

3



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO**

**FACULTAD DE CIENCIAS**

MEDICION DE LA DOSIS EN EL EXTERIOR DE LA CAMARA DE IRRADIACION DEL GAMMABEAM DEL INSTITUTO DE CIENCIAS NUCLEARES, UNAM.

**T E S I S**  
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:  
**F I S I C O**  
P R E S E N T A :  
**SANTIAGO OSCAR ANGELES ZARAGOZA**

DIRECTORA DE TESIS: DRA. MARIA ISABEL GAMBOA DE BUEN



TESIS CON  
FALDA DE ORIGEN

2002



FACULTAD DE CIENCIAS  
SECCION ESCOLAR



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.

# Paginación Discontinua



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE MÉXICO

**M. EN C. ELENA DE OTEYZA DE OTEYZA**

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

Comunicamos a usted que hemos revisado el trabajo escrito:

"Medición de la Dosis en el Exterior de la Cámara de Irradiación del Gammabeam del  
Instituto de Ciencias Nucleares, UNAM"

realizado por ANGELES ZARAGOZA SANTIAGO OSCAR

con número de cuenta 7304793-7 , quién cubrió los créditos de la carrera de Física.

Dicho trabajo cuenta con nuestro voto aprobatorio.

Atentamente

Director de Tesis

Propietario

DRA. MARIA ISABEL GAMBOA DE BUEN

Propietario

DRA. MARIA ESTER BRANDAN SIQUES

Propietario

DR. ORACIO NAVARRO CHAVEZ

Suplente

M. EN C. ANA ELENA BUENFIL BURGOS

Suplente

M. EN C. PATRICIA RAQUEL AVILES MANDUJANO

Consejo Departamental de Física

*Patricia Goldstein Benache*

DRA. PATRICIA GOLDSTEIN BENACHE  
Coordinadora de Licenciatura  
FACULTAD DE CIENCIAS  
DEPARTAMENTO DE FISICA

**De un camino truncado, el presente trabajo conforma su final, mismo que se logró gracias a:**

- mis padres:** Teresa y Santiago (finado):  
por ser un ejemplo de honestidad y trabajo.
- mi esposa:** Magdalena:  
quien convirtió mi lucha en su lucha.
- mis hijos:** César, Tonatiuh y Tonatzin:  
quienes con su simple presencia me fortalecieron en los momentos de debilidad.
- mis hermanos:** Esther, Enrique, José Luis (finado), Benjamín, Lourdes y Marisela:  
que me apoyaron en toda circunstancia y depositaron su confianza en mí.
- a mis sobrinos:** que no desfallezcan en la construcción de su camino.
- mis amigos:** con quienes, en su oportunidad compartí un mundo de fantasías y tranquilidad. En particular con mi gran amigo, Carlos Canizal Silahua (finado), de quien conservo momentos maravillosos.

## **Agradecimientos**

Ofrezco mi más amplio y sincero agradecimiento a mi directora de tesis, Dra. María Isabel Gamboa de Buen por haberme brindado su comprensión, su apoyo, su tiempo y ante todo su amistad durante el desarrollo del presente trabajo.

A los integrantes que conformaron el comité sinodal: Dra. María Isabel Gamboa de Buen, Dra. María Ester Brandan Siques, Dr. Horacio Navarro Sánchez, M.C. Ana Elena Buenfil Burgos y M.C. Patricia Raquel Aviles Mandujano por sus sabios consejos y por haber revisado y externado sus atinados comentarios tendientes a mejorar esta tesis.

A la M.C. Ana Elena Buenfil Burgos por autorizarme usar las instalaciones del Laboratorio de Dosimetría del Instituto de Física de la UNAM.

Al M.C. Epifanio Cruz Zaragoza por las facilidades otorgadas para la irradiación de cristales en el Gammabeam del Instituto de Ciencias Nucleares, al operario Fis Francisco García Flores, así como a los C.C. Berta Milla Elizarraras y Francisco Isidoro Pacheco por su apoyo.

Al Instituto de Ciencias Nucleares, UNAM, por permitirme usar sus instalaciones, en las que se desarrolló la mayor parte de este trabajo.

A la Universidad Intercontinental y a todas las personas con las cuales he colaborado durante los últimos 5 años y que me otorgaron concesiones, tanto para la terminación de mis estudios de licenciatura como para el desarrollo y la conclusión de esta tesis.

Por último, y de una manera muy especial, ofrezco mi agradecimiento a la Universidad Nacional Autónoma de México por abrigarme con su cielo azul y oro, y brindarme la oportunidad para realizar mis estudios profesionales.

# Contenido

<b>Capítulo 1. Introducción</b>	<b>1</b>
<b>Capítulo 2. Desintegración radiactiva</b>	
2.1. Ley de decaimiento	3
2.2. Tipos de decaimiento radiactivo	5
<b>Capítulo 3. Interacción de la radiación electromagnética con la materia</b>	
3.1. Clasificación de la radiación	9
3.2. Tipos de interacción	10
3.3. Absorción de la radiación	16
<b>Capítulo 4. Dosimetría y Termoluminiscencia</b>	
4.1. Magnitudes dosimétricas	20
4.2. Fundamentos de dosimetría	25
4.3. Termoluminiscencia	32
<b>Capítulo 5. Dosimetría termoluminiscente</b>	
4.4. Eficiencia intrínseca de los detectores termoluminiscentes	37
4.5. Lectores termoluminiscentes	37
4.6. Cristales termoluminiscentes	39
4.7. Ventajas y desventajas de los detectores termoluminiscentes	40
<b>Capítulo 6. Método experimental</b>	
6.1. Material y equipo	42
6.2. Protocolo para el manejo de los dosímetros	47
6.3. Procedimiento de homeado	49
6.4. Procedimiento de irradiación	50

6.5	Calibración de los dosímetros	51
-----	-------------------------------	----

### **Capítulo 7. Resultados**

7.1.	Medidas con dosímetros LiF: Mg, Cu, P (GR - 207)	52
7.2.	Medidas con dosímetros CaF <sub>2</sub> : Dy (TLD - 200)	55
7.3.	Rapidez de dosis en el Gammabeam	59
7.4.	Medida de la rapidez de dosis ambiental	60
7.5.	Comparación de valores experimentales con los límites de dosis establecidos oficialmente	61

<b>Capítulo 8. Conclusiones</b>	<b>64</b>
---------------------------------	-----------

<b>9. Bibliografía</b>	<b>66</b>
------------------------	-----------

## Capítulo 1

### Introducción

El irradiador Gammabeam del Instituto de Ciencias Nucleares es un irradiador de tipo semi-industrial que cuenta con 15 fuentes de  $^{60}\text{Co}$  distribuidas simétricamente en forma de "L" que se utiliza para realizar trabajos, tanto de investigación como de tipo industrial; en la primera aplicación se puede mencionar la irradiación de polímeros y la irradiación de gases que simulan atmósferas, mientras que en la segunda aplicación cabe indicar la irradiación de cosméticos, suplementos alimenticios y condimentos, a efecto de disminuir su contaminación biológica. En agosto de 1998 se aplicó una recarga al irradiador, teniendo en este momento una actividad de 55,000 Ci. En general, todas las personas que acuden al edificio del irradiador, estudiantes y empleados de las compañías a las cuales se les presta el servicio, así como las que trabajan en las cercanías del edificio, están preocupadas por la dosis que pueden recibir debido a la radiación gamma emitida por las fuentes radiactivas. Por lo que es conveniente conocer los niveles de dosis en los alrededores inmediatos a la cámara de irradiación.

Aunque se cuenta con monitores de radiación y se practica dosimetría personal a los empleados que con mayor frecuencia están expuestos a esta radiación gamma, no se han realizado medidas precisas de la tasa de dosis en estas áreas, por lo que, el objetivo principal de este trabajo consiste en medir la rapidez de dosis en el exterior inmediato a la cámara del irradiador, y dadas las características del edificio en el que se encuentra instalado dicho dispositivo se espera que algunas de las medidas sean mayores que las correspondientes a la rapidez de dosis ambiental y otras sean del mismo orden de esta.

Para poder cumplir con el objetivo antes mencionado en primera instancia es necesario conocer algunos conceptos y procesos relacionados con la física de radiaciones, dosimetría y termoluminiscencia, mismos que se enmarcan en la primera parte del presente trabajo, y que de una manera sucinta se compilan en los siguientes apartados:

En el capítulo 2 se introducen los conceptos básicos referentes al decaimiento radiactivo. Los procesos de interacción de la radiación electromagnética con la materia que son de interés para la física de radiaciones, se revisan someramente en el capítulo 3. El capítulo número 4 está

conformado por algunas nociones básicas de la dosimetría y del fenómeno termoluminiscente, mientras que en el capítulo 5 se esboza brevemente un estudio sobre dosimetría termoluminiscente.

La segunda parte de este trabajo está constituida por: el capítulo 6, en el cual se indica el material y equipo utilizado, y se explica el desarrollo experimental utilizado para realizar las mediciones de la rapidez de dosis en los alrededores del irradiador; el capítulo 7, que comprende los datos registrados durante el desarrollo experimental, así como los resultados obtenidos, y el capítulo 8 en el que se emiten las conclusiones a las que se llegan una vez analizados los resultados y comparados con la rapidez de dosis ambiental y los valores mínimos permitidos para una persona considerada como público en general o como personal ocupacionalmente expuesto (POE).

## Capítulo 2

### 2. Desintegración Radiactiva

Los núcleos pueden transformarse unos en otros o pasar de un estado energético a otro mediante la emisión de radiaciones. El proceso que sufren se denomina decaimiento radiactivo o desintegración radiactiva. Esta transformación sucede de manera espontánea en cada núcleo, sin que pueda impedirse mediante algún factor externo. El decaimiento nuclear solamente sucede cuando hay un exceso de masa-energía en el núcleo por lo que, la emisión le ayuda a lograr una mayor estabilidad (RI.91).

Ernest Rutherford y Frederik Soddy en 1902 propusieron una teoría que describía la naturaleza de la radiactividad y que los materiales radiactivos, al emitir radiación, se transforman en otros materiales, ya sea del mismo elemento o de otro. Estas transformaciones se llevan a cabo por uno o varios mecanismos diferentes. En estos se incluyen la emisión de partículas alfa, partículas beta positivas (positrones), beta negativas (electrones), y captura de electrones orbitales. Cada una de estas reacciones puede ir acompañada o no por la emisión de radiación gamma. Las propiedades radiactivas de los núclidos están determinadas por consideraciones nucleares y son independientes del estado físico o químico del elemento.

#### 2.1. Ley de decaimiento radiactivo:

Rutherford y Soddy para explicar sus experimentos formularon la ley exponencial que gobierna al decaimiento de las sustancias radiactivas. En 1910 H. Bateman obtuvo en una forma más general, las ecuaciones de decaimiento y crecimiento de las sustancias radiactivas. La ley exponencial deducida por Rutherford y Soddy está dada por:

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \quad (2.1)$$

donde  $N$  es un gran número de átomos radiactivos idénticos, y  $\lambda$  es la probabilidad de que cualquier átomo particular se desintegre por unidad de tiempo,  $\lambda$  es llamada constante total de decaimiento, tiene dimensiones recíprocas de tiempo y es independiente de las condiciones

físicas y químicas, tales como: presión, temperatura, concentración o edad de los átomos radiactivos (AC.73).

### 2.1.1. Actividad ( $N\lambda$ ):

Es el valor esperado del número total de desintegraciones por unidad de tiempo que ocurre en una fuente radiactiva. En todo lo que sigue se supone que  $N(t)$  cambia solamente debido al decaimiento de los núcleos de esta fuente. La actividad se define como la razón de cambio del número de átomos respecto al tiempo. Matemáticamente se expresa como:

$$A = - \frac{dN}{dt} \quad (2.2)$$

Como  $N$  disminuye cuando  $t$  aumenta, se tiene un signo negativo. Si  $A$  es la actividad para el tiempo  $t$  y  $A_0$  la actividad inicial ( $t = 0$ ), se tiene que:

$$A = A_0 e^{-\lambda t} \quad (2.3)$$

Esta ley es aplicable a cualquier núcleo radiactivo, la constante  $\lambda$  es diferente para cada radioisótopo (AT.86).

Las unidades de la actividad son:

$$\text{Curie (Ci): } 1\text{Ci} = 3.7 \times 10^{10} \frac{1}{\text{s}} \quad \text{Becquerel (Bq): } 1\text{Bq} = 1 \frac{1}{\text{s}}$$

### 2.1.2. Vida media de una sustancia radiactiva ( $\tau_{1/2}$ ):

Es el tiempo necesario para que el número inicial de átomos o la actividad se reduzca a la mitad, es decir, si  $t = \tau_{1/2}$ , entonces,  $N = N_0/2$ , sustituyendo en (2.1), y manipulando algebraicamente, se obtiene (AC.73) que la vida media está relacionada con la constante de decaimiento por:

$$\tau_{V2} = \frac{\ln 2}{\lambda} \quad (2.4)$$

Otra cantidad que se utiliza para caracterizar a una sustancia radiactiva es la vida promedio  $\tau$  que es el tiempo en promedio de vida de uno de sus átomos y está dada por:

$$\tau = \frac{1}{\lambda} = 1.44\tau_{V2} \quad (2.5)$$

## 2.2. Tipos de decaimiento radiactivo

Los decaimientos radiactivos se caracterizan básicamente por: tipo de emisión, su energía y la rapidez del proceso. Cada tipo de núcleo tiene su propio modo de decaimiento, el cual depende de dos factores:

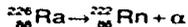
- Inestabilidad nuclear; es decir, si la razón neutrón/protón es demasiado alta o demasiado baja, y
- La relación masa-energía entre el núcleo original (padre), el núcleo resultante (hija) y la partícula emitida.

### 2.2.1. Radiación alfa

Las partículas alfa son emitidas principalmente por los núcleos radiactivos pesados ( $Z \geq 82$ ,  $A \geq 208$ ). Como estas partículas consisten de dos protones y dos neutrones entonces, cuando un núcleo inestable (núcleo padre) de número atómico  $Z$  y número másico  $A$  emite una partícula  $\alpha$  se transforma en otro núcleo (núcleo hija) con número atómico  $Z - 2$  y número másico  $A - 4$ , de acuerdo al siguiente patrón (AC.73):

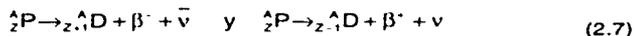


Ejemplo:



### 2.2.2. Radiación beta:

Existen dos tipos principales de decaimiento beta, el de la partícula negativa y el de la partícula positiva, los cuales están representados, respectivamente, por (AC.73):



donde  $\nu$  es un neutrino y  $\bar{\nu}$  es un antineutrino, ambas partículas no tienen carga y su masa en reposo es igual a cero.

