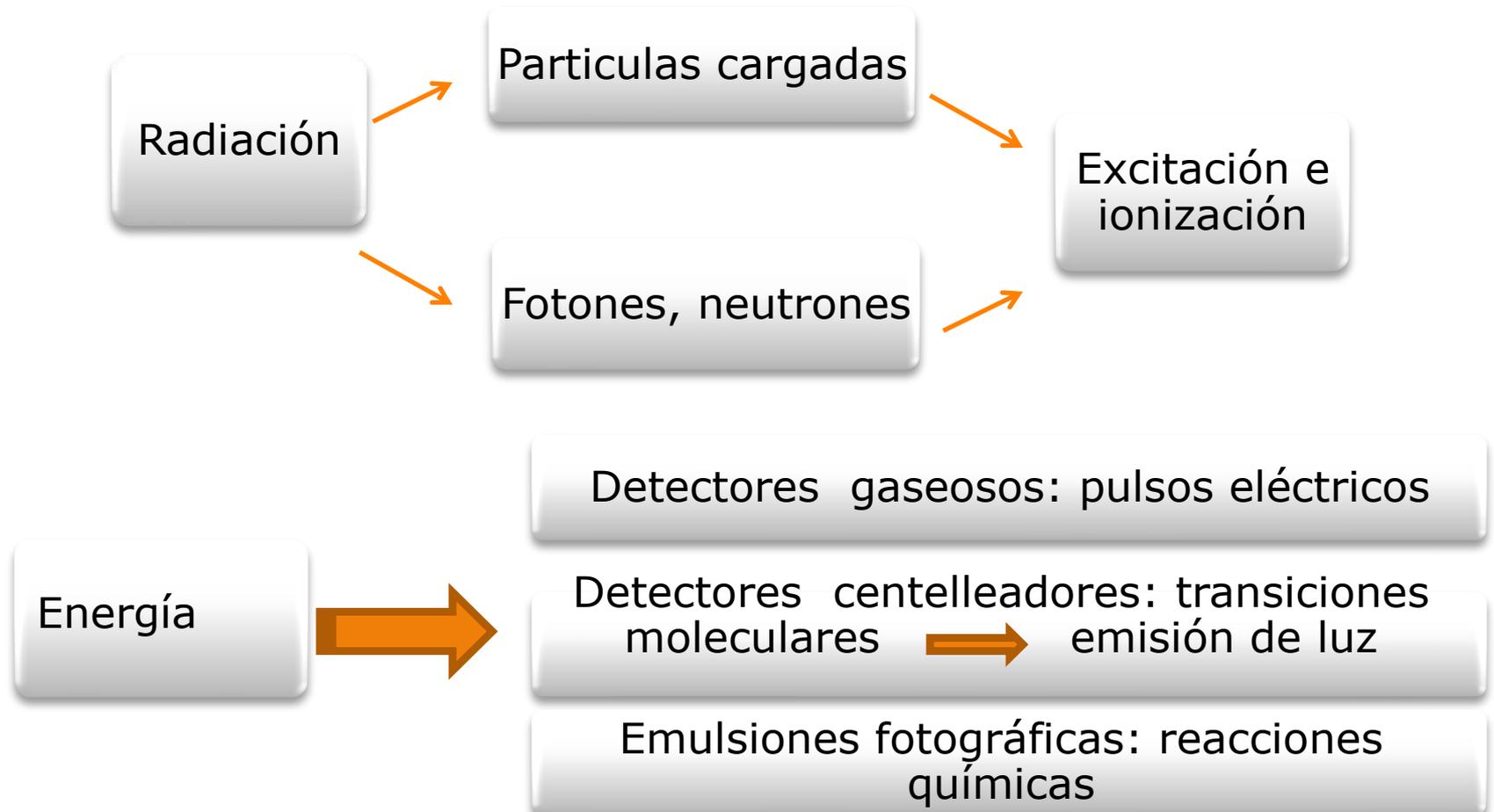


# Detección de la Radiación

ENR 2024

# Características Generales de los Detectores

**Fundamentos de la detección:** transferencia de parte o toda la energía de la radiación a la masa del detector donde es convertida a una forma perceptible.

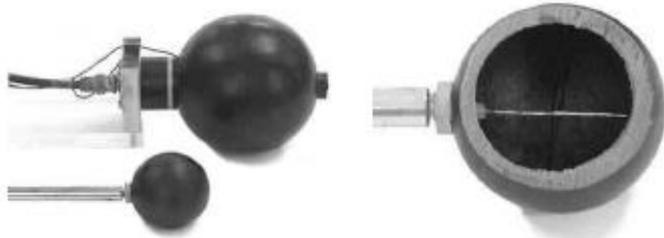


# Detectores de radiación

Un detector de radiación es cualquier *medio material* activo o pasivo que permite registrar alguna *propiedad* de un campo de radiación ionizante.

Detector *activo*: necesita un sistema electrónico de lectura en funcionamiento mientras es irradiado para obtener la señal, p.e. cámara de ionización.

Detector *pasivo*: puede ser utilizado sin necesidad de registro electrónico durante el proceso de irradiación, p.e. placa fotográfica.



Cámara de ionización Shonka con paredes de plástico conductor A-150 equivalente a tejido.



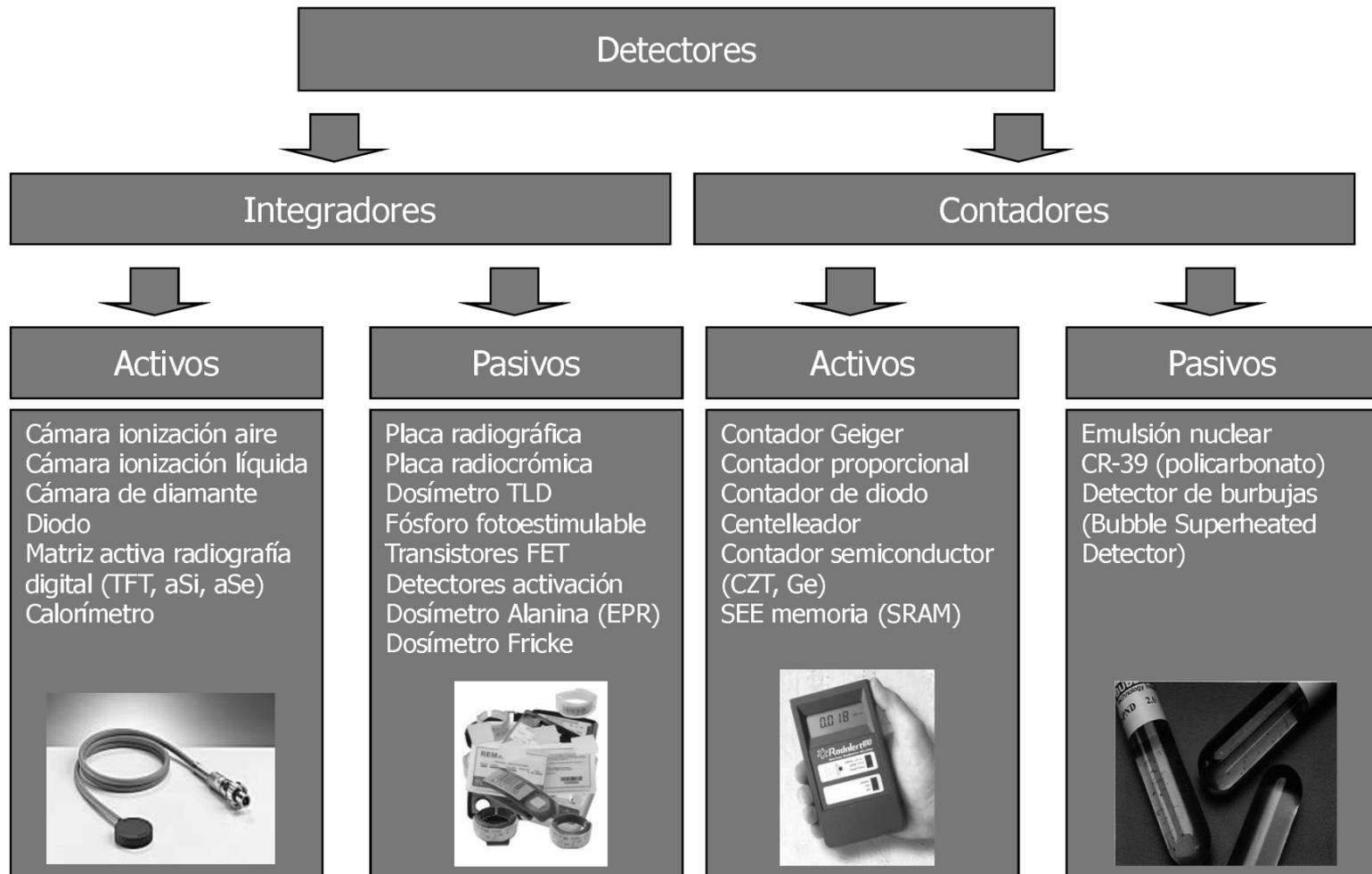
Placa radiográfica. La exposición total se traduce en densidad óptica al ser revelada.



Placa radiocrómica. Compuesta de una película de polímero se oscurece proporcionalmente a la dosis (sin revelado).

# Detectores de radiación

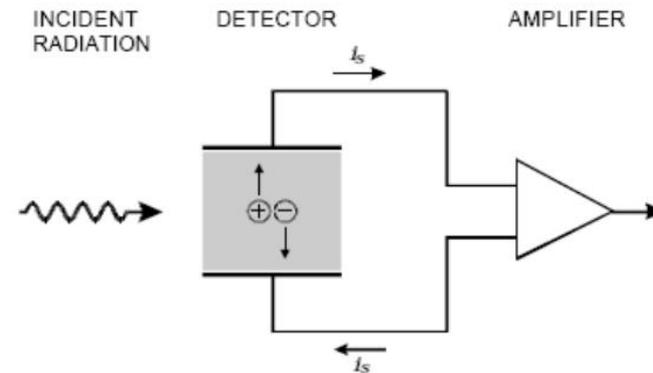
Podemos también dividir a los detectores dependiendo de si la señal que ofrecen es el resultado de integrar todos los efectos de múltiples interacciones individuales ("integradores") o bien detectores que funcionan en base a las interacciones de una sola partícula individual ("contadores").



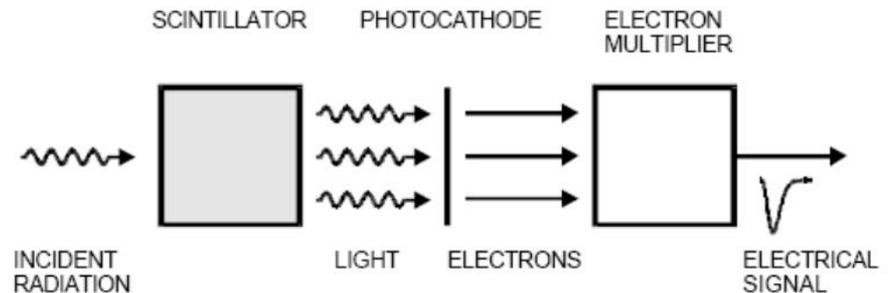
# Detectores de radiación

Según el modo de detección de la señal, los detectores se pueden dividir:

*Modo directo:* a través de la ionización del medio material, rayos X y partículas cargadas, cámara de ionización.



*Modo indirecto:* primero se produce luz que posteriormente se convierte en señal eléctrica, rayos X y partículas cargadas, centelladores.



Pueden excitarse también estados ópticos, se emite luz.

# Detección indirecta: fotosensores

Se necesita un elemento conversor de la señal de luz a señal eléctrica. Gama amplia de dispositivos.

Type	$\lambda$ (nm)	$\epsilon_Q \epsilon_C$	Gain	Risetime (ns)	Area (mm <sup>2</sup> )	1-p.e noise (Hz)	HV (V)	Price (USD)
PMT*	115–1100	0.15–0.25	$10^3$ – $10^7$	0.7–10	$10^2$ – $10^5$	$10$ – $10^4$	500–3000	100–5000
MCP*	100–650	0.01–0.10	$10^3$ – $10^7$	0.15–0.3	$10^2$ – $10^4$	0.1–200	500–3500	10–6000
HPD*	115–850	0.1–0.3	$10^3$ – $10^4$	7	$10^2$ – $10^5$	$10$ – $10^3$	$\sim 2 \times 10^4$	$\sim 600$
GPM*	115–500	0.15–0.3	$10^3$ – $10^6$	$O(0.1)$	$O(10)$	$10$ – $10^3$	300–2000	$O(10)$
APD	300–1700	$\sim 0.7$	$10$ – $10^8$	$O(1)$	$10$ – $10^3$	$1$ – $10^3$	400–1400	$O(100)$
SiPM	400–550	0.15–0.3	$10^5$ – $10^6$	$\sim 1$	1–10	$O(10^6)$	30–60	$O(10)$
VLPC	500–600	$\sim 0.9$	$\sim 5 \times 10^4$	$\sim 10$	1	$O(10^4)$	$\sim 7$	$\sim 1$

\*These devices often come in multi-anode configurations. In such cases, area, noise, and price are to be considered on a “per readout-channel” basis.

PMT: fotomultiplicador

MCP: microchannel plate

HPD: hybrid photodetector

GPM: gas photomultiplier

APD: avalanche photodiode

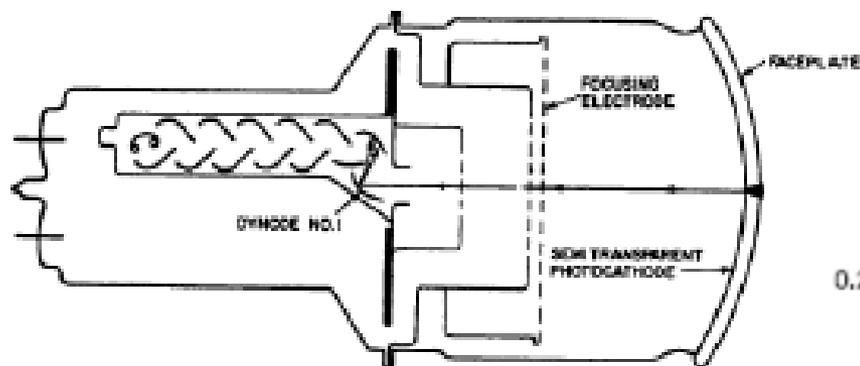
SiPM: silicon photomultiplier

VLPC: visible light photon counters

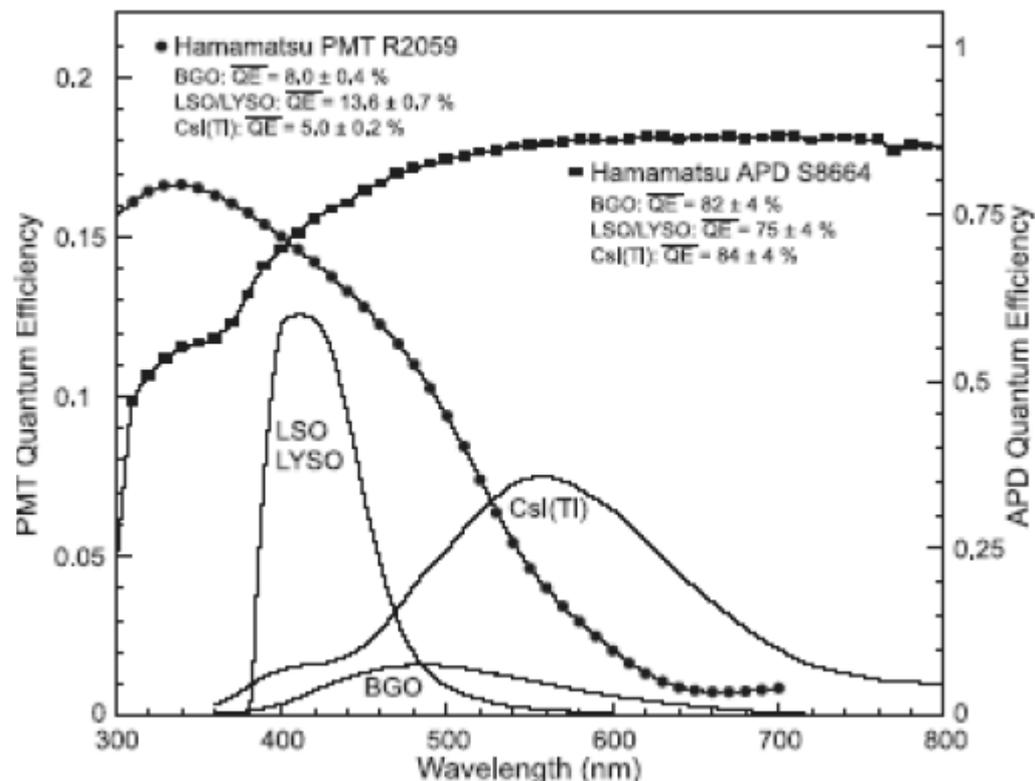


# DetECCIÓN INDIRECTA: FOTOSENSORES

El tubo fotomultiplicador es el más antiguo de los fotosensores utilizados. Se basa en la emisión de electrones por un fotocátodo (normalmente con un metal alcalino) y su posterior multiplicación por colisiones y aceleraciones sucesivas (dinodos)



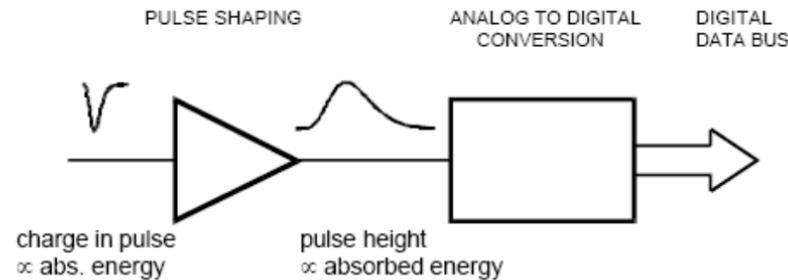
El material del fotocátodo determina la sensibilidad primaria del sensor en términos de la eficiencia de extracción del fotoelectrón. El electrón tiene que ser capaz de escapar del material del fotocátodo (work function)



# Detectores de radiación: contadores

El proceso de detección de radiación en contadores (en detectores activos y en muchos detectores pasivos) consiste en la conversión de la señal del detector en una señal eléctrica que pueda ser digitalizada para su posterior análisis o procesado.

Normalmente el detector produce una señal de carga eléctrica proporcional a la energía depositada en el medio activo del sensor. Esta carga eléctrica habitualmente es amplificada en una señal de voltaje cuya amplitud es proporcional a la carga inicial y esta amplitud es entonces digitalizada.



# Detectores de radiación: señal

Detección directa: si los cuantos de radiación incidente depositan suficiente energía en el medio material, entonces se produce la formación de un par electrón-ión en gases (y líquidos) y de un par electrón-hueco en semiconductores y metales.

$$N_{e-ion} = \frac{\Delta E}{W}$$

Otros modos de detección:

- Excitación de estados ópticos en centelleadores
- Excitación de estados de vibración de una red (fonones)
- Formación de burbujas sobrecalentadas

Valores típicos de energías de ionización/excitación:

- ~30 eV ionización en gases
- 1-5 eV ionización en cristales semiconductores
- ~10 eV excitación de estados ópticos en centelleadores
- meV energía de excitación de fonones en una red

# Factor de Fano

Consideremos un detector directo de radiación (semiconductor, líquido no polar, gas) la energía depositada se emplea en parte en la creación de pares ión-electrón y otra parte se emplea en la excitación de átomos o moléculas del medio (o de vibraciones de la red cristalina).

$$N_{e-ion} = \frac{E_0}{W}$$

Consideremos que se producen  $N_i$  ionizaciones y  $N_x$  excitaciones en el medio activo. Sean  $E_i$  y  $E_x$  las energías medias necesarias para una ionización y una excitación respectivamente. Tendremos que

$$E_0 = N_i E_i + N_x E_x$$

Normalmente en señales macroscópicas el número de ionizaciones y de excitaciones es grande. Si asumimos un comportamiento Poissoniano, entonces tendremos que

$$\sigma_x = \sqrt{N_x}; \quad \sigma_i = \sqrt{N_i}$$

Si consideramos un suceso con una energía  $E_0$  fija el número de ionizaciones y de excitaciones puede variar, pero (respecto a su valor medio) tendremos

$$0 = E_i \Delta N_i + E_x \Delta N_x$$

De aquí podemos obtener cómo las energías medias de excitación y de ionización participan en el reparto de la deposición de energía en el medio

$$E_i \sigma_i = E_x \sigma_x$$

De donde se puede deducir que

$$\sigma_i = \frac{E_x}{E_i} \sqrt{N_x}$$

A partir de la conservación de la energía obtenemos una ligadura

$$E_0 = N_i E_i + N_x E_x$$

$$N_x = \frac{E_0 - N_i E_i}{E_x}; \quad \sqrt{N_x} = \sqrt{\frac{E_0 - N_i E_i}{E_x}}$$

Finalmente obtenemos que las fluctuaciones en la ionización del medio son

$$\sigma_i = \frac{E_x}{E_i} \sqrt{\frac{E_0}{E_x} - N_i \frac{E_i}{E_x}}$$

La cantidad de ionizaciones se computa respecto a la energía total depositada

$$N_i = N_Q = \frac{E_0}{W}$$

De donde se puede deducir que

$$\sigma_i = \frac{E_x}{E_i} \sqrt{\frac{E_0}{E_x} - \frac{E_0}{W} \frac{E_i}{E_x}}$$

De aquí se puede deducir las fluctuaciones en el número de ionizaciones en función del número total de ionizaciones

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{E_0}{W}} \sqrt{\frac{E_x}{E_i} \left( \frac{W}{E_i} - 1 \right)}$$

Lo cual se puede escribir como

$$\sigma_Q = \sqrt{F N_Q}$$

$$F = \frac{E_x}{E_i} \left( \frac{W}{E_i} - 1 \right)$$

Factor de Fano

## En resumen

✓ Para calcular las fluctuaciones: La radiación no es totalmente absorbida (detector delgado).

El número de reacciones que producen señales sigue Poisson:

$$\sigma^2 = J \quad \Rightarrow \quad R = \frac{2.35\sqrt{J}}{J} = 2.35\sqrt{\frac{\omega}{E}} \propto \frac{1}{\sqrt{E}}$$

✓ La radiación se absorbe totalmente, no vale Poisson y la resolución resulta menor. Los eventos no son independientes:

$$E_{\text{rad}} = \text{cte} = n_1 E_1 = n_2 E_2 = \dots \quad \Rightarrow \quad \sigma^2 = FJ$$
$$R = \frac{2.35\sqrt{FJ}}{J} = 2.35\sqrt{\frac{F\omega}{E}}$$

$F=1$ , centelladores  
 $F<1$ , gaseosos, semiconductores

Otros factores:

$$(\Delta E)^2 = (\Delta E_{\text{ruido}})^2 + (\Delta E_{\text{elect}})^2 + \dots$$

El factor de Fano implica que no podemos aplicar estadística de Poisson de modo directo a las fluctuaciones de la carga eléctrica producida por ionización en un detector directo de la radiación

$$\text{var}(N_Q) = \overline{(N_Q - \overline{N_Q})^2} = F \overline{N_Q}$$

Medio detector	W (eV)	Factor fano
Silicio	3.6	0.1
Germanio	2.9	0.1
Ar	26.2	0.17
Ne	36.2	0.17
Ne+0.5%Ar	25.3	0.05
Ar líquido	23.3	0.11
Xe líquido	15.4	0.06

# Sensibilidad

Es la capacidad de producir una señal útil para un dado tipo de radiación y energía.

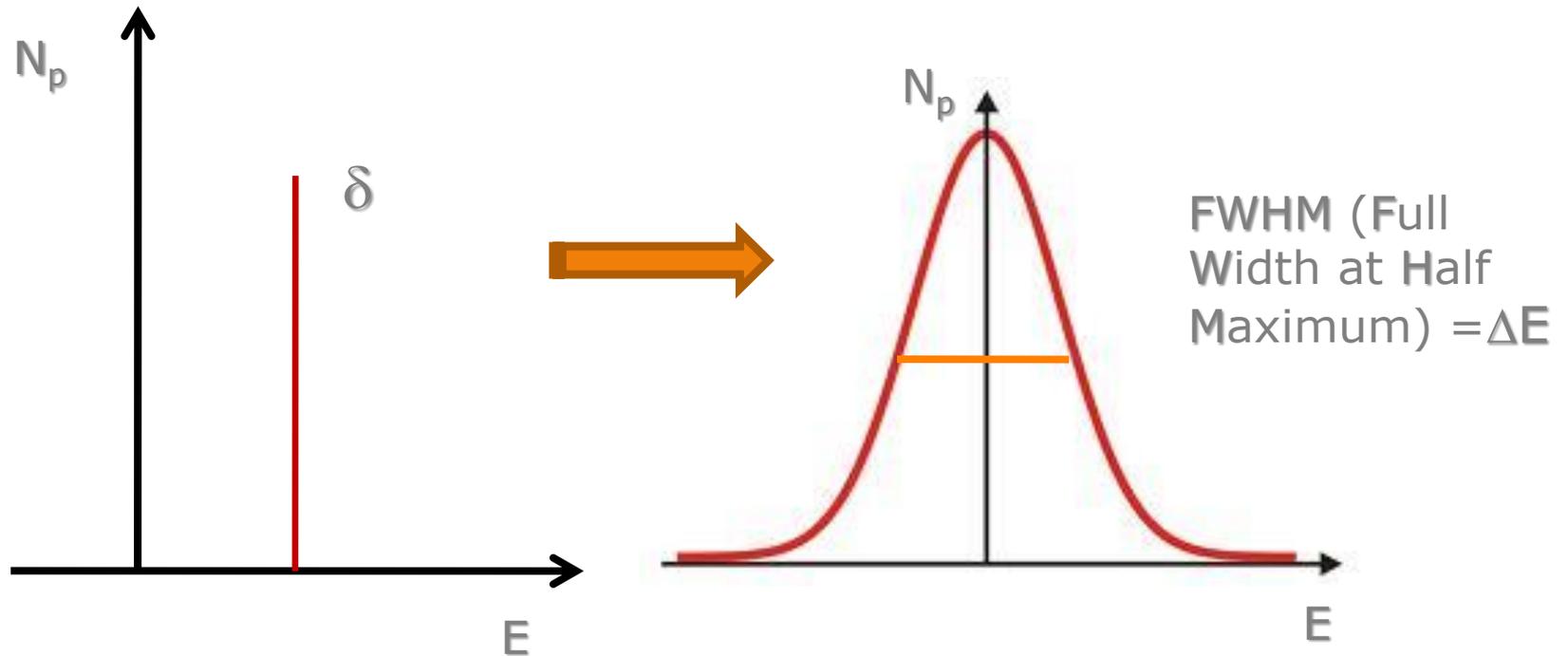
Es función de:

- i)  $\sigma_{ion}$
- ii) la masa del detector (partículas cargadas, neutras, neutrones, etc)
- iii) ruido inherente del detector
- iv) material que protege y rodea el volumen sensible del detector

# Resolución en energía

- ✓ Capacidad del detector de distinguir dos energías muy próximas
- ✓ Si el haz de radiación es monoenergético:

$$R = (\Delta E / E) \times 100$$



# Resolución en energía

$$R = (\Delta E / E) \times 100$$

Para  $E_\gamma = 1\text{MeV}$

NaI: 8-9%

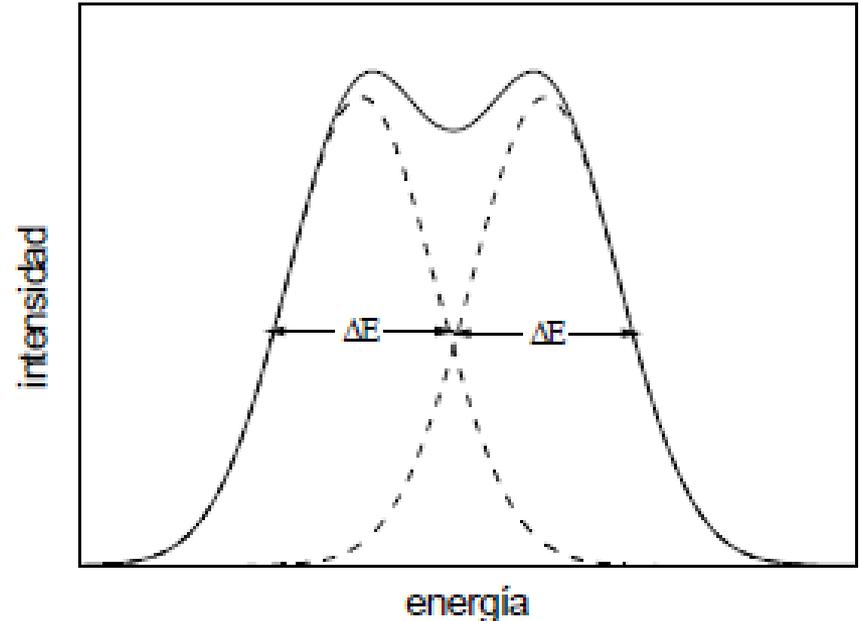
Ge: 0.1%

Dos energías se resuelven si los picos correspondientes están separados por una distancia mayor que sus **FWHM**.

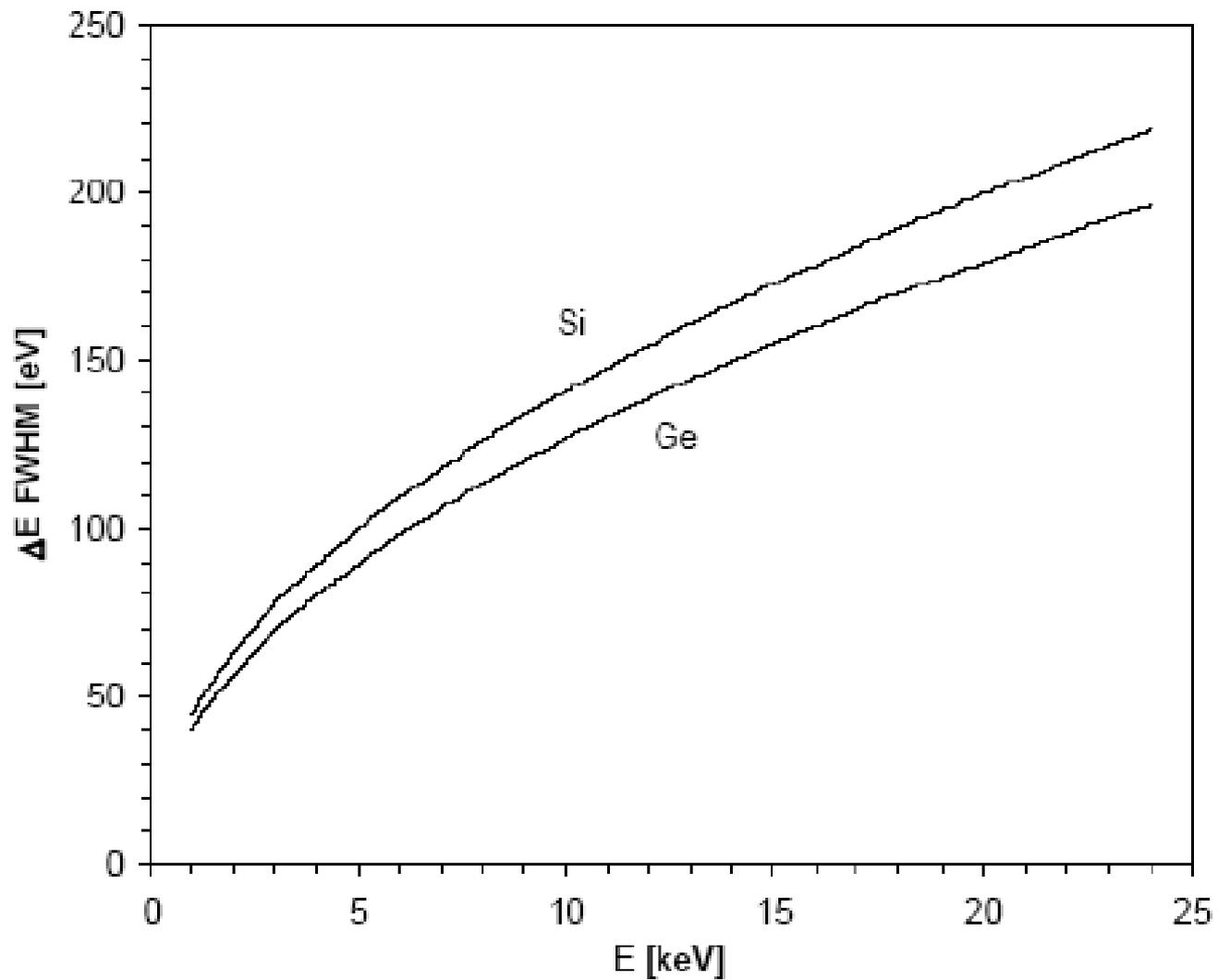
R en gral. mejora con la **E**, debido a que los procesos de excitación e ionización siguen la estadística de Poisson.

$\omega$ : energía para producir una ionización

$J = E/\omega =$  no. de ionizaciones, crece con **E**, bajan las fluctuaciones.



### Intrinsic Resolution of Si and Ge Detectors





# Respuesta

La cantidad de ionización en el cristal es proporcional a la energía absorbida.

Se supone que el procesamiento electrónico de la señal no lo modifica.

- la señal de salida es gral. un pulso eléctrico,  $i(t)$

- La cantidad de ionización =  $\int i dt$  proporcional a la altura o amplitud de pulso



$$R_{ta} = \frac{\textit{energía de la radiación}}{\textit{altura de pulso}}$$

$R_{ta} = f(\text{tipo de partícula y energía})$

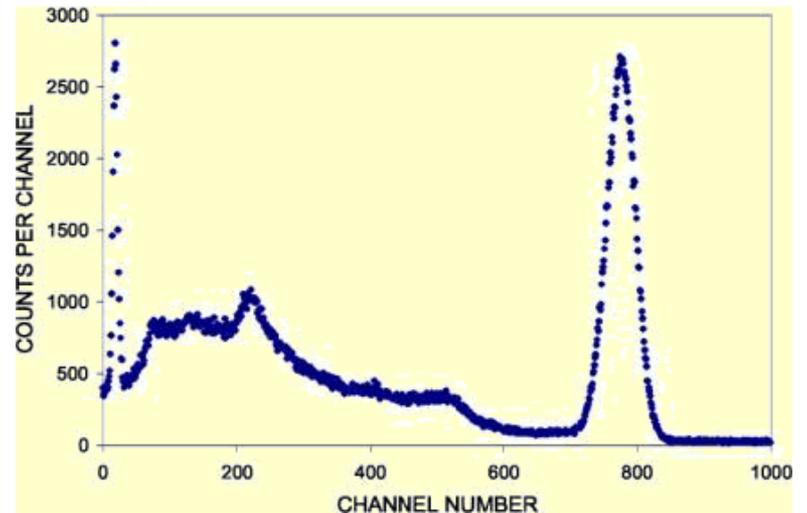
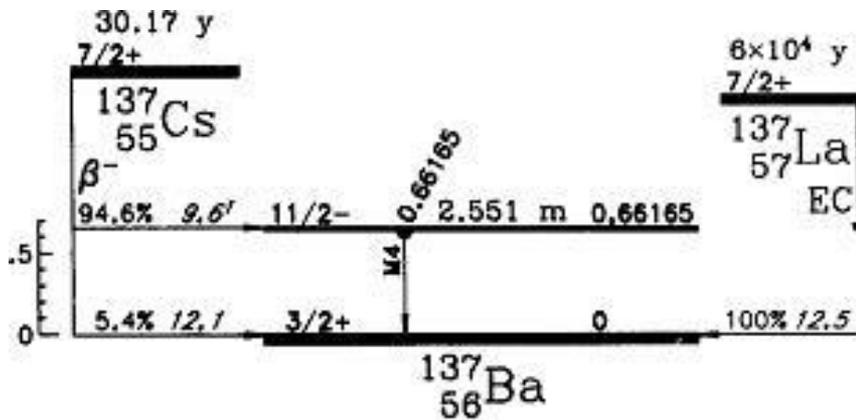
# Función Respuesta

Es el espectro de altura de pulsos que se observa del detector cuando es bombardeado por un haz monocromático de una dada radiación.

Si la respuesta es lineal, el espectro medido corresponde al espectro de energías de la radiación incidente.

$$PH(E) = \int S(E')R(E, E')dE'$$

$R_{ta}(E, E')$ : función respuesta a la energía incidente  $E'$   
 $S(E')$ : espectro de energía  $\gamma$



# Tiempo de respuesta

Es el tiempo que el detector emplea entre el arribo de la radiación y la formación del pulso: debe ser corto, pulso bien agudo con un flanco de subida lo más vertical posible.

# Eficiencia

La eficiencia absoluta o eficiencia total:

$$\epsilon_{\text{total}} = \frac{\text{eventos registrados}}{\text{eventos emitidos por la fuente}}$$

Es una función de la geometría del detector y la probabilidad de una interacción en el detector:

$$P(\theta)d\Omega = d\Omega / 4\pi$$

# Eficiencia

La probabilidad que la radiación interactúe con el detector:

$$P_{\text{int}} = 1 - e^{-x/\lambda}$$

Luego,

$$d\varepsilon_{\text{tot}} = (1 - e^{-x/\lambda}) d\Omega / 4\pi$$

Se puede factorizar en dos términos:

$$\varepsilon_{\text{tot}} = (1 - e^{-x/\lambda}) \int d\Omega / 4\pi = \varepsilon_{\text{int}} \varepsilon_{\text{geom}}$$

donde

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

Depende de la sección eficaz de interacción, por tanto del tipo de radiación, energía.

# Tiempo muerto

Es el tiempo requerido por el detector para procesar un evento usualmente vinculado a la duración de la señal pulso.

- ✓ Si el detector está insensible durante  $\tau$ , no cuenta otro pulso y se afecta el conteo.
- ✓ Si el detector está sensible durante  $\tau$ , los efectos se suman y la información se distorsiona.

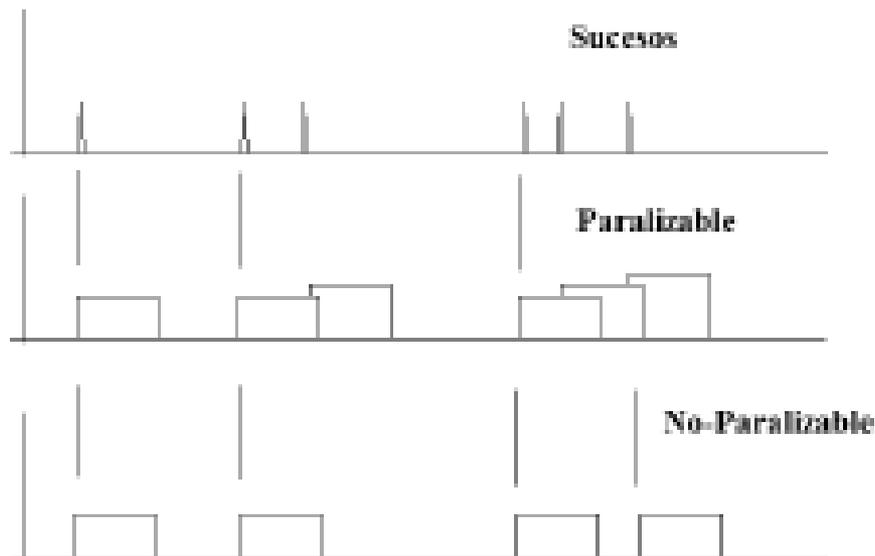


- ✓ Se afecta el conteo y la energía
  - ✓ Se distorsiona la distribución temporal entre arribos de eventos, que deja de ser de Poisson
- 
- ✓ El conteo debe ser suficientemente bajo para que un segundo evento no ocurra dentro de  $\tau$ .
  - ✓ Cada elemento del sistema de detección tiene su tiempo muerto:  
 $\tau_{\text{electr}} \gg \tau_{\text{detector}}$

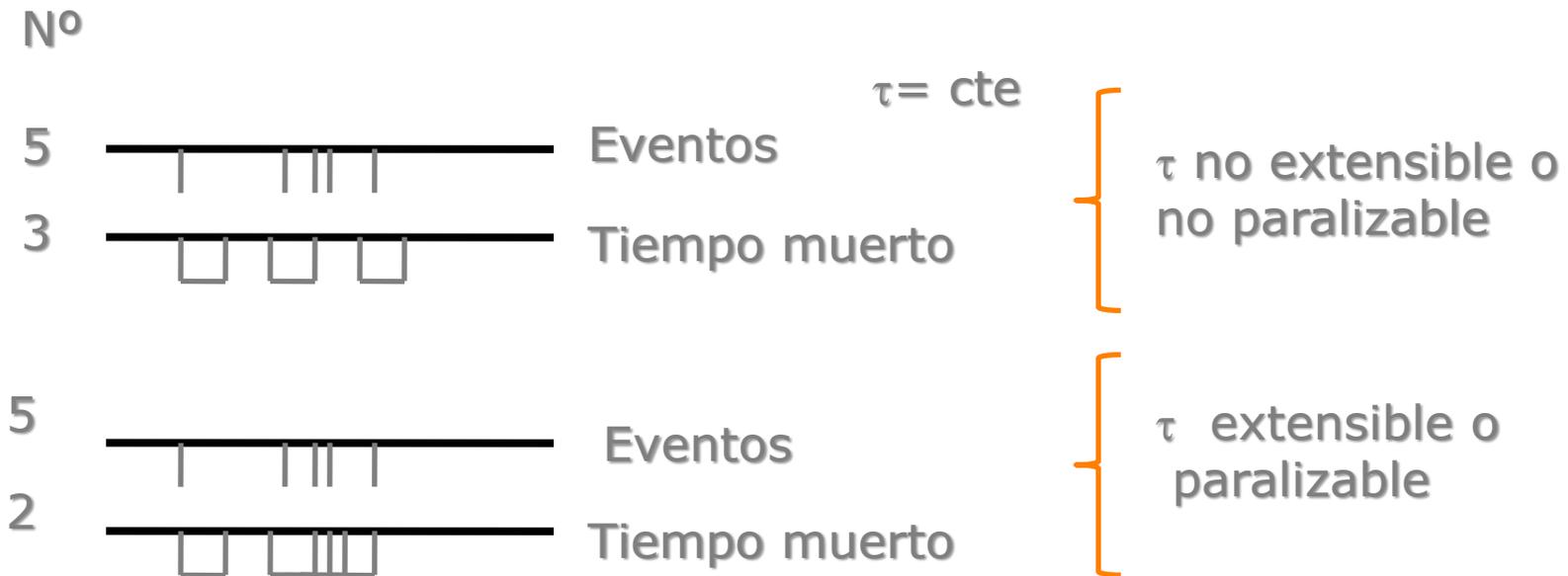
# Tiempo muerto

El tiempo muerto en la respuesta del sistema de adquisición se divide en dos categorías:

- ✓ Sistemas no-paralizables: registran un suceso y tienen un tiempo muerto fijo (independiente de la existencia de un segundo suceso)
- ✓ Sistemas paralizables: se incrementa proporcionalmente a la existencia de un suceso en ese intervalo.



# Efecto de $\tau$ sobre el contaje



# Efecto de $\tau$ sobre el contaje

Para el 1<sup>er</sup>. caso:

$m$ : contaje verdadero

$k$ : cuentas medidas en un tiempo  $T$

$k\tau$ : tiempo muerto total durante el tiempo de contaje  $T$

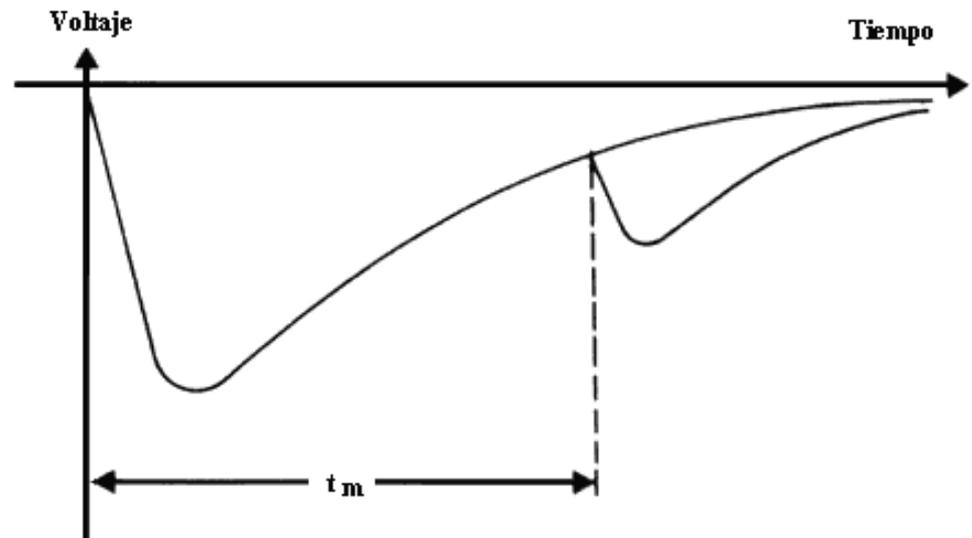
$mT$ : cuentas totales en  $T$

Contaje no detectado

$$mT = k + mk\tau$$

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

Cuando  $\tau \ll T$ ,  $m \rightarrow k/T$



# Efecto de $\tau$ sobre el contaje

Para el 2<sup>do</sup>. caso, solo se detectan los sucesos que no se solapan. Asumiendo una estadística de Poisson, la probabilidad de que dos sucesos no solapen:

$$P(t) = m \exp(-mt)$$

La probabilidad para  $t > \tau$ :

$$P(t > \tau) = m \int_{\tau}^{\infty} \exp(-mt) dt = \exp(-m\tau)$$

El número de cuentas observadas al tiempo  $T$ , será la fracción de  $mT$  que satisfaga la condición :

$$k = mT \exp(-m\tau)$$

El valor verdadero,  $m$  se obtiene resolviendo numéricamente.

En un sistema no-paralizable la tasa observada crece monótonamente con el número de sucesos, mientras que en el paralizable llega a decrecer con  $m$  grande.

# Medida de $\tau$

Método de las dos fuentes:

Se miden dos fuentes separadas y juntas

$m_1, m_2$ : contajes verdaderos

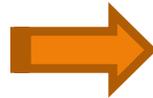
$R_1, R_2, R_{12}$ : contajes medidos, no hay fondo

Configuración idéntica

$$m_1 = R_1 [1 - R_1 \tau]^{-1}$$

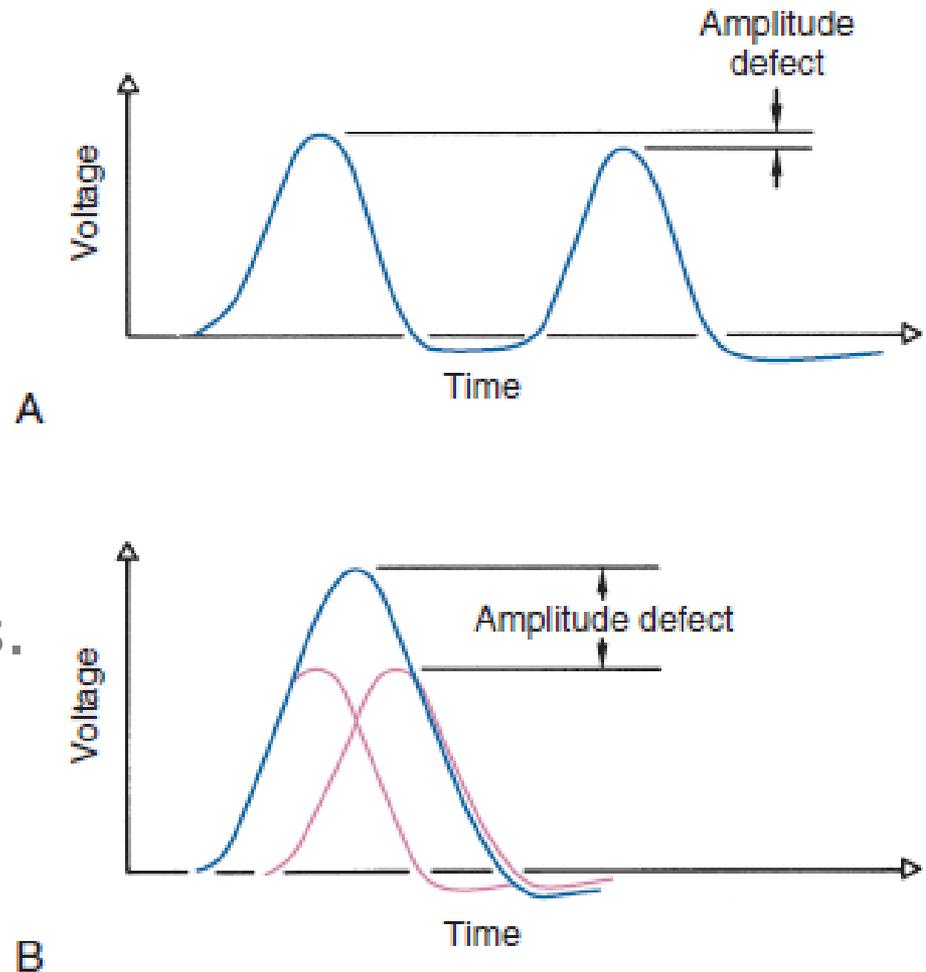
$$m_2 = R_2 [1 - R_2 \tau]^{-1}$$

$$m_1 + m_2 = R_{12} [1 - R_{12} \tau]^{-1} = R_1 [1 - R_1 \tau]^{-1} + R_2 [1 - R_2 \tau]^{-1}$$



$$\tau \geq 5-10 \%$$

Corrimiento de *la línea de base* y *pulsos de apilamiento (pile up)* son dos problemas que surgen ligados a la superposición de pulsos.



**FIGURE 8-6** A, Schematic representation of baseline shift, caused by a pulse riding on the “tail” of a preceding pulse. B, Pulse pile-up effects for two pulses occurring very close together in time.

# Tipos de detectores



RMA - 2023

Profesora: Laura Damonte

JTP: Diego Richard

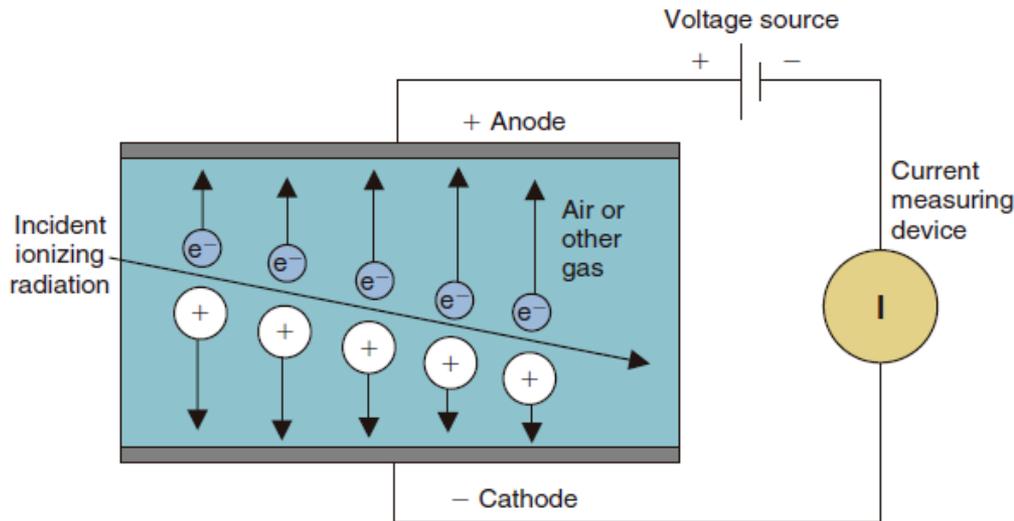
# Detectores de Ionización Gaseosos

- ✓ Detectores más antiguos en la detección de la radiación.
- ✓ Usados en los primeros 50 años del siglo pasado: *cámara de ionización, contador proporcional, contador Geiger-Müller.*
- ✓ Diversos tipos, sus propiedades fundamentales son similares.
- ✓ Se basan en la recolección directa de los  $e^-$  e iones producidos.
- ✓ Actualmente, solo como monitores de la radiación.



**FIGURE 7-3** A battery-powered radiation survey meter. An ionization chamber is contained in the base of the unit, with the entrance window on the bottom face of the device (not shown). The meter indicates radiation level. The rotary switch is used to select different scale factors. (Courtesy Ludlum Measurements, Inc., Sweetwater, TX.)

# Detectores de Ionización Gaseosos



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

✓ Consta de un gas encerrado en un recipiente de paredes delgadas con un alambre central.

- ✓ Entre el alambre y las paredes del cilindro se aplica un voltaje alto y positivo.
- ✓ La diferencia de potencial aplicada hace que los  $e^-$  se muevan hacia el ánodo y los iones positivos hacia el cátodo, evitándose así la recombinación.
- ✓ La corriente eléctrica generada da lugar a pulsos que son contados directamente, o activan un medidor de corriente.
- ✓ Baja eficiencia para fotones (1%) pero buenos para partículas  $\alpha$  o  $\beta$ .
- ✓ Cualquier gas, incluso aire, mezcla de gas inerte con gas orgánico.
- ✓ Cada gas tiene diferente potencial de ionización: 30-40 eV

# Detectores gaseosos

✓ La magnitud de estos efectos depende del tipo de gas, del voltaje aplicado y del tamaño del detector. Los diferentes detectores gaseosos se distinguen por su operación en diferentes regiones de voltaje.

**V=0:** todo se recombina

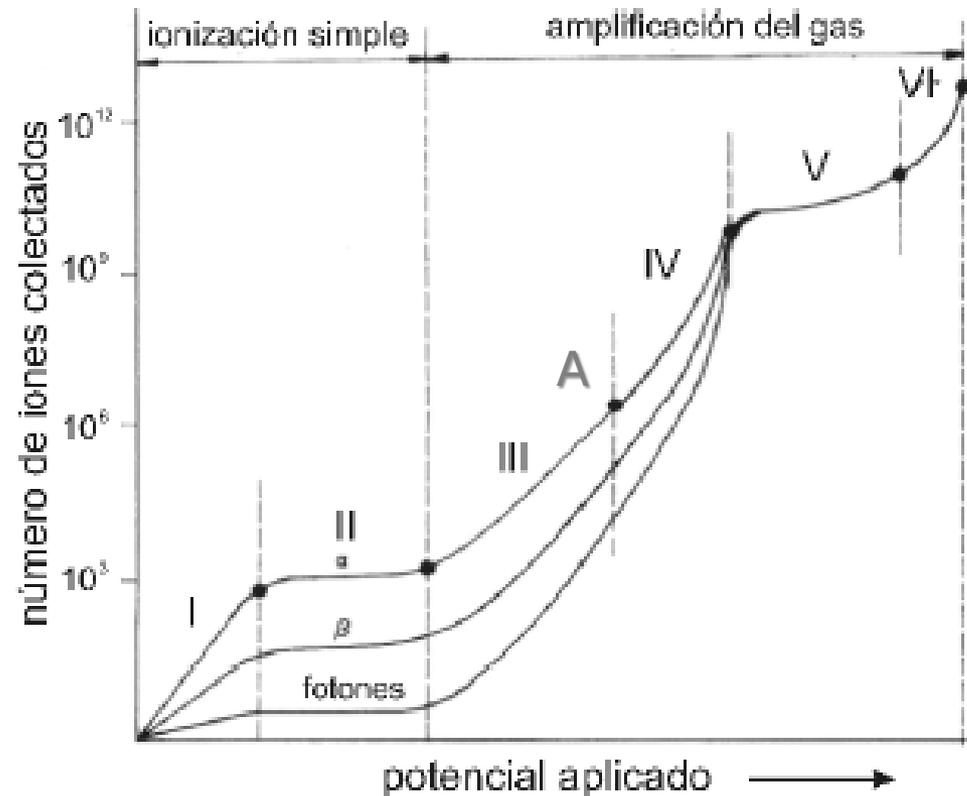
**I:**  $F_e > F_{\text{recom}}$  y N crece con V

**II:** se colectan todos  
 $N \neq f(V)$ ,  
región *Cámara de Ionización*

**III:** ionización secundaria  
(avalancha o cascada),  
Se amplifica  $10^6$ , *Contador proporcional*

**IV:** *proporcionalidad limitada*

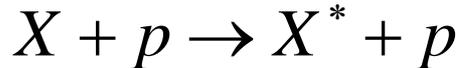
**V:** *Geiger -Müller*, **VI:** *descarga continua, inutil*



# Fenómenos de ionización en gases

Una partícula cargada pierde su energía por:

i) excitación



Se necesitan energías bajas pero definidas.  
Para gases nobles  $\sigma \approx 10^{-17} \text{ cm}^2$

ii) ionización:



Ionización primaria sin requerimiento de energía pero tienen un umbral alto  
 $\sigma \approx 10^{-16} \text{ cm}^2$   
Se producen ionizaciones secundarias dada la alta energía del  $e^-$  primario.

Efecto Penning (estado metaestable):



Iones Moleculares en gases nobles



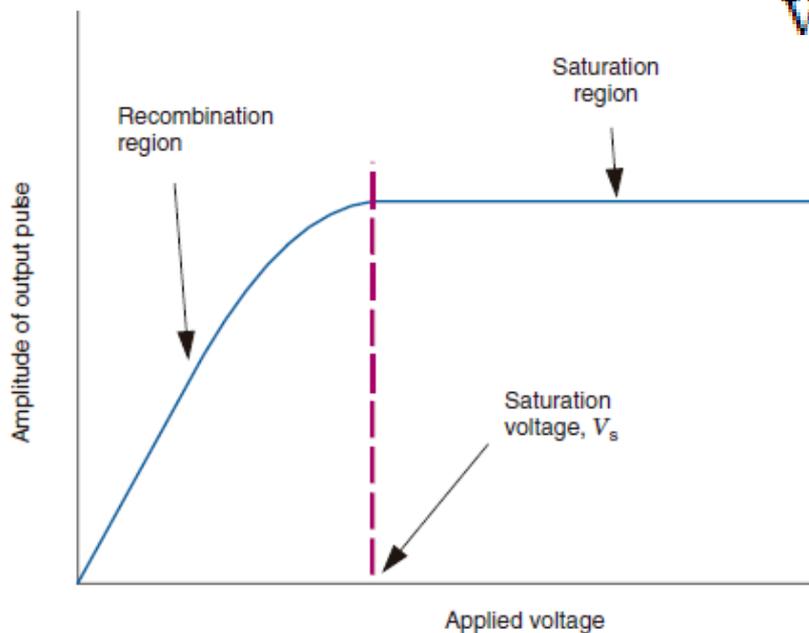
# Cámara de Ionización

La energía media necesaria para producir un ión en aire es de unos 35 eV,

1 MeV  $\longrightarrow$   $10^6/35=3 \times 10^4$  iones y electrones.

Una cámara de ionización de tamaño medio, 100 cm<sup>2</sup> con una separación de 1 cm entre las placas y capacidad de 8,9 pF, el voltaje del pulso recogido es

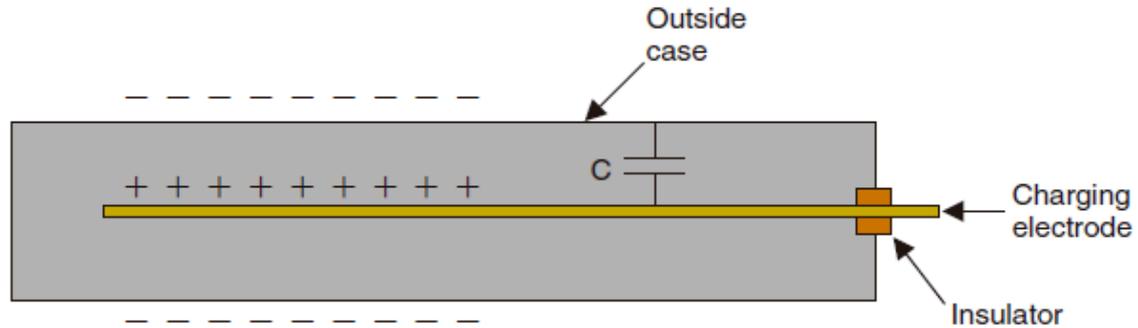
$$V = \frac{(3 \times 10^4 \text{ iones})(1,6 \times 10^{-19} \text{ C/ion})}{8,9 \times 10^{-12} \text{ F}} \cong 0,5 \text{ mV}$$



Voltaje de 100 V, la  $v_{\text{ion}} = 1 \text{ m/s}$  y  $t = 0,01 \text{ s}$  en atravesar una cámara de 1 cm de grosor.

Una fuente de  $3,7 \times 10^7 \text{ Bq}$  da un promedio de una desintegración cada 30 ms. Por tanto, la cámara de ionización no sirve como contador de señales individuales o actividades altas.

# Dosímetro de bolsillo



$$Q = V \times C$$



# Contador Proporcional

✓ Voltajes mayores a los 1000 V → ionizaciones secundarias

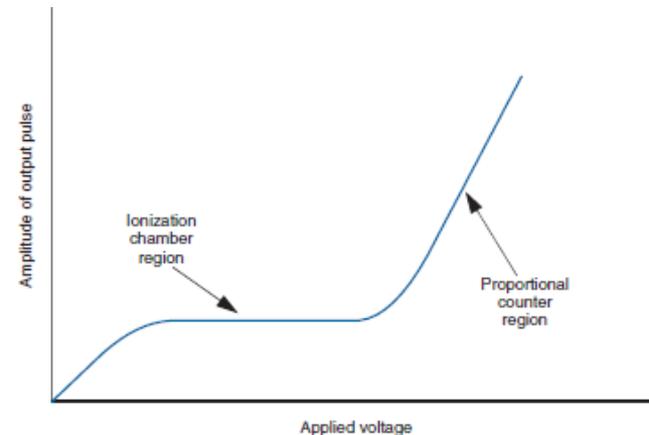
→ avalancha o cascada de ionizaciones.

✓ Entre 1000 y 100000 ionizaciones secundarias, el número de pares electrón/ión es proporcional al número de ionizaciones primarias y por ende, a la energía y tipo de partícula incidente sobre el detector.



*contador proporcional*

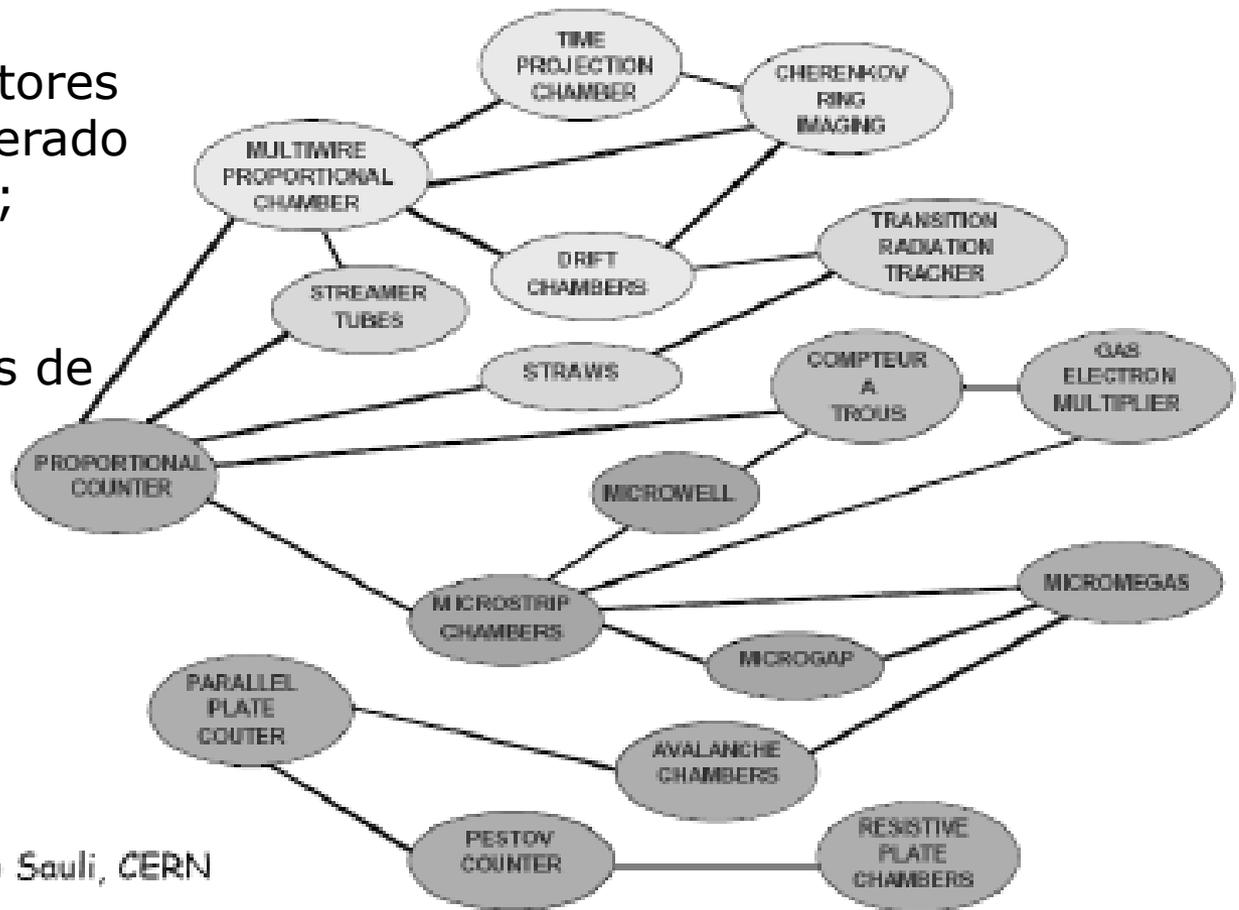
✓ Estos detectores se emplean para detectar fotones y electrones de baja energía. En el caso en que el gas es  $\text{BF}_3$  o  $^3\text{He}$  se pueden detectar neutrones con energías en el rango desde 0,1 eV hasta 100 keV.



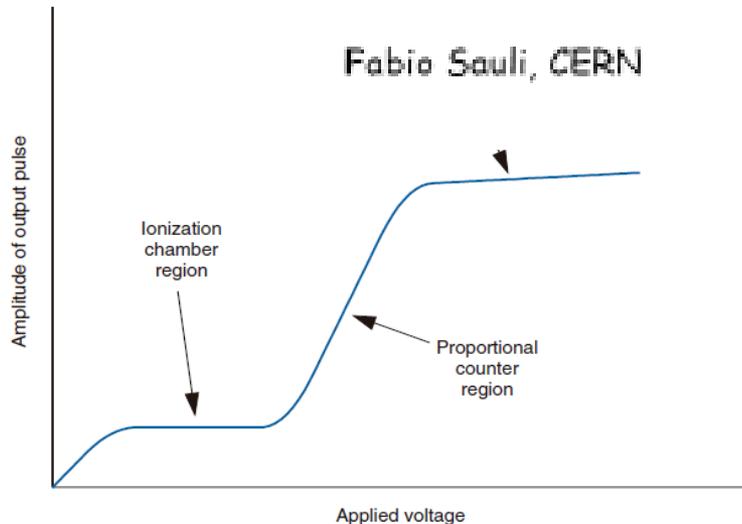
# Contador Geiger-Müller

- ✓ En la región Geiger-Müller se generan avalanchas secundarias en cualquier parte del tubo.
- ✓ El factor de amplificación puede llegar a ser de hasta  $10^{10}$  veces.
- ✓ Se pierde la relación entre la carga del pulso generado y la energía y tipo de partícula incidente.
- ✓ Un detector Geiger-Müller produce un pulso de salida de aprox. 1 V de tensión.
- ✓ El tiempo de colección de carga es del orden de  $10^{-6}$  s y el tiempo necesario para completar este ciclo es del orden de  $10^{-4}$ - $10^{-3}$  s.
- ✓ Gas de apagado, compuesto por moléculas orgánicas complejas, como el etanol.
- ✓ Detectan la presencia de radiación, pero no pueden determinar la energía ni el tipo de partícula incidente.
- ✓ Son los más usados a fines de monitoreos rutinarios porque son fáciles de operar, son de construcción sencilla y se pueden incorporar a un monitor portátil.
- ✓ Generalmente operan con voltaje de alrededor de **700** a **800 V**, pero esto puede variar según el diseño de cada detector.

El número de detectores gaseosos ha proliferado en los últimos años; desde las cámaras multihilo hasta los detectores gaseosos de microestructura.



Fabio Sauli, CERN



# Aplicaciones de los Detectores Gaseosos

- ✓ Calibradores de dosis: cámaras de ionización para ensayar cantidades relativamente grandes (MBq)
- ✓ Medir y verificar la actividad de eluentes de un generador, preparaciones para pacientes, envíos de fuentes radioactivas, etc
- ✓ Típicamente son cámaras llenas con Ar, presurizadas.
- ✓ Contadores de flujo: modo proporcional o Geiger-Müller para medir actividades de emisores  $\beta$ . Para medir emisiones de gases en cromatografía:  $^3\text{H}$  or  $^{14}\text{C}$  (gas: 90% He más 10% metano).



**FIGURE 12-17** An ionization chamber dose calibrator. Samples are inserted into the well in the sealed ionization chamber. The current is measured and displayed on a digital readout. (Courtesy Biodex Medical Systems, Shirley, NY.)

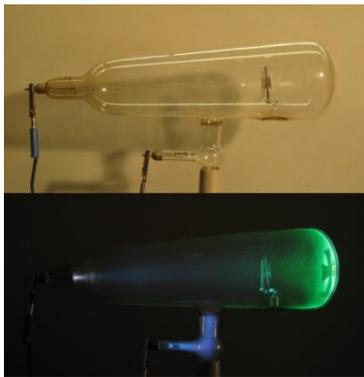
# Detectores de centelleo. Fundamentos



**William Crookes**, (Londres, 1832 - 1919) Físico y químico inglés. Descubrió el elemento químico talio.

Su tubo de descarga de rayos catódicos , *tubo de Crookes* formó parte de todos los laboratorios experimentales y permitió descubrir el electrón y el efecto fotoeléctrico.

Inventó el *espintariscopio* (1903), con el que se detectaba la emisión de partículas alfa de los elementos radiactivos.



*Tubo de Crookes*



*espintariscopios*

# Detectores de centelleo. Fundamentos

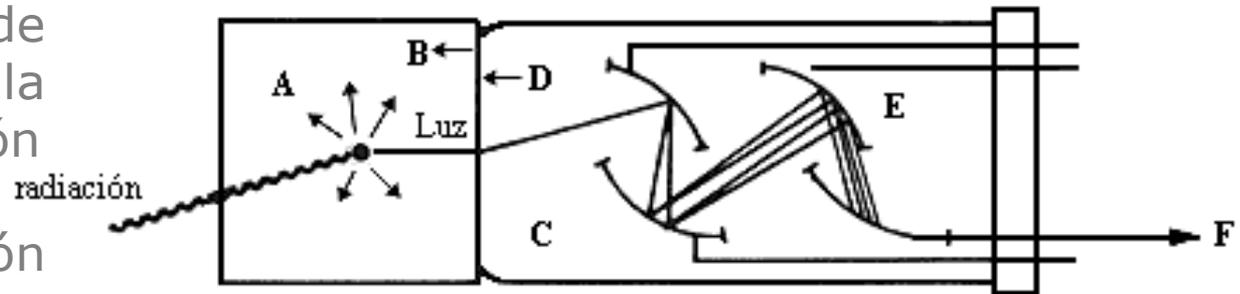
- ✓ Un centelleador es un material que centellea, o sea, exhibe luminiscencia cuando por él pasa radiación ionizante (electrones, positrones u otras partículas o iones más pesados).
- ✓ La re-emisión es en forma de un corto destello de luz, típicamente en el rango de la luz visible.
- ✓ Si esta re-emisión es rápida ( $< 10^{-8}\text{s}$ )  fluorescencia.
- ✓ Si la excitación es metaestable ( $\mu\text{s}$  a horas)  fosforescencia.
- ✓ Consistía en una pantalla de ZnS que emitía destellos luminosos producidos por partículas alpha de una fuente de radio pequeña.
- ✓ Necesidad de adaptar el ojo en una habitación oscura.
- ✓ Se detectan eventos individuales.
- ✓ **1944:** Curran y Baker sustituyeron el ojo por el *fotomultiplicador*.

# Detectores de centelleo

✓ En ciertos sólidos la radiación produce pequeños destellos luminosos que se recogen y transforman en un pulso eléctrico.

✓ Un sólido, por su mayor densidad, es más eficiente en detener la radiación que un gas. Por lo tanto, la eficiencia de un detector de centelleo es muy superior a la de uno de gas, especialmente para rayos gamma.

✓ El proceso de luminiscencia, o sea la absorción de radiación y la posterior emisión de luz, es muy rápido, disminuyendo el tiempo muerto.



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

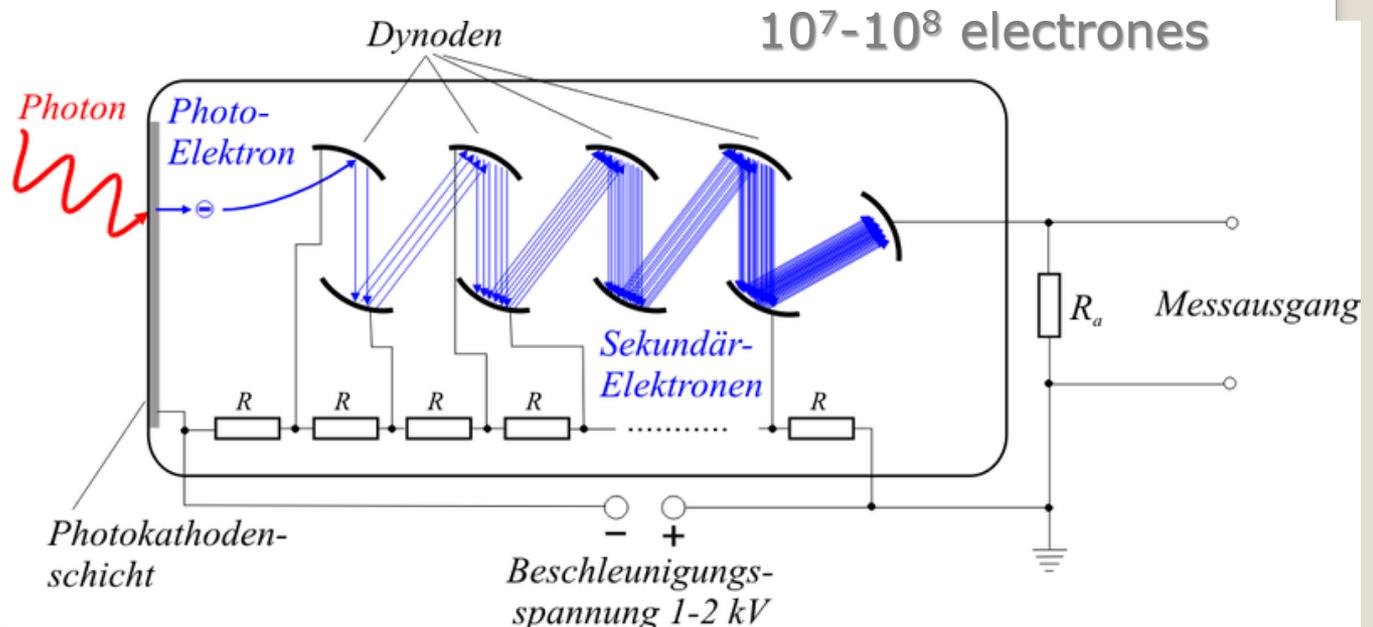
# Detectores de centelleo. Características

- ✓ Se selecciona para que tenga una alta eficiencia en absorber radiación ionizante y emitir luz (luminiscencia).
- ✓ Debe ser transparente a la longitud de onda de su propia emisión para poder transmitir la luz producida, y debe estar a oscuras para que la luz ambiental no le afecte.
- ✓ *Sensibilidad a la energía*: para  $E_{rad} > E_{umbral}$ , lineales a la energía de la radiación incidente, de modo que la intensidad de la luz sea proporcional a la energía depositada en un amplio rango de longitudes de onda.
- ✓ *Respuesta temporal rápida*: El tiempo de decaimiento de la luminiscencia debe ser corto para que los pulsos de la señal producida sean rápidos.   $\Delta t$  entre eventos muy cortos  alta precisión
- ✓ *Discriminación forma de pulso*: es posible identificar entre diferentes tipos de partículas. Las partículas con diferente poder de ionización inducen excitaciones distintas por mecanismos fluorescentes diferentes.

# Detectores de centelleo. Características

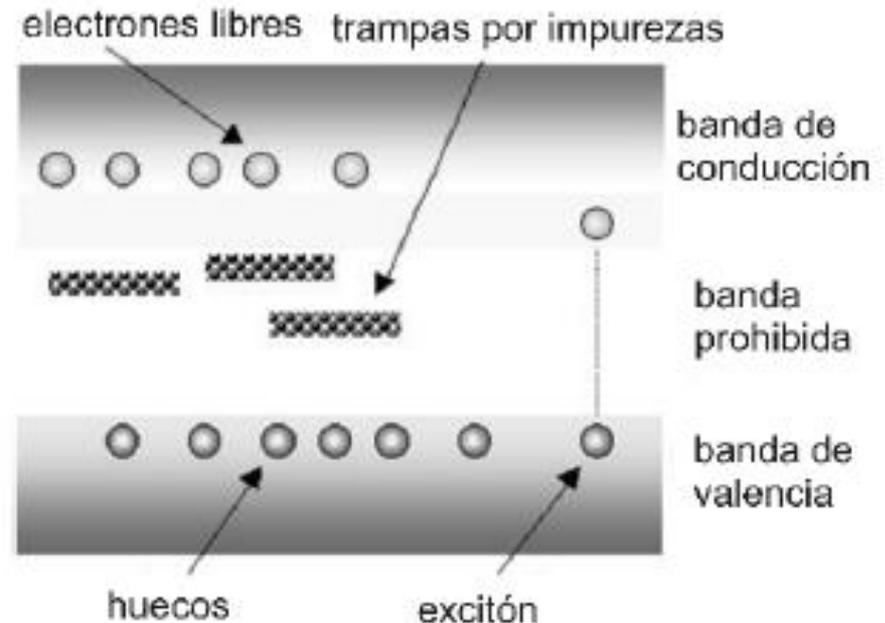
- ✓ Debe tener buena calidad óptica y poder ser fabricado en tamaños grandes, compatibles con los requerimientos experimentales.
- ✓ Debe tener un índice de refracción cercano al del vidrio (1,5) para que el acoplamiento óptico con el fototubo sea bueno.
- ✓ El contacto debe ser óptico (por ej. con grasa transparente) para que no haya pérdidas. El tubo fotomultiplicador es un recipiente de vidrio sellado y al alto vacío:

✓ En el ánodo la señal eléctrica es suficientemente grande para poder ser manejada con amplificadores y analizadores de pulsos convencionales.



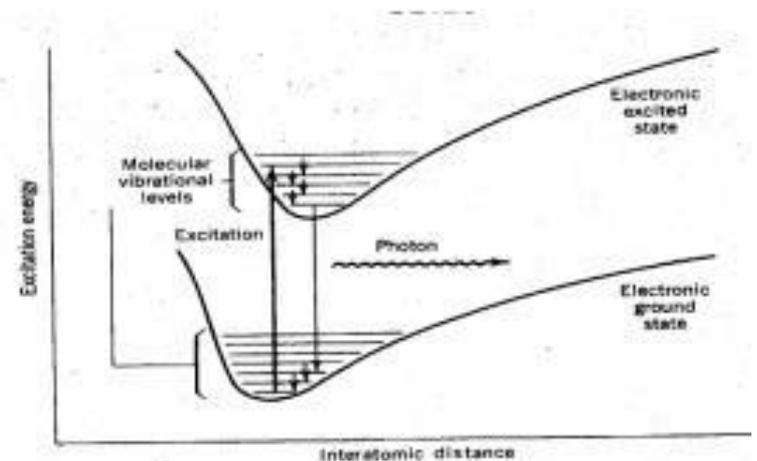
# Detectores de centelleo. Tipos

- ✓ Cristales orgánicos, líquidos orgánicos, plásticos, cristales inorgánicos, gases y vidrios.
- ✓ Uno de los materiales más empleado en la detección de fotones es el ioduro de sodio activado con talio, NaI(Tl), otro usado es el fluoruro de bario  $BaF_2$ .
- ✓ Para detectar neutrones suelen emplearse materiales orgánicos plásticos, siendo los más importantes el antraceno ( $C_{14}H_{10}$ ) y el estilbena ( $C_{14}H_{12}$ ).
- ✓ Para ciertas aplicaciones en bioquímica y medioambiente son útiles también los centelladores líquidos orgánicos.



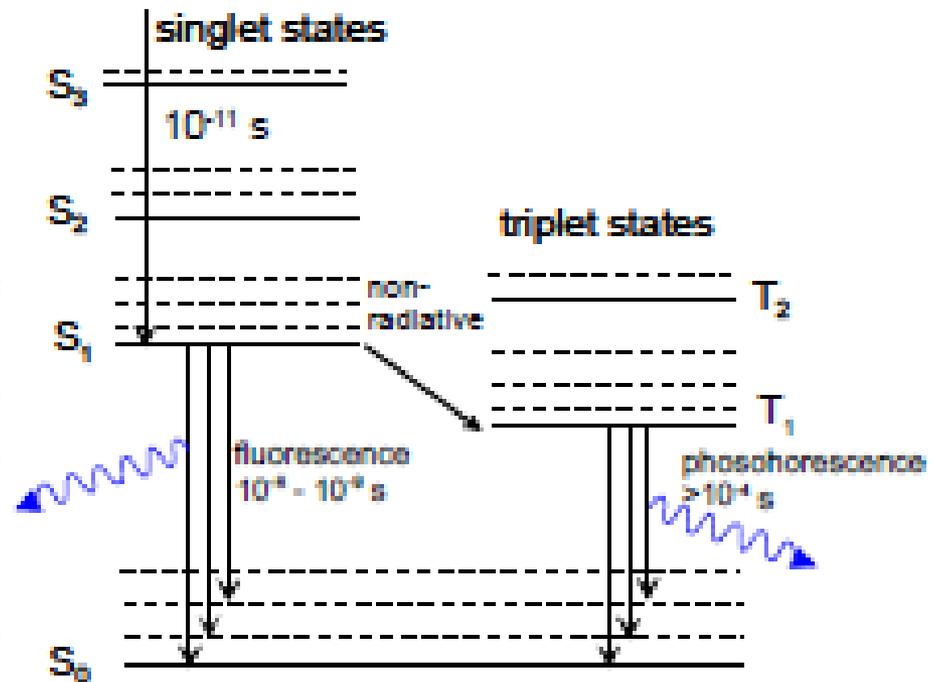
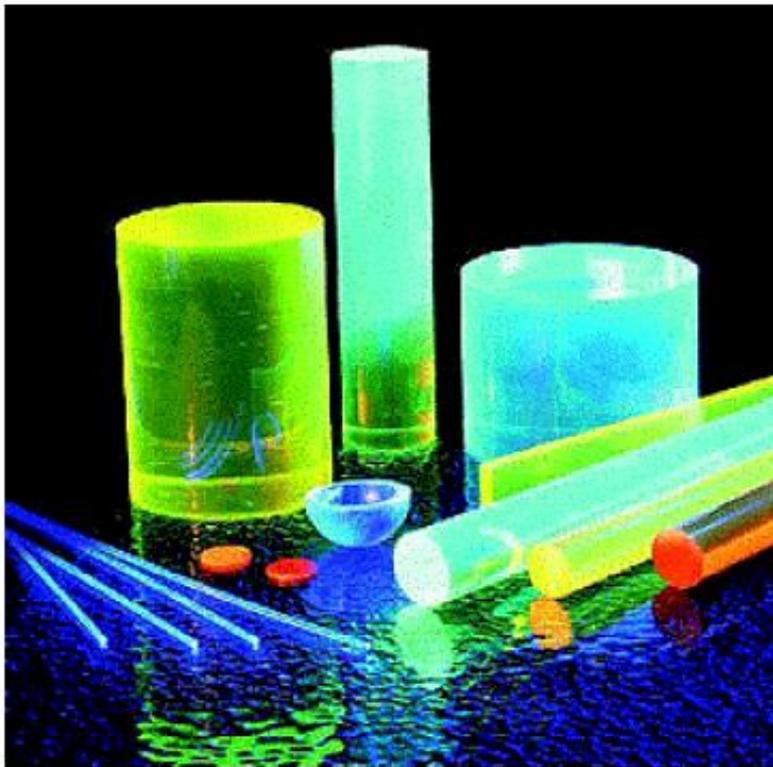
# Centelleadores orgánicos

- ✓ Funcionamiento por fluorescencia molecular
- ✓ Son compuestos de hidrocarburos aromáticos que contienen estructuras de anillo de benceno.
- ✓ Transiciones de los electrones *libres* de valencia en las moléculas, los llamados *orbitales  $\pi$  moleculares*, no pertenecen a un átomo particular de la molécula y ocupan estados singletes ( $S_0$ ) y tripletes ( $T_0$ ).
- ✓ Cada nivel electrónico,  $\Delta E \sim \text{eV}$ , que posee una estructura fina de subniveles vibracionales  $\Delta E \sim 0.1 \text{ eV}$
- ✓ Son muy rápidos, de bajo  $Z$  malos para  $\gamma$  y  $\beta$  pero excelentes para partículas cargadas livianas.
- ✓ Su eficiencia para  $e^-$  es  $\sim 1$ .



# Centelleadores orgánicos

Suelen existir en forma líquida o en plásticos centelleadores. Consisten normalmente en un solvente junto a desplazadores de onda (secundarios o terciarios)

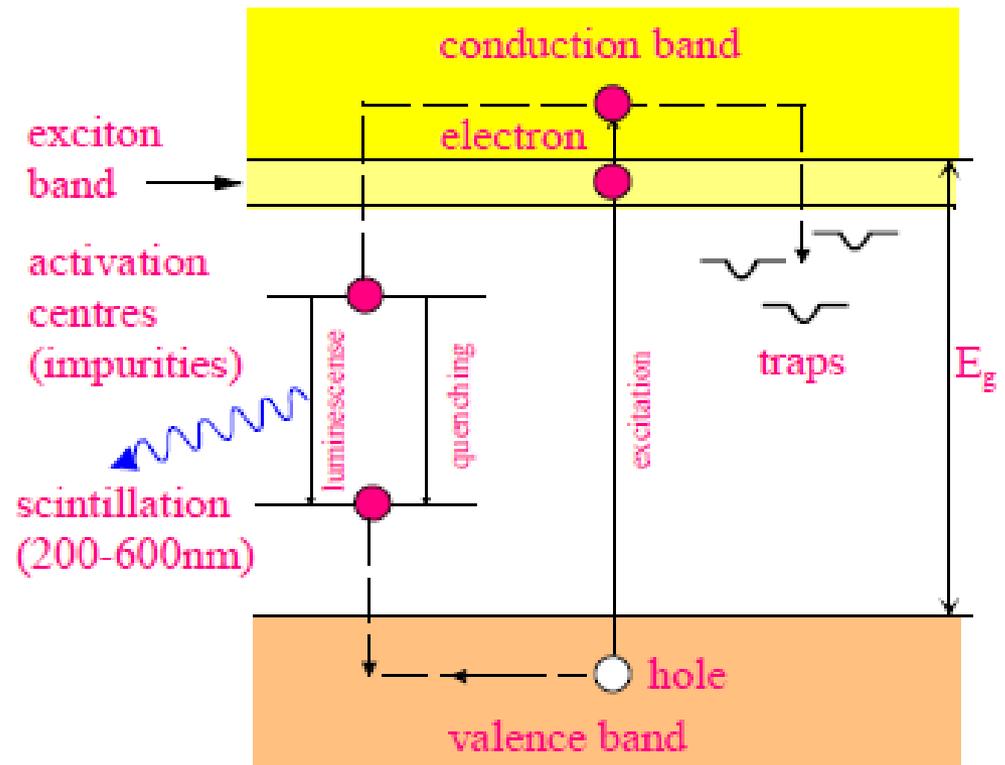


# Centelleadores inorgánicos

- ✓ Son cristales de haluros alcalinos con una impureza activadora.
- ✓ La excitación de los electrones a la banda de conducción permite producir luz durante el proceso de relajación a su estado fundamental
- ✓ Los centelleadores inorgánicos son usualmente materiales de gran densidad y alto Z
- ✓ Por tanto, pueden parar la radiación ionizante en una pequeña distancia.

Alcalinos: **NaI (Tl), CsI(Tl), CsF, etc**

No alcalinos: **BGO ( $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ ),  $\text{BaF}_2$ ,  $\text{PbWO}_4$**



## Parámetros más significativos de los materiales de centelleo más utilizados

Material centelleador	NaI	BGO	LSO	GSO
Densidad	6.67	7.13	7.40	6.71
Número atómico efectivo (Z)	51	74	66	59
Coefficiente de atenuación lineal (cm <sup>-1</sup> )	0.34	0.92	0.87	0.62
Índice de refracción	1.85	2.15	1.82	1.85
Producción de luz [%NaI:Tl]	100	15	75	41
Longitud de onda de salida (nm)	410	480	420	430
Constante de decaimiento (ns)	230	300	40	56
Fragilidad	Si	No	No	No
Higroscopia	Si	No	No	No

## Algunas características

- **Orgánicos**

- Líquidos

- Económicos y eficaces
    - Incómodos

- Sólidos

- Tiempo de decaimiento rápido
    - Gran longitud de atenuación
    - Espectro de emisión

- **Inorgánicos**

- Antraceno

- Standard, aunque poco utilizado

- NaI, CsI

- Excelente resolución a los  $\gamma$
    - Tiempo de decaimiento lento

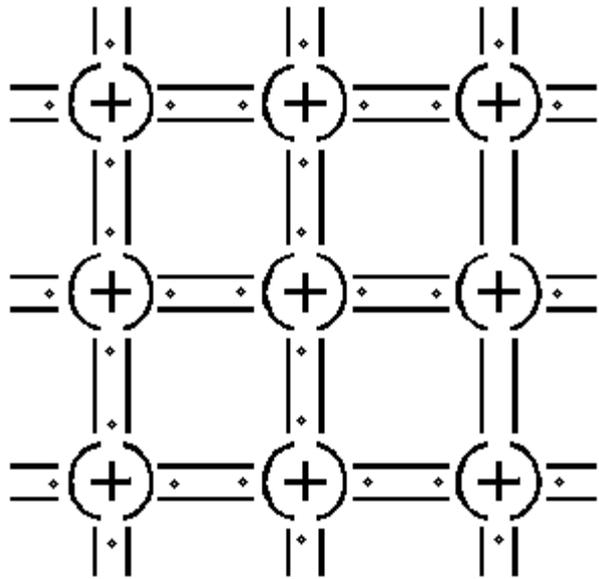
- BGO

- Alta densidad, compacto
    - Buena resolución
    - Muy caro

# Detectores Semiconductores

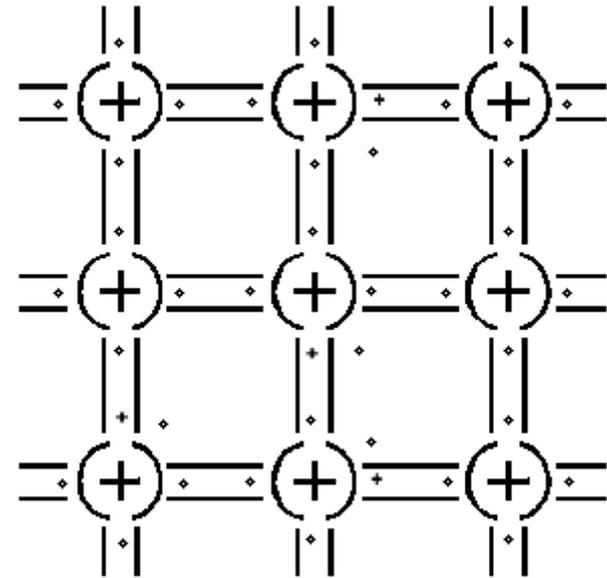
- ✓ Basados en materiales semiconductores, típicamente, **Ge** y **Si**.
- ✓ Se los denomina también detectores de estado sólido.
- ✓ Primeros detectores de alta resolución en energía (1930-1960).
- ✓ El principio de operación similar a detectores gaseosos: la radiación ionizante crea un par electrón-hueco que es recolectado por un campo eléctrico.
- ✓ La energía de ionización (3 eV) es  $\sim$  **10** veces menor que en gases y **100** veces menor que en un centelleador  mejor resolución en energía

# Detectores semiconductores intrínsecos



$T=0K$

Ge



RT

- ✓ Son semiconductores absolutamente puros y sin ningún tipo de imperfección en su estructura cristalina.
- ✓ La única causa de su conductividad es la temperatura.
- ✓ A temperatura ambiente se tienen electrones y huecos libres que bajo la acción de un campo eléctrico dan lugar a una corriente eléctrica.

# Detectores semiconductores dopados

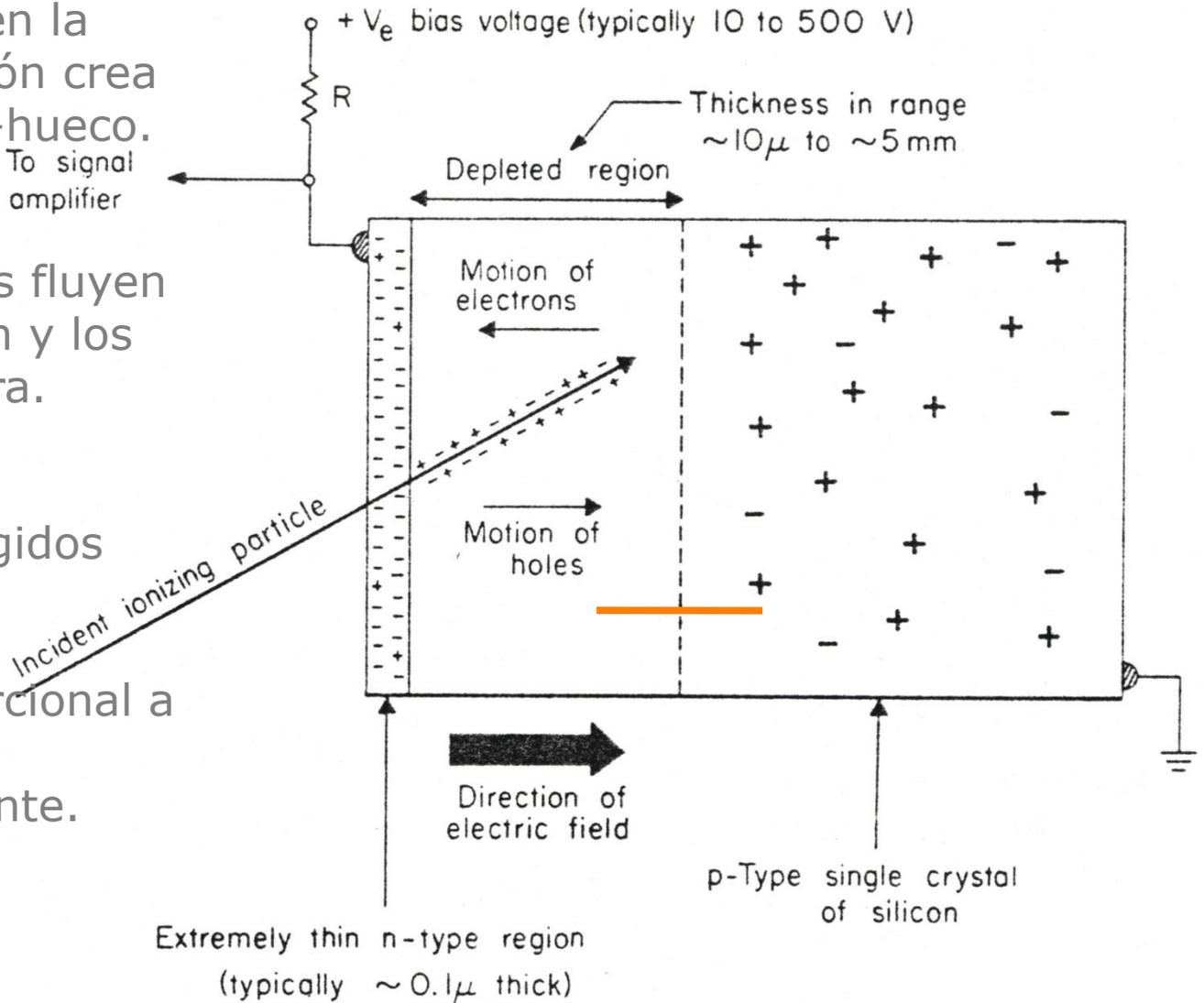
- ✓ Se introducen en la red cristalina átomos con valencia 3 o 5.
- ✓ valencia 5: P, As, S  estados discretos donores, debajo banda de conducción de Si o Ge, semiconductor *tipo n*
- ✓ valencia 3: huecos  estados discretos aceptores, encima banda de valencia de Si o Ge, semiconductor *tipo p*
- ✓ Al poner en contacto un material de tipo-p y uno de tipo-n, hay difusión de electrones y posibilidad de combinación con los huecos.
- ✓ En las proximidades de la unión p-n, los conductores de carga son neutralizados, creando una región denominada zona de depleción.
- ✓ Campo eléctrico que impide la difusión. Se forma una unión p-n típica de un diodo.
- ✓ **Ge(Li) o Si(Li)** (el rango de un fotón de 100 keV en Ge es de unos 4 mm y en Si es de unos 2 cm)

# Detectores semiconductores dopados

✓ La radiación en la zona de depleción crea un par electrón-hueco.  
To signal amplifier

✓ Los electrones fluyen en una dirección y los huecos en la otra.

✓ El número de electrones recogidos crea un pulso eléctrico de amplitud proporcional a la energía de la radiación incidente.



# Detectores semiconductores

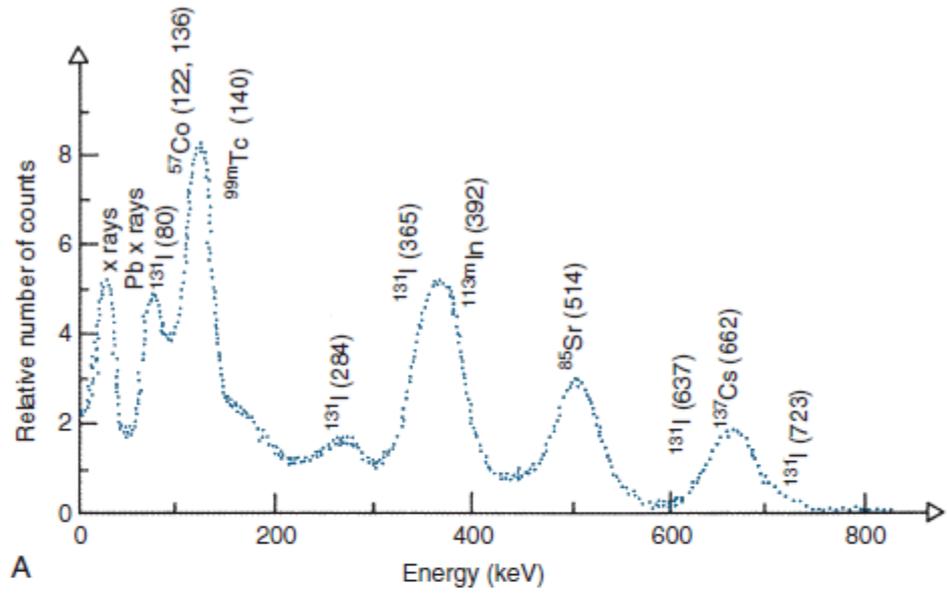
- ✓ Inconvenientes tecnológicos: alta conductividad en comparación con la de los gases  producción de ruido electrónico
- ✓ Los defectos en su estructura cristalina (es decir, las vacancias y dislocaciones) producen recombinación de los portadores.
- ✓ El tamaño de los detectores es pequeño, no para cámara gamma.
- ✓ Ruido térmico a RT, se utiliza a a bajas temperaturas (77K)
- ✓ Se utilizan en detectar contaminación ambiental.
- ✓ No son comunes en medicina nuclear.
- ✓ **CZT**: Cadmio-Zinc-Teluro, **CsI(Tl)**, **NaI(Tl)**

# Aplicaciones. Detectores semiconductores

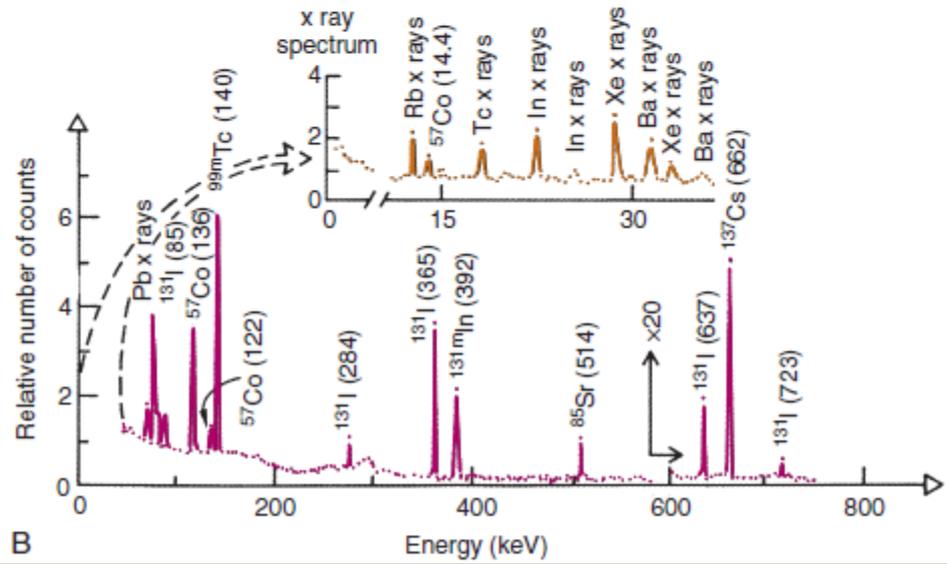
## In vitro

- ✓ Los sistemas detectores semiconductores (Ge y Si) avances revolucionarios en física nuclear, química nuclear, ciencia de materiales, con un efecto limitado en medicina nuclear.
- ✓ Pequeño tamaño y alto costo.
- ✓ Ventajas: su alta resolución permite resolver energías de rayos  $\gamma$  de unos pocos keV.
- ✓ Su principal aplicación en Medicina Nuclear es en estudios con trazadores y ensayos de pureza de radionucleidos y radiofármacos
- ✓ *Si* para rayos X de baja energía y *Ge*, *CdTe* y *CZT* se utilizan para rayos  $\gamma$ .

Nal(Tl) detector



Ge(Li) detector



# Aplicaciones. Detectores semiconductores

## In vivo

- ✓ Se utilizan para medir concentraciones de actividad en pacientes o en experimentos con animales.
- ✓ Sistemas diseñados para sensor radioactividad en zonas localizadas del cuerpo (*probe systems*):
  - *Singleprobe*: tomas tiroideas de yodo, detección del ganglio centinela en cancer de mama.
  - *Multiprobe*: estudios renales, del cerebro, etc.

$NaI(Tl)$

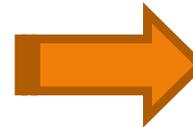


FIGURE 12-19 Typical NaI(Tl) probe system for measuring thyroid uptake of radioactive iodine. (Courtesy Capintec, Inc., Ramsey, NJ.)

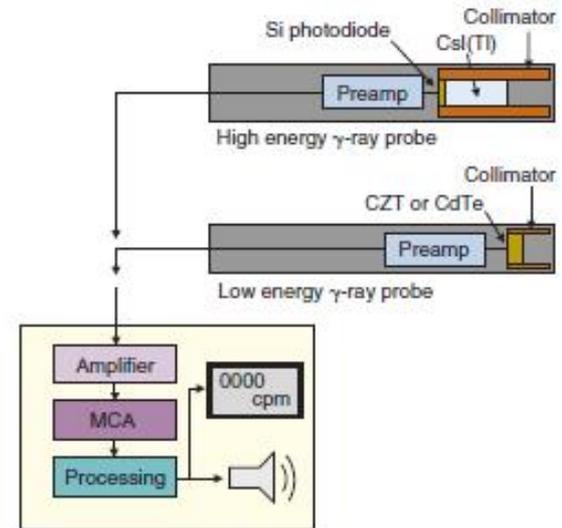
# Aplicaciones. Detectores semiconductores

## In vivo

✓ Sondas miniaturas para sensor rayos  $\gamma$  y  $\beta$  para uso quirúrgico en aplicaciones para cancer:

✓ detección del nodo linfático centinela en cáncer de mama y melanoma. Se identifica con  $^{99m}\text{Tc}$ .

✓ Cirugía radioguiada.



A



B

**FIGURE 12-20** A, Schematic representation of  $\gamma$ -ray probes for intraoperative use. B, Four different wireless gamma probes shown with control unit. The geometry of the probes are tailored to suit specific clinical applications. (Figure B courtesy IntraMedical Imaging, Los Angeles, CA.)

# Aplicaciones. Detectores semiconductores

## In vivo

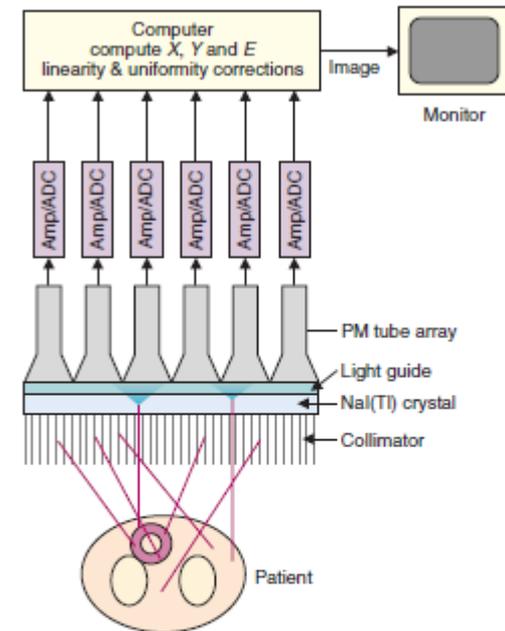
- ✓ Contadores de cuerpo completo: diseñados para medir la cantidad total de radioactividad en el cuerpo.
- ✓ Se emplea generalmente detectores de NaI(Tl).
- ✓ Se utilizan para estudiar las tasas de retención, circulación y eliminación de nucleidos  $^{60}\text{Co}$  y  $^{57}\text{Co}$  (vitamina B12),  $^{24}\text{Na}$ ,  $^{42}\text{K}$ ,  $^{47}\text{Ca}$  y  $^{59}\text{Fe}$ .
- ✓ La mayoría de ellos emiten rayos  $\gamma$  de alta energía y tienen vidas medias algo largas.
- ✓ Suelen utilizarse para detectar y monitorear la posible ingestión accidental de radionucleidos.
- ✓ Utilizan detectores relativamente grandes de NaI(Tl), 15 a 30 cm de diámetro por 5 a 10 cm de espesor a fin de obtener buenas eficiencias geométricas como intrínseca.

# Cámara Gamma

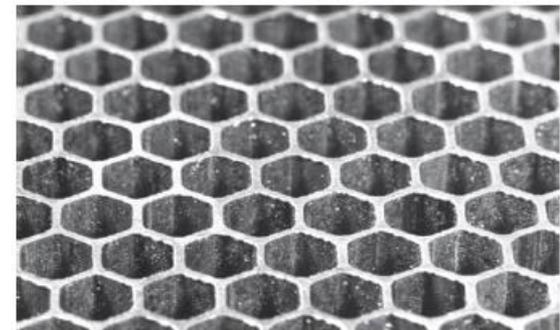
✓ El propósito de las imágenes por radionucleidos es obtener un diagrama de la distribución del radionucleido en el cuerpo del paciente antes de ser inyectado.



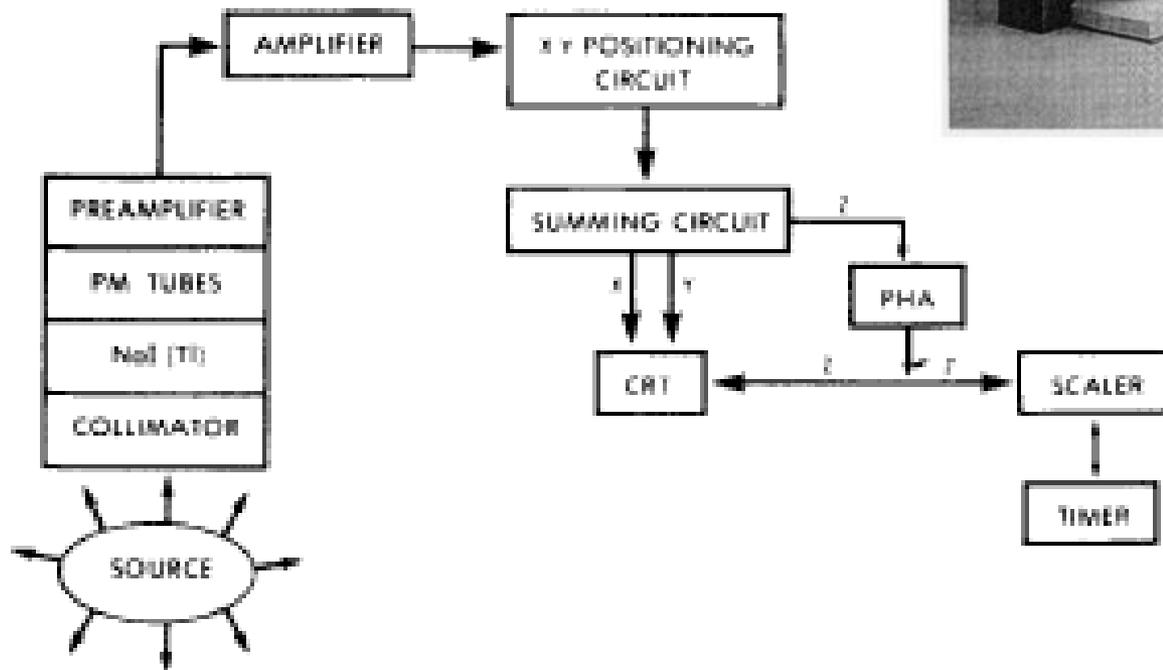
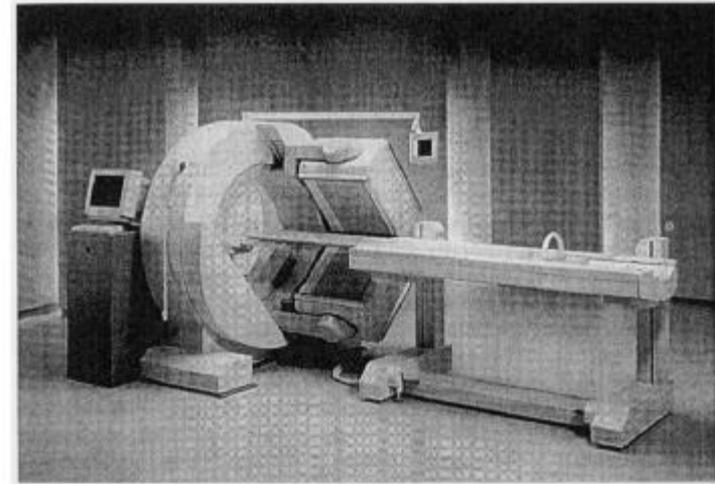
**E 13-3** A rectangular gamma camera detector with the cover removed showing the photomultiplier (PM) tubes mounted on the NaI(Tl) crystal. In this example, the gamma camera detector measures  $50 \times 15$  cm and is read out by tubes 5 cm in diameter. This is a digital camera in which each of the PM tube outputs is individually digitized. (by Dr. Joel Karp, University of Pennsylvania, Philadelphia, PA.)



**FIGURE 13-1** Basic principles and components of a modern gamma camera. The outputs of each photomultiplier (PM) tube are amplified and digitized using an analog-to-digital converter (ADC). The X-Y locations for each gamma ray that interacts in the NaI(Tl) crystal are computed from the digitized signals. The energy deposited by the gamma ray,  $E$ , which is proportional to the total measured pulse amplitude, also is computed by summing the individual PM tube signals. If  $E$  falls within the selected energy window, the event is accepted and placed at the appropriate X-Y location in the image.

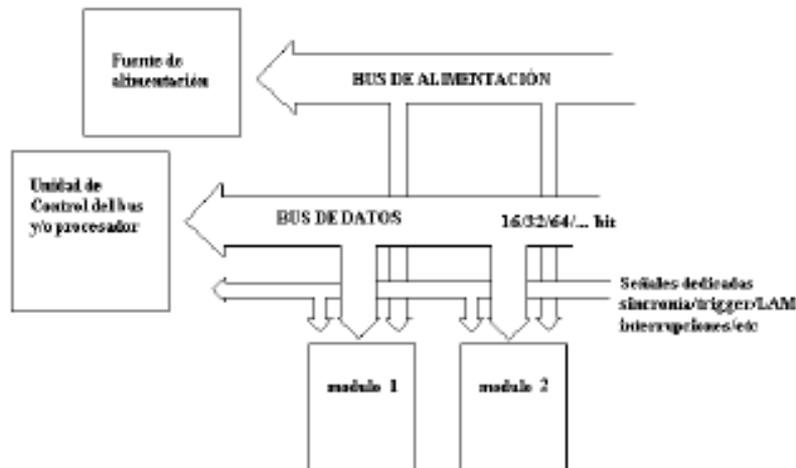


# Cámara gamma



# Electrónica modular

Tanto en aplicaciones médicas, de Física Nuclear y de Altas Energías es normal que la electrónica en muchos casos sea modular. Los módulos de propósito general o específico se conectan mediante un bus.

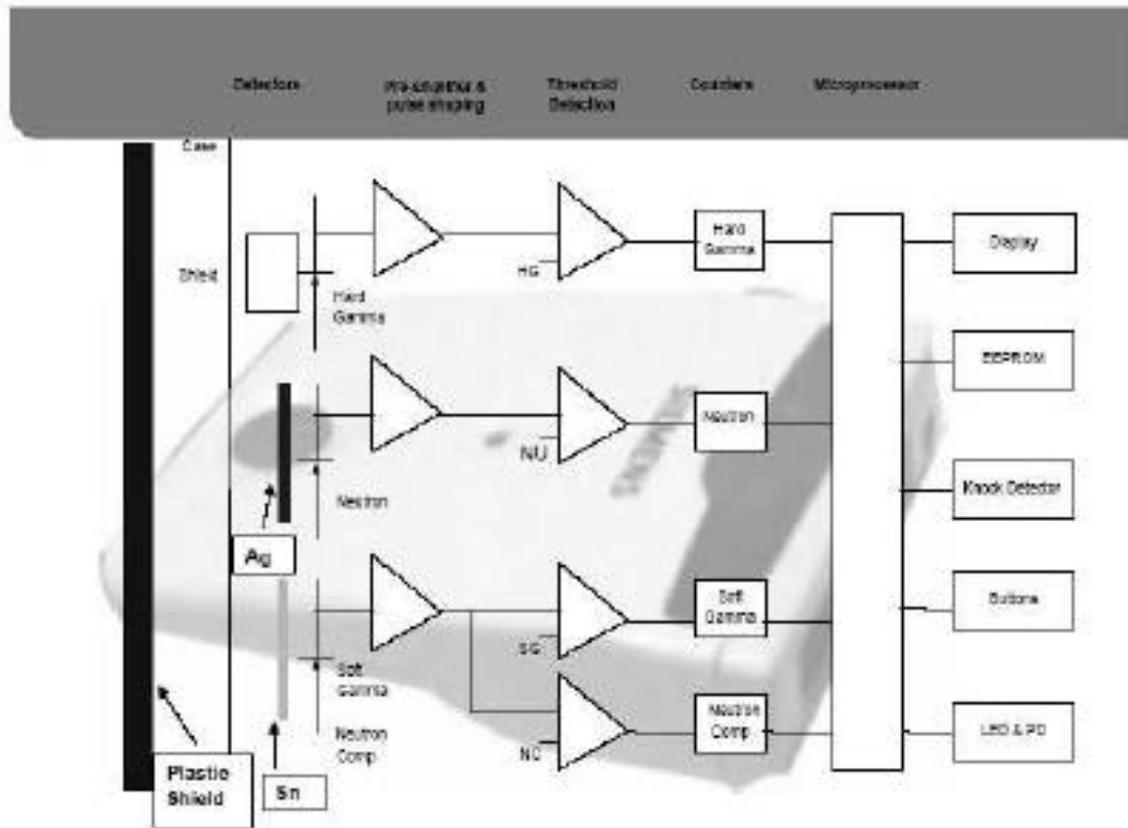


El estándar NIM (Nuclear Instrumentation Module) define un sistema modular basado en un bus de alimentación únicamente.

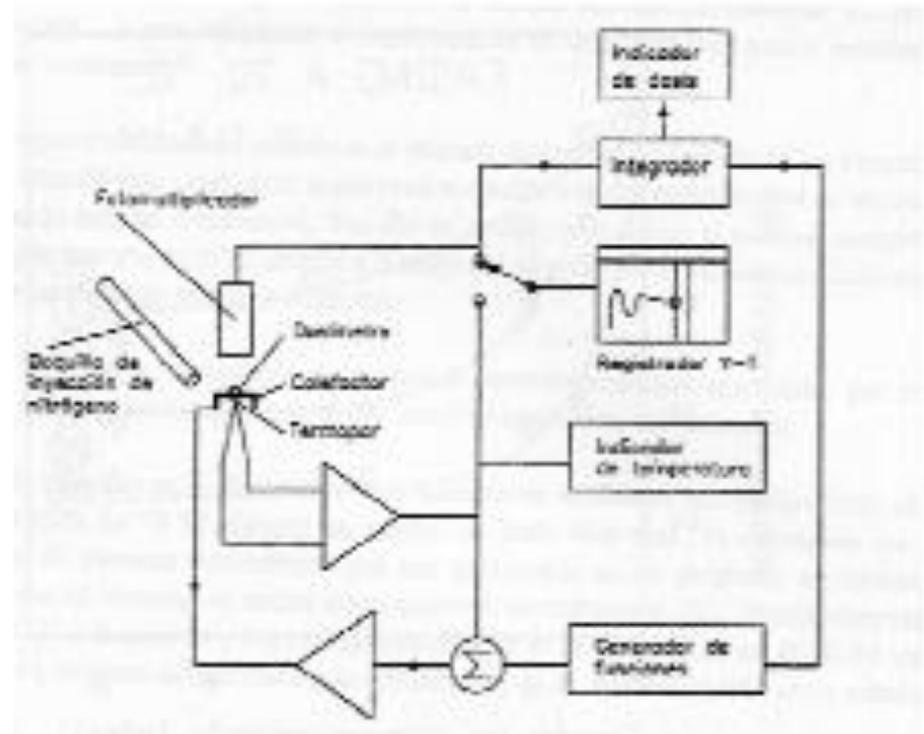
El primer estándar de bus de datos modular fue el CAMAC (Computed Automated Measurement and Control) introducido el año 1969. Los buses actuales han evolucionado enormemente en ancho de banda y tiempo de latencia.



# Dosimetría personal: dosímetro de diodo

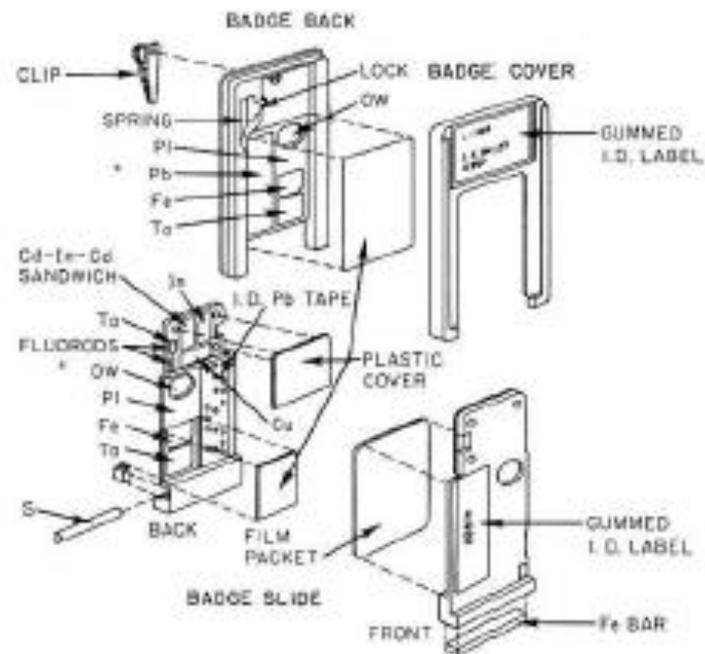
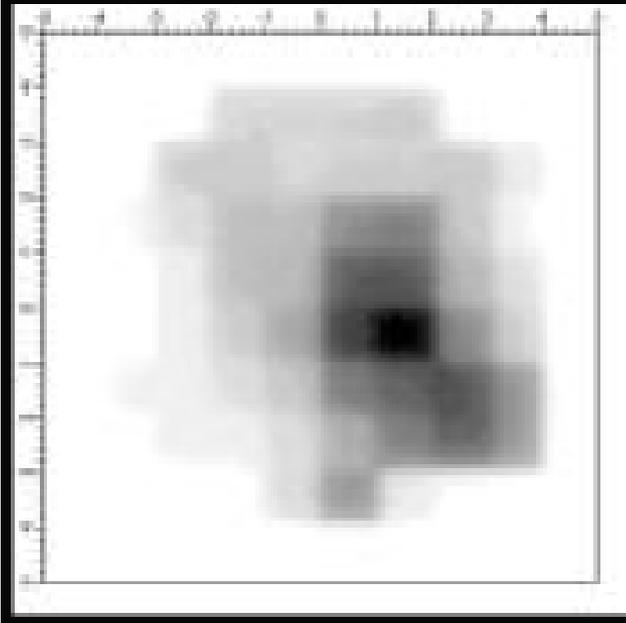


# Dosimetría termoluminiscente n(TLD)



# Dosimetría de película

Film



SECURITY CREDENTIAL



ASSEMBLY

Tipo	Ventajas	Desventajas
Cámara de ionización	<p>Precisa y exacta</p> <p>Recomendada para la calibración de haces</p> <p>Necesarias correcciones habitualmente bien conocidas</p> <p>Lectura inmediata</p>	<p>Se necesitan cables de conexión</p> <p>Hay que polarizarlas con alto voltaje</p> <p>La dosimetría de megavoltaje requiere múltiples correcciones</p>
Película radiográfica	<p>Alta resolución 2D</p> <p>Es muy fina y no perturba el haz</p>	<p>Necesitamos sala oscura o sistema de revelado</p> <p>Presentan variabilidad entre películas y entre lotes</p> <p>Es necesario calibrarlas con cámaras de ionización</p> <p>Tienen problemas de dependencia en energía</p> <p>No se usan para calibrar haces</p>
TLD	<p>Variados formatos y tamaños</p> <p>Se puede usar en tamaños muy pequeños de modo que son factibles dosis cuasi-puntuales</p> <p>Se pueden usar varios TLDs al mismo tiempo</p> <p>Algunos son relativamente equivalentes a tejido</p> <p>No son caros</p>	<p>La señal se borra en la lectura</p> <p>Es fácil estropear un TLD o perder su lectura</p> <p>Su lectura no es inmediata</p> <p>Para obtener resultados exactos se necesita una cadena de lectura bien calibrada</p> <p>Su lectura y calibración requieren cierta dedicación de tiempo</p> <p>No se recomiendan para calibración de haces</p>
Diodo	<p>Pequeño tamaño</p> <p>Alta sensibilidad</p> <p>Lectura inmediata</p> <p>Pueden incluso operarse sin tensión de bias</p> <p>La instrumentación requerida es simple</p>	<p>Requieren cables de conexión</p> <p>Presentan dependencias de la calibración con temperatura</p> <p>Cambian su sensibilidad con la dosis acumulada</p> <p>Se necesita cierto cuidado para mantener constante su respuesta en el tiempo</p> <p>No se usan para calibrar haces</p>

# Detección de la radiación

# DetECCIÓN DE PARTÍCULAS ALFA

- ✓ Existen varios tipos de detectores para la detección de emisores  $\alpha$ , como las cámaras de ionización, contadores proporcionales, centelladores líquidos y plásticos o semiconductores.
- ✓ Las cámaras de ionización tienen alta eficiencia de conteo pero muy pobre resolución en energía.
- ✓ Los contadores proporcionales y los centelladores líquidos tienen la ventaja de que el emisor  $\alpha$  puede ubicarse dentro del contador, permitiendo detectar la radiación en un ángulo sólido de  $4\pi$ .
- ✓ Los detectores semiconductores son normalmente usados para la determinación de emisores  $\alpha$  en muestras ambientales y residuos, cuando se necesita información espectroscópica.
- ✓ Pequeñas diferencias en las energías de las partículas  $\alpha$  emitidas por diferentes nucleidos torna difícil separar los picos asociados a los diferentes radionucleidos, como en el caso del  $^{241}\text{Am}$  y  $^{238}\text{Pu}$ , o del  $^{237}\text{Np}$ ,  $^{233}\text{U}$ ,  $^{234}\text{U}$  y  $^{230}\text{Th}$ . Es importante realizar una buena separación química del radionucleido. Así mismo, la autoabsorción en la fuente reducirá la eficiencia de conteo y empeorará la resolución en energía del espectro. Por esta razón es esencial la preparación de fuentes delgadas.

# Detección de partículas beta

- ✓ Los nucleídos emisores  $\beta$  pueden ser medidos por detectores gaseosos tales como cámaras de ionización, detectores de flujo gaseoso o Geiger-Müller.
- ✓ Los contadores Geiger-Müller se utilizan para nucleídos emisores de  $e^-$  de alta energía ya que los de baja energía son absorbidos en la ventana que separa el gas de la muestra. La eficiencia de este tipo de detectores varía entre el 10% y el 70% dependiendo de la E, el espesor de la fuente y de las características del contador
- ✓ Para análisis medioambiental y residuos de baja actividad se requiere un contador de bajo nivel, el cual se obtiene reduciendo el conteo de fondo a valores tan bajos como 0,1 cuentas/min mediante el uso de cámaras de apantallamiento, permitiendo alcanzar un límite de detección de 1,5 mBq para  $^{99}\text{Tc}$  y  $^{90}\text{Sr}$ . Sin embargo, los detectores de Geiger-Müller carecen de resolución en energía y por lo tanto cualquier actividad de un radionucleído desconocido en la muestra debe identificarse por otros medios, tal como la determinación de la vida media.

# Detección de partículas beta

- ✓ Los centelladores líquidos, tienen ventajas en la detección de electrones de baja energía debido a la ausencia de atenuación cuando la muestra a analizar está inmersa en el centellador.
- ✓ Permiten la identificación de actividades de radionucleídos a pesar de su pobre resolución en energía. Poseen baja autoabsorción, alta eficiencia, permiten una distribución homogénea de la muestra en el líquido centellador.
- ✓ Preparación de muestras simples y fácil estandarización del uso de patrones internos o externos. Posibilidad de determinación de radionucleídos que decaen por conversión interna o captura electrónica mediante la medida de los electrones Auger.
- ✓ Sin embargo debido a la baja energía de estos electrones ( $<20$  keV) la eficiencia de conteo es baja, del orden del 30%. Comparado con el Geiger-Müller, la velocidad de conteo de fondo es mayor (0,5 c/min), resultando así el límite de detección del  $^{99}\text{Tc}$  en 25 mBq.

# Detección de partículas beta

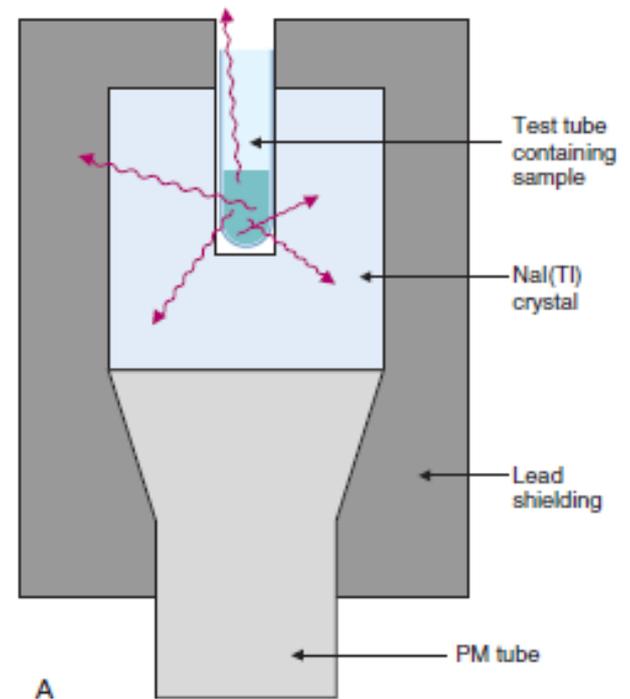
- ✓ Debido a la distribución continua de energía de los electrones en el decaimiento  $\beta$ , esta espectroscopía es una herramienta pobre para identificar las contribuciones individuales a un espectro.
- ✓ Para la identificación de nucleídos emisores  $\beta$  se requiere, como en el caso de los emisores  $\alpha$ , de la separación química de los radionucleídos de interés. A pesar de dicha separación, varios isótopos de un mismo elemento pueden estar presentes en la muestra, como el  $^{89}\text{Sr}$  y  $^{90}\text{Sr}$  y aún cuando los isótopos emitan electrones de energías discretas, los electrones generados en la relajación de los niveles atómicos tienen una distribución de energía complicada que impide un análisis certero.

# Detección de fotones

- ✓ Entre los detectores que pueden ser usados para la detección de rayos  $\gamma$  figuran los detectores de centelleo con cristales de NaI, CsF y ZnS, contadores gaseosos y detectores semiconductores basados en Si dopado con Li, HPGe, CdTe y GaAs.
- ✓ Las características de estos detectores hacen que sea posible la medida simultánea de un conjunto de radionucleídos sin la necesidad de realizar procedimientos de separación química.
- ✓ Debe tenerse en cuenta que la eficiencia de estos detectores es baja (10% de eficiencia absoluta) y varía con la energía de los fotones, distancia fuente-detector y tamaño del cristal detector
- ✓ El límite de detección es típicamente mayor que 50 mBq, algunos órdenes de magnitud mayor que en el caso de espectroscopía  $\alpha$  y  $\beta$ , pero depende del apantallamiento del detector, los radionucleídos de interés y la interferencia de radionucleídos.

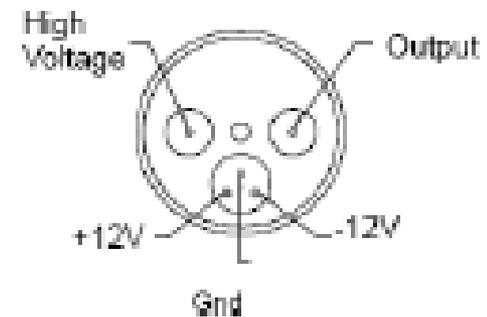
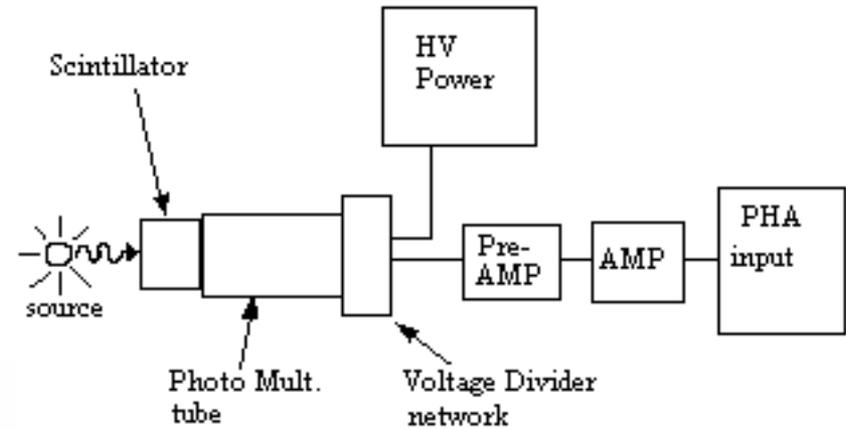
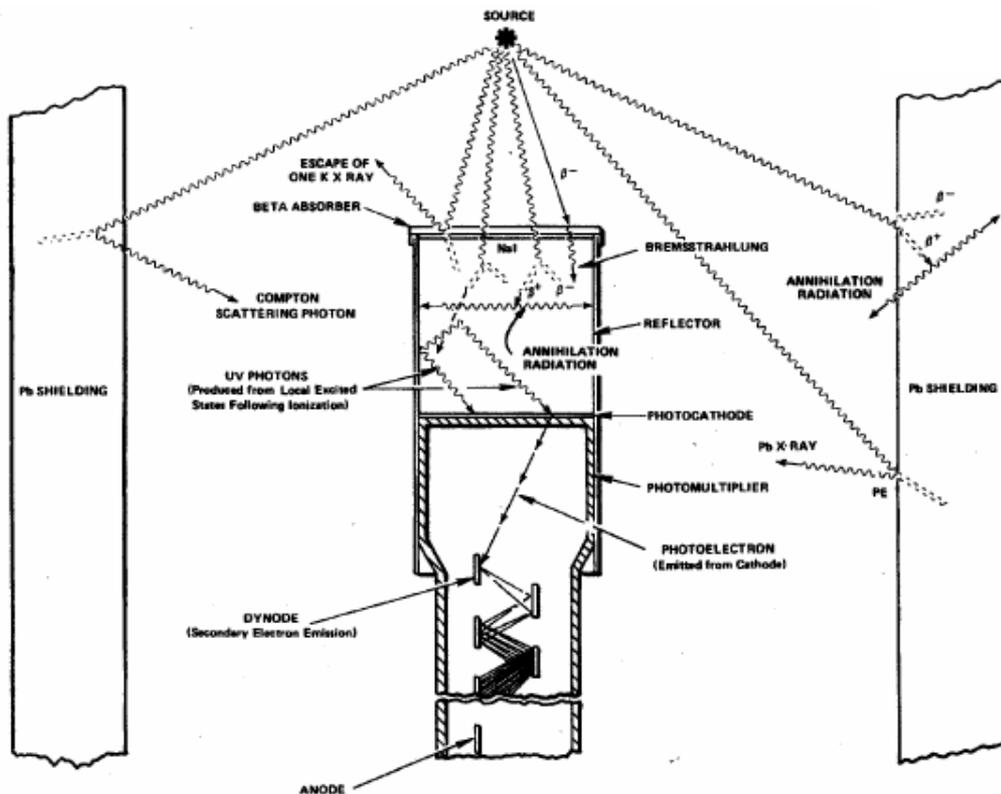
# Aplicaciones. Contadores de pozo

- ✓ Contadores de pozo utilizan NaI(Tl) se utilizan exclusivamente para radionucleidos emisores de rayos-X o rayos  $\gamma$ .
- ✓ Se utilizan para ensayos de inmunoanálisis: medidas de hormonas tiroideas, ensayos de radioactividad en sangre y control de calidad de radiofarmacos.
- ✓ En monitoreo de seguridad radiologica: test de barrido.
- ✓ Las características del contador de pozo de NaI(Tl) lo convierten en una herramienta importante en ensayos in vitro.
- ✓ Restricciones: pequeños volúmenes de muestras y pequeñas cantidades de actividad (100kBq). Para actividades mayores (mayoría de radionucleidos), tiempo muerto excesivo.

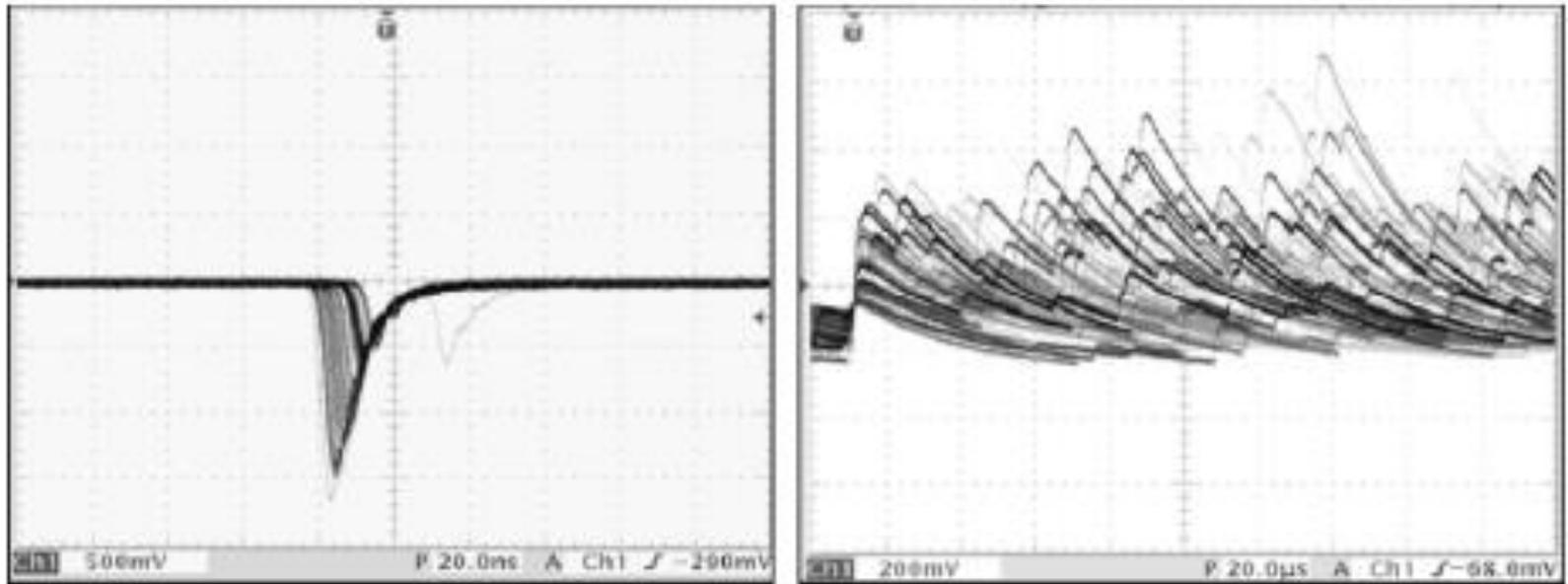


# Formación de los señales

Corte esquemático del módulo detector:  
cristal semiconductor (INa(Tl)),  
fotomultiplicador (PM), placas de  
apantallamiento (Pb), fuente  
radiactiva e interacciones diversas.



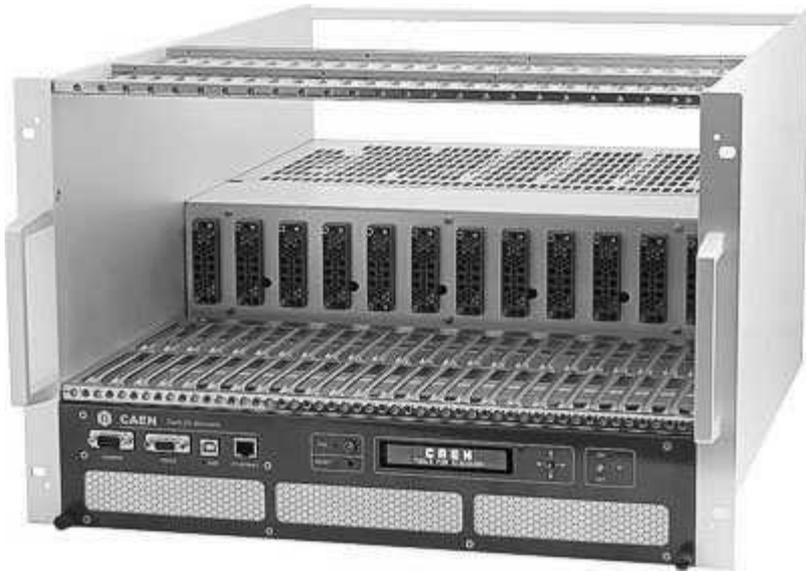
# Formación de los señales



**Figura 5.6: Pulsos de salida del ánodo (der.) y del dinodo (izq).**

✓ En el ánodo la señal eléctrica es suficientemente grande para poder ser manejada con amplificadores y analizadores de pulsos convencionales.

# Electrónica asociada



NIM: Nuclear Instrumentation Module



Fuente de alta tensión

# Formación de los señales

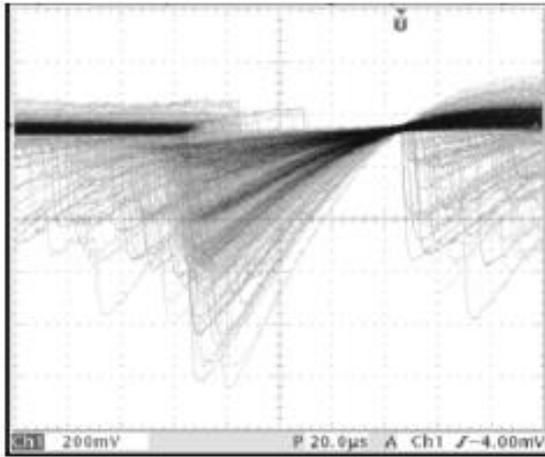


Figura 5.9: Pulso de salida del pre-amplificador

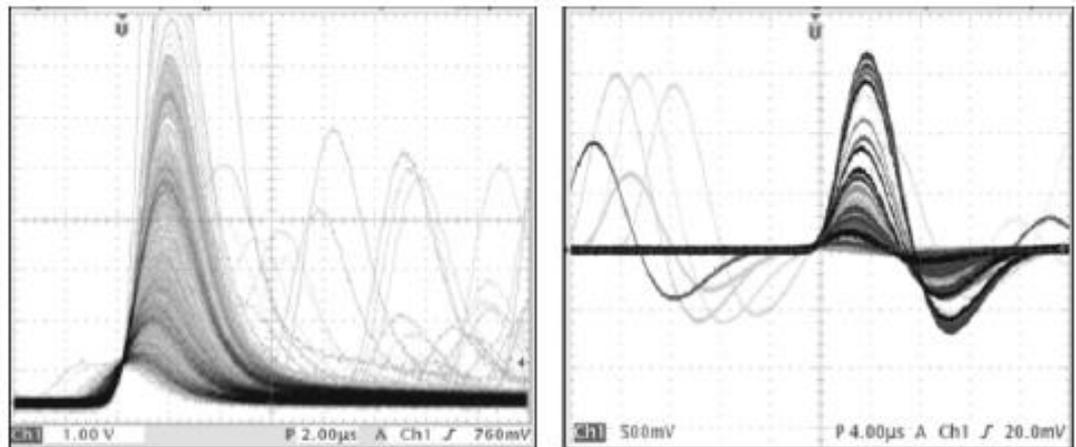
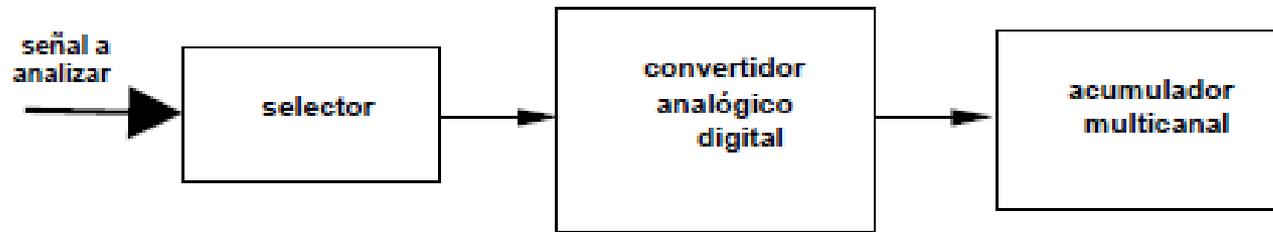
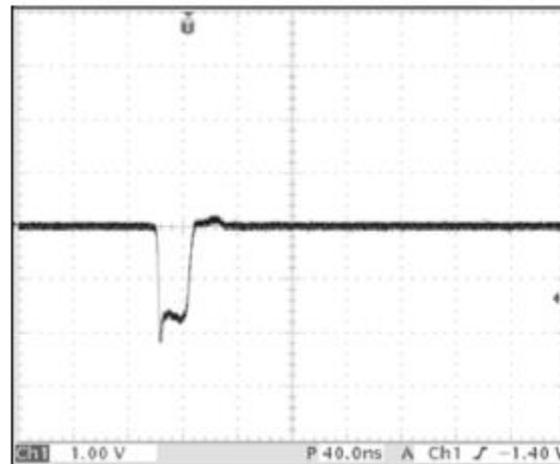


Figura 5.10: Pulsos generados en el amplificador. Unipolar (izq.) y bipolar (der.).



**Figura 5.12: Diagrama de bloques de un analizador multicanal de altura de pulsos.**



**Figura 5.11: Pulsos lógicos del analizador monocanal.**



# Espectro gamma simple del $^{137}\text{Cs}$ .

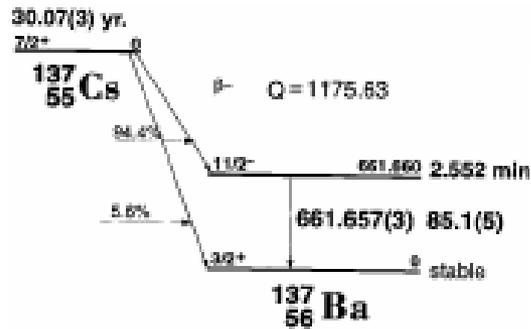
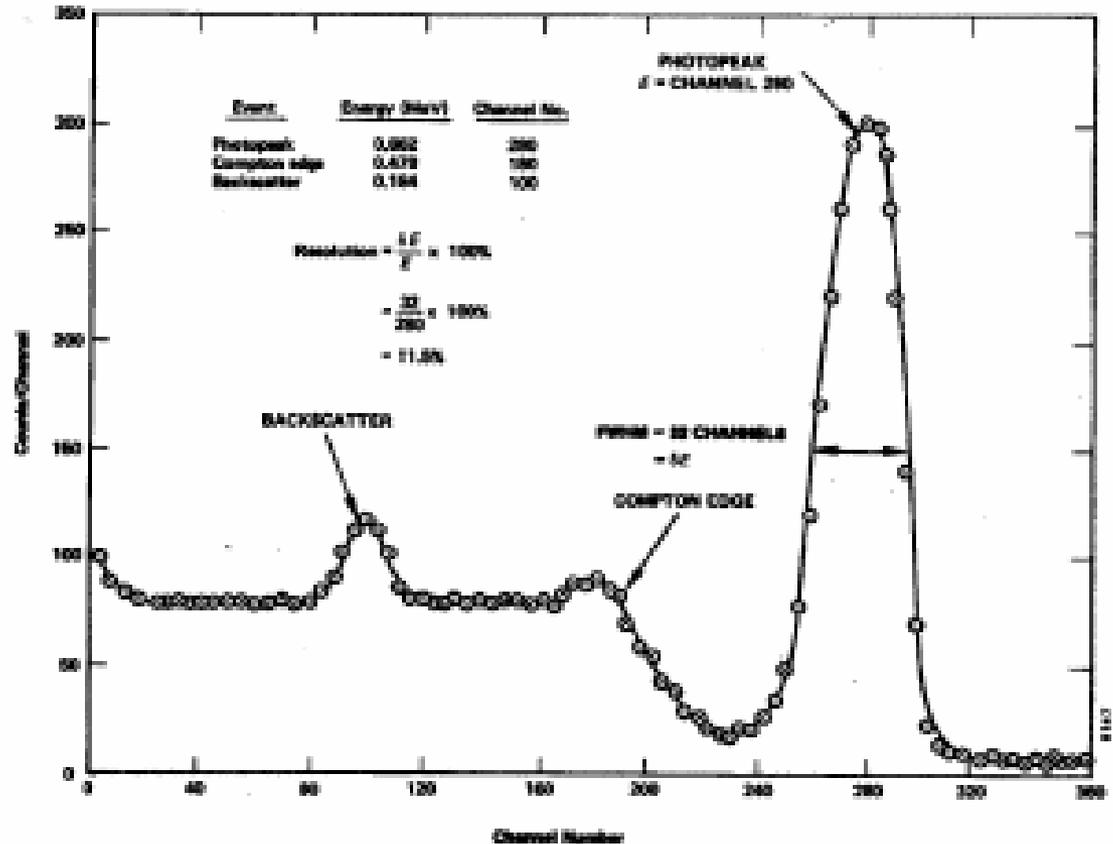
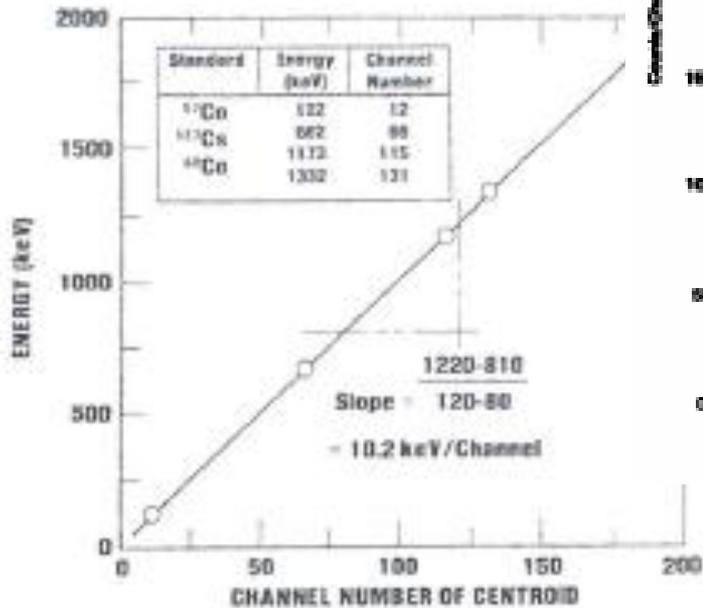


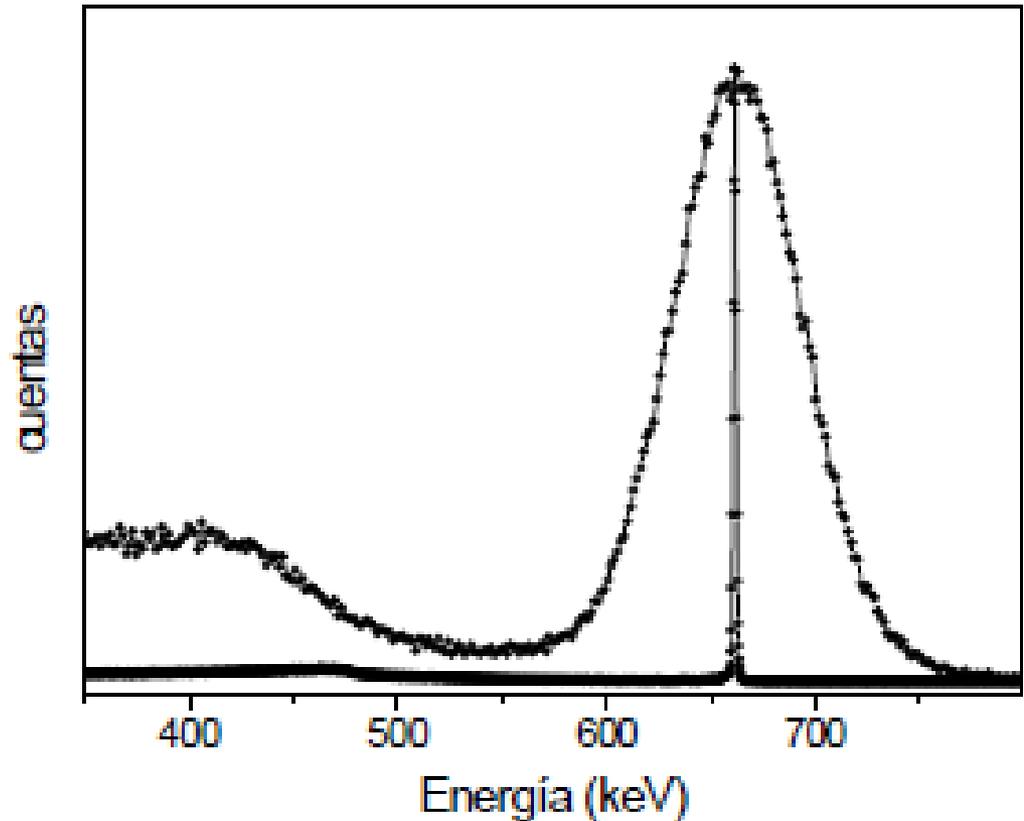
Figura 9.1.- Esquema de desintegración del  $^{137}\text{Cs}$



Recta de calibración en energías

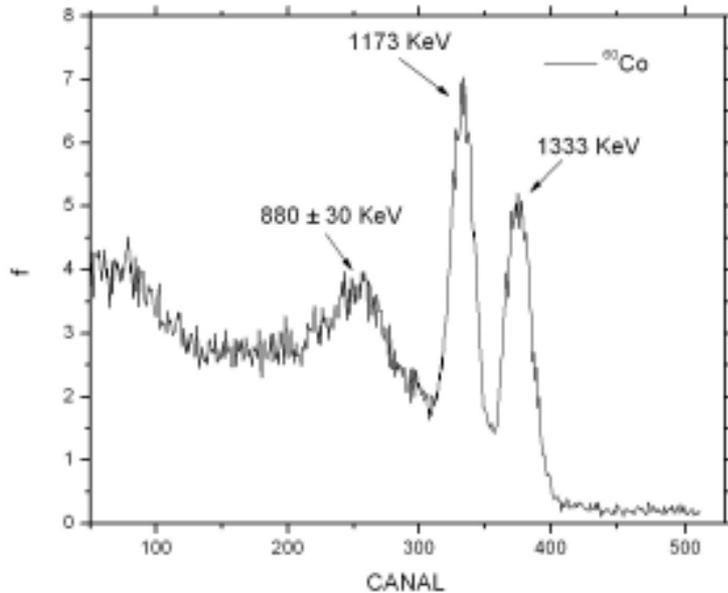
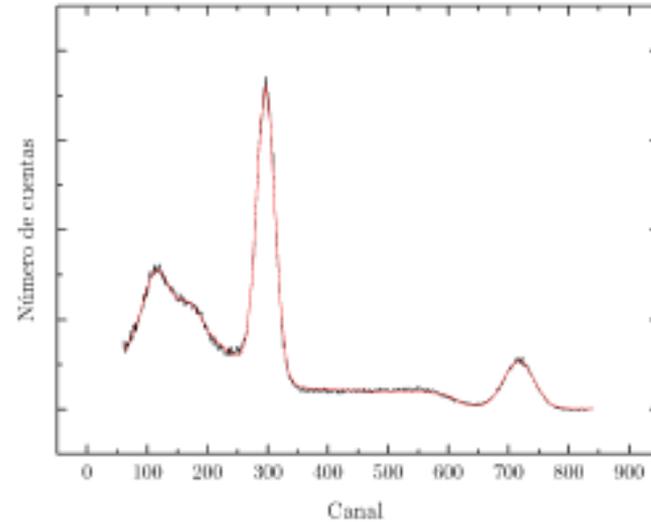
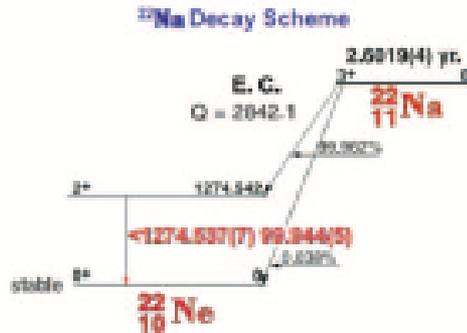
# Espectroscopia gamma

Comparación  
entre un NaI(Tl)  
y un HPGe.

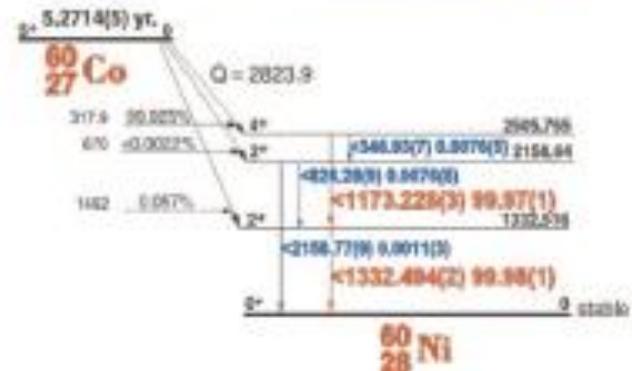


# Espectroscopia gamma

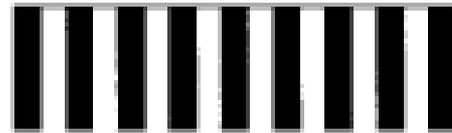
2.6019 Yr.  $^{22}\text{Na}$  [C]



5.2714(5) yr.  $^{60}\text{Co}$  Decay Scheme [C]



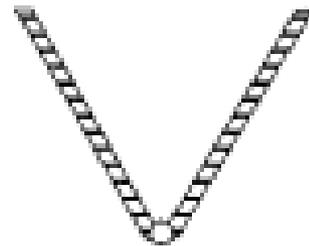
# Colimadores



Parallel hole collimator



Diverging collimator



Pinhole collimator



Converging collimator

FIGURE 3.7. Several collimator designs.

# PET: Positron Emission Tomography

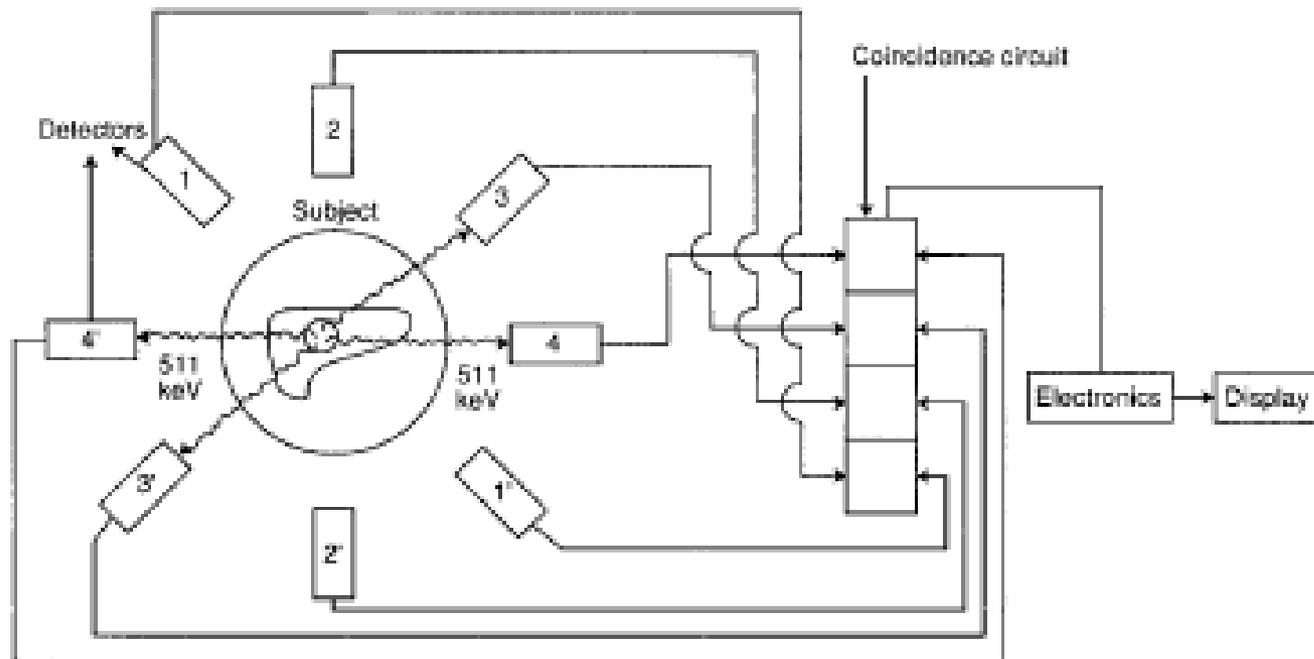


FIGURE 3.9. Schematic diagram of a PET system using four pairs of detectors.

