

# Capítulo 6

## Detectores de radiación

### Introducción

- **Detección:** Conjunto de procedimientos necesarios para determinar las propiedades de las partículas ( $E$ ,  $q$ ,  $m$ ) de la radiación
- Fundamental para
  1. Información acerca de los núcleos
  2. Protección y control de radiactividad
- Se fundamenta en la interacción de la radiación con la materia
- Distinta interacción  $\rightarrow$  distintos detectores

### PROPIEDADES GENERALES DE LOS DETECTORES

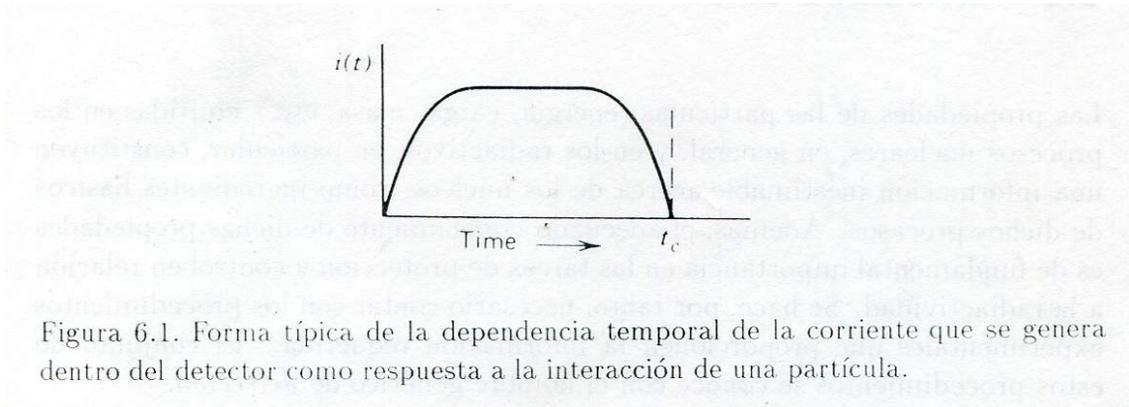
1. Eficiencia
2. Resolución
3. Tiempo muerto
4. Modo de operación

### Modelo simplificado

- **Detector hipotético sometido a la radiación:**
- La interacción produce cierta carga  $Q$  en su volumen activo

- Se recoge proporcionando una señal eléctrica
- Para ello se establece un campo eléctrico
- Tiempo empleado en recoger las cargas  $t_C$  depende de:
  1. La movilidad de los portadores de carga
  2. La distancia media que deben recorrer
- $t_C$  depende del detector y es una de sus características
- Corriente eléctrica  $I(t)$  generada durante  $t_C$  verifica

$$\int_0^{t_C} I(t)dt = Q$$



- **Es posible que circulen al mismo tiempo las corrientes producidas por distintas interacciones, que no se podrán diferenciar**

## Modos de operación

- **Modo de corriente:** se mide la corriente continua media producida en el detector. **Se pierde la información individual.**  
—→ **Detectores en dosimetría y control de reactores**
- **Modo de pulso:** Se mide una señal de salida para cada pulso de corriente, **que lleva información útil, como la energía**  
—→ **Detectores en Física Nuclear y espectroscopía**

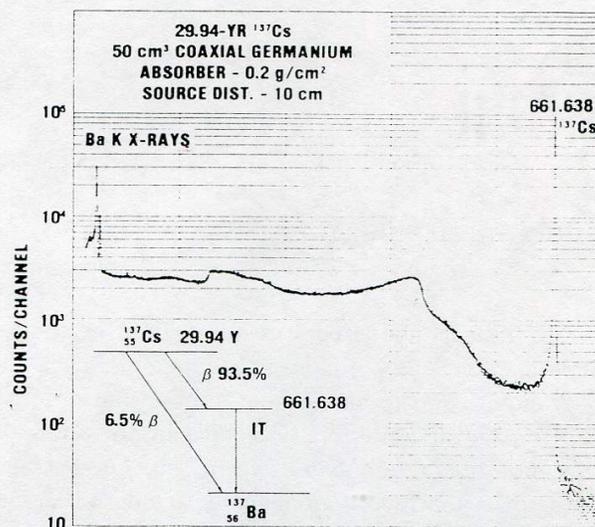
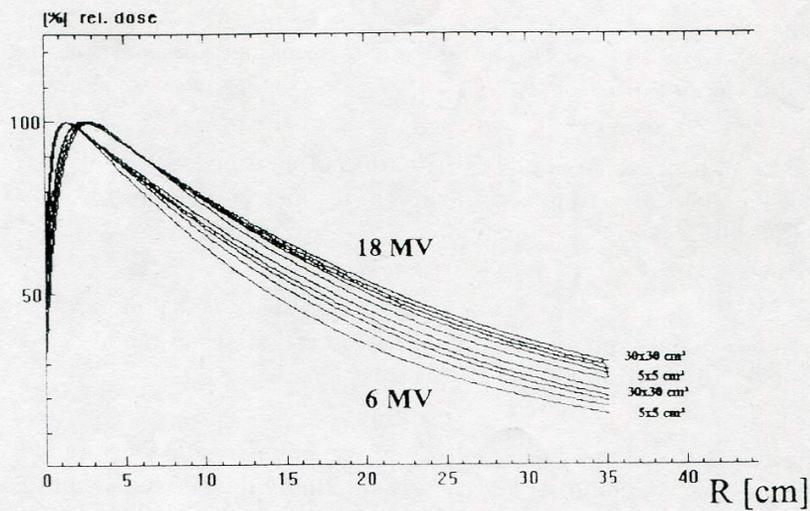
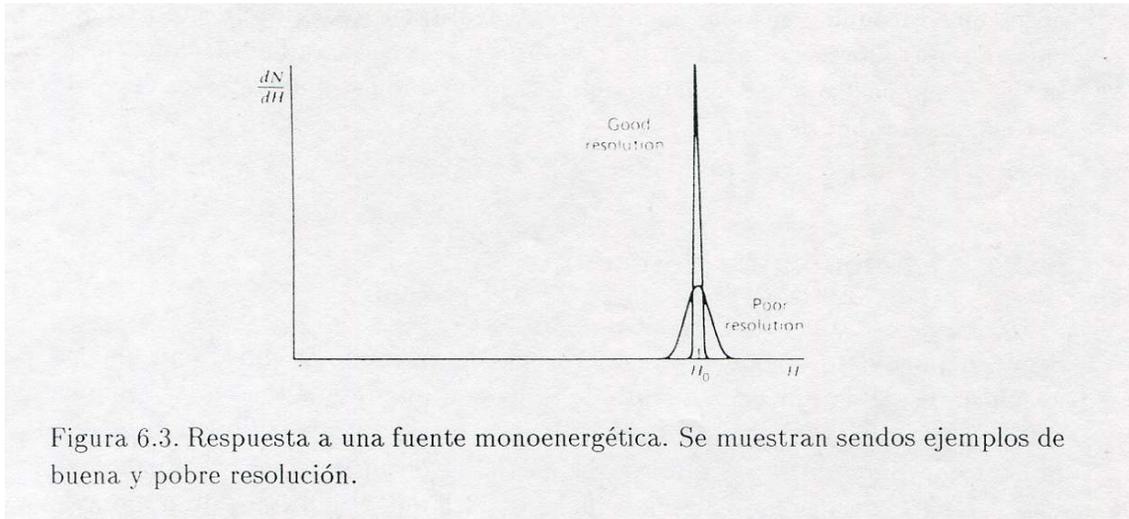


Figura 6.2. Ejemplos de los dos modos de funcionamiento de los detectores de radiación. Arriba se muestra las *curvas de rendimiento en profundidad* en agua para haces de fotones de 6 MV y 18 MV. Estas curvas nos dan la dosis de radiación medida con una cámara de ionización que se va alejando paulatinamente de la fuente del haz. Abajo se muestra un *espectro de altura de pulsos* usual en espectroscopía. En este caso corresponde a la desintegración del  $^{137}\text{Cs}$ . La altura de los pulsos (en abscisas) es en general proporcional a la energía del cuanto de radiación detectado.

## Resolución en energía

- Respuesta del detector a una fuente mono-energética de radiación
- Cuanto mayor es la anchura del pulso peor es la resolución



- En promedio es deseable que la señal  $H$  del detector sea proporcional a la carga producida, y ésta a la energía de la partícula

$$H \propto Q \propto E$$

- La anchura indica que esta proporcionalidad no es rigurosa
- La carga  $Q$  que produce un fotón  $E_\gamma$  oscilará alrededor de un valor  $Q_0$  con desviación estandar  $\Delta Q$
- Una buena resolución requiere fluctuaciones mínimas
- **Resolución:**  $R = \frac{\Delta H}{H}$

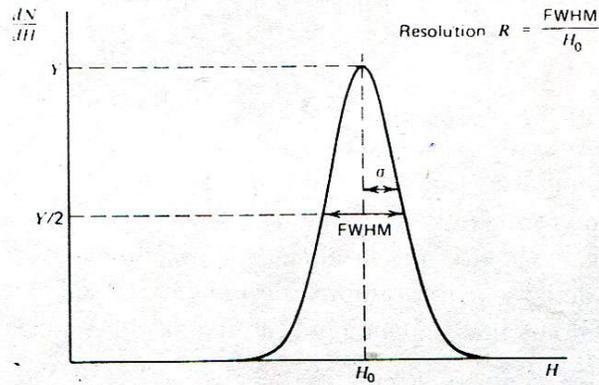


Figura 6.4. Definición de la resolución en energía de un detector.

- Motivos de las fluctuaciones:
  1. Variaciones en las características de operación durante la medida
  2. Ruido aleatorio en el detector y sistema instrumental.
  3. Fluctuación estadística asociada a la naturaleza discreta de la señal: **No puede eliminarse**

## Eficiencia de detección

- Los detectores dan un pulso por cada cuanto que interacciona con su volumen activo

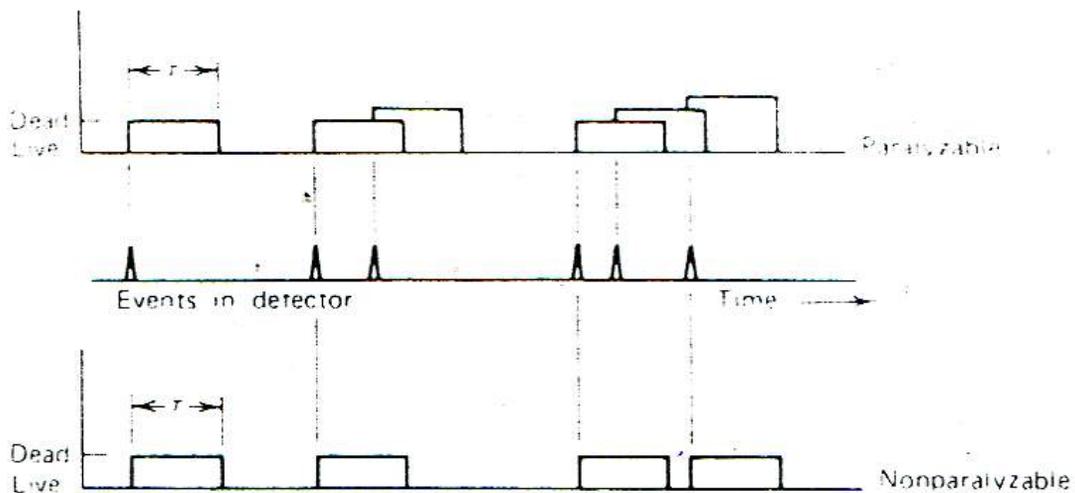
$$\text{Eficiencia absoluta} = \frac{\text{N}^\circ \text{ de pulsos}}{\text{N}^\circ \text{ de cuentas emitidas}} \quad (\text{depende de la geometría})$$

$$\text{Eficiencia intrínseca} = \frac{\text{N}^\circ \text{ de pulsos}}{\text{N}^\circ \text{ de cuentas incidentes}} \quad (\text{Depende del detector})$$

- **Radiación  $\alpha, \beta$ :** es posible el 100% de eficiencia
- **Radiación  $\gamma, n$ :** No siempre interaccionan. Eficiencia  $\neq$  100%  
→ es necesario conocer la eficiencia para relacionar el número de pulsos con el número de partículas incidentes.
- Tipos de eficiencia:
  1. **Total:** se aceptan todos los pulsos generados por el detector
  2. **De pico:** se consideran los pulsos correspondientes a un pico de energía. **Preferibles experimentalmente, ya que no son sensibles a perturbaciones, como dispersión por objetos alrededor del detector.**
- El conocimiento de la eficiencia es fundamental para determinar la actividad

## Tiempo muerto

- La separación de dos pulsos requiere una separación temporal.
- **Tiempo muerto:** separación temporal mínima para separar dos pulsos.
- Es posible que se pierdan sucesos
- La pérdida aumenta con el tiempo de contaje.
- Es necesario corregir el número de cuentas medidas para obtener el número real de sucesos.
- **Modelo paralizabile:** los sucesos ocurridos durante el tiempo muerto alargan el tiempo muerto
- **Modelo no paralizabile o tiempo muerto no extendido:** los sucesos ocurridos durante el tiempo muerto se pierden sin afectar el comportamiento del detector.



- **En el modelo no paralizabile:**

$$n = \frac{m}{1 - m\tau}$$

$n$  = interacciones por segundo en el detector

$m$  = cuentas recogidas por segundo

$\tau$  = tiempo muerto

• **Método de las dos fuentes:**

$$\begin{aligned}\tau &= \frac{X(1 - \sqrt{1 - Z})}{Y} \\ X &= m_1 m_2 - m_{12} m_b \\ Y &= m_1 m_2 (m_{12} + m_b) - m_{12} m_b (m_1 + m_2) \\ Z &= \frac{m_1 + m_2 - m_{12} - m_b}{X^2}\end{aligned}$$

$m_1$  = cuentas por segundo de la fuente 1

$m_2$  = cuentas por segundo de la fuente 2

$m_{12}$  = cuentas por segundo de las fuentes 1 y 2 juntas

$m_b$  = cuentas por segundo de fondo (en ausencia de fuentes)

# TIEMPO MUERTO $\tau$

## Cuentas reales y aparentes

Consideremos una medida del numero de cuentas en un tiempo  $t$

Sean:

$N$  = numero de partículas que entran en el detector

$N'$  = número de partículas detectadas

**Por cada cuenta detectada, el sistema está parado un tiempo**

$\tau$

$t_p = N'\tau$  = tiempo total que el sistema está parado

Número de partículas no contadas =  $\frac{N}{t}t_p \implies$

$$\begin{aligned}N - N' &= \frac{N}{t}N'\tau \\ \frac{N}{t} - \frac{N'}{t} &= \frac{N}{t} \frac{N'}{t} \tau \\ A - A' &= AA'\tau\end{aligned}$$

$$A = \frac{A'}{1 - A'\tau}$$

**Determinación del tiempo muerto:  
Método de las dos fuentes.**

**Partículas por segundo que entran en el detector:**

$n_1$  = con la muestra 1

$n_2$  = con la muestra 2

$n_{12}$  = con la muestra conjunta 1 + 2

$n_f$  = fondo de radiación

Se verifica:

$$\begin{aligned}n_1 - n_f + n_2 - n_f &= n_{12} - f \\n_1 + n_2 &= n_{12} + f \\ \frac{n'_1}{1 - n'_1\tau} + \frac{n'_2}{1 - n'_2\tau} &= \frac{n'_{12}}{1 - n'_{12}\tau} + \frac{n'_f}{1 - n'_f\tau}\end{aligned}$$

Despejando el tiempo muerto:

$$\begin{aligned}(1 - n'_{12}\tau)(1 - n'_f\tau) [(n'_1(1 - n'_2\tau) + n'_2(1 - n'_1\tau))] &= \\(1 - n'_1\tau)(1 - n'_2\tau) [(n'_{12}(1 - n'_f\tau) + n'_f(1 - n'_{12}\tau))] & \\n'_1 + n'_2 - n'_{12} - n'_f + 2(n'_{12}n'_f - n'_1n'_2)\tau & \\+ [(n'_f + n'_{12})n'_1n'_2 - (n'_1 + n'_2)n'_fn'_{12}] \tau^2 &= 0\end{aligned}$$

(Ecuación de segundo grado).

Definimos los coeficientes:

$$\begin{aligned} X &= n'_1 n'_2 - n'_{12} n'_f \\ Y &= (n'_f + n'_{12}) n'_1 n'_2 - (n'_1 + n'_2) n'_f n'_{12} \\ Z &= \frac{n'_1 + n'_2 - n'_{12} - n'_f}{X^2} Y \end{aligned}$$

Se tiene la ecuación:

$$Y\tau^2 - 2X\tau + \frac{X^2 Z}{Y} = 0$$

Con solución:

$$\begin{aligned} \tau &= \frac{2X \pm \sqrt{4X^2 - 4Y X^2 Z/Y}}{2Y} \\ &= \frac{2X - \sqrt{4X^2 - 4X^2 Z}}{2Y} \end{aligned}$$

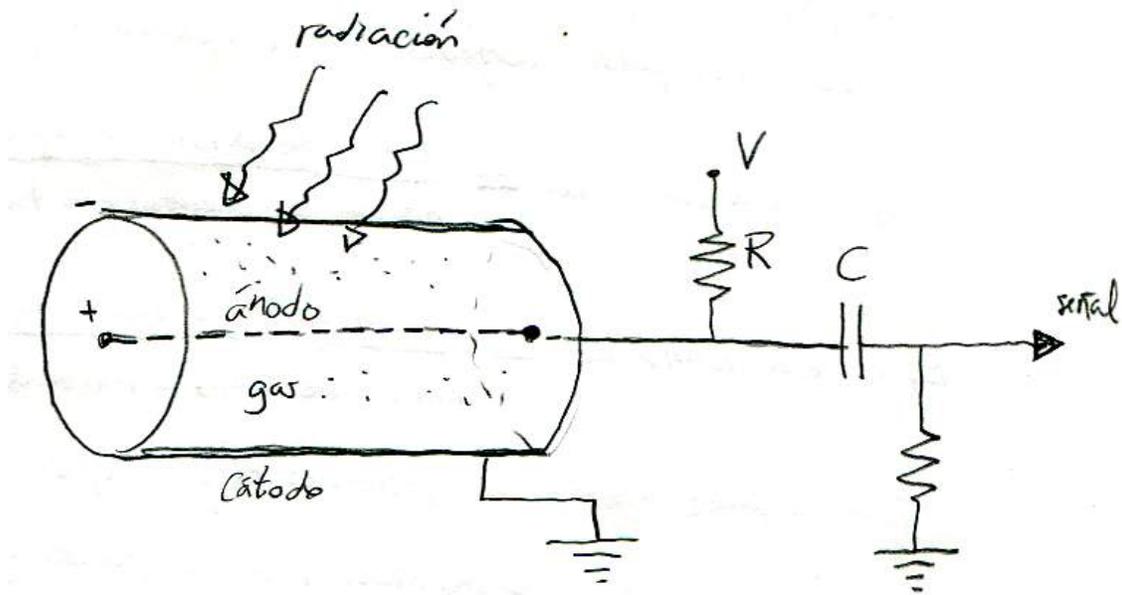
$$\tau = \frac{X}{Y} (1 - \sqrt{1 - Z})$$

Nótese que  $X > 0$ .

Como  $\tau > 0$  debe cumplirse  $Z > 0$ .

## Detectores de gas

- Los primeros detectores desarrollados.
- El gas se encierra en una cámara cilíndrica.
- Se aplica un potencial entre la pared y un filamento central (ánodo +).
- Cuando la radiación atraviesa el gas produce iones y electrones, que se mueven hacia el filamento.
- Se colecta una carga  $Q$  que produce un pulso eléctrico y que es procesado electrónicamente.



- La altura del pulso es función del voltaje  $V$  aplicado.

- Zonas de operacion:

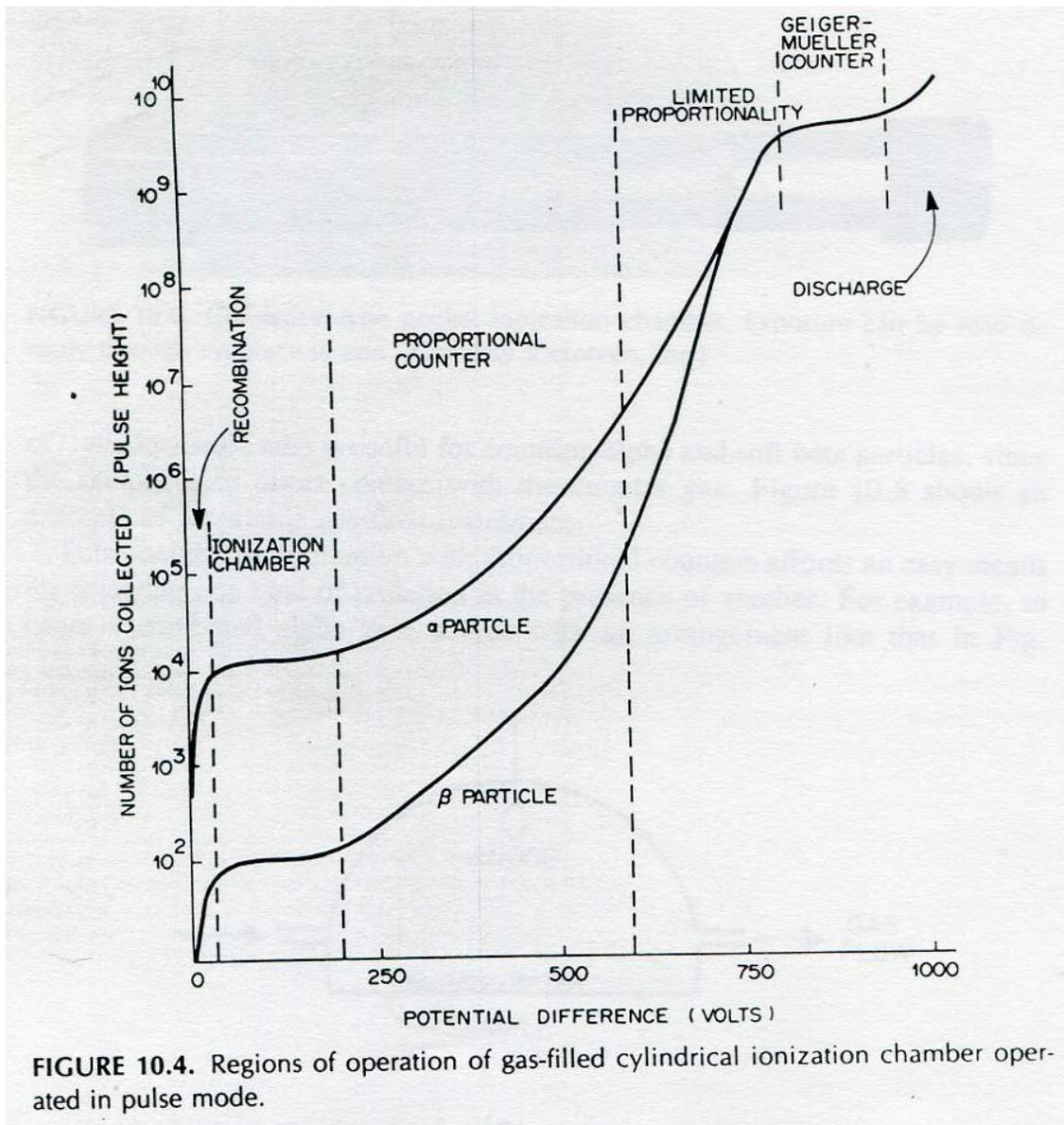


FIGURE 10.4. Regions of operation of gas-filled cylindrical ionization chamber operated in pulse mode.

1. **Zona de recombinación:**  $V$  pequeño y el campo eléctrico es poco eficiente en la recolección. Se compite con la recombinación.
2. **Región de saturación:** No hay recombinación  $\rightarrow$  **Cámaras de ionización:** usadas en modo de corriente en dosimetría. Se usa aire seco o gases más pesados como Argón a presión normal.

3. **Región proporcional:** Los  $e^-$  poseen energía para producir ionizaciones secundarias que aumentan  $Q$ . **La altura de los pulsos depende de las características de la ionización inicial**

Distinguen entre partículas de diferentes energías y poderes de ionización

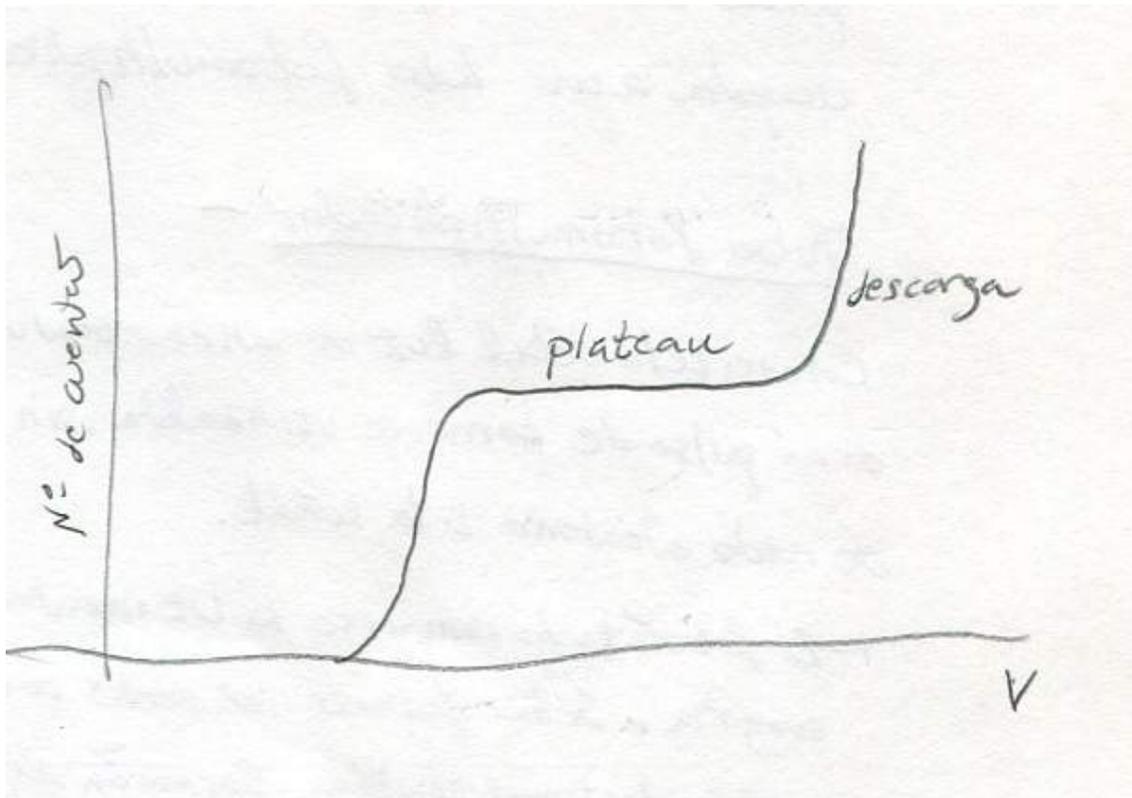
**Contadores proporcionales:**

- Estudio de muestras de baja actividad
- Espectroscopía de rayos  $X$  y  $\gamma$  de baja actividad
- Detección de  $n$ ,  $\alpha$ , etc

**Al final de esta zona se pierde la proporcionalidad**

4. **Región de Geiger-Muller:** Pulso independiente de la ionización. **Todas las partículas producen pulsos de la misma altura. Se pierde la información sobre la energía depositada.** Los pulsos suelen ser grandes (del orden de voltios), lo que simplifica la electrónica. **Tiempo muerto elevado.**
5. **Región de descarga continua.** El gas se ioniza debido al elevado potencial aplicado y el detector es inservible

- **Detectores Geiger-Müller:** Funcionan como simples contadores. Sólo se requiere que cada pulso sea registrado por el sistema de contaje.
  - **Curva de plateau:** Representa el número de cuentas frente a  $V$ .
  - A partir de un voltaje dado, las cuentas aumentan rápidamente hasta un valor aproximadamente constante (plateau)
  - Si el voltaje aumenta mucho, se pasa a la zona de descarga, peligrosa para el detector.
  - **El voltaje de trabajo** se escoge dentro del plateau y alejado de la zona de descarga.



## Detectores de centelleo

- La radiación produce luz de centelleo al interactuar con ciertos materiales luminiscentes.
- Primer método para detectar radiación: Roentgen observa fluorescencia en una pantalla cuando descubre los rayos X
- Constan de dos elementos:
  1. Materia centelleadora
  2. Tubo fotomultiplicador

## Materiales centelleadores:

- La radiación pierde energía en un centelleador:
  1. se producen transiciones electrónicas a estados excitados.
  2. Decaen emitiendo fotones, que pueden ser observados y relacionados
- **Fluorescencia:** Si la emisión es rápida ( $10^{-8}$  s)
- **Fosforescencia:** Si es más lenta
- Tipos de centelleadores:
  1. **Inorgánicos.** Más utilizados los cristales de haluros alcalinos, como el INa  
Más luz de salida y respuesta lineal, aunque lentos. Útiles en espectroscopía  $\gamma$
  2. **Orgánicos.** En forma cristalina (antraceno), líquidos (tolueno) o polimerizados en plásticos.  
Son mucho más rápidos, pero producen menos luz. Preferibles en espectroscopía  $\beta$  y detección de neutrones.
- Características de los buenos centelleadores:
  1. Gran **eficiencia** en la conversión de energía en luz

2. Relación **lineal** entre la energía depositada y la luz producida
  3. **Transparencia** a la luz producida
  4. Corto tiempo de desaparición de la luminiscencia  $\longrightarrow$  se generan pulsos luminosos con la mayor rapidez posible
- El centelleador se rodea de superficies reflectantes para atrapar la máxima luz posible.

Tubo fotomultiplicador
------------------------

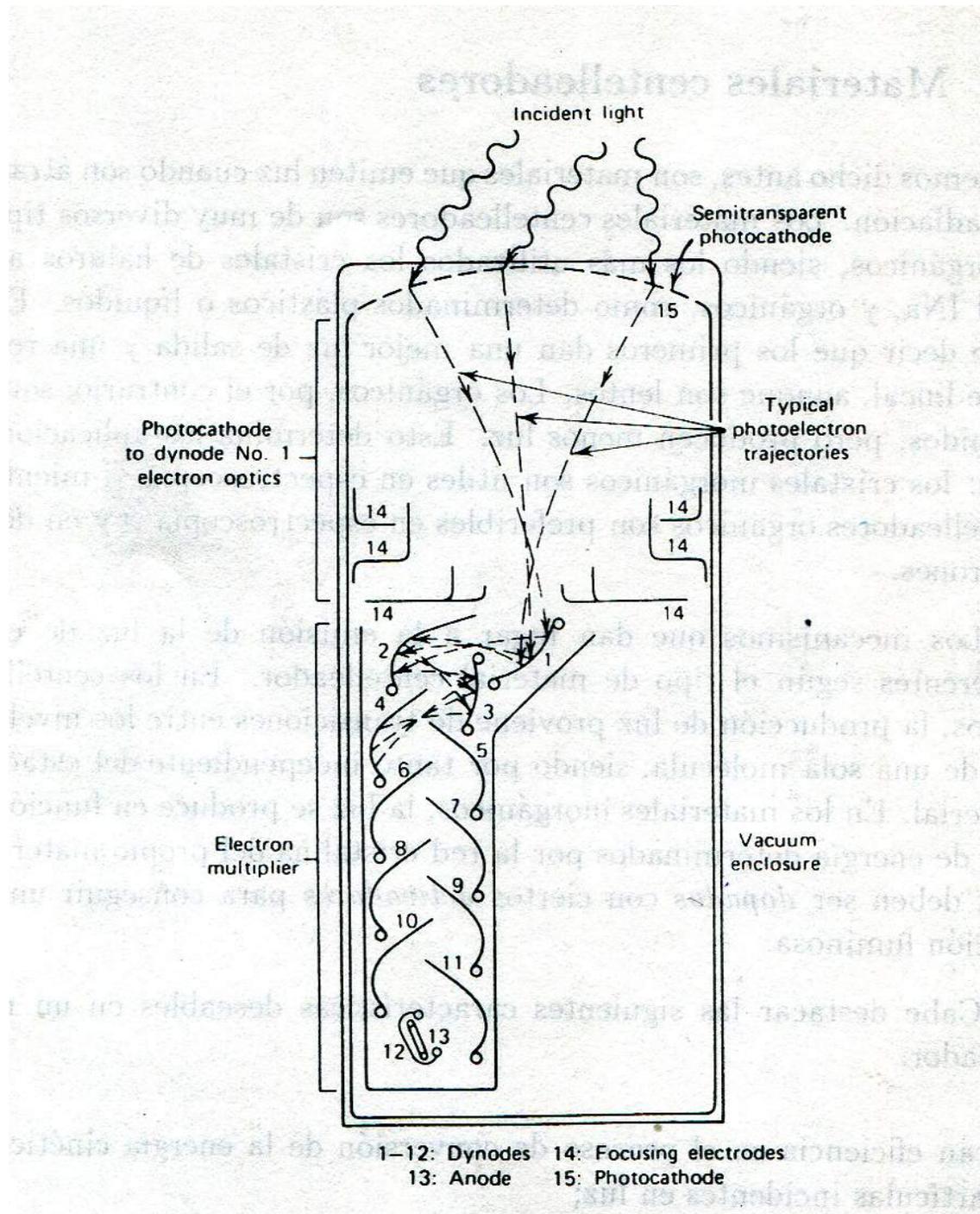


Figura 6.8. Esquema de un tubo fotomultiplicador.

- La luz se recoge en un **tubo fotomultiplicador que genera un pulso eléctrico**
  1. Un cátodo fotosensible convierte los fotones en fotoelectrones
  2. Se aceleran por un campo eléctrico hacia un electrodo (**dínodo**)
  3. Cada electrón arranca un número de electrones secundarios
  4. Los electrones son multiplicados por una serie sucesiva de dínodos
  5. Amplificaciones de  $10^7-10^{10}$  proporcionan una señal de salida adecuada
  6. La magnitud de la señal es proporcional a la pérdida de energía que produjo el centelleo

## Detectores de semiconductor

- Los detectores sólidos presentan mayor densidad que los líquidos o gaseosos
- Esto permite reducir el tamaño del volumen activo
- Los detectores de centelleo tienen eficiencia baja y resolución pobre.
- Los detectores de **estado sólido** emplean materiales semiconductores:
  1. Mejor resolución
  2. Respuesta rápida y lineal
  3. Versatilidad geométrica
- Desventajas:
  1. Limitados a tamaños muy pequeños
  2. Alta susceptibilidad a la degradación
- **Tipos de detectores de semiconductor:**
  1. De unión difusa
  2. De barrera de superficie
  3. De GeLi (gran resolución, requieren temperaturas de Ni líquido)

## Detectores de neutrones

- Los neutrones no tienen carga, su detección se basa en los choques con los núcleos atómicos
- En estas reacciones se producen partículas cargadas o fotones como productos secundarios, que se detectan+
- La reacción nuclear depende de la energía del neutrón.
- **Ejemplo:** neutrones térmicos ( $T \sim 0.025$  eV) o lentos ( $T < 1$  eV):

Se utiliza un contador proporcional de gas  $\text{BF}_3$  (trifluoruro de boro) en donde ocurre la reacción

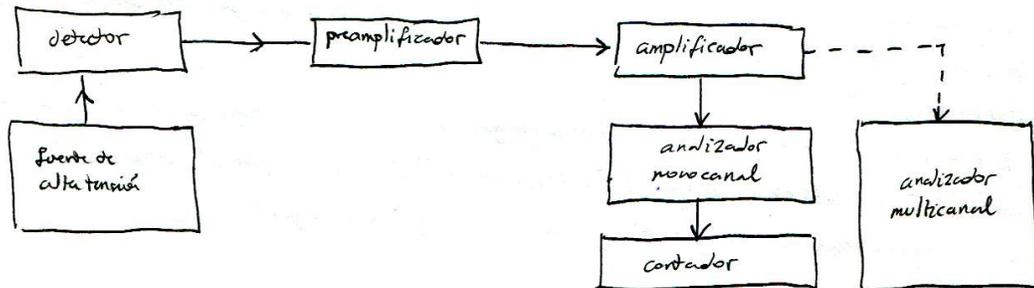


Si toda la energía  $Q$  liberada se absorbe en el detector, se observa un pulso de 2.79 eV.

- Otros métodos de detección de neutrones:
  - **Retroceso del protón:** Se hacen incidir sobre un gas conteniendo H y se detectan los protones de retroceso.
  - **Activación neutrónica:** Muchos núcleos se vuelven radiactivos tras capturar neutrones. Método utilizado en reactores.

## Electrónica asociada al proceso de detección.

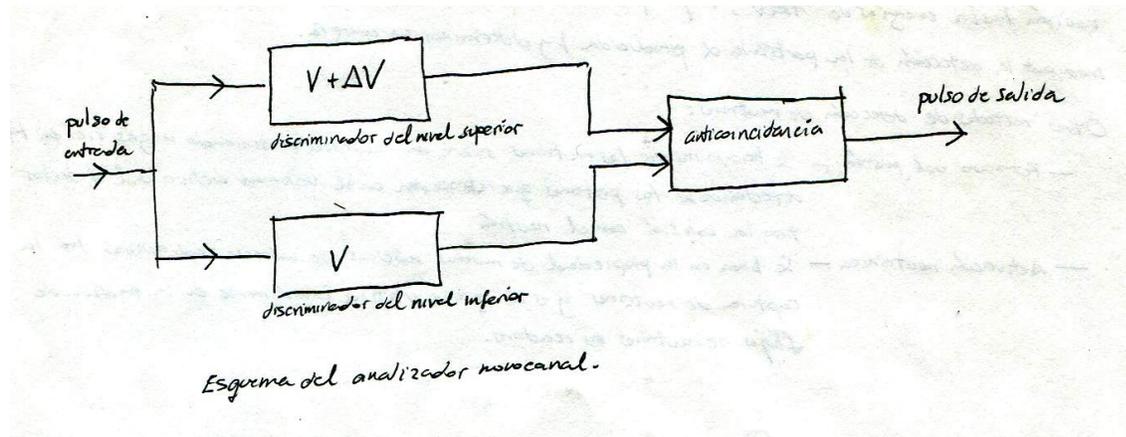
- Los detectores proporcionan pulsos eléctricos de altura proporcional a la energía depositada por la partícula incidente
- Sistema electrónico de análisis de pulsos:
  1. **Fuente de alta tensión.** Proporciona el voltaje necesario para el funcionamiento del detector
  2. **Preamplificador y amplificador,** para que el pulso final tenga una altura suficiente
  3. **Analizador de altura de pulsos.**



esquema de la electrónica asociada al proceso de detección

## Analizador monocanal (modo diferencial)

1. El pulso se introduce simultáneamente en dos **circuitos discriminadores**
2. Se determina si la altura del pulso es inferior o superior al nivel elegido, en cuyo caso dejan pasar la señal
3. Las dos señales se llevan a un circuito de **autocoincidencia**
4. Se produce un pulso si la amplitud de entrada estaba entre  $V$  y  $V + dV$ .
5. Los pulsos finales se llevan a un contador



- El analizador monocanal implica gran número de operaciones repetitivas.
- El **analizador multicanal** las realiza de forma simultánea.