



---

---

**DIVISION DE ESTUDIOS DE  
POSGRADO**

**FACULTAD DE INGENIERIA**

**Implementación de un Sensor para Radiación  
Beta Basado en Fibra Óptica**

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO EN  
INGENIERIA (INSTRUMENTACION)

PRESENTA

CARLOS EUGENIO OJEDA NAVA

DIRECTOR DE TESIS: DR. GABRIEL EDUARDO SANDOVAL  
ROMERO

CIUDAD UNIVERSITARIA, MEXICO D.F. AGOSTO DEL 2005.





Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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

## **Dedicatoria:**

- A Claudia, por compartir tu vida conmigo.
- A mis Padres y Hermanos.
- Y a mí.

## **Agradecimientos:**

- A la UNAM, por brindarme todo.
- A mi director de tesis, Dr. Gabriel Eduardo Sandoval Romero por su dirección, aportación de sus conocimientos, tiempo, paciencia y atención para lograr este trabajo.
- Al Dr. Efraín Chávez Lomelí del IFUNAM por su coasesoría, apoyo y confianza.
- A CONACYT, quien con su importante labor y apoyo, contribuye al desarrollo de este país. Muestra de ello, es este trabajo de tesis de maestría.
- Al Dr. Rubén Alfaro Molina del IFUNAM por su siempre disponibilidad, amigable atención y apoyo técnico; de quien con su ayuda, fue posible realizar buena parte de este trabajo. Al Dr. Roberto Ortega Martínez (Coordinador del Laboratorio de Óptica Aplicada del CCADET) por su asesoría y por el préstamo del “tocadisco” pulidor de fibras. Al Dr. Augusto García Valenzuela (Jefe del Depto de Investigación Aplicada del CCADET) por sus valiosos comentarios, apoyo y confianza; al igual a la Dra. Celia Sánchez Pérez (Jefa de la Unidad de Películas Delgadas del CCADET) y a la Dra. Graciela Velasco (Coordinadora del área de Instrumentación del Posgrado en Ingeniería), por su siempre disposición a apoyar.
- Al Dr. Elder de la Rosa, del Centro de Investigaciones en Óptica (CIO) de León Guanajuato, por su ayuda.
- A mi gran amigo Rafael Macías Pérez, de quien siempre he obtenido el ejemplo, apoyo para mi desarrollo personal y académico.
- Al Dr. Rafael Martínez Lugo, de quien siempre recuerdo su ejemplar, agradable y cordial disponibilidad a enseñar y apoyar.
- Al compañero Pedro Mexía Hernández por la asesoría en el pulido y monitoreo de las fibras empleando el microscopio, Mario Rangel Guzmán también por la asesoría en el pulido de las fibras y al Ing. Gerardo Daniel Rayo López.

# INDICE

	Página
<b>Introducción.</b> .....	<b>6</b>
<b>Objetivo.</b> .....	<b>6</b>
<b>Detectores de radiación portátiles.</b> .....	<b>7</b>
<b>Propuesta.</b> .....	<b>8</b>
<b>Desarrollo.</b> .....	<b>9</b>
<b>Alcance del trabajo.</b> .....	<b>11</b>
<b>Vistazo a los capítulos presentados en este trabajo de tesis.</b> .....	<b>12</b>
<b>Capítulo 1.- Las fuentes de radiación y sus características.</b> .....	<b>14</b>
Introducción .....	14
1.1.- Estructura atómica. ....	14
1.2.- Estructura nuclear. ....	24
1.3.- Condiciones de estabilidad e inestabilidad nuclear. ....	26
1.4.- Procesos de transformación radiactiva (desintegración o decaimiento).....	29
1.5.- Transformación (decaimiento) alfa. ....	31
1.6.- Transformación (decaimiento) beta. ....	34
1.6.1.- Emisión beta negativo.....	36
1.6.2.- Emisión beta positiva .....	37
1.6.3. Captura electrónica. ....	37
1.7.- Radiación gama (rayos $\gamma$ ). ....	39
1.8.- Conversión interna (CI). ....	41
Conclusión al Capítulo 1. ....	42
<b>Capítulo 2.- Teoría de detectores.</b> .....	<b>43</b>
2.1.- Introducción. ....	43
2.2.- Interacción del fotón gama. ....	44
2.2.1.- Efecto fotoeléctrico. ....	44
2.2.2.- Efecto Compton. ....	45
2.2.3.- Producción de pares. ....	47
2.3.- Detectores y equipos de electrónica nuclear. ....	49
2.3.1.- Introducción. ....	49
2.3.2.- Detectores de centelleo. ....	50
2.3.3.- Centelladores inorgánicos. ....	54
2.3.4.- Centelladores orgánicos. ....	57
2.3.5.- Tubo fotomultiplicador ( <i>PMT</i> ). ....	59
2.3.6.- Amplificador rápido FTA420C de ORTEC. ....	64
2.3.7.- Discriminador cuádruple a 100MHz. Modelo 821 de LeCroy.....	65
2.3.8.- Discriminador de Fracciones Constantes por Octavas. Modelo CF8000 de LeCroy. ....	66
2.3.9.- Convertidor de amplitud a tiempo ( <i>Time to Amplitude                 Converter/SCA</i> ). Modelo 567 de EG&G ORTEC. ....	67
2.4.- Condiciones para la medición de radiación alfa, beta y gama.....	68
2.5.- Efectos biológicos dañinos que puede causar la radiación. ....	69

Conclusión al Capítulo 2. ....	70
<b>Capítulo 3. Fundamentos y características de la fibra óptica convencional y centelladora. ....</b>	<b>72</b>
3.1.- Introducción a las fibras ópticas. ....	72
3.2.- Luz y propiedades ópticas de la materia. ....	74
3.2.1.- Radiometría. ....	75
3.2.2.- Propagación de la luz dentro de la fibra. ....	76
3.3.- Teoría y funcionamiento de fibra centelladora. ....	79
3.3.1.- Mecanismo de transmisión y cubierta. ....	81
3.3.1.1.- Cubierta simple (single cladding). ....	81
3.3.1.2.- Cubierta múltiple (multi cladding). ....	81
3.3.1.3.- Fibra óptica de índice escalonado. ....	82
3.3.1.4.- Propagación y pérdidas de la luz en fibra óptica. ....	83
3.4.- Tipo de orientación del polímero de las fibras con núcleo de poliestireno ( <i>PS</i> ). ....	85
3.5.- Proceso de centelleo. ....	85
3.5.1.- El fenómeno de fluorescencia. ....	90
3.5.2.- El fenómeno de fosforescencia. ....	90
3.6.- Bombeo en las fibras centelladoras. ....	91
Conclusión al Capítulo 3. ....	94
<b>Capítulo 4.- Caracterización de las fibras centelladoras, implementación experimental del detector de fuentes puntuales de radiación. ....</b>	<b>96</b>
4.1.- Experimento propuesto para la caracterización de las fibras. ....	96
4.2.- Fibra centelladora. ....	96
4.3.- Implementación física de las primeras pruebas ....	97
4.4.- Pulido de las fibras ópticas. ....	101
4.5.- Resultados del experimento. ....	103
Conclusión al Capítulo 4. ....	118
<b>Capítulo 5.- Perspectivas. ....</b>	<b>120</b>
5.1.- Descripción de los circuitos. ....	122
5.2.- Procedimiento de detección de la radiación. ....	125
Conclusión al Capítulo 5. ....	125
<b>Conclusiones generales. ....</b>	<b>128</b>
<b>Bibliografía. ....</b>	<b>131</b>
<b>Apéndice. Estadística de la radiación. ....</b>	<b>138</b>
Ap.1.- Leyes de decaimiento radiactivo. ....	138
Ap.2.- Carácter estadístico en la emisión radioactiva ....	139
Ap.2.1. Error, exactitud y precisión. ....	140
Ap.2.2. Desviación estándar ....	141
Ap.2.3. Desviación estándar de un conteo. ....	143
Ap.2.4. Ley de probabilidad en medidas de radioactividad. ....	144

Ap.2.5. Errores aleatorios en medidas de radioactividad. ....	146
Ap.2.6. Ejemplo de aplicación práctica. Control del buen funcionamiento de un sistema de conteo. .... ..	148
<b>Glosario de términos. ....</b>	<b>149</b>

## **Introducción.**

Hoy en día, el manejo y uso de material radioactivo es común. Algunos ejemplos típicos son los hospitales oncológicos donde se aplican tratamientos de braquiterapia. La palabra braqui, significa - cerca de -. La Braquiterapia consiste en la colocación de material radioactivo muy próximo al tumor o en el interior del órgano afectado, liberando radiación ionizante predeterminada donde está localizado el tumor, limitando su efecto nocivo a los órganos adyacentes [1]. Otro ejemplo se da en las centrales nucleares para la producción de energía eléctrica, ahí se tienen materiales radioactivos como combustible [2]. También los hay en la industria metalúrgica, donde la conformación y grosor de los productos elaborados deben cumplir los estándares requeridos. Y para finalizar de mencionar la extensa área de empleo de elementos radioactivos, tenemos a la industria química de pinturas, farmacéuticas, cosmética, de alimentos, entre otras.

Como hemos observado, resulta imprescindible contar con equipos que permitan la manipulación y monitoreo de estos elementos radioactivos, ya que éstos al ser empleados de manera correcta, proporcionan al ser humano una gran variedad de beneficios. En contraparte, la radiación no controlada también representa un alto potencial de peligrosidad, ya que la exposición no supervisada y prolongada con altas dosis, pudieran ser nocivos para la salud y hasta mortales [3], etc.

## **Objetivo.**

El objetivo principal es elaborar, caracterizar, evaluar y validar el modelo experimental de un detector de radiación, basado en fibra óptica centelladora, el cual nos permita localizar fuentes puntuales de radiación ionizante principalmente.

Por todo lo anterior, es por lo que en este trabajo de maestría, se plantea primeramente, un modelo experimental para la detección y ubicación de fuentes de radiación (particularmente radiación beta), empleando como elemento sensor, una fibra óptica en su modalidad de fibra dopada centelladora sensible a la radiación. También se

analiza y comenta el sistema electrónico desarrollado para este sensor. Este método está basado en la medición ultra-rápida del “tiempo de vuelo” de los pulsos de luz (centelleo provocado por la radiación al interactuar con el material dopante centellador contenido en la fibra óptica),

Conjuntamente, se propone un segundo modelo experimental (presentado como anexo en este trabajo), en donde y con base a lo obtenido en el primer modelo, se emplearía una electrónica un tanto convencional y de bajo costo, que a final de cuentas, resultaría en la implementación de un instrumento detector portátil también para la detección y ubicación de fuentes de radiación. Este método realiza la detección haciendo lecturas y promediando repetidamente las intensidades luminosas obtenidas de la fibra centelladora.

Actualmente no existe un detector de radiación que emplee fibra óptica dopada como elemento centellador, de tal manera que estas fibras puedan cubrir una superficie donde se presume que exista alguna fuga o fuente de emisión radioactiva. Este detector sería capaz de ubicarla conforme se realice un barrido sobre la superficie. Algunas características importantes del sensor serían: la eficiencia, el bajo costo de su realización, portabilidad, entre otras.

## **Detectores de radiación portátiles.**

Existe una variedad muy amplia de monitores portátiles con distintos tipos de detectores y diversos sistemas electrónicos de medición, cada uno de ellos está diseñado para satisfacer ciertas necesidades, los hay analógicos y digitales, desde los muy sencillos hasta los que contienen microprocesadores con facilidades para el manejo de datos y para transmitirlos a otros equipos [4].

Generalmente, el sistema detector se alimenta con baterías, la fuente de bajo voltaje sirve para aportar a cada circuito la corriente que requiera, cuenta con un circuito para comprobar el estado de las baterías e indica cuando deben reemplazarse; la fuente de alto voltaje está constituida por un convertidor de corriente directa en alterna, un transformador



para elevar la tensión y un rectificador para convertirla nuevamente en corriente directa y así proporcionar al detector el potencial de polarización que necesita. El detector puede ser de distintos tipos y entregar los pulsos producidos por la radiación al amplificador, el cual los amplifica y acondiciona para pasarlos al discriminador, donde se deja pasar únicamente a los que tienen el nivel adecuado, ya sea un circuito integrador y a un medidor analógico (de aguja), o hacia un medidor digital (contador) y, si se requiere, a una bocina para producir una señal audible.

Las características más importantes a considerar en un instrumento son las siguientes:

- a) Alta confiabilidad, precisión y exactitud.
- b) Sensible a todo tipo de radiación.
- c) Que mida dosis en tejidos.
- d) Respuesta independiente a la energía de radiación.
- e) Amplio rango de medición.
- f) Gran sensibilidad (capaz de medir niveles muy bajos).
- g) Manejo sencillo y facilidad para la interpretación de lecturas.
- h) Respuesta independiente de la dirección de incidencia de la radiación.
- i) Ligero y pequeño, con buena resistencia mecánica y a ambientes adversos.
- j) Amplia duración de las baterías.
- k) Facilidad para su mantenimiento y calibración.
- l) Bajo costo.

Obviamente ningún instrumento reúne todas estas cualidades, ni siquiera un buen número de ellas, por tanto, es necesario escoger el conjunto de equipos que nos permita satisfacer razonablemente nuestras necesidades particulares.

## **Propuesta.**

Esta primera propuesta experimental hace uso del principio de medición del “tiempo de vuelo” de dos pulsos de luz; de tal manera que, este sistema hace uso de las propiedades

ópticas de las fibras ópticas centelladoras plásticas (*PSF*, Plastic Scintillation optical Fibers). Estas fibras ópticas (*FO*) producen destellos o pulsos de luz al incidir e interactuar en ellas, radiación electromagnética del tipo ionizante principalmente; los pulsos de luz son llevados a dos fotomultiplicadores (*PMT*, Photo-Multiplier Tube) donde se hace la conversión y multiplicación a pulsos eléctricos[4], posteriormente se hace una amplificación, luego llegan a una etapa de discriminación empleando un discriminador (*CFD*, Constant Fraction Discriminator), para entonces continuar a una etapa de conversión de tiempo a amplitud (*TAC*, Time to Amplitude Converter) dadas las señales de inicio (*START*) y paro (*STOP*). Estos datos son recabados por un sistema analizador multicanal (*MCA*, Multi-Channel Acquisition). El sistema propuesto llevaría la siguiente configuración [5] mostrada en la figura 1.

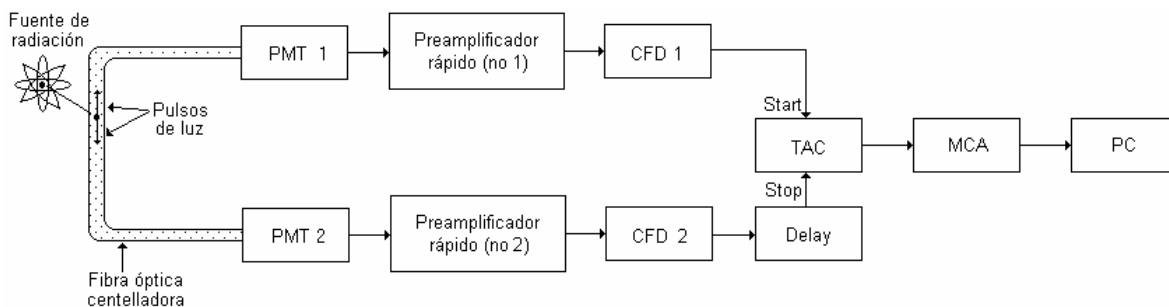


Figura 1. Esquema básico propuesto del detector de radiación gama.

## Desarrollo.

El elemento principal lo conforma el sensor de fibra óptica centelladora, ya que ésta es la encargada de hacer la detección y conversión a señal de información ante una fuente radiactiva. Cabe mencionar, que dependiendo de la respuesta óptica de la fibra centelladora que se consiga, se llegue a requerir de manera adicional, implementar un arreglo con fibras de corrimiento de frecuencias (*WLSOF*, Wave Length Shifters Optical Fibre) acopladas a fibras convencionales, quedando un arreglo como el que se muestra en la figura 2 [5].

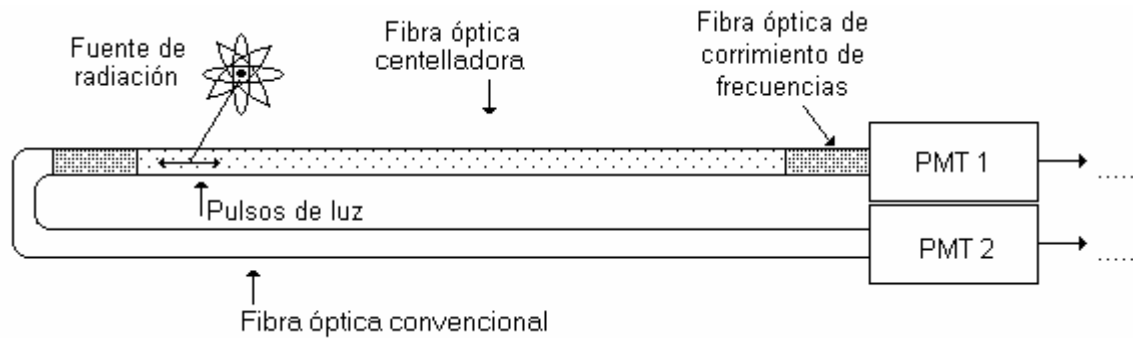


Figura 2. Configuración y acoplamiento de la fibra centelladora con las fibras de corrimiento de frecuencia y las fibras convencionales.

Las *WLSOF* son empleadas ya que éstas tienen la propiedad de poseer un amplio espectro de respuesta ante una gran gama de radiaciones, ya sea que estén en el cercano infrarrojo o en el ultravioleta. Las *WLSOF* responderán con un pulso de luz en el visible en color verde, lo cual nos permite acoplar *PMTs* convencionales que trabajen en esos mismos rangos.

Los *PMTs* pueden ser funcionalmente muy prácticos, ya que en el mismo encapsulado se encuentran integrados una fuente de alto voltaje regulable y ajustable para seleccionar la sensibilidad requerida en este proyecto, además del módulo que conforma al fotomultiplicador propiamente.

Así pues, se requerirán amplificadores rápidos para aumentar el voltaje de las señales electrónicas que nos proporcionan los *PMTs*, estos amplificadores deben de trabajar en órdenes de respuestas de no más de un par de nanosegundos.

Posteriormente se conectarán circuitos discriminadores, los cuales sólo permitirán el paso a aquellas señales eléctricas que correspondan a las producidas por los pulsos luminosos por la radiación.

Para la rama de abajo, se requerirá de un circuito de retardo para permitir hacer un conteo confiable del tiempo transcurrido en el cual las señales luminosas llegan a los

respectivos *PMTs*. Es decir, la rama de arriba cumple con una función de señal de inicio (*START*) del conteo del tiempo, mientras que la de abajo será el paro (*STOP*).

Estas señales de inicio y paro darán la pauta para que un *TAC* mida el “tiempo de vuelo” y genere como salida una señal eléctrica en amplitud, indicativa de la posición o ubicación física real (a lo largo de la *FO* centelladora) de la fuente puntual radiactiva.

Finalmente se empleará de un digitalizador analizador multicanal (*MCA*) para promediar a lo largo de un espectro de adquisiciones, la posición puntual de la fuente de radiación.

### **Alcance del trabajo.**

Además de llevar a cabo la implementación de tal sistema, tendremos que caracterizar buena parte de los elementos implicados, principalmente las fibras ópticas, ya que éste por ser el elemento transductor y sensor de radiación, desempeña un papel trascendental en el sistema. El trabajo también sentará las bases para posteriores caracterizaciones donde se empleen fibras centelladoras. También dejará manifestado la factibilidad de implementar dispositivos lógicos de respuesta ultra rápida de diseño y construcción nacional.

Cabe señalar que se tendrán presentes algunas de las características para el trabajo de implementación del instrumento sensor centellador, tales como sensibilidad, intervalo de medición y precisión, eficiencia, dependencia energética y direccionabilidad, portabilidad, resistencia, confiabilidad y radiosensibilidad.

El segundo modelo experimental propuesto, se basa en la detección y ubicación de la fuente de radiación por medio de lecturas y promedios en amplitud de las señales luminosas colectadas en lapsos constantes. De esta manera, se detectaría una señal que indicaría la presencia de radiación.

Este trabajo de tesis de maestría servirá como inicio del desarrollo de sensores de radiación que utilizan fibras ópticas centelladoras. Estos sensores son ampliamente requeridos en reactores nucleares, plantas industriales, aplicaciones médicas, entre muchas otras, en donde el manejo de fuentes de radiación son en extremo delicadas.

Este trabajo de tesis está documentado de la siguiente manera:

**Capítulo 1.** En este capítulo se describe qué son las radiaciones, así como su origen y su naturaleza. Se hace una reseña histórica desde que el hombre, empleando métodos científicos y estadísticos, empezó por entender y proponer modelos que explicaban el funcionamiento del mundo atómico y nuclear.

**Capítulo 2.** Se hace un análisis básico de aquellos fenómenos atómicos y nucleares que dan origen a las radiaciones: efecto fotoeléctrico, efecto Compton y producción de pares. También se analizan algunas características esenciales que deben cumplir los materiales centelladores (empleados para conformar dispositivos detectores). Se describen algunos parámetros de detectores para aplicaciones médicas y de uso en física de radiaciones principalmente; así como todo el equipo e instrumentación electrónica requeridos: fotomultiplicadores, amplificadores rápidos, discriminadores, convertidores de tiempo a amplitud, digitalizador multicanal, fuentes de alto voltaje, etc.

**Capítulo 3.** Se dan los principios de funcionamiento de la fibra óptica, los parámetros sobresalientes que deben cumplir para convertirse en un medio transmisor de luz. Se dan las bases para iniciar la conformación de la fibra óptica dopada centelladora o sensible a la radiación, así como las formas de bombeo más empleadas.

**Capítulo 4.** Se presentan resultados de las pruebas experimentales con las fibras centelladoras. Su respuesta en presencia de una fuente de radiación beta así como el armado y caracterización del experimento en su totalidad, pasando por pasos intermedios de pulido y acople de la fibra con los fotomultiplicadores y demás instrumentación electrónica requerida. Se muestran gráficamente los resultados y se verifica el modelo experimental

propuesto, además se dan las bases, para entonces proponer la implementación de un instrumento detector portátil de bajo costo para la detección y ubicación de radiación beta.

# **Capítulo 1. Las fuentes de radiación y sus características.**

## **Introducción.**

El origen de la radiación que nos atañe en este trabajo es la asociada a los procesos atómicos o nucleares [6] y la referente a la excitación de los electrones en el átomo. Es conveniente catalogarla dentro de dos grupos principalmente:

- |  |   |
|--|---|
| -Radiación con origen de partículas cargadas:  | Electrones rápidos<br>Partículas cargadas pesadas |
| -Radiación con origen de partículas sin carga: | Radiación electromagnética<br>Neutrones           |

Cabe señalar que la radiación alfa puede viajar unas cuantas micras, las betas un par de milímetros y la gama centímetros o varios metros [7]. Esta última, al igual que los neutrones, son neutros y viajan grandes distancias sin perturbación alguna.

### **1.1. Estructura atómica.**

Desde tiempos muy remotos el ser humano ha tratado de conocer la naturaleza de las cosas que lo rodean, desde las muy pequeñas hasta las muy grandes, ha buscado comprender la estructura y el comportamiento tanto de los seres vivos como de los objetos llamados “inanimados”, hasta llegar a tratarse de explicar el universo entero [3]. Primero empleando únicamente el razonamiento y ahora haciendo experimentos bastante complicados para comprobar las hipótesis y modelos que elabora para cada situación bajo estudio. Mucho antes del nacimiento de las ciencias experimentales la reflexión de los filósofos griegos condujo a conceptos cuya demostración parcial es relativamente reciente. Así Demócrito (400 años A.C.) llegó a la conclusión de que si dividimos un pedazo de materia en porciones cada vez más pequeñas, nos veremos limitados por la herramienta de corte, pero no por la materia misma, sin embargo, la razón le permitió continuar mentalmente el proceso hasta llegar al límite que la materia imponga, cuando una división ulterior cambie la naturaleza de la substancia. Ya entonces se pensaba que toda substancia

podía descomponerse en otras sustancias más simples, que ya no puedan descomponerse, a las que llamaron elementos. El análisis de la estructura de la materia condujo a los pioneros de la química (los alquimistas), al descubrimiento experimental de algunos elementos y aunque algunas sustancias inicialmente difíciles de descomponer, como el agua, se consideraron elementos durante un tiempo, finalmente se demostró que eran combinaciones de elementos, es decir compuestos. Si dividimos un elemento llegaremos finalmente a la porción más pequeña posible a la que Demócrito denominó “átomo”, que quiere decir indivisible.

Fue hasta principios del siglo XX cuando se tuvo evidencia experimental de las partículas constitutivas de la materia, esos “átomos” y se les puso ese nombre, sin embargo pronto se descubrió que tienen una estructura formada por partículas más pequeñas, las cuales a su vez están constituidas por otras menores, de modo que el concepto original de Demócrito, (átomo = partícula indivisible), se traslada a un nivel que todavía no conocemos.

La ciencia actual utiliza mucho los modelos, que son representaciones de los fenómenos (de carácter temporal y con ciertas limitaciones), que ayudan a entender su comportamiento y que están sometidos permanentemente a la prueba experimental, pueden haber varios modelos para un fenómeno, con distinto grado de complejidad, cada uno tiene ventajas para determinados fines. De acuerdo con el modelo de Bohr (considerando las imprecisiones del modelo), el átomo está constituido por un núcleo muy pequeño (del orden de  $10^{-14}$  m), donde se concentra la mayor parte de la masa total del átomo y que tiene carga eléctrica positiva. Alrededor de esta región central se encuentran unas partículas con carga eléctrica negativa que se llaman electrones, en número suficiente para neutralizar la carga del núcleo, las cuales giran en órbitas determinadas atraídas por la carga eléctrica del núcleo. El diámetro de un átomo es del orden de  $10^{-10}$  m, ¡diez mil veces mayor que el núcleo!, de modo que la mayor parte del volumen atómico es espacio vacío en el que se mueven los electrones como los planetas alrededor del sol. Por el momento usaremos este



modelo sencillo para explicar algunos conceptos. En la figura 1.1 se observa que en cada una de las órbitas sólo puede haber un número determinado de electrones.

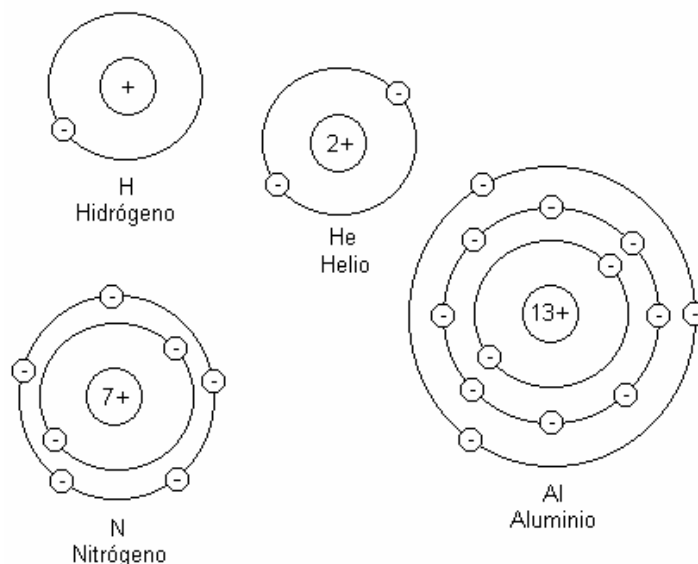


Figura 1.1. Representación de algunos átomos según el modelo de Bohr.

Cuando se utiliza un espectrómetro de prisma para analizar en longitud de onda la luz emitida durante una descarga eléctrica, producida en un tubo que contiene un gas monoatómico a baja presión, se observa una serie de líneas (espectro de líneas) brillantes que es característica del elemento que constituye el gas, a diferencia de la franja continua que produce la luz del sol (espectro continuo). Para poder explicar los espectros atómicos de líneas en términos de su modelo planetario del átomo, Bohr propuso que los electrones sólo pueden encontrarse en las órbitas permitidas y que están ligados al núcleo por fuerzas electromagnéticas. La órbita más interna se llama *K* y puede tener sólo 2 electrones, la segunda *L* y puede tener hasta 8 electrones, la tercera *M* (18 electrones), la cuarta *N* (32 electrones), y así sucesivamente [3]. En la figura 1.2, se observan las órbitas permitidas corresponden a estados de energía discretos y característicos de cada elemento llamados niveles de energía.

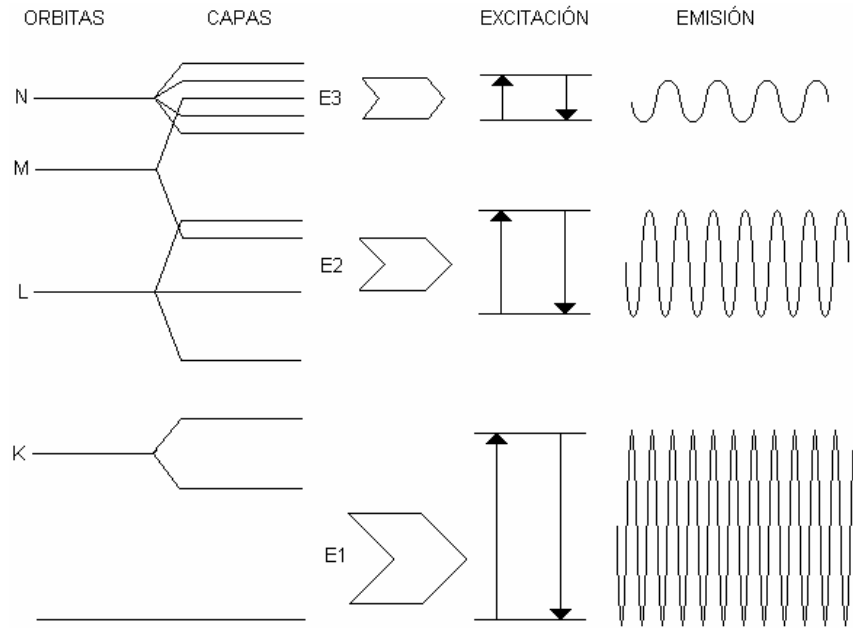


Figura 1.2. Esquema de niveles de energía, excitación y emisión de fotones.

Cuando todos los electrones están en los niveles de menor energía, el átomo se encuentra en el estado de mínima energía llamado estado base. Si a un átomo se le cede energía y uno o más de sus electrones son transferidos a estados de mayor energía, llamados estados excitados, se dice que se produjo una excitación. La energía de excitación es, entonces, la energía que se debe proporcionar a un átomo en el estado base para cambiar un electrón a un nivel superior de energía y dejar al átomo en un estado excitado. Cuando el átomo excitado regresa a su estado base, libera la energía de excitación mediante la emisión de un fotón (rayo X o uno luminoso), que tiene una energía prácticamente igual a la energía que había recibido. A este proceso se le llama desexcitación. El rayo X emitido, cuya energía es característica del átomo, se denomina rayo X característico o de *fluorescencia*[8]. Así cuando un electrón pasa de un nivel de energía  $E_i$  a otro nivel  $E_f$ , siempre que  $E_i > E_f$ , el átomo emite una onda electromagnética o fotón cuya energía está dada por la ecuación (1) [4]:

$$h\nu = E_i - E_f \quad (1)$$

donde  $h$  es la constante de Planck ( $6.62 \times 10^{-34}$  Js) y  $\nu$  es la frecuencia de la onda electromagnética en hertz (ciclos por segundo). Las ondas de radio, las de radar (microondas), la luz visible, los rayos X y la radiación gama, son el mismo fenómeno:

ondas electromagnéticas, su diferencia sólo reside en el valor de la frecuencia  $\nu$  y por tanto en la energía que transportan. En la figura 1.3 se muestra el espectro electromagnético [9].

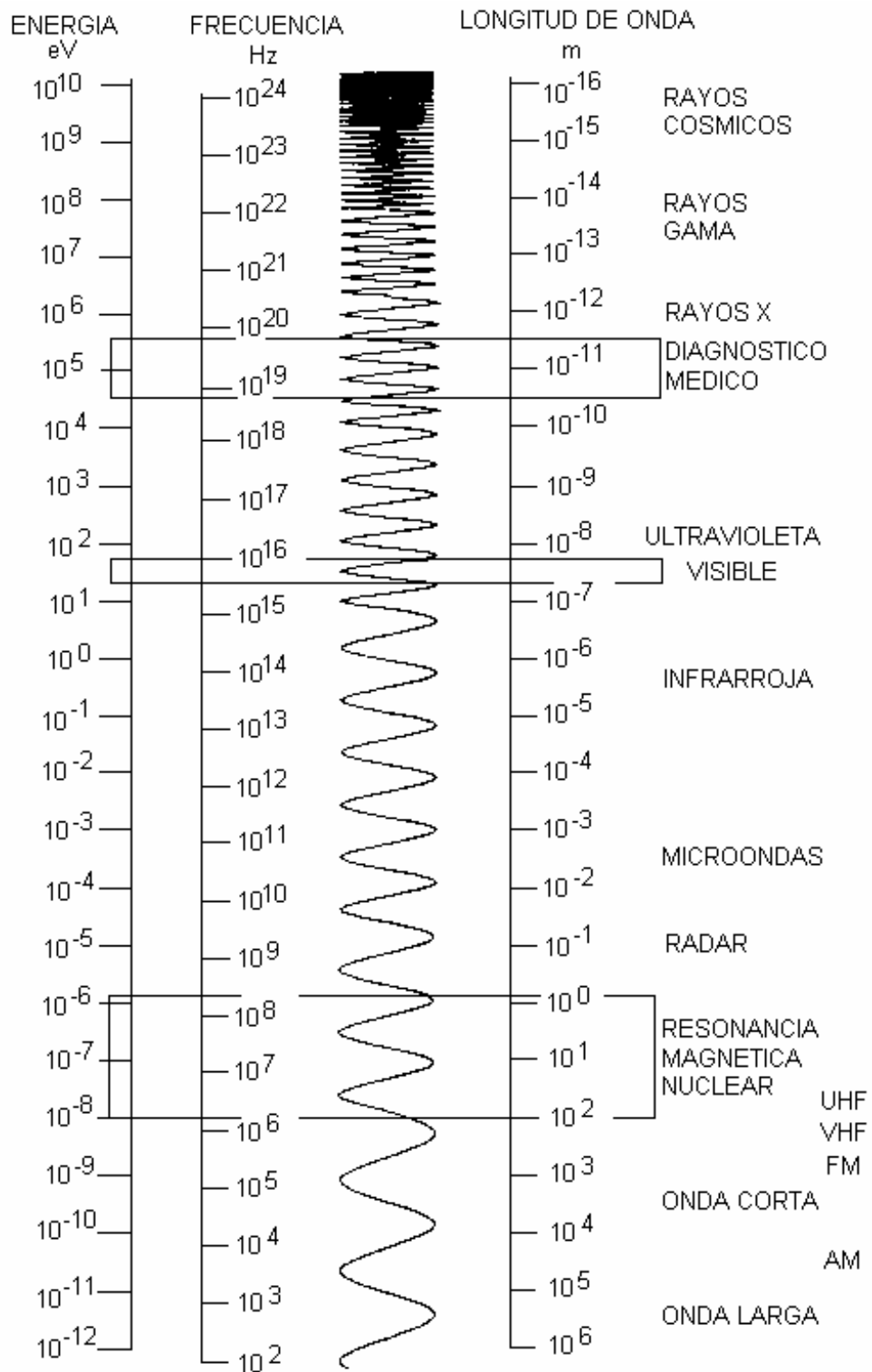


Figura 1.3. Espectro electromagnético.

Si al átomo se le cede suficiente energía como para que uno o más de sus electrones se separen del átomo, se produce el fenómeno denominado ionización, los electrones quedan libres (iones negativos) y el átomo queda cargado positivamente (ion positivo). A las partículas cargadas se les llama iones porque pueden moverse en un campo eléctrico (del griego ion = viajero). La energía necesaria para liberar un electrón del átomo, cuando está en su estado base, se conoce como energía de ionización (o potencial de ionización). El valor de la energía de ionización depende del nivel de energía (órbita y capa) en el que se encuentra el electrón y es igual que su energía de ligadura o de amarre. Los electrones liberados salen del átomo con una energía cinética  $E_c$  igual a la energía cedida al átomo  $E$  menos su energía de ligadura  $E_b$ . Finalmente un átomo ionizado atrapa del medio los electrones que le faltan para neutralizarse, pudiendo emitir fotones luminosos o de rayos X, según la diferencia de energía entre los niveles involucrados.

El modelo propuesto de Bohr, fue el primer modelo de átomo cuantitativamente correcto. Sin embargo, hacia 1930 cedió su lugar a una teoría más compleja y exacta, basada en ideas modernas acerca de las propiedades de onda de la materia. En este desarrollo se vió claramente que el movimiento electrónico no está confinado en órbitas bien definidas, sino que se trata de un movimiento complejo que se describe mejor a través de las propiedades de onda y probabilidades.

Una propiedad importante de la materia es que está constituida por partículas discretas y, por lo tanto, debe presentarse en cantidades cuantizadas. Planck y Einstein demostraron que la luz posee también las propiedades de la materia adoptando características cuantizadas. Más adelante en 1924, el científico francés Louis de Broglie avanzó la hipótesis complementaria de que toda la materia tenía propiedades de onda[3]. Postuló que con toda partícula en movimiento se encuentra asociada una radiación cuya longitud de onda es:

$$\lambda = \frac{h}{mv} = \frac{h}{p} \quad \lambda = \frac{h}{mv} = \frac{h}{p} \quad (2)$$

La masa por la velocidad,  $mv$  es la cantidad de movimiento,  $p$ , de un partícula y puede considerarse como una medida de la inercia o tendencia de una partícula a

permanecer en movimiento. Es útil señalar porqué las características del movimiento ondulatorio no aparecen en el movimiento de los objetos observables normalmente. Todo, desde una pelota de tenis hasta un acorazado, tienen una natural ondulatoria asociada con sus movimientos. Sin embargo, en los objetos relativamente grandes, las longitudes de onda son de tamaño tan extremadamente pequeños que nuestros sentidos no pueden detectarlos. Consideremos, por ejemplo, una pelota de tenis que tiene una masa de 200 g y una velocidad de  $3 \times 10^3$  cm/s.

Mediante la ecuación de Broglie se puede calcular que la longitud de onda asociada es  $6.62 \times 10^{-27} / (200)(3 \times 10^3)$ , o sea, aproximadamente  $10^{-32}$  cm.

Está claro que esta longitud de onda es demasiado pequeña como para que se pueda observar. Por otra parte, un electrón cuya masa en reposo es aproximadamente  $10^{-27}$  g; moviéndose con la misma velocidad, tendría una longitud de onda de unos  $2 \times 10^{-3}$  cm que entra perfectamente del alcance cuantificable.

Las hipótesis complementarias que se refieren a la naturaleza corpuscular de las ondas y a la naturaleza ondulatoria de las partículas en movimiento proporciona los fundamentos para una teoría completamente nueva de la estructura electrónica de los átomos y moléculas, que se comprobaría ser de enorme valor. Esta teoría ha establecido firmemente las propiedades cuánticas de la energía en los sistemas físicos naturales y, lógicamente, se llama Mecánica cuántica en sus aspectos más generales.

Erwin Schrödinger (1887-1961) presentó en 1926 un modelo matemático para el hidrógeno, el cual puede ser resuelto con exactitud muy reservada. Se obtiene una cuantización en la que son posibles solamente ciertos orbitales y energías. Los orbitales permitidos son designados mediante tres números cuánticos orbitales.

El primer número cuántico se llama primer número cuántico principal y se designa con el símbolo  $n$ . De una forma general, puede decirse que determina el volumen efectivo del orbital electrónico.

El segundo número cuántico tiene el símbolo  $l$ , este número determina la forma general de la región en que se mueve el electrón. Los dos primeros números cuánticos determinan conjuntamente las propiedades espaciales del movimiento orbital del electrón.

El tercer número cuántico,  $m_l$  determina la orientación de una configuración espacial determinada según una dirección arbitraria. La forma más conveniente de tener un eje arbitrario de referencia consiste en la introducción de un campo magnético externo. Por lo tanto, el tercer número recibe el nombre de número cuántico magnético. Estos tres números cuánticos determinan explícitamente un orbital electrónico.

El electrón en movimiento en un orbital determinado tiene ciertas propiedades que pueden explicarse imaginando que el electrón es un pequeño imán lineal, con un polo norte o uno sur. Este comportamiento de “imán” recibe el nombre de “espín” del electrón y puede tener los dos sentidos posibles en un eje arbitrario. El número cuántico de espín,  $s$ , nos dice el sentido que el espín tiene respecto a dicho eje en el espacio.

La solución de la ecuación de Schrödinger impone ciertas restricciones en el valor que puede asumir cada número cuántico. El número cuántico principal puede tener cualquier valor entero, desde 1 hasta infinito, pero para cada valor de número cuántico principal están determinados los valores posibles del número cuántico  $l$ . Igualmente, para cada valor del número cuántico  $l$  quedan determinados los valores posibles del número cuántico  $m_l$ .

De tal manera que conforme a la teoría cuántica (y como se mencionó anteriormente), a cada capa se le asigna un número cuántico  $n$ , llamado número cuántico principal y con valores de números enteros, por ejemplo: 1 para la capa  $K$ , 2 para la  $L$ , 3 para la  $M$ , 4 para la  $N$  y 5 para la  $O$ . Cada capa o nivel energético se subdivide en subcapas u orbitales, las cuales se designan como  $s, p, d, f$ , etc. Para un número cuántico principal  $n$ , existen  $n$  subcapas en la capa principal. Estas subcapas son llamadas número cuántico azimutal[3], designado con la letra  $l$ , representa el momento angular de los electrones y

puede tener valores de  $l = 0, 1, 2, \dots, n-1$ . Así, para la subcapa  $s$ , el valor  $l = 0$ , para la subcapa  $p$ ,  $l = 1$ , para la  $d$ ,  $l = 2$ , etc.

De acuerdo con la descripción anterior, la capa  $K$  tiene una subcapa denominada como  $1s$ , la capa  $L$  tiene dos subcapas denotadas como  $2s$  y  $2p$  y así sucesivamente. La orientación del momento magnético de los electrones en un campo magnético está descrito por el número cuántico magnético  $m$ . Los valores de  $m$  pueden ser  $m = -l, -(l-1), \dots, (l-1), l$ . Otro número cuántico es el espín,  $s = \pm 1/2$ , que equivale a ( $s = +1/2$  ó  $1/2$ ) y se asigna a cada electrón para especificar su rotación sobre su propio eje.

La configuración electrónica de los elementos está gobernada por las siguientes cinco reglas[3]:

I.- Conforme al principio de exclusión de Pauli, dos electrones no pueden tener el mismo valor de los cuatro números cuánticos en un átomo dado.

II.- El electrón entrará en el primer orbital de más baja energía y luego será llenado el siguiente orbital de más alta energía[3]. Las energías relativas de los orbitales son  $1s < 2s < 2p < 3s < 3p < 4s < 3d < 4p < 5s < 4d < 5p < 6s < 4f < 5d < 6p < 7s$ . Este orden es válido para elementos de bajo  $Z$  ( $Z < 20$ ). Para elementos con  $Z$  elevado, el orden es en ocasiones diferente.

III.- En cada orbital debe de haber un máximo de  $2(2l + 1)$  electrones[8].

IV.- Cuando los electrones entran a un nivel energético con valores fijos de  $n$  y  $l$ , los primeros orbitales libres son ocupados uno a uno hasta que cada orbital se llena.

V.- Cada capa energética contiene un máximo de  $2n^2$  electrones.

La configuración electrónica en diferentes capas y subcapas está representada en la tabla 1.1 y, como ejemplo, la estructura del  $^{28}\text{Ni}$  está representada en la figura 1.4.

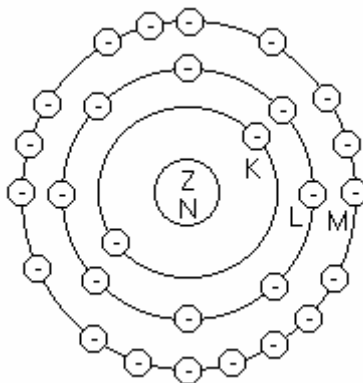


Figura 1.4. Configuración electrónica en forma esquemática de las capas K, L y M en el átomo de níquel.