Los núcleos que tienen un exceso de neutrones tienden a emitir un electrón ( $\beta^-$ ), lo cual deja al núcleo con un neutrón menos y un protón más. Este tipo de emisión deja muchas clases de núcleos en un estado excitado y entonces son emitidos uno o más rayos gamma para alcanzar el estado base.



Los núcleos con exceso de protones usualmente emiten un positrón ( $\beta^+$ ) que deja al núcleo con un protón menos y un neutrón más.



### 2.2.3. Captura electrónica

En el proceso de captura electrónica, el núcleo padre en lugar de emitir una  $\beta^-$ , captura uno de sus propios electrones atómicos y emite un neutrino monoenergético. Este proceso está representado por el siguiente patrón:



El electrón atrapado por el núcleo generalmente proviene de la capa K, dejando una vacancia. Para llenar esta vacancia, cae un electrón de una capa exterior (L, M, etc.), emitiendo un fotón

de rayos X. El proceso total se identifica por los rayos X emitidos, los cuales son característicos del nuevo núcleo (AC.73)



#### 2.2.4. Radiación gamma

Los rayos gamma son fotones, es decir, paquetes de radiación electromagnética; no tienen masa ni carga, y solamente constituyen energía emitida en forma de onda.

Los núclidos generalmente están en el estado de mínima energía, pero pueden quedar en un estado excitado como consecuencia de un decaimiento. Después pueden regresar a su estado base por emisión de rayos  $\gamma$  (AC.73). Este fenómeno se representa por:



donde el asterisco significa que el núcleo está en un estado excitado, y tanto el núcleo padre como el núcleo hija tienen la misma estructura nuclear.



El diagrama de energías del  ${}^{60}\text{Co}$  se muestra en la Figura 2.1.

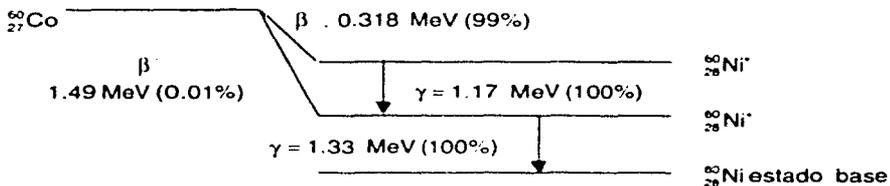


Figura 2.1 Diagrama de energías para el  ${}^{60}\text{Co}$  que se transforma en  ${}^{60}\text{Ni}$  y se emiten rayos  $\gamma$ . La energía de las partículas  $\beta^{-}$  es su máxima energía cinética.

Debido a que la emisión de un rayo  $\gamma$  se debe a un cambio de nivel de energía, la energía de emisión es discreta, teniéndose uno o más picos, dependiendo del radionúclido.

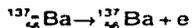
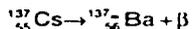
### 2.2.5. Conversión interna

Un núcleo excitado, en lugar de emitir un rayo  $\gamma$  de energía  $h\nu$ , puede impartir a través de su campo Coulombiano la misma cantidad de energía directamente a uno de sus propios electrones atómicos, el cual escapa del átomo con una energía cinética neta  $h\nu - E_b$ , donde  $E_b$  es la energía de amarre del electrón en su capa original. Este proceso no tiene nada que ver con el efecto fotoeléctrico, ya que en este caso, el núcleo no emite fotones (AT.86). Este fenómeno se representa por:



donde la  $m$  significa metaestable.

Ejemplo:



## Capítulo 3

### 3. Interacción de la radiación electromagnética con la materia

#### 3.1. Clasificación de la radiación

La radiación constituye un vehículo para transportar energía de un lugar a otro. Es un término muy amplio que comprende tanto emisiones electromagnéticas como emisiones corpusculares, dentro de las primeras se encuentran: la luz visible, la infrarroja, la ultravioleta, las microondas, las ondas de radio, los rayos X y los rayos gamma; dentro de las segundas se sitúan: las partículas alfa y beta, los neutrones, los electrones acelerados y algunos iones pesados (AZ.99). Además, algunas de estas radiaciones pueden tener suficiente energía como para producir ionización, por lo que se les llama radiaciones ionizantes, las cuales se pueden clasificar de la siguiente manera:

- ◆ **Radiación directamente ionizante.**- Son partículas cargadas rápidas que transfieren su energía directamente a la materia, a través de numerosas interacciones coulombianas, produciendo una gran cantidad de ionización a lo largo de su trayectoria, por ejemplo, partículas alfa, protones, electrones (AT.86).
- ◆ **Radiación indirectamente ionizante.**- Son partículas que transfieren energía a partículas cargadas del medio en que inciden, depositando éstas su energía en el propio medio a través de interacciones coulombianas. A este grupo pertenecen los rayos X, los rayos gamma y los neutrones.

Las interacciones primarias de la radiación electromagnética con la materia liberan partículas cargadas con energía cinética, generalmente electrones. Es la interacción de estas partículas secundarias con el medio lo que produce transferencia de energía de la radiación al material irradiado.

La radiación electromagnética de interés en la física de radiaciones ionizantes se clasifica de acuerdo con su origen, no con su energía (EV.55):

- **Rayos  $\gamma$ .**- Son radiaciones electromagnéticas que acompañan a las transiciones nucleares, debido a un decaimiento radiactivo.
- **Radiación de frenado, bremsstrahlung o rayos X continuos.**- Son el resultado de la desaceleración de electrones libres u otras partículas cargadas.
- **Rayos X característicos.**- Son emitidos debido a transiciones atómicas de electrones ligados a las capas K, L, M, ... en los átomos.
- **Radiación de aniquilación.**- Es emitida cuando un electrón y un positrón se combinan, también se llaman rayos  $\gamma$ .

La energía cuántica de cualquiera de estas radiaciones se puede expresar como  $E = h\nu$ , donde  $\nu$  es la frecuencia y  $h$  es la constante de Planck. Las interacciones de estos fotones con la materia son independientes de su origen y dependen únicamente de su energía cuántica.

### 3.2. Tipos de interacción

Hay ciertos procesos que causan que los fotones sean dispersos o absorbidos en un medio. Los principales procesos mediante los cuales los fotones interactúan con la materia, de acuerdo con su longitud de onda son (EV.55):

- **El efecto Compton.**- Es la dispersión inelástica que se presenta durante la interacción de los fotones con electrones atómicos.
- **El efecto fotoeléctrico.**- Es la absorción completa que se presenta durante la interacción de los fotones con los electrones atómicos.
- **La producción de pares.**- Es la absorción completa que se presenta durante la interacción de los fotones con el campo eléctrico alrededor del núcleo o de los electrones.

- **Dispersión Thomson.-** Es la dispersión de los fotones debida a un electrón libre, el cual bajo la influencia del campo electromagnético oscilante, es acelerado por este campo, y por lo tanto a su vez emite radiación.
- **Dispersión Rayleigh.-** Es la dispersión elástica de la radiación electromagnética por una partícula sujeta a un potencial armónico, por ejemplo un electrón ligado a un átomo.

Para dosimetría de la radiación los tres primeros procesos son los más importantes, ya que el resultado de la interacción es la transferencia de energía de los fotones a electrones del medio con el que interaccionan, los cuales imparten esa energía a la materia.

La importancia relativa de estos tres efectos depende de la energía cuántica  $E = h\nu$  del fotón incidente y del número atómico  $Z$  del medio absorbente. En la figura 3.1 se indican las regiones de  $Z$  y  $E$ , en las cuales cada interacción predomina. Las curvas muestran donde son igualmente probables dos clases de interacción. Se observa que el efecto fotoeléctrico es dominante a las energías más bajas del fotón, el efecto Compton a energías medias y la producción de pares a las energías más altas.

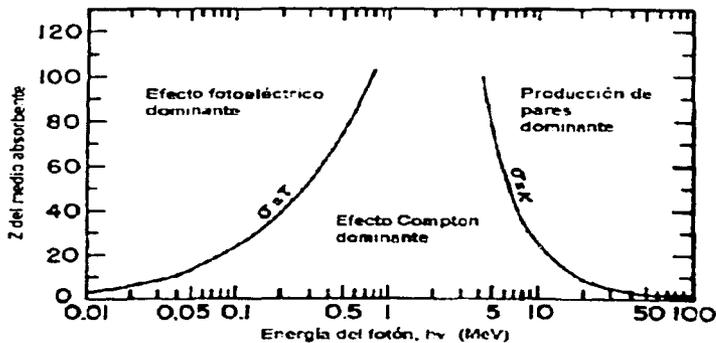


Figura 3.1 Importancia relativa de los tres tipos principales de interacción de los rayos X y  $\gamma$ . Las líneas muestran los valores de  $Z$  y  $h\nu$  para los cuales los dos efectos vecinos son igualmente probables. (EV.55)

### 3.2.1. Efecto Compton

Cuando el fotón incidente tiene una energía  $h\nu_0$  que no puede ser despreciada en comparación con  $m_0c^2$  se tiene que:

- El momento del fotón  $h\nu_0/c$  no puede ser despreciado. Este momento incidente debe conservarse entre el fotón dispersado y el electrón.
- La dirección del fotón dispersado no es paralela a la dirección del fotón incidente; el fotón dispersado tiene un momento y una energía menor que las del fotón incidente, el momento y la energía restantes se imparten al electrón.

Se supone que el electrón golpeado está en reposo, y su energía de ligadura es pequeña comparada con  $h\nu_0$ .

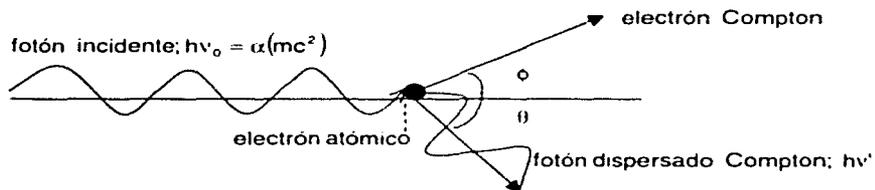


Figura 3.2 Trayectorias en el plano de dispersión para el fotón incidente  $h\nu_0$ , el fotón dispersado  $h\nu'$  y el electrón dispersado, el cual adquiere un momento  $p$  y una energía cinética  $T$  (EV.55).

En la figura 3.2 se muestra el esquema de la interacción de un fotón con un electrón, donde la energía del fotón incidente es  $h\nu_0$ , el ángulo al que es emitido el fotón dispersado es  $\theta$ , la energía del fotón dispersado es  $h\nu'$ , el ángulo al que sale el electrón es  $\phi$  y su momento y energía cinética son  $p$  y  $T$ , respectivamente. Las trayectorias del fotón incidente y del fotón dispersado definen el plano de dispersión. El momento normal a este plano es cero, de donde

la trayectoria del electrón debe caer también en ese plano; entonces, las tres trayectorias deben ser coplanares.

La ecuación que representa al efecto Compton es:

$$\frac{c}{v'} - \frac{c}{v_0} = \lambda' - \lambda_0 = \frac{h}{m_0 c} (1 - \cos \theta) \quad (3.1)$$

Esta ecuación proporciona el corrimiento Compton, la longitud  $h/m_0 c = 2.426 \times 10^{-10} \text{ cm}$  es llamada longitud de onda Compton  $\lambda_c$  , y es igual a la longitud de onda de un fotón con energía igual a la energía en reposo del electrón  $m_0 c^2 = 0.511 \text{ MeV}$  . Esta ecuación se puede escribir como:

$$\frac{1}{hv'} - \frac{1}{hv_0} = \frac{1}{m_0 c^2} (1 - \cos \theta) \quad (3.2)$$

El corrimiento Compton en la longitud de onda es independiente de la energía del fotón incidente. En cambio, el corrimiento Compton en la energía depende fuertemente de  $hv_0$  .

Los fotones de baja energía son dispersados con un cambio de energía moderado, pero los fotones de alta energía sufren un gran cambio en ella.

La energía del fotón dispersado es:

$$hv' = \frac{m_0 c^2}{1 - \cos \theta + 1/\alpha} \quad (3.3)$$

La energía transferida máxima  $T_{max}$  al electrón es:

$$T_{max} = \frac{hv_0}{1 + 1/2\alpha} \quad (3.4)$$

donde

$$\alpha = \frac{hv_0}{m_0 c^2} \quad (3.5)$$

### 3.2.2. Efecto fotoeléctrico

Se presenta en aquellos casos donde la energía del fotón es comparable con la energía de ligadura del electrón.

Un fotón incidente no puede ser absorbido totalmente por un electrón libre, esto se debe a consideraciones de conservación de momento. Sin embargo, se tiene absorción total si el electrón está ligado inicialmente a un átomo, ya que entonces se conserva el momento debido al retroceso del átomo residual.

Los electrones más fuertemente ligados tienen mayor probabilidad de absorber un fotón que incide sobre el átomo. Como participa el átomo entero, el efecto fotoeléctrico se puede ver como una interacción del fotón primario con la nube de electrones atómicos en la cual la energía del fotón  $h\nu_0$  se absorbe y un electrón, usualmente K o L, es sacado del átomo como se muestra en la figura 3.3.

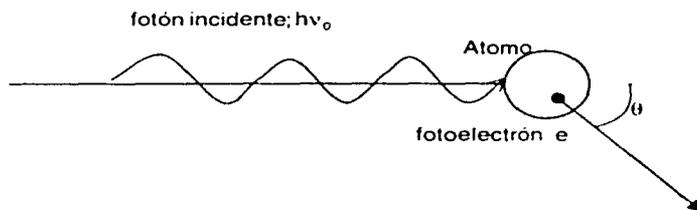


Figura 3.3 Representación esquemática del proceso fotoeléctrico: el fotón incidente  $h\nu_0$  es absorbido completamente y se emite un fotoelectrón de energía  $T = h\nu_0 - E_0$  a un ángulo  $\theta$  (EV.55)

El electrón sale del átomo a un ángulo  $\theta$  con respecto a la dirección del fotón incidente y con una energía cinética

$$T = h\nu_0 - E_0 \quad (3.6)$$

donde  $E_b$  es la energía de ligadura del electrón, mientras que la energía sobrante aparece como rayos X característicos al llenarse la vacancia en la capa interna.

