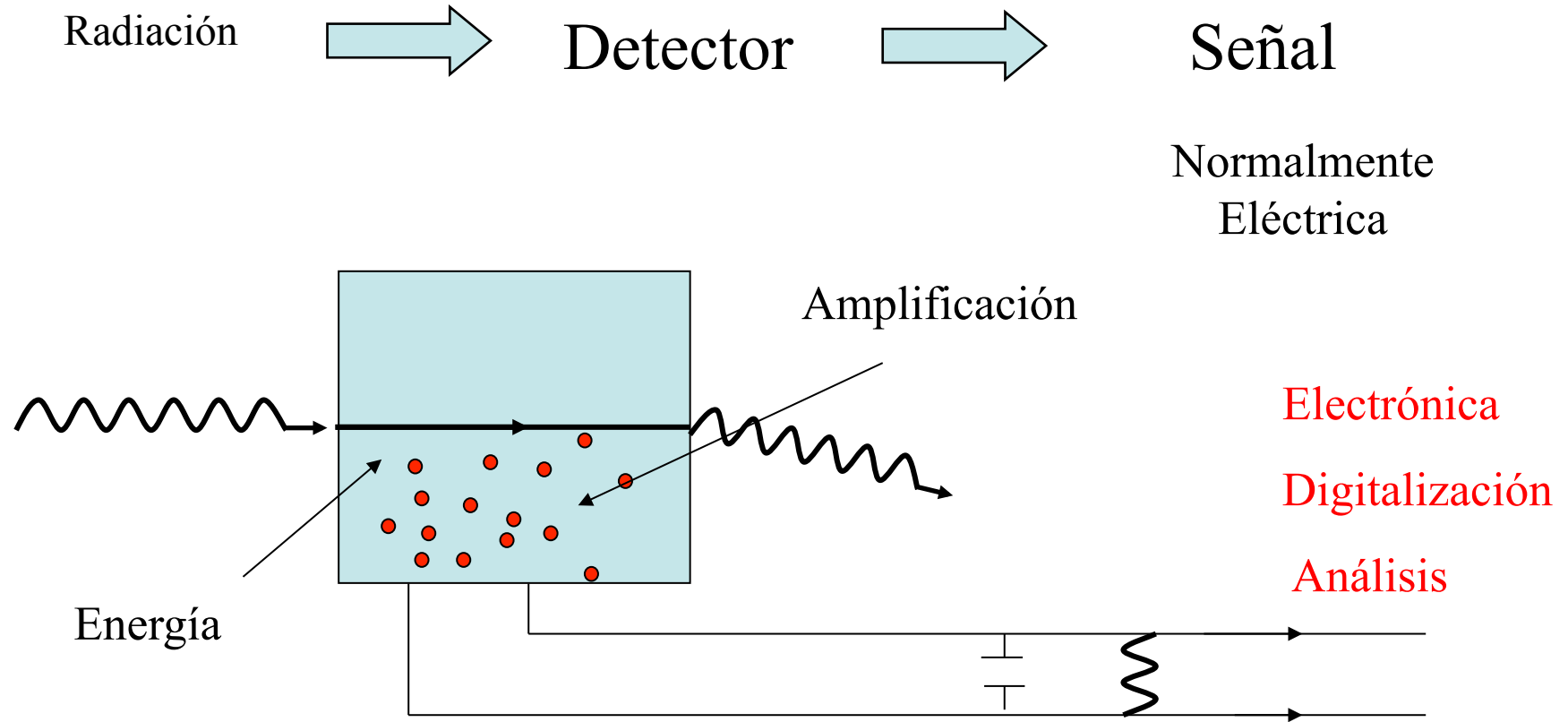


Detectores de Partículas

Física de Astropartículas *Master de Física Fundamental*

Juan Abel Barrio, Curso 11/12
Universidad Complutense de Madrid

Detección de radiación



© Jose Luis Contreras, Juan Abel Barrio

Detectores de partículas

- Propiedades generales (1.5 h)
- Técnicas de Montecarlo (0.5 h)
- Detectores de radiaciones ionizantes (2 h)
 - Cámaras de ionización
 - Detectores de centelleo
 - Detectores de estado sólido
- **Fotodetectores (1 h)**
 - **Fotomultiplicadores**
 - **Detectores de estado sólido**
- Técnicas de detección (1 h)
 - Espectroscopía con centelleadores
 - Detectores de trazas
 - Calorímetros
 - Detectores combinados (LHC)