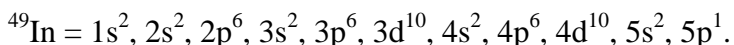
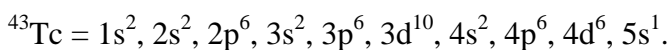
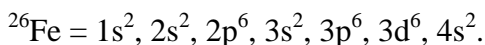
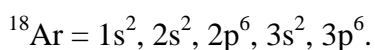
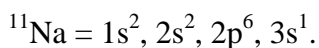
Capa principal	Núm. Cuántico Principal ( $n$ )	Subcapa ( $l$ )	Núm. de electrones $2(2l+1)$ en cada subcapa	$2n^2$
K	1	s(0)	2	2
L	2	s(0)	2	8
		p(1)	6	
M	3	s(0)	2	18
		p(1)	6	
		d(2)	10	
N	4	s(0)	2	32
		p(1)	6	
		d(2)	10	
		f(3)	14	
O	5	s(0)	2	50
		p(1)	6	
		d(2)	10	
		f(3)	14	
		g(4)	18	

Tabla 1.1. Configuración electrónica en diferentes capas y subcapas.

Consideremos como ejemplo específico la configuración electrónica del elemento  $^{14}\text{N}$ . El átomo del nitrógeno tiene número atómico 7, así que los primeros dos electrones llenan el nivel 1s; el tercer y cuarto electrones pueden estar en el orbital 2s y los tres electrones restantes están alojados entre los tres orbitales 2p. Así, la configuración del  $^{14}\text{N}$  es  $1s^2, 2s^2, 2p^3$ , donde 1s, 2s y 2p representan el tipo orbital y el exponente indica el



número de electrones en cada uno de ellos [3]. Ejemplos similares de la configuración electrónica de otros elementos son:



## 1.2. Estructura nuclear.

Los núcleos están constituidos por dos tipos de partículas, a las que por su ubicación se les da el nombre genérico de nucleones, estas partículas son los protones y los neutrones. Los protones tienen carga positiva de magnitud igual que la del electrón y masa de 1.0075 uma (unidad de masa atómica:  $1 \text{ uma}^* = 1.66 \times 10^{-27} \text{ kg}$ ), en tanto que los neutrones no tienen carga y su masa es de 1.008665 uma.

Al número de protones que hay en el núcleo, que es igual al número de electrones de un átomo neutro, se le llama número atómico,  $Z$  [4]. El número de neutrones se representa con  $N$  y al número total de nucleones [2] se le llama número de masa  $A$ , de modo que  $A=Z+N$ . El número atómico  $Z$  está relacionado con las propiedades químicas del átomo, porque éstas dependen de los electrones que tenga en las órbitas externas, mientras que el número de masa lo está con las propiedades físicas. Un elemento está constituido por átomos con las mismas propiedades químicas, es decir que tienen el mismo número atómico, pero pueden tener diferente número de masa.

\* El peso de un átomo de  $^{12}\text{C}$  es de  $1.992678 \times 10^{-23} \text{ g}$ . Es evidente la incomodidad de trabajar con gramos. Para simplificar esto se introduce la unidad de masa atómica (uma), definiéndola como la cantidad de masa igual a un doceavo de la masa de un átomo de  $^{12}\text{C}$ , el cual se toma como referencia, es decir:  
 $1 \text{ uma} = (\text{masa atómica de } ^{12}\text{C})/12$

Se llama núclido (o nucleido) a un conjunto de átomos con un número atómico  $Z$  y de masa  $A$ , definidos [10]. La notación empleada para representar a los núclidos es:

$$\begin{array}{l} A = \text{nucleones} \\ Z = \text{protones} \end{array} \quad \mathbf{X} \quad \begin{array}{l} N = \text{neutrones} \end{array} \quad \text{donde X es el símbolo del elemento.}$$

En general, para que un núclido quede completamente definido, es suficiente escribir el número de masa y el símbolo del elemento (pues con éste se define  $Z$  y el valor de  $N$  se puede determinar restando  $Z$  de  $A$ ). Ejemplos de núclidos son:  $^3\text{H}$ ,  $^{12}\text{C}$ ,  $^{32}\text{P}$ ,  $^{59}\text{Co}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{133}\text{Cs}$ ,  $^{238}\text{U}$ , etc.

Cabe mencionar que un isótopo, es un átomo cuyo núcleo tiene el mismo número de protones y de electrones, pero diferente número de neutrones[11].

Un elemento químico, como el oxígeno, está constituido por un conjunto de átomos con  $Z = 8$ , pero con diferentes masas o sea diferente valor de  $A$ , de hecho el oxígeno que se encuentra en la naturaleza contiene tres isótopos (núclidos) distintos:

$$^{16}\text{O} (99.76 \%), \ ^{17}\text{O} (0.04\%) \text{ y } \ ^{18}\text{O} (0.20\%)$$

El cobre natural tiene dos isótopos:  $^{63}\text{Cu}$  (69.17%) y  $^{65}\text{Cu}$  (30.83%)

En la tabla periódica, los elementos se ordenan según su número atómico  $Z$  y se forman columnas con elementos que tienen propiedades semejantes, de modo que todos los núclidos con igual  $Z$  quedan juntos en la misma casilla (por corresponder al mismo elemento), así los tres núclidos naturales del oxígeno ocuparían el mismo lugar en la tabla periódica, por eso se denominan isótopos (del griego isos = igual y topos = lugar), a los diferentes núclidos del mismo elemento. El cobre natural está formado por casi un 70% de átomos con masa 63 y un 30% con masa 65, por tanto el peso atómico que muestra es 63.546, el promedio. Se llama abundancia isotópica al porcentaje de un núclido que existe en el elemento natural.

### 1.3. Condiciones de estabilidad e inestabilidad nuclear.

En 1896 Henry Becquerel, mientras estudiaba los cristales fluorescentes, descubrió que las sales de uranio emiten radiaciones capaces de atravesar materiales opacos a la luz y dejar una impresión en las placas fotográficas, inicialmente pensó que el fenómeno se debía a la exposición previa a la luz solar, pero pronto se percató de que los cristales no expuestos también emitían, en forma espontánea, esa radiación que era capaz de ionizar el aire y descargaba los electroscopios. Posteriormente María Curie demostró que todas las sales de uranio (U) y de torio (Th), emiten esas radiaciones independientemente de su composición química, lo que le hizo pensar que se debía a una propiedad de esos elementos, sin embargo encontró minerales que producían aun mayor cantidad de radiación y supuso que contenían elementos más activos que el U y Th. Sus experimentos la condujeron al descubrimiento de dos elementos nuevos, el polonio y el radio, por lo que denominó radiactividad al fenómeno consistente en la emisión espontánea de radiaciones ionizantes. Posteriormente descubrieron más elementos con esa propiedad y los llamaron radioelementos o elementos radiactivos, para 1910 ya tenían identificadas 40 especies químicas derivadas de las sucesivas transformaciones iniciadas con uranio y torio, observaron también que esas series de transformaciones terminan en el elemento plomo y que algunos miembros de las series tenían propiedades químicas idénticas aunque sus propiedades físicas fueran distintas. Pronto se confirmó que de un mismo elemento existían isótopos estables y radiactivos, simultáneamente Rutherford descubrió el núcleo y Bohr desarrolló su modelo del átomo.

El origen de la inestabilidad de los núcleos es un desequilibrio [6] de la relación  $N/Z$  y la evolución hacia una configuración más estable se puede desarrollar de acuerdo con varios procesos, tal y como se verá más adelante.

La desintegración de un núcleo inestable es un proceso espontáneo que está acompañado de liberación de energía, según la ecuación (3)

$$\Delta E = \Delta mc^2 \quad (3)$$

donde  $\Delta m$  siempre es positiva.

$$\Delta m = M_i - M_f \quad (4)$$

$\Delta m$  = masa inicial del núcleo – masa final del núcleo.

Con el fin de representar la pérdida de energía y el cambio de número atómico que resulta del decaimiento radioactivo, han sido creados esquemas o diagramas llamados de desintegración o decaimiento. En estos diagramas, los diferentes niveles de energía se representan por líneas horizontales y la caída de un nivel a otro, por decaimiento radioactivo[2,3]:

- a) Las caídas verticales representan el decaimiento por medio de radiación gama, cuando tiene lugar una transición isomérica.
- b) Los movimientos a la derecha representan un avance en cargas positivas, cambiando a un elemento de mayor número atómico por emisión de partículas  $\beta^-$ .
- c) Los movimientos a la izquierda indican una pérdida de carga positiva, cambiando a un elemento de menor número atómico por emisión de partículas  $\alpha$  o partículas  $\beta^+$ , o bien captura electrónica, con emisión de rayos X.

La tabla 1.2 muestra la clasificación de los núcleos estables que se encuentran en la naturaleza de acuerdo al número par o impar de protones y neutrones. Puede verse que la combinación par-par en el número de protones y de neutrones en el núcleo, es la preferida por la naturaleza para tener núcleos estables. La combinación impar-impar de núclidos estables sólo se encuentra en un reducido número de elementos ligeros. El número de combinaciones par-impar es aproximadamente igual al de combinaciones impar-par.

Protones	Neutrones	Núclidos estables
Par	Par	160
Par	Impar	56
Impar	Par	52
Impar	Impar	4
		272

Tabla 1.2. *Núclidos estables.*

En la figura 1.5 se presenta una gráfica del número de protones como función del número de neutrones para los núclidos estables. Para  $Z < 20$ , la línea de estabilidad es una línea recta con  $Z = N$ . Para los núclidos más pesados ( $Z > 20$ ,  $N > 20$ ), la curva de estabilidad se dobla en la dirección de  $N > Z$ . Para valores grandes de  $Z$  la repulsión electrostática es más importante, por tanto el número de neutrones debe ser mayor para compensar este efecto repulsivo [4].

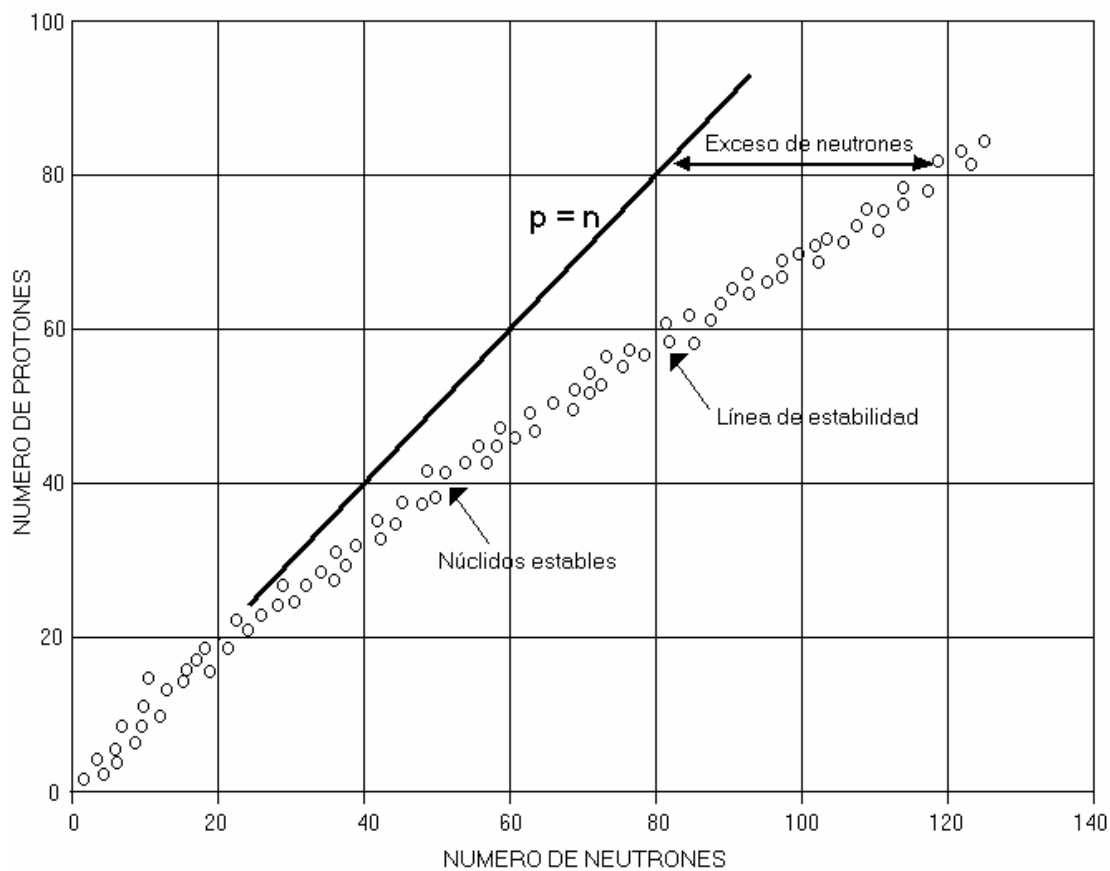


Figura 1.5. *Curva de estabilidad para los núclidos. Se grafica el número de neutrones de cada núclido vs su número de protones.*

## 1.4. Procesos de transformación radiactiva (desintegración o decaimiento).

En la figura 1.5 se señaló la “línea de estabilidad”, la cual más que una línea es una región con cierta anchura, que representa la zona de mínima energía para los núcleos de los átomos, puede imaginarse como una cañada bordeada por laderas inclinadas, los núclidos que, están por arriba de esa región tienen un exceso relativo de protones, de modo que espontáneamente tienden a “caer” hacia el fondo de la cañada mediante algún proceso que disminuya el número de protones o aumente el de neutrones, por el contrario, los núclidos que están por debajo de esa zona tienen un exceso de neutrones y tenderán a transformarse mediante procesos que reduzcan el número de neutrones o aumenten el de protones [2,4].

Puede observarse que los núclidos estables sólo llegan hasta el que tiene 126 neutrones y 83 protones, todos los núclidos con mayor número de nucleones ( $A > 209$ ) son inestables. Los núcleos radiactivos se transforman escogiendo el camino más conveniente para lograr la combinación estable y pueden emitir una o varias de las radiaciones presentadas en la tabla 1.3.

RADIACIÓN	SÍMBOLO	ESTRUCTURA	CARGA	MASA (uma)
Part. alfa	$\alpha$	2p+2n	+2e	4.0015
Part. beta negativa	$\beta^-$	e- (electrón)	-e	0.000549
Part. beta positiva	$\beta^+$	e+ (positrón)	+e	0.000549
Rayos gama	$\gamma$	fotón	0	-

Tabla 1.3.- Radiaciones emitidas por los núcleos radioactivos.

Cuando se descubrió la radiactividad y antes de conocer la naturaleza de las radiaciones se les bautizó con los nombres de las letras del alfabeto griego, alfa, beta y gama, nótese que la partícula alfa es idéntica a un núcleo de Helio, la beta es un electrón y la gama un fotón de alta energía, los nombres originales se usan específicamente para indicar que provienen del núcleo y son consecuencia de una transformación radiactiva.

Los núcleos que tienen exceso de protones transforman uno de ellos en un neutrón emitiendo una partícula beta positiva, los que tienen exceso de neutrones emiten una beta negativa transformando un neutrón en protón, los núcleos pesados se deshacen simultáneamente de dos protones y dos neutrones emitiendo una partícula alfa, algunos pasan de un estado excitado a otro estado más cercano al estado base, emitiendo fotones gama. Así mediante una o varias transformaciones sucesivas, los núclidos radiactivos se van acercando a la condición más estable que está representada por alguno de los 272 núclidos estables. Inicialmente, se denominó “desintegración” radiactiva a la emisión de radiaciones, pero en realidad el núcleo no se desintegra sólo cambia el tipo o número de nucleones que contiene y por tanto se transforma en otro núclido, del mismo elemento o de otro elemento, al modificarse su número atómico o su número de masa.

En el proceso de transformación radiactiva, como en todo proceso, se cumple el principio de conservación de la energía, del momento y de la carga eléctrica, la energía total (energía de masa en reposo y energía cinética) del átomo antes de la transformación es igual a la energía total de los productos de la transformación. La energía asociada con un cambio nuclear es millones de veces superior a la de una reacción química, procede de la conversión de masa en energía, la equivalencia entre masa y energía es  $E = mc^2$ , así una masa en reposo de  $1 \text{ uma} = 1.66 \times 10^{-27} \text{ kg}$  tendrá una equivalencia en energía de:

$$E = (1.66 \times 10^{-27} \text{ kg})(3 \times 10^8 \text{ ms}^{-1})^2 = 1.49 \times 10^{-10} \text{ J} = 931.49 \text{ MeV}$$

Si comparamos la masa de 2 protones y 2 neutrones con la de una partícula alfa, encontraremos una diferencia de  $0.03083 \text{ uma} = 28.7178 \text{ MeV}$ , esta diferencia es la energía que mantiene unidas a las cuatro partículas, se llama energía de amarre nuclear. Si comparamos la masa del núclido radiactivo con la de los productos de la transformación encontraremos que la diferencia de masas corresponde a la energía liberada durante la transformación nuclear.

## 1.5.- Transformación (decaimiento) Alfa.

Los físicos conocían las propiedades de la radiación  $\alpha$ , pero eran muy reducidas según su naturaleza. Se había comprobado que las partículas  $\alpha$  se propagan en línea recta y se había intentado desviarlas de su trayectoria normal con un campo magnético para probar su naturaleza eléctrica, pero sin resultados apreciables. Rutherford y Pierre Curie demostraron igualmente que una parte de la radiación emitida por una sustancia radioactiva era desviada por un campo eléctrico.

Rutherford logró el experimento en 1903, utilizando un poderoso campo magnético y con una fuente intensa, los rayos fueron canalizados estrechamente antes de penetrar en una cámara de ionización donde los iones formados eran capturados. Rutherford estableció que la radiación  $\alpha$  eran partículas de carga eléctrica y posteriormente determinó el valor del cociente  $e/m$  (carga/masa) de la partícula, desviando el haz de rayos por fuerzas eléctricas y magnéticas. Estos resultados fueron de vital importancia para comprender los fenómenos radioactivos. En principio la radiación  $\alpha$  porta carga eléctrica positiva [3] y posee velocidades relativamente elevadas. Siguiendo la analogía con los rayos positivos o catódicos, se podía esperar que por comparación del valor  $e/m$  de los elementos conocidos se podrían identificar a los átomos ionizados, que constituyen a los rayos  $\alpha$ . Por la imprecisión de las medidas de  $e/m$  pudieron suponer que la especie era hidrógeno o helio. Más tarde Ramsay y Soddy resolvieron el problema, haciendo una demostración sorprendente: hicieron pasar la radiación  $\alpha$  producida por una sal de radio, a través de una pared de vidrio muy delgada, a un recipiente evacuado también de vidrio y en unos cuantos días se había acumulado en el recipiente suficiente gas, el cual fue identificado espectroscópicamente. Las líneas características encontradas pertenecían al helio. Tanto Debiere como Marie Curie encontraron que el actinio, lo mismo que el polonio, también producían helio.

Parecía más y más probable que la radiación  $\alpha$  eran iones de helio y que portaban dos cargas elementales. También fue Rutherford quien estableció este último punto. Se podía precisar que la emisión de rayos  $\alpha$  por las sustancias radioactivas estudiadas eran



iones de helio con dos cargas eléctricas positivas y con velocidades aproximadas de 20000km/s, es decir, 2 cm/ns. Por lo tanto, se puede comprender por qué el recorrido de la radiación  $\alpha$  en un gas cualquiera aumenta cuando la presión o el número de moléculas por unidad de volumen disminuye.

Lo anterior indicó, que la partícula alfa no es una partícula fundamental [3]; está formada por dos neutrones y dos protones, un núcleo de  ${}^4_2\text{He}$ , muy estable.

Como ejemplo de transformación con emisión de partícula alfa se tiene:



Claramente puede verse que al emitir una partícula alfa con número de masa 4 (cuatro nucleones), el número de masa del Radio disminuye en 4 unidades, como la partícula alfa se lleva dos protones el número atómico se reduce en 2 y el núclido resultante ya no es Radio, sino Radón. Nótese también que la masa total (A) después, de la transformación es la misma que antes de la transformación, igualmente ocurre con la carga eléctrica (Z), se cumple la conservación de la masa y de la carga.

La energía de la transformación 4.87 MeV procede de la diferencia de masas atómicas entre el  ${}^{226}\text{Ra}$  y los productos  ${}^{222}\text{Rn}$  y  $\alpha$ :

$$226.025403 - 222.017571 - 4.002603* = (0.005229 \text{ uma})(931.49) = 4.87 \text{ MeV}$$

En forma genérica podemos representar la transformación alfa como sigue en la figura 1.6, ahí se indica la vida media que es de 1602 años y los porcentajes en abundancia en la naturaleza para cada elemento:

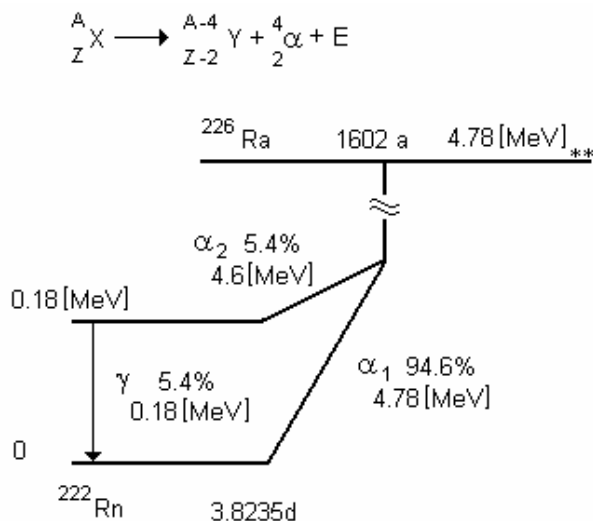


Figura 1 .6.- Diagrama de niveles de energía para  $^{226}\text{Ra} \rightarrow ^{222}\text{Rn}$  (\*\* este valor resulta de restar a la energía de la transición 4.87 la que se lleva el núcleo de Rn en retroceso).

Los estados energéticos del proceso se representan mediante un esquema o diagrama de niveles de energía conocido como “esquema de decaimiento”, (ver figura 1.6), la energía de la transformación se reparte entre la partícula alfa y el núclido hijo en retroceso  $^{222}\text{Rn}$ , si el núclido hijo queda en estado excitado emite la energía sobrante como un fotón gama o varios, para llegar al estado final de la transformación, el núclido hijo puede ser radiactivo, como en este caso, o estable.

En la transformación la partícula alfa sale en una dirección y el núcleo hijo sufre un retroceso en dirección opuesta, la energía se reparte entre ambos, como la masa de la alfa es mucho menor, sale con alta velocidad y una energía cinética prácticamente igual a la de la transformación. Del total de núcleos presentes la mayoría (94.6 %) sigue el camino directo y el resto pasa a un estado excitado del que llega al estado base emitiendo un fotón gama.

Todas las partículas alfa emitidas en una de las alternativas tienen la misma energía por lo que su espectro es discreto (el espectro es la curva de distribución de energía de las partículas emitidas), como se muestra en la figura 1.7.

•En este cálculo se usa la masa de un átomo neutro de helio, porque en el átomo de Ra había 88 electrones y en el de Rn quedan sólo 88. Su valor es mayor a la masa de la partícula alfa dada en la tabla.

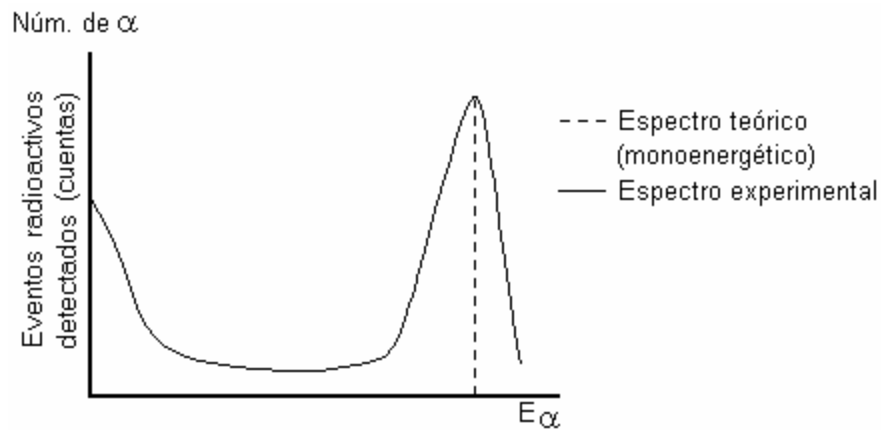


Figura 1.7.- Espectro alfa del  $^{226}\text{Ra}$ .

### 1.6.- Transformación (decaimiento) beta.

La fracción de la radiación que era fácilmente desviada por el campo magnético constituye la radiación  $\beta$  [2,3]. El sentido de la desviación suponía la presencia de partículas cargadas negativamente. Becquerel realizó un estudio sobre estas partículas. Una sal de radio fue colocada en el fondo de un recipiente de plomo, con una abertura muy estrecha, dejando salir un haz bien definido de estas radiaciones. A la salida penetraban en un campo magnético de un electroimán, que actuaba sobre ellos en forma perpendicular a la dirección de propagación. Las partículas cargadas seguían trayectorias circulares, por lo tanto el radio circular dependía de la carga, de la masa y de la velocidad. Sobre una placa fotográfica, colocada horizontalmente en el campo magnético, se veían trazas de punto de impacto de la radiación en forma curveada. En la figura 1.8 se muestra el equipo utilizado para identificar los tres tipos de radiación. Mediante este tipo de aparatos, Becquerel observó igualmente una gran banda impresa.

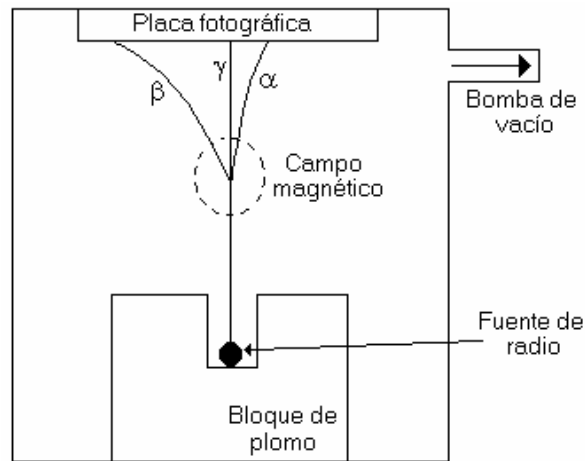


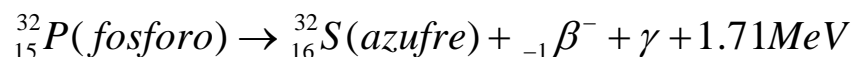
Figura 1.8. *Dispositivo experimental empleado para demostrar la Deflexión de las radiaciones en un campo magnético.*

Pierre y Marie Curie verificaron el signo de las cargas eléctricas transportadas por la radiación  $\beta$ . Para esto eliminaron la radiación  $\alpha$  de la fuente con una placa metálica delgada y la radiación  $\beta$  no absorbida penetraba en un bloque de parafina, en el cual estaba colocado un disco metálico unido a un electroscopio. La radiación  $\beta$  completamente absorbida por el disco le comunicaba sus cargas negativas. Contrariamente a la radiación  $\alpha$ , cuya naturaleza fue difícil determinar, la de los rayos  $\beta$  fue conocida rápidamente. Los métodos clásicos permitieron conocer la relación  $e/m$  y la velocidad de las partículas. Se encontró exactamente para la relación  $e/m$  el valor que Thomson había determinado para los rayos catódicos en un tubo de “Crookes”. Por lo tanto, la radiación  $\beta$  no era otra cosa más que electrones. Observaron una diferencia en el poder de penetración entre los rayos catódicos y la radiación  $\beta$ . La velocidad de propagación de los electrones en el interior de un tubo de “Crookes” es un poco superior a la de la radiación  $\alpha$ , es decir, del orden de 20000 a 30000 km/s, es decir, de 2 a 3 cm/ns; la de la radiación  $\beta$  es extremadamente grande. Esa diferencia de velocidad depende del origen y es necesario medirla en el vacío para evitar un frenado por choques con las moléculas. Así, ésta puede alcanzar un valor de 290000 km/s o lo que es igual 29 cm/ns.

La energía cinética de estas partículas extremadamente pequeñas es considerable, aún cuando su masa sea 7000 veces más pequeña que la de las partículas  $\alpha$ , las  $\beta$  tienen un

poder de penetración superior. La transformación beta tiene las tres modalidades que se ejemplifican a continuación.

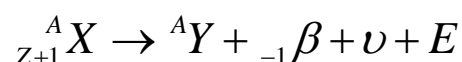
### 1.6.1. Emisión de beta negativa $\beta^-$ :



Nuevamente se puede apreciar la conservación de la masa y de la carga, además se puede ver que el número de protones aumentó de 15 a 16 debido a que un neutrón se transformó en un protón y emitió un electrón y un antineutrino[2], éste, así como su antipartícula el neutrino, no tienen carga eléctrica y su masa es insignificante, el cambio es:



La representación general para este tipo de transformación beta es:



La energía de la transformación (1.71 MeV para el  ${}^{32}\text{P}$ ) se reparte entre la partícula beta y el antineutrino ( $\bar{\nu}$ ), cada uno de ellos puede tener una energía entre 0 y  $E$  pero siempre la suma será igual a  $E$ . Esto da lugar a que el espectro de la radiación beta sea continuo, esto es, las betas emitidas podrán tener energías desde cero hasta la  $E_{\text{máx}}$  que es la energía de la transformación, como se muestra en la figura 1.9.

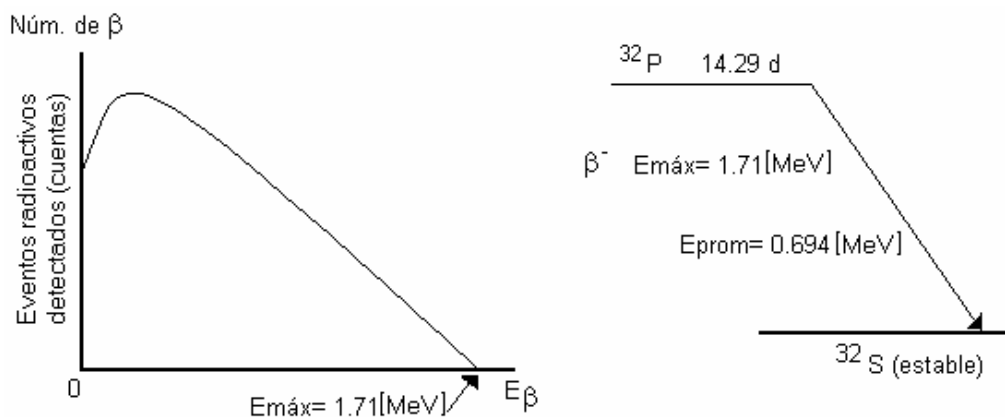
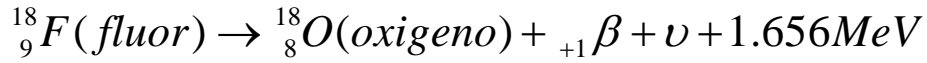
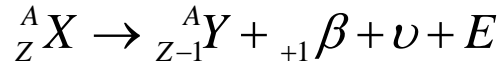


Figura 1.9. Espectro beta y diagrama de niveles de energía para el  ${}^{32}\text{P}$ .

### 1.6.2. Emisión beta positiva $\beta^+$ .



En este caso un protón se transformó en neutrón emitiendo un positrón y un neutrino ( $p^+ \rightarrow n + \beta^+ + \nu$ ). El proceso puede representarse por [2]:



El espectro de la beta positiva es bastante similar al de la beta negativa, sólo que está ligeramente desplazado hacia la derecha por la repulsión electrostática del núcleo sobre el positrón. El esquema de transformación se muestra en la figura 1.10, en el que la recta vertical representa la energía necesaria para que ocurra la emisión de un positrón 1.022MeV, que corresponde a la masa de 2 electrones (0.511 MeV).

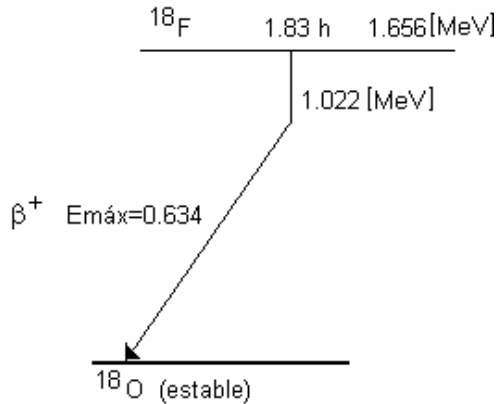
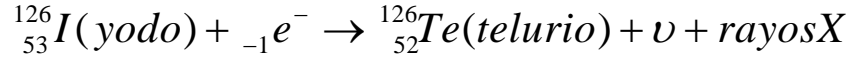


Figura 1.10.- Diagrama de niveles de energía para el  ${}^{18}\text{F}$ .

### 1.6.3. Captura electrónica.

Existe otra alternativa para transformar un protón en neutrón, consiste en que el núcleo capture un electrón de la órbita más cercana ( $K$  o  $L$ ), este proceso se conoce como *captura electrónica (CE)*, la energía de la transformación se convierte en energía cinética del neutrino monoenergético emitido y al dejar una vacante en la capa  $K$ , los electrones orbitales ocupan las vacantes y se emiten los rayos  $X$  característicos, (la probabilidad relativa aproximada de captura es de 90% para la capa  $K$  y 10% para la  $L$ ):



En el  ${}^{126}\text{I}$  como en muchos otros radionúclidos se presentan varias alternativas de transformación, en este caso el núcleo original puede optar por la emisión de beta negativa, beta positiva, o la captura electrónica; en el primer proceso un neutrón se convierte en protón ( $n \rightarrow p + e^{-} + \nu$ ), en los dos últimos procesos un protón se convierte en neutrón y lleva a un núclido estable, ( $p^{+} \rightarrow n + e^{+} + \nu$ ) y ( $p^{+} + e^{-} \rightarrow n + \nu$ ) en la figura 1.11 se muestra el diagrama de transformación. Este es un caso bastante complicado, el espectro beta será la suma de los espectros de cuatro emisiones beta (3- y 1+), además el espectro gama tiene los rayos **X** producidos en cada transición de los electrones orbitales.

En los esquemas de las figuras 1.9 y 1.10 las transformaciones han ocurrido directamente al nivel de energía correspondiente al núclido hijo en su estado estable, en el caso de la figura 1.11, se pasa a niveles excitados del núcleo hijo, la energía que se libera para llegar al estado base, constituye un fotón gama cuya energía es igual a la diferencia de energía entre los niveles involucrados, así la **emisión de radiación gama** corresponde a transiciones inmediatas entre niveles de energía del núcleo[2], de manera similar a la emisión de rayos X o luz visible debidas a transiciones de los electrones en el átomo. La radiación gama es monoenergética y por tanto es característica de cada radionúclido, ya que la energía de los fotones emitidos corresponde a una transición específica entre niveles de energía bien definidos.

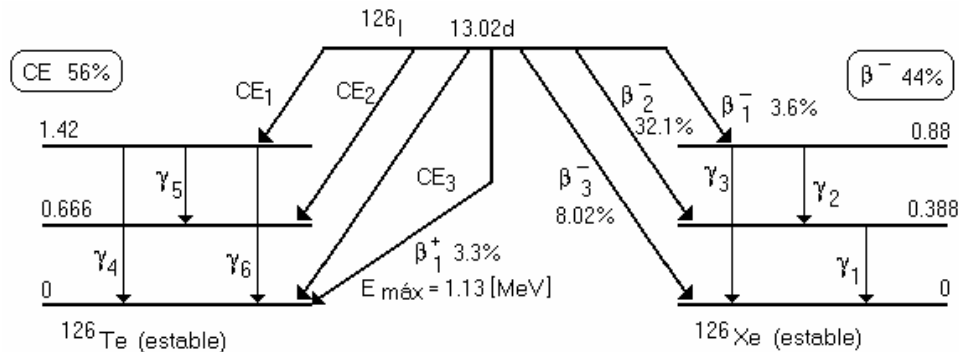
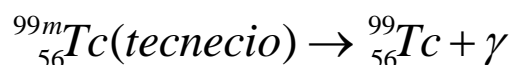


Figura 1.11.- Esquema de transformación del  ${}^{126}\text{I}$ .

Existen núcleos que se mantienen en estado excitado durante algún tiempo, a estos estados se les denomina metaestables y el paso de un estado metaestable al estado base se conoce como *transición isomérica (TI)*, a los dos estados involucrados se les conoce como estados isoméricos (isómero = que tiene la misma composición química pero diferentes propiedades físicas), un ejemplo sencillo de este proceso se ilustra con la siguiente transformación:



### 1.7. Radiación gama (rayos $\gamma$ ).

Análogas a la luz, es decir, que corresponden a fotones desplazándose a la velocidad de la luz, esta radiación electromagnética no era desviada bajo la acción de un campo magnético, la mancha originada por esta radiación apareció en el centro de la placa fotográfica [3] (ver figura 1.8), puesto que no está formada por partículas cargadas eléctricamente y mucho más penetrante que la luz, a diferencia de las partículas que se encontraron un poco desviadas según su masa y carga.

Esta radiación ha sido identificada como ondas electromagnéticas parecidas a los rayos X y a la luz visible pero de diferentes energías[11]. Su longitud de onda ( $\gamma$ ) es del orden de  $10^{-11}$  cm o  $10^{-3}$  Å. Por mucho tiempo no hubo ninguna distinción entre los rayos  $\gamma$  de origen nuclear y los rayos X de origen extranuclear, los cuales a menudo acompañan a las transformaciones nucleares.

Un núcleo en estado excitado puede disipar su energía y regresar al estado fundamental a través de una variedad de modos. El modo más común de desexcitación es por emisión de radiación electromagnética. Tal radiación es llamada radiación gama; los rayos  $\gamma$  tienen una frecuencia determinada según su energía [5]. Frecuentemente la transición no se realiza en forma directa de un estado superior al estado fundamental, sino que puede realizarse en varias etapas a través de estados excitados intermedios. Se han observado en procesos radioactivos, rayos  $\gamma$  con energías entre 10 keV y 7 MeV.



Estas radiaciones pueden detectarse con placas fotográficas; también por su capacidad de producir ionización en gases, por la fosforescencia que producen al chocar con pantallas que contienen algunos productos como el sulfuro de zinc, silicato de zinc, platinocianuro de bario, etc. Las partículas que emanan de las sustancias radioactivas provienen de su núcleo y por ello, además de confirmarnos la complejidad de la estructura de los átomos, nos muestran algunas partículas que pueden participar de su constitución.

Los grandes descubrimientos se multiplicaron, Rutherford y Soddy formularon la teoría de las transformaciones radioactivas, según la cual los átomos radioactivos se transforman progresivamente por emisiones de partículas o radiaciones en otros átomos químicamente diferentes.

El término “gama” se aplica a la radiación emitida por núcleos excitados y no a una banda de energía en particular, es decir, es generada por transiciones de los núcleos atómicos entre dos estados energéticos. La radiación gama generalmente cae en el intervalo de 0.01 a 10 MeV. En el espectro electromagnético se traslapa, en la parte de bajas energías, con la radiación X, que es de origen electrónico y no nuclear [4]. En la parte superior se traslapa con la radiación cósmica.

Al igual que todas las formas de radiación electromagnética, la frecuencia y la longitud de onda pueden relacionarse con la energía del fotón [4]:

$$E = h\nu = hc/\lambda \quad (6)$$

donde  $\nu$  y  $\lambda$  son la frecuencia y la longitud de onda de la radiación, respectivamente, y  $h$  es la constante de Plank.

Los fotones también pueden exhibir el comportamiento de las partículas. Aunque no tienen masa en reposo, exhiben un momento igual a  $E/c$ . Esta propiedad es muy importante en el análisis de la interacción de los fotones con la materia [4].

La interacción de los rayos gama con la materia es más compleja que la de las partículas alfa y beta; en general, la interacción directa da lugar a la liberación de electrones

secundarios. Esta primera interacción directa puede efectuarse por cualquiera de los tres procesos vistos con anterioridad: efecto fotoeléctrico, efecto Compton y producción de pares.

### 1.8.- Conversión interna (CI).

El proceso de conversión interna es un proceso alternativo a la emisión de un fotón gama [3], un núcleo excitado, en lugar de emitir un rayo  $\gamma$  de energía  $h\nu$ , puede impartir toda o parte de su energía de excitación directamente a uno de sus electrones atómicos. Cuando esto ocurre el electrón escapa con energía cinética igual que la diferencia entre la energía de excitación del núcleo y la energía de ligadura del electrón,  $h\nu - E_b$ . Siempre es posible que ocurra una conversión interna en lugar de emisión  $\gamma$ , pero en muchos casos la probabilidad de la CI es despreciable y puede ser ignorada.

La emisión de radiación gama, como ocurre entre dos niveles definidos de energía, es monoenergética, el número y cantidad de fotones emitidos es característico de cada radionúclido y permite su identificación, en la figura 1.12 se muestra el diagrama de niveles y el espectro del  $^{60}\text{Co}$  en la figura 1.13, puede observarse que la mayoría de las transformaciones ocurren por emisión de  $\beta^-$  con  $E_{m\acute{a}x} = 0.31$  MeV, conducen a un estado excitado del  $^{60}\text{Ni}$ , desde el cual se llega al estado base mediante la emisión de dos fotones gama, los que en el espectro aparecen como dos picos perfectamente definidos.

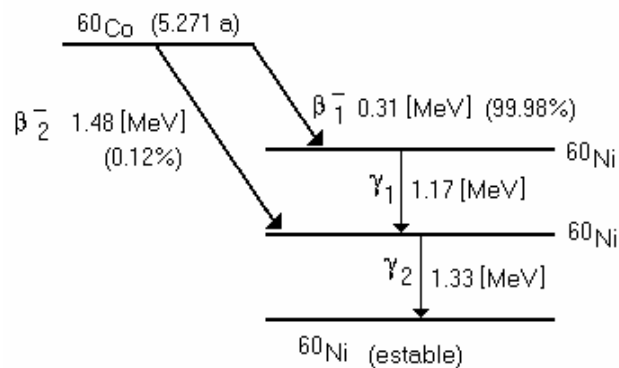


Figura 1.12.- Esquema del  $^{60}\text{Co}$ .

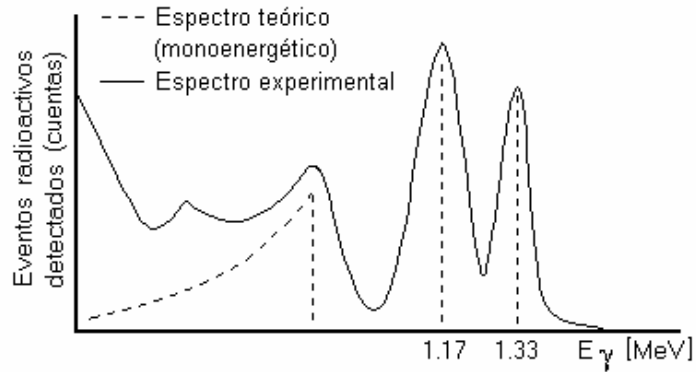


Figura 1.13.- Esquema y espectro del  $^{60}\text{Co}$ .

## Conclusiones al Capítulo 1.

En este capítulo se investigó que principalmente durante el siglo XX, se sentaron las bases que explicaban en buena medida el comportamiento de los primeros elementos químicos descubiertos, así como de las partículas elementales que conforman al átomo. Enseguida se describió la naturaleza de las radiaciones, que puede ser de origen atómico o nuclear, por lo que además, su origen puede estar asociado a partículas cargadas y no cargadas. También se dedujo y comprobó la naturaleza energética cuantizada de la materia. Dado todo lo anterior, se abordaron los mecanismos de desintegración de algunos elementos que presentaban inestabilidades en su estructura atómica y nuclear.

Existe en la naturaleza una cierta estabilidad en la abundancia de los elementos químicos según la relación entre su número de protones y neutrones. Hecho sumamente importante, fue el desarrollo del sustento estadístico que logra describir con bastante exactitud el comportamiento de las radiaciones y en general al mundo atómico y nuclear.

