



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE CIENCIAS

**EFFECTO DEL CAMBIO DE CONCENTRACIÓN DE
SAL EN AGUA DESTILADA SOBRE EL ESPECTRO
COMPTON DE UNA FUENTE DE Cs-137**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

F Í S I C A

P R E S E N T A:

ALINE ALEJANDRA QUEVEDO BELLO



**DIRECTOR DE TESIS:
M. en C. FRANCISCO PABLO RAMÍREZ GARCÍA**

2009



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.

AGRADEZCO

A la Universidad Nacional Autónoma de México, a la Facultad de Ciencias y en especial al Taller de física de radiaciones, por el apoyo que me brindaron para poder llegar hasta este momento.

Al Dr. Carlos Mendoza Ruiz, al Físico Antonio González Guzmán y a la Física Margarita Sánchez y Sánchez, por su buena disposición para la lectura y valiosas sugerencias del presente trabajo.

A la M. en C. Patricia Avilés Mandujano por su entera disposición y apoyo para que este trabajo se realizara.

Al Dr. Adrián Reyes Cervantes, por su incondicional apoyo durante mis estudios en la carrera y en la realización de este trabajo.

Al M. en C. Ricardo Martín Hernández Flores, por su paciencia y apoyo brindados durante la carrera y durante la realización del presente trabajo.

A todos mis profesores, compañeros y amigos, que colaboraron conmigo y me animaron para terminar la carrera.

A Francois y Lorraine por su paciencia y cooperación que me brindaron durante el desarrollo de mis estudios.

A mis hermanos, Mariela, Oliva, Quinatzin y César, por su amor y apoyo incondicional.

A mi padre y en especial a mi madre por creer en mí.

A mi asesor el M. en C. Francisco Pablo Ramírez García por su tiempo y apoyo sin el cual, este trabajo no se habría realizado.

“EFECTO DEL CAMBIO DE CONCENTRACIÓN DE SAL EN AGUA DESTILADA SOBRE EL ESPECTRO COMPTON DE UNA FUENTE DE ^{137}Cs ”

	Página
RESUMEN	5
CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN TEÓRICA	
1.1 Radiación electromagnética	6
1.1.1 Rayos X	6
1.1.2 Rayos gamma	7
1.2 Interacción de la radiación electromagnética con la materia	8
1.2.1 Efecto fotoeléctrico	9
1.2.2 Dispersión Compton	10
1.2.3 Producción de pares	15
1.3 Solubilidad y salinidad	15
1.3.1 Solubilidad del NaCl y del $\text{BaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ en agua	16
1.3.2 Densidad y densidad electrónica del NaCl y del $\text{BaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	17
CAPÍTULO II SELECCIÓN DE MATERIALES Y EQUIPO	
2.1 Materiales	19
2.1.1 Cesio	19
2.1.1.1 Cs-137	19
2.1.1.2 Seguridad radiológica	20
2.1.2 Cloruro de Sodio	22
2.1.3 Cloruro de Bario	23
2.1.4 Agua bidestilada	23
2.2 Equipo	24
2.2.1 Detectores	24
2.2.1.1 Detectores de centello	25
2.2.1.2 Detector de centello NaI(Tl)	25
2.2.1.3 Funcionamiento	26
2.2.1.4 Detector de GeHP	28
2.2.2 Software	30
2.2.3 Análisis de espectros	30
2.2.4 Fondo	31
2.2.5 Colimadores de plomo	32

CAPÍTULO III EXPERIMENTO

3.1 Material	33
3.2 Procedimiento	33
3.2.1 Colimación	33
3.2.2 Calibración del multicanal	35
3.2.3 Cálculo para las concentraciones de sal	36
3.2.4 Toma de espectros	37

CAPÍTULO IV ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1 Fondo	39
4.2 Fondo y Cesio	43
4.3 Comportamiento general de los espectros	48
4.4 Comparación de las sales: NaCl y BaCl ₂ · 2H ₂ O	55
4.5 Comparación de las concentraciones	57

CONCLUSIONES	61
CONCLUSIONES GENERALES	63

ANEXOS	
1. Programa Klein-Nishina en MatLab	64
2. Programa Convoluciones en Wolfram Mathematica	65

REFERENCIAS	67
-------------	----

BIBLIOGRAFÍA	70
--------------	----

RESUMEN

El objetivo del presente trabajo, es hacer un análisis de los espectros obtenidos con un detector de centello NaI(Tl), emitidos por una fuente de ^{137}Cs de $300\ \mu\text{Ci}$, colocada a 30° del detector, sobre aire, agua, agua con dos tipos de sal (NaCl y $\text{BaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), con distintas concentraciones.

En el capítulo I, se da una introducción teórica de los conceptos implicados, como son: la radiación electromagnética, los rayos gamma, el efecto fotoeléctrico, el efecto Compton, solubilidad y densidad electrónica.

En el capítulo II, se describen detalladamente los materiales y el funcionamiento del equipo que fue utilizado, entre otros, el ^{137}Cs , el NaCl , el BaCl_2 y el detector de centello NaI(Tl), así mismo se habla de las precauciones que deben tomarse cuando se trabaja con fuentes radioactivas.

La descripción del experimento se encuentra en el capítulo III. Vale la pena mencionar que para llegar a la elección de los materiales y el procedimiento, reportados en el presente trabajo, se hicieron, a lo largo de un año, tres arreglos diferentes, con materiales distintos, como fueron: tres fuentes de ^{137}Cs con distintas actividades ($10\ \mu\text{Ci}$, $100\ \mu\text{Ci}$ y $300\ \mu\text{Ci}$), dos tipos de colimadores para la fuente, tres tipos de colimadores para el detector, la variación del ángulo (0° , 90° y 30°), la variación del tiempo (partiendo de 20 minutos hasta llegar a 24 horas), obteniendo una cantidad aproximada de 85 espectros, de los cuales, sólo los 9 últimos, que corresponden a un ángulo de 30° , con una duración de 24 horas cada uno, aportaron los resultados reportados en este trabajo.

Queda claro que fue gracias al análisis de los 85 espectros, que se pudo ir mejorando, cambiando, corrigiendo y optimizando, tanto el material como el procedimiento, para llegar a los resultados reportados. Sin olvidar, que si las condiciones, principalmente económicas, permitieran repetir el experimento con mejores materiales, el estudio de la dispersión Compton sobre agua con sal, permitiría caracterizar con más detalle éste fenómeno.

En el capítulo IV, se encuentra el análisis de los resultados. De donde se concluye que, el dispositivo utilizado, permite el estudio de la dispersión Compton; además, que en la región de fotones con mayores energías, se observa un aumento de fotones dispersados, al aumentar la densidad electrónica del medio.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN TEÓRICA

1.1 Radiación electromagnética

El término radiación se refiere a “energía en tránsito”¹. El fenómeno de la radiación consiste en la propagación de energía en forma de ondas electromagnéticas o partículas subatómicas a través del vacío o de un medio material.

La radiación propagada en forma de ondas electromagnéticas (Rayos X, Rayos UV, etc.) se llama radiación electromagnética, mientras que la radiación corpuscular es la radiación transmitida en forma de partículas subatómicas (partículas α , neutrones, etc.) que se mueven a gran velocidad en un medio o el vacío, con apreciable transporte de energía.

Si la radiación transporta energía suficiente como para provocar ionización en el medio que atraviesa, se dice que es una radiación ionizante como los Rayos X, Rayos gamma y Partículas α , entre otros. En caso contrario se habla de radiación no ionizante, como son las ondas de radio, TV o de telefonía móvil.

1.1.1 Rayos X²

La denominación Rayos X designa a una radiación electromagnética descubierta por Wilhelm Roentgen a finales del s. XIX, invisible, capaz de atravesar cuerpos opacos. Su longitud de onda va de 10^{-11} a 10^{-8} m (0.1 a 100 Å), que son del orden de 10^{-4} veces la longitud promedio de onda en la luz visible y, por tanto, con cuantos 10^4 veces más energéticos.

Como es sabido, los electrones en un átomo están ordenados en capas alrededor del núcleo. Los electrones más cercanos al núcleo, los más fuertemente ligados, están en la capa *K*. Aquellos en la siguiente posición, de mayor enlace, están en la capa *L*, y enseguida en la capa *M*, luego en la *N*, y así sucesivamente.

Cuando los electrones son arrancados de su configuración original por algún proceso de ionización, como por ejemplo, al sufrir una colisión con una partícula incidente altamente energética, un electrón de la capa *K*, es desprendido dejando un hueco, es entonces que un electrón de la capa *L* pasa a ocupar el hueco cediendo energía en forma de fotón, que se nombra Rayo X.

Esta radiación, característica del material del blanco, se denomina línea K_{α} . El electrón de la capa *M* que llena la vacante en la capa *K* cediendo energía en forma

de otro Rayo X se llama línea K_β ; es decir, las transiciones de las capas L , M , N , etc. a la capa K dan lugar a la serie de líneas K_α , K_β , K_γ , etc., llamadas la serie K . Cuando los electrones son desalojados de la capa L y los huecos son llenados por electrones de las restantes capas M , N , O , dan lugar a la serie L , la primera línea de la cual es L_α y así sucesivamente.

A los Rayos X asociados con la serie K son llamados "Rayos X duros" y los asociados con las series menos energéticas L , M , N , son llamados "Rayos X suaves". Por lo general, son utilizados los Rayos X duros ya que su energía es mayor. Regularmente, la energía crece con el número atómico del elemento.

Existe un gran número de procesos físicos por los cuales el átomo puede ser excitado y producir un Rayo X característico. Para fines de este trabajo no es necesario profundizar más sobre Rayos X.

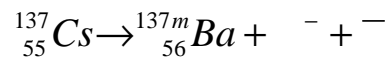
1.1.2 Rayos gamma³

Los núcleos, como los átomos, existen en estados de energía característicos. Los núcleos excitados vuelven a su estado fundamental por medio de la emisión de fotones cuyas energías corresponden a la diferencia entre los estados, inicial y final, de la transición de que se trate. Los fotones emitidos por los núcleos tienen valores de energía hasta de varios MeV, y reciben el nombre de rayos gamma.

Una alternativa de la desintegración gamma es que un núcleo excitado vuelva, en determinados casos, a su estado fundamental, cediendo la energía de excitación a uno de los electrones orbitales que lo rodean. Se puede pensar que este proceso, conocido como conversión interna, es una especie de efecto fotoeléctrico en el que un fotón nuclear es absorbido por un electrón atómico, pero es mejor considerar a la conversión interna como la representante de una transferencia directa de la energía de excitación desde un núcleo hasta un electrón. El electrón emitido tiene una energía cinética igual a la pérdida de la energía nuclear de excitación, menos la de enlace del electrón en el átomo.

En la mayoría de los casos, existen dos o más estados excitados, de forma que, dos o más fotones gamma de energías discretas son emitidos en cascada. La emisión de rayos gamma sucede usualmente alrededor de 10^{-13} segundos después de la desintegración primaria. Algunas veces, sin embargo, para algunos núcleos ésta puede durar varias horas. Si no excede alrededor de $1\mu s$, es llamado isómero del mismo núcleo, de lo contrario se llama estado excitado (metaestable) del núcleo en que se transforma. El decaimiento subsiguiente de un isómero es llamado transición isomérica

El decaimiento del ^{137}Cs se manifiesta por la emisión de una partícula beta negativa (β^-) y un antineutrino ($\bar{\nu}$):



En la sección 2.1.1 puede observarse el esquema de decaimiento (fig. 2.1) con las respectivas energías de Rayos gamma y el tiempo promedio necesario para que el 50% del ^{137}Cs se transforme en ^{137m}Ba metaestable.

En este trabajo como en buena parte de la literatura, se dice que la energía del ^{137}Cs es de 661.6 keV, pero debe quedar claro que se habla en realidad de la energía de los fotones emitidos por el isótopo del ^{137m}Ba .

1.2 Interacción de la radiación electromagnética con la materia⁴

Cuando un Rayo gamma pasa a través de la materia, la probabilidad de absorción en una capa fina es proporcional al espesor de dicha capa (ver fig. 1.1), lo que lleva a un decrecimiento exponencial de la intensidad $I(x)$.

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

donde, I_0 es la intensidad del rayo gamma, μ es el coeficiente de absorción lineal, x es el espesor en unidades de longitud. A veces es útil expresar el espesor en unidades de masa por unidad de área. Si definimos $t = \rho x$, donde ρ es la densidad tenemos que:

$$I(x) = I_0 \cdot e^{(-\mu \cdot t)}$$

donde μ/ρ se conoce como el coeficiente de absorción másico.

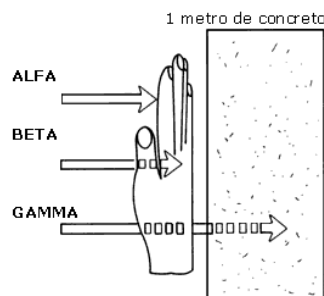


Fig. 1.1 Poder de penetración de diferentes tipos de radiación.⁵

Pasando a través de la materia, la radiación gamma principalmente ioniza los átomos de tres formas que son: el efecto fotoeléctrico, la dispersión Compton y la creación de pares.

1.2.1 Efecto fotoeléctrico⁶

El efecto fotoeléctrico ocurre cuando un material es expuesto a la luz visible, radiación ultravioleta u otro tipo de radiación electromagnética como son los rayos gamma. En el caso de los rayos gamma, sucede cuando un fotón gamma interactúa con un electrón atómico y le transfiere toda su energía, expulsando a dicho electrón del átomo. El fotoelectrón es expulsado con una energía cinética E_k de:

$$E_k = E_\gamma - E_b$$

donde E_γ es la energía del fotón incidente ($h\nu$, h es la constante de Planck y ν es la frecuencia) y E_b es la energía de enlace del electrón.

El átomo queda en un estado excitado durante más o menos 10 ns y regresa a su estado estable una vez que sus electrones se han acomodado y recuperado el electrón perdido.

En la mayoría de casos el efecto fotoeléctrico se da por medio de la emisión de rayos X.

En la figura 1.2 se puede observar el fotopico obtenido de una fuente de ^{137}Cs con un detector NaI(Tl).

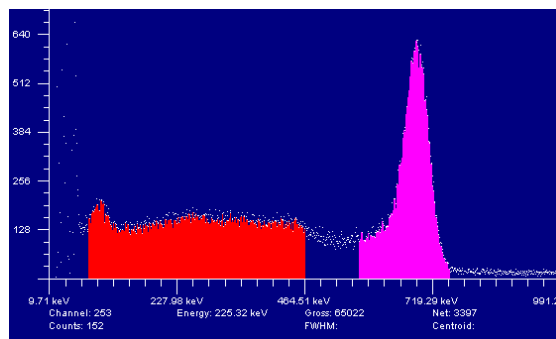


Fig. 1.2 Fotopico (derecha) y efecto Compton (izquierda) de una fuente de ^{137}Cs obtenida con un detector NaI(Tl), con el programa ICSW, en el Taller de Física de Radiaciones, Facultad de Ciencias, UNAM.

1.2.2 Dispersión Compton⁷

Arthur H. Compton descubrió en 1923 que las longitudes de onda de los Rayos X cambian después de haber sido dispersadas por electrones, a este descubrimiento por el cual recibió el premio Nobel en 1927 se le llama efecto Compton.

Para propósitos de este trabajo es necesario conocer la dispersión Compton.

La dispersión Compton sucede cuando un fotón colisiona con un electrón orbital, el fotón es dispersado a un ángulo θ de su dirección original. Una fracción de su energía es transferida al **electrón de retroceso** que será emitido a un ángulo ϕ de la dirección del fotón incidente (ver figura 1.3).

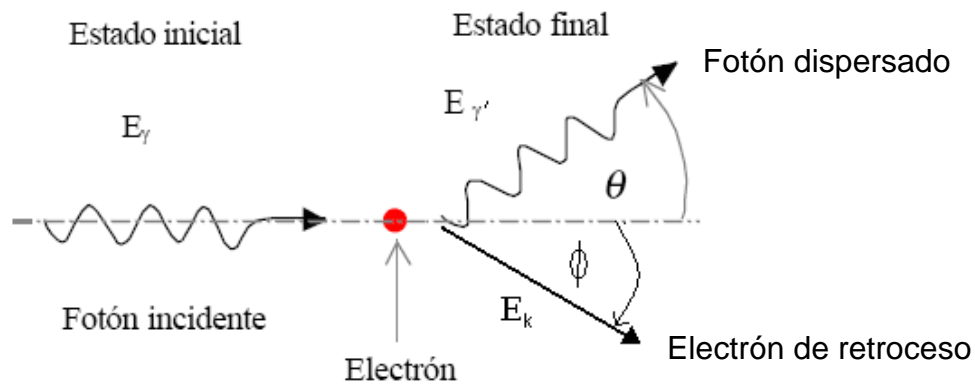


Fig. 1.3 Dispersión Compton

Se describe la dispersión Compton como un proceso inelástico, esto se debe a que ambas partículas, tanto el fotón como el electrón, absorben energía de un solo fotón; además hay un cambio en la longitud de onda del fotón y la radiación difundida es incoherente con el haz incidente, es decir, tenemos una interacción en la cual, el sistema M_1+M_2 se transforma en partículas diferentes, M_3+M_4 , como estado final. Sin embargo, visto de otro modo, se trata de un proceso elástico ya que en él no se produce pérdida de energía cinética.

En la dispersión Compton se asume que el electrón está inicialmente en reposo y es esencialmente libre, esto es, no está ligado a los átomos del dispersor, esta explicación es buena para los electrones externos débilmente ligados, cuya energía de amarre es mucho menor que la energía del fotón de Rayos X. Puesto que los electrones de retroceso pueden tener velocidades comparables con la de

la luz, es necesario utilizar la expresión relativista para la conservación de la energía y para la conservación de momento lineal.

Por el principio de conservación de energía, usando la cinemática relativista y asumiendo que la energía de enlace del electrón es despreciable, tenemos que:

$$E + E_e = E' + E_{e'}$$

$$E + E_e = E' + (E_e + E_K)$$

$$E = E' + E_K \dots\dots\dots 1$$

- Donde:
- $E_\gamma = h\nu$ es la energía del fotón incidente.
 - $E_{\gamma'} = h\nu'$ es la energía del fotón dispersado.
 - $E_e = m_e c^2$ es la energía del electrón asumiéndolo en reposo
 - m_e es la masa del electrón
 - c^2 es la velocidad de la luz en el vacío.
 - $E_{e'}$ es la energía del electrón de retroceso.
 - E_K es la energía cinética del electrón, para la cual es necesario utilizar la forma relativista ya que el electrón de retroceso alcanza velocidades cercanas a la de la luz.

Sustituyendo la energía cinética del electrón en la ecuación 1 :

$$E = E' + c\sqrt{m_e^2 c^2 + p_e^2} - m_e c^2$$

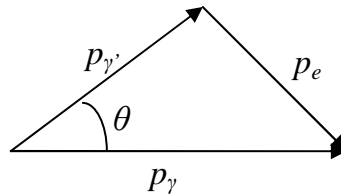
$$\left(c\sqrt{m_e^2 c^2 + p_e^2} \right)^2 = \left(E - E' + m_e c^2 \right)^2$$

$$m_e^2 c^4 + c^2 p_e^2 = \left(E - E' + m_e c^2 \right)^2$$

$$c^2 p_e^2 = \left(E - E' + m_e c^2 \right)^2 - \left(m_e c^2 \right)^2$$

$$c^2 p_e^2 = E^2 + E'^2 + 2E m_e c^2 - 2E E' - 2E m_e c^2 \dots\dots\dots 2$$

Por el principio de conservación del momento y utilizando la ley de los cosenos, podemos describir el siguiente diagrama⁸ como:



$$p_e^2 = p^2 + p'^2 - 2p \cdot p' \cos \theta \dots\dots\dots 3$$

donde: p_e es el momento lineal del electrón de retroceso.

$p_{\gamma'} = h / \lambda' = E_{\gamma'} / c$ es el momento lineal del fotón dispersado.

$p_{\gamma} = h / \lambda = E_{\gamma} / c$ es el momento lineal del fotón incidente.