Propiedades generales

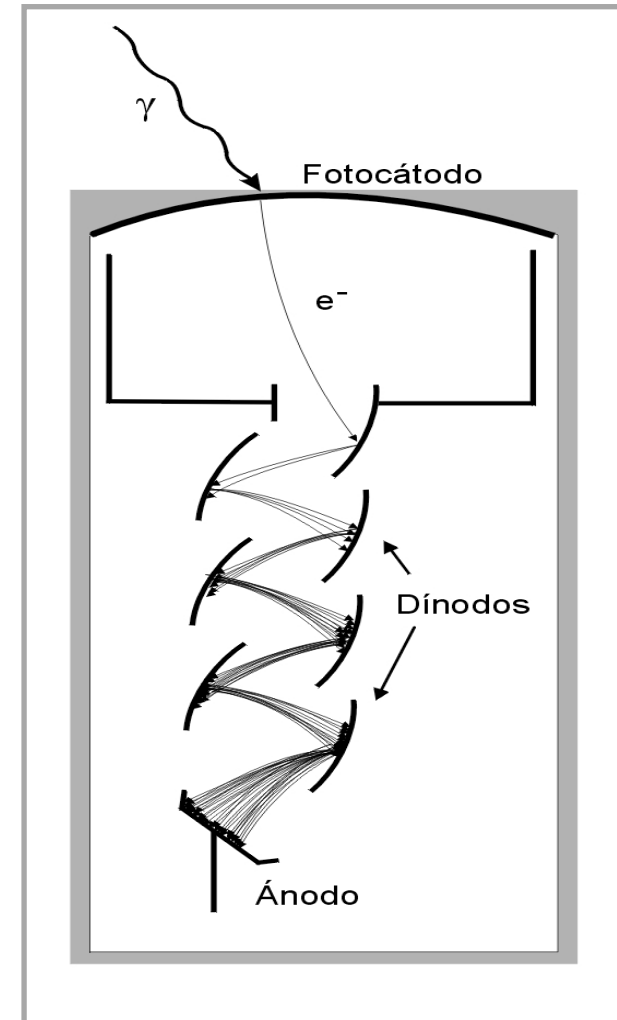
Fotocátodo \Rightarrow · Efecto Fotoeléctrico. Emisión e^-

Dínodos \Rightarrow · Aceleración del e^- y emisiones secundarias (multiplicación)
· Cascada de e^- hacia el ánodo

Ánodo \Rightarrow · Recoge la cascada de e^-
· Corriente eléctrica

Modos de Operación $\left\{ \begin{array}{l} \text{Continuo – Iluminación cte.} \\ \text{Pulsado – Centelleador,} \\ \text{contador Cherenkov} \end{array} \right.$

Respuesta \Rightarrow Lineal \Rightarrow Energía depositada
 \Rightarrow Rápida \Rightarrow Transito \sim ns



Esquema básico de un fotomultiplicador

El Fotocátodo. Eficiencia y Sensibilidad (I)

Ventana $\left\{ \begin{array}{l} \text{Vidrio} \Rightarrow \text{Luz Visible (350 – 800 nm)} \\ \text{Cuarzo} \Rightarrow \text{U.V. (150 – 800 nm)} \end{array} \right.$

Efecto Fotoeléctrico (Einstein)

$$E = h\nu - f \Rightarrow \text{Frecuencia Umbral}$$

E: Energía cinética del electrón emitido

ν : Frecuencia del fotón incidente ($h\nu \sim 3 \text{ eV}$)

f: Función de trabajo ($\sim 2 \text{ eV}$)

