

6. Bases tecnológicas de la Medicina Nuclear

Los equipos técnicos

▶ 6.1 DETECCIÓN Y MEDIDA DE LA RADIACIÓN

La radiación no se puede medir directamente.

Podemos detectar los efectos que directa o indirectamente provoca al atravesar un medio.

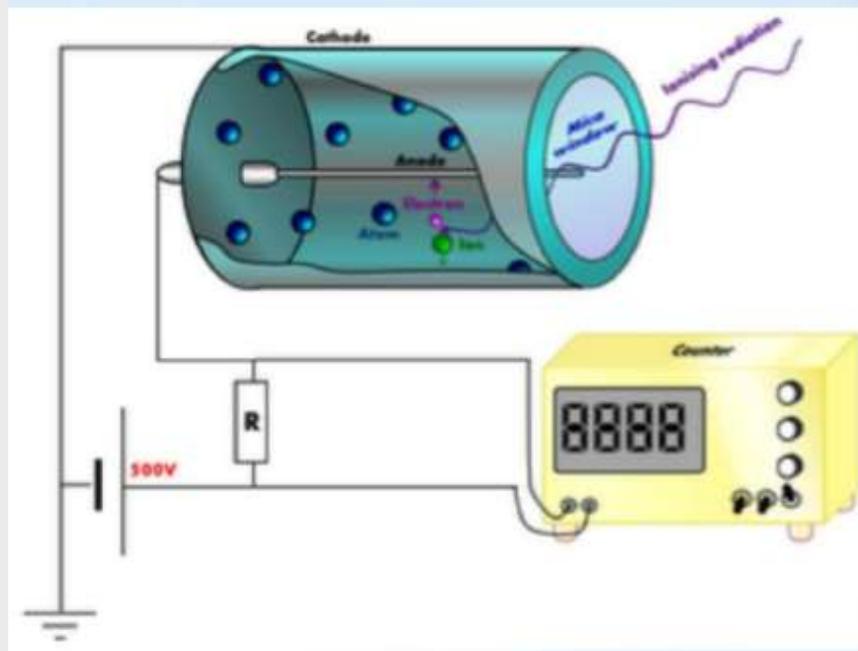
Los detectores de radiación usados se basan en los siguientes efectos:

- Ionización de un gas (detectores de ionización) o de un sólido (detectores de semiconductores) que pasan a ser conductores eléctricos.
- La emisión de fotones de luz visible debido a la excitación de electrones de algunas sustancias (detectores de centelleo).
- Provocar el velado de películas fotográficas (detectores fotográficos). En MN se usan, principalmente, los detectores de centelleo y los detectores de ionización.

Estos últimos, no se aplican a día de hoy y no los estudiaremos en profundidad.

► 6.1.1 Los detectores de Ionización Gaseosa:

- Consiste en una cámara rellena de un gas a presión
- Contiene dos electrodos, uno positivo (un hilo central) y otro negativo (la estructura cilíndrica).
- Se aplica una diferencia de potencial entre los dos electrodos, pero en ausencia de radiación no existe corriente alguna.
- Al pasar radiación el gas se ioniza, creándose pares iónicos de diferente signo.
- Los iones son atraídos por el electrodo de signo contrario, creando una corriente eléctrica proporcional a la intensidad de la radiación, y que puede cuantificarse mediante un electrómetro.



Existen tres tipos: Cámara de Ionización básica, contador proporcional y detector “Geiger Müller”

La cámara de ionización básica.

No generan radiación secundaria. Cada fotón gamma se corresponde con un impulso eléctrico. La cantidad de energía convertida en corriente eléctrica es única para cada radionúclido.

La cámara de ionización se emplea para medir la corriente total generada por múltiples sucesos a lo largo de un determinado periodo de integración.

Se usan principalmente como activímetros o calibradores de dosis, permitiendo calcular la actividad de un radiofármaco



Los contadores proporcionales:

- Al tener voltajes más altos, llegan a los electrodos iones primarios y secundarios.
- Se amplifica la intensidad de corriente eléctrica generada y siendo ésta proporcional a la energía de la radiación incidente.
- No tienen una gran utilidad en MN, pero son usados en investigación para detectar partículas α y β .



Los contadores Geiger Muller

- Tienen un alto voltaje por lo que la ionización primaria provoca una “avalancha” de ionizaciones secundarias.
- Esto permite la detección de sucesos individuales independientemente de la energía de la radiación.
- Tienen un elevado tiempo muerto (tiempo que tarda en “recuperarse” el detector entre una medida y otra)
- Se utilizan principalmente para detectar bajos niveles de radiactividad (muy sensibles) y como detectores de contaminación radiactiva.



6.1.2 Los detectores de Ionización de un sólido (semiconductores):

- Se basan en el mismo proceso que el de las cámaras de ionización, pero en lugar de un gas utilizan un medio sólido: cristales de germanio intrínseco o combinados con litio.
- La ionización del cristal aumenta su capacidad de conducción eléctrica y así detecta la radiación.
- Su aplicación clínica es limitada, debido al pequeño tamaño de los cristales, que alcanzan una sensibilidad muy baja, y a la complejidad del equipo (es necesario que operen a bajas temperaturas incorporando nitrógeno líquido).

6.1.3 Detectores de Centelleo. De ellos hablaremos más adelante

- ▶ MUY BIEN, PERO.....¿COMO ES UNA GAMMACÁMARA POR DENTRO?¿COMO SE PUEDEN DETECTAR LOS FOTONES DE LOS PACIENTES?



- *Gammacámara es el equipo que permite captar la distribución del radiofármaco detectando la radiación gamma.
- *Diseñado por Hal Oscar Anger en 1957 y empleado por primera vez en 1958.



