



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO

FACULTAD DE CIENCIAS

**“DETECCIÓN DE NEUTRONES MEDIANTE LA
METODOLOGÍA DE TRAZAS NUCLEARES EN
SÓLIDOS”**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

FÍSICA

P R E S E N T A :

KAREN VALENCIA GARCÍA



DIRECTOR DE TESIS:
DR. GUILLERMO CIRANO ESPINOSA GARCÍA

México, D.F. 2015



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



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.

Hoja de datos del jurado

1.- Datos de alumno Apellido paterno Apellido materno Nombre Teléfono Universidad Nacional Autónoma de México Facultad de Ciencias Carrera Número de cuenta	1.- Datos del alumno Valencia García Karen 57561717 Universidad Nacional Autónoma de México Facultad de Ciencias Física 306248047
2.- Datos del tutor Grado Nombre Apellido paterno Apellido materno	2.- Datos del tutor Dr. Guillermo Espinosa García
3.- Datos del sinodal 1 Grado Nombre Apellido paterno Apellido materno	3.- Datos del sinodal 1 Dr. José Manuel Hernández Alcántara
4.- Datos del sinodal 2 Grado Nombre Apellido paterno Apellido materno	4.- Datos del sinodal 2 Dr. Fermín Castillo Mejía
5.- Datos del sinodal 3 Grado Nombre Apellido paterno Apellido materno	5.- Datos del sinodal 3 Dr. Juan Manuel García Islas
6.- Datos del sinodal 4 Grado Nombre Apellido paterno Apellido materno	6.- Datos del sinodal 4 M. en C. Manuel René Garduño López
7.- Datos del trabajo escrito Titulo Numero de paginas Año	7.- Datos del trabajo escrito Detección de neutrones mediante la Metodología de Trazas Nucleares en Sólidos. 62 2015

Índice

	Página
Introducción	1
Capítulo I	
Aspectos Fundamentales	
El neutrón	3
Clasificación de neutrones	5
Fuentes de neutrones	6
Sección eficaz (σ) para neutrones	8
Reacciones nucleares (n,p),(n, α)	9
Detección de neutrones por núcleos en retroceso	10
Dispersión elástica de neutrones	11
El protón	11
Partícula alfa	11
Detección de neutrones	12
Esferas de Bonner	12
Trazas Nucleares en Sólidos (TNS) como detector de neutrones	12
Eficiencia de detección	14
Modelos para la formación de trazas nucleares	14
Interacción de neutrones con la materia	17
CR-39 como material sensible	18
Método de grabado	18
Análisis de la traza formada	19
Conteo y análisis de trazas nucleares	21
Capítulo II	
Metodología	
Selección del método para la detección de neutrones	22
Selección del material sensible (Detector)	22
Dispositivo de detección de neutrones	23
Fuente de $^{241}\text{Am-Be}$	26
Dispositivo de irradiación	27
Irradiación	28
Procedimiento de grabado químico	28
Sistema de lectura	29
Estadística en el conteo de trazas nucleares	30
Capítulo III	
Instrumentación	
Fuente de neutrones $^{241}\text{Am-Be}$	32
Dispositivo de irradiación	33
Material sensible CR-39	33
Materiales para frenar neutrones y convertidores	34
Baño térmico controlado	35
Sistema de lectura	35
Capítulo IV	
Resultados y Discusión	
Flujo de neutrones para la fuente $^{241}\text{Am-Be}$	37

Densidad de trazas	38
Eficiencia de detección	44
Aplicaciones	45
Conclusiones	46
Anexo I*	47
Tabla de constantes físicas	
Anexo II**	49
Reacciones nucleares para detector CR-39	
Anexo III***	51
Procedimiento para la lectura de trazas	
Anexo IV ****	52
Tablas del número de trazas por detector	
Anexo V *****	56
Imágenes de trazas para cada detector	
Anexo VI *****	58
Definiciones	
Referencias	60

Introducción

En este estudio se realiza la detección de neutrones a través del plástico policarbonato alil diglicol (CR-39), mediante el fenómeno de la formación de trazas nucleares en sólidos. Este fenómeno surge debido al paso de la radiación ionizante a través de ciertos materiales, dejando huellas conocidas como “trazas latentes”.

Estas trazas pueden ser observadas mediante la microscopía óptica – lo que representa una de las principales ventajas, ya que no requiere instrumentos de mayor complejidad, permitiendo su desarrollo en pequeños laboratorios con costos bajos -, para revelar dichas huellas se requiere de un proceso de desgaste “grabado químico”, en el cual se expanden las trazas latentes con sustancias químicas del material utilizado como detector de radiación ionizante, que se observan como pequeños surcos cónicos, denominadas “trazas grabadas” o “trazas”.

Es posible obtener gran información acerca de la radiación a la cual fue expuesto el material detector, a partir de las características cualitativas y cuantitativas del conjunto de trazas observadas, p. ej. su tipo (p , n y α), su energía, la masa involucrada, su carga y el tiempo de exposición. A este proceso de irradiación, grabado químico y análisis de las trazas, se le conoce como métodos de trazas nucleares en sólidos.

Para este estudio se utiliza una fuente radioactiva de americio-berilio, la cual emite neutrones con un amplio espectro de energías. Los neutrones al no tener carga no interactúan de forma coulombiana con la materia, pero si pueden interactuar con los átomos del material. En este caso, los neutrones al colisionar con el polímero orgánico (CR-39) que está constituido por átomos de hidrogeno, carbono y oxígeno, producen reacciones nucleares; en el caso del hidrogeno la colisión neutrón-protón es elástica, lo cual ocasiona que el protón sea despedido dejando a lo largo de su

trayectoria una traza latente. Además las colisiones de los neutrones con los átomos del material rompen cadenas moleculares, contribuyendo con la formación de trazas.

Para que las trazas del detector plástico se amplifiquen, son tratados químicamente, revelando la huella que deja el neutrón al interactuar con el detector. Con el análisis de estas huellas se puede realizar el cálculo de flujo de una fuente radioactiva y la eficiencia de detección del material utilizado.

Los objetivos de este trabajo son:

- Detectar neutrones de la fuente de $^{241}\text{Am-Be}$ (1-15 MeV), con el método de trazas nucleares en sólidos, utilizando el material plástico policarbonato alil diglicol (CR-39) como detector, utilizando diferentes moderadores sobre el detector, los cuales son:
 - ^{10}B (Boro-10)
 - Cd (Cadmio)
 - Polietileno
 - Lucita
- Determinar el flujo de neutrones detectado en el material CR-39 para cada uno de sus diferentes recubrimientos.
- Calcular la eficiencia de detección del material CR-39 para cada uno de sus diferentes recubrimientos.

—Capítulo I—

Aspectos fundamentales

El neutrón

La existencia del neutrón fue anticipada por Rutherford en 1920, en 1930, Walther Bothe, hizo colisionar partículas alfa con elementos ligeros como el berilio, boro o litio y obtuvo una radiación mucho más penetrante que las conocidas hasta entonces. Bothe pensó que se trataba de un nuevo tipo de radiación gamma (γ), pero los resultados experimentales eran difíciles de interpretar.

Fue hasta 1932 cuando el Físico James Chadwick en Inglaterra mostró que la hipótesis de la radiación γ era insostenible, basándose en los experimentos de Frederic e Irene Joliot-Curie, repitiendo sus experimentos con el fin de encontrar una partícula neutra y que la radiación que se pensaban que era γ , la formaban partículas sin carga, con masa aproximada a la del protón.

El neutrón es una partícula subatómica, con masa ligeramente mayor a la del protón $939.565 \text{ MeV}/c^2$ ($1.6749 \times 10^{-27} \text{ Kg}$), con carga eléctrica igual a cero. El neutrón al igual que el protón se encuentra dentro del núcleo de los átomos, a los cuales se les conoce como nucleones.

A los neutrones que se encuentran fuera del núcleo se les conoce como neutrones libres, los cuales son inestables y decaen con una vida media cercana a 15 minutos ($887 \pm 0.8 \text{ s}$). Este decaimiento es posible gracias al “decaimiento beta inverso (β^-)” que se lleva a cabo mediante la fuerza nuclear débil, en el cual el neutrón pasa a protón, un electrón y un antineutrino electrónico, como se muestra en la ecuación 1.1. Este tipo de decaimiento también puede ocurrir en los núcleos inestables.



En el caso del decaimiento beta (β^+), a partir de un protón podemos tener un neutrón, positrón y neutrino electrónico, como se describe en la ecuación 1.2. Tanto el decaimiento β^+ como el β^- son decaimientos radioactivos.



La diferencia entre las masas de los reactivos y los productos, se debe a la energía de la reacción nuclear.

Clasificación de neutrones

Los neutrones son subdivididos en intervalos de energía de acuerdo con su comportamiento exhibido, esta energía depende de la reacción que los genera. La temperatura del neutrón (energía del neutrón), nos indica la energía cinética de los neutrones libres, regularmente dada en eV. La distribución de las energías para los neutrones, se asocia con la distribución de Maxwell-Boltzmann (Figura 1.1).

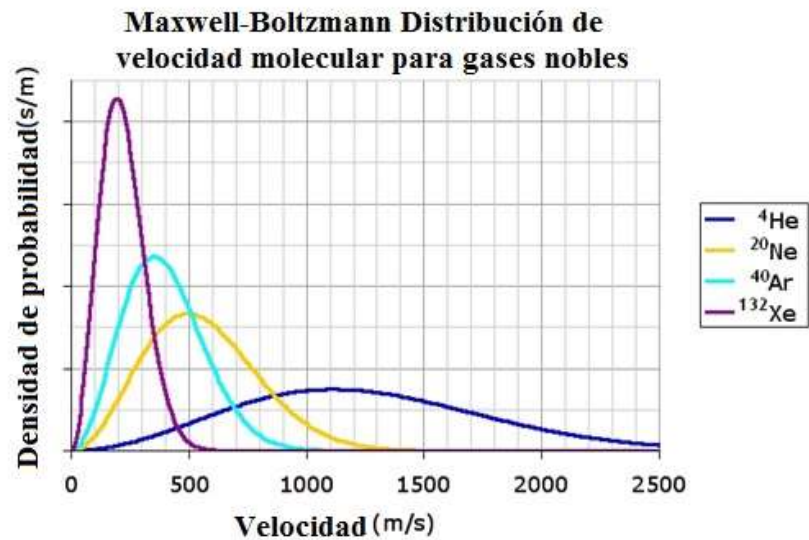


Figura 1.1 Se observa la función de probabilidad de la velocidad de los gases nobles a una temperatura de 293.15 K (20°C).

En la Tabla 1.1 se da la clasificación de neutrones en función de su energía, los denominados fríos comprenden energías de 0 a 0.025 eV, los térmicos 0.025 eV, los epitérmicos de 0.024 a 0.4 eV, también se encuentran los cádmicos, epicádmicos, lentos, de resonancia, intermedios y los rápidos son aquellos que su energía excede los 0.5 MeV.

Intervalo de Energía	Nombre
0 - 0.025 eV	Fríos
0.025 eV	Térmicos
0.025 - 0.4 eV	Epitérmicos
0.4 - 0.6 eV	Cádmicos
0.6 - 1.0 eV	Epicádmicos
1 - 10 eV	Lentos
10 - 300 eV	De resonancia
0.3 - 500 keV	Intermedios
0.5 - 20 MeV	Rápidos
> 20 MeV	Relativistas

Tabla 1.1 Clasificación de neutrones (Dostal y Elson, 1980).

En este caso se trabaja en un intervalo de energía de 0.5 a 15 MeV para los neutrones, por lo tanto, trabajamos con neutrones rápidos.

Fuentes de neutrones

Existen diversos tipos de fuentes de neutrones que dependiendo de las densidades de flujo de neutrones que emiten reciben su nombre: reactores nucleares, aceleradores, fuentes fijas, fuentes isotrópicas móviles (fuentes de neutrones móviles). Los neutrones generalmente son clasificados por su energía y dependiendo de estos intervalos de energía se determinan los equipos adecuados para su detección (L'Annunziata, 1998). En la tabla 1.2 se muestran algunas fuentes de neutrones, en donde la notación es la siguiente: neutrón n , protón p y partícula alfa α .

Tabla 1.2 Fuentes de Neutrones (Radioisotópicos)

Fuentes de Neutrones Radioisotópicos <i>(Shani, 1990).</i>				
Fuente de Neutrones	Producción de Neutrones (n / s / Ci *)	Tipo de Fuente	Vida Media	Reacción
²³⁹ Pu-Be	1.7x10 ⁶	α /n	24360 años	⁹ Be + α → ¹² C + n + 5.71 MeV
²⁴¹ Am-Be	2.2x10 ⁶	α /n	433 años	⁹ Be + γ → 2α + n - 1.67 MeV
¹²⁴ Sb-Be-D ₂ O		γ /n	60.2 días	² H + γ → ¹ H + n - 2.23 MeV
²⁵² ₉₈ Cf	4.4x10 ⁹	Fisión Espontánea (FE)	2.65 años	²⁵² ₉₈ Cf (FE) → 2f + 3.8n + 200 MeV

*Un curie (Ci) es 37 x 10⁹ Bq i.e. 37000MBq

Fuente ²³⁹Pu-Be

La fuente de ²³⁹Pu-Be tiene una vida media de 24360 años, produciendo neutrones mediante la reacción (α,n), ya que el plutonio decae por emisión alfa, las partículas alfa interactúan con el berilio generando neutrones.

Fuente de ²⁵²Cf

El californio- 252, es un isotopo con una vida media de 2.65 años, los neutrones son producidos por medio de fisión espontanea, con una probabilidad de fisión por desintegración del 3.09% y una energía de 79 a 103 MeV (Osborne-Lee I.W. et al., 1995)

La fisión espontánea tiene exactamente el mismo proceso de desintegración que la fisión nuclear, salvo que esta se produce sin que el núcleo atómico sea alcanzado por colisión de un neutrón o ninguna otra partícula, debido a que el núcleo atómico alcanza su masa crítica.

Fuente ²⁴¹Am-Be

La fuente de ²⁴¹Am-Be es de las más utilizadas debido a su larga vida media de 433 años y a la baja emisión de radiación gamma, en comparación con otras fuentes.

Esta fuente se produce a partir de la mezcla compacta de óxido de americio y de polvo de berilio metálico. El americio decae por la emisión de fotones de 59.5 keV y partículas alfa, las cuales interactúan con el berilio generando neutrones.

En este caso, para los experimentos se utiliza una fuente de $^{241}\text{Am-Be}$, por el número de neutrones producidos, el intervalo de energía de los neutrones emitidos y su vida media. El espectro energético de la fuente de $^{241}\text{Am-Be}$ (Figura 1.2) comprende neutrones con energías entre 100 KeV y 10 MeV, con un flujo de $(1.13 \pm 0.03) \times 10^6 \text{ n.s}^{-1} 4\pi$.