## 2.- Teoría de detectores.

### 2.1.- Introducción.

Los fotones (rayos X y gama) transfieren energía a la materia que atraviesan mediante varios procesos de interacción, pero los más importantes son tres procesos conocidos como [6]:

Efecto fotoeléctrico

Efecto Compton

Producción de pares

La importancia relativa de los tres procesos depende de la energía del fotón gama y del número de protones  $Z$  (número atómico) del material que sufre la interacción [2,3]. Cabe señalar que al número de neutrones en el núcleo se le designa con una  $N$ . Una cantidad más usada es la suma,  $N+Z$ , la cual se designa con una  $A$ , y recibe el nombre de número de masa.

En la figura 2.1 (figura de las regiones [12]) se muestran las regiones en las que predomina cada tipo de interacción, en función de las variables mencionadas.

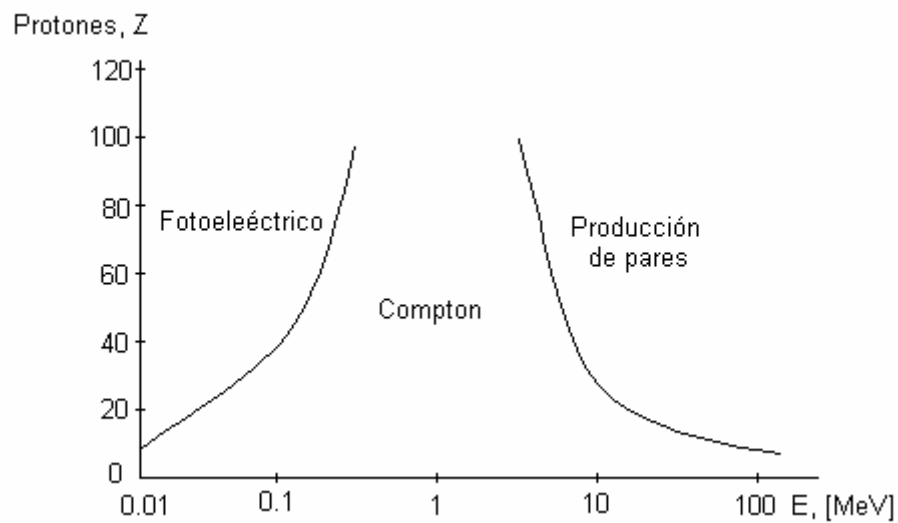


Figura 2.1. Importancia relativa de los tres efectos de la radiación con la materia.

Las curvas representan la combinación de valores de energía  $E$  y número atómico  $Z$  para las que la probabilidad de los dos tipos de interacción es la misma. La probabilidad de que un fotón produzca alguno de los efectos se llama sección transversal para ese efecto, para el fotoeléctrico se le representa con la letra griega tau  $\tau$ , para el Compton con sigma  $\sigma$  y para la producción de pares con capa  $\chi$ . Puede verse que el fotoeléctrico es el más probable para bajas energías y alta  $Z$ , el Compton para energías intermedias y la probabilidad de producción de pares sólo para energías mayores a 1.022 MeV.

## **2.2.- Interacción del fotón gama.**

### **2.2.1.- Efecto fotoeléctrico.**

Es una interacción en la que el fotón cede toda su energía  $E_i$  a un electrón, el fotón desaparece y el electrón (llamado fotoelectrón) [3], sale expulsado con una energía cinética ( $E_e$ ), que es la diferencia entre la energía del fotón y la energía de ligadura o de amarre ( $E_b$ ) del electrón con el átomo:  $E_e = E_i - E_b$ , esta interacción es con el átomo y no puede ocurrir con electrones libres, existe conservación de la energía y del momento, el fotoelectrón sale en cualquier dirección, el átomo residual, por su gran masa, se desplaza muy poco, su energía cinética es despreciable; este proceso tiene mayor probabilidad de ocurrir a bajas energías y con electrones fuertemente ligados, capas  $K$  y  $L$ , así como en elementos de alta  $Z$ , para que el efecto ocurra, el fotón debe tener energía mayor a la de ligadura. La expulsión del electrón deja una vacante en la capa  $K$  o  $L$ , la cual es ocupada por otro electrón con la consecuente emisión de uno o varios fotones de *rayos X característicos*.

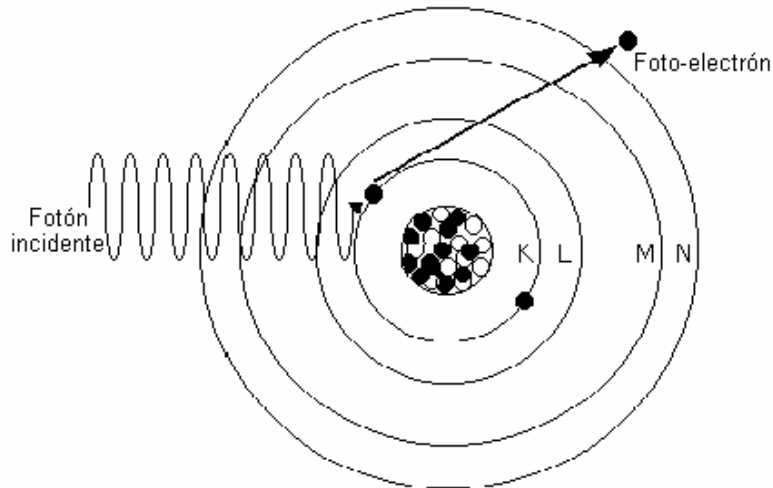


Figura 2.2. Efecto fotoeléctrico.

La probabilidad del efecto fotoeléctrico es aproximadamente proporcional a  $Z^3$  y disminuye rápidamente conforme la energía del fotón aumenta, es inversamente proporcional a  $E^{3.5}$ , aumenta significativamente cuando la energía del fotón es ligeramente superior a la energía de ligadura.

### 2.2.2.- Efecto Compton.

El efecto Compton o dispersión Compton es un tipo de interacción que ocurre entre fotones de energías intermedias y electrones libres y poco ligados (los de las capas más externas) [3], parte de la energía del fotón se transfiere al electrón y el resto sale en forma de otro fotón (al que llamaremos *fotón Compton*), la energía de ligadura del electrón se desprecia por lo que se le considera no ligado en el análisis dinámico del proceso. Si se representa con  $E_i$  a la energía del fotón incidente, con  $E_e$  a la energía cinética del electrón expulsado, con  $\theta$  al ángulo en que sale el electrón, con  $E_c$  a la energía del fotón Compton (algunos lo llaman “dispersado”) y con  $\phi$  al ángulo en que sale dicho fotón, al aplicar la conservación de la energía y del momento a la interacción (se comporta como un choque entre bolas de billar, ver figura 2.3), se obtiene la siguiente relación:

$$E_c = \frac{E_i}{1 + E_i (1 - \cos \phi) / m_0 c^2} \quad (7)$$

donde  $m_o$  = masa del electrón,  $c$  = velocidad de la luz,  $m_o c^2 = 0.511$  MeV

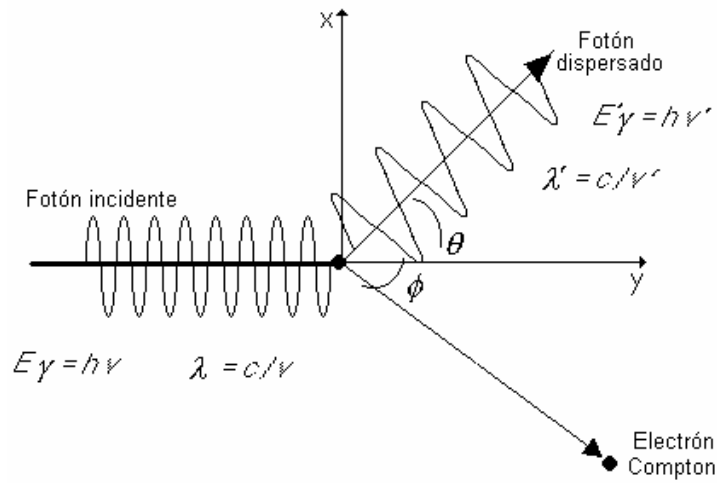


Figura 2.3. Efecto Compton.

La energía cinética del electrón expulsado es la diferencia:

$$E_e = E_i - E_c \quad (8)$$

Conviene reflexionar respecto de que las interacciones compton podrán ocurrir entre dos casos extremos, uno en que el fotón incidente casi no cede energía, o sea cuando  $E_c \cong E_i$  y  $E_e \cong 0$ , esto es cuando  $\theta \cong 90^\circ$  y  $\phi \cong 0$ , que sería cuando el fotón apenas toca al electrón y sigue su camino prácticamente sin interacción, y el otro cuando  $\theta \cong 0$  y  $\phi \cong 180^\circ$ , en que le cedería la máxima energía al electrón y el fotón compton saldría en dirección opuesta. Esto significa que la interacción compton produce fotones con un espectro continuo de energías desde cero hasta un máximo, ése máximo se acercará a  $E_i$  cuando  $E_i \gg 0.511$  MeV, los fotones compton podrán sufrir otra interacción compton o fotoeléctrica según su energía, hasta ser completamente absorbidos en el medio o bien algunos de ellos podrán escapar en varias direcciones, por lo que a esa radiación se le denomina *dispersa* [3]. La probabilidad de la interacción compton es independiente de la  $Z$  del material absorbente, pero aumenta para materiales con mayor número de electrones por  $\text{cm}^3$  (densidad electrónica), casi todos los materiales tienen entre  $2.5$  y  $3 \times 10^{23}$  electrones por gramo, sólo el hidrógeno tiene el

doble de ese valor, de modo que la probabilidad de interacción compton aumenta con el contenido de hidrógeno del material, también es mayor mientras más grande sea la densidad, sin embargo disminuye conforme aumenta la energía del fotón incidente.

### **2.2.3.- Producción de pares.**

Sólo cuando la energía del fotón es mayor al doble de la masa en reposo del electrón ( $> 1.022$  MeV), es energéticamente posible el proceso de producción de pares pero su probabilidad se hace significativa cuando los fotones son de varios MeV. El proceso ocurre en las cercanías del núcleo donde el fotón desaparece y se producen un electrón y un positrón [4], es un caso de transformación de energía en materia, ya que el fotón no tiene masa en reposo y los electrones producidos sí la tienen, el núcleo participa en el proceso para la conservación del momento, los dos electrones salen en direcciones distintas, su energía cinética sumada es igual a la diferencia entre la energía inicial del fotón y los 1.022 MeV necesarios para crear las dos masas, esto es:  $E_{e^-} + E_{e^+} = E_i - 1.022$ .

La energía inicial del fotón se reparte entre las dos partículas, aunque no en partes iguales, la energía promedio es  $(E_i - 1.022)/2$ , generalmente el positrón adquiere mayor energía cinética que el electrón por la repulsión eléctrica del núcleo. Ambas partículas se desplazan en el medio produciendo ionizaciones y perdiendo energía hasta detenerse. El positrón, cerca del final de su trayectoria, se combina con un electrón y forma un *positronio*, el cual en  $10^{-10}$  s sufre una aniquilación, proceso contrario a la producción de pares, en el que desaparecen las dos partículas y se transforman en energía, en la forma de dos fotones de 0.511 MeV, que salen en direcciones opuestas[6].



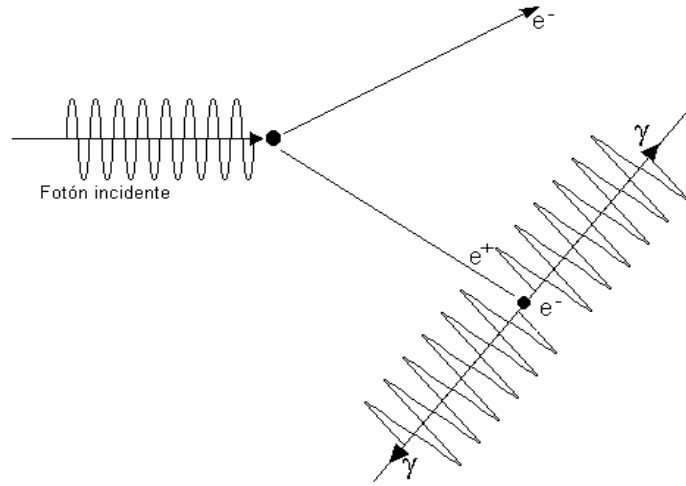


Figura 2.4. *Proceso de producción de pares.*

En la figura 2.5 se ilustran los tres procesos principales de la interacción de la radiación electromagnética con la materia, donde puede verse el significado de cada una de las variables mencionadas para cada efecto. Obsérvese que el efecto fotoeléctrico crea una vacante en la capa  $K$ , la cual da lugar a una sucesión de saltos electrónicos y a la emisión de rayos X característicos. La aniquilación del positrón contribuye con dos fotones adicionales, tanto el fotón Compton como los rayos X y los fotones de aniquilación pueden sufrir interacción una o varias veces (por efecto fotoeléctrico o Compton) y ser absorbidos por el material o escapar sin sufrirla.

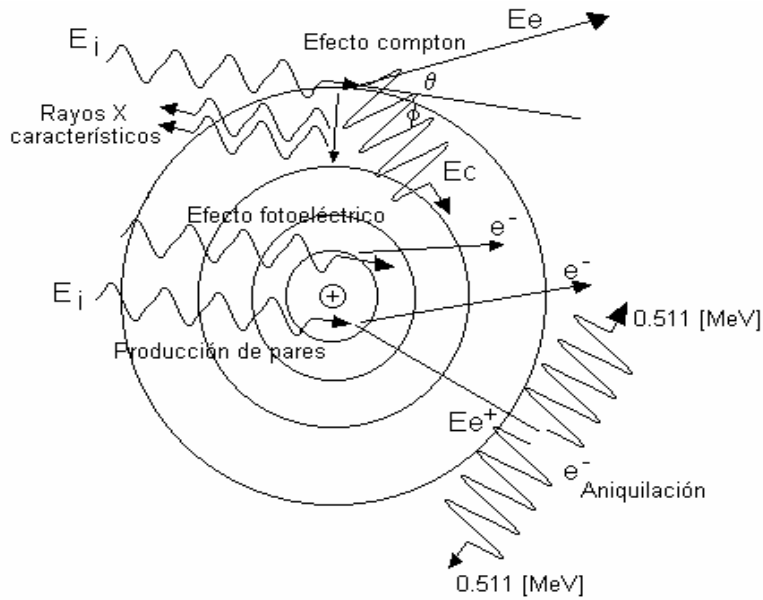


Figura 2.5. *Procesos de interacción de los fotones con la materia.*

## **2.3.- Detectores y equipos de electrónica nuclear.**

### **2.3.1.- Introducción.**

Desde el descubrimiento de la radioactividad, fue necesario poner a punto aparatos y métodos que permitan detectar las radiaciones nucleares y, en seguida, medir su intensidad su energía. Todos los métodos de detección están basados en la interacción de las partículas y la radiación electromagnética con la materia que atraviesan [5]. Su aplicación depende enormemente del tipo de radiación, puesto que se ha comprobado, por ejemplo, que una partícula alfa puede ser frenada en una corta distancia en el aire, mientras que una radiación gama con una energía de varios MeV pueden llegar a atravesar varios metros de aire sin ser frenada.

Los detectores de radiación se pueden clasificar en dos categorías: primero, en los que se realiza principalmente el fenómeno de ionización de los gases y segundo, en los que ocasionan la excitación en los sólidos o líquidos [10, 13]. Hemos indicado que cuando una radiación nuclear atraviesa la materia se forman pares de iones; por ejemplo, al irradiar un gas como el aire, originalmente neutro, se producen cargas eléctricas de dos signos y si se establece un campo eléctrico entre dos electrodos; en ellos se recolectan las cargas producidas. La corriente que resulta está en función de la cantidad de energía cedida al gas y su medida lleva a una determinación clásica de una carga, de un voltaje o de una intensidad.

La ionización de un gas se utiliza principalmente en detectores como la cámara de ionización y en los detectores Geiger-Müller; los métodos de centelleo se caracterizan por la emisión de luz después de una excitación [4, 6]. En los detectores sólidos, como los semiconductores, se producen fenómenos un poco diferentes.

Algunas de las aplicaciones actuales de los materiales centelladores en general, tales como [5, 9, 14-48]: calorímetros, medición de tiempos de vuelo de partículas, detectores de fibras centelladoras en configuración tracking, contadores de disparo, contadores de veto, etc.

### 2.3.2.- Detectores de centelleo.

Uno de los métodos más antiguos para detectar la radiación se basa en registrar los destellos luminosos que se producen durante la interacción con ciertos materiales llamados centelladores [2], es decir, se utilizan sustancias que emiten luz después de que en ellas se deposita energía por el paso de una partícula cargada [6]. El propio Rutherford empleó una capa delgada de sulfuro de zinc como detector, para realizar su famoso experimento de la dispersión de las partículas alfa, claro que observar los destellos luminosos directamente es extremadamente incómodo, afortunadamente desde 1947 se desarrollaron métodos electrónicos para registrarlos y contarlos; a la fecha se pueden efectuar conteos muy elevados con tiempos de resolución muy cortos y hasta medir con precisión la intensidad de los pequeñísimos destellos del detector.

Estas sustancias pueden ser líquidas, cristalinas o plásticas. Se consideran centelladores a todos los productos que contienen sustancias susceptibles de emitir un flujo de fotones cuando interactúan con un haz de partículas alfa, beta, radiación gama, neutrones, etc[33,40,49]. Las condiciones mínimas que deberían cumplir para ser considerado como centellador son las siguientes:

1.- El espectro de emisión fotónica debe estar comprendida entre 2000 y 6000 Angstroms, es decir 200 a 600 nm, con una mención favorable para el azul, que es la región de máxima sensibilidad de los fotocátodos. Es necesario, por supuesto, que el medio sea transparente a los fotones para que puedan ser detectados por el fotocátodo.

2.- Para lograr un conteo fiable de la actividad, el centellador debe poseer una gran rapidez de respuesta para reaccionar a cada partícula de alguna radiación.

3.- De igual forma, la sensibilidad, la selectividad y la proporción deben ser las cualidades buscadas, a fin de poder adicionar a la detección de una radiación muy débil la posibilidad de identificar la radiación y la medida de su energía.

Si la radiación atraviesa un medio, sólido o líquido, dotado de propiedades luminiscentes, el paso de una partícula se traduce por un breve chispazo o centelleo. Todos los centelladores se caracterizan por tener niveles “ópticos” atómicos o moleculares, que son excitados por los campos de Coulomb de las partículas cargadas que los atraviesan. Los niveles ópticos son suministrados usualmente por la pequeña cantidad de impurezas disueltas en un medio aún altamente purificado [49].

El centellador permite determinar el espectro de energía de una radiación, midiendo la altura de los pulsos generados por cada interacción de ésta con el material centellador.

Un equipo contador de centelleo comprende: una sustancia luminiscente, un fotomultiplicador, un selector de pulsos para la espectrometría y una escala de conteo.

Las sustancias luminiscentes son muy numerosas y se pueden dividir en tres clases[3]:

I.- Los cristales orgánicos, como antraceno, naftaleno, estibeno, terfenilo, etc.

II.- Los cristales inorgánicos, como yoduro de sodio, de potasio, de litio, de cesio, fluoruro de cesio, activados con talio, el sulfuro de zinc, etc. Entre los centelladores inorgánicos, cristalinos, el yoduro de cesio con algunas impurezas de talio es el más utilizado; debido al número atómico elevado del yodo, son muy sensibles a la radiación gama, que libera fotoelectrones rápidos del átomo del yodo.

III.- Las soluciones de sustancias orgánicas en líquidos orgánicos, por ejemplo, xilol, xileno o un sólido plástico.

Los centelladores son polivalentes y pueden medir todos los tipos de radiaciones con una gran sensibilidad y, por ende, su empleo es cada día mayor [3].

Por lo general tendremos que los centelladores inorgánicos presentan una respuesta luminosa alta pero lenta, los orgánicos presentan una respuesta luminosa baja pero rápida [4].

Entonces tenemos que no todos los centelladores reúnen los requisitos para ser empleados como detectores, para este fin lo recomendable según el caso sería que [4,7]:

- a) Convirtiera eficientemente la energía de la radiación en energía luminosa.
- b) Que la cantidad de luz producida fuera proporcional a la energía depositada por la radiación en el detector.
- c) Que el material fuera totalmente transparente a la luz que emite.
- d) Que el tiempo que tarde en emitir la luz sea mínimo.
- e) Que se preste para la construcción de detectores de diversos tamaños y formas.
- f) Que tenga otras propiedades físicas y químicas adecuadas (densidad, índice de refracción, resistencia mecánica y química, longitud de onda de la luz emitida, etc

En general, podemos decir que un sistema detector por centelleo está constituido por: el material centellador y el tubo fotomultiplicador[6], como se ilustra en la figura 2.6.

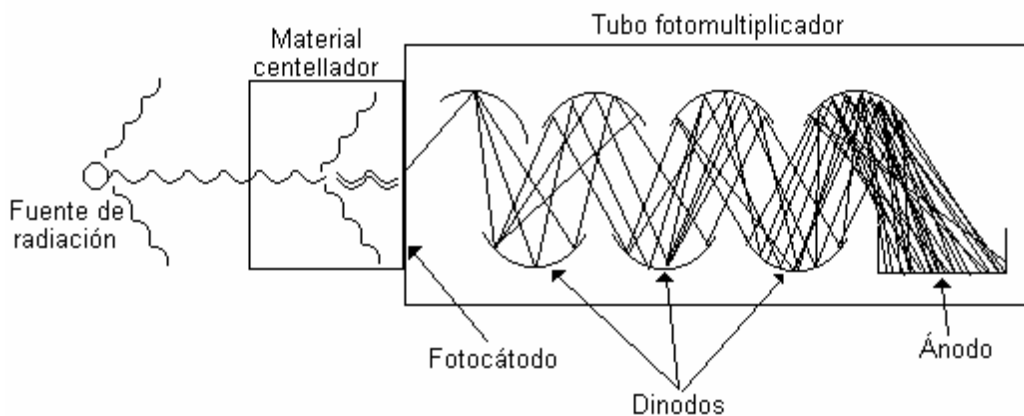


Figura 2.6. Construcción de un detector por centelleo..

La cantidad de luz emitida por el centellador es muy pequeña cuando una partícula pasa a través de él y está muy por debajo del nivel detectable por el ojo humano o por las placas fotográficas. Por esta razón, la luz es recolectada después de que se genera en el

material centellador (figura 2.6), permitiéndosele incidir sobre las capas de fototubos altamente sensibles, usualmente del tipo fotomultiplicador. En este tubo, los débiles pulsos de luz inciden sobre un fotocátodo, que entonces emite algunos electrones al interior del tubo. A continuación estos electrones son acelerados por un intenso campo eléctrico y caen sobre un segundo electrodo, de donde desprenden más electrones. Este mayor grupo, a su vez, es acelerado, para caer en un tercer electrodo y desprender aún más electrones. Luego se hace que esta secuencia de cascada prosiga a través de 10, 12 ó 14 etapas hasta que la carga original producida por la luz quede multiplicada por  $10^9$  ó más[49]. La corriente que resulta en el tubo produce un pulso de voltaje que se mide fácilmente y se puede hacer proporcional a la cantidad de luz recogida y bajo ciertas condiciones, a la energía depositada por la partícula cargada en el centellador.

Por ejemplo, una radiación gama de 130 keV, origina en el cristal de yoduro de sodio un fotoelectrón de aproximadamente 100 keV (la energía de unión de la capa K del yoduro es de 30 keV). Este fotoelectrón produce del orden de 1000 fotones de longitud de onda cercana al ultravioleta. Estos 1000 fotones producen en el fotocátodo 100 electrones. Acelerados hasta el segundo electrodo (dinodo), producen 500 nuevos electrones (multiplicación por 5). Estos 500 producen 2500 en el tercer electrodo, 12500 en el cuarto, etc. El factor de multiplicación para 10 electrodos es  $5^{10}$ . Gracias a los sistemas de detección por centelleo se ha podido medir la energía de un gran número de radiaciones gama. Se han detectado igualmente rayos X de fluorescencia y partículas  $\beta$ , con pequeños cristales de antraceno o de estilbeno.

Actualmente, una gran parte de los sistemas detectores por centelleo funcionan bajo este esquema [6], más recientemente se ha venido empleando los fotodiodos detectores basados en semiconductores [4], sus diferencias son detalles de construcción y operación que atienden a necesidades particulares impuestas por los materiales o por la aplicación requerida, así como para mejorar su eficiencia. En todos los casos el centellador debe estar protegido de la luz ambiental y debe asegurarse un buen acoplamiento óptico entre el recipiente que contiene al centellador y el tubo fotomultiplicador, a fin de asegurar una buena transmisión de la luz hacia el fotocátodo, además en algunos casos es necesario

proteger al centellador del ambiente que lo rodea (humedad, temperatura, atmósferas contaminantes o corrosivas, etc) y debe proporcionar la protección mecánica suficiente.

### **2.3.3.- Centelladores inorgánicos.**

Una aplicación importante de los centelladores inorgánicos, se encuentra en el ámbito de la física médica[17], el material más usado es el yoduro de sodio activado con talio NaI(Tl), también se emplea el sulfuro de zinc activado con plata ZnS(Ag) y en menor proporción el yoduro de cesio activado con talio o con sodio CsI(Tl) y CsI(Na), actualmente se están empezando a usar germaniato de bismuto  $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ , silicato de gadolinio activado con cerio  $\text{Gd}_2\text{SiO}_5(\text{Ce})$ , fluoruro de bario  $\text{BaF}_2$ , yoduro de litio activado con europio LiI(Eu) [3], etc. Los activadores se agregan en cantidades muy pequeñas y sirven para hacer más eficiente la conversión de energía en luz, de hecho la radiación produce ionizaciones y excitaciones en el cristal, cuya consecuencia es el paso de electrones de la banda de valencia a la banda de conducción, dejando en ésta última huecos que se comportan como portadores positivos, ambos viajan por el cristal hasta caer en niveles de energía intermedios aportados por el activador. La desexcitación desde esos niveles da lugar a la emisión de fotones luminosos de menor energía a la empleada para pasar el electrón de la banda de valencia a la de conducción. En la figura 2.7 se ilustra el proceso para el NaI(Tl). El tiempo de desexcitación del talio es de  $0.25 \mu\text{s}$ , lo cual permite conteos muy elevados sin pérdidas significativas por tiempo muerto [1].

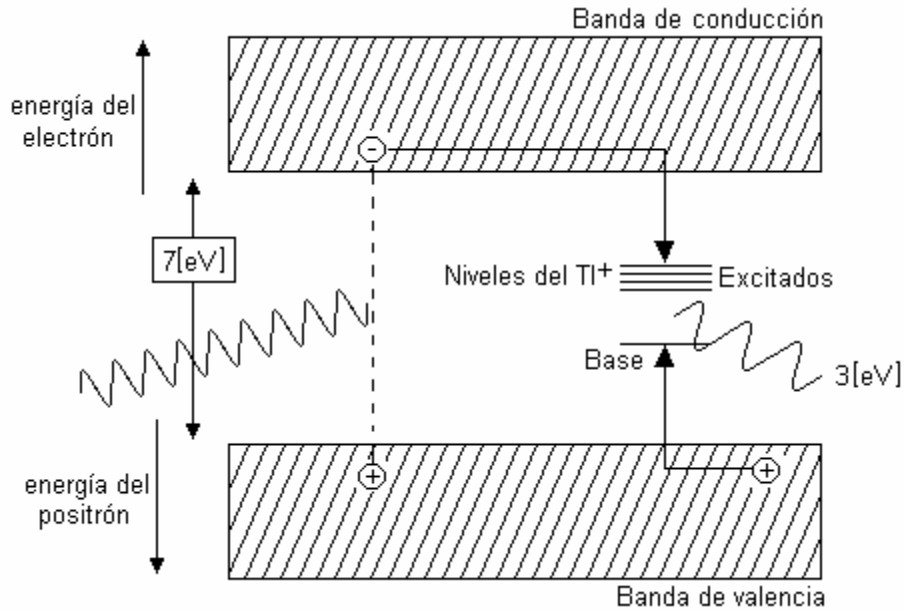


Figura 2.7. Conversión de energía en el NaI(Tl).

La eficiencia de un detector por centelleo depende de muchas variables, desde la posición relativa entre la muestra y el detector, las dimensiones del detector y la energía de la radiación, hasta la eficiencia de conversión de energía del material centellador [50]. De hecho se definen varios tipos de eficiencia: eficiencia absoluta, eficiencia relativa y eficiencia intrínseca. La primera esta dada por la relación entre el número de partículas o de fotones detectados y el número de ellos emitidos por la fuente, la segunda es la respuesta de un detector comparada con la de otro de dimensiones dadas y bajo las mismas condiciones de geometría, la tercera es el porcentaje de conversión de energía en energía luminosa dentro del detector. La eficiencia intrínseca depende de la geometría del cristal y la energía de los fotones incidentes.

La luz emitida por los centelladores inorgánicos tiene una longitud de onda de alrededor de 400 nm y los materiales de los fotocátodos son sensibles a fotones de 350 a 500 nm, esto los hace muy adecuados para su uso como detectores[51-53]. La radiación necesita depositar del orden de 22 eV para producir un fotón luminoso de 3 eV, por tanto un fotón gama de 100 keV produciría del orden de 4 000 fotones luminosos. En la tabla 2.1 se dan las propiedades de algunos centelladores inorgánicos. Los de mayor densidad tienen



una mejor absorción de fotones gama, sin embargo la eficiencia de conversión no va aparejada con la densidad.

Material	Amáx (nm)	t (us)	Índice refrac.	Densidad	Eficiencia rel.
NaI(Tl)	410	0.23	1.85	3.67	100%
CsI(Na)	420	0.63	1.84	4.51	85
CsI(Tl)	565	1.0	1.8	4.51	45
LiI(Eu)	470-485	1.4	1.96	4.08	35
ZnS(Ag)	450	0.20	2.36	4.09	130
CaF <sub>2</sub> (Eu)	435	0.9	1.44	3.19	50
Bi <sub>4</sub> Ge <sub>3</sub> O <sub>12</sub>	480	0.3	2.15	7.13	8
CsF	390	0.005	1.48	4.11	5

Tabla 2.1. *Propiedades de los centelladores inorgánicos.*

El NaI(Tl), desde su descubrimiento a principios de los años cincuenta, se ha mantenido como el de mayor uso a pesar del desarrollo de otros materiales[50], se obtiene mediante el crecimiento de cristales a partir de la sal fundida, es altamente higroscópico y se deteriora rápidamente si se expone a la humedad, por lo que tiene que mantenerse en un recipiente de aluminio que garantice hermeticidad, recubierto internamente con un material blanco como reflector difuso (MgO o Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), con una cara de vidrio para permitir la salida de la luz y acoplado al fotocátodo con una grasa de índice de refracción adecuado. Su propiedad más notable es su alto rendimiento luminoso. El yoduro de cesio es menos higroscópico que el de sodio y tiene mayor resistencia mecánica, permite distinguir partículas por forma de pulso, tiene el más alto coeficiente de absorción para gama y se usa en instrumentos espaciales. El ZnS(Ag) se usa para radiación alfa, sólo está disponible en forma de polvo policristalino y su poca transparencia impide emplear espesores mayores a 25 mg/cm . El LiI(Eu) se usa para detectar neutrones. El CaF<sub>2</sub>(Eu) no es higroscópico y puede usarse al vacío. Así cada uno tiene un campo de aplicación donde alguna de sus cualidades es relevante o indispensable. Se construyen de muy diversas formas y tamaños según el uso.

### 2.3.4.- Centelladores orgánicos.

En los centelladores orgánicos también una fracción de la energía absorbida se convierte en excitación y posteriormente en fotones de menor energía, pero en este caso el proceso es molecular[49], puede explicarse mediante un diagrama de energía vibracional de a molécula como el que se muestra en la figura 2.8. Las curvas representan dos estados electrónicos de la molécula con niveles de energía vibracional representados por líneas horizontales. La molécula normalmente está en estado base y al nivel más bajo de energía vibracional, la energía que la radiación le cede la lleva al estado excitado, el proceso se representa con una flecha vertical A -A', la molécula cede parte de su energía a moléculas vecinas pasando a un nivel vibracional de menor energía y el resto lo emite como un fotón luminoso al regresar al estado base, flecha B -B'. La transición puede darse entre distintos niveles y por tanto se emiten fotones de varias energías, también puede regresar al estado base sin emitir fotones si las curvas están muy cercanas o si sufre una disociación.

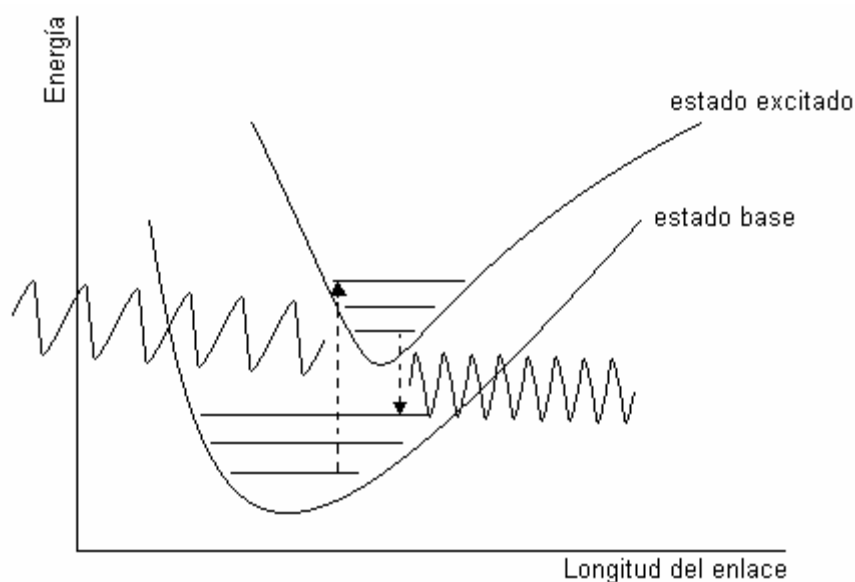


Figura 2.8. *Proceso de emisión de un centellador orgánico.*

Una prueba de que el mecanismo es molecular y no debido a una estructura cristalina, es el hecho de que la fluorescencia se mantiene aunque la sustancia se disuelva en un solvente o en un plástico, lo cual permite construir los centelladores en muchas formas o usarlos en forma líquida [6]. Existen varios materiales orgánicos que emiten

fotones de longitud de onda adecuada para ser absorbidos en el fotocátodo, el antraceno y el estilbeno son los más comunes y se usan en forma de cristal, mientras el terfenilo es el más popular para los centelladores plásticos y líquidos [3].

El tiempo de decaimiento para el antraceno es del orden de 30 ns, para el estilbeno de 5 ns y para los centelladores plásticos y líquidos varía entre 2 y 4 ns [3], lo cual los hace excelentes para conteo rápido. Tanto por su densidad como por no tener elementos con número atómico elevado son poco eficientes para radiación gama, sin embargo tienen la propiedad de producir pulsos de forma diferente en función del tipo de partícula incidente, lo cual permite discriminar entre ellas, especialmente entre neutrones y fotones gama. Es interesante señalar que en los centelladores líquidos y plásticos el número de moléculas activas es pequeño, sin embargo la eficiencia es alta, lo cual indica que la energía es absorbida por el solvente o el plástico y transferida eficientemente a la molécula centelladora, sin embargo los fotones emitidos tienen una longitud de onda muy corta (ultravioleta) para ser absorbidos en el fotocátodo, por lo que en muchos casos es necesario introducir otro soluto adicional que absorbe los fotones ultravioleta y emite otros con la longitud de onda adecuada.

La detección de partículas poco penetrantes como las alfa y las beta de baja energía presenta problemas por la absorción que sufren en el material opaco que generalmente cubre al detector [6], una aplicación muy particular, es la de centelladores líquidos en los que la muestra radioactiva a analizar, se mezcla con el centellador resuelve este problema y aumenta la eficiencia de conteo significativamente, sin embargo también existen otros problemas a considerar, así la selección del sistema muestra-centellador debe considerar cuatro factores: el solvente, el centellador, el material radiactivo y el recipiente a emplear.

El solvente además de disolver al centellador y a la muestra radioactiva en análisis, debe transferir eficientemente la energía de la radiación al centellador y ser transparente a la luz emitida, generalmente se usa tolueno o xileno que disuelven a muchos compuestos orgánicos. Para las muestras acuosas y las que tienen color, hay que ver cómo se solubilizan completamente (en ocasiones con un solvente adicional como dioxano) de

manera que no absorban demasiado los fotones y produzcan una extinción mínima. En la tabla 2.2 se dan algunas propiedades de centelladores orgánicos.

Material	Densidad	$\lambda_{\text{máx}}$ nm	$\tau$ ns	Eficiencia relativa
Antreceno	1.25	447	30	100%
Estilbeno	1.16	410	4.5	50
Plástico	1.032-1.045	375-434	1.7-3.3	46-68
Líquido	0.735-1.61	385-430	2.6-4	20-78

Tabla 2.2.- *Propiedades de los centelladores orgánicos.*

### 2.3.5.- Tubo fotomultiplicador (*PMT*).

Es el dispositivo más empleado para la conversión de luz en señal electrónica, aunque también se usan fotodiodos y semiconductores sensibles a la luz [4,21]. Para nuestro caso el *PMT* no será la excepción, el fotomultiplicador es un elemento esencial que hace la conversión del fotón producido por la interacción de la radiación con el elemento sensor (fibra centelladora) a electrones (fotoelectrón). Los tubos se construyen con diversas formas geométricas para reducir el tiempo de tránsito de los electrones y para aumentar la ganancia [4,9]. El fotocátodo debe tener una función de trabajo (energía necesaria para arrancar un electrón) suficientemente baja para ser sensible a fotones luminosos, su espesor debe ser adecuado para absorber la luz pero no muy grueso para que no absorba los electrones que produce, generalmente se hace de antimonio de cesio  $\text{Cs}_3\text{Sb}$  o de antimonio de cesio y potasio  $\text{K}_2\text{CsSb}$ , ambos tienen muy buena respuesta a la luz del centellador. Los dinodos son del mismo material que el fotocátodo o de cobre-berilio, su ganancia depende del voltaje y puede ser superior a 10, el número de dinodos puede llegar a 12, por lo que es fácil obtener ganancias totales de  $10^6$  o mayores, según la aplicación específica.

Los dinodos producen una emisión secundaria de electrones al incidir sobre ellos los primeros provenientes de los dinodos anteriores, de ahí el porqué la mayoría de los diseños de *PMTs* requiera de voltajes negativos en la alimentación del resto de los dinodos, los

cuales son polarizados con un potencial más negativo y así atraer a los electrones generados con anterioridad. Existe un divisor de alto voltaje (*HV*) entre cada dinodo, de tal manera que al chocar un fotoelectrón con el dinodo, desprende varios electrones más, favoreciendo entonces la multiplicación de éstos y por lo tanto, la amplificación en corriente de los fotones primogenios, tal y como se muestra a continuación:

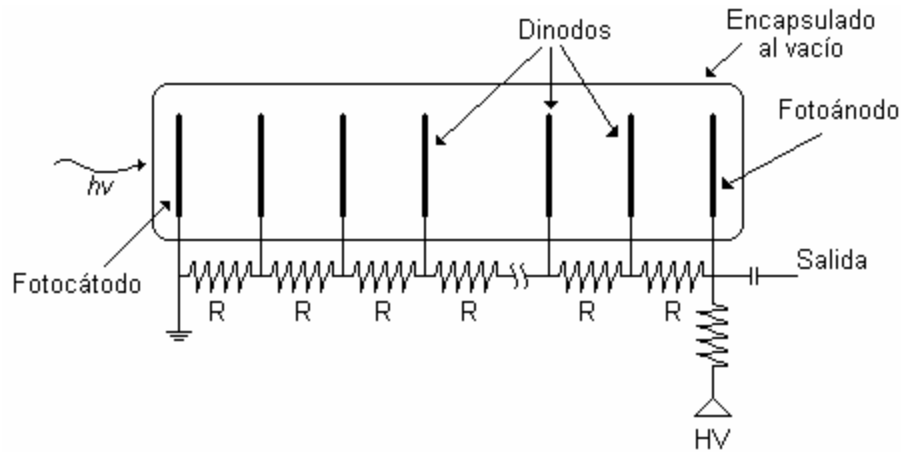


Figura 2.9. Esquema para la polarización de alto voltaje aplicado a los dinodos del PMT.

La señal puede obtenerse como una corriente o un pulso según el tipo de información que se requiera.

De tal manera, que la ganancia de un *PMT* estará dada por [49]:

$$M = \prod_{i=1}^N g_i \quad (9)$$

donde  $g = 3-50(f(E))$  es la ganancia de los dinodos, así pues:

$$g = 4 \text{ y suponiendo a } 10 \text{ dinodos, entonces } M = 4^{10} = 10^6 \text{ (aprox).}$$

Una configuración típica para un *PMT*, el elemento centellador y la cubierta protectora de radiación [4,6,12], es como la mostrada en la figura 2.10.

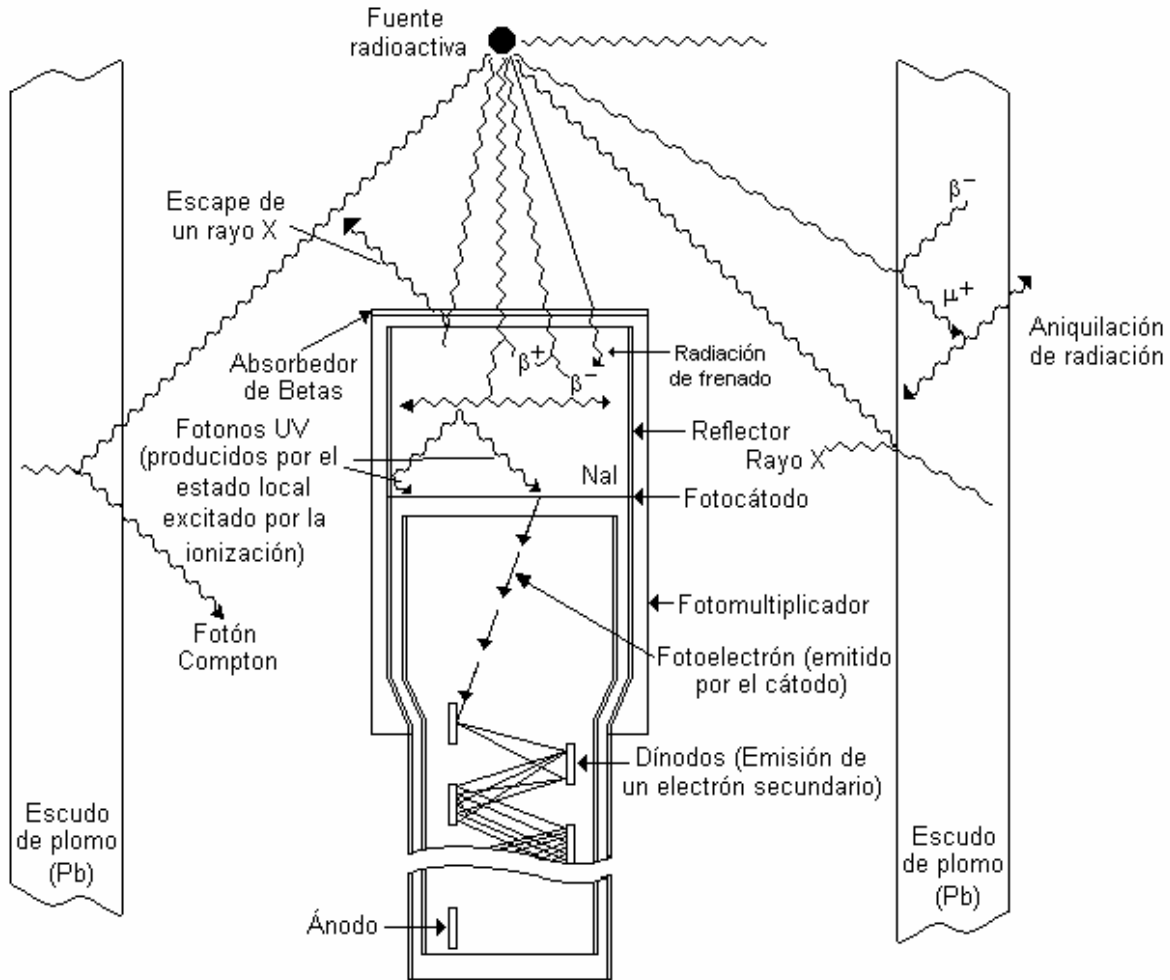


Figura 2.10. Arreglo típico del PMT, centellador y cubierta protectora de radiación.