Eficiencia Cuántica $\eta(\lambda)$

$$QE(\lambda) = \eta(\lambda) = \frac{\text{n}^\circ \text{ electrones emitidos}}{\text{n}^\circ \text{ fotones incidentes } (\lambda)}$$

El Fotocátodo. Eficiencia y Sensibilidad (II)

Sensibilidad del fotocátodo $S(\lambda)$

$$S(\lambda) = \frac{I_K}{P(\lambda)}$$

Intensidad corriente fotoelectrones (A)
Potencia de la radiación incidente (W)

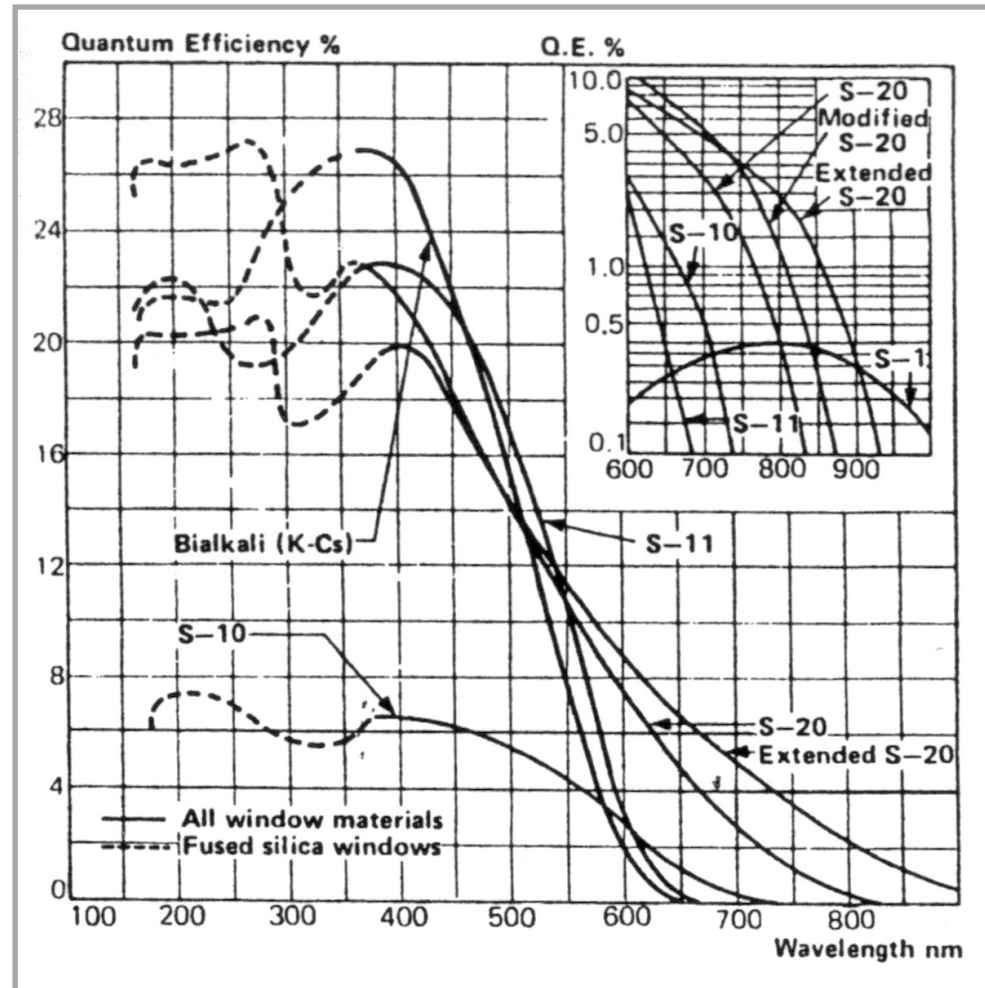
$$S(\lambda) = \lambda \cdot \eta(\lambda) \cdot e / (hc)$$

Sensibilidad Luminosa

Corriente por Lumen (no se utiliza)

El Fotocátodo. Eficiencia y Sensibilidad (III)

Eficiencia Cuántica



El Fotocátodo. Eficiencia y Sensibilidad (IV)