### 3.2.3. Producción de Pares

La producción de pares es un proceso de absorción, en el cual un fotón desaparece y se producen un electrón y un positrón, como se muestra en la figura 3.4. Esto sólo puede ocurrir en un campo de fuerzas de Coulomb, usualmente cerca de un núcleo atómico. Sin embargo, también puede ocurrir, con menor probabilidad, en el campo de un electrón atómico. Este último proceso es llamado producción de tripletes, porque el electrón que produce el campo de Coulomb también puede adquirir energía cinética significativa al conservarse el momento, entonces un positrón y dos electrones salen del sitio de interacción.

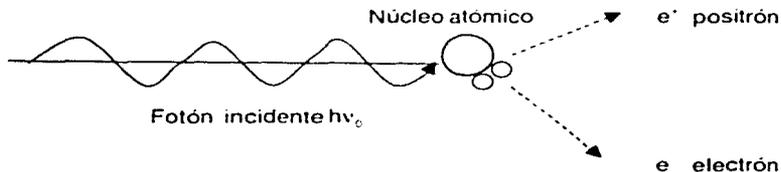


Figura 3.4 Representación esquemática del proceso de producción de pares en el campo de un núcleo. El fotón incidente es totalmente absorbido y emerge un par electrón - positrón. La energía cinética total es:  $T^+ + T^- = hv_0 - 2m_e c^2$  (EV 55).

Para que ocurra la producción de pares se necesita que el fotón tenga una energía mínima  $h\nu$  igual a dos veces la energía de la masa en reposo del electrón:

$$h\nu_{\min} = 2m_e c^2 = 1.022 \text{ MeV} \quad (3.7)$$

Para que haya producción de tripletes la energía mínima del fotón debe ser:

$$h\nu_{\min} = 4m_e c^2 = 2.044 \text{ MeV} \quad (3.8)$$

El electrón y el positrón no necesariamente adquieren la misma energía cinética, pero su energía promedio está dada por:

$$\bar{T} = \frac{h\nu - 1.022 \text{ MeV}}{2} \quad (3.9)$$

### 3.3. Absorción de radiación electromagnética

Cuando un haz de radiación ionizante pasa a través de un medio absorbente puede sufrir algunos de los procesos descritos, mediante los cuales, los fotones son dispersados o absorbidos por el medio, reduciéndose la intensidad de la radiación transmitida.

#### 3.3.1. Coeficiente de atenuación lineal

Consideremos un haz de fotones monoenergético y colimado. Al punto P (figura 3.5) llegarán N fotones. Si colocamos un medio absorbente de grosor  $\Delta x$  en la trayectoria del haz, un número  $\Delta N$  de fotones no atravesará el medio y por consiguiente el número de fotones que alcanza al punto P se reducirá (TU.95).

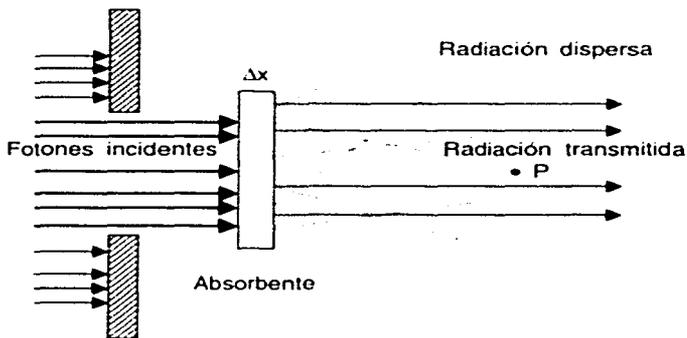


Figura 3.5 Representación esquemática de cómo un absorbente de grosor  $\Delta x$  reduce la intensidad de la radiación en P y cómo se produce la radiación dispersa.

$\Delta N$  depende directamente del número de fotones incidentes en el absorbente, así como del grosor  $\Delta x$  de éste. Matemáticamente, esta relación se expresa como:

$$\Delta N = -\mu N \Delta x \quad (3.10)$$

donde  $\mu$  es la constante de proporcionalidad, llamada coeficiente lineal de atenuación, la cual comprende todas las contribuciones individuales de los diferentes procesos físicos, y depende tanto del número atómico del absorbente como de la energía de la radiación  $h\nu$ . Este coeficiente representa una probabilidad de interacción de la radiación con el medio absorbente, misma que se identifica con la sección eficaz de interacción.

La relación 3.10 se puede escribir como:

$$\mu = -\frac{\Delta N}{N} \frac{1}{\Delta x} \quad [\mu] = \text{cm}^{-1} \quad (3.11)$$

De esta relación, se observa que el coeficiente lineal de atenuación es igual a la fracción de fotones que no atraviesan al absorbente por unidad de longitud.

Integrando la relación (3.11) y considerando los límites  $x \in [0, x]$  y  $N \in [N_0, N]$ , se obtiene:

$$N = N_0 e^{-\mu x} \quad (3.12)$$

donde  $N$  es el número de fotones transmitidos,  $N_0$  es el número de fotones incidentes y  $x$  es el espesor del medio absorbente.

### 3.3.2. Coeficiente másico de atenuación

El grosor  $\Delta x$  del absorbente reduce la intensidad de la radiación transmitida mediante interacciones entre la radiación incidente y los electrones y átomos del medio. La atenuación producida por una capa  $\Delta x$  dependerá del número de electrones presentes en dicha capa. Si esta capa es comprimida a la mitad de su grosor original, manteniendo el mismo número de electrones, entonces atenúa la misma fracción de radiación incidente, por lo que su coeficiente

lineal de atenuación aumenta. Por lo tanto, este coeficiente de atenuación depende de la densidad del material.

Si dividimos el coeficiente lineal de atenuación entre la densidad del material del absorbente, resulta una propiedad atómica, llamada coeficiente másico de atenuación, el cual es independiente de la densidad del medio y está definido como:

$$\mu_m = \frac{\mu}{\rho} \quad [\mu_m] = \frac{\text{cm}^2}{\text{g}} \quad (3.13)$$

Este coeficiente es la suma de los coeficientes másicos de atenuación de los diferentes procesos de interacción de la radiación con la materia y se relaciona con la sección total atómica de atenuación  $\mu_{\text{tot}}$  de la siguiente manera (RI.01):

$$\mu_m = \frac{\mu}{\rho} = \mu_{\text{tot}} \frac{A_0}{M} \quad (3.14)$$

donde

$A_0$ .- es el número de Avogadro.

$M$ .- es el peso molecular o atómico.

$\mu_{\text{tot}}$ .- es la sección total de atenuación, que es la probabilidad por cada átomo del material absorbente de que un fotón experimente un proceso atenuador, es decir, que lo remueva del haz original de radiación.

### 3.3.3. Coeficiente másico de transferencia de energía

Cuando un fotón interactúa con un electrón en un proceso de absorción, parte de la energía del fotón  $h\nu$  se convierte en energía cinética de partículas cargadas (PC) rápidas (electrones o positrones), mientras que parte es radiada desde el absorbente como radiación de dispersión.

Una de las cantidades de mayor interés de los procesos de interacción, es la fracción de la energía del fotón que se transfiere como energía cinética a los electrones del material en la

vecindad de cada interacción. Para conocer esta cantidad (RI.01), se define el coeficiente másico de transferencia de energía:

$$\frac{\mu_{tr}}{\rho} = \frac{A_0}{M} (f_c \sigma_c + f_l \sigma_l + f_{pp} \sigma_{pp}) \quad (3.15)$$

donde  $\sigma_c$ ,  $\sigma_l$  y  $\sigma_{pp}$  son las secciones eficaces correspondientes al efecto Compton, efecto fotoeléctrico y producción de pares, respectivamente, y  $f_c$ ,  $f_l$  y  $f_{pp}$  son las fracciones de energía perdida durante los mismos procesos.

### 3.3.4. Coeficiente de absorción de energía

La mayoría de las partículas cargadas rápidas pierde su energía en colisiones con el material y esto contribuye a la energía depositada, sin embargo, es necesario restar la energía de procesos secundarios que son radiativos, como el bremsstrahlung producido por electrones y positrones, la radiación de aniquilación y la emisión fluorescente producida por electrones y positrones. Con esto se obtiene el coeficiente másico de absorción (RI.01) como:

$$\frac{\mu_{en}}{\rho} = (1 - g) \frac{\mu_{tr}}{\rho} \quad \left[ \frac{\mu_{en}}{\rho} \right] = \frac{cm^2}{g} \quad (3.16)$$

donde  $g$  es la fracción de energía perdida por procesos radiativos, es decir, este coeficiente másico de absorción de energía representa la fracción de energía de los fotones que es realmente absorbida por el movimiento de partículas cargadas por  $\frac{cm^2}{g}$  de absorbente.

## Capítulo 4

### 4. Dosimetría y Termoluminiscencia

#### 4.1. Magnitudes dosimétricas

Las magnitudes y unidades empleadas en dosimetría se utilizan para caracterizar y cuantificar los campos de radiación y describir la interacción de la radiación con la materia como función del tipo de radiación ionizante incidente.

##### 4.1.1. Fluencia

Proporciona una caracterización del campo de radiaciones sin referirse a su interacción con el material irradiado. La fluencia de partículas se define como el número de partículas que atraviesan una esfera finita durante un intervalo de tiempo, como se muestra en la figura 4.1 (AT.86).

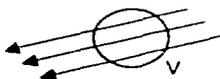


Figura 4.1 Fluencia de partículas que atraviesan una esfera de sección eficaz igual a la unidad.

Sea  $N_p$  el valor esperado del número de rayos que cruzan la esfera que rodea al punto P, con un círculo máximo de área  $da$ , en un intervalo de tiempo  $\Delta t$ . Si  $V \rightarrow 0$ , entonces la fluencia es:

$$\Phi = \frac{dN_p}{da} \quad [\Phi] = \text{m}^{-2} \quad (4.1)$$

#### 4.1.2. Rapidez de fluencia o densidad de flujo

Es la variación de la fluencia con respecto al tiempo (AT.86)

$$\varphi = \frac{d\Phi}{dt} = \frac{d}{dt} \left( \frac{dN_s}{da} \right) \quad [\varphi] = m^{-2}s^{-1} \quad (4.2)$$

#### 4.1.3. Fluencia de energía

Sea R el valor esperado de la energía total, excluyendo la energía de la masa en reposo, llevada por los  $N_s$  rayos que golpean la esfera finita que rodea al punto P, durante un intervalo de tiempo  $\Delta t$ . Si  $V \rightarrow 0$ , entonces la fluencia de energía es:

$$\psi = \frac{dR}{da} \quad [\psi] = \frac{J}{m^2} \quad (4.3)$$

#### 4.1.4. Rapidez de fluencia de energía

Es la variación de la fluencia de energía con respecto al tiempo (AT.86):

$$\dot{\psi} = \frac{d\psi}{dt} = \frac{d}{dt} \left( \frac{dR}{da} \right) \quad [\dot{\psi}] = \frac{J}{m^2s} \quad (4.4)$$

#### 4.1.5. Energía radiante

Es la energía de partículas, excepto energía en reposo, emitida, transferida o recibida en el volumen V.

#### 4.1.6. Energía impartida

Es la radiación depositada en un volumen determinado, (AT.86). Se define como:

$$\epsilon = R_{in} - R_{out} + \sum Q \quad (4.5)$$

- $R_{en}$ .- Es la energía radiante de todas las partículas ionizantes, cargadas o no cargadas que ingresan al volumen.
- $R_{ex}$ .- Es la energía radiante de todas las partículas ionizantes, cargadas o no cargadas que dejan el volumen.
- $\sum Q$ .- Es la suma de la energía neta derivada de la masa en reposo en  $V$ ; si hay transformación de masa en energía  $Q$  es positiva, si la transformación es de energía a masa  $Q$  es negativa.

#### 4.1.7. Dosis absorbida

Es la cantidad de energía impartida que la radiación deposita en la unidad de masa del material irradiado (AT.86).

$$D = \frac{d\bar{\epsilon}}{dm} \quad [D] = \text{Gy} \quad (4.6)$$

donde  $d\bar{\epsilon}$  es la energía promedio impartida por la radiación ionizante en una porción de masa  $dm$ . La energía promedio  $\bar{\epsilon}$  impartida es el valor esperado de la energía impartida por unidad de masa en un punto (AT.86).

#### 4.1.8. Rapidez de dosis

Es la variación de la dosis con respecto al tiempo:

$$\dot{D} = \frac{dD}{dt} \quad \left[ \dot{D} \right] = \frac{\text{Gy}}{\text{s}} \quad (4.7)$$

donde  $dD$  es el incremento de la dosis absorbida en el intervalo de tiempo  $dt$  (AT.86).

#### 4.1.9. Exposición.

Es una medida de la ionización producida por la radiación electromagnética ionizante. Solamente está definida para rayos  $X$  y rayos  $\gamma$  en aire, y se define como el cociente entre

$dQ$  y  $dm$ , donde  $dQ$  es el valor absoluto de la carga total de iones de un solo signo producidos en aire, cuando todos los electrones liberados por fotones en un elemento de volumen de aire de masa  $dm$  son completamente detenidos (AT.86).

$$X = \frac{dQ}{dm} \quad [X] = R = 2.58 \times 10^{-4} \frac{C}{Kg} \quad (4.8)$$

**R = Roentgen.**- Es la exposición que produce en aire una carga de 1 ues de uno u otro signo en 0.001293 g de aire (i.e. la masa contenida en 1 cm<sup>3</sup> a 760 Torr y 0° C), irradiado por fotones.

$$1R = \frac{1 \text{ ues}}{0.001293 \text{ g}} \times \frac{1 \text{ C}}{2.998 \times 10^9 \text{ ues}} \times \frac{10^3 \text{ g}}{1 \text{ Kg}} = 2.580 \times 10^{-4} \text{ C/Kg} \quad (4.9)$$

La ionización que surge de la absorción de Bremsstrahlung emitida por los electrones, no debe ser incluida en  $dQ$ .

#### 4.1.10. Rapidez de exposición

Indica cuánto cambia la exposición en la unidad de tiempo, (AT.86) y se define como:

$$\dot{X} = \frac{dX}{dt} \Rightarrow X = \int_{t_0}^t \dot{X}(t) dt \quad (4.10)$$

#### 4.1.11. El valor $\bar{W}$

Es la energía promedio necesaria para formar un par de iones en un gas. Experimentalmente se ha encontrado que para aire seco  $\bar{W} = 33.97 \text{ eV/par - iones}$ .

$$\frac{\bar{W}}{e} = \frac{33.97 \text{ eV/electrón}}{1.602 \times 10^{-19} \text{ C/electrón}} \times 1.602 \times 10^{-19} \frac{J}{eV} = 33.97 \text{ J/C} \quad (4.11)$$

#### 4.1.12. Equilibrio de Partícula Cargada (EPC)

Existe EPC para el volumen  $v$  si cada partícula cargada de un tipo y energía de radiación que

sale de  $v$  es reemplazada por otra partícula idéntica del mismo tipo y energía de radiación, en términos de valores esperados, cumpliéndose en promedio, que en  $v$  se balancean las energías que traen las partículas cargadas entrantes y las salientes, como se muestra en la figura 4.2 (AT.86).