Para nuestro caso, utilizaré un *PMT* de la marca Hamamatsu, serie R7400P [54]. Este *PMT* es sensible a fotones con longitud de onda del *UV* hasta el visible. A continuación se muestra la imagen del *PMT* empleado para la caracterización de la fibra óptica centelladora empleada para nuestro experimento:



Figura 2.11. Fotografía del PMT empleado para el experimento.

Se trata de un *PMT* en encapsulado en subminiatura con diámetro de 16 mm (los más pequeños del mundo), posee 8 etapas de multiplicación (dinodos) con una ganancia típica libre de ruido del orden de  $700 \times 10^3$  veces, especiales para aplicaciones de conteo de fotones, respuesta en tiempo del orden de 0.78 ns y con voltajes de operación de -1000 V (voltaje negativo) típico [54].

En buena medida, podemos afirmar que internamente todos los *PMT* son iguales [4]; algunos serán de dimensiones más grandes y otros serán más pequeños, todo dependerá de la tecnología y el factor de ganancia que ofrezcan los fabricantes, entre otros factores menores. A continuación se muestra el esquema para nuestro *PMT*, que no es más grande que un lápiz adhesivo:

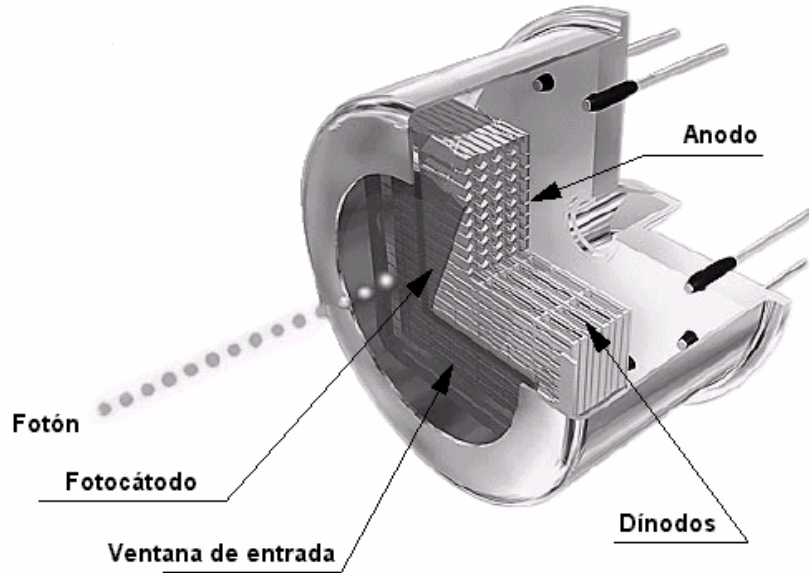


Figura 2.12. Esquema básico del proceso de fotomultiplicación de los fotoelectrones.

El R7400P muestra una alta sensibilidad que va desde el UV hasta el visible [54]. A continuación se muestra la curva de sensibilidad y ganancia vs voltaje de polarización:

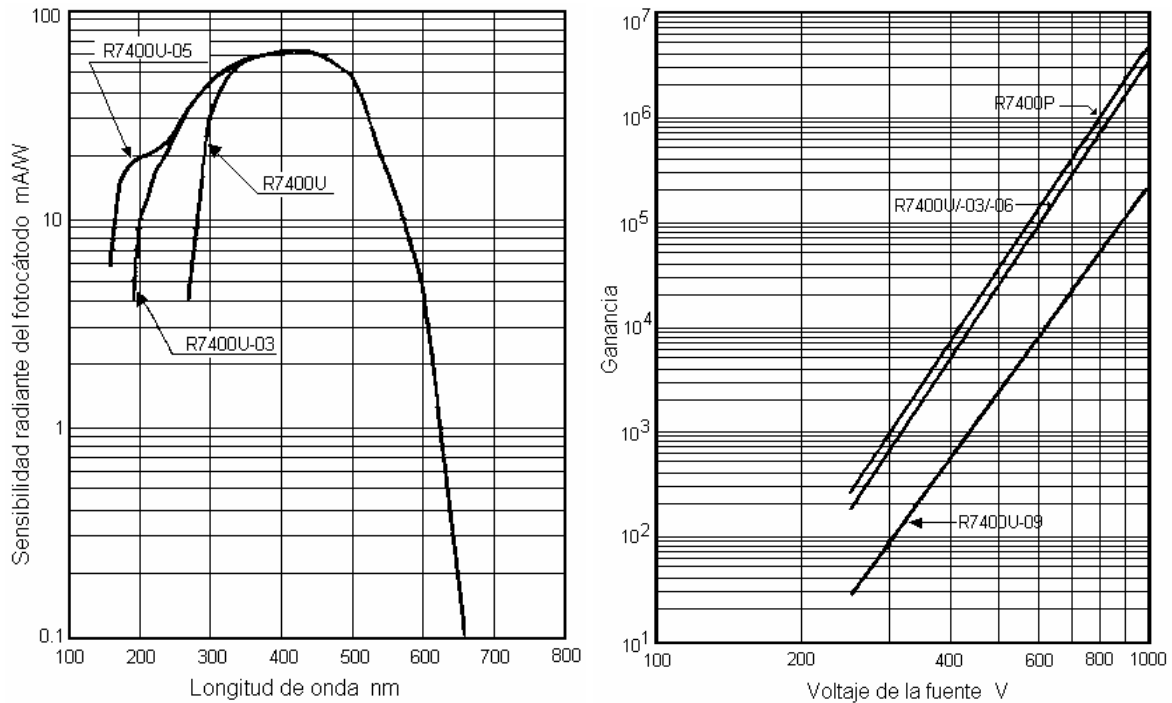


Figura 2.13. Sensibilidad vs longitud de onda y ganancia vs voltaje de la fuente de alimentación.



### 2.3.6.- Amplificador rápido FTA420C de ORTEC.



Para aplicaciones de alto desempeño, amplificación rápida de señales lineales analógicas provenientes de fotomultiplicadores, multiplicadores de electrones, fotodiodos y detectores electrónicos de partículas cargadas, entre otros [55]. Además posee:

Número de canales: 4.

Ruido equivalente a la entrada en rms:  $\leq 20 \mu\text{V}$ .

Tiempo de levantamiento:  $\leq 1 \text{ ns}$ .

Ganancia: 20.

Rango de salida: 0 a -5 V a  $50 \Omega$  de carga.

Ancho de banda: 10 a 350 MHz.

Tiempo de propagación entre canales:  $< 30 \text{ ps}$ .

### 2.3.7.- Discriminador cuádruple a 100MHz. Modelo 821 de LeCroy.



Un discriminador es un instrumento que permite comparar el valor de una medida con una magnitud de referencia e indica la diferencia entre ambas [56]. A continuación se ilustran los componentes básicos del discriminador empleado:

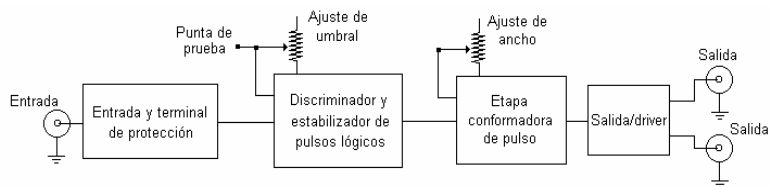


Figura 2.14. Componentes del discriminador.

Sus terminales frontales permiten una alta sensibilidad con un ancho de banda de 100 MHz. Cada una de las salidas tiene su propio control de umbral y de anchura [56]. El umbral puede supervisarse desde el panel frontal vía un punto de prueba.

La actualización de las salidas puede ser ajustada dentro de un rango de 5 ns a 1  $\mu$ s. El cruce del primer umbral hace extender la duración del pulso con un rendimiento al tiempo igual a la anchura del pulso seleccionado. Si el cruce del segundo umbral ocurre dentro de la especificación temporal en el orden de nanosegundos, la unidad no responderá.

### 2.3.8.- Discriminador de Fracciones Constantes Óctuple. Modelo CF8000 de LeCroy.



El sofisticado discriminador de fracciones constantes óctuple (Octal constant-Fraction Discriminator) de ORTEC modelo CF8000 tiene la mayoría de las características requeridas para experimentos donde intervengan las tomas más exigentes de tiempos, tales como los de experimentos de coincidencias de señales provenientes de varios detectores [57]. Contiene ocho discriminadores en un solo módulo. La técnica de fracción constante proporciona una excelente resolución temporal sobre un rango ancho de amplitudes de los pulsos.

Algunas características exclusivas de este discriminador incluyen: conformador de figura con retardo interno, seguidor con ajuste automático, una salida totalizadora analógica, además posee bloques de lógica integrada minimizando así componentes externos.

Las señales de entrada pueden estar dentro de un rango desde 0 a  $-5$  V. Cada entrada tiene su propio ajuste de umbral, el cual puede ser desde un valor de  $-10$  mV a  $-1$  V.

Para cada canal existen tres salidas provenientes de la lógica Fast-NIM, etiquetadas por A y dos con B. Para todas las salidas es posible ajustar su ancho. También posee circuitos internos conformadores que pueden aplicar retardos desde 2, 4, 6, 8 ó 10 ns.

### 2.3.9.- Convertidor de tiempo a amplitud (Time to Amplitude Converter/SCA). Modelo 567 de EG&G ORTEC.



El analizador-convertidor monocanal de tiempo a amplitud de ORTEC modelo 567 (*Time-to-Amplitude Converter/Single-Channel Analyzer TAC/SCA*) mide el intervalo de tiempo de entre las entradas de una señal de pulso de inicio (*START*) y otra de paro (*STOP*), genera un pulso de salida analógica proporcional al tiempo medido, proporciona al científico flexibilidad incomparable en el desarrollo de experimentos con señales aleatorias producidas dentro de un rango ajustable de tiempo [58].

Las entradas de inicio (*START*) y paro (*STOP*) poseen disparos independientes (empleadas para experimentos de coincidencias o anticoincidencias) que propician la eliminación de eventos indeseados, dados por imposiciones de tiempos o energías. El modelo 567 también incorpora un analizador monocanal (*SCA*) con características para inhibir la salida del *TAC* dada una ventana de restricción impuesta por el *SCA*.

Las conversiones válidas ocurren desde el final del retardo interno después de la señal de paro (*STOP*) y el fin del reset. La amplitud de la salida va de 0 a 10 volts positivos y es proporcional a la diferencia en tiempo de las señales de *START* y *STOP*.

## 2.4.- Condiciones para la medición de radiación alfa, beta y gama.

La poca penetración de las partículas alfa en la materia hace que su detección y medición requiera condiciones especiales [3], un detector geiger que tiene una gran sensibilidad para partículas cargadas las detectaría con una eficiencia del 100 % si pudieran entrar al volumen sensible del detector, esto no siempre es posible porque la ventana de la mayoría de los geiger no es suficientemente delgada para que la atraviesen. Para efectuar mediciones confiables es preferible usar un detector proporcional o un geiger sin ventana, estos detectores requieren un flujo continuo del gas de detección, los monitores portátiles de ese tipo sólo pueden usar un tanque pequeño que se consume con relativa rapidez e implica un gasto adicional. Son más populares los detectores por centelleo de ZnS(Ag) que se construyen con ventanas muy delgadas de mylar opaco y existen de dimensiones suficientemente grandes como para explorar superficies posiblemente contaminadas, para hacerlo es necesario que el detector esté a distancias muy pequeñas de la superficie, debido a que las partículas alfa sólo pueden atravesar unos milímetros de aire para llegar a la ventana con energía suficiente para atravesarla.

Las partículas betas, como tienen un espectro continuo, son absorbidas significativamente aún por espesores pequeños, particularmente las que tienen poca energía máxima como las del  $^3\text{H}$ ,  $^{14}\text{C}$ ,  $^{35}\text{S}$ , etc., de modo que para su detección se requieren detectores sin ventana, el tritio definitivamente no puede detectarse con ningún detector con ventana, para los demás las ventanas más delgadas reducen la eficiencia hasta sólo 10 ó 15%. Adicionalmente para tener una medición relativamente útil el detector tiene que haber sido calibrado con una fuente del mismo radionúclido y en condiciones geométricas similares. Para detectar contaminaciones con emisores alfa y beta débil, si no se dispone de un monitor adecuado, se pueden tomar frotis de la superficie y medirlos posteriormente con un detector de laboratorio sin ventana o con uno de centelleo líquido. Los emisores beta de energías mayores pueden detectarse con un geiger de ventana delgada sin problemas.

La medición de campos gama en general es más sencilla ya que los fotones no tienen dificultad para entrar al detector, sin embargo, si se requiere hacer una medición más

precisa, hay que tener un detector debidamente calibrado y conocer su dependencia energética y direccional[3]. La dependencia energética es la variación de la lectura en función de la energía de la radiación, es fácil comprender que las paredes del detector pueden atenuar significativamente la radiación de muy baja energía ( $< 20$  keV), además algunos monitores tienen cubiertas o blindajes para compensar la mayor efectividad de absorción de radiaciones gama de energía intermedia (20 a 100 keV), con objeto de tener una respuesta más plana a todo lo largo del intervalo de energías más frecuente. Para campos intensos es preferible un monitor con cámara de ionización, para intensidades menores un geiger permite medir la rapidez de exposición, aunque su dependencia energética para bajas energías es considerable. La dependencia direccional representa la variación de la lectura con la dirección de incidencia de la radiación.

## **2.5.- Efectos biológicos dañinos que puede causar la radiación.**

La radiación nuclear produce efectos en todo tipo de materia sobre la que incide. Por radiación nuclear se quiere decir electrones, protones, partículas alfa, fotones gama, neutrones y cualquier otro tipo de partículas cargadas o neutras, o fotones emitidos como resultado de las reacciones nucleares [3]. Los efectos de la producción de un ión, por ejemplo, genera cambios en la materia animada e inanimada. Estos cambios pueden afectar las propiedades macroscópicas, o bien, como en el caso de los sistemas biológicos, el funcionamiento de estos tipos de materia.

En el campo de los efectos de la radiación, la principal preocupación, por mucho, está dirigida hacia el ser humano, considerado como objeto receptor de radiación. No se intentará seguir a detalle la serie de eventos microscópicos, empezando con una o muchas ionizaciones en el tejido de un individuo y terminando con un diagnóstico de cáncer o algún otro defecto en ese individuo; además de que los detalles de un mecanismo tal no se conocen con certeza hasta ahora.

Como es sabido, la mayor parte de los seres vivos están constituidos por células, de modo que para entender el efecto que producen las radiaciones ionizantes en los sistemas

vivientes es necesario tener un conocimiento básico de la célula y de su funcionamiento. Dentro de un ser humano existe una gran diversidad de células, desde las que actúan como unidades independientes hasta las que forman los diferentes tejidos y órganos, algunos con funciones tan específicas e indispensables que pueden afectar a todo el organismo. Cada célula tiene que realizar un conjunto de funciones para su supervivencia y para asegurar su contribución al mantenimiento y operación de todo el cuerpo, como todo ser vivo necesita alimentarse, reproducirse y defenderse de posibles agentes externos que pudieran alterar su equilibrio (agentes físicos, químicos o biológicos), la magnitud e importancia del daño que en un momento dado puede ocasionar la exposición prolongada a la radiación ionizante, dependerá del número de células afectadas y de la forma en que hayan sido afectadas, puede pasar desapercibido si sólo causó la muerte de un número reducido de células, tal que pueda ser fácilmente recuperado por la reproducción celular que continuamente se realiza en los tejidos, o puede llegar a ser tan grande que supere esa capacidad de recuperación y afecte severamente al funcionamiento de un órgano o tejido importante para la preservación de la vida del organismo y produzca la muerte del individuo.

## **Conclusión al Capítulo 2.**

En este capítulo se investigó que dependiendo de las energías implicadas en las interacciones atómicas y nucleares en la materia, se generan principalmente tres procesos que conllevan a la producción de radiaciones: efecto fotoeléctrico, efecto Compton y producción de pares.

Se mencionaron algunos de los parámetros más importantes que deben cumplir los dispositivos detectores, tales como la rapidez de respuesta, la sensibilidad, selectividad y el espectro de emisión fotónica en los detectores de centelleo, entre muchos otros.

Observamos que para aplicaciones donde las resoluciones temporales no son críticas, los centelladores pueden ser de origen orgánico, en contra parte, si lo importante es tener mayor resolución, se debe considerar el emplear un detector de origen inorgánico.

Se describieron algunos de los dispositivos electrónicos requeridos en la instrumentación de la física de radiaciones, tales como: el tubo fotomultiplicador, preamplificadores y amplificadores rápidos, discriminadores, digitalizadores multicanal, entre otros. Cabe mencionar, que las velocidades de detección para estos eventos radioactivos va comúnmente desde unos microsegundos a nanosegundos e inclusive picosegundos (según las energías implicadas en el fenómeno a observar).

También se investigó que algunas de las implicaciones que conlleva el trabajar con radiaciones, esto es, la radiación dependiendo de la energía que tenga y del tipo de partícula cargada o no de que se trate, ésta puede ser dañina a los seres vivos; de tal manera pues, que resulta vital el conocer como tratarlas y los efectos biológicos como consecuencias de su contacto cotidiano durante el trabajo.



## Capítulo 3. Fundamentos y características de la fibra óptica convencional y centelladora.

### 3.1.- Introducción a las fibras ópticas.

Una fibra óptica convencional es una varilla de vidrio transparente cubierta con un revestimiento de un material con refracción óptica menor. En su forma más simple consiste de un arreglo coaxial de dos vidrios homogéneos con distribución de índices de refracción como se muestra en la figura 3.1. La diferencia de índices de refracción de los vidrios permite que la luz viaje dentro del núcleo, manteniéndose confinada en él, con atenuaciones que dependen de la longitud de onda [59]. Por ello es común referirse a ellas como guías de ondas ópticas. Las fibras ópticas se clasifican principalmente por el perfil de índices de refracción de las dos capas centrales visto como una función del radio. El perfil más común, mostrado en la figura 3.1, tiene como distribución de índices una función de escalón, por lo que este tipo de fibras se conoce como: “fibras ópticas de índice en escalón”. Al cilindro interior le llamamos núcleo, al intermedio recubrimiento y al exterior protección, la cual cubre a la fibra óptica. El índice de refracción del recubrimiento debe ser menor al índice de refracción del núcleo para que se tenga el efecto de reflexión total interna y la luz viaje a través de la fibra óptica.

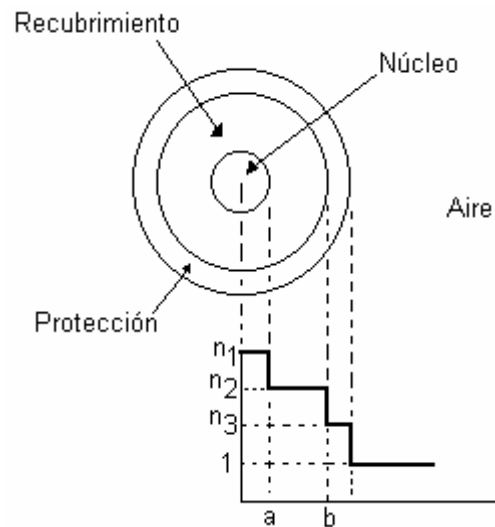


Figura 3.1. Perfil de índices de refracción para una fibra óptica del tipo índice de escalón”.

En las fibras ópticas existen otras distribuciones de índices de refracción, estas son: gradiente de índice, fibra óptica tipo “W”, fibra óptica birrefringente (la cual conserva el estado de polarización). Dependiendo de los materiales con los que se fabrican éstas (plástico, vidrio, cuarzo), permiten que se conduzca radiación o señales luminosas con porcentajes de transmisión hasta 70%. Las fibras ópticas son actualmente muy usadas en las comunicaciones, en la transmisión de imágenes en sistemas de video y en la conducción de energía desde los mJ hasta potencia de algunos kilowatt, para aplicaciones médicas e industriales, respectivamente.

Comercialmente se venden con protecciones adicionales para cuidar daños por el manejo de éstas, ver figura 3.2. La configuración básica es con las tres primeras capas: núcleo, recubrimiento y protección [60].

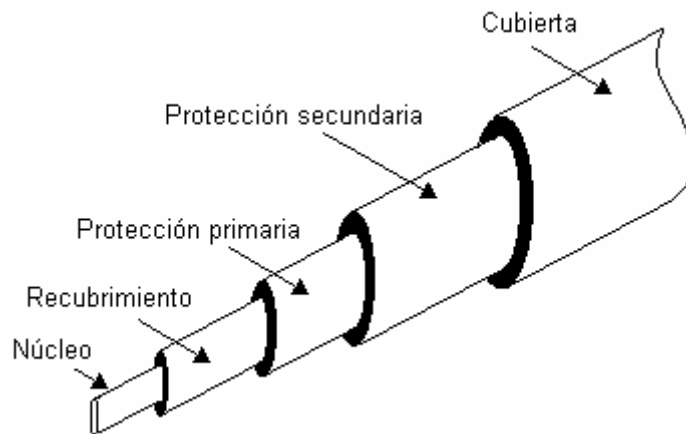


Figura 3.2. Configuración común de una fibra óptica.

En particular, las fibras ópticas centelladoras han logrado nuevos avances en las áreas de investigación e instrumentación [14-48], tales como:

- Imagenología empleando bombardeo con neutrones
- Discriminación de partículas
- Calorímetros
- Telescopios para rayos cósmicos
- Sistemas de imágenes en tiempo real
- Celdas de flujos, etc.

### 3.2.- Luz y propiedades ópticas de la materia.

La luz es de naturaleza electromagnética. Puede ser considerada como la propagación de paquetes (cuantos) u ondas de energía electromagnética [60]. El espectro electromagnético está dividido en diferentes regiones, por ejemplo: ultravioleta (*UV*), visible, cercano, medio, lejano infrarrojo (*IR*), microondas, ondas de radio, etc. El nombre *luz* es asociada a aquella radiación electromagnética que tiene una longitud de onda del orden de 0.1 a 100  $\mu\text{m}$  [9]. La luz de longitud de onda más corta que podemos ver es la violeta y es llamada ultravioleta, por otro lado, la de longitud más grande que podemos ver es la roja y es llamada visible. El rango infrarrojo está dividido en tres regiones: cercano infrarrojo de 0.9 a 1.5  $\mu\text{m}$ , el medio de 1.5 a 4  $\mu\text{m}$  y el lejano infrarrojo de 4 a 10  $\mu\text{m}$ . Las distintas porciones del espectro de radiación son estudiadas por diferentes áreas del conocimiento de la física.

La velocidad de la luz  $c_0$  en el vacío es independiente de la longitud de onda y puede ser expresada empleando las permitividades magnéticas y eléctricas respectivamente en espacio libre:

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ henry/m} \quad \text{y} \quad \epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12} \text{ farad/m}$$
$$c_0 = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} = 299,792,458.7 \text{ m/s} \quad (10)$$

por lo que la frecuencia de las ondas de luz en el vacío o cualquier otro medio en particular, se relaciona con la longitud de onda  $\lambda$ , por lo que se puede escribir:

$$v = \frac{c}{\lambda} \quad (11)$$

donde  $c$  es la velocidad de la luz en el medio.

La energía del fotón asociado relaciona su frecuencia por:

$$E = h \nu \quad (12)$$

donde  $h = 6.63 \times 10^{-34} \text{ J s}$ , ( $4.13 \times 10^{-15} \text{ eV s}$ ) y se le conoce como la constante de Planck.

### 3.2.1.- Radiometría.

Consideremos una onda que viaja a través de tres materiales. Todas las capas están hechas de diferentes sustancias llamadas medios. La figura 3.3, muestra qué pasa con un rayo de luz que viaja desde el primer medio hasta el segundo, y hasta el tercero.

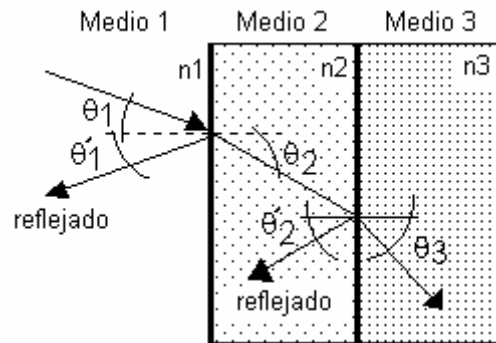


Figura 3.3. Luz atravesando materiales con diferente índice de refracción.

Parte de la luz incidente es reflejada desde la frontera planar entre el primer y segundo medio, de acuerdo con la Ley de la Reflexión de Euclides [59]:

$$\theta_1 = \theta'_1. \quad (13)$$

Una parte de la luz entra al plano del medio 2 a un ángulo diferente. El nuevo ángulo  $\theta_2$  está gobernado por la ley de la refracción, la cual fue descubierta en 1621 por Willebrord Snell (1580-1626), y es conocida como *Ley de Snell*:

$$n_1 \text{ sen } \theta_1 = n_2 \text{ sen } \theta_2 \quad (14)$$

donde  $n_1$  y  $n_2$  son los índices de refracción de los medios 1 y 2 respectivamente.

Un *índice de refracción* es una relación de la velocidad de la luz en el vacío  $c_0$  con referencia al medio  $c$ :

$$n = \frac{c_0}{c} \quad (15)$$

Dado que siempre tenemos  $c < c_0$ , el índice de refracción de un medio es siempre mayor que la unidad. La velocidad de la luz en un medio se relaciona directamente con la

constante dieléctrica  $\epsilon_r$  del medio, la cual subsecuentemente determina el índice de refracción:

$$n = \sqrt{\epsilon_r} \quad (16)$$

Generalmente,  $n$  está en función de la longitud de onda. La longitud de onda depende del índice de refracción, este hecho lo manifestó Newton en un experimento con un prisma y apreció la dispersión de la luz blanca en su espectro de colores.

Un índice de refracción está en dependencia con la longitud de onda, a este fenómeno se le conoce como dispersión. El cambio de  $n$  con  $\lambda$  es gradual usualmente, a menos de que  $\lambda$  se aproxime a la región donde el material no sea transparente. A continuación en la figura 3.4 se muestran las curvas de transparencia de algunos materiales ópticos [61].

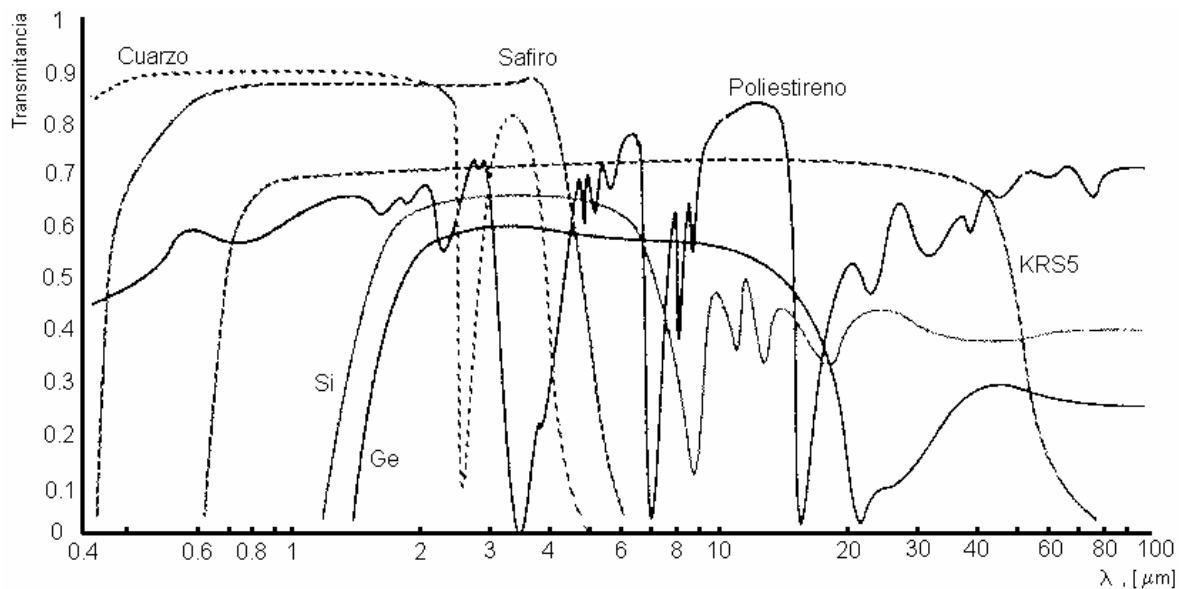


Figura 3.4. Transparencia característica para varios materiales ópticos.

### 3.2.2.- Propagación de la luz dentro de la fibra.

Para visualizar aun mejor la manera en que viaja la luz dentro de la fibra, consideremos ahora un cilindro de vidrio rodeado de aire, la luz que pega en sus paredes desde dentro será internamente reflejada siempre que el ángulo de incidencia en cada

reflexión sea mayor que  $\theta_c = \text{sen}^{-1} n_{\text{aire}}/n_1$ , donde  $n_1$  es el índice del cilindro o fibra [59], ver figura 3.5. Como mostraremos un rayo meridional (es decir, uno que es coplanar con el eje óptico) podría sufrir varias miles de reflexiones por metro cuando va rebotando a lo largo de la fibra hasta que sale en el extremo lejano. Si la fibra tiene un diámetro  $D$  y una longitud  $L$ , la longitud  $l$  recorrida por el rayo será:

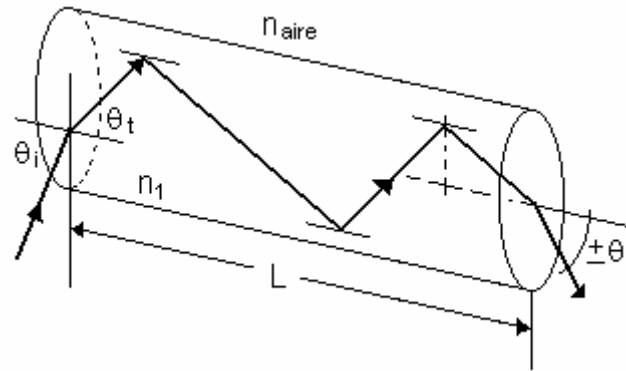


Figura 3.5. Rayos reflejados dentro de un cilindro dieléctrico.

$$l = L/\cos \theta_t \quad (17)$$

o de la Ley de Snell

$$l = n_1 L (n_f^2 - \text{sen}^2 \theta_i)^{-1/2} \quad (18)$$

El número  $N$  de reflexiones está entonces dado por

$$N = \frac{l}{D/\text{sen}\theta_t} \pm 1 \quad (19)$$

o

$$N = \frac{L \text{sen}\theta_i}{D(n_f^2 - \text{sen}2\theta_i)^{1/2}} \pm 1 \quad (20)$$

La superficie lisa de una fibra se debe mantener limpia de humedad, polvo, aceite, etc., si se desean evitar las fugas de luz, (a través del mecanismo de reflexión total interna frustrada). Similarmente, si un gran número de fibras se empacan muy próximas entre sí, la luz se puede colar de una fibra a otra en lo que se conoce como comunicación cruzada. Por estas razones es ahora costumbre revestir cada fibra con una cubierta transparente de índice más bajo llamado revestimiento [61-64]. Esta capa sólo necesita ser lo suficientemente gruesa para proveer el aislamiento deseado pero por otras razones generalmente ocupa

alrededor de un décimo del área de la sección transversal. Típicamente el núcleo de una fibra puede tener un índice  $n_f = 1.62$  y el revestimiento un índice  $n_c = 1.52$ .

La apertura numérica de un sistema se define en general como el producto del seno del semiángulo del rayo más oblicuo de entrada a un sistema, el cual es medido desde la normal a la superficie ( $b_{m\acute{a}x}$ ), por el índice de refracción del medio ( $n_o$ ) en el que está inmerso éste.

$$N.A. = n_o \text{ sen } b_{m\acute{a}x} \quad (21)$$

Aplicando la ley de Snell, la condición de reflexión total interna y la geometría del perfil en escalón de la fibra óptica [59]; la ecuación de la apertura se puede escribir como:

$$N.A. = (n_f^2 - n_c^2)^{1/2} \quad (22)$$

De esta manera, sólo la luz que es reflejada totalmente de manera interna viaja muy lejos dentro de la fibra óptica. Esto es, sólo los rayos que hacen un ángulo de  $\theta \leq \theta_c$ , el eje crítico de la fibra se propaga a lo largo de la fibra [62]. De la ley de Snell se tiene:

$$\text{sen}\theta_c = \frac{n_f}{n_o} \text{sen}\left(\frac{\pi}{2} - \phi_c\right) = \frac{n_f}{n_o} \cos\phi_c \quad (23)$$

cuando el índice del material adyacente de la fibra  $n_f$  (o  $n_o$ ), entonces

$$\text{sen}\theta_c = \frac{NA}{n_o} \quad (24)$$

tenemos que su valor numérico (apertura numérica  $NA$ ) decrece conforme  $n_c$  se aproxima a  $n_f$ .

### 3.3.- Teoría y funcionamiento de fibra centelladora.

Las fibras plásticas centelladoras comerciales estándares, consisten de un núcleo basado en poliestireno (PS) [16] y una cubierta de acrílico o polimetilmetacrilato (PMMA), a continuación se muestra la tabla 3.1 con algunos datos técnicos que proporcionan los fabricantes:

Material centellador en el núcleo .....	Poliestireno
Índice de refracción del núcleo .....	1.6
Densidad .....	1.05 g/cm <sup>3</sup>
Cubierta .....	Acrílico
Índice de la cubierta .....	1.49
Espesor de la cubierta .....	3% del diámetro del núcleo
Apertura numérica .....	0.58
Eficiencia de confinamiento .....	3.44% mínimo
Compatibilidad para vacío .....	Si
Temperatura de operación .....	20°C a 50°C
Número de átomos de H por cm <sup>3</sup> (núcleo) ... 4.82 x 10 <sup>22</sup>	
Número de átomos de C por cm <sup>3</sup> (núcleo) ... 4.85 x 10 <sup>22</sup>	
Número de átomos-electrones por cm <sup>3</sup> (núcleo) ... 3.4x10 <sup>23</sup>	

Tabla 3.1. *Propiedades ópticas y físicas de BICRON.*

El núcleo centellante contiene dopantes fluorescentes seleccionados para producir el centelleo deseado, además de proporcionar las características ópticas y resistencia a la radiación [14].

Otros fabricantes como KURARAY, también reportan algunos datos, tal y como se muestra en la siguiente tabla 3.2:

Materiales					
		Material	Índice de refracción	Densidad g/cm <sup>3</sup>	No. de átomos por cm <sup>3</sup>
Núcleo		Poliestireno (PS)	$n_D = 1.59$	1.05	C: 4.9 x 10 <sup>22</sup> H: 4.9 x 10 <sup>22</sup>
Cubierta	más interna	PMMA	$n_D = 1.49$	1.19	C: 3.6 x 10 <sup>22</sup> H: 5.7 x 10 <sup>22</sup> O: 1.4 x 10 <sup>22</sup>
	más externa	Polímero fluorinado (FP)	$n_D = 1.42$	1.43	

Tabla 3.2. *Propiedades ópticas y físicas de las fibras centelladoras de KURARAY.*



Este fabricante reporta algunas especificaciones geométricas de sus fibras, como se muestra en la figura 3.6:

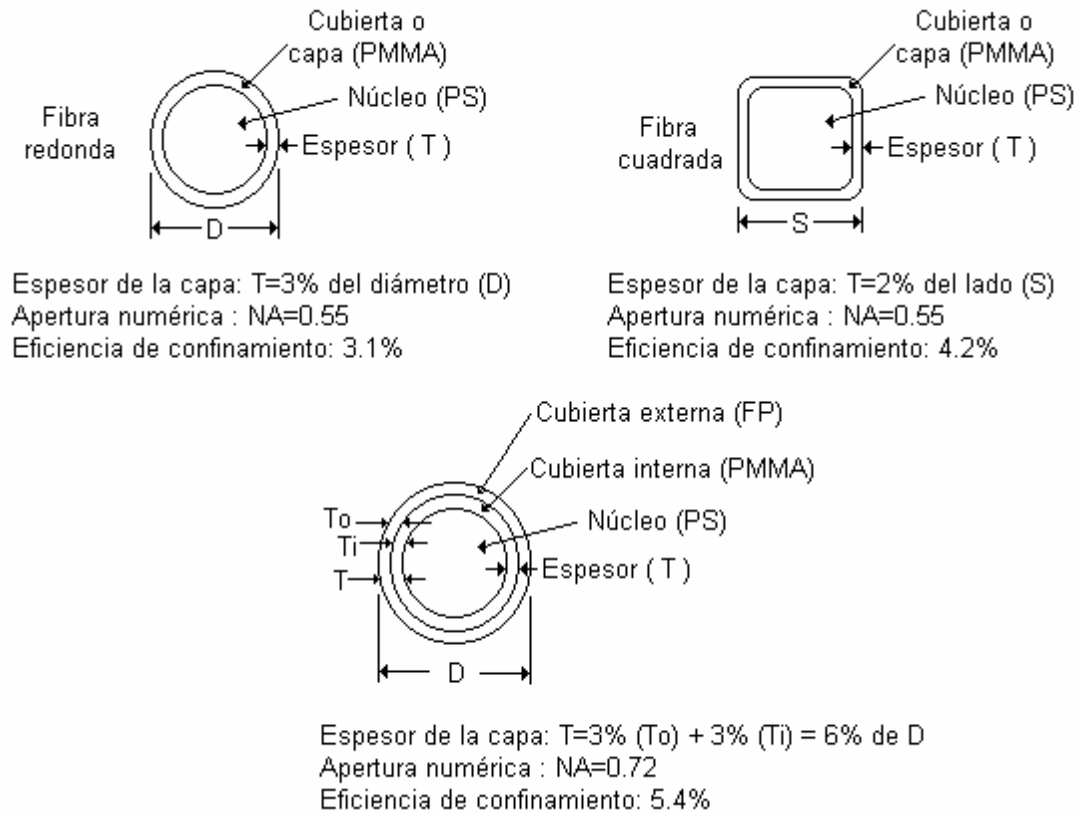


Figura 3.6. Sección transversal y espesor de la cubierta.

La fibra óptica centelladora que empleamos posee las siguientes características mostradas en la tabla 3.3:

Fibras centelladoras				
Descripción	Color	Pico de emisión (nm)	Tiempo de decaimiento (ns)	Características
Fibra centelladora de Kuraray SCF38	Azul	428	2.3	Uso genérico

Tabla 3.3. Propiedades ópticas para Kuraray.

### 3.3.1.- Mecanismo de transmisión y cubierta.

#### 3.3.1.1.- Cubierta simple (single cladding).

La cubierta simple o sencilla es el tipo estándar de cubierta.

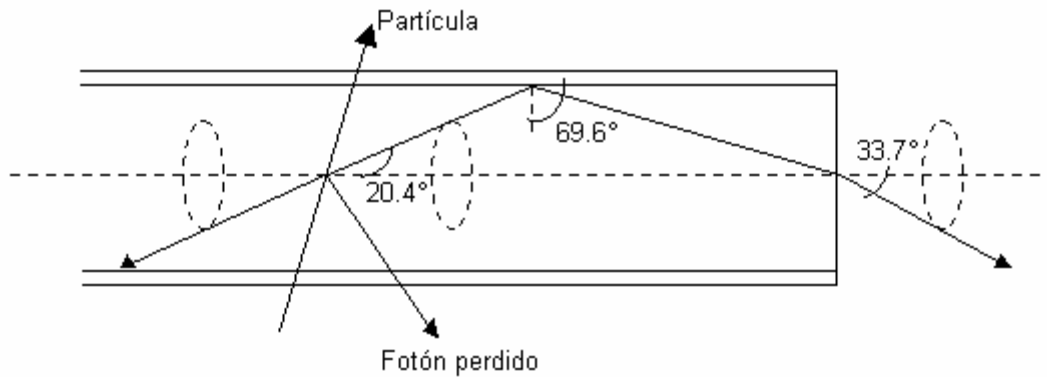


Figura 3.7. Fibra óptica con cubierta sencilla.

#### 3.3.1.2.- Cubierta múltiple (multi cladding).

Las fibras ópticas multi cubierta tienen 50% más de eficiencia de confinamiento de la luz, en comparación a las de cubierta simple.

En las fibras claras (*Clear-PS fiber*) con cubierta múltiple tienen una *N.A.* extremadamente alta, en comparación a las fibras de *PS* o *PMMA*, y son ampliamente utilizadas para la transmisión de luz. Las fibras de cubierta múltiple tienen un factor de atenuación grande, ligeramente mayor que las de cubierta sencilla [14].

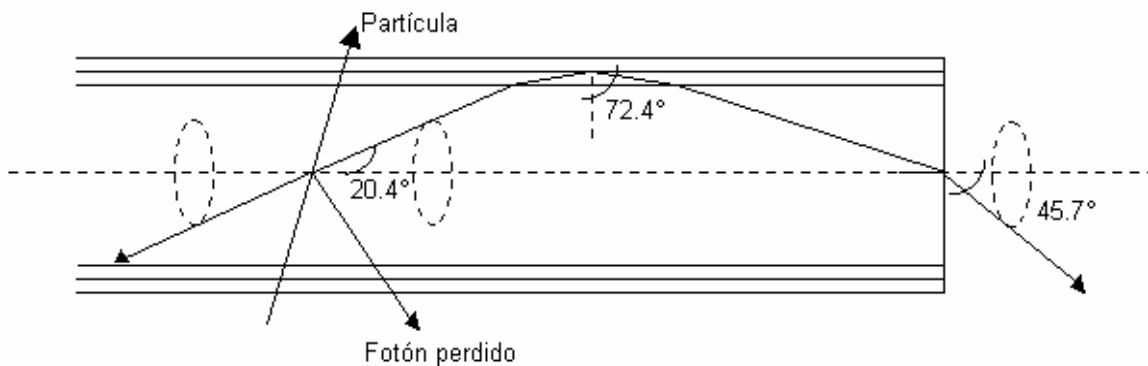


Figura 3.8. Fibra óptica con cubierta múltiple.

### 3.3.1.3.- Fibra óptica de índice escalonado.

Una fibra de índice escalonado (como lo es el caso para las fibras centelladoras) es aquella en la cual el índice del núcleo,  $n_f$  es constante y más grande que el índice de la cubierta,  $n_2$  (como se observó en la figura 3.1). Ya que  $n_f > n_c$ , existe reflexión total interna. Es de notarse que la fibra de índice escalonado difiere de una guía planar dieléctrica sólo en que se trata de un caso en dos dimensiones con una sección transversal circular [63].

El rayo meridional mencionado, se ilustra en la figura 3.9:

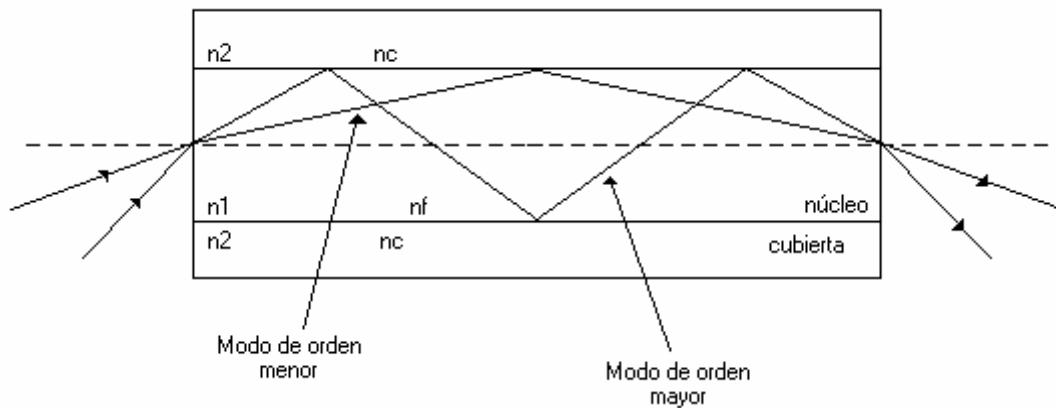


Figura 3.9. Trayectoria planar de un rayo meridional.

