



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE CIENCIAS

ACTIVACIÓN DE MUESTRAS DE ALUMINIO

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE :
F I S I C O

PRESENTA:

LUIS ANTONIO MELÉNDREZ RODRÍGUEZ

DIRECTORA DE TESIS:

DRA. BEATRIZ ELIZABETH FUENTES MADARIAGA



2001





Universidad Nacional
Autónoma de México



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 esta 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.

ESTA TESIS NO SALE
DE LA BIBLIOTECA



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

DRA. MARÍA DE LOURDES ESTEVA PERALTA

Jefa de la División de Estudios Profesionales de la
Facultad de Ciencias
Presente

Comunicamos a Usted que hemos revisado el trabajo escrito:
"Activación de muestras de aluminio"

realizado por Meléndrez Rodríguez Luis Antonio con número de cuenta 08637783-0

quién cubrió los créditos de la carrera de Física.

Dicho trabajo cuenta con nuestro voto aprobatorio.

Atentamente

Director de Tesis
Propietario

Propietario Dra. Beatriz Elizabeth Fuentes Madariaga *Beatriz E. Fuentes M.*

Propietario M. en C. Ana Elena Buenfil Burgos *Ana E. Buenfil B.*

Propietario Dra. María Isabel Gamboa de Buen *MI Gamboa*

Suplente M. en C. César Gustavo Ruíz Trejo *César Ruíz*

Suplente Ing. Fernando Iturbe Hermann *F. Iturbe*

Consejo Departamental de Física

Patricia Goldstein M.

DRA. PATRICIA GOLDSTEIN-MENACHE, FACULTAD DE CIENCIAS
Coordinadora de Licenciatura DEPARTAMENTO DE FÍSICA

Agradecimientos

Quiero agradecer con mucho cariño a: los profesores que me enseñaron ha aprender no sólo sus conocimientos sino además el amor a su vocación, comprensión y su amistad, así como también a todos mis compañeros con los que compartí gratos y también amargos momentos. A la UNAM por ser una institución del cuál tengo el privilegio de ser y formar parte de ella, y a un sinnúmero de cosas que están relacionadas al entorno en la conclusión de mi trabajo de tesis de Licenciatura de Física.

A la Dra. Beatriz Elizabeth Fuentes Madariaga por ser una excelente tutora en la dirección de la tesis y una estupenda persona, en todo el sentido de la palabra.

Al comité de Sinodales: M. en C. Ana Elena Buenfil Burgos, Dra. María Isabel Gamboa de Buen, M. en C. César Gustavo Ruiz Trejo, y al Ing. Fernando Iturbe Hermann por sus sugerencias y comentarios en la tesis.

A los profesores del Departamento de la Facultad de Ciencias: René Alvarado Ortega, Alicia Zarzoza, Andrés Porta Contreras, Bernardo y Luis por su apoyo en la elaboración de este proyecto.

A los profesores del Colegio de Ciencias y Humanidades Plantel Azcapotzalco y Conalep.

Laboratoristas de Física Moderna: Pedro Vargas, Francisco e Iván, así como al personal de los talleres de Carpintería y de Máquinas y Herramientas.

A mis Padres Maria Marcos Rodríguez, Luis Meléndrez y mis hermanos Jorge, Martín y Manuel por ser lo más esencial en mi vida.

A la memoria de todas las personas que siempre me apoyaron y alentaron a luchar por mis principios e ideales y que lamentablemente no están conmigo en esta etapa importante de mi vida, pero sé que aún están conmigo.

A Claudia porque no existen palabras para poder expresar la parte emotiva que me ayuda a ser cada día mejor y más fuerte.

A la familia Muñoz López por su amistad y compañía incondicional.

A Alejandro Reyes y familia porque sé que puedo y pueden contar conmigo siempre.

A todos mis familiares y amistades que siempre me han apoyado en todo.

A mi México...

ÍNDICE

Introducción	(1)
Capítulo 1. Conceptos de Física Nuclear	
1.1 El Núcleo	(3)
1.2 Transformaciones Nucleares	(3)
1.2.1 Ley de decaimiento radiactivo	(4)
1.2.2 Vida Media	(5)
1.3 El Neutrón	(5)
1.3.1 Interacción de los neutrones con la materia	(5)
1.3.2 Sección Eficaz	(6)
1.3.3 Clasificación de los neutrones	(7)
1.3.4 Moderación	(8)
1.4 Activación	(8)
Capítulo 2. Equipo Experimental	
2.1. Diseño y operación del irradiador	(10)
2.2 Fuente de neutrones ($^{241}\text{Am} - ^9\text{Be}$)	(10)
2.3. Detectores de radiación	(12)
2.3.1 El detector Geiger Muller y la Interfase GMX	(12)
2.3.2 Detectores de Centelleo	(13)
2.3.3 Detector de Germanio Hiperpuro (Ge-HP)	(14)
2.3.4 Analizador Multicanal (MCA)	(15)
Capítulo 3. Desarrollo Experimental	
Desarrollo Experimental	(16)
Capítulo 4. Resultados y Análisis	
Resultados y Análisis	(21)
Capítulo 5. Conclusiones	
Conclusiones	(28)
Referencias Bibliográficas	(I)

Introducción

La producción de radioisótopos generalmente se lleva a cabo en los reactores nucleares y los aceleradores de partículas. En estos equipos la activación se genera en tiempos muy cortos debido a la elevada intensidad de los flujos. El análisis por activación se puede emplear para determinar la composición química en algunos materiales (espectroscopia), y se aplica en diferentes campos como son la arqueología, la agricultura, investigaciones criminológicas, y del medio ambiente entre otras.

Las fuentes de neutrones tipo Howitzer tienen flujos muy pequeños comparados con los aceleradores y los reactores. Sin embargo, su bajo costo y maniobrabilidad las hacen muy atractivas. Los laboratorios de docencia de Física Moderna de la Facultad de Ciencias, cuentan con un irradiador de $^{241}\text{Am}-^9\text{Be}$ de 0.5 Ci.

Se planteó el problema de averiguar la factibilidad de activar aluminio el cual es un elemento con una sección eficaz de absorción muy pequeña, que fácilmente se activa en aceleradores y reactores. El interés del trabajo surgió de una propuesta del artículo "An introductory activation experiment for the senior laboratory". R.M. Prior and A.A. Rollefson, Am.J.Phys 46 (10), Oct. 1978.

La reacción a estudiar es la $^{27}\text{Al} (n, \gamma) ^{28}\text{Al}$, que se produce con neutrones térmicos. La vida media del ^{28}Al es de 2.25 min y la energía de la γ es de 1.778 MeV. Esta reacción compite con la reacción $^{27}\text{Al} (n, p) ^{27}\text{Mg}$ producida por neutrones rápidos. La γ más intensa que produce el ^{27}Mg es de 843.59 keV.

Los resultados obtenidos en este trabajo de tesis permiten sugerir el desarrollo de una nueva práctica experimental en los laboratorios de Física Moderna de la Facultad de Ciencias. La activación de aluminio, junto con la activación de indio, plata y oro enriquecerán los experimentos de física nuclear en dichos laboratorios.

Estos experimentos permitirán estudiar decaimientos radiactivos a través de la identificación de gammas de diversos radionúclidos, así como la determinación de sus vidas medias.

La tesis tiene la siguiente estructura:

En el Capítulo 1 se cubren varios conceptos básicos de radiactividad y física nuclear. El Capítulo 2 está relacionado con las características de la fuente de ^{241}Am - ^9Be , del irradiador y de los instrumentos para detección de la radiación. El Capítulo 3 está enfocado al desarrollo experimental. En el Capítulo 4 se presenta el análisis de los resultados. El Capítulo 5 consta de las conclusiones.

CAPÍTULO 1

CONCEPTOS DE FÍSICA NUCLEAR

1.1 El Núcleo

Un núclido se representa esquemáticamente por ${}^A_Z X_N$, donde X representa el símbolo químico del elemento, Z es el número atómico e indica el número de protones, N es el número de neutrones y A es el número de masa atómica, equivalente al número total de protones más neutrones [K1,V1].

Un elemento está constituido por núclidos con diferente número de neutrones, pero con igual número atómico. Son isótopos los núclidos que contienen el mismo número de protones pero diferente número de neutrones, su comportamiento químico es idéntico debido a que su estructura electrónica es la misma, pero su comportamiento físico es diferente. Existe una gran variedad de isótopos conocidos de todos los elementos, algunos de ellos creados de manera artificial.

Un concepto importante en física nuclear es el valor Q el cual determina la energía umbral para producir una reacción nuclear [F1]. El valor Q de una reacción nuclear es la diferencia en masa-energía entre las componentes iniciales m_i de la reacción nuclear y los productos finales m_f de ésta. En todas las reacciones nucleares espontáneas el valor Q es positivo.

$$Q = (\sum m_i - \sum m_f)c^2 \quad (1.1)$$

Q [MeV], $m_{i,f}$ [uma], con $c^2 = 931 \text{ MeV/uma}$.