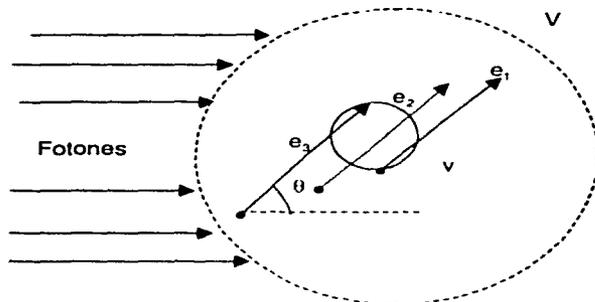


Figura 4.2 Condiciones de equilibrio de partícula cargada para una fuente externa. El volumen  $V$  contiene un medio homogéneo uniformemente irradiado por radiación indirectamente ionizante. La atenuación se considera despreciable. Las partículas cargadas secundarias son producidas uniformemente en  $V$ , no necesariamente de manera isotrópica, pero con la misma dirección y misma distribución de energía en todo punto. Si la distancia mínima que separa las fronteras de los volúmenes interno y externo es mayor que el alcance máximo de las partículas cargadas presentes, entonces existe EPC en  $v$  (AT.86).

#### 4.1.13. Relación entre dosis absorbida y exposición

La relación entre dosis absorbida y exposición está definida para rayos X y rayos  $\gamma$  en un volumen de aire, y existe solamente si existe EPC en el punto de interés (AT.86).

$$D_{\text{ave}}^{\text{EPC}} = X \left( \frac{W}{e} \right)_{\text{ave}} \quad (4.12)$$

Si  $[D] = \text{cGy}$  y  $[X] = \text{R}$ , entonces

$$D_{\text{EPC}} = 0.876 X \quad (4.13)$$

#### 4.1.14. Dosis equivalente

La dosis equivalente,  $H_{T,R}$ , en un tejido u órgano T debida a la radiación R, se define como el producto de la dosis absorbida promedio,  $D_{T,R}$  en el tejido y un factor de ponderación  $w_R$  que depende del tipo de radiación utilizada, esto es:

$$H_{T,R} = w_R D_{T,R} \quad [H_{T,R}] = 1\text{Sv} = 1\text{J/Kg} \quad (4.14)$$

Para rayos  $\gamma$ , el factor de ponderación es igual a la unidad.

#### 4.1.15. Equivalente de dosis efectivo

El riesgo para todos los efectos estocásticos, para un individuo, está dado por el equivalente de dosis efectivo,  $H_E$ , que es la suma ponderada de las dosis equivalentes para los diferentes tejidos dado por (RE.88):

$$H_E = \sum_T w_T T_{T,R} \quad [H_E = 1\text{Sv} = 1\text{J/Kg}] \quad (4.15)$$

donde  $w_T$  son los factores de ponderación para los diferentes tejidos.

En el caso de irradiación externa uniforme del cuerpo entero,  $H_T$  es la misma para todo el cuerpo, entonces:

$$H_E = H_T = \sum_R w_R D_{T,R} \quad (4.16)$$

## 4.2. Fundamentos de Dosimetría

La dosimetría se refiere a la determinación de la dosis absorbida o a la rapidez de dosis resultante de la interacción de la radiación ionizante con la materia.

#### 4.2.1. Teoría de cavidades

Consideremos un medio irradiado por una densidad de flujo de fotones  $\varphi$ , uniforme espacialmente. En cualquier punto dentro del medio (a una profundidad igual o mayor que el alcance máximo de los electrones secundarios) existirá equilibrio de partícula cargada y la densidad de flujo de los fotones dará lugar a una densidad de flujo de electrones  $\varphi_e$  igualmente uniforme espacialmente (BR.81). Consideremos un tiempo finito de exposición  $t$  y definiendo la fluencia como  $\Phi = \varphi t$ , podemos determinar la dosis absorbida en el medio,  $D_u$  por:

$$D_u = \Phi E \left( \frac{\mu_{em}}{\rho} \right)_u \quad (4.17)$$

Si se trata de un espectro continuo de energía, entonces:

$$D_u = \int \frac{d\Phi(E)}{dE} E \left( \frac{\mu_{em}}{\rho} \right)_u dE \quad (4.18)$$

Si ahora, introducimos una cavidad en este medio, la dosis absorbida en la cavidad será en general diferente de  $D_u$ . La relación entre la dosis depende del material de la cavidad y del tamaño de ésta. En general supondremos que el material de la cavidad es diferente que el del medio. Con respecto al tamaño de la cavidad, se pueden distinguir tres situaciones:

- Las dimensiones de la cavidad son pequeñas comparadas con el alcance de los electrones secundarios generados por los fotones.
- Las dimensiones de la cavidad son grandes comparadas con el alcance de los electrones.
- Las dimensiones de la cavidad son comparables con el alcance de los electrones.

El desarrollo de la teoría de Bragg-Gray supuso la primera situación. Más tarde las teorías de Laurence, Spencer y Attix, y de Burch y Burlin han permitido extender la teoría de Bragg-Gray a situaciones de los dos últimos tipos (BR.81).

### 4.2.2. Teoría de Bragg-Gray

Si una fluencia  $\Phi$  de partículas cargadas idénticas de energía cinética  $T$  pasa a través de una interfaz entre dos medios diferentes,  $g$  y  $w$ , como se muestra en la figura 4.3.

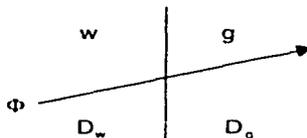


Figura 4.3 Interfaz entre dos medios diferentes para determinar la dosis absorbida sobre la frontera (AT.86).

Entonces se puede escribir para la dosis absorbida en el medio  $g$ ,

$$D_g = \Phi \left[ \left( \frac{dT}{\rho dx} \right)_{x_g} \right]_T \quad (4.19)$$

y para el lado  $w$

$$D_w = \Phi \left[ \left( \frac{dT}{\rho dx} \right)_{x_w} \right]_T \quad (4.20)$$

Ignorando efectos de dispersión, la fluencia  $\Phi$  es continua a través de la interfaz, y

$$\frac{D_w}{D_g} = \frac{(dT/\rho dx)_{x_w}}{(dT/\rho dx)_{x_g}} \quad (4.21)$$

donde  $\left( \frac{dT}{\rho dx} \right)_x$  es el poder másico de frenado de colisión, definido como el valor esperado de la rapidez de pérdida de energía por unidad de longitud másica por una partícula cargada en un medio dado, en interacciones que producen ionización y excitación del medio.

Consideremos que un medio homogéneo  $w$ , es irradiado y contiene una capa delgada o cavidad con otro medio  $g$  (figura 4.4), suponiendo que se cumplen las siguientes condiciones, llamadas de Bragg-Gray:

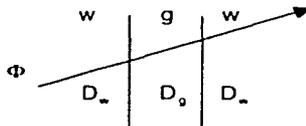


Figura 4.4 Una fluencia de partículas cargadas pasa a través de una capa delgada del medio  $g$  que se encuentra contenida en el medio  $w$ . Suponiendo que  $\Phi$  es continua a través de las dos interfaces, la razón de dosis  $D_w/D_g$  es igual a la razón de los poderes de frenado (AT.86).

- El grosor de la capa  $g$  es pequeño en comparación con el alcance de las partículas cargadas incidentes, esto es, su presencia no perturba el campo de las partículas cargadas.
- La dosis absorbida en la cavidad es depositada completamente por las partículas cargadas que la cruzan.

Entonces, el cociente de las dosis absorbidas en el medio adyacente  $w$  con respecto a la cavidad  $g$  está dado por la ecuación (4.19), llamada relación de Bragg-Gray, con la cual se puede calcular  $D_w$  a partir de la  $D_g$  medida previamente.

La relación de Bragg-Gray no requiere EPC ni un campo de radiación homogéneo. Sin embargo, la fluencia  $\Phi$  debe ser la misma para la cavidad y el medio circundante, así como en el lugar donde se calcula  $D_w$  (AT.86).

#### 4.2.3 Modelo de un Dosímetro Simple en términos de la Teoría de Cavidad

De manera simple, un dosímetro consiste de un volumen sensible  $V$  lleno con un medio  $g$ ,

envuelto por otro medio  $w$ , cuyo grosor es  $d \geq 0$ , figura 4.5.

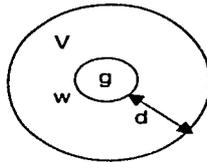


Figura 4.5 Modelo simple de un dosímetro (AT.86).

El medio  $g$  puede contener: un gas, un líquido o un sólido, dependiendo del tipo de dosímetro.

La pared del dosímetro tiene diversas funciones:

- Es una fuente de partículas cargadas secundarias que contribuyen a la dosis en  $V$ , además en algunos casos proporciona EPC.
- Protege a  $V$  de partículas cargadas que se originan fuera de la pared.
- Protege a  $V$  de influencias hostiles, tales como: daños mecánicos, suciedad, humedad, luz, campos electrostáticos o de radiofrecuencia que puedan alterar la lectura.
- Sirve como contenedor del medio  $g$ .
- Puede contener filtros de radiación para modificar la dependencia con la energía del dosímetro.

Este dispositivo es capaz de proporcionar una lectura  $r$  que está relacionada con la dosis absorbida  $D_g$  depositada en su volumen sensible  $V$  por la radiación ionizante. Si la dosis no es homogénea en  $V$ , entonces  $r$  está relacionada con el valor medio de  $D_g$ .

Teóricamente  $r$  es proporcional a  $D_g$ , sin embargo, en la práctica esta aproximación no es del todo correcta, ya que la mayoría de los dosímetros presentan cierto grado de no-linealidad de  $r$  vs  $D_g$  en una parte del intervalo de dosis (AT.86).

#### 4.2.4. Características Generales de los Dosímetros

- **Absolutidad.-** Se refiere a que un dosímetro mide la dosis en su propio volumen sensible y no necesita calibración en un campo de radiación conocido. Ejemplos: calorímetro, cámara de ionización, solución Fricke.
- **Precisión.-** Se refiere a la reproducibilidad de las mediciones y está asociada con las variaciones de las características del instrumento, condiciones ambientales y naturaleza estocástica de los campos de radiación. Se expresa en términos de la desviación estándar. A una alta precisión le corresponde una pequeña desviación estándar.
- **Exactitud.-** Expresa la proximidad del valor esperado al valor real de la cantidad a medir.
- **Sensibilidad.-** Se define como la respuesta del dosímetro por unidad de dosis y se denota como  $\frac{dr}{dD_0}$ . Una sensibilidad constante para el intervalo en cuestión, proporciona una respuesta lineal  $r$  vs  $D_0$ . si no es lineal pero  $r = r(D_0)$  es una función univaluada, entonces es aceptable.
- **Intervalo de dosis.-** El límite inferior puede ser impuesto por la señal de fondo del equipo utilizado ( $r_0$ ), la cual está compuesta de rayos cósmicos, fuentes naturales terrestres o artificiales; y de la señal del dosímetro a dosis cero, ( $r = r_0$  cuando  $D_0 = 0$ ).

De lo anterior, se tiene que la lectura observada en ausencia de campo de radiación, es

$$r_0 + r_b$$

El límite superior de la independencia con la rapidez de dosis, ocurre usualmente cuando las trazas de partículas cargadas están lo suficientemente cerca en el espacio y en el tiempo como para permitir que los iones, pares electrón-agujero o productos químicos activos interaccionen entre sí.

- **Intervalo de la rapidez de dosis**

a) Para dosímetros integradores:

- No hay restricción en el límite de baja rapidez.
  - Existe un límite superior, independientemente de la rapidez de dosis. Se presenta cuando las trazas de partículas cargadas están suficientemente juntas, tanto en el tiempo como en el espacio.
- b) Para medidores de rapidez de dosis.- La lectura  $r$  debe ser proporcional a la tasa de dosis  $d\bar{D}_0/dt$ , o al menos ser una función univaluada.

- **Estabilidad**

- a) Antes de la irradiación: Efectos de la temperatura, humedad, presencia de oxígeno, etc. pueden causar un cambio gradual en la sensibilidad o en el fondo instrumental.
- b) Después de la irradiación: Algunos dosímetros integradores pueden sufrir desvanecimiento durante el tiempo entre la irradiación y la lectura. Esto puede agravarse con condiciones ambientales desfavorables.

- **Dependencia con la energía**

Es la dependencia de la lectura del dosímetro  $r$  por unidad de la cantidad medida, respecto a la energía cuántica o cinética de la radiación. Existen dos usos comunes del término "dependencia con la energía":

- a) Dependencia de la lectura del dosímetro por unidad de exposición a rayos  $\gamma$ , con la energía cuántica media o calidad del haz.

$$\frac{r}{X} \text{ vs } \bar{E}$$

- b) Dependencia de la lectura del dosímetro por unidad de dosis absorbida en agua, con la energía del haz de fotones o electrones.

$$\frac{r}{D} \text{ vs } \bar{E}$$

### 4.3. Termoluminiscencia (TL)

La termoluminiscencia forma parte del conjunto de procesos conocidos como Fenómenos Térmicamente Estimulados dentro de los cuales se encuentran: la conductividad térmicamente estimulada (TSC), la capacitancia térmicamente estimulada (TScap), la polarización térmicamente estimulada (TSPC), etc. (MC.95). Cada uno de estos fenómenos se desarrolla en dos etapas:

- Perturbación del sistema: de su estado de equilibrio a un estado metaestable.
- Relajación térmicamente estimulada: el sistema al ser estimulado regresa a su estado de equilibrio.

En la primera etapa, es necesario que el material absorba energía para que pueda pasar a un estado metaestable.

En la segunda etapa, mientras el sistema regresa a su estado de equilibrio, se observa un cambio no-isotérmico de una propiedad particular del material, por ejemplo, luminiscencia, conductividad, capacitancia, etc.

En la figura 4.6 se muestra un esquema del mecanismo termoluminiscente (MC.95).