Fotocátodos comerciales

Metales – Baja eficiencia (0.1%)

Nombre	Comp.	$\lambda_{\text{máx}}$ (nm)	Q.E. (%)
S1	Ag-O-Cs	800	0.36
S4	SbCs	400	16
S11 (A)	SbCs	440	17
Super A	SbCs	440	22
S13 (U)	SbCs	440	17
S20 (T)	SbNa-KCs	420	20
S20R	SbNa-KCs	550	8
TU	SbNa-KCs	420	20
Bialkali	SbRb-KCs	420	26
Bialkali D	Sb-K-Cs	400	26
Bialkali DU	Sb-K-Cs	400	26
SB	Cs-Te	235	10

Alta pérdida de energía por colisión con electrones libres deslocalizados (gas de electrones)

Grosor de la capa de fotocátodo – Profundidad de escape

Semiconductores – Alta eficiencia (10-30%)

Estructura de bandas de energía.

Pocos electrones en la banda de conducción.

Un electrón excitado a esta banda sufre pocas colisiones

Semiconductores con afinidad electrónica negativa (80%)

GaP fuertemente dopado con Zn y Cs

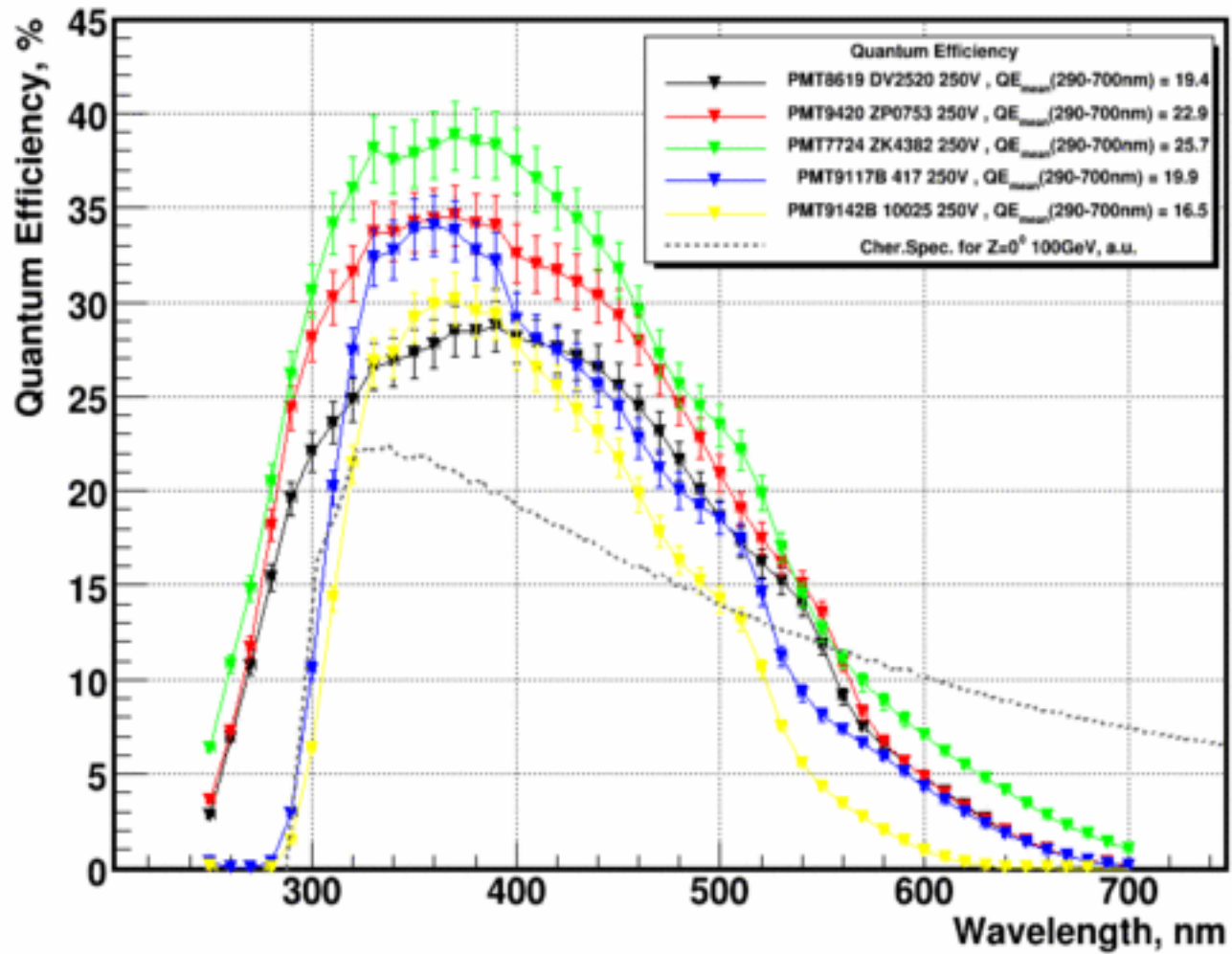
Estructura de bandas en superficie deformada.