1.2 Transformaciones Nucleares

Algunos núclidos pueden transformarse en otros, o pasar de un estado energético a otro, mediante la absorción de partículas o la emisión de radiaciones. Se dice entonces que los núcleos son radiactivos y el proceso que sufren se denomina decaimiento radiactivo o desintegración radiactiva. Este decaimiento nuclear sólo sucede cuando hay un exceso de masa - energía en el núcleo. La emisión ayuda a lograr una mayor estabilidad liberando energía. Los decaimientos radiactivos de los diferentes núcleos se caracterizan por el tipo de emisión, su energía y la rapidez de decaimiento [I2, K1,V1].

Los siguientes procesos son representativos de la desintegración de los núclidos radiactivos:



En estos procesos ν y $\bar{\nu}$ representan al neutrino y al antineutrino, que son partículas que no tienen carga ni masa, β es un positrón, o un electrón según su carga, y $({}^A_Z X)^*$ representa un átomo en un estado excitado; el cual regresa al estado base $({}^A_Z X)$ por la emisión de un rayo γ o fotón.

1.2.1 Ley de decaimiento radiactivo

Sea N el número de átomos presentes en una muestra de material radiactivo en un tiempo dado t , y dN el número de desintegraciones que sufre en un intervalo de tiempo dt . Entonces, la probabilidad de desintegración es igual a $-dN/N$, donde el signo menos indica que está disminuyendo el número de núcleos. La probabilidad de desintegración por unidad de tiempo es:

$$\lambda = \frac{-1}{N} \left(\frac{dN}{dt} \right) = \text{constante}$$

donde λ se conoce como constante de decaimiento o desintegración. Mediante algunos pasos algebraicos, se encuentra la ley de decaimiento radiactivo, que está dada por:

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \quad (1.2)$$

N_0 es la cantidad inicial de núcleos.

La actividad de una muestra se define por $A = dN / dt = -\lambda N$ y representa la rapidez a la cual ocurren las desintegraciones de los núcleos [I2, K1]. Las unidades de la actividad son el Curie (Ci) equivalente a 3.70×10^{10} desintegraciones/s.

En el sistema internacional la unidad de la actividad es el Bequerel (Bq). (1 Bq = 1 desintegración / s).

De la ecuación (1.2) se obtiene que:

$$A = A_0 e^{-\lambda t} \quad (1.3)$$

donde, A_0 es la actividad inicial.

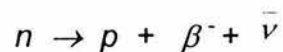
1.2.2 Vida Media

La vida media o tiempo de semi-desintegración ($T_{1/2}$) de un radionúclido se define como el tiempo transcurrido en el cual el número de núcleos decae a la mitad del número inicial, o sea el tiempo en el cual la actividad disminuye a la mitad de la actividad inicial. De la ecuación (1.2) se obtiene que:

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} \quad (1.4)$$

1.3 El Neutrón

El neutrón es una partícula que fuera del núcleo es inestable y que decae por la emisión de una partícula β^- , con una vida media de 12 minutos. Es decir,



El valor Q de la desintegración del neutrón es de 0.789 MeV y se puede calcular a través de la ecuación (1.1).

1.3.1 Interacción de los neutrones con la materia

Es importante entender y conocer cuál es el efecto de la interacción de la radiación con la materia. Los neutrones no ionizan directamente a los materiales porque no tienen carga eléctrica. Antes de colisionar pueden penetrar varios centímetros en el material. Cuando llegan a incidir directamente sobre un núcleo, puede suceder cualquiera de dos procesos: la dispersión elástica o la reacción nuclear, donde esta última incluye la dispersión inelástica, la captura radiativa y la fisión nuclear.

En la dispersión elástica, al chocar el neutrón con un núcleo rebota en cualquier dirección, transfiriéndole energía cinética al núcleo. Esta energía transferida es mayor entre más ligero sea el núcleo.

En las reacciones nucleares con haces de neutrones puede ocurrir una dispersión inelástica o una captura radiativa. En el primer caso, el núcleo residual queda en estado excitado, y el neutrón pierde una parte considerable de su energía cinética original. En el segundo caso se produce la emisión de un rayo gamma, desapareciendo el neutrón [J1,G1].

1.3.2 Sección Eficaz

En Física Nuclear, el concepto de sección eficaz es fundamental, y se emplea para describir cuantitativamente la probabilidad de interacción de los neutrones con los núcleos atómicos. Cuando se expone un material cualquiera a la acción de los neutrones, la velocidad con que se produce una reacción nuclear determinada depende del número de neutrones y de su velocidad, así como del número y naturaleza de los núcleos existentes en el material irradiado [B2,F1,H1].

La sección eficaz de un blanco para una reacción neutrónica es una propiedad del núcleo y de la energía del neutrón incidente. En este sentido, es una medida de la probabilidad de que ocurra un proceso dado. Los núcleos atómicos poseen, por ejemplo, secciones eficaces de dispersión σ_s y de absorción σ_a . La sección eficaz de absorción depende del número de partículas absorbidas, del número de partículas incidentes, del número de núcleos por unidad de volumen en la muestra, y del espesor de la misma.

La Tabla 1.1 muestra algunos ejemplos de las secciones de dispersión σ_s y de absorción σ_a expresadas en barn ($1 \text{ barn} = 10^{-24} \text{ cm}^2$).

Tabla 1.1
Secciones eficaces para absorción de neutrones de 2200 m/s

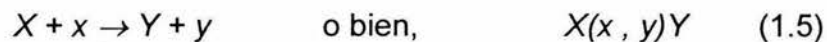
Elemento	σ_s (barn)	σ_a (barn)
Aluminio	1.4	0.24
Boro	4.0	755
Cadmio	7.0	2450
Carbono	4.8	0.0034
Deuterio	7.0	0.0005
Hidrógeno	38-100	0.33

De la tabla anterior se puede ver que los valores de la sección eficaz de absorción para el boro y el cadmio son muy grandes con respecto a los demás elementos, por lo que son empleados como excelentes absorbentes de neutrones. Por otro lado, los materiales que contienen una gran cantidad de carbono o deuterio son empleados para la moderación de neutrones [S1].

1.3.3 Clasificación de los neutrones

Los neutrones se clasifican de acuerdo con su energía cinética de la siguiente forma: a) relativistas, con energías mayores que 20 MeV b) rápidos, cuya energía es de decenas de keV y c) térmicos, denominados de esta manera porque están en equilibrio térmico con sus alrededores; sus energías son del orden de 0.025 eV.

Las fuentes que producen neutrones están regidas por un tipo de reacción nuclear en la que un isótopo estable (no radiactivo) X se irradia con un haz de partículas x para formar el isótopo radiactivo Y , y la emisión de la partícula y [F1,K1]. La reacción se representa de la siguiente forma:



Las fuentes de neutrones más comunes son:

- a) Reactores nucleares. Son las fuentes más poderosas, en este caso los neutrones se obtienen por fisión nuclear.
- b) Aceleradores de partículas. Las reacciones más comunes son utilizando haces de protones o de deuterones.

- c) Fuentes (α , n). Son mezclas de un núclido en las que se tiene un emisor de partículas alfa, y un núclido que tiene una gran probabilidad de que ocurra la reacción (α , n). La fuente que se empleó en este trabajo es de este tipo, el emisor α es el ^{241}Am y el receptor es ^9Be (Capítulo 2).
- d) Fuentes (γ , n). Son mezclas de un núclido emisor de fotones γ , y el otro núclido que tiene una gran probabilidad de que ocurra la reacción (γ , n). Estas fuentes en su mayoría producen neutrones monoenergéticos.
- e) Fuentes de fisión espontánea. Son fuentes formadas por núclidos que se fisionan espontáneamente, como son los siguientes casos: ^{254}Cf , ^{252}Cf , ^{244}Cm , ^{242}Cm , ^{238}Pu y ^{232}U [F1,S1].

1.3.4 Moderación

El método usual para producir neutrones lentos, es rodear una fuente de neutrones rápidos con parafina o con algún material que contenga grandes cantidades de hidrógeno o deuterio. A medida que los neutrones atraviesan este material "moderador", las colisiones elásticas con los núcleos de hidrógeno continuamente los frenan, hasta que a una distancia de varios centímetros de la fuente, la mayoría de los neutrones han perdido gran parte de su energía original y llegan a ser térmicos [K1,S1].

1.4 Activación

La activación es el proceso mediante el cual se transforma el núcleo estable de un elemento en otro núcleo inestable. Esto ocurre a través de un proceso de captura de las partículas con las que es "bombardeado" el material. El núcleo puede absorber la partícula incidente y emitir su exceso de energía como radiación electromagnética, o como neutrones, protones o partículas más pesadas. Un neutrón que se aproxima al núcleo de un átomo, no sufre una fuerza de repulsión, como lo experimentan el protón, el deuterón o la partícula α , y por lo tanto, sus probabilidades de penetración y de ser capturados son relativamente grandes [K1,G1,R1].