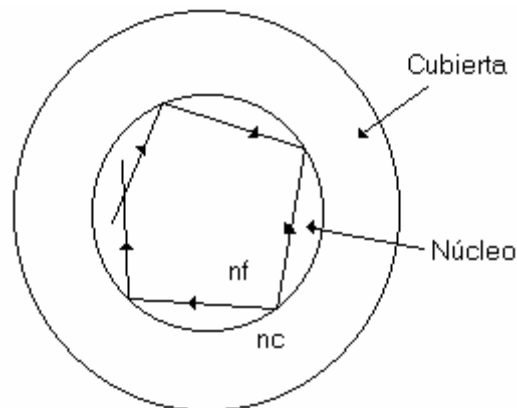


Figura 3.10. Trayectoria del haz en un medio en tres dimensiones.

### 3.3.1.4- Propagación y pérdidas de la luz en fibra óptica.

Las pérdidas de intensidad en las fibras ópticas pueden ser debidas a varias causas. Entre ellas, tenemos [61-64]:

- Absorción por impurezas.
- Dispersión por impurezas o por los defectos de la interface molecular del silicio de la cubierta al núcleo, produciendo dispersión Rayleigh.
- Curvaturas y microcurvaturas en la fibra.
- Dispersión y reflexión debida a los empalmes.

Todos estos fenómenos contribuyen a la degradación de la transmisión en la fibra. Por ejemplo, para el caso de las telecomunicaciones, la atenuación mínima de una fibra normal ocurre alrededor de los 720 nm de longitud de onda y es del orden de 0.2 dB/km.

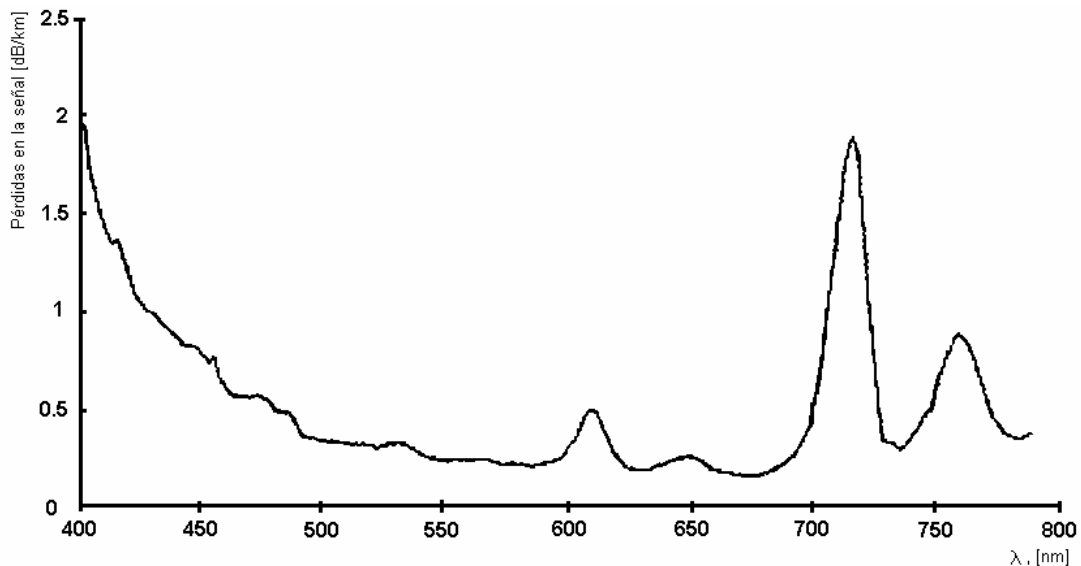


Figura 3.11 Espectro de pérdidas de propagación para fibras en telecomunicaciones.

Para el caso de las fibras ópticas claras para física nuclear, tenemos el siguiente espectro de pérdida de la fibra de Kuraray [14]:

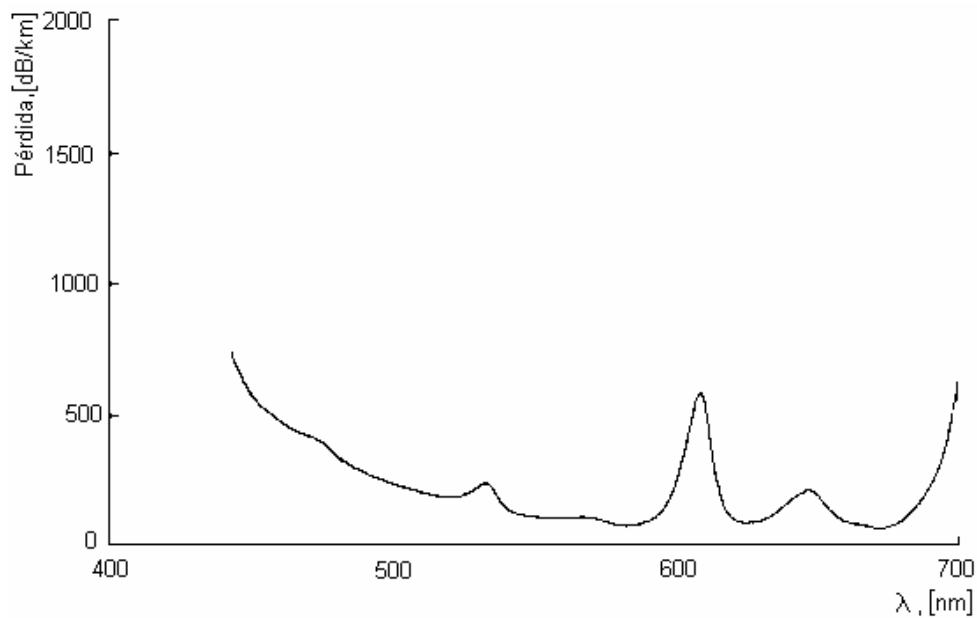


Figura 3.12. *Espectro de pérdidas de propagación de la fibra clara de Kuraray.*

El agua o mejor dicho el ion  $H_2O$ , que se encuentra fuertemente presente como impureza en la fibra, genera un pico de atenuación alrededor de los 1430 nm [61].

La dispersión Rayleigh representa el límite físico de atenuación, aumenta fuertemente cuando la longitud de onda disminuye. Ésta es la razón principal del por qué en las telecomunicaciones ópticas se usa luz infrarroja.

Referente a las curvaturas y desde el punto de vista de los rayos ópticos, las condiciones de la reflexión se modifican: cuando la guía está torcida, un rayo que se reflejó cuando la guía era recta puede escapar de él. Desde el punto de vista de ondas ópticas, la perturbación crea acoplamiento de los modos guiados a modos de radiación.

Las fibras monomodo pueden doblarse por debajo de los 10 cm de radio de curvatura sin pérdida significativa, pero para radios más bajos, las pérdidas varían exponencialmente con respecto al radio de curvatura.

### **3.4.- Tipo de orientación del polímero de las fibras con núcleo de poliestireno (PS).**

**Tipo estándar** (Non-S type): El núcleo de *PS* es la cadena más común de poliestireno no orientado, es ópticamente isotrópico y muy transparente. Este tipo convencional estándar tiene buena longitud de atenuación, pero muestra una cierta fragilidad ante esfuerzos mecánicos por dobleces ante la manipulación durante su ensamblaje [14].

**Tipo S** (S): El núcleo posee una orientación molecular sobre la línea de propagación longitudinal. Este tipo de fibra es mecánicamente fuerte contra malos manejos sacrificando el factor de transparencia.

La atenuación lineal de este tipo de fibras se acerca al 10% menos que la del tipo estándar.

### **3.5.- Proceso de centelleo.**

Las fibras centelladoras combinan la tecnología de los materiales centelladores con la tecnología de las fibras ópticas plásticas [16], ver figura 3.13. Una fibra centelladora estándar consiste de un núcleo con base de poliestireno (*PS*) con un índice de reflexión  $n=1.6$  y polimetilmetacrilato (*PMMA*) con índice  $n=1.49$  como capa superior con espesor de 3mm.

La calidad de la interface óptica entre el núcleo y la(s) cubierta(s), determina las pérdidas de la señal emitida, producto del efecto centellador del núcleo.

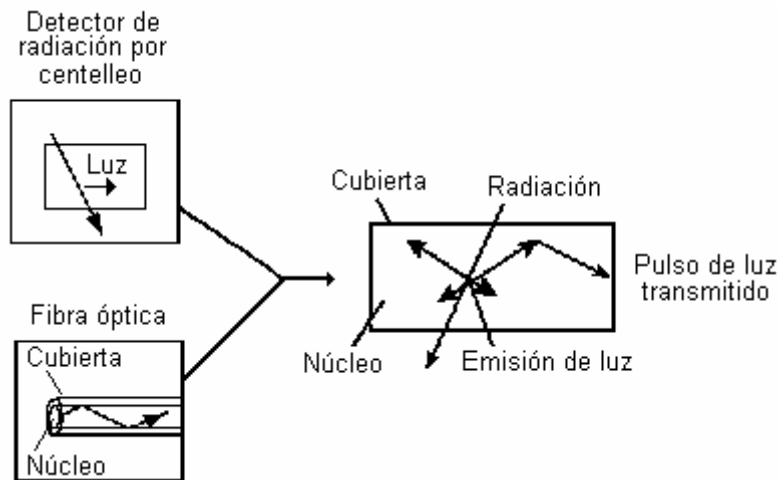


Figura 3.13. *Proceso interno de centelleo y transmisión de la luz dentro de la fibra.*

El proceso de centelleo consiste en la absorción de una forma de energía (luz, calor, esfuerzo mecánico, reacción química, radiación ionizante, etc.) y su remisión como luz. Se denomina luminiscencia; cuando la emisión de luz ocurre inmediatamente después de la excitación, en tiempos inferiores a  $10^{-8}$  s. Se conoce como fluorescencia; si se forma un estado excitado que sea metaestable, si la emisión se retrasa (puede durar desde algunos microsegundos hasta horas dependiendo del material), entonces el fenómeno se denomina fosforescencia. Lógicamente sólo los materiales fluorescentes pueden emplearse como detectores en aplicaciones como la descrita en este trabajo, el proceso de conversión de energía depende de la naturaleza inorgánica u orgánica del material y para el uso de cada uno de ellos se requieren condiciones específicas.

El proceso centellador es el resultado de la excitación molecular del estado del singlete  $\pi$  del polímero, producido por la radiación ionizante a ser detectada [65]. Hasta entonces es posible saber sobre esta radiación estudiando el pico de fluorescencia obtenido, como se muestra en la figura 3.14 [4].

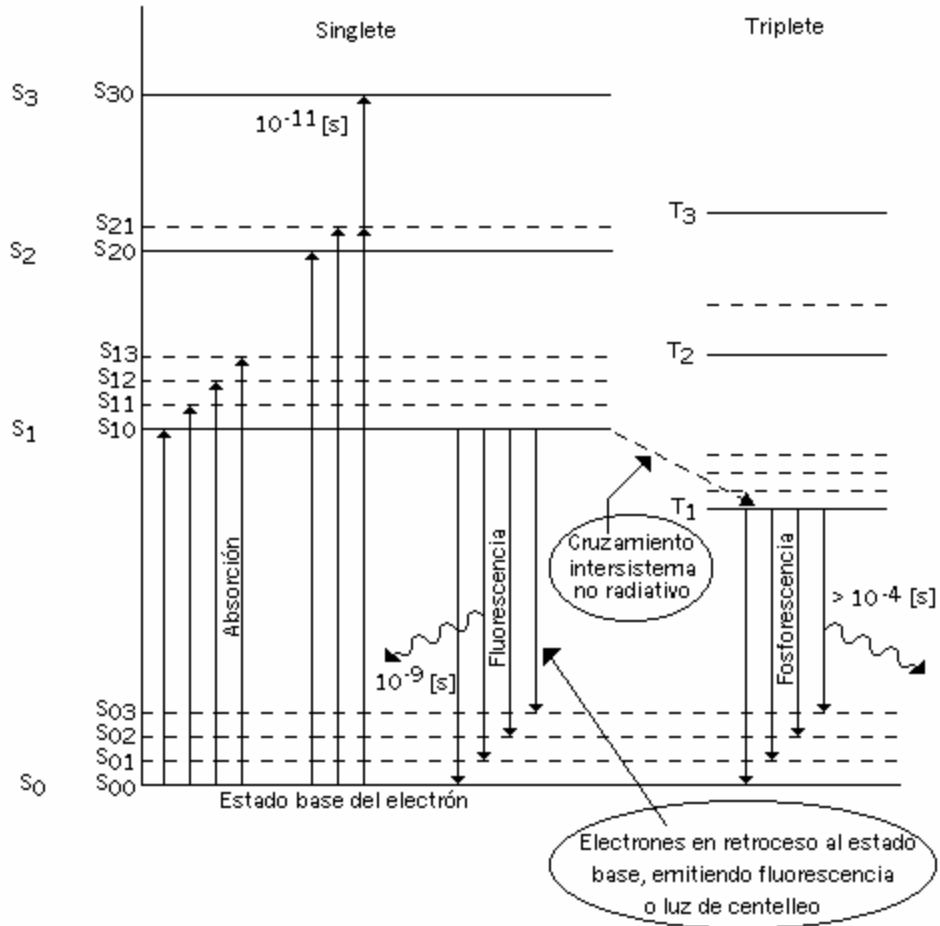


Figura 3.14. *Excitación del electrón a niveles altos de energía cuando pasa una partícula cargada, absorbiendo parte de su energía.*

Generalmente, la longitud de onda del pico de emisión de las fibras de poliestireno está centrado en 280 nm [65], que es fuera del rango visible, en donde mayormente son sensibles los *PMTs* de costo más accesibles. Por esta razón, el núcleo de las fibras *PS* son dopadas o “teñidas” con una o dos “tintas”, que corren en frecuencia hacia el rojo la señal luminosa emitida.

La tinta primera o primaria es excitada por la energía no radiactiva transferida por el proceso del estado excitado del polímero. Entonces la emisión del centellador depende de la tinta primaria y típicamente se ubica fuera del rango sensible de los *PMTs* convencionales, como se muestra en la figura 3.15 [49], así que se torna necesario el empleo de un segundo tinte.



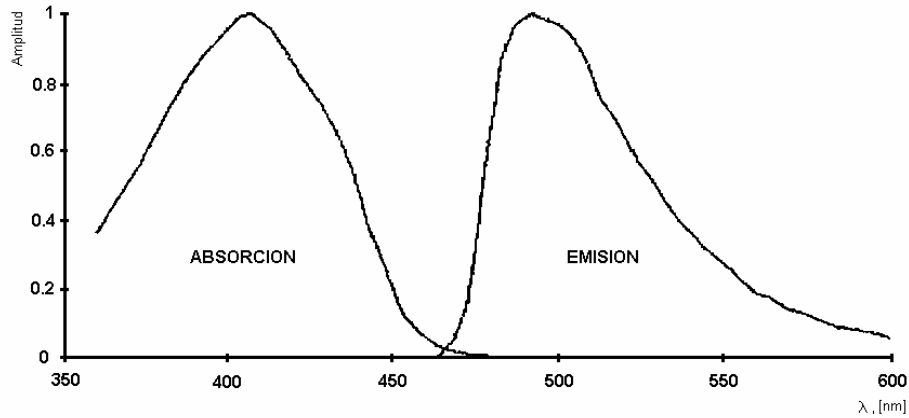


Figura 3.15. Espectros de absorción y emisión típicos de una fibra centelladora.

La banda de absorción de esta nueva tinta, debe sobreponerse a la banda de emisión de la tinta primaria, para entonces emitir preferentemente en el rango sensible del *PMT*. La excitación de la tinta secundaria es producto de la transferencia de energía radioactiva que implicó la desexcitación de la primaria por la emisión de fotones; éstos fueron reabsorbidos por la secundaria que, a su vez, al procurar su estado basal, emite un fotón en el rango sensible del *PMT* [65]. La emisión de la tinta secundaria está típicamente dentro del rango desde los 400 a 650 nm, como se muestra en la figura 3.16 [49].

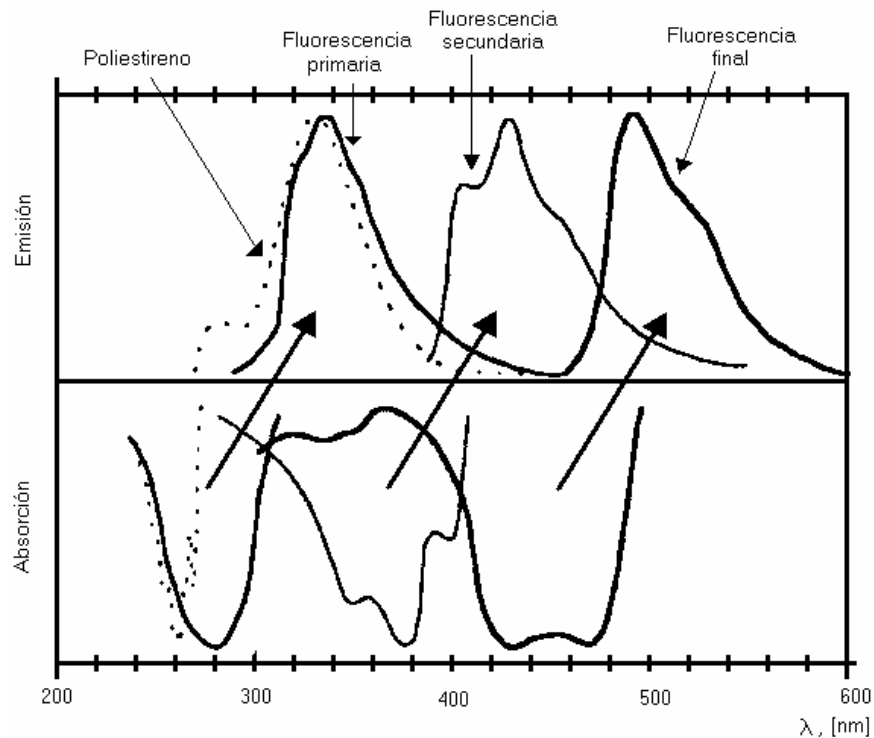


Figura 3.16. Espectros de absorción y emisión típicos de una fibra centelladora dopada con varias tintas.

A continuación se muestra el espectro de emisión para la fibra SCSF-38 de Kuraray [14], algunos de los parámetros de estas fibras están dados en la tabla 3.3.

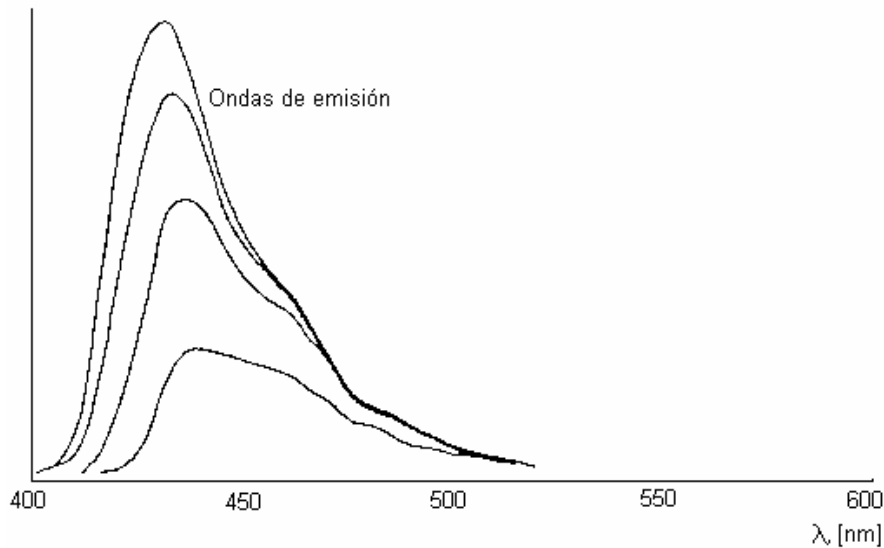


Figura 3.17. Espectros de emisión para fibras de Kuraray con excitación a 350 nm.

La intensidad del pulso luminoso emitida por el material centellador, es directamente proporcional a la energía de la radiación ionizante absorbida.

Por estas razones, las fibras centelladoras han sido ampliamente utilizadas en experimentos de física de altas energías. En los últimos años, éstas han sido usadas para desarrollar detectores de alta resolución espacial y temporal para rayos gama, especialmente en el campo de imagenología en física médica[50]. Esta tecnología de fibras ópticas centelladoras posee un gran potencial en la configuración de detectores-colectores “trackings” para sistemas de detección de partículas cargadas, que son en esencia la nueva generación en detectores empleados en los nuevos aceleradores [15].

Cabe aclarar que las fibras centelladoras son elementos que se queman, es decir, dado el proceso con radiación al que son sometidas, éstas presentan una degradación que no es reversible [21]; por lo que implica reemplazar este elemento óptico, por otro nuevo después de emplearse por un tiempo de uso.

### **3.5.1.- El fenómeno de fluorescencia.**

La fluorescencia es una propiedad de los cuerpos que, al ser expuestos a los rayos ultravioletas o a la luz visible, transforman estas radiaciones y emiten luz a una longitud de onda mayor que la de los rayos incidentes [11].

Cuando los fotones de una radiación chocan con los átomos y moléculas de los cuerpos fluorescentes, estas partículas absorben su energía y quedan excitadas. El retorno a su estado normal se efectúa por etapas, en el curso de cada una de las cuales la partícula pierde una parte de su exceso de energía en forma de radiación de longitud de onda mayor que la de la radiación incidente. La mayoría de las veces, esta radiación son rayos ultravioleta [11] cuyas onda, demasiado pequeñas, no impresionan a la retina y son invisibles; pero las nuevas radiaciones emitidas por el cuerpo fluorescente pertenecen al espectro visible. En este fenómeno estriban los efectos luminosos designados con los nombres de luz negra.

Un ejemplo muy común es el de las lámparas fluorescentes, una descarga eléctrica en el vapor de mercurio da lugar a una emisión de rayos ultravioleta e invisibles que, al excitar la sustancia del revestimiento fluorescente del tubo, provocan la emisión del mismo de luz visible. También los rayos X y los rayos catódicos provocan la fluorescencia de muchas sustancias, especialmente la de los sulfuros que constituyen el revestimiento de las pantallas de los aparatos de radiología, televisores, etc.

Es decir, la fluorescencia es la emisión luminosa originada por otra fuente.

El fenómeno de fluorescencia no debe confundirse con el de fosforescencia.

### **3.5.2.- El fenómeno de fosforescencia.**

El fenómeno de la fluorescencia, se distingue en que la luminiscencia del cuerpo fluorescente cesa en cuando se suprimen las radiaciones que excitan sus átomos o

moléculas, mientras que la fosforescencia de los sulfuros alcalinos expuestos a una insolación intensa puede prolongarse durante varios días.

Los cuerpos absolutamente puros no son fosforescentes, pero pueden presentar fosforescencia cuando contienen impurezas [11], a las cuales se les da el nombre de fosforógenos. Las radiaciones incidentes (luz, rayos X, rayos ultravioleta, etc) excitan los fosforógenos y éstos provocan la luminiscencia mientras no hayan vuelto a su estado de equilibrio. La índole de la fosforescencia determina el color de la luz emitida: una ínfima proporción de cobre en el sulfuro de zinc da una fosforescencia color verde, mientras que el manganeso la da amarilla, anaranjada o roja, según las proporciones. Las sustancias fosforescentes más empleadas con los sulfuros alcalinotérreos, los de zinc y de cadmio.

### 3.6.- Bombeo en las fibras centelladoras.

El bombeo de la luz dentro de las fibras dopadas, se puede llevar a cabo de dos maneras principalmente:

- Bombeo longitudinal.
- Bombeo transverso.

El bombeo longitudinal es empleado para introducir luz dentro de las fibras dopadas empleadas en telecomunicaciones (principalmente), éstas requieren de una fuente de luz que emite con  $\lambda$  de 980 nm aproximadamente, los dopantes de la fibra responden emitiendo del orden de 1550 nm, como se muestra en la figura 3.18.

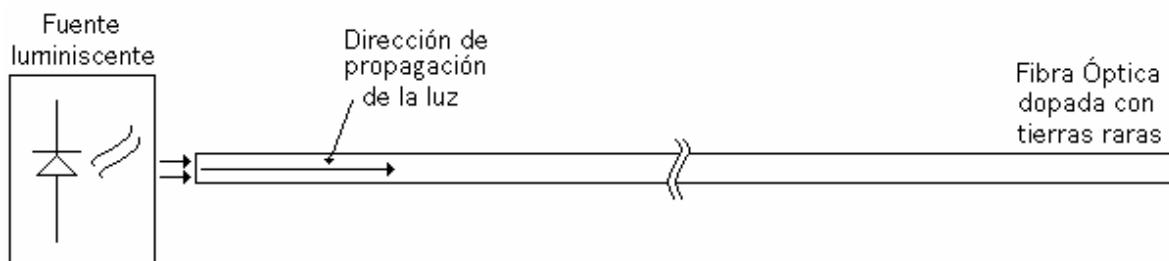


Figura 3.18. Bombeo longitudinal empleado en fibras dopadas en telecomunicaciones.

El bombeo transverso es el que se genera cuando se emplean fibras ópticas centelladoras. En este esquema, generalmente la fuente radioactiva emite radiación electromagnética de muy alta energía, en la figura 3.19 se muestra el esquema del bombeo transverso.

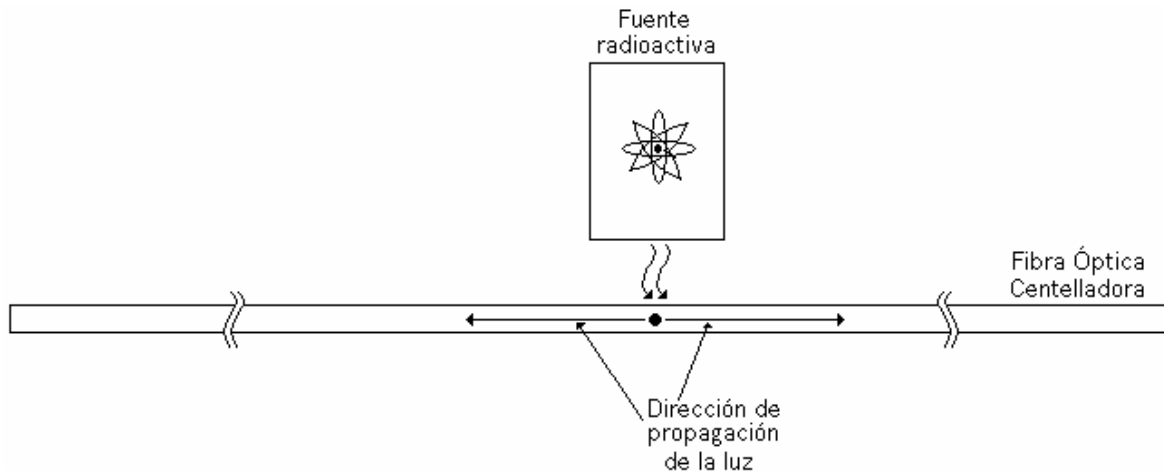


Figura 3.19. Bombeo transverso generado en fibras centelladoras dopadas.

Al interaccionar la radiación emitida por la fuente con los materiales dopantes de la fibra (en el interior de la misma), se emiten pulsos de luz corridas fuertemente hacia el visible, de tal manera que podemos afirmar, que el bombeo longitudinal para fibras para telecomunicaciones y el bombeo transverso de fibras para física de radioaciones, trabajan bajo el mismo principio de bombeo. El bombeo transverso también se encuentra en sistemas de láseres con fibra, como se muestra en la figura 3.20 [66]:

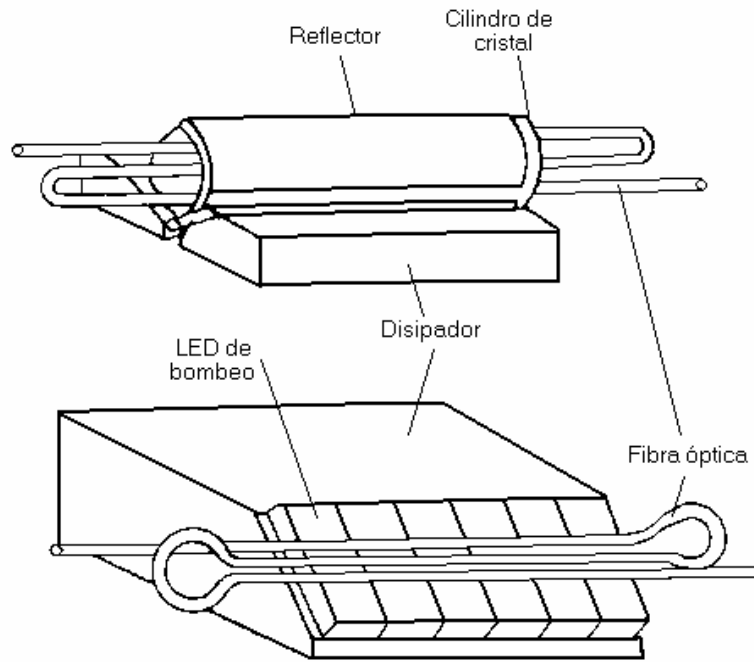


Figura 3.20. Principio de operación del bombeo transversal.

El dispositivo de bombeo (led de bombeo o lámparas de flash), aplica pulsos luminosos a un serpentín de un mismo tramo de la fibra; de esta manera se induce la generación de pulsos luminosos en régimen láser.

El sistema de ecuaciones de razón que modelan el cálculo de lo que sucede en la fibra, es el siguiente [67-72]:

$$\frac{dP_p(z)}{dz} = -\gamma_p(z)P_p(z) \quad (25)$$

$$\frac{dP_s^\pm(z, \lambda_i)}{dz} = \pm G_e(z, \lambda_i)[P_s^\pm(z, \lambda_i) + P_o] - G_a(z, \lambda_i)P_s^\pm(z, \lambda_i) \quad (26)$$

en donde  $z$  es la coordenada longitudinal a través del eje de la fibra óptica;  $P_p(z)$  es la potencia de bombeo de la fibra centelladora dopada;  $\gamma_p(z)$  es el coeficiente de la absorción del bombeo dependiente del cambio de la coordenada ( $z$ ) a través del eje de la fibra dopada;

$P_s^\pm(z, \lambda_i)$  es la densidad espectral de la potencia de la señal dependiente de la longitud de onda ( $\lambda$ ) y de la fibra óptica ( $z$ ); en donde  $P_s^+$  corresponde a la dirección coincidente de la señal de radiación con la señal de bombeo;  $P_s^-$  corresponde a la dirección cuando la señal de radiación es contraria a la señal de bombeo;  $G_e(z, \lambda_i)$  es el coeficiente de amplificación en potencia para la radiación espontánea;  $G_a(z, \lambda_i)$  es el coeficiente de absorción en potencia para la radiación espontánea;  $P_o$  es el equivalente del espectro de la densidad de potencia de entrada de la radiación espontánea amplificada.

### **Conclusiones al Capítulo 3.**

Se investigaron los fundamentos de la óptica de fibras, tales como el índice de refracción. Los tipos convencionales de fibras: escalonada, de índice escalonada, etc. Los materiales más comunes tales como cuarzo, vidrio o plástico principalmente. También se comento lo referente a radiometría e inserción de la luz en una fibra óptica.

Se hizo una descripción básica del funcionamiento de las fibras centelladoras, las cuales, conjugan los principios de las fibras ópticas convencionales con los de los dispositivos detectores centelladores, éstos últimos empleados fuertemente en el ámbito de la física de radiaciones.

Se reportaron algunas de las principales causas que producen pérdidas de la luz dentro de las fibras, como lo son: pérdidas por impurezas dentro de la fibra, dispersión Rayleigh, curvaturas, dispersión por empalmes ineficientes, etc.

Se describió el principio de funcionamiento del evento de fosforescencia y fluorescencia (o luminiscencia), en donde esta última, es debida a eventos de emisión lumínica por el retroceso de electrones a su estado base, con tiempos de duración del orden de picosegundos (evento sumamente rápido); mientras que la fosforescencia son eventos similares, pero que conllevan tiempos mucho más lentos, del orden de decenas de milisegundos, etc.

Finalmente, se investigó el proceso de funcionamiento de las fibras centelladoras cuando éstas realizan el fenómeno llamado corrimiento de frecuencias. Este fenómeno, trata el hecho de que los diferentes materiales centelladores que posee la fibra (o de que está dopada), son sensibles a diferentes longitud de ondas, por lo que absorben y emiten en longitudes tales que, se genera un efecto de encadenamiento de un centellador a otro. El primero absorbe a baja longitud, emitiendo en una más alta; entonces el segundo centellador lo absorbe y emite en otro aún más alta; y así sucesivamente, etc. En este proceso se requirió del proceso de bombeo, que significa la manera en que la radiación o luz entra o interaccionaron el material óptico- centellador de las fibras; el más común es el bombeo longitudinal (empleado fuertemente en telecomunicaciones).



## Capítulo 4. Caracterización de las fibras centelladoras.

### 4.1.- Experimento propuesto para la caracterización.

El experimento consiste, en el empleo de fibra centelladora como elemento sensor de la radiación, en los extremos del maso de estas fibras van acoplados dos fotomultiplicadores, estos a su vez, están conectados a dos amplificadores de respuesta rápida, para posteriormente conectarse al convertidor de tiempo a amplitud (*TAC*), éste hará la conversión del intervalo de tiempo generado por las señales de los *PMTs* (señal de *INICIO* y *PARO*) a una equivalente en amplitud, la señal resultante será capturada por una tarjeta multicanal para entonces leer estos datos en una *PC*. En la figura 4.1 se esquematiza esta implementación llevada a cabo:

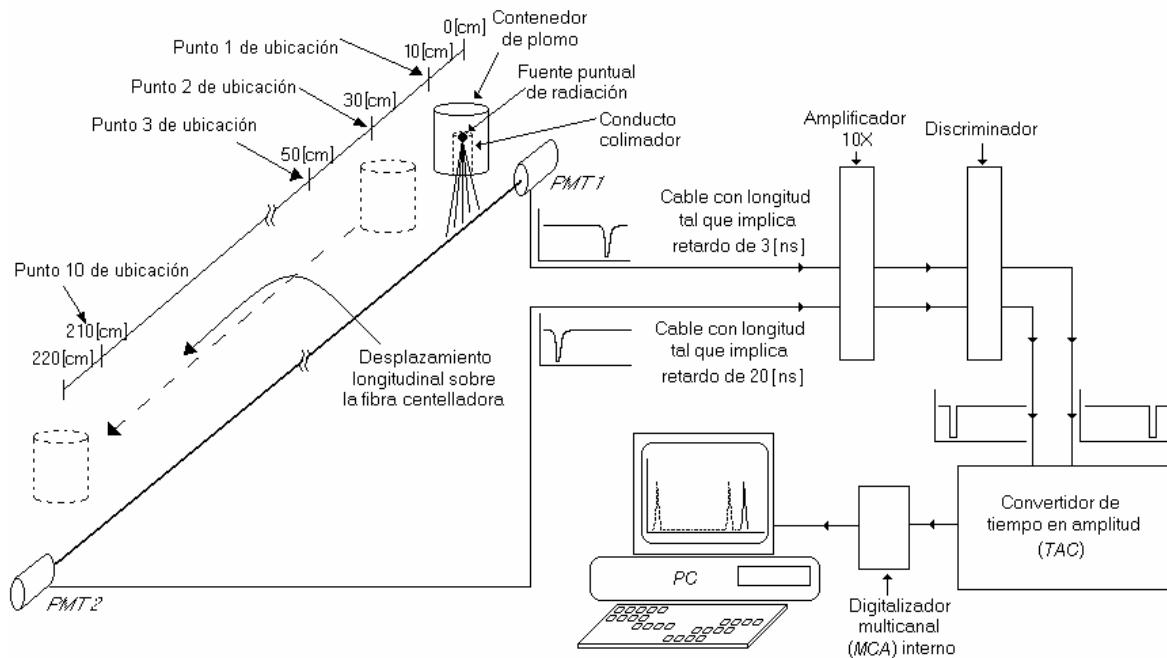


Figura 4.1. Esquema básico propuesto del detector de radiación.

### 4.2.- Fibra centelladora.

Para esta parte de la caracterización de la fibra óptica centelladora, empleamos fibra centelladora de BICRON (para conocer sus parámetros, referirse a la Tabla 3.1, pág 79), que se obtuvo como desecho de algunos experimentos realizados en el acelerador CERN.

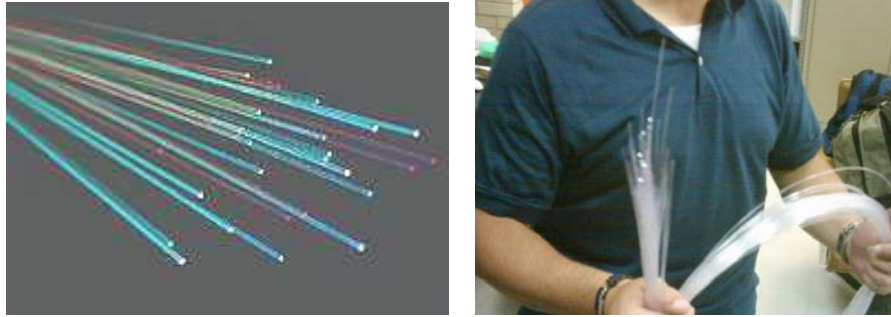


Figura 4.2. Imágenes mostrando las fibras ópticas centelladoras y guía óptica.

De la página electrónica de BICRON-Saint Gobain, obtenemos que ellos la tienen catalogada por el número BCF-12, fibra plástica centelladora de emisión en el azul; además comentan que los detectores de centelleo de materiales plásticos y fibras ópticas son empleados para la investigación y aplicaciones industriales tales como:

- Formación de imágenes por neutrones
- Discriminación de partículas
- Calorímetros
- Detección de rayos cósmicos
- Sistemas de adquisición de imágenes en tiempo real
- Celdas de flujo, entre muchas otras. Los datos de BICRON comentando que esta fibra es de las más requeridas para hacer detectores de radiación.

### 4.3.- Implementación física de las primeras pruebas.

La primera prueba con fibras, requirió hacer el arreglo mostrado en la figura 4.3.

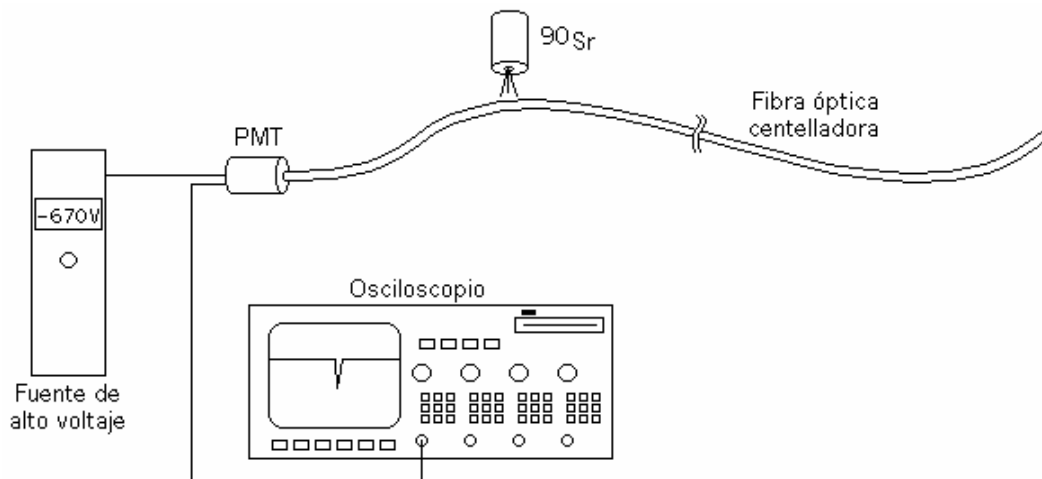


Figura 4.3. Imágenes mostrando el maso de tres fibras centelladoras.

Ésta empleó un empalme de 3 fibras centelladoras, obteniendo así, un solo maso con espesor de 3 fibras y con 2.2 m de largo aproximadamente (referirse a la Tabla 3.1). Este maso se forró de cinta de teflón convencional para minimizar las pérdidas de luz, confinar el mayor número de fotones producto del centelleo, aislar del ruido luminoso externo, además de proporcionar soporte mecánico al arreglo centellador:

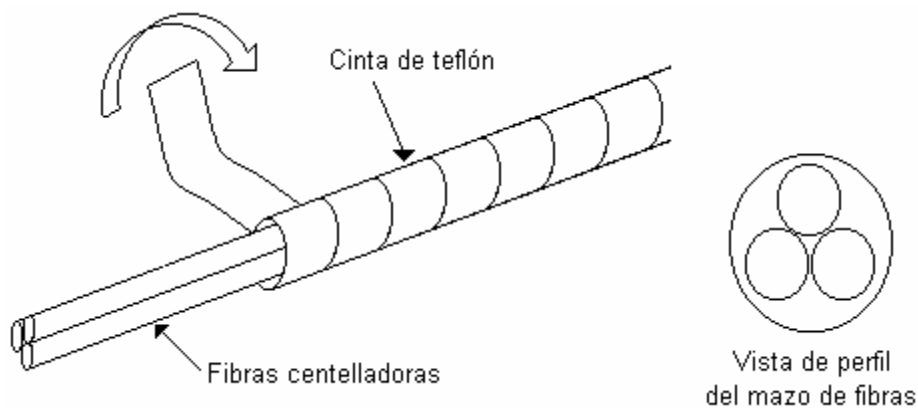


Figura 4.4. Figura mostrando el maso de tres fibras centelladoras.



Figura 4.5. Imagen real mostrando el maso de tres fibras centelladoras.

Posteriormente, a este maso se le acopló una base de lucita con forma cilíndrica (se empleó este material, ya que es propicio para su manejo en los tornos mecánicos y conformar adecuadamente su forma cilíndrica), para luego acoplar todo al fotomultiplicador Hamamatsu serie R7400P (descrito en el capítulo 2). La fijación de las fibras a la base de lucita se hizo con pegamento comercial epóxico de secado en 5 minutos.

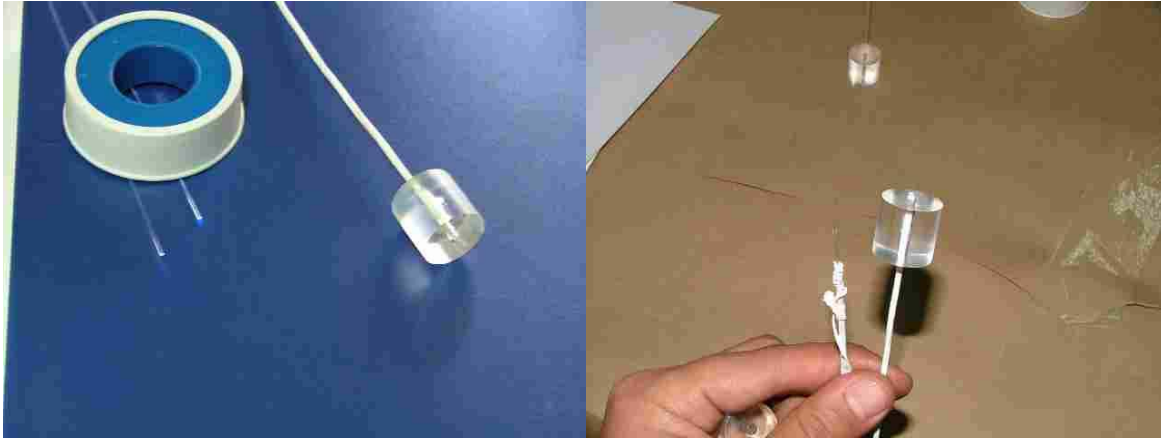


Figura 4.6. Acople del maso de fibras a la base de lucita.