Función de trabajo negativa \rightarrow e^- sólo necesita energía para alcanzar la superficie

Problema: Fabricación muy complicada

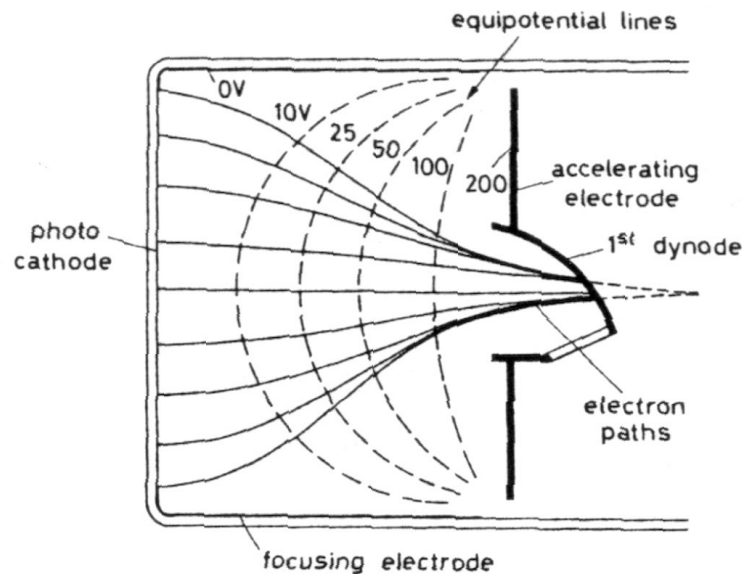
El Fotocátodo. Eficiencia y Sensibilidad (V)

Eficiencia Cuántica – estado del arte



Sistema electro-óptico de entrada

Objetivo → Recoger los fotoelectrones y enfocarlos hacia el primer dínodo



Requisitos

1. Máxima eficiencia

Deben llegar al primer dínodo la mayor cantidad posible de fotoelectrones

2. Independencia del punto de emisión

El tiempo que un fotoelectrón tarda en llegar al primer dínodo debe ser independiente del punto del fotocátodo de donde se emitió

→ **Resolución Temporal**

Sistema de Multiplicación. Dínodos (I)

Objetivo ⇒ Amplificar la corriente mediante la emisión de electrones secundarios en cada etapa o dínodo

Proceso ⇒ Impacto de un electrón sobre el dínodo (análogo al fotoeléctrico)