La razón constante R a la cual se produce un núclido, está relacionada con la sección eficaz σ y la intensidad del haz incidente. En un intervalo de tiempo dt , el número de núcleos producidos es justamente $R dt$. El número de núcleos del isótopo radiactivo que se desintegran en el intervalo dt es λNdt , donde λ es la constante de desintegración y N es el número de núcleos presentes.

El cambio neto dN en el número de núcleos es: $dN = Rdt - \lambda Ndt$, de donde se encuentra que: $N(t) = \frac{R}{\lambda}(1 - e^{-\lambda t})$. Por lo tanto, la actividad se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$A(t) = R(1 - e^{-\lambda t}) \quad (1.6)$$

La gráfica de la actividad $A(t)$ como función del tiempo t , se conoce como curva de saturación. En la Figura 1.1 se graficó $A(t)$ en función de múltiplos de la vida media. Se puede observar que para aproximadamente 10 vidas medias la muestra se satura casi al 100%. La asíntota que caracteriza a la curva de la ecuación (1.6) representa al tiempo de saturación [G1,K1].

Curva de Saturación

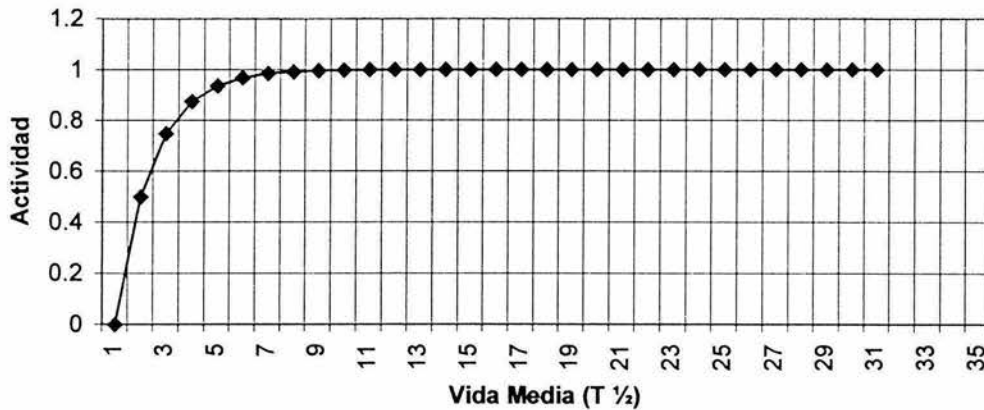


Figura 1.1. Curva típica de saturación de la actividad vs tiempo.

La actividad de saturación R , es función del flujo de neutrones que incide sobre la muestra (en nuestro caso es de aluminio), de su sección eficaz o transversal de captura neutrónica, de la masa y la masa molecular del material.

CAPÍTULO 2
EQUIPO EXPERIMENTAL

2.1. Diseño y operación del irradiador

El irradiador es un tanque cilíndrico de acero inoxidable de 200 litros de capacidad, cuyas dimensiones son: 75 cm de alto y 56.5 cm de diámetro externo. El tanque está lleno de manera homogénea con cera tipo americana (parafina), con bajo contenido de aceite, que sirve como material moderador [B1].

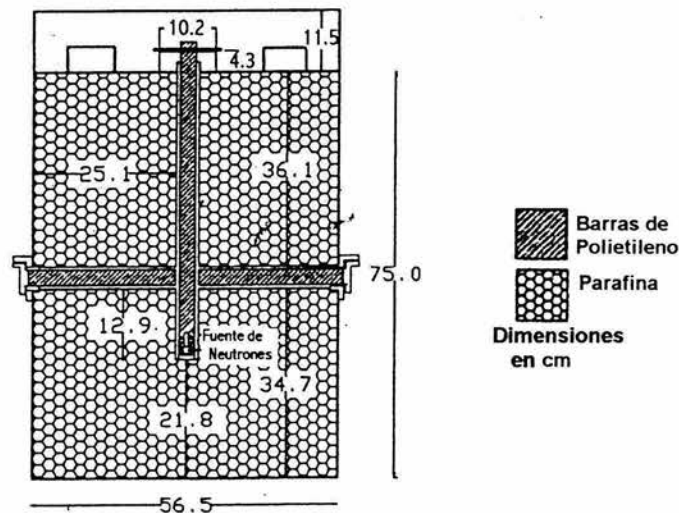


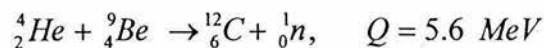
Figura 2.1 Esquema representativo de la fuente de $^{241}\text{Am} - ^9\text{Be}$ dentro del irradiador

En el interior del tanque hay un arreglo de 5 tubos fijos como lo muestra la Figura 2.1. En el tubo que se encuentra a lo largo de su eje longitudinal se localiza la fuente radiactiva, la cual puede fijarse en 7 diferentes posiciones. Los cuatro canales experimentales en forma de crucetas, funcionan como guías y están sellados con barras de polietileno para la moderación de los neutrones rápidos que son emitidos por la fuente radiactiva. Las muestras se colocaron en estos 4 canales a una distancia de 10 cm aproximadamente respecto de la fuente.

2.2 Fuente de neutrones ($^{241}\text{Am} - ^9\text{Be}$)

El irradiador alberga una fuente de $^{241}\text{Am} - ^9\text{Be}$ que fue preparada y manufacturada por la compañía inglesa Amersham Ltd; en un empaque de AmO_2 y Be.

El ^{241}Am emite partículas α , las cuales producen neutrones mediante la siguiente reacción:



De acuerdo al catálogo [A2], las características específicas de esta fuente son:

- a) Las fuentes de neutrones de berilio (α, n) emiten un número significativo de neutrones de baja energía (aproximadamente el 23% de los neutrones emitidos por la fuente tienen energías menores que 1 MeV cuya energía media es de 400 keV.
- b) Actividad nominal del ^{241}Am 0.5 Ci.
- c) La emisión de $(1.1 \pm 0.1) \times 10^6$ n/s.
- d) Tasa de dosis de neutrones de 2.2 mrem/h a 1 m por Ci.
- e) Tasa de exposición por radiación γ aproximadamente 2.5 mR/hr a 1 m por Ci.

En la Figura 2.2 se muestra el espectro de la fuente de $^{241}\text{Am}-^9\text{Be}$ empleada en este trabajo.

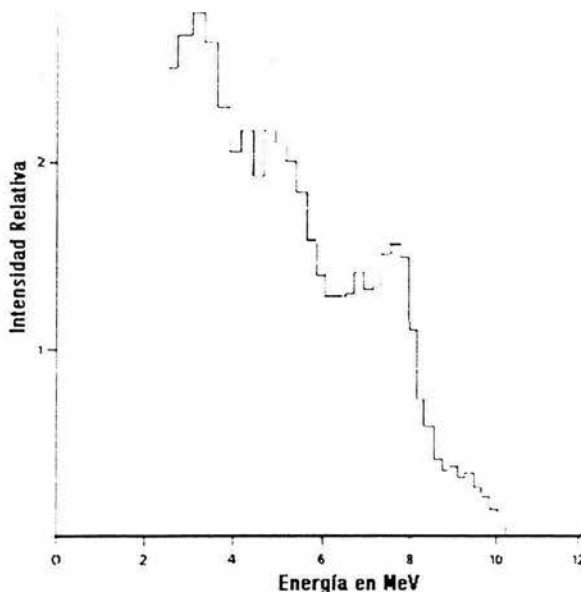


Figura 2.2 Espectro característico para una fuente de $^{241}\text{Am}-^9\text{Be}$

2.3 Detectores de radiación

En la detección de la radiación ionizante es necesario valerse de instrumentos apropiados para percibir su presencia y conocer de algún modo su intensidad, energía, o cualquier otra propiedad que ayude a evaluar sus efectos en la materia. El diseño se basa en el conocimiento de la interacción de la radiación con la materia.

En este trabajo se detectó radiación γ , y para ello se utilizó el equipo que a continuación se describe.

2.3.1 El detector Geiger Muller y la Interfase GMX

El detector Geiger Muller (GM), es uno de los instrumentos más simples que se emplean para la detección de la radiación. Consiste básicamente en un cilindro metálico (cátodo) abierto por los extremos, montado dentro de un tubo de vidrio de paredes delgadas y con un alambre fino de wolframio insertado a lo largo del eje central (ánodo), Figura 2.3. El contador GM contiene en su interior una mezcla de argón, a una presión parcial de unos 10 mm Hg y otro gas, llamado extintor, que suele ser cloro o bromo, a una presión parcial de 0.5 mm Hg.

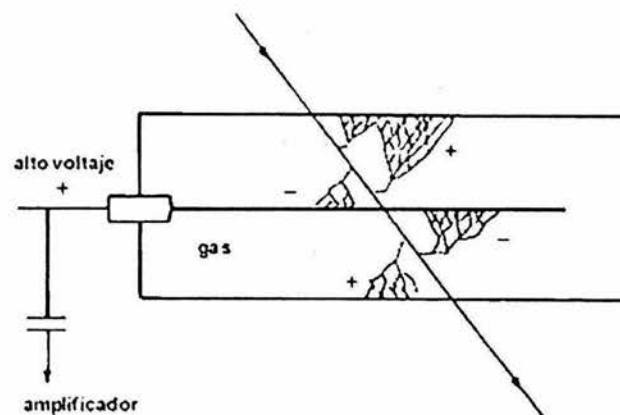


Figura 2.3 Esquema de la operación de un contador Geiger- Müller. Las cargas producidas por la ionización se multiplican en su trayecto hacia los electrodos.

Cuando un rayo cósmico o una radiación ionizante atraviesa el tubo, se crean iones debido a la interacción con las partículas del gas. Los electrones liberados son atraídos por el alambre cargado positivamente y se mueven hacia él, adquiriendo en una distancia muy corta una gran velocidad. Los electrones rápidos pueden ionizar también a otros átomos, con lo que liberan más electrones. Esta multiplicación de cargas se repite en rápida sucesión, produciendo dentro de un intervalo muy corto una avalancha de iones hacia el alambre central. Los contadores GM generalmente operan con voltaje de alrededor de 700 a 800 V.

El dispositivo o interfase GMX consiste de una caja metálica, en cuyo interior se encuentra la fuente de alto voltaje y la electrónica necesaria para la transmisión de la señal registrada por el detector G^éiger Muller hacia una computadora personal. La información adquirida por el detector GM, se manipula por medio de los programas incluidos en el paquete [I1, K2].

2.3.2 Detectores de Centelleo

Los detectores de centelleo cuentan con un cristal en el cual la radiación incidente produce pequeños destellos luminosos que son transformados en pulsos eléctricos. Estos detectores tienen ventajas sobre los detectores de gas: mejor eficiencia y resolución, menor tiempo muerto, y permiten determinar la energía de la radiación incidente. Los materiales más empleados como cristal de centelleo son: el yoduro de sodio activado con talio, NaI (Tl) y el yoduro de cesio activado con talio, CsI (Tl), que son de bajo costo y muy estables. Hay una variedad de detectores hechos con materiales inorgánicos, orgánicos y plásticos (ejemplo, el antraceno y el estilbeno) para la detección de neutrones y partículas β , y líquidos orgánicos que se emplean para ciertas aplicaciones especiales.

El cristal se une a un tubo fotomultiplicador (TFM) con un contacto óptico (por ejemplo con grasa transparente) y éste a un preamplificador. El tubo fotomultiplicador es un recipiente de vidrio sellado y al alto vacío. La cara que está en contacto con el cristal de centelleo va cubierta en su interior por un material que emite electrones al recibir luz (fotocátodo) y opera como una celda

fotoeléctrica. Estos electrones son acelerados y multiplicados en campos eléctricos secuenciales entre electrodos llamados dinodos, lográndose multiplicaciones de un millón de veces. En el último de ellos la señal eléctrica es suficientemente grande para poder ser manejada con amplificadores y analizadores de pulsos convencionales [A1, I1, K2].

La función del preamplificador es optimizar el acoplamiento detector-sistema electrónico, para evitar distorsiones y reflexiones en la señal de salida, además amplifica las señales débiles del detector (\sim mV), minimizando el ruido electrónico.

El preamplificador se conecta a un amplificador para generar pulsos que puedan ser enviados a un multicanal para su análisis.

2.3.3 Detector de Germanio Hiperpuro (Ge-HP)

Los detectores de cristales semiconductores se fabrican con combinaciones de Si-Li y Ge-HP (Germanio Hiperpuro). Estos detectores funcionan a temperaturas de alrededor de 70 K para eliminar en su totalidad los electrones libres de la zona de depleción, reducir el ruido electrónico por corriente de fuga y así poder utilizar diferencias de potencial más elevadas (aprox. 3,000 V) con lo que el proceso de detección se hace más eficiente. Para analizar el pulso en forma eficiente son necesarios varios procesos de amplificación. Para evitar la introducción de perturbaciones a los pulsos por los cables, inmediatamente después de que el pulso electrónico es generado en el cristal, éste se colecta y se amplifica por un preamplificador que se encuentra dentro del detector. Luego sale del detector por medio de un cable coaxial y es nuevamente amplificado para ser enviado por el cable coaxial al sistema encargado de procesar los pulsos. Los pulsos pueden ser procesados de diferentes formas según lo que se desee hacer. Si lo que se necesita es sólo contar el número de rayos γ que inciden en el detector, se utiliza un monocanal que cuenta cuántos pulsos se generan en un intervalo de tiempo dado y que se encuentran dentro de un cierto intervalo de energía. Si lo que se

necesita es conocer no sólo cuántos pulsos se generan sino también catalogarlos por su tamaño, entonces se utiliza un multicanal [M1,K2].

2.3.4 Analizador Multicanal (MCA)

El analizador multicanal (MCA) es un dispositivo para el análisis de señales analógicas, que se clasifican según sus amplitudes; subdivide el rango de tamaño aceptable para los pulsos en un número determinado de "canales" [K2]. Cuando llega un pulso al multicanal, éste mide su tamaño y lo cuenta con todos los pulsos que se encuentran dentro del mismo intervalo de tamaño para ese canal. Entonces el multicanal genera un histograma de frecuencia del tamaño de los pulsos que le llegan. Como el tamaño del pulso generado en el detector está relacionado con la energía del rayo γ que lo produjo, es posible hacer una correlación entre el tamaño del pulso y la energía del rayo γ . Por consiguiente, el histograma obtenido por el multicanal se convierte en un espectro de energía de los rayos γ que incidieron en el detector. El espectro de energía revela cuál es la energía y la intensidad de los rayos γ que inciden en el detector y, por consiguiente, revela cuáles son los núclidos radiactivos presentes en el entorno que rodea al detector. Para la correlación mencionada entre el tamaño del pulso y la energía del rayo γ que lo produce, es necesario calibrar el detector y toda la electrónica asociada. Esto se logra utilizando el sistema con una fuente radiactiva de energía conocida.

CAPÍTULO 3

DESARROLLO EXPERIMENTAL

Como se mencionó en la introducción de este trabajo de tesis, el objetivo general es investigar la factibilidad de activar aluminio con un irradiador convencional. Esta idea surgió de los comentarios del artículo: *An introductory activation experiment for the senior laboratory*. R.M. Prior and A.A. Rollefson, Am.J.Phys 46 (10), Oct. 1978.

Los objetivos particulares de esta tesis son:

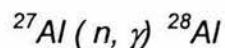
- a) Medición de la vida media del ^{28}Al .
- b) Determinación de la energía de la radiación γ emitida por el ^{28}Al .

Utilizando la fuente de neutrones descrita en el capítulo anterior, se encontraron las condiciones bajo las cuales se podrían realizar los dos puntos anteriores. El problema planteado tiene varios aspectos que debían considerarse: el flujo de la fuente es de varios órdenes de magnitud menor que la de los generadores empleados usualmente (reactores, aceleradores); la sección de captura del aluminio es muy pequeña; si los sistemas de detección de radiación que se tienen en los laboratorios de docencia de Física Moderna son los adecuados para poder determinar la vida media y la radiación γ del ^{28}Al .

Las muestras a irradiar se prepararon con aluminio común y corriente; no se usó aluminio puro. Las muestras que se hicieron tienen diferentes geometrías y dimensiones según se muestra en la Tabla 4.1 (Capítulo 4).

Las muestras se pesaron en una balanza analítica Scientech SA 80 y las dimensiones se midieron con un vernier. Las muestras de ^{27}Al se colocan en los canales experimentales del irradiador llevando un registro de cada una de ellas.

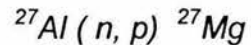
El ^{27}Al tiene una sección eficaz de captura neutrónica de 0.235 barns y una abundancia natural del 100%. Las muestras se activaron con neutrones térmicos a través de la siguiente reacción:



Las características del ^{28}Al son [R2]:

- a) Emite partículas β^- con una energía máxima $E_{\text{max}} = 2.865 \text{ MeV}$.
- b) La vida media es de 2.25 minutos.
- c) Decae a ^{28}Si estable.

Esta reacción nuclear compite con la reacción:



que se produce por la interacción con neutrones rápidos .

El ^{27}Mg decae en $^{27}\text{Mg} \rightarrow ^{27}\text{Al} + \beta^- + \bar{\nu}$

Sus características son [R2]:

- a) Vida media de 9.45 minutos ↗
- b)

Energía máxima de la partícula β^- (MeV) / %	Energía del fotón γ (MeV) / %
1.59 / 41	0.17068 / 0.8
1.75 / 58	0.84376 / 73
2.65 / 0.3	1.01443 / 29

Las muestras de aluminio activadas se emplearon para realizar los objetivos particulares de este trabajo.

El equipo empleado en los diferentes experimentos fue:

1. Detector GM Nucleus EG – 1.
2. Interfase GM Nucleus Experimenter, No. de Serie 9303-0801
3. Cristal de centelleo Harshaw 905-2 de NaI (TI), tubo fotomultiplicador Harshaw 9257 KAFL, y preamplificador Ortec 276. No. de Serie XA 289
4. Detector de Germanio Hiperpuro Canberra Coaxial GC5019. Este detector tiene una alta eficiencia y resolución por lo que puede medir energías desde 50 keV a 10000 keV.

5. El detector de centelleo se utilizó con el multicanal MCA EG&G Ortec 7150, y el detector de Ge-HP opera con una tarjeta multicanal instalada en la computadora PC.

Con la finalidad de familiarizarse con el equipo experimental, se realizaron varios experimentos previos al análisis de las muestras de aluminio activadas.

Dichos experimentos son:

- A) Determinación del voltaje de operación del detector GM con el sistema, mostrado en la Figura 3.1, usando una fuente de ^{60}Co .
- B) Determinación del tiempo muerto del detector GM mediante dos métodos:
- Analizando la señal con un osciloscopio
 - Utilizando dos fuentes radiactivas

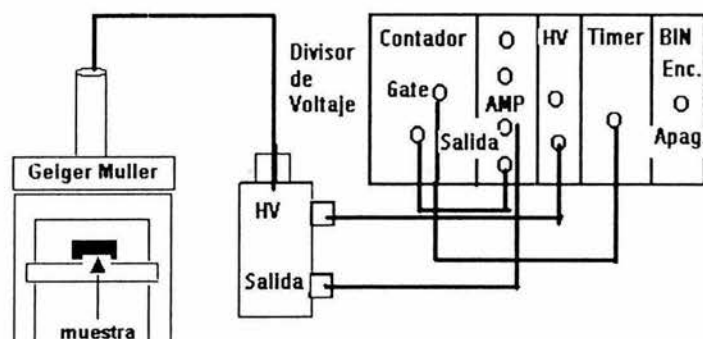


Figura 3.1 Sistema de detección: GM, divisor de voltaje y rack

- C) Determinación del voltaje de operación con la interfase GMX con el dispositivo de la Figura 3.2.
- D) Activación de muestras de indio (^{115}In) y determinación de la vida media.
- E) Análisis de una muestra de $^{116\text{m}}\text{In}$ con el dispositivo de la Figura 3.3, y medición de la energía de la radiación γ que emite el ($^{116\text{m}}\text{In}$).

Concluidos estos experimentos, se procedió al análisis de las muestras irradiadas. Se colocaron las muestras activadas debajo del detector GM, y utilizando el programa de “vida media”, se hizo la adquisición de datos. Posteriormente, se retiró el material radiactivo y se midió la radiación de fondo.

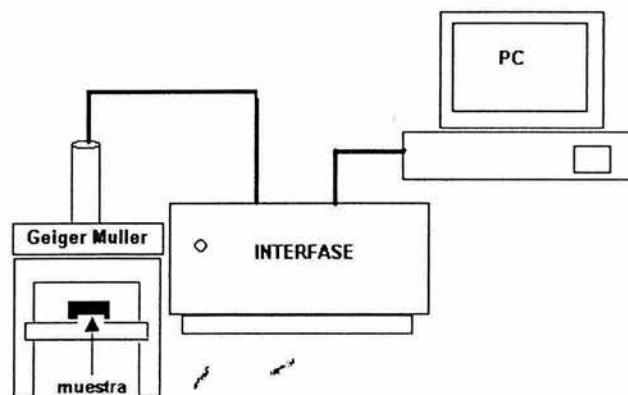


Figura 3.2 Instalación del equipo para el experimento de la vida media o período de semidesintegración del ^{28}Al .

La segunda parte del experimento consistió en la medición de la energía de la radiación gamma γ , emitida por el ^{28}Al . Para ello se utilizó un detector de centelleo de NaI (TI), con una superficie circular de aproximadamente 5 cm de diámetro, y un analizador de pulsos como lo indica la Figura 3.3.

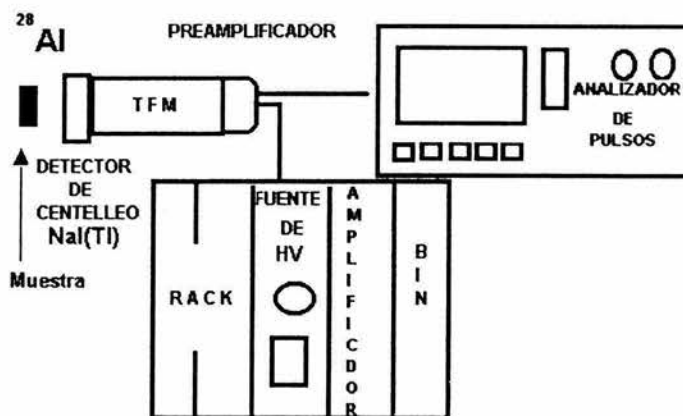


Figura 3.3 Instalación del equipo para determinar los valores de las energías de la radiación gamma.

Para poder obtener las energías de los rayos γ emitidos por el isótopo en cuestión o cualquier fuente, es necesario “calibrar” el sistema, para encontrar la relación

entre el canal y la energía de la radiación. Una vez hecha la calibración, se analizaron las muestras activadas.

Los resultados obtenidos empleando el detector de centelleo condujeron a que se considerara el uso de un detector con una mayor resolución, en este caso uno de Germanio Hiperpuro (Ge-HP). El dispositivo experimental se presenta en el esquema de la Figura 3.4.

Con el mismo sistema se midió la vida media del ^{28}Al . Al igual que en el caso del sistema con el detector de centelleo, primero se calibró el sistema.

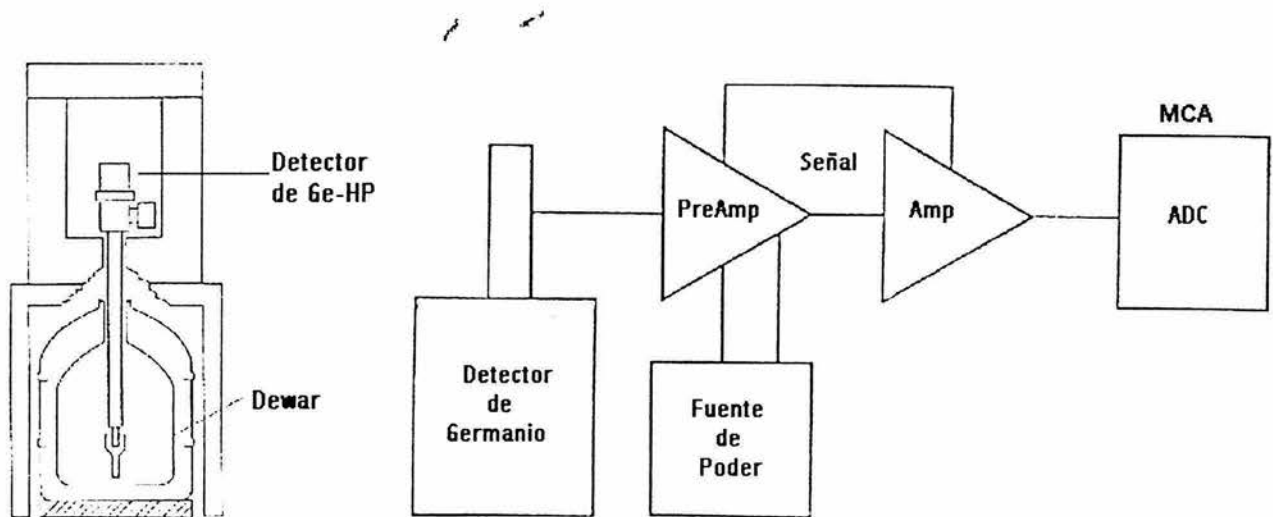


Figura 3.4 Esquema del sistema de detección con el detector de Ge-HP.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS Y ANÁLISIS

Resultados y Análisis

Las características de las muestras de aluminio que se emplearon en las diferentes etapas del presente trabajo de tesis, se indican en la siguiente tabla.

Tabla 4.1

Muestras de Aluminio		Largo (cm)	Ancho (cm)	Espesor (cm)	Área (cm ²)	Masa (g)
Cuadrada	M1	2.030 ± 0.005	2.020 ± 0.005	0.200 ± 0.005	4.10 ± 0.02	2.2130 ± 5x10 ⁻⁴
	M2	2.080 ± 0.005	2.060 ± 0.005	0.200 ± 0.005	4.28 ± 0.02	2.3070 ± 5x10 ⁻⁴
	M3	2.050 ± 0.005	2.040 ± 0.005	0.200 ± 0.005	4.18 ± 0.02	2.3010 ± 5x10 ⁻⁴
	M4	2.090 ± 0.005	2.050 ± 0.005	0.200 ± 0.005	4.28 ± 0.02	2.3950 ± 5x10 ⁻⁴
Rectangular	R1	3.200 ± 0.005	1.660 ± 0.005	0.010 ± 0.005	5.12 ± 0.02	3.6530 ± 5x10 ⁻⁴

Muestras de Aluminio		Diámetro (cm)	Radio (cm)	Altura (cm)	Área (cm ²)	Masa (g)
Cilíndrica	C1	1.660 ± 0.005	0.830 ± 0.005	2.100 ± 0.005	3.50 ± 0.01	12.3690 ± 5x10 ⁻⁴
Luna	L1	2.400 ± 0.005	1.200 ± 0.005	0.400 ± 0.005	3.38 ± 0.02	9.5230 ± 5x10 ⁻⁴

Aunque para la activación lo importante es la masa de la muestra, y no su forma geométrica, se experimentó con varias geometrías. No se utilizaron muestras cuadradas más masivas porque no se tenía lámina más gruesa; con lo único que se contaba era con varillas de aluminio de diámetros diferentes.

Las fuentes radiactivas calibradas empleadas en los diversos experimentos fueron ⁶⁰Co y ¹³⁷Cs. Las actividades de éstas el día que se emplearon fueron de (1.31 ± 0.07) μCi y de (7.42 ± 0.27) μCi, respectivamente.

Los resultados de los experimentos previos son:

1. Mediante dos formas distintas se encontró que el voltaje de operación del contador GM es de (540 ± 2) V. En el primer método se utilizaron módulos electrónicos convencionales Figura (3.1), y para el segundo caso se empleó la interfase del detector GMX de acuerdo con la Figura (3.2). En ambos métodos se utilizó la fuente de ⁶⁰Co.

2. Se encontró que el tiempo muerto del detector GM es de $(10 \pm 1) \mu\text{s}$, (usando el osciloscopio), y por el método de las dos fuentes (^{60}Co y ^{137}Cs) se determinó que el tiempo muerto es de $11.7 \mu\text{s}$.
3. Se obtuvo la curva de decaimiento para el $^{116\text{m}}\text{In}$, encontrándose una vida media de 55 min. El valor reportado es de 54.1 min.
4. El sistema de la Figura (3.3) se calibró usando las fuentes radiactivas de ^{60}Co y ^{137}Cs .

La calibración se hizo de la siguiente forma:

Se programó el multicanal utilizando un tiempo real (RT) de conteo de 120 segundos, un discriminador de niveles (LLD) de 6, una ganancia gruesa de 10 y una ganancia fina de 0.70, con una amplificación directa para observar el fotopico de las fuentes. Los fotopicos de las fuentes de ^{137}Cs (0.66 MeV) y ^{60}Co (1.17 MeV, 1.33 MeV) se localizaron en los canales 334, 582, y 657 respectivamente.

Ajustando los datos por el método de mínimos cuadrados, se obtuvo la siguiente ecuación:

$$E = (2.069 \pm 0.015) \times 10^{-3} C - (3 \pm 2) \times 10^{-2} \quad (4.1)$$

donde la variable E es la energía en MeV y C es el Canal. El coeficiente de correlación es de 0.99993.

Con la ecuación (4.1) se determinó que las energías de las γ emitidas por el $^{116\text{m}}\text{In}$ fueron de $(1.29 \pm 0.03) \text{ MeV}$ y $(1.09 \pm 0.03) \text{ MeV}$. Los valores reportados son: 1.29349 y 1.09723 MeV, respectivamente [R2].

A continuación se presentan los resultados del experimento para obtener la curva de decaimiento del ^{28}Al .

- A) Se utilizó el sistema de la Figura 3.2 con la muestra M2. Se recolectaron 50 datos con un voltaje de 540 V cada 15 s. Posteriormente se realizó el mismo ejercicio pero sin la muestra de aluminio, con el propósito de obtener

la radiación de fondo. No se observaron diferencias significativas entre ambos conjuntos de datos, lo que impidió medir la vida media. (Figura 4.1).

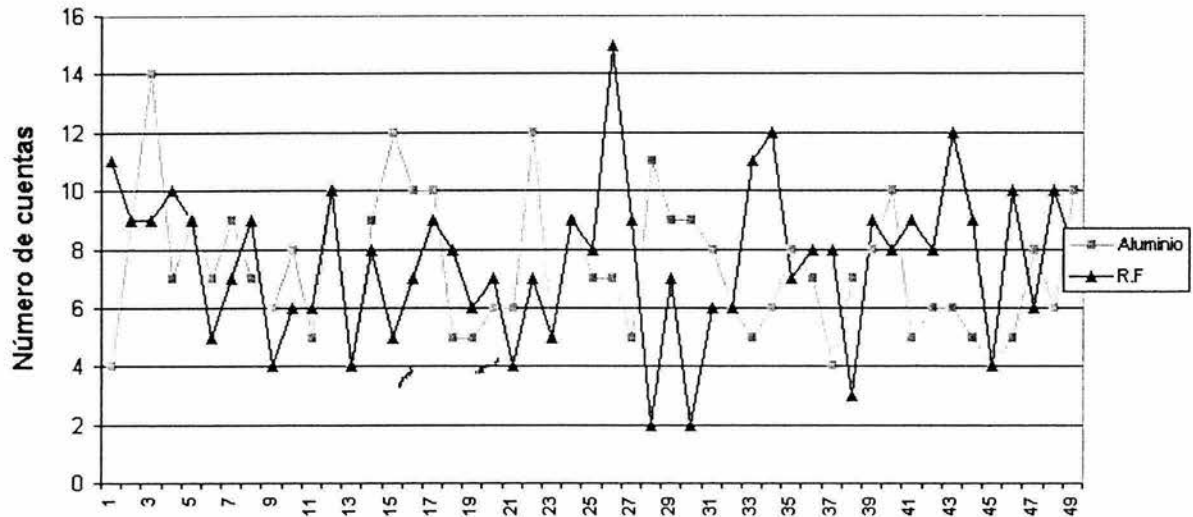


Figura 4.1 Gráfica que ilustra la detección de la vida media del ^{28}Al vs RF.

- B) Se procedió a realizar el mismo experimento pero con el detector de centelleo a un voltaje de 800 V, el TFM y un multicanal, según se indica en la Figura 3.3. Con la muestra M3 se formó un pequeño fotopico con 21 cuentas en el canal 874. La idea era obtener el espectro, guardar la información del número de cuentas del fotopico y repetir el experimento varias veces teniendo así la variación del número de cuentas en función del tiempo de decaimiento. Pero como las cuentas de la primera corrida fueron sólo 21, no se pudo seguir el procedimiento. Se decidió entonces utilizar el detector de Ge-HP para obtener un mejor espectro, dada su mejor resolución.
- C) El dispositivo de la Figura 3.4 se empleó con los siguientes parámetros: voltaje de operación de polaridad positiva a 4000 V, ganancia gruesa de 50, ganancia fina de 8.38, tiempo de formación del pulso de 6 μs .

Se calibró el sistema con una fuente tipo Marinelli que viene junto con el equipo. La fuente es la No. 616-64 de los laboratorios "Isotope Products" con una actividad de 190.9 kBq, el 15 de Abril del 2002. La fuente consta de 11 radionuclidos entre los que se encuentran: ^{137}Cs , ^{60}Co , ^{57}Co , ^{109}Cd , ^{88}Y .

Se obtuvo un espectro de la radiación de fondo. El único fotopico que se observa corresponde al ^{40}K , el cual tiene una energía de 1460.8 keV. localizado en el canal 6113 como se indica en la Figura 4.2.

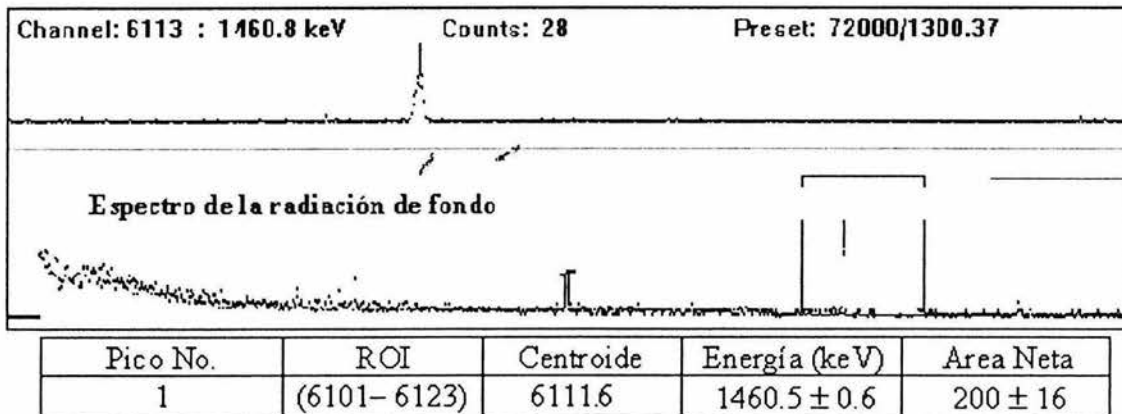


Figura 4.2 Espectro de la radiación de fondo con el detector de Ge-HP.

Una vez obtenido el espectro anterior, se realizó el mismo procedimiento que se planteó para el detector de centelleo. Primero se colocó la muestra M2 durante 15 minutos, pero se obtuvo un conteo muy bajo. Dada la relación entre masa y actividad, se consideró utilizar de manera conjunta, las muestras C1 y L1, para la adquisición de los espectros.

El equipo se programó para hacer conteos de 60 segundos cada uno. La baja actividad de las muestras, sólo permitió el registro de tres espectros, mismos que se muestran en las siguientes figuras.

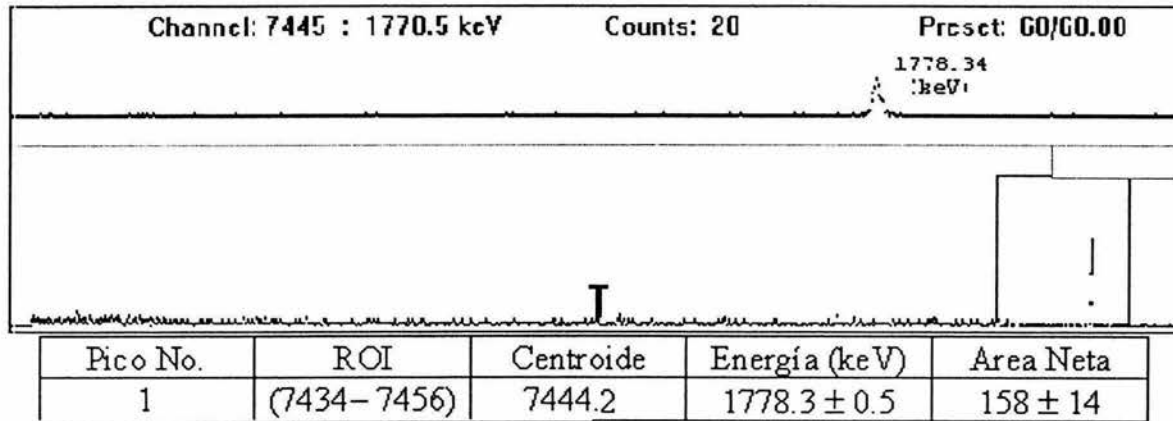


Figura 4.3 El espectro muestra 20 cuentas en el fotopico del ^{28}Al con una energía γ de 1778.34 keV, adquirida en la primera corrida.

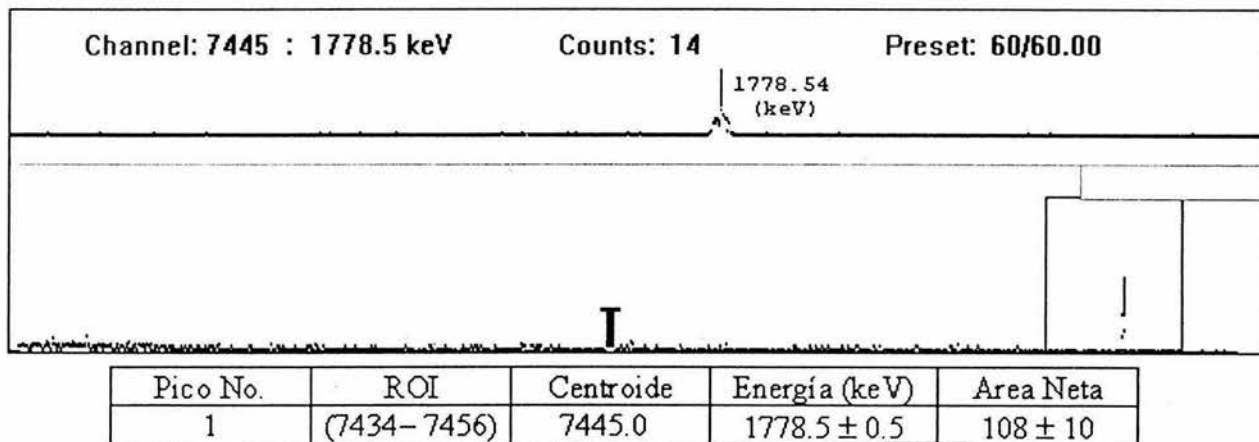


Figura 4.4 El espectro muestra 14 cuentas en el fotopico del ^{28}Al con una energía γ de 1778.54 keV para la segunda corrida.

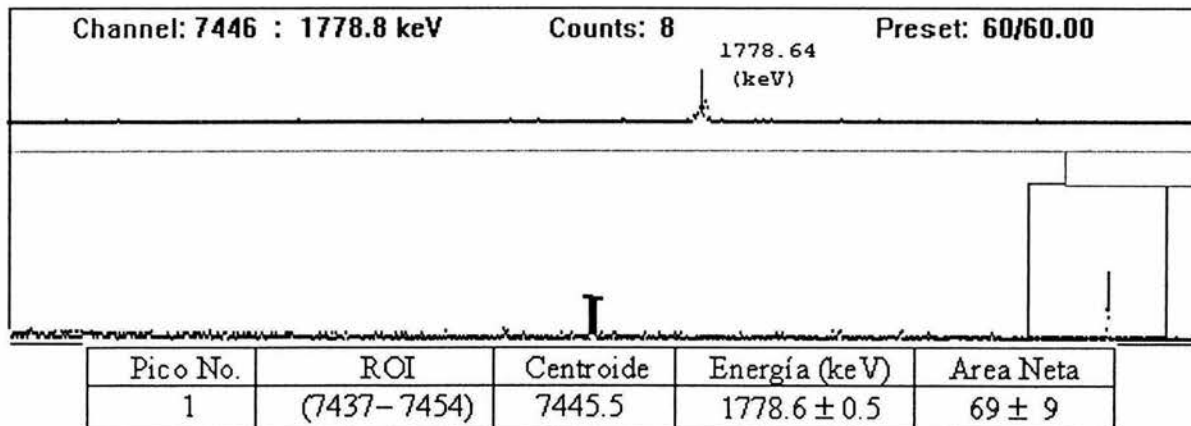


Figura 4.5. El espectro muestra 8 cuentas en el fotopico del ²⁸Al con una energía γ de 1778.64 keV, para la tercera corrida.

Cada una de las figuras anteriores, contiene una tabla en la cual "ROI" indica el intervalo de los canales de la región de interés. El centroide es el número del canal donde se localiza la energía del fotopico. El área neta es la cantidad de cuentas debajo de la curva del fotopico.

Con la información de los espectros de las figuras 4.3, 4.4 y 4.5 se realizó el cálculo de la vida media del ²⁸Al considerando que la actividad es el área bajo la curva del fotopico. Se obtuvieron tres puntos de coordenadas:

$$U(0, 158 \pm 14), V(1.33, 108 \pm 10) \text{ y } W(2.53, 69 \pm 9).$$

Las abscisas de los puntos anteriores representan al tiempo t y las ordenadas a la actividad A , respectiva. El valor de la vida media $T_{1/2}$ se obtuvo realizando un ajuste por mínimos cuadrados de la recta:

$$\ln(A/A_0) = -\lambda t$$

y sustituyendo posteriormente el valor de la λ en la ecuación (1.4).

Los resultados calculados fueron: $\lambda = (-0.36 \pm 0.02) \text{ min}^{-1}$, que corresponde al valor de $T_{1/2} = (2.1 \pm 0.1) \text{ min}$; la vida media reportada es de 2.25 min [R2].

A continuación se presentan los resultados del experimento para obtener la energía de la radiación γ del ^{28}Al .

A) Mediante el sistema detector de centelleo – MCA se pudo apreciar un pequeño “fotopico” en el canal 874 correspondiéndole una energía de (1778.3 ± 0.3) keV de acuerdo con la calibración de la ecuación 4.1.

B) Con el detector de Ge-HP, el fotopico se localizó en el canal 7446 correspondiéndole una energía de (1778.0 ± 0.5) keV. El espectro obtenido se presenta en la Figura 4.6.

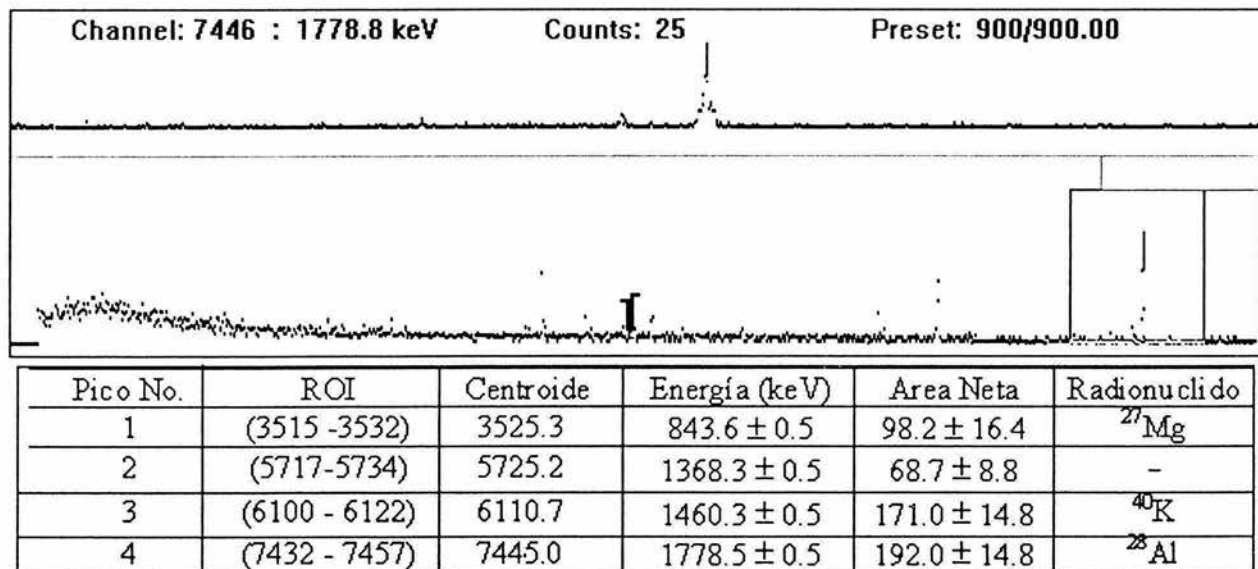


Figura 4.6. El espectro muestra 25 cuentas en el fotopico del ^{28}Al con una energía γ de 1778.53 keV durante un tiempo de 15 minutos.

En el espectro de la figura anterior, el sistema distinguió 4 fotopicos, que corresponden a los radionuclidos de la última columna de la tabla.

Para el fotopico No.2 los siguientes radionúclidos presentan una energía γ cercana al valor que se indica en la tabla: ^{135}I , ^{124}Sb , ^{24}Na , $^{125\text{m}}\text{Sn}$, ^{77}Ge y ^{188}Re . De estas posibilidades considero que la impureza que se registra corresponde a: $^{125\text{m}}\text{Sn}$.

Conclusiones:

Los objetivos que se plantearon para este trabajo se cumplieron de manera satisfactoria. Se activaron muestras de aluminio y se determinó la vida media del ^{28}Al , así como la energía de la γ que emite.

Aún con el bajo flujo de neutrones de la fuente radiactiva empleada y el pequeño valor de la sección eficaz de captura del aluminio, se lograron activar las muestras en aproximadamente 1.5 horas. Esto implica que es posible desarrollar este experimento en los cursos que se imparten en el laboratorio de Física Moderna, considerando que son dos sesiones a la semana de tres horas cada una.

Los resultados negativos para obtener la vida media del ^{28}Al con la interfase del GMX condujeron a tratar de obtenerla con el detector de centelleo, y posteriormente con el de Ge- Hp.

Con el detector de centelleo sólo fue posible detectar un pequeño fotopico correspondiente a la γ del ^{28}Al . Con el detector de Ge-HP fue posible calcular la vida media y la energía del fotopico. Los valores obtenidos fueron: $T_{1/2} = (2.1 \pm 0.1)$ minutos, y una γ de (1778.0 ± 0.5) keV, ambos concordando con los valores reportados en la literatura.

Con el detector de Ge-HP se logró además, identificar la γ más intensa que emite el ^{27}Mg . Esto significa que en las muestras ocurrieron las reacciones (n,p) , además de la (n, γ) . La activación con neutrones rápidos se debió a la proximidad de las muestras con la fuente, por lo que no se moderaron todos los neutrones.

También fue posible detectar una impureza en las muestras de aluminio. Este hecho abre la posibilidad de estudiar y comparar materiales de diferentes procedencias.

CAPÍTULO 5
CONCLUSIONES

Es importante señalar que el irradiador y el detector de Ge-HP se encuentran ubicados en dos edificios diferentes dentro de la Facultad de Ciencias. Esto presentó una dificultad en el desarrollo de las mediciones. El tiempo transcurrido desde que se sacaron las muestras del irradiador, hasta que se colocaron en el detector, ocasionó la pérdida de cuentas, aproximadamente un 15% de la actividad del radionúclido. Estas cuentas son cruciales dada la corta vida media del radionúclido, además de la baja actividad de la muestra.

Hay varias acciones que se pueden llevar a cabo para optimizar los resultados obtenidos. Se sugiere lo siguiente:

- a) Dado que la actividad de saturación depende de la masa de la muestra, se recomienda utilizar muestras con mayor masa en el detector de centelleo. Sin con ello se obtiene una mejor estadística, no será necesario utilizar el detector de Ge-HP, a menos que se requieran espectros más definidos.
- b) Utilizar aluminio puro para eliminar la impureza que se detectó.
- c) Utilizar un detector de NaI (TI) con una mayor área de detección para mejorar la estadística.
- d) Para evitar la activación con neutrones rápidos, colocar las muestras de aluminio dentro de un blindaje de parafina o más alejadas de la fuente.
- e) Si se desea usar el detector de Ge-HP, buscar la manera de que el irradiador y el detector estén próximos.

Referencias bibliográficas

- [A1]- A.C. Melissinos, "Experiments in Modern Physics", Academic- Press 1966, Pp. 152-174, 194-208 y 252-264.
- [A2]- Amerscham, "Industrial gauging and analytical instrumentation sources" Sep./1984.
- [B1] - Beatriz E. Fuentes M., René Ortega A., Carlos Alejandro V., "A Basic Neutron Howitzer", Reporte de investigación 432 ISBN 970-654-685-5, Junio de 2000, Pp. 5 -10.
- [B2] - Burcham, William Ernest, " Física Nuclear ", Ed. Reverte, 1974, Pp. 101-104.
- [E1]- Evans, "The Atomic Nucleus", Mc Graw- Hill, N.Y. 1955, Pp. 674-676, 750-754.
- [F1]- Francisco García Flores, Tesis: "Determinación del Campo de Radiación Neutrón – Gamma en las vecindades de un acelerador de partículas", 1998.
- [G1]- Goldsmith, "Experimental Nucleonics", Rinehart and Company Inc. New York, 1952, Pp. 105-116. (Cap 4 Neutron Activation of Silver).
- [H1] - Henry Semat, "Física Atómica y Nuclear", Madrid Aguilar, 1959, Pp. 75-96 y 313-382.
- [I1] - "Instruction Manual Geiger Muller Experimenter for the Personal Computer", Oxford Instruments Inc Analytic Systems Division Nuclear Measurements Group 601 Oak Ridge Turnpike .
- [I2] - Irving Kaplan "Física Nuclear" Aguilar, segunda edición, S.A. de Ediciones, 1962, Impreso en España.
- [J1] - Joss G, Freeman IM "Theoretical Physics", Blackie and Son Ltd 1967, Pp. 739-780.
- [J2]- J.B. Birks, "Scintillation Counters", Mc Graw- Hill 1953.
- [K1] -Kenneth S. Krane, " Física Moderna", Editorial Limusa, 1991, Pp. 269-340.
- [K2] -Knoll, G.F., "Radiation Detection and Measurements", 2nd. Ed., John Wiley & Sons Inc. New York, 1989.
- [M1] -Manuales del equipo MCA ORTEC y Detector Ge -HP CANBERRA.
- [R1]-R.M. Prior and A.A. Rollefson, "An introductory activation experiment for the senior laboratory" American Journal of Physics 46(10), Oct. 1978.
- [R2]- David R. Lide, CRC "Handbook of Chemistry and Physics", Edition 77th,1996-1997.
- [S1]-Samuel Glasstone, Alexander Sesonske, "Ingeniería de Reactores Nucleares", Editorial Reverté, 1975, Pp. 61-92.
- [V1] - Virgilio Acosta, Clyde L. Cowan, B.J. Graham M.R., "Curso de Física Moderna", Editorial Harla, 1975, Pp. 69- 86, 275-283 y 298-339.