Figura 4.6 Representación esquemática de las dos fases del proceso termoluminiscente. En la primera se almacena energía a partir del campo de radiación, induciendo un estado metaestable. En la segunda la estimulación térmica regresa al sistema a su estado de equilibrio. Durante esta etapa, se emite luz, cuya cantidad depende de la energía inicialmente absorbida (MC.95).

La termoluminiscencia es la emisión de luz que se produce al calentar, por debajo de su temperatura de incandescencia, a un sólido cristalino previamente expuesto a un agente

excitante, como las radiaciones ionizantes, de tal manera que el sólido libera energía que almacenó durante la acción del agente.

#### 4.3.1. Fenómeno termoluminiscente

Al irradiar el cristal, su estructura sufre alteraciones por la ionización, en este proceso se liberan electrones de la red y se generan dos tipos de portadores de carga: electrones y agujeros, ambos portadores pueden viajar por el cristal hasta quedar atrapados en defectos de la red.

Los defectos pueden ser: impurezas u otros defectos puntuales, ya sean intrínsecos o generados por la radiación. En cada caso, las cargas se encuentran localizadas en posiciones bien definidas dentro de la red cristalina, de manera tal, que parte de la energía de radiación absorbida es almacenada por el cristal.

La estabilización de los defectos puede incrementarse con el desorden de la red (impurezas y otras imperfecciones estructurales), este desorden de la red existe desde antes de la irradiación, y aumenta la energía almacenada, ya sea por trampas para agujeros y electrones libres, o bien mediante el establecimiento de átomos intersticiales y vacancias. Por lo tanto, se encuentra que los materiales más sensibles para dosimetría termoluminiscente son dopados con impurezas; esto no implica, que a más defectos le corresponde más termoluminiscencia. La clave para hacer que un dosímetro termoluminiscente sea más sensible es adicionar cantidades controladas de dopantes.

En el proceso termoluminiscente la liberación de la energía almacenada en la forma de luminiscencia es estimulada por un incremento en la temperatura del cristal. La energía liberada se debe a la recombinación de electrón-agujero y los electrones pasan del estado metaestable excitado al estado base (MC.95), como se muestra en la figura 4.7.

Los activadores proveen a la red cristalina de dos clases de centros o imperfecciones.

- Trampas para electrones y agujeros.
- Centros luminiscentes localizados en las trampas, y que emiten luz cuando electrones y agujeros se recombinan entre ellos.

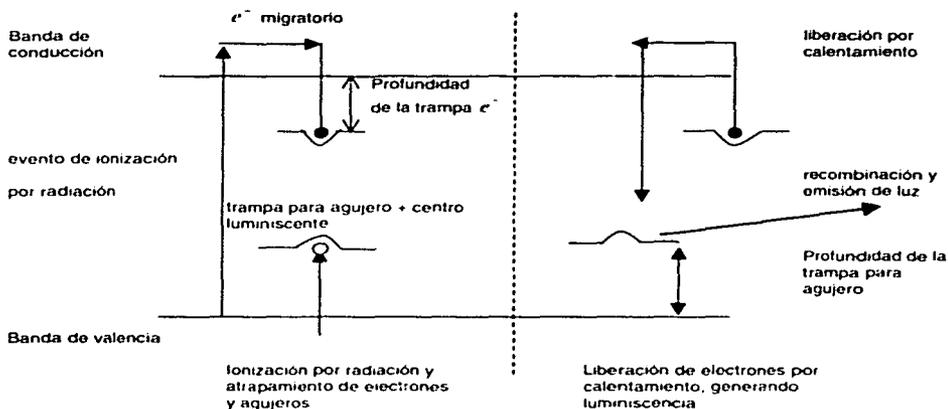


Figura 4.7 Diagrama de bandas de energía para explicar el fenómeno termoluminiscente (AT.86).

#### 4.3.2. Curva Termoluminiscente

La curva TL o de brillo es la gráfica de la intensidad de la luz emitida como función de la temperatura, y representa la distribución de energía de las trampas.

La intensidad termoluminiscente neta medida resulta de la interacción del campo de radiación con el material termoluminiscente. Esta depende del tipo, número y distribución de los diferentes defectos presentes en el material; del tiempo de calentamiento; de la naturaleza del material huésped que es irradiado; de la energía de la radiación (y otros factores, tales como el tiempo de irradiación, rapidez de irradiación, temperatura, etc. (MC.95).

En aplicaciones dosimétricas los parámetros del campo de radiación relevantes son: dosis, rapidez de dosis, energía de partículas incidentes, etc. y solamente afectan al tamaño del pico termoluminiscente, y no su forma (AZ.99).

La probabilidad de desocupación de las trampas está en función de la temperatura; a baja temperatura, esta probabilidad es prácticamente cero, ya que los portadores de carga no adquieren la energía cinética suficiente para escapar de la trampa. Si la temperatura aumenta,

la probabilidad de que las trampas se desocupen, aumenta. Durante el calentamiento, una fracción de los portadores liberados se dirige hacia los centros de recombinación, haciendo que disminuya la población de portadores de carga atrapados, por lo que la curva empieza a decaer, dando origen a un pico de brillo (AZ.99).

Si en el cristal existen varios tipos de trampas, el proceso se repite para cada una de ellas, dando lugar a varios puntos de intensidad máxima de emisión luminosa, los cuales se llaman picos termoluminiscentes. Cada pico está caracterizado por: la temperatura máxima, profundidad de la trampa y factor de frecuencia.

#### 4.3.3. Respuesta termoluminiscente en función de la dosis absorbida.

La respuesta TL como función de la dosis  $F(D)$  se define como la dependencia de la intensidad de la señal TL con respecto de la dosis absorbida. Los materiales dosimétricos ideales tienen una respuesta lineal en un intervalo amplio de dosis, sin embargo, la mayoría de los materiales usados en dosimetría muestran una variedad de efectos no-lineales, como se muestra en la figura 4.8.

Frecuentemente la curva de respuesta de un material TL en función de la dosis absorbida comprende tres regiones: lineal, supralineal y de saturación.

En la región lineal se realizan las medidas con la máxima precisión. Para fines prácticos es conveniente utilizar esta zona, o bien, la que produzca una línea recta en escala logarítmica para simplificar la calibración y el uso del cristal en dosimetría (AT.86).

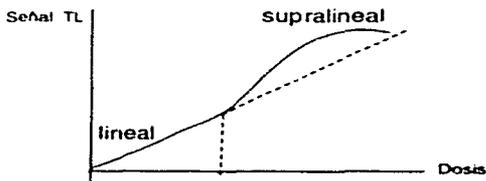


Figura 4.8 Señal termoluminiscente como función de la dosis, en donde se muestra el comportamiento lineal y no-lineal de los materiales dosimétricos.

En la región supralineal la sensibilidad de los materiales aumenta con la dosis absorbida. Para explicar este fenómeno se han propuesto diversas hipótesis (AZ.99):

- Creación de nuevas trampas durante la irradiación.
- Incremento en la disponibilidad de centros luminiscentes cuando las trazas de las partículas cargadas se aproximan, es decir, la fluencia aumenta.
- Creación de nuevos centros luminiscentes o de recombinación.
- Presencia de centros luminiscentes o recombinación no radiativa.
- Acción de un nivel de atrapamiento intermedio.

La zona de saturación se alcanza cuando todas las trampas han sido ocupadas, presentándose un fenómeno de disminución de la sensibilidad, consecutivo a la coloración del cristal y a la alteración de la estructura cristalina. Un tratamiento térmico no restituye sus propiedades iniciales, si el cristal es irradiado hasta la zona de saturación.

## Capítulo 5

### 5. Dosimetría Termoluminiscente

#### 5.1. Eficiencia intrínseca de los detectores termoluminiscentes

Solamente una pequeña parte de la energía depositada como dosis absorbida en un DTL es emitida como luz, cuando la sustancia es calentada. La eficiencia intrínseca se define como:

$$\frac{\text{Energía de la luz TL emitida por unidad de masa}}{\text{Dosis absorbida por el cristal}} \times 100 \quad (5.1)$$

#### 5.2. Lectores termoluminiscentes

Son dispositivos que se utilizan para calentar un DTL y para medir la luz TL emitida por el dosímetro. En la figura 5.1 se presenta un esquema de un lector termoluminiscente.

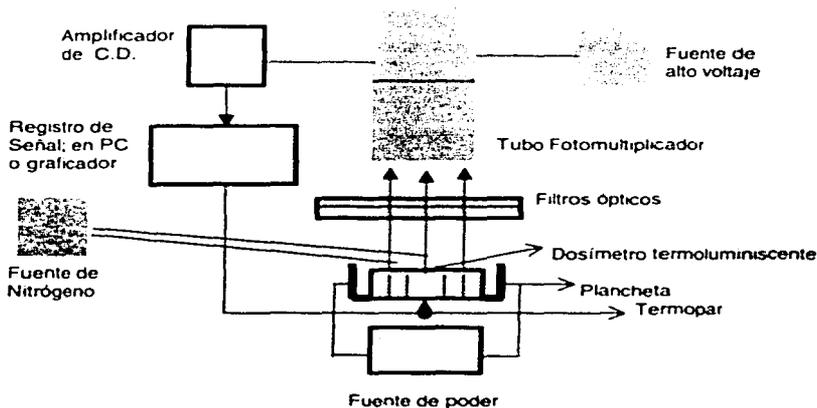
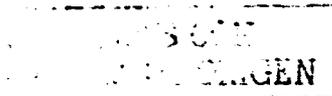


Figura 5.1 Esquema de un lector termoluminiscente (AT 86).



### 5.2.1. Sistema de Calentamiento

Se usan métodos indirectos, tales como: plancheta, bloque de calentamiento, gas caliente, radiofrecuencia, frecuencia óptica láser (AZ.99).

La plancheta debe tener baja capacidad térmica, vida útil larga y baja emisión en la región infrarroja.

### 5.2.2. Sistema detector de Luz

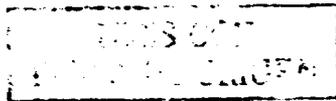
Su objetivo principal es concentrar la mayor cantidad de luz emitida por el material TL sobre el elemento sensible del detector de luz (AZ.99).

El método mas común para medir cuantitativamente la luz consiste en usar un tubo fotomultiplicador, cuyo fotocátodo está en contacto con el material TL a través de: sistemas de lentes, filtros térmicos, capas de agua, tubos de luz, entre otros.

- El tubo fotomultiplicador (TFM) convierte la señal luminosa en carga eléctrica.
- El flujo de gas sirve para reducir y estabilizar la corriente oscura mediante el enfriamiento de la cara frontal del TFM y para suprimir la señal espuria.
- Fuente de Alto Voltaje.- Puesto que se requiere que la corriente directa a la salida de la fuente de alto voltaje sea constante, entonces se usa una entrada regulada de bajo voltaje en el circuito oscilador.
- Fuente de Luz de Referencia.- Se usa para verificar la estabilidad del lector TL y calibrar el sistema de lectura.

### 5.2.3. Sistema Acondicionador de la Señal:

Sirve para convertir la señal termoluminiscente que llega al TFM en una señal medible cuantitativamente, tal como: pulsos, corriente directa, fotones (AZ.99).



- a) **Conteo de pulsos.**- la corriente de salida del TFM es convertida en una serie de pulsos de voltaje de amplitud fija, cuya frecuencia es proporcional a la corriente. El número de pulsos correspondientes a la TL emitida durante el ciclo de lectura, puede ser contado y registrado en un escalador de pulsos.
- b) **Corriente integrada o carga.**- la corriente de salida del TFM es amplificada y registrada en un graficador X-Y o en una PC. Para tener una salida visual, el integrador se acopla a un sistema digital.
- c) **Conteo de fotones.**- cada pulso formado en el ánodo del TFM corresponde a un evento fotoeléctrico en el fotocátodo. Los pulsos, cuya altura corresponde a los producidos por señales TL son seleccionados por medio de un discriminador, el cual no acepta pulsos que corresponden a la corriente oscura.

### 5.3. Cristales termoluminiscentes

Consisten de un material dieléctrico cristalino que sirve como huésped de activadores que pueden estar asociados con trampas, centros luminiscentes o ambos (AT.86).

Los materiales más comunes se clasifican en :

- a) aquellos que tienen buena equivalencia a tejido, aunque la mayoría tienen baja sensibilidad, tales como  $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ ,  $\text{LiF}$  y  $\text{BeO}$ .
- b) aquellos que tienen alta sensibilidad pero baja equivalencia de tejido, tales como,  $\text{CaSO}_4$  y  $\text{CaF}_2$ .

Las formas más comunes de presentación de los DTL son:

- a) **granulado.**- con dimensiones entre 75 y 100  $\mu\text{m}$
- b) **chips.**- son cuadrados de  $3.2 \times 3.2 \text{ mm}^2$  y con un grosor de 0.9 mm
- c) **matriz de teflón.**- contiene al cristal en polvo, usualmente tienen forma de disco.

## 5.4. Ventajas y desventajas de los detectores termoluminiscentes

(AT.86)

### • Ventajas

- a) Intervalo de dosis.- la respuesta es lineal de decenas de  $\mu\text{Gy}$  a  $10\text{ Gy}$ . Para TLD – 100 muestra supralinealidad entre  $10 - 10^2\text{ Gy}$
- b) La respuesta es independiente de la rapidez de dosis entre  $0$  y  $10^9\text{ Gy}$ .
- c) Son de tamaño pequeño.
- d) Están disponibles comercialmente.
- e) Son reutilizables, incidiendo en un ahorro económico.
- f) Existe disponibilidad en cuanto a formas y sensibilidades a diferentes tipos de radiación.
- g) Presentan precisión y exactitud, ya que sus lecturas pueden ser reproducibles entre  $1$  y  $2\%$ .

### • Desventajas

- a) Falta de uniformidad, es decir, un mismo lote de dosímetros presenta una distribución de sensibilidad y diferentes lotes tienen una sensibilidad promedio diferente, por lo que se necesita una calibración individual o por lotes.
- b) Presentan inestabilidad durante el almacenamiento, es decir, que la sensibilidad puede variar con el tiempo antes de la irradiación.
- c) Presentan desvanecimiento, es decir, no retienen permanentemente el  $100\%$  de sus portadores de carga atrapados.
- d) Son sensibles a la luz, principalmente a la ultravioleta, solar y fluorescente. Esto puede causar una aceleración en el desvanecimiento.
- e) Presentan señal termoluminiscente espuria.
- f) Presentan memoria de la radiación recibida, la sensibilidad puede ser aumentada o disminuida después de recibir una gran dosis de radiación. Esta memoria se elimina mediante un tratamiento térmico.