Metales – Poco eficientes

Semiconductores – Muy eficientes

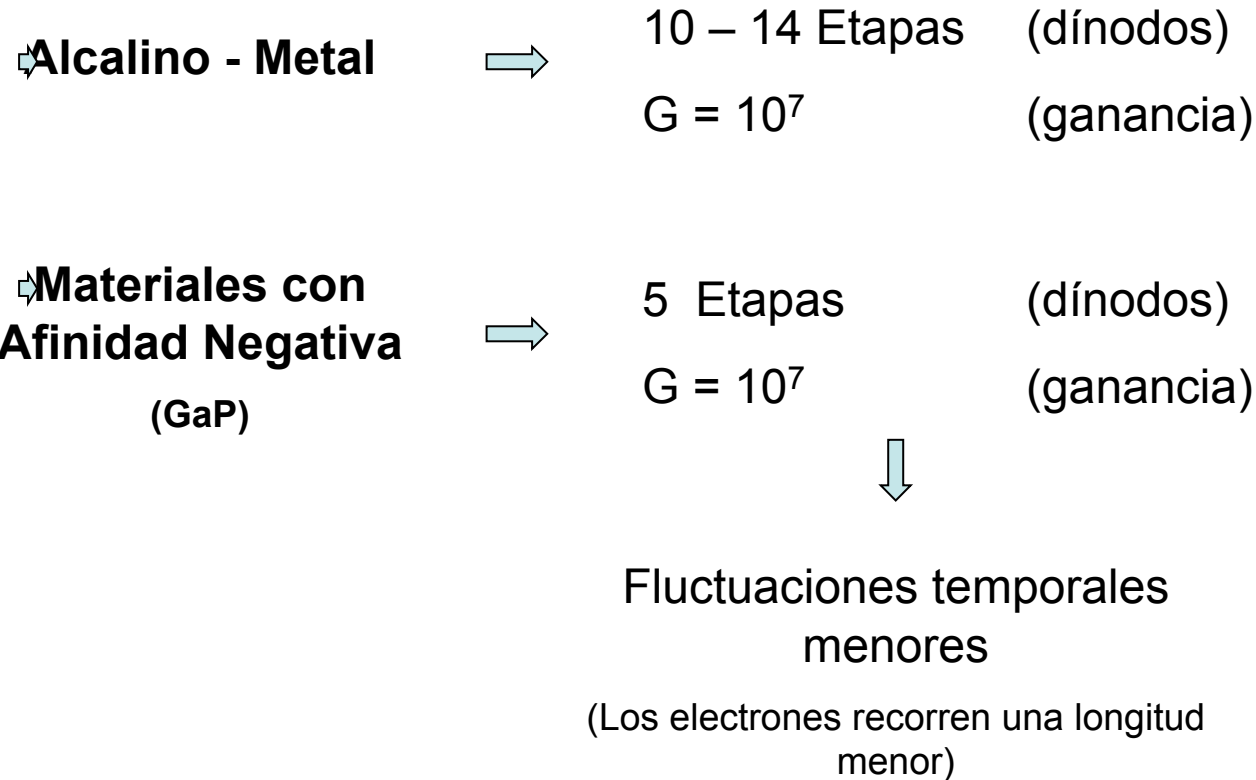
Diferencia de Potencial constante entre dínodos

Dínodo = Capa emisora e^- sobre conductor

Alcalino / Alcalinotérreos sobre metal (Ag-Mg, Cu-Be, Cs-Sb)

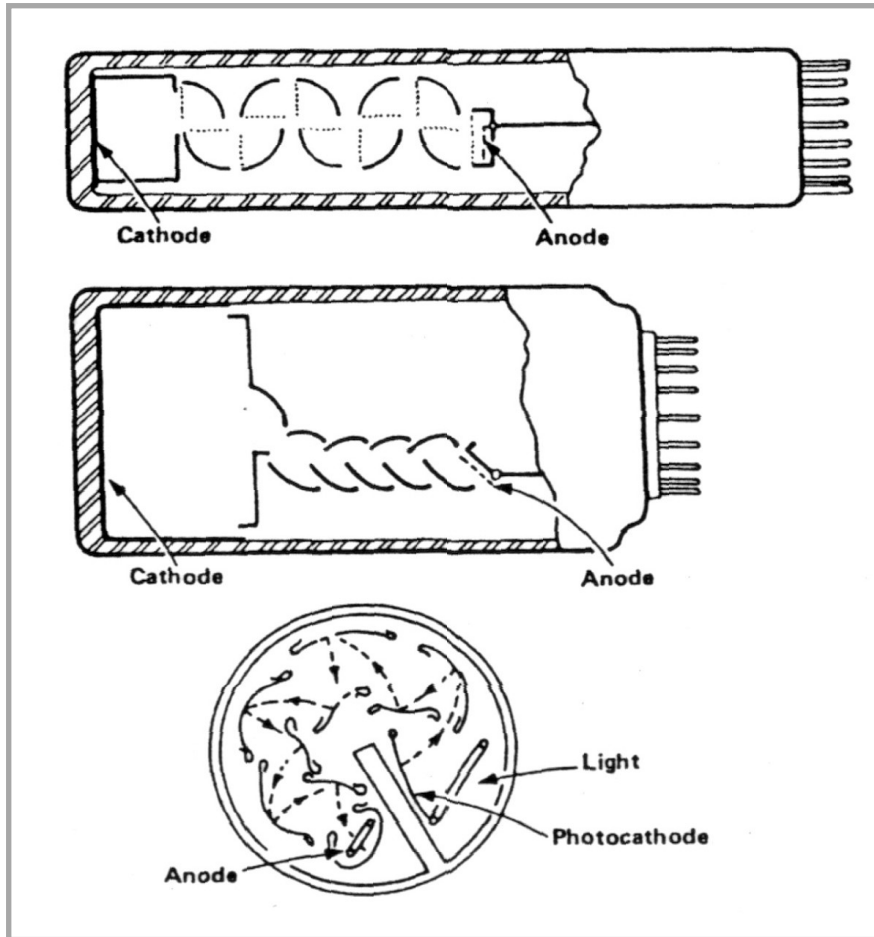
Propiedades ⇒ {
· Alta ganancia o “Factor de Emisión Secundario” (d)
· Emisión secundaria estable (bajo corrientes altas)
· Baja emisión termoiónica. Bajo ruido

Sistema de Multiplicación. Díodos (II)



Sistema de Multiplicación. Dínodos (III)

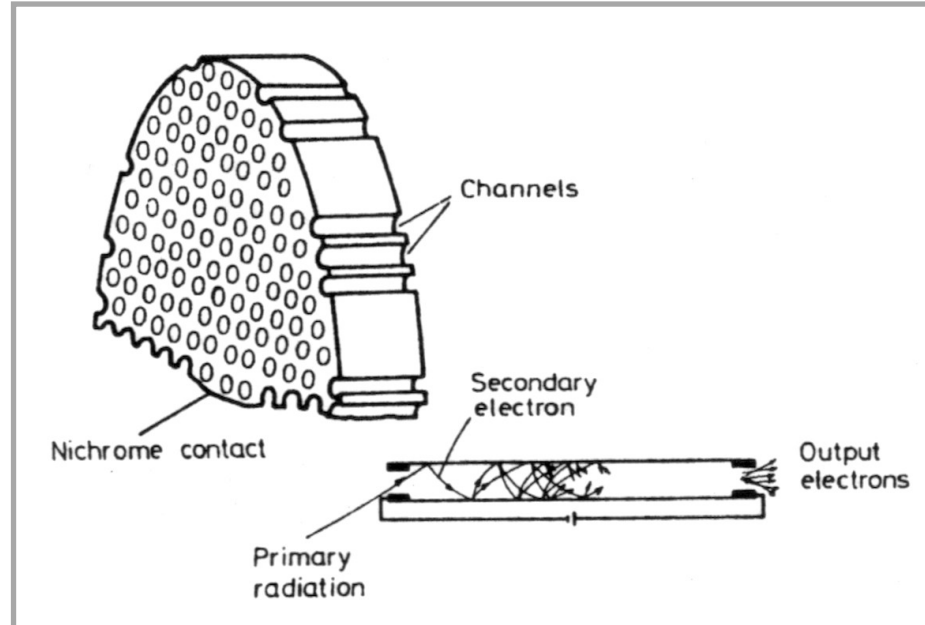
Configuraciones – Box & Grid, Lineal, Circular



- Reflexión de e^- entre dínodos
→ Alta ganancia
- Utilización eficiente del espacio
→ Gran número de etapas
- Cátodo y Ánodo aislados
→ No retroalimentación