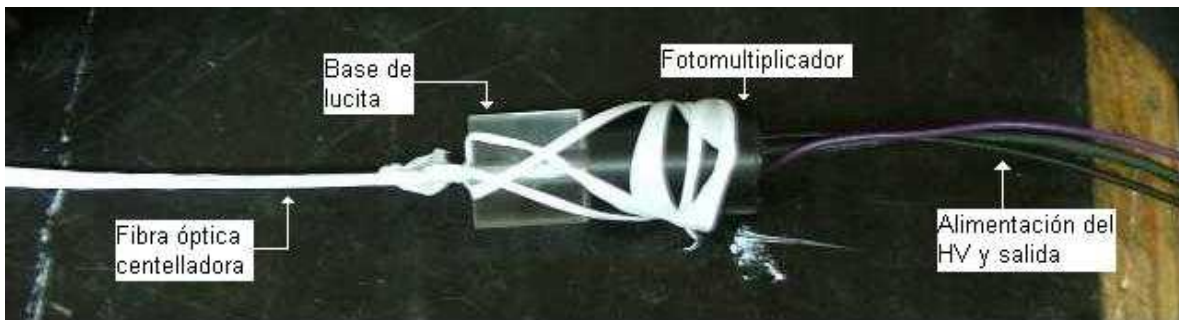


Figura 4.7. Acople del maso de fibras a la base de lucita y al PMT.

Para realizar estas primeras pruebas, empleamos como fuente radioactiva de estroncio 90 ( $^{90}\text{Sr}$ ), ésta emite radiación beta (electrones) de energía relativamente alta, lo cual implica no observar por el colimador a la muestra radioactiva confinada dentro del contenedor de plomo y procurar minimizar el tiempo de trabajo (exposición) con ella. A continuación se muestra la información extraída de la Tabla de Radionúclidos [73] para el  $^{90}\text{Sr}$ :

Sr 90
28,64 a
$\beta^-$ 0,5
no $\gamma$
g
$\sigma$ 0,014

Figura 4.8. Información extraída de la Tabla de Radionúclidos para Estroncio 90 ( $^{90}\text{Sr}$ ), mostrando la emisión de betas negativas de 0.5 MeV.

Este radionúclido es una fuente de betas negativas puras, es decir, emite betas y produce un hijo estable y un estado base [3], tal y como se muestra en la figura 4.9:

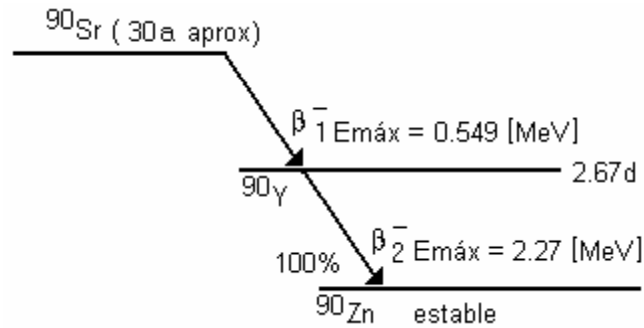


Figura 4.9. Esquema de transformación para la fuente de betas empleada en el experimento (Estroncio 90).

Conforme se ajustó el alto voltaje ( $HV$ ) a hasta  $-670 \text{ V}$ , se empezó a observar más claramente una señal electrónica en el osciloscopio (recordemos que dada la naturaleza de construcción de estos  $PMTs$ , los empleados en el experimento requieren alimentación negativa, con un valor máximo de hasta  $-1000\text{V}$  [54]). La amplitud de esta señal también dependía de la ubicación de la fuente de radiación beta a lo largo de la fibra, así como de la distancia entre ambos elementos. El ajuste óptimo dado en las perillas del osciloscopio fue de ganancia en amplitud de  $5 \text{ mV}$  y de  $10 \text{ ns}$  en el ajuste del tiempo. La figura 4.10 se aprecia una muestra de estas señales adquiridas directamente del  $PMT1$ .

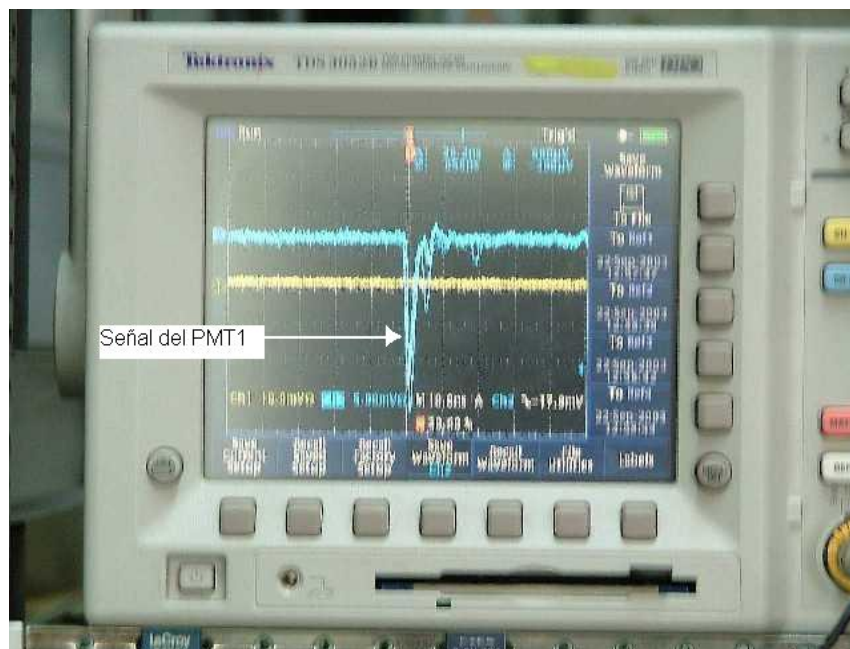


Figura 4.10. Lectura electrónica en el osciloscopio de los pulsos producto de la radiación beta sobre la fibra acoplada a al  $PMT1$ .

Posteriormente se sugirió el añadir dos fibras más al maso ya hecho. Esto debido a que la radiación gama, en particular, es más difícil de detectar y confinar en un material centellador, es decir, se recomienda el obtener una mayor área transversal de material centellador.

#### 4.4.- Pulido de las fibras ópticas.

Esta parte es de vital importancia, ya que se requiere minimizar las pérdidas de fotones; el pulido es un proceso para mejorar las superficies de las fibras y optimizar el flujo de fotones hacia los *PMTs*.

Una vez hechos los masos de fibras, se procedió al emparejado de cada fibra, es decir, a arreglar la longitud de cada fibra sobre las bases de lucita para que todo el maso en su conjunto, quede totalmente liso y acople perfectamente con la superficie de los *PMTs*. Para tal fin, empleamos un pulidor de fibras ópticas de la marca Buehler que nos fue prestado en el CCADET, a continuación se muestra este equipo en la figura 4.11:



Figura 4.11. Pulidora de fibras ópticas.

Posteriormente ya en el IFUNAM se procedió a dar un mejor acabado, para tal fin empleé dos métodos más; el primero es trabajar el maso con una borla para pulido en seco:

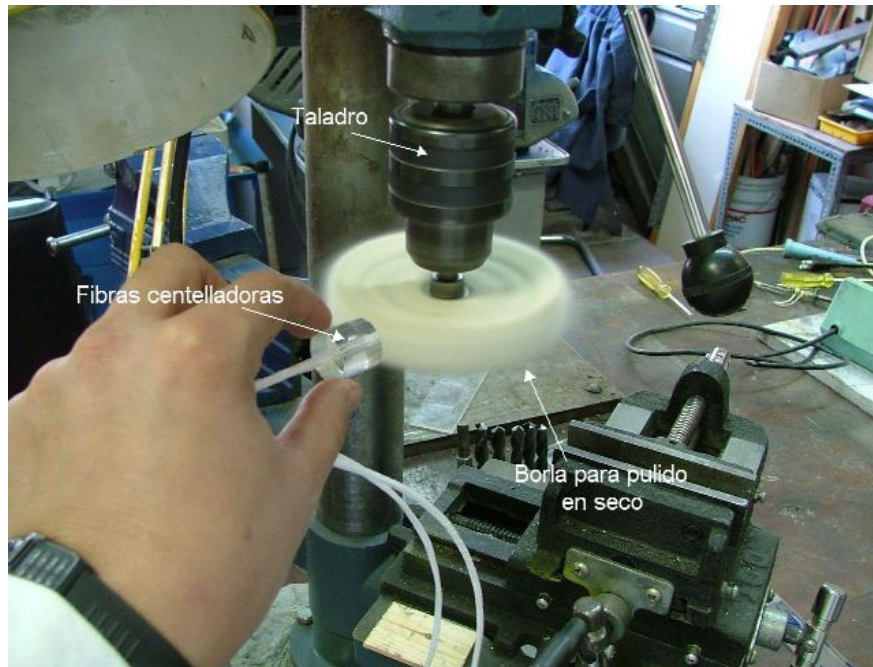


Figura 4.12. Trabajo de mejora de la superficie con una borla de pulido en seco.

Este método da todavía un mejor acabado a la superficie de las fibras, en este paso hicimos una inspección de las superficies observándolas al microscopio, obteniéndose las siguientes imágenes:

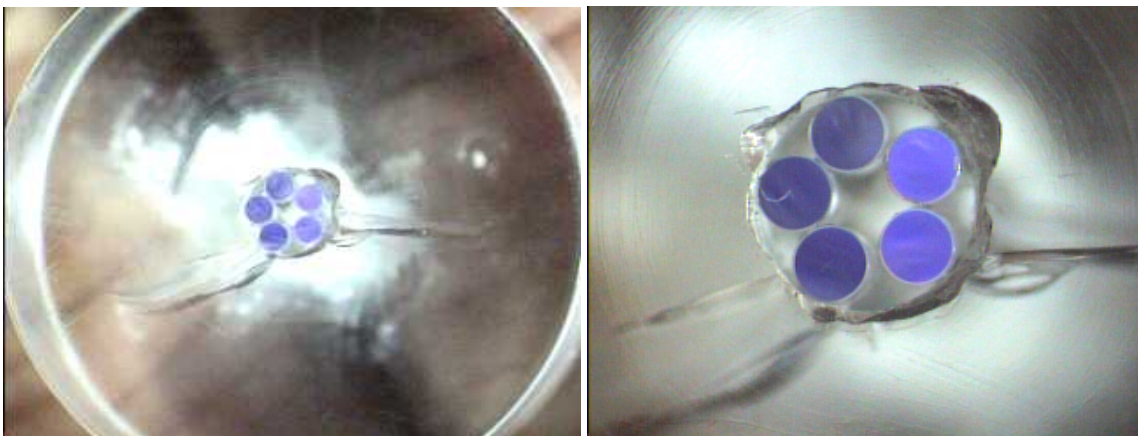


Figura 4.13. Cuatro acercamientos de las fibras con microscopio, apreciando el acabado de las superficies empleando la borla de pulido.

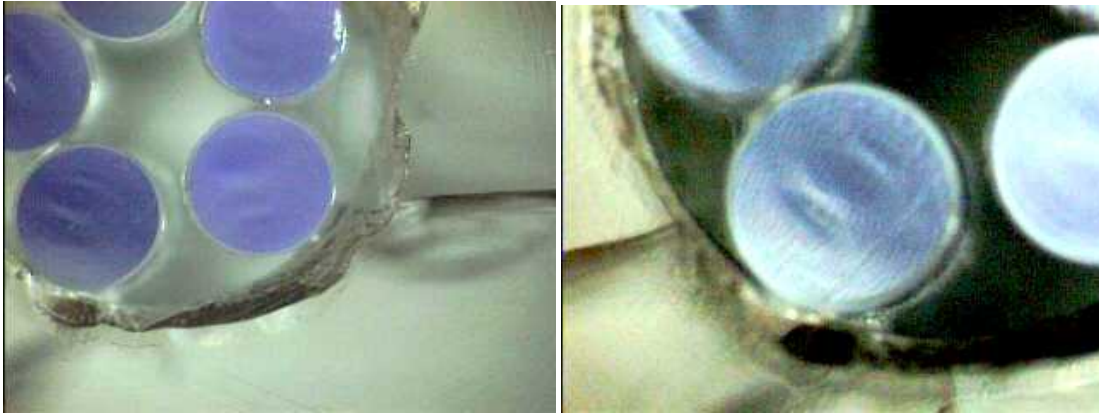


Figura 4.14. Cuatro acercamientos de las fibras con microscopio, apreciando el acabado de las superficies empleando la borla de pulido.

El segundo método alternativo consiste en trabajar el maso con una herramienta con superficie de tela de paño montada sobre el tocadisco.

#### 4.5. Resultados del experimento.

Una vez hechas las pruebas preliminares con los elementos y dispositivos requeridos, además de mejorar con el pulido la superficie de contacto hacia los *PMTs*, se procedió a implementar el experimento en su totalidad, tal y como se mostró en la figura 4.1. A continuación se muestran algunas imágenes:

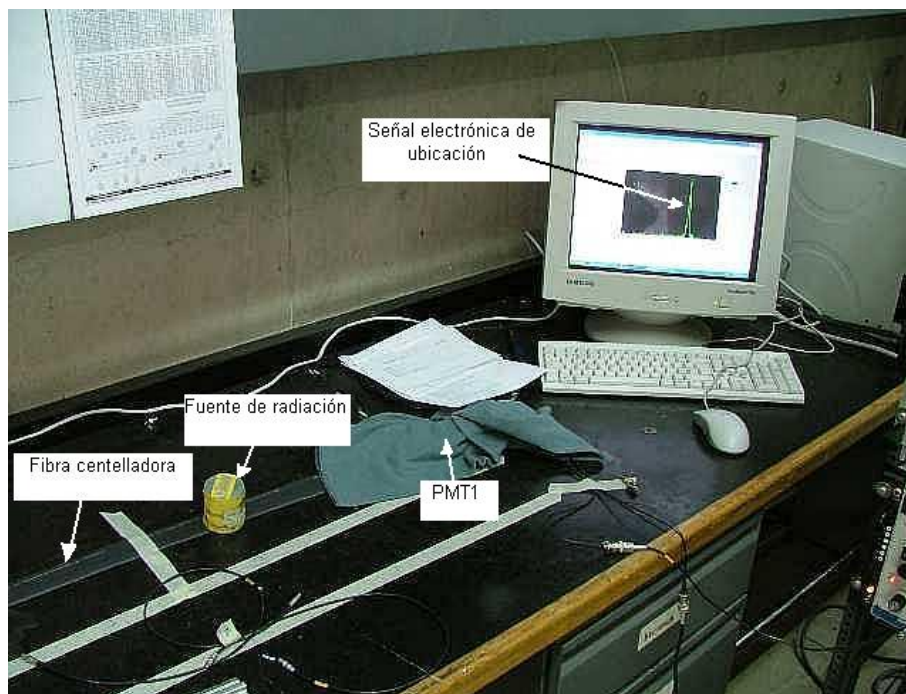


Figura 4.15. Experimento: fibras centelladoras, fuente de radiación, *PMTs* y PC.



A continuación se muestra un detalle de las conexiones y ajuste del voltaje negativo aplicado a los *PMTs*.

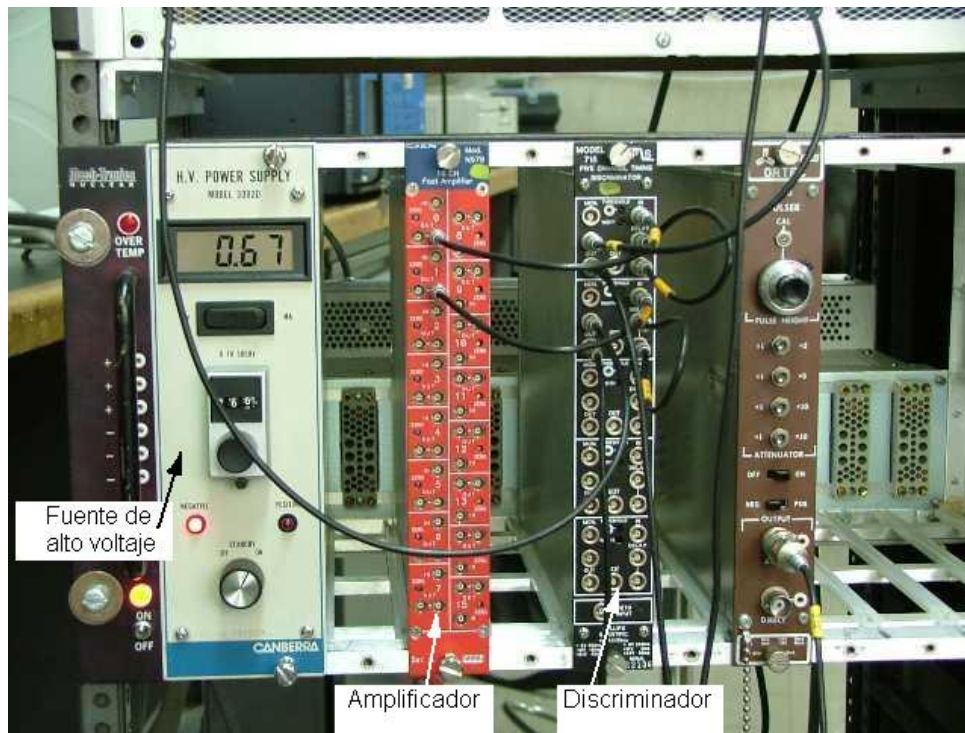


Figura 4.16. Experimento: fuente de alto voltaje (ajustado a 670V), amplificador y discriminador.

Posteriormente, se hizo la montura de ambos *PMTs* (de manera semejante a la figura 4.1), pero adicionalmente, ambos *PMTs* y el maso de fibras fueron introducidos dentro de una manguera de termofit de color negro (como se muestra en la figura 4.22); así se logró aislar aún más de ruido lumínico del exterior. Con ayuda de un osciloscopio se observaron las señales de desempeño de esta implementación, se empleó una fuente radioactiva de  $^{90}\text{Sr}$  colocada sobre la fibra centelladora en el extremo del *PMT 1*. A continuación se da una muestra de las señales electrónicas obtenidas del *PMT1* cuando la fuente radioactiva se encontraba por encima a 10cm sobre la *FO* y a 10cm del *PMT1* como referencia:

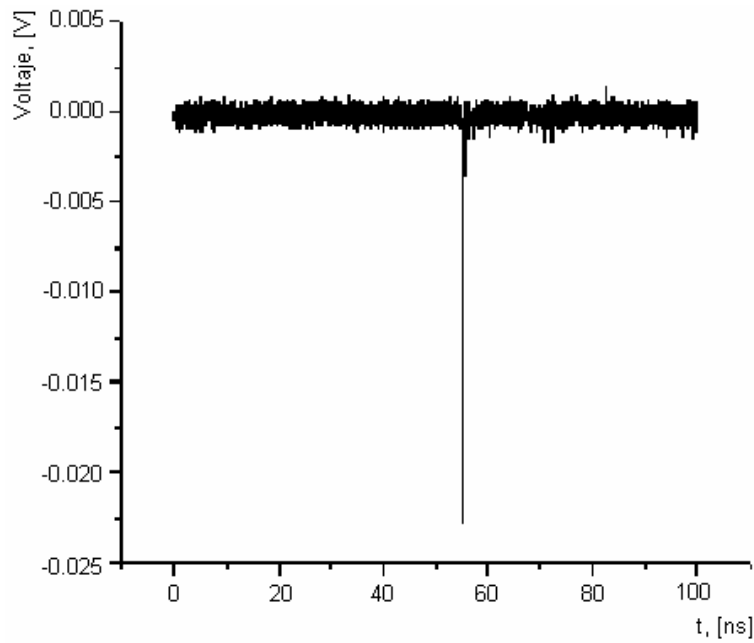


Figura 4.17. Señal electrónica proporcionada por los fotomultiplicadores.

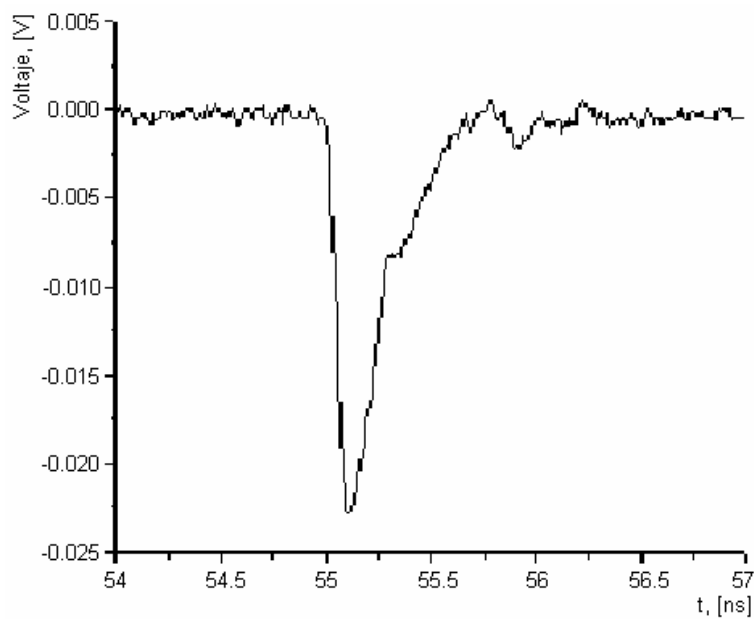


Figura 4.18. Señal electrónica proporcionada por los fotomultiplicadores.

Cabe mencionar que estas señales son al igual que la mostrada en la figura 4.17, tomadas desde la salida del *PMT 1*, es importante observar que éstas ya poseen una magnitud del orden de 20 mV y poseen una duración que va desde una fracción a hasta

algunas decenas de nanosegundos en promedio, lo cual es bastante propicio para su manipulación electrónica de manera un tanto convencional.

Luego se procedió a conectar la salida de los *PMTs* a una etapa de amplificación de 10X, los amplificadores requeridos deben ser muy rápidos para poder mantener una buena resolución temporal en el experimento. Después se hizo la conexión a los dispositivos discriminadores.

El discriminador es un dispositivo que tiene por entrada una señal analógica (en este caso la señal de salida de los *PMTs*); este dispositivo posee una perilla de ajuste de umbral o disparo en relación a la entrada, de tal manera que podemos seleccionar a aquellas señales de entrada que cumplan con la amplitud deseada y así discriminar lo que pudiera ser ruido y la señal útil amplificada [57] de los *PMTs*; adicionalmente, el discriminador también cuenta con un ajuste del ancho del pulso de salida.

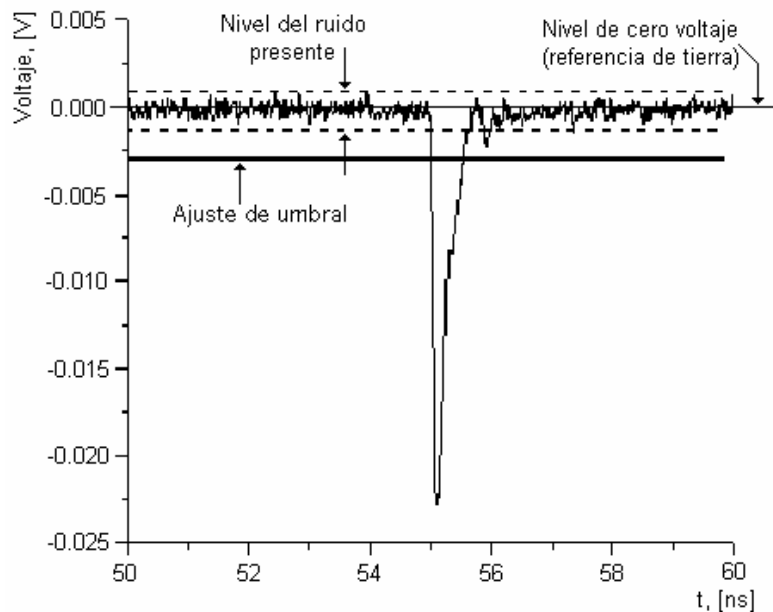


Figura 4.19. Señal electrónica proveniente del *PMT1* y esquematización de las señales de ajuste de umbral.

Es decir, el discriminador nos posibilita ajustar el nivel de umbral para seleccionar la amplitud de la señal de entrada que deseamos manipular, entonces éste generará como

salida una señal cuadrada con características de pulso lógico digital, además también posee una perilla que nos posibilita ajustar el ancho temporal de este pulso de salida, si así lo requiriera la instrumentación electrónica del experimento.

A continuación se muestra en la figura 4.20 a manera de ejemplo, una de las señales de salida del discriminador:

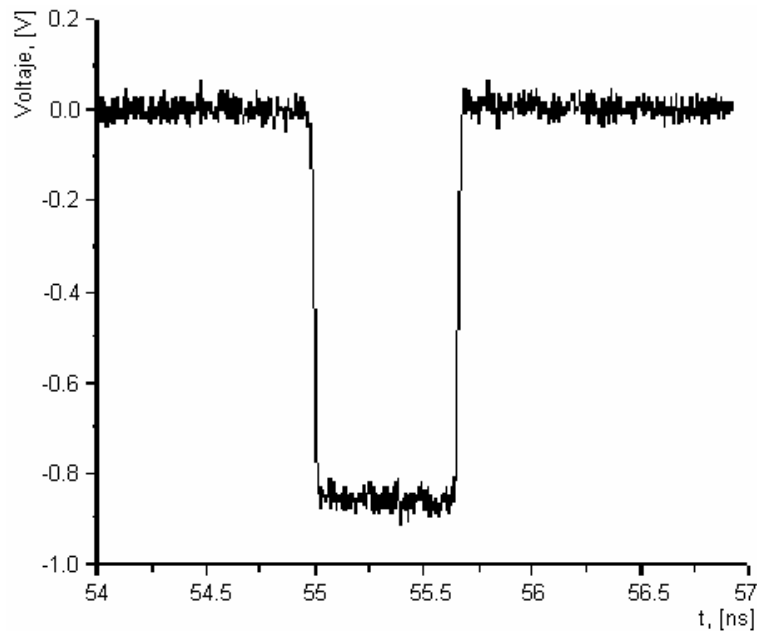


Figura 4.20. Señal electrónica de salida del discriminador.

Ahora, si recordamos, nuestro modelo experimental demanda que se recolecten dos señales electrónicas, productos del pulso luminoso que se propaga en ambos extremos de la fibra centelladora; este pulso luminoso arriba a distintos tiempos a los extremos, de esta forma se obtiene una señal electrónica de *INICIO* y otra señal de *PARO*, tal y como se muestra en la figura 4.21.

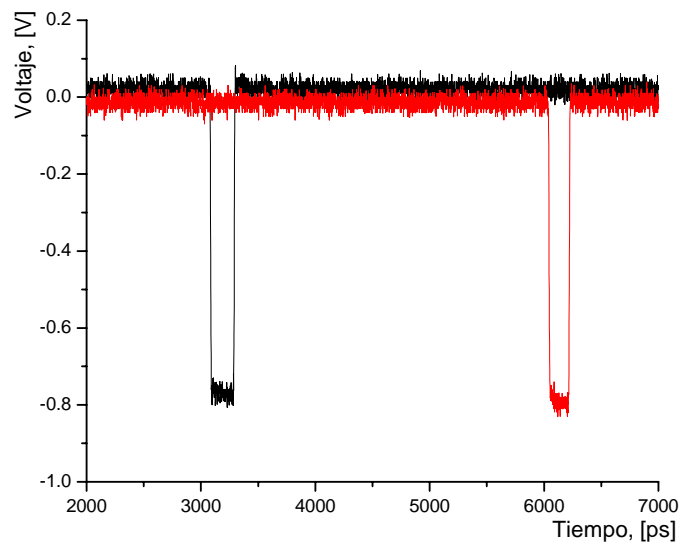


Figura 4.21. Señales de INICIO y PARO ya conformadas por el discriminador.

De tal manera pues, que se obtienen de ambos *PMTs* estas señales, se acondicionan y se obtienen las señales mostradas en la figura 4.22. Ahora, hemos mencionado que la esencia de funcionamiento de este método experimental, radica en la medición y conversión del intervalo de tiempo (diferencia del “tiempo de vuelo” de los pulsos luminosos que viajan dentro de la *FO*) producido por el pulso de *INICIO* y el pulso o señal de *PARO*, a un equivalente en una señal analógica cuya ubicación dependerá de este lapso, esta conversión será realizada por el *TAC*, ver figura 4.22.

Para nuestro experimento, el ancho temporal de cada pulso requerido no tendrá ninguna relevancia, ya que sólo nos interesa el intervalo de tiempo generado desde el inicio de cada pulso, de esta manera se produce el lapso con que se trabaja.

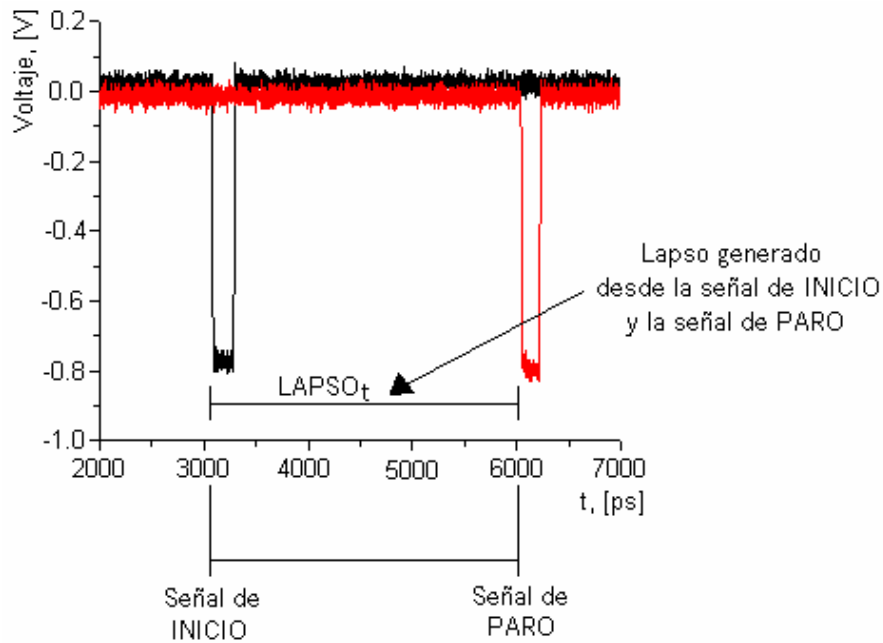


Figura 4.22. Señales de INICIO y PARO conformando el lapso.

Ya con estas señales, hacemos la conexión con el TAC. Éste hará la medición del “tiempo de vuelo” o de llegada de dichas señales, para generar como salida una señal analógica, cuya amplitud será proporcional y dependerá de la diferencia de los tiempos de arribo de las señales de salida de los discriminadores (señales *START* y *STOP* provenientes de los *PMTs*), como se muestra a manera de ejemplo en la figuras 4.23, 4.24 y 4.25.

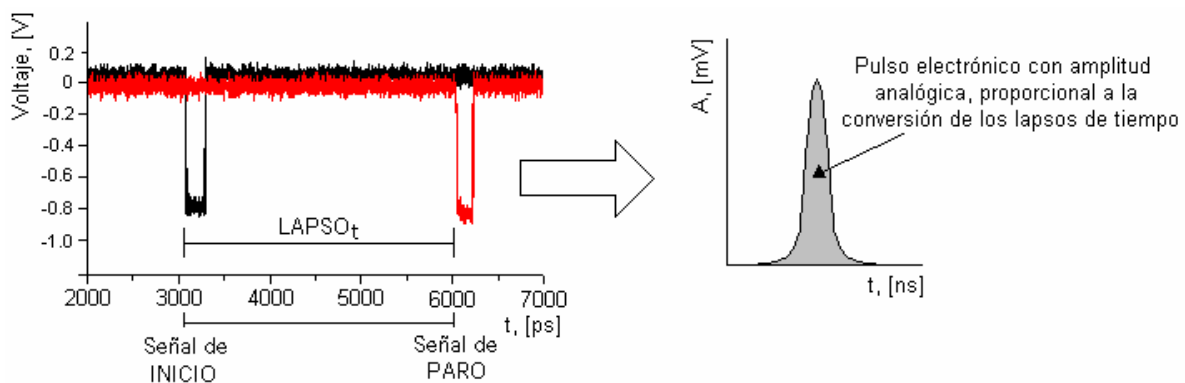


Figura 4.23. Esquema ilustrativo del funcionamiento del TAC cuando la fuente de radiación se ubica en el punto 1, es decir, a 10[cm] sobre la FO.

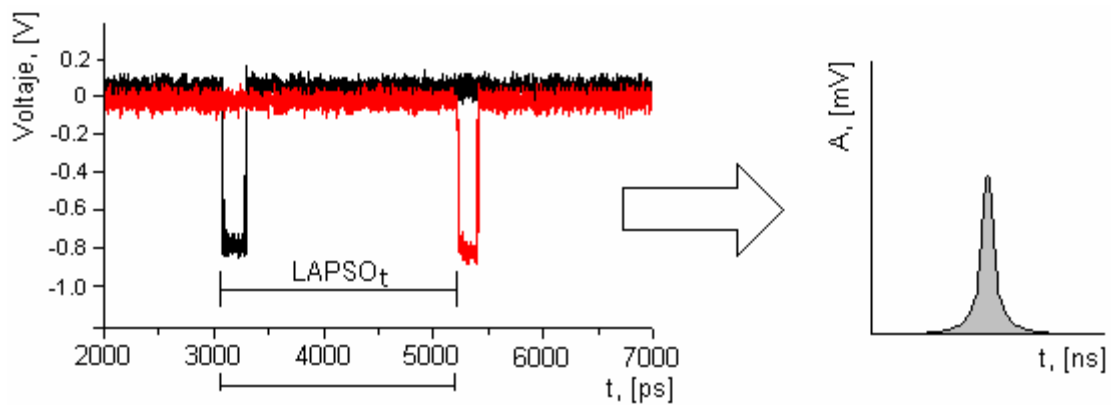


Figura 4.24. Esquema ilustrativo del funcionamiento del TAC cuando la fuente de radiación se ubica a 110[cm] sobre la FO.

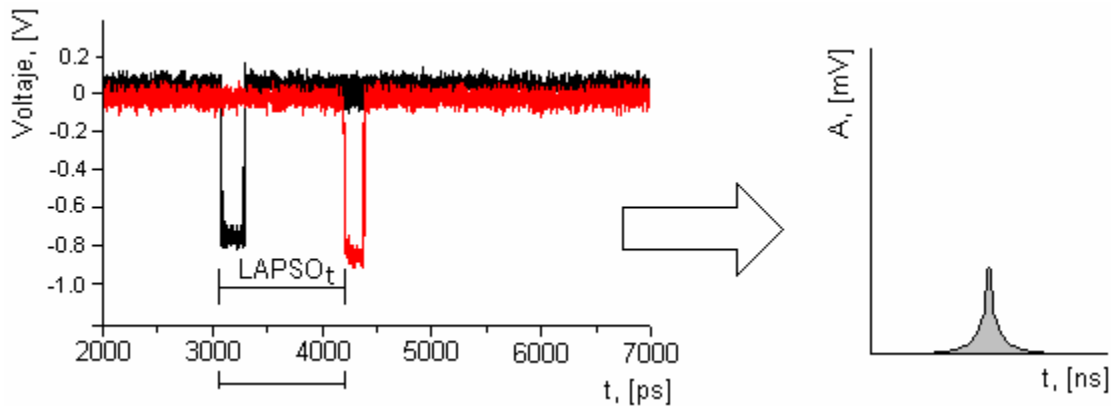


Figura 4.25. Esquema ilustrativo del funcionamiento del TAC cuando la fuente de radiación se ubica a 210[cm] sobre la FO.

Finalmente, la recolección de los datos lo hacemos en una *PC* vía una tarjeta digitalizadora multicanal (*MCA*), de tal manera que se obtienen gráficas como la mostrada a continuación en la figura 4.27, esa adquisición fue realizada con la fuente de radiación sobre la fibra sensora e igual a 20 cm de distancia del *PMT 1*.

A continuación en la la figura 4.26, se muestra el esquema realizado para la lectura a 0cm, es decir, con la fuente sobre la FO:

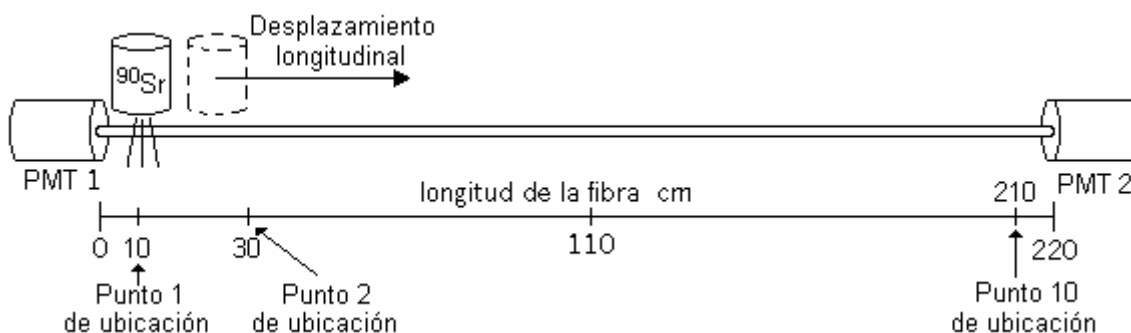


Figura 4.26. Esquema de la primera medición durante el experimento hecha a 0 cm de la FO, es decir, con la fuente sobre la fibra.

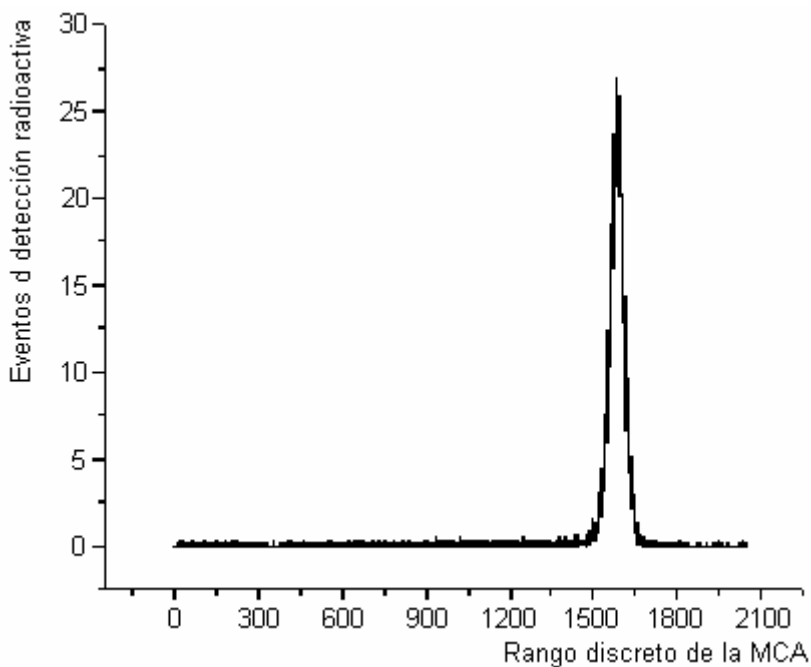


Figura 4.27. Señal de adquisición vista desde la pantalla de la PC, generada por la fuente de radiación puesta sobre la FO.

Cabe aclarar que la tarjeta digitalizadora multicanal (MCA), hace la lectura y convierte a un dato digital cada uno de los datos analógicos que genera el convertidor de tiempo en amplitud (TAC), de tal manera, que en la pantalla de la PC se observa en el eje horizontal, cada valor analógico digitalizado y colocado dentro del rango discretizado dada



la resolución de la *MCA*; por otro lado, en el eje vertical, se tiene el conteo acumulado de cada evento radioactivo generado en la *FO*.

Para observar en la gráfica de la figura 4.28 (y en las posteriores) el valor numérico en unidades de longitud de la posición de la fuente, habría que considerar que la resolución discreta del *MCA* es de 11 bits, es decir 2048 valores discretos diferenciables (distintos) entre ellos. Para lograr un ajuste electrónico óptimo entre todos los equipos involucrados, implicaría para cada equipo, igualar el valor electrónico de la salida con el valor de entrada del siguiente, y así sucesivamente. Para dar un ejemplo, el rango de salida promedio que nos entrega el *TAC* es del orden de 0V a -0.8V, esta salida va a la entrada de la *MCA*, la cual acepta valores dentro del rango de 0V a -5V (valores lógicos negativos), de tal manera, que fue requerido adicionar cable electrónico en las salidas de los *PMTs* para lograr un “corrimiento” de nuestras señales y así poderlas observar más hacia el centro del rango de la *MCA* (hecho ilustrado en la figura 4.1).

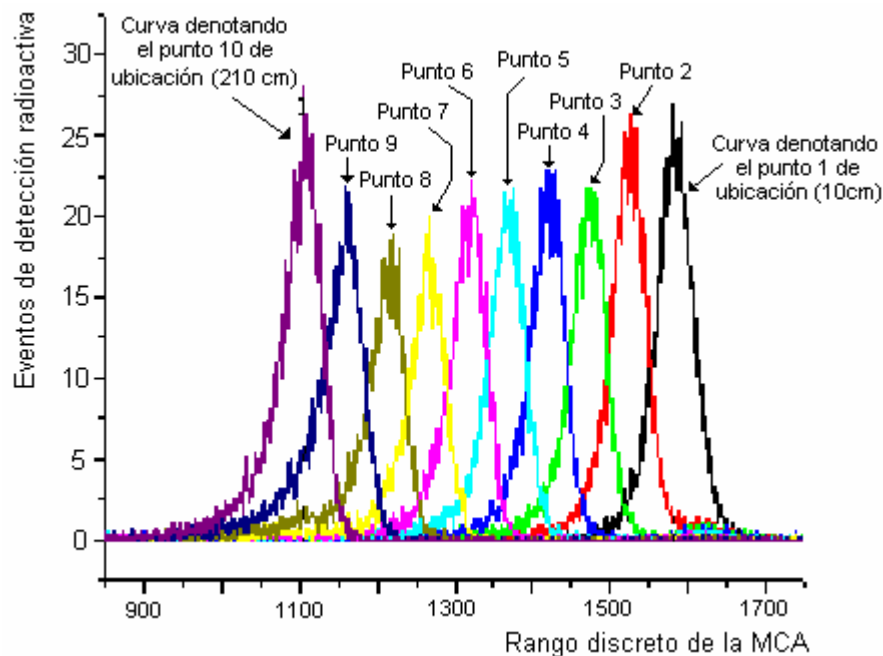


Figura 4.28. Señales denotando la ubicación de la fuente radioactiva sobre la *FO* a distancias de 20 cm desde el *PMT 1* como referencia.

En nuestra implementación experimental, observamos que los 2 m (2000 mm) empleados en las corridas sobre la *FO* estarán ubicados dentro de un intervalo de 456, unidades discretas de la *MCA* (el valor de 456 resulta de medir la diferencia entre el valor numérico en X del FWHM [2, 4, 6], para la curva generada por la fuente en el punto 1 y con el punto 10), ver figura 4.29:

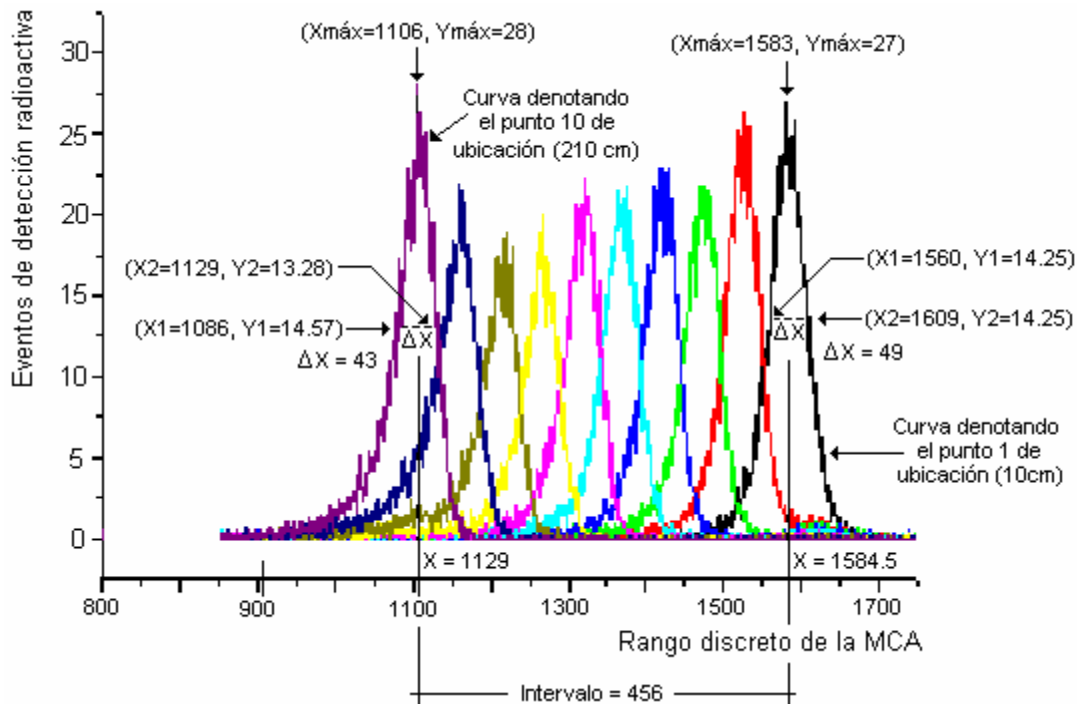


Figura 4.29. Cálculo del intervalo en unidades discretas empleado, dada la longitud de la *FO*.

De tal manera que existe una relación directa entre la diferencia de los lapsos de cada curva, con la ubicación física de la fuente sobre la *FO*, dada por:

$$\begin{aligned} \text{Unidad discreta de la MCA (UD}_{MCA}) &= \\ &= 2000 \text{ mm} / 456 \text{ unidades discretas} = \\ &= 4.38 \text{ mm/ud} \end{aligned}$$

Es decir, cada unidad discreta equivale a 4.38mm en desplazamiento longitudinal a lo largo de la *FO*.

De manera semejante, a los cálculos hechos para el FWHM para los puntos 1 y 10 (vistos en la figura 4.29), se hicieron para el resto de las curvas, obteniéndose el siguiente resultado:

$X_{p1} = 1585$ ud
$X_{p2} = 1528$ ud
$X_{p3} = 1473$ ud
$X_{p4} = 1421$ ud
$X_{p5} = 1367$ ud
$X_{p6} = 1318$ ud
$X_{p7} = 1265$ ud
$X_{p8} = 1213$ ud
$X_{p9} = 1158$ ud
$X_{p10} = 1129$ ud

Tabla 4.1. Cálculos de los FWHM para cada curva en unidades discretas.

De la tabla 4.1, obtenemos el promedio de las diferencias generadas entre cada punto, dando 50.66 ud. Significa que entre cada curva existe un intervalo de 50.66 ud, que multiplicado por el valor longitudinal de cada unidad discreta tenemos 221.37mm= 22.189cm. Es decir, que existe un error del 10.9% con respecto a la posición física de la fuente sobre la FO.

Una vez obtenido y explicado este resultado, se procedió a establecer la secuencia completa de mediciones experimentales, que consistió en adquirir los datos cada 20 cm de distancia desde el punto 1, esto es desde el *PMT 1* como referencia y con la fuente a 0 cm, es decir, sobre la fibra centelladora; así se obtuvo la siguiente gráfica:

Considerando lo anterior, finalmente podemos construir una gráfica que ilustre más claramente la información recabada, donde el eje horizontal muestre unidades de longitud, (cabe reitar que los datos recabados fueron siempre con 30 segundos de adquisición) como se observa en la figura 4.30.

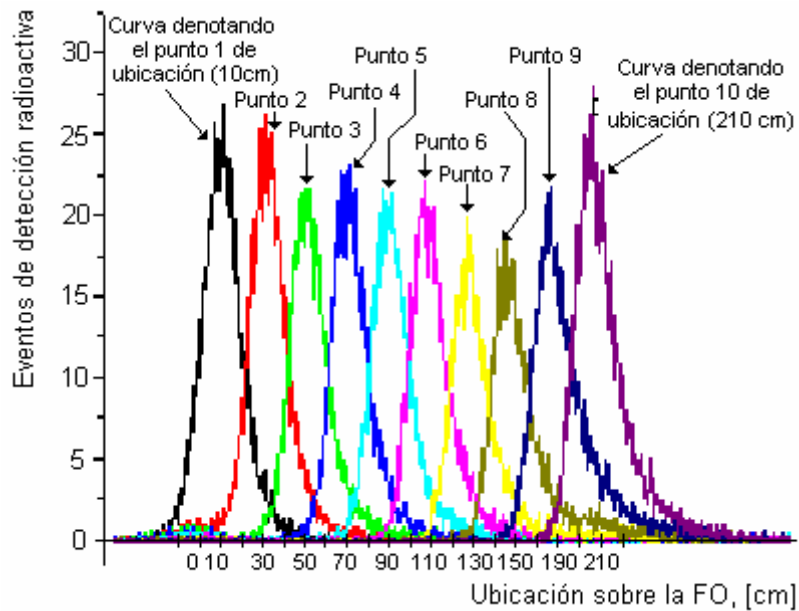


Figura 4.30. Señales denotando la ubicación en unidades longitudinales de la fuente radioactiva sobre la FO.

También se hicieron las repeticiones pero ahora con distancias de la fuente puntual a la fibra de 10 y 20 cm, como se muestra en la figura 4.31:

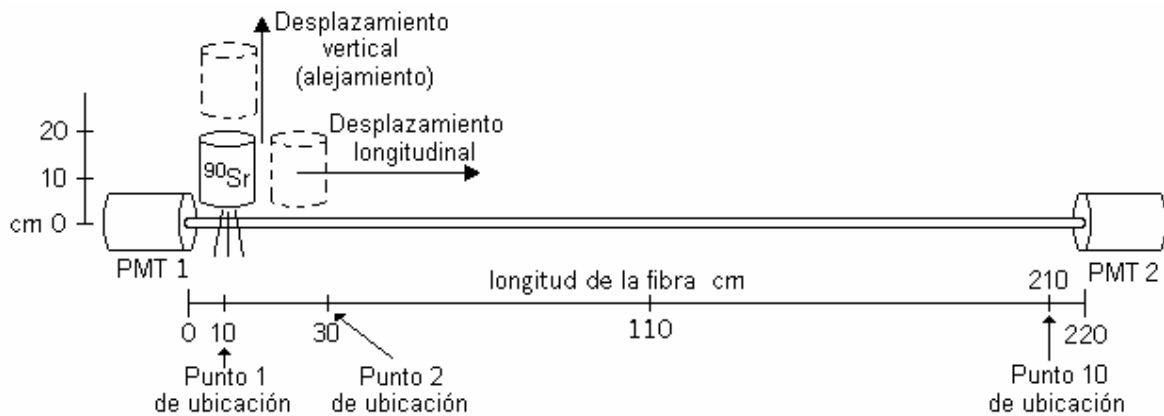


Figura 4.31. Esquema de las mediciones durante el experimento hechas a 10 y 20 cm de alejamiento y a lo largo de la FO.

De tal manera que se obtuvieron los siguientes datos mostrados en la figura 4.321 y figura 4.33:

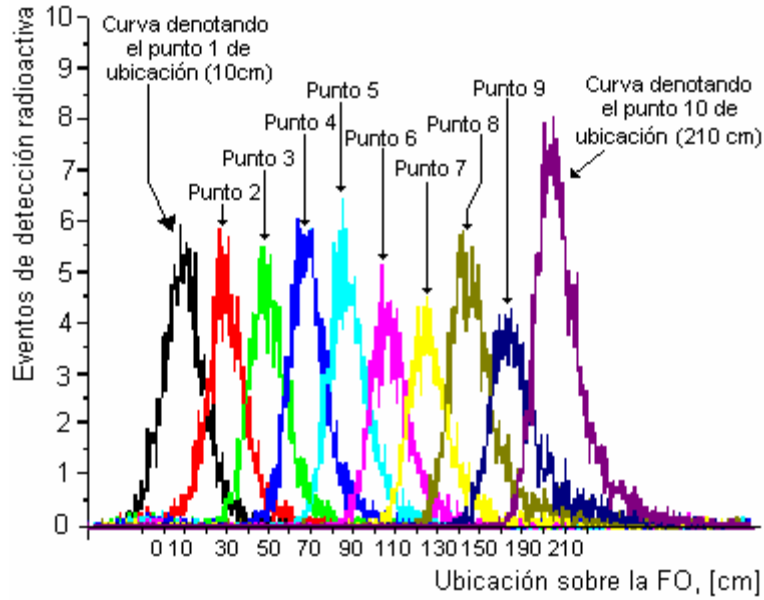


Figura 4.32. Señales denotando la ubicación de la fuente radioactiva a 10 cm sobre la FO a distancias de 20 cm desde el PMT 1 como referencia.

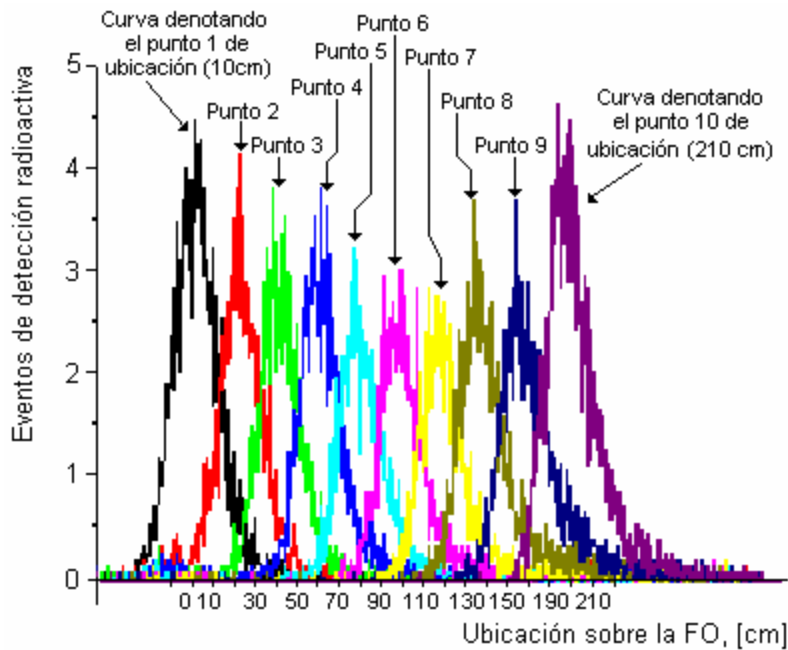


Figura 4.33. Señales denotando la ubicación de la fuente radioactiva a 20 cm sobre la FO y con intervalos de 20cm de distancia desde el PMT 1 como referencia.

A continuación se muestran las señales adquiridas cuando la fuente permanece sobre el mismo punto 1, ubicado a 10cm del *PMT1* y sobre la *FO*, pero la fuente es posicionada a un alejamiento en distancia desde 0, 10 y 20 cm.

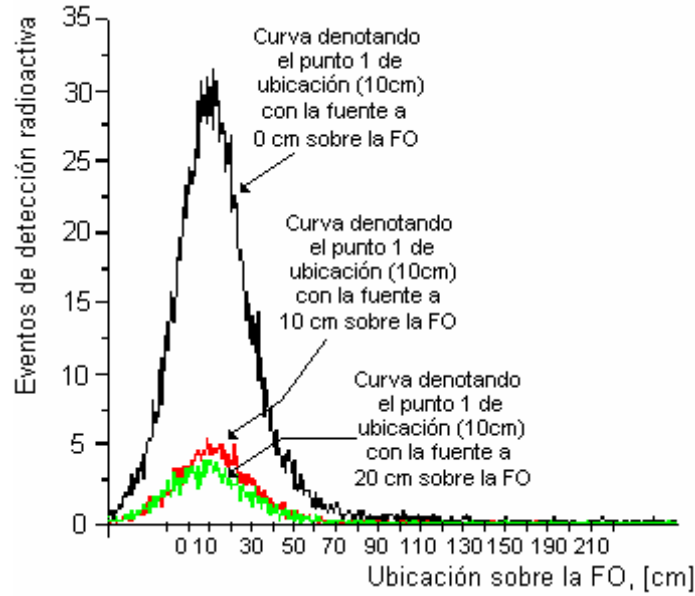


Figura 4.34. Señales de localización (sobre un mismo punto) cuando la fuente es alejada a 0, 10 y 20 cm sobre la FO.

La figura 4.35 ilustra claramente como el modelo experimental es sensible a la distancia o alejamiento de la fuente de radiación a la FO centelladora.

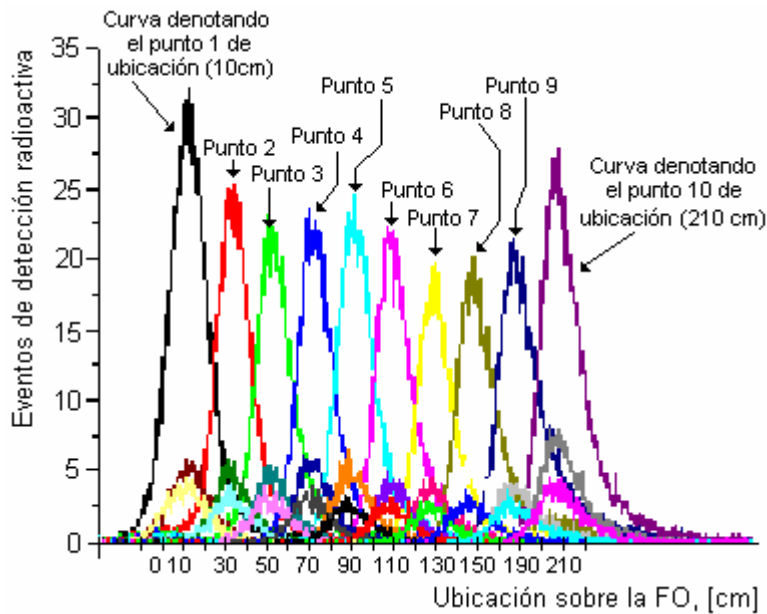


Figura 4.35. Corridas completas mostrando las señales del posicionamiento de la fuente a intervalos de 20 cm desde el PMT 1, a 0, 10 y 20 cm de alejamiento sobre la FO.

Hasta este momento, la información electrónica recabada en los experimentos, se ha mostrado en gráficas donde el eje horizontal corresponde al tiempo de vuelo o arribo de los

pulsos luminosos dentro de la *FO* y en el eje ordenado a los eventos radioactivos detectados, se requiere hacer una manipulación de esta información para lograr una conversión que muestre de manera clara, la ubicación (en unidades de longitud) de la fuente radioactiva a lo largo de la *FO*, para tal fin, observemos las siguientes ecuaciones donde se relacionan algunos parámetros:

Los datos obtenidos muestran la linealidad del desempeño del modelo experimental, tal y como se observa en la figura 4.36.

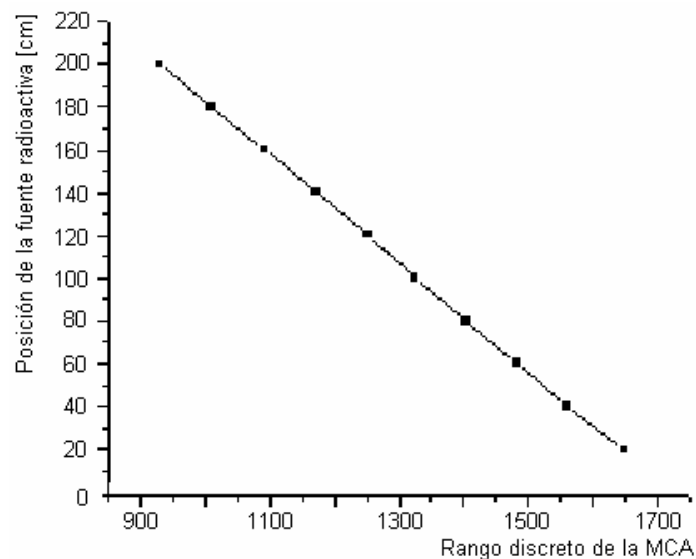


Figura 4.36. Gráfica mostrando la linealidad del desempeño del detector en su conjunto.

La figura 4.36 muestra el desempeño lineal que presentó el arreglo experimental, significa que por cada variación en el lapso medido, se obtendrá por consiguiente, una ubicación longitudinal muy precisa de la fuente de radiación a lo largo de la fibra.

## Conclusiones al Capítulo 4.

Como conclusión al capítulo, se mostró claramente el trabajo hecho en el laboratorio; desde la manipulación de las fibras ópticas: el confinamiento con cinta de teflón para confinar la luz, el pulido de los extremos ya colocadas en maso de tres fibras sobre las bases de lucita. Después, las primeras pruebas con las fibras ópticas centelladoras

acopladas a los fotomultiplicadores y luego al osciloscopio, se observó una mejora en la respuesta, conforme se ajustaba el alto voltaje a los valores negativos típicos de operación y en presencia de una fuente de radiación beta.

Posteriormente, al elaborar el maso final con grosor de 5 fibras, e implementar toda la instrumentación electrónica: amplificadores rápidos, discriminadores, el convertidor de tiempo a amplitud, la tarjeta digitalizadora multicanal y las corridas en la *PC*, se verificó el buen desempeño que desarrollaba nuestra propuesta experimental. Gracias a la rapidez de respuesta de los equipos, se obtuvieron resoluciones longitudinales de 2mm.

Cabe recordar que si bien el modelo experimental funciona, el desempeño recae fuertemente en la velocidad de respuesta de la tecnología empleada, en los equipos de instrumentación antes mencionados.

Obtuvimos una resolución longitudinal con valor de 4.38mm dado la capacidad digitalizadora de la *MCA*. Los cálculos finales mostraron un error del 10.9% con referencia a la posición física de la fuente sobre la *FO*, con respecto a la posición obtenida de las adquisiciones electrónicas.



## Capítulo 5. Perspectivas.

La propuesta experimental adicional de un detector para radiación se tratará de un dispositivo portátil basado en microcontrolador, éste logra la detección y ubicación de la fuente de radiación haciendo lecturas de las amplitudes de las señales provenientes de los *PMT 1* y *PMT 2* (en lugar de medir los “tiempos de vuelo” como se hizo con el primer modelo experimental), para inmediatamente promediarlas e ir calculando cocientes de dichas lecturas, este trabajo de promediar se hace en lapsos constantes, el esquema propuesto del dispositivo se muestra a continuación en la figura 5.1.

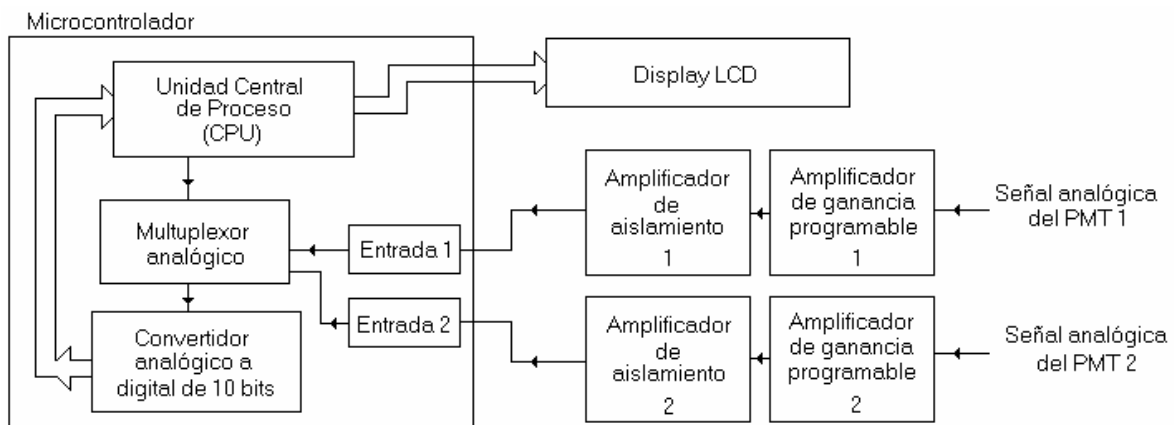


Figura 5.1. Esquema propuesto para el detector portátil.

Como se observa en la figura anterior, este dispositivo tiene por cerebro un microcontrolador, éste se encargará de enviar mensajes al usuario a través de un display de cristal líquido (*LCD*) y controlar a los amplificadores de ganancia programable, los amplificadores de aislamiento y demás componentes requeridos.

A continuación se muestra una imagen previa del prototipo del detector:

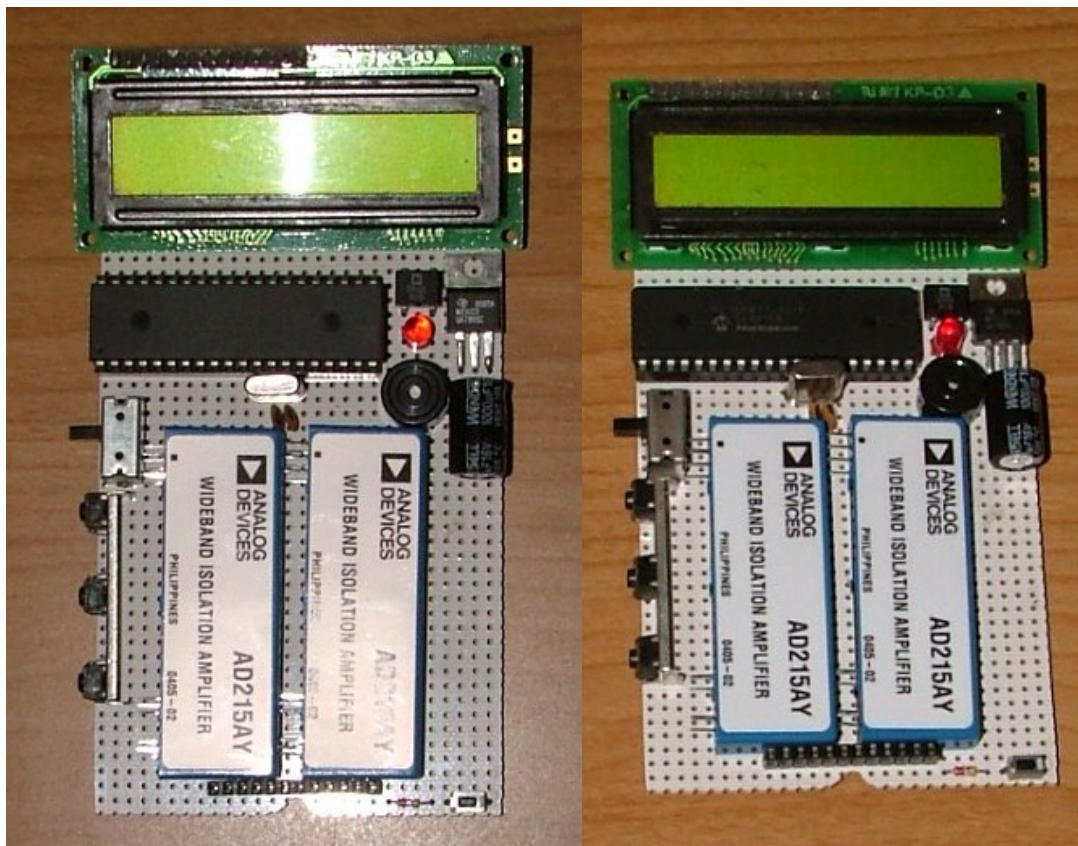


Figura 5.2. Vista preliminar de la electrónica del detector portátil.

Este dispositivo requiere de una fuente de alto voltaje externo para alimentar a los *PMTs*, la señal que entregan los *PMTs* es colectada primeramente por amplificadores de ganancia programable PGA204 de la compañía Burr Brown, éstos permiten ajustar la ganancia desde 1, 10, 100 y hasta 1000, para esto tiene 2 líneas lógicas (o bits) de control; luego estas señales van a unos amplificadores de aislamiento AD215AY de la compañía Analog Devices, para luego ser digitalizadas por el convertidor analógico a digital (*ADC*) que tiene incorporado el microcontrolador PIC16F877. Este micro tiene un *ADC* con 8 canales de 10 bits multiplexados, además se cuenta con una herramienta de software para programarlo en lenguaje C y así emplear funciones ya hechas para el manejo rápido y seguro de dispositivos, tales como el *LCD* y el teclado, entre muchos otros. El microcontrolador posee un reloj oscilador maestro que corre a 20 MHz, por lo que resultará muy interesante observar su desempeño para una aplicación como esta.

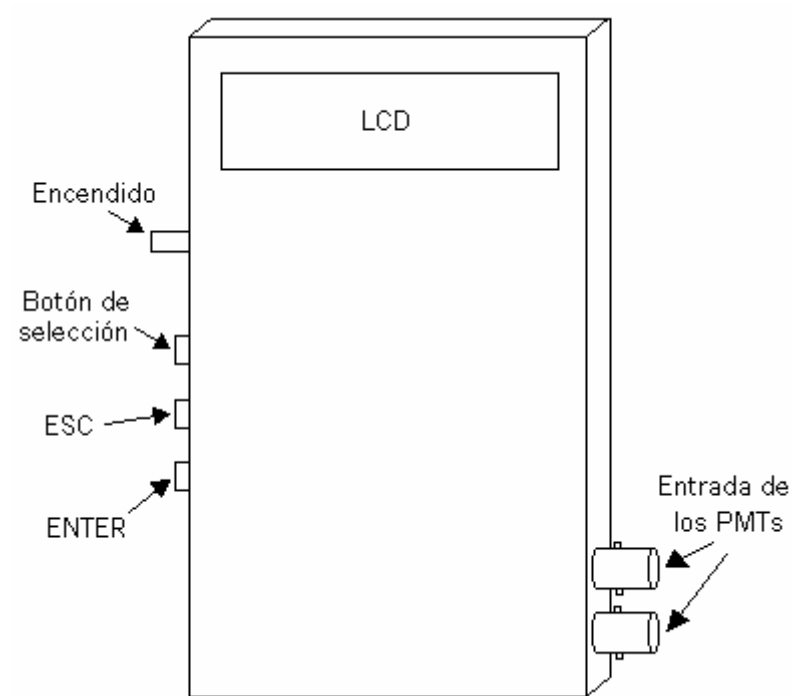


Figura 5.3. Vista del acabado del dispositivo.

## 5.1.- Descripción de los circuitos.

Como se mencionó con anterioridad, el circuito principal lo constituye el microcontrolador PIC16F877 de la compañía Microchip [74]. Este es el cerebro del dispositivo detector, ya que él es quien realiza la coordinación de los demás circuitos requeridos. A continuación se muestra el diagrama de bloques constitutivos del microcontrolador utilizado:

Device	Program FLASH	Data Memory	Data EEPROM
PIC16F873	4K	192 Bytes	128 Bytes
PIC16F876	8K	368 Bytes	256 Bytes

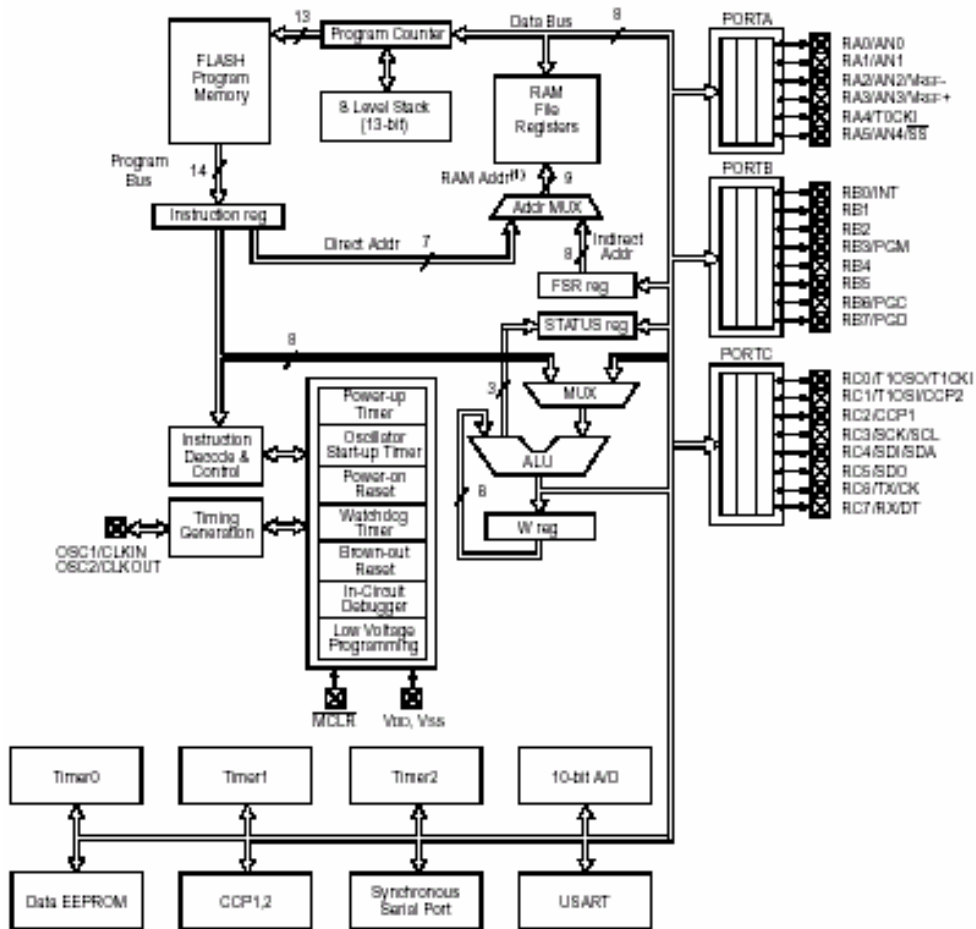


Figura 5.4. Diagrama del microcontrolador PIC16F877.

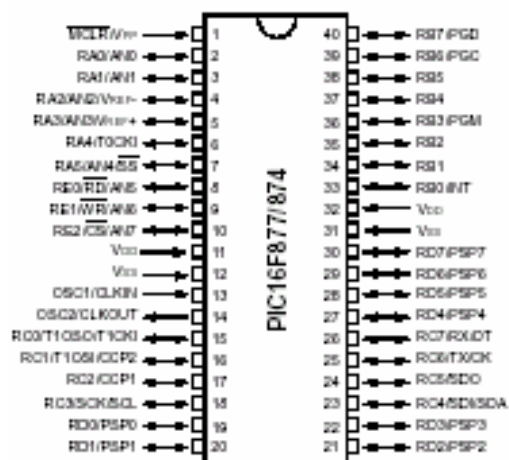


Figura 5.5. Patigrama del microcontrolador PIC16F877.

A continuación se presenta al amplificador de ganancia programable PGA204:

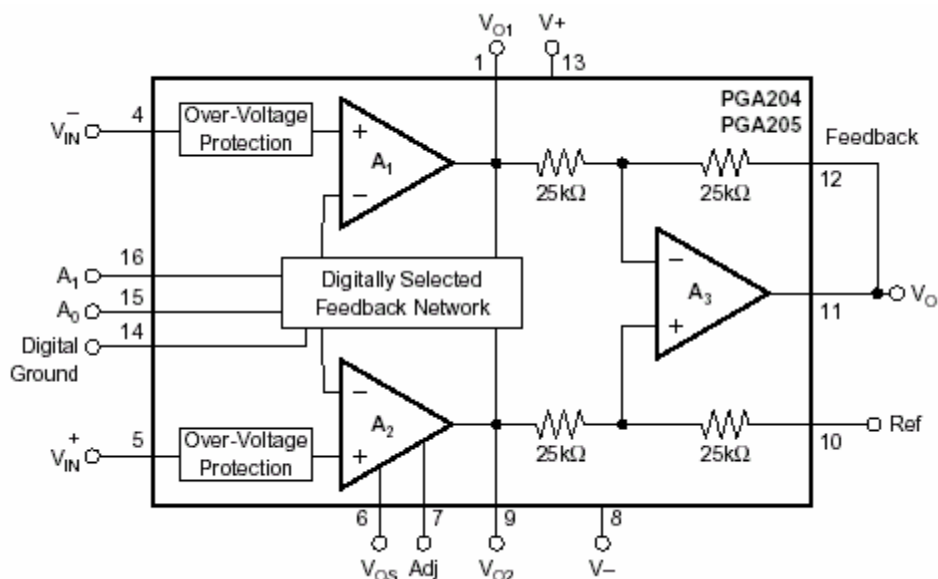


Figura 5.6. Diagrama del amplificador de ganancia programable PGA204.

El PGA204 nos posibilita el programar la ganancia desde 1, 10, 100 ó 1000 veces la señal de entrada, de esta manera tenemos la opción de ajustar la magnificación de las señales de los *PMTs* que a su vez depende de la energía de la radiación en cuestión.

El siguiente circuito amplificador es el AD215AY, este es un amplificador de aislamiento que nos permite precisamente aislar eléctricamente la señal de entrada que viene desde los *PMTs*, de donde es posible que en caso de daño se propague el alto voltaje que proviene de la alimentación de los mismos, etc. A continuación se muestra el diagrama de bloques del AD215AY:

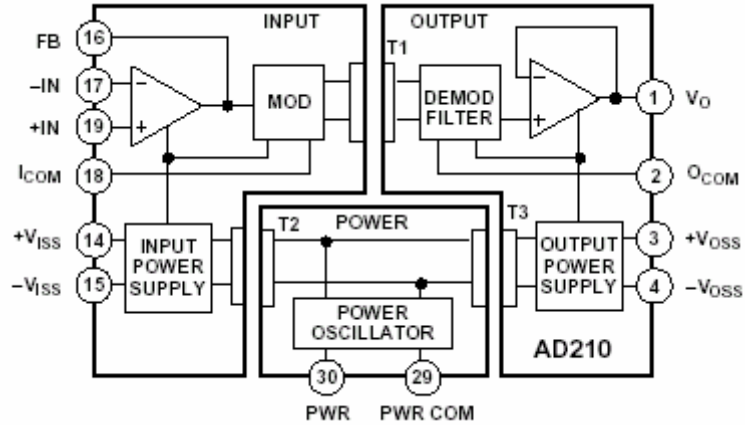


Figura 5.7. VDiagrama del amplificador de aislamiento AD215AY.

## 5.2.- Procedimiento de detección de la radiación.

Dado que el proceso de actividad de un elemento o material radioactivo (visto en capítulos anteriores) es mayormente detectado conforme se logren mayor número de cuentas (o detecciones radioactivas) además de la energía de éstas, proponemos pues, hacer una serie de lecturas o conteos de esas señales de radiación en lapsos constantes.

Este método pretendería entonces, que conforme se realicen las adquisiciones se vayan arrojen los resultados, es decir, se vaya perfilando la ubicación de la fuente de radiación a lo largo de la fibra centelladora. Se requiere que el microprocesador haga los cálculos de los cocientes de las lecturas promediadas de las amplitudes obtenidas por cada *PMT*.

El valor numérico de los cocientes, sería directamente proporcional a la ubicación de la fuente a lo largo de la fibra, la analogía del resultado sería como la imagen gráfica de las curvas obtenidas para los experimentos realizados (ver figura 4.32).

**Conclusión al Capítulo 5.** Semejante a lo expuesto en el Capítulo 4, el modelo si funcionaría, y que en buena medida, la calidad del desempeño recae fuertemente en las características de respuesta de la instrumentación electrónica. Ahora, en esta última propuesta para un dispositivo detector portátil, la electrónica de acondicionamiento y de

manipulación de la información, puede presentar una funcionalidad y desempeño bastante aceptable. Se emplean amplificadores de ganancia programable, lo cual permitiría ajustar la sensibilidad de éstos cuando así se requiera; el cerebro de este dispositivo lo conforma un microcontrolador PIC16F877, este micro ejecuta instrucciones a una frecuencia de 20 MHz y por poseer un set de instrucciones tipo RISC, tiene un procesamiento similar al de un procesador INTEL 80386, en pocas palabras, es bastante rápido. Adicionalmente y entre muchos otros recursos que tiene integrado en el chip, este PIC posee un convertidor analógico digital de 10 bits con ocho entradas multiplexadas; de éstas se requerirán dos (una para cada fotomultiplicador). El display de cristal líquido indicará la posición de la fuente de radiación y su certidumbre será mayor conforme se logre obtener un mayor número de cuentas.

Hemos implementado y demostrado una propuesta experimental, que arrojó resultados muy alentadores, sobre la viabilidad de detectar y ubicar fuentes puntuales de radiación empleando fibra óptica centelladora dopada.

Adicionalmente la propuesta (vista en este capítulo5) para un instrumento portátil de detección y ubicación, presenta grandes posibilidades, ya que éste trabajaría haciendo lecturas de los *PMTs* ubicados en los extremos de la *FO* y realizando cálculos de cocientes de manera cíclica. De esta manera, se lograría discernir sobre la ubicación de la fuente.

Quisiera recalcar el papel de la instrumentación electrónica nuclear tiene en la actualidad, ya que ésta sirve para el monitoreo y control de los procesos donde intervienen factores de índole radioactivo. Hoy en día, se les localiza desde sensores convencionales de detección y análisis de sustancias, análisis de composición química, centrales nucleares y en una gran variedad de experimentos científicos afines.

Finalmente, deseo mencionar la importancia de fomentar el trabajo de investigación y desarrollo tecnológico en México, ya que como es bien sabido, requerimos generar tecnologías y formar personal capacitado que contribuya y proponga metodologías novedosas. Todo producirá en dejar de ser un país dependiente con pocos recursos

económicos que siempre tiene que comprar la tecnología extranjera que por lo tanto, genera un círculo vicioso poco benéfico; para entonces, nosotros producir tecnologías adecuadas a bajo costo, y de esa manera tomar un papel activo y de punta en la carrera de investigación y desarrollo tecnológico que tantos beneficios acarrea para el país.



## **Conclusiones generales.**

Hoy en día, el conocimiento de existencia y uso de las radiaciones es algo cotidiano y hasta podemos decir, que resultaría inconcebible el no emplearlas para nuestro beneficio. Actualmente, las radiaciones y los fenómenos asociados a éstas, son empleados en las centrales núcleo-eléctricas, hospitales oncológicos, industria farmacobióloga, de cosméticos, alimenticia, de pinturas, metal-mecánica, en la academia, milicia, etc. De igual manera, los efectos biológicos nocivos de las radiaciones, han sido conocidos desde que éstas fueron descubiertas y empleadas.

Es por todas estas razones, por lo que en este trabajo de tesis de maestría, planteamos, una primer propuesta experimental para la detección y ubicación de fuentes de radiación beta (rayos de electrones).

Esta propuesta, emplea fibra óptica centelladora como elemento sensor de radiación, requiere de dos fotomultiplicadores acoplados en los extremos de la fibra para colectar los pulsos de luz (producto de la interacción de la radiación con el material centellador contenido en la fibra), luego, empleando amplificadores rápidos y discriminadores, logramos obtener las señales electrónicas que delatan la presencia de radiación; finalmente una tarjeta digitalizadora multicanal hace las conversiones de señales analógicas a digital, para su procesamiento en una computadora.

De tal manera pues, que si monitoreamos una fuente de radiación (preferentemente gama o betas), a lo largo de la fibra, obtendremos una gráfica donde se generen curvas gaussianas y que muestran claramente el desplazamiento a intervalos de 20 cm que se le dió a la fuente de radiación sobre la fibra óptica. Cabe recordar, que el experimento mide “los tiempos de vuelo” de los pulsos de luz generados en la fibra por la presencia de la radiación y que son colectados por fotomultiplicadores, etc.

Esta propuesta, al ser llevada a cabo, demostró la viabilidad de la metodología e instrumentación hecha. Como resultado final, tenemos una resolución longitudinal de

4.38mm dada la capacidad digitalizada en bit de la *MCA*, aunado a la velocidad de respuesta desde los *PMTs*, amplificadores y discriminadores principalmente. Estos factores arrojaron un error del 10.9% con respecto a la posición física real de la fuente sobre la *FO*, lo cual puede ser bueno para ciertas aplicaciones, tales como el monitoreo en grandes extensiones, como lo son las plantas nucleares.

Adicionalmente durante los experimentos, también observamos los efectos de la atenuación, al exponer la fuente de radiación a distintos espaciamentos hacía la fibra.

Los resultados respaldan la posibilidad de implementar un instrumento detector de radiación, pero ahora, empleando las mediciones por intensidades.

La segunda propuesta de instrumento detector de radiaciones (planteado en el capítulo 5 de este trabajo de tesis).

Este instrumento, tendría como cerebro un microcontrolador (este microcontrolador es el equivalente de una computadora pequeña integrada en un solo chip), el cual haría uso de algoritmos estadísticos para realizar los cálculos, y así poder perfilar la detección y ubicación de la fuente de radiación conforme se realice un mayor conteo.

Como se observa en la figura 5.1, este dispositivo requiere de las señales dadas por dos fotomultiplicadores, éstas serán dadas a dos amplificadores de ganancia programable, éstos a su vez, irán a dos amplificadores de aislamiento, para después ser capturadas y digitalizadas por el micro. El micro procesará la información de manera repetida, para al mismo tiempo, reportar los eventos e ir informando sobre un display de cristal líquido.

Cabe recordar que este desarrollo, trabajaría bajo la filosofía de detección, empleando las lecturas de intensidades de los eventos, para entonces pretender ir generando un perfil que denote la ubicación de la fuente; a diferencia del primer método hecho en laboratorio, donde la ubicación fue el resultado de medir el tiempo de vuelo de la luz dentro de la fibra, etc.

Adicionalmente, se obtendrían mejores resultados si se realizaran algoritmos más robustos y mejores métodos de procesamiento de la información, así resultaría información más exacta y precisa sobre el fenómeno a examinar.

Para finalizar esta conclusión, resumo que hemos demostrado claramente el buen desempeño del modelo experimental que realizamos en laboratorio. Obtuvimos buenas resoluciones temporales y espaciales, que sin duda, dan el visto bueno para una futura implementación de este modelo.

Sienta las bases para nuevos y mejores desarrollos en el ámbito de las radiaciones, fibras ópticas, materiales centelladores y/o detectores, electrónica de instrumentación y otros campos de la ciencia y técnica relacionados.

## Bibliografía:

- 1 Guillermo E. Avendaño Cervantes. *Fundamentos Técnicos de Radiología y Tomografía Axial Computarizada*, 357 págs, Editorial Diana, México, 1993.
- 2 Thomas J. Connolly, *Fundamentos de ingeniería nuclear*, 376 págs, Limusa, México. 1983.
- 3 José Luis Iturbe García, *Fundamentos de Radioquímica*, Universidad Autónoma del Estado de México, 406 págs, 2001.
- 4 Glenn F. Knoll, *Radiation Detection and Measurement*, 785 pages, Ed. Wiley, USA, 1991.
- 5 M. Albrecht, K. Andert, P. Anselmino, B. Baumbaugh, J. Bishop, H. Dauerty, D. Dreher, M. Jensen, N. Kamat, D. Karmgard, B. Marchant, J. Marchant, M. Mckenna, Rozzi, R. Ruchti, A. Slusher, R. Sommesse, T. Sparks, and M. Vigneault. <sup>b</sup> V. Clendenen and C. Hurlbut, “Scintillators and Wavelength Shifters for the Detection of Ionizing Radiation”, Notre Dame, Indiana 46556, USA, <sup>b</sup> Ludlum Measurements Inc, 501 Oak Street. Sweetwater, Texas 79556, USA, 1999.
- 6 International Atomic Energy Agency, *Nuclear Electronics Laboratory Manual*, Vienna, 327 pages, 1989.
- 7 Jacob Fraden, *Handbook of Modern Sensors, Physics, Designs and Applications*, 2th Edition, AIP Press, 547 pages, Springer, USA, 1996.
- 8 Cruz/Chamizo/Garrita, *Estructura atómica, Un enfoque químico*, 820 págs, Addison-Wesley Iberoamericana, México, 1991.
- 9 Saleh and teach, *Fundamental of Photonics*, 966 pages, Ed. Wiley, USA, 1991.
- 10 R.A.Faires, B.H.Parks, *Radioisótopos, Técnicas de Laboratorio*, 308 págs, Eudeba Editorial Universitaria de Buenos Aires, Argentina, 1973.
- 11 Larousse Co, *Diccionario Larousse de Ciencias y técnicas*, 1056 págs, México D.F. 1983.
- 12 Jerome L. Duggan, *Laboratory Investigations in Nuclear Science*, 208 pages, Tennelec, 1988.
- 13 J.Lugo. M.del C. Cassano. L.Mellado, *Manual de Laboratorio de Radioisótopos No1. Detección y medida de radiaciones por ionización de gases*, 39 págs, Universidad

- Nacional Agraria La Molina, Lima Perú, 1976.
- 14 Kuraray Co., Ltd, “*Kuraray’s Scintillation Materials. Plastic Scintillating Fibers Notes*”, Page 10, USA, [www.kuraray.com](http://www.kuraray.com), 1999.
  - 15 S. Margluies and M.Chung, “Effects of a high-energy x-ray irradiation of selected scintillating fibers”, Page 30, University of Illinois at Chicago 6067-7059, *SPIE*, Vol 2007, 1999.
  - 16 Bicon, Saint-Gobain Industrial Ceramics, Inc, Standard Plastic Scintillating, “Wavelength Shifting and Optical Fibers”, Ohio 44065 USA, page 3, [www.bicon.com](http://www.bicon.com) , 2000.
  - 17 BMDO Technology Applications in Biomedicine Existing Technologies PET, SPECT, and Particle Beam Therapies, “Highly Efficient Scintillating Fibers”, USA, page 45, *eff.pdf.*, 2001.
  - 18 V.Brekhovskih, R.Dzhelyadin, A. Konoplyannikov, V.I. Rykalin, “The WLS Fiber Time Properties Study”, (IHEP, Protvino, Russia), 9 pages, 20/june/2000.
  - 19 Ryuichi Nishiura and Nobuyuki Izumi, “Radiation Sensing System Using an Optical Fiber”,Mitsubishi Electric, ADVANCE. USA, vol95\_tr10.pdf., September 2001.
  - 20 R.C. Ruchti and M.R. Wayne, “Studies of scintillating fibers read out with visible light photon counters for the DO upgrade”, University of Notre Dame, Notre Dame, IN 46556, 2001.
  - 21 J. Berthold, “Overview of prototype fibre optic sensors for future application in nuclear environments”. *III, In Proc. SPIE*, vol. 2425, pp. 74-83, 1994.
  - 22 Taylor, K. Hulick, J. Battiato, A. Sanchez, J. Winter, and A. Pirich, “Response of germania doped fiber bragg gratings in radiation environments”, *SPIE Conf. on Enabling Photonic Techn. for Aerospace Appl*, vol. 3714, pp. 106-113, 1999.
  - 23 Kakuta, H. Yamagishi, T. Iwamura, and M. Urakami, “Development of new nuclear instrumentation based on optical sensing -irradiation effects on fibre Bragg grating sensors”, *SPIE Proc. 14th Int. Conf. on Optical Fiber Sensors*, vol. 4185, pp. 816-819, 2000.
  - 24 P. Niay, P. Bernage, M. Douay, F. Lahoreau, J. Bayon, T. Georges, M. Monerie, P.

- Ferdinand, S. Rougeault, and P. Cetier, "Behaviour of Bragg gratings, written in germanosilicate fibers, against -ray exposure at low dose rate", *IEEE Photonics Technology Letters*, **vol. 6**, pp. 1350-1352, 1994.
- 25 K. Fujita, A. Kimura, M. Nakazawa, and H. Takahashi, "Bragg peak shifts of fibre Bragg gratings in radiation environment", *SPIE Conf. on Fiber Optic Sensor Technology II*, SPIE Photonics Boston, USA, vol. 4204, pp. 184-191, 2000.
- 26 <sup>a</sup> E. Atkin, P. Buzhan, B. Dolgoshein, A. Ilyin, I. Ilyushchenko, V. Kantserov, V. Kaplin, A. Karakash, F. Kayumov, Yu. Mishin, A. Pleshko, E. Popova, S. Smirnov, Yu. Volkov. <sup>b</sup> A. Goldsher, L. Filatov, S. Klemin. <sup>c</sup> V. Chernikov, Yu. Dmitriev, V. Subbotin, "Scintillation Fiber Detector of Relativistic Particles", <sup>a</sup> Moscow Engineering Physics Institute, Moscow, 115409, Scientific Research Institute. Okruzhnoy proezd, 27, Moscow, 105187. <sup>c</sup> Scientific Research Institute of Pulse Technique Luganskaya str., 9, Moscow, 115304.
- 27 Junyong Sun, Qiang Huang, and John A. Gilbert, "Comparing cross talk in doped scintillating-fiber bundles". 15361539.pdf., *Applied Optics* / **Vol. 34**, no 9/ 20, page 1536, march 1995.
- 28 E.C. Aschenauer, J. Bähr, V. Gapienko, B. Hoffmann, A. Kharchilava, H. Ludecke, R. Nahnauer, R. Shanidze, "Development of scintillating fiber detector technology for high rate particle tracking", DESY-IfH Zeuthen. 9710001.pdf, 1997.
- 29 D. P. Hutchinson, R. K. Richards, L. C. Maxey, and D. E. Holcomb, "Wavelength-shifting fiber readout of scintillation detectors", Instrumentation and Controls Division—ORNL. R. G. Cooper—SNS, International Workshop on Position-Sensitive Neutron Detectors, Berlin, Germany, June 28-30, 2001.
- 30 ORTEC, *Gama-Ray Spectroscopy Using NaI(Tl)*, Experiment 3, [www.ortec.com](http://www.ortec.com), 1996.
- 31 A. Fernández Fernández, B. Brichard, F. Berghmans, and M. Décreton, "Dose-rate dependencies in gamma-irradiated in-fibre Bragg gratings", *IEEE Trans. on Nuclear Science*, **vol. 49**, pp. 2874-2878, December 2002.
- 32 A. Fernández Fernández, F. Berghmans, B. Brichard, A. Gusarov, O. Deparis, M. Décreton, P. M egret, M. Blondel, and A. Delchambre, "Radiation-resistant WDM optical link for thermonuclear fusion reactor instrumentation", *IEEE Trans. on Nuclear Science*, **vol. 48**, no. 5, 2001.

- 33 M.Yoshida, *K2K: Full Active Scintillator Tracker*. (KEK), yoshida.pdf, 2002.Sep.28@ Kyoto. 2000.
- 34 David Griscom, “ $\gamma$ -ray induced optical attenuation in Ge-doped silica fiber image guides”, Naval Research Laboratory, Washington, DC. USA. *J. Appl. Phys.* **78** (11), 1 December 1995.
- 35 P. Borgermans, B. Brichard, F. Berghmans, M. Decreton, A. Tomashuk, I. Nikolin, and K. Golant, “On-line gama dosimetry with phosphorous and germanium co-doped optical fibres”, *Proc. of RADECS'99, vol. IEEE TH8471*, pp. 477-482, 1999.
- 36 S. Vasiliev, E. Dianov, K. Golant, O. Medvedkov, A. Tomashuk, V. Karpov, M. Grekov, A. Kurkov, B. Lecomte, and P. Niay, “Performance of Bragg and long-period gratings written in N-doped and Ge-doped silica fibers under  $\gamma$ -radiation”, in *Radecs'97, IEEE TRANSACTIONS ON NUCLEAR SCIENCE, VOL.45, NO. 3, JUNE 1998*.
- 37 A. Gusarov, A. Fernández Fernández, S. Vasiliev, O. Medvedkov, M. Blondel, and F. Berghmans, “Effect of gama-neutron nuclear reactor radiation on the properties of Bragg gratings written in photosensitive ge-doped optical fibre”, *Nucl. Instr. Methods in Phys. Res. B*, **2001**. ELSEVIER. Nuclear Instruments and methods in Physics Research B 187, 79-86, (2002).
- 38 A. Gusarov, F. Berghmans, O. Deparis, A. Fernández Fernández, Y. Defosse, P. Megret, M. Décreton, and M. Blondel, “High total dose radiation temperature effects on temperature sensing fibre Bragg gratings,” *IEEE Photonics Technology letters*, **no. 9**, pp. 1159-1161, 1999.
- 39 David E. Holcomb, “Miniature, Scintillation-Based, In-Core, Self-Powered Flux and Temperature Probe for HTGRs”, U.S. DEPARTMENT OF ENERGY. NUCLEAR ENERGY RESEARCH INITIATIVE. Proposal No.: 01-039, *Oak Ridge National Laboratory, 1998*.
- 40 JOHN G.WESTERFELD, “A liquid scintillation/luminescence counter with reagent injectors”, (P e r k i n E l m e r Wallac, G a i t h e r s b u r g, MD), page 18-20, March 2000.
- 41 Solar Low Energy Neutrino Laboratory. MOON-I design. “Scintillation Fiber readout”, 1998.

- 42 M.J.Christ<sup>1</sup>, C.M.Benson<sup>1</sup>, F.A.Berry<sup>1</sup>, W.F.Fountain<sup>1</sup>, J.S.Johnson<sup>1</sup>, J.W.Watts<sup>1</sup>, J.C.Gregory<sup>2</sup>, T.A.Parnell<sup>2</sup>, Y.Takahashi<sup>2</sup>, R.B. Munroe<sup>3</sup>, “The Scintillating Optical Fiber Calorimeter Instrument Performance (SOFCAL)”, <sup>1</sup> Marshall Space Flight Center/NASA, Huntsville AL. 35812, <sup>2</sup> University of Alabama in Huntsville, Dept of Physics, 35899, <sup>3</sup> University of Mobile, Mobile AL, 1999.
- 43 Alexander Gorin<sup>1</sup>, Igor Manuilov<sup>1</sup>, Andrei Ryazantsev<sup>1</sup>, Kei-ichi Kuroda<sup>2</sup>, Kouji Morimoto<sup>3</sup>, Takayuki Oku<sup>3</sup>, Hirohiko M. Shimizu<sup>3</sup>, Fuyuki Tokanai<sup>3</sup>, Jun-ichi Suzuki<sup>4</sup>. “Development of Scintillation Imaging Device for Cold Neutrons”, <sup>1</sup> Institute for High Energy Physics, Protvino, Moscow region, Russia, <sup>2</sup> Advanced Research Institute for Science and Engineering, Waseda University, Tokyo, Japan, <sup>3</sup> RIKEN (The Institute of Physical and Chemical Research), 2-1 Hirosawa, Wako, Saitama 351-0198, Japan, <sup>4</sup> Japan Atomic Energy Research Institute, 2-4 Shirakata Shirane, Tokai, Ibaraki 319-1195, Japan. Wls5\_preprint.pdf, Preprint submitted to *ELSEVIER*. 6 january 2001.
- 44 R.Hui, , J.Thomas, C. Allen, B. Fu, and S. Gao, “Low-Coherent WDM Reflectometry for Accurate Fiber Length Monitoring”, *IEEE Photonics Technology Letters*, **Vol.15, No 1**, January 2003.
- 45 Raman Kashyap, “Photosensitive Optical Fibers: Devices and Applications”. BT Laboratories, Martlesham Heath, Ipswich IP5 7RE, United Kingdom. 1994.
- 46 J. Nilsson, W. A. Clarkson, R. Selvas, J. K. Sahu, P. W. Turner, S. U. Alam, and A. B. Grudinin, “High-power Wavelength-tunable Cladding-pumped Rare-earth-doped Silica Fiber Lasers”, Optoelectronics Reseach Centre, University of Southampton SO17 1BJ, UK. Southampton Photonics, 3 Wellington Park, Hedge End, Southampton SO30 2QU, UK. 2003.
- 47 D. Johnson, P. P. Antich, J. A. Anderson, J. Fernando, G. Thambi and R. W. Parkey, E. Fenyves and R. Cheney. ”CT Imaging at High Energy using Plastic Scintilliating Optical Fibers”, *SPIE* **Vol. 2281/71**. 2000.
- 48 D. Ress, R. A. Lerche, R. J. Ellis, G. W. Heaton, M. B. Nelson, and G. Mant, D. E. Lehr, “Scintillating-fiber Imaging Detector for 14MeV Neutrons”, *SPIE*, **Vol.2281**, 1995.
- 49 Vchristian Joram, “Scintillation + Photo Detection”, CERN Summer Student Lectures of Particle Detectors 2002, page 23, SSL\_PD\_111.pdf, 2002.



- 50 Peter Valk, Dale Bailey, David Townsend, Michael Maisey. *Positron Emission Tomography. Basic Science and Clinical Practice*, 883 pages, Edit Springer.2003.
- 51 <sup>a</sup> J.F. Rivas-Silva, L.Rodríguez-Merino, A. Flores-Riveros. <sup>b</sup> M.Berrondo. “Ab initio Calculations for Absorption and Emission Energies of Alkali Halide Crystals Doped with Thallium”, *International Journal of Quantum Chemistry*, **Vol. 77**, 785-790 (2000).
- 52 <sup>a</sup>J. F. Rivas-Silva, <sup>a</sup>S. Durand-Niconoff, <sup>b</sup>T. M. Schmidt, <sup>c</sup>M. Berrondo. “Theoretical Explanation of the Quenching of Luminescence in Cerium-Doped Ytterbium oxyorthosilicate”, <sup>a</sup>Instituto de Física “Luis Rivera Terrazas”, Universidad de Puebla. Puebla, 72570, México, <sup>b</sup>Departamento de Física, Universidad Federal de Uberlandia, C.P.593, 38400-902. Uberlandia MG. Brasil. <sup>c</sup>Department of Physics and Astronomy, Brigham Young University, Provo, Utah, USA, 2000.
- 53 <sup>a</sup> J.F. Rivas-Silva, L.Rodríguez-Merino, A. Flores-Riveros, <sup>b</sup> M.Berrondo. “Electronic calculations on fluorides and oxides of Zr, Hf and Th”, <sup>a</sup> Instituto de Física, Menemérita Universidad de Puebla, México. <sup>b</sup> Department of Physics and Astronomy, Brigham Young University, Provo, Utah, USA, 2001.
- 54 Hamamatsu Co, “Metal Package Photomultipliers Tube, R7400U Series Fotosensor Modules Datasheet”, R7400P.pdf, 8 pages. [www.hamamatsu.com](http://www.hamamatsu.com), USA, 1999.
- 55 ORTEC Co, “Fast Timing Amplifier. Model FTA820. Operating and Service Manual. ORTEC”, 12 pages, USA, 1989.
- 56 ORTEC & CAMBERRA, “821 Series Quad Discriminators. NIM Model. Operator’s Manual. LeCroy”, 38, [www.ortec.com](http://www.ortec.com), [www.camberra.com](http://www.camberra.com), USA, 1983.
- 57 ORTEC, “Octal Constant fraction Discriminator. Model CF8000. Operating and Service Manual”, 11 pages, USA, 1989.
- 58 EG&G ORTEC, “Time to Amplitude Converter/Single Channel Analyzer. Model 567. Operating and Service Manual”, 17 pages, USA, 1989.
- 59 Eugene Hecht and Alfred Zajac, *OPTICA*, Edit. Addison-Wesley Iberoamericana, 586 págs, 1986.
- 60 Carlos G. Treviño, Jazmín Carranza y Roberto Ortega, “Diseño y construcción de un acoplador Láser-Fibra óptica”, *Revista Instrumentación y Desarrollo*. **Vol 3, no1/1991**.
- 61 T. Izawa and S. Sudo, “Optical Fibers: Materials And Fabrication”, *KTK Scientific Publishers/Tokyo*, 186 pages, 1986.

- 62 Kenneth A. Janes, *Introduction to Optical Electronics*, Ed. Harper and Row, Publishers, New York, 430 pages, 1987.
- 63 Julie P. Harmon. Gerry K. Noren, *Optical Polymers Fibers and Waveguides*. American Chemical Society, Washington, DC. 251 pages, 1999.
- 64 Allen H. Cherin, *An Introduction to Optical Fibers*. Ed. McGraw Hill. 326, pages, 1985.
- 65 E. De la Rosa-Cruz, L.A. Díaz-Torres, R.A. Rodríguez, G. A. Kumar. C.W. Dirk, O. Rodríguez, S.Kopecky. Y.Díaz-Torres. “Fluorescence Characterization of the Ternary System TMQ-PBDBD365-POPOP dyes doped polystyrene Optical Fiber under Gama and UV-irradiation”, *Proc. SPIE*, **Vol. 4461**, pp 200-205 (2001).
- 66 Fibra Óptica y la Construcción de Instrumentos (*Edición en ruso*), 328 pages, Editorial Mashinostroyenia, Leningrado, 1987.
- 67 M.J. Digonnet, *Fiber Optic and Laser Sensors*, *SPIE 2070*, **XI**, 113, 1993.
- 68 E. Desurvire, J.R. Simpson, *J. of L. Technol.* **7 (5)**, 835, 1989.
- 69 E. Desurvire, J. L. Zyskind, C. R. Giles, *J. of L. Technol.* **8 (11)**, 1730, 1990.
- 70 J. R. Armitage, *IEEE Journal of Quantum Electronics*, **26 (3)**, 423, 1990.
- 71 E. Desurvire, C. R. Giles, J. R. Simpson, *J. of L. Technol.* **7**, 2095, 1989.
- 72 E. Desurvire, J. R. Simpson, P. C. Becker, *Optics Letters*, **12 (11)**, 888, 1987.
- 73 G. Pfenning, H. Klewe-Nebenius, W. Seelmann-Eggebert. “Chart of the Nuckides”, *Karlsruher Nuklidkarte*. 6, Institute für Radiochemie. Deutschland, Auflage 1995.
- 74 [www.microchip.com](http://www.microchip.com)

## A P E N D I C E

### Estadística de las radiaciones.

#### Ap.1. Leyes de decaimiento radiactivo y radioactividad.

En una población determinada, el número de fallecimientos por año depende del número de personas que forman la población, mientras más habitantes tenga mayor será el número anual de decesos. Sin embargo como el proceso es estocástico (al azar), no es posible saber con precisión el número exacto de fallecimientos que ocurrirán el año próximo y mucho menos determinar qué personas morirán. Mediante las estadísticas se puede obtener un valor promedio “esperado”, que se acercará más al valor observado cuando la población sea muy grande y el intervalo de tiempo considerado sea mucho menor que la vida promedio de los habitantes.

Se ha observado que los núcleos radioactivos se comportan de manera similar, se transforman espontáneamente mediante procesos explicados anteriormente, sin embargo hasta hoy no es posible determinar cuál núcleo se va a transformar en el siguiente segundo, ya que es un proceso al azar, que es independiente de las condiciones físicas y químicas (temperatura, presión, composición, concentración, etc) [3]. Si se tiene un gran número  $N$  de núcleos radioactivos idénticos en una muestra, la fracción de núcleos que se transforma por unidad de tiempo es constante, esto se expresa matemáticamente como:

$$\frac{dN}{Ndt} = \lambda \tag{A.1}$$

donde  $\lambda$  es la constante de decaimiento (característica de cada radionúclido),  $dN$  es el número de núcleos que se transformaron en el intervalo de tiempo  $dt$ .

Claramente puede verse que  $\lambda$  es la fracción de los núcleos presentes que se transforman en la unidad de tiempo, por tanto su unidad es  $s^{-1}$ .

La actividad de un elemento es el número total de desintegraciones o transformaciones por unidad de tiempo.

$$A = \frac{dN}{dt} = -\lambda N \quad (A.2)$$

Así, puede verse que la actividad es directamente proporcional al número de átomos radioactivos presentes en la muestra, el signo negativo nos indica que la actividad disminuye conforme pasa el tiempo, pues conforme se van transformando los núcleos su número total va siendo cada vez menor. Para toda fuente radioactiva su actividad disminuye con el tiempo sin que podamos hacer nada para evitarlo ni para modificar su rapidez con que decae. La unidad de actividad es el Bequerel (Bq) y es  $s^{-1}$ , un Bq es una transformación cada segundo. Anteriormente se usaba como unidad de actividad el Curie (Ci), que corresponde aproximadamente a la actividad de 1g de  $^{226}\text{Ra}$ , actualmente se ha establecido como valor internacionalmente aceptado que  $1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{ Bq}$ , exactamente.

En la práctica, la radioactividad se mide mediante un conteo que se obtiene con la ayuda de un detector. El número de señales registradas es proporcional a la actividad [3].

$$I = \varepsilon A \quad (A.3)$$

Donde  $\varepsilon$  es la eficiencia total de detección. Esta depende de la naturaleza del detector, de la geometría, etc. El valor  $\varepsilon$  se obtiene con la ayuda de patrones, en la cual se conoce la actividad absoluta. Por ejemplo, en radioquímica se efectúan mediciones relativas, lo que evita la medida de  $\varepsilon$ .

## **Ap.2. Carácter estadístico en la emisión radioactiva.**

Las leyes de la evolución de la actividad de los radioelementos describen el comportamiento medio de un conjunto de  $N$  núcleos radioactivos[3]. Esas leyes se han establecido comparando la variación del número de núcleos a la de una función continua.

No es más que una aproximación, puesto que la variable (número de núcleos) es una cantidad discontinua. Dado el carácter estadístico de la emisión radioactiva [3], los componentes  $A$  y  $N$  de la siguiente ecuación:

$$A = \lambda N = \lambda N_0 e^{-\lambda t} \quad (A.4)$$

no tienen un valor bien definido como la mayor parte de los fenómenos físicos usuales observables. Una medida única de una fuente radioactiva conduce a un número de desintegraciones, expresada en cuentas por minuto (c/min). Repitiendo el número de medidas se puede determinar un valor medio de las series de desintegraciones.

Las medidas experimentales presentan una distribución estadística alrededor de esta media, en la cual, el intervalo refleja las fluctuaciones de las medidas de radioactividad. De ahí la justificación presentada en la propuesta hecha por el detector portátil de bajo costo, explicado en el capítulo 5.

### **Ap.2.1. Error, exactitud y precisión.**

En alguna medida de cantidad, es probable que ocurra un error a una desviación en la obtención del valor verdadero de esa cantidad [3]. Existen dos tipos de errores, el sistemático y el aleatorio. Los errores sistemáticos se originan por el mal funcionamiento del equipo de medición y por las inapropiadas condiciones experimentales; éstas se pueden corregir rectificando la situación.

Los errores aleatorios o de azar se originan por fluctuaciones aleatorias en las condiciones experimentales, por ejemplo, fluctuaciones de alto voltaje o fluctuaciones en la cantidad que se va a medir tal como el decaimiento radioactivo.

La exactitud de una medida refleja que tan cercano se está del valor verdadero.

La precisión de una serie de medidas describe que tan reproducibles son las medidas e indica la desviación mediante el valor promedio. El valor promedio de las mediciones puede estar lejos del valor verdadero.

Mientras más cerca se encuentra una medida del valor promedio, más alta es la precisión y mientras más cerca se encuentra esta medida del valor verdadero, existe más exactitud de dicha medida. La precisión se puede mejorar eliminando los errores aleatorios, mientras que para tener mejor exactitud es necesario eliminar los dos tipos de errores.

### **Ap.2.2. Desviación estándar.**

La desviación estándar de un grupo de medidas indica la precisión de las mismas [3]. La desintegración radioactiva sigue la ley de la distribución de Poisson, y a partir de esta se puede saber si una muestra radioactiva da un conteo promedio  $\bar{n}$ , entonces su desviación estándar se expresa por:

$$\sigma = \sqrt{\bar{n}} \quad (A.5)$$

y la media será:  $\bar{n} \pm \sigma$

La desviación estándar en medidas de actividad indica la fluctuación estadística de la desintegración radioactiva.

Si un conteo único  $n$  de una muestra radioactiva es muy largo, entonces  $n$  se puede estimar cercano a  $\bar{n}$  y se puede sustituir en la ecuación anterior, es decir:

$$\sigma = \sqrt{n} \quad (A.6)$$

Por ejemplo, la desviación estándar de un conteo de una muestra radioactiva donde se obtienen 10000 cuentas será 100.

Por otro lado, cuando se efectúan  $k$  medidas sucesivas ( $n_1, n_2, \dots, n_k$ ) de la actividad de un radionúclido, los valores obtenidos se reparten estadísticamente alrededor del valor

verdadero. La mejor estimación del conjunto de conteos es la media aritmética de las observaciones individuales:

$$\bar{n} = \frac{1}{k} \sum_{mi} \frac{1}{k} (n_1 + n_2 + \dots) \quad (A.7)$$

implica que el límite de confianza del 68% de todas las medidas podrán caer con una desviación estándar a  $l$ , a ambos lados del valor promedio. Es decir, en el rango comprendido entre  $\bar{n} - \sigma$  y  $\bar{n} + \sigma$ . Simultáneamente 95% de las medidas caerán con dos desviaciones estándar ( $\bar{n} - 2\sigma$  a  $\bar{n} + 2\sigma$ ) y 99% de los datos con tres desviaciones estándar ( $\bar{n} - 3\sigma$  a  $\bar{n} + 3\sigma$ ).

Una cantidad más útil es la desviación estándar expresada en un porcentaje durante el análisis estadístico de datos de conteo, la cual se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$\sigma(\%) = \frac{\sigma}{n} \times 100 = \frac{100\sqrt{n}}{n} = \frac{100}{\sqrt{n}} \quad (A.8)$$

Esta ecuación indica que cuando  $n$  aumenta,  $\sigma(\%)$  disminuye y, por lo tanto, la precisión de las medidas aumenta.

La precisión es mucho mejor mientras el número de cuentas registradas sea más elevado, supongamos, por ejemplo, si se registran 10000 cuentas:

$$\sigma = \sqrt{10000} = 100$$

Existe 68% de probabilidad de que el valor medio esté comprendido entre 9900 y 10100 cuentas; 95% de probabilidad de que esté comprendido entre 9800 y 10200, etc.

En el primer caso, la precisión es de  $\frac{10 \times 100}{10000} = 1\%$ ; en el segundo caso, es de

$$\frac{200 \times 100}{10000} = 2\%$$

Pero si se cuentan  $10^5$  cuentas, la precisión con un nivel de confianza de 68% es de 0.3% y con un nivel de confianza es de 0.6%.

Así, la precisión de un conteo de una muestra radioactiva puede aumentar cuando se tiene un gran número de cuentas.

Para un conteo de 10000 cuentas,  $\sigma(\%)$  es 1%, mientras que para un conteo de 1000000  $\sigma(\%)$  es de tan sólo el 0.1%.

### Ap.2.3. Desviación estándar de un conteo.

La desviación cuando se realiza un conteo de alguna muestra radioactiva, es [3]:

$$\sigma_c = \frac{\sigma}{t} \quad (A.9)$$

donde  $\sigma$  es la desviación estándar del conteo total  $n$  durante el tiempo  $t$ .

$$\sigma_c = \frac{\sqrt{n}}{t} = \sqrt{\frac{ct}{c}} = \sqrt{\frac{c}{t}} \quad (A.10)$$

donde  $n$  es igual a la velocidad de conteo  $ct$ .

Ejemplo: una muestra radioactiva se cuenta durante ocho minutos y se obtienen 3200 desintegraciones. Calcular la velocidad de conteo promedio y la desviación estándar de la medida.

La velocidad de conteo promedio  $c=3200/8 = 400$  cpm

La desviación estándar  $\sigma_c = \sqrt{\frac{c}{t}} = \sqrt{\frac{400}{8}} \pm 7$

Por lo tanto, la velocidad de conteo promedio es  $400 \pm 7$  cpm.

Alguna situación se puede presentar, en la cual dos cantidades “x” y “y” pueden ser sumadas, restadas, multiplicadas y divididas, con sus respectivas desviaciones estándar.



Los resultados de las desviaciones estándar de estas operaciones aritméticas están expresados por las siguientes ecuaciones:

$$\text{Suma: } \sigma(x + y) = \sqrt{\sigma x^2 + \sigma y^2} \quad (A.11)$$

$$\text{Resta: } \sigma(x - y) = \sqrt{\sigma x^2 - \sigma y^2} \quad (A.12)$$

$$\text{Multiplicación: } \sigma(xy) = (xy)\sqrt{(\sigma x / X)^2 + (\sigma y / Y)^2} \quad (A.13)$$

$$\text{División: } \sigma(x / y) = (x / y)\sqrt{(\sigma x / X)^2 + (\sigma y / Y)^2} \quad (A.14)$$

Ejemplo: una muestra radioactiva de un conteo promedio de  $9390 \pm 95$  cuentas en un tiempo de  $20 \pm 1$  [min]. Calcular la velocidad de conteo promedio y su desviación estándar.

La velocidad de conteo promedio  $c = 9390/20 = 470$  cpm

$$\text{La desviación estándar } \sigma_c = \frac{9390}{20} \sqrt{\left(\frac{95}{9390}\right)^2 + \left(\frac{1}{20}\right)^2} = 24$$

Así el conteo promedio es  $470 \pm 24$  cpm

#### **Ap.2.4. Ley de probabilidad en medidas de radioactividad.**

Consideremos una serie de  $k$  medidas sucesivas de una misma muestra radioactiva durante tiempos de conteo iguales  $t$ . El conjunto de valores observados  $n_1, n_2, \dots, n_k$ , constituyen una muestra de la población total de valores que se obtendrían para un número infinito de mediciones. No se puede evidentemente conocer el valor de  $m$  que corresponde a la media de esta población y que definiría el valor más probable del número de desintegraciones, pero se demuestra que la mejor estimación que se puede hacer de esta medida se obtiene calculando la media  $\bar{n}$  del conjunto de los valores medidos.

Este valor  $\bar{n}$  representa igualmente la mejor estimación de la varianza. De hecho, el valor que se considera es el cociente  $a_t = n/t$ , que representa la actividad de la muestra desconocida  $A$  (en cpm).

Los valores  $a_1 = n_1/t$ ,  $a_2 = n_2/t$ , etc, son variables aleatorias que se distribuyen alrededor del valor medio  $A = m/t$  según la ley de Gauss, en la cual la varianza es:

$$\sigma^2 = \frac{m}{t^2} = \frac{A}{t} \quad (A.15)$$

La mejor estimación que se puede hacer del valor A es, por lo tanto, el valor promedio:

$$\bar{a}_t = \frac{a_1 + a_2 + \dots + a_k}{k} = \frac{\bar{n}}{t} \quad (A.16)$$

Las variables  $\bar{n}$  y  $\bar{a}_t$  que se deducen de  $k$  medidas con duración  $t$ , también son variables aleatorias donde las leyes de probabilidad son leyes de Gauss, con lo siguientes parámetros:

$$\text{Media de } \bar{n} : m = At \quad (A.17)$$

$$\text{Varianza de } \bar{n} : \frac{m}{k} = \frac{At}{k} \quad (A.18)$$

$$\text{Media de } \bar{a}_t : \frac{m}{t} = A \quad (A.19)$$

$$\text{Varianza de } \bar{a}_t : \frac{m}{kt^2} = \frac{A}{kt} \quad (A.20)$$

Todo lo que sigue concierne a medidas que se van a realizar fijando el tiempo, es decir, para una duración  $t$ . A veces se llegan a efectuar medidas de radioactividad teniendo cuenta el tiempo necesario para observar un número determinado de desintegraciones: éstas son medidas fijando el número de cuentas. En este caso, se puede demostrar que la duración  $t$  de las medidas y el valor  $a_n = n/t$  son variables aleatorias, en que las distribuciones pueden ser similares a distribuciones de Gauss con los siguientes parámetros:

$$\text{Media de } t = \frac{n}{A} \quad \text{media de } a_n = A \quad (A.21)$$

$$\text{Varianza de } t = \frac{n}{A^2} \quad \text{varianza de } a_n = \frac{A^2}{n} \quad (A.22)$$

Si se efectua una serie de  $k$  medidas fijando el número de cuentas (tal que  $k_n$  sea pequeño ante el número total  $n$  de los átomos presentes), el conjunto de valores de la variable  $a_n$ :

$$a_1 = \frac{n}{t_1}, a_2 = \frac{n}{t_2}, \dots, a_k = \frac{n}{t_k} \quad (\text{A.23})$$

se reparte alrededor del valor desconocido de  $A$  según la ley de Gauss, de varianza  $A^2/n$ . La mejor estimación que se puede hacer de  $A$  es el valor medio:

$$\bar{a}_n = \frac{n}{k} \left( \frac{1}{t_1} + \frac{1}{t_2} + \dots + \frac{1}{t_k} \right) \quad (\text{A.24})$$

El término  $\bar{a}_n$  es una variable aleatoria, en la cual la ley de probabilidad es una ley de Gauss de media  $A$  y varianza  $A^2/nk$ .

### Ap.2.5. Errores aleatorios en medidas de radioactividad.

La medida de radioactividad de una muestra radioactiva consiste en obtener una apreciación tan conveniente como posible del valor  $A$  de su radioactividad a partir del valor experimental  $a = n/t$ , donde  $n$  es el número de desintegraciones obtenidas durante un tiempo  $t$ .

La ley de probabilidad de la variable aleatoria  $a$  puede ser semejante a una ley normal, en la cual la media  $m$  es igual al valor desconocido de la radioactividad de la muestra  $A$  y la desviación estándar es igual a la raíz cuadrada de la media. En el caso de una medida única, la mejor estimación de la media es el resultado de esta medida y la estimación de la varianza es la raíz cuadrada de la medida. Por ejemplo, si se limitara a realizar una sola medida resultando 4496 cuentas en dos minutos, la desviación estándar de ésta será:

$$\sigma_n = \sqrt{4498} = 67 \quad \text{o bien} \quad \sigma_n (\%) = \frac{67 \times 100}{4496} = 1.5$$

el resultado se expresa por:

$$n = 4496 \pm 67 \text{ cuentas o } 4496 \pm 1.5\%$$

Pero se desea saber sobre una serie de conteos por unidad de tiempo (*actividad*):

$$a = \frac{n}{t} \sqrt{\frac{n}{t}} = \frac{4496}{2} \frac{76}{2} = 2248 \pm 33.5 \text{cpm}$$

$$a = 2248 \pm 1.5\%$$

En forma más general:

$$n = at \tag{A.25}$$

La desviación estándar en una sola medida es:

$$\sigma_a = \frac{\sqrt{n}}{t} = \frac{\sqrt{at}}{t} = \sqrt{\frac{a}{t}} \tag{A.26}$$

La desviación estándar es inversamente proporcional a la raíz cuadrada del tiempo de conteo. En el ejemplo anterior, esto es:

$$\sigma_a = \sqrt{\frac{2248}{2}} = 33.5$$

La desviación estándar de la ley de probabilidad, del valor medio de  $\bar{a}$  de una actividad de  $k$  medidas de la misma duración  $t$  es:

$$\sigma_{\bar{a}} = \sqrt{\frac{\bar{a}}{kt}} = \sqrt{\frac{2243}{9}} = 15.7$$

En lugar de contar por separado los números  $n_i$  de desintegraciones durante  $k$  medidas sucesivas, se habría podido contar globalmente el número total de desintegraciones:

$$N = \sum_{i=1}^k n_i = t \sum_{i=1}^k a_i \tag{A.27}$$

En el curso de una medida única de duración  $T = kt$ , la estimación de la actividad es, según la siguiente expresión:

$$\frac{N}{T} = \frac{t \sum a_i}{kt} = \bar{a} \tag{A.28}$$

y el error es:

$$\sqrt{\frac{\bar{a}}{T}} = \sqrt{\frac{\bar{a}}{kt}} \quad (A.29)$$

Así el error sobre el valor medio de los resultados de  $k$  medidas con el mismo tiempo  $t$  es igual al error de una medida única de duración total  $T = kt$ .

Se demuestra de la misma manera que el error sobre el valor medio de los resultados de  $k$  medidas efectuadas, prediciendo el número de cuentas  $n$ , es igual al error sobre una medida única, teniendo el número de cuentas predichas de desintegraciones  $N = kn$ .

### **Ap.2.6. Ejemplo de aplicación práctica. Control del buen funcionamiento de un sistema de conteo.**

En el caso de medidas de radioactividad con tiempo largos de conteo, es indispensable asegurar la estabilidad del sistema de conteo. Para esto se realizan medidas de radioactividad periódicamente de un elemento radioactivo de vida media larga y se establece un diagrama de control de la siguiente manera:

+ Determinar la media de la actividad  $\frac{\sum a_i}{k} = 20103/9 = 2234cpm$

+ Determinar la desviación estándar:  $\sigma_a = \sqrt{\frac{\bar{a}}{t}} = \sqrt{\frac{2234}{2}} = 33.5$

+ Calcular los valores correspondientes en el límite de confianza de 95%, para una medida única de dos minutos, es decir:

$$a = \bar{a} \pm t\sigma = 2234 \pm (33.5 \times 1.96) = 2234 \pm 66cpm$$

El límite superior es por lo tanto 2300 cpm. Y el límite inferior es 2168 cpm.

Se efectúa la misma operación para un valor de confianza de 99% ( $t\sigma = 2576 \times 33.5$ ) y se obtiene  $2148 < \bar{a} < 2320$  cpm.

## Glosario de términos:

**Abundancia isotópica:** porcentaje de un núclido que existe en el elemento natural.

**Actividad de un elemento:** es el número total de desintegraciones o transformaciones por unidad de tiempo.

**ADC:** Convertidor Analógico a Digital (*Analogic to Digital Converter*).

**Alfa (radiación o partícula):** Núcleo de helio que consiste en dos protones y dos neutrones, con una carga doble positiva.

**Angstrom,** unidad ( Å ): la unidad métrica longitudinal angstrom es igual a  $10^{-10}$  m.

**Atenuación:** El proceso por el cual, una fuente de radiación un reducido en intensidad al atravesar material del sorne. Él el la la combinación de absorción y esparciendo procesos y loada a una disminución en densidad de flujo de la viga cuando proyectó a través de la materia.

**Braquiterapia:** consiste en la colocación de material radioactivo muy próximo al tumor o en el interior del órgano afectado, liberando radiación ionizante predeterminada donde está localizado el tumor, limitando su efecto nocivo a los órganos adyacentes.

**Número de Avogadro (escala física  $6.025 \times 10^{23}$ ):** es el número de átomos en un gramo de peso atómico de cualquier elemento, inclusive es el número de moléculas en un gramo de peso molecular de cualquier substancia.

**Bremsstrahlung:** emisión de rayos X de baja energía cuando los electrones son frenados y desviados de su trayectoria por los campos coulómicos de los núcleos atómicos.

**CFD:** Discriminador de Fracciones Constantes (*Constant Fraction Discriminator*).

**Conversión interna:** proceso alternativo a la emisión de un fotón gama, un núcleo excitado, en lugar de emitir un rayo gama de energía  $h\nu$ , puede impartir toda o parte de su energía de excitación directamente a uno de sus electrones atómicos.

**Decaimiento alfa:** modo de decaimiento radioactivo en el cual el número de masa de un átomo pesado disminuye en cuatro unidades y el número atómico en dos unidades.

**Decaimiento beta:** modo de decaimiento radioactivo en el cual el número de masa permanece sin cambiar, pero el número atómico aumenta o disminuye en una unidad.

**Decaimiento gama:** modo de desexcitación nuclear en el cual no hay cambio en el número de masa ni en el número atómico.

**Desviación estándar:** es una medida de dispersión muy empleada en estadística. Nos da una idea de qué tanto los valores individuales se alejan del valor promedio.  $\langle A \rangle$  sólo nos proporciona el valor promedio de la propiedad A. No sabemos si, durante las diversas mediciones, esta variable física se ha mantenido cercana a su valor promedio o ha oscilado mucho alrededor de él[8].

**Efecto Compton:** interacción directa de una radiación gama con un electrón orbital, resultando un desplazamiento del electrón y una disminución de la energía del fotón gama.

**Efecto fotoeléctrico:** interacción de un fotón gama con un átomo o una molécula resultando una completa absorción de la radiación.

**Electrón ( $e^-$ ):** partícula cargada negativamente girando alrededor del núcleo atómico, tiene una carga de  $4.8 \times 10^{-10}$  unidades electrostáticas y una masa de  $9.1 \times 10^{-28}$  g, equivalente a 0.51 MeV o igual a 1/1836 la masa de un protón.

**Electrón-volt:** cantidad de energía adquirida por una unidad electrónica de carga cuando es acelerada por una diferencia de potencial de 1 volt;  $1 \text{ keV} = 10^3 \text{ eV}$ ,  $1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV}$ .

**Excitación:** uno o varios electrones periféricos de un átomo libre o de un conjunto de moléculas pasan a orbitales más externos. Este estado es inestable y el o los electrones regresan más o menos rápidamente a una órbita más cercana del núcleo. La energía ha efectuado un trabajo de alejando al electrón del núcleo y ha aumentado la energía potencial del átomo. Cuando el electrón regresa a una órbita más central, esta energía se libera en forma de fotones de fluorescencia [3].

**FO:** Fibra Óptica

**FSFO:** Fibra óptica superluminiscente.

**Fluorescencia:** radiación de una longitud de onda en particular emitida por una sustancia como resultado de la absorción de radiación de longitud de onda muy corta. Esta emisión ocurre esencialmente sólo durante la irradiación.

**Higroscópico:** dícese de las sustancias ávidas de agua y de aquellas sobre las cuales se condensa fácilmente el vapor de agua atmosférico.

**HV:** alto voltaje (*high voltaje*).

**Índice de refracción:** es una relación de la velocidad de la luz en el vacío  $c_0$  con referencia al medio  $c$ .

**Isótopo:** Dícese de los átomos cuyos núcleos tienen el mismo número de protones y de electrones, pero diferente número de neutrones [10].

**LCD:** Display de Cristal líquido (*Liquid Crystal Display*).



**Luminiscencia:** emisión de luz como resultado del decaimiento de una molécula excitada a un nivel bajo de energía. En fluorescencia, la emisión de luz cesa inmediatamente después de quitar la fuente de excitación. En fosforescencia, la emisión de luz continúa durante un período medible después de quitar la fuente de excitación.

**MCA:** Tarjeta de Adquisición Multicanal (*Multi Channel Acquisition*).

**Neutrón:** partícula elemental neutra con número de masa igual a la unidad. En estado libre (fuera del núcleo) es inestable, teniendo una vida media de casi 12 min. Decae por el proceso  $n \rightarrow p + e^- + \nu$ .

**Núclido:** Nombre dado por los físicos a todo átomo, definido por su número de masa  $A$ , su número atómico  $Z$  y su estado de energía nuclear [10]. Por ejemplo, cualquier núcleo estable o radioactivo [3], por ejemplo,  $^{12}\text{C}$ ,  $^{14}\text{C}$ ,  $^{40}\text{Ca}$  y  $^{151}\text{Eu}$  todos son núclidos.

**Número atómico (Z):** El número de electrones orbitales que rodean el núcleo de un átomo neutro y según la teoría actual, el número de protones en el núcleo.

**Número de neutrones:** número de neutrones en un núcleo. Símbolo  $N$ , donde  $N=A-Z$ .

**Números mágicos:** número de protones o de neutrones en un núcleo que parecen estar asociados a capas completas y, por lo tanto, los núcleos son muy estables.

**Número de masa (A):** número total de protones y neutrones en un núcleo de un núclido.

**PMT :** Tubo Foto Multiplicador (*Photo Multiplier Tube*).

**Positrón:** electrón con una unidad de carga eléctrica positiva.

**Radioactividad (radioactividad):** la radioactividad de un elemento es el número total de desintegraciones o transformaciones por unidad de tiempo.

**Radiación de aniquilación:** radiaciones de 0.511 MeV emitidas a 180° después de que una  $\beta^+$  se aniquiló con un electrón en la materia.

**Radiación electromagnética:** radiación formada por ondas eléctricas y magnéticas que viajan a la misma velocidad de la luz. Ejemplos: luz, ondas de radio, rayos gama, rayos X.

**Radioisótopo:** sinónimo de isótopo radioactivo. Algun isótopo que es inestable sufre decaimiento con emisión de radiación característica.

**Radioterapia:** es un tratamiento con radiaciones ionizantes que persigue destruir las células cancerosas en el área en la que se administra. Hay dos maneras de administrar radioterapia: La radioterapia externa o común, se suele administrar en "sesiones" de tratamiento, una cada día, que duran unos minutos, y las máquinas de tratamiento no entran en contacto con el paciente. La otra manera de tratar con radioterapia es la llamada braquiterapia o curieterapia.

**Rayos gama:** radiación electromagnética que se origina en los procesos de desexcitación de los núcleos atómicos.

**Resolución:** habilidad para separar las cuentas en un espectro cuando sus energías son muy cercanas.

**Ruido:** ruido que un signo-ruido eléctrico indeseable viene de las fuentes externas tal como la línea de poder de CA, motores, generadores, transformadores, luces fluorescentes, hierros soldando, CRT despliega, computadoras, tormentas eléctricas, soldadores, radio, transmisores, y fuentes interiores como semiconductores, resistencias, y condensadores. El ruido adultera signos que usted está intentando enviar o recibir.

**TAC:** Convertidor de Tiempo a Amplitud (*Time to Amplitude Converter*).

**Transición isomérica:** es el paso ocurrido de un núcleo metaestable (permanencia temporal de un núcleo en estado excitado) a su estado base.

**WLSOF:** Fibra Óptica Corredora de Frecuencias (*Wave Length Shifters Optical Fibre*).