- g) Inestabilidad del equipo lector; la lectura de los detectores termoluminiscentes depende de la sensibilidad del lector a la luz, así como de la rapidez de calentamiento aplicada, por lo que es difícil mantener la estabilidad de este dispositivo durante largos periodos de tiempo.

## Capítulo 6

### Método experimental

#### 6.1. Material y equipo

##### 6.1.1. Dosímetros termoluminiscentes

Originalmente se utilizaron 64 dosímetros GR-207 de fluoruro de litio dopados con magnesio, cobre y fósforo en forma de chips con dimensiones; 3 mm de ancho, 3 mm de largo y 1 mm de grosor. Posteriormente se utilizaron 16 dosímetros TLD-200 de fluoruro de calcio dopados con disprosio en forma de chips con dimensiones de 3 mm de ancho, 3 mm de largo y 0.9 mm de grosor.

##### 6.1.2. Portadosímetros

Para efectos de horneado se utilizó un portadosímetros de acero inoxidable con una capacidad de 50 cristales, y para efectos de irradiación se utilizaron portadosímetros de lucita.

##### 6.1.3. Sistema de tratamiento térmico

Se empleó un horno Furnace modelo 47900, marca Thermolyne, de control manual y programable en un intervalo de temperaturas, comprendido entre 0 °C y 500 °C. Figura 6.1.

##### 6.1.4. Sistema lector

Las lecturas de los cristales se realizaron mediante un equipo automático, marca Harshaw 3500, que se muestra en la figura 6.1, y el cual consiste en términos generales de: una

plancheta, donde se coloca el dosímetro que al ser calentado, emite luz; un tubo fotomultiplicador, en el que la señal luminosa se convierte en una señal eléctrica, misma que se integra durante el tiempo total de lectura, obteniéndose una lectura de carga que es proporcional a la luz emitida por el dosímetro.



Figura 6.1 Fotografía del equipo utilizado para realizar las lecturas de los dosímetros termoluminiscentes, en donde se muestran el horno (1), el equipo TL utilizado (2) y el tanque de gas nitrógeno (3).

#### 6.1.5. Flujo de gas

Se cuenta con un tanque que contiene gas nitrógeno y que está conectado al módulo de la plancheta. El nitrógeno tiene como función, reducir y estabilizar la corriente oscura, corriente

del ánodo del TFM generada por éste sin señal luminosa, así como ayudar a la filtración de los rayos infrarrojos emitidos por la plancheta, debido al calentamiento de la misma, además de minimizar la presencia de señal espuria.

#### **6.1.6. Sistema de cómputo**

Se hizo uso de dos equipos: el primero, marca Samsung, modelo Sync Master 3 que está conectado al sistema lector; en este equipo está instalado el programa de cómputo Tldshell mediante el cual se obtienen las curvas de brillo de los dosímetros; el segundo equipo es marca Hewlett Packard, Modelo Brio; en éste está instalado el programa Origin Pro 6.1, mismo que se utilizó para el análisis de datos y obtención de la curva de calibración.

#### **6.1.7. Fuentes de radiación para caracterización de dosímetros**

Con la finalidad de agrupar dosímetros termoluminiscentes con respuestas similares al ser irradiados a una misma dosis, se usó el irradiador Gammacell del Instituto de Ciencias Nucleares, ver figura 6.2, que contiene 24 fuentes de  $^{60}\text{Co}$  colocadas en un blindaje de plomo. La rapidez de dosis en el centro de la cámara de irradiación y a 3 cm de altura era de  $1.05 \pm 0.02$  Gy/min, en agua, en enero del año 2001.

#### **6.1.8. Fuentes de radiación del Gammabeam**

Se utilizó el irradiador Gammabeam del Instituto de Ciencias Nucleares, el cual contiene 15 fuentes de  $^{60}\text{Co}$  distribuidas en forma de "L" con una actividad aproximada de 55,000 Ci, mostrado en la figura 6.3.

#### **6.1.9. Fuentes radiactivas para calibración**

Para efectos de la calibración de los dosímetros se utilizó una fuente de  $^{60}\text{Co}$  del Instituto de Física. Esta fuente está embutida en un soporte de plomo, en el que se introduce otro soporte de madera; a éste último se fija una lámina de lucita que contiene al dosímetro a irradiar, como

se muestra en el esquema de la figura 6.4. Mediante este mecanismo, tanto el dosímetro como la fuente siempre se mantienen en la misma posición relativa.

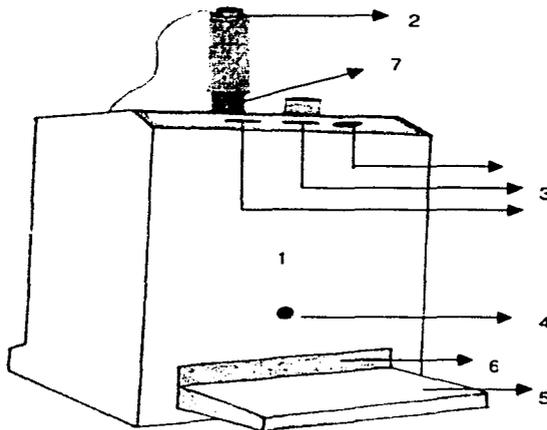


Figura 6.2 Representación esquemática del irradiador GammaCell 200 del Instituto de Ciencias Nucleares, UNAM, el cual consta de 24 fuentes radiactivas de  $^{60}\text{Co}$ .

- 1.- Blindaje dentro del cual se encuentra el contenedor de las fuentes radiactivas.
- 2.- Embolo en el que se encuentran: la cavidad en la que se colocan las muestras a irradiar, y un orificio con lo que se permite introducir cables o sondas delgadas para la irradiación de líquidos o flujo continuo.
- 3.- Tablero de la unidad, lugar en el que se encuentran los controles tanto para accionar el émbolo como el dispositivo utilizado para medir de manera automática el tiempo de irradiación.
- 4.- Control manual del émbolo.
- 5.- Escalón de acceso.
- 6.- Interruptor de seguridad.
- 7.- Tapa de la cavidad.

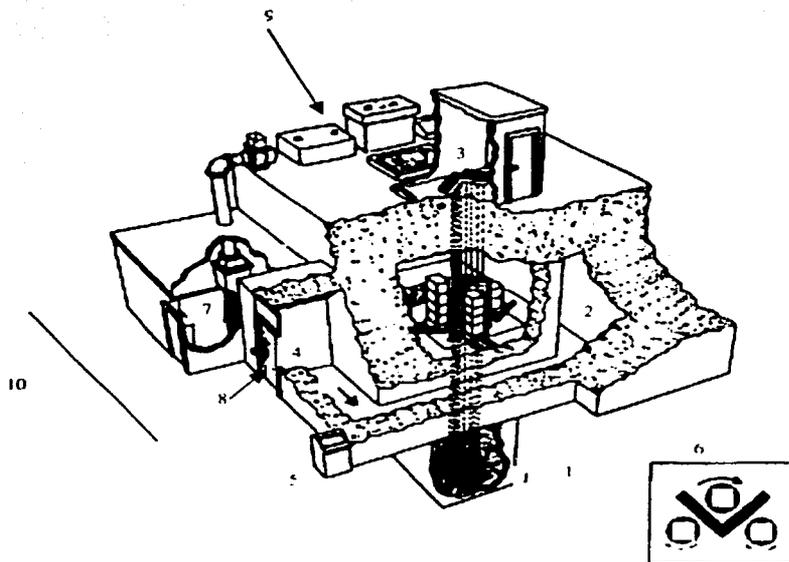


Figura 6.3 Esquema del irradiador Gammabeam del Instituto de Ciencias Nucleares de la Universidad Nacional Autónoma de México. (CU.97)

- 1.- Alberca de almacenamiento de las fuentes.
- 2.- Cámara de irradiación.
- 3.- Mecanismo para el movimiento de las fuentes.
- 4.- Laberinto de la cámara de irradiación.
- 5.- Consola de control.
- 6.- Posición de las fuentes.
- 7.- Cuarto de compresores de aire, filtro de aires, planta purificadora de agua para la alberca y tableros de control.
- 8.- Puerta de acceso
- 9.- Pared contigua a la alberca de almacenamiento.
- 10.- Oficinas del personal que labora en el irradiador.

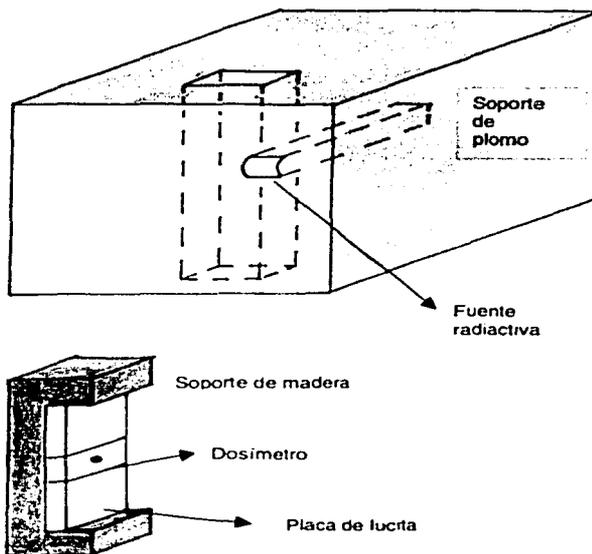


Figura 6.4 Dispositivo utilizado para la irradiación de los cristales, a efecto de obtener la curva de calibración.

## 6.2. Protocolo para el manejo de los dosímetros

Con el fin de optimizar el aprovechamiento de los dosímetros es conveniente establecer un protocolo para el uso de los mismos. Este protocolo se debe diseñar de conformidad con la naturaleza del dosímetro, con las propiedades principales del material a irradiar, así como con la información obtenida del equipo lector. Para el presente trabajo, el protocolo a cumplir fue el siguiente:

### 6.2.1. Cristales LiF: Mg,Cu,P (GR-207), (ZH.86, HO.90, HO.93, BA.93)

- Horneado de los dosímetros a una temperatura de 240 °C durante un tiempo de 10 minutos, (RA.94).
- Enfriamiento de los dosímetros a temperatura ambiente, durante un tiempo aproximado de 12 minutos.
- Empaquetado de los dosímetros en placas de lucita, formando lotes de cuatro cristales cada uno, envueltos con plástico color negro, identificando cada paquete de acuerdo con los puntos de ubicación en los alrededores de la cámara de irradiación del Gammabeam.
- Irradiación de los cristales, se colocaron los lotes en diferentes puntos externos a la cámara de irradiación, previamente seleccionados, excepto uno que se conservó debidamente empaquetado sin ser expuesto a la luz y que se utilizó para determinar la radiación de fondo.
- Después de una hora de concluir la irradiación de los dosímetros, éstos se leyeron en el equipo lector Harshaw 3500, en el que se establecieron las siguientes condiciones de operación:
  - Tasa de calentamiento: 10 °C s<sup>-1</sup>
  - Tiempo de calentamiento: 30 s
  - Ventana de integración: de temperatura ambiente a 300 °C
  - Voltaje de operación: 780 V

### 6.2.2. Cristales CaF<sub>2</sub>: Dy (TLD-200)

- Horneado de los dosímetros a una temperatura de 400 °C durante un tiempo de 60 minutos, (PI.86).
- Enfriamiento de los dosímetros a temperatura ambiente, durante un tiempo aproximado de 25 minutos.
- Empaquetado de los dosímetros en placas de lucita, formando lotes de cuatro cristales cada uno, envueltos con plástico color negro, identificando cada paquete de acuerdo con

los puntos de ubicación en el exterior de la cámara de irradiación.

- ◆ Irradiación de los cristales, se colocaron los lotes en diferentes puntos externos a la cámara de irradiación, previamente seleccionados, excepto uno que se conservó debidamente empaquetado sin ser expuesto a la luz y se utilizó para determinar la radiación de fondo.
- ◆ Después de una hora de concluir la irradiación los dosímetros, éstos se leyeron en el equipo lector Harshaw 3500, para el que se establecieron las siguientes condiciones de operación:
  - Tasa de calentamiento:  $10\text{ }^{\circ}\text{C s}^{-1}$
  - Tiempo de calentamiento: 40 s
  - Ventana de integración: de temperatura ambiente a  $400\text{ }^{\circ}\text{C}$
  - Voltaje de operación 780 V

### 6.3. Procedimiento del horneado

El horneado de los dosímetros termoluminiscentes es un tratamiento térmico que se aplica a estos cristales antes de iniciar cualquier estudio sobre ellos; además está destinado a borrar el historial informativo inducido en el material, restaurando y despoblando las trampas existentes para los portadores de carga. El procedimiento aplicado en este caso fue el siguiente:

- ◆ Se enciende el horno, calibrándolo a  $240\text{ }^{\circ}\text{C}$  para los dosímetros GR-207, y a  $400\text{ }^{\circ}\text{C}$  para los dosímetros TLD-200.
- ◆ Se espera, aproximadamente 20 minutos para que se establezca la temperatura en la cavidad del horno, independientemente del tipo de dosímetro a hornear.
- ◆ En la cavidad del horno se introducen los cristales previamente colocados en el portadosímetros de acero inoxidable.
- ◆ Se hornean durante un periodo de 10 minutos los cristales GR-207, y durante 60 minutos los cristales TLD-200.

- ◆ Se extraen los dosímetros del horno, dejándolos enfriar, sin retirarlos del portadosímetro, a temperatura ambiente durante 12 y 25 minutos, respectivamente.

## **6.4. Procedimiento de Irradiación**

### **6.4.1. Cristales LiF: Mg,Cu,P, (GR-207)**

Durante esta etapa, se colocaron los mismos lotes de dosímetros, previamente identificados, en los siguientes puntos externos a la cámara de irradiación, mostrados en la figura 6.3.

- ◆ En la puerta de acceso a la cámara de irradiación (8) se colocaron tres lotes a diferentes alturas con respecto al nivel del piso: el primero a 11 cm, el segundo a 122 cm y el tercero a 225 cm.
- ◆ Se colocó un lote de cristales junto a la consola de control (5), a una altura de 120 cm con respecto al nivel del piso.
- ◆ En el cuarto del deionizador (7) se colocó un lote a una altura de 120 cm con respecto al nivel del piso.
- ◆ En el exterior de la pared contigua (9) a la alberca que contiene a las fuentes radiactivas, se colocó un lote a una altura de 120 cm con respecto al nivel del suelo.
- ◆ Por último, se colocó un lote en el interior de las oficinas (10) del irradiador a una altura de 120 cm.