Sustituyendo los momentos lineales anteriores en la ecuación 3:

$$p_e^2 = \frac{E^2}{c^2} + \frac{E'^2}{c^2} - \frac{2E E' \cos \theta}{c^2}$$

$$c^2 p_e^2 = E^2 + E'^2 - 2E E' \cos \theta \dots\dots\dots 4$$

Igualando las ecuaciones 2 y 4 y simplificando, obtenemos finalmente, la energía del fotón dispersado de la siguiente manera:

$$E' = \frac{E}{1 + \frac{E(1 - \cos \theta)}{m_e c^2}} \dots\dots\dots 5$$

La energía cinética del electrón de retroceso, de la ecuación 1, estará dada por:

$$E_k = E - E' = \frac{E^2(1 - \cos \theta)}{m_e c^2 + E(1 - \cos \theta)} \dots\dots\dots 6$$

De las ecuaciones 5 y 6, se observa que para ángulos muy pequeños, menores a 10° , muy poca energía del fotón incidente es transmitida al electrón en retroceso, es decir, la energía del fotón dispersado está muy cercana a la del fotón incidente (ver figura 1.4). Por consiguiente, el máximo de energía que puede ser transferida

al electrón de retroceso se encuentra en ángulos mayores a 150°, a este máximo se le llama borde Compton; se obtiene de la ecuación 6 para $\theta = \pi$ y está dado por la siguiente ecuación:

$$E_{ce} = \frac{E^2}{E + \frac{mc^2}{2}} \dots\dots\dots 7$$

Y al mismo tiempo, se encuentra la energía de retrodispersión E_r , dada por la energía del rayo gamma dispersado menos el borde Compton:

$$E_r = E - E_{ce} \dots\dots\dots 8$$

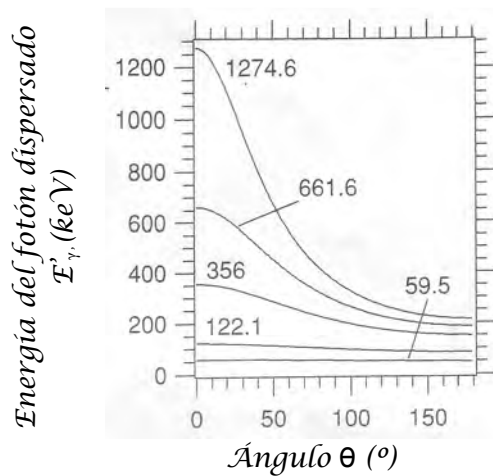


Fig. 1.4 Energía del fotón dispersado como función del ángulo para cinco distintas energías de rayos gamma incidentes: ²⁴¹Am (59.5 keV), ⁵⁷Co (122.1 keV), ¹³³Ba (356 keV), ¹³⁷Cs (661.6 keV) y ²²Na (1274.6 keV).

Utilizando las ecuaciones anteriores, se pueden calcular los valores de las energías para el fotón dispersado como para el electrón de retroceso a distintos ángulos para el ¹³⁷Cs el cual tiene una energía de 661.6 keV y tomando $mc^2 = 511$ keV. Se puede comprobar que estamos trabajando con un proceso elástico.

Grados	Energía del fotón dispersado	Energía del electrón de retroceso
0°	661.6 keV	0 keV
30°	563.8 keV	97.8 keV
90°	288.3 keV	373.3 keV
180°	184.3 keV	477.3 keV

Tabla 1.1 Energías para el fotón dispersado y el electrón de retroceso, a varios ángulos.

Ahora bien, la probabilidad de la dispersión Compton depende de los detalles de la interacción fotón-electrón, concretamente de la relación entre la dirección de polarización de la radiación y la dirección del spin del electrón difusor. Para esto se utiliza la fórmula de Klein-Nishina⁹, que da la sección eficaz elemental de la difusión Compton. La expresión fundamental de la sección eficaz elemental de la colisión del electrón, para radiación polarizada es:

$$\sigma_{dif}(E, \theta) = \frac{r_e^2}{2} \left[\frac{1}{[1 + \alpha(E) \cdot (1 - \cos(\theta))]^2} \right] \left[1 + \cos(\theta)^2 + \frac{\alpha(E)^2 \cdot (1 - \cos(\theta))^2}{1 + \alpha(E) \cdot (1 - \cos(\theta))} \right] \dots 9$$

donde r_e es el radio del electrón y $\alpha(E_\gamma) = E_\gamma / m_e c^2$ es la energía del fotón incidente sobre la energía en reposo del electrón. Esta fórmula se puede utilizar para calcular el número de fotones observados para un cierto ángulo de difusión θ . En este trabajo fue generada con Matlab (ver anexo 1), la curva de la energía de rayos gamma proveniente del ¹³⁷Cs que se observa en la figura 1.5 y se puede analizar la variación del ángulo con respecto a la energía del fotón incidente con respecto a la energía del fotón dispersado para $\theta = 90^\circ$.

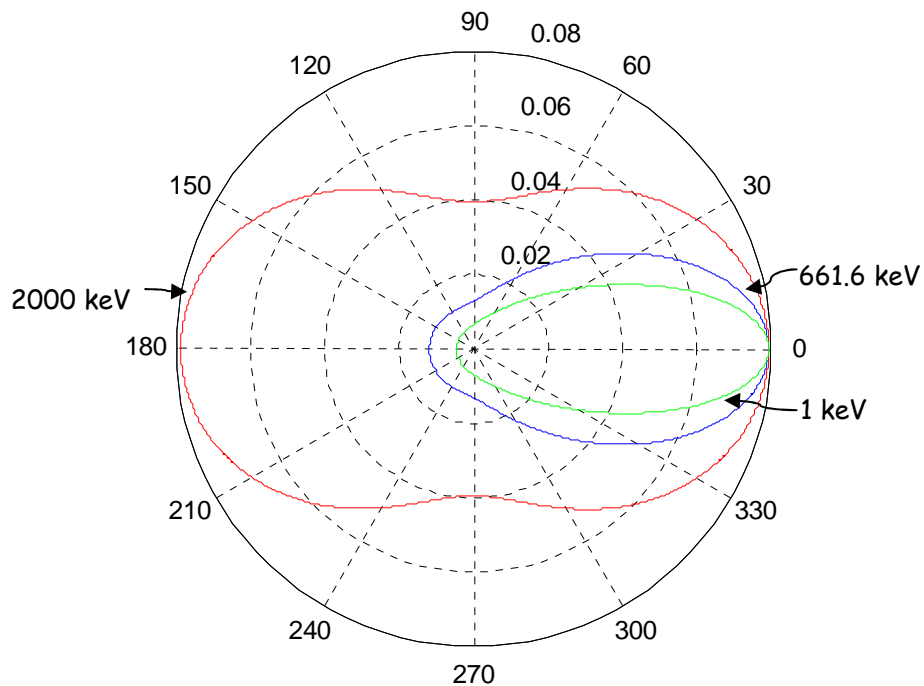


Fig. 1.5 Gráfica polar del número de fotones incidentes por dispersión Compton en unidad de ángulo sólido, dispersados a un ángulo θ . La curva muestra la energía del fotón incidente, 1 keV, 661.6 keV y 2000 keV.

1.2.3 Producción de pares¹⁰

Debido a la interacción de la fuerza de Coulomb, en la vecindad del núcleo, la energía del fotón incidente se convierte espontáneamente en la masa de un par electrón-positrón. Un positrón es la antipartícula correspondiente al electrón; tiene la misma masa de un electrón, pero tiene una carga positiva de igual magnitud a la carga negativa de un electrón. La energía excedente del equivalente a la masa en reposo de las dos partículas (1.02 MeV) aparece como energía cinética del par y del núcleo. El positrón tiene una vida muy corta (del orden de 10^{-8} segundos). Al final de su periodo, se combina con un electrón libre. Toda la masa de estas dos partículas se convierte entonces en dos fotones gamma de 0.511 MeV de energía cada uno.

Puesto que en este trabajo se utiliza una fuente de ^{137}Cs , la cual tiene una energía de 661.6 keV, no se estudia la producción de pares, dado que esta energía es menor a 1.02 MeV.

I.3 Solubilidad y salinidad¹¹

Una solución se define como una mezcla homogénea de iones o moléculas de sustancias en iguales o distintos estados de agregación. Se llama disolución al proceso de preparar una solución y ésta se compone de mínimo un solvente y mínimo un soluto.

El solvente se encuentra en mayor cantidad y es conocido también como disolvente ya que disuelve al soluto. Éstos dos pueden encontrarse en forma líquida, sólida o gaseosa y la solución que se formará tendrá el estado físico del solvente.

La concentración de una solución constituye una de sus principales características y muchas de sus propiedades dependen exclusivamente de ésta. Entre las características más importantes de una solución se encuentran que, al dejarlas en reposo durante un tiempo, las fases no se separan ni se observa sedimentación, es decir las partículas no se depositan en el fondo del recipiente; además son totalmente transparentes, es decir, permiten el paso de la luz y sus componentes o fases no pueden separarse por filtración¹².

El término solubilidad se utiliza tanto para designar al fenómeno cualitativo del proceso de disolución como para expresar cuantitativamente la concentración de las soluciones. La solubilidad de una sustancia depende de la naturaleza del disolvente y del soluto, así como de la temperatura y la presión del sistema. Hay tres tipos de soluciones que se clasifican de acuerdo a la cantidad del soluto:

- *Solución saturada* es aquella que contiene la cantidad máxima de soluto.
- *Solución insaturada*, contiene la cantidad de soluto por debajo de lo que se puede disolver.
- *Solución sobresaturada*, contiene la cantidad de soluto por encima de lo que puede ser disuelta a cierta temperatura.

Existen distintas formas de especificar la concentración de una solución, las tres más utilizadas son: gramos por litro (g/l), molaridad (mol/l), y porcentaje de la solución de saturación (%).

Los gramos por litro indican la masa de soluto, expresada en gramos, contenida en un determinado volumen de disolución, expresado en litros. Así, una solución de cloruro de sodio con una concentración de 40 g/l contiene 40 g de cloruro de sodio en un litro de solución.

Los cambios de presión no modifican la solubilidad de un sólido en un líquido. Si un sólido es insoluble en agua, no se disolverá aunque se aumente bruscamente la presión ejercida sobre él.

1.3.1 Solubilidad del NaCl y del BaCl₂ · 2H₂O en agua

El agua es una molécula tetraédrica, con el átomo de oxígeno en el centro y los dos átomos de hidrógeno en los vértices de dicho tetraedro quedando los otros dos vértices ocupados por los electrones no compartidos del oxígeno (fig. 1.6).

El agua es un solvente muy importante de compuestos iónicos debido a su polaridad, a su elevada constante dieléctrica y a que su grupo -OH le permite formar puentes de hidrógeno. Es capaz de solvatar tanto cationes (iones con carga positiva) en su polo negativo (esencialmente sus electrones no compartidos) como aniones (iones con carga negativa) por medio de puentes de hidrógeno.

Solamente el agua y solventes muy polares pueden disolver en cantidad apreciable compuestos iónicos, que debido a las atracciones electrostáticas forman enlaces ion-dipolo, los cuales aportan energía suficiente para vencer las fuerzas interiónicas en el cristal. En el proceso de disolución cada ion es rodeado por muchas moléculas del solvente (solvatación). Además un solvente para que pueda disolver a los compuestos iónicos necesita tener una constante dieléctrica muy grande, es decir, que debe tener propiedades muy aislantes para disminuir la atracción entre los iones de carga opuesta una vez que se encuentren solvatados¹³.

Las sales se forman de la unión de un catión con un anión, son conductores de electricidad cuando están en estados acuosos o líquidos, son solubles en agua tienen punto de fusión alto (sobre los 300°C), tienen baja volatilidad, no son combustibles y reaccionan rápidamente.

El NaCl es un cristal que tiene simetría cúbica; cada celda unitaria de cloruro de sodio tiene cuatro iones sodio y cuatro iones cloro asociados con ella.

Por ser el agua es un solvente polar y el NaCl es un compuesto iónico, las partículas de Na⁺ quedaran pegadas a la molécula de agua en el oxígeno y las de Cl⁻ en el hidrógeno y puentes de hidrógeno, como se muestra en la figura 1.6.

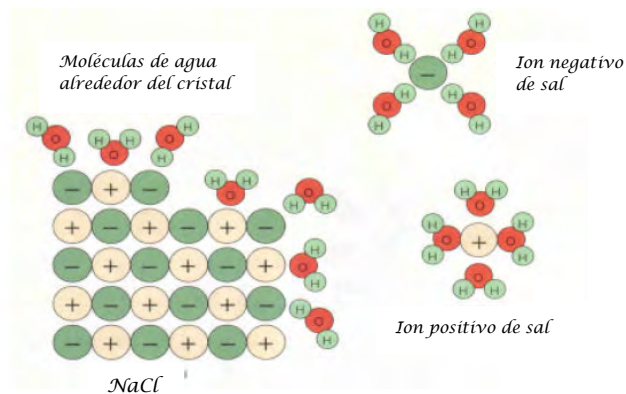


Fig. 1.6 Moléculas de agua alrededor de un cristal de NaCl¹⁴

La máxima solubilidad del NaCl en agua es de 35.9g NaCl por 100g de agua, por lo que para preparar 1 litro de solución saturada (en caso del NaCl, conocida comúnmente como "Salmuera") en agua destilada (densidad=1g/ml) a 20°C se necesitan 359 g de NaCl. Su solubilidad es prácticamente independiente de la temperatura.

Así como el NaCl, el cloruro de bario dihidratado (BaCl₂ 2H₂O) es soluble en agua; su máxima solubilidad es de 360 g por litro de agua a 20°C.

1.3.2 Densidad y densidad electrónica del NaCl y del BaCl₂ 2H₂O

La densidad de un fluido homogéneo es su masa dividida entre su volumen y puede depender de muchos factores, tales como su temperatura y la presión a la que está sometido, sin embargo, la densidad de los líquidos varía muy poco en grandes intervalos de la presión y de la temperatura, por esta razón, en este trabajo se consideran como una constante.

La densidad electrónica ρ_e se refiere al número de electrones totales por unidad de volumen¹⁵, y se calcula utilizando la siguiente fórmula:

$$\rho_e = N_A \sum_i \frac{Z_i}{A_i} \dots\dots\dots 10$$

donde: N_A es el número de Avogadro, ρ es la densidad del elemento, Z es el número atómico y A es el peso molecular. A continuación se muestra una tabla con las densidades importantes para este trabajo.

Elemento	Densidad g/cm³	Peso molecular g/mol	Densidad electrónica electrones/cm³
Aire	0.00129	28.96	8.048×10^{20}
Agua	1	18	3.34×10^{23}
NaCl	2.2	58.48	4.078×10^{23}
BaCl₂·2H₂O	3.1	208.25	9.862×10^{23}

Tabla 1.2 Densidades para el agua, aire, NaCl y BaCl₂.

¹ Simon, R. *Physics in Nuclear Medicine*. 3ª edición. Saunders. USA. p. 8.

² Beiser, A. *Conceptos de física moderna*. 2ª edición. McGrawHill. México 1977. Capítulos 2 y 12.

³ Ídem.

⁴ 2008 Disponible en :
http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen2/ciencia3/099/htm/sec_7

⁵ Ídem

⁶ Beiser. A. *Conceptos de física moderna*. 2ª edición. McGrawHill. México 1977. Capítulos 2 y 12.

⁷ Bazterrra, V. et al. *Efecto Compton*. Laboratorio 5. Dpto. de Física. FCEyN. UBA. 1997.

⁸ 2008 Disponible en :
<http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/cuantica/compton/Compton.htm#Fundamentos%20físicos>

⁹ Burcham, W.C. *Física Nuclear*. Reverte. México 1974. Capítulo 5.

¹⁰ Beiser, A. *Conceptos de física moderna*. 2ª edición. McGrawHill. México 1977. Capítulos 2 y 12.

¹¹ Ciencias Físicas 117. *Aguas y soluciones*. Pontificia Universidad Católica de Puerto Rico. Departamento de Química.

¹² 2009 Disponible en:
<http://www.monografias.com/trabajos15/separacion-mezclas/separacion-mezclas.shtml>

¹³ 2009 Disponible en:
<http://www.aula21.net/Nutriweb/agua.htm>

¹⁴ 2009. Disponible en:
marc.pucpr.edu/facultad/jescabi/CF%20117/Agua%20y%20Soluciones.pdf

¹⁵ Castegnet, A. et al. *Medición de Densidad por Retrodispersión Gamma: Bases para el diseño de equipos aplicables a suelos y otros materiales*. Informe No. 137. Comisión Nacional de Energía Atómica. Argentina. 1965.

CAPÍTULO II

SELECCIÓN DE MATERIALES Y EQUIPO

2.1 Materiales

Los materiales con los que se realizó el experimento son una parte clave, no tan sólo para la obtención de los resultados sino también para el análisis y comprensión de éstos. A continuación se describen y se dan las características principales tanto del Cesio como de las sales y del agua que fueron utilizados.

Así mismo, siempre que se trabaja con fuentes radioactivas es necesario estar consciente del peligro que éstas conllevan, por ésta razón se dedica una sección a seguridad radiológica.

2.1.1 Cesio

El cesio es el elemento químico con número atómico 55 y peso atómico de 132,905 uma. Su símbolo es Cs, y es el segundo más pesado de los metales alcalinos en el grupo IA de la tabla periódica.

El cesio es un metal blando, ligero y de bajo punto de fusión. Es el más reactivo y menos electronegativo de todos los elementos. El cesio reacciona en forma vigorosa con oxígeno para formar una mezcla de óxidos. En aire húmedo, el calor de oxidación puede ser suficiente para fundir y prender el metal. El cesio no reacciona con nitrógeno para formar nitruros, pero reacciona con el hidrógeno a temperaturas altas para producir un hidruro muy estable; reacciona en forma violenta con el agua y aun con hielo a temperaturas hasta -116°C (-177°F) así como con halógenos, amoníaco y monóxido de carbono. En general, con compuestos orgánicos el cesio experimenta los mismos tipos de reacciones que el resto de los metales alcalinos, pero es mucho más reactivo.

2.1.1.1 Cs-137

^{137}Cs es un isótopo radiactivo de cesio que se forma principalmente durante la fisión nuclear. Tiene una vida media de 30.23 años, y se transforma emitiendo una partícula beta a un isómero nuclear metaestable de $^{137\text{m}}\text{Ba}$. $^{137\text{m}}\text{Ba}$ tiene una vida media de 2.55 minutos y es responsable de la emisión de rayos gamma con energía de 661.6 keV. Quedando como ^{137}Ba que es un isótopo estable. Ver fig. 2.1.

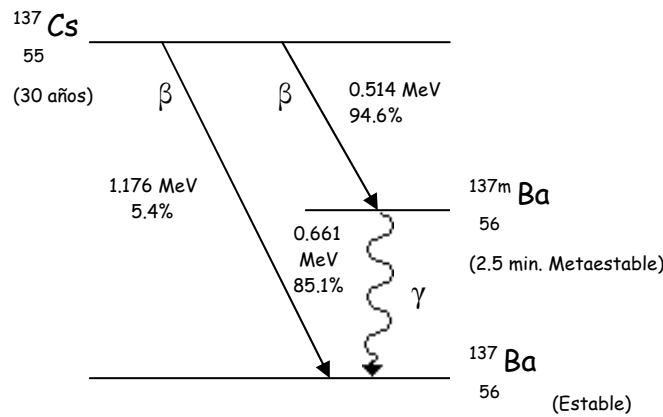


Fig 2.1 Esquema de Decaimiento del ^{137}Cs

El espectro del isótopo ^{137}Cs , tiene un pico muy agudo centrado en 661.6 keV, o en la longitud de onda $1.878 \cdot 10^{-12}$ m, (0.01878 Å). Dos cuestas, una correspondiente al borde Compton en 477.3 keV, y otra debida a la retrodispersión en 184.4 keV, además de un pico debido a los rayos X en 30 keV del ^{137}Ba como se puede observar en la figura 2.2.

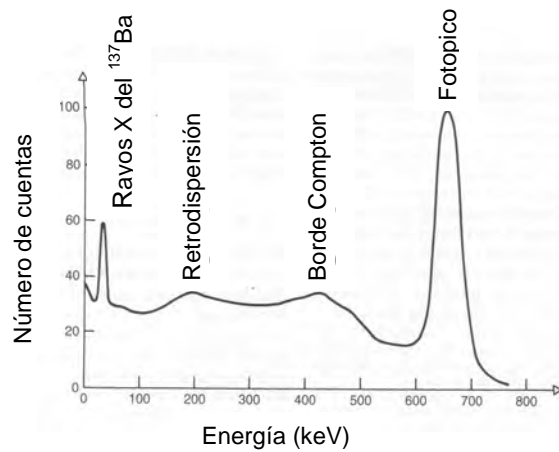


Fig.2.2 Espectro obtenido con un detector NaI(Tl) para ^{137}Cs (rayos gamma 661.6 keV y rayos X de 30 keV del ^{137}Ba)¹

2.1.1.2 Seguridad radiológica²

Bien conocido es el hecho de que las radiaciones nucleares tales como los rayos γ , las partículas α , las partículas β , y los neutrones pueden causar daños al cuerpo humano. Menos de un año después del descubrimiento de los rayos X por Roentgen, un fabricante de tubos de rayos X notó que estos rayos habían dañado

sus manos. Becquerel recibió una quemadura en el pecho al llevar un frasco que contenía Radio en el bolsillo de su saco.

Los efectos dañinos de las radiaciones nucleares se deben a la ionización o excitación de los átomos en las células vivas causadas por el efecto Compton, la bremsstrahlung, el efecto fotoeléctrico, etc. Algunos constituyentes de las células son alterados o destruidos por la ionización, y algunos de los productos formados pueden actuar como venenos; la célula sufre cambios irreversibles.

Frecuentemente, el reemplazo normal de las células se ve inhibido por la incapacidad de las células para reproducirse después de estar sujetas a las radiaciones ionizantes. Las células más sensitivas son las de la médula de los huesos, las glándulas linfáticas, la piel de los labios y los intestinos, los órganos reproductores, los folículos del cabello, y la piel. Los tejidos del hígado y del riñón son moderadamente sensibles, mientras que los tejidos de los nervios del cerebro y de los músculos son menos sensibles.

La radiación de una fuente de gran actividad, mayor a 1 Ci, emitida por las partículas del cesio puede traer como consecuencia efectos como náuseas, vómitos, diarreas, y hemorragias. Sí la exposición es larga la gente puede incluso perder el conocimiento, entrar en coma o incluso morir. Cuan serios sean los efectos depende de la resistencia de cada persona, el tiempo de la exposición, la distancia a la fuente y la actividad a la que esté expuesta.