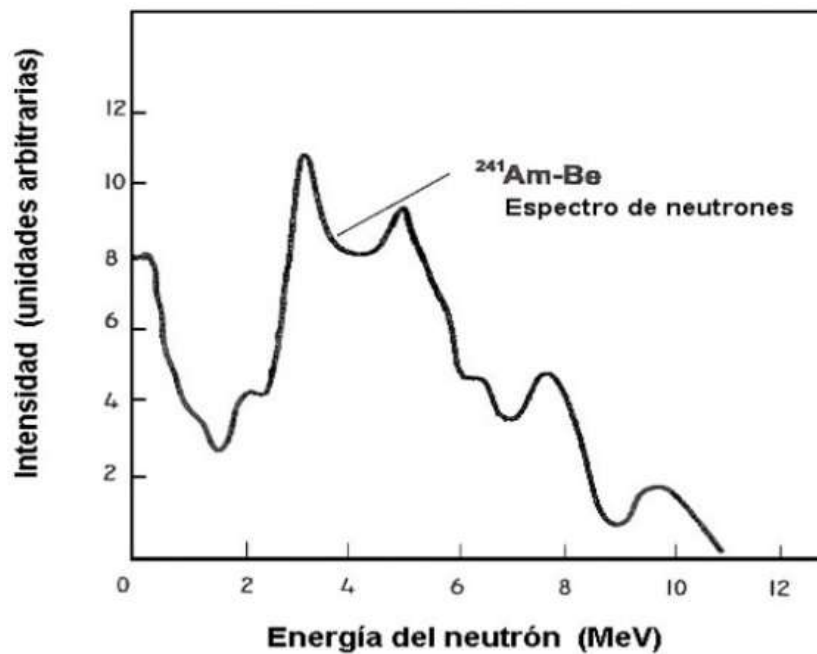


Figura 1.2 Espectro $^{241}\text{Am-Be}$, (IAEA, 1993).

Sección eficaz (σ) para neutrones

La sección eficaz (para cada tipo de interacción) por núcleo, se expresa en unidades de área y usualmente se da en barn (10^{-28}m^2).

La sección eficaz macroscópica Σ se obtiene al multiplicar la sección eficaz σ (microscópica) por el número del núcleo N por unidad de volumen, obteniendo así dimensiones de 1/longitud.

$$\Sigma = N\sigma \quad (1.3)$$

Σ es la probabilidad por unidad de longitud para que un proceso en específico ocurra, al sumar todas los proceso que se combinan para cada interacción, obtenemos Σ_{total} que es la probabilidad por unidad de longitud para cualquier tipo de interacción que ocurra.

$$\Sigma_{total} = \Sigma_{captura} + \Sigma_{dispersión} + \dots \quad (1.4)$$

El camino libre medio (L) del neutrón está dado por $1/\Sigma_{total}$, teniendo así L unidades de longitud. En materiales sólidos, L puede ser del orden de 1cm o menos para neutrones lentos y para neutrones rápidos es del orden de 10 cm.

Al considerar neutrones con una velocidad fija v (una energía en particular), podemos describir la frecuencia de interacción como el producto de $v\Sigma$. A las reacciones por unidad de tiempo y volumen, se le conocen como densidad de velocidad de reacciones y está dada por $n(r)v\Sigma$, donde $n(r)$ es la densidad de del número de neutrones en el vector posición r , y $n(r)v$ es el *flujo de neutrones* $\phi(r)$ con dimensiones de tiempo⁻¹longitud⁻². De esta manera, el coeficiente de densidad de la reacción está dado por el flujo de neutrones y la sección eficaz macroscópica:

$$\text{Coeficiente de densidad de la reacción} = \phi(r)\Sigma \quad (1.5)$$

Reacciones nucleares (n,p),(n, α)

Las reacciones nucleares suceden cuando un núcleo blanco es bombardeado con partículas nucleares y generalmente se denotan de la siguiente forma:



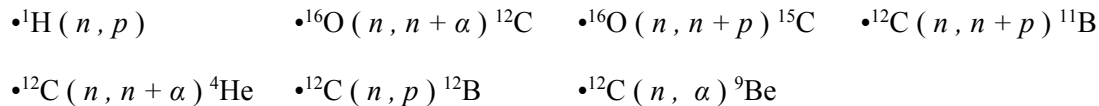
En la reacción nuclear, el núcleo blanco X es bombardeado por la partícula a , y el núcleo producto es Y como resultado de la partícula despedida b . La energía de la reacción nuclear, es la diferencia entre las masas de los reactivos y los productos, a la cual denominamos Q .

Otra manera de escribir la reacción nuclear, se muestra en la ecuación 1.7.



En la reacción nuclear (n,p), un núcleo es bombardeado por un neutrón, como resultado la partícula despedida es un protón y en la (n,α), incide un neutrón y es despedida una partícula alfa.

Las reacciones nucleares que causan efecto en el material (partículas cargadas como p o α) seleccionado para este trabajo CR-39 (policarbonato alil diglicol), que tiene una composición de ^1H , ^{12}C y ^{16}O , son las siguientes:



Para más reacciones de neutrones con un intervalo de energía de 0.5-15MeV, de la fuente de $^{241}\text{Am-B}$, véase Anexo II** (NNDC-BNL,2006).

Detección de neutrones por núcleos en retroceso

El método más común para detectar neutrones rápidos, está basado en la dispersión elástica de neutrones con núcleos ligeros. La dispersión transfiere energía cinética del neutrón al núcleo blanco, a este núcleo blanco se le conoce como núcleo en retroceso, los cuales son núcleos ligeros, siendo la interacción con el hidrógeno el más estudiado por su simplicidad.

El núcleo en retroceso que resulta de la dispersión elástica, generalmente con hidrógeno, se le conoce como protón en retroceso. Los detectores de protones en retroceso, son aquellos dispositivos basados en esta interacción.

El valor Q para la dispersión elástica es cero, ya que la energía cinética resultante de la reacción, por definición es la misma que energía cinética antes de la reacción. El núcleo blanco se encuentra en reposo antes de la reacción, y por lo tanto las energías cinéticas totales de productos de la reacción (núcleo en retroceso y el neutrón dispersado), deben ser igual a la energía del neutrón incidente.

Dispersión elástica de neutrones

Una interacción neutrónica es en la que la energía cinética perdida por un neutrón en una colisión nuclear es transferida al núcleo. La energía de un neutrón se reduce de manera más eficaz en las colisiones con núcleos de masa similar al neutrón, como el hidrogeno y otros elementos de baja masa atómica.

El protón

En 1886 Eugene Goldstein tras realizar una serie de experimentos con tubos de descarga, observó un tipo de radiación que estaba constituida por cargas positivas (iones). En 1918 Rutherford a quien generalmente se le da el crédito por el descubrimiento del protón, sugiere que se le considere a los núcleos de hidrógeno como partículas elementales, tras darse cuenta que cuando las partículas α son disparadas dentro de un gas de nitrógeno, los detectores muestran la traza del núcleo de hidrogeno.

El protón del griego protón=primero, es una partícula subatómica con carga eléctrica positiva (1.602×10^{-19} coulomb), una masa de $938.272 \text{ MeV}/c^2$ ($1.6727 \times 10^{-27} \text{ Kg}$), 1.00727646688 uma, o cerca de 1836 veces la masa del electrón, con un diámetro de aproximadamente $1.5 \times 10^{-15} \text{ m}$.

El protón se ha observado como estable, aunque puede ocurrir el decaimiento β^+ (mencionado anteriormente). La vida media del protón es $\approx 10^{35}$ años (Antonio F.S. et al 2006).

Partícula alfa

Las partículas alfa (α) fueron identificadas por Ernest Rutherford como la menos penetrante de las radiaciones emitidas por materiales de manera natural.

Estas partículas alfa están compuestas por dos protones y dos neutrones, son núcleos completamente ionizados, ya que al carecer de electrones, su carga eléctrica es positiva ($+2q_e$), mientras que su masa es de 4 uma. Tiene una carga de 3.2×10^{-19} coulombs y una masa de $3727.378 \text{ MeV}/c^2$ ($6.68 \times 10^{-27} \text{ Kg}$).

Detección de neutrones

Los neutrones al no tener carga, sino solo masa, los detectamos mediante las reacciones nucleares (n,p) , (n,γ) o (n,α) , siendo las partículas cargadas al interactuar con los materiales, las que mediante la excitación, ionización y/o el desplazamiento de electrones, nos dan la medición de los neutrones.

Esferas de Bonner

Los detectores denominados esferas de Bonner, consisten en esferas homogéneas de polietileno, en las cuales colisionan los neutrones generando una reacción nuclear ya sea (n,p) o (n,α) , en el centro del conjunto de esferas se encuentra un detector (Geiger o similar), el cual es sensible a partículas cargadas y a radiación γ .

Los diámetros de las esferas, tradicionalmente son fabricadas en valores enteros desde 1 hasta 18 pulgadas de diámetro, cada una de las esferas tiene una respuesta diferente en función de la energía de los neutrones incidentes, así las medidas obtenidas del conjunto de estas esferas proporcionan información sobre el espectro neutrónico.

Aunque las esferas de Bonner son un método efectivo para reconstruir el espectro de neutrones, el peso de las esferas, los largos periodos de tiempo empleados para realizar las mediciones, la necesidad de un código para realizar la reconstrucción del espectro, y un usuario experimentado para la manipulación del código, son algunas desventajas que este sistema presenta.

Trazas Nucleares en Sólidos (TNS) como detector de neutrones

El método de Trazas Nucleares en Sólidos, puede dividirse en tres pasos (Figura 1.3):

1. Exposición a la radiación.
2. Revelado químico de la traza.
3. Caracterización y lectura de la traza.



Figura 1.3 Diagrama en donde se muestran los pasos del método de detección por trazas en sólidos.

Una de las características de la metodología de Trazas Nucleares en Sólidos, es que el material detector es sensible sólo a partículas cargadas como son α , protones, iones y fragmentos de fisión; en el caso de los neutrones al no poseer carga, es necesario tener una reacción nuclear (n,p) o (n, α), para poder detectarlos.

El primer paso consiste en exponer el material detector a la radiación ionizante, al exponer el detector material se crea la traza latente en el material. Para hacer visibles las trazas nucleares, se requiere de un proceso químico, produciéndose un desgaste en el detector, preferencialmente en la zona de impacto de las partículas cargadas, a esto se le denomina “trazas grabadas”, que tienen forma cónica, la cual puede ser observada mediante microscopio óptico.

Para el conteo y análisis de las trazas grabadas, se requiere contar el número de trazas grabadas por unidad de área (número de trazas / cm^2), ya que es proporcional al flujo de la fuente de neutrones y el tamaño del diámetro de la traza, medido en la superficie del material, nos indicará la energía de la partícula (Espinosa et al. 1994).

Unas de las principales ventajas de este método y por lo cual se selecciona para este trabajo, son:

- Los detectores por Trazas Nucleares en Sólidos, no son sensibles a radiación γ , β o χ , por lo que en el estudio de campos mixtos es una buena alternativa.
- La forma y el tamaño del detector, se pueden ajustar al área de medición.
- No se requiere de instrumentación sofisticada y compleja. El método de Trazas Nucleares es simple, fácil de manipular y a bajo costo.

Eficiencia de detección

Eficiencia de detección teórica del material detector.

La eficiencia de detección de un dispositivo basado en núcleos en retroceso puede ser calculada por la sección eficaz de dispersión σ_s .

Cuando solo hay un tipo de núcleo en el detector, la eficiencia intrínseca es:

$$\varepsilon = 1 - e^{(-N\sigma_s d)} \quad (1.8)$$

donde N es el número de densidad del núcleo blanco, σ_s es la sección eficaz de dispersión para el núcleo, y d es la longitud de la trayectoria de los neutrones incidentes a través del detector (Durrani y Bull, 1987).

Es común que los detectores de protones de retroceso, estén compuestos por una combinación de carbono con hidrógeno. La dispersión del carbono presenta varios efectos que tomaremos en cuenta. La eficiencia de detección (ε), sin considerar efectos de dispersión múltiple, es:

$$\varepsilon = \frac{N_H \sigma_{SH}}{N_H \sigma_{SH} + N_C \sigma_{SC}} \{1 - e^{[-d(N_H \sigma_{SH} + N_C \sigma_{SC})]}\} \quad (1.9)$$

donde N_H la densidad para el hidrógeno, σ_{SH} es la sección eficaz de dispersión del hidrógeno, N_C es la densidad para el carbono y σ_{SC} es la sección eficaz del carbono.

Modelos para la formación de trazas nucleares

Para explicar el daño que causa la radiación en los materiales, se han desarrollado diferentes modelos, algunos pueden funcionar para ciertos materiales, en ciertos intervalos de energía o con condiciones muy específicas. Entre los modelos que predicen la formación de trazas, se encuentran los mostrados en la Tabla 1.3.

Tabla 1.3 Relación de modelos existentes, que predicen la formación de trazas nucleares.

MODELO	CONSIDERACIONES
Colisión atómica	No se aplica en lo general, solo para $E = 1\text{KeV/amu}$
Energía depositada en la producción de rayos delta	Falta información para el modelo en general
Perdida de energía restringida	Convincente, pero no demostrado experimentalmente
Punta iónica	No aceptable
Pérdida total de energía	No aceptable
Ionización primaria y excitación (Punta de explosión iónica).	Válida para inorgánicos. Faltan consideraciones para efectos de rayos delta.

Punta de explosión iónica.

De todos los modelos teóricos que se han propuesto hasta el momento, el modelo de ionización primaria y excitación (Punta de explosión iónica) ha sido el más aceptado, el cual consiste en entender la formación de huellas nucleares en sólidos, considerando como efecto fundamental un desplazamiento atómico en el material usado como detector.

Para explicar el daño causado por la radiación ionizante en los materiales (Fleischer et al. 1965), se propone un modelo considerando como efecto fundamental un desplazamiento atómico en el material usado como detector, esto es similar a una explosión de ionización a lo largo de la trayectoria de la partícula cargada, que genera una orientación inestable electrostática a su paso, provocando una repulsión de los iones desde sus posiciones iniciales hasta sus posiciones intersticiales (Figura 1.4).

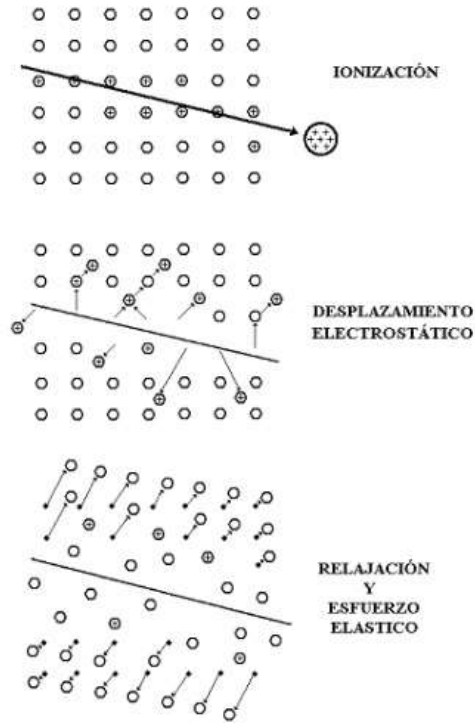


Figura 1.4 Mecanismo de punta de explosión iónica para la formación de trazas en sólidos inorgánicos.

Después de la formación de los iones primarios, se “forman” los iones intersticiales y los sitios vacantes en la red, producto de las fuerzas coulombianas, expandiendo el “esfuerzo” en el material hacia los lados de la trayectoria de la partícula que se representan como daños en el material, estos se pueden observar directamente mediante microscopía electrónica de transmisión, a estos daños se les conoce como “trazas latentes”.

Este modelo presenta básicamente dos restricciones, los materiales detectores deben ser semiconductores de baja conductividad o aislantes.

En el caso de los plásticos, el efecto en el material está dado por el rompimiento de cadenas poliméricas, expulsando algunos de sus átomos por colisiones con las partículas incidentes, como se muestra en la Figura 1.5.