### **6.4.2. Cristales CaF<sub>2</sub>: Dy, (TLD-200)**

Durante esta etapa de irradiación, únicamente se colocaron tres lotes de dosímetros en puntos de la puerta de acceso a la cámara de irradiación, previamente identificados. Estos puntos se ubicaron a diferentes alturas con respecto al nivel del piso: el primero a 11 cm, el segundo a 122 cm y el tercero a 225 cm.

## **6.5. Calibración de los dosímetros**

### **6.5.1. Cristales LiF: Mg, Cu, P, (GR-207)**

La calibración de los dosímetros se llevó a cabo en el Instituto de Física. Para ello, se irradiaron los cristales a diferentes dosis, exponiéndolos a rayos  $\gamma$  de una fuente de  $^{60}\text{Co}$ , a una rapidez de dosis en aire de: 0.079 mrad/s (junio 2001), (RA.01).

Se realizaron cuatro mediciones para la calibración de los dosímetros, en cada una de ellas los cristales se irradiaron de manera individual.

### **6.5.2. Cristales $\text{CaF}_2$ : Dy, (TLD-200)**

Como en el caso anterior, la calibración de los dosímetros se realizó irradiando los cristales a diferentes dosis, exponiéndolos a rayos  $\gamma$  de una fuente de  $^{60}\text{Co}$ , a una rapidez de dosis en aire de 0.073 mrad/s (diciembre 2001-enero 2002).

Para estos cristales, se realizaron tres lecturas, los dosímetros fueron irradiados de manera individual.

## Capítulo 7

### 7. Resultados

Para obtener información suficiente y determinar la rapidez de dosis en los alrededores de la cámara de irradiación del Gammabeam, se ejecutó el proceso de horneado-irradiación-lectura hasta un total de 14 veces por lote, usando dosímetros GR-207, y 4 veces, usando cristales TLD-200, respetando en cada ejecución los protocolos y procedimientos establecidos previamente para cada tipo de material.

Con la finalidad de obtener los valores más próximos a los reales de la rapidez de dosis, el tiempo de irradiación de los dosímetros fue variable, éstos estuvieron expuestos a radiación durante varios días en los puntos seleccionados, por lo que el tiempo efectivo de irradiación dependió del tiempo de operación (fuentes radiactivas fuera de la alberca) y del tiempo muerto del irradiador (fuentes en el interior de la alberca de almacenamiento). Además, se consideró qué tipo de material era irradiado; ya fuesen muestras para fines de investigación, tales como polímeros o gases que simulan atmósferas, o bien, productos para uso industrial, tales como; sacos con condimentos, sacos con harinas o con salvado, cajas con suplementos alimenticios o cajas con cosméticos. Dentro de este contexto, cabe mencionar que no se encontró correlación alguna entre el material irradiado y la rapidez de dosis.

#### 7.1. Medidas con dosímetros LiF: Mg,Cu,P (GR-207)

##### 7.1.1. Caracterización de los dosímetros

Inicialmente se caracterizó un lote de dosímetros, 32 cristales, los cuales presentaron una señal termoluminiscente promedio de  $(0.24 \pm 0.02) \times 10^{-4}$  nC al ser expuestos a una misma dosis, posteriormente se seleccionó otro grupo de 32 dosímetros del mismo lote original; en la caracterización de esta segunda agrupación se obtuvo una señal promedio de  $(0.28 \pm 0.04) \times 10^{-4}$  nC irradiados a una misma dosis. Las irradiaciones se llevaron a cabo en el irradiador Gammacell, colocando los dosímetros en posición horizontal para que la dosis absorbida fuera

la misma, únicamente subiendo y bajando el émbolo de manera que la dosis fuera la menor posible. Dado lo anterior la dosis recibida por ambos grupos pudo ser diferente.

### 7.1.2. Curvas de brillo

Para las primeras medidas, los cristales de LiF:Mg,Cu,P se calentaron desde la temperatura ambiente hasta 240 °C, como se propone en la literatura (ZH.86). En estas lecturas, apareció el pico termoluminiscente predominante aproximadamente a 230 °C, perdiéndose parte de la curva de brillo. Por este motivo, se optó por ampliar el límite superior de la ventana de integración hasta una temperatura de 300 °C. En la figura 7.1 se muestran dos curvas de brillo obtenidas para este tipo de dosímetros, en las cuales se observa que el área bajo la curva para dosímetros expuestos a la misma dosis, es aproximadamente la misma, independientemente de la temperatura del pico termoluminiscente predominante. En este trabajo se utilizó el área bajo la curva como medida de dosis, independientemente del pico dominante.

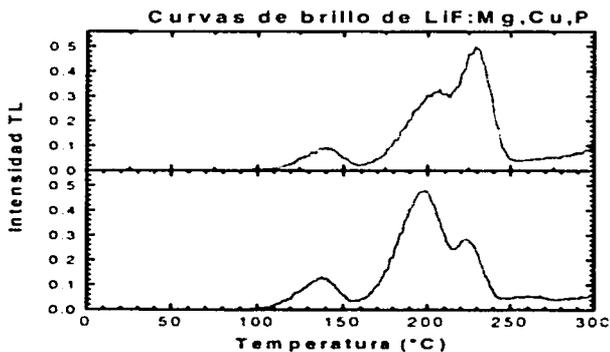


Figura 7.1 Curvas termoluminiscentes para dosímetros LiF:Mg,Cu,P (GR-207). En la primera curva el pico termoluminiscente predominante aparece aproximadamente a 230 °C. Si la ventana de integración llega solamente a 240 °C, se pierde parte de la curva de brillo y por consiguiente, información. En la segunda curva, el pico termoluminiscente predominante aparece aproximadamente a 200 °C. En este caso se dispone prácticamente de toda la curva TL y por lo tanto de toda la información de interés. En ambos casos, se integró hasta 300 °C. La diferencia estaba en que en el caso de integrar hasta 240 °C se perdería más información que en la segunda

### 7.1.3. Lectura de los dosímetros colocados en el área del Gammabeam

Con cada grupo de dosímetros caracterizados se realizaron 7 lecturas, haciendo un total de 14. Al trabajar con estos dosímetros se detectó, desde la primera lectura, que los puntos en los cuales se registran niveles de dosis superiores al nivel ambiental, son aquellos que se encuentran en la puerta de acceso a la cámara de irradiación, mientras que en el resto de los puntos previamente seleccionados se registran niveles semejantes a los correspondientes al nivel ambiental, como se muestra en la tabla 7.1.

**Tabla No 7.1**

Señal termoluminiscente medida en diferentes puntos externos inmediatos a la cámara de irradiación del Gammabeam									
Cada valor corresponde al promedio de cuatro dosímetros.									
Lectura	Puerta de acceso a la cámara de irradiación				Otros puntos externos a la cámara de irradiación				Tiempo de irradiación (h)
	Fondo	Arriba	Medio	Abajo	Consola	Deion	Oficina	Exterior	
	(nC)								
2	2.425	16.587	22.902	13.304					84.20
3	2.592	17.323	24.461	12.535					87.05
4	1.848	17.288	24.419	12.534					108.05
5	1.224	15.457	20.445	11.515	0.289	-0.0801	-0.1236	0.801	61.58
6	0.821	1.966	6.672	4.144	0.197	-0.1264	-0.2528	0.211	70.23
7	0.533	7.249	9.909	6.251	-0.1796	-0.1596	-0.0798	0.7315	66.50
8	0.792	18.209	19.479	15.880	0.6352	0.2117	0.0847	1.4821	211.73
9	0.793	19.637	26.662	16.444	0.3193	0.1597	0.0479	2.5544	159.65
10	0.840	19.582	26.641	16.281	0.3416	0.2277	0.0455	1.7078	113.85
11	0.720	9.149	10.045	7.486	0.2559	0.0383	0.0639	0.9597	63.98
12	1.344	24.426	33.273	20.964	0.5769	0.1923	0.1923	2.1156	192.33
13	0.960	11.936	12.863	10.545	0.4635	-0.0116	-0.0116	1.2747	115.88
14	0.936	24.550	43.550	20.281	1.4944	0.4270		2.5618	213.48
15	0.589	2.584	2.839	2.397	0.0187				17.00

En la tabla 7.1 se observa que los puntos en los cuales se registra una señal termoluminiscente superior a la ambiental son los que se encuentran localizados en la puerta de acceso a la cámara de irradiación, que de acuerdo con un orden ascendente en valores son: parte inferior, parte superior y parte media. Esto es, la mayor rapidez de dosis se registra en la parte media de la puerta, misma que está localizada a una altura de 122 cm con respecto al piso.

El signo negativo de algunos valores es consecuencia de que para determinar la señal termoluminiscente; a la carga asociada con la señal del cristal expuesto en el área del irradiador se le restó la correspondiente a la señal de fondo, la cual se determinó con base en dosímetros que no se irradiaron, pero que si fueron horneados simultáneamente con los demás, en cada proceso de lectura. Esto es, que la señal detectada en puntos de los alrededores inmediatos a la cámara de irradiación es menor que la señal de fondo correspondiente.

#### **7.1.4. Calibración de los dosímetros**

Con la finalidad de determinar la curva de calibración, los dosímetros se irradiaron en cuatro ocasiones; en cada caso se obtuvieron valores muy diferentes de la señal termoluminiscente para una misma dosis, lo que imposibilitó obtener una curva de calibración que permitiese obtener la dosis absorbida en los puntos de interés.

El hecho de obtener diferentes valores de las señales termoluminiscentes para dosímetros irradiados a la misma dosis puede deberse a daño ocasionado al leer los cristales hasta una temperatura mayor que la recomendada por los fabricantes.

En virtud de lo anterior, se decidió trabajar con otro tipo de dosímetros, los TLD-200, con los cuales se prosiguió y concluyó el trabajo ya iniciado. Cabe mencionar que al inicio del trabajo experimental no se contaba con este tipo de dosímetros, sino que fue necesario conseguirlos cuando se detectó que ya no respondían adecuadamente los cristales GR-207.

#### **7.2. Medidas con dosímetros $\text{CaF}_2: \text{Dy}$ (TLD-200)**

Al utilizar los dosímetros TLD-200 se consideró conveniente seguir registrando la señal termoluminiscente únicamente en los puntos situados en la puerta de acceso a la cámara de

irradiación, y ya no colocar dosímetros en los puntos en los que se registraron valores para las señales termoluminiscentes del orden de los valores ambientales.

### 7.2.1. Caracterización de los dosímetros

Para la consecución y conclusión del desarrollo experimental, se caracterizaron 16 cristales, mismos que presentaron un valor promedio de la señal termoluminiscente, igual a  $(0.27 \pm 0.02) \times 10^{-4}$  nC a una misma dosis.

### 7.2.2. Curvas de brillo

Dos de las curvas obtenidas para estos cristales, se muestran en la figura 7.2. En ambas gráficas, se observa que el pico termoluminiscente predominante aparece alrededor de los 180° C, obteniéndose toda de la curva de brillo para una ventana de integración desde la temperatura ambiente hasta 400° C.

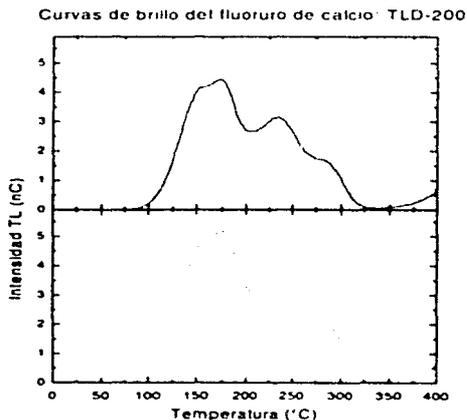


Figura 7.2 Señales termoluminiscentes para dosímetros de fluoruro de calcio, TLD-200, expuestos en el irradiador Gammabeam.

### 7.2.3. Lectura de los dosímetros colocados en el área del Gammabeam

Con este grupo de dosímetros se realizaron 4 lecturas; las medidas de la carga por unidad de tiempo obtenidas, una vez restando la señal de fondo, se muestran en la Tabla 7.2.

**Tabla 7.2**

Señal termoluminiscente medida en la puerta de acceso a la cámara de irradiación del Gammabeam					
Lectura	Puerta de acceso a la cámara de irradiación				Tiempo de Irradiación (h)
	Fondo	Arriba	Medio	Abajo	
	(nC)				
1	11.21	268.78	334.90	186.05	81.83
2	4.93	249.25	320.38	172.00	78.70
3	5.45	258.15	318.88	170.18	80.25
4	6.10	273.30	334.88	197.70	80.25

En esta tabla se observa que la tendencia de los valores de la carga presentan una tendencia semejante a la de los dosímetros GR-207, es decir, la menor se encuentra en la parte inferior de la puerta, aumenta en la parte superior, y el máximo valor se obtiene en la parte central.

### 7.2.4. Calibración de los dosímetros

Para obtener la curva de calibración, los dosímetros se irradiaron en tres ocasiones; en las tres lecturas se obtuvieron valores semejantes para la señal termoluminiscente a una misma dosis. El promedio de los valores obtenidos para esta señal, así como su dosis correspondiente se muestran en la Tabla 7.3.

Tabla 7.3

<b>Respuesta TL de los dosímetros TLD-200 como función de la dosis</b>			
<b>Tiempo de Irradiación (s)</b>	<b>Señal TL (nC)</b>	<b>Desviación STL</b>	<b>Dosis (mGy)</b>
60	6.4	0.9	4.38
120	13	2	8.76
180	18	0.9	13.1
240	28	1	17.5
300	30	1	21.9
360	39	2	26.3
600	65	2	43.8
900	100	10	65.7
1500	160	2	110
2100	220	1	153
2700	280	30	197
3600	370	10	263
5400	540	20	394

En este cuadro se observa un comportamiento lineal de la señal termoluminiscente con respecto al tiempo de irradiación. La curva de la señal termoluminiscente versus la dosis de irradiación representa la curva de calibración correspondiente a este tipo de dosímetros, que es de tipo lineal y se muestra en la figura 7.3.