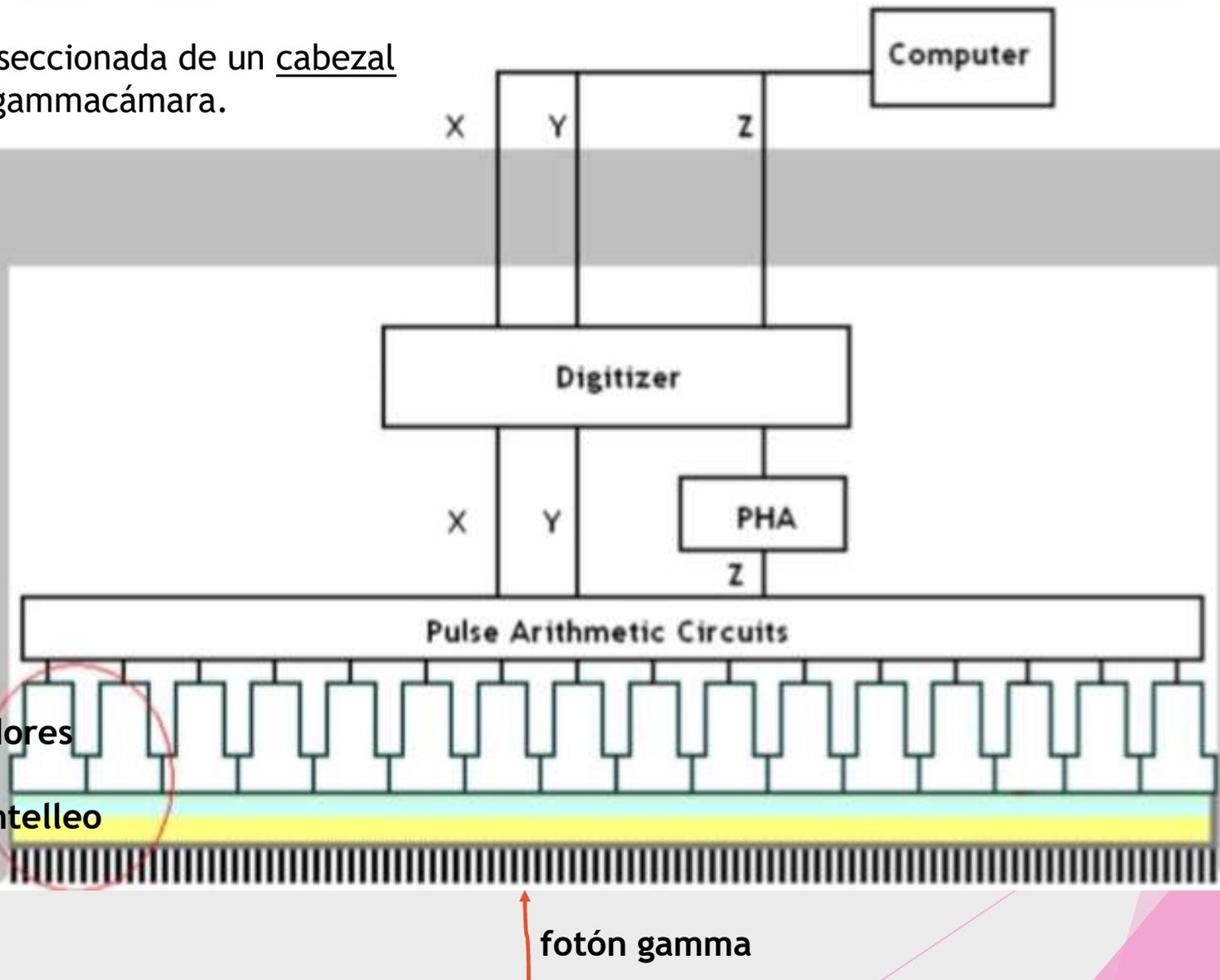
6.2 COMPONENTES DE LA GAMMACAMARA

Serán, si seguimos el recorrido de la energía proveniente del paciente:

- 1- Cabezales: donde se incluyen los colimadores, los cristales de Centelleo y los tubos fotomultiplicadores.
- 2- Equipo electrónico de tratamiento de señal: Donde se analizan los pulsos, se obtiene la imagen analógica y se convierte en digital.
- 3- Camilla de exploración.
- 4- El Gantry.
- 5- Circuito de posicionamiento.
- 6- El procesador de imágenes.



Imagen seccionada de un cabezal de una gammacámara.



Fotomultiplicadores

Cristales de centelleo

Colimadores

fotón gamma

▶ 6.2.1 COLIMADORES

Planchas de plomo con orificios intercalados y separados por septos.

a) Según energía del radioisótopo varía el grosor de los septos, pudiendo ser:

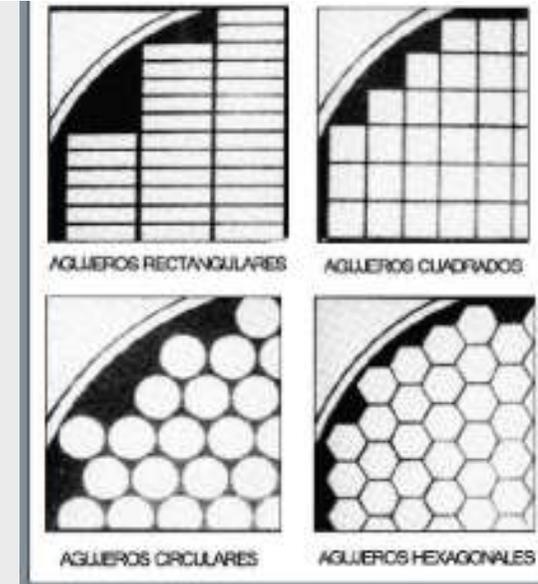
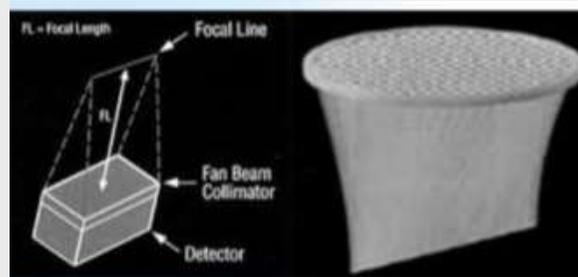
- De Alta Energía (HE). Mas de 300 KeV.
- De Media Energía. Entre 200-300 KeV.
- De Baja Energía. Menos de 200 KeV.

b) Según sensibilidad y resolución espacial deseados varía el tamaño del orificio.

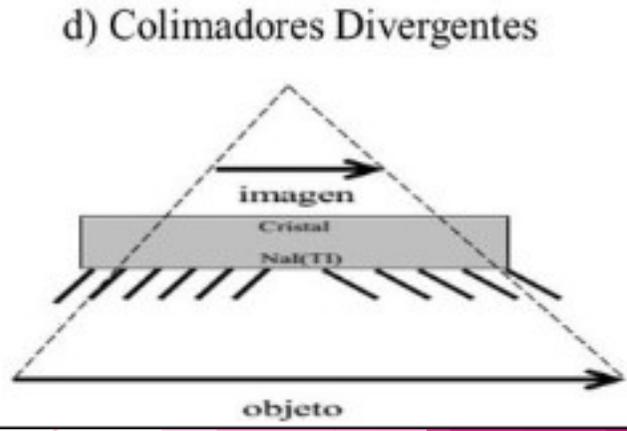
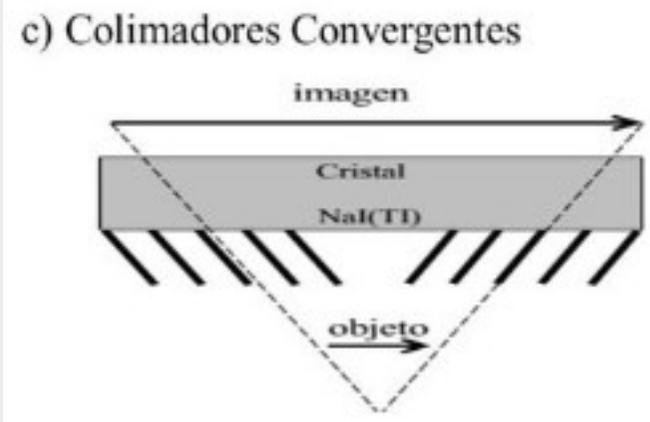
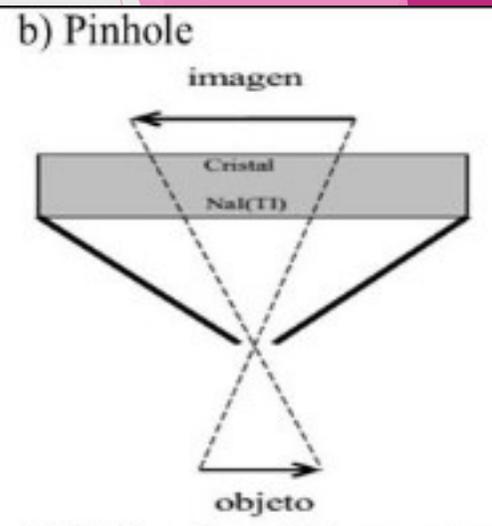
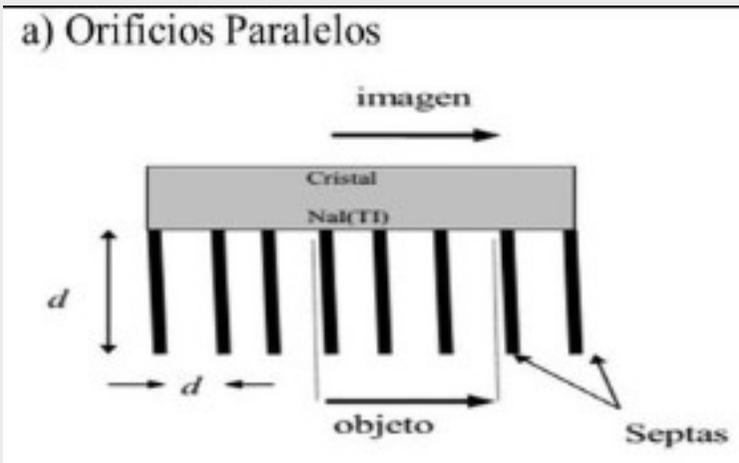
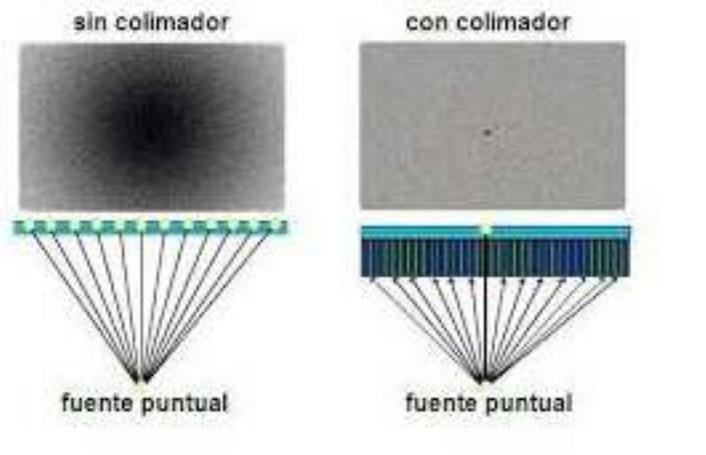
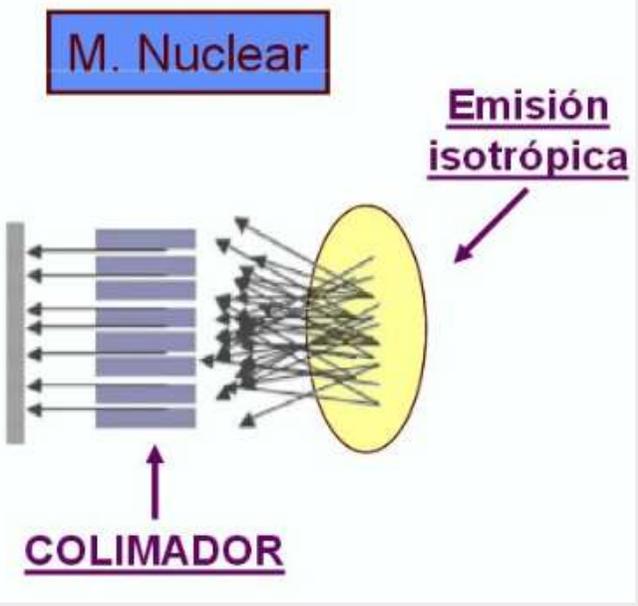
- De Alta sensibilidad y baja resolución.
- De Alta resolución y baja sensibilidad.
- De Sensibilidad y resolución medias.

c) Según diseño de las perforaciones:

- Orificios paralelos.
- Divergentes.
- Convergentes.
- Pin-hole.
- Fan Beam

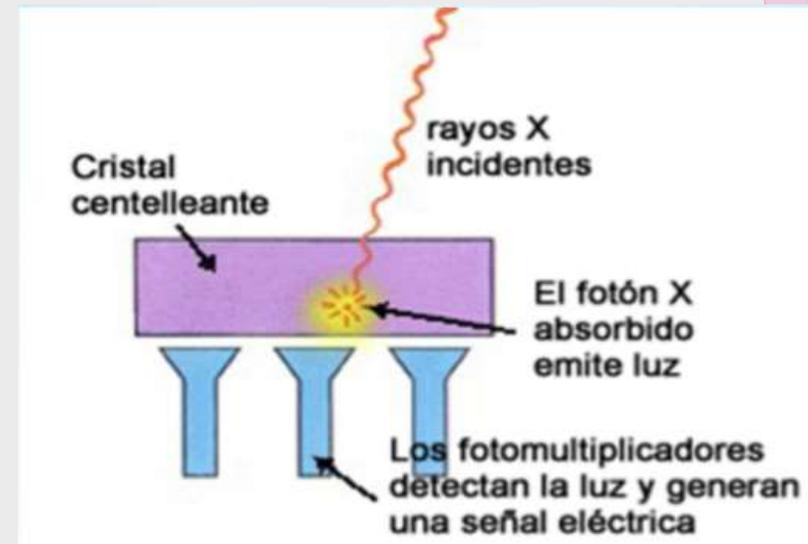
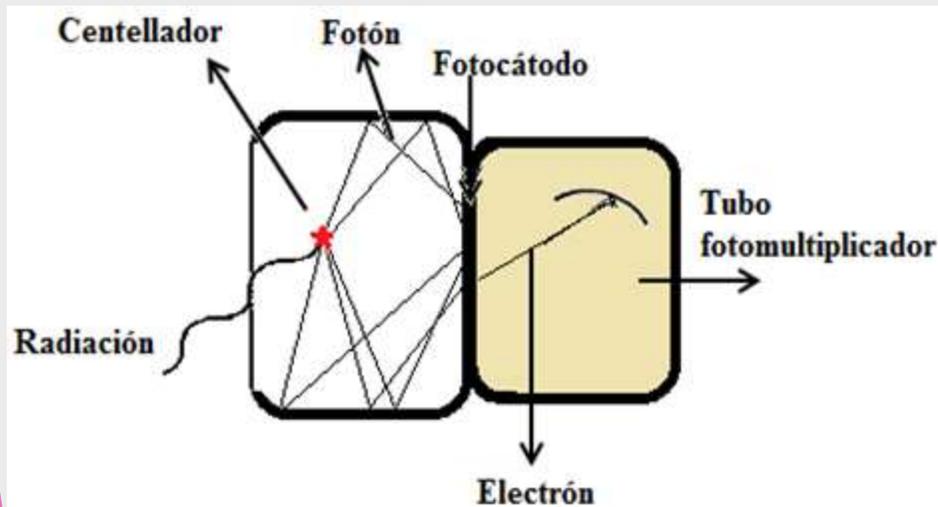


Los más utilizados, por este orden son: LEAP, MEAP, LEHR, LEHS, Pin Hole y Fam Beam



6.2.2 Detectores de Centelleo.

- Las cámaras de ionización gaseosa no son muy sensibles a los rayos X o γ . Debido a la baja probabilidad de interacciones ionizantes.
- Los cristales de yoduro sódico activado con talio NaI (Tl) tienen una alta sensibilidad para los fotones γ . Éstos cristales se emplean como detectores para los sistemas de imagen utilizados en MN.
- Los rayos γ penetran en el cristal y transmiten energía a los electrones de valencia mediante las interacciones fotoeléctricas y Compton. Esta energía eleva a los electrones a la banda de conducción, con una diferencia energética de unos pocos KeV. Al volver los electrones a la banda de valencia, se emiten fotones de luz.
- Este proceso se denomina centelleo, y tiene una duración aproximada de 10^{-6} segundos.



- Los cristales de centelleo son los más usados en MN.
- Son “baratos” y permiten una gran flexibilidad de tamaño y forma.
- Su potencia de frenado es adecuada para el rango de energías con el que se trabaja en MN.
- Debido a la rapidez del proceso de centelleo, tienen un tiempo muerto mucho menor que otros detectores, lo que le permite ser capaz de detectar dos sucesos muy próximos en el tiempo.
- Entre sus inconvenientes se encuentran su fragilidad y su elevada naturaleza hidrofóbica, que requiere recipientes sellados de forma hermética.
- El cristal está rodeado por un recipiente de aluminio, excepto por el lado por el que salen los fotones emitidos, que está cubierto por una fina ventana de cuarzo.

Los fotones de luz van a ser detectados por un tubo fotomultiplicador.

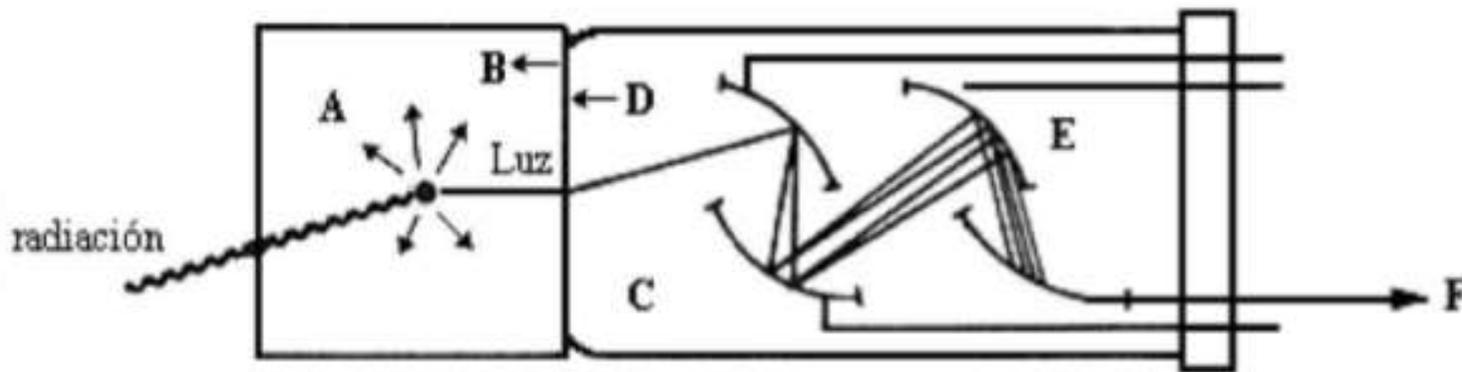


6.2.3 Tubos Fotomultiplicadores.

Donde tiene lugar el proceso de detección y conversión de los fotones de luz emitidos por el cristal de centelleo con el fotocátodo de un tubo fotomultiplicador.

Los fotones “arrancan” electrones del fotocátodo. Éstos electrones son atraídos y acelerados por una serie de electrodos (dínodos).

Al chocar el electrón con un dínodo, se producen más ionizaciones y se expulsan varios electrones, que serán atraídos por el próximo dínodo.



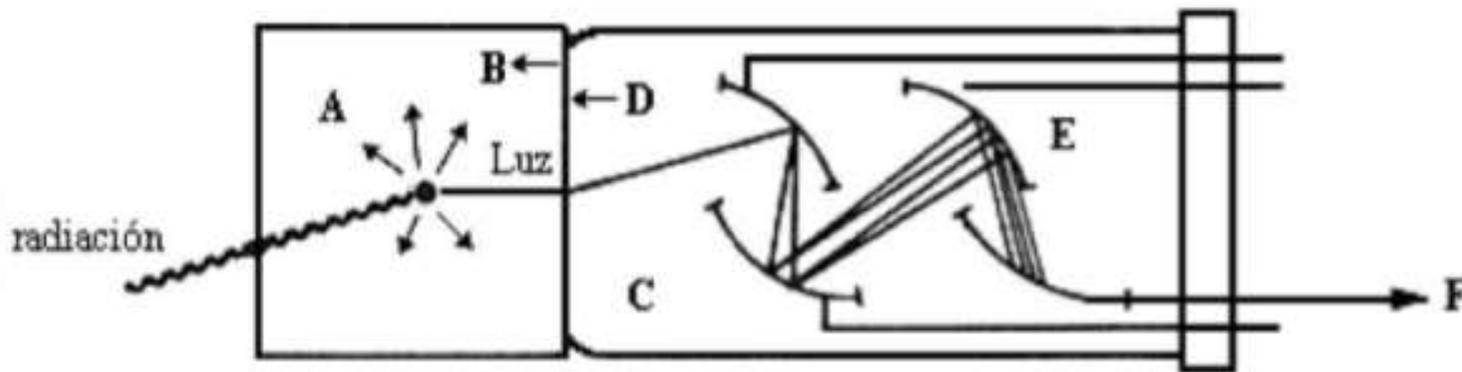
- A** Cristal de centelleo
- B** Contacto óptico
- C** Tubo fotomultiplicador
- D** Fotocátodo
- E** Dínodos
- F** Señal de salida

6.2.3 Tubos Fotomultiplicadores.

Se multiplica así el número de electrones incidentes. Se recogen todos en el ánodo y se genera un pulso de corriente, que podremos procesar.

En el procesado de la señal eléctrica se puede determinar la energía depositada en el cristal (la energía de la radiación incidente) y la localización. Los TFM más próximos al evento recogerán la mayor cantidad de fotones emitidos por el cristal. El circuito es capaz de calcular las coordenadas más probables del evento. Se produce así la localización o posicionamiento del evento

La clave del detector de centelleo está en que se mantiene la proporcionalidad a lo largo de todo el proceso

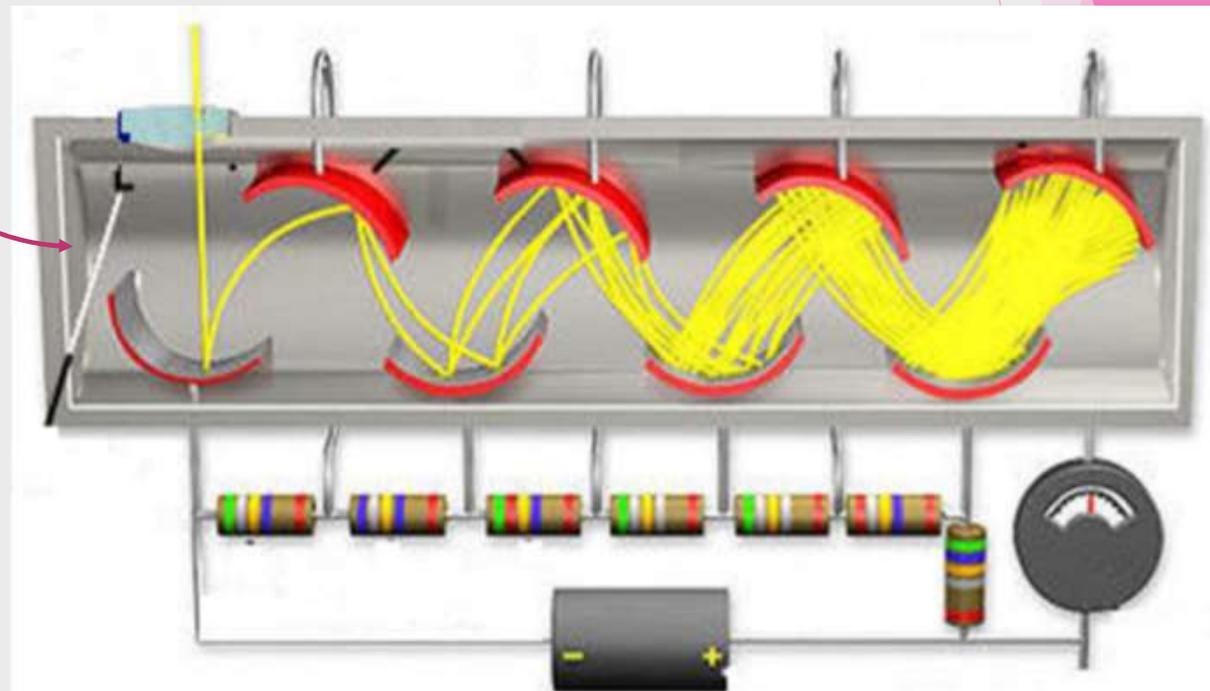
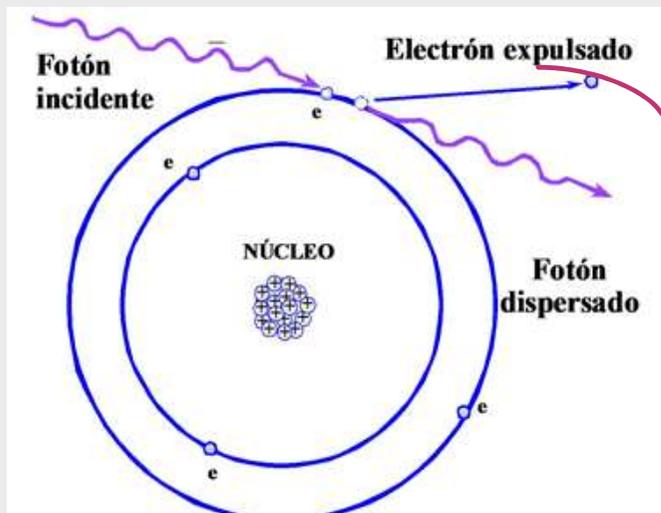


- A** Cristal de centelleo
- B** Contacto óptico
- C** Tubo fotomultiplicador
- D** Fotocátodo
- E** Dinodos
- F** Señal de salida

También permite la discriminación entre fotones primarios y fotones que han sufrido el efecto Compton.

Estos fotones que provienen del efecto Compton serán menos energéticos que los fotones primarios y por lo tanto sus pulsos eléctricos resultantes serán también menores. Los fotones primarios son los necesarios para crear la imagen gammagráfica.

La discriminación de fotones derivados del efecto Compton es crítico en las exploraciones de MN. H

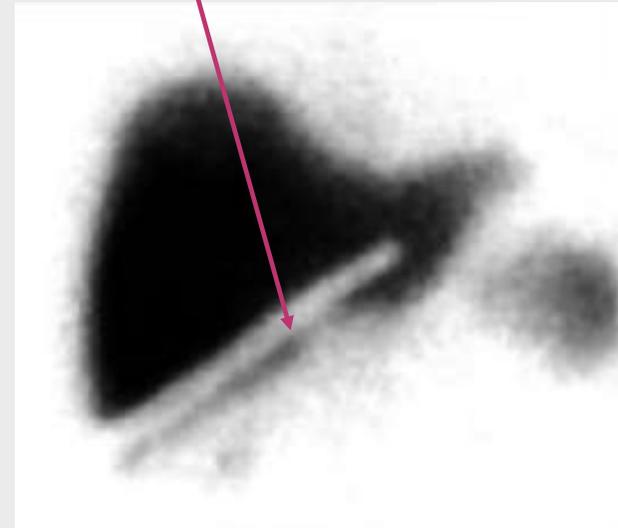
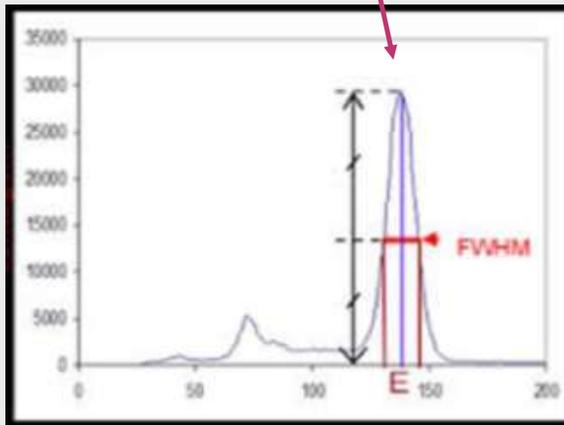


6.2.4 Análisis de señal:

Para cada evento (es decir, cada fotón), se procesan sus señales.

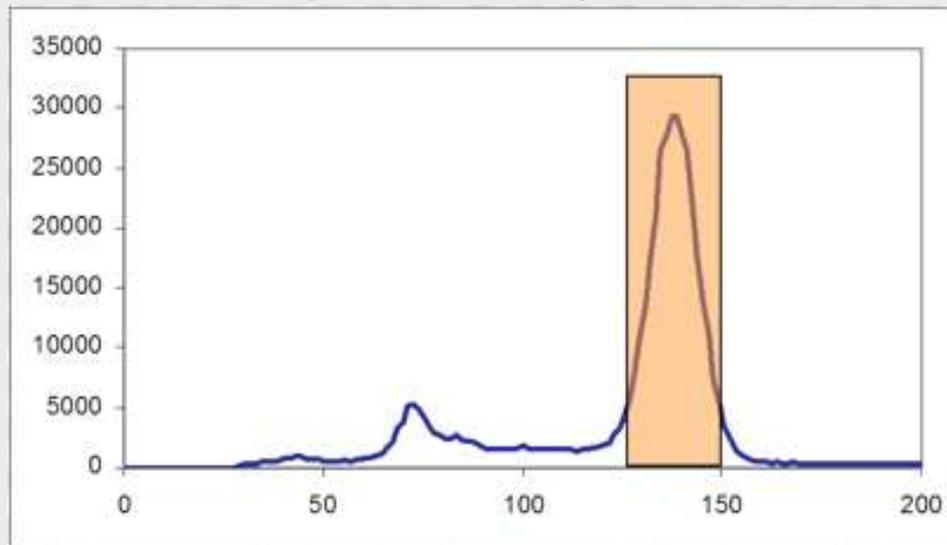
No todos los fotones que salen del paciente son válidos para obtener una buena imagen. Por eso aplicamos varios filtros que discriminan entre los fotones válidos y los no válidos. Son tres:

- Colimadores (ya conocidos).
- Filtros de Resolución espacial: (plomos, posición, etc,)
- Ventana de detección (que explicamos en seguida).



Ventana de detección.

- El analizador de pulsos de la gammacámara incorpora un filtro o ventana de energías
- Sólo los valores energéticos comprendidos en un rango determinado son considerados válidos y entran a formar parte de la imagen final, desechando el resto.
- La ventana se centra en el fotopico y su anchura depende de la resolución y la sensibilidad que se quiera alcanzar: * Cuanto más ancha sea la ventana se aceptarán más fotones por unidad de tiempo, disminuyendo el tiempo de adquisición de la imagen (aumenta la sensibilidad) pero también se aceptarán mayor cantidad de fotones dispersos atenuados por efecto Compton (disminuye la resolución). Y a la inversa.
- Una ventana con una amplitud del 20% quiere decir que todos los fotones que estén entre un 10% por debajo y un 10% por encima del fotopico serán aceptados.

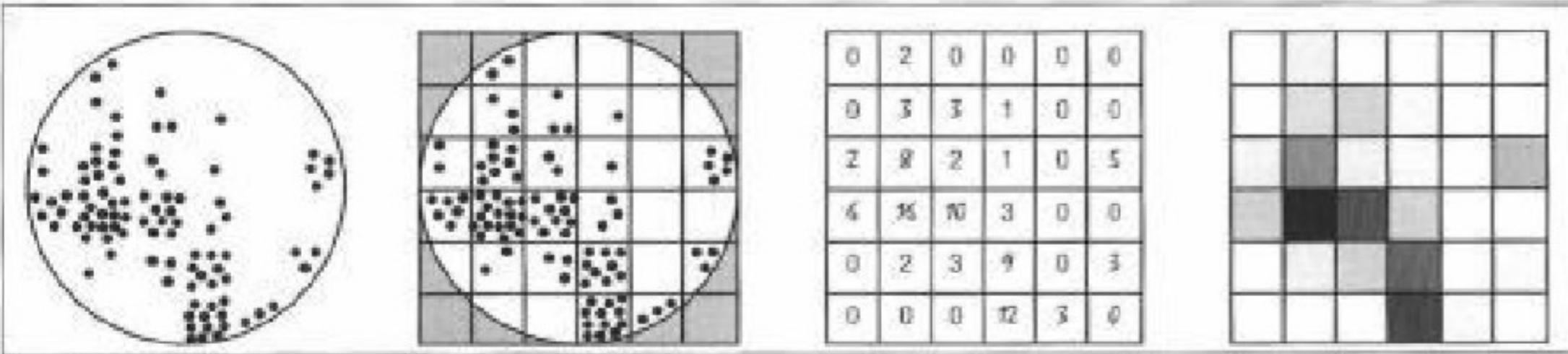


6.2.5 Digitalización:

En las gammacámaras modernas, las señales procedentes de los tubos fotomultiplicadores son digitalizadas mediante una conversión analógico-digital (CAD).

Si la señal Z está entre el rango determinado por el filtro o ventana de detección, el evento se guardará con las coordenadas (x, y) correspondientes.

Sobre la imagen analógica se superpone una matriz que la divide en unidades elementales o píxeles. En función del número de eventos localizados en ese píxel se le asigna un número entero que cuantificará su valor en la escala de grises o de color elegida.

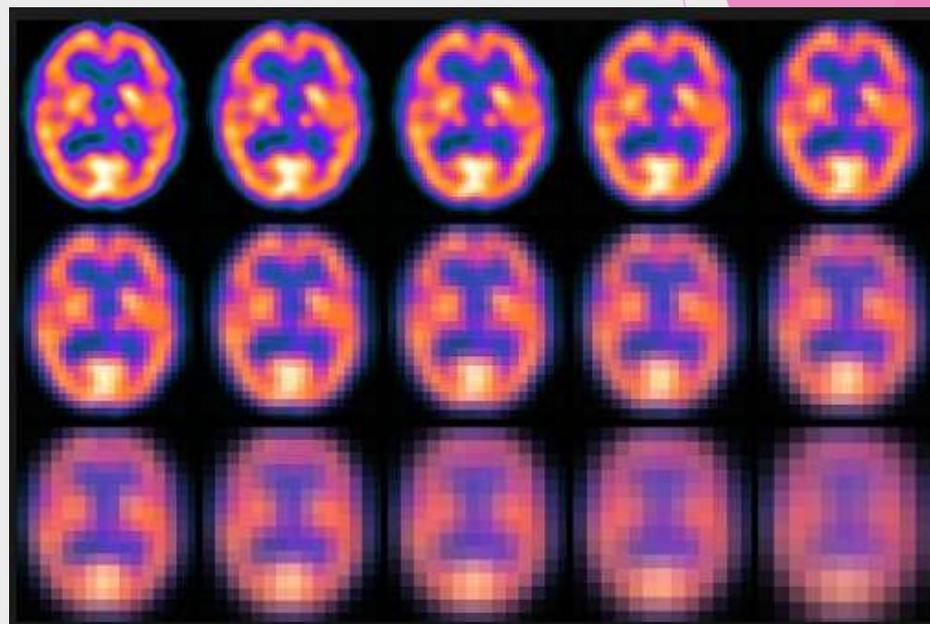


Una matriz digital más grande, con menor tamaño de píxel, aumenta la resolución.

A cambio el estudio requerirá más tiempo para completarse, ya que se detectarán menos cuentas por píxel. Se produce una pérdida de resolución de la imagen gammagráfica al aumentar el tamaño del píxel.

Ejemplos de matrices usadas en MN son:

- Para estudios dinámicos: 64x64.
- Para estudios estáticos planares: 128x128 y 256x256.
- Para rastreos: 256x1024 o 512x2048



- Gantry:

Sistema mecánico que soporta al detector y que permite su localización adecuada e incluso la rotación en algunos casos.

- Camilla o mesa de exploración:

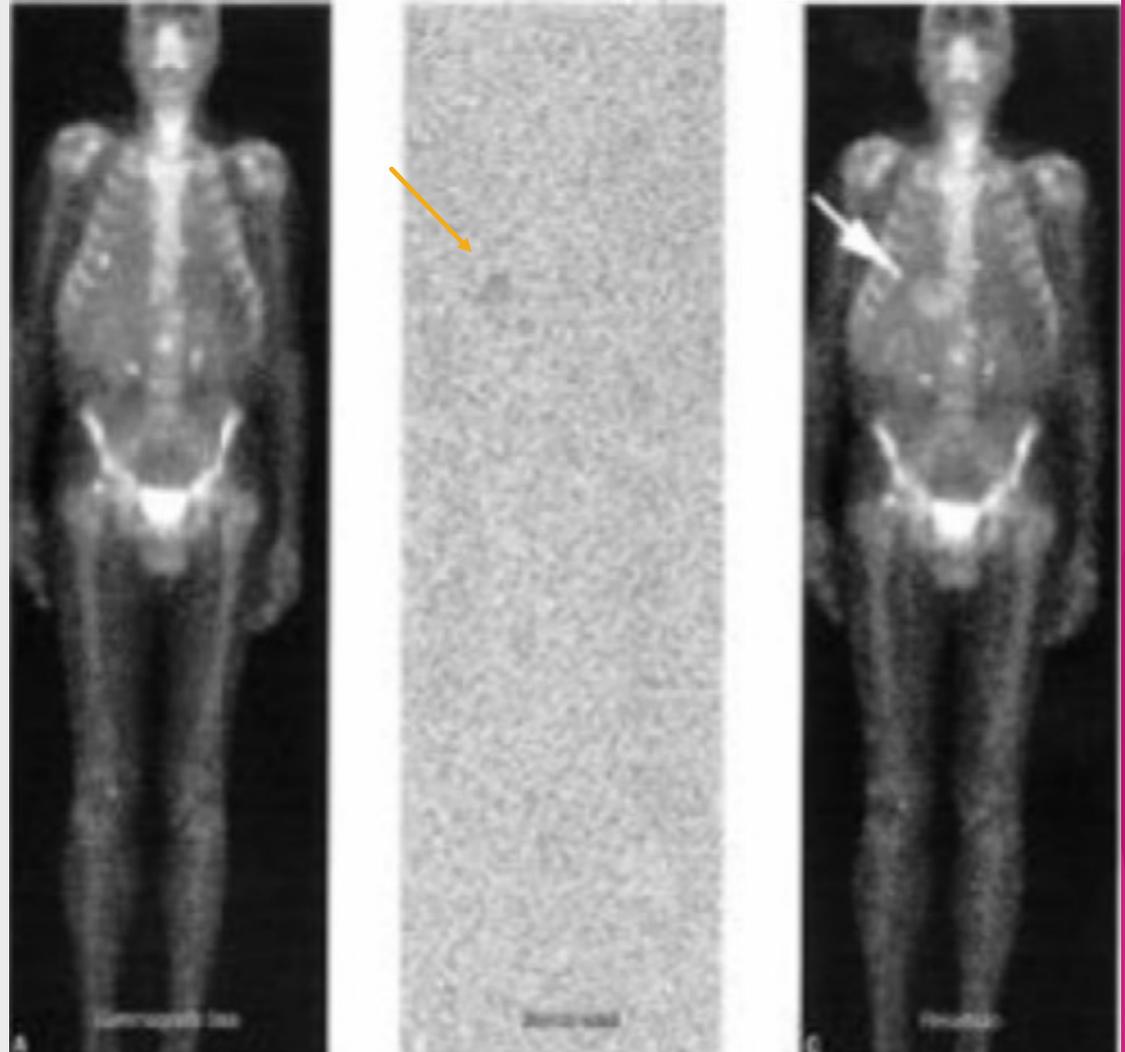
Hecha de materiales que atenúan poco la radiación.

6.2.6 Control de Calidad de la Gammacámara.

Cuando se hace una exploración en MN, la calidad de la imagen resultante dependerá de ciertos parámetros referidos a la gammacámara. Estos parámetros deben de cumplir unos requisitos mínimos de calidad para que el diagnóstico médico sea útil.

-Uniformidad (control intrínseco):

Capacidad de la gammacámara de producir una imagen homogénea cuando una fuente radiactiva suministra una distribución homogénea de radiación. La falta de uniformidad provoca la aparición de zonas hipercaptantes (calientes) o hipocaptantes (frías) que pueden ser interpretadas erróneamente como patologías. La falta de uniformidad suele deberse a alteraciones en los tubos fotomultiplicadores, que se vuelven inestables con el paso del tiempo. Se realiza SIN colimador.

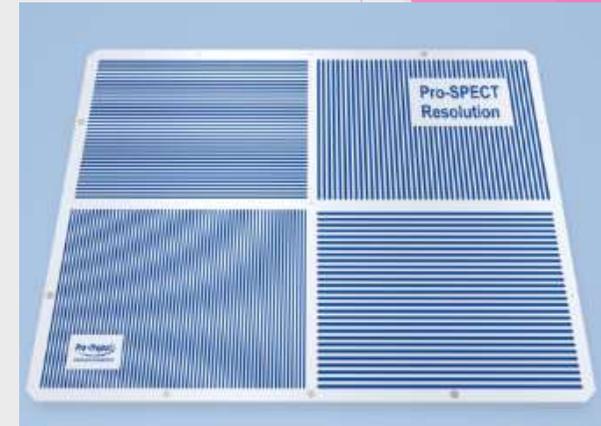


-Resolución espacial (Control extrínseco):

Es la característica que permite observar los contornos de un objeto o distinguir objetos que se encuentran muy próximos. Se refiere, por tanto, a la nitidez de definición y la falta de resolución proporciona una imagen borrosa. La resolución espacial del equipo condicionará la separación mínima exigible entre dos puntos para poder ser diferenciados en la imagen.

Se realiza con un falso colimador.

La resolución espacial de la imagen depende de la resolución intrínseca (el sistema sin colimador) y de la extrínseca.



- Resolución temporal:

La capacidad del sistema para diferenciar dos eventos que se han producido en un intervalo de tiempo muy próximo. Esto está relacionado con el tiempo muerto: si un fotón llega al detector antes de que haya concluido la formación del pulso debido a un fotón anterior, ambos eventos se acumulan en un pulso único o se produce un apilamiento de varios eventos sucesivos sin posibilidad de discriminación.

Este parámetro se ve afectado por la rapidez del proceso luminiscente del cristal de centelleo, el tiempo de integración del pulso, la conversión de la señal analógica a digital, etc. Los efectos en la resolución temporal son importantes en los estudios dinámicos.

- *Sensibilidad:*

La cantidad de cuentas registradas en la unidad de tiempo por unidad de material radiactivo (cuentas/min/ μ Ci). Refleja la capacidad del sistema para transformar cada desintegración radiactiva en un evento observable. La falta de sensibilidad genera una imagen de escasa calidad con pocas cuentas.

-*Linealidad espacial:*

La capacidad de la gammacámara para producir imágenes uniformes de fuentes radiactivas en forma de líneas rectas. Define la capacidad de la gammacámara para situar correctamente en el espacio a los eventos que tienen lugar. La falta de linealidad se denomina distorsión o alabeo.

-*Centro de rotación:*

Tiene como objeto verificar las posibles desviaciones de los cabezales a la hora de rotar sobre un hipotético eje.

► Videos de interés:

<https://www.youtube.com/watch?v=l0re3ncCKvM> resumen GC 1 min. Muy bueno.

<https://www.youtube.com/watch?v=MTZiHqPKSm8> resumen GC 3 min en inglés. Sencillo

<https://www.youtube.com/watch?v=msy0Zx5UcJM> Control Calidad GC 20 min. México

<https://www.youtube.com/watch?v=ZRvzHi-GY7c> por dentro 3 min. En inglés. Muy bueno

<https://www.youtube.com/watch?v=OGIB3wLHf2Y> descripción equipo 1 min. Muy bueno

<https://www.youtube.com/watch?v=vplQd0HZoj4> cambio colimador. 7 minutos

<https://www.youtube.com/watch?v=YIHMtdtzQTc> tubo fotomultiplicador 1 min