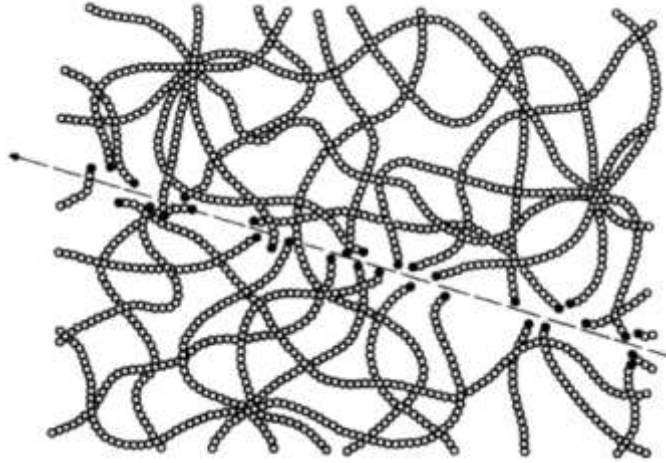


Figura 1.5 En plásticos, el rompimiento de cadenas poliméricas da una dirección preferente de grabado a lo largo del daño.

Interacción de neutrones con la materia

Detección de neutrones rápidos por trazas nucleares.

Las trazas que son producidas por neutrones rápidos son causadas por el retroceso elástico de los núcleos. Generalmente los núcleos ligeros son los más favorables para producir trazas, ya que tienen una alta sección eficaz para dispersión elástica, además de transmitir una gran fracción de energía en la colisión con el neutrón y tener bastante alcance dentro del detector.

Muchos grupos de investigación han utilizado el policarbonato, el nitrato de celulosa y el acetato de celulosa como detectores de trazas (Medveczky y Somogyi, 1966; Becker, 1969; Tuyn y Broerse, 1970; Frank y Benton, 1970; Nishiwaki et al., 1971).

CR-39 como material sensible

El plástico CR-39, tiene una composición de H,C y O, cuya detección de neutrones está basada en las reacciones nucleares (n,p) y (n, α) con los núcleos del material. Donde las reacciones (n,p), son en su mayoría con el hidrogeno y las reacciones (n, α) con los núcleos de C y O, como se mostró anteriormente.

La baja eficiencia de detección del CR-39 a los neutrones rápidos, se puede mejorar colocando unos pocos milímetros de un material rico en hidrogeno, conocido como material convertidor. El neutrón rápido al incidir sobre el convertidor, pierde una fracción de su energía cinética inicial, termalizando al neutrón y con ello es factible generar una reacción (n,p) o (n, α). En la Figura 1.6, se muestra la respuesta de los detectores de neutrones en función de la energía.

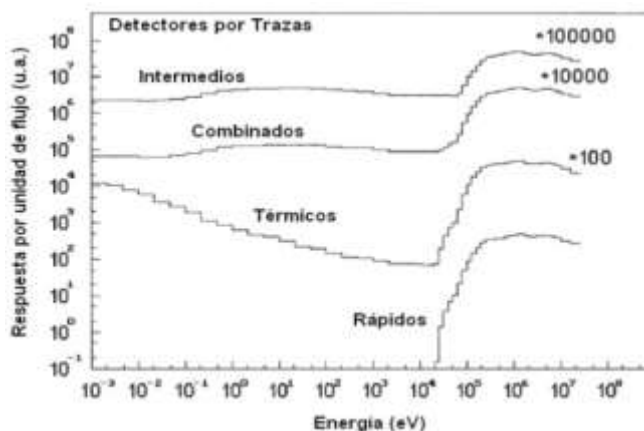


Figura 1.6 Respuesta de detectores por trazas a neutrones de diferentes energías (IAEA,2001).

Método de grabado

Para plásticos, el procedimiento establecido es utilizar como ataque químico una solución acuosa de NaOH o KOH, con concentraciones típicas dentro de un intervalo de 1 a 12 moles, las temperaturas generalmente empleadas son de 30°C a 70°C. En la tabla 1.3 se muestran las características empleadas en el ataque químico o grabado para diferentes materiales.

Material	Grabado
Plásticos de policarbonato	Solución NaOH o KOH; 1-12mol. Temperatura: 40- 70°C.
Plásticos de nitrato de celulosa	Solución NaOH; 1-12mol. Temperatura: 40- 70°C.
Plásticos CR-39	Soluciones NaOH o KOH; 1-12mol. Temperatura: 40-70°C.
Orthopyrex y Clinopyrex	6g NaOH + 4g H ₂ O. En punto de ebullición.
Mica	48% HF. Temperatura 20-25°C.
Vidrio	1 - 48 % HF. Temperatura 20-25°C.
Feldespató	1g NaOH +2g H ₂ O. En punto de ebullición.
Apatita	0.1-5% HON ₃ . Temperatura 20-25°C.
Zirconio	11.5g KOH + 8g NaOH. Temperatura: 200-220°C.

Tabla 1.4 Grabados más comunes en TNS.(Durrani y Bull,1987).

Para poder obtener reproducibilidad en los resultados se deben seguir los protocolos establecidos para el control de factores como: la concentración de la solución, su temperatura y el tiempo de grabado. El tiempo de grabado está relacionado directamente con las capas a desgastar en el material, por este motivo el tiempo de grabado depende del estudio a realizar (Khan y Khan, 1980).

Análisis de la traza formada

Geometría de la traza para v_T constante

La formación de la traza en su caso simple, consiste en la disolución química del material, a lo largo de la huella de la partícula v_T y el ataque general sobre la superficie grabada v_g . En el caso en que v_T y v_g (isotrópico) sean constantes, se tiene un ataque preferencial a lo largo de la trayectoria de la partícula.

La Figura 1.7 muestra como el proceso de creación de conos tiene como su eje (D), con longitud de grabado v_{Tt} ($t =$ tiempo de grabado), el diámetro de la traza D y la longitud visible de la traza L, son el resultado de la competencia entre los efectos de v_T y v_g , en donde hay un pequeño exceso de v_T sobre v_g , formando un ángulo entre el eje de la trayectoria y la pared del cono.

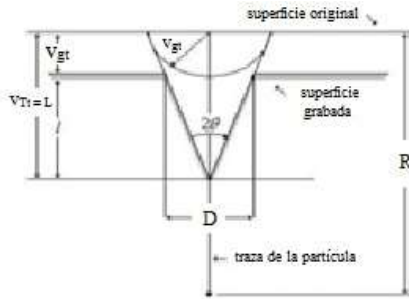


Figura 1.7 Geometría de una traza de una partícula incidente verticalmente, v_T y v_g constantes.

Este comportamiento muestra que una geometría simple nos da medidas en términos de los parámetros del grabado:

$$\sin \theta = \frac{\frac{D}{2}}{\left[\left(\frac{D}{2}\right)^2 + (L)^2\right]^{1/2}} \quad (1.11)$$

$$v_g t = \left(\frac{D}{2}\right)\left(\frac{D}{2L}\right) = \left[\left(\frac{D}{2}\right)^2 + \left(\frac{L^2}{L}\right)\right]^{1/2}$$

$$v_g t = \left(\frac{D}{2}\right)(\tan \theta + \sec \theta) \quad (1.12)$$

$$v_T t = \left[\left(\frac{D}{2}\right)^2 L^2\right]^{1/2} \cdot \left(\frac{D}{2L} + \left(\frac{D}{2}\right)^2 + L^2/L\right)$$

$$v_T t = D \csc \theta (\tan \theta + \sec \theta)/2 \quad (1.13)$$

Geometría de la traza para v_T variable

La geometría de la traza es más complicada cuando v_T aumenta o disminuye a lo largo de la longitud de la traza y si se considera a v_g no isotrópico.

Existen otros parámetros a considerar, para el grabado de la traza, como el ángulo de incidencia de la traza. Por lo regular se considera la partícula a 90° , perpendicular al material, pero experimentalmente la radiación incidente puede venir en cualquier ángulo. Esta dependencia angular se relaciona directamente con la eficiencia de grabado de la traza.

En 1972 (Fleisher y Hart), se encontró experimentalmente dos casos típicos para el valor de la eficiencia (η), en función del ángulo de incidencia:

$$\eta = \frac{\text{Número de trazas reveladas en la superficie}}{\text{Número de trazas que impactaron en la superficie}} \quad (1.14)$$

En el primer caso son trazas aleatorias en todo el volumen, considerando solo las que presentan un ángulo de incidencia constante:

$$\eta = \cos^2 \theta \quad (1.15)$$

Para el segundo caso, de trazas orientadas de una fuente radioactiva externa y delgada:

$$\eta = 1 - \sin \theta \quad (1.16)$$

Este valor de eficiencia es alterado por las condiciones del disolvente químico, como son concentración, temperatura, tiempo de grabado y pre-tratamiento químico. Para polímeros como el CR-39, se logran eficiencias hasta de un 90% para las partículas incidentes a 90°.

Conteo y análisis de trazas nucleares

Para el conteo y análisis de las trazas nucleares se usó el sistema de análisis de imágenes digitales denominado DIAS (Digital Image Analysis System) por sus siglas en inglés (Espinosa et al., 1996). Para la detección del flujo de neutrones, en este trabajo solo se consideran las trazas formadas por partículas a 90°, las cuales dejan huellas circulares.

Con esta sección finalizamos el capítulo I y continuamos con el Capítulo II (metodología).

*Cuando la sangre de tus venas
retorne al mar y el polvo de tus huesos
vuelva al suelo, quizá recuerdes que esta tierra
no te pertenece a ti, si no tu a la tierra.*
PROVERBIO SIUX

—Capítulo II—

Metodología

Selección del método para la detección de neutrones

De entre todos los métodos de detección de neutrones, como el de las esferas de Bonner, el de Análisis de Activación por Neutrones (NAA), el de termoluminiscencia, entre otros, para este trabajo se seleccionó la Metodología de Trazas Nucleares en Sólidos, por la simplicidad en su instrumentación, bajo costo, eficiencia y sobre todo por ser accesible tecnológicamente.

Además, este método se puede poner al alcance de cualquier institución por no requerir un sofisticado equipamiento, por ser novedoso y por qué puede ser aplicado en muchos campos.

Selección del material sensible (Detector)

En este trabajo se utiliza el material CR.39 Lantrack® (policarbonato alil diglicol) como material sensible (detector), por su amplia respuesta energética de 0.3 a 15 MeV, por su gran eficiencia a protones y por su facilidad de manipular.

Además no es sensible a radiación γ , β y X, siendo una buena alternativa para la detección de neutrones en campos mixtos, su tamaño y forma se pueden ajustar al área de detección, facilitando la detección de neutrones en áreas de diferentes tamaños.

Dispositivo de detección de neutrones

Se desarrolló un dispositivo para la detección de neutrones, que consta de un contenedor plástico con dimensiones 3.5cm de diámetro y 1.7 cm de altura (Figura 2.1) como porta detectores,



Figura 2.1 Contenedor plástico utilizado para el dispositivo de detección.

en el cual se colocan dos detectores (CR-39), con la cara sin número al flujo de neutrones, ya que el material sensible de un lado tiene un número de serie y del otro es liso, como se muestra en la figura 2.2.



Figura 2.2 CR-39 *Lantrack*® como material sensible.

Posteriormente se coloca hule espuma de 2cm de espesor, para que al cerrar el contenedor plástico, los detectores queden a presión y no cambien su posición (conservar la geometría) como se muestra en la Figura 2.3.

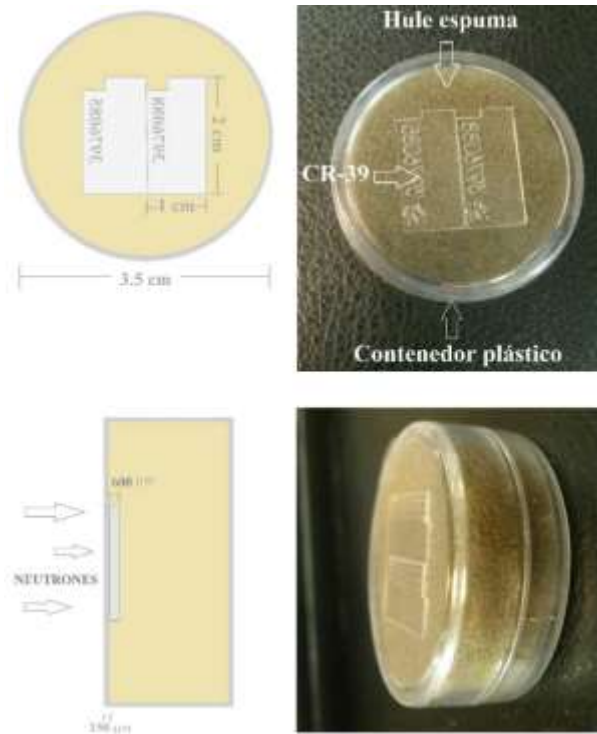


Figura 2.3 Dispositivo de detección (CR-39), vista frontal y lateral.

Estudio con diferentes convertidores

Para esto se realizan 4 experimentos:

- Dispositivo de detección sin convertidor.
- Dispositivo de detección con convertidor de Acrílico (Polimetilmetacrilato CAS 9011-14-7, con formula: $[\text{CH}_2\text{C}(\text{CH}_3)(\text{CO}_2\text{CH}_3)]_n$), de 3 mm de espesor entre el contenedor plástico y los detectores como se muestra Figura 2.4.

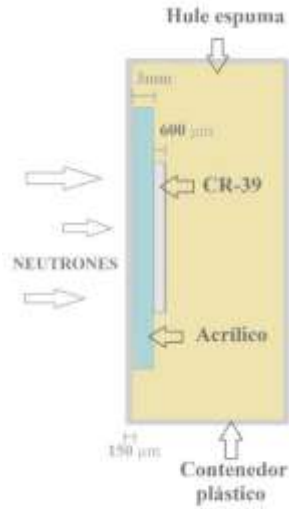


Figura 2.4 Diagrama del dispositivo de detección con convertidor de Acrílico (vista lateral).

- c) Dispositivo de detección con convertidor de Polietileno (PEBD, CAS 9002-88-4, con fórmula: $[-HC=CH-]_n$), de 1.5 mm de espesor entre el contenedor plástico y los detectores como se muestra en la Figura 2.5.

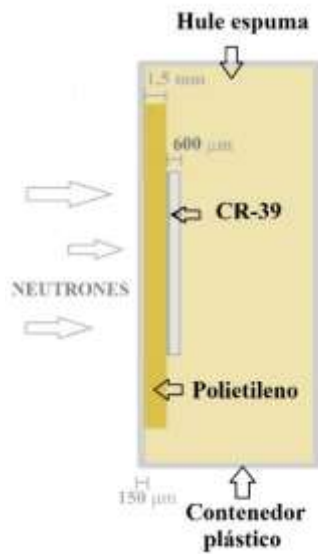


Figura 2.5 Diagrama del dispositivo de detección con convertidor de Polietileno (vista lateral).

Se colocan las placas de polietileno y Acrílico como convertidores, ya que al ser materiales hidrogenados, favorecen la reacción (n,p) del flujo de neutrones de la fuente, haciendo más eficiente y sensible la detección.

- d) Dispositivo de detección con placa de Cadmio (Cd, CAS 7440-43-9), de 1mm de espesor entre el contenedor plástico y los detectores como se muestra en la Figura 2.6. Para frenar y/o bloquear los neutrones entre las energías de 0.5 MeV a 0.8 MeV (Guayasamin et al., 2010), del espectro de la fuente de $^{241}\text{Am-Be}$.

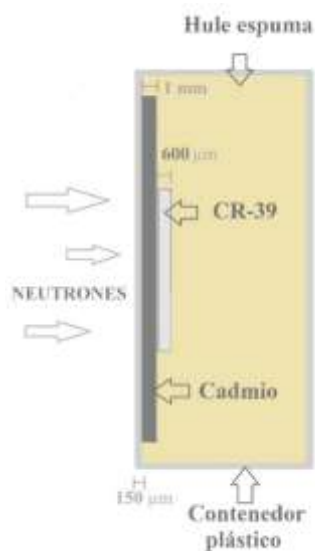


Figura 2.6 Diagrama del dispositivo de detección con frenador de Cadmio (vista lateral).

Fuente de $^{241}\text{Am-Be}$

Para este trabajo se selecciona una fuente de $^{241}\text{Am-Be}$ por su intervalo de energías entre 500KeV y 15 MeV (Ver Figura 1.2, espectro de la fuente de $^{241}\text{Am-Be}$), que se encuentran dentro del rango de energías a las que es sensible el detector CR-39 y por su vida media.

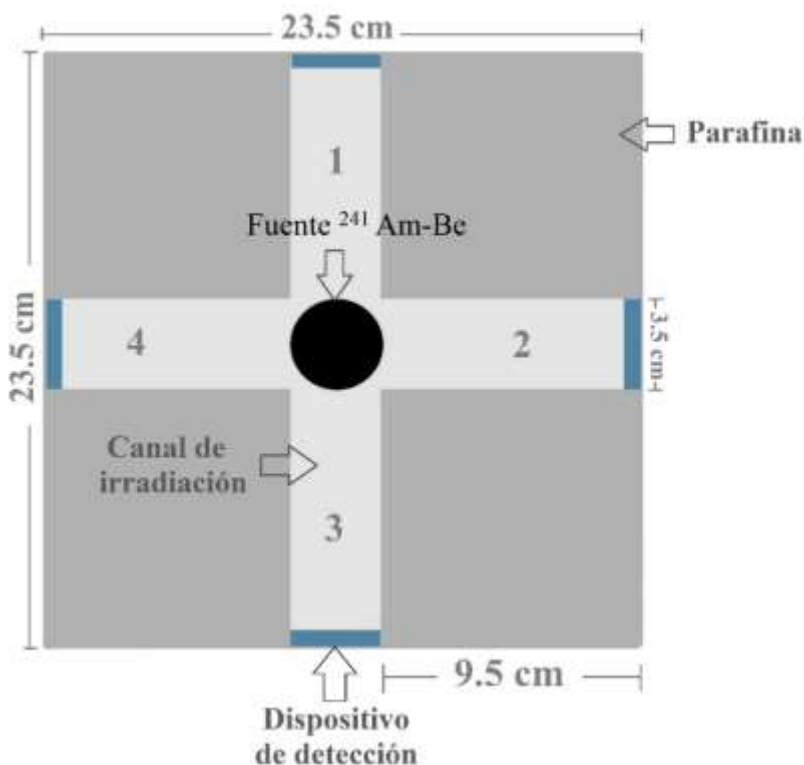
Dispositivo de irradiación

El dispositivo de irradiación está hecho de parafina, material moderador de neutrones.

La fuente de $^{241}\text{Am-Be}$ se colocó en el centro como se muestra en la Figura 2.6, se cuenta con 4 canales de irradiación de 3.5 cm de diámetro. Estos canales tienen la función de colimar y evitar en lo posible la dispersión de los neutrones, obteniendo una incidencia neutrón-detector de 90 grados.

Además por ser el dispositivo de irradiación de parafina, los neutrones de la fuente quedan confinados dentro de éste, siguiendo las medidas de protección radiológica recomendadas.

Además que el dispositivo de irradiación mantiene una simetría entre la fuente de $^{241}\text{Am-Be}$ y el dispositivo de detección, lo cual es un aspecto sumamente importante para la reproducibilidad experimental.



2.6 Esquema del dispositivo de irradiación con neutrones

Irradiación

Se coloca cada uno de los 4 experimentos antes mencionados en los canales de salida del dispositivo de irradiación señalados con los números 1,2,3 y 4, como se muestra en la Figura 2.6, y a la misma distancia de 9.5 cm de la fuente de $^{241}\text{Am-Be}$, con el fin que todos se encuentren sometidos a los mismos tiempos de irradiación: 3, 4.5, 6 y 9 hrs., para observar el comportamiento de los detectores de neutrones en función al tiempo de exposición.

Para seguir con el Método de Trazas Nucleares sacamos los detectores del dispositivo de detección y continuamos con el proceso de grabado químico.

Procedimiento de grabado químico

Todos los detectores CR-39 más un testigo se someten al mismo proceso de grabado químico, siguiendo los protocolos del Proyecto de Aplicaciones de la Dosimetría, PAD del IFUNAM (Espinosa et al., 1996).

El grabado químico se realiza con solución KOH al 6.25 N (Espinosa et al., 1996; Harvey et al. 1998), en un baño térmico de temperatura controlada, a una temperatura de $60^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$.

De acuerdo a los protocolos los tiempos de grabado pueden variar desde 3 hasta 18 hrs (Gammage y Espinosa et al., 1997; Harvey et al., 1998; Espinosa et al., 1996). Para este trabajo se seleccionó solamente 3 horas de grabado químico, tiempo suficiente para observar las trazas formadas y así disminuir el tiempo del proceso.

Paso posterior al grabado químico, los detectores son lavados, con agua destilada y posteriormente con agua corriente, con la finalidad de remover todo el KOH del detector, se dejan secar los detectores en el papel secante por ambas caras del detector.

Después de grabados los detectores son contados (densidad de trazas) con el sistema automático de lectura.

Sistema de lectura

Para la lectura de la densidad de trazas, es el Sistema de Análisis de Imágenes Digitales DIAS. El cual está compuesto por un microscopio óptico con 3 lentes de 40x, 100x y 200x, acoplado a este se tiene una cámara CCD por sus siglas en inglés (Charge Coupled Device) para procesar la imagen, en paralelo se conecta con un monitor para observar la forma de las trazas, como se muestra en la Figura 2.7.

La señal de la cámara CCD es llevada a una tarjeta digitalizadora, y se analiza con el programa *Mocha Image Analysis*, para hacer la conversión a densidad de trazas (trazas/cm²), (Espinosa et al., 1996). Los datos obtenidos se pueden analizar con cualquier otro programa estadístico OriginPro 7.5 o Microsoft Excel.

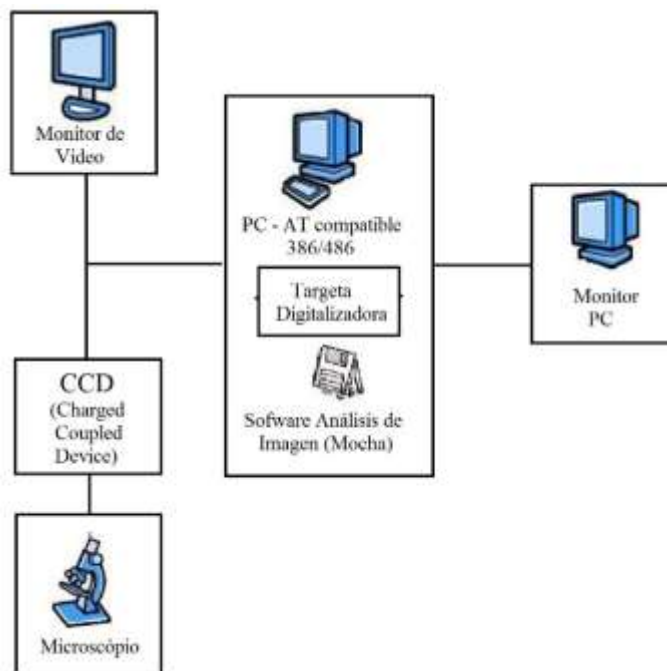


Figura 2.7 Esquema del sistema de lectura DIAS (Mendoza et al., 2008).

Traza formada por protones y por partículas α

Un aspecto muy importante es la distinción entre trazas de protones y trazas por partículas α (Espinosa et al.,1996; Jakes et al.,1997) para el conteo final, ya que las trazas por partículas alfa son de mayor tamaño como se puede observar en la Figura 2.8. Se tiene que el diámetro de las trazas formadas por protones son de $\approx 15 \mu\text{m}$ y por partículas α de $\approx 30 \mu\text{m}$. Esto es debido a que las partículas α , están constituidas por dos protones y dos neutrones, por tal motivo tienen mayor masa y carga que la del protón.

En este caso solo vamos a considerar las trazas realizadas por protones, ya que la mayor reacción nuclear es (n,p), para una fuente de neutrones.

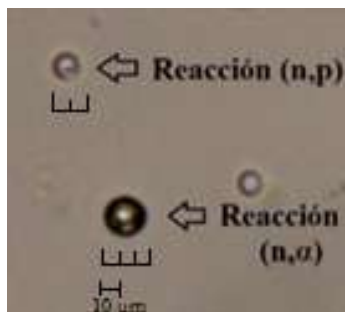


Figura 2.8 Fotografía donde se muestra las trazas formadas por la reacción (n,p) y (n,α).

Estadística en el conteo de trazas nucleares

Se analizan un total de 17 detectores, de cada uno, se selecciona el conteo de 25 campos leídos automáticamente, con un área de 0.108mm^2 cada uno, para tener una mejor estadística y por lo tanto una menor desviación estándar.

Por detector se realiza, la suma total de trazas analizadas ($\Sigma(x)$), el promedio de trazas (\bar{x}) y la desviación estándar (σ). Usamos \bar{x} para determinar la densidad de trazas (trazas/cm²) y la eficiencia de detección.

El número de trazas observadas en cada campo se muestra en las tablas del Anexo IV ****.

*La ciencia no es sino una perversión
de sí misma a menos que tenga como objetivo
final el mejoramiento de la humanidad.*
NIKOLA TESLA

—Capítulo III—

Instrumentación

Como mencionamos en el capítulo II, la detección de neutrones será realizada mediante la Metodología de Trazas Nucleares en Sólidos (MTNS), la cual puede dividirse en tres pasos: exposición a la radiación, revelado químico de la traza, caracterización y lectura de la traza.

La instrumentación para cada paso de la MTNS será descrita a lo largo de este capítulo.

Fuente de neutrones $^{241}\text{Am-Be}$

Se utiliza una fuente de $^{241}\text{Am-Be}$, con una actividad de $1.13 \pm 0.03 \times 10^{-6}$ n/s 4π , con incertidumbre de $\pm 2.5\%$, con certificado del 11/09/1978, la fuente tiene una parte activa de 10mm de diámetro x 10mm de altura, una parte que recubre a la fuente (dimensiones exteriores) de 18mm de diámetro x 18mm de altura y la parte del soporte de la fuente con dimensiones 34mm de diámetro y 56mm de altura como se muestra en la Figura 3.2.

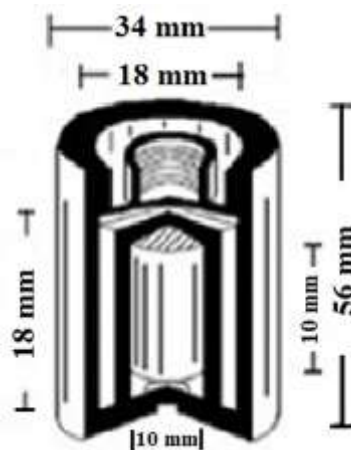


Figura 3.2 Diagrama de la fuente $^{241}\text{Am-Be}$.

Dispositivo de irradiación

El dispositivo de irradiación está elaborado de parafina, con dimensiones: base de 23.5 cm x 23.5 cm y con altura de 34 cm, como se muestra en la Figura 3.1.

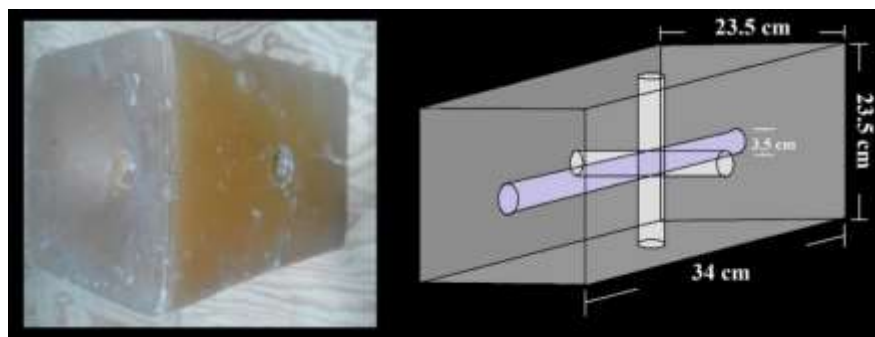


Figura 3.1 Dimensiones e imagen del dispositivo de irradiación.

Material sensible CR-39

Para este trabajo se utilizaron los detectores CR-39 *Lantrack*[®], con dimensiones de 1cm x 2cm y un espesor de 600 μm , cuentan originalmente con unas protecciones de plástico de 50 μ , las cuales fueron retiradas para la experimentación.

El CR-39 producido por el proceso “Columbia Resin-39”, (policarbonato alil diglicol), con formula química $\text{C}_{12}\text{H}_{18}\text{O}_7$. En la figura 3.4, se muestra la estructura química, en donde se observa una doble cadena unida por un enlace de oxígeno.

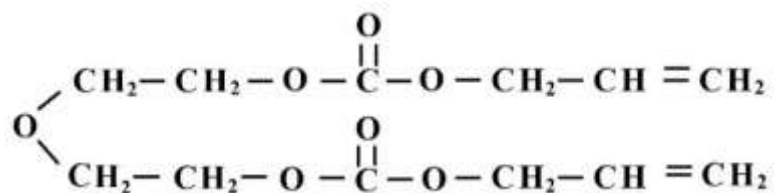


Figura 3.4 Esquema de la estructura química del CR-39.

El porcentaje de los elementos por molécula que conforman el material detector CR-39, se muestran en la Tabla 3.1. Donde se observa que aproximadamente el 50% corresponde al elemento ^1H .

Elemento	Porcentaje
^1H	48.648 %
^{12}C	32.432 %
^{16}O	18.918 %

Tabla 3.1 Porcentaje por molécula del detector CR-39.

Los intervalos de secciones eficaces para neutrones con elementos como blancos se muestran en la tabla 3.2.

Elemento	Intervalo de Sección eficaz (barns)
^1H	10^{-4} a 10^4
^{12}C	10^{-4} a 1
^{16}O	10^{-4} a 10^2

Tabla 3.2 Secciones eficaces para los elementos blancos del 3R-39.

Se observa que el mayor intervalo de sección eficaz corresponde al ^1H . Por ello y debido a que es el de mayor abundancia en el material detector, la mayoría de las reacciones nucleares será de las interacciones de neutrones con el ^1H .

Materiales para frenar neutrones y convertidores

Se utilizaran 3 materiales Acrílico, Polietileno y Cadmio. El Polietileno y el Polimetimetilmetacrilato, también conocido como Acrílico, Plexiglás o Lucita, se utilizan como convertidores ya que son ricos en hidrogeno. Las dimensiones del polietileno son 1.4×2 cm y con un espesor de 1.5mm, las del acrílico son 2.5×2.5 cm y un espesor de 3mm. El cadmio se utiliza para frenar y/o bloquear a los neutrones rápidos, con dimensiones 2×3.5 cm y un espesor de 1 mm (Figura 3.5).