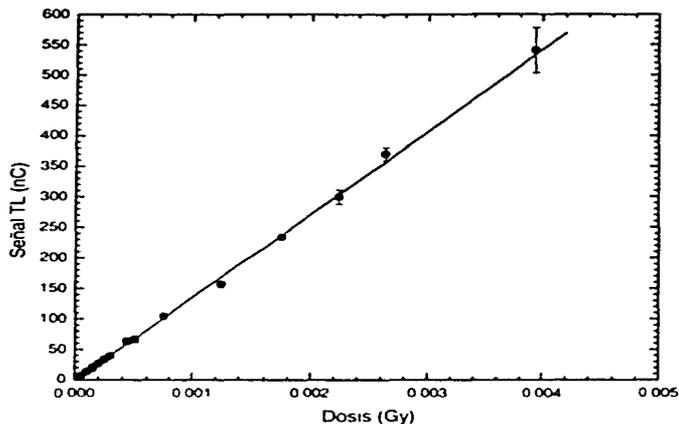


Figura 7.3 Curva de calibración de los dosímetros TLD-200, irradiados con rayos  $\gamma$  de una fuente de  $^{60}\text{Co}$  a diferentes dosis, a una misma rapidez de dosis durante diferentes tiempos.

La ecuación obtenida con base en los datos experimentales, y que representa matemáticamente esta curva de calibración, es una ecuación de tipo lineal y tiene la forma siguiente:

$$\text{Señal termoluminiscente: } R = (133500 \pm 500)D \quad [R] = \text{nC}; \quad [D] = \text{Gy} \quad (7.1)$$

### 7.3. Rapidez de dosis en el Gammabeam

De la ecuación de la señal termoluminiscente (7.1) se obtiene la dosis en [Gy] para las medidas realizadas en el irradiador Gammabeam. Luego, al dividir esta dosis entre el tiempo de exposición, se obtiene la rapidez de dosis, dada por:

Rapidez de dosis: 
$$\dot{D} = (7.5 \pm 0.2) \times 10^{-6} R \cdot \frac{1}{t} \quad (7.2)$$

Al sustituir los valores de la Tabla 7.2 en la relación (7.2), se obtienen los valores experimentales de la rapidez de dosis enlistados en la Tabla 7.4.

**Tabla 7.4**

<b>Rapidez de dosis obtenida con base en datos experimentales en la puerta de acceso a la cámara del irradiador Gammabeam</b>				
Lectura	Fondo	Arriba	Medio	Abajo
	(μGy/h)			
1	0.18 ± 0.08	24 ± 2	30 ± 2	16 ± 2
2	0.11 ± 0.08	23 ± 2	30 ± 1	16 ± 1
3	0.20 ± 0.02	24 ± 2	29 ± 2	15 ± 2
4	0.2 ± 0.2	25 ± 1	31 ± 2	18 ± 2
Promedio	0.19 ± 0.02	24 ± 1	30 ± 1	16 ± 1

- \* La incertidumbre corresponde a una desviación estándar.
- \*\* Los promedios y las incertidumbres se obtuvieron pesados por la incertidumbre.
- \*\*\* El tiempo de exposición es el tiempo en que las fuentes se encontraban en el exterior de la alberca de almacenamiento, que es el tiempo de operación del irradiador

#### **7.4. Medida de la rapidez de dosis ambiental**

En este trabajo se hizo una medida de la rapidez de dosis ambiental, a partir de la señal termoluminiscente (fondo) de los dosímetros almacenados en el laboratorio de dosimetría del ICN, utilizados para determinar la dosis debida únicamente a las fuentes de radiación del irradiador Gammabeam. Se obtuvo un valor de  $1,700 \pm 200 \mu\text{Gy/año}$ .

En el año de 1994 (ZA.94) se reportaron valores de la rapidez de dosis medida en diferentes puntos de la Ciudad de México, mismos que se relacionan en la tabla 7.5

Tabla 7.5

Rapidez de dosis medida en diferentes puntos de la Ciudad de México	
Lugar	Rapidez de dosis ( $\mu\text{Gy/año}$ )
Instituto de Investigaciones Biomédicas (UNAM)	962
Facultad de Ciencias (UNAM)	910 - 1016
Edificio del acelerador de 2 Mev IFUNAM	915 - 2,563
Xochimilco	860 - 890
San Miguel Ajuso	945
Angel de la Independencia	788 - 837

El promedio mundial de la rapidez de dosis, pesado por población, es de  $800 \mu\text{Gy/año}$  (200 a  $2000 \mu\text{Gy/año}$ ). Sin embargo se han obtenido valores mucho mayores, como por ejemplo, 4,200, 12,500 y  $20,000 \mu\text{Gy/año}$  en China, Noruega y Suecia, respectivamente (UNSCEAR). Cabe hacer notar, que en el reporte del UNSCEAR no aparecen medidas realizadas en interiores de edificios en México. Al comparar el valor de la rapidez de dosis de  $1,700 \pm 200 \mu\text{Gy/año}$  obtenido en el presente trabajo con los valores reportados en la literatura, se observa que es comparable con los valores medidos en diversas Instituciones de Ciudad Universitaria y está dentro del intervalo de valores obtenidos internacionalmente.

### 7.5. Comparación de valores experimentales con los límites de dosis establecidos oficialmente

La Comisión Internacional de Protección Radiológica (CIRP) es un organismo internacional encargado de emitir recomendaciones para realizar prácticas seguras sobre el uso de la radiación. En el ámbito nacional, esta responsabilidad recae en la Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardias (CNSNS). En la actualidad existen tres recomendaciones de

carácter general (RI.91), las cuales están contempladas en el Reglamento General de Seguridad Radiológica, emitido por la CNSNS (RE.88):

- ♦ No debe adoptarse práctica alguna que involucre radiación a menos que produzca un beneficio neto.
- ♦ Las exposiciones a la radiación deben mantenerse tan bajas como sea razonablemente posible. Esta recomendación se conoce como "Principio de ALARA"
- ♦ El equivalente de dosis que reciba cualquier individuo no debe exceder los límites establecidos por la CNSNS para cada circunstancia.

De las tres recomendaciones, la involucrada en el presente trabajo, es la tercera, ya que está directamente relacionada con la dosis existente en los alrededores inmediatos del irradiador Gammabeam, y es a la que está expuesto el personal que labora en el edificio donde se encuentra instalado este dispositivo, o bien el personal que por diversas circunstancias tiene que asistir ocasionalmente a estas instalaciones; el primero se denomina Personal Ocupacionalmente Expuesto, POE, mientras que el segundo se denomina Personal no Ocupacionalmente Expuesto.

Para el POE se utiliza el término "límite de equivalente de dosis efectivo", mismo que el Reglamento antes citado, en su Artículo 20, Capítulo II, ha fijado en 50 mSv por año. Esta dosis promediada sobre 50 semanas, proporciona el valor de 1mSv por semana. Considerando 40 horas de trabajo por semana, se obtiene 0.025 mSv/h; éste es el límite de dosis que se recomienda no exceder. En nuestro caso, con base en el promedio de los valores obtenidos en la puerta de acceso a la cámara de irradiación, se tiene que la rapidez de dosis es del orden de  $(0.023 \pm 0.006)$  mSv/h, es decir, el intervalo medido está entre 0.017 y 0.029 mSv/h.

Al comparar estos valores, se podría inferir que se está cumpliendo, valga la expresión, de una manera límite, con la recomendación referente al límite de equivalente de dosis; sin embargo, es preciso indicar que éste sería el caso, siempre y cuando una persona permaneciese durante ocho horas diarias frente a la puerta de acceso a la cámara de irradiación, hecho que no se presenta en la realidad, ya que el personal que trabaja en las instalaciones del Gammabeam, aunque labora aproximadamente 11 horas al día, ocasionalmente está frente a la mencionada puerta de acceso cuando el irradiador está operando, por lo que, la dosis que recibe durante el

día, semana o año está muy por debajo del límite establecido oficialmente para la dosis equivalente.

Para el personal no ocupacionalmente expuesto, el mismo Reglamento, en su Artículo 37, Capítulo II establece un límite de 5 mSv por año, valor que corresponde a la décima parte del límite de dosis equivalente para el personal ocupacionalmente expuesto, que promediado a una hora, se tiene que el límite es de 0.0025 mSv/h. Lo mismo que en el caso anterior, la cantidad de dosis que podría recibir el personal no ocupacionalmente expuesto está muy por debajo del límite establecido por la Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardias, ya que este público asiste a estas instalaciones esporádicamente, y además no se le permite permanecer frente a la puerta de acceso a la cámara de irradiación, sino que su estancia está confinada en una área adyacente tanto a la consola como a las oficinas del personal que opera el irradiador.

## Capítulo 8

### 8. Conclusiones

Durante el desarrollo de la primera etapa de este trabajo, se utilizaron dosímetros de LiF:Mg, Cu,P (GR - 207), determinándose puntos externos inmediatos a la cámara de irradiación en los cuales la rapidez de dosis es superior o semejante a la ambiental; en el primer caso están los puntos localizados en la puerta de acceso a la cámara, mientras que en el segundo, están los puntos ubicados en la consola de control, en el cuarto de deionización, en la oficina del personal que labora en el Gammabeam, así como en el exterior de la pared contigua a la alberca de almacenamiento de las fuentes radiactivas de  $^{60}\text{Co}$ .

Para la realización de la segunda etapa, se usaron dosímetros de  $\text{CaF}_2:\text{Dy}$  (TLD - 200), determinándose la rapidez de dosis en la puerta de acceso, que es el único lugar de los previamente seleccionados en el que se registró una rapidez de dosis superior a la ambiental y, consecuentemente, el único a ser considerado para verificar qué tan alta es dicha rapidez de dosis con respecto a la ambiental y si su valor se encuentra dentro de los límites establecidos por los organismos normativos en la materia.

La rapidez de dosis ambiental medida ( $1700 \pm 200 \mu\text{Gy/año}$ ) está de acuerdo con los valores reportados en la literatura de medidas realizadas en Ciudad Universitaria, la Ciudad de México y en diferentes países del mundo.

En el capítulo 6, referente a los resultados experimentales, se comentó que los valores de la rapidez de dosis en la puerta de acceso a la cámara de irradiación están por debajo del límite establecido oficialmente, por consiguiente, se puede inferir que "los niveles de dosis que se registran en los puntos externos inmediatos a la cámara de irradiación del Gammabeam, están por debajo del límite de dosis equivalente recomendado por la Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardias".

Con lo anterior, se observa el cumplimiento de la recomendación de que "El equivalente de dosis que reciba cualquier individuo no debe exceder los límites determinados por la CNSNS para cada circunstancia". Para nuestro caso, se tiene que el personal ocupacionalmente

expuesto o no ocupacionalmente expuesto, cuando se encuentra en las inmediaciones del edificio del Gammabeam, o bien en el interior del mismo, está expuesto a una dosis prácticamente ambiental, por lo que los niveles asociados al irradiador no incidirán en algún efecto biológico determinista.

Para concluir, y sin generar zozobra alguna, puesto que no existe motivo, se recomienda no permanecer en las cercanías o frente a la puerta de acceso a la cámara de irradiación del Gammabeam, cuando éste esté operando, salvo en caso estrictamente necesario.

## 9. Bibliografía

- AC.73** Acosta, V., Cowan C. L. y Graham B.J., 1973, *Essentials of Modern Physics*, Harper and Row, Publishers.
- AT.86** Attix, F. H., 1986, *Introduction to Radiological Physics and Radiation Dosimetry*, John Wiley and Sons Inc.
- AZ.99** Azorín, N. J., 1999, *La Aplicación de la Dosimetría Termoluminiscente en Medicina*, Notas de Curso impartido en CICATA, IPN.
- BA.93** C. Bacci, L. D' Angelo, C. Furetta and S. Giancola, *Comprehensive Study on LiF: Cu, Mg, P (GR-200A)*, *Radiation Protection Dosimetry*, Vol. 47, pp. 215-218, 1993.
- BR.81** Brandan, S. M. E., 1981, *Conceptos de dosimetría y microdosimetría*, Notas de Física, Vol. 4, No 5, Instituto de Física, UNAM.
- CU.97** Cruz Z. E., 1997, *Diversos usos de la fuente de rayos gamma en la Universidad Nacional Autónoma de México*, *Educación Química*, Vol. 8, p.p. 8-12, 1997.
- EV.55** Evans, R.D., 1955, *The Atomic Nucleus*, Mc Graw Hill, New York.
- HO.90** Y. S. Horowitz and A. Horowitz, *Characterisation of LiF: Cu, Mg, P (GR-200)*, *Radiation Protection Dosimetry*, Vol. 33, pp. 279-282, 1990.
- HO.93** L. Oster, Y. S. Horowitz and A. Horowitz, *Glow Curve Readout of LiF: Mg, Cu, P (GR-200) Chips at Maximum Temperatures between 240°C and 280°C: Elimination of the Residual Signal*, *Radiation Protection Dosimetry*, Vol. 49, pp. 407-411, 1993.
- MC.95** McKeever, S. W. S., Moscovitch, M. y Townsend, P.D., 1995, *Thermoluminescence Dosimetry Materials: Properties and Uses*, Nuclear Technology Publishing.
- PI.86** Pin-Chieh Hsu and Tien-Ko Wang, *On the Annealing Procedure for CaF<sub>2</sub>: Dy*, *Radiation Protection Dosimetry*, Vol. 16, pp. 253-256, 1986.
- RA.01** Ramírez G.J, Buenfil B, Ana Elena, *Informe de Servicio Social, Reporte Interno FE029*, Instituto de Física, UNAM, 2001.
- RA.94** *Radiation measurement products. Certificate of quality thermoluminescence radiation detectors*, 1994. Harshaw-Bicron.
- RE.88** *Reglamento General de Protección Radiológica*, Diario Oficial de la Federación, 22 de marzo de 1988.

- RI.91** Rickards C.J. Cameras, R.R., 1991, Las Radiaciones, II El Manejo de las Radiaciones Nucleares, Serie, La Ciencia desde México, Fondo de Cultura Económica.
- RI.01** Rickards, C. J., 2001, La física de las radiaciones en materia, Dirección General de Divulgación de la Ciencia, UNAM.
- TU.95** Turner, J. E., 1995, Atoms, Radiation, and Radiation Protection, John Wiley and Sons, Inc.
- ZA.94** Zárate, M. A., 1994, Medición de la Radiación Ambiental en el D.F. utilizando Dosímetros Termoluminiscentes, Tesis para obtener el grado de Físico.
- ZH.86** Zha Ziying, Wang Shoushan, Wu Fang, Chen Guolong, Li Yuanfang and Zhu Jianhuan, Measurement of Extremely Low Level Dose With LiF (Mg, Cu, P) TL Chips, Radiation Protection Dosimetry, Vol. 17, pp. 415-418, 1986.
- UN.00** UNSCEAR 2000 Report to the General Assembly, with scientific Annexes, Sources and Effects of Ionizing Radiation, Vol. 1: Sources, United Nations.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN