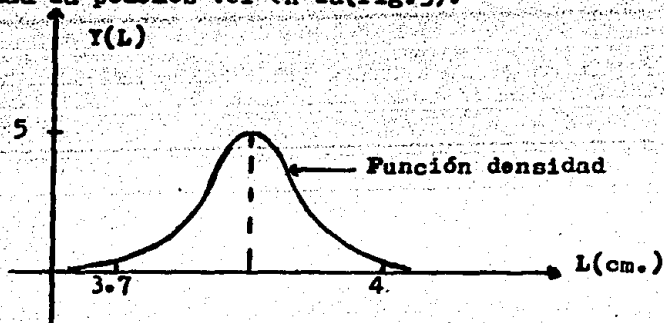


Fig. 3.- Función densidad Y(L) en función del alcance L.

De la ecuación (23) podemos ver que YdL nos da la fracción de partículas alfa que se encuentran en el intervalo $[L, L+dL]$.

b) Ionización específica (I)

Este método consiste en medir los iones producidos por la partícula alfa en función de la distancia recorrida y se ha encontrado que la ionización específica aumenta al final de la trayectoria. La ionización específica está relacionada con el poder frenante del medio $(-dE/dL)$ por la siguiente relación:

$$-\frac{dE}{dL} = wI \quad (24)$$

donde w es la energía consumida en cada creación de un par de iones. I se mide en pares de iones producidos por unidad de longitud. El signo menos en la ecuación (24) es debido a que E disminuye al aumentar L .

c) Alcance-energía

Al integrar la ecuación (24) para obtener el alcance en función del poder frenante tenemos:

$$\bar{L} = \int_{L_0}^{L_1} dL = \int_{I_0}^E (wI)^{-1} dE = - \int_{I_0}^E \left(\frac{dE}{dL} \right)^{-1} dE \quad (25)$$

Para efectuar la segunda integral se debe conocer el número total de iones producidos I (ionización específica) y se multiplica por w , o bien conocer el poder frenante del medio para efectuar el cálculo como lo indica la tercera integral. También se puede calcular una relación teórica del poder frenante para una partícula de carga Z y alta velocidad v en virtud de los procesos de choque; interviene también la carga nuclear Z_0 del medio absorbente, su potencial de ionización efectivo (I) y su densidad atómica (N). Dicha relación está dada por la siguiente expresión:

$$- \frac{dE}{dL} = \frac{4\pi e^4 Z^2 N Z_0}{mv^2} \left[\ln \frac{2mv^2}{I} - \ln(1 - \beta^2) - \beta^2 \right] \quad (26)$$

donde m es la masa del electrón en reposo, $\beta = \frac{v}{c}$ y c es la velocidad de la luz en el vacío (ver la referencia No. 12). De la ecuación (26) vemos que para $\beta \ll 1$ es decir para partículas a baja velocidad:

$$-\frac{dE}{dL} = \frac{4\pi e^4 Z^2 NZe}{mv^2} \ln \frac{2mv^2}{I} \quad (27)$$

Al combinar las ecuaciones (25) y (26) obtenemos:

$$\bar{L} = K \int_{E_0}^E f(v) dE = mZ^{-2} F(v) \quad (28)$$

donde K es el coeficiente de la ecuación (26) y m es la masa de la partícula proyectil.

La ecuación (28) nos dice que para diversas partículas en un mismo medio absorbente, el alcance depende únicamente de la velocidad de la partícula. De tal manera que si se comparan dos partículas de masa m y m_0 y cuyas cargas son z y z_0 y de idéntica velocidad, entonces por la ecuación (28) tenemos que:

$$\bar{L} = L_0 \left(\frac{m}{m_0} \right) \left(\frac{z_0}{z} \right)^2 \quad (28)$$

Estas últimas ecuaciones son fundamentales en la teoría de alcance de una partícula en un medio determinado y tienen infinidad de aplicaciones para diferentes partículas proyectiles como son: electrones, mesones, protones o partículas más pesadas en las cuales se tiene que hacer ajustes a las ecuaciones para obtener buenos resultados.

CAPITULO II

PARTE EXPERIMENTAL

En este capítulo se describe la técnica utilizada para analizar el uranio contenido en los minerales y medir su coeficiente de actividades, $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$.

2.1) EQUIPO Y MATERIALES

Se utilizó un equipo de espectroscopía alfa para medir la radiación alfa emitida por los isótopos de uranio. El equipo consta de las siguientes partes:

- 1) Bomba de difusión.
- 2) Campana de vacío y detector de barrera superficial.
- 3) Preamplificador Tenselec, modelo T.C. 133 y fuente de voltaje Ortec modelo 459.
- 4) Amplificador Ortec modelo 450.
- 5) Analizador multicanal (1024 canales) Northern modelo N.S. 710.
- 6) Impresora Teletype 9320-3JC.

7) Graficadora Hewlett Packard modelo 7004B.

El equipo se acopla como lo muestra el siguiente diagrama de bloques figura 4.

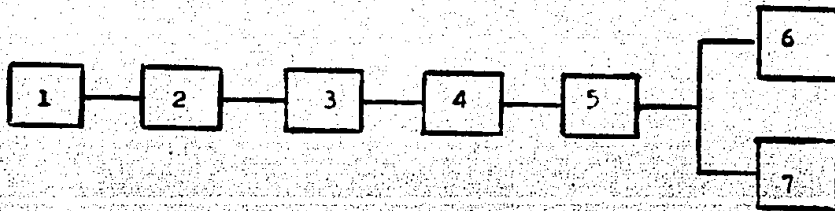


Fig. 4 .-- Diagrama de bloques del sistema de detección.

2.2) OPERACION DEL EQUIPO

La operación del equipo consta de los siguientes pasos:

- a) Se introduce una fuente radiactiva de uranio en la campana de vacío de tal manera que quede en frente del detector a una distancia aproximada de 1 a 3 mm.

- b) Se enciende la bomba difusora para extraer el aire de la campana y se espera aproximadamente 15 min., de manera que se obtenga un vacío estable de aproximadamente 2×10^{-6} torr. - Esto se hace con el fin de evitar la pérdida de energía de las partículas alfa al atravesar el aire existente entre el detector y la fuente de uranio.
- c) Se enciende la fuente de voltaje y se le suministra 90 volts. que es el voltaje con que trabaja el sistema.
- d) Se enciende el registrador multicanal para empezar el proceso de conteo durante un tiempo de 3 y 20 hrs. dependiendo de la actividad de la muestra. En este aparato queda registrada la detección de las partículas en diferentes canales dependiendo de su energía.
- e) Se extrae la información obtenida del multicanal en dos formas:
- i) Por medio de la impresora para un análisis estadístico.
 - ii) Por medio de la graficadora para obtener un análisis gráfico.

2.3) CALIBRACION DEL MULTICANAL

El equipo multicanal se calibró con una muestra patrón comercial que contiene los isótopos radiactivos mostrados en la tabla No.2.

ISOTOPOS	ENERGIAS (MeV)	CANALES
^{239}Pu	5.168	517
^{241}Am	5.485	561
^{244}Cm	5.804	603

Tabla 2.- Isótopos radiactivos, energías y canales en los que se registraron los picos de los isótopos de la fuente patrón.

El espectro obtenido de esta muestra radiactiva se muestra en la figura 5.

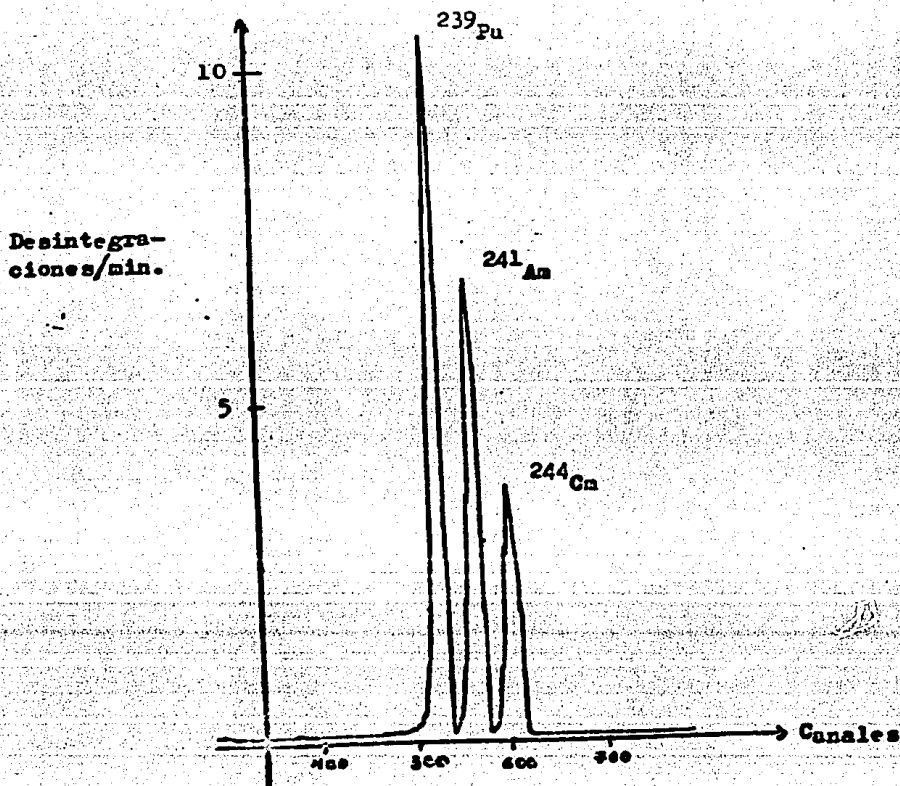


Fig. 5 -- Espectro alfa de una fuente triple de ^{239}Pu , ^{241}Am y ^{244}Cm utilizada para calibrar el sistema de detección.

La figura 5 permite calibrar el multicanal por medio de una gráfica ajustada a mínimos cuadrados (fig.6 y apéndice 3).

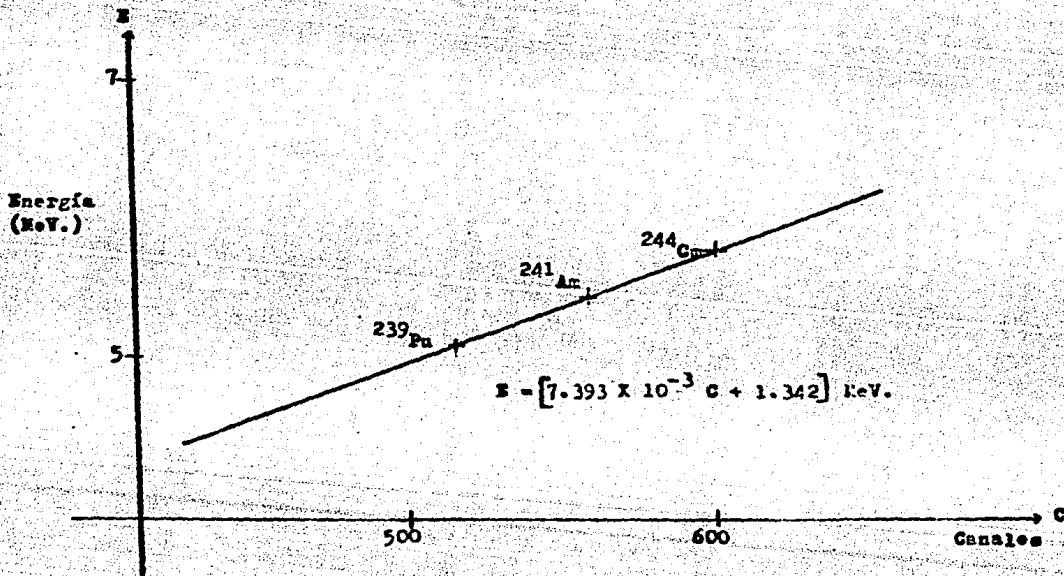


Fig. 6.- Curva de calibración, energía en función del número de canal en que se registra.

El valor de la energía se puede expresar por medio de la relación:

$$E = (7.373 \times 10^{-3} G + 1.342) \text{MeV.} \quad (30)$$

donde G es el canal de registro.

Por medio de esta ecuación se puede analizar cualquier muestra radiactiva, es decir, permite determinar la energía de cada radiación alfa que registra el multicanal. Posteriormente por medio de esta información se puede identificar el elemento utilizando tablas convencionales.

2.4) METODOS DE ANALISIS

Los minerales analizados fueron diferentes muestras de pechblenda de diferentes lugares, pechblenda 1 (procedente de Estrasburgo Francia), pechblenda 2 (de Clairmont Ferrant), pechblenda 3 (del reactor natural de Oklo) y autunita, mineral rico en uranio. Con estos minerales se efectuó el mismo proceso analítico, que se describe a continuación:

a) Tratamiento de los minerales

Las muestras de uranio no pueden ser analizadas cuando contienen impurezas, ya que para su medición se requiere de muestras muy delgadas y puras de este elemento, de otra manera la autoabsorción no permitiría su medición.

Con el propósito de disolver el mineral se tomaron muestras de aproximadamente 20 mg. del mineral y se calentaron a 85°C en presencia de 1 ml de una mezcla de ácidos (tres partes de ácido clorhídrico, una de ácido nítrico y una de agua) hasta la evaporación del líquido. Este ataque del mineral se repite varias veces hasta su disolución. Aquellos minerales que no se disolvieron se tratan posteriormente con 3 ml de ácido fluorhídrico pasando la muestra a una vaso de polietileno y calentando en baño de agua hirviendo hasta eliminar todo el ácido. Una vez disuelta la muestra se aforó con agua tridestilada a 20 ml, obteniéndose así una muestra para el análisis de uranio en fase acuosa.

En ocasiones cuando existe exceso de silicatos el proceso anterior no disuelve completamente el mineral por lo que se repite la adición de ácido fluorhídrico; en el caso de muestras con alto contenido de hierro se separa el exceso de este elemento por medio del método de extracción por solventes utilizando cupferron. (Para detalles de este método ver el apéndice 4).

b) Separación del uranio de otros elementos.

De los 20 ml de la fase acuosa se pasa 1 ml a un vaso de precipitado y se le agrega 1 ml de una solución patrón ^{232}U (Spike) que tiene una actividad de 47 desintegraciones por minuto, así mismo se agregan 4 gotas de ácido perclórico para asegurar el medio oxidante y se lleva la solución a sequedad en una parrilla de calentamiento. Nuevamente se le agrega 2 ml de ácido clorhídrico 9.5 N. y se lleva a sequedad con el propósito de eliminar los radicales de nitrato. El residuo del vaso se trata de la siguiente manera:

10.) Se agregan 25 ml de ácido clorhídrico 0.1 M y se pasa por una columna de partición (fig.7) impregnada con D_2EHPA que permite la absorción del uranio. Esta fracción eluida contiene las impurezas presentes en el mineral.

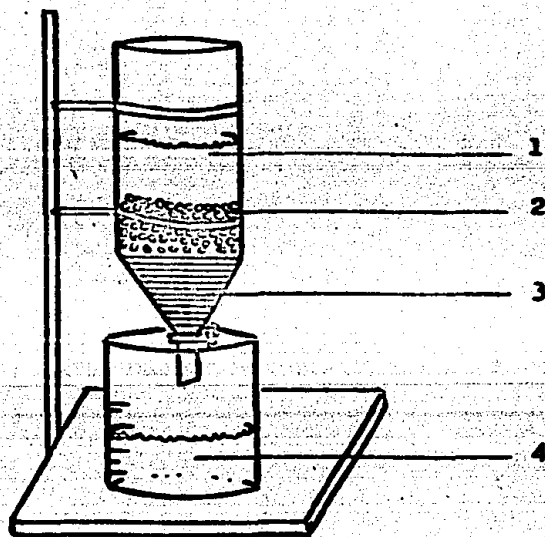


Fig. 7.- Columna para purificar el uranio. 1) Solución con uranio. 2) Lecho de teflón impregnado con D_2EHPA . 3) Fibra de vidrio. 4) Fase de líquido eluido por la columna.

20.) Se pasa por la columna 25 ml de ácido clorhídrico 3 N y se recoge esta fracción en otro recipiente. En esta fracción se eluye el hierro que interferiría con el uranio.

30.) Finalmente se pasa por la columna 40 ml de ácido clorhídrico-12 N eluyendo precisamente el uranio; esta fase se recoge en un recipiente especial para hacer el análisis de uranio contenido en el mineral analizado.

Una vez obtenidas las tres fases separadamente, se regenera la columna lavándola con 100 ml de agua, para que quede lista para volver a utilizarla, la columna se debe dejar con cierta cantidad de agua, es decir se debe tener mucho cuidado de que nunca quede seca.

La solución de uranio de la tercera fase se lleva a sequedad, una vez seca la muestra se le agrega 10 ml de fluoruro de sodio 0.1 N y se ajusta la solución a pH 10 con una solución de hidróxido de sodio (40 ml de agua y 5 gr del compuesto) esta fase queda lista para un proceso electrolítico.

Las otras fracciones residuales también son preparadas siguiendo el mismo proceso para asegurar la ausencia del uranio en ellas.

c) Proceso electrolítico

Por medio del proceso de electrólisis se prepara una muestra delgada de uranio en una placa de acero inoxidable perfectamente pulida a espejo de 1.5 cm de diámetro y 0.15 cm de espesor posteriormente se pasa la solución obtenida en una celda electrolítica ver (fig.8).

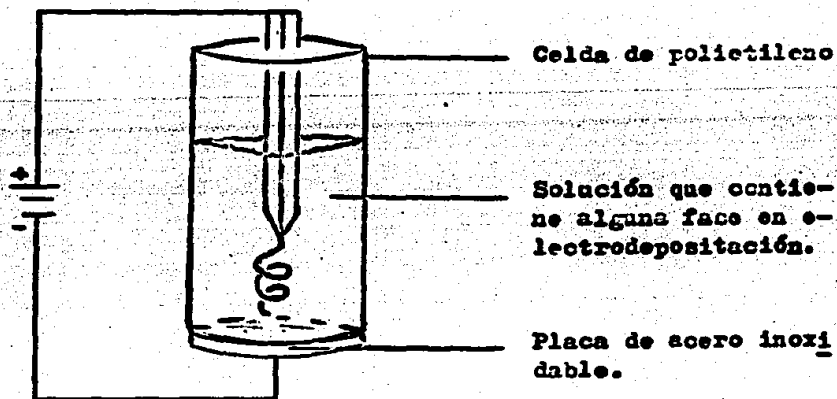


Fig.8 .- Celda electrolítica utilizada para la preparación de muestras delgadas de uranio.

Esta celda está compuesta de las siguientes partes principales: un electrodo positivo que básicamente lo constituye un alambre de platino, un electrodo negativo que está constituido por la placa de acero inoxidable, una fuente de voltaje cuyo voltaje de operación fue de 3.5 a 5 volts y una corriente de 5 mA durante un periodo de electrólisis de 180 min. obteniéndose de este proceso una película delgada de uranio electrodepositado en la placa de acero, lista para ser analizada en el espectrómetro alfa (fig. 9).



Fig.9 .- Fotografía de una placa de acero inoxidable con uranio electrodepositado para el análisis.

CAPITULO III

RESULTADOS Y CONCLUSIONES

- a) La determinación cuantitativa del uranio se hizo a través de su isótopo más abundante en masa que es el ^{238}U .
- b) Para la determinación de actividades se midieron los picos de energía alfa de los isótopos de uranio, observándose (fig.10) la presencia del ^{235}U , ^{234}U además del patrón utilizado el ^{232}U .
- c) Para la determinación del cociente de actividades del ^{234}U y el ^{238}U se requirió obtener la actividad de cada uno de ellos lo cual se hizo por la integración de sus picos de energía de 4.7 MeV. y 4.2 MeV. respectivamente.
- A continuación se describe el procedimiento utilizado: una muestra de 20 mg de mineral tratado de acuerdo al inciso(2.4), se aforó a 20 ml con agua tridestilada y de ella se tomó 1 ml para el análisis, es decir el equivalente de 1 mg de mineral, los resultados obtenidos a través del espectrómetro alfa se muestran en la tabla No.3.

<SELECT REGION>

356	1	1	1	1	1	2	1	1
364	0	2	1	2	3	2	0	0
372	1	2	1	0	1	1	0	4
380	3	1	2	0	0	4	4	4
388	4	2	8	6	3	7	10	14
396	21	21	29	39	45	61	96	91
404	110	100	102	69	21	4	0	1
412	0	0	0	1	1	0	0	2
420	3	6	3	9	6	5	5	2
428	2	2	1	1	5	0	0	3
436	0	2	0	1	0	1	0	4
444	3	3	5	4	7	8	5	6
452	11	25	21	27	38	51	60	85
460	73	82	126	129	86	33	60	0
468	0	0	0	0	1	1	0	0
476	1	0	1	0	0	0	0	2
484	0	1	1	2	2	2	2	2
492	5	0	4	0	4	4	5	5
500	4	10	14	14	15	25	23	39
508	70	88	101	126	159	196	168	232
516	294	295	224	94	29	3	0	0
524	1	1	1	0	0	2	0	1
532	1	0	0	0	0	0	0	0
540	0	0	1	0	1	1	1	2
548	1	1	3	0	4	6	5	0
556	1	0	0	0	0	1	0	0

Tabla 3.- Información numérica de un espectro alfa, el máximo de cada pico se indica con un círculo y los paréntesis rectangulares indican el área de cada pico. La gráfica asociada a estos datos se muestran en la -- (fig. 10).

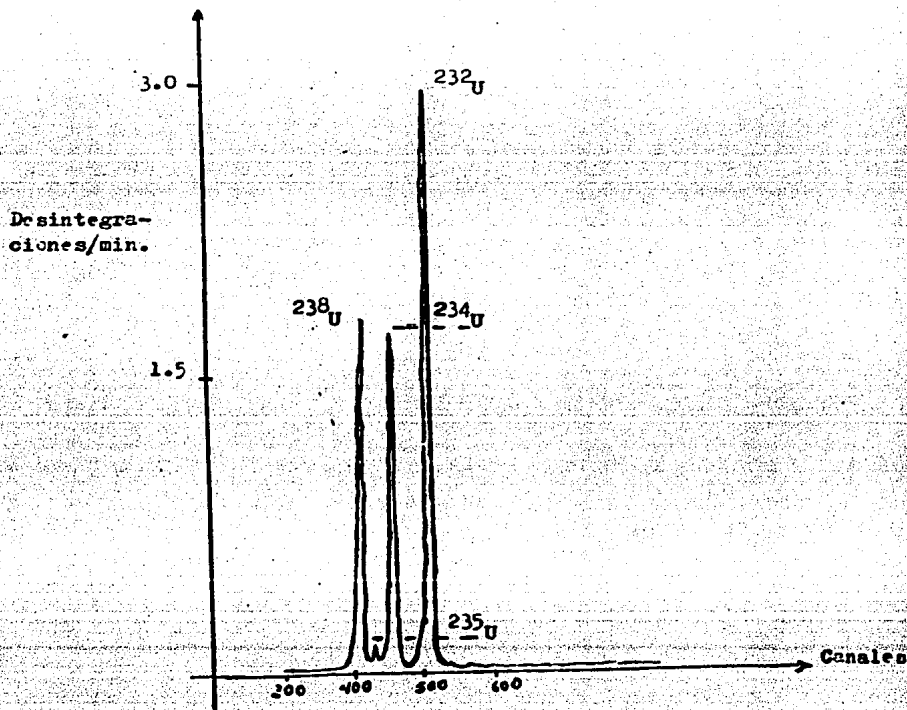


Fig. 10 .-- Espectro alfa típico de las fuentes de uranio.

La actividad de cada isótopo del uranio se calculó por la integración de las áreas de sus picos de energía - alfa respectivas mostrados en la tabla 3. Por ejemplo para el ^{232}U se encontró una área de 2230 desintegraciones en 64364 seg., es decir 2.08 desintegraciones/min. De igual manera se procedió para los otros isótopos, una vez obtenida la actividad de cada elemento se obtuvo las relaciones $^z\text{U}/^{238}\text{U}$ donde z es la masa atómica de un isótopo cualquiera así para el ^{232}U tenemos en este experimento que el cociente de actividades $^{232}\text{U}/^{238}\text{U} = 2.57$, haciendo lo mismo para todos los isótopos obtenidos, se obtuvo la tabla 4.

ISOTOPO	CANAL	AREA	DES./MIN	${}^Z\text{U}/{}^{238}\text{U}$
${}^{232}\text{U}$	517	2 230	2.08	2.57
${}^{234}\text{U}$	463	893	0.83	1.03
${}^{235}\text{U}$	423	52	0.05	0.06
${}^{238}\text{U}$	404	865	0.81	1.00

Tabla 4.- Isótopos del uranio, posición en que se encuentra el pico de energía alfa, área de cada pico, actividad de cada isótopo y cociente de actividades ${}^Z\text{U}/{}^{238}\text{U}$.

De esta tabla podemos calcular la cantidad de uranio contenido en el mineral analizado, por lo que primero calculamos la eficiencia con la que se desarrolló el experimento, teniendo en cuenta que: el patrón de ${}^{232}\text{U}$ tiene una actividad de 47 - desintegraciones/min. Utilizando este valor se calculó que - la eficiencia de todo el proceso es de 4.4%, este valor incluye eficiencia de separación y de detección.

Además sabemos que: un microgramo ($1\mu\text{g}$) de ${}^{238}\text{U}$ tiene una actividad de 0.733 desintegraciones/min., sin embargo registramos en nuestro experimento 0.81 desintegraciones/min., que corresponde a $1.10\mu\text{g}$ de ${}^{238}\text{U}$.

Introduciendo la eficiencia total (4.4 %) en estos cálculos - al hacer las correcciones se encuentra que el ^{238}U contenido en este mineral es de 2.52 μg (véase los resultados de este experimento en la fila 7 de la tabla 5).

Además fué necesario confirmar que no hubiera presencia de uranio en las fracciones de desecho 1a. y 2a. indicado en el inciso (2.4).

En la tabla 5 tenemos el resumen de 11 experimentos, con los diferentes minerales analizados. La primera columna indica el mineral analizado, la segunda indica la cantidad de mineral utilizado en cada experimento, la tercera indica el tiempo de conteo en el multicanal, la cuarta, quinta y sexta son las medidas del área de cada pico de energía, las columnas séptima, octava y novena proporcionan las desintegraciones por minuto de cada isótopo en cada muestra, la columna décima muestra la eficiencia con la que se trabajó en el experimento, las columnas once y doce son las medidas de los cocientes de actividades $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$, así como $^{232}\text{U}/^{238}\text{U}$ y la columna trece indica-

Mineral	Mig. de Mineral Analizado	Tiempo Conteo(seg.)	Area		D.P.M. $\frac{234}{U}$	D.P.M. $\frac{238}{U}$	D.P.M. $\frac{235}{U}$	Eficiencia	$\frac{234}{U}$	$\frac{238}{U}$	% de U en cada experimento.		
			$\frac{234}{U}$	$\frac{238}{U}$									
1	Fechblenda 1	2.4	5 000	344	327	21	4.12	3.92	0.25	0.53	1.05	0.06	41.6
2	"	2.5	4 750	3 074	3 113	183	8.80	39.30	2.30	4.90	0.98	0.06	43.76
3	"	0.625	16 680	3 890	3 774	873	4.00	13.60	3.10	6.00	1.03	0.23	44.96
4													
5													
6													
7	Fechblenda 2	1.0	64 364	893	865	2 230	0.83	0.81	2.07	4.40	1.03	2.58	2.52
8	"	7.5	15 252	612	619	191	2.30	2.33	0.72	1.53	0.99	0.30	2.77
9													
10													
11													
12	Fechblenda 3	5.0	9 858	653	591	425	3.97	3.60	2.52	5.51	1.10	0.72	1.78
13	"	3.0	13 327	388	412	731	80.36	0.38	0.67	1.43	0.94	1.27	1.21
14	"	3.0	19 580	3 245	3 253	2 110	8.81	3.83	6.47	13.76	0.99	1.69	1.26
15	"	3.0	64 831	3 109	2 963	5 711	2.88	2.74	5.28	11.23	1.05	1.93	1.11
16													
17													
18													
19	Antanita 4	0.752	33 512	3 167	3 072	196	15.18	4.78	0.87	1.95	1.08	0.18	46.70
20	"	0.752	64 352	33 816	33 690	2 162	12.89	12.77	2.92	4.30	1.01	0.16	53.90
21													
22													
23													
24	Origen de la muestra		1.- Matrasburgo Francia.										
25			2.- Orléans France.										
26			3.- Neaples Natural Okio, Odben.										
27			4.- Astan, Francia										
28													
29													
30													
31													
32													
33													
34													
35													
36													
37													
38													
39													
40													
41													
42													

Tabla No. 5

(45)

el resultado de cada experimento y es la cantidad de uranio que contiene el mineral analizado.

De la tabla 5 obtenemos promedios de los datos más importantes para cada uno de los minerales que se analizaron y se resumen en la tabla 6.

Mineral	$^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$	$^{232}\text{U}/^{238}\text{U}$	Eficiencia	% de Uranio cont. en el Mineral.	Desviación estándar.
Pech. 1	1.02	0.11	4.01	43.44	1.70
Pech. 2	1.01	1.44	2.96	2.64	0.20
Pech. 3	1.02	1.40	7.98	1.34	0.20
Autunita 4	1.04	0.17	3.07	50.30	5.10

Tabla 6

La tabla 6 muestra los promedios de el cociente de actividades $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$, $^{232}\text{U}/^{238}\text{U}$, la eficiencia con la que se trabajó y el porcentaje de uranio que contiene el mineral analizado objetivos de este trabajo., además se calculó la desviación estándar del uranio contenido en el mineral donde se observa que la mayor desviación es de 5.1 lo cual indica muy poco margen de error en los resultados de cada experimento.

CONCLUSION

En estudios de análisis isotópico se requiere de técnicas especiales para evaluar la concentración de los isótopos de uranio proveniente de materiales naturales. Las técnicas analíticas convencionales, como son la fluorimetría o la activación neutrónica detectan con mucha precisión solamente la concentración del uranio total contenido en la muestra, la espectroscopía de masas permite la separación de los isótopos del uranio que se utilizan para medir el cociente de actividades $^{235}\text{U}/^{238}\text{U}$, sin embargo el límite de detección es de 0.1 ppb para una abundancia del ^{235}U de 0.7 % y en el ^{234}U esta abundancia es de 0.005 %. En el presente trabajo se puso a punto una técnica radioquímica capaz de detectar con precisión el cociente de actividades de los isótopos del uranio de masa 234 y 238.

El análisis radioquímico por medio de la espectroscopía alfa, motivo del presente estudio, es en la actualidad uno de los pocos medios para determinar el cociente de actividades $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ y tiene un límite de error de sólo 5 %.

APENDICE No.1

Deducción de la ecuación (3) página 6.

Por la conservación del momento, cuando una partícula de masa M se desintegra en dos partes m_{α} y m_{β} , la energía cinética con la que la partícula de masa m_{α} sale disparada debe ser igual a la energía cinética de la partícula de masa m_{β} , es decir:

$$m_{\alpha} v_{\alpha} = m_{\beta} v_{\beta} \quad (a)$$

o bien

$$m_{\alpha} k_{\alpha} = m_{\beta} k_{\beta} \quad (b)$$

donde

$$k = \frac{1}{2} m v^2$$

pero

$$m_{\alpha} = A \quad \text{y} \quad m_{\beta} = A - A$$

ya que la masa de la partícula padre desintegra en 4, así la ecuación (b) queda como:

$$4k_{\alpha} = (A - A)k_{\beta} \quad (c)$$

Sustituyendo k_f de (c) en la ecuación (2) página 6 obtenemos la ecuación (3).

$$k_d = \frac{A-4}{A} E_L \quad (3)$$

APENDICE No.2

Se ha encontrado que para que el electrón sea constituyente del núcleo atómico su energía cinética debe ser superior a 20 KeV., sin embargo se encuentra que esta energía es de aproximadamente de 2 KeV., como se muestra por el Principio de Incertidumbre razón por lo que el electrón no puede existir en el núcleo.

Demostración

El radio r del núcleo atómico es $r \leq 10^{-14}$ m.

Por lo que la incertidumbre relacionada con el momento será:

$$\Delta p \geq \frac{h}{\Delta x}$$

entonces

$$\Delta p \gg \frac{1.054 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}}{10^{-14} \text{ m}} \gg 1.1 \times 10^{-20} \frac{\text{Kg}\cdot\text{m}}{\text{seg.}}$$

Es decir, su energía cinética es:

$$E = pc = 1.1 \times 10^{-20} \frac{\text{Kg}\cdot\text{m}}{\text{seg.}} \times 3 \times 10^8 \frac{\text{m}}{\text{seg.}}$$

$$= 3.3 \times 10^{-12} \text{ J} = 2 \times 10^6 \text{ ev.} = 2 \text{ KeV.}$$

APENDICE No.3

Análisis de regresión.

En el análisis de regresión generalmente se trabaja con dos o más variables. Cuando se manejan dos variables una se llama ordinaria que es medible sin error apreciable X y la otra llamada variable aleatoria Y , la primera es llamada variable independiente y la segunda dependiente.

En un experimento se seleccionan n valores $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ y luego se observan los valores y_i correspondientes, de manera que se tendrá una muestra de la forma:

$$(x_1, y_1), (x_2, y_2), (x_3, y_3), \dots, (x_n, y_n)$$

En el análisis de regresión se supone que la media μ de las y_i dependen de las x_i es decir:

$$Y = \mu(x_i)$$

Esta ecuación corresponde a una curva de regresión de Y con base en X y en el caso más sencillo puede ser una recta representada por:

$$\mu(x) = bx + a$$

A la pendiente b se le llama coeficiente de regresión. Los parámetros a y b se pueden obtener por el método de mínimos cuadrados, desarrollado por Gauss.

"La recta debe ajustarse a los puntos dados, de manera que la suma de los cuadrados de las distancias verticales de estos puntos hasta la recta, sea mínima".

Por lo tanto la distancia vertical de un punto (x_1, y_1) hasta la recta:

$$Y = a + bX \quad (1)$$

$$\text{es } d = (y_1 - a - bx_1)$$

por lo tanto los cuadrados de las distancias verticales de los n puntos de la muestra a la recta tiene la suma.

$$q = \sum_{i=1}^n (y_i - a - bx_i)^2 \quad (2)$$

es decir:

q es función de a y b

para que q sea mínimo es necesario que:

$$\frac{\partial q}{\partial a} = 0 \quad \text{y} \quad \frac{\partial q}{\partial b} = 0$$

por lo tanto derivando (2) tenemos que:

$$\frac{\partial q}{\partial a} = -2 \sum_{i=1}^n (y_i - a - bx_i) = 0$$

y

$$\frac{\partial q}{\partial b} = -2 \sum_{i=1}^n x_i (y_i - a - bx_i) = 0$$

de aquí que

$$\sum_{i=1}^n y_i - an - b \sum_{i=1}^n x_i = 0$$

$$\sum_{i=1}^n x_i y_i - a \sum_{i=1}^n x_i - b \sum_{i=1}^n x_i^2 = 0$$

que son las llamadas ecuaciones normales y usando la definición de la media aritmética tenemos que éstas se convierten en:

$$\bar{Y} = a + b\bar{X}$$

$$\sum_{i=1}^n x_i y_i = a \sum_{i=1}^n x_i + b \sum_{i=1}^n x_i^2$$

despejando a y b de este sistema de ecuaciones tenemos:

$$a = \bar{y} - b\bar{x}$$

y

(3)

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i - n\bar{x}\bar{y}}{\sum_{i=1}^n x_i^2 - n\bar{x}^2}$$

el numerador de b se puede definir como:

$$S_{xy} = \frac{1}{n-1} \left(\sum_{i=1}^n x_i y_i - n\bar{x}\bar{y} \right)$$

que se le da el nombre de covariancia de la muestra o bien

$$S_{xy} = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})$$

y el denominador de (3) claramente se ve que es la variancia de x multiplicada por (n-1).

es decir

$$(n-1)S_x^2$$

y

$$b = \frac{S_{xy}}{S_x^2}$$

Si definimos a r como el coeficiente de correlación:

$$r = \frac{S_{xy}}{S_x S_y}$$

entonces b queda relacionada con r de la siguiente manera:

$$b = r \frac{S_x}{S_y}$$

Entonces b está relacionada con r y con las desviaciones estándar de las dos variables X y Y . Es decir, conociendo la pendiente de una recta podemos encontrar el coeficiente de correlación de dicha muestra. Este coeficiente nos indica que tanto se ajusta el conjunto muestral a la recta de regresión.

APENDICE No.4

El método de extracción del hierro del mineral por solventes (cupferron) se emplea de la siguiente manera: a la solución de pechblenda se le agrega ácido sulfúrico H_2SO_4 y se evapora hasta producir el gas SO_3 con el propósito de eliminar los nitratos presentes; una vez hecho esto, se diluyen los residuos en 10 ml de agua y se transfiere a un embudo de separación el cual previamente contiene 10 ml de dietiléter, en seguida se le agrega 2 ó 3 ml de una solución acuosa al 5% de cupferron y se le agita hasta tener una emulsión homogénea, después se le deja reposar de tal manera que se separen las fases (éter y agua), en esta separación junto con el éter se queda el hierro y en el agua el uranio, torio, radón etc., por lo que se drena el éter a un vaso de precipitado para separar el hierro y el agua del éter que está en el embudo; se le puede agregar otros 10 ml de éter y volver a agitar y después drenarlo al vaso, esto es con el fin de extraer lo más posible el hierro de la muestra original.

Una vez hecha esta operación, se lleva la muestra de agua la cual contiene el uranio y otros minerales a sequedad y se -- afora a 20 ml de agua tridestilada, obteniendo así una muestra para el análisis de uranio en fase acuosa.

BIBLIOGRAFIA

- 1) Analytical Chemistry
of the Manhattan Project.
Clement J. Rodden. (1961)
- 2) Studies on the ^{234}U and ^{238}U Ratio
in Natural Materials.
B. L. IRAO, P.P. PAREKH. M. SANKARDAS
Journal of Radioanalytical Chemistry vol.33 (1976)
- 3) Advanced Inorganic Chemistry
by F. Albert Cotton
and Geoffrey Wilkinson
Ad. John Wiley.
- 4) Cohen, Bernard L.,
Concepts of Nuclear Physics
Mc. Graw Hill, Book Company (1971)
- 5) Concepts of Modern Physics
of Arthur Beiser
Ad. Mc. Graw Hill, Book, second edition (1973)
- 6) Espectroscopia Alfa del Uranio
Tesis de Moisés Cywiak Garbarcewicz
Universidad Autónoma de México. (1985)

- 7) Determination of the Period after the Purification of ^{233}U with concomitant ^{232}U and Daughters
Tetsuo Hashimoto and Toshio Imai
Radiochimica, Acta 21, 66-72 (1974)
- 8) Quantitative Inorganic Analysis
Arthur I. Vogel
Third Edition, V.6 (1978).
- 9) Suggested Method for Spectrochemical Analysis of impurities in Uranium oxide
by Thallium Chloride- Strontium Fluoride Carrier D/C ARC Technique
Acta E-2 S M 6-43 V.37
by D.E. Gordanier. (1975)
- 10) Introduction to Mathematical Statistics
Paul G. Hoel
Ad. John Wiley and Sons, Inc. Nueva York-Londres (1976).
- 11) Introductory Nuclear Physics
by David Halliday
John Wiley & Sons Inc.
New York. (1961)
- 12) Nuclear and Radiochemistry
3rd. edition by Gerhart Friedlander,
Joseph W. Kennedy, Edward S.M.,
Julian Malcolm Miller
(1981)

- 13) Contribución al estudio de los efectos consecutivos a la desintegración alfa del ^{238}U en compuestos de Uranio y Minerales Uraníferos.
Tesis Doctoral (1985), Estrasburgo-Francia.
Eduardo Ordóñez Regil.