



El núcleo y sus radiaciones

clase 8

Departamento de Física, Facultad de Ciencias Exactas - UNLP
Instituto de Física La Plata - CONICET
Calle 49 y 115 La Plata





Detectores. Características generales.

La base de la detección de la radiación es su interacción con los medios materiales, a los cuales parte o toda su energía. Esta energía produce modificaciones en el medio, que si son reconocibles permiten detectar y determinar propiedades de la radiación incidente.

Partículas cargadas: transfieren su energía en forma directa produciendo ionizaciones y excitaciones (ionización primaria).

Partículas neutras: interacciones que llevan a la producción de partículas cargadas, las cuales luego ionizan o excitan el detector (ionización secundaria).

La forma en que la energía deposita se convierte en una señal utilizable depende del detector.

Estas modificaciones son, en general, fácilmente aprovechables cuando conducen a la producción de un pulso eléctrico.

Como una introducción a los temas que discutiremos, describiremos algunas características generales a todos los tipos de detectores.



Detectores. Características generales.

Sensibilidad

Capacidad de producir una señal utilizable para un dado tipo de radiación y energía.

Cada tipo de detector es sensible a un tipo de radiación y en un rango de energía.

Fuera de ese rango: señal no utilizable o directamente no hay señal (detector no sensible).

Depende de:

- La sección eficaz para reacciones de ionización en el material detector.

Determinan la probabilidad de interacción de la radiación con la masa del detector.

- La masa del detector.

Partículas cargadas: altamente ionizantes. Detectores de pequeño volumen o baja densidad.

Partículas neutras: sección eficaz muy pequeña. Poca probabilidad de interacción. Mayor masa. La masa del detector depende de la radiación a detectar (ejemplo. Para neutrinos, toneladas!).



Detectores. Características generales.

Sensibilidad

Aún cuando se produzca una señal, la misma debe superar un cierto umbral para ser usable.

Este umbral depende del **ruido intrínseco** del detector y la electrónica asociada.

Ruido intrínseco: fluctuaciones de la corriente o voltaje de salida. Siempre presente, aun no cuando no se exponga al detector a radiaciones.

La señal debe ser mayor al ruido electrónico (y al fondo de radiaciones que rodea al conjunto muestra-detector).

- El material que rodea al detector.

Puede cambiar la energía o la dirección de la radiación incidente, haciendo que la misma no llegue al volumen sensible del detector.

Ejemplo: Si el detector esta recubierto de una capa metálica, las partículas α no la atraviesan y no serán detectadas.

El blindaje del conjunto muestra-detector permite anular el nivel de radiación externo.



Detectores. Características generales.

Respuesta del detector

Además de detectar la presencia de una radiación, muchos detectores son también capaces de proveer información acerca de, por ejemplo, la energía de la radiación.

La cantidad de ionizaciones producidas en el detector es proporcional a la energía cedida en el volumen del detector.

Si la radiación incidente es totalmente absorbida la cantidad de ionizaciones da una medida de la energía de la radiación incidente.

La salida de un detector de naturaleza eléctrica es un pulso de tensión. La cantidad de ionizaciones se refleja en la carga eléctrica contenida en este pulso.

Si la forma es forma del pulso no cambia de un evento detectado a otro, cantidad de ionizaciones, o sea la energía incidente, se refleja en la altura del pulso.



Detectores. Características generales.

Respuesta del detector

Relación entre la energía de la radiación y la carga total del pulso de salida o su altura es la **respuesta del detector**.

Idealmente, es deseable que la respuesta del detector sea **lineal**.

La respuesta de un detector depende del tipo y energía de la radiación incidente.

Que un detector tenga una respuesta lineal para un tipo de partícula o energía no implica que siga siendo una respuesta lineal para otra partícula o energía.



Detectores. Características generales.

Resolución en energías:

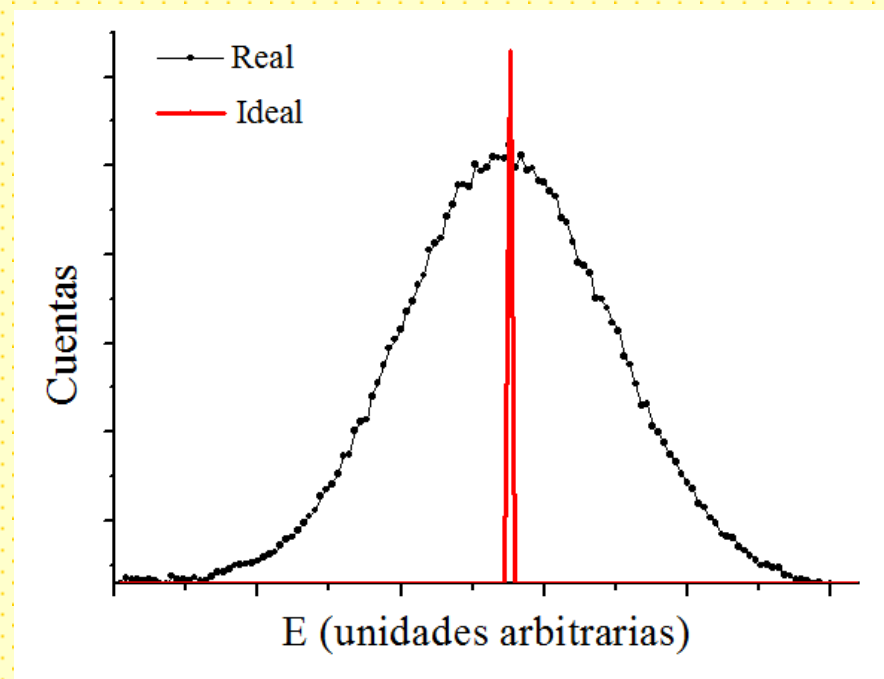
Capacidad del detector para distinguir entre dos energías próximas entre sí.

Factor fundamental en aplicaciones en que es necesario determinar la energía de la radiación incidente.

Puede medirse exponiendo el detector a una radiación monoenergética.

Idealmente: pico tipo delta.

Realidad: pico con un ancho finito y de forma gaussiana.



La distribución se debe a la naturaleza estadística de los procesos ionización y excitación en el material detector.

Detectores. Características generales.

Resolución en energías:

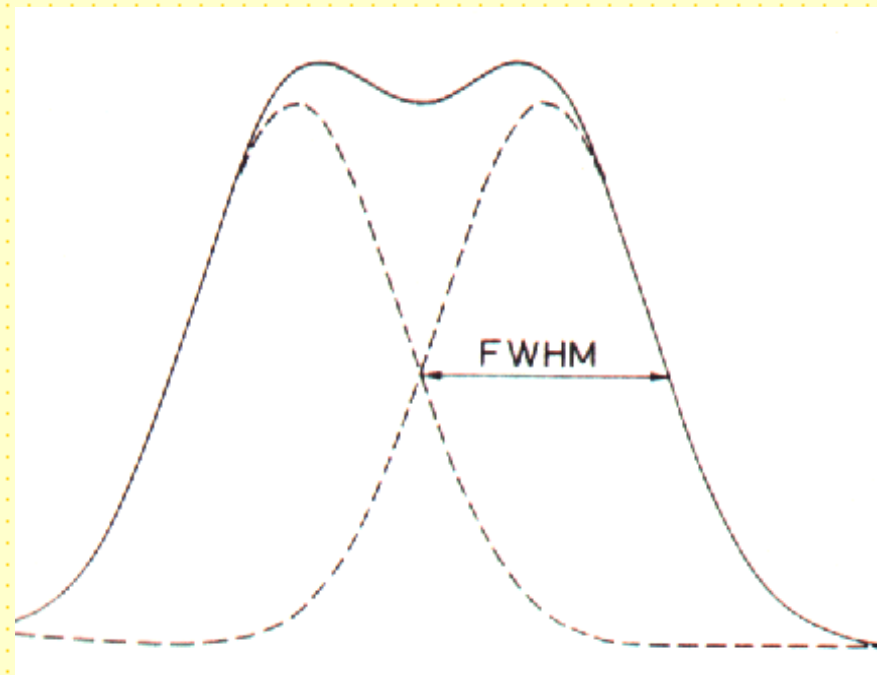
Se describe en función del ancho a la altura media («full width at half maximum», FWHM).
Energías separadas por una «distancia» menor al FWHM no se pueden resolver.

E_1 y E_2 separadas por $\Delta E = E_2 - E_1 = \text{FWHM}$.

La línea sólida es la suma de dos picos gaussianos idénticos separados por $\Delta E = \text{FWHM}$

$$R = \frac{\Delta E}{E}$$

Usualmente, en %.





Detectores. Características generales.

$$R = R(E)$$

w : energía necesaria para producir una ionización

E : energía depositada.



$$J = E / w \text{ ionizaciones}$$

Si asumimos una distribución tipo gaussiana, la varianza viene dada por $\sigma^2 = J$.

Entonces, dos posibles situaciones: :

1- No toda la energía incidente es absorbida, eventos independientes, vale la distribución de Poisson).

$$R = 2,35 \frac{\sqrt{J}}{J} = 2,35 \sqrt{\frac{w}{E}},$$

El factor 2.35 relaciona la desviación estándar de la gaussiana con el FWHM.



Detectores. Características generales.

2- Si la energía incidente totalmente absorbida los eventos no son independientes, por lo cual no vale Poisson.

En esta situación, $\sigma^2 = FJ$

$$R = 2,35 \sqrt{\frac{Fw}{E}}$$

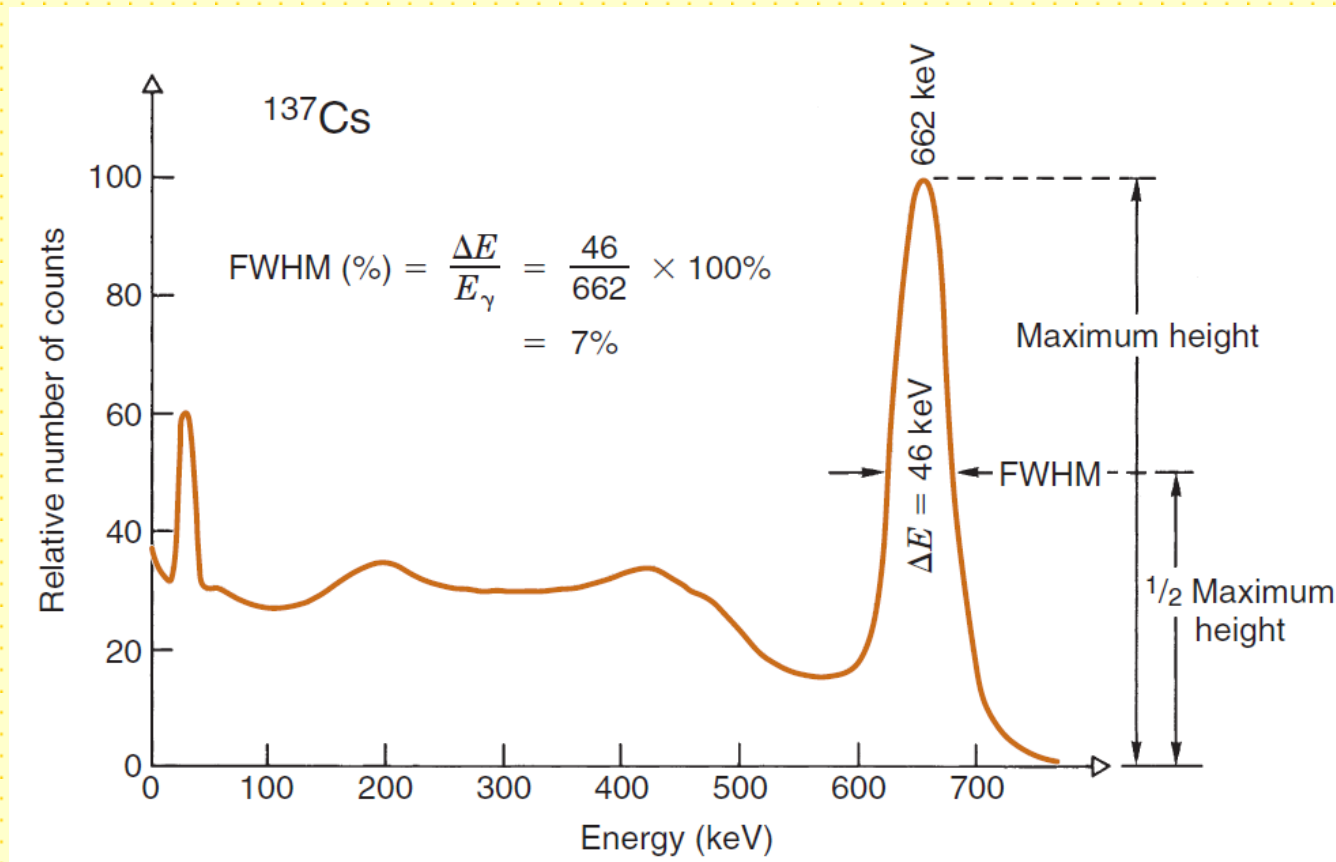
F: Factor de Fano

F es función de todos los procesos que conducen a transferencia de energía al medio detector (incluye procesos que no producen ionización).

Es una propiedad intrínseca del medio detector, y es muy difícil de calcular.

Para muchos detectores, $F < 1$, lo que incrementa la resolución del detector (ya lo veremos para casos particulares).

Detectores. Características generales.



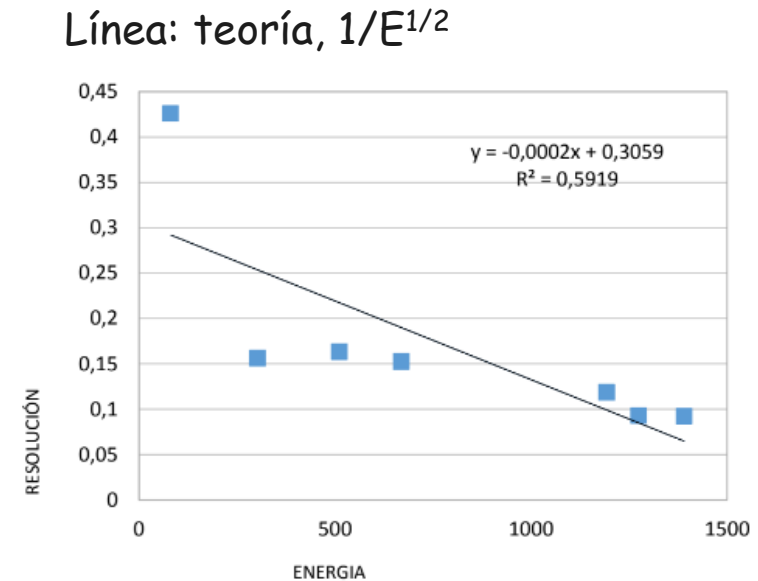
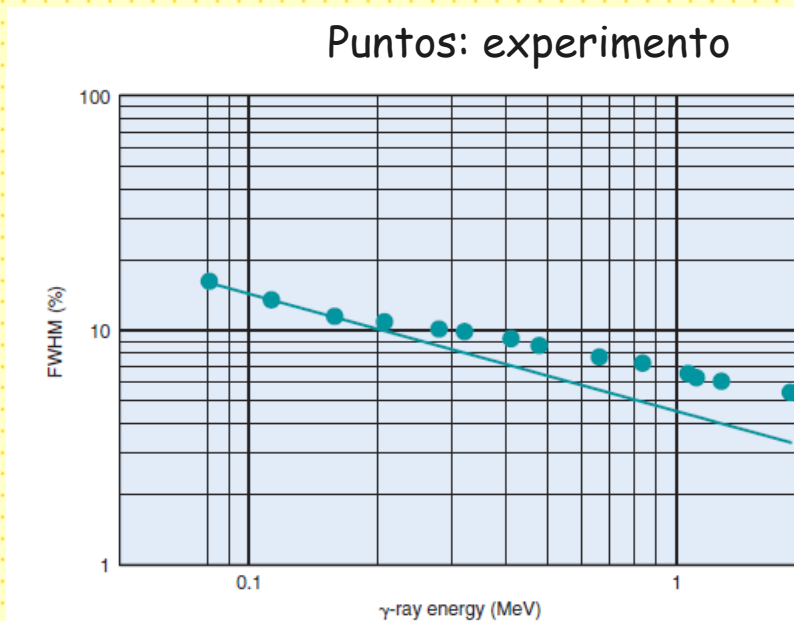
Miremos solo el pico gaussiano, dejemos de lado por el momento la estructura del espectro por debajo de 550 keV.

Detectores. Características generales.

$$R = \text{cte} \frac{1}{\sqrt{E}}$$

De acuerdo a lo anterior:

Sin embargo:



Conclusión: la resolución no depende sólo de la fluctuación estadística en el número de ionizaciones (de hecho, es lo que menos peso tiene). Ya veremos este punto en detalle.



Detectores. Características generales.

Función respuesta

Espectro de alturas de pulsos observado a la salida del detector cuando sobre éste incide radiación monoenergética

La función respuesta de un detector a una dada energía queda determinada por las diferentes interacciones que pueden tener lugar entre la radiación y el material detector.

Efecto fotoeléctrico $E_e = E_\gamma - E_{lig}$

Efecto Compton $E_e = E_\gamma - E_\gamma' \quad (0 < E_e < E_{max})$.

Más probable cuanto menor Z.

De acuerdo a la energía de la partícula incidente y el material detector, cada proceso tendrá diferente probabilidad de ocurrencia..

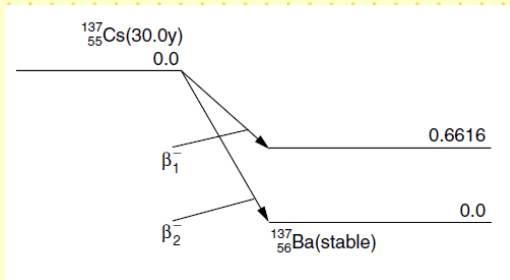
Formación de pares $E_\gamma = 2m_0c^2 + E_{e+} + E_{e-}$

Detectores. Características generales.

Espectro y reflejará las diferentes interacciones que ocurren en el volumen del detector..

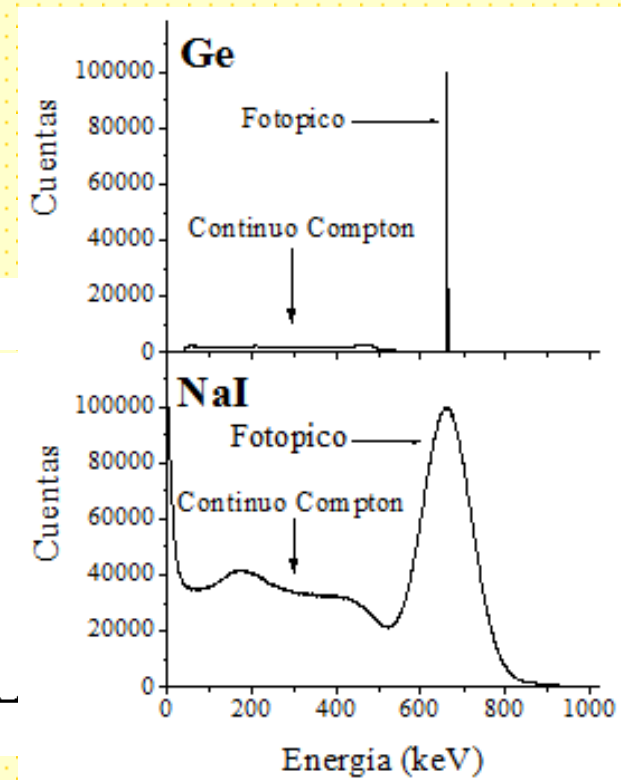
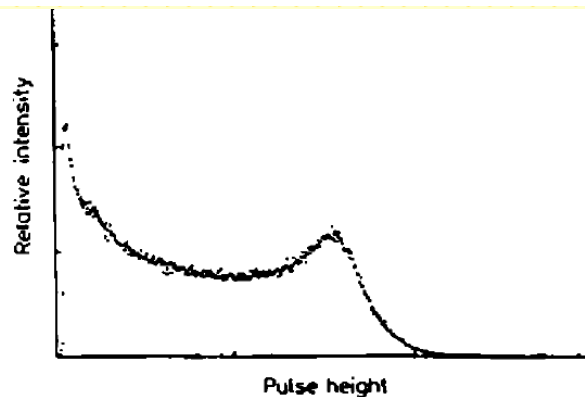
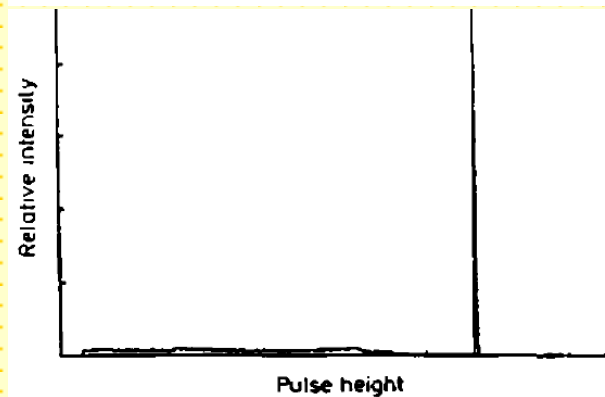
La estructura del espectro dependerá de cada interacción, o sea, de la sección eficaz para cada proceso, que a su vez depende de la energía del rayo y y del Z del material detector.

Fuente:

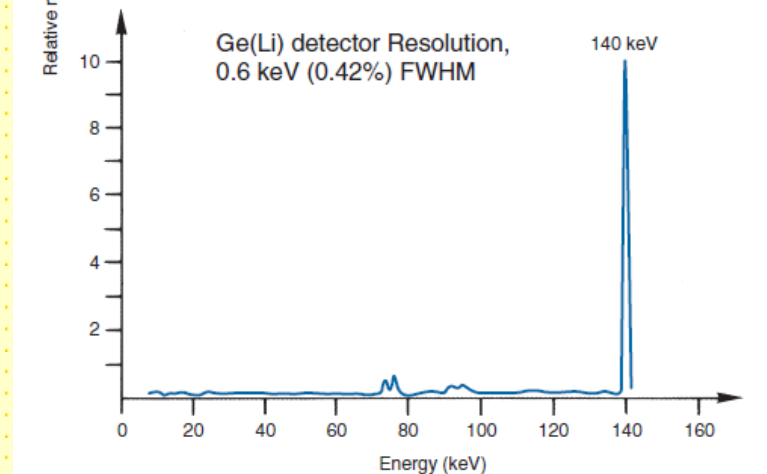
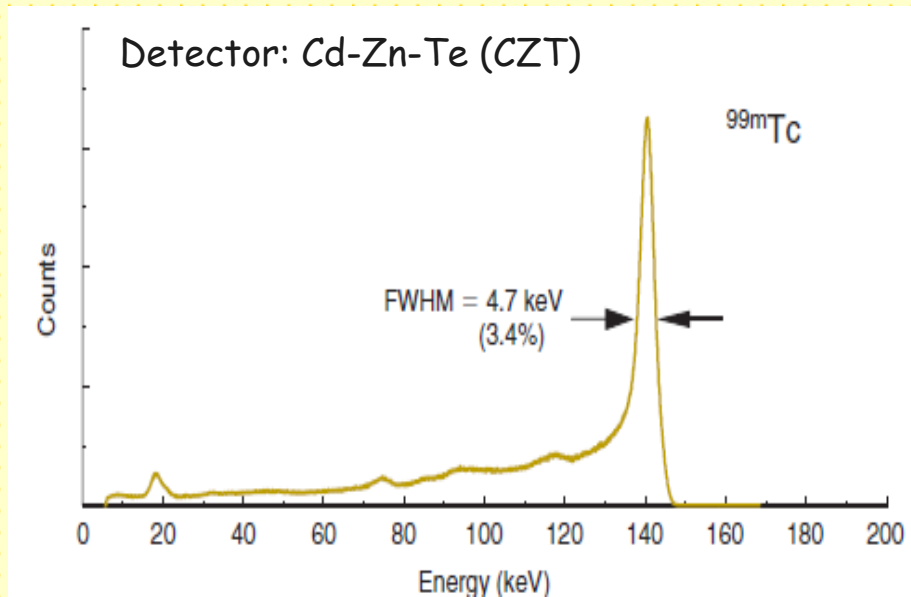
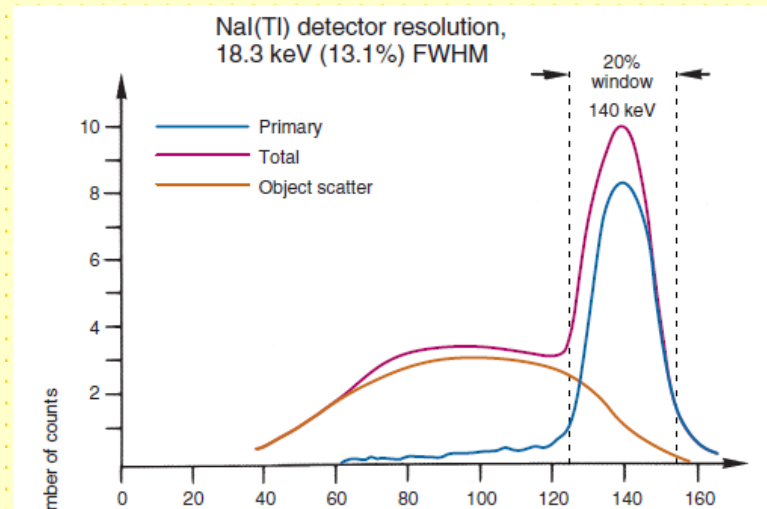
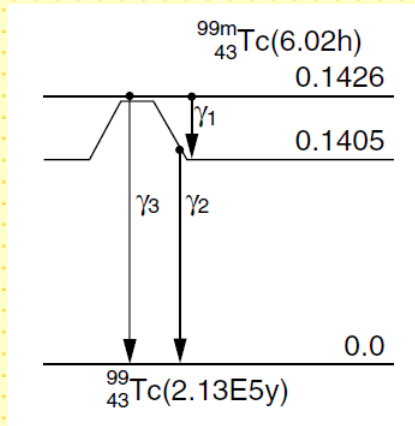


Detector semiconductor Ge.

Detector: Centellador orgánico.



Detectores. Características generales.





Detectores. Características generales.

Eficiencia

La eficiencia de detección se refiere a la eficacia de un sistema detector para convertir la radiación incidente en señales útiles del detector.

Si la fuente emite D eventos por unidad de tiempo y la eficiencia del sistema es ξ entonces el número de eventos detectados por unidad de tiempo R es:

$$R = \xi \cdot D$$

$$\xi = \frac{\textit{eventos registrados}}{\textit{eventos emitidos por la fuente}}$$

Es función de la geometría del detector y de la probabilidad de interacción en el volumen sensible del mismo.



Detectores. Características generales.

$$R = \xi \cdot D$$

En general, es deseable entonces maximizar la eficiencia de detección de modo que la tasa de conteo sea máxima con una mínima actividad

La eficiencia se puede factorizar en dos términos:

- Eficiencia geométrica

$$\xi_{geom} = \frac{\text{eventos incidentes sobre el detector}}{\text{eventos emitidos por la fuente}}$$

- Eficiencia intrínseca

$$\xi_{int} = \frac{\text{eventos registrados}}{\text{eventos incidentes sobre el detector}}$$

$$\xi_{total} = \xi_{int} \xi_{geom}$$

Detectores. Características generales.

- Eficiencia geométrica

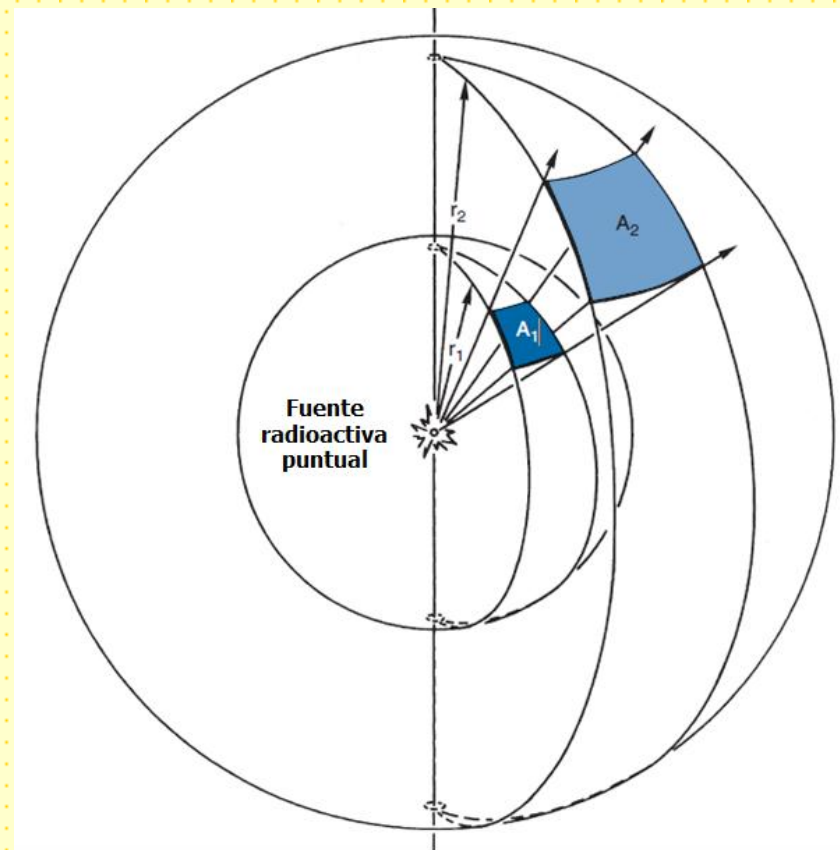
La radiación de una fuente radiactiva puntual se emite en forma isótropa: misma intensidad en todas las direcciones.

A una distancia r de la fuente emisora de rayos γ , la radiación emitida pasa a través de la superficie de una esfera imaginaria de área $4\pi r^2$. Por lo tanto, por unidad de superficie :

$$I = \frac{\text{actividad}}{4\pi \cdot r^2}$$

Unidades: gammas/seg.cm²

Ya habíamos visto esta dependencia.
Tiene implicaciones importantes para la eficiencia de detección, así como para consideraciones de seguridad radiológica
Se aplica a todo tipo de emisiones radioactivas.



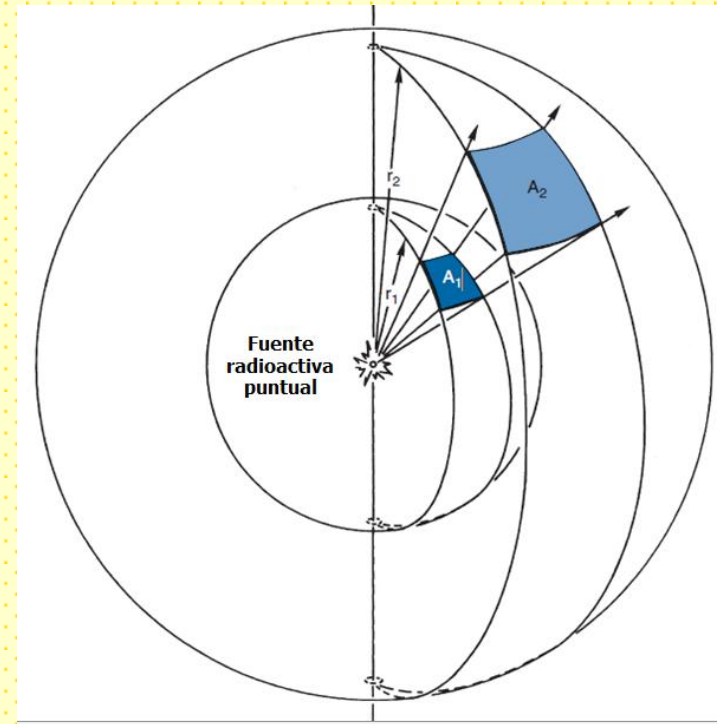
Detectores. Características generales.

Un detector de área A a una distancia r de la fuente puntual (y «mirando» hacia ella) interceptará una fracción $A/4\pi r^2$ de la radiación emitida. Entonces:

$$\xi_{geom} = \frac{A}{4\pi \cdot r^2}$$

Aproximación válida solo cuando la distancia fuente puntual-detector es grande en comparación con el tamaño del detector,

Ejemplo: Calcular la eficiencia geométrica para un detector de diámetro $D=7.5$ cm a una distancia $r=20$ cm de una fuente puntual.



$$\xi_{geom} = \frac{4\pi(D/2)^2}{4\pi \cdot r^2} = 0.009 (0.9\%)$$

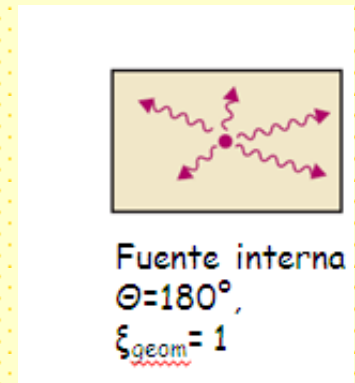
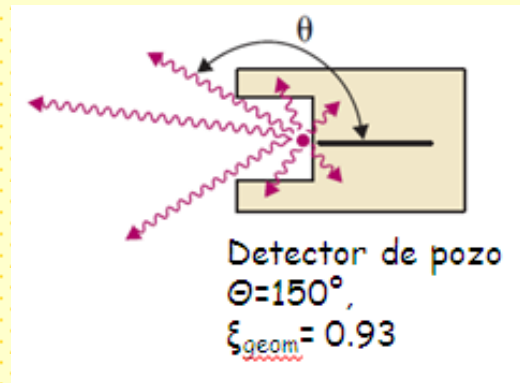
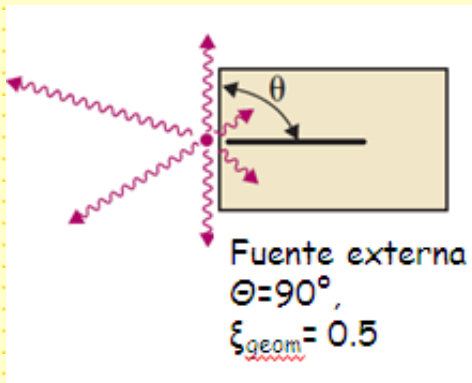
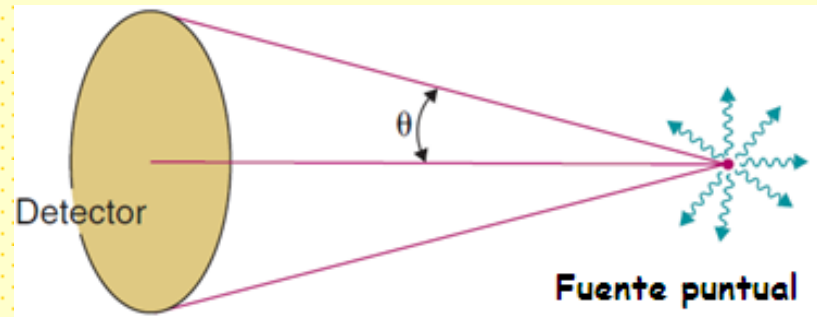
Detectores. Características generales.

$$\xi_{geom} = \frac{A}{4\pi \cdot r^2}$$

Falla cuando el detector está muy cerca de la fuente (para $r=0$, $\xi=\infty$).

Una expresión mas adecuada es:

$$\xi_{geom} = \frac{1}{2} (1 - \cos \theta)$$



Ambas expresiones son válidas para las fuentes de pequeña dimensión comparadas con la distancia fuente-detector. Para cuando el tamaño de la fuente es mayor a $0.3r$ o sistemas multidetectores se requieren modelos más complejos.

Detectores. Características generales.

- Eficiencia intrínseca

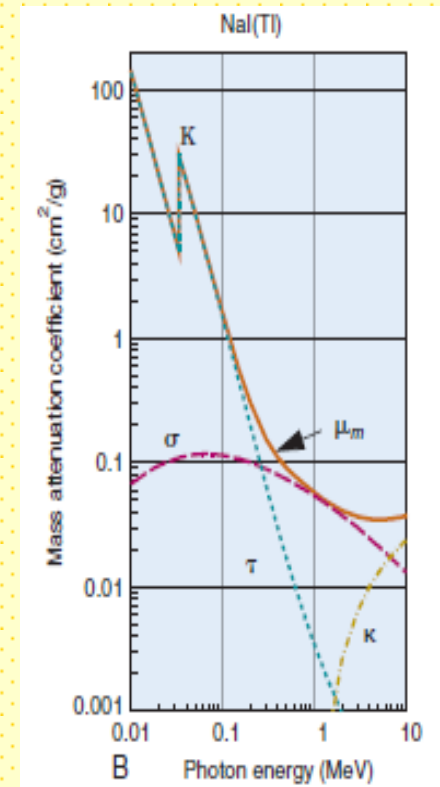
Depende de:
Tipo y energía de la partícula incidente.
Material detector.

Coefficiente de atenuación lineal

$$\xi_{\text{int}} = 1 - e^{-\mu_l(E)x}$$

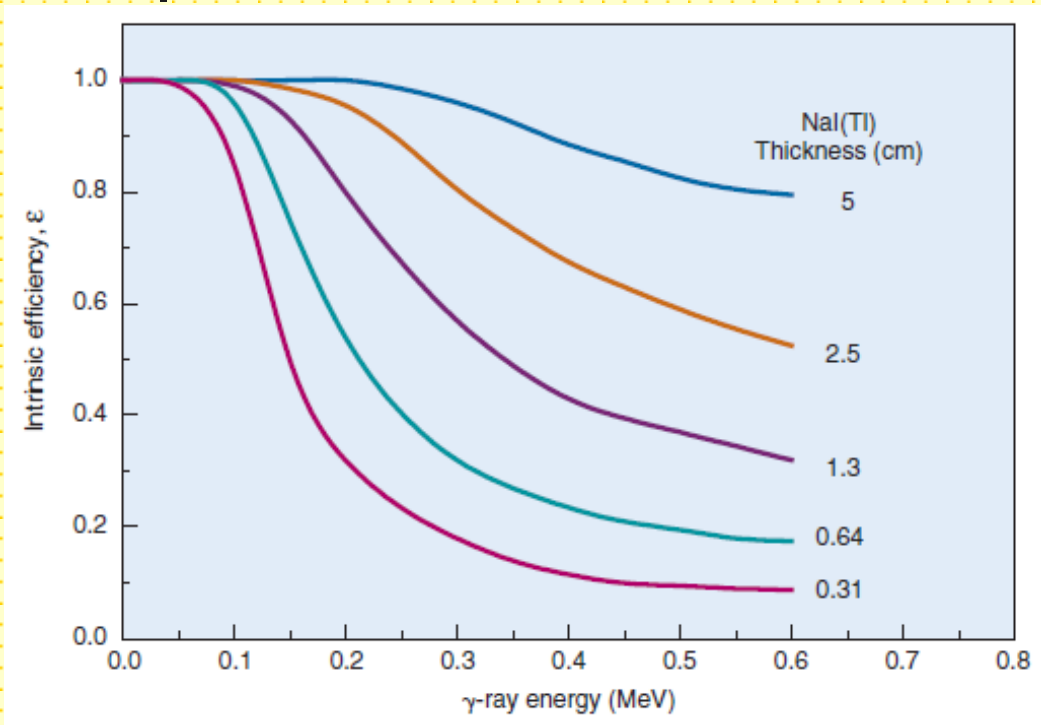
Espesor del material detector

Esta expresión asume que todas las interacciones de los rayos γ producen una señal utilizable.



Valores de μ_l se obtienen multiplicando μ_m por 3.67 g/cm^3 , densidad del NaI(Tl).

Detectores. Características generales.



Para $E < 100$ keV, $\xi_{int} \sim 1$ para espesores de NaI(Tl) del orden de 0.5 cm.

Para energías mayores, los efectos del espesor del cristal son importantes, aunque para un espesor de al menos 5 cm, $\xi_{int} > 0.8$ para energías en el rango de interés de Medicina nuclear.

Para partículas cargadas, en general ξ_{int} es del orden de 1 (o muy alta) aún con detectores de pequeño volumen.

La eficiencia es más importante en el caso de partículas neutras, ya que la probabilidad de interacción en este caso es mucho menor.

En este caso, las dimensiones del cristal detector se vuelven fundamentales, ya que se requiere una masa importante para obtener una buena probabilidad de interacción.



Detectores. Características generales.

Hasta aquí se ha asumido que todos los γ que interactúan con el detector producen una señal utilizable.

Sin embargo, en ciertas aplicaciones, no son utilizadas en ciertas aplicaciones.

Por ejemplo, en algunas aplicaciones se hace un uso selectivo de energías, como ser registrar sólo los rayos γ asociados a la interacción fotoeléctrica (fotopico), descartando aquellas señales originadas en interacciones Compton.

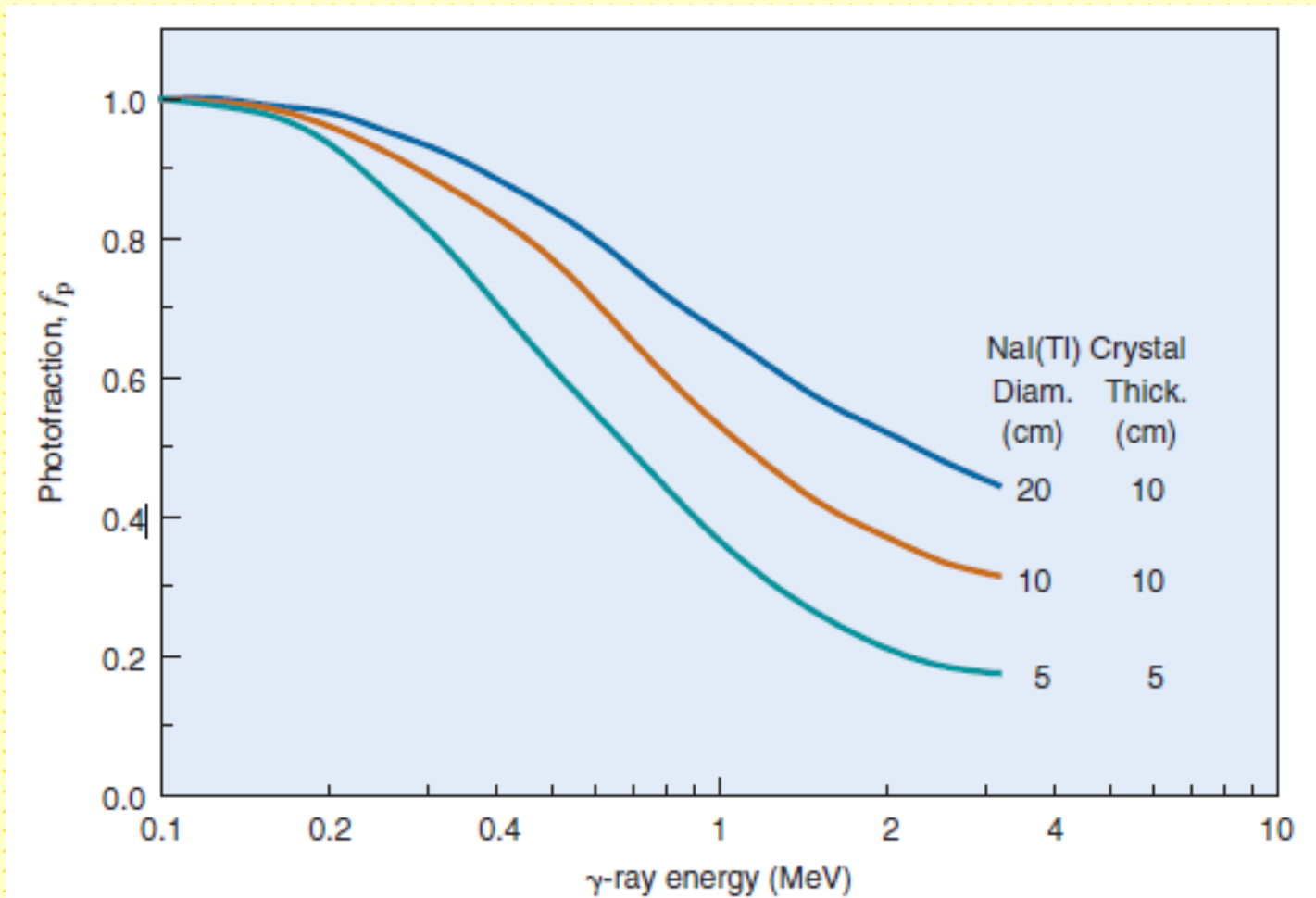
La fracción de interacciones que producen señales de salida se denota f .

La fracción asociada al fotopico se denomina fotofracción. Veremos su importancia en las próximas clases.

f depende de:

- Material detector y la energía del rayo γ (determina la relación $\sigma_{\text{foto}}/\sigma_{\text{Compton}}$).
- Tamaño del material detector (a mayor volumen, mayor probabilidad de detectar el rayo γ secundario generado en la interacción Compton o los fotones de aniquilación generados en formación de pares).

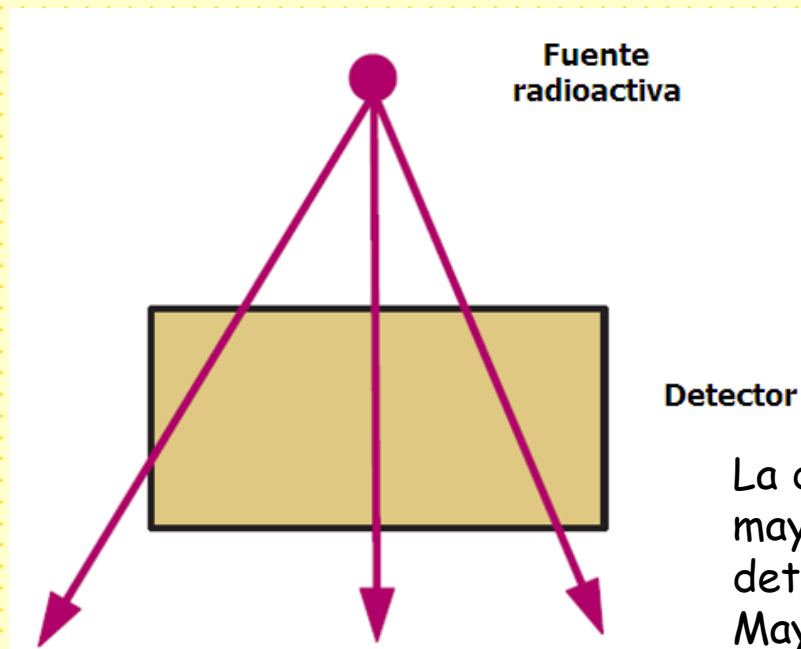
Detectores. Características generales.



Detectores. Características generales.

$$\xi_{\text{int}} = 1 - e^{-\mu_l(E)x}$$

En esta expresión se ha asumido que todos los rayos γ atraviesan el espesor de la superficie, independientemente del punto de la superficie del mismo que alcanzan.



La distancia recorrida es menor al espesor del detector.
Menor eficiencia.

El espesor del detector coincide con la trayectoria recorrida.

La distancia recorrida es mayor al espesor del detector.
Mayor eficiencia.

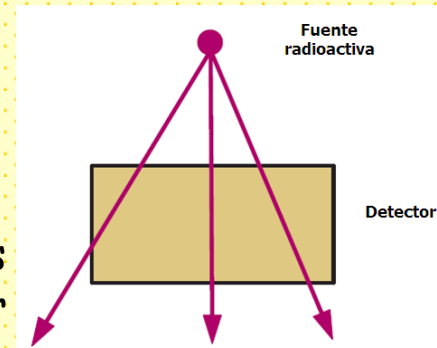


Detectores. Características generales.

La distancia recorrida es menor al espesor del detector. Menor eficiencia.

Efectos de borde.

Dependiendo de la geometría del arreglo fuente-detector, y de las características geométricas del mismo, el efecto de borde puede ser muy importante.



El efecto de borde es importante.

El efecto de borde es despreciable.

No sirven las expresiones simplificadas y debe recurrirse a métodos numéricos (salvo que la eficiencia sea muy alta).

Detectores. Características generales.



La importancia del efecto de borde sobre la eficiencia depende de:

- Forma y tamaño del detector.
- Material que forma el volumen sensible del detector.
- Distancia fuente-detector.

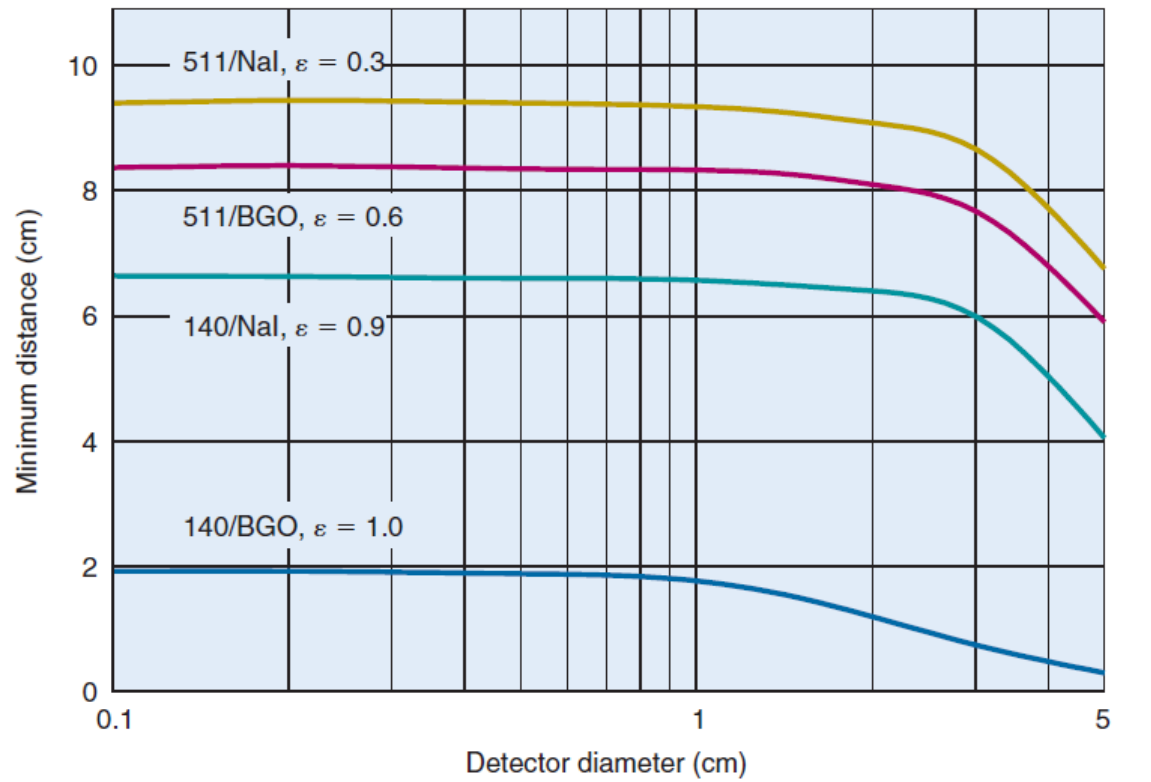
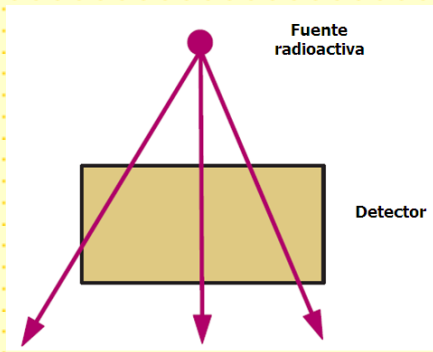
No es posible establecer una regla general para determinar si es necesario usar modelos sofisticados en lugar de las ecuaciones simplificadas presentadas anteriormente.

Todos estos parámetros deben ser considerados para esta determinación

Un gráfico que puede ser de utilidad.

Detectores. Características generales.

Dos detectores (BGO, NaI), dos energía (140 keV, 511 keV).



Eficiencias calculadas
Usando:

$$\xi_{\text{int}} = 1 - e^{-\mu_l(E)x}$$

Para el rayo central

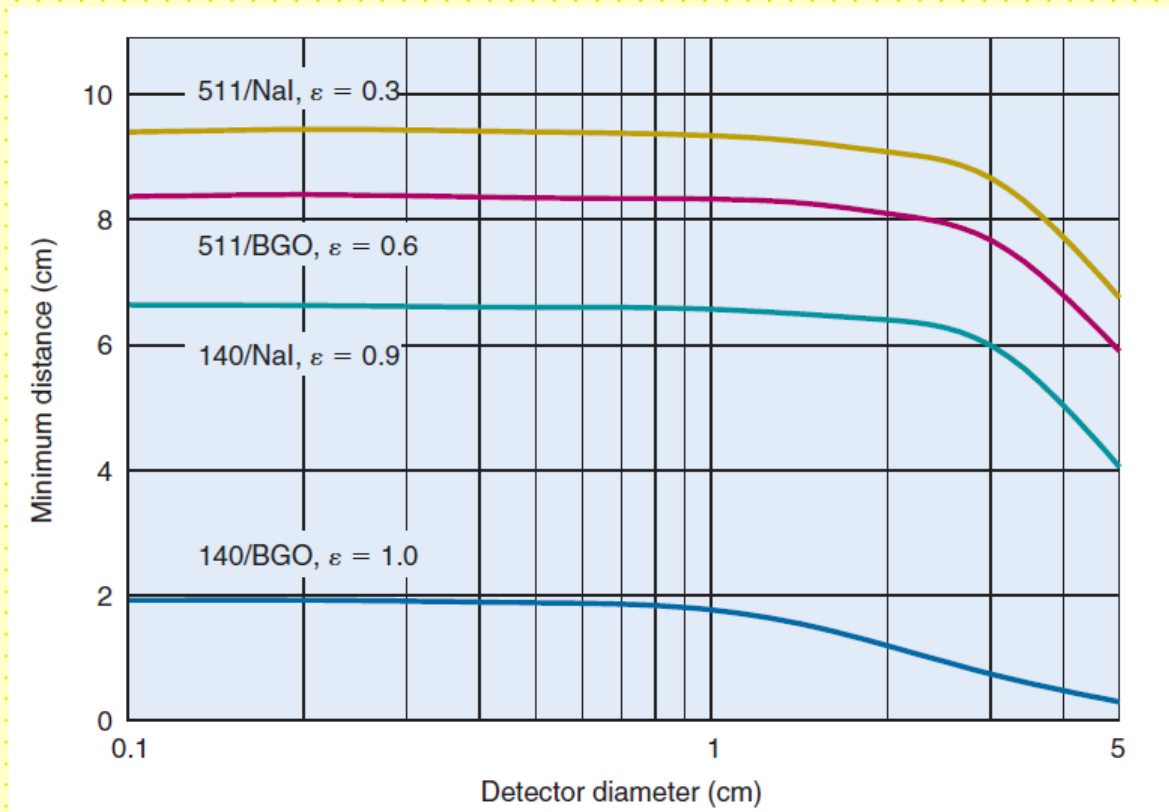
Las curvas indican la distancia mínima fuente-detector para la cual las predicciones del modelo simplificado es precisa en un rango de 10%.

Detectores. Características generales.



Para BGO (alta eficiencia intrínseca) y 140 keV, la distancia mínima es de sólo 2 cm. Aún para el caso del detector «delgado».

Para NaI(Tl) (menor eficiencia intrínseca), se requieren 10 cm.





Detectores. Características generales.

Determinación experimental de la eficiencia. Calibración.

Las eficiencias de detección se pueden determinar experimentalmente usando fuentes de calibración.

Fuente de calibración: fuente para la cual la actividad de la misma se conoce con precisión. (en ocasiones la actividad es dada media da por el proveedor de la fuente o se estima a partir de la masa, vida media y composición de la fuente).

Se mide la tasa de detección de la muestra de calibración y se determina la eficiencia a partir de:

$$R = \xi \cdot D$$

Detectores. Características generales.

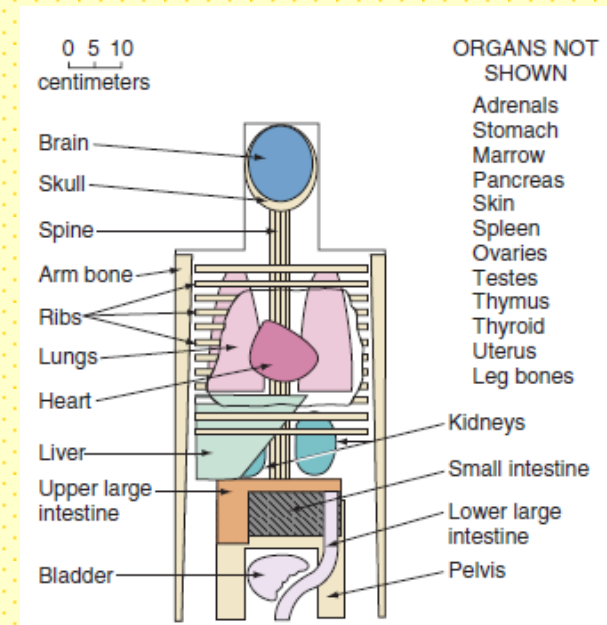
La determinación experimental de ξ requiere muchos cuidados:

Conservar la geometría fuente-detector. La fuente de calibración debe simular con precisión la forma y la distribución de la fuente bajo estudio, conservando la distancia fuente detector. La fuente calibrada y la muestra deben tener igual autoabsorción (absorción de rayos γ en la propia muestra).

Las fuentes de calibración también se usan en «phantomas» que simulan la anatomía humana para estimar la eficacia de detección en sistemas de detección en vivo.

Cuidado: el resultado es preciso sólo si el phantom y la distribución de la fuente en el mismo son precisas para simular el sujeto humano.

Una discrepancia de 1 cm en la profundidad de la fuente en el phantom y en el sujeto humano puede resultar en un 10% a 20% de diferencia en la tasa de conteo

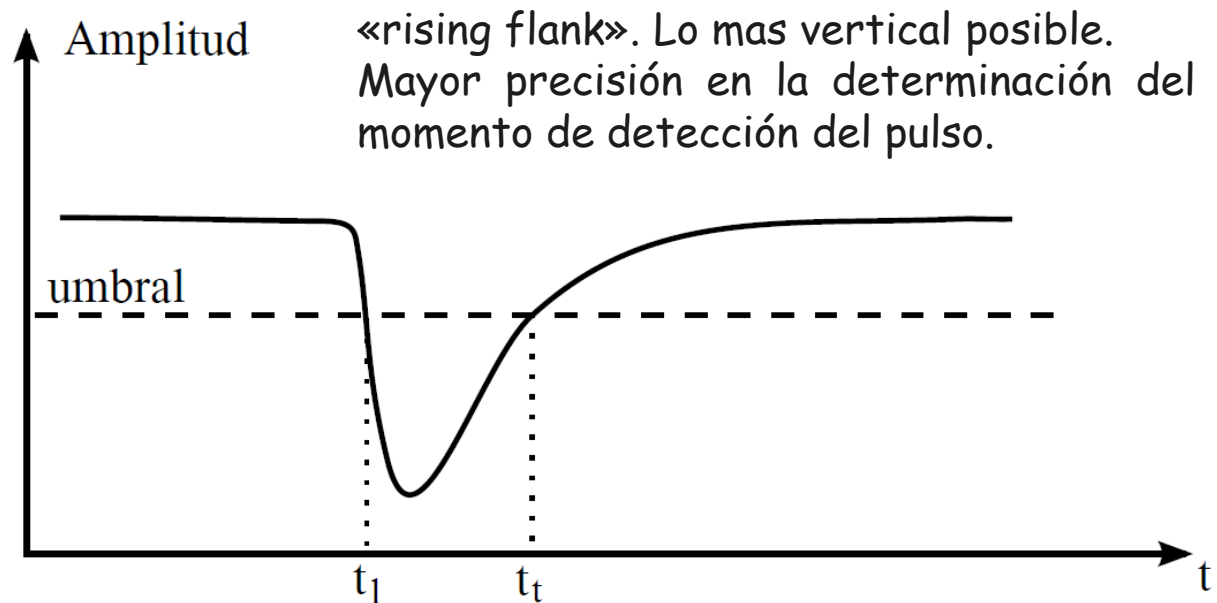
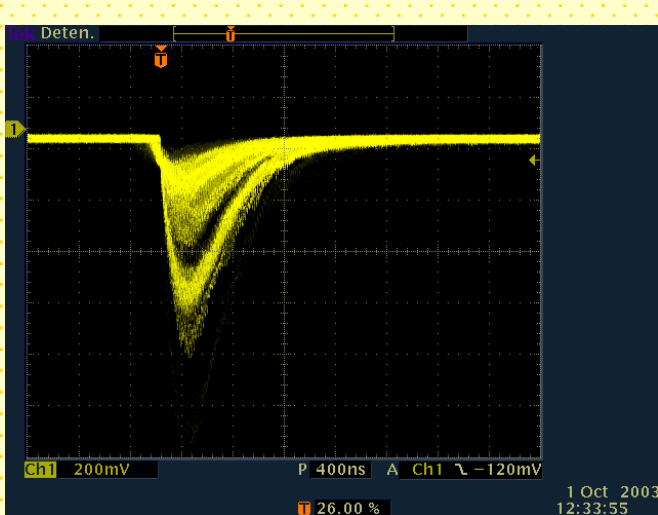


Detectores. Características generales.

Respuesta Temporal.

Tiempo que le toma al detector formar una señal luego de la llegada de la radiación incidente. Este tiempo es de crucial importancia para **aplicaciones temporales**.

Para que el detector tenga un tiempo de respuesta aceptable, la señal debe formarse lo más rápidamente posible.

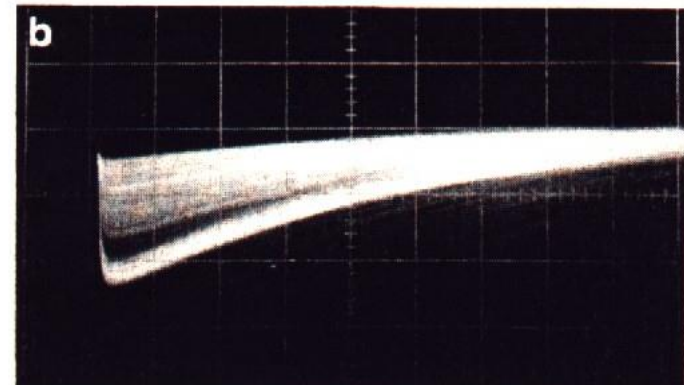
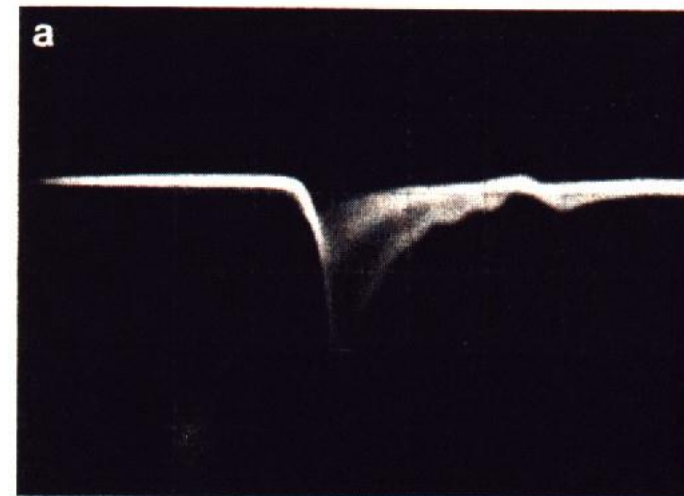




Detectores. Características generales.

La duración de la señal también es importante. Durante este período, un segundo evento puede no ser aceptado (el detector es insensible) o la segunda señal se suma a la primera, falseando la información.

Tiempo muerto del detector.



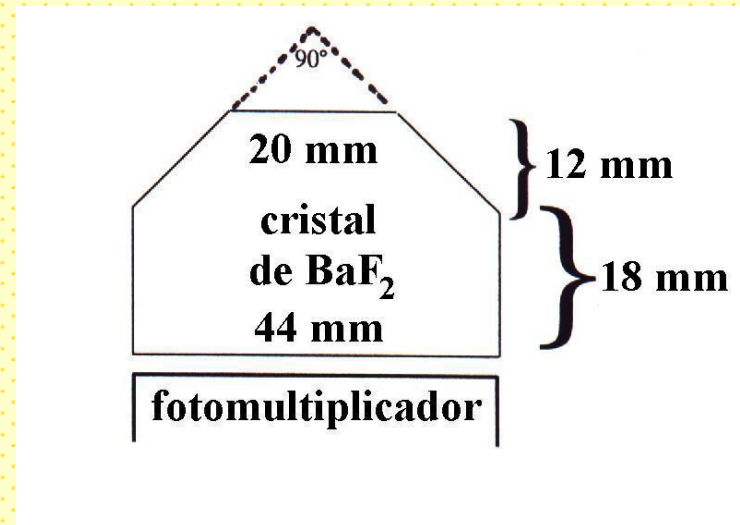
Detectores. Características generales.

La respuesta temporal depende fuertemente de:

Material que forma el detector.

Geometría del cristal detector.

Depende del sistema detector en su conjunto, no sólo del cristal detector. Cada elemento del sistema detector tiene su propio tiempo de procesamiento de señales.





Detectores. Características generales.

Tiempo muerto.

Tiempo "que le toma" al detector procesar un evento.

Relacionado a la duración de la señal.

Durante este período, un segundo evento puede no ser aceptado: **el detector es insensible.**

o bien

una segunda señal puede sumarse a la primera, dando lugar a un pulso distorsionado y en consecuencia a una pérdida de la información contenida en los mismos.

Estos efectos limitan la cantidad de eventos detectables por unidad de tiempo.

Para evitar los efectos de generados por el tiempo muerto, el contaje se debe mantener lo mas bajo posible para que la probabilidad que dos eventos se produzcan con una diferencia temporal menor al tiempo muerto sea baja.

Detectores. Características generales.

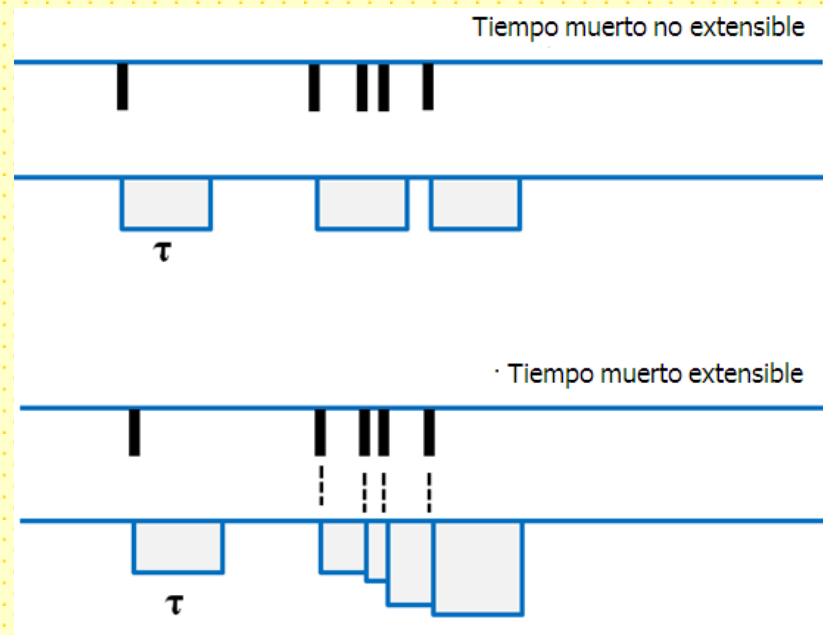
Supongamos que el tiempo muerto para cada evento detectado es τ (el mismo para cada evento).

Dos casos generales:

Tiempo muerto no extendible (no paralizable): Si un segundo evento durante el tiempo muerto τ introducido por el evento precedente, este segundo evento es ignorado.

Luego del tiempo τ el sistema vuelve a registrar eventos.

Contadores escalímetros y sistemas analizadores de altura de pulsos responden a este modelo.



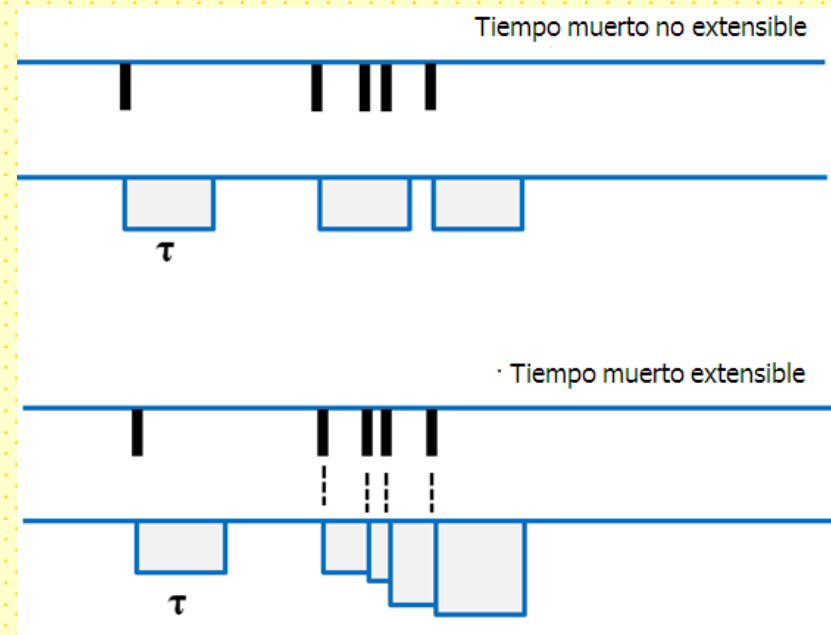
Detectores. Características generales.

Supongamos que el tiempo muerto para cada evento detectado es τ (el mismo para cada evento).

Dos casos generales:

Tiempo muerto extendible (paralizable): Si un segundo evento durante el tiempo muerto τ del evento precedente, este adiciona su tiempo muerto, aunque no sea contado.

Para altas tasas de eventos, produce tiempos muertos muy largos.





Detectores. Características generales.

Supongamos que el número de eventos por unidad de tiempo que llegan al detector es m (suponemos que todos los eventos son registrados) y el detector registra k eventos en el tiempo T . Supongamos el caso no extensible.

Si $\tau=0$, $mT=k$.

Si τ no es cero, un total de $mk\tau$ cuentas «se pierden». Entonces:

$$mT = k + mk\tau$$

$$m = \frac{k/T}{1 - (k/T)\tau}$$

Cuentas
reales ($\tau=0$)

Cuentas
registradas

$$R_t = \frac{R_0}{1 - R_0\tau}$$

Para altas tasas de conteo

$$R_0^{\max} = \frac{1}{\tau}$$

Detectores. Características generales.

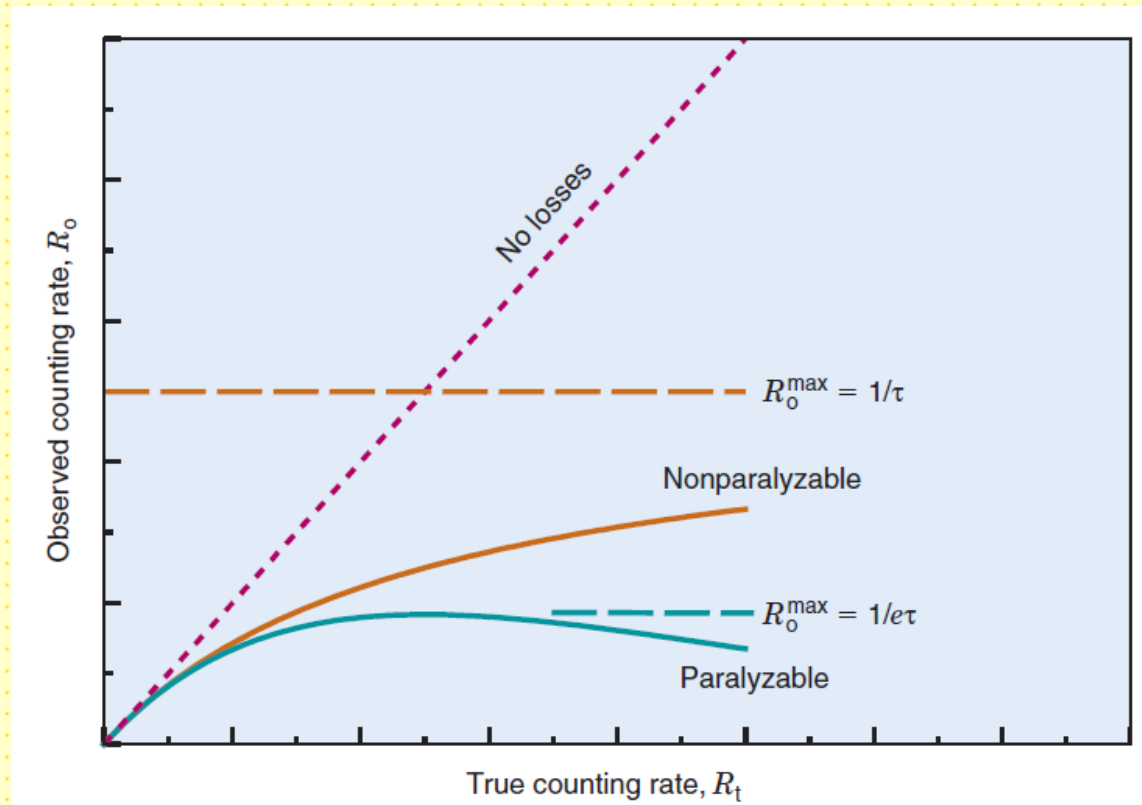
Tiempo muerto extensible:

$$R_0 = R_t e^{-R_t \tau}$$

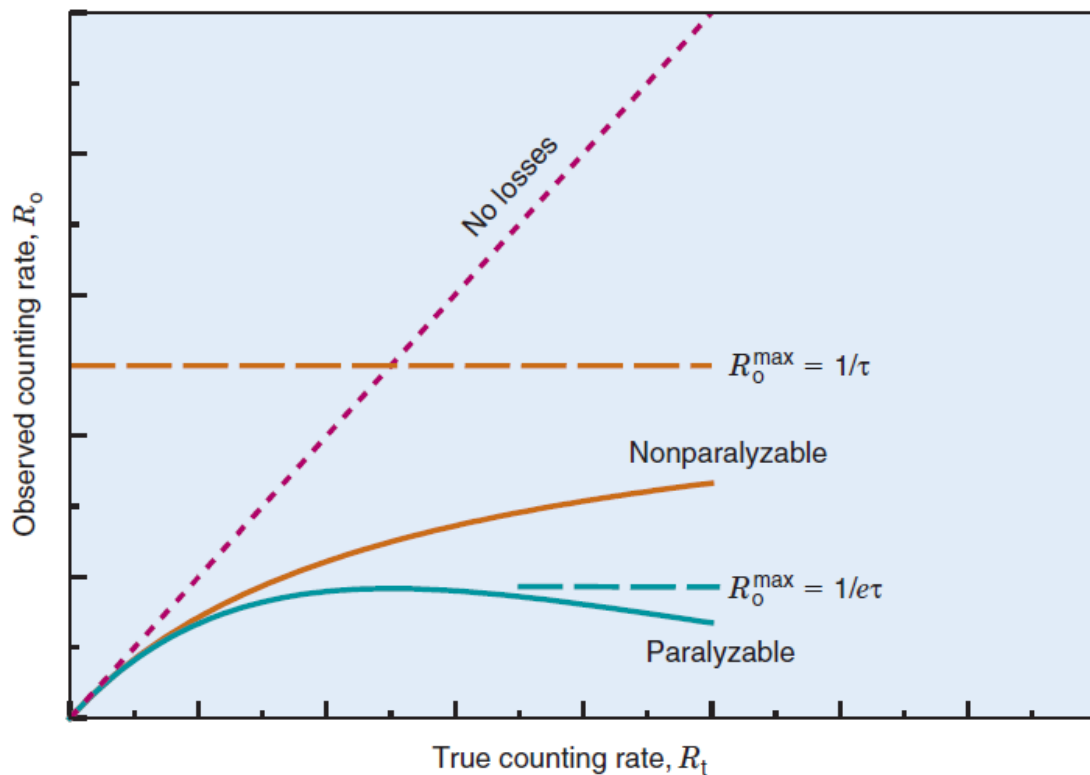
Ecuación trascendente.
No hay solución analítica.

Para altas tasas de conteje

$$R_0^{\max} = \frac{1}{e\tau}$$



Detectores. Características generales.



Para un dado valor de tiempo muerto y tasa de conteo, las pérdidas de tiempo para un sistema extensible son mayores que las de un sistema no extensible.

El conteo observado decrece al aumentar la tasa de eventos. (Eventos adicionales extienden el tiempo muerto sin contribuir a al conteo observado).

«parálisis del detector»



Detectores de ionización.

Cuando radiación ionizante pasa a través de la materia, interactúa con átomos y moléculas, transfiriéndoles energía.

La transferencia de energía da lugar a dos efectos:

Ionización: la energía transferida es suficiente para que un electrón atómico sea eyectado e su átomo o molécula, dando lugar a un par de iones (un electrón con carga negativa) y un átomo o molécula con carga positiva).

Excitación: Los electrones son llevados a un nivel de mayor energía, dando lugar a un átomo o molécula en estado excitado.

Ambos procesos «están involucrados» en la detección de la radiación, aunque en algunos detectores predomina la ionización y en otros la excitación.



Detectores de ionización.

Detectores de ionización.

Un poco de historia...

Primeros dispositivos eléctricos empleados para la detección de la radiación.

Funcionamiento básico: colección directa de electrones e iones producidos por el pasaje de la radiación a través de un gas.

Durante la primera mitad del siglo XX se desarrollaron tres tipos de detectores basados en el mismo principio.

Cámara de ionización.

Contador proporcional.

Contador Geiger-Müller.



Detectores de ionización.

Su diseño básico no ha cambiado demasiado desde la década de 1940.

Desde entonces, han sido reemplazados paulatinamente por otros sistemas de detección.

Hoy en día no son ampliamente usados, salvo en aplicaciones específicas.

Uso actual: monitores de radiación, ya que son baratos, simples de operar y fáciles de mantener.



Detectores de ionización.

Último comentario:

A partir de 1960, el desarrollo de nuevos dispositivos (*multi-wire proportional counter, drift chamber, time projection chamber*), junto con el desarrollo de la electrónica y nuevos sistemas de adquisición ha dado nueva vida a estos dispositivos.

Desarrollos modernos: Emplear líquidos en lugar de gases como medio.



Detectores de ionización.

Detectores de ionización gaseosos.

Por qué gases?

Por la alta movilidad de electrones e iones.

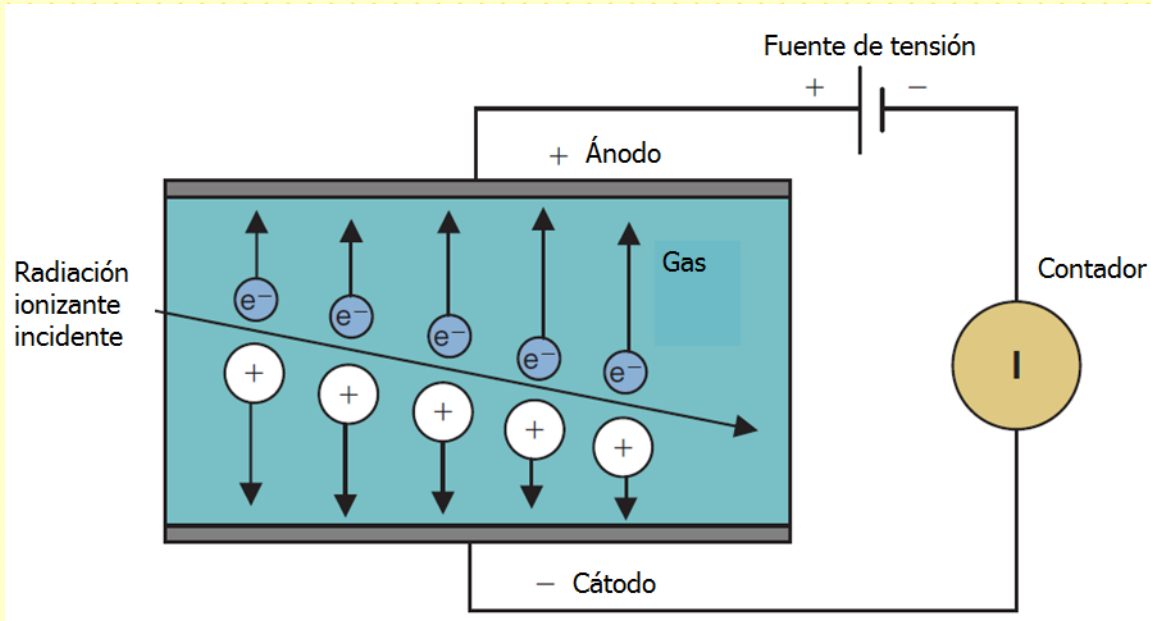
Los procesos de ionización y excitación han sido ampliamente estudiados y están bien comprendidos.

Detectores de ionización.

Configuración básica.

Idea básica: corrientes inducidas por ionización del gas entre electrodos.

En condiciones normales, los gases son aislantes. No hay corriente eléctrica entre los electrodos.



La ionización inducida por la radiación genera cargas + y -, que son atraídas hacia los electrodos, generándose entonces una corriente que puede ser medida y dar información sobre la radiación.

Los electrodos no necesariamente son placas (diferentes desarrollos). El gas puede estar en una cámara sellada o directamente aire atmosférico.

Detectores de ionización.

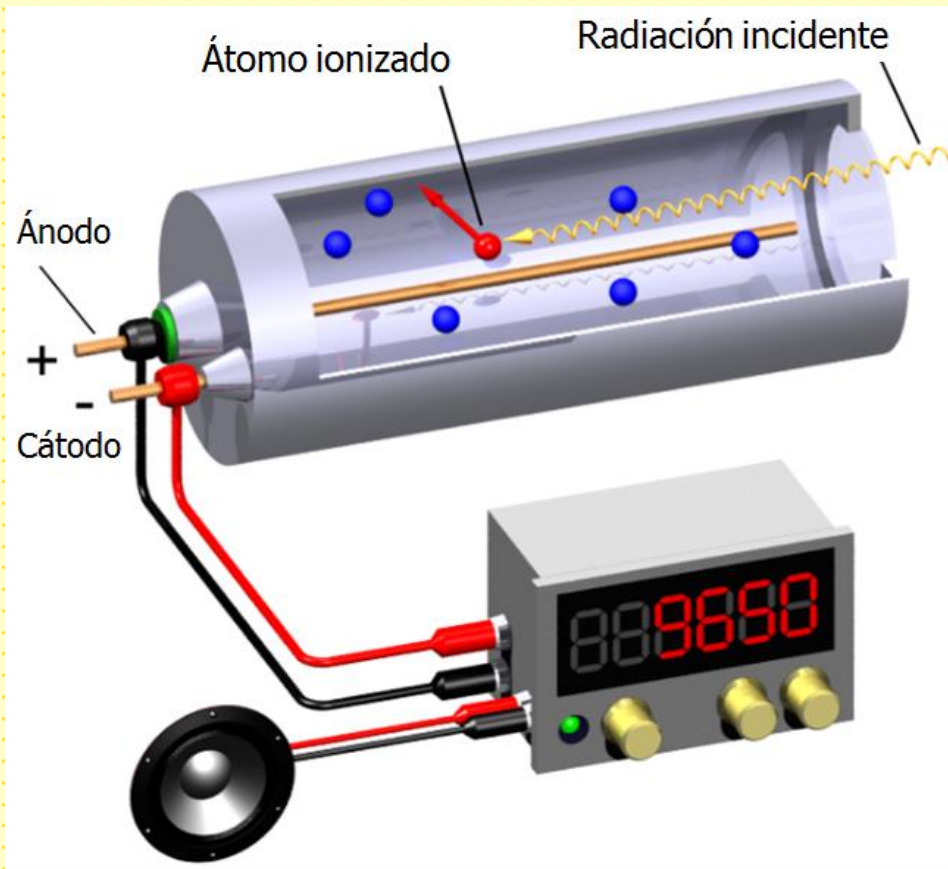
Forma mas común: cilindro con el gas en su interior y un alambre central (coaxial).

$$E = \frac{1}{r} \frac{V_0}{\ln(b/a)}$$

a: radio del alambre central.
b: radio interior del cilindro.
r: distancia radial al alambre.

Si la radiación penetra en el cilindro (al volumen sensible) se producen ionizaciones y excitaciones en el gas.

El número de pares ion-electrón es proporcional a la energía de la radiación incidente.





Detectores de ionización.

Número medio de pares creados. Proceso de naturaleza estadística.

$$N = E / j$$

	Potencial de excitación, eV	Potencial de ionización, eV	Energía para la creación de un par, eV
H ₂	10,8	15,4	37
He	19,8	24,6	41
N ₂	8,1	15,5	35
O ₂	7,9	12,2	31
Ne	16,6	21,6	36
Ar	11,6	15,8	26
Kr	10,0	14,0	24
Xe	8,4	12,1	22
CO ₂	10,0	13,7	33
CH ₄		13,1	28
aire			33,7

El número de pares creados es prácticamente independiente del gas y del tipo de partícula.



Detectores de ionización.

Elección del gas.

Varios factores involucrados en la elección del gas:

- 1- Voltaje de trabajo no muy elevado.
- 2- Alta ganancia.
- 3- Proporcionalidad.
- 4- Capacidad de medir altas tasas de eventos.

Por su costo y bajo voltaje de trabajo, se suele usar **Ar**. Ya veremos sus desventajas.

Desventajas del Ar.

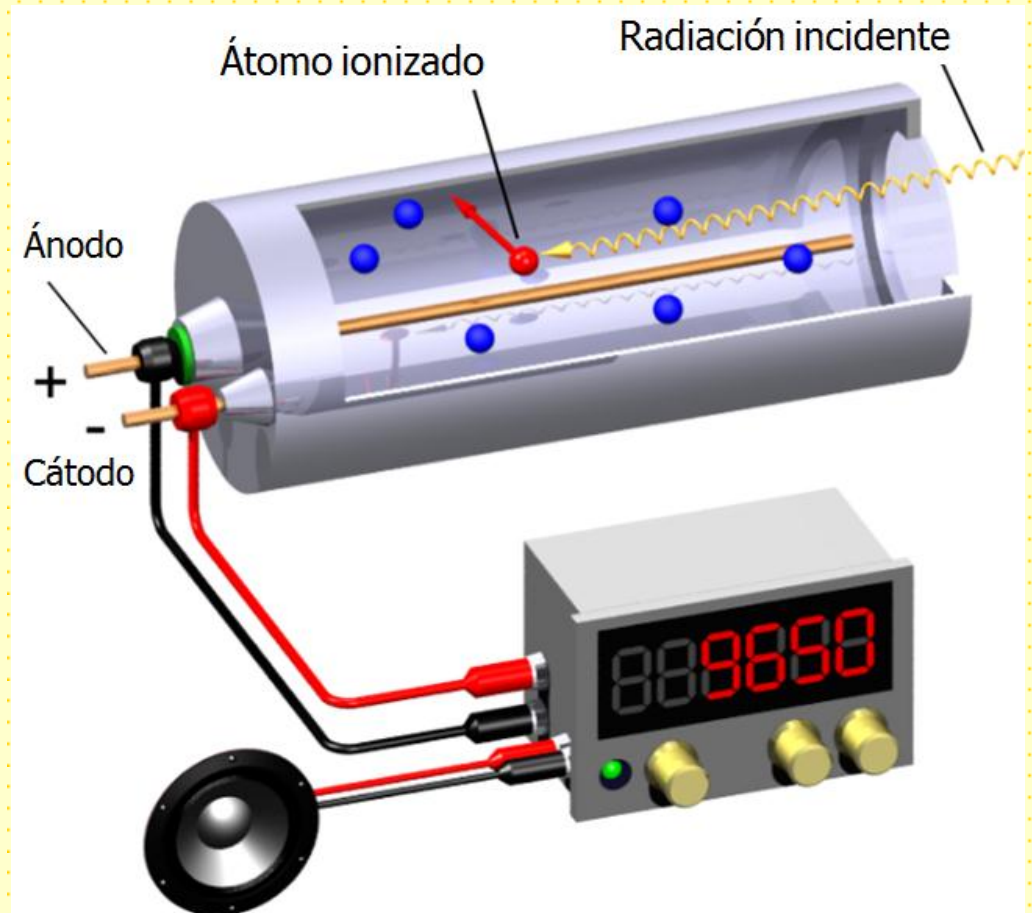
Por su alto potencial de excitación, no puede operarse con ganancias mayores a 10^3 - 10^4 .

Para "apagar" la descarga se agrega un segundo gas, por ejemplo, metano o alcohol.

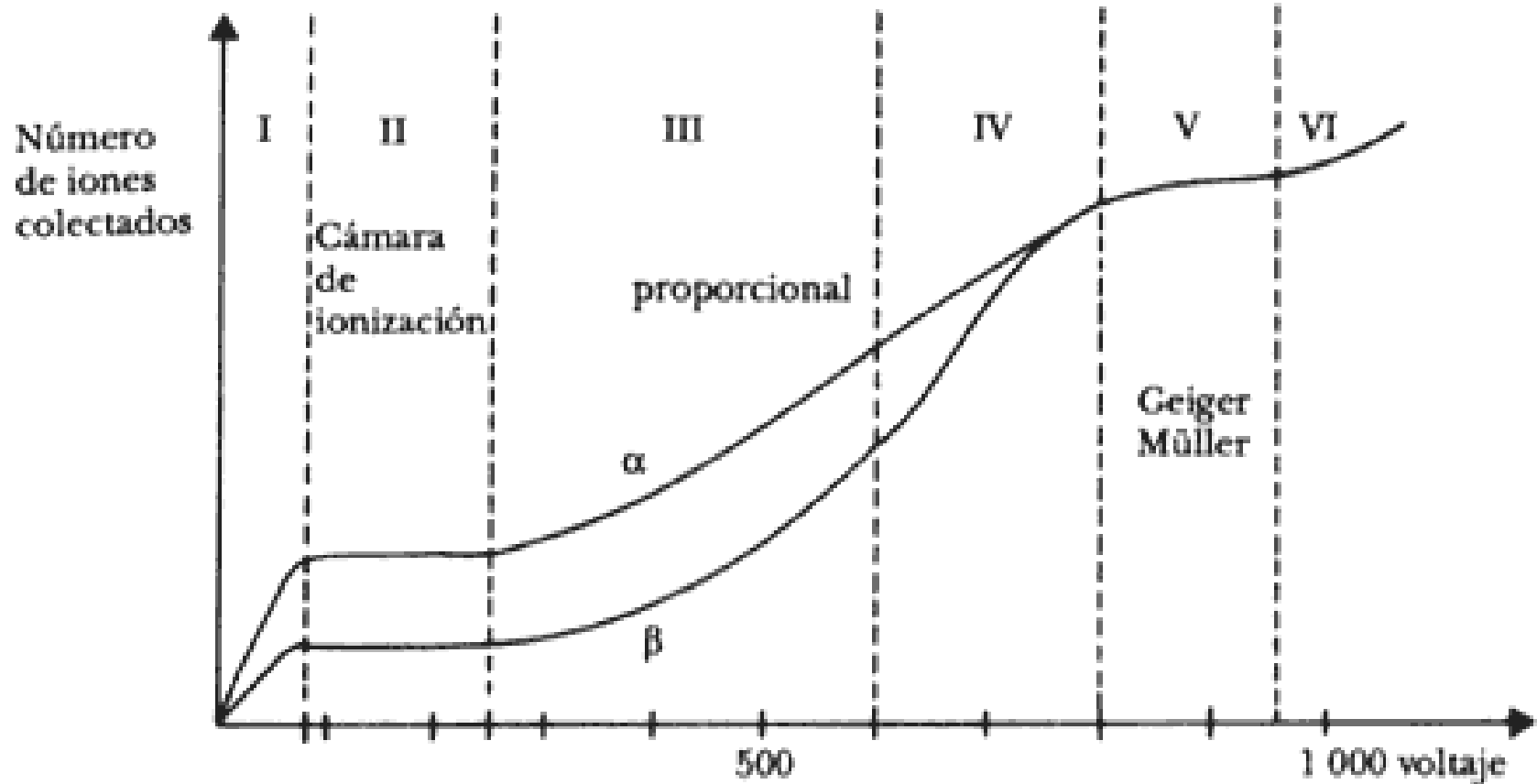
Detectores de ionización.

Volviendo al detector...

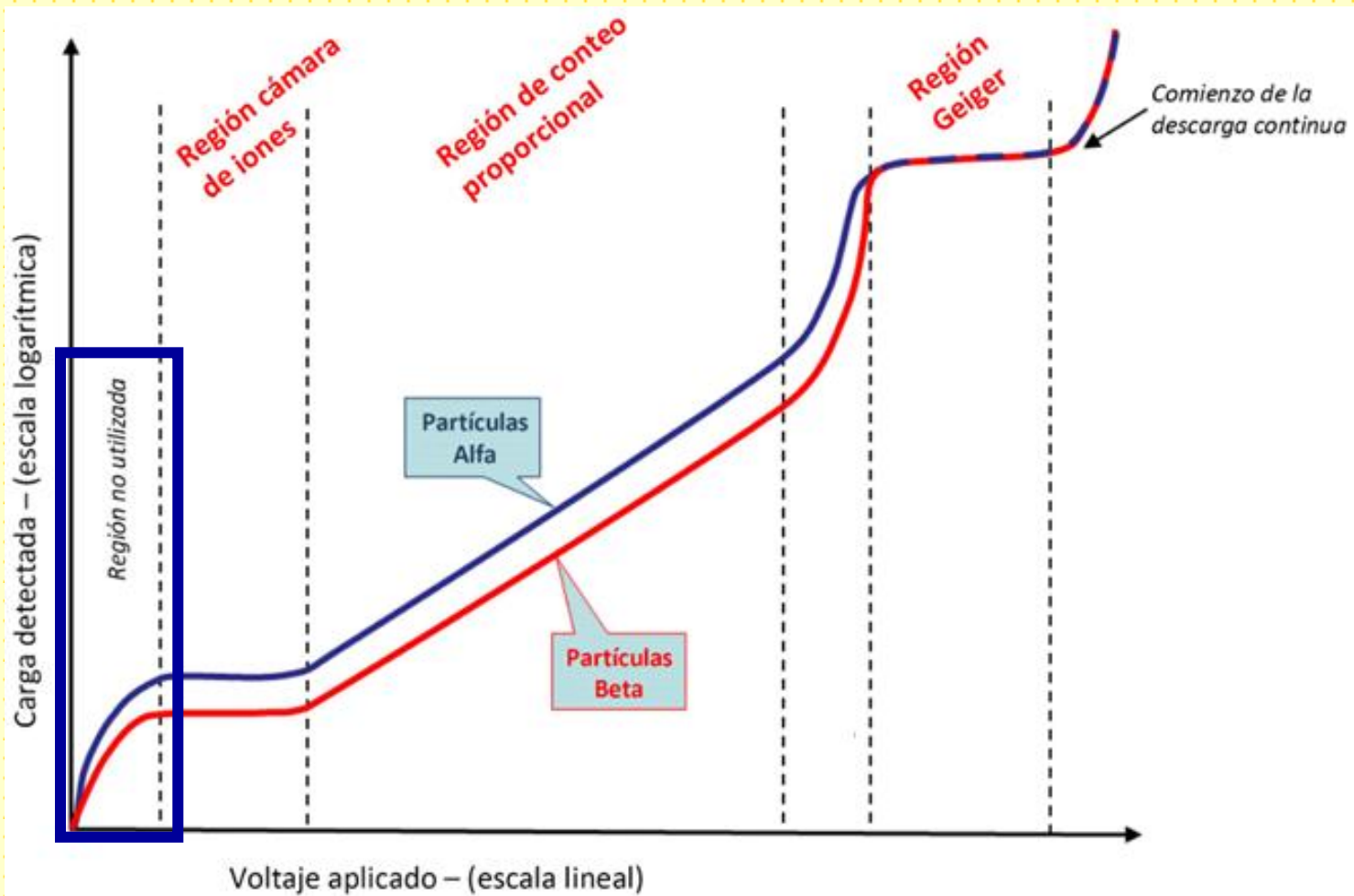
La señal de corriente observada depende del voltaje aplicado.



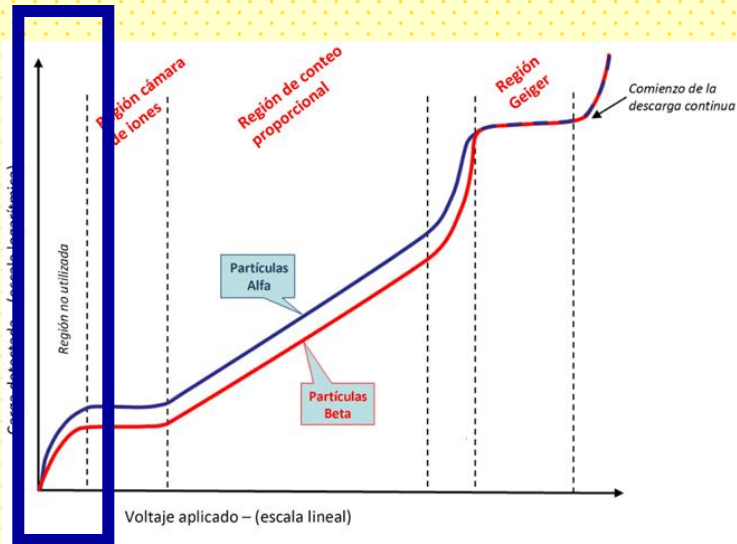
Detectores de ionización.



Detectores de ionización.



Detectores de ionización.

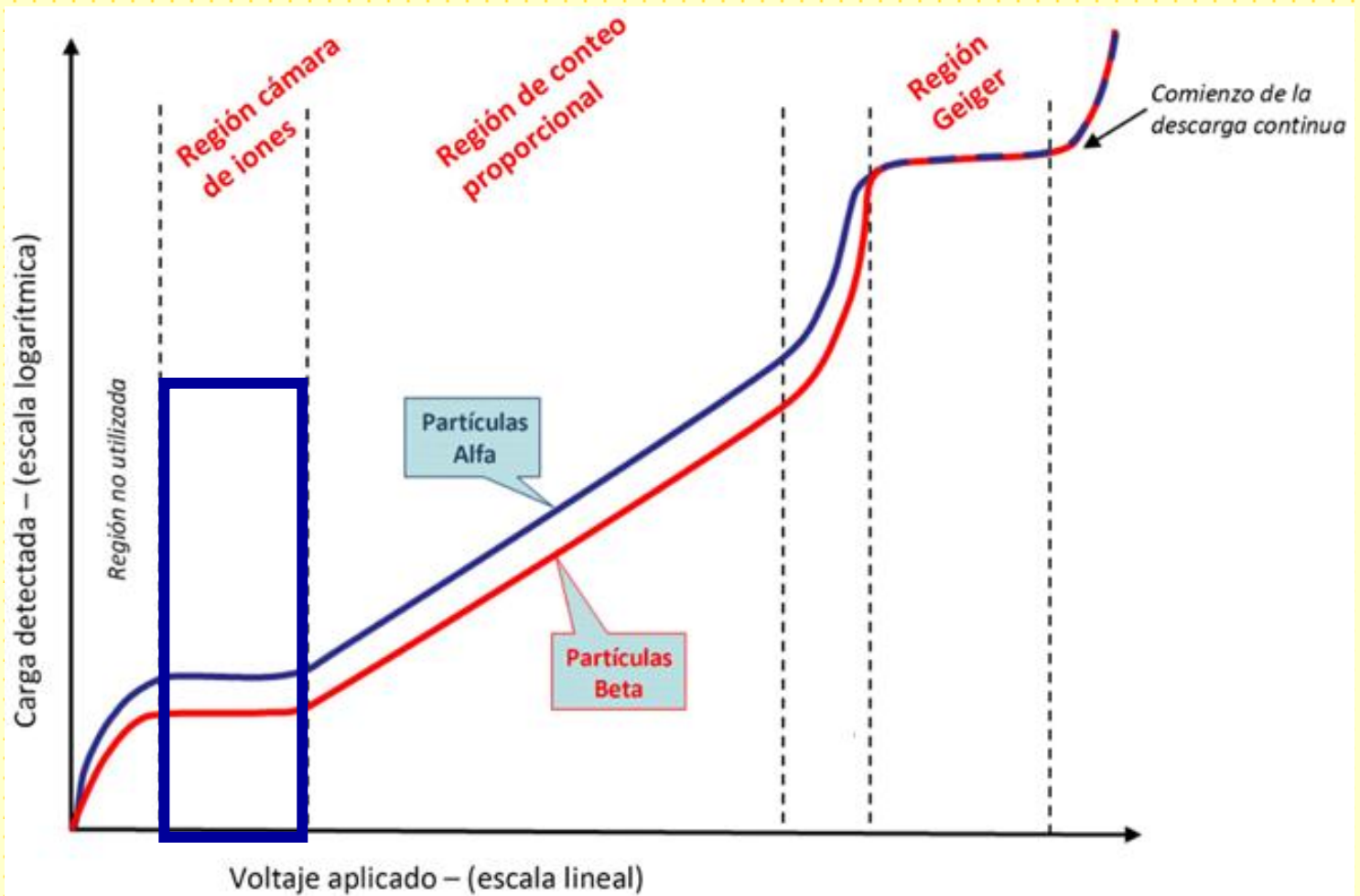


Para $V = 0$, los iones se atraen y se recombinan. No hay colección. No hay corriente.

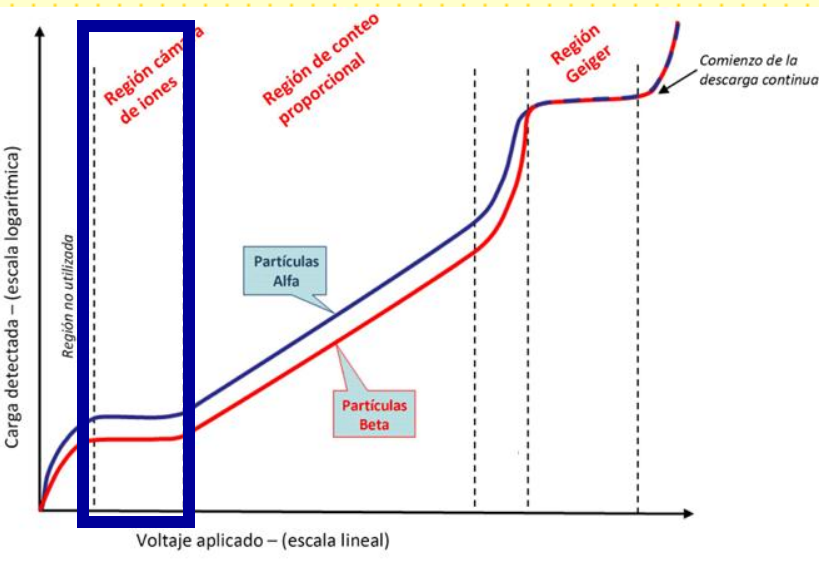
Al aumentar $V = 0$, empieza a producirse colección. Competencia entre recombinación y colección. Gana recombinación.

Corriente muy pequeña y no utilizable. No es una región que se pueda usar para detección.

Detectores de ionización.



Detectores de ionización.



Al aumentar V , empieza a ganar la colección por sobre la recombinación.

Llega un momento que el voltaje es suficiente para coleccionar todos los pares generados.

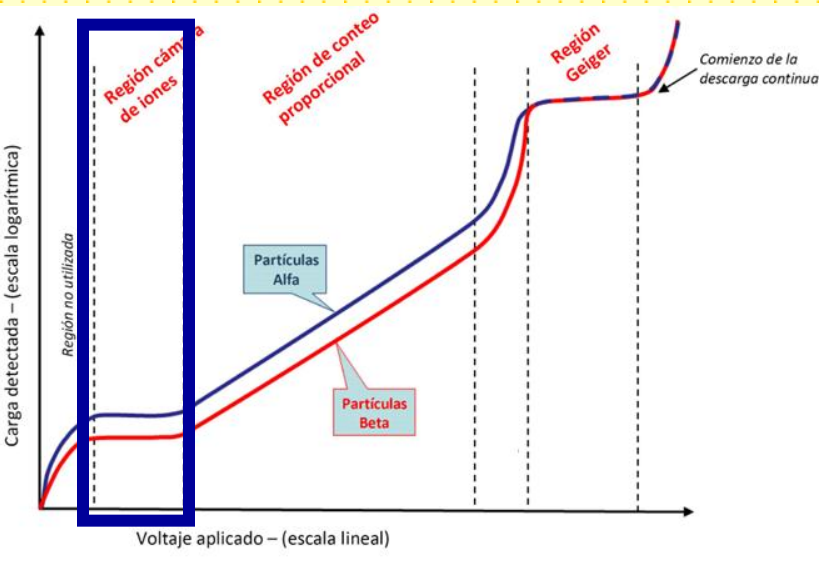
"Voltaje de saturación", "región de saturación".

Típicamente, $V \sim 50-300$ V (depende del diseño del detector).

Cuando se opera en esta región, el detector se denomina **"cámara de ionización"**.

Detectores de ionización.

"cámara de ionización".



Corriente extremadamente pequeña.

Ejemplo: radiación de 1 MeV. Asumiendo como medio aire, $E_{ion} = 34 \text{ eV}$,

$$N = E / j = \frac{1 \times 10^6 \text{ eV}}{34 \text{ eV}} \approx 3 \times 10^4$$

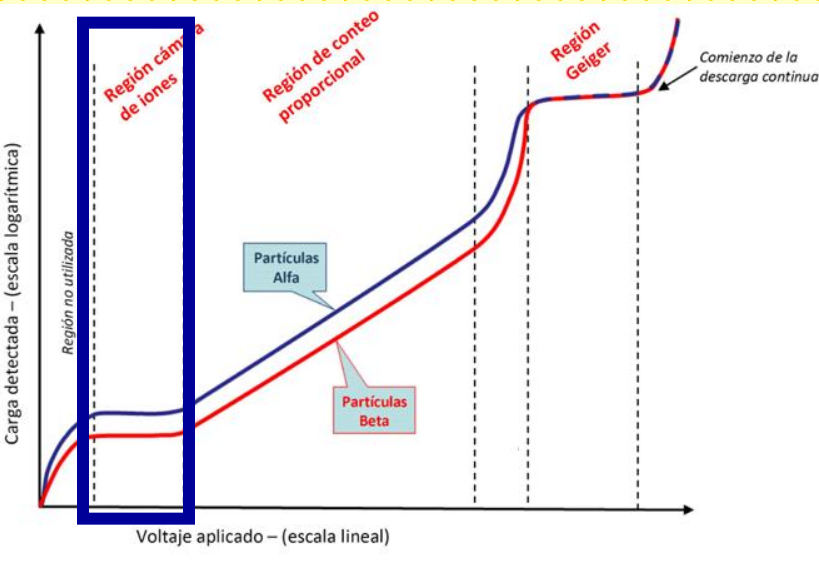
Eso equivale a $3 \times 10^{-15} \text{ C}$.

Por esto no se emplean para el estudio de eventos radiactivos individuales.

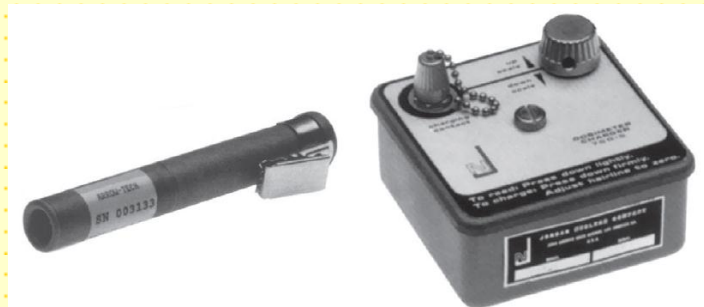
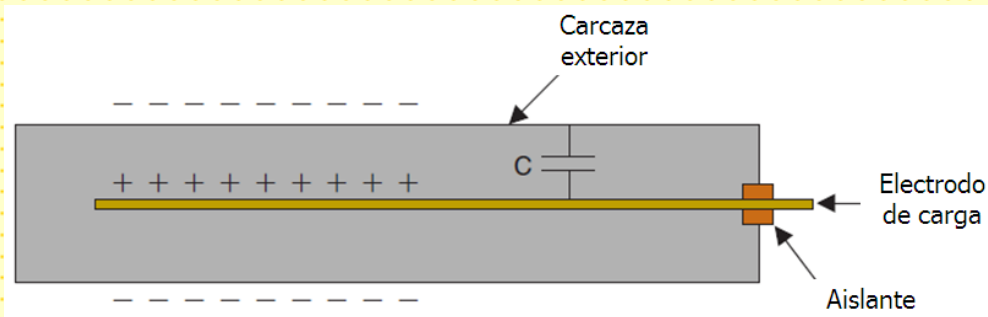
Uso: dosímetros.

Detectores de ionización.

"cámara de ionización".

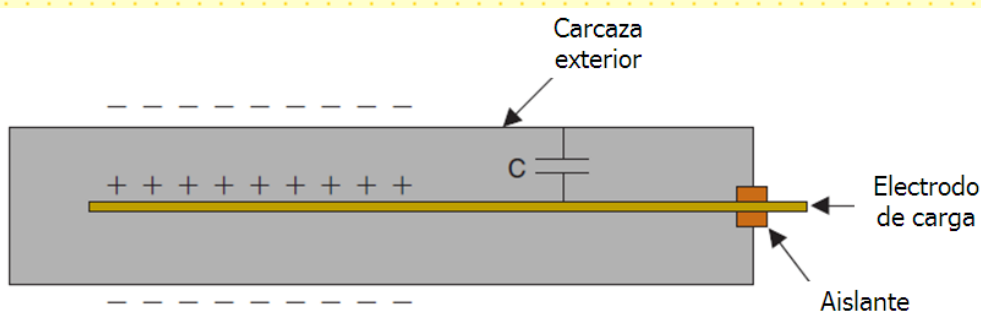


Dosímetro de bolsillo



Detectores de ionización.

"cámara de ionización".



Se carga el dispositivo a un voltaje V (conocido y establecido)

Si la capacidad del sistema C , la carga es $Q=CV$.

Cuando la cámara es expuesta a la radiación, se colecta una carga ΔQ , que va descargando el capacitor (la carga positiva es atraída al cátodo y viceversa).

Se mide el cambio en V , lo que permite determinar la cantidad de ionizaciones, o sea, el número de eventos incidentes (generalmente, una aguja que se defleca en función del voltaje entre las placas. Se observa directamente a ojo, y se lee en una escala previamente calibrada).

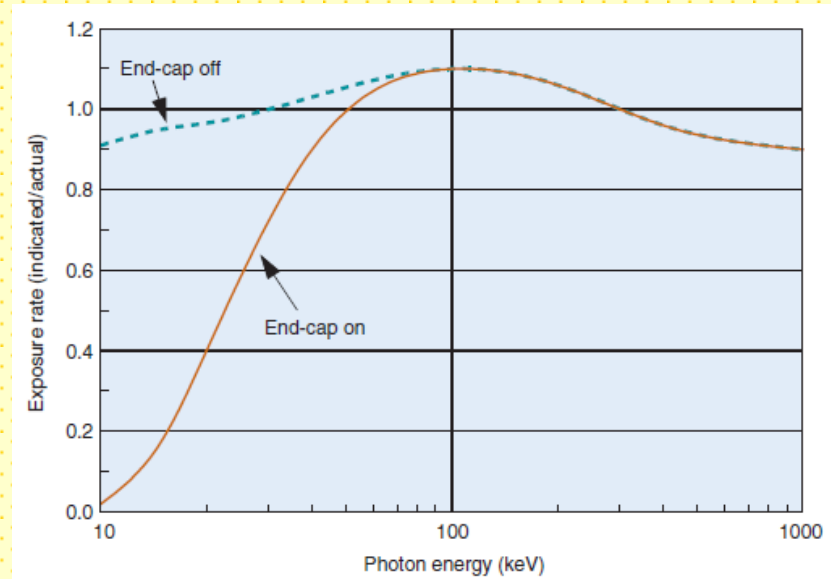
Se usan para medir exposiciones del orden de 10 mR (ya veremos que es esta unidad) con una precisión del orden de 20%.

Detectores de ionización.

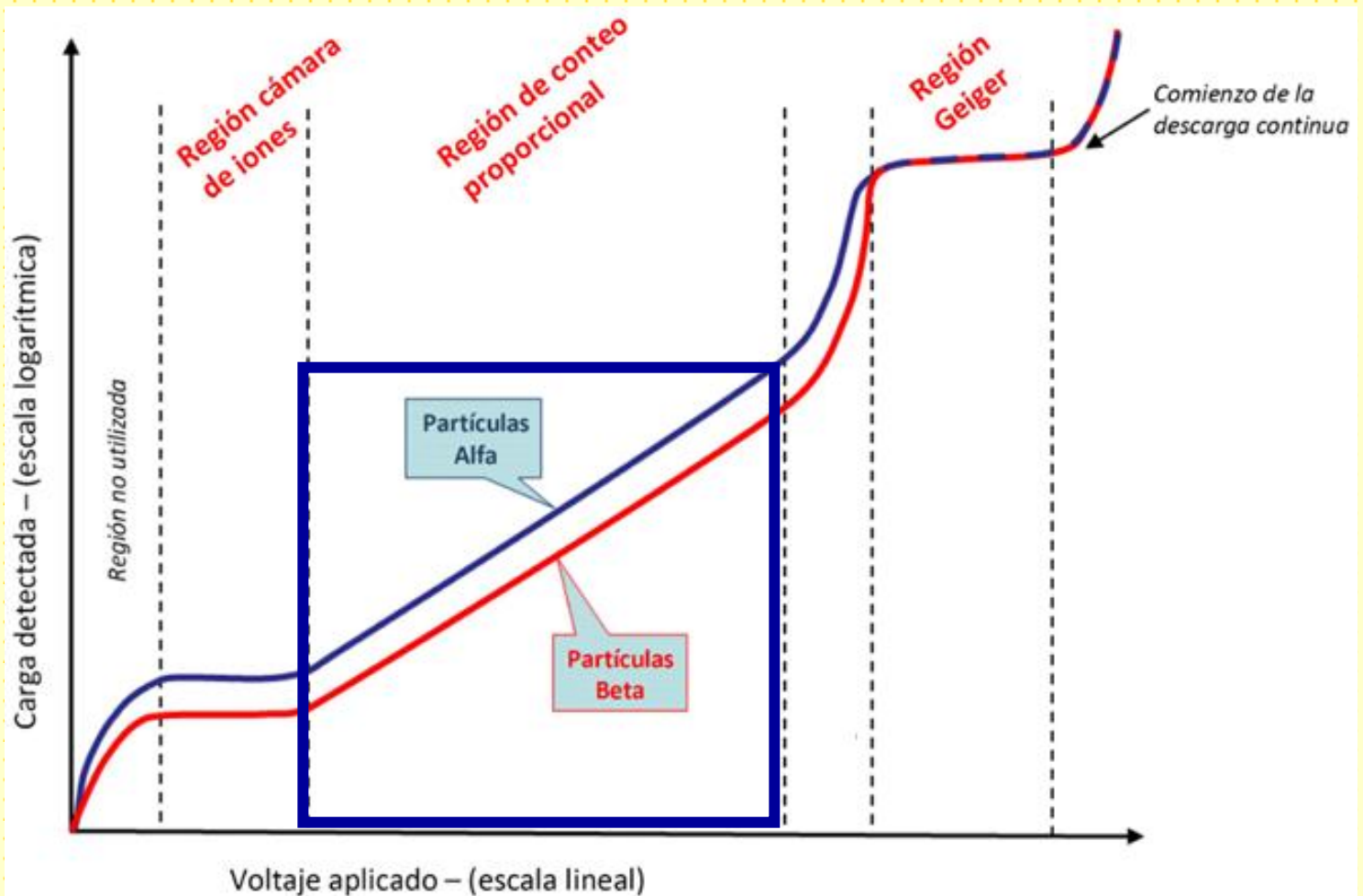
"cámara de ionización".

Desventajas:

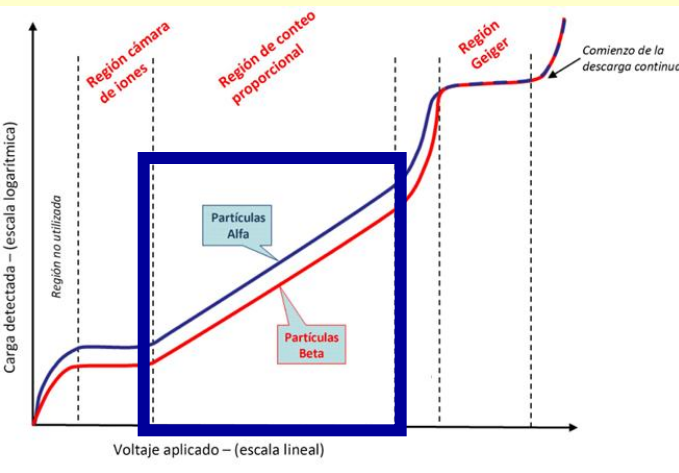
- Baja eficiencia de detección para rayos X y γ (no es problema para dosimetría. Si para otras aplicaciones, como ser imágenes médicas).
- La respuesta depende de la energía de la radiación incidente (la interacción con el gas y las paredes del detector depende de la energía).
- Para el caso de cámara "abiertas", la densidad del aire y por ende el coeficiente de absorción.



Detectores de ionización.



Detectores de ionización.



Cámara de ionización: el voltaje entre los electrodos sólo es suficiente para recolectar los pares generados por acción directa de la radiación incidente.

Si se aumenta el voltaje a un valor suficientemente alto, los electrones generados por ionización directa adquieren energía suficiente para generar ionizaciones adicionales por colisiones con otros átomos del gas. Ionización secundaria.

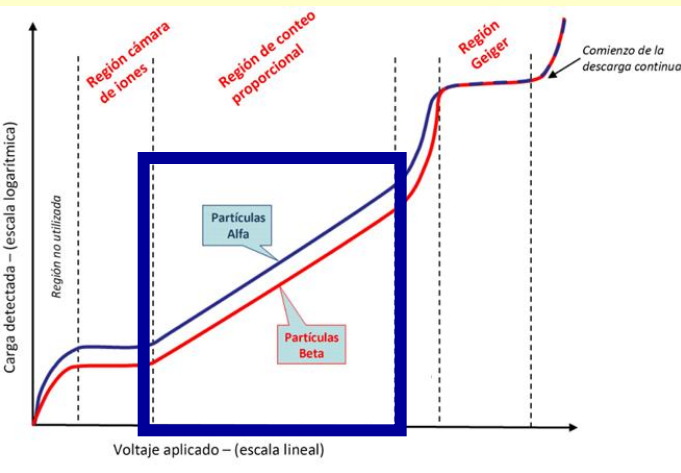
Estos electrones a su vez pueden causar más ionización: proceso de cascada (avalancha de Townsend o la amplificación de la carga).

factor por el cual se incrementa la ionización: **factor de amplificación del gas**.

Aumenta rápidamente con el voltaje aplicado. Puede ser tan alto como 10^6 , dependiendo de el diseño de la cámara y el voltaje aplicado.

En esta región: **Contador proporcional**.

Detectores de ionización.

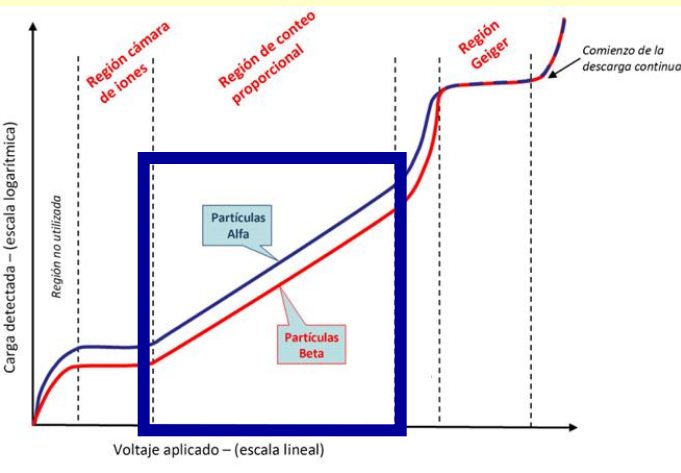


$$Q_{colectada} = f_{amplificación} \frac{E}{j}$$

Por lo tanto, el total de carga colectada es proporcional a la energía depositada en el detector por la radiación incidente.

Comentario: los contadores proporcionales no son simplemente cámaras de ionización operadas a alta voltajes. Están especialmente diseñado para optimizar la amplificación, tanto en términos de la cantidad de amplificación y linealidad de la amplificación.

Detectores de ionización.



Ventajas:

- El tamaño de la señal eléctrica producida por un evento individual es mucho más grande.

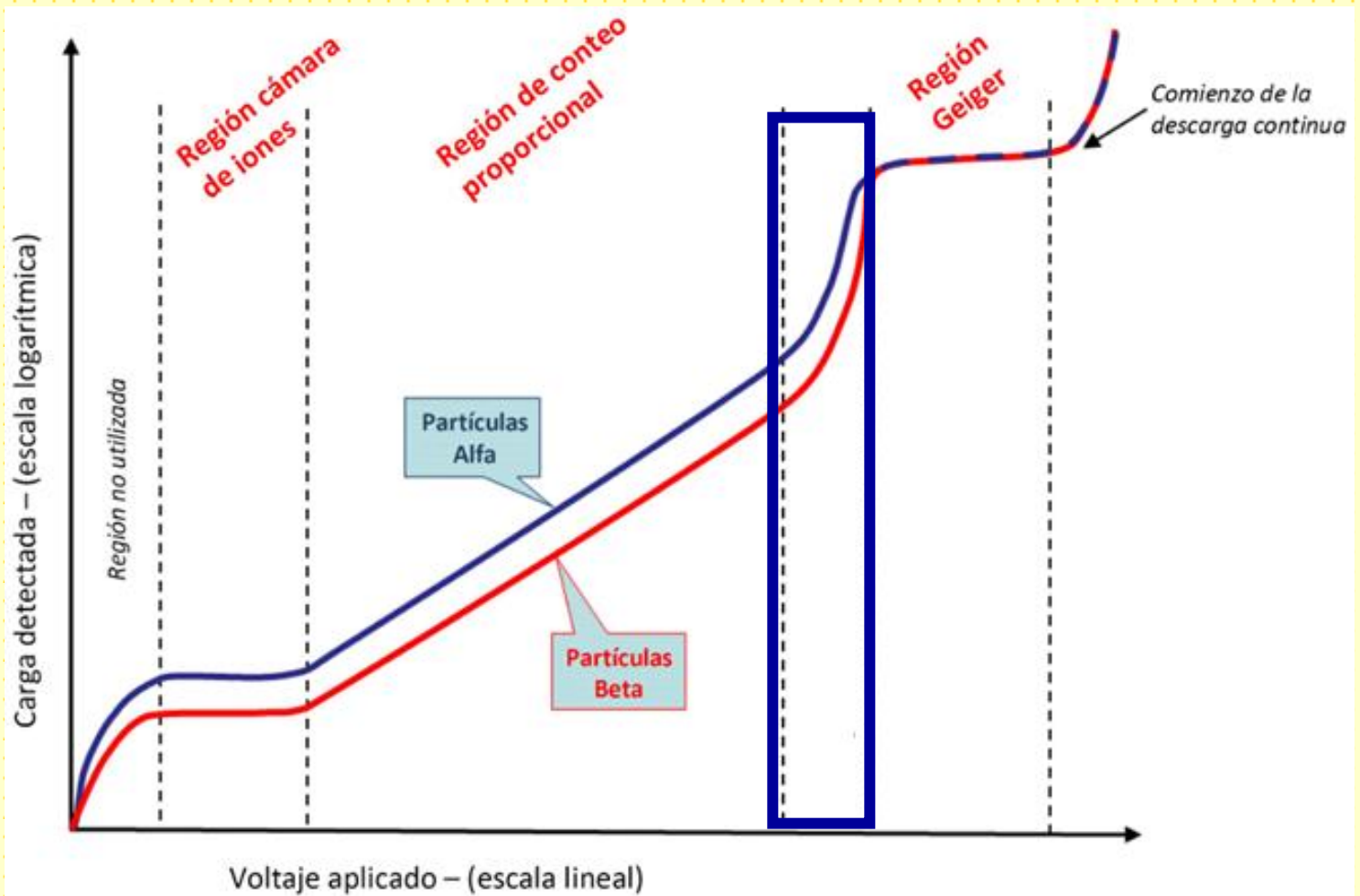
Útiles para detectar y contar eventos individuales.

- El pulso de corriente es proporcional a la cantidad de energía depositada por la radiación incidente.

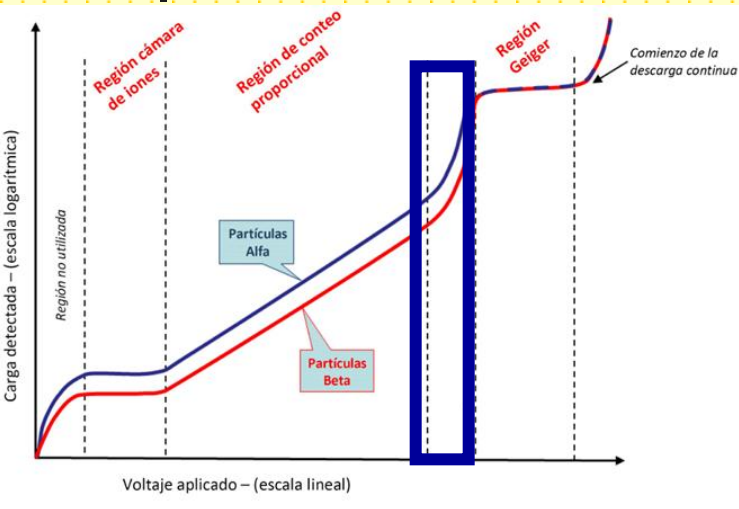
Los contadores proporcionales se pueden usar para discriminar entre radiaciones de diferentes energías sobre la base de estudiar el «tamaño» del pulso eléctrico generado.

Esto último es válido solo para muy bajas tasas de conteo.

Detectores de ionización.



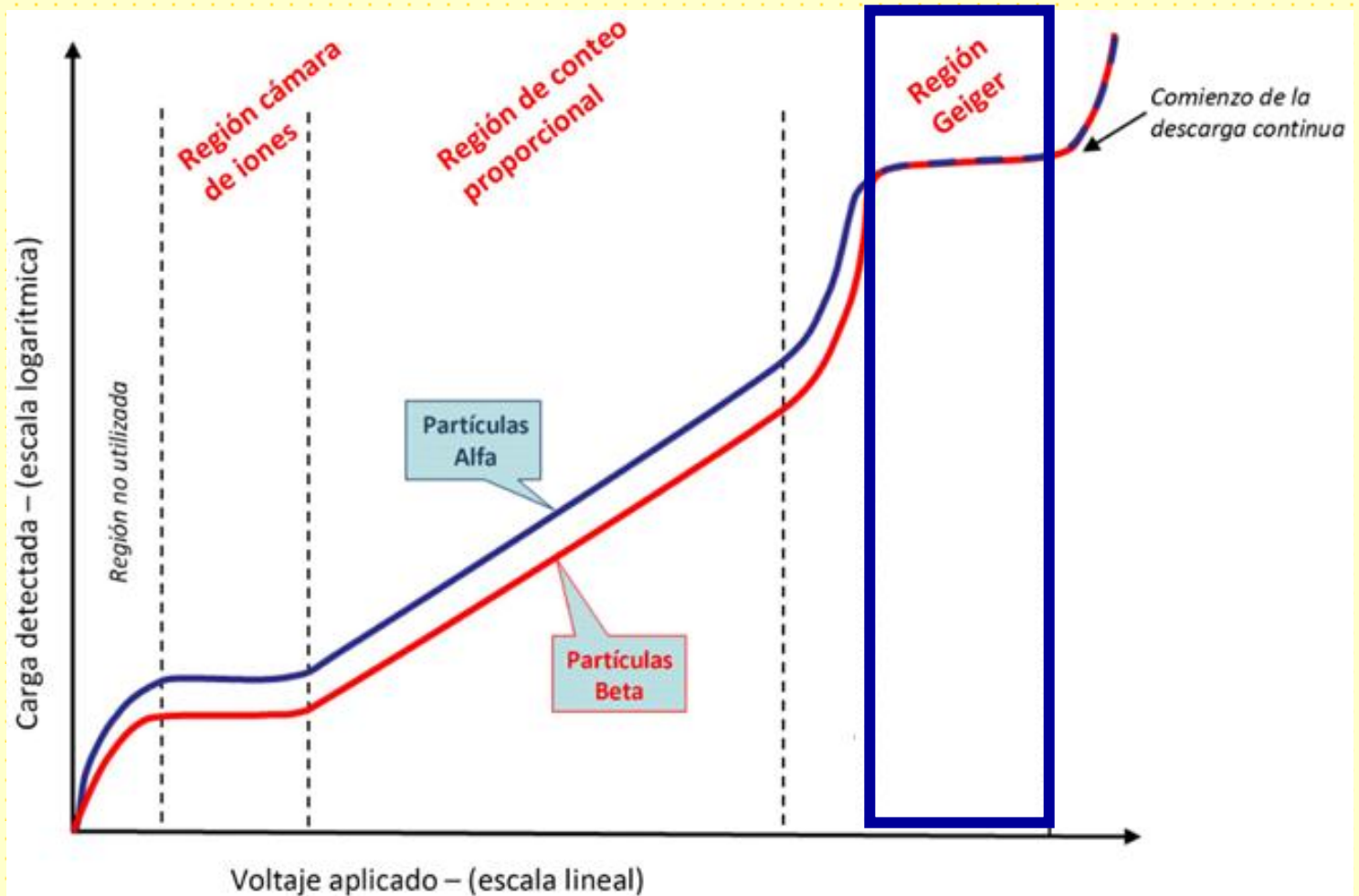
Detectores de ionización.



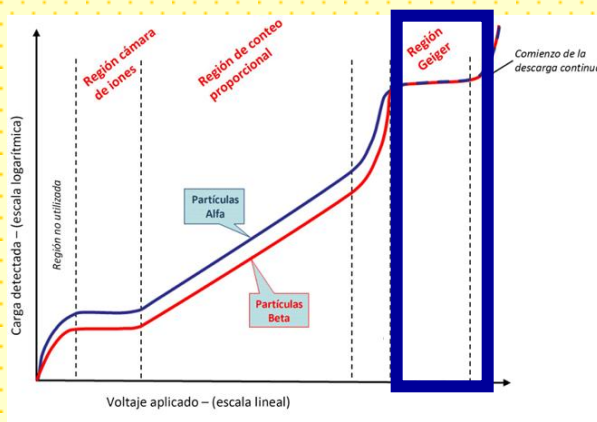
Región de proporcionalidad limitada.

Al aumentar el voltaje, aumenta el número y tamaño de la avalancha. Se producen efectos de apantallamiento de carga que comienza a limitar la relación entre la energía depositada y la carga colectada.

Detectores de ionización. Detector Geiger-Müller.



Detectores de ionización. Detector Geiger-Müller.



Región Geiger-Müller: detector optimizado para maximizar el factor de multiplicación.

Similar funcionamiento al contador proporcional. En lugar de una única avalancha localizada en un punto, se produce una reacción en cadena. Múltiples avalanchas a lo largo del ánodo.

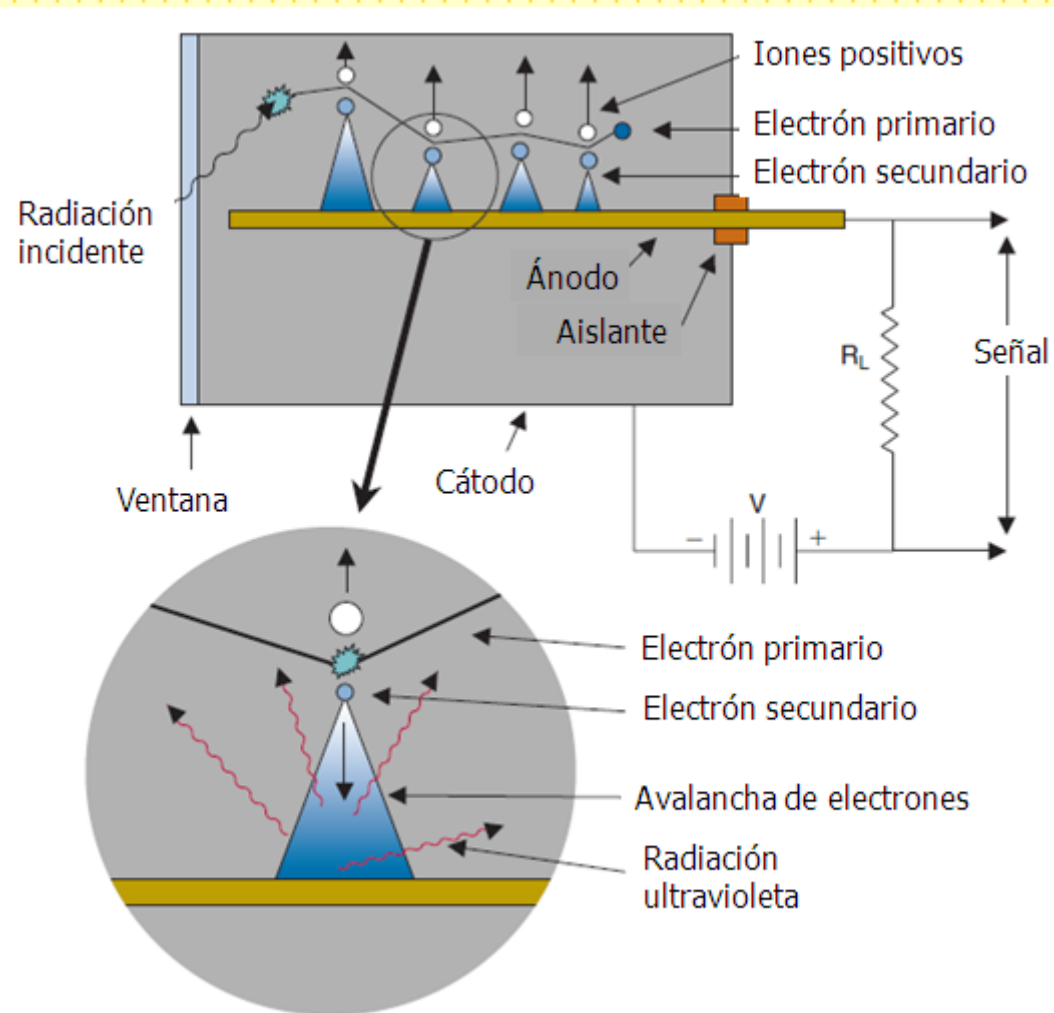
Las avalanchas se producen por fotones producidos por la desexcitación de moléculas..

Las moléculas excitadas decaen al estado fundamental emitiendo fotones en longitudes de onda visibles o ultravioletas (tiempo de decaimiento del orden de 10^{-9} s)

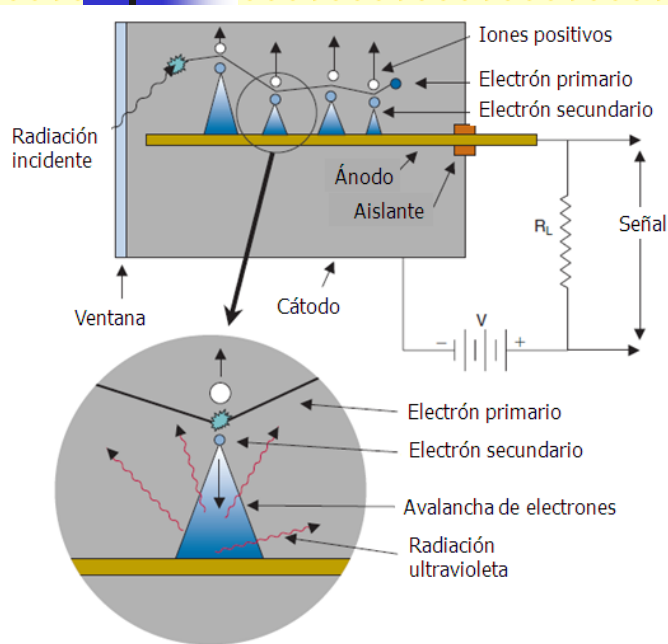
Cuando un fotón UV interactúa con el gas o con la superficie del cátodo se libera otro electrón, (efecto fotoeléctrico),

Se puede desencadenar una nueva avalancha de electrones, ya que se mueve hacia el ánodo a lo largo del volumen de gas y a lo largo toda la longitud del alambre central.

Detectores de ionización. Detector Geiger-Müller.



Detectores de ionización. Detector Geiger-Müller.



A medida que la avalancha progresa, los electrones, son rápidamente, colectados.
Los iones positivos son y de movimiento lento. Tardan en colectarse.

Se forma una nube de cargas positivas alrededor del alambre central.
Se reduce el campo eléctrico alrededor del ánodo.
Se termina la avalancha.

Se genera una gran cantidad de carga eléctrica.
Corriente de salida saturada, de amplitud constante, independientemente de la energía o tipo de partícula incidente.

El factor de amplificación de gas puede ser tan alto como 10^{10} .
Señal eléctrica fácilmente detectable con circuitos electrónicos. Puede ser utilizado para detectar y contar eventos individuales.



Detectores de ionización. Detector Geiger-Müller.

Problema al terminar la avalancha: los iones positivos se mueven hacia el cátodo.

Cuando están muy cerca de el electrodo externo, se arrancan electrones para neutralizar los iones positivos.

El átomo resultante puede quedar en un nivel excitado, por lo cual se emite radiación UV que pueden ionizar átomos del gas y del cátodo, dando lugar a una nueva avalancha.

Por lo tanto, si no hay precauciones, un único evento de radiación ionizante puede hacer que el contador G-M entre en una serie de descargas continuas.

Solución: se agrega un gas adicional («quenching») para cortar la reacción en cadena (auto extinguido).

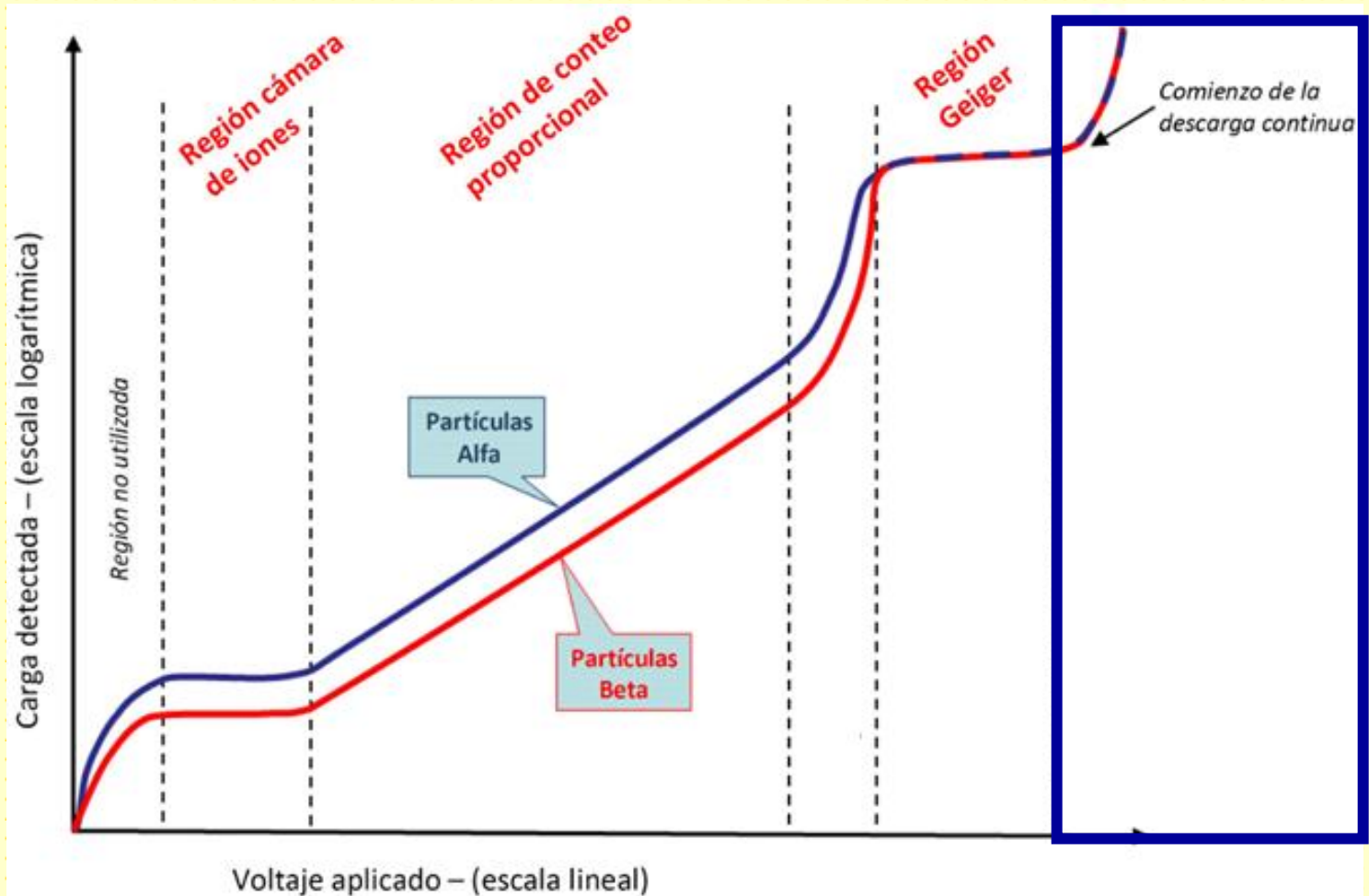
Deben cumplir:

- Liberar electrones fácilmente para neutralizar los iones positivos.
- Que no emita fotones UV al desexcitarse. .
- Que absorban radiación UV a fin de absorber los posibles fotones UV generados en el proceso de neutralización

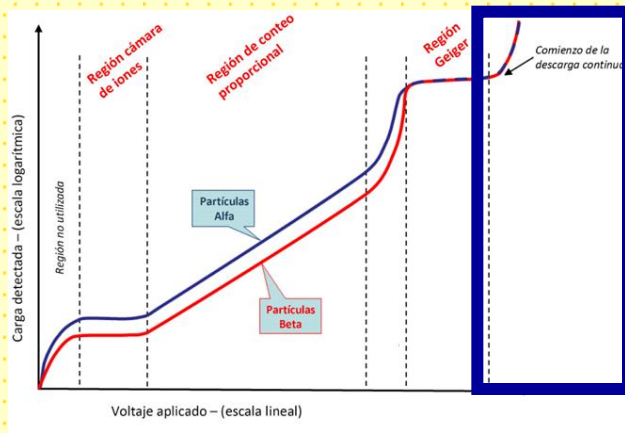
Vapores orgánicos. (e.g., alcohol), gases halógenos (e.g., Cl_2).

Los vapores orgánicos son mas eficientes pero tienen menor vida útil que los halógenos.

Detectores de ionización. Detector Geiger-Müller.



Detectores de ionización. Detector Geiger-Müller.



Cuando el voltaje se incrementa a un muy alto valor, la tasa de conteo comienza de nuevo a incrementarse.
Ionización espontánea en la cámara

La curva luego entra la región de descarga espontánea.

No deben ser operado en esta región:

- La información no es útil ni confiable.

- El gas «quenching» se consume rápidamente por las descargas espontáneas, acortando así la vida del contador.



Detectores de ionización. Detector Geiger-Müller.

Los contadores *GM* son simples, robustos, fáciles de operar y relativamente baratos .

Buena parte del trabajo realizado en Física Nuclear y Física Médica en la primera mitad del siglo XX fue hecho con contadores *GM*.

Desventajas:

- Baja eficiencia de detección para rayos γ y rayos X.
- Incapacidad de distinguir energías sobre la base.

Principalmente empleados para dosimetría y protección radiológica.



Detectores centelladores.

Son quizás los más ampliamente utilizados en Física Nuclear y para la detección de la radiación, especialmente γ .

Se basan en el hecho que ciertos materiales, al ser alcanzados por una partícula nuclear o por radiación, emiten un pequeño flash de luz, un "centelleo" (luminiscencia).

Este fenómeno ocurre cuando la radiación interactúa con la materia, excitando e ionizando átomos y moléculas, las cuales se desexcitan emitiendo fotones con rango de energía en el espectro visible o en los alrededores de él.

Cuidado: La mayoría de los materiales transparentes producen una pequeña cantidad de luz de centelleo cuando sobre ellos incide radiación ionizante.

Sólo en algunos pocos materiales la conversión de energía de excitación a luz es eficiente. a estos los llamamos **materiales centelladores**.

Cuando son acoplados a un dispositivo amplificador, estos centelleos pueden ser convertidos en un pulso eléctrico, el cual puede ser luego analizado electrónicamente.



Detectores centelladores.

Un poco de historia

Primer ejemplo del uso de un centellador para la detección de partículas: "*Spinthariscopio*" inventado por Crookes en 1903. Consistía en una placa de ZnS, la cual producía pequeños destellos al ser golpeada por partículas α .

Estos destellos podían ser distinguidos en un cuarto oscuro visualmente, aunque se requería un cierto entrenamiento!!!!

Era tedioso de emplear y nunca fue demasiado popular, pese a ser utilizado por Rutherford, Geiger y Marsden en sus experimentos de dispersión de partículas α , y con la aparición de los detectores gaseosos, este dispositivo cayó en desuso.

En 1944, Curran y Baker resucitaron al instrumento, reemplazando el ojo por el recientemente desarrollado tubo fotomultiplicador.



Detectores centelladores.

Un detector centellador consta de varios componentes:

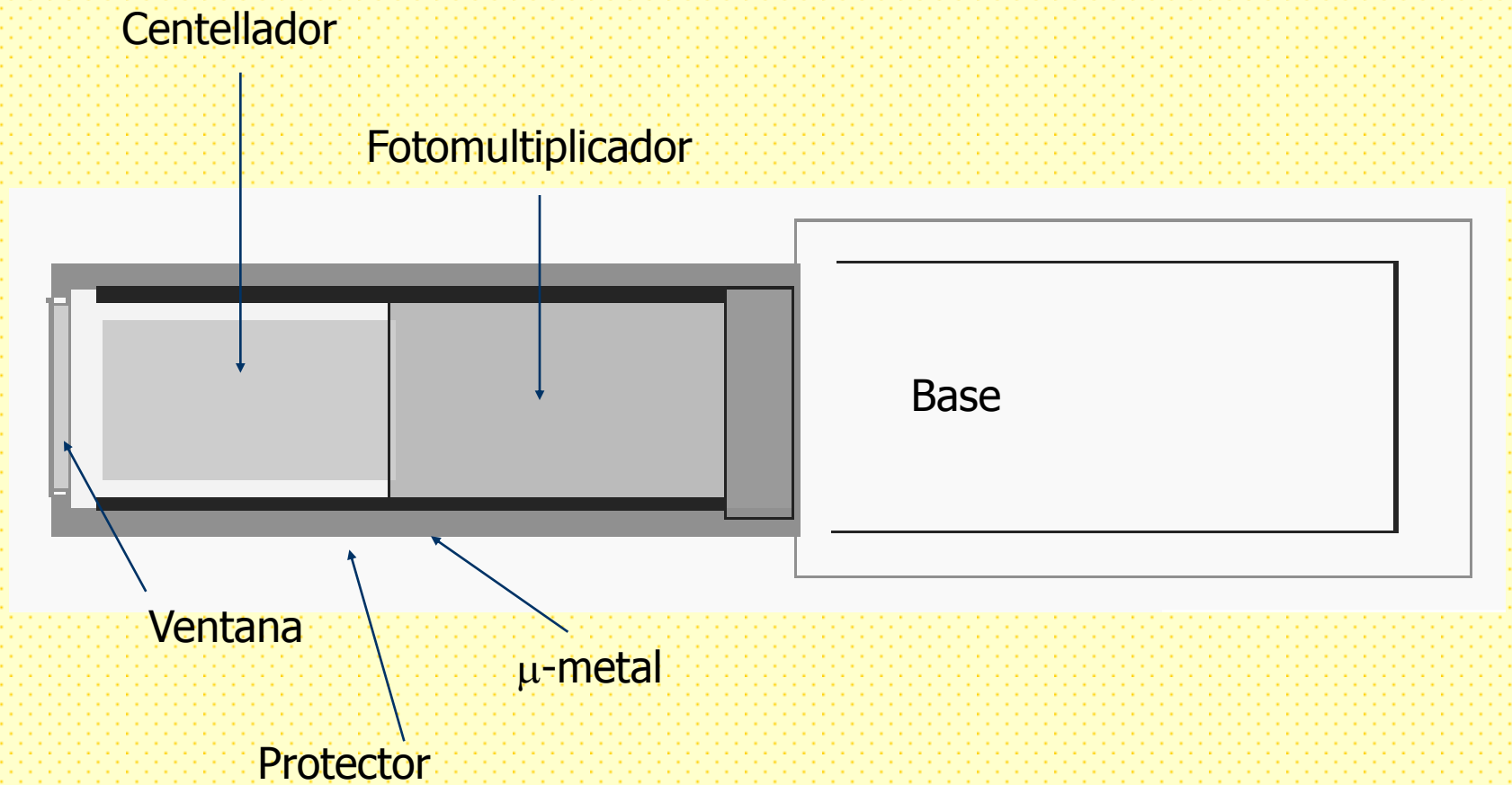
- 1- Un material centellador que transforma la radiación ionizante en fotones visibles.
- 2- Un fotodetector, que convierte la luz de centelleo en una señal eléctrica. El fotodetector más utilizado en un detector centellador es el tubo fotomultiplicador.

Conceptualmente, un fotomultiplicador cuenta con dos componentes:

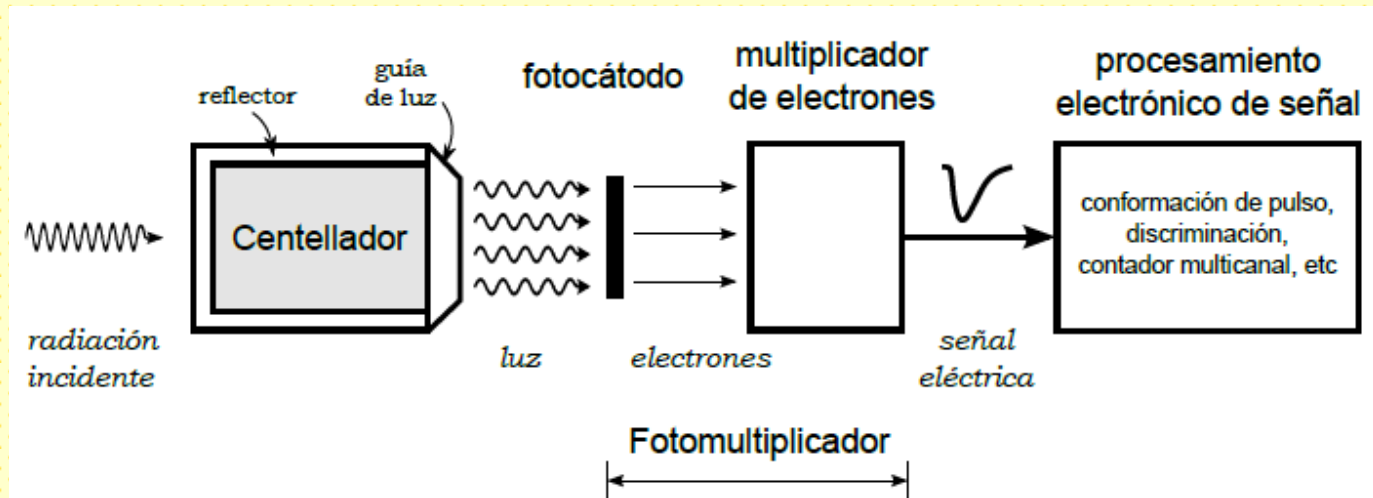
- **Fotocátodo** Material que emite electrones cuando absorbe fotones en el espectro visible. Los electrones emitidos por el fotocátodo son llamados fotoelectrones.
- **Multiplicador de electrones.** Arreglo de electrodos conectados a alta tensión que permite multiplicar el número de fotoelectrones (ganancias del orden de 10^6).

- 3- Circuito electrónico que procesa las señales eléctricas de salida del fotomultiplicador.

Detectores centelladores.



Detectores centelladores.





Detectores centelleadores.

Funcionamiento básico

Pasaje de la radiación a través del centelleador



Excitación de los átomos y moléculas



Emisión de fotones



Estos son transmitidos al fotomultiplicador, donde son convertidos en un pulso de fotoelectrones, que es amplificado por un sistema multiplicador



Detectores centelladores.

Comentario.

Una característica común a todos los centelladores es que la «cantidad de luz producida» después de la interacción de un único rayo γ , una partícula β u otra radiación ionizante, es proporcional a la energía depositada por la radiación incidente en el centellador

La cantidad de luz producida también es muy pequeño, por lo general unos cientos o unos pocos miles de fotones para un solo rayo γ en el rango de energía de interés para imágenes de medicina nuclear (70-511 keV).



Detectores centelladores.

Información que proveen:

Sensibles a la energía de la radiación incidente.

Respuesta temporal rápida. Tiempos de respuesta y recuperación bajos. Por lo tanto, presentan buena resolución temporal y aceptan altas tasas de eventos.

Algunos centelleadores son capaces de distinguir el tipo de partícula incidente ("*pulse shape discrimination*").



Detectores centelladores.

Los materiales centelladores presentan la propiedad conocida como **luminiscencia**.

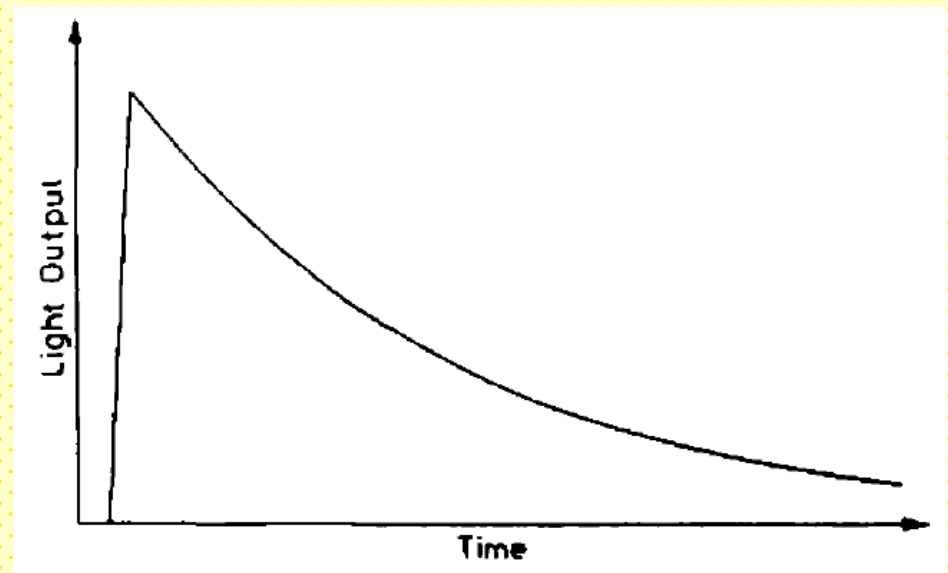
Al ser expuesto el material a una radiación (luz, calor, partículas, etc) absorben la energía y la re-emiten en forma de luz visible luego de un cierto tiempo t .

$t < 10^{-8} \text{ s}$ → Fluorescencia.

$t > 10^{-8} \text{ s}$ → Fosforescencia.

En primera aproximación, la evolución temporal del proceso de reemisión puede escribirse:

$$N = \frac{N_0}{\tau_d} e^{-t/\tau_d}$$

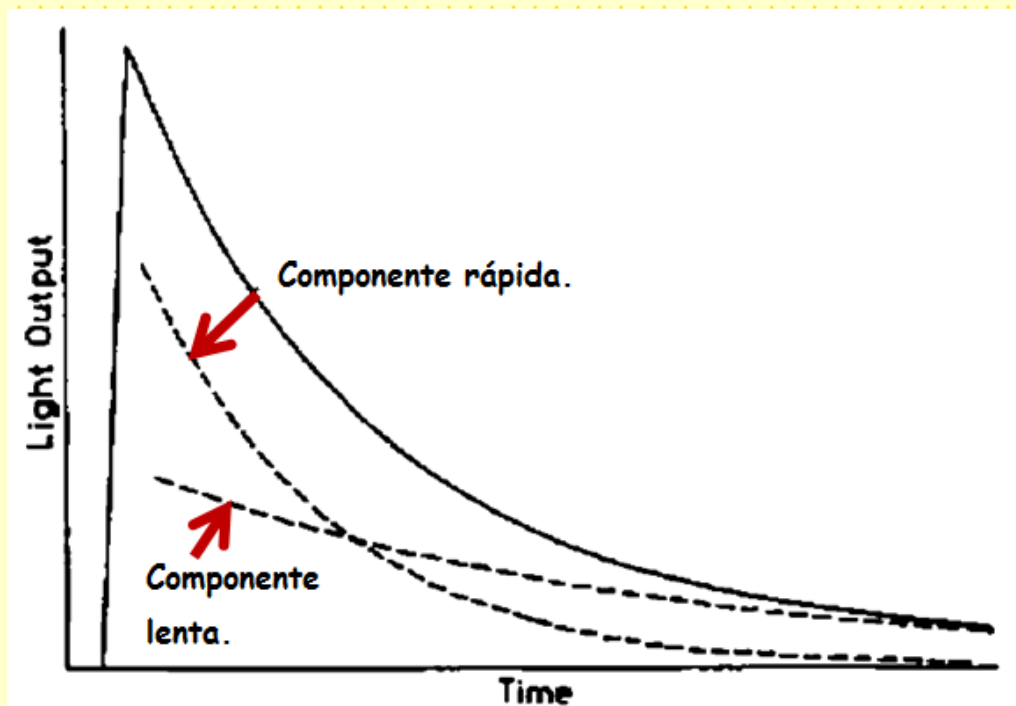


Detectores centelladores.

En muchos casos, este proceso es mejor descrito por:

$$N = A e^{-t/\tau_A} + B e^{-t/\tau_B}$$

En general, una de las componentes es mucho más rápida que la otra.





Detectores centelleadores.

Un buen material centelleador debe cumplir:

- 1- Alta eficiencia en la conversión de energía de excitación en radiación fluorescente.
- 2- Transparencia del material a esta radiación, para permitir su transmisión.
- 3- Emisión en un rango espectral consistente con el rango de respuesta del fotomultiplicador.
- 4- Corto tiempo de decaimiento.
- 5- Durabilidad.



Detectores centelladores.

Materiales centelladores:

Plásticos

Cristales orgánicos

Líquidos

Cristales inorgánicos

Discutiremos cada tipo de centellador por separado.



Detectores centelladores.

Centelladores orgánicos.

Material centellador (se lo suele llamar en forma coloquial «flúor», no por el elemento si no por ser es el responsable de la fluorescencia) disuelto en un solvente base.

- Soluciones líquidas (centelladores líquidos).
- Matrices poliméricas (centelladores plásticos).

Los compuestos centelladores son hidrocarburos aromáticos: compuestos que contienen átomos de C ligados entre sí en forma de anillo.

Entre los más extensamente utilizados se pueden mencionar:

PTP ($C_{18}H_{14}$),
B-PBD ($C_{24}H_{22}N_2O$)
PPO ($C_{15}H_{11}NO$)
POPOP ($C_{24}H_{16}N_2O_2$)

Compuestos de nombre químico impronunciable (por ejemplo, 1,4-di-[2-(5-phenyloxazolyl)]-benzene).

Materiales ricos en C y H, cuyo número atómico promedio está entre 3,5 y 5.



Detectores centelladores.

Centelladores orgánicos.

Los materiales centelladores se conforman como mezcla de dos de estos compuestos, en donde uno de ellos es el centellador primario y el otro el denominado wavelength shifter.

El primero, del orden de 20 veces más concentrado que el segundo, emisión en el rango UV (300-370 nm).

El segundo, absorbe los fotones UV y los reemite en longitudes de onda más largas.

Función:

- 1- «Ajusta» la longitud de onda de los fotones con la respuesta espectral del fotocátodo.
- 2- Disminuir la absorción de estos fotones por el mismo centellador.

Rango de emisión espectral: en el orden de 400 nm.



Detectores centelladores.

Centelladores orgánicos.

Mecanismo de centelleo: transiciones realizadas por electrones de valencia.

Compuestos aromáticos: orbitales moleculares π , en los cuales los electrones no se encuentran asociados a un átomo en particular, sino que están delocalizados en la molécula.

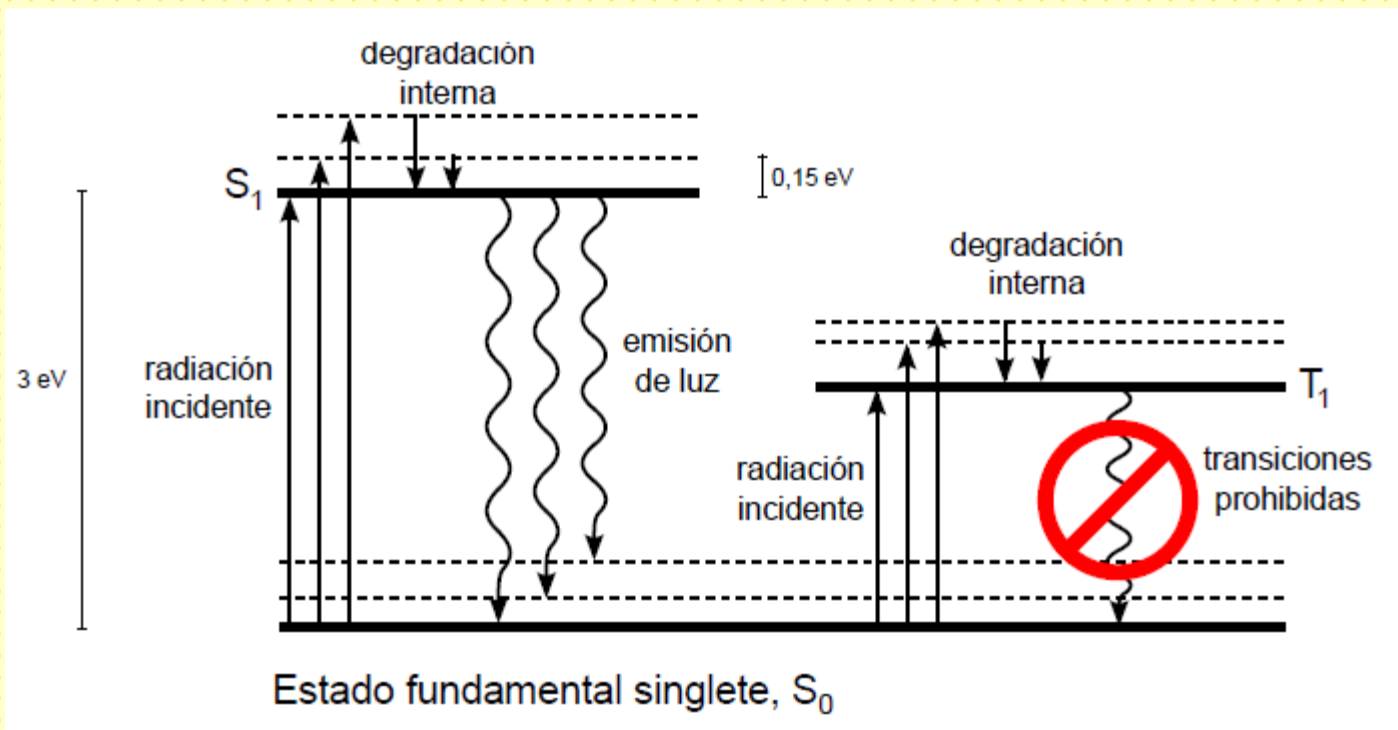
Generan los enlaces químicos entre los átomos de C que forman el anillo característico de estos compuestos.

La luz de centelleo se genera por transiciones entre niveles energéticos de electrones de valencia.

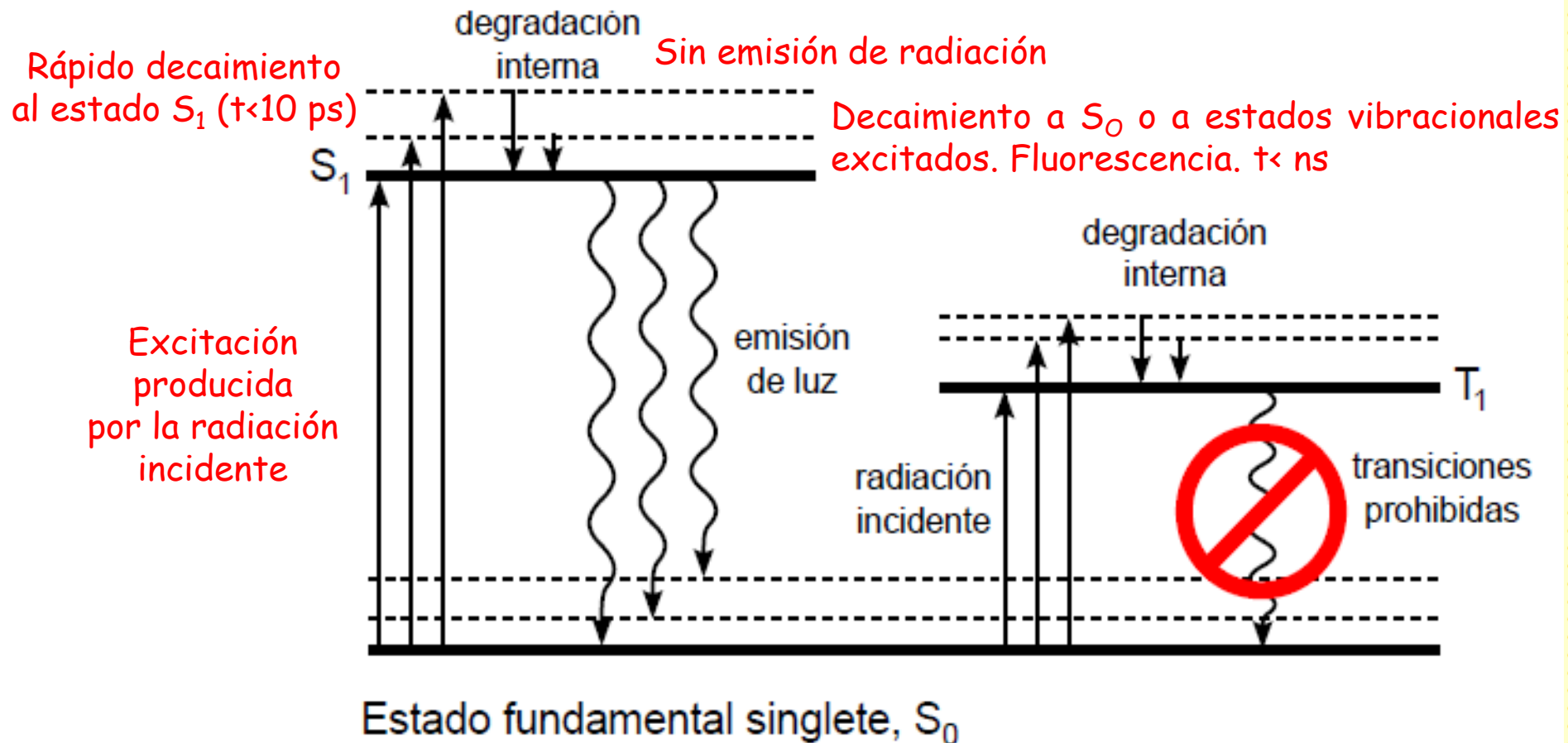
Detectores centelladores.

Centelladores orgánicos.

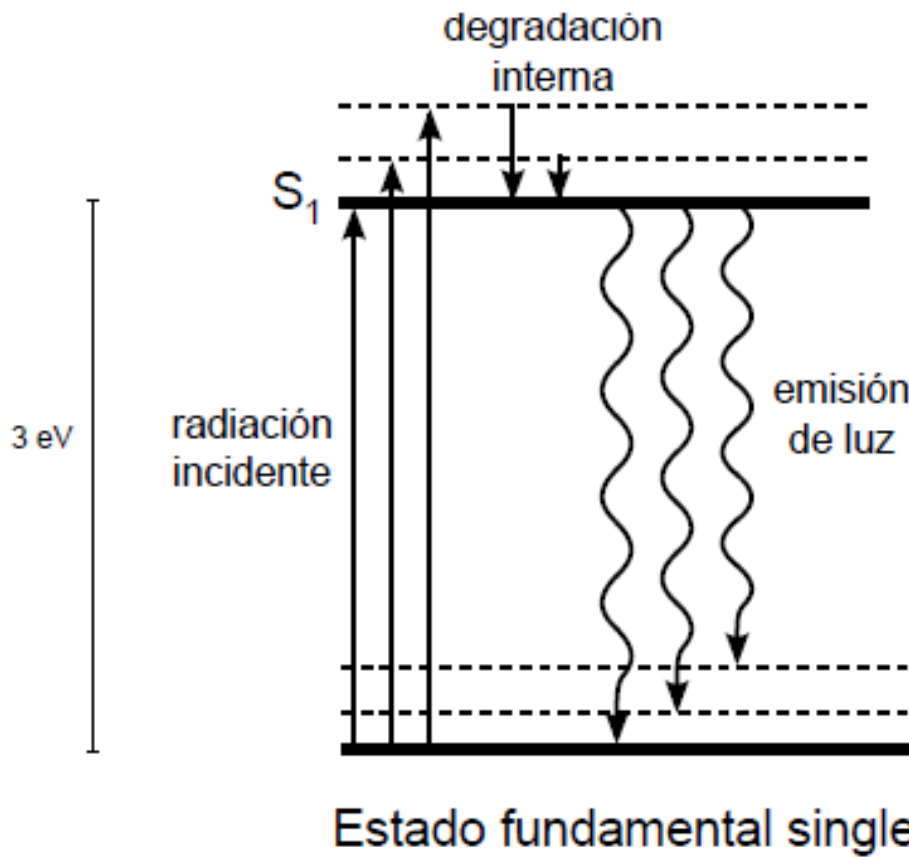
Asociado a cada nivel electrónico hay una estructura de subniveles energéticos de modos vibracionales excitados. La diferencia de energía entre niveles electrónicos: del orden de 3 eV. Diferencias de energía entre los subniveles vibracionales: del orden de 0,15 eV.



Detectores centelladores.



Detectores centelladores.



El hecho que los electrones decaigan desde S_1 a estados vibracionales de S_0 (transición de menor energía que la requerida para el salto $S_0 \rightarrow S_1$) **explica la transparencia de los centelladores a su propia radiación.**

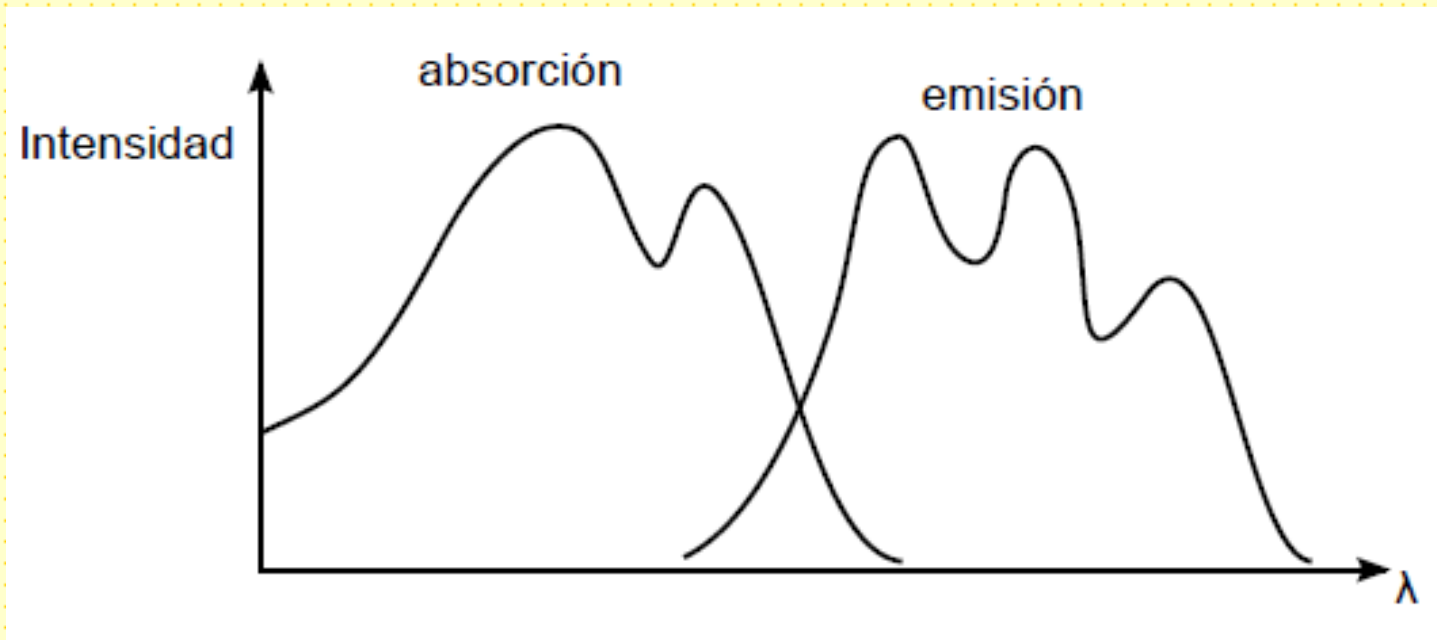
(A temperatura ambiente prácticamente todos los electrones ocupan el estado fundamental S_0 y no sus subniveles vibracionales. A temperatura ambiente $kT = 0,025 \text{ eV}$).



Detectores centelladores.

Centelladores orgánicos.

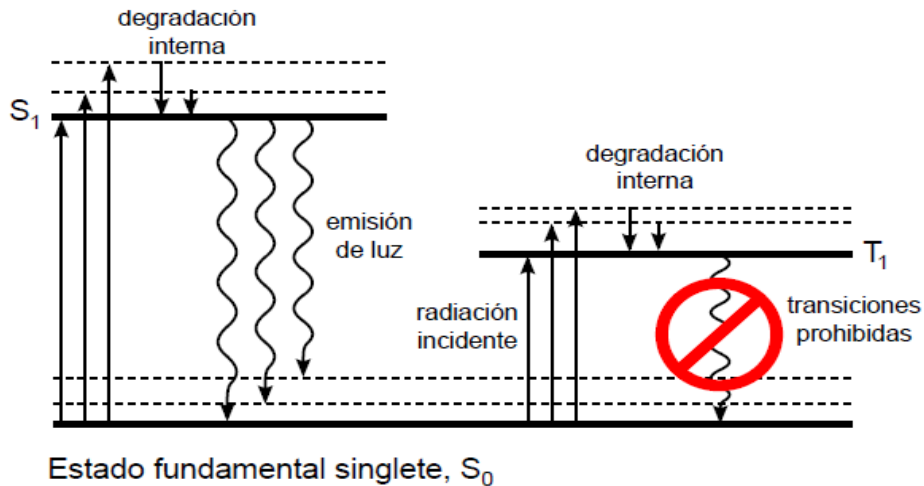
Diagrama esquemático el corrimiento al rojo (mayores longitudes de onda, menores frecuencias, menores energías menores) del espectro de emisión de un centellador inorgánico respecto al de absorción (Stokes shift).



Detectores centelladores.

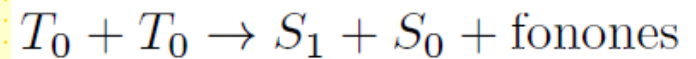
Centelladores orgánicos.

Estado triplete: también ocurre un proceso de degradación interna. Lleva los electrones que pueblan los subniveles vibracionales al estado T_1



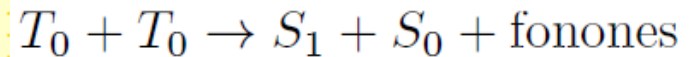
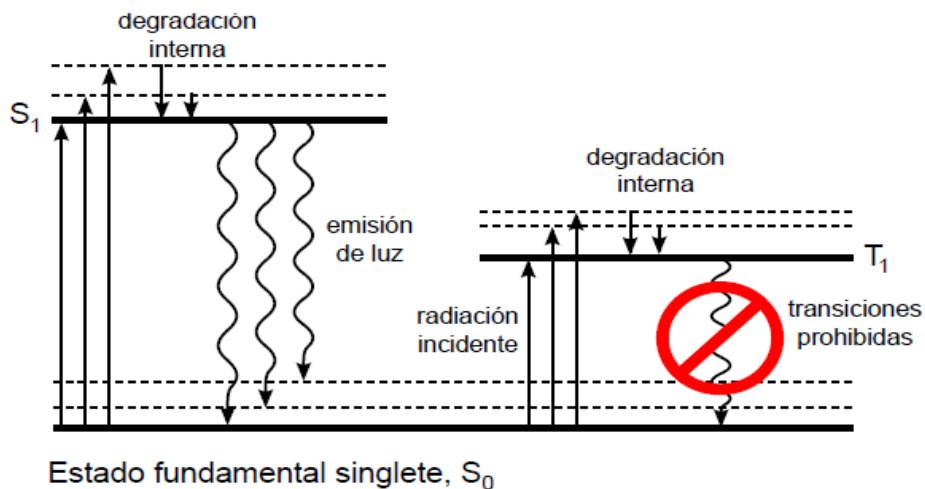
Las transiciones $T_0 \rightarrow S_0$ están prohibidas por reglas de selección.

Los electrones en T_0 decaen al interactuar con electrones de otra moléculas excitados en el estado T_0 .



Detectores centelladores.

Centelladores orgánicos.



proceso que deja la molécula en el estado S_1 . Luego decae a S_0 por el proceso antes descrito.

Esta radiación se emite con un cierto retardo característico de la interacción entre moléculas excitadas: componente lenta del centellador (fosforescencia).

La contribución de esta componente a la luz total no es significativa, salvo para ciertos materiales orgánicos.



Detectores centelladores.

Centelladores orgánicos.

Característica importante: procesos muy rápidos, con tiempos de decaimiento en el orden de unos pocos nanosegundos o menos.

Muy buena respuesta temporal. Ideales para aplicaciones temporales.

En general, mala resolución en energía.

Debido a la naturaleza molecular de la luminiscencia de estos materiales, los centelladores orgánicos pueden ser utilizados en numerosas formas sin perder sus propiedades.

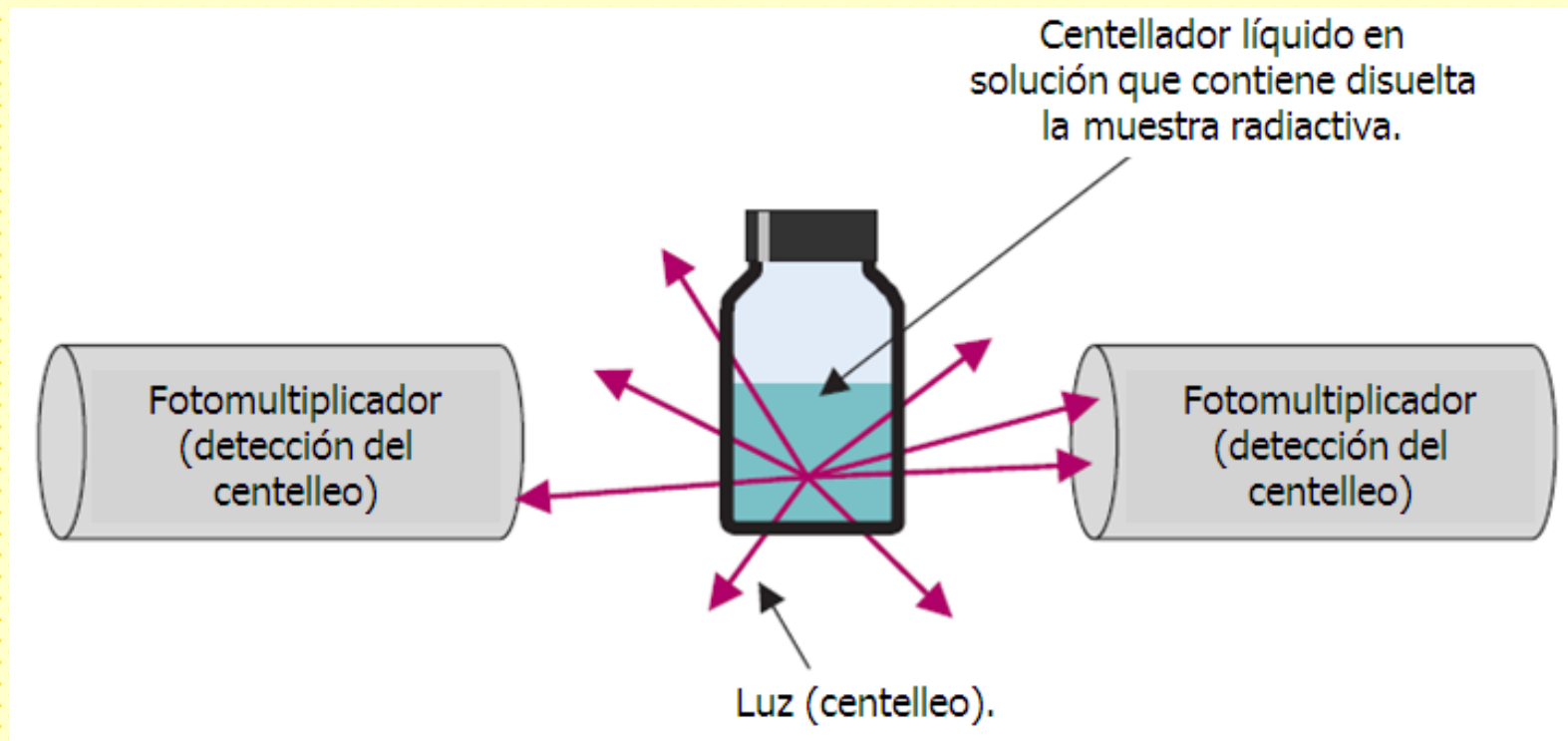
Ineficientes para radiación penetrante (rayos γ y de energía media o alta).

Baja salida lumínica (menor que los centelladores inorgánicos, aunque es más eficiente el acople con el fotomultiplicador. Lo que en parte compensa este problema),

Detectores centelladores.

Centelladores orgánicos líquidos.

Soluciones del material centellador en un solvente líquido



Detectores centelladores.

Centelladores orgánicos líquidos.

Los solventes más comúnmente utilizados son:

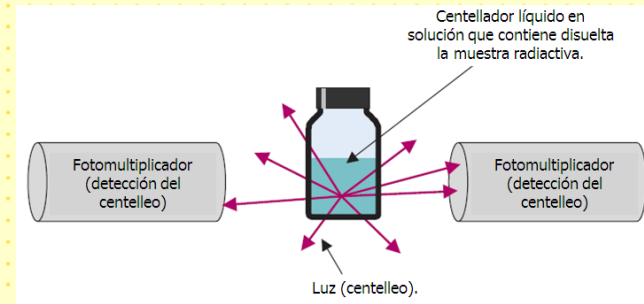
xileno
Tolueno
Benceno
Fenilciclohexano
Trietilbenceno
Decalina.

Concentración del material centellador primario:
entre 2 y 4 g por litro de solvente.

Tiempo de respuesta de los centelladores líquidos muy corto.

Bajo costo respecto a otros centelladores.

Son frecuentemente utilizados en aplicaciones que requieren grandes volúmenes o pueden usados y descartados.

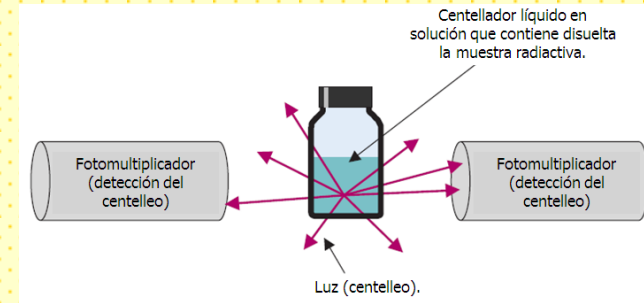


Detectores centelladores.

Centelladores orgánicos líquidos.

Resumiendo, la solución contiene cuatro componentes:

- 1- **Solvente:** Mayor parte de la solución.
Disuelve el centellador y la muestra radiactiva.
Responsable de la mayor parte de la absorción de la radiación emitida por la muestra.
- 2- **Soluto primario (fluor).**
Centellador propiamente dicho. Absorbe la radiación y emite la luz de centelleo.
- 3- **Soluto secundario («wave shifter»).**
Acopla la luz del centellador con la del fotomultiplicador.
- 4- **Aditivos.**
Para mejorar alguna característica del centellador líquido en conjunto.





Detectores centelladores.

Centelladores orgánicos líquidos.

El "cóctel" preciso de solvente, soluto primario, soluto secundario y aditivos depende del tipo de muestra que se está midiendo

Existe una amplia variedad de diferentes cócteles optimizados para diferentes aplicaciones disponibles comercialmente.

Debido a la relación íntima entre la muestra y el detector, es el sistema más adecuado para la detección eficiente de partículas β , rayos x y rayos γ de baja energía.

Ampliamente utilizado para la medición de ^3H y ^{14}C .

En aplicaciones médicas, se usa principalmente para ensayo sensible de radioactividad en muestras biológicos como sangre y orina.

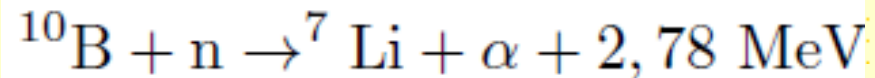


Detectores centelladores.

Centelladores orgánicos líquidos.

Ejemplos de aplicación.

Detección de neutrones: se diluye el centellador con algún material absorbente de neutrones, por ejemplo, ^{10}B .



El Li y la partícula α se reparten la energía liberada como energía cinética y son ahora estos quienes, al frenarse, ionizan y excitan al centellador para producir fotones.



Detectores centelladores.

Centelladores orgánicos líquidos.

Medición de actividad de emisores beta de baja energía.

^{14}C (datación de restos arqueológicos. Medicina Nuclear).

^3H (medición en las centrales nucleares de agua pesada, como las centrales nucleares Atucha I y II y Embalse, de Argentina).

Recordar: el agua pesada de un reactor ($^2\text{H}_2\text{O}$) es inactiva. Conforme el núcleo de un reactor opera, el ^2H presente en el agua pesada se transforma en ^3H por la captura de un neutrón.

^{14}C y ^3H : emisores β de energías máximas 150 keV y 18 keV. Bajo un bajo poder de penetración de los electrones emitidos.

En el caso de centelladores líquidos, estos radionucleídos se diluyen en el centellador y el solvente.

La emisión de los electrones se da desde el seno del fluido, los electrones cedan toda su energía al material sensible, maximizando la generación y detección de fotones lumínicos.



Detectores centelladores.

Centelladores orgánicos cristalinos.

Antraceno ($C_{14}H_{10}$)

Trans-estilbena ($C_{14}H_{12}$)

Naftaleno ($C_{10}H_8$)

Resoluciones temporales del orden de 1 ns o menos.

Resistentes y durables

Antraceno es el que presenta la mayor salida lumínica de los centelladores orgánicos.

La respuesta lumínica es anisotrópica.



Detectores centelladores.

Centelladores orgánicos plásticos.

Quizás los de un uso más extendido.

Matriz polimérica (un plástico base) con un material centellador disuelto.

Plásticos base más utilizados:

- Poliestireno
- Polimetilmetacrilato (acrílico)
- Poliviniltolueno.

Concentración del orden de 1% en peso (aproximadamente 10 g/l) del centellador primario (PPO, por ejemplo) y de 0,05% en peso del wavelenght shifter (POPOP, por ejemplo).

Luego de su disolución en el solvente base y posterior polimerización, ambas especies químicas quedan uniformemente distribuidas en la matriz polimérica.



Detectores centelladores.

Centelladores orgánicos plásticos.

Son sencillos de fabricar y se los puede maquinar en la forma deseada. Comercialmente se pueden conseguir en diversas geometrías: barras de diversas secciones, cilindros, prismas, láminas finas y de gran tamaño a un costo relativamente bajo.

Corto tiempo de decaimiento. Alta resolución temporal. Por esta razón, se los utiliza para aplicaciones temporales.

Son delicados, ya que son atacados por solventes orgánicos y ácidos.



Detectores centelladores.

Centelladores inorgánicos.

Los centelladores inorgánicos son principalmente cristales de haluros alcalinos que contienen una impureza activadora en muy baja concentración (ya veremos su función). cristales crecidos en hornos de alta temperatura.

Haluros alcalinos: compuestos binarios de un metal del grupo 1 con un halógeno (iodo, fluor).

El material más ampliamente utilizado es el **NaI(Tl)**. Tl (talio) es la impureza activadora.

Otros cristales comúnmente empleados son: CsI(Tl)

CsI(Na)

KI(Tl)

LiI(Eu)

CsF₂.

BGO (Bi₄Ge₃O₁₂) (no alcalino)

BaF₂ (no alcalino)

Detectores centelladores.

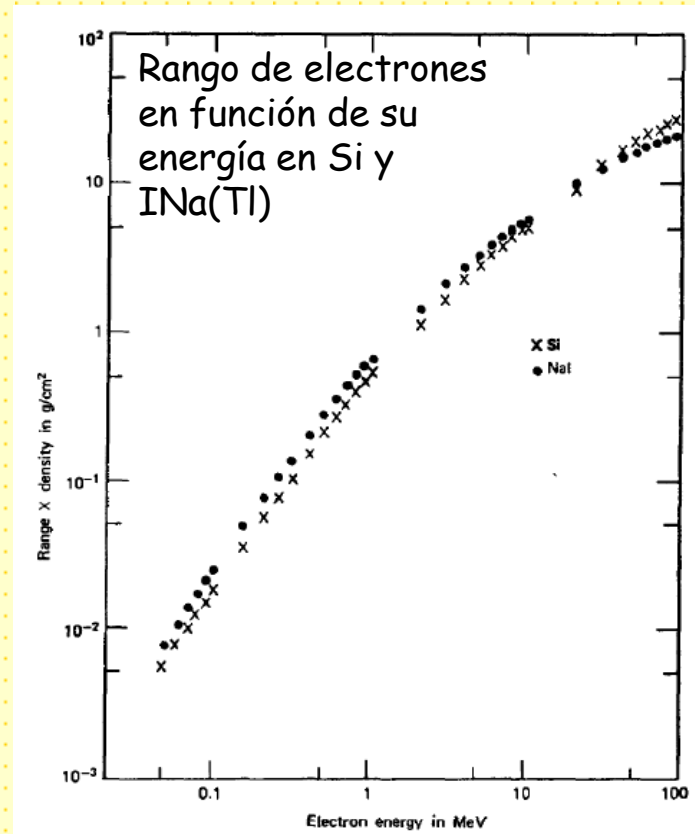
Centelladores inorgánicos.

Alta densidad y un alto número atómico, por lo cual presentan un buen poder de frenado de la radiación. Alta eficiencia para γ .

Alta salida lumínica. Alta cantidad de fotones por unidad de energía absorbida, lo cual se traduce en una mejor resolución en energía. Esto los hace adecuados para detección de rayos γ .

Tiempo de decaimiento del orden de los 300 ns. 2-3 órdenes de magnitud por encima de los orgánicos. Son más lentos que los centelleadores plásticos (con excepción del CsF, que tiene una resolución temporal del orden de 3 ns).

Higroscópicos!!!!: NaI(Tl), el centellador inorgánico más utilizado, es un ejemplo paradigmático. Para utilizar el cristal se lo debe recubrir con una envoltura aislante y estanca para evitar que el mismo absorba humedad ambiente.





Detectores centelladores.

Centelladores inorgánicos.

NaI(Tl), ha sido el material estándar. Dos nuevos materiales han atraído gran atención en los últimos años.

BaF₂: El descubrimiento de una componente rápida en el centelleo **del BaF₂ proveyó** de un nuevo material para empleo en aplicaciones temporales.

80% de la luz se origina en una componente con un decaimiento temporal lento, mientras que el otro 20% decae rápidamente, con una **vida media de 600 ps**. Esta propiedad otorga al BaF₂ una respuesta temporal comparable a la de los más rápidos centelladores orgánicos.

Los cristales de BaF₂ son fácilmente obtenibles y proveen una resolución en energías del orden del 10% para rayos γ de 662 keV. Además, la alta densidad del BaF₂ y el alto número atómico del Ba dan a este material centellador una muy buena eficiencia para el fótópico.



Detectores centelladores.

Centelladores inorgánicos.



Presenta un alto Z , por lo cual es altamente eficiente para interacción fotoeléctrica. Es 3-5 veces más eficiente que el NaI y no es higroscópico.

Desventaja: su salida lumínica es menor que el NaI, lo que resulta en una menor resolución en energía.



Detectores centelladores.

Centelladores inorgánicos.

Propiedades de algunos materiales centelladores inorgánicos empleados en Medicina Nuclear.

Property	NaI(Tl)	BGO	LSO(Ce)	GSO(Ce)	CsI(Tl)	LuAP(Ce)	LaBr ₃ (Ce)	Plastic*
Density (g/cm ³)	3.67	7.13	7.40	6.71	4.51	8.34	5.3	1.03
Effective atomic number	50	73	66	59	54	65	46	12
Decay time (nsec)	230	300	40	60	1000	18	35	2
Photon yield (per keV)	38	8	20-30	12-15	52	12	61	10
Index of refraction	1.85	2.15	1.82	1.85	1.80	1.97	1.9	1.58
Hygroscopic	Yes	No	No	No	Slightly	No	Yes	No
Peak emission (nm)	415	480	420	430	540	365	358	Various

Los valores para los detectores plásticos son valores típicos.



Detectores centelladores.

Centelladores inorgánicos.

Mecanismo de centelleo

Mientras que en un material centellador orgánico el mecanismo de producción de luz es de naturaleza molecular, en uno inorgánico es característico de su **estructura electrónica de bandas, propia de una red cristalina.**

Hagamos un alto entonces para entender la estructura de bandas de un sólido-



Entretiempo: bandas en un sólido.

La estructura electrónica de bandas describe aquellos rangos de energía que un electrón puede tener (bandas permitidas) y aquellos rangos de energía a los que un electrón no puede acceder (bandas prohibidas, o "band gaps").

Banda de valencia: rango de energías más alto que se encuentra completamente ocupado por electrones a 0 K. cero absoluto.

Los electrones que pueblan esta banda (y las de inferior energía se encuentran asociados a un sitio de la red.

Los electrones que ocupan la **banda de conducción**, rango por encima de la banda de valencia, se encuentran delocalizados y pueden moverse libremente por el cristal.

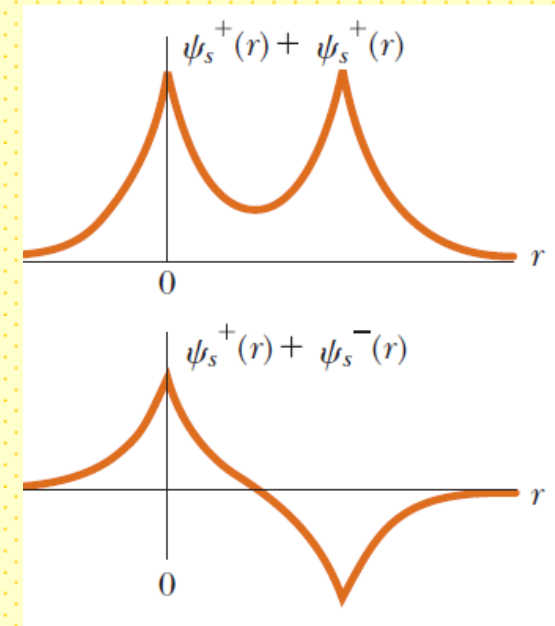
Entretiempo: bandas en un sólido.

Supongamos dos átomos idénticos (por ejemplo Na, un electrón 3s en la última capa). Al estar muy separados, no interactúan, y se puede considerar que sus niveles de energía electrónica son los de átomos aislados.

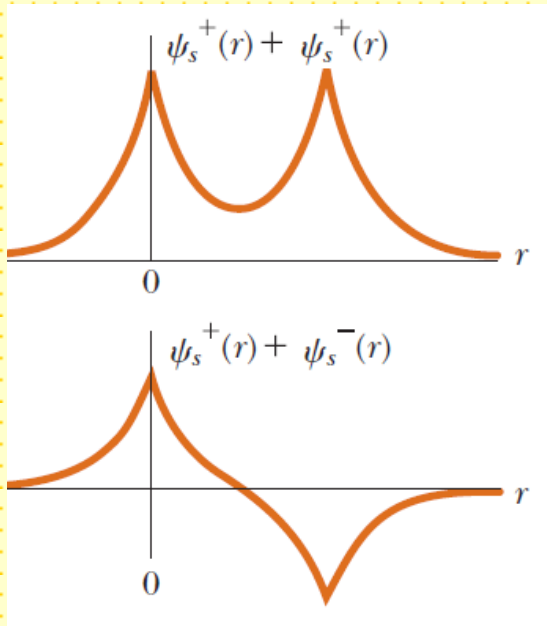
Cuando los dos átomos de sodio se acerquen entre sí comenzarán a interactuar y sus funciones de onda comenzarán a solaparse. Las propiedades del sistema combinado difieren, dependiendo de cómo se combinan las funciones de onda de cada átomo.

$$\psi_s^+(r) = +Af(r)e^{-Zr/na_0} \quad \psi_s^-(r) = -Af(r)e^{-Zr/na_0}$$

Estas dos posibles combinaciones de funciones de onda representan dos estados posibles del sistema de dos átomos.



Entretiempo: bandas en un sólido.



Estas curvas representan la amplitud de probabilidad de hallar un electrón en un cierto punto.

Curva positiva-positiva: probabilidad de hallar el electrón en el punto medio entre los átomos.

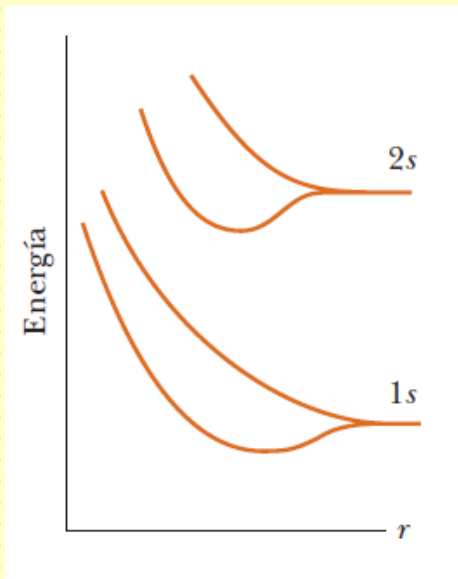
Curva positiva-negativa: no hay esta probabilidad.

Un estado con una elevada probabilidad de que haya un electrón *entre* dos núcleos positivos debe tener una energía diferente que un estado en donde el electrón tenga una alta probabilidad de encontrarse en otra parte!

Los estados son *divididos* en dos niveles de energía a causa de las dos formas de combinar las funciones de onda.

La diferencia de energía es relativamente pequeña, de modo que los dos estados están cerca uno del otro en una escala de energía.

Entretiempo: bandas en un sólido.



Para separaciones r grandes, las nubes de electrones no se superponen y se tienen los niveles electrónicos atómicos.

Cuando los átomos se acercan entre sí r disminuye, las nubes de electrones se solapan y es necesario considerar el sistema de dos átomos.

Cuando gran número de átomos se acercan entre sí para formar un sólido, las funciones de onda individuales se pueden acercar en varias combinaciones de funciones de onda, donde cada posible combinación corresponde a una energía diferente.

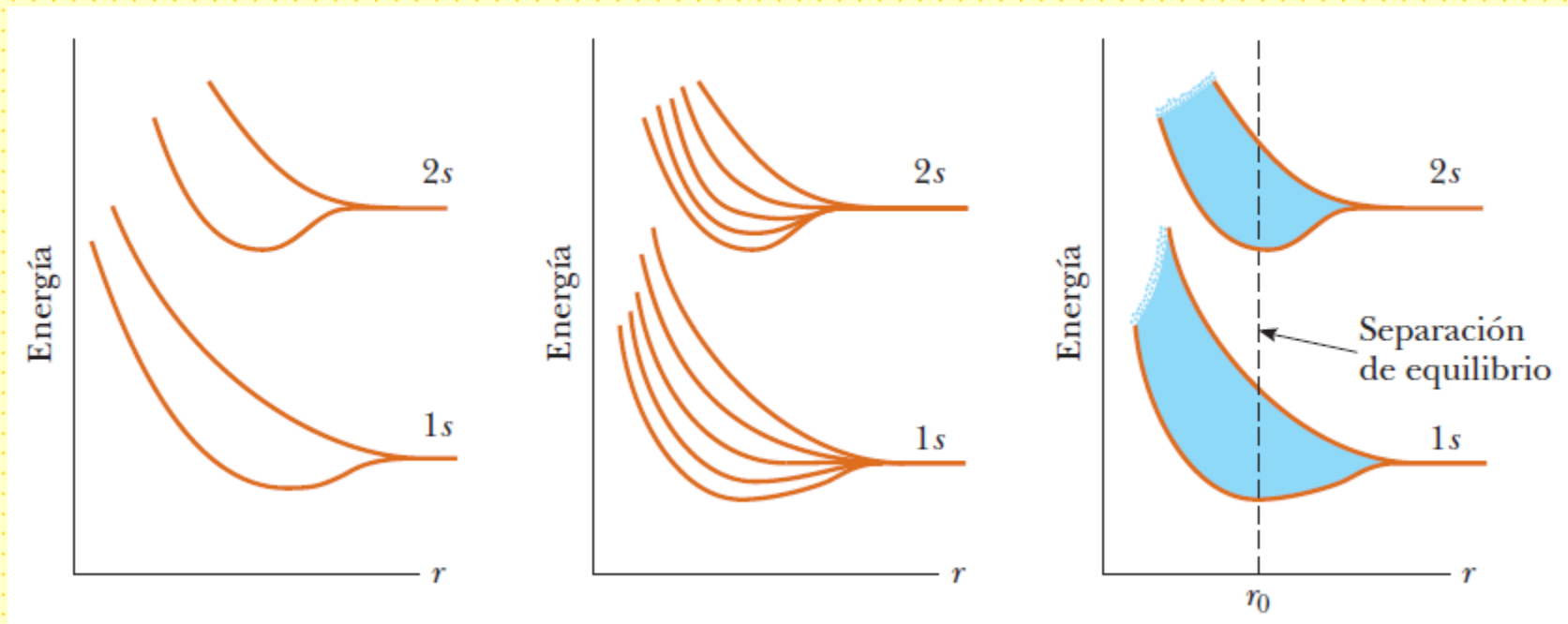
Entretiempo: bandas en un sólido.

En los sólidos hay del orden de 10^{23} átomos por cm^3 , por lo que obtiene una enorme cantidad de niveles de energía con tan poco espacio entre sí que se les puede considerar una **banda** continua de niveles de energía,

2 átomos

5 átomos

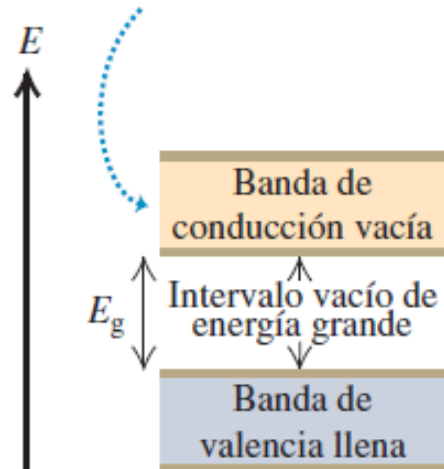
10^{23} átomos



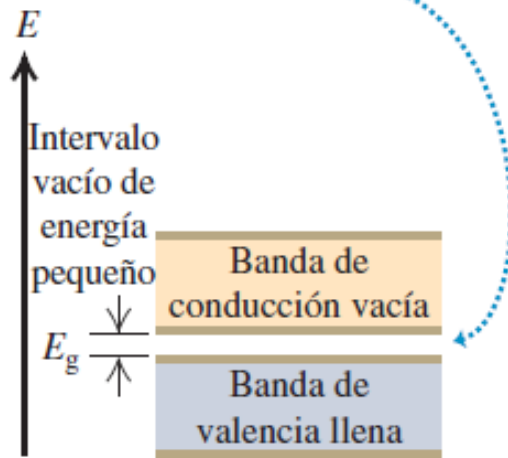
Entretiempo: bandas en un sólido.

Tres situaciones:

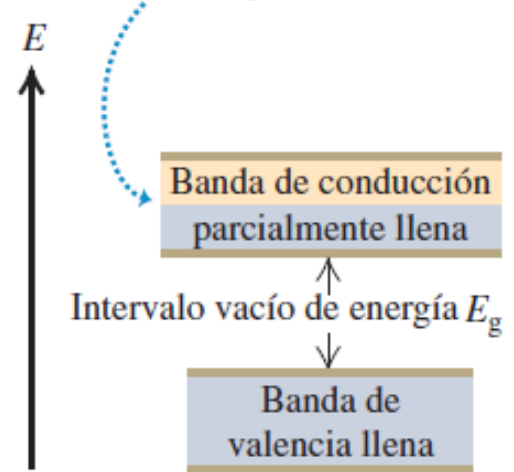
a) En un aislante en el cero absoluto, no hay electrones en la banda de conducción.



b) Un semiconductor tiene la misma estructura que la de un aislante, pero con menor intervalo de energía entre las bandas de valencia y de conducción.

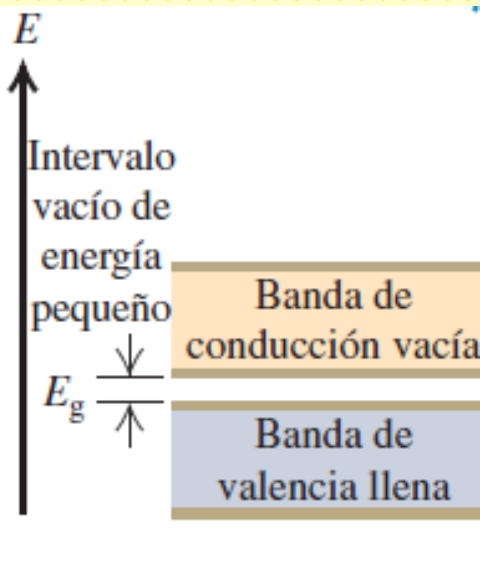


c) Un conductor tiene una banda de conducción parcialmente llena.



Materiales centelladores inorgánicos

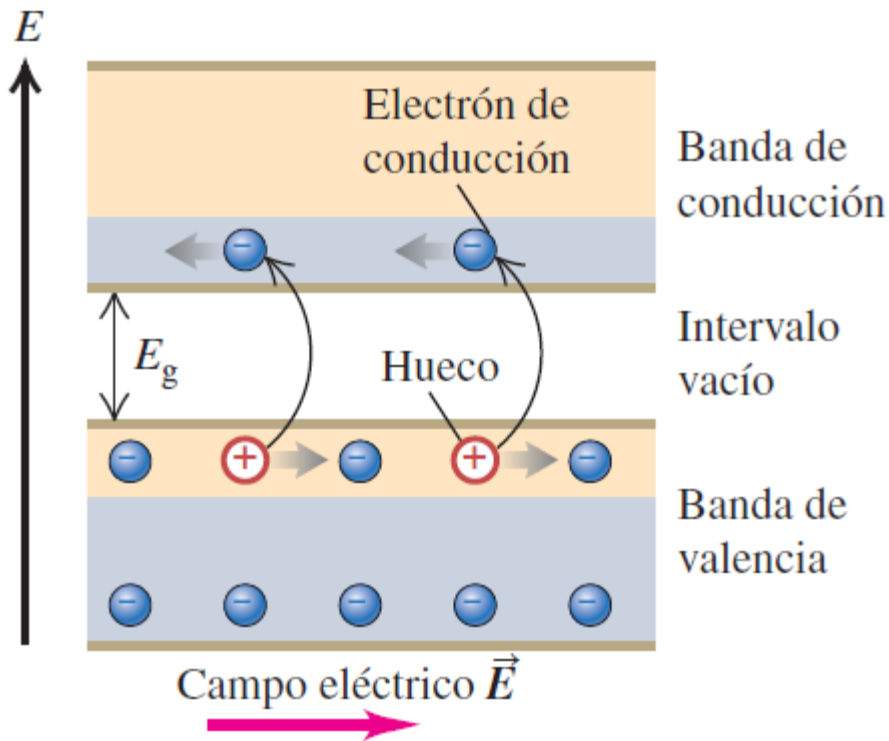
Entretiempo: bandas en un sólido.



A temperaturas muy bajas los electrones no pueden saltar desde la banda de valencia llena hasta la banda de conducción, por lo que los semiconductores son aislantes a dichas temperaturas: sus electrones no tienen estados cercanos disponibles a los que puedan pasar como respuesta a un campo eléctrico aplicado.

A altas temperaturas (incluso ambiente) una cantidad apreciable de electrones puede ganar la energía suficiente como para saltar el intervalo y llegar a la banda de conducción, donde pueden moverse por todo el cristal. La cantidad de esos electrones aumenta con rapidez al incrementarse la temperatura.

Entretiempo: bandas en un sólido.



En un semiconductor puro, o *intrínseco*, los huecos en banda de valencia, y los electrones en banda de conducción, siempre existen en cantidades iguales.

Cuando se aplica un campo eléctrico, se mueven en direcciones contrarias. Así, un hueco en la banda de valencia se comporta como una partícula con carga positiva, aun cuando las cargas en movimiento en esa banda sean electrones.

Conductividad por huecos y electrones.
conductividad intrínseca.

Entretiempo: bandas en un sólido.

¿Qué pasa si agregamos impurezas?

Supongamos *Ge* (semiconductor de $gap=0.67$ eV, en el cual reemplazamos un átomo de *Ge* (+4) por un átomo de *As* (+5). Sobra un electrón.

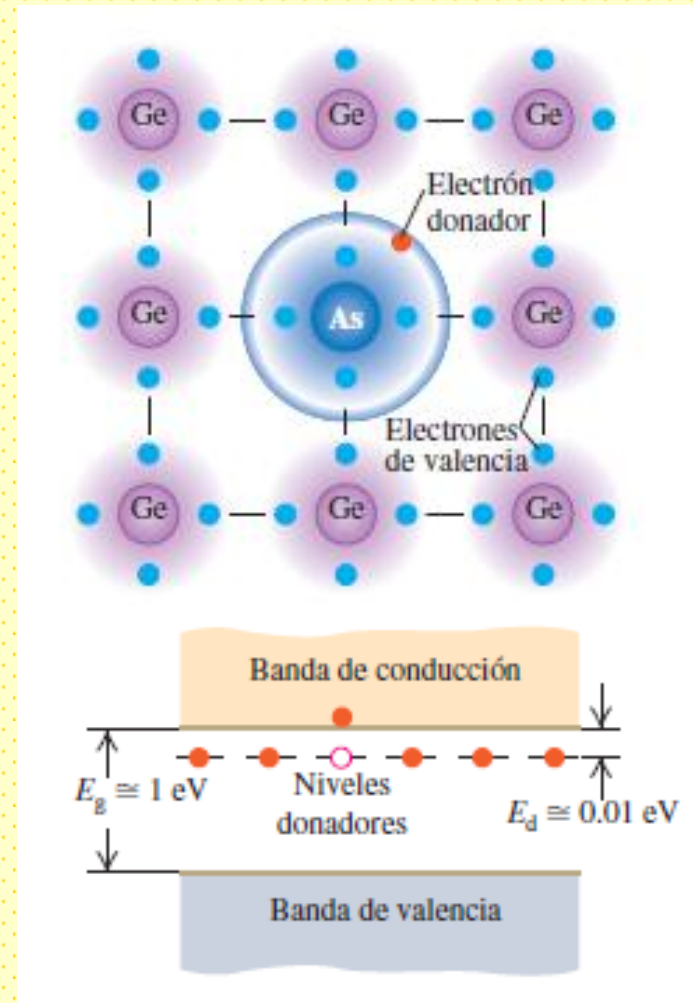
El quinto electrón de valencia está enlazado muy débilmente y no participa en los enlaces covalentes.

una concentración de donadores tan pequeña como una parte en 10^8 puede aumentar la conductividad en forma tan drástica que la conducción debida a impurezas se vuelve el mecanismo dominante.

La conductividad se debe casi totalmente a movimiento de cargas *negativas* (electrones).

A este material se le llama

semiconductor tipo *n*, con impurezas tipo *n*.



Entretiempo: bandas en un sólido.

Supongamos que ahora reemplazamos un átomo de Ge (+4) por un átomo de Ga (+3). Falta un electrón.

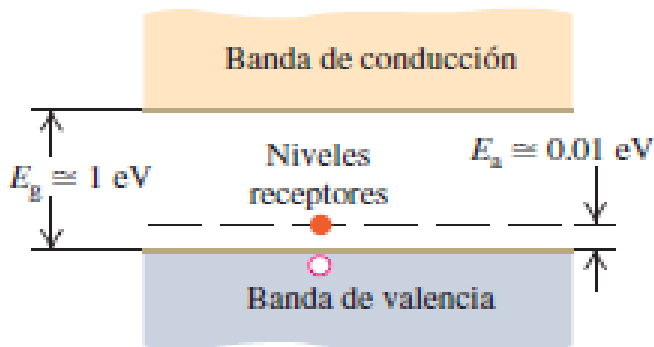
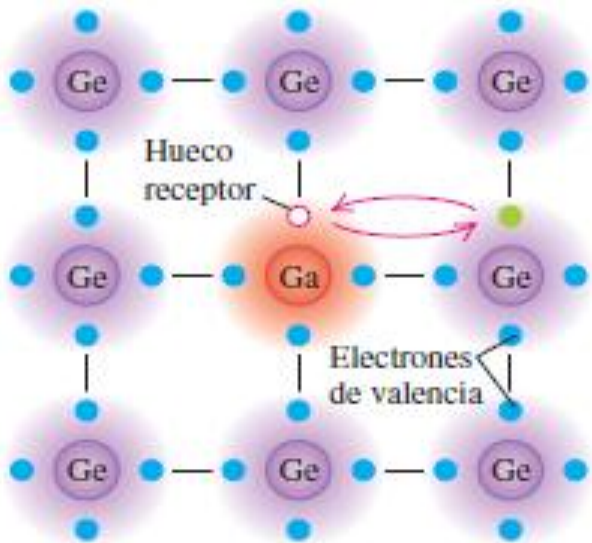
El hueco funciona como carga positiva que se puede mover a través del cristal, igual que en la conductividad intrínseca. El hueco está enlazado al átomo de Ga , en un nivel llamado nivel aceptor

En un semiconductor dopado con aceptores la conductividad se debe casi por completo al movimiento de huecos.

Al material se le llama

semiconductor tipo p, con impurezas tipo p.

Algunos semiconductores se dopan con impurezas de ambos tipos, n y p. A esos materiales se les llama semiconductores compensados.





Detectores centelladores.

Centelladores inorgánicos.

Ahora si, volvamos al centellador inorgánico.

Si un electrón de un centellador inorgánico absorbe energía y es promovido a la banda de conducción, deja un hueco en el lugar que ocupaba en la banda de valencia.

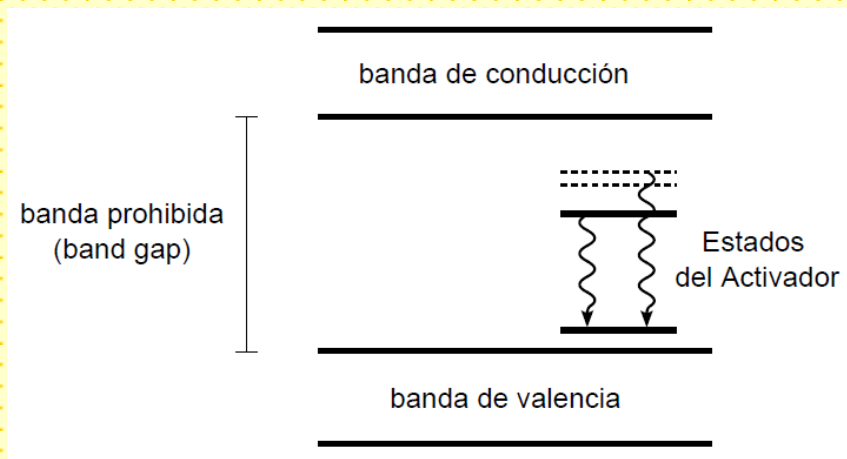
Al desexcitarse, se recombina con el hueco y recupera su lugar en la banda de valencia. En un cristal puro, la desexcitación mediante la emisión de un fotón es un proceso ineficiente

El agregado de impurezas («activadores») genera sitios especiales en la red en donde la estructura de bandas del cristal puro se modifica: estados energéticos accesibles dentro de la banda prohibida, a través de los cuales los electrones puede desexcitarse para volver a la banda de valencia.

Eligiendo adecuadamente al activador, las transiciones de electrones entre sus estados excitados y su fundamental de conllevan la emisión de fotones visibles («centros de luminiscencia»). Su estructura dentro del cristal determina el espectro de emisión del centellador.

Detectores centelladores.

Centelladores inorgánicos.



Los electrones, y los respectivos huecos creados pueden moverse libremente por el cristal, ya sea en forma independiente o apareados formando una configuración electrón-hueco (excitón).

Si el estado formado posee transiciones al fundamental permitidas, se producen con vidas medias de 50-500 ns, liberando la energía mediante un fotón visible. La migración de los electrones y huecos toma tiempos mucho menores a las vidas medias de las desexcitaciones del activador. El tiempo de respuesta del centellador está gobernado por estas últimas.

El presente modelo explica por que el cristal es transparente a la luz emitida por los centros de luminiscencia: la energía de los fotones emitidos no es suficiente para excitar electrones de la banda de valencia a la de conducción.



Detectores centelladores.

Centelladores inorgánicos.

Cuidados:

En el proceso de captura de electrones y huecos por parte de un activador, puede ocurrir que se forme una configuración metaestables.

La transición directa al fundamental está prohibida. Mediante la absorción de energía térmica, el electrón es capaz de acceder a niveles energéticos desde los cuales puede decaer mediante la emisión de un fotón visible. **Componente lenta de emisión de luz.**

Defectos de la red cristalina representan trampas para la carga liberada por la radiación ionizante.

Capturan electrones y huecos y generan recombinaciones en donde la energía liberada no se libera como fotones visibles. **Ineficiencia en la generación de luz de centelleo.**



Detectores centelladores.

Centelladores inorgánicos.

Salida lumínica.

La salida lumínica de un centelleador se refiere a la "habilidad" del detector para convertir la energía de ionización en fotones.

Es una variable fundamental, ya que determina la eficiencia y resolución del detector.

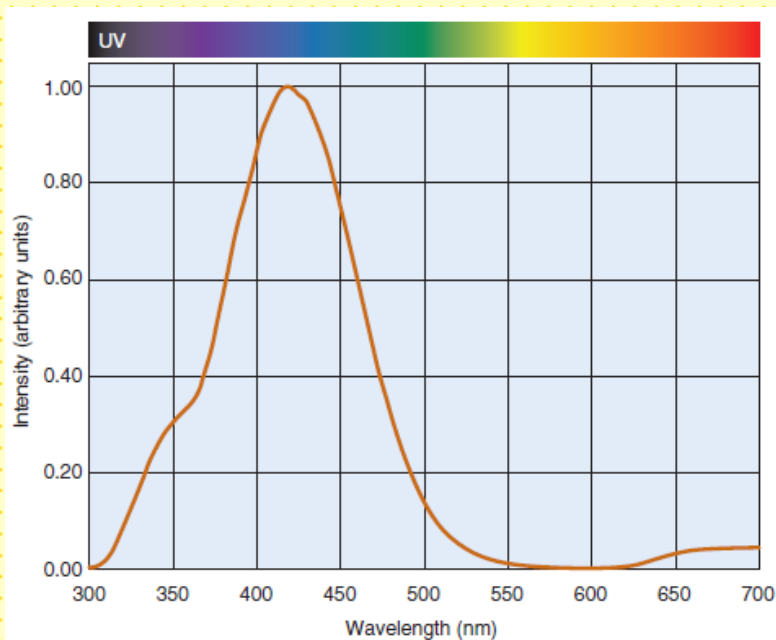
Energía promedio necesaria para crear un fotón.	
Antraceno	60
NaI	25
Plásticos	100
BGO	300

Además de la eficiencia del centelleador, se debe tener en cuenta la eficiencia del fotomultiplicador (aprox. 30%). Por lo tanto, asumiendo que todos los fotones son "colectados", sólo el 30% será detectado.

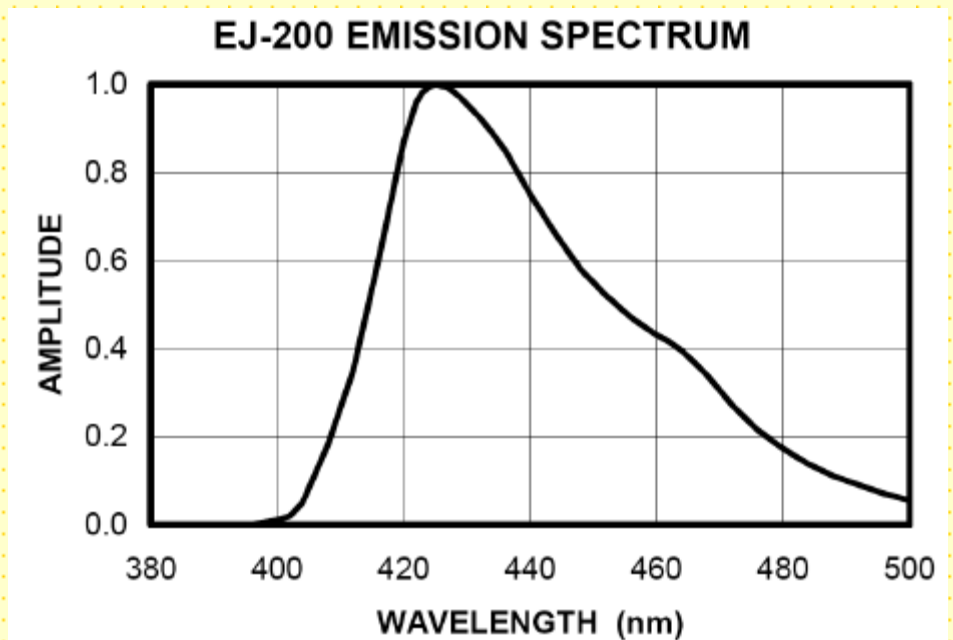
Detectores centelladores.

Centelladores inorgánicos.

Espectros de emisión de: Ina(Tl).



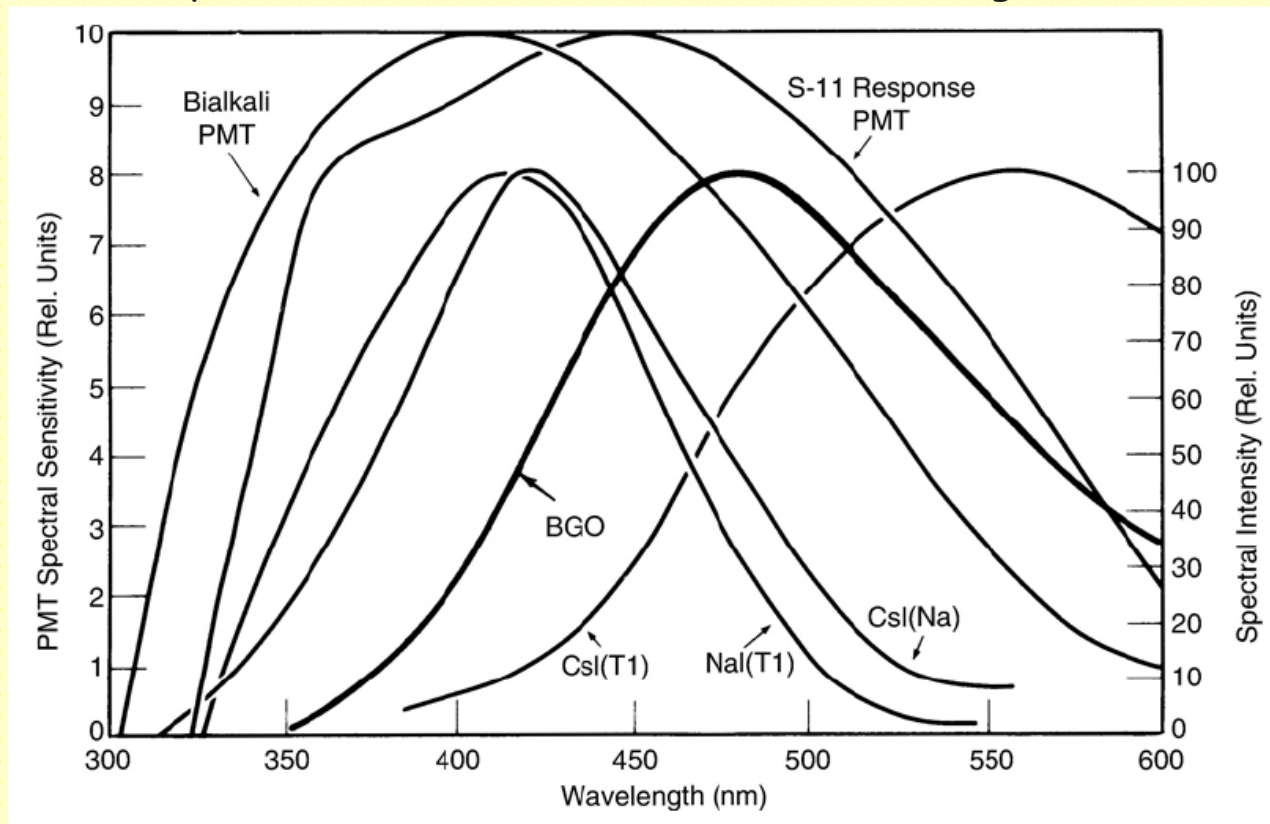
Espectros de emisión de centellador plástico.



Detectores centelladores.

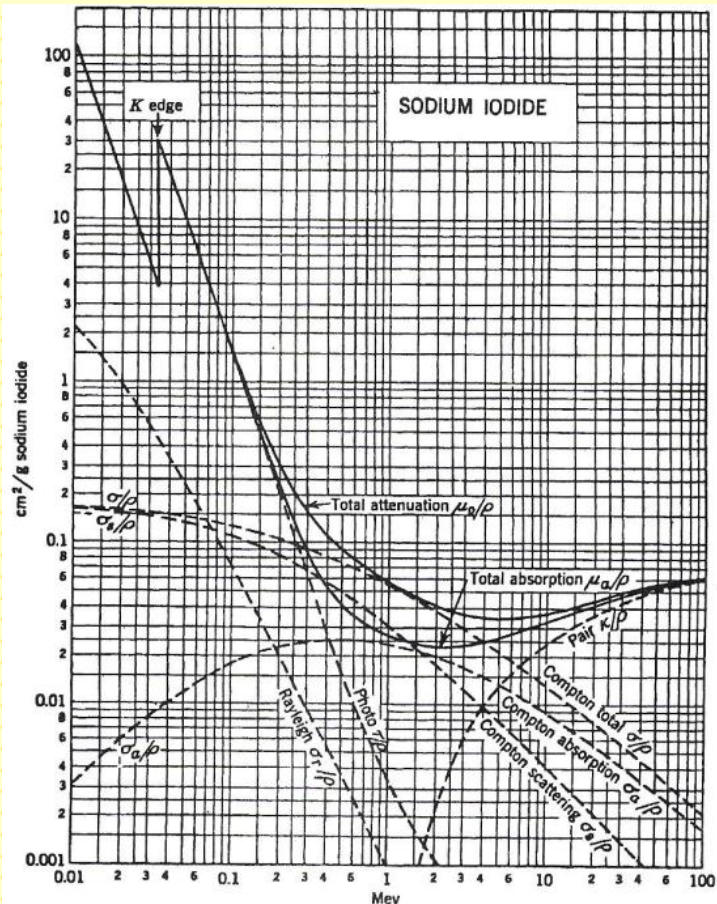
Centelladores inorgánicos.

Espectros de emisión de centelladores inorgánicos.



Detectores centelladores.

Centelladores inorgánicos.



Al elegir un material centellador hay que tener en cuenta algunas consideraciones.

La capacidad de un centellador para absorber rayos γ de alta energía (> 100 keV) es de importancia en imágenes médicas.

La sección eficaz para interacción fotoeléctrica depende básicamente del Z del material (Z^5).

La sección transversal para la interacción Compton depende linealmente con Z.

Para comparar la capacidad de diferentes materiales centelladores para detectar rayos γ de alta energía, el número atómico efectivo es útil y conveniente



Detectores centelladores.

Centelladores inorgánicos.

Número atómico efectivo: forma de estimar el número atómico que representa la atenuación de un material. Se define:

$$Z_{\text{eff}} = \sqrt[x]{w_1 Z_1^x + w_2 Z_2^x + \cdots w_n Z_n^x}$$

$$w_i = \frac{m_i Z_i}{\sum_{i=1}^n m_i Z_i}$$

m_i : número de átomos del elemento i en el compuesto.

El índice x depende de la energía del rayo γ .
Para rayos γ en el rango 100-600 keV, x entre 3 y 3.5.



Detectores centelladores.

Comparación entre centelladores

principales diferencias entre centelladores orgánicos e inorgánicos:

- Densidad
- Número atómico efectivo
- Tiempo de respuesta y de decaimiento.

Centellador	tipo	ρ [g/cm ³]	fotones/MeV	τ_{decay} [ns]	λ_{max} [nm]
NaI(Tl)	inorg	3,67	38 10 ³	230	410
CsI(Tl)	inorg	4,51	65 10 ³	1300	560
BGO	inorg	7,13	8,2 10 ³	300	480
NE104	plástico	1,03	10 10 ³	1,8	406
NE224	líquido	0.88	12 10 ³	2,5	425

Costo, propiedades mecánicas y resistencia mecánica y a la radiación son otros factores que determinan las aplicaciones de cada tipo de centellador.



Detectores centelladores.

Centellador	tipo	ρ [g/cm ³]	fotones/MeV	τ_{decay} [ns]	λ_{max} [nm]
NaI(Tl)	inorg	3,67	$38 \cdot 10^3$	230	410
CsI(Tl)	inorg	4,51	$65 \cdot 10^3$	1300	560
BGO	inorg	7,13	$8,2 \cdot 10^3$	300	480
NE104	plástico	1,03	$10 \cdot 10^3$	1,8	406
NE224	líquido	0.88	$12 \cdot 10^3$	2,5	425

Los centelladores orgánicos tienen un Z promedio en el orden de 4 y una densidad del orden de 1 g/cm³.

Los inorgánicos presentan Z efectivos grandes y densidades mayores.

Dado que los mecanismos de interacción de fotones con la materia dependen fuertemente de Z (fotoeléctrico con Z⁵, Compton con Z y creación de pares con Z²) y la densidad, los centelladores inorgánicos resultan adecuados para la detección y espectrometría de fotones. (Los centelladores plásticos pueden ser utilizados, pero la sensibilidad a los fotones será menor).



Detectores centelladores.

Centellador	tipo	ρ [g/cm ³]	fotones/MeV	τ_{decay} [ns]	λ_{max} [nm]
NaI(Tl)	inorg	3,67	$38 \cdot 10^3$	230	410
CsI(Tl)	inorg	4,51	$65 \cdot 10^3$	1300	560
BGO	inorg	7,13	$8,2 \cdot 10^3$	300	480
NE104	plástico	1,03	$10 \cdot 10^3$	1,8	406
NE224	líquido	0.88	$12 \cdot 10^3$	2,5	425

La emisividad de fotones por unidad de energía absorbida de centelladores inorgánicos y orgánicos son del mismo orden de magnitud.:

A la hora de escoger el centellador, otros factores son los preponderantes.



Detectores centelladores.

Centellador	tipo	ρ [g/cm ³]	fotones/MeV	τ_{decay} [ns]	λ_{max} [nm]
NaI(Tl)	inorg	3,67	38 10^3	230	410
CsI(Tl)	inorg	4,51	65 10^3	1300	560
BGO	inorg	7,13	8,2 10^3	300	480
NE104	plástico	1,03	10 10^3	1,8	406
NE224	líquido	0.88	12 10^3	2,5	425

Los centelladores orgánicos presentan tiempos de respuesta y de decaimiento órdenes de magnitud por debajo de los inorgánicos (con escasas excepciones).

Respuesta rápida: información temporal precisa (por ejemplo. diferencia temporal entre dos eventos con gran precisión).

El tiempo de decaimiento esta relacionado con el tiempo muerto del sistema detector. Limita la tasa de contaje máxima del sistema.

Los centelladores orgánicos resultan adecuados en aplicaciones que requieren información temporal.



Detectores centelladores.

Propiedades mecánicas: Los detectores plásticos pueden ser maquinados más fácilmente que los cristales inorgánicos.

Los inorgánicos son frágiles y pesados, lo cual limita su mecanizado y manipulación.

Algunos centelladores inorgánicos como el NaI(Tl) , son higroscópicos, lo cual obliga a mantenerlos en una envuelta para aislarlos de la humedad ambiente.

Nada de eso ocurre con los plásticos: se los puede inyectar en moldes, extruir, laminar, torneear y cortar sin dificultades.



Detectores centelladores.

La radiación ionizante produce daños en la materia que atraviesa.

Cristales inorgánicos: induce dislocaciones y sitios intersticiales en la red, crea tensiones mecánicas y provoca migración de impurezas.

Plásticos: degrada las cadenas poliméricas, destruyéndolas y creando entrecruzamiento y reticulado.

La radiación rompe enlaces químicos y destruye irreversiblemente las moléculas del centellador primario y del wavelength shifter disminuyendo su emisividad.

- Pérdida de transparencia de los materiales.

Los tratamientos térmicos revierten estos efectos en los cristales inorgánicos parcial o totalmente.

En los plásticos, esta regeneración es limitada o nula



Detectores centelladores.

Para un centellador orgánico, una dosis de 1 kGy genera una pérdida del desempeño del detector significativa.

El umbral de daño para los inorgánicos es más extendido: los haluros alcalinos dopados, como por ejemplo el NaI(Tl), sufren daños a partir de dosis de 10 Gy; mientras que, en el otro extremo, el BaF₂ pierde desempeño a partir de 10⁵ Gy.



Detectores centelladores.

El centellador NaI(Tl).

Las ventajas de NaI(Tl) lo han convertido en el detector mas empleado para casi todas las aplicaciones de rutina en medicina nuclear con rayos γ y en el rango de energía de 50-250 keV.

Los cristales de NaI son centelladores a temperatura de nitrógeno líquido (77 K). Se vuelven eficientes a temperatura ambiente con el agregado de impurezas Tl (NaI(Tl)).

Los cristales de NaI (Tl) son crecidos a partir de NaI fundido con el agregado de 0.1-0.4 % molar.

Cristales de tamaño relativamente grande se crecen en hornos bajo condiciones de temperatura cuidadosamente controladas.

Por ejemplo, cristales para cámaras gamma usan cristales de NaI(Tl) de 30-50 cm de diámetro por 1 cm de grosor.



Detectores centelladores.

El centellador NaI(Tl).

Algunas razones por la cual se emplea el NaI(Tl) en Medicina nuclear.

1. Relativamente densos ($\rho = 3.67\text{g/cm}^3$) y contiene un elemento de relativamente alto número atómico (yodo, $Z = 53$).

Por lo tanto es un buen absorbente y muy eficiente detector de radiaciones penetrantes, tales como rayos X y rayos γ en el rango 50-250 keV. El modo predominante de interacción en este rango es absorción fotoeléctrica.

2. Es eficiente, produciendo un fotón de luz visible por cada 30 eV de energía de radiación absorbido.



Detectores centelladores.

El centellador NaI(Tl).

3. Es transparente a su propia emisión de centelleo.

Muy poca pérdida de la luz de centelleo por autoabsorción incluso en cristales de tamaño relativamente grande.

4. Se pueden crecer cristales de tamaño relativamente grande de manera, lo cual es ventajoso para los detectores empleados para imágenes médicas.

5. La longitud de onda de los fotones emitidos coincide con la región de respuesta máxima de los fotocátodo de los tubo fotomultiplicadores (ya lo veremos).



Detectores centelladores.

El centellador NaI(Tl).

Alguna desventajas.

1. El cristal NaI(Tl) es bastante frágil y se fractura fácilmente por tensiones mecánicas o térmicas.

Las fracturas no necesariamente destruyen al detector pero crean regiones «opacas» en el cristal, reduciendo la cantidad de fotones de centelleo que alcanzan el fotocátodo.

2. Higroscópico.

3. Para energías por encima de 250 keV el mecanismo predominante de interacción es interacción Compton y se requieren mayores volúmenes de NaI(Tl) para una eficiencia de detección adecuada.



Detectores centelladores.

Otros tipos de detectores tienen ventajas sobre detectores de NaI(Tl) en ciertos aspectos.

Por ejemplo

- Los detectores gaseosos son más baratos (pero tienen una eficiencia mucho menor),
- Los detectores semiconductores tienen mejor resolución en energía (pero son muy caros de usar sobre todo en cámaras γ).

Para la detección de las emisiones de 511-keV (emisores de positrones) es preferible emplear centelladores más densos:

Germanato de bismuto ($\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$; BGO).

De uso común en tomógrafos PET debido a su excelente eficiencia de detección a 511 keV.



Detectores centelladores.

Orthosilicato de lutecio [$\text{Lu}_2\text{SiO}_5(\text{Ce})$; LSO]

Algo menos eficiente que el BGO para 511 keV pero tiene mejor salida lumínica y es más rápido.

Ofrece ventajas sobre BGO para altas tasas de contaje, respuesta temporal rápida o se requiere decodificar la información de pequeños centelladores en un sistema de formación de imágenes.

LSO es muy caro (el Lu es costoso) y difícil de crecer (alto punto de fusión).

Orthosilicato de lutecio-ytrio (LYSO-LSO, una pequeña fracción de los átomos de lutecio son reemplazados con ytrio) tiene propiedades de centelleo muy similar a LSO.



Detectores centelladores.

BaF_2 y CsF : históricamente se ha utilizado en las cámaras de positrones debido a su tiempo de decaimiento muy rápido.

Menor eficiencia de detección que BGO y LSO, lo que ha limitado su aplicación generalizada en Medicina Nuclear.

Nuevos materiales centelladores siguen siendo descubiertos y desarrollados. Los más promisorios candidatos para uso en Medicina Nuclear las aplicaciones son LuAP [$LuAlO_3(Ce)$], bromuro de lantano [$LaBr_3(Ce)$] y cloruro de lantano [$LaCl_3(Ce)$].



Detectores centelladores. El fotomultiplicador.

La intensidad de luz producida por los centelladores es muy baja, unos cientos a unos pocos miles de fotones por rayo y de energía en el rango 70-1000 keV que interactúa.

En los primeros días de la Física Nuclear, era común emplear los centelladores para estudiar las características de las partículas observando y contando, en una habitación oscura, los centelleos producidos por estas partículas en una pantalla.

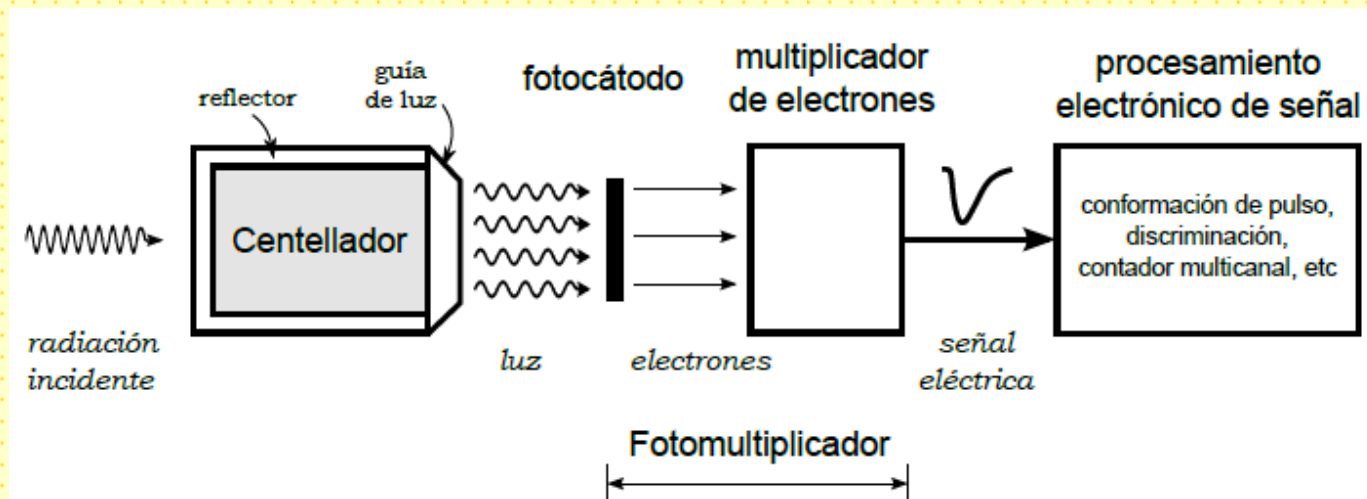
Obvias limitaciones para contar con eficacia y precisión con este sistema.

¿Cómo se resuelve? Introducción de electrónica ultrasensible capaz de detectar la luz de centelleo

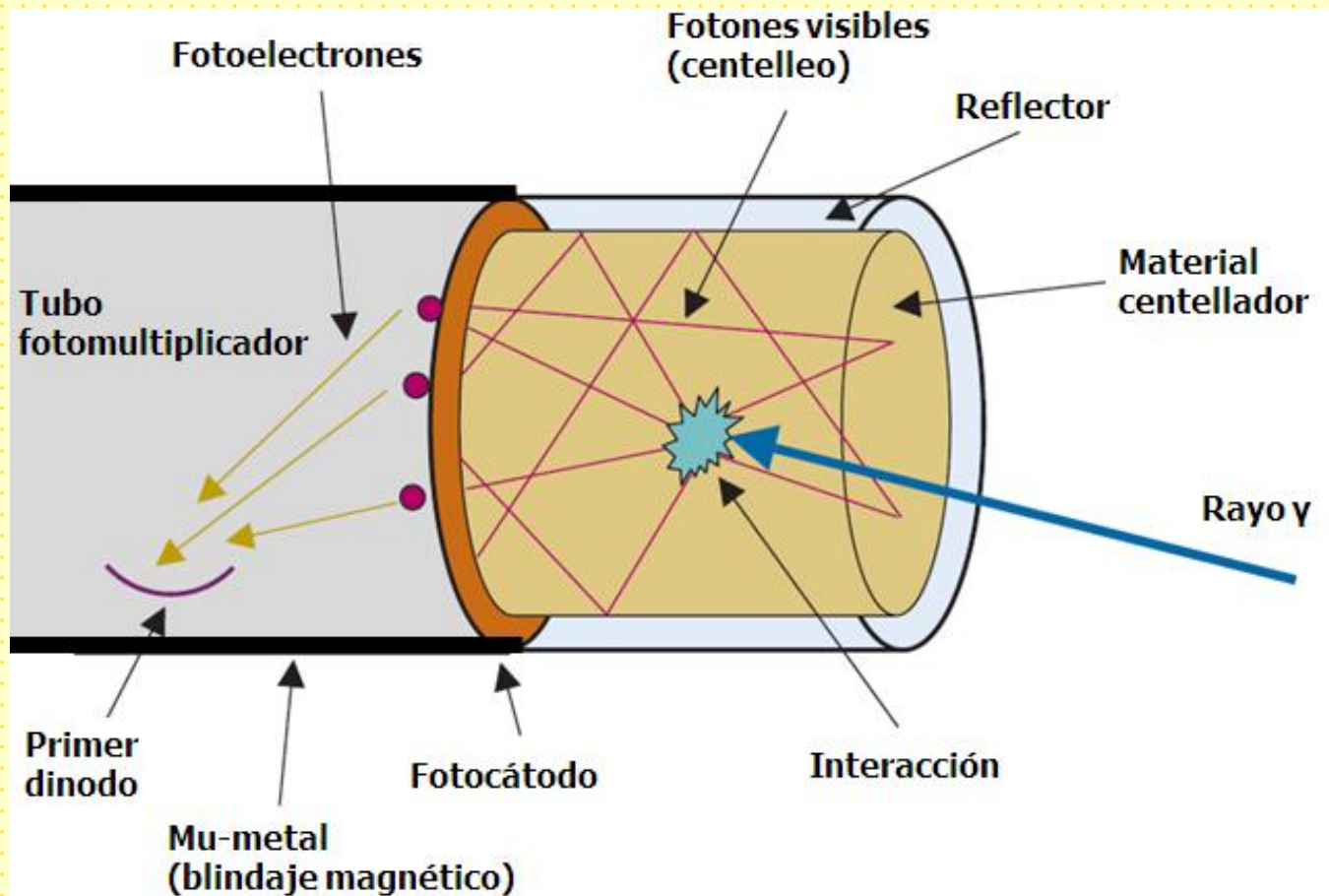
fotomultiplicadores

Detectores centelladores. El fotomultiplicador.

El fotomultiplicador convierte la luz emitida por el centellador en una corriente eléctrica medible.

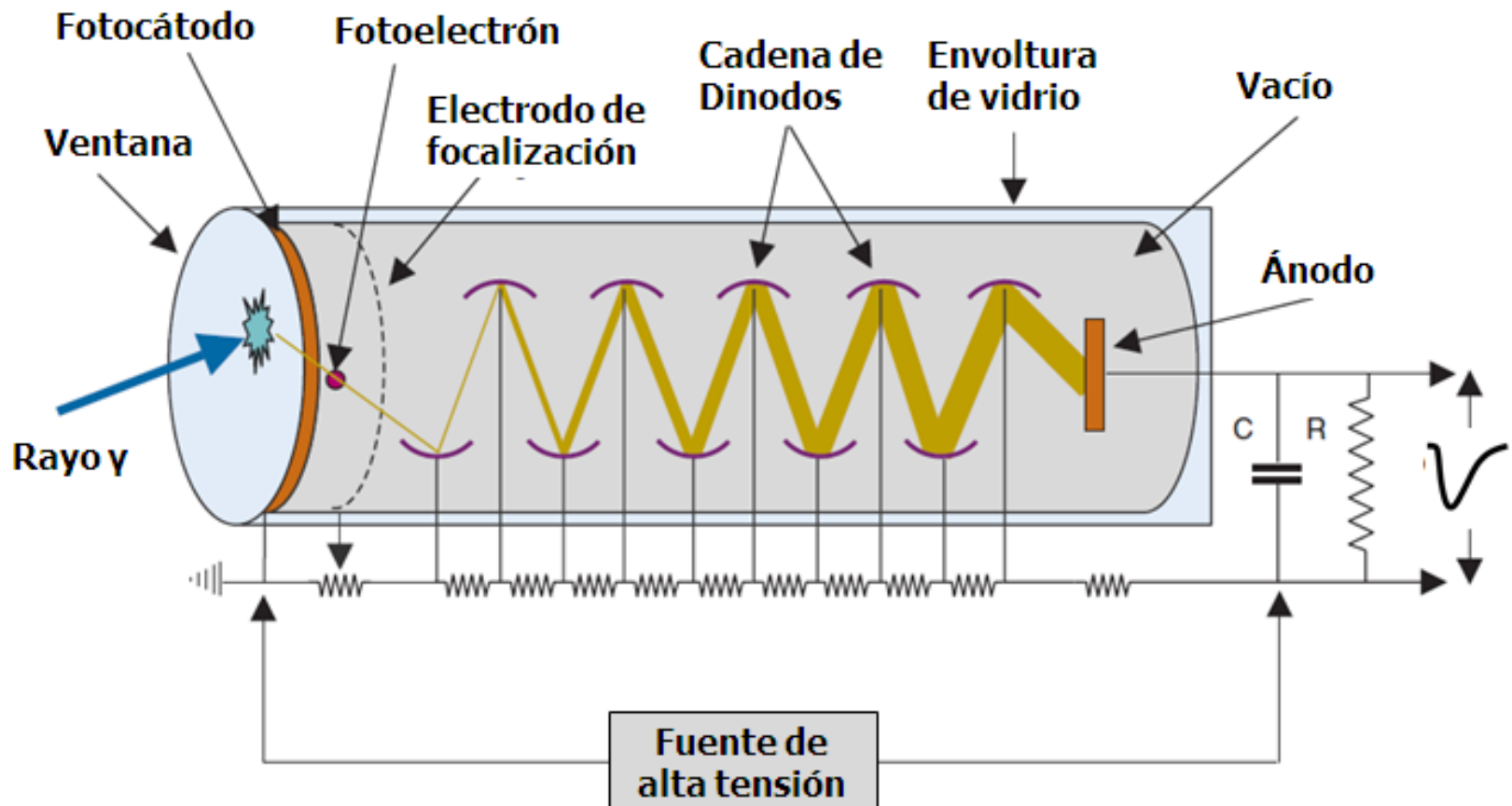


Detectores centelladores. El fotomultiplicador.

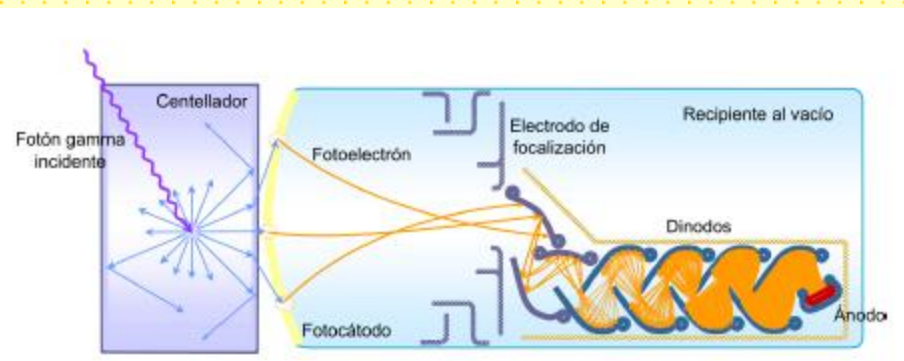


Detectores centelladores. El fotomultiplicador.

Funcionamiento básico.



Detectores centelladores. El fotomultiplicador.



Fotocátodo. La superficie frontal interior de la ventana de entrada de vidrio del tubo de FM está cubierta con una sustancia fotoemisora: sustancia que emite electrones cuando es golpeado por fotones de luz visible.

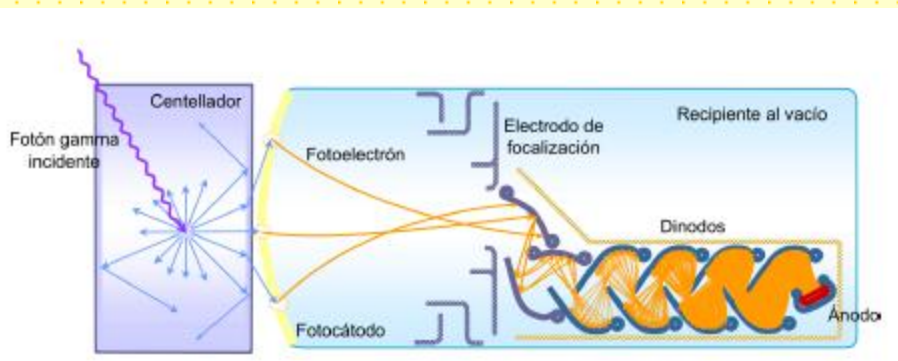
Convierte fotones en electrones via efecto fotoeléctrico:

$$E = h\nu - \phi$$

La eficiencia de conversión depende fuertemente del tipo y energía de la radiación incidente y del material fotosensible.

$$n(\lambda) = \frac{\text{número de fotoelectrones emitidos}}{\text{número de fotones incidentes}}$$

Detectores centelladores. El fotomultiplicador.



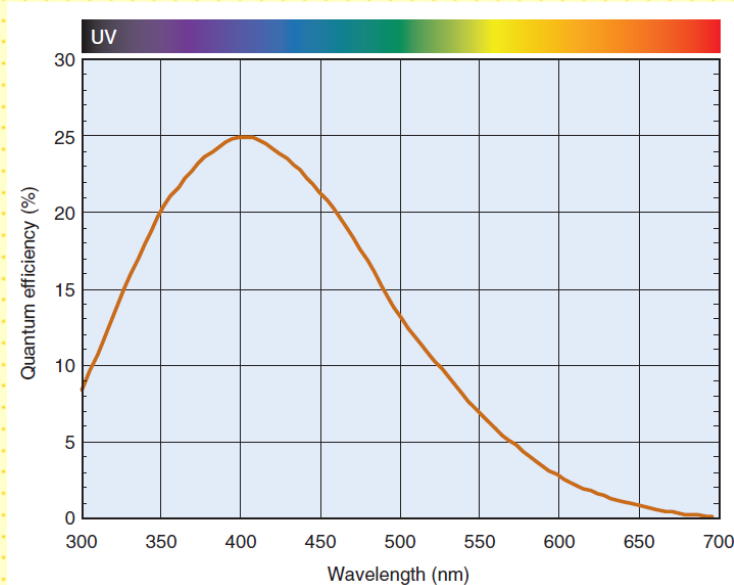
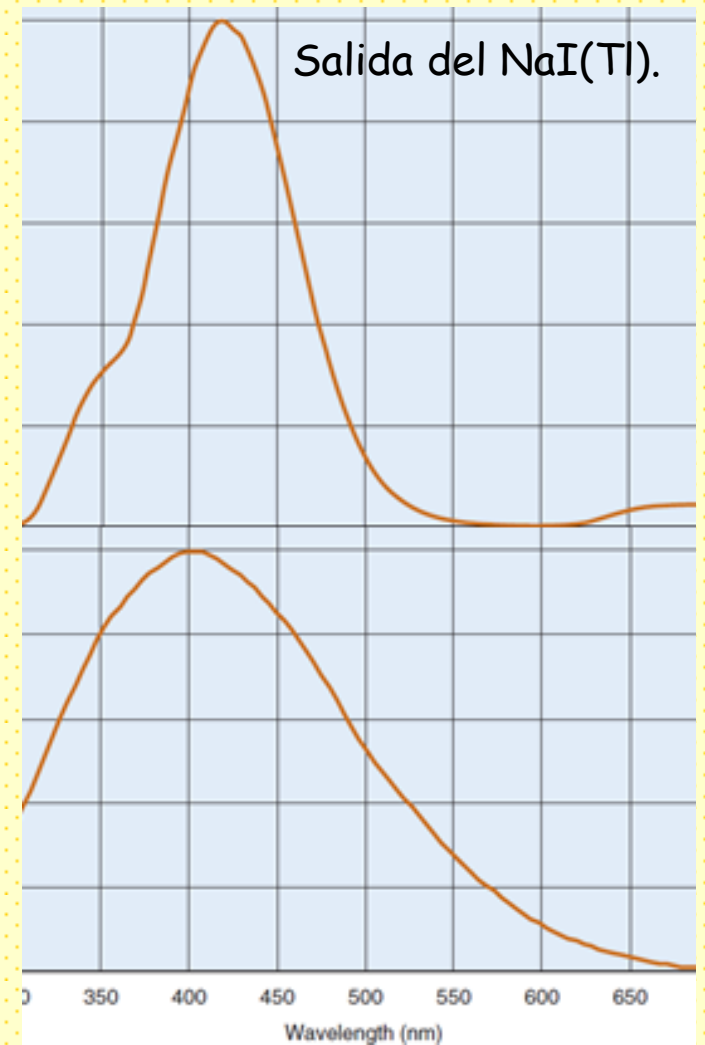
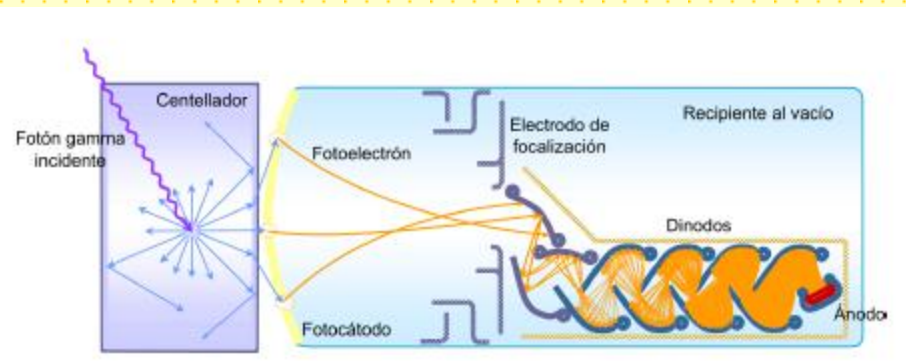
La respuesta es tal que sólo una banda de longitudes de onda es eficientemente convertida en fotoelectrones.

Esta respuesta ocurre alrededor de 400 nm, que es la longitud de onda de los fotones emitidos por los materiales centelladores.

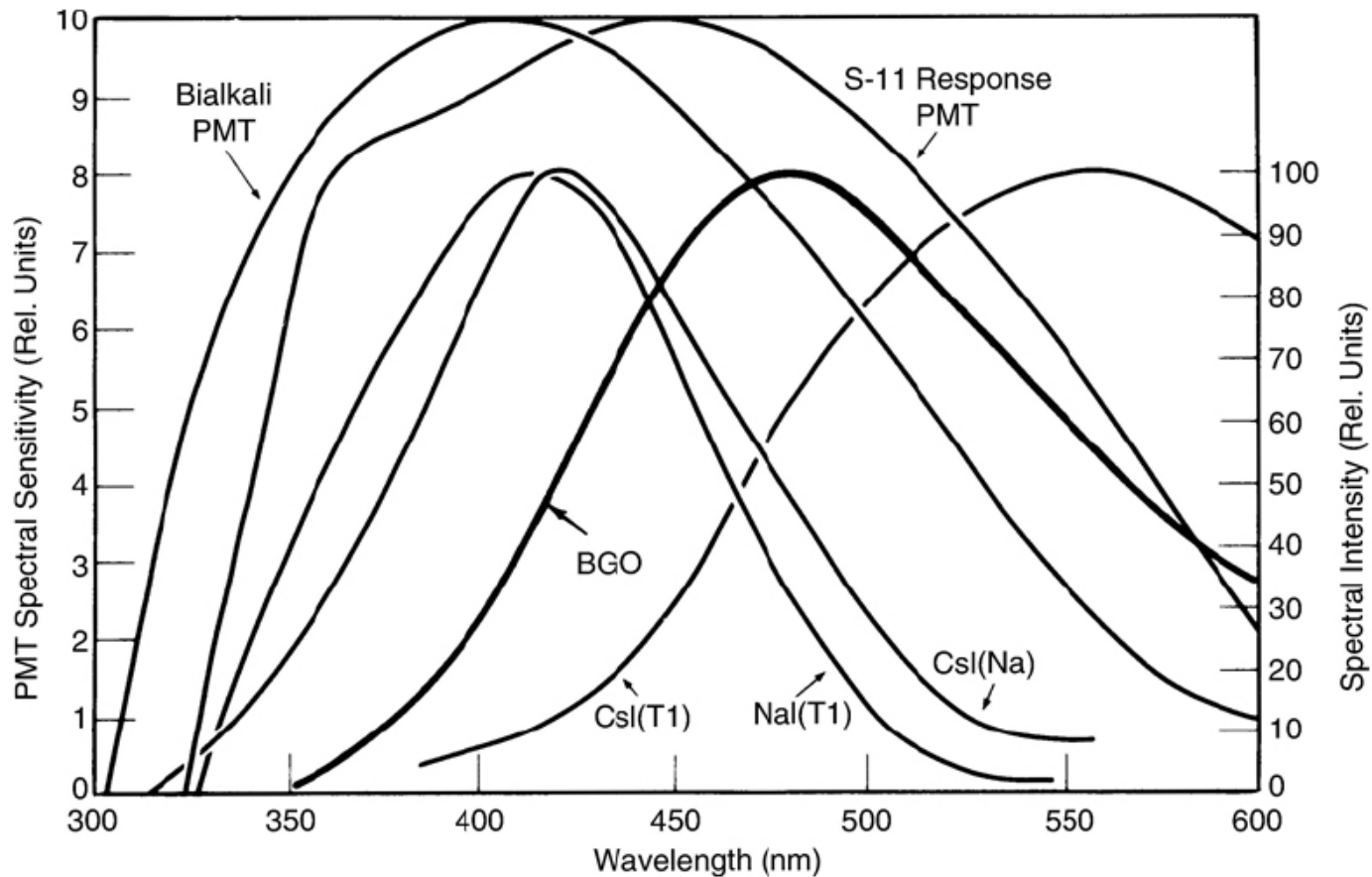
Material	λ de respuesta (nm)	$n(\lambda)$ (%)
Ag-O-Cs	800	36%
SbCs	400–440	16-22
SbNa-KCs	420–550	8-20
SbRb-Cs	420	26
Sb-K-Cs	400	26
Cs-Te	235	10

La eficiencia de conversión luz visible a electrones (o eficiencia cuántica), de 1 a 3 fotoelectrones por 10 fotones de luz visible que llegan al fotocátodo.

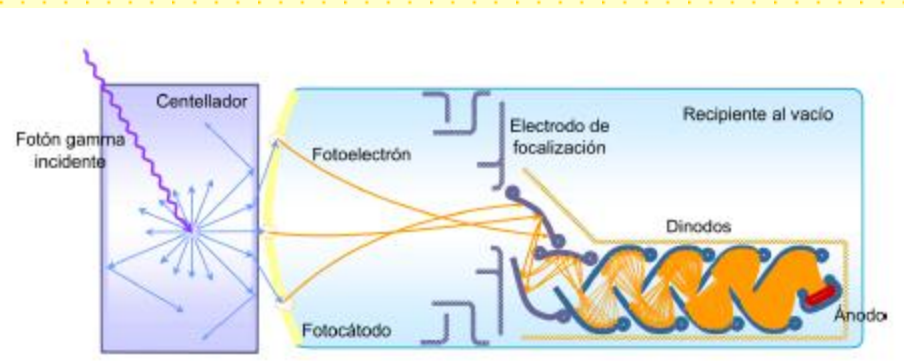
Detectores centelladores. El fotomultiplicador.



Detectores centelladores. El fotomultiplicador.



Detectores centelladores. El fotomultiplicador.



Los fotoelectrones son emitidos en forma isótropa.

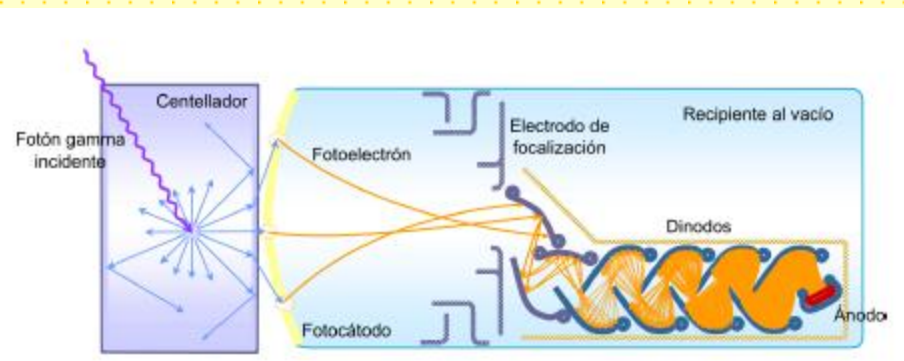
A temperatura ambiente, la energía media de los fotoelectrones es 0,025 eV.

El fotoelectrón perderá energía por colisiones en su trayecto hacia la superficie del material.

Si, al llegar a la superficie aun posee suficiente energía para superar la barrera energética generada por la interface material-vacío, el fotoelectrón escapará del material (función trabajo del orden de 4 eV para metales, del orden de 1,5 eV para semiconductores dopados).

Sólo una fracción de los electrones liberados por los fotones incidentes escapan del fotocátodo.

Detectores centelladores. El fotomultiplicador.



Luego de la emisión, los fotoelectrones deben ser **colectados y enfocados en la primera etapa de la cadena de amplificación.**

Esta tarea es realizada por un sistema electro-óptico, mediante la aplicación de un campo eléctrico.

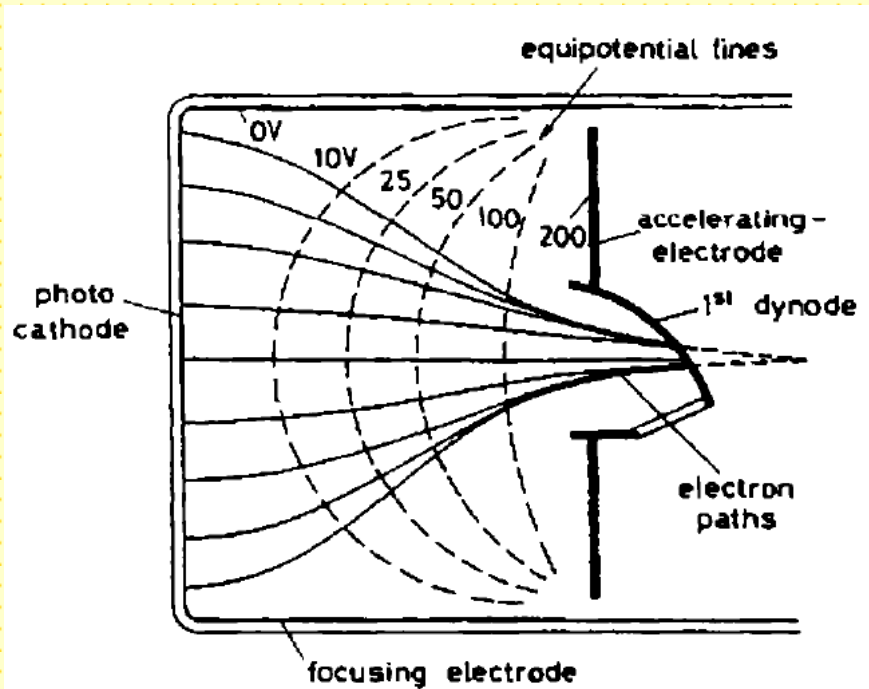
Dos requerimientos básicos:

Alta eficiencia de colección, independientemente del punto donde se genere el fotoelectrón.

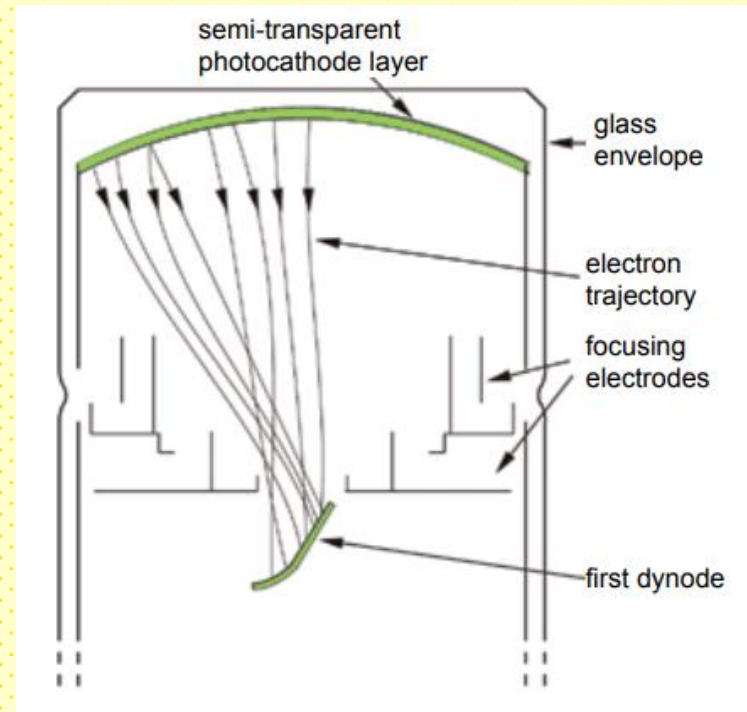
El tiempo de vuelo del fotoelectrón desde el cátodo hasta el primer dinodo debe ser independiente del punto donde se genere el fotoelectrón.

Detectores centelladores. El fotomultiplicador.

Sistema de enfoque.

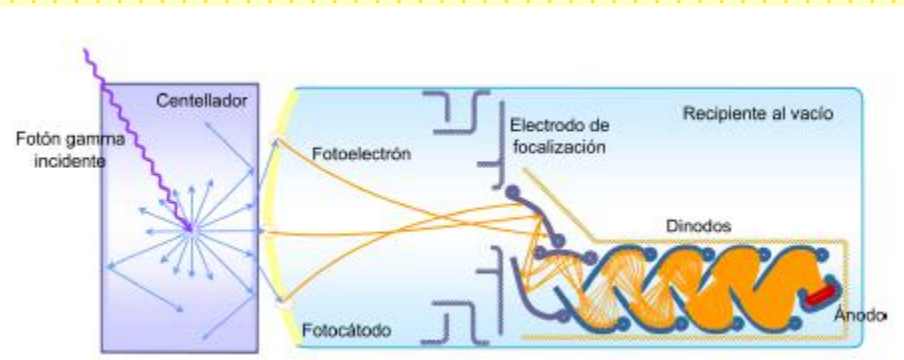


Trayectoria de los fotoelectrones.



Detectores centelladores. El fotomultiplicador.

Sección de multiplicación de electrones.



La sección de multiplicación de electrones amplifica la débil corriente de fotoelectrones a fin de producir una señal eléctrica medible.

La amplificación se realiza a partir del proceso de emisión secundaria.

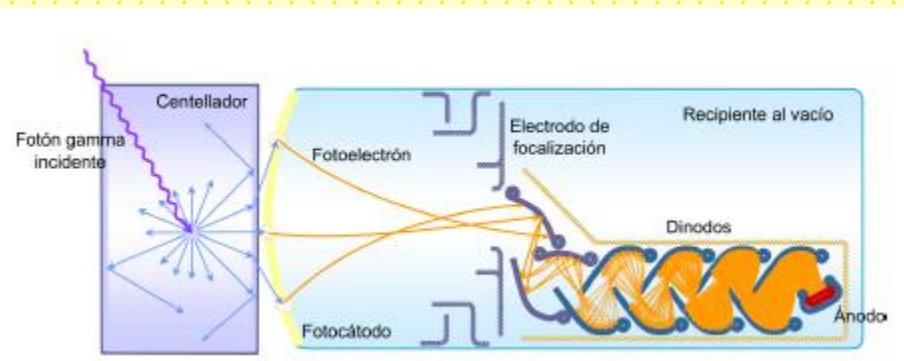
El dinodo está recubierto con un material que tiene una alta emisión secundaria como ser CsSb.

Cuando un fotoelectrón golpea la superficie del dinodo arranca electrones secundarios. La relación electrones secundarios/electrones incidentes es el factor de multiplicación.

Depende de la energía del fotoelectrón (que a su vez queda determinada por la diferencia de potencial entre el dinodo y el fotocátodo).

Detectores centelladores. El fotomultiplicador.

Sección de multiplicación de electrones.

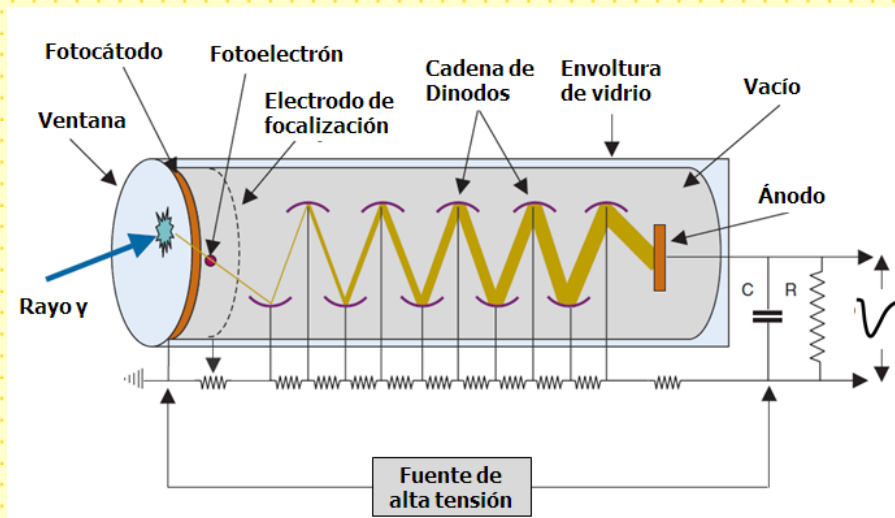


El proceso es similar al efecto fotoeléctrico, pero con electrones. La diferencia es que un campo eléctrico debe ser mantenido entre los dinodos para acelerar los electrones.

El proceso debe cumplir:

- Alto número de electrones secundarios emitidos por electrón primario incidente
- Estabilidad de la emisión secundaria.
- Baja emisión termoiónica, esto es, bajo ruido.

Detectores centelladores. El fotomultiplicador.



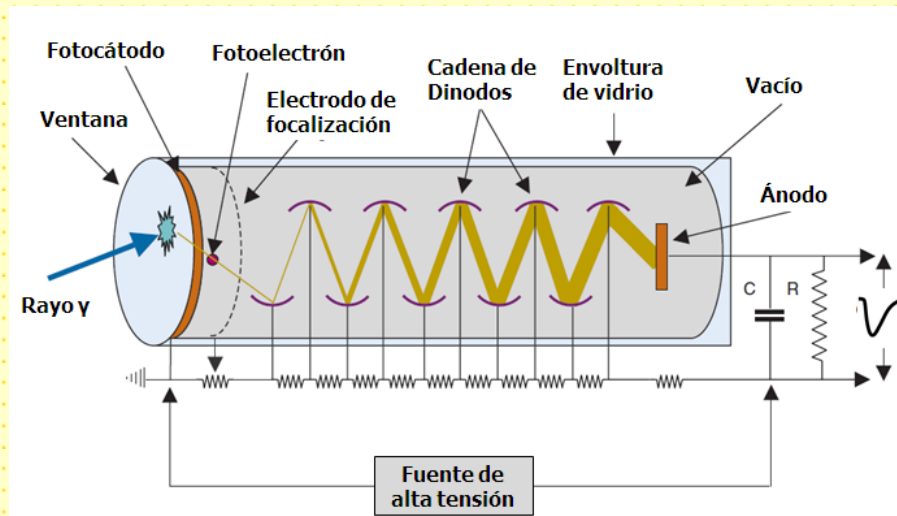
Los electrones secundarios expulsados desde el primer dinodo son atraídos por el segundo dinodo. 50-150 V más alto que el primer dinodo.

El proceso de multiplicación se repite a través de múltiples dinodos (entre 9 y 12).

El factor de multiplicación es de entre 3 y 6 por dinodo..

Multiplicación total: $\sim 6 \times 10^7$) para un tubo de 10 etapas con un factor de multiplicación promedio de factor de multiplicación de 6 en cada dinodo.

Detectores centelladores. El fotomultiplicador.



Por lo tanto, un pulso de corriente relativamente grande se obtiene a la salida del FM, incluso cuando la señal de entrada es muy débil.

Notar: la intensidad de corriente producida es proporcional a la intensidad de la señal luminosa incidente en el fotocátodo y por lo tanto también a la energía depositada por la radiación incidente.



Detectores centelladores. El fotomultiplicador.

Los tubos FM requieren una fuente de alta tensión.

Si el tubo tiene 10 dinodos, y el primero está a 300 V (en relación al fotocátodo).

Incrementos de 150 V de dinodo a dinodo.

Se necesitan 1500 V para un FM de 10 dinodos..

La fuente de voltaje debe ser muy estable ya que el factor de multiplicación es muy sensible a cambio en el voltaje.

Un aumento del 1% en el voltaje aplicado al tubo aumenta la cantidad de corriente recogida en el ánodo por aproximadamente 10%. Esto es de considerable importancia en aplicaciones donde se debe determinar la altura del pulso.



Detectores centelladores. El fotomultiplicador.

Los tubos FM se sellan en vidrio y están al vacío.

Cuidado: El enfoque de un haz de electrones de un dinodo a otro puede verse afectado por campos magnéticos externos.

Por lo tanto, los tubos de PM se recubren con una lámina de metal para blindarlos magnéticamente («mu-metal»).

mu-metal: una aleación de hierro, níquel y pequeñas cantidades de cobre y cromo

Detectores centelladores. El fotomultiplicador.



Varias formas (redonda, cuadrada y hexagonal) y tamaños.

La mayoría de los usados en medicina nuclear tienen fotocátodos en el rango de 1 a 7.5 cm de diámetro.

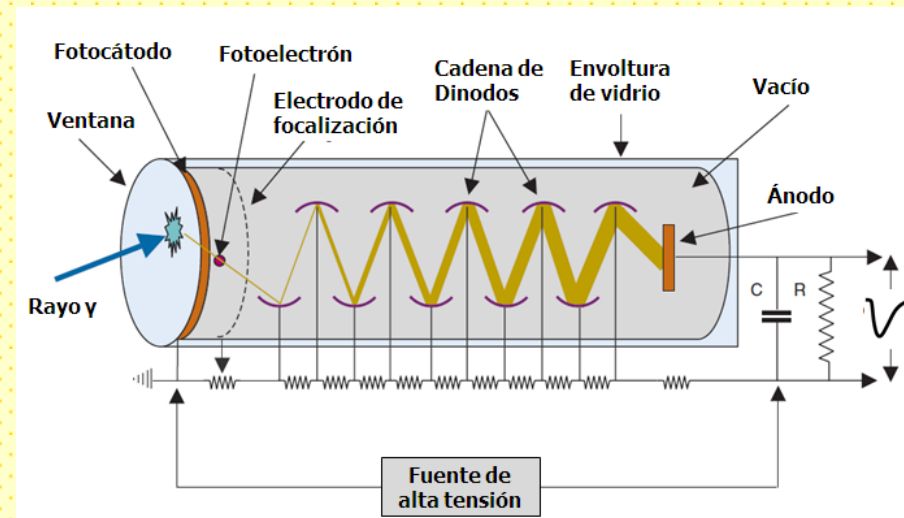
Algunos desarrollos tienen la capacidad de determinar la ubicación de la luz incidente en el fotocátodo.

Detectores centelladores. El fotomultiplicador.

En el caso de un centellador de NaI(Tl) se lo reviste con una carcasa de aluminio o acero inoxidable para evitar la humedad ambiente.

Ventana óptica para permitir la salida de la luz de centelleo del cristal al tubo FM.

Para un buen acoplamiento óptico entre el cristal y el FM se emplea una «grasa óptica» que «adapta» los diferentes medios.



Tanto el cristal como el tubo FM se envuelven herméticamente en algún material para evitar el ingreso de luz externa, que afectaría la medida y puede hasta destruir el FM.

Los cristales se recubren con un material altamente reflexivo para maximizar la luz recogida en el fotocátodo.

Con un acoplamiento óptico eficiente, buenas superficies reflectantes, y un cristal libre de defectos aproximadamente el 30% de la luz emitida por el cristal alcanza el fotocátodo.



Detectores centelladores. El fotomultiplicador.



Detectores centelladores. El fotomultiplicador.

Respuesta temporal y resolución.

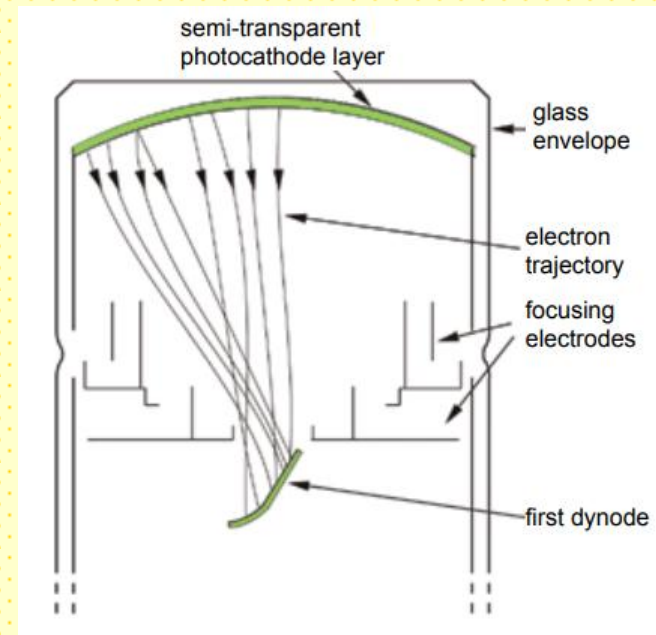
Factores afectan la resolución temporal.

Variación en el tiempo de vuelo de los electrones a lo largo del fototubo. Puede ser del orden de 0,5 ns.

Ruido estadístico. Surge de la naturaleza estadística de los procesos fotoeléctrico en el fotocátodo y de emisión secundaria en los dinodos.

Para una iluminación constante, el número de fotoelectrones y electrones secundarios fluctúa en el tiempo.

En el caso de los electrones secundarios se suman efectos como diferencias en tiempos de vuelos, factores geométricos, no uniformidades en los dinodos, etc.



Detectores centelladores. El fotomultiplicador.

En adición al ruido estadístico debemos considerar el ruido intrínseco del fototubo ("*dark currents*").

Aún cuando el fotomultiplicador no es iluminado, pueden observarse corrientes a la salida del mismo. Las fuentes de estas corrientes pueden ser:

Emisión térmica.

Corrientes parásitas.

Fenómenos de ionización.

Contaminación radioactiva.

Mala aislación lumínica.

En general, estas corrientes son de unos pocos nanoamperes.





Detectores centelladores. El fotomultiplicador.

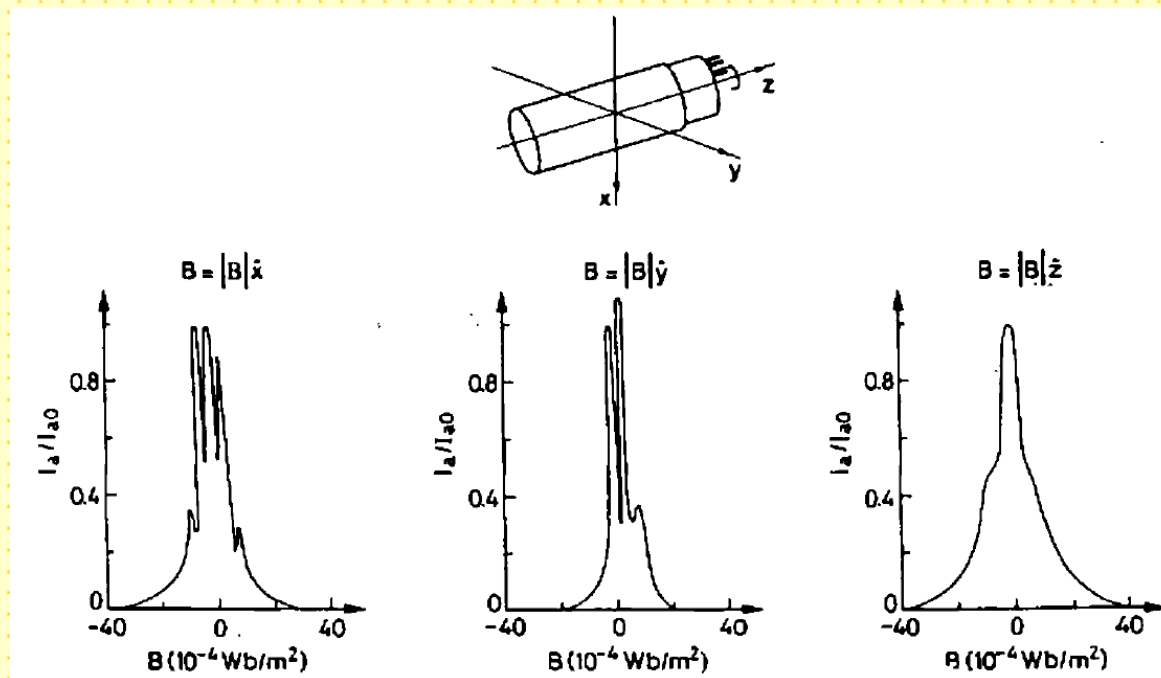
Factores ambientales que afectan el funcionamiento del detector.

1- Exposición a la luz natural: puesto que los fotomultiplicadores son extremadamente fotosensibles, debe tenerse el máximo cuidado en no exponerlos a la luz ambiental durante su funcionamiento.

Aún cuando no se aplique voltaje, es conveniente no exponer el fotomultiplicador a luz intensa, ya que esto puede resultar en la aparición de corrientes parásitas.

Detectores centelladores. El fotomultiplicador.

2- Exposición a campos magnéticos: Los campos magnéticos son una de las más importantes influencias en la operación de los fotomultiplicadores. Un pequeño campo magnético es suficiente para desviar los electrones de su trayectoria ideal, afectando su eficiencia.



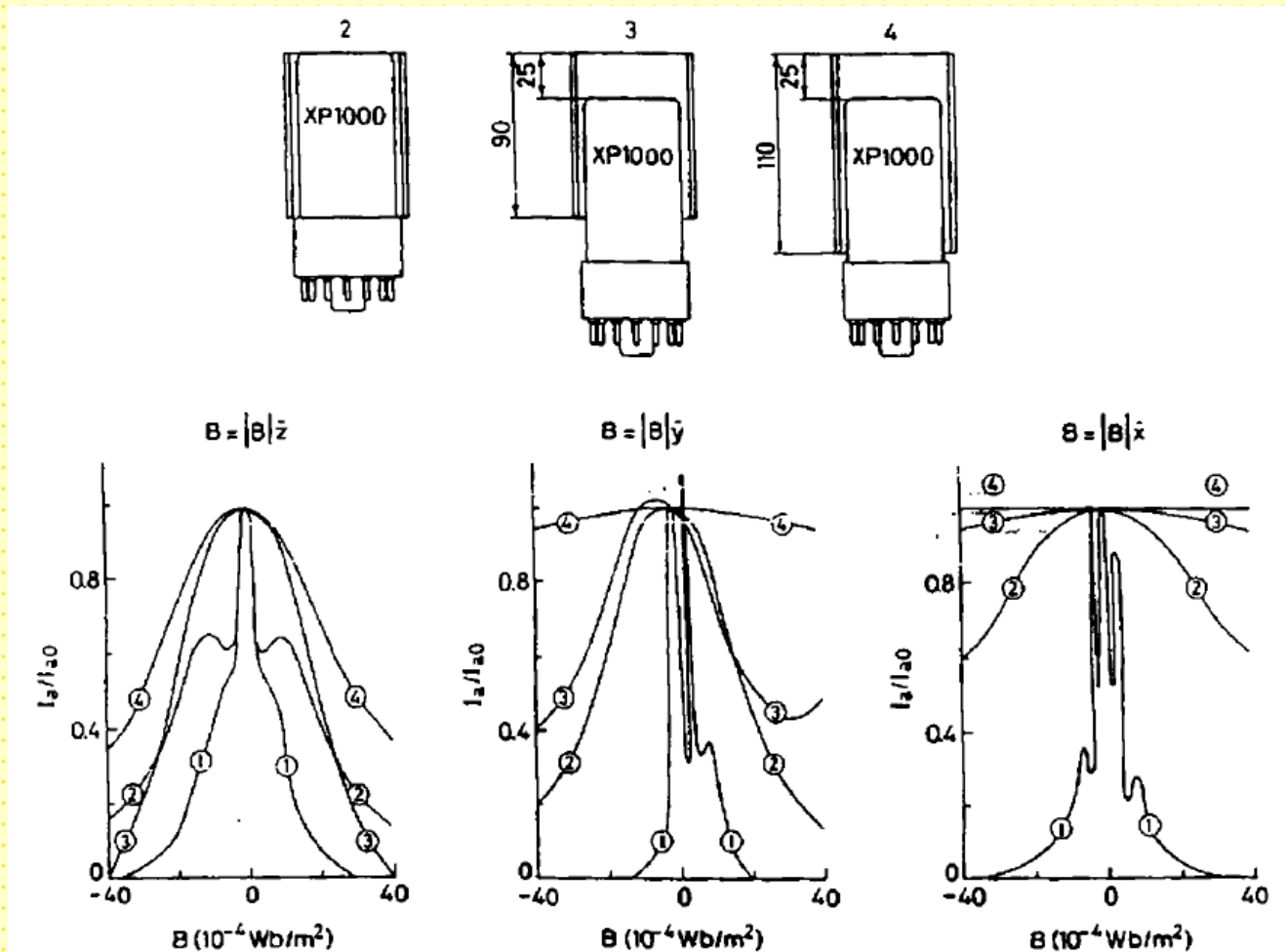


Detectores centelladores. El fotomultiplicador.

La parte más sensible de los fotomultiplicadores a campos magnéticos es el sistema colector de electrones, ya que aquí los electrones podrían ser desviados de forma tal que éstos no puedan ser enfocados correctamente en la cadena multiplicadora de electrones del fototubo.

La forma más sencilla para eliminar la influencia de los campos magnéticos externos es recubrir al fotomultiplicador con un material que apantalle el campo magnético (μ -metal). Generalmente es suficiente con recubrir el fototubo, aunque se ha comprobado que se obtienen mejores resultados si el μ -metal se extiende más allá de éste

Detectores centelladores. El fotomultiplicador.





Detectores centelleadores. El fotomultiplicador.

Montaje de un detector centelleador.

Cuando se monta un detector de centelleo se debe estudiar cuidadosamente:

a colección y el posterior "transporte" de los fotones originados en el proceso de interacción entre la radiación incidente en el volumen sensible del detector.

Colección de luz.

la pérdida de luz en el centellador puede ocurrir de dos formas básicas:

Escape a través de los bordes del centellador.

Autoabsorción en el material (para detectores de dimensiones pequeñas este efecto es despreciable).

Detectores centelladores. El fotomultiplicador.

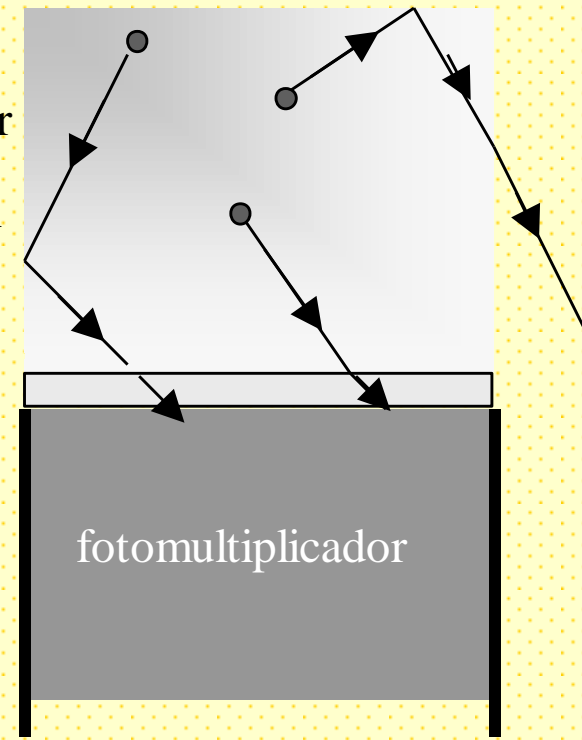
las longitudes de atenuación típicas son del orden de metros, por lo cual sólo detectores de gran tamaño son afectados por este fenómeno.

$$L(x) = L_0 \exp\left(-\frac{x}{l}\right)$$

Los fotones emitidos en un determinado punto del centellador viajan en todas las direcciones, y sólo una fracción alcanza el fotomultiplicador, mientras que el resto viaja hasta los bordes del cristal.

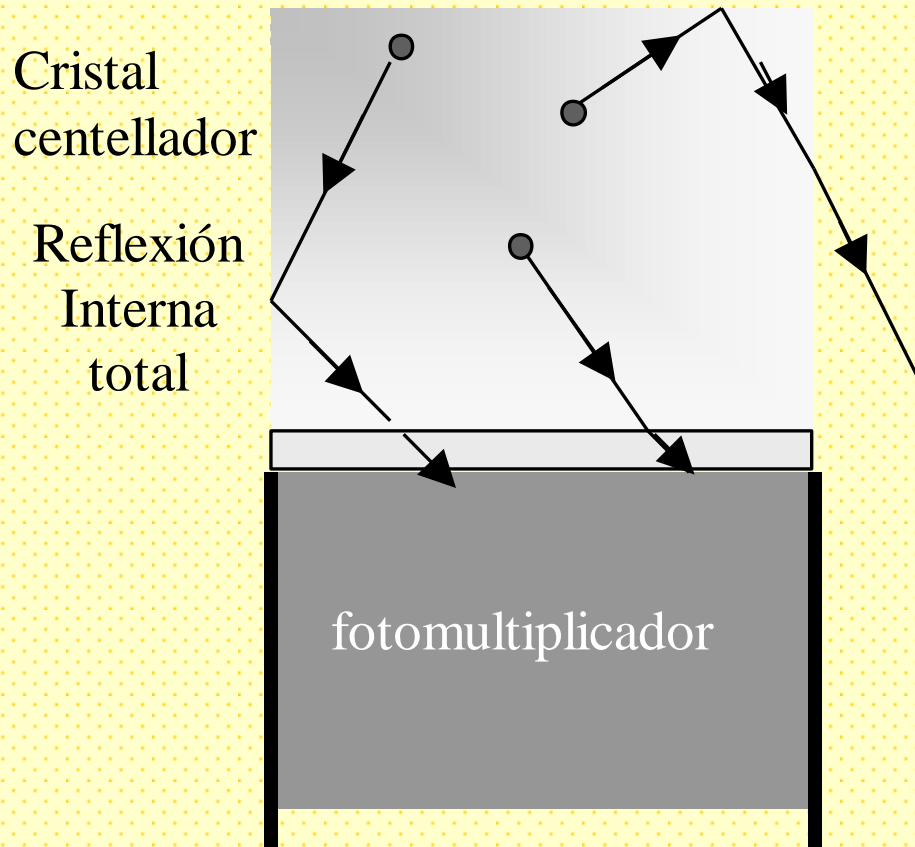
Cristal centellador

Reflexión
Interna
total



fotomultiplicador

Detectores centelladores. El fotomultiplicador.



$$\theta_B = \text{sen}^{-1} (n_{ext} / n_{cent})$$

θ_B : ángulo crítico.

De acuerdo al ángulo Brewster, ocurre el fenómeno de reflexión total, de forma tal que la luz retorna al volumen del centellador.

Para ángulos menores a θ_B , se produce una reflexión parcial. **Esta pérdida reduce la eficiencia y la resolución en energía del detector.**



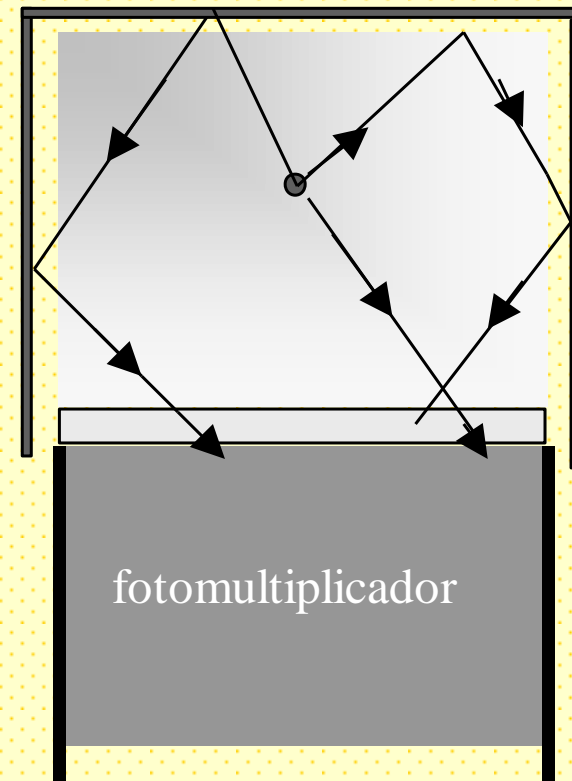
Detectores centelladores. El fotomultiplicador.

Para incrementar la eficiencia en la colección de luz, se pueden emplear diferentes métodos. La práctica más común y sencilla consiste en redirigir la luz que escapa hacia el detector mediante un material reflector.

La superficie reflectora puede ser del tipo *especular* o *difusa*.

Cristal
centellador

Reflector
externo



fotomultiplicador



Detectores centelladores. El fotomultiplicador.

Acoplamiento del cristal centellador al tubo fotomultiplicador:

En contraste con los requerimientos requeridos para la reflexión interna, la unión entre el centellador y el fotomultiplicador debe realizarse de forma tal de permitir un máximo de transmisión de luz.

El contacto óptico entre los dos medios debe realizarse entonces con un material cuyo índice de refracción sea lo más próximo posible al del centellador y la ventana del fotomultiplicador.

. Los agentes más comunes son aceite o grasa siliconada de alta viscosidad.



Detectores centelladores. El fotomultiplicador.

Montaje de la unidad detectora

En primer lugar, y a fin de remover posible suciedad o contaminación presente sobre las caras externas de los detectores (factores que deterioran drásticamente la resolución en energía), se debe limpiar cuidadosamente los cristales.

Un mejor método es lijar las superficies laterales, a fin de lograr una limpieza más profunda y volverlas opacas.

Luego de limpiar los cristales cuidadosamente, removiendo el polvo originado en el lijado, se los recubre con cinta blanca de teflón, dejando libre solamente la base a acoplar ópticamente con el fotocátodo del tubo fotomultiplicador. La cinta teflón actuará en este caso como reflector externo.



Detectores centelladores. El fotomultiplicador.

Los cristales son entonces ópticamente acoplados a la ventana de cuarzo, transparente al ultravioleta, de los fotomultiplicadores con una gota de grasa siliconada de alta viscosidad ($\eta \approx 100.000 \text{ cSt}$).

Debe evitarse la formación de burbujas de aire, que deterioran la transmisión de luz del centellador al fotomultiplicador.

Una vez acoplados los fototubos a los cristales detectores, se debe cubrir a la unidad con papel de aluminio, de forma tal que toda la unidad detectora quede al mismo potencial.

Finalmente, se recubre el conjunto en toda su longitud con cinta aisladora negra. Esta cinta, junto con el aluminio, tiene por finalidad evitar que luz externa entre al cristal y al fototubo y, además, aislarlo eléctricamente.



Detectores centelladores. El fotomultiplicador.



Detectores centelladores. El fotomultiplicador.



Detectores centelladores. El fotomultiplicador.



Detectores centelladores. El fotomultiplicador.



Detectores centelladores. El fotomultiplicador.





Detectores semiconductores.

El principio de funcionamiento de los detectores semiconductores puede asemejarse al de la cámara de ionización, pero en este caso el medio ionizable en vez de un gas, consiste en un semiconductor de alta resistividad como el Ge o el Si.

La alta resistividad se logra mediante la formación de zonas del material sin de portadores libres o volumen efectivo.

Los detectores semiconductores normalmente son pobres conductores eléctricos.

Cuando incide la radiación ionizante, la carga eléctrica producida puede ser recolectada aplicando un campo externo, tal como en los detectores de ionización.

Este principio no puede ser aplicado un material conductor (un metal): conduciría una gran cantidad de carga incluso sin eventos ionizantes.

Aisladores (por ejemplo, vidrio) tampoco: no conducen incluso en presencia de radiación ionizante.

Sólo los semiconductores pueden funcionar como "cámaras de ionización sólida".



Detectores semiconductores.

Los materiales semiconductores más comúnmente empleados son

- Silicio (Si)
- Germanio (Ge)

Más recientemente:

- Teluro de cadmio (CdTe)
- Teluro de cadmio y zinc (CZT)

	Si(Li)	Ge(Li) or Ge	CdTe*	Air
$\rho(\text{g/cm}^3)$	2.33	5.32	6.06	0.001297
Z	14	32	48 & 52	~7.6
$W(\text{eV})^\dagger$	3.6	2.9	4.43	33.7



Detectores semiconductores.

Ventajas:

- Alta densidad del medio ionizable (2000 a 5000 veces más densos que los gases).

Alto poder de frenado → alta eficiencia de detección por unidad de volumen efectivo del detector.

- La energía necesaria para producir un par de portadores de carga en los semiconductores es del orden de 3-5 eV. Aproximadamente 10 veces menor que en gases y centelladores (al menos)

Para una misma energía, la cantidad de portadores de carga producidos es mucho mayor en los detectores semiconductores que en detectores de gases o centelladores → menores fluctuaciones estadísticas y por ende en una mejor resolución en energía.

Buena señal que permite la detección y conteo de eventos individuales.

Señal es proporcional a la energía depositada en el medio detector. Pueden usarse para determinar la/s energía/s de la radiación incidente.



Detectores semiconductores.

Ventajas:

Alta movilidad de los electrones.

Volumen efectivo del medio detector es reducido.

Tiempo de colección de cargas muy breve (del orden del ns).



Detectores semiconductores.

A pesar de sus ventajas, los detectores semiconductores tienen una serie de problemas que han limitado su uso en Medicina Nuclear.

- Tanto Si como Ge (sobre todo) conducen una cantidad significativa de corriente eléctrica inducida térmicamente en temperatura ambiente.

Fondo (ruido electrónico) que interfiere con la detección de las corrientes generadas por la radiación incidente.

Los detectores de Si (generalmente) y los de Ge (siempre) debe operarse a temperaturas muy por debajo temperatura ambiente (H₂ líquido, 77 K).



Detectores semiconductores.

- Impurezas y defectos.

"trampas de electrones«. Captura los electrones liberados en la ionización, lo que resulta en una reducción sustancial en la carga colectada y por ende en la señal de salida

Limita el grosor de un detector a aproximadamente 1 cm.

Los defectos en la estructura cristalina (vacancias, dislocaciones) producen recombinación de los portadores.

Pérdida de eficiencia de detección.



Detectores semiconductores.

Dos enfoques para resolver el problema de impurezas y defectos.

Dos enfoques para resolver el problema de impurezas y defectos

Muestras muy puras del material detector. (en general, mayormente con Ge, (HPGe)).

10^{-6} ppm; 10^{10} átomos de impureza/cm³. Ge de resistividad específica sumamente elevada,

Detectores de Ge hiperpuros o intrínsecos.

Costosos.

Volúmenes efectivos de aproximadamente 1 cm de espesor. (del orden de 5 cm de diámetro)

Ampliamente utilizados en espectrometría y de alta resolución.



Detectores semiconductores.

Segundo enfoque es introducir deliberadamente en la matriz de cristal impurezas que donan electrones para llenar (compensar) las trampas de electrones creadas por otras impurezas.

Generalmente se emplea como dopante Li.

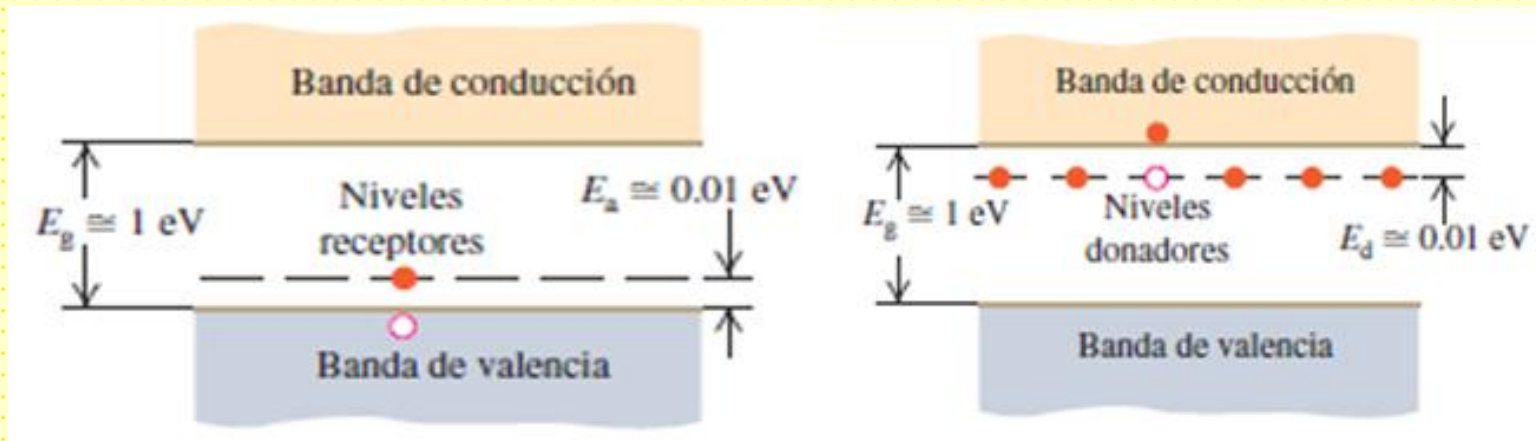
«Detectores de deriva de litio» (Si (Li) o Ge (Li)).

Proceso de crecimiento largo y caro.

Tamaños de cristal limitado a unos pocos centímetros de diámetro por aproximadamente 1 cm de espesor (Si (Li)) y aproximadamente 5 cm de diámetro por 5 cm de espesor para Ge (Li).

Detectores semiconductores.

Mecanismo de funcionamiento.



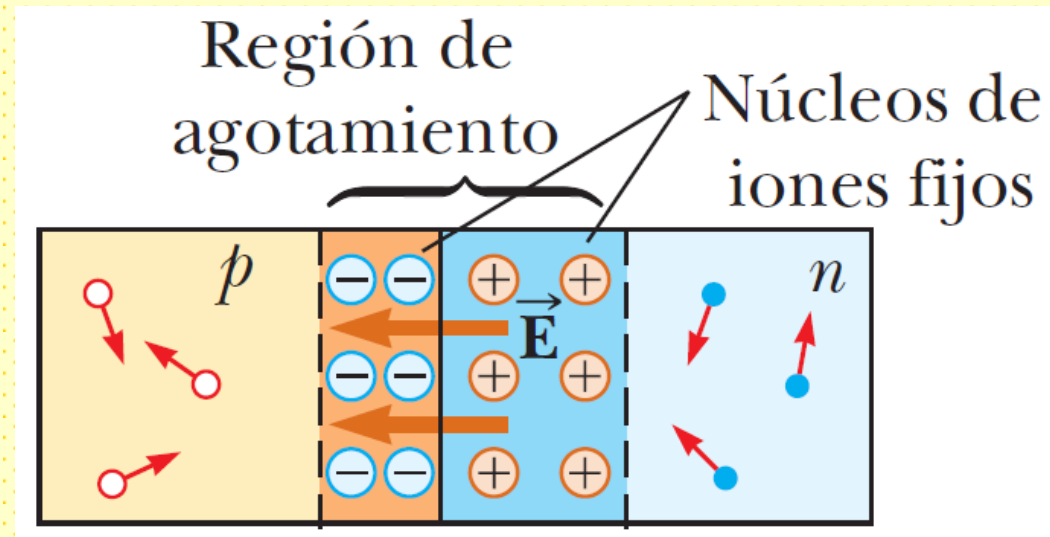
Semiconductor tipo p

Semiconductor tipo n

Detectores semiconductores.

Cuando se ponen en contacto un material tipo-p y uno tipo-n, los electrones del semiconductor de tipo-n pueden difundirse a través de la unión en el semiconductor de tipo-p y combinarse con los huecos.

En las proximidades de la unión p-n, los portadores de carga son neutralizados, creando una región denominada zona de depleción (o de agotamiento).



La difusión de electrones de la región tipo-n deja atrás estados ionizados donores fijos, mientras que en la región tipo-p quedan estados aceptores fijos cargados negativamente.

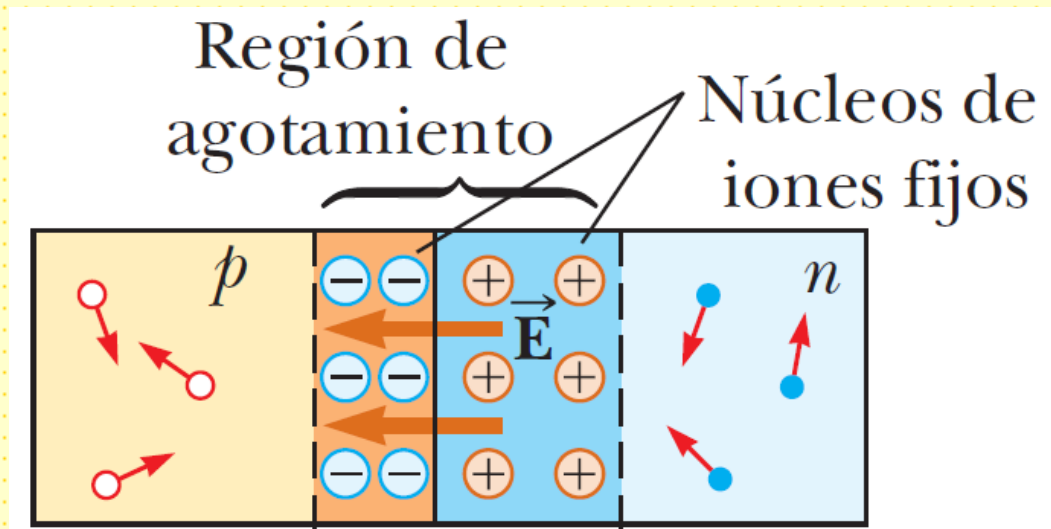
Se crea por tanto un campo eléctrico que impide que la difusión continúe. La zona de depleción tiene un gran parecido con un condensador plano-paralelo

Unión p-n, diodo.

Detectores semiconductores.

Si alguna radiación penetra en la zona de depleción y crea un par electrón-hueco, el resultado es muy similar al de una cámara de ionización.

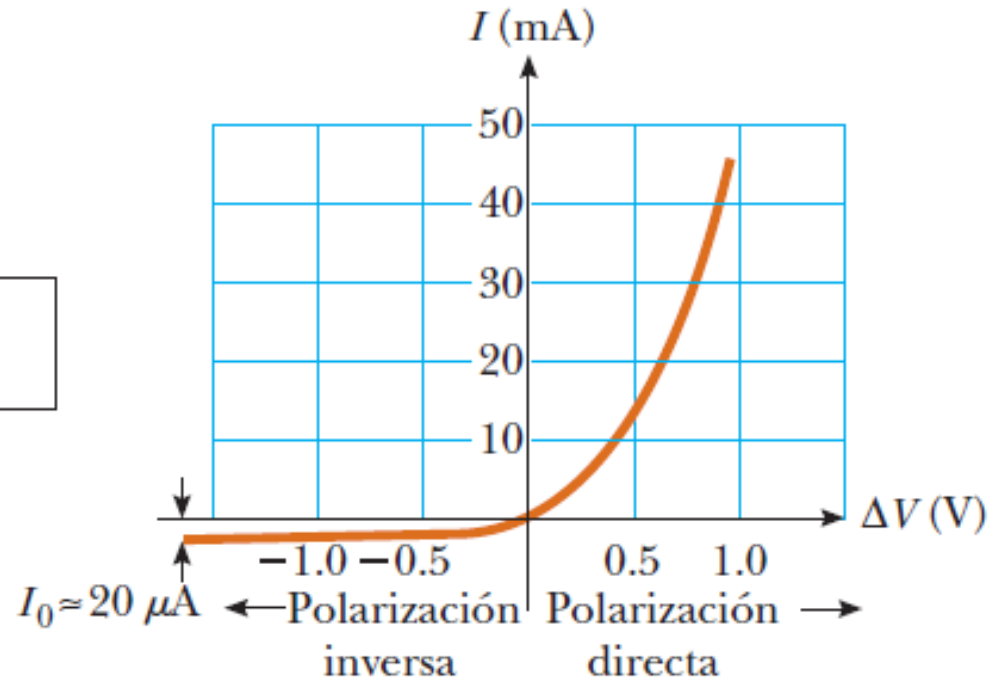
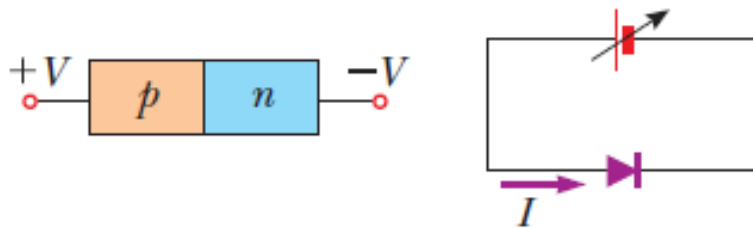
Los electrones fluyen en una dirección y los huecos en la otra. El número de electrones colectados crea un pulso eléctrico cuya amplitud es proporcional a la energía de la radiación incidente.



Estos detectores operan con voltajes de entre 1000-3000V) que aumentan la magnitud del campo eléctrico en la región de depleción haciendo más eficiente la recolección de la carga y aumentando el ancho de la región de depleción, es decir el volumen sensible del detector.

Detectores semiconductores.

Polarización directa.



Polarización inversa: se conecta el polo + de la batería al lado n del diodo.

Modo de trabajo de los detectores semiconductores.

$$I = I_0 (e^{e\Delta V/k_B T} - 1)$$



Detectores semiconductores.

Para construir estos detectores se puede partir de un semiconductor de tipo-p en el que se difunden átomos de Li.

La capa de tipo-n creada al formar detectores como $Ge(Li)$ o $Si(Li)$ es del orden de 1 mm de grosor, la cual es fácilmente penetrada por rayos γ de energía media.

Para partículas cargadas el alcance es mucho menor:

- Electrón de 1 MeV, el alcance = 1 mm en Si y Ge
- Partículas α de MeV: 0,02 mms

Una capa-n del grosor de 1 mm impediría a las partículas cargadas alcanzar la zona de depleción. Para partículas cargadas, se debe emplear otro diseño.



Detectores semiconductores.

El tiempo necesario para recoger la carga de un detector semiconductor típico encuentra en el rango **10-100 ns**, dependiendo de la geometría del detector y del punto de entrada de la radiación respecto a los electrodos.

Mucho menor que el que se tiene con una cámara de ionización, dado que aquí el recorrido que deben hacer las cargas creadas se ve reducido en varios órdenes de magnitud.

La principal desventaja de este tipo de detectores reside en que la distribución de Li a temperatura ambiente resulta sumamente inestable (tiende a condensar), por lo que estos detectores se deben almacenar y operar a bajas temperaturas (normalmente 77 K). Este efecto es mayor para Ge.

Deben ser operados y mantenidos a 77 K!!!.

Los detectores Ge (Li) pueden arruinarse por solo una hora a temperatura ambiente.

Los detectores de Si (Li) pueden tolerar niveles elevados de temperatura, pero proporcionan un óptimo rendimiento si también se almacenan a 77 K.

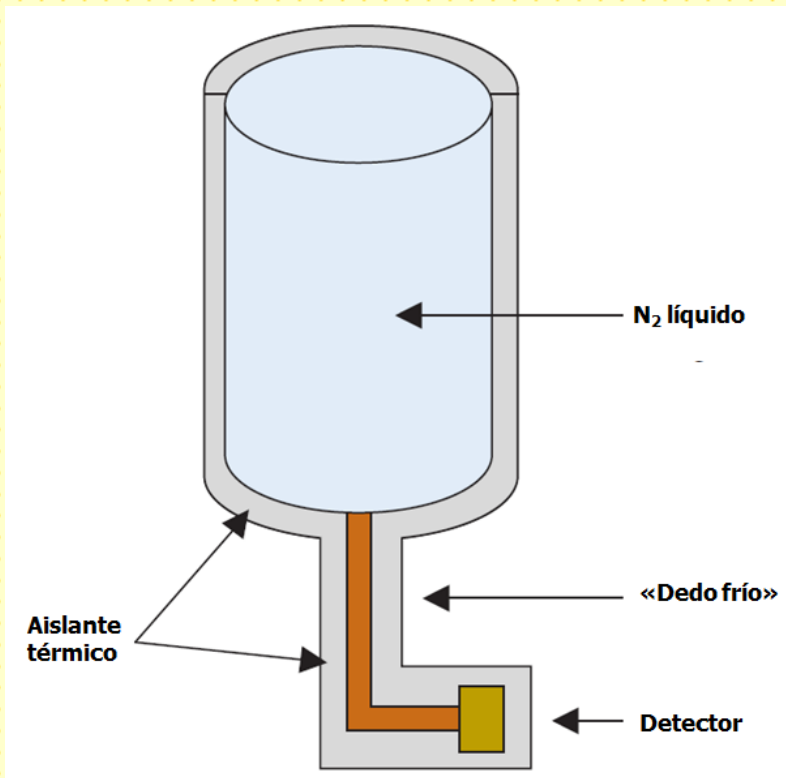


Detectores semiconductores.

Debido a las dificultades inherentes a los detectores de $Ge(Li)$, el HPGe se ha convertido en el material de detección de elección para espectroscopía γ .
(la mayoría los fabricantes ahora han dejado de producir detectores $Ge(Li)$).

Los detectores de $Si(Li)$ encuentra aplicaciones en espectroscopía de rayos X de baja energía y de partículas β (campo en el cual el número atómico bajo del Si no es una desventaja).

Detectores semiconductores.



Muchas veces el preamplificadores y parte del circuito electrónico también se enfría para reducir niveles de ruido electrónico.



Detectores semiconductores.

Los detectores de CdTe y CZT (que tiene propiedades muy similares) se han desarrollado más recientemente y no tienen las dos principales desventajas de Si y Ge:

- 1- puede ser operado a temperatura ambiente sin ruido electrónico excesivo.
- 2- Por su alto Z detectores relativamente delgados pueden tener un buen poder de frenado para rayos γ .

Si están siendo utilizados en algunas aplicaciones de Medicina Nuclear y en imágenes médicas su uso ha restringido en general a pequeños o detectores comprenden múltiples pequeños elementos debido a la dificultad y costo para crecer de piezas de grandes dimensiones con la pureza requerida.