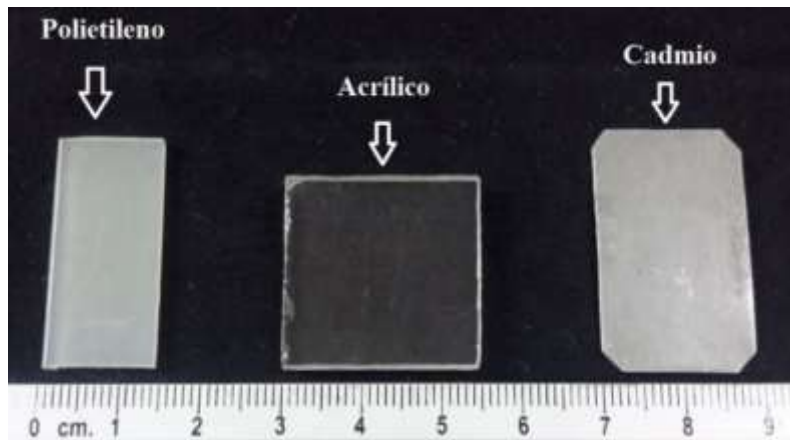


Figura 3.5 Polietileno y Acrílico como convertidores, y Cadmio como frenador.

Baño térmico controlado

Para el grabado químico que se explicó en el Capítulo II (página 24), se utiliza un baño térmico Equipar-Precisión modelo 184, de temperatura controlada, como se muestra en la Figura 3.6.



Figura 3.6 Instrumentación para el grabado químico mediante la metodología de TNS (PAD, IFUNAM).

Sistema de lectura

Se utiliza el sistema de lectura DIAS, que consta de un microscopio óptico Metalux MT-TISI, al cual se encuentra acoplada una cámara CCD RS-17 (Kyowa KMC-100A CCD), en paralelo se conecta un monitor Victor TM-14, la señal de la cámara se envía a una computadora por medio de un

aparato Grabber Mylex 33-ZXP (tarjeta de video), como se muestra en la Figura 3.7. La computadora cuenta con un programa de análisis de imágenes conocido como Mocha Image Analysis versión 1.2, 1987-1993 de Jandel Scientific.

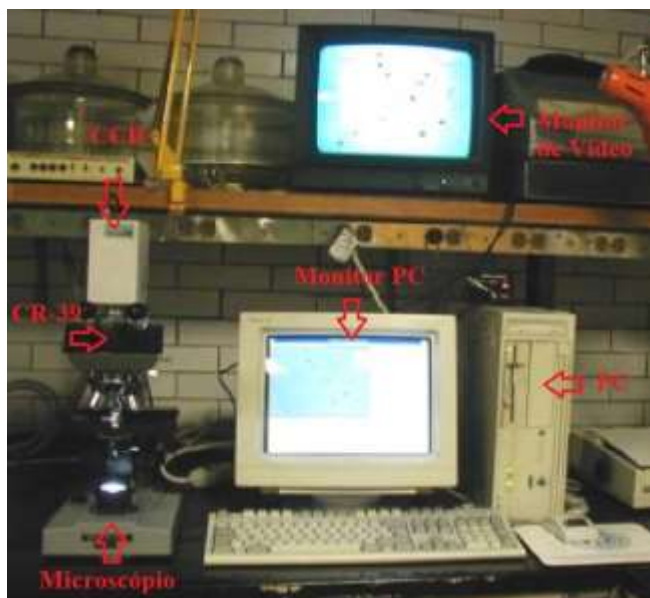


Figura 3.7 Imagen del sistema de lectura DIAS (PAD IFUNAM).

Siendo la instrumentación sencilla, a bajo costo y fácil de manipular, lo cual nos proporciona una ventaja sobre otros métodos de detección de neutrones.

*La mente que se abre a una nueva idea,
jamás volverá a su tamaño original.*
ALBERT EINSTEIN

—Capítulo IV—

Resultados y Discusión.

A partir de las lecturas de las trazas de los detectores, obtenemos el número de trazas/cm² (densidad de trazas δ), así como la eficiencia de detección por medio de la Metodología de Trazas Nucleares en Sólidos.

Los datos del flujo y eficiencia serán mostrados por separado para cada experimento.

Flujo de neutrones para la fuente ²⁴¹Am-Be.

Antes de calcular la eficiencia de detección de los diferentes experimentos, se requiere conocer el flujo de neutrones neto que irradia a los detectores, que puede ser calculado a partir del ángulo sólido (Ω), Figura 4.1, mediante la siguiente relación (Glenn F. Knoll et al., 1999):

$$\Omega = \frac{\pi a^2}{d^2} \quad (4.1)$$

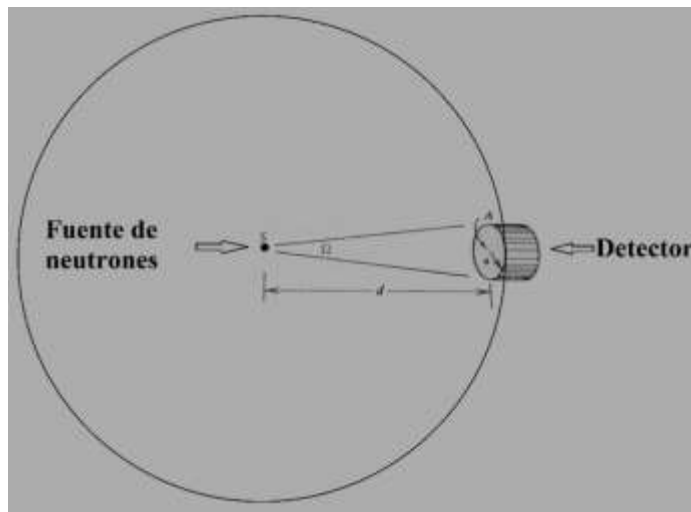


Figura 4.1 Esquema del ángulo sólido Ω en la irradiación.

donde s es la fuente de neutrones, el radio del detector es $a = 1.75\text{cm}$ y la distancia del detector a la fuente de neutrones es $d = 9.5\text{cm}$. Obteniendo un ángulo sólido (Ω) = 0.1066. Para calcular el flujo neto que irradia a los detectores, usamos la siguiente expresión:

$$\varphi_{\Omega} = \Omega \left(\frac{\varphi_{EAMA}}{4\pi} \right) \quad (4.2)$$

donde φ_{Ω} es el flujo neto que irradia a los detectores, el flujo de la fuente de $^{241}\text{Am-Be}$ de la marca EAMA es de $\varphi_{EAMA} = 1.13 \pm 0.03 \times 10^6 \text{ n s}^{-1} 4\pi$ y el ángulo sólido $\Omega = 0.1066$, obteniendo un flujo $\varphi_{\Omega} = 9.58 \times 10^3 \text{ n cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$.

Densidad de trazas.

El flujo de neutrones detectados está asociado con la densidad de trazas por unidad de área existente en el detector. Las imágenes analizadas tienen un área de 0.108 mm^2 , la cual es la misma para todos los campos examinados, ya que es una variable intrínseca del sistema de lectura, únicamente se modifica si se cambia los objetivos del microscopio o la calibración.

Se mostraran las densidades de trazas de los 4 experimentos por separado, con diferentes tiempos de irradiación a la fuente de neutrones: 3, 4.5, 6 y 9hrs.

Se grafica la densidad de trazas δ por horas de exposición a la fuente de $^{241}\text{Am-Be}$, para observar el comportamiento del detector CR-39 en los 4 experimentos, en función al tiempo de irradiación.

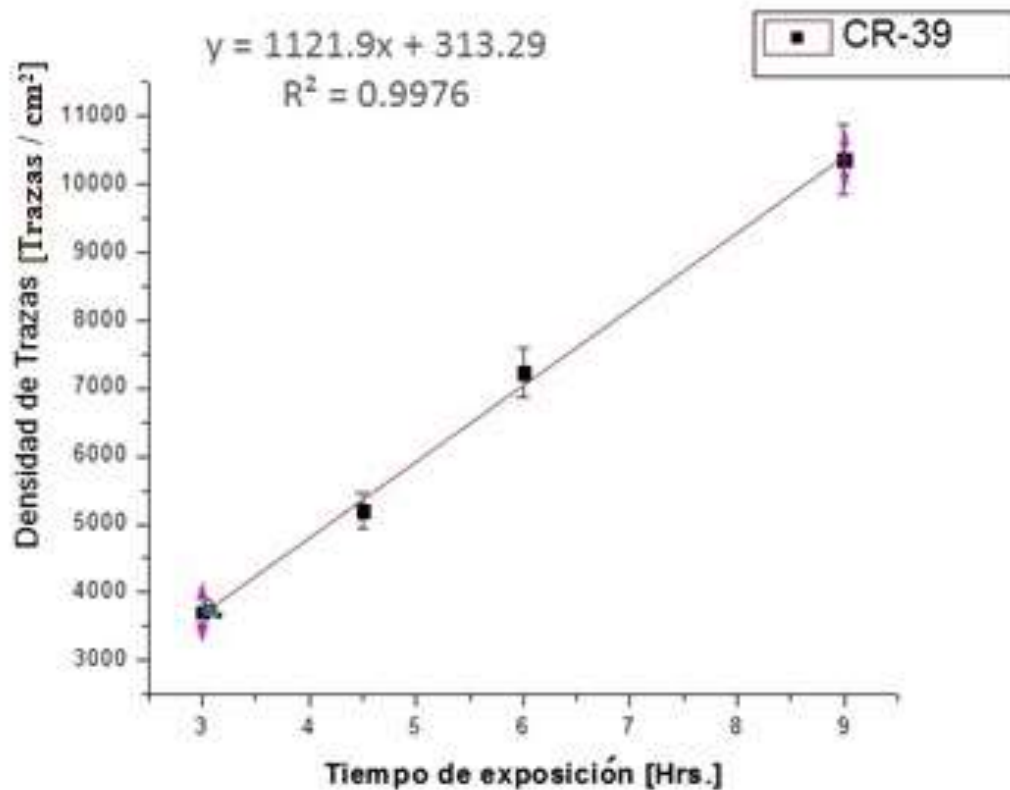
a) Dispositivo de detección sin convertidor.

En la Tabla 4.1 se muestra la densidad de trazas obtenidas para el experimento a).

Experimento a) Dispositivo de detección sin convertidor

Número de serie de los detectores	Tiempo de exposición a la radiación [Hrs.]	Densidad de trazas δ [Trazas / cm ²]
1557945	3	3711 ± 751
3976197	4.5	5201 ± 1003
3976096	6	7685 ± 1065
3976196	9	10362 ± 1332

Tabla 4.1. Densidad de trazas para el experimento a).



Grafica 4.1. Comportamiento del detector CR-39 para experimento a) en función al tiempo de exposición a la fuente de Am²⁴¹-Be.

La densidad de trazas δ , es equivalente a definirla como el flujo detectado en el CR-39 ya que las trazas en el material corresponden a protones de las reacciones (n, p), de donde cada neutrón proviene de la fuente de ²⁴¹Am-Be.

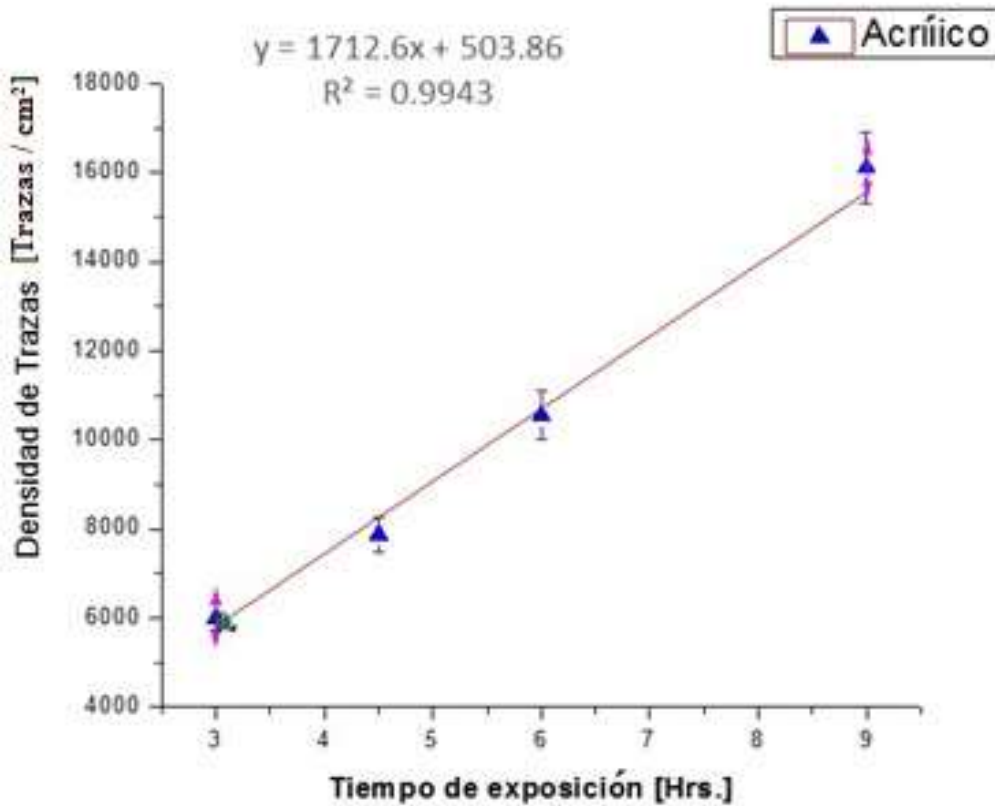
b) Dispositivo de detección con convertidor de Acrílico.

En la Tabla 4.2 se muestra la densidad de trazas obtenidas para el experimento b).

Experimento b) Dispositivo de detección con convertidor de Acrílico

Número de serie de los detectores	Tiempo de exposición a la radiación [Hrs.]	Densidad de trazas δ [Trazas / cm ²]
3976333	3	4907 ± 743
3976194	4.5	7879 ± 962
3976101	6	9722 ± 1363
3976195	9	16113 ± 1166

Tabla 4.2. Densidad de trazas para el experimento b).



Grafica 4.2. Comportamiento del CR.39 para el experimento b), en función al tiempo de exposición a la fuente de Am²⁴¹-Be.

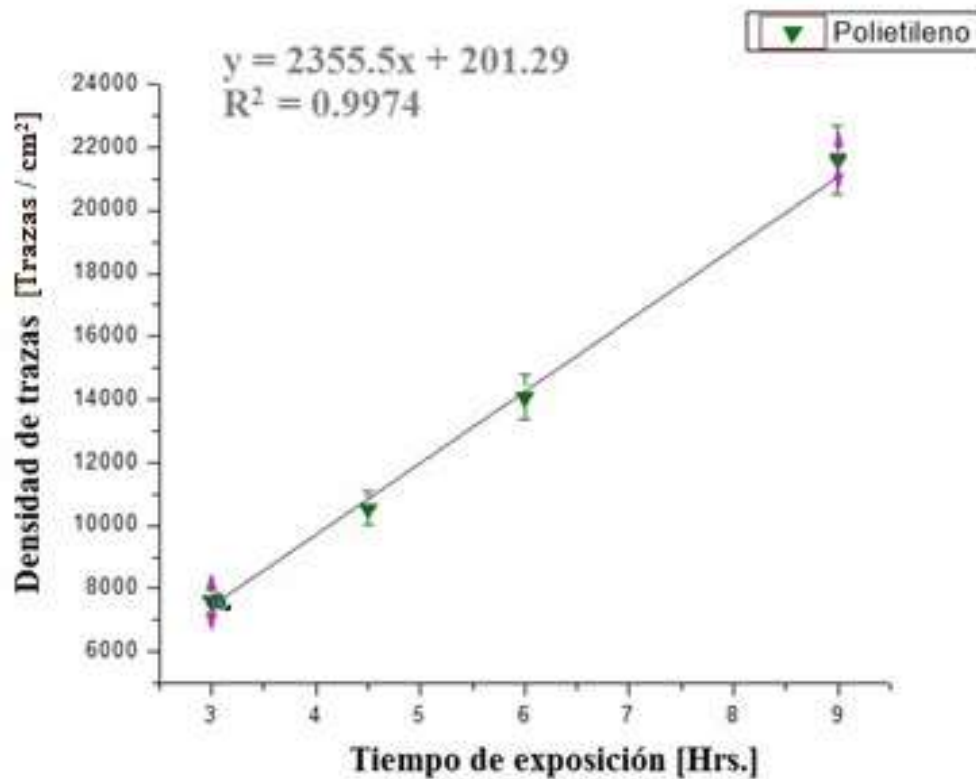
c) Dispositivo de detección con convertidor de Polietileno.

En la Tabla 4.3 se muestra la densidad de trazas obtenidas para el experimento c).

Experimento c) Dispositivo de detección con convertidor de Polietileno

Número de serie de los detectores	Tiempo de exposición a la radiación [Hrs.]	Densidad de trazas δ [Trazas / cm ²]
3976336	3	8016 ± 889
3976337	4.5	10537 ± 1298
3976094	6	14074 ± 1787
3976193	9	23597 ± 1912

Tabla 4.3. Densidad de trazas para el experimento c).



Grafica 4.3. Comportamiento del CR.39 para el experimento c), en función al tiempo de exposición a la fuente de Am²⁴¹-Be.

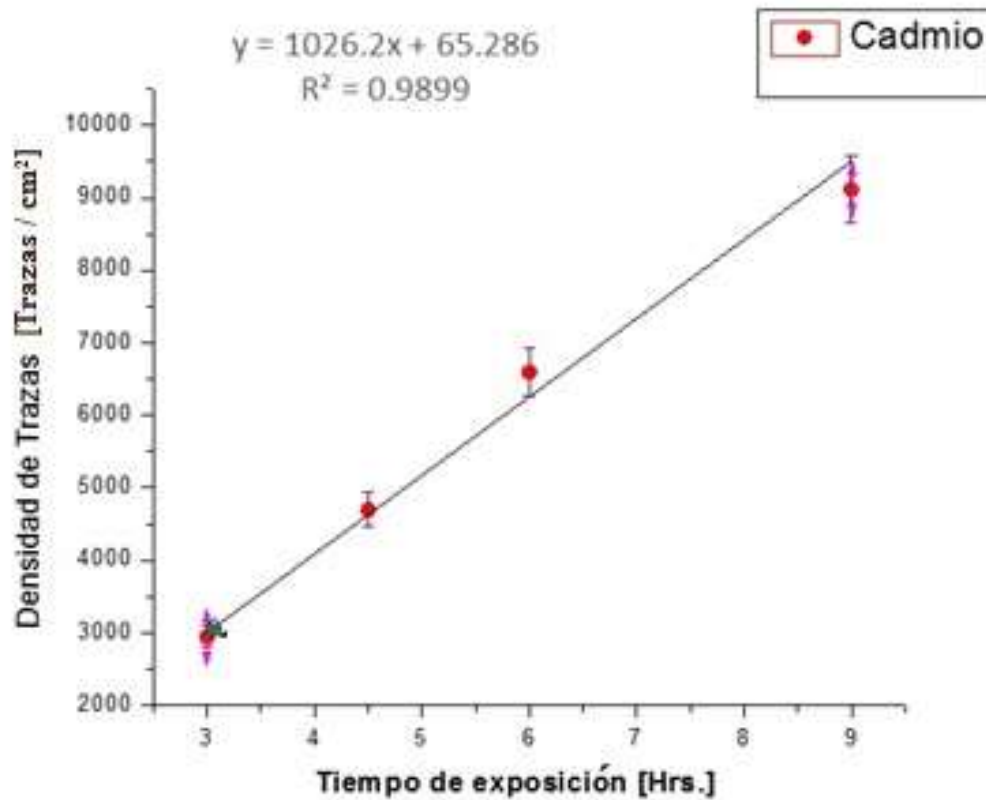
d) Dispositivo de detección con frenador de Cadmio.

Se muestra en la Tabla 4.4 la densidad de trazas obtenidas para el experimento d).

Experimento d) con Cadmio para frenar neutrones

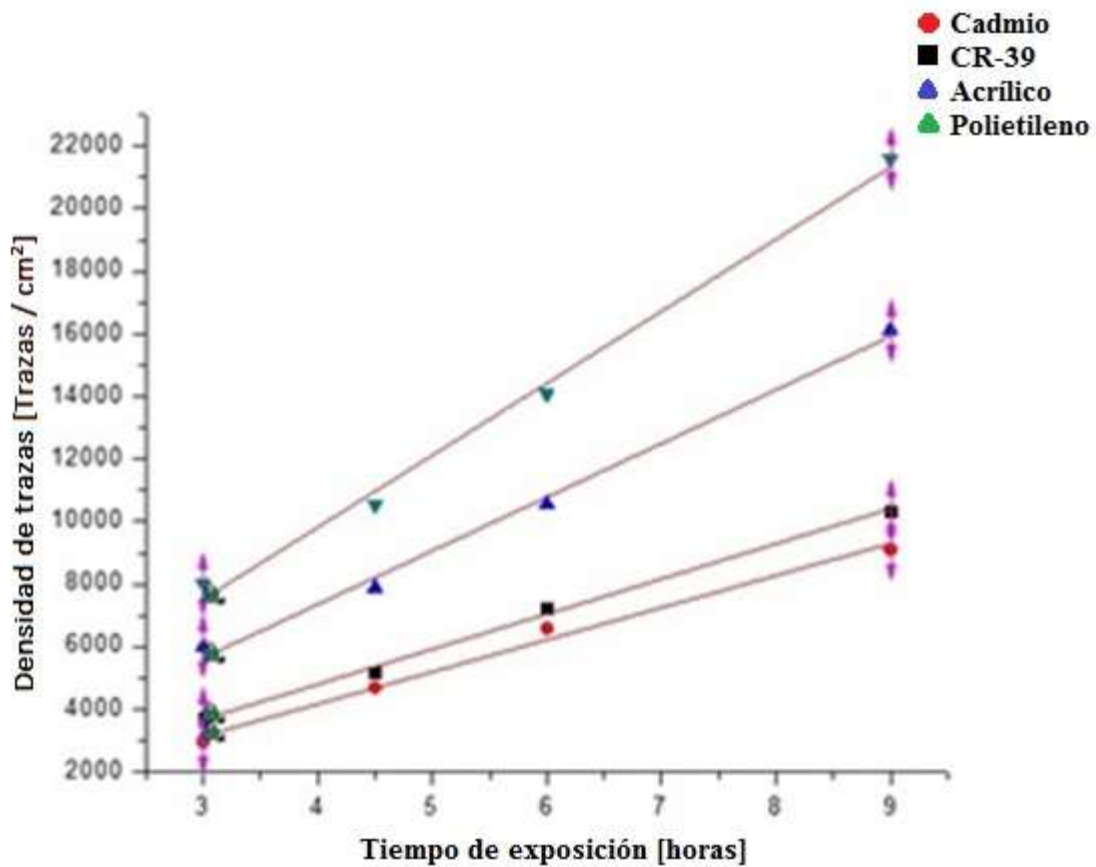
Número de serie de los detectores	Tiempo de exposición a la radiación [Hrs.]	Densidad de trazas δ [Trazas / cm ²]
1557946	3	2948 ± 203
3976199	4.5	4697 ± 1091
3976084	6	6593 ± 898
3976198	9	9112 ± 1639

Tabla 4.4. Densidad de trazas para el arreglo d).



Grafica 4.4. Comportamiento del detector (CR-39) para el experimento d), en función al tiempo de exposición a la fuente de Am²⁴¹-Be.

A continuación se presenta la Grafica 4.5, en la que se comparan los 4 experimentos antes mencionados.



Grafica 4.5 Comparación de respuesta de los cuatro diferentes experimentos.

Se observa que las respuestas de detección del material sensible CR-39, son distintas, pero básicamente paralelas para cada uno de los cuatro experimentos, estos resultados como se mencionó anteriormente, se deben a que, cuando se tiene el convertidor de Acrílico o Polietileno obtenemos una densidad de trazas mayor, ya que tienen un alto contenido de H¹, obteniendo como resultado un mayor número de protones. En el caso de la placa de Cadmio (Cd) los neutrones rápidos se frenan, obteniendo menos flujo de neutrones llegando al material sensible.

Podemos observar una ganancia lineal en todos los detectores CR-39 en la región de 3 a 9 horas ($\varphi_{3hrs.} = 1.03464 \times 10^8 n cm^{-2}$, $\varphi_{9hrs.} = 3.10392 \times 10^8 n cm^{-2}$) de irradiación a la fuente de ²⁴¹Am-Be, la pendiente es característica para cada detector con diferente convertidor, ya

que está relacionada con la eficiencia y los efectos acumulativos del material. Obteniendo de esta manera un comportamiento característico para cada experimento y para condiciones de grabado químico específicas.

Eficiencia de detección.

El valor de la eficiencia \mathcal{E} se calcula a partir de la densidad de trazas y el flujo total, donde este último (φ_T) se refiere al flujo que recibe el detector durante todo el tiempo que se encuentra sometido a la irradiación.

$$\varphi_T = \varphi_{\Omega} t \quad (4.3)$$

$$\mathcal{E} = \frac{\delta}{\varphi_T} \quad (4.6)$$

Sustituyendo los valores de la densidad de trazas de los detectores CR-39 δ y el flujo total de la fuente φ_T , obtenemos la eficiencia para cada experimento.

Se realiza un promedio para la eficiencia de detección de cada experimento (Tabla 4.6).

Tabla 4.6. Eficiencia promedio de los diferentes experimentos.

Detector	Eficiencia de detección σ [trazas/neutrón]
CR-39 sin convertidor	$3.45 \times 10^{-5} \pm 1.25 \times 10^{-6}$
CR-39 con convertidor de Acrílico	$4.91 \times 10^{-5} \pm 2.53 \times 10^{-6}$
CR-39 con convertidor de Polietileno	$7.0 \times 10^{-5} \pm 2.14 \times 10^{-6}$
CR-39 con frenador de Cadmio	$3.0 \times 10^{-5} \pm 1.4 \times 10^{-6}$

Se puede observar que el experimento más eficiente es con convertidor de polietileno debido a su alto contenido de H¹. Los valores de eficiencia del dispositivo de detección pueden ser comparados con los reportes de otros autores tales como (Khan y Khan, 1980; El-Sersy et al., 2004).

Se encontró que la radiación de fondo tiene un número de trazas de 148 ± 17 , la cual fue restada de todos los detectores CR-39.

Aplicaciones

Entre las principales aplicaciones se encuentran:

- La medición de flujos de neutrones en reactores nucleares (Harvey et al., 1998; Espinosa et al. 1996)
- Para la dosimetría de personal en instalaciones con flujo de neutrones y otras partículas (Harvey et al., 1998; Puglesi et al., 2003).
- Para la fabricación de microfiltros (Fleisher et al. 1998).
- En el área de física espacial, con mediciones de dosis en naves aéreas y espaciales (Fleisher et al. 1998).
- Medición de flujo de neutrones de equipos de radiografía neutrónica en hospitales y la industria (Fleisher et al. 1998; Lowenthal et al., 2001).
- En física de altas energías y rayos cósmicos, se pueden observar trazas en meteoritos (Durani y Bull, 1987; Shavrin et al., 2002).
- En física nuclear, para la identificación de productos de reacciones para altas y bajas energías (Freje et al., 2002).

Las diversas aplicaciones, lo accesible del método, el tiempo requerido, su bajo costo y que es el indicado en campos mixtos, nos sugiere la posibilidad de ampliar aún más el rango de aplicación de este método, teniendo en cuenta que sus abundantes posibilidades dejan abierta la puerta a nuestra imaginación.

Conclusiones

Se observó la detección de neutrones de la fuente de $^{241}\text{Am-Be}$ por el método de Trazas Nucleares en Sólidos, en el detector plástico denominado CR-39.

El uso de convertidores como el acrílico y polietileno mejoran la eficiencia de detección de la radiación ionizante en el C-39, debido a que al ser materiales muy hidrogenados, se aumenta el número de reacciones (n,p). En el caso del Cadmio, se frenan y/o bloquean los neutrones rápidos, por lo cual disminuye la eficiencia de detección en el material sensible.

Para los detectores CR-39 de trazas nucleares en sólidos la eficiencia de detección es de 10^{-5} , que comparada con la eficiencia de otros métodos electrónicos se podría considerar baja, pero dada su reproducibilidad, su bajo costo y su fácil manejo, se puede considerar un método alternativo para la detección de neutrones.

Como ejemplo de ello: en la Unión Europea desde el año de 1998, se estableció oficialmente para la dosimetría de neutrones, la metodología de Trazas Nucleares en Sólidos (J.R. Harvey, R.J. Tanner, W.G. Alberts, et al 1998). En Corea en el año 2005 fue utilizado el CR-39 para la construcción de un sistema de monitoreo ambiental para detectar radón por medio de TNS (Gil H.A. et al, 2005). En Egipto se utiliza la metodología de TNS a partir del año 2007 para detectar la contaminación de partículas α (Zaki M. F. et al, 2007).

*Soy de las que piensan que la ciencia tiene
una gran belleza. Un científico en su laboratorio
no es solo un técnico: es también un niño colocado ante
fenómenos naturales que le impresionan
como un cuento de hadas.*

MARIE CURIE

Anexo I* Tabla de constantes físicas

Constantes físicas para el neutrón, protón y partículas α .

<i>Cantidad</i>	<i>Símbolo</i>	<i>Valor</i>	<i>Unidad</i>
Masa del neutrón	m_n	$1.67492716(13) \times 10^{-27}$	kg
en u, $m_n = A_r(n)$		1.00866491578(55)	u
energía equivalente	$m_n c^2$	$1.50534946(12) \times 10^{-10}$	J
en MeV		939.565330(38)	MeV
Neutrón- electrón proporción de masa	m_n / m_e	1838.6836550(40)	
neutrón- muón proporción de masa	m_n / m_μ	8.89248478(27)	
neutrón- tau proporción de masa	m_n / m_τ	0.528722(86)	
neutrón- protón proporción de masa	m_n / m_p	1.00137841887(58)	
neutrón masa molar $N_A m_n$	M_n	$1.00866491578(55) \times 10^{-3}$	kg mol ⁻¹
neutrón longitud de onda Compton $h / m_n c$	$\lambda_{c,n}$	$1.319590898(10) \times 10^{-15}$	m
Neutrón momento magnético	μ_n	$-0.96623640(23) \times 10^{-26}$	J T ⁻¹
a proporción con el magnetón de Bohr	μ_n / μ_B	$-1.04187563(25) \times 10^{-3}$	
Proporción con el magnetón nuclear	μ_n / μ_N	-1.91304272(45)	
Neutrón g-factor $2\mu_n / \mu_N$	g_n	-3.82608545(90)	
Neutrón -electrón			
momento magnético proporción	μ_n / μ_e	$1.04066882(25) \times 10^{-3}$	
Neutrón-protón			
momento magnético proporción	μ_n / μ_p	-0.68497934(16)	
Neutrón giromagnético proporción $2 \mu_n /\hbar$	γ_n	$1.83247188(44) \times 10^8$	s ⁻¹ T ⁻¹
Masa del protón	m_p	$1.67262158(13) \times 10^{-27}$	kg
en u, $m_p = A_r(p)$		1.00727646688(13)	u
Energía equivalente	$m_p c^2$	$1.50327731(12) \times 10^{-10}$	J
en MeV		938.271998(38)	MeV
Protón- electrón proporción de masa	m_p / m_e	1836.1526675(39)	
Protón- muón proporción de masa	m_p / m_μ	8.88024408(27)	
Protón- tau proporción de masa	m_p / m_τ	0.527994(86)	
Protón- neutrón proporción de masa	m_p / m_n	0.99862347855(58)	
Protón masa molar $N_A m_p$	M_p	$1.00727646688(13) \times 10^{-3}$	kg mol ⁻¹
Protón longitud de onda Compton $h / m_p c$	$\lambda_{c,p}$	$1.321409847(10) \times 10^{-15}$	m
protón momento magnético	μ_p	$1.410606633(58) \times 10^{-26}$	J T ⁻¹
a proporción con el magnetón de Bohr	μ_p / μ_B	$1.521032203(15) \times 10^{-3}$	
Proporción con el magnetón nuclear	μ_p / μ_N	2.792847337(29)	
protón g-factor $2\mu_p / \mu_N$	g_p	5.585694675(57)	
protón- neutrón			
momento magnético proporción	μ_p / μ_n	-1.45989805(34)	
protón giromagnético proporción $2\mu_p / \hbar$	γ_p	$2.67522212(11) \times 10^8$	s ⁻¹ T ⁻¹

<i>Cantidad</i>	<i>Símbolo</i>	<i>Valor</i>	<i>Unidad</i>
Masa de partícula alfa	M_α	$6.64465598(52) \times 10^{-27}$	kg
en u, $m_\alpha = A_r(\alpha)$		4.0015061747(10)	u
energía equivalente	$M_\alpha c^2$	$5.97191897(47) \times 10^{-10}$	J
en MeV		3727.37904(15)	MeV
partícula alfa-electrón proporción de masa	m_α / m_e	7294.299508(16)	
partícula alfa-protón proporción de masa	m_α / m_p	3.972599684(11)	
partícula alfa masa molar $N_A m_\alpha$	M_α	$4.0015061747(10) \times 10^{-3}$	kg mol ⁻¹
Velocidad de la luz en el vacío	c	299792458	m s ⁻¹
Constante de permeabilidad	μ_0	$4\pi \times 10^{-7}$	N A ⁻²
		$=12.56637 \times 10^{-7}$	N A ⁻²
Constante dieléctrica $1 / \mu_0 c^2$	ϵ_0	8.85418×10^{-12}	F m ⁻¹
Impedancia del vacío $\mu_0 c$	Z_0	376.730313461	Ω
Constante gravitacional	G	$6.673(10) \times 10^{-11}$	m ³ kg ⁻¹ s ⁻²
	$G / \hbar c$	$6.707(10) \times 10^{-39}$	(GeV/c ²) ⁻²
Constante de Planck	h	$6.62606876(52) \times 10^{-34}$	J s
en eV s		$4.13566727(16) \times 10^{-15}$	eV s
$h / 2\pi$	\hbar	$1.054571596(82) \times 10^{-34}$	J s
en eV s		$6.58211889(26) \times 10^{-16}$	eV s
Masa de Planck $(\hbar c / G)^{1/2}$	m_p	$2.1767(16) \times 10^{-8}$	kg
Longitud de Planck $\hbar / m_p c = (\hbar c / G^3)^{1/2}$	l_p	$1.6160(12) \times 10^{-35}$	m
Tiempo de Planck $l_p / c = (\hbar c / G^3)^{1/2}$	t_p	$5.3906(40) \times 10^{-44}$	s
Carga elemental	e	$1.602176462(63) \times 10^{-19}$	C
Masa del electrón	m_e	$9.10938188(72) \times 10^{-31}$	kg
en MeV		0.510998902(21)	MeV
Constante de Boltzmann	k	$1.3806503(24) \times 10^{-23}$	J K ⁻¹
en eV K ⁻¹		$8.617342(15) \times 10^{-5}$	eV K ⁻¹

*Referencia (Mohr y Taylor, 2005)

Anexo II** Reacciones nucleares para el detector CR-39

Entre otras reacciones posibles en un intervalo de energía de 1 a 15 MeV con núcleos blanco como ^1H , ^{12}C y ^{16}O .

1. $^1\text{H} (n, p)$
2. $^1\text{H} (n, e) ^1\text{H}$
3. $^1\text{H} (n, \gamma) ^2\text{H}$
4. $^{12}\text{C} (n, ^{12}\text{C})$
5. $^{12}\text{C} (n, e) ^{12}\text{C}$
6. $^{12}\text{C} (n, n + p) ^{11}\text{B}$
7. $^{12}\text{C} (n, n + 2\alpha) ^4\text{He}$
8. $^{12}\text{C} (n, \gamma) ^{13}\text{C}$
9. $^{12}\text{C} (n, p) ^{12}\text{B}$
10. $^{12}\text{C} (n, \alpha) ^{11}\text{B}$
11. $^{12}\text{C} (n, \alpha) ^9\text{Be}$
12. $^{16}\text{O} (n, ^{16}\text{O})$
13. $^{16}\text{O} (n, e) ^{16}\text{O}$
14. $^{16}\text{O} (n, n') ^{16}\text{O}$
15. $^{16}\text{O} (n, 2n) ^{15}\text{O}$
16. $^{16}\text{O} (n, n + \alpha) ^{12}\text{C}$
17. $^{16}\text{O} (n, n + 3\alpha) ^4\text{He}$
18. $^{16}\text{O} (n, n + p) ^{15}\text{N}$
19. $^{16}\text{O} (n, n + D) ^{14}\text{N}$
20. $^{16}\text{O} (n, 2n + p) ^{14}\text{N}$
21. $^{16}\text{O} (n, n + 2p) ^{14}\text{C}$
22. $^{16}\text{O} (n, n + p + \alpha) ^{11}\text{B}$

23. $^{16}\text{O} (n, n') ^{16}\text{O}$
24. $^{16}\text{O} (n, \gamma) ^{17}\text{O}$
25. $^{16}\text{O} (n, p) ^{16}\text{N}$
26. $^{16}\text{O} (n, D) ^{15}\text{N}$
27. $^{16}\text{O} (n, T) ^{14}\text{N}$
28. $^{16}\text{O} (n, \alpha) ^{13}\text{C}$
29. $^{16}\text{O} (n, 2\alpha) ^9\text{Be}$
30. $^{16}\text{O} (n, p + \alpha) ^{12}\text{B}$
31. $^{16}\text{O} (n, p) ^{16}\text{N}$
32. $^{16}\text{O} (n, D) ^{15}\text{N}$
33. $^{16}\text{O} (n, T) ^{14}\text{N}$
34. $^{16}\text{O} (n, \alpha) ^{13}\text{C}$

Donde la notación es la siguiente: neutrón (n), protón (p), partícula alfa (α), electrón (e), radiación gamma (γ), deuterio (D) y tritio (T).

**Referencia (NNDC-BNLD, 2006)

Anexo III* Procedimiento para lectura de las Trazas

El detector CR-39 se coloca en el microscopio óptico estándar con un filtro azul, se obtienen imágenes de 0.108 mm^2 para una lente de 200x.

Una vez seleccionada la imagen es capturada por medio del programa Mocha, en la barra de herramientas, en la función *Image* y después con la función *Capture Control* aparecerá un ventana en donde se observa la imagen que se observa en el monitor de video y posteriormente se pulsa en la función *Capture* y la imagen se puede guardar en un archivo designado.

Para el conteo automático, primero se marcan las trazas en la imagen, se selecciona en la barra de herramientas *Threshold Image*, se marcan de rojo con *Overlay 1 (Red)*, y se selecciona la escala de grises adecuada, ya seleccionada la escala de grises finalizamos con *Add Treshold*, con ello las trazas han sido marcadas.

Para el conteo de las trazas, en la barra de herramientas se selecciona *Automatic Measurement*, se despliega una ventana, en la columna *Measurement* se elige la opción *Number of Objects*, se añade esta opción con *Add*, para finalizar en el lado izquierdo inferior de la ventana se selecciona *Objects Number*, *Overlary 1 (Red)*, y realiza el conteo con *Full-Count*. Finalmente, sobre la imagen aparece el número de cada traza y el total de las trazas contadas.

Anexo IV **** Tablas del número de trazas en el detector

Se muestra el Numero de trazas encontradas en el detector CR-39 por experimento, en cada uno de los 25 campos, además se muestra la suma total de trazas, el promedio de trazas y la desviación estándar.

A) Dispositivo de detección sin convertidor

No. De campos	No. 1557945	No. 3976197	No. 3976096	No. 3976196
1	5	6	8	12
2	3	5	9	13
3	4	5	11	11
4	4	6	7	13
5	6	7	9	11
6	3	6	7	10
7	4	6	8	13
8	4	8	10	11
9	5	6	8	11
10	4	5	8	10
11	4	4	9	12
12	3	7	7	11
13	5	5	10	13
14	3	6	9	12
15	4	5	8	12
16	5	6	8	10
17	4	6	9	11
18	4	7	7	14
19	3	5	10	11
20	4	5	8	9
21	3	5	8	10
22	4	6	9	11
23	4	4	8	9
24	5	7	11	8
25	3	4	9	12
Σ	100	140	207	280
promedio	4	5.6	8.29	11.2
desv. est.	0.81	1.08	1.15	1.44
desv. est. %	20.25%	19.28%	13.87%	12.86%

B) Dispositivo de detección con convertidor de Acrílico

No. De campos	No. 3976333	No. 3976194	No. 3976101	No. 3976195
1	7	9	11	18
2	5	6	13	17
3	5	10	9	17
4	6	8	12	19
5	5	9	9	16
6	5	10	10	19
7	6	7	11	17
8	5	9	9	17
9	7	9	10	18
10	5	8	11	17
11	5	10	8	20
12	4	8	10	18
13	5	8	12	18
14	6	9	10	17
15	5	8	11	20
16	5	8	9	16
17	4	10	13	17
18	5	8	11	17
19	6	7	10	16
20	5	8	10	17
21	5	8	8	19
22	7	9	11	17
23	5	8	9	17
24	5	10	13	15
25	5	9	12	16
Σ	132	213	262	435
promedio	5.28	8.52	10.48	17.4
desv. est.	0.8	1.04	1.47	1.26
desv. est. %	15.15%	12.21%	14.03%	7.24%

C) Dispositivo de detección con convertidor de Polietileno

No. de campos	No. 3976336	No. 3976337	No. 3976094	No. 3976193
1	7	10	17	22
2	6	11	13	25
3	8	13	16	26
4	7	9	17	24
5	7	10	19	24
6	6	11	17	27
7	7	11	15	27
8	5	12	15	25
9	8	11	16	26
10	7	10	13	25
11	6	11	17	26
12	9	9	16	24
13	7	11	13	27
14	7	12	14	25
15	6	12	16	26
16	8	8	15	24
17	7	13	13	25
18	5	11	17	27
19	7	10	15	25
20	8	9	13	27
21	6	11	18	26
22	7	11	16	26
23	7	8	15	25
24	6	11	13	27
25	6	13	11	26
Σ	170	268	380	637
promedio	6.8	10.72	15.2	25.48
desv. est.	0.96	1.4	1.93	1.26
desv. est. %	14.12%	13.06%	12.70%	3.70%

D) **Dispositivo de detección con frenador de Cadmio**

No. de campos	No. 1557946	No. 3976199	No.3976084	No. 3976198
1	3	4	7	11
2	4	5	8	10
3	3	5	6	7
4	5	6	6	12
5	3	5	8	9
6	3	7	6	14
7	3	5	7	9
8	4	5	7	10
9	5	4	9	11
10	2	5	6	9
11	4	4	6	9
12	3	6	9	8
13	2	5	8	11
14	3	7	8	10
15	4	7	7	9
16	3	5	8	10
17	2	5	6	9
18	4	4	7	9
19	3	8	7	8
20	4	6	6	7
21	2	5	8	9
22	3	5	8	13
23	3	4	7	9
24	2	3	7	10
25	3	4	6	13
Σ	80	127	178	246
promedio	3.2	5.08	7.12	9.84
desv. est.	0.86	1.18	0.97	1.77
desv. est. %	27%	23.23%	13.62%	17.99%

Anexo V* Imágenes de las trazas para cada detector.

a) Dispositivo de detección sin convertidor

No. 1557945



No. 3976197



No. 3976096



No. 3976196



b) Dispositivo de detección con convertidor de Polietileno

No. 3976336



No. 3976337



No. 3976094

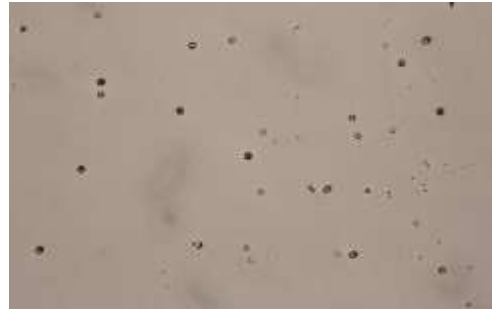


No. 3976193



c) Dispositivo de detección con convertidor de Acrílico

No. 3976195



d) Dispositivo con absorvedor de Cadmio

No. 3976333



No. 1557946



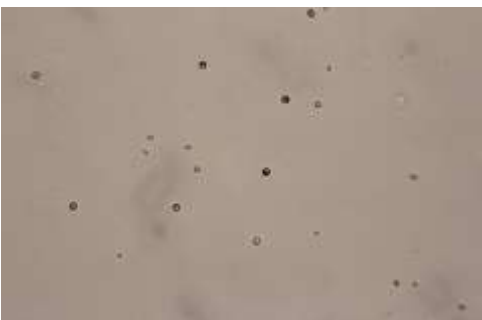
No. 3976194



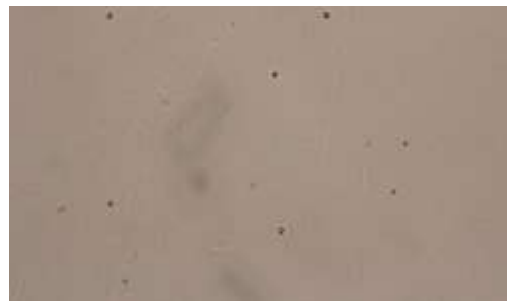
No. 3976199



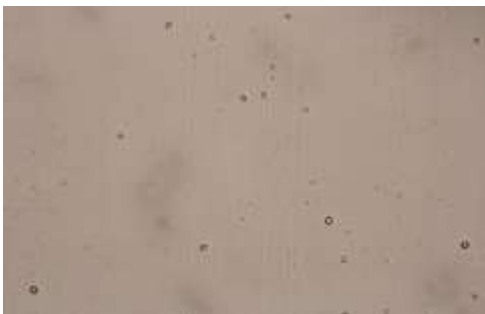
No. 3976101



No.3976084



No. 3976198



Anexo VI***** Definiciones

Actividad: número de desintegraciones que se producen por unidad de tiempo.

Antineutrino electrónico: las antipartículas de los neutrinos, son partículas neutras, tienen un spin de $1/2$, y son parte de la familia de partículas de los leptones.

CAS: El número de registro CAS, o simplemente número CAS, es un identificador numérico permanente, inconfundible y único que otorga el Servicio de Resúmenes Químicos (Chemical Abstract Service o CAS) de la Sociedad Química Americana a cada sustancia descrita en la literatura, incluyendo a los plaguicidas.

Decaimiento nuclear: es un proceso en el que un núcleo inestable se transforma en uno más estable, emitiendo partículas y/o fotones y liberando energía durante el proceso.

Fisión nuclear: La fisión ocurre cuando un núcleo pesado se divide en dos o más núcleos pequeños, además de algunos subproductos como neutrones libres, fotones (generalmente rayos gamma) y otros fragmentos del núcleo como partículas alfa y beta.

Fuerza nuclear débil: es una de las cuatro fuerzas fundamentales de la naturaleza. Esta fuerza es la responsable de fenómenos naturales como la desintegración radiactiva. La palabra "débil" deriva del hecho que un campo de fuerzas es de 10^{13} veces menor que la interacción nuclear fuerte

Ionización: fenómeno mediante el cual se producen iones, estos son átomos o moléculas cargadas eléctricamente debido al exceso o falta de electrones respecto a un átomo o molécula neutra.

Isotrópico: que tiene propiedades que son idénticas en todas direcciones

Mol: es la unidad con que se mide la cantidad de sustancia, una de las siete magnitudes físicas fundamentales del Sistema Internacional de Unidades. $1 \text{ mol} = 6,022\ 141\ 29\ (30) \times 10^{23}$ átomos.

Neutrino electrónico: es una partícula elemental que pertenece al grupo de los leptones. Tiene spin $\frac{1}{2}$, y una masa como mucho un millón de veces menor que la del electrón, pero no nula.

Positrón: es una partícula elemental, antipartícula del electrón. Posee la misma cantidad de masa que el electrón y carga eléctrica; sin embargo, esta es positiva.

Radiación Gamma (γ): es un tipo de radiación electromagnética, y por tanto constituida por fotones, producida por desexcitación de un nucleón de un nivel o estado excitado a otro de menor energía y por desintegración de isótopos radiactivos.

Radiación X: radiación electromagnética, invisible para el ojo humano, La longitud de onda está entre 10 a 0,01nanómetros, correspondiendo a frecuencias en el rango de 30 a 30000 PHz

Sección eficaz (σ): es una medida de la interacción entre proyectiles o partículas lanzadas contra un centro dispersor, es una magnitud escalar que tiene como unidad, unidades de superficie, en ciertos casos representa la sección transversal efectiva vista por los proyectiles al aproximarse al blanco.

Termalización: neutrones libres, estos reducen su velocidad de manera gradual como consecuencia de los choques de con los núcleos de los átomos vecinos. Es un fenómeno típico de los procesos que tienen lugar en los reactores de las centrales nucleares

Vida media: promedio de vida de un núcleo o de una partícula subatómica libre antes de desintegrarse.

Referencias

- Aguilera, E.F., Hernández E. and Hirsch J. (2005). IV Escuela mexicana de física nuclear. SMF. México, D.F.
- Al-Jarallah, M.I., Abu- Jarad, F., Hallak, A.B., Coban, A. and Islam M. (1993). Investigation of proton response of CR-39. Nucl. Instrum. Methods B73, 507-511.
- Azorin, N.J. (1997). Introducción a la física nuclear. México, Ediciones Científicas AZVEG.
- Balnford, J.L. Jr., Walker R.M. and Wefel J.P. (1970). Calibration of plastics track detectors for use in cosmic ray experiments. Rad. Effects 5,41-45.
- Becker, K. (1967). Alpha particle registration in plastics and its applications for Radon and neutron personnel dosimetry. Health Phys. 16, 113-123.
- Becker, K.(1967). Direct fast neutron interactions with polymers. Oak Ridge National Laboratory Rept. 4446, p. 226.
- Belafrites, A., Nourreddine, A., Mouhssine, D., Nachab, A. and Boucenna, A. (2005). Resonance of PN3 dosimeters to ²³⁹Pu-Be neutrons. Radiat. Meas. 39, 241-244.
- D'Errico, F., Weiss, M., Luszik-Badra, M., Matzke, M., Bernardi, L. and Cecchi, A. (1997). A CR-39 track image analyzer for neutrón spectrometry. Radiat. Meas. 28(1-6), 823-830.
- Dostal, J. and C. Elson. (1980). General principles of neutron activation analysis. Mineralogical association of Canada short course in neutrón activation analysis in the geosciencies. Ed. G. K. Muecke, Canada.
- Durrani, S.A., R.K. Bull. (1987). Solid state nuclear track detection. Principles, methods and applications. Pergamon Press. Int. Ser. Nat. Phil. Vol. 111.
- El-Sersy, A. R., Khaled, N. E. and Eman, S.A. (2004). Determination of CR-39 detection efficiency for fast neutron registration and absolute neutrón dosimetry. Nucl. Instrum. Methods B215, 443-448.
- El-Sersy, A. R., E man, S.A. and Khaled, N.E. (2004). Fast neutrón spectroscopy using CR-39 track detectors. Nucl. Instrum. Methods 226, 345-350.
- Espinosa, G. (1994). Trazas Nucleares en Sólidos. UNAM, ISBN. Ed. E.A.I, México.
- Espinosa, G., Gammage, R.B., Meyer, K.E., and Dudney, C.S. (1996). Nuclear track analysis by digital imaging. Radiat. Prot. Dosim. 66(1-4), 363-366.
- Espinosa, G., Jacobson, I., Golzarri, J.I., Vázquez, C., Frangoso, R. and Santos, E. (2002). Analysis of the formed track in solid state materials using atomic force microscopy. Radiat. Prot. Dosim. 101(1-4), 89-92.
- Fernández, F., Domingo, C., Baixeras, C., Liguera, E., Zamani, M., and Debeauvais, M. (1991). Fast neutron dosimetry with CR-39 using electrochemical etching. Nuclear Track and Radiat. Meas. 19, 467-470.

- Fleischer, R.L., Price P.B. (1963). Charged particle tracks in glass. *J. Appl. Phys.* 34, 2903-2904.
- Fleischer, R.L., Price P.B., Walker R.M. and Hubbard E.L. (1964). Track registration in various solid state nuclear track detectors. *Phys. Rev.* 133^a, 1443-1449.
- Fleischer, R.L., Price P.B. and Walker R.M. (1965). Solid state track detectors: Applications to nuclear science and geophysics. *Ann. Rev. Nuc. Sci.* 15, 1-28.
- Fleischer, R.L., Price P.B. and Woods R.L. (1969). Nuclear particle track identification in inorganic solids. *Phys. Rev.* 88, 563-567.
- Fleischer, R.L., Buford Price P. and Walker R.M. (1975). *Nuclear tracks in solids: principles and applications.* Berkeley: University of California.
- Fleischer, R.L. (1998). *Tracks to innovation: nuclear tracks in science and technology.* New York: Springer.
- Frank, A.L. and Benton E.V. (1970). Measurements of ⁴He particles and recoil nuclei produced by high energy neutrons in plastics. *Proc. Seventh Inter. Colloq. Corpuscular Photography and visual solid detectors, Barcelona,* 441-446.
- Frank, A.L. and Benton E.V. (1972). Development of a high energy neutrón detector. Defense Nuclear Agency Rept. 2918F.
- Frenje, J.A., Li, C.K., Séguin, F.H., D.G., Kurebayashi, S., Petrasso, R.D., Roberts, S., Glebov, Yu. V., Meyerhofer, D.D., Sangster, T.C., Soures, J.M., Stoeckl, C., Schmid, G.J. Lerche, R.A. (2002). Absolute measurements of neutron yields from DD and DT implosions at the OMEGA laser facility using CR-39 track detectors. *Rev. Sci. Instrum.* 73(7), 2597.
- Gammage, R.B. and Espinosa, G. (1997). Digital imaging system for track measurements. *Radiat. Meas.* 28(1-6), 835-838.
- Garduño R. E. (2008). *Detección de neutrones mediante la Metodología de Trazas Nucleares en Solidos.* Tesis, Facultad de Ciencias. UNAM
- Hanzen, F. and Martín A.D. (1984). *Quarks and Leptons: An Introductory course in modern particle physics.* John-Wiley and Sons. Canada.
- Harvey, J.R., Tanner, R.J., Alberts, W.G., Bartlett, D.T., Piesch, E.K.A. and Schraube, H. (1998). The contribution of EURADOS and CENDOS to etched track neutrón dosimetry: The current status in Europe. *Radiat. Prot. Dosim.* 77(4), 267-304.
- Hoppner, U., Benton E.V. and Fiedler G. (1969). Diameter of etched fission fragment tracks in solid state detectors as a function of particle energy. *Nucl. Instr. Methods* 74, 285-290.
- Hughes, D.J. (1953). *Pile neutrón research.* Cambridge, Mass: Addison-Wesley.
- Hughes, D.J. (1959). *The neutrón story.* Doubleday Anchor Books. USA.
- IAEA, International Atomic Energy Agency. (1993). *Handbook on nuclear data for borehole logging and mineral analysis.* IAEA technical report series No. 357. POB100, A-1400, Vienna, Austria.

- IAEA, International Atomic Energy Agency. (2001). Compendium of neutron spectra and detector responses for radiation purposes. IAEA technical reports series No. 403. Supplement to technical reports series No. 318. Vienna, Austria.
- Izerrouken, M., Skvarc, J. and Ilic, R. (2003). A wide energy range personnel neutron dosimeter. *Radiat. Meas.* 37, 21-24.
- Jakes, J., Voigt, J. and Schraube, H. (1997). Etched track size distributions induced by broad neutron spectra in PADC. *Radiat. Prot. Dosim.* 70(1-4), 133-138.
- Jamil, K., Ali, S., Qureshi, I.E., Rehman, F., Khan, H.A., Manzoor, S. and Waheed, A. At various neutron energies. *Radiat. Meas.* 28(1-6), 495-498.
- J.R. Harvey, R.J. Tanner, W.G. Alberts. (1998). The contribution of EURADOS and SENDOS to etched track neutron dosimetry. *Radiation Protection Dosimetry*, vol. 77, (4), pag 267-304.
- Khan, A. Hameed and Khan, A. Naemm. (1980). Fast neutron dosimetry using a CR-39 plastic track detector. *Nucl. Instrum. Methods* 178, 491-497.
- Khan, A. Hameed and Khan, A. Naemm.(1980). A new plastic track detector for fast neutron dosimetry. *Applied Radiat. Isotopes* 31, 775-779.
- Knoll, A. and Glen F. Radiation detection and measurement. (2000). 3rd ed. New York: J. Wiley and Sons.
- L'Annunziata, M.F. (1998). A handbook of radioactivity analysis. Academic Press, New York.
- Lengar, I., Skvarc, J. and Ilic, R. (2003). Computer simulation of the processes in CR-39 neutron detector. *Radiat. Meas.* 36, 1, 115-118.
- Lengar, I., Skvarc, J. and Ilic, R. (2002). Fast neutron detection with coincidence counting of recoil tracks in CR-39. *Nucl. Instrum. Methods.* B192, 440-444.
- Lowenthal, G.C., P.L. Airey. (2001). Practical applications of radioactivity and nuclear radiations. Cambridge University Press, England.
- Luck, H.B. (1974). Diameter evolution of proton tracks in a cellulose nitrate detector. *Nucl. Instr. Methods* 116, 613-614.
- Medveczky, L. and Somogyi G. (1966). Fast neutron flux measurement by means of plastics. *Atomki Közlem* 8, 226-231.
- Mendoza B.L. (2008). Estudio de Radón Intramuros en Ambientes Laborales. Tesis, Facultad de Ciencias, UNAM.
- Mohr, P.J and B.N Taylor. (2005). CODATA Recommended Values of the constants: 2002. Review of Modern Physics 77,1.
- Nikezic, D., Yu, K.N. (2004). Formation and growth of tracks in nuclear track materials. *Mat. Sci. And Eng. R* 46, 51-123.

- Nishiwaki, Y. and Yamazaki K. (1971). Detection of fast neutrons by etch- pit method of nuclear track registration in plastics. *J. Nucl. Sci. Technol.* 8, 162-166.
- NNDC-BNLD, National Nuclear Data Center, Brookhaven National Laboratory Database. (2006). ENDF/B-VII.0 official release, USA.
- Osborne-Lee, I. W.; Alexander, C. W. (1995). Californium-252: A Remarkable Versatile Radioisotope» Oak Ridge Technical Report ORNL/TM-12706
- Pálfalvi, J.K., Sajó- Bohus, L., Balaskó, M. and Balasházy, I. (2001). Neutron field mapping and dosimetry by CR-39 for radiography and other applications. *Radiat. Meas.* 34, 471-475.
- Palacios, D., Palacios, F., Sajó-Bohus, L., Pálfalvi, J.K. (2001). A new method to measure track density and to differentiate nuclear tracks in CR-39 detectors. *Radiat. Meas.* 34, 119-122.
- Paratzke, H.G., Benton E.V. and Henke R.P. (1973). On particle track evolution in dielectric track detectors and charge identification thorough track radius measurement. *Nucl. Instr. Methods* 108, 73-80.
- Price, P.B., Fleicher R.L., Peterson D.D., O’Ceallaigh C., O’Sullivan D., and Thompson A. (1967). Identification of isotopes of energetic particles with dielectric track detectors. *Phys. Rev.* 164, 1618-1620.
- Price, P.B., Lal D., Tamhane A.S. and Perelygin V.P. (1973). Characteristics of tracks of ions with 14 – Z-36 in common rock silicates. *Earth Planet Sci. Lett.* 19, 377-395.
- Shani, G. (1990). Activation analysis with isotopic sources. *Activation Analysis* vol. 2 Ed. Z.B. Alfassi, CR Press Inc., Florida USA.
- Shavrin, P.I., Kuahevskij, B.M., Kusnetsov, S.N., Nechaev, O. Yu., Panasyuk, M.L., Ryumin, S.P., Yushkov, B.Yu., Bratolyubova-Tsulukidze, L.S., Lyagushin, V.I., Germantsev, Yu.L. (2002). Measurements of neutron fluxes with energies from thermal to several MeV in near- Earth space: SINP results. *Radiat. Meas.* 35, 531-538.
- Somogyi, G. (1966). New method for measuring the particle energy information from heavy ion tracks in Lexan. *Nature Phys. Sci.* 240, 82-83.
- Turek, K. and Dajko, G. (2001). Comparison of experimental and calculated responses of CR-39 to neutron spectra of Am- Be ²⁵²Cf sources. *Radiat. Meas.* 34, 625-628.
- Tuyn, J.W.N. and Broerse J.J. (1970). On the use of Makrofol polycarbonate foils for the measurement of the fast neutron dose distribution inside a human phantom. *Proc. Seventh Inter. Colloq. Corpuscular Photography and Visual Solid Track Detectors.* Barcelona, 527-531.
- Varnagy, M., Csikai J., Szegedi S. and Nagy S. (1970). Observation of proton tracks by a plastic detector. *Nucl. Instr. Methods* 89, 27-28.
- Zanini, A., Fasolo, F., Visca, L., Durisi, E., Perusino, M., Annand, J.R.M. and Burn, K.W. (2005). Test of bubble passive spectrometer for neutron dosimetry. *Phys. Med. Biol.* 50, 4287-4297.