De esta manera, el cesio debe mantenerse siempre dentro de su caja protectora y en el momento de ser solicitado, debe de tomarse con pinzas y ser colocado inmediatamente en el espacio previsto para éste dentro del colimador, el cual deberá de llevar una tapa (de plomo), para evitar radiación directa mientras se toman las mediciones. Asegurar la mínima exposición del laboratorista es muy importante, si se cuenta con un cronómetro, la persona puede alejarse del experimento mientras los aparatos como el detector y el multicanal estén trabajando. También es importante colocar cerca del experimento (fig. 2.3) un letrero que indique el nombre de la fuente, la actividad de ésta, y la radiación captada a un metro del experimento.

Para evitar estar expuestos a la radiación gamma del cesio se requiere de una barrera de plomo, tomando en cuenta que 0.6 cm de plomo reducen la intensidad en un 50%, a lo que se llama "atenuación media"³.

Pero el plomo también es tóxico, así que es necesario tomar doble precaución, ni el Cesio en polvo o en estado sólido, ni el plomo deben entrar en contacto directo con la persona ya que pueden quedarse en la piel y ser ingeridos a través de alimentos; se recomienda la utilización de guantes y lavarse las manos después de su manipulación. Además de que la fuente siempre debe mantenerse dentro de su capsula o ficha de plástico y debe haber pasado por pruebas de fuga, para verificar que no se está saliendo de la capsula en la cual se encuentra contenida.



Fig. 2.3 Señalización durante un experimento cuando se trabaja con fuentes radioactivas.

2.1.2 Cloruro de Sodio

El cloruro de sodio, popularmente denominado sal común, sal de mesa, o en su forma mineral, halita, es un compuesto químico con la fórmula NaCl. El cloruro de sodio es la sal en parte responsable, de la salinidad del océano y del fluido extracelular de muchos organismos⁴.

Como ya se mencionó anteriormente, es un cristal que tiene simetría cúbica; cada celda unitaria de cloruro de sodio tiene cuatro iones sodio y cuatro iones cloro asociados con ella. Cada uno de los otros doce iones sodio es compartido con tres celdas unitarias adyacentes de tal modo que cada uno contribuye con un cuarto de ion a la celda en consideración. El número total de iones sodio es, entonces, $1 + (1/4)12 = 4$. De manera que, si bien existen catorce iones cloro, sólo cuatro están asociados con la celda unitaria (véase figura 2.4).

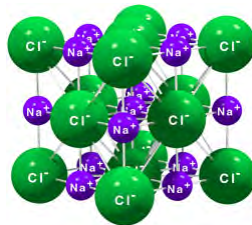


Fig. 2.4 Cristal de NaCl.⁵

Para este trabajo, se utiliza NaCl con una pureza del 99.97% y contiene también: I (0.0005%), Br (0.005%), NO₃ (0.001%), SO₄ (0.002%), Ca (0.0004%), Mg (0.0002%), K (0.001%) e impurezas de PO₄ (1), metales pesados como Pb (1) y Fe (0.4), materia insoluble (0.002%) y un pH de 5 de concentración a 25°C⁶.

2.1.3 Cloruro de Bario

El cloruro de bario es un compuesto químico con la fórmula BaCl_2 , es una sal de cloro y bario de color blanquizo; es altamente soluble en agua. Al disolverse el agua de cristalización entra a formar parte de la solución y se obtiene el compuesto $\text{BaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Por lo tanto es importante mantenerlo en un recipiente cerrado, ya que absorbe con facilidad la humedad del medio ambiente.

Como la mayoría de sales de Bario, el BaCl_2 es un compuesto tóxico, una dosis de 1 gramo puede ser mortal; la ingestión puede causar severa gastroenteritis incluyendo espasmos abdominales, vómito y diarrea, en casos más graves puede producir colapso y paro respiratorio; el contacto con la piel o con los ojos puede causar irritación y ardor; la inhalación puede llegar a causar paro respiratorio⁷, por lo tanto, debe ser manipulado con mucho cuidado, deben utilizarse guantes de neopreno, lavarse las manos después de su manipulación y colocar el letrero de veneno cerca del producto.

Para este experimento se utiliza $\text{ClBa}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ con una pureza del 99.37% y contiene también: sustancias oxidantes como NO_3 (0.005%), sustancias no precipitadas por H_2SO_4 (0.15%), Ca (0.05%), Sr (0.1%), metales pesados como Pb (0.00025) y Fe (0.0001%), materia insoluble (0.004%) y un pH de 5 de solución a 25°C⁸.

2.1.4 Agua bidestilada⁹

El agua destilada es aquella cuya composición se basa en la unidad de moléculas de H_2O . Es aquella a la que se le han eliminado las impurezas e iones mediante destilación; es decir es agua que ha sido hervida en un aparato sellado, llamado "alambique", y luego recondensada en una unidad enfriadora ("condensadora") para devolver el agua al estado líquido. La destilación se usa para purificar el agua. Los contaminantes disueltos tales como sales se quedan en el tanque donde el agua hierve mientras que el vapor de agua se eleva hacia fuera.

Algunos alambiques pueden condensar selectivamente (por licuefacción) el agua y no otras sustancias volátiles, pero la mayoría de los procesos de destilación permiten el arrastre de al menos algunas de las sustancias volátiles, una parte muy pequeña del material no volátil que fue arrastrado dentro del flujo de vapor de agua cuando las burbujas estallan en la superficie del agua hirviendo. El pH es generalmente 4,5 - 5,0. Adicionalmente, hay que tener cuidado de no recontaminar el agua después de haberla destilado.

En la experimentación química, un fenómeno que existe en cualquier líquido o disolución que esté libre de impurezas macroscópicas como el caso del agua destilada, es que puede ser calentado en un horno microondas por encima de su punto de ebullición sin hervir. Sólo cuando este líquido es agitado violentamente o se le añaden impurezas como partículas de polvo o cristales (por ejemplo cloruro sódico), hierve de forma repentina y explosiva, pudiendo causar quemaduras.

Con el objetivo de disminuir el ruido en el espectro deseado, por causa de impurezas u otras sustancias dentro del agua, en este trabajo se utiliza agua con doble destilación. Desgraciadamente, el proveedor de agua bidestilada, en pequeñas cantidades, no da las especificaciones del agua proporcionada.

2.2 Equipo

Así como los materiales descritos en la sección anterior, el equipo con el que se cuenta es de suma importancia para su optimización así como, para la comprensión y el análisis de resultados. A continuación se describe el detector y su funcionamiento, los colimadores y el software utilizado.

2.2.1 Detectores¹⁰

Cuando la radiación de un material radioactivo pasa a través de la materia, interacciona con átomos y moléculas transfiriendo energía. Esta transferencia de energía puede suceder de dos formas principalmente, ya sea por ionización o por excitación. La ionización ocurre cuando la energía transferida logra desprender un electrón del átomo o molécula. La excitación ocurre cuando los electrones son simplemente perturbados de su estado normal en el átomo o molécula, haciendo que éstos queden en un estado excitado. Ambos procesos pueden ser detectados, sin embargo, para fines de este trabajo, sólo interesa el estudio de los llamados “detectores de radiación” que son aquellos que detectan la radiación por ionización. Y más específicamente, los llamados “detectores de centello”, que se describen a continuación.

2.2.1.1 Detectores de centello¹¹

Se les llama materiales “centelladores” aquellos que tienen la propiedad de ser luminiscentes es decir, de emitir radiación electromagnética con longitud de onda visible o ultra-violeta después de absorber energía transferida al material por partículas ionizantes. La radiación emitida puede detectarse con transductores opto-electrónicos adecuados, éstos se encargan de convertir las señales luminosas en eléctricas, permitiendo así su análisis y procesamiento por un sistema electrónico.

Existen varios tipos de detectores de centello como el NaI(Tl), BGO, LSOC(Ce), CsI(Tl), BaF₂, los cuales utilizan como sustancias centelladoras sustancias inorgánicas en forma de cristales sólidos, sustancias orgánicas disueltas en soluciones líquidas, o plásticos, entre otros.

2.2.1.2 Detector de centello NaI(Tl)¹²

El detector de centello NaI(Tl) utiliza una sustancia inorgánica (Ioduro de Sodio) en forma de cristal y está dopada con Talio. Se compone esencialmente de tres partes : el cristal, un tubo fotomultiplicador y un preamplificador, ver figura 2.5.

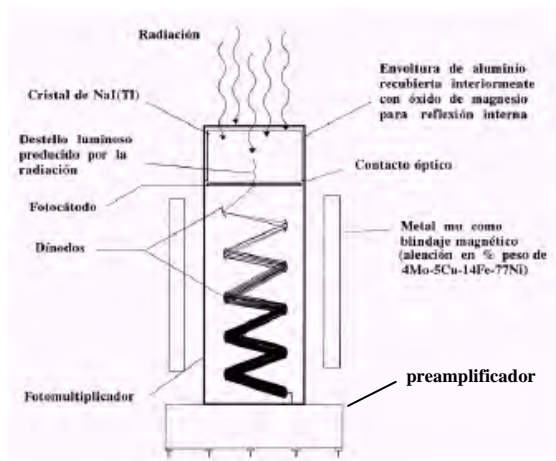


Figura 2.5 Diagrama de un detector de centello¹³

El cristal

La mayoría de cristales inorgánicos son centelladores en su estado puro, por ejemplo, el cristal puro de NaI centella cuando se encuentra a la temperatura del nitrógeno líquido, sin embargo, para obtener un mejor centelleo a otras

temperaturas, se les agregan impurezas, es decir, átomos de otros elementos. En el caso del NaI(Tl), la impureza es el Talio.

El cristal se encuentra dentro de una estructura de aluminio recubierta interiormente con óxido de magnesio para que exista una reflexión interna. Al fondo de la estructura se encuentra un vidrio o plástico transparente que funciona como ventana óptica, la cual permite la salida de la luz de centello dada por el cristal hacia el tubo fotomultiplicador.

El cristal y el tubo fotomultiplicador se encuentran perfectamente sellados para evitar la entrada de factores externos, como humedad, que puedan afectar la detección; con esta premisa, contando con una buena superficie reflectora y un cristal no defectuoso, la luz emitida por el cristal que llega al fotocátodo del tubo fotomultiplicador es de alrededor del 30%.¹⁴

Tubo fotomultiplicador

El tubo fotomultiplicador, la segunda parte del detector de centelleo, es un transductor de señales luminosas en eléctricas, está formado por un cilindro de vidrio al vacío que contiene en un extremo una placa sensible a la luz (fotocátodo), formada por capas alternadas de antimonio y cesio, que emiten electrones cuando reciben radiación luminosa (efecto fotoeléctrico), y se compone esencialmente de tres partes: el fotocátodo, los dínodos multiplicadores y el ánodo colector de carga eléctrica.

Preamplificador (y fuente de alto voltaje)

El preamplificador del sistema consiste de un circuito con transistores de ganancia unitaria sin inversión de señal, diseñado para operar con el ánodo o dinodo del tubo fotomultiplicador, no presenta formador de pulso y estandariza el tiempo de caída exponencial del pulso a 50 μ s. La impedancia de entrada es de 1M Ω con una capacitancia de 50 pF, utiliza una configuración emisor común en donde se aumenta la impedancia de entrada por retroalimentación positiva (denominada Bootstrap). La impedancia de salida es de aproximadamente 100 Ohms, se utiliza un circuito en par complementario para proporcionar la corriente requerida en la carga.

2.2.1.3 Funcionamiento

El funcionamiento es el siguiente: la radiación gamma emitida por la fuente incide directamente sobre el cristal, en el cual los fotones interactúan con los electrones contenidos en el cristal, a través de efecto fotoeléctrico, dispersión Compton o producción de pares, como se muestra en la figura 2.6. Donde cada e^-

deja un átomo ionizado que al neutralizarse emite un fotón óptico (o centello), esto es, un hoyo en la estructura cristalina NaI(Tl), el cual lo dona el Tl, ya que el centro v_k es móvil en el cristal NaI a temperaturas mayores a 90 K y se recombina con el Tl con lo que se emite un fotón de 420 nm¹⁵.

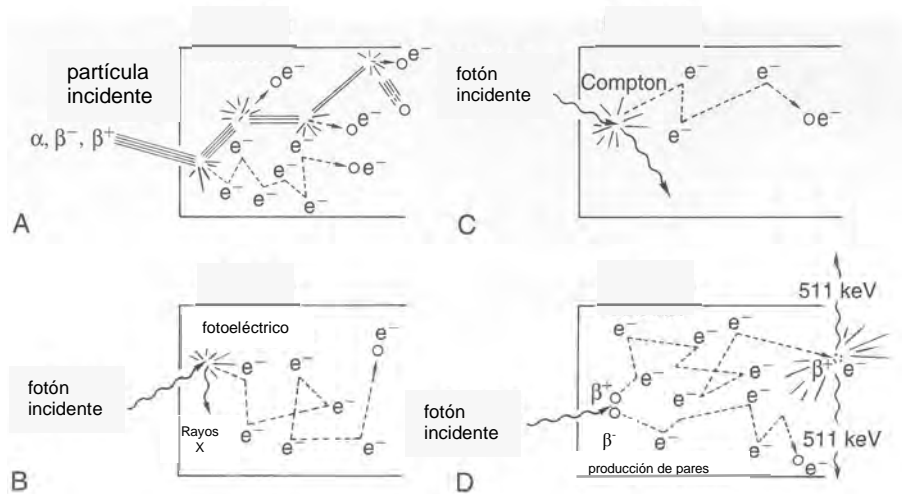


Fig. 2.6 Energía depositada en el detector. A, energía transferida de una partícula cargada a electrones en múltiples ionizaciones. B-D, energía transferida de un fotón incidente en la interacción con electrones en (B) efecto fotoeléctrico, (C) dispersión Compton y (D) producción de pares.¹⁶

Enseguida, los electrones producidos en los distintos mecanismos de interacción, a su vez excitan a la red cristalina induciendo la emisión de fotones ópticos, por lo que la información de la energía del rayo gamma queda contenida en el número de fotones ópticos y no en la energía de los mismos.

Los fotones ópticos inciden sobre el fotocátodo del tubo fotomultiplicador. En el fotocátodo, cada fotón visible que incide produce la emisión de un electrón, por efecto fotoeléctrico. Estos son acelerados y dirigidos hacia una serie de electrodos (dínodos). Los electrones desprendidos del cátodo viajan hacia el primer dínodo impulsados por la diferencia de potencial aplicada entre éste y el cátodo; esto les da energía suficiente como para que al llegar al primer dínodo sean capaces de arrancar 2 o 3 electrones por cada electrón incidente. Como el siguiente dínodo tiene un potencial mayor que el anterior, el proceso se repite, produciendo una multiplicación de electrones, de manera que al ánodo llegan de 10^6 a 10^8 electrones por cada electrón inicial. De esta forma la salida del fotomultiplicador entrega un pulso de tensión cuya amplitud es proporcional a la energía del rayo gamma original. Ver figura 2.7.

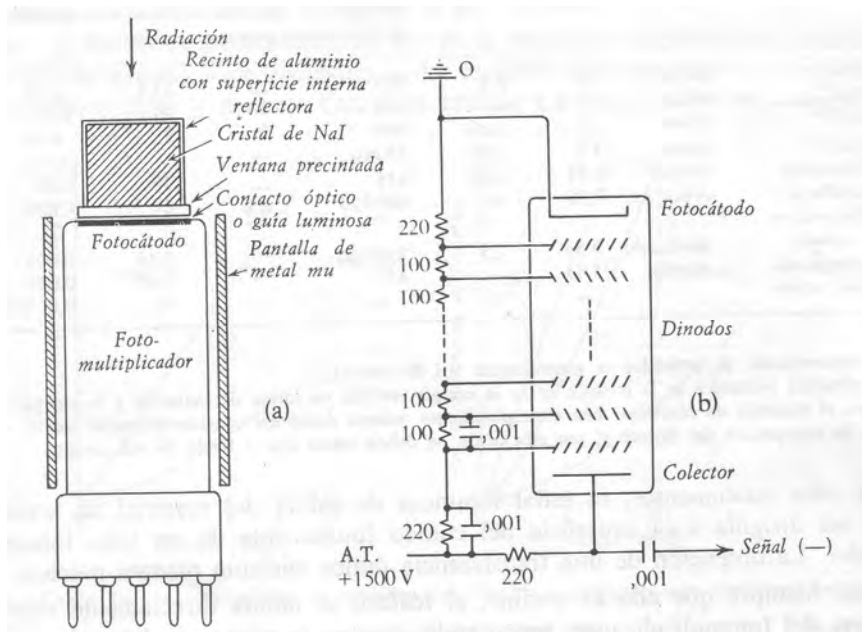


Fig. 2.7 Esquema de un detector NaI(Tl).¹⁷

Luego se pasa la señal por un amplificador, que tiene la propiedad de generar una señal de forma conocida y de duración ajustable, para ser introducida al analizador multicanal. La amplitud de la señal entregada por el amplificador, es proporcional a la cantidad de fotones que incidieron dentro de un intervalo de tiempo también ajustable. El analizador multicanal realiza la tarea de dividir la amplitud de la señal en distintos canales, es decir asocia cada canal una amplitud determinada de señal y cuenta cuantas veces recibió señales con la misma amplitud asociada. Esto es equivalente a contar cuantos electrones fueron emitidos por el material centellador.

En este trabajo, el equipo que se utiliza en el ordenador contiene, tanto el amplificador como el analizador multicanal, y el programa asociado da el espectro final.

2.2.1.4 Detector de GeHP¹⁸

El principio de funcionamiento de los detectores semiconductores puede asemejarse al de la cámara de ionización, donde el medio ionizable, en vez de un gas, consiste en un semiconductor (Ge o Si) de alta resistividad. Los detectores semiconductores normalmente son malos conductores, sin embargo, cuando son ionizados, la carga eléctrica producida es colectada con la aplicación de voltaje externo, como se hace con los detectores que utilizan un gas. Este principio no puede ser aplicado utilizando materiales conductores, ya que conduce un promedio alto de corriente aún sin ser ionizado. Así mismo, tampoco se pueden

utilizar materiales no conductores, ya que no conducen aún siendo ionizados. Por esta razón sólo los materiales semiconductores funcionan.

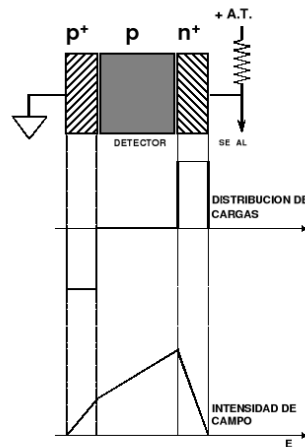


Fig. 2.8 Detector semiconductor.¹⁹

Especialmente el detector semiconductor de GeHP, como todos los detectores, ofrece ciertas ventajas y desventajas entre las cuales se encuentran, que son mejores absorbedores de radiación, ya que la energía necesaria para producir un par de portadores de carga en los semiconductores es aproximadamente 10^3 veces mayor que en los gases.

Por lo tanto, para una misma energía impartida, la cantidad de portadores de carga producidos es mucho mayor en los semiconductores que en gases o centelladores, lo cual se traduce en menores fluctuaciones estadísticas, por lo que se tiene una mejor resolución.

A su vez, los inconvenientes tecnológicos de los semiconductores son: su alta conductividad en comparación con la de los gases, lo cual se traduce en ruido que tiende a enmascarar la medición de partículas ionizantes de muy baja energía; por otro lado, está también la presencia de impurezas en el cristal así como, los defectos en su estructura cristalina (es decir, las vacancias y dislocaciones) producen recombinación de los portadores y, por lo tanto, pérdida de algunos de ellos, lo que resta eficiencia de detección.

Una forma de resolver el problema del cristal, es lograr un cristal muy puro, además de un descenso en la temperatura; en el caso del germanio se le llama GeHP.

2.2.2 Software

En este trabajo se utilizan principalmente cuatro programas, el primero es el ICSW (Integrated computer spectrometer), el cual cuenta con una tarjeta para computadora, que tiene integrado un amplificador, un multicanal y es el encargado de registrar los datos (cuentas por canal) y el programa permite obtener los espectros. Para el análisis estadístico de los datos, las gráficas y generar las curvas deseadas se utilizan Excel, MatLab y Mathematica.

2.2.3 Análisis de espectros

Una importante propiedad de un detector para su uso en espectrometría es la capacidad para poder discriminar partículas ionizantes de energía muy próximas entre sí. Por ejemplo al tener dos detectores distintos, simultáneamente expuestos a radiación se obtendrán espectros distintos, como se puede observar en las figuras 4.2 y 4.3. Se obtienen amplitudes y alturas distintas de los pulsos según el tipo de detector.

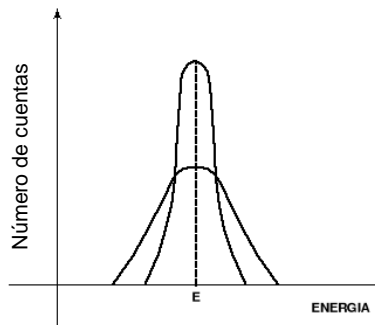


Fig. 2.9 Pulsos de dos detectores diferentes

Aunque ambas distribuciones están centradas en el mismo valor E (fig. 2.9), el ancho de ambas difiere notablemente. Estos anchos reflejan la distinta magnitud de las fluctuaciones estadísticas, propias de los detectores, de las señales producidas en cada interacción, suponiendo que por cada interacción se aportó la misma energía al detector.

La capacidad de un detector para discriminar las energías de las partículas ionizantes incidentes es tanto mayor cuanto menor sea el ancho de su función respuesta. Ello se cuantifica con un parámetro denominado "resolución" (r) del detector, el cual está dado por el ancho a mitad de altura de la función distribución

de amplitudes de las señales (*AMA*), para partículas ionizantes monoenergéticas, dividido por la energía del pico (*E*). Ecuación 11, figura 2.10.

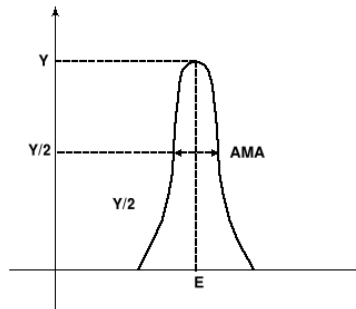


Figura 2.10 Resolución del detector

$$r = \frac{AMA}{E} \dots\dots\dots 11$$

La resolución es un parámetro adimensional. Cuanto menor sea el valor de la resolución de un dado detector, mejor diferenciará energías de valores cercanos entre sí.

De la ecuación 11, se tiene que la resolución (*r*) encontrada en el presente trabajo para el detector NaI(Tl) es de: (ver fig. 4.5 y tabla 4.2)

$$r = \frac{2590.8}{660.8} = 3.92$$

2.2.4 Fondo

Siempre que se habla de detectores de centello o de cualquier otro tipo de detector que va a ser utilizado en un medio natural, es importante tomar en cuenta la radiación del fondo, es decir, la radiación que proviene de los rayos cósmicos, de la radioactividad natural existente en el detector, de los materiales utilizados en el experimento, así como, otras fuentes de radiación que se encuentren en su entorno, como en el laboratorio.

Los elementos naturales que en general interfieren, pertenecen a las cadenas naturales de torio y uranio, ²¹²Pb, ²¹⁴Pb, ²¹⁴Bi, etc. Además existen otros isótopos naturales como el ⁴⁰K (que además se encuentra en el propio detector) y en algunos casos, elementos artificiales, que se encuentran en los materiales estructurales del blindaje o del detector²⁰.

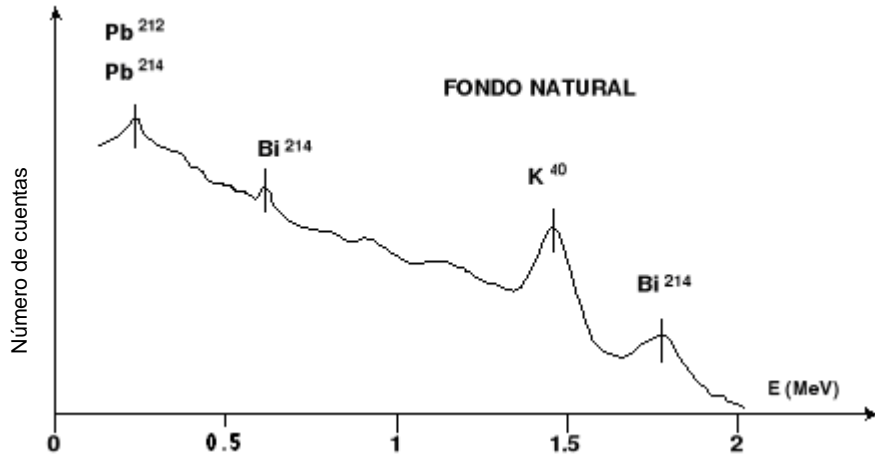


Figura 2.11 Fondo natural²¹

2.2.5 Colimadores de plomo

Se utilizan dos colimadores, uno para la fuente y el otro para el detector; el primero consiste en un cilindro macizo de plomo de 10 cm. de radio, con un orificio de 0.6 cm. y dentro del cual se encuentra la fuente de ^{137}Cs (ver fig. 2.12). El segundo, es un bloque de plomo, con un orificio de 0.6 cm., detrás del cual está centrado el detector (ver figura 2.13).

La finalidad de los colimadores es dirigir y reducir la radiación emitida por la fuente, en un haz de 0.6 cm. de diámetro, para su mejor manejo en el momento en que se busque un ángulo preciso.

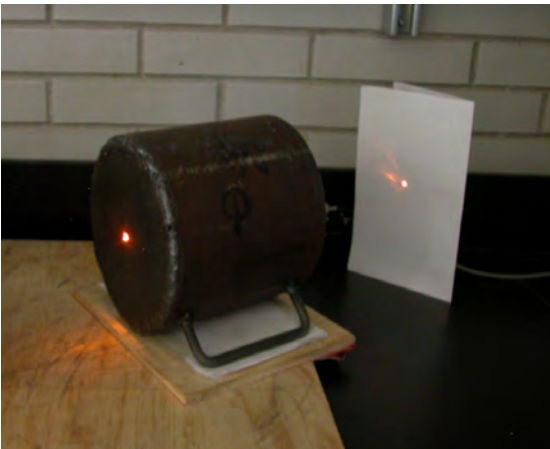


Fig. 2.12 Cilindro de plomo como colimador para el haz de la fuente de ^{137}Cs .

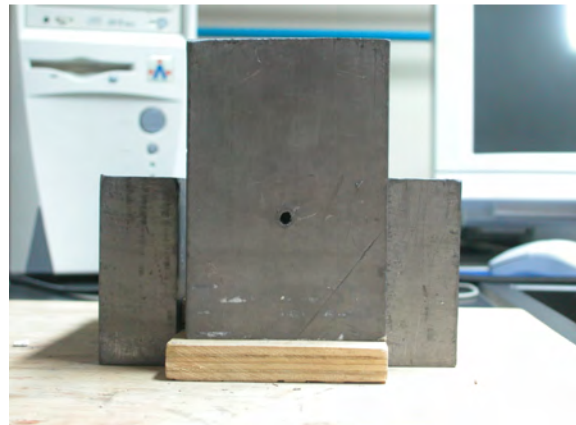


Fig. 2.13 Colimador de plomo en forma de bloque para el detector NaI(Tl).

CAPÍTULO III

EXPERIMENTO

A continuación se describe el último experimento realizado para el cual se obtuvieron finalmente resultados satisfactorios; primero se menciona el material utilizado, enseguida la forma en la que se procedió.

3.1 Material

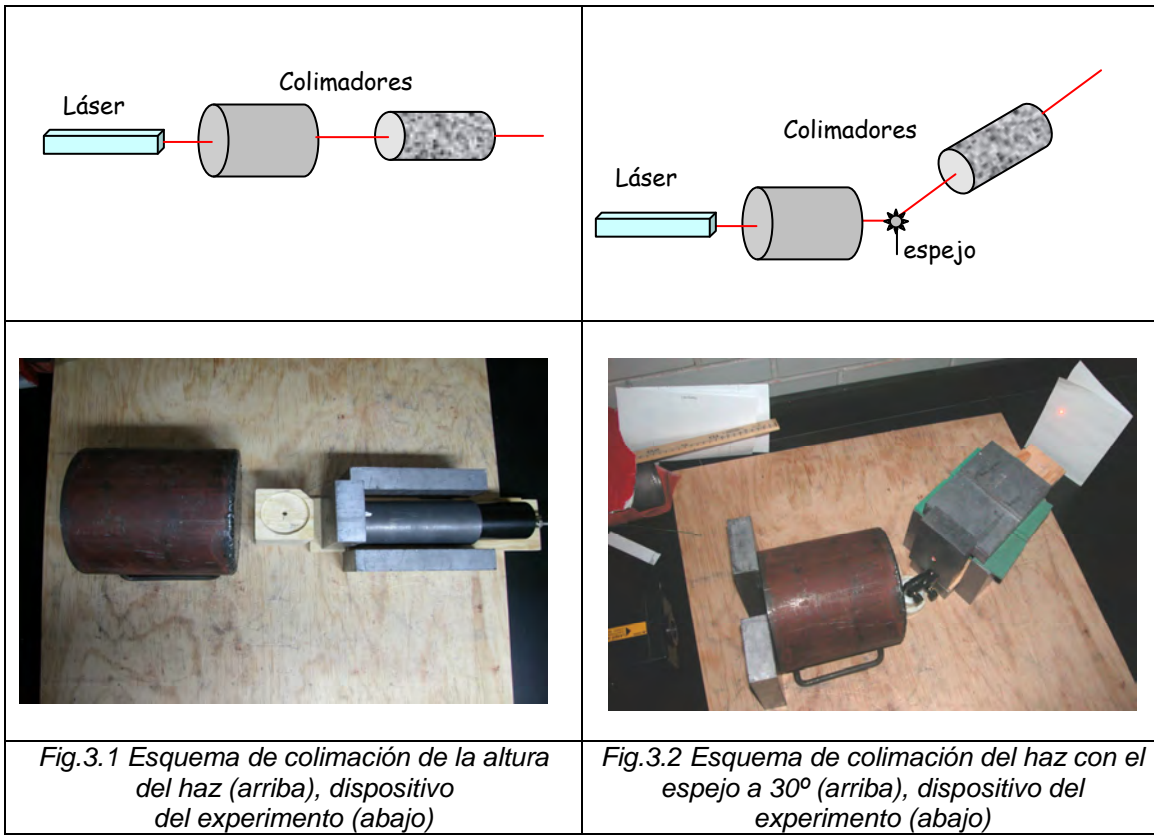
- Fuente: ^{137}Cs de 300 μCi
- Fuentes para calibración: ^{137}Cs y ^{133}Ba , de 1 μCi , cada una.
- Agua bidestilada
- Cloruro de Sodio (NaCl) al 99.97%
- Cloruro de Bario ($\text{BaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) al 99.37%
- Detector de centello de NaI(Tl) de 5cm x 5cm, con preamplificador
- Báscula digital
- 8 recipientes de plástico transparente
- Colimador: cilindro sólido de plomo con una perforación de 0.6 cm.
- Colimador para el detector: bloque de plomo con una perforación de 0.6 cm.
- Bloques de plomo
- Láser
- Espejo giratorio
- Ordenador con los programas ICSW, Excel, MatLab y Matemática y tarjeta multicanal Spectech/mcs-10

3.2 Procedimiento

El procedimiento, como se explica con detalle a continuación, consta primeramente del ajuste de los colimadores, enseguida las conexiones adecuadas y el encendido de los aparatos; siguiendo con la calibración del multicanal y la preparación de las muestras para llegar finalmente a la toma de espectros.

3.2.1 Colimación

Se colocan los dos colimadores de frente y el láser para colimar el haz a la altura necesaria, enseguida con ayuda del espejo graduado se coloca el colimador del detector en donde el haz indica 30° , como se muestra a continuación:



Una vez colimado el haz, se hacen las conexiones como se muestra en la figura 3.3, y se coloca el detector dentro de su colimador.

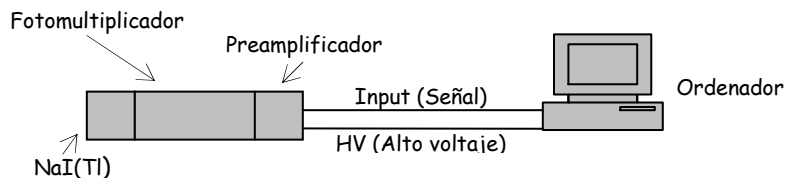


Fig. 3.3 Esquema de las conexiones.

Verificadas las conexiones, se encienden los aparatos, y se abre el programa ISCW en el cual es necesario activar el alto voltaje en 0.80 kV.

3.2.2 Calibración del multicanal

Enseguida se procede a la calibración del multicanal, para esto, es necesario adquirir un espectro usando isótopos conocidos, en este trabajo se utilizan el ^{133}Ba y ^{137}Cs , de 1 μCi cada una, produciendo líneas gamma en 31 keV, 81 keV, 356 keV para el ^{133}Ba y 661.6 keV para el ^{137}Cs , la selección de estas dos fuentes se debe a que entre estas energías es donde se realizarán todas las mediciones.

Este multicanal ofrece la posibilidad de calibrar con 2 puntos o con 3 puntos, para esto, es necesario obtener los espectros de las fuentes con las que se va a calibrar.

Esto es, se coloca la fuente de bario frente al detector y se obtiene el espectro durante 2 minutos, se posiciona el marcador en el canal más alto del primer pico y se verifica que tenga el mayor número de cuentas, se escribe el valor de la energía conocida correspondiente, enseguida, se mueve el marcador al punto más alto del segundo pico, se verifica, una vez más, que tenga el mayor número de cuentas y se escribe la energía conocida correspondiente.

Ahora, se cambia la fuente de ^{137}Cs de 1 μCi , se toma el espectro durante 2 minutos y de la misma manera que para el ^{133}Ba , se busca el canal más alto del primer pico y se verifica que tenga el mayor número de cuentas, se escribe el valor de la energía conocida correspondiente.

Por ejemplo, los datos obtenidos para el bario fueron, en el canal 69 se obtuvieron 380 cuentas, al cual se le asignó la energía de 81 keV, para el segundo pico, se obtuvieron 779 cuentas para el canal 327, al cual se le asignó la energía de 356 keV. Para el cesio se obtuvieron 297 cuentas en el canal 592 y se le asignó la energía de 661.6 keV.

Enseguida se selecciona en la barra de herramientas el modo calibrar con 3 puntos, se eligen las unidades con las que se va a trabajar (keV o MeV) y se escriben los datos anteriores.

Para verificar si el multicanal ha quedado bien calibrado, se vuelve a colocar el cesio, se obtiene una vez más su espectro y se verifica, el canal, el número de cuentas y la energía asignada por el multicanal, si ésta se aproxima a la línea gamma conocida, entonces se puede decir que el aparato está calibrado, de no ser así, se repite la calibración desde el principio; es posible aumentar o disminuir la ganancia para una mejor calibración.

Una vez calibrado, es necesario dirigirse a la ventana de calibración para obtener la función estadística de los datos calculada por el programa ICSW, los cuales nos serán necesarios para obtener las energías correspondientes a cada canal, como se muestra en la ecuación 12:

$$\text{Energía} = 11.0913 + (1.00204 \times \text{canal}) + (0.00016123 \times \text{canal}^2) \dots\dots\dots 12$$

Para verificar que sea correcto el cálculo, en el canal 592 que fue asignado para el cesio, debe corresponder a la energía de 661.6 keV.

3.2.3 Cálculo para las concentraciones de sal

Como se mencionó en la teoría, se necesitan 359g de NaCl y 360g de BaCl₂ 2H₂O por litro de agua para obtener solución saturada; de esta manera, la masa de sal (m_{SB}) que corresponde a la concentración (50%, 85% y 100%) esta dada por la siguiente ecuación:

$$m_{SB} = \frac{m_s \cdot m_r}{10^3} \dots\dots\dots 13$$

donde:

m_s es la masa de sal con respecto a la concentración requerida

$$m_s = 359 \cdot C / 100 \text{ para el NaCl}$$

o bien

$$m_s = 360 \cdot C / 100 \text{ para el BaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$$

C es la concentración requerida (50%, 85% y 100%).

m_r es la cantidad de agua que contiene el recipiente.

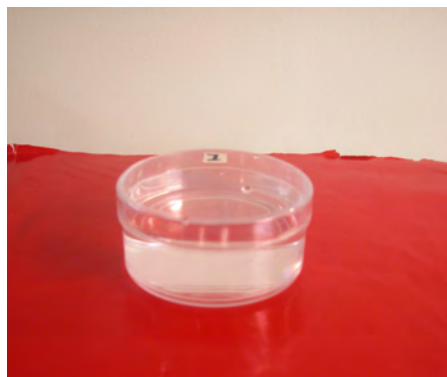


Fig 3.4. Ejemplo de una de las muestras (sal diluida en agua bidestilada)

3.2.4 Toma de espectros

Una vez calibrado el multicanal y teniendo las muestras listas, se coloca el siguiente dispositivo:

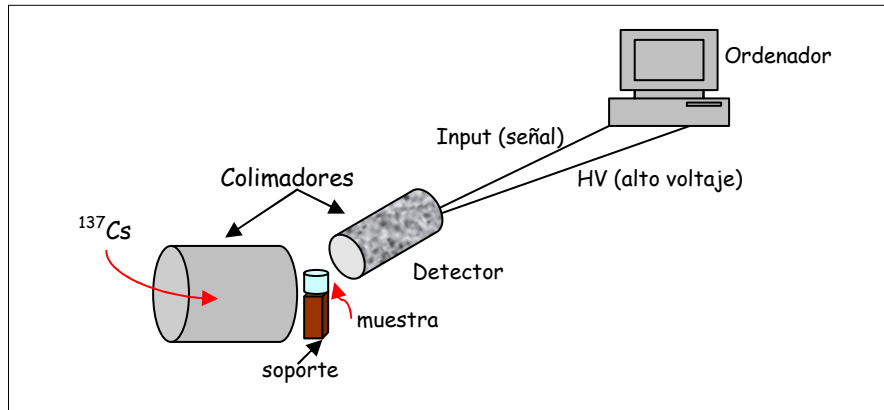


Fig. 3.5 Esquema del experimento



Fig.3.6 Experimento, al fondo se observa el ordenador con un espectro. Al frente, el láser y el primer colimador dentro del cual se encuentra la fuente de ^{137}Cs



Fig. 3.7 Vista superior del experimento

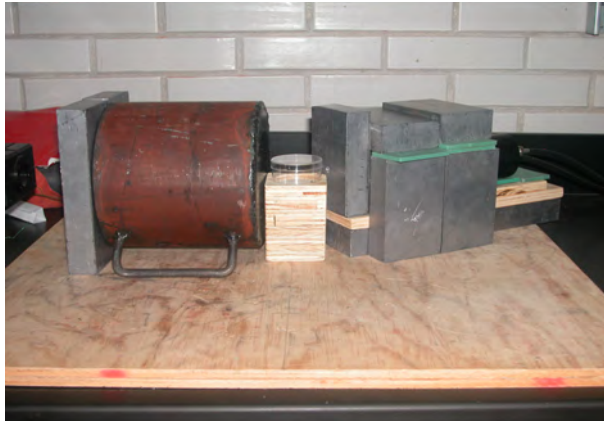


Fig. 3.8 Vista lateral del experimento.

Primero, se tomó un espectro con la fuente de ^{137}Cs de $300\ \mu\text{Ci}$, sin muestra, frente al detector, es decir a 0° , por tan sólo un minuto. Ya que éste nada más servirá para verificar la calibración y que el espectro esperado se cumple.

Después se tomó el espectro de la radiación de fondo, es decir, todas las fuentes se encuentran dentro de sus estuches, en la caja fuerte instalada en el laboratorio, durante 24 horas.

Enseguida, con la fuente de ^{137}Cs de $300\ \mu\text{Ci}$, colocada a 30° del detector, durante 24 horas cada uno, se adquirieron los siguientes espectros:

- a) sin muestra (en aire),
- b) con una muestra de agua,
- c) con una solución de NaCl al 50%,
- d) con una solución de NaCl al 85%,
- e) con una solución de NaCl al 100%,
- f) con una solución de $\text{BaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ al 50%,
- g) con una solución de $\text{BaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ al 85%,
- h) con una solución de $\text{BaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ al 100%.

Antes de comenzar a tomar cada uno de los espectros anteriores, se verificó la calibración del multicanal, siguiendo los mismos pasos que se explicaron en 3.2.2 con la finalidad de ver si el equipo sufría algún cambio.

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS DE RESULTADOS

A continuación se hace un análisis de los resultados obtenidos, primeramente se analiza el fondo existente en el laboratorio, enseguida la influencia de éste con respecto a los espectros del ^{137}Cs a 0° y 30° en aire y finalmente se hace un estudio de los espectros del ^{137}Cs a 30° con las distintas muestras de agua.

Para llevar acabo el estudio de los espectros con las muestras, se prosigue en tres etapas: en la primera se observa el comportamiento general de todos los espectros; en la segunda, se compara la influencia debida a las distintas sales (NaCl y BaCl_2) con respecto al agua y en la tercera se analizan los cambios debidos a la concentración de cada sal.

Si se observa con detenimiento el espectro de salida dado por el programa ICSW (fig. 1.2), es una serie de puntos, los cuales al ser graficados y alisados con Excel, son unidos por líneas y muestran una serie de picos. Ya que el objetivo del presente trabajo es analizar el comportamiento general de éstos, se recurre a un método frecuentemente utilizado en el laboratorio para interpretar espectros, llamado **Convolución**, el cual utiliza una distribución gaussiana para eliminar el ruido.¹ De esta manera, para obtener curvas más claras, a cada espectro se le realiza una convolución (comparar figuras 4.1 y 4.4); en el anexo 2 se encuentra el programa de *Wolfran Mathematica 7*, utilizado para este fin.

Una vez obtenida la convolución, se le pidió al programa dar los máximos y mínimos de cada espectro, y se obtuvieron los datos experimentales reportados.

4.1 Fondo

Como se mencionó en la sección 2.2.4, es importante reconocer los elementos naturales que se encuentran presentes en el momento de la toma de datos, es decir, el fondo. Para conocer los elementos que se encuentran en el fondo, se tomaron dos espectros simultáneos dentro del laboratorio, el primero (fig. 4.1) tuvo una duración de 24 horas, y fue adquirido con el mismo detector $\text{NaI}(\text{TI})$ que se utiliza en el resto del experimento; el segundo espectro (fig. 4.2) fue adquirido durante 26 horas con un detector de GeHP . Además se presenta un espectro (fig. 4.3) tomado 5 meses antes en el mismo laboratorio con un detector de GeHP durante 72 horas.

A continuación se pueden observar los espectros adquiridos y los elementos que se encuentran presentes.

El pico predominante del espectro se encuentra en la energía de 1461 keV y corresponde al ^{40}K , éste es muy abundante en la naturaleza.

También se puede notar el tipo de espectro característico de un detector de NaI(Tl) y uno de GeHP. Remarcando que en este trabajo se utiliza uno de NaI(Tl).

Fondo con detector NaI(Tl) 24 hrs.

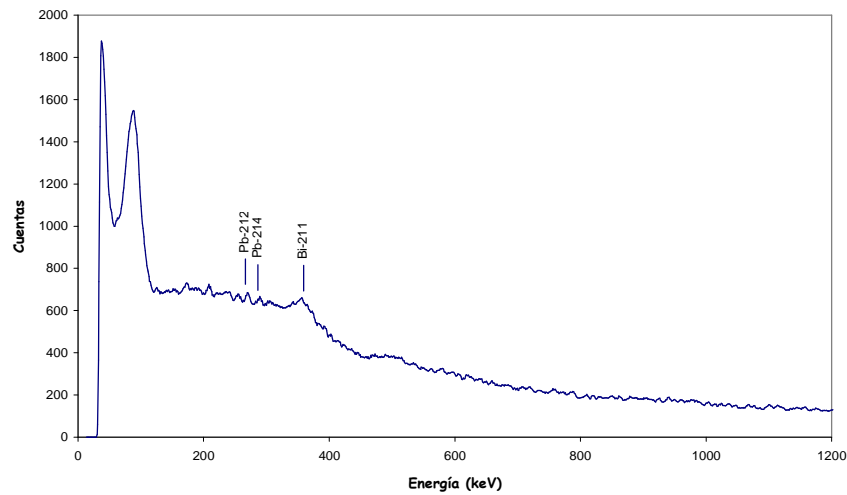


Fig. 4.1 Espectro del fondo del laboratorio tomado durante 24 horas con un detector de NaI(Tl), escala normal.

Fondo con detector de GeHP 26 hrs.

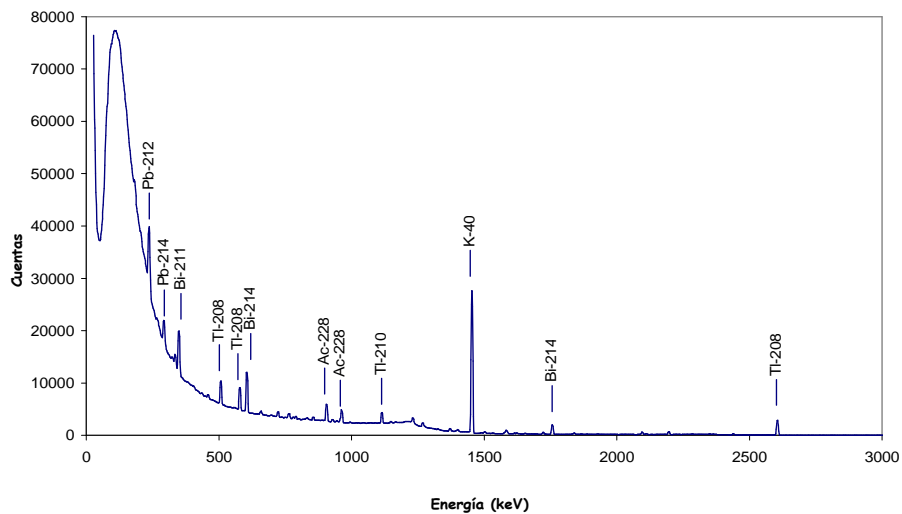


Fig. 4.2 Espectro del fondo del laboratorio tomado durante 26 horas con un detector de GeHP, escala normal.²

FONDO DEL TALLER DE FISICA DE RADIACIONES
DICIEMBRE 2008, GeHP SIN BLINDAJE

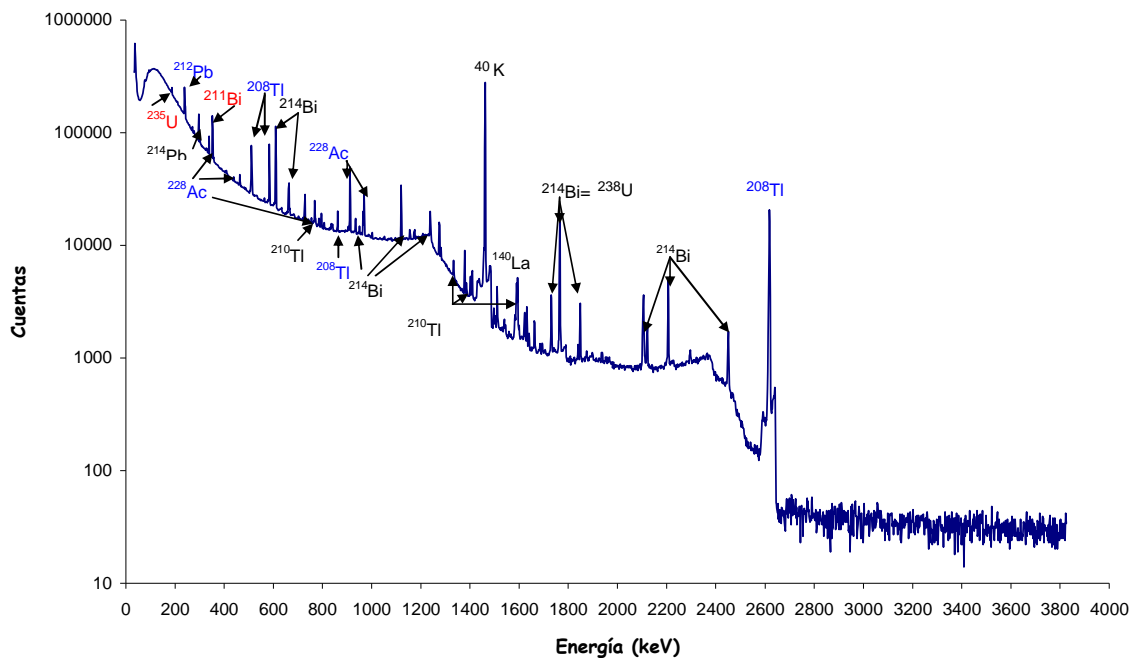


Fig. 4.3 Fondo tomado un detector de GeHP en dic. 2008, durante 72 horas, usando escala logarítmica.³

En la tabla 4.1 se presentan los elementos del fondo, encontrados en el laboratorio de Física de radiaciones, así como la energía, intensidad y vida media, de cada uno.

Elemento	Energía (keV)			Intensidad	Vida media
	Teórica ⁴	Nal(Tl)	GeHP		
²¹² Pb	238.6	254.4	237.1	43.6%	10.64 horas
²¹⁴ Pb	295.2	289.0	291.5	18.4%	26.8 meses
²²⁸ Ac	338.3		333.7	11.3%	6.15 horas
²¹¹ Bi	351.1	341.6	348.8	12.9%	2.14 meses
²⁰⁸ Tl	510.7		507.3	22.6%	3.1 meses
²⁰⁸ Tl	583.2		578.2	85%	3.1 meses
²¹⁴ Bi	609.3		605.3	45.5%	19.9 meses
²²⁸ Ac	911.2		905.6	25.8%	6.15 horas
²²⁸ Ac	968.9		961.5	15.8%	6.15 horas
²¹⁰ Tl	1110.0			6.9%	1.3 meses
⁴⁰ K	1460.82		1453.4	10.6%	1.24 x 10 ⁹ años
²¹⁴ Bi	1764		1756.7	15.3%	19.9 meses
²⁰⁸ Tl	2614.5		2606.2	99.8%	3.1 meses

Tabla 4.1. Elementos que pertenecen al fondo, con su respectiva energía en keV, intensidad y vida media.

Es necesario recordar que en este experimento se utilizan bloques de plomo tanto para proteger y colimar el detector, así como un cilindro de plomo para colimar la fuente; además de otros elementos que pueden estar contenidos dentro de éstos y que se desconocen pues no se tienen las especificaciones del proveedor. Todos estos elementos forman parte del fondo detectado.

Por otro lado, como se puede observar, el espectro obtenido con el detector de GeHP es más claro y preciso que el del detector Nal(Tl), ya que, bajo las mismas condiciones, entre 0 keV y 1200 keV, detectó 9 elementos, mientras que el Nal(Tl), detectó únicamente 3 elementos y que al hacer la convolución del espectro de la figura 4.1, es sólo un elemento, ver figura 4.4.

El objetivo de este trabajo no es hacer un análisis profundo del fondo ni tampoco una comparación de detectores. Sin embargo, como se muestra en la siguiente sección, hay un elemento, el ^{211}Bi , que por tener una energía de 351.1 keV (fig. 4.4), que influye en el estudio de los espectros.

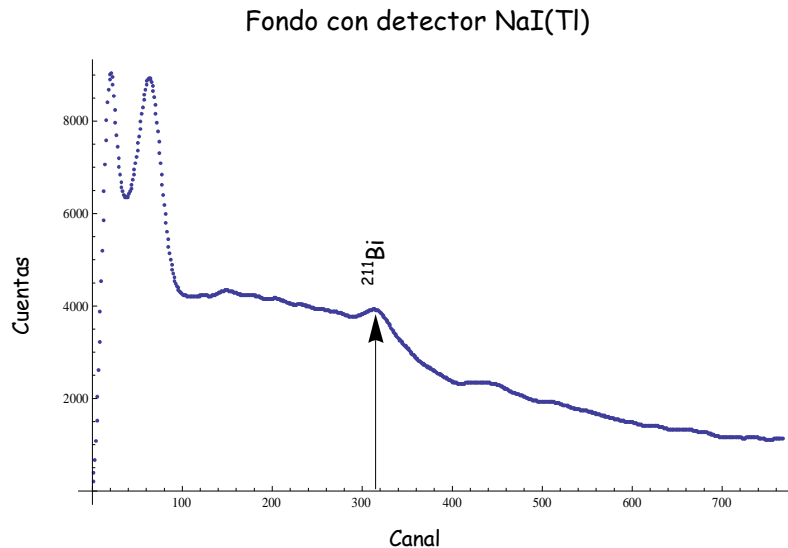


Fig. 4.4 Convolución de la figura 4.1 correspondiente al espectro del fondo del laboratorio tomado durante 24 horas con un detector de NaI(Tl).

4.2 Fondo y Cesio

En el espectro de la fuente de ^{137}Cs de 300 μCi , colocada frente al detector, es decir a 0° ; se confirma que el pico más alto está en 660.8 keV que corresponde a la energía del fotón incidente, enseguida está el pico correspondiente al borde Compton en 414.6 keV, el tercer máximo del espectro, se encuentra en 195.1 keV correspondiente a la energía de retrodispersión (backscattering) y finalmente se observan los dos últimos picos correspondientes al fondo en 77.8 keV y 32.7 keV. Ver figura 4.5 y tabla 4.2.

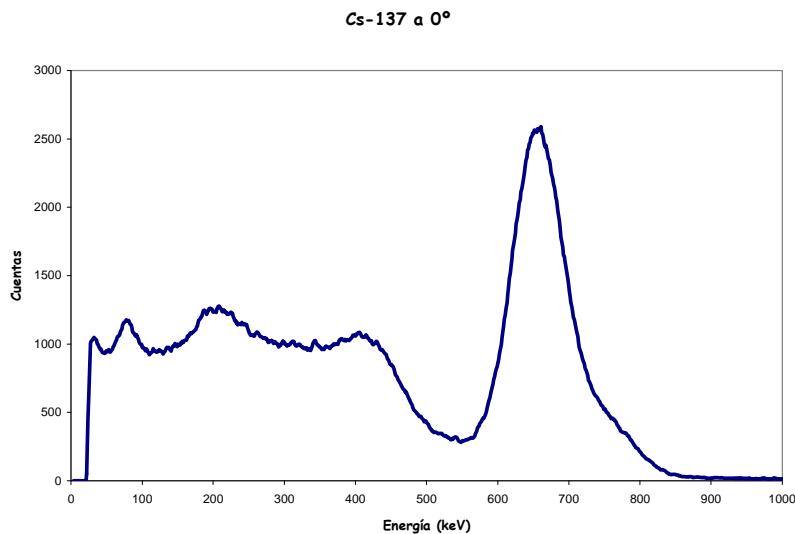


Fig. 4.5 Espectro de una fuente de ^{137}Cs , tomado frente al detector de NaI(Tl).

Energías (keV) ^{137}Cs a 0°		
Conspicua de:	Valor teórico	Valor experimental
Fotopico	661.6	660.8
Borde Compton	477.3	414.6
Retrodispersión	184.4	195.1
Fondo exp.	77.1	77.8
Fondo exp.	30.9	32.7

Tabla 4.2 . Valores teóricos y experimentales de una fuente de ^{137}Cs colocada frente a un detector NaI(Tl).

En la energía correspondiente al Borde Compton, se observa una disminución, la cual es típica de los espectros obtenidos con detectores de NaI(Tl). Cabe aclarar que este espectro fue obtenido únicamente con fines de comprobar el espectro mostrado en la teoría.

^{137}Cs a 30°

Al comparar el espectro adquirido con la misma fuente de ^{137}Cs pero ahora colocada a 30° del detector, con el espectro del fondo (fig. 4.6) se puede apreciar que hay una diferencia significativa entre el Cesio y el fondo; se duplica el número de cuentas obtenidas para el Cesio (en promedio 1032 cuentas) y las del fondo (en promedio 505 cuentas), de 110 keV a 620 keV, esto es, se obtiene en promedio una diferencia de 527 cuentas (fig. 4.7).

Fondo y Cs-137

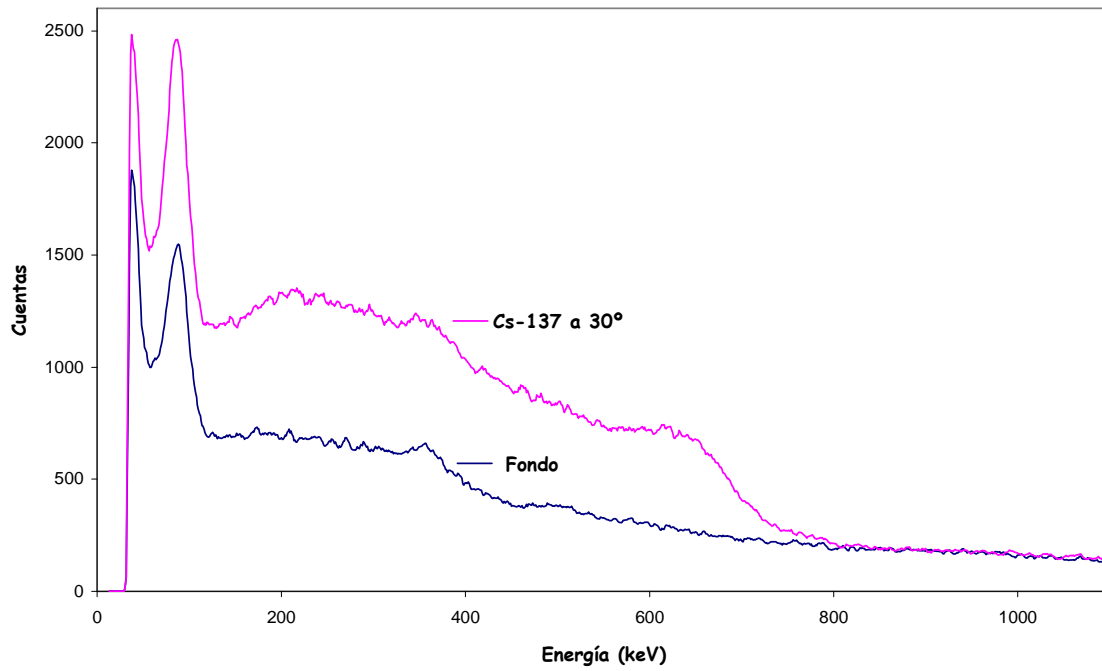


Fig. 4.6 Espectro del fondo y de una fuente de ^{137}Cs , colocada a 30° de un detector $\text{NaI}(\text{Tl})$ durante 24 horas.

Promedio de la diferencia entre el fondo y Cs-137 a 30°

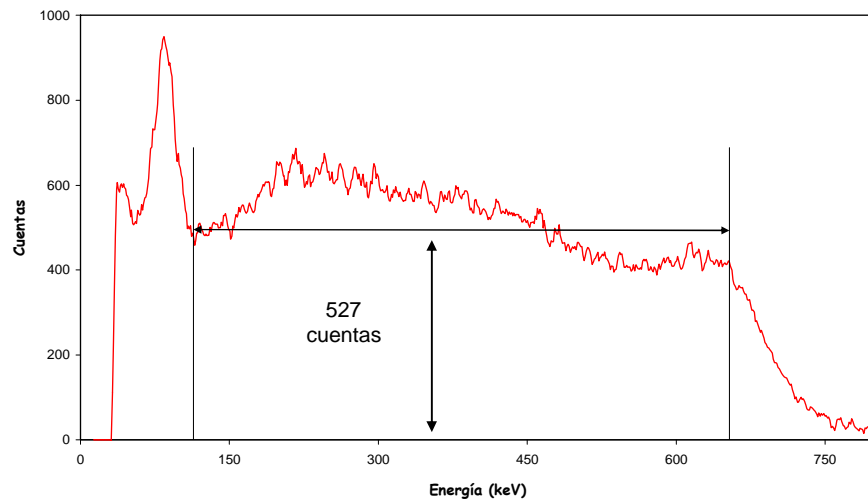


Fig. 4.7 Promedio de la diferencia entre el fondo y la fuente de ^{137}Cs a 30° .

Lo anterior permite pensar que el fondo tiene una baja influencia sobre los espectros, sin embargo, al comparar los espectros obtenidos tanto para el ^{137}Cs en aire como para ^{137}Cs con las distintas muestras, existe un pico que desaparece al restarle el fondo a los espectros (ver figuras 4.8 y 4.9).

Como se mencionó en el apartado anterior, este pico se debe muy probablemente al ^{211}Bi , que es el único elemento que al hacer la convolución del fondo se observa (fig. 4.4).

Por esta razón, el análisis de todos los espectros siguientes, se hace restando el fondo a cada uno.

Ahora bien, puesto que el objetivo de este trabajo es analizar el cambio de la dispersión Compton con distintas concentraciones de sal en agua, no es de interés el fotopico, es decir, no es interesante conocer la energía de los fotones incidentes puesto que ésta ya se conoce experimentalmente, además se comprueba en este experimento que se cumple sin cambio alguno, por el contrario, es más interesante hacer el análisis al cambiar el ángulo de incidencia, eliminando el efecto fotoeléctrico, para energías de 661.6 keV, en este caso a 30° .

La razón por la cual se eligió el ángulo de 30° fue tratando de conseguir el ángulo más pequeño que permitió el dispositivo experimental, con el fin de obtener el mayor número de fotones incidentes por dispersión Compton (ver fig. 1.5).

El principal problema encontrado en la reducción del ángulo fue el espesor del espejo y el diámetro del haz. Al hacer incidir el láser sobre el espejo, e ir reducir el ángulo, el haz incidía sobre el borde del espejo (ver figura 3.2), de manera que el mínimo ángulo para el cual el haz incidía en la cara del espejo fue el de 30° . Por consiguiente, todos los espectros fueron adquiridos a un ángulo de 30° .

Cesio-137 y muestras de BaCl₂

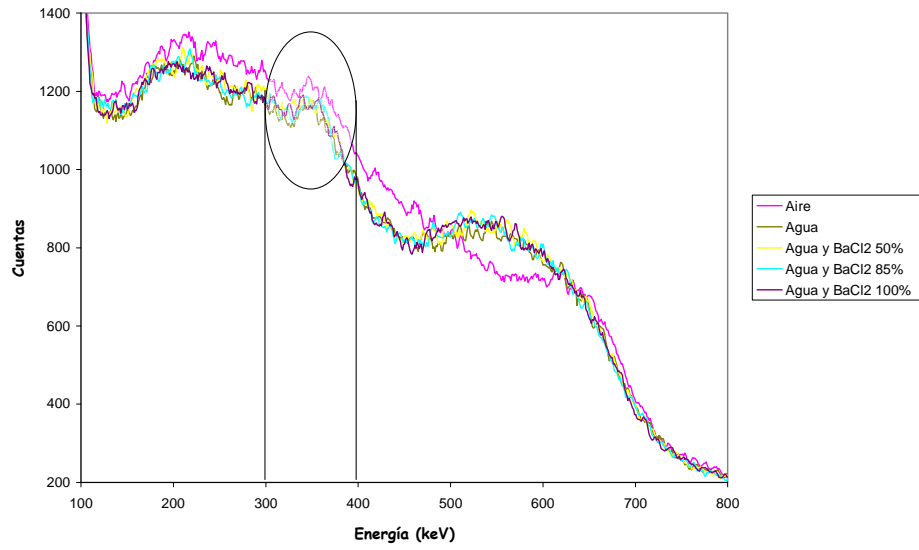


Fig. 4.8 Espectros del ¹³⁷Cs a 30°, en aire (rosa), agua y agua con distintas concentraciones de BaCl₂. Dentro de la elipse se observa un pico debido al fondo.

Espectros de BaCl₂ restando el fondo

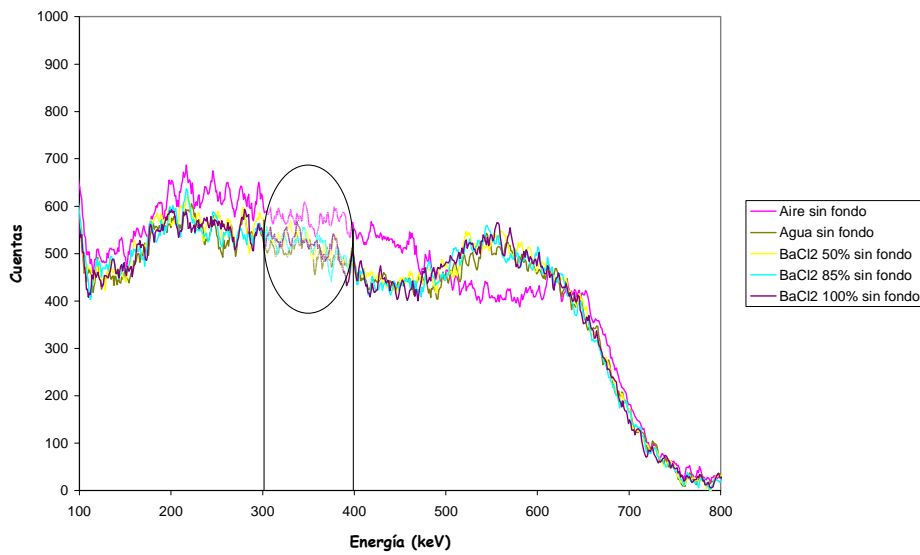


Fig. 4.9 Espectros del ¹³⁷Cs a 30°, en aire (rosa), agua y agua con distintas concentraciones de BaCl₂, restando el fondo.

4.3 Comportamiento general de los espectros.

Al observar el comportamiento de los espectros debidos al ^{137}Cs sobre aire, agua y agua con NaCl y BaCl_2 con distintas concentraciones, se constata que siguen en principio un mismo patrón (figuras 4.8, 4.9 y 4.10).

Espectros de NaCl, restando el fondo

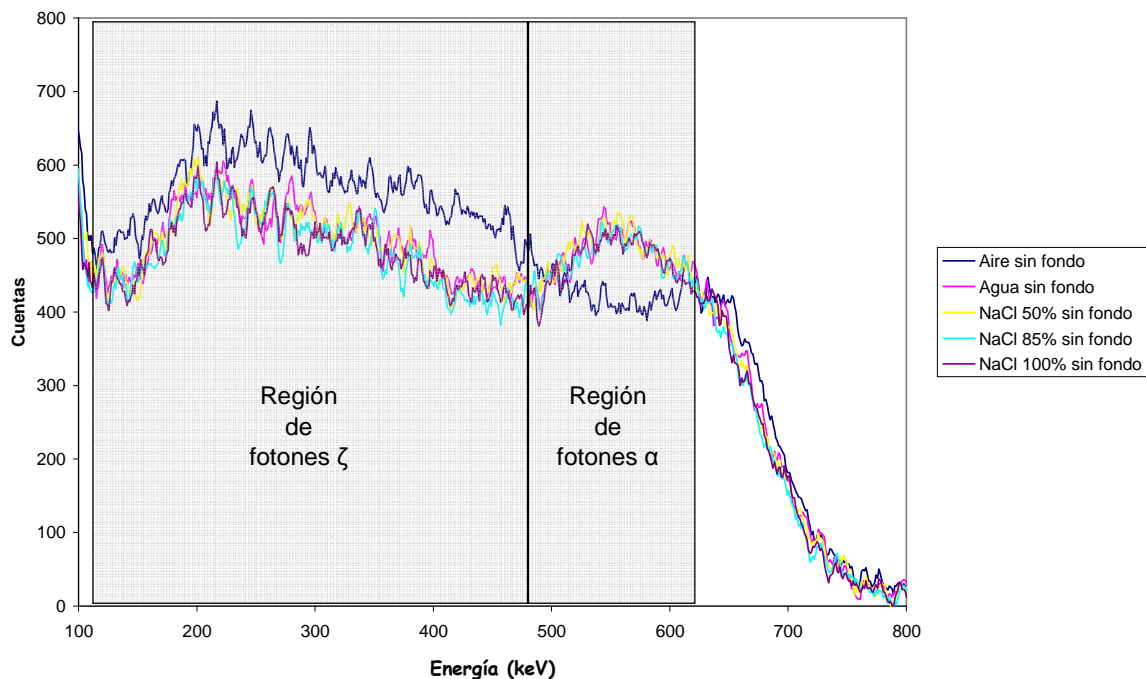


Fig. 4.10 Espectros del ^{137}Cs a 30° , en aire (rosa), agua y agua con distintas concentraciones de NaCl. En gris, las dos regiones de estudio.

De manera que para el análisis siguiente, los espectros se dividen en dos regiones de energía: la primera corresponde a la región comprendida entre 480 keV y 620 keV, que corresponden a los canales 438 y 558 respectivamente, a la cual se le nombrará **Región de fotones α**, y se refiere a la zona en la que se encuentran los fotones que son dispersados muy poco, de manera que pierden muy poca energía, dicho de otra manera, conservan la mayor energía después de la colisión. (figuras 4.10, 4.12 y 4.13).

A la segunda región se le llamará **Región de fotones ζ**, y comprende desde la energía de 110 keV hasta 479 keV (del canal 98 al 437). En ésta se encuentran todos los fotones de menor energía, ya sea por haber cedido una parte importante de su energía al electrón de retroceso o por haber sufrido varias dispersiones (figuras 4.10, 4.12 y 4.13).

Iniciando el estudio del comportamiento general de los espectros, se observa que en el espectro del ^{137}Cs colocado a 30° del detector, sin ninguna muestra, es decir **en aire**, hay un máximo que se encuentra en el canal 541 que corresponde a 601.6 keV (fig. 4.11); el cual, se había calculado teóricamente en 563.8 keV (tabla 1.1).

La diferencia entre la energía teórica y la energía experimental, se debe a la cantidad de variables que fueron tomadas para calcular el valor teórico y las que realmente se ven implicadas en el valor experimental; en el primero, se supone una única colisión de un fotón con un electrón, vistos desde la mecánica relativista, como se explicó en la sección 1.2.2.

En cambio, en el dato experimental intervienen muchos otros factores como son, el detector, el aire, la cantidad de radiación, etc. Sin embargo, para fines del objetivo del presente trabajo, que es estudiar los cambios en los espectros al cambiar las concentraciones de sal en agua, implica que **todas las variables contenidas en el dato experimental, son las mismas, que se encontrarán en todos los espectros, a excepción del cambio de las muestras**, es decir, se utiliza el mismo detector, la misma fuente, el mismo dispositivo, una variación insignificante de presión y temperatura, etc.

Por consiguiente, se toma al espectro de ^{137}Cs a 30° en aire, como el espectro base de comparación en el resto de los espectros.

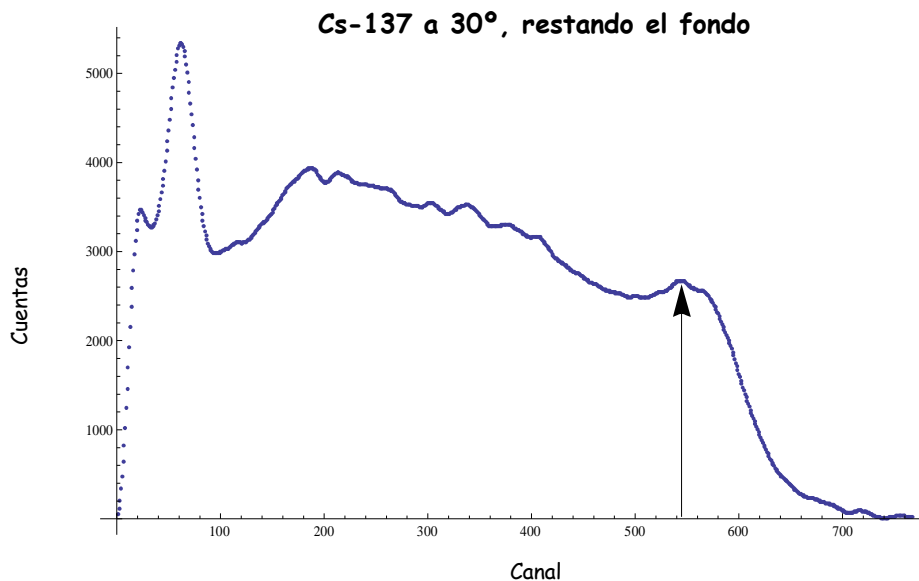
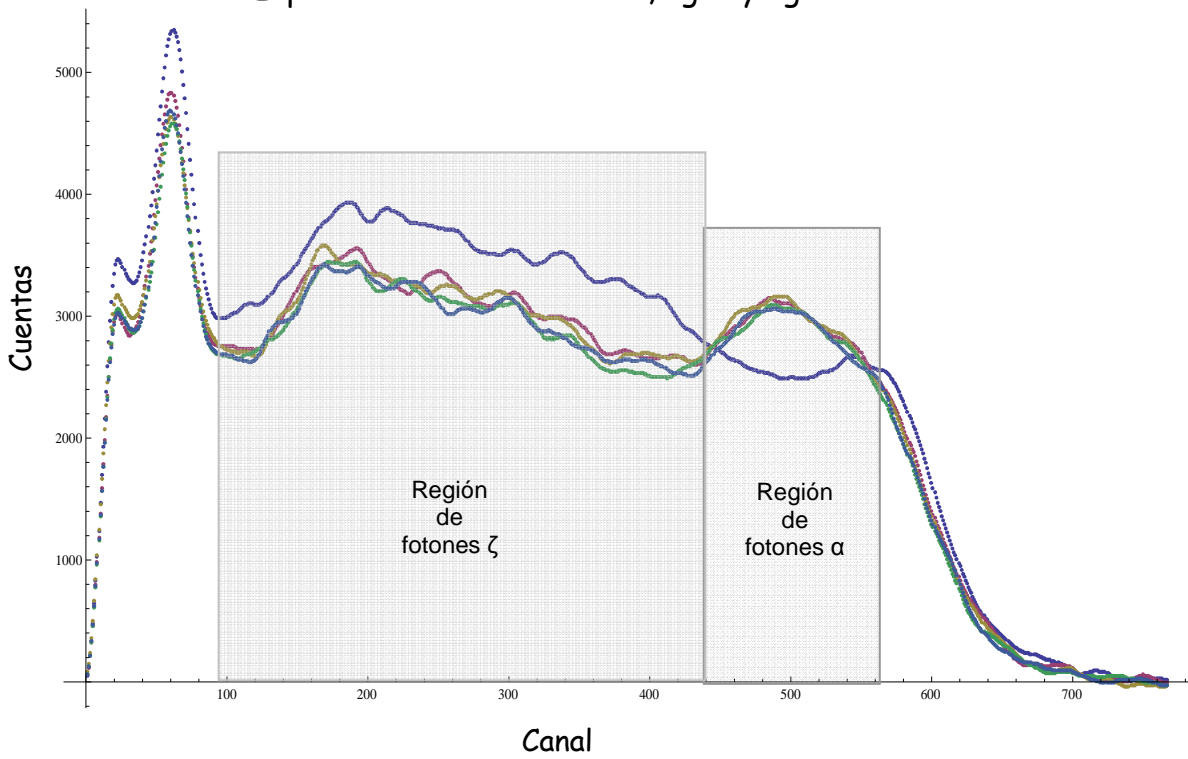


Fig. 4.11 ^{137}Cs en aire, colocado a 30° del detector, restando el fondo.

Espectros del ^{137}Cs en aire, agua y agua con NaCl



- Aire
- Agua
- Agua y NaCl al 50%
- Agua y NaCl al 85%
- Agua y NaCl al 100%

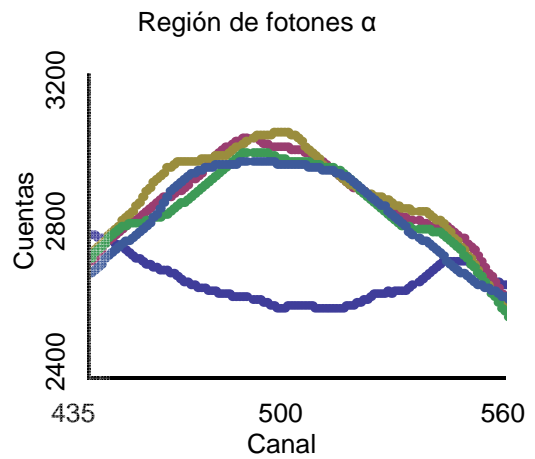
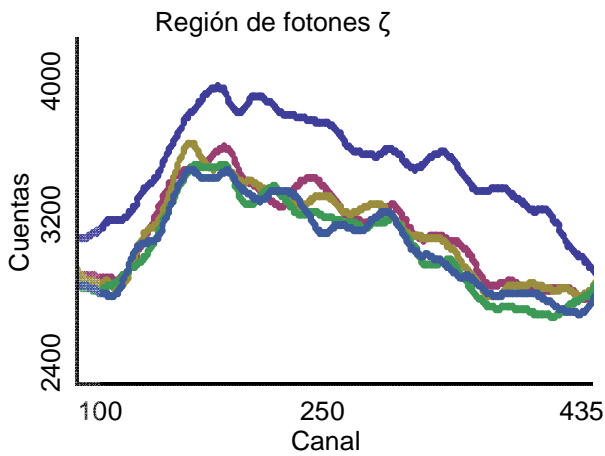
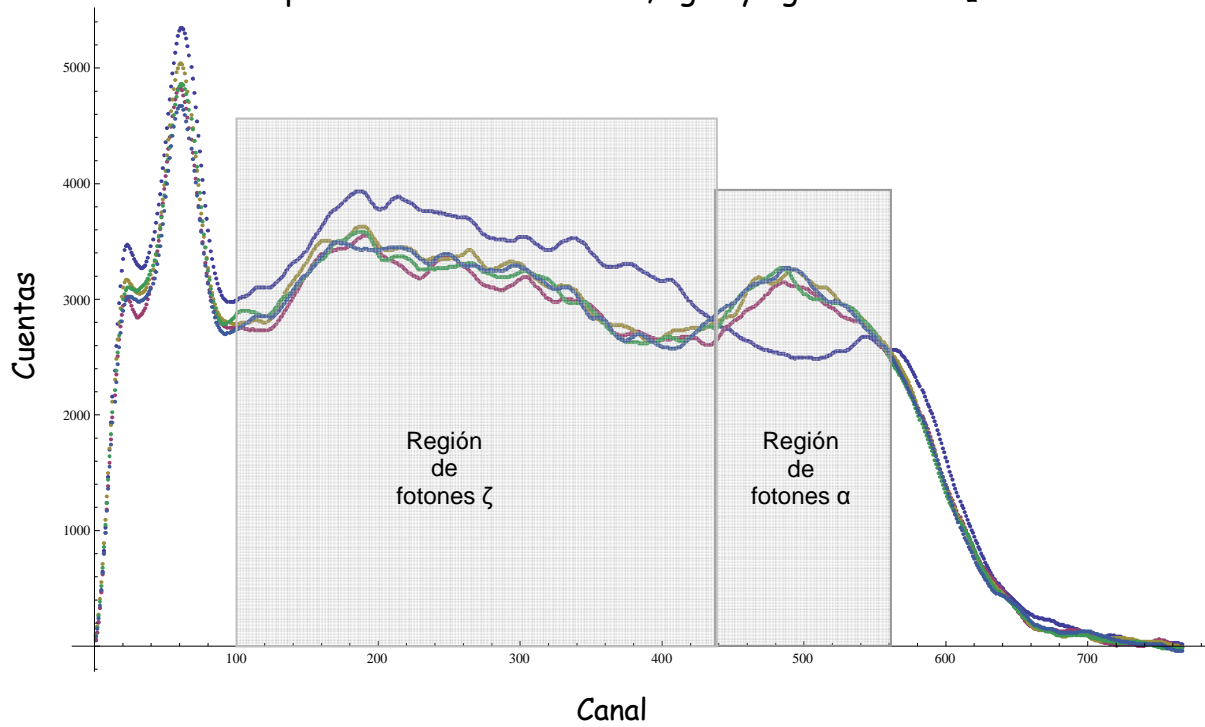


Fig. 4.12 Convulsión de los espectros del ^{137}Cs , en aire, agua y agua con distintas concentraciones de NaCl. Arriba, espectro completo; abajo izquierda, región de fotones ζ ; abajo derecha, región de fotones α .

Espectros del ^{137}Cs en aire, agua y agua con BaCl_2 .



- Aire
- Agua
- Agua y BaCl_2 al 50%
- Agua y BaCl_2 al 85%
- Agua y BaCl_2 al 100%

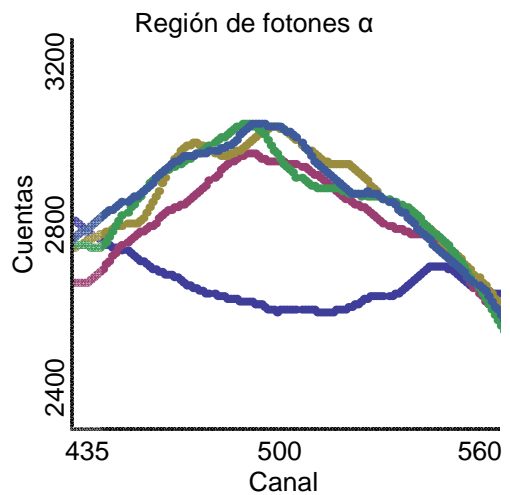
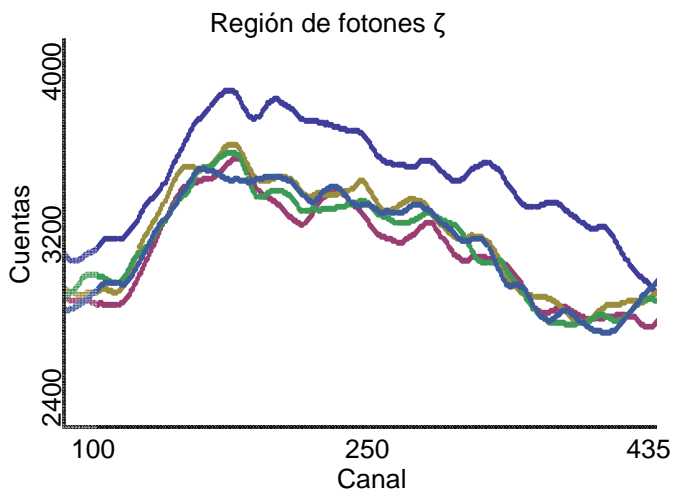


Fig. 4.13 Convolución de los espectros del ^{137}Cs , en aire, agua y agua con distintas concentraciones de NaCl . Arriba, espectro completo; abajo izquierda, región de fotones ζ ; abajo derecha, región de fotones α .

De los espectros de las figuras 4.12 y 4.13 se obtiene que:

- **Región de fotones α**

➤ a partir de una energía aproximada de 622 keV (canal 560), las cuentas tanto en las muestras como en aire disminuyen drásticamente hasta llegar a un número prácticamente constante que corresponde a la radiación de fondo. La diferencia entre los 622 keV y los 661.6 keV es por el ángulo al cual se encuentra el detector.

➤ también se observa que a partir de los 622 keV, antes citados, el promedio de las muestras pasa ligeramente por debajo del espectro del aire, esto se debe a la interferencia de la muestras entre la fuente y el detector, es decir, al interferir con un material de mayor densidad electrónica se registra una disminución en el número de fotones que bajo una dispersión Compton a 30° logran llegar al detector para energías mayores a los 622 keV.

➤ enseguida se observa el fenómeno más interesante de este trabajo que es **el aumento de cuentas** en la *región de fotones α* .

Para hacer una comparación entre los espectros, ya sea en su conjunto o cada uno por separado, se analizan los máximos y mínimos alcanzados en los espectros.

De manera que, el máximo, al promediar el espectro del agua con el espectro del promedio de todas las muestras con NaCl, tiene 3136 cuentas, y el mínimo en el espectro del aire, tiene 2484 cuentas; dando una máxima diferencia de 651 cuentas, que corresponde a un aumento del 20.7% de eventos (fig. 4.14).

Para el caso del BaCl₂ se obtiene un máximo con 3227 cuentas, dando una diferencia de 742 cuentas, que corresponde a un aumento del 23.6% con respecto a los eventos registrados en el espectro del aire (fig. 4.15).

Es decir, en energías ligeramente menores que la energía del fotón que ha sufrido una dispersión Compton a 30° (601.6 keV, canal 541), se registra un aumento de más del 20% en la cantidad de fotones dispersados, cuando se interfiere con un medio de mayor densidad electrónica que el aire.

- **Región de fotones ζ**

➤ En la región contenida entre 110 keV (canal 98) y 479 keV (canal 437), se observa una disminución de cuentas tanto en el espectro del agua como en los espectros de los promedios de las muestras con NaCl y con BaCl₂, con respecto al espectro del aire.

Al obtener un promedio del número de cuentas en las muestras con NaCl y las del agua y restarlo al número de cuentas obtenidas en el espectro del aire (fig. 4.14), se tiene una disminución del 14.9% en el número de fotones registrados.

Así mismo para las muestras con BaCl₂, registrando una disminución del 12.5% en el número de cuentas, con respecto al número de cuentas para el espectro del aire (fig. 4.15).

Es decir, al interferir con un medio de mayor densidad electrónica, se registra una disminución de más del 10% en la cantidad de fotones con energías menores a 479 keV; siendo mayor para el NaCl que para el BaCl₂.

Espectros del ¹³⁷Cs, en aire, agua y promedio de las muestras con NaCl.

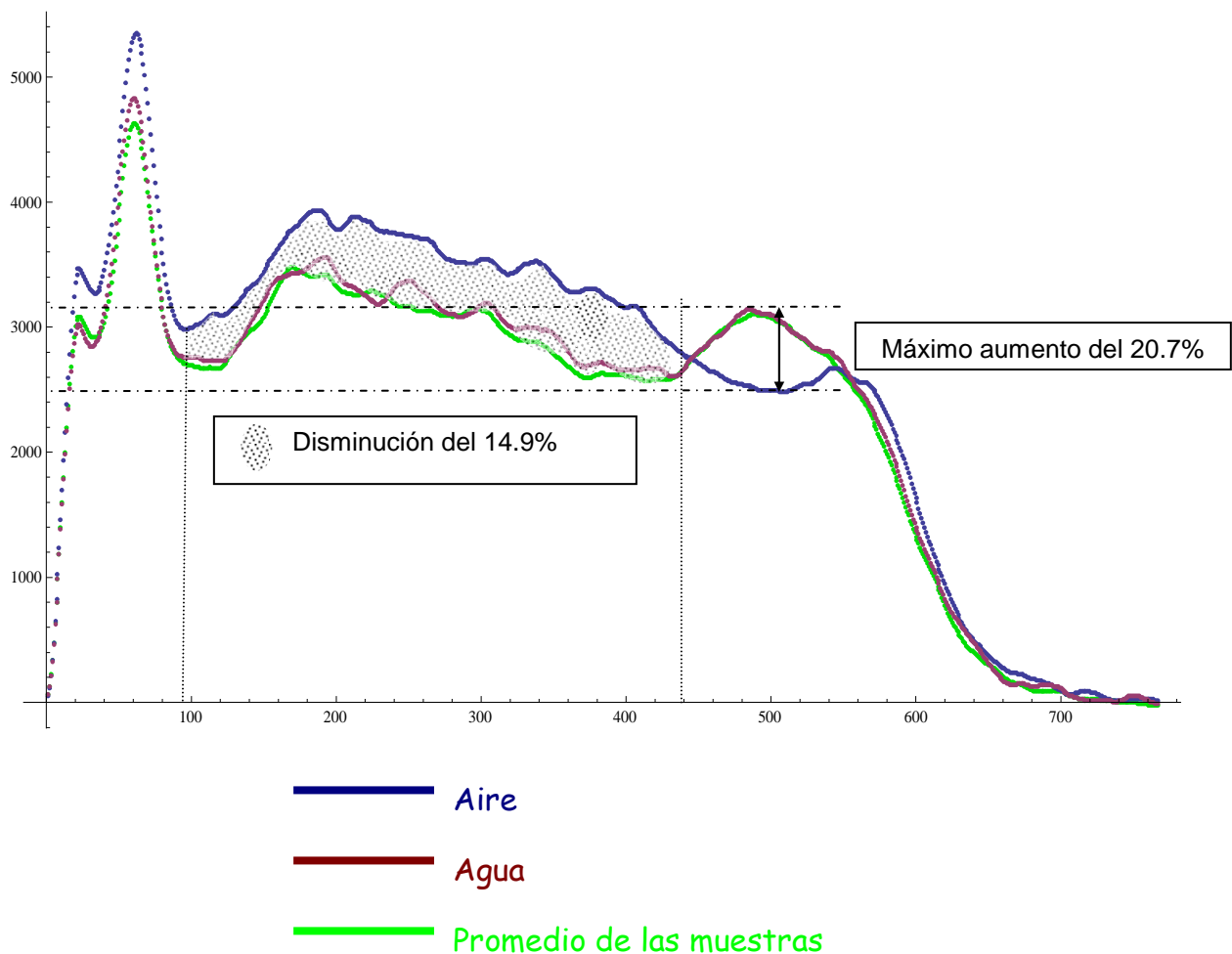


Fig. 4.14 Espectros del ¹³⁷Cs, en aire, agua y promedio de las muestras con NaCl.
Zona punteada, promedio de la diferencia entre espectros.
Flecha, diferencia entre espectros.

Espectros del ^{137}Cs , en aire, agua y promedio de las muestras con BaCl_2 .

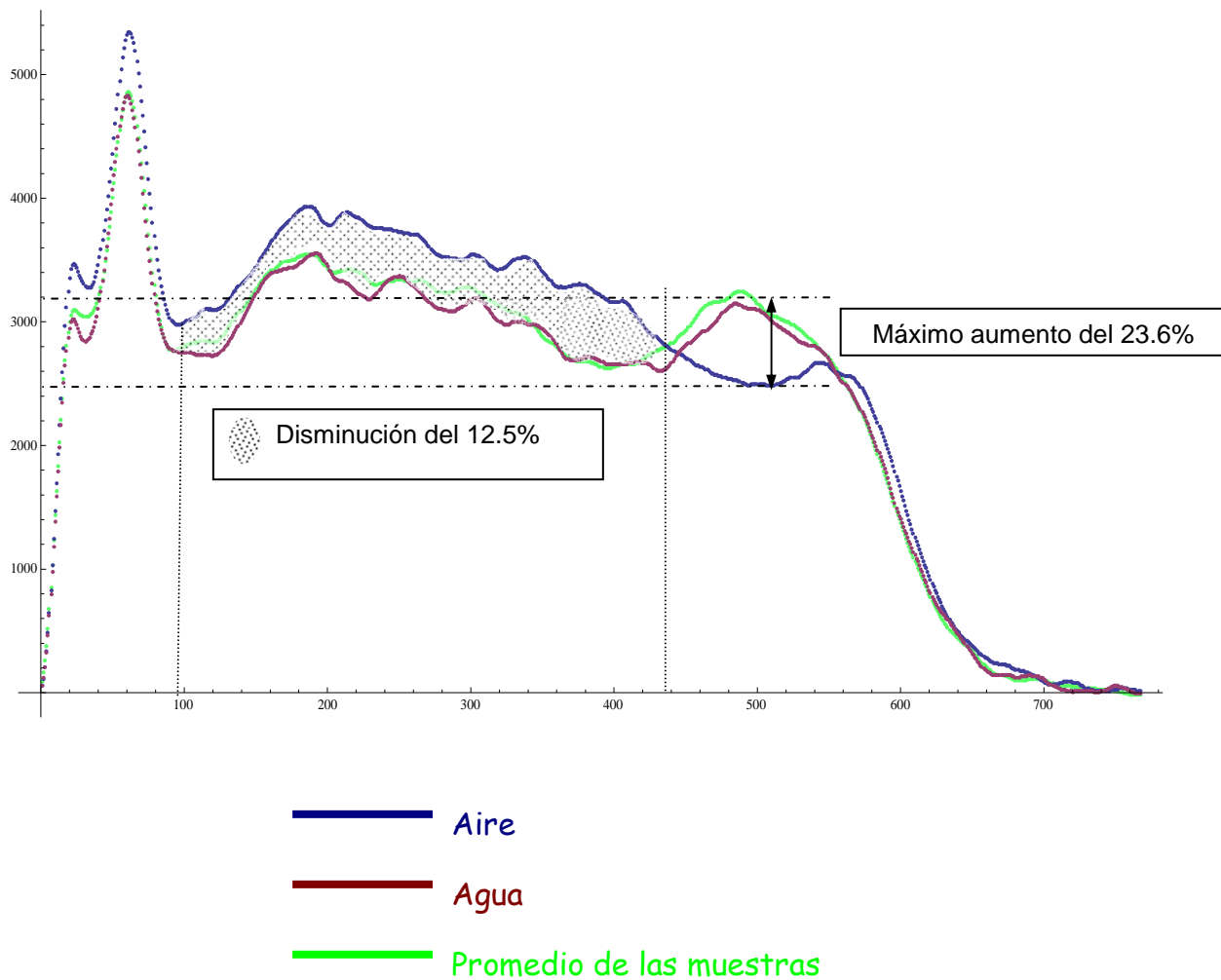


Fig. 4.15 Espectros del ^{137}Cs , en aire, agua y promedio de las muestras con BaCl_2 .
Zona punteada, promedio de la diferencia entre espectros.
Flecha, diferencia entre espectros.

4.4 Comparación de las sales: NaCl y BaCl₂ · 2H₂O

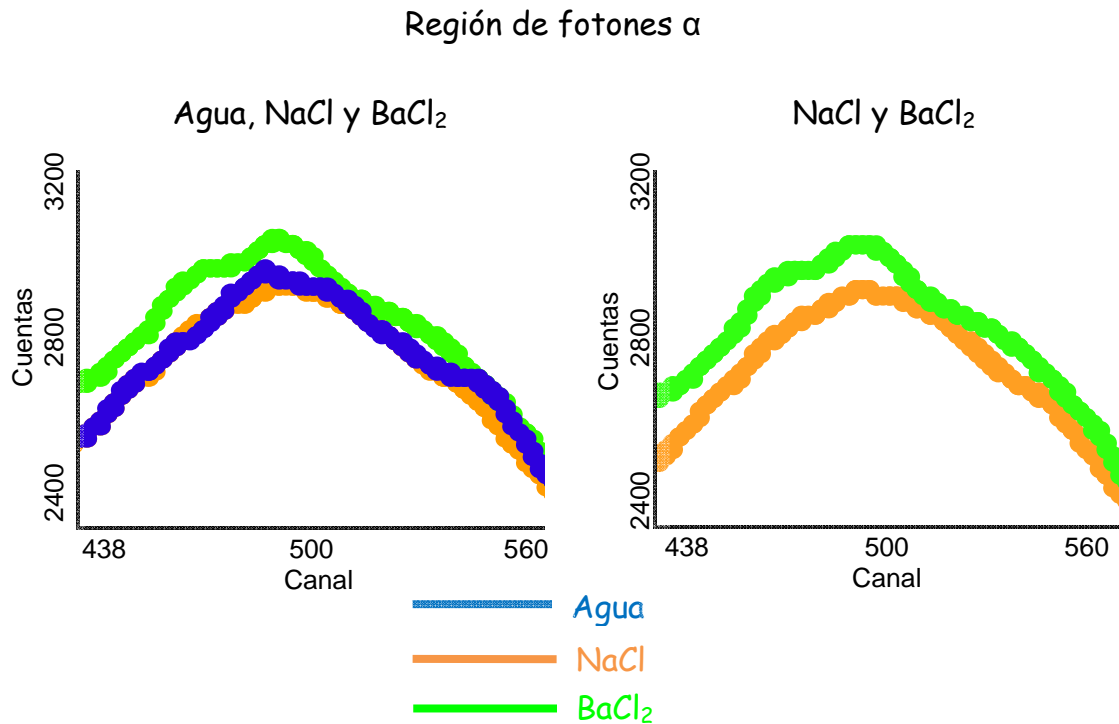


Fig. 4.16 Espectros del ¹³⁷Cs en agua y promedio de las muestras con: NaCl y BaCl₂. En la región de fotones α .

- **Región de fotones α**

Al observar los espectros en la región de fotones α (fig. 4.16), se constata que no hay casi ninguna diferencia entre el promedio de las muestras con NaCl y el agua, es decir, que la dispersión de los fotones se debe principalmente al agua y no al NaCl.

Sin embargo, en el caso del BaCl₂ se observa que éste pasa por arriba del espectro del agua y del NaCl, es decir, al aumentar la densidad electrónica del material, como es la densidad del BaCl₂ que es tres veces mayor que la del agua y dos veces mayor que la del NaCl (tabla 1.2), el número de fotones registrados aumenta.

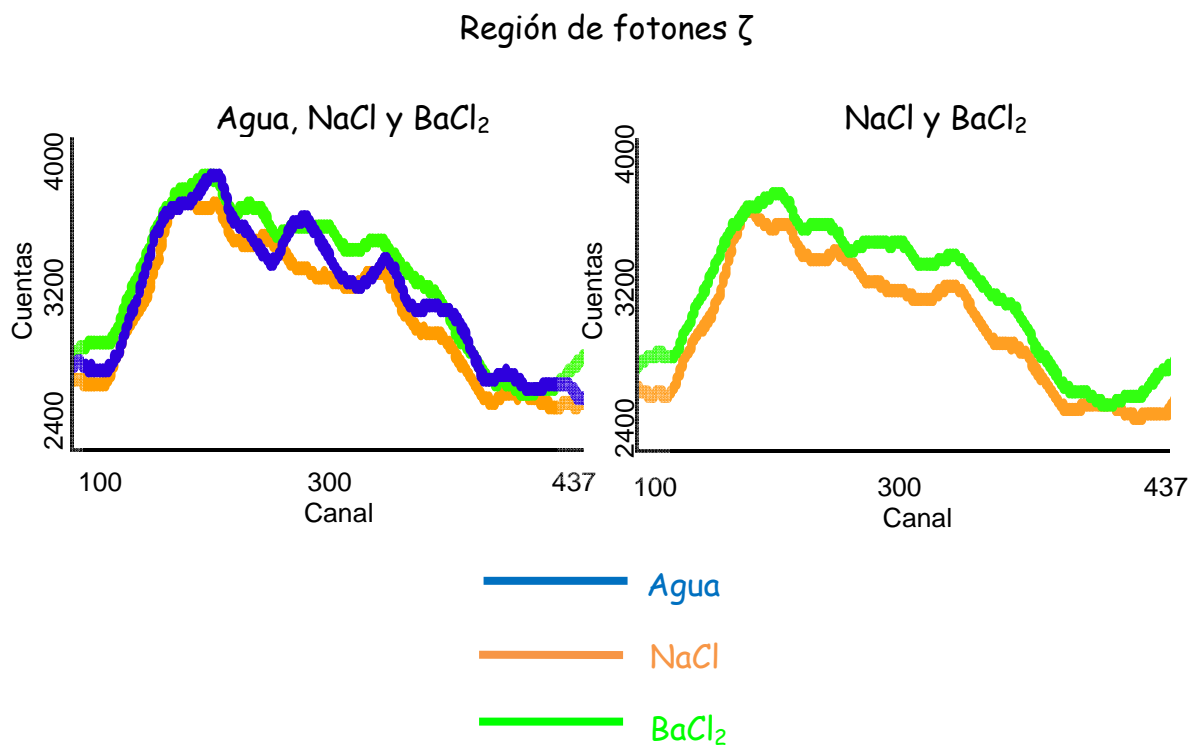


Fig. 4.17 Espectros del ¹³⁷Cs, en agua y promedio de las muestras con: NaCl y BaCl₂. En la región de fotones ζ .

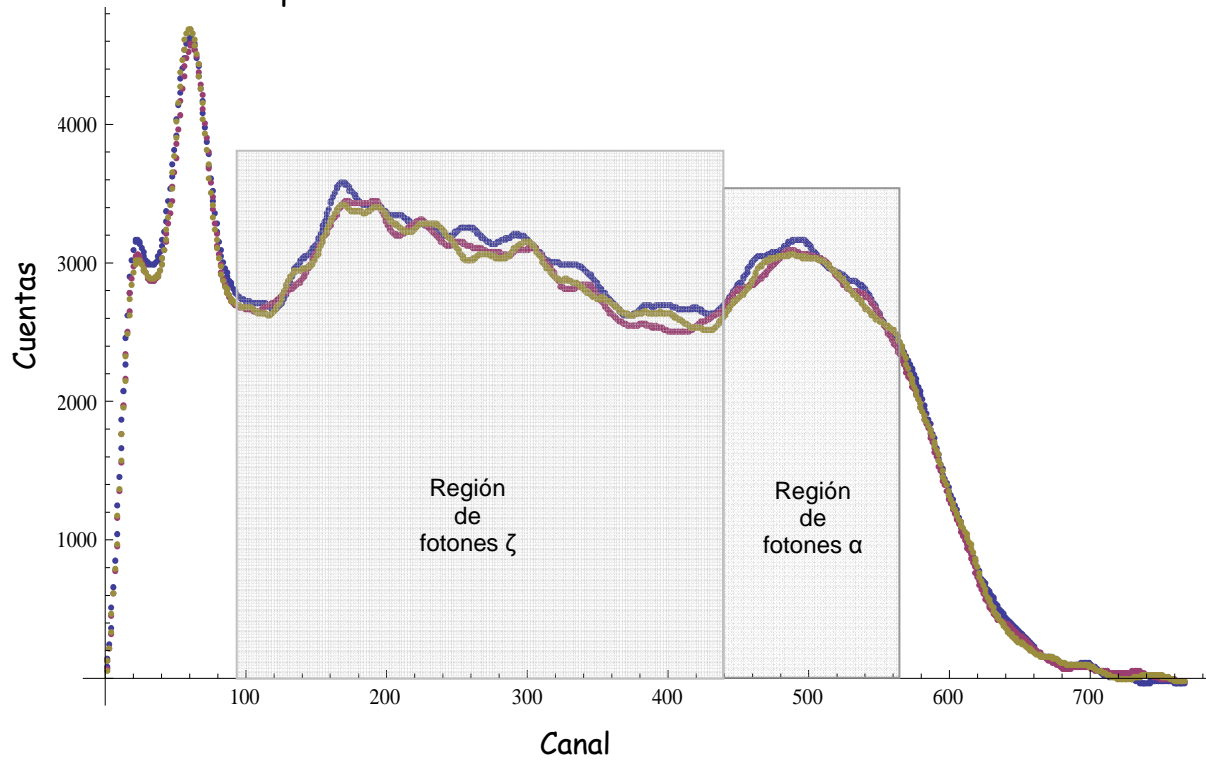
- Región de fotones ζ

Al observar los espectros en la región de fotones ζ (fig. 4.17), se constata que, tanto en el espectro de las muestras de NaCl, como en el de las muestras de BaCl₂, hay poca diferencia con respecto al espectro obtenido para el agua.

Sin embargo, el espectro del NaCl pasa ligeramente por debajo del espectro del agua, sucediendo lo contrario para el del BaCl₂. Y al observar el espectro del NaCl con el del BaCl₂, éste último pasa por arriba del espectro del NaCl, es decir, al duplicar la densidad electrónica del medio, se registra un aumento en la cantidad de fotones.

4.5 Comparación de las concentraciones

Espectros de las distintas concentraciones de NaCl



- NaCl al 50%
- NaCl al 85%
- NaCl al 50%

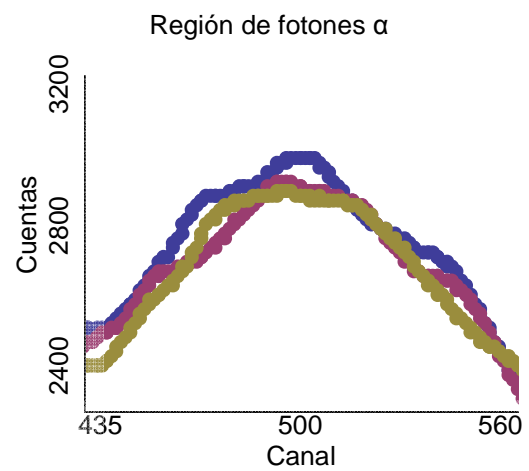
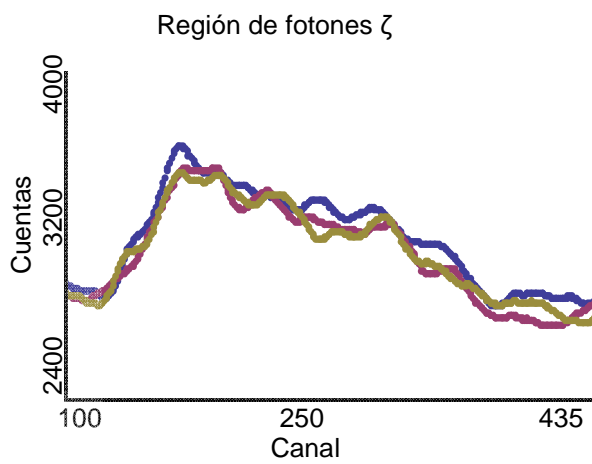


Fig. 4.18 Espectros de agua con distintas concentraciones de NaCl. Arriba, espectro completo; abajo izquierda, región de fotones ζ ; abajo derecha, región de fotones α .

- **Región de fotones α**

En la región de fotones α para las muestras con NaCl, se observa que el valor del máximo que alcanza cada uno de los espectros se encuentra aproximadamente en el mismo valor para la energía (fig. 4.18, tabla 4.4) y con un número de cuentas también muy similar.

Sin embargo, el número de cuentas disminuye ligeramente, según la concentración de sal, esto es, que al aumentar la cantidad de sal en agua, el número de fotones que llegan al detector es ligeramente menor.

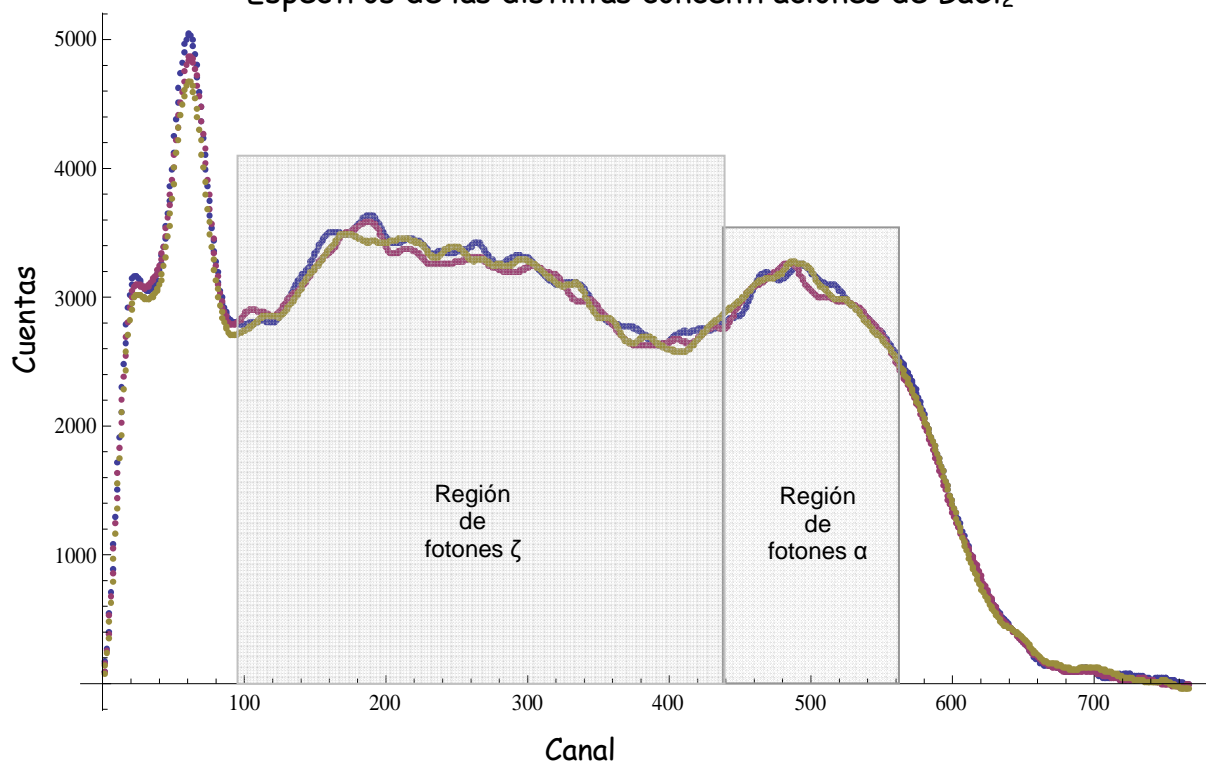
	NaCl al 50%	NaCl al 85%	NaCl al 100%
Energía (keV)	545.4	538.5	547.8
Canal	493	487	495
Número de cuentas	3165	3093	3025

Tabla 4.4 . Valores del máximo en la región de fotones α en las muestras de agua con NaCl.

- **Región de fotones ζ**

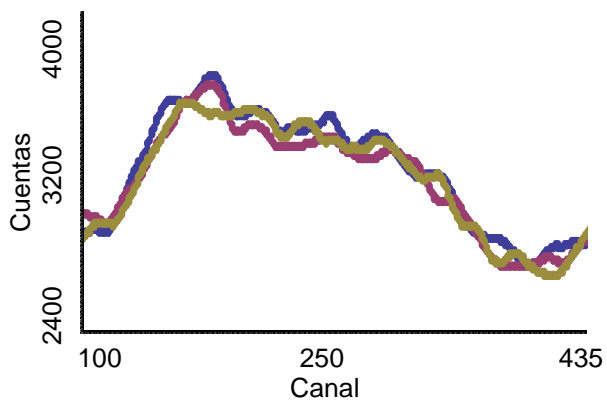
Así mismo, en la zona de fotones ζ , el espectro correspondiente al NaCl al 50% se encuentra, ligeramente, por arriba de los espectros del NaCl al 85% y al 100%, es decir, al aumentar la cantidad de sal, disminuye ligeramente el número de fotones registrados.

Espectros de las distintas concentraciones de BaCl₂



- BaCl₂ al 50%
- BaCl₂ al 85%
- BaCl₂ al 100%

Región de fotones ζ



Región de fotones α

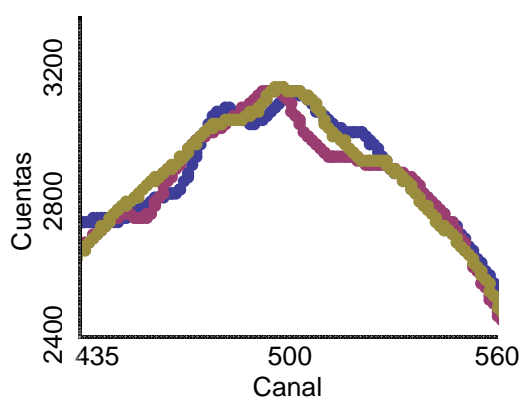


Fig. 4.19 Espectros de agua con distintas concentraciones de BaCl₂. Arriba, espectro completo; abajo izquierda, región de fotones ζ ; abajo derecha, región de fotones α.

- **Región de fotones α**

En la región de fotones α para las muestras con BaCl_2 se observa que, el valor del máximo en los espectros se encuentra en, aproximadamente, en un mismo valor para la energía (fig. 4.19, tabla 4.6).

También se observa que el número de cuentas, está muy cercano en los tres espectros; es decir, al aumentar del 50%, al 85%, al 100%, bajo las condiciones del presente experimento, no hay cambio en el número de fotones que llegan al detector, ni cambio en su energía.

	BaCl₂ al 50%	BaCl₂ al 85%	BaCl₂ al 100%
Energía (keV)	531.5	535.0	538.5
Canal	481	484	487
Número de cuentas	3219	3267	3274

Tabla 4.6 . Valores del máximo en la región de fotones α en las muestras de agua con BaCl_2 .

- **Región de fotones ζ**

Del mismo modo que en la región de fotones α , en la zona de fotones ζ , los tres espectros con BaCl_2 , muestran, máximos y mínimos en valores para la energía, muy cercanos, con números de cuentas parecidos, al ir aumentando la concentración de sal en agua, es decir, no hay cambio en el número de fotones que llegan al detector, ni cambio en su energía.

CONCLUSIONES

El análisis de los espectros obtenidos con un detector de centello NaI(Tl), emitidos por una fuente de ^{137}Cs de $300\ \mu\text{Ci}$, colocada a 30° del detector, sobre aire, agua, agua con dos tipos de sal (NaCl y $\text{BaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), con distintas concentraciones, permite concluir los puntos siguientes.

En la región de fotones α (energías comprendidas entre 480 keV y 620 keV)

Al comparar los espectros de:

- aire con el promedio de todas las muestras (agua y agua con distintas concentraciones de NaCl o de BaCl_2).

Aumenta el número de fotones dispersados; es decir, al aumentar la densidad electrónica del medio, estos fotones salen dispersados con poca pérdida de energía, ya que, la sección eficaz es mayor. Además, el número de fotones aumenta al encontrar un mayor número de electrones con quien colisionar.

- agua con distintas concentraciones de NaCl con el de agua con distintas concentraciones de BaCl_2 .

Aumenta el número de fotones dispersados; es decir, al aumentar la densidad electrónica de poco más del doble, estos fotones pierden poca energía y llegan en mayor cantidad al detector.

- agua con NaCl al 50%, agua con NaCl al 85% y el de agua con NaCl al 100%.

No se observa un comportamiento característico en el que se vea la influencia del cambio de concentración.

- agua con BaCl_2 al 50%, agua con BaCl_2 al 85% y el de agua con BaCl_2 al 100%.

Tampoco se observa un comportamiento particular entre éstos.

Esta limitante se puede deber a la resolución del NaI(Tl).

En la región de fotones ζ (energías comprendidas entre 110 keV y 479 keV)

Al comparar los espectros de:

- aire con el promedio de todas las muestras (agua y agua con distintas concentraciones de NaCl o de BaCl₂).

Disminuye el número de fotones dispersados; es decir, por ser fotones menos energéticos el coeficiente de atenuación aumenta, al aumentar la densidad electrónica del medio, ya que el de la sal y del agua es mayor que el del aire, por lo cual, son absorbidos por el medio y no llegan al detector. Del mismo modo, a encontrarse con un mayor número de electrones con quien colisionar, se registra un descenso en el número de cuentas.

- agua con el de agua con distintas concentraciones de NaCl.

Se observa una **disminución** en el número de fotones dispersados; es decir, el coeficiente de atenuación para los fotones aumenta, al aumentar la densidad electrónica, ya que es mayor en el NaCl (menos del doble) que en el agua, por lo cual, menos fotones dispersados llegan al detector.

- agua con NaCl, con el de agua con BaCl₂.

Aumenta el número de fotones dispersados. Es decir, al aumentar la densidad electrónica en poco más del doble, aun al tratarse de fotones menos energéticos, llegan en mayor cantidad al detector.

- agua con NaCl al 50%, agua con NaCl al 85% y el de agua con NaCl al 100%.

No se observa un comportamiento característico en el que se vea la influencia del cambio de concentración.

- agua con BaCl₂ al 50%, agua con BaCl₂ al 85% y el de agua con BaCl₂ al 100%.

Tampoco se observa un comportamiento particular entre éstos.

Esta limitante se puede deber a la resolución del NaI(Tl).

CONCLUSIONES GENERALES

El dispositivo diseñado, permite el estudio de la dispersión Compton.

En particular, es importante señalar la región de fotones α , en la cual se observa el aumento de fotones dispersados, al aumentar la densidad electrónica del medio.

Se recomienda, para encontrar mayores características propias de este fenómeno, utilizar otro tipo de detector con mayor resolución, como puede ser uno de GeHP, y ampliar la gama de sales, con diferentes densidades electrónicas, para evaluar su influencia sobre la dispersión Compton.

ANEXOS

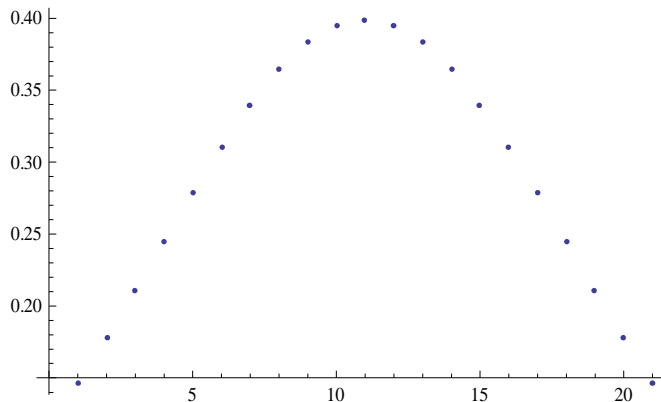
1. Programa para la ecuación 8 (Klein-Nishina) en MatLab

```
clc;clear;clf;
E=662;
alfa=E/511;
re=2.81794028e-1 ;
tet(1:1002)=0;
sigma(1:1002)=0;
Z=1;
for i=1:1002
    tet(i)=(i-1)*2*pi/1000;
    teta=tet(i);
    s1=(1+alfa*(1-cos(teta)))^2;
    s2=1+cos(teta)^2;
    s3=(alfa^2*(1-cos(teta))^2)/(1+alfa*(1-cos(teta)));
    sigma(i)=Z*re^2/2*(1/s1)*(s2+s3);
end
polar(tet,sigma)
hold on
E=1;
alfa=E/511;
for i=1:1002
    tet(i)=(i-1)*2*pi/1000;
    teta=tet(i);
    s1=(1+alfa*(1-cos(teta)))^2;
    s2=1+cos(teta)^2;
    s3=(alfa^2*(1-cos(teta))^2)/(1+alfa*(1-cos(teta)));
    sigma(i)=Z*re^2/2*(1/s1)*(s2+s3);
end
polar(tet,sigma,'r')
E=2000;
alfa=E/511;
for i=1:1002
    tet(i)=(i-1)*2*pi/1000;
    teta=tet(i);
    s1=(1+alfa*(1-cos(teta)))^2;
    s2=1+cos(teta)^2;
    s3=(alfa^2*(1-cos(teta))^2)/(1+alfa*(1-cos(teta)));
    sigma(i)=Z*re^2/2*(1/s1)*(s2+s3);
end
polar(tet,sigma,'g')
hold off
```

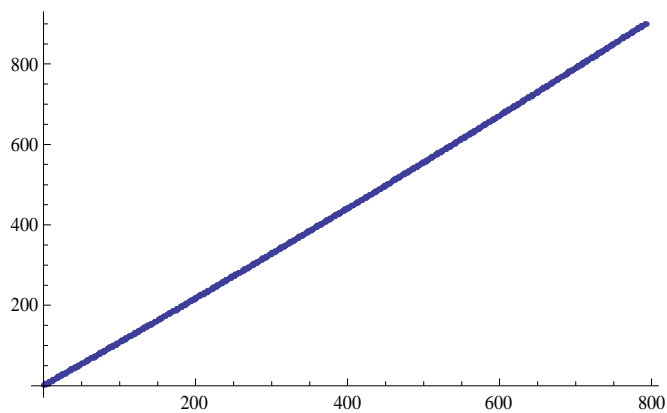
2. Programa para las convoluciones en Wolfram Mathematica 7

```
kern=Table[Exp[-n^2/100]/Sqrt[2. Pi],{n,-10,10}];
```

```
ListPlot[kern]
```



```
ListPlot[Energia]
```



```
Airesinfondo=Subtract[Aire,Fondo]
```

```
a= AiresinfondoConv=ListConvolve[kern,Airesinfondo];
```

```
ListPlot[%]
```

```
Aguasinfondo=Subtract[Agua,Fondo]
```

```
b=AguasinfondoConv=ListConvolve[kern,Aguasinfondo];
```

```
ListPlot[%]
```

```
NaCl50sinfondo=Subtract[NaCl50,Fondo]
c=NaCl50sinfondoConv=ListConvolve[kern,NaCl50sinfondo];
ListPlot[%]
TruncNaCl50sinfondoConv=Table[NaCl50sinfondoConv[[i]],{i,480,520}];
Max[TruncNaCl50sinfondoConv]
Position[NaCl50sinfondoConv, 3165.6897923382426]
```

```
NaCl85sinfondo=Subtract[NaCl85,Fondo]
d=NaCl85sinfondoConv=ListConvolve[kern,NaCl85sinfondo];
ListPlot[%]
TruncNaCl85sinfondoConv=Table[NaCl85sinfondoConv[[i]],{i,480,520}];
Max[TruncNaCl85sinfondoConv]
Position[NaCl85sinfondoConv,3093.806676507582 ]
```

```
NaCl100sinfondo=Subtract[NaCl100,Fondo]
e=NaCl100sinfondoConv=ListConvolve[kern,NaCl100sinfondo];
ListPlot[%]
TruncNaCl100sinfondoConv=Table[NaCl100sinfondoConv[[i]],{i,460,540}];
Max[TruncNaCl100sinfondoConv]
```

```
ListPlot[{a,b}]
ListPlot[{c,d,e}]
ListPlot[{a,b,c,d,e}]
f=Mean[{{c},{d},{e}}]
ListPlot[%]
```

REFERENCIAS

Simon, R. *Physics in Nuclear Medicine*. 3ª edición. Saunders. USA. p. 8.

¹ Beiser, A. *Conceptos de física moderna*. 2ª edición. McGrawHill. México 1977. Capítulos 2 y 12.

¹ Ídem.

¹ 2008 Disponible en :
http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen2/ciencia3/099/htm/sec_7

¹ Ídem

¹ Beiser. A. *Conceptos de física moderna*. 2ª edición. McGrawHill. México 1977. Capítulos 2 y 12.

¹ Bazterrra, V. et al. *Efecto Compton*. Laboratorio 5. Dpto. de Física. FCEyN. UBA. 1997.

¹2008 Disponible en :
<http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/cuantica/compton/Compton.htm#Fundamentos%20físicos>

¹ Burcham, W.C. *Física Nuclear*. Reverte. México 1974. Capítulo 5.

¹ Beiser, A. *Conceptos de física moderna*. 2ª edición. McGrawHill. México 1977. Capítulos 2 y 12.

¹ Ciencias Físicas 117. *Aguas y soluciones*. Pontificia Universidad Católica de Puerto Rico. Departamento de Química.

¹ 2009 Disponible en:
<http://www.monografias.com/trabajos15/separacion-mezclas/separacion-mezclas.shtml>

¹ 2009 Disponible en:
<http://www.aula21.net/Nutriweb/agua.htm>

¹ 2009. Disponible en:
marc.pucpr.edu/facultad/jescabi/CF%20117/Agua%20y%20Soluciones.pdf

¹ Castegnet, A. et al. *Medición de Densidad por Retrodispersión Gamma: Bases para el diseño de equipos aplicables a suelos y otros materiales*. Informe No. 137. Comisión Nacional de Energía Atómica. Argentina. 1965.

¹ Simon, R. *Physics in Nuclear Medicine*. 3ª edición. Saunders. USA. p.152.

¹ Acosta, V. *Curso de física moderna*. 1ª edición. Harla. México. 1975. Capítulos 7, 8, 31.

¹ Delacroix, D. et al. *Garionucléides et Radioprotection*. 2ª edición. EDP sciences 2006. Francia.

¹ 2009 Disponible en:
http://www.facmed.unam.mx/bmnd/gi_2k8/prods/PRODS/Cloruro%20de%20sodio%20Iny.htm

¹ 2009 Disponible en:
<http://images.google.com.mx>

¹ Marca J.T. Baker CAS No. 7647-14-5 USA.

¹ 2009 Disponible en: www.itson.mx/.../CLORURO%20DE%20BARIO%20ANH.pdf

¹ Marca J.T. Baker CAS No. 7647-14-5 USA.

¹ 2008 Disponible en:
<http://www.olivella.org/Rafanell/SIGLO%20XXI/QUIMICA/AGUA%20INTERCANVI%20IONICO.doc>

¹ Simon R. *Physics in Nuclear Medicine*. 3ª edición. Saunders. USA. 2003.
Capítulos 2, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12

¹ Ídem

¹ Knoll G. *Radiation detection and measurement*. 2ª edición. Wiley. USA. 1989.
Capítulos 2, 4, 8, 9, 10.

¹ Gutiérrez, O. et al. *Sistema para verificación automático de detectores de radiación nuclear tipo centello*. Instituto Tecnológico de Chihuahua. México.

¹ 2009 Disponible en:
www.fisicarecreativa.com/guias/drelativ.pdf

¹ Rodni, P. *Physical processes in organic scintillators*. Press LLC 1997. Florida

¹ Simon R. *Physics in Nuclear Medicine*. 3ª edición. Saunders. USA. p.150.

¹ Burcham, W.C. *Física Nuclear*. Reverte. México 1974. Capítulo 5.

¹ 2009 Disponible en :
www.ib.cnea.gov.ar/.../Detectores%20de%20Radiaci%F3n.pdf

¹ Ídem

¹ Ídem

¹ Ídem

¹ 2009 Disponible en:

http://es.wikipedia.org/wiki/Funci%C3%B3n_gaussiana

¹ Espectro adquirido por la M. en C. Patricia Avilés en el laboratorio de Física de Radiaciones. Facultad de Ciencias. Análisis del espectro elaborado por la autora del presente trabajo.

¹ Cortesía de Paola Fuentes Morales en su trabajo: *Análisis comparativo del espectro de una muestra de roca volcánica con los detectores de centelleo NaI(Tl) y de estado sólido GeHP*. Dic. 2008.

¹ 2009 Disponible en:

<http://www.nndc.bnl.gov/chart/>

BIBLIOGRAFÍA

1. Simon, R. *Physics in Nuclear Medicine*. 3ª edición. Saunders. USA. 2003. Capítulos 2, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12.
2. Knoll, G. *Radiation detection and measurement*. 2ª edición. Wiley. USA. 1989. Capítulos 2, 4, 8, 9, 10.
3. Burcham, W.C. *Física Nuclear*. Reverte. México 1974. Capítulo 5.
4. Geir, A. *Radioisotope Gauges for Industrial Process Measurements*. John Wiley & Sons. USA 2004. Capítulos 2, 3, 4.
5. Acosta, V. *Curso de física moderna*. 1ª edición. Harla. México. 1975. Capítulos 7, 8, 31.
6. Beiser, A. *Conceptos de física moderna*. 2ª edición. McGrawHill. México 1977. Capítulos 2, 12.
7. De La Peña, L. *Introducción a la mecánica cuántica*. 2ª edición. Fondo de Cultura Económica. México 1991. Capítulo 1.
8. Halliday, D. et al. *Física Vol. 2*. 3ª edición. Compañía editorial continental. México. 1996. Capítulo 49.
9. Instructivo del detector. *Crystals & Detectors*. Saint Gobain. Bicron
10. Bazterrra, V. et al. *Efecto Compton*. Laboratorio 5. Dpto. de Física. FCEyN. UBA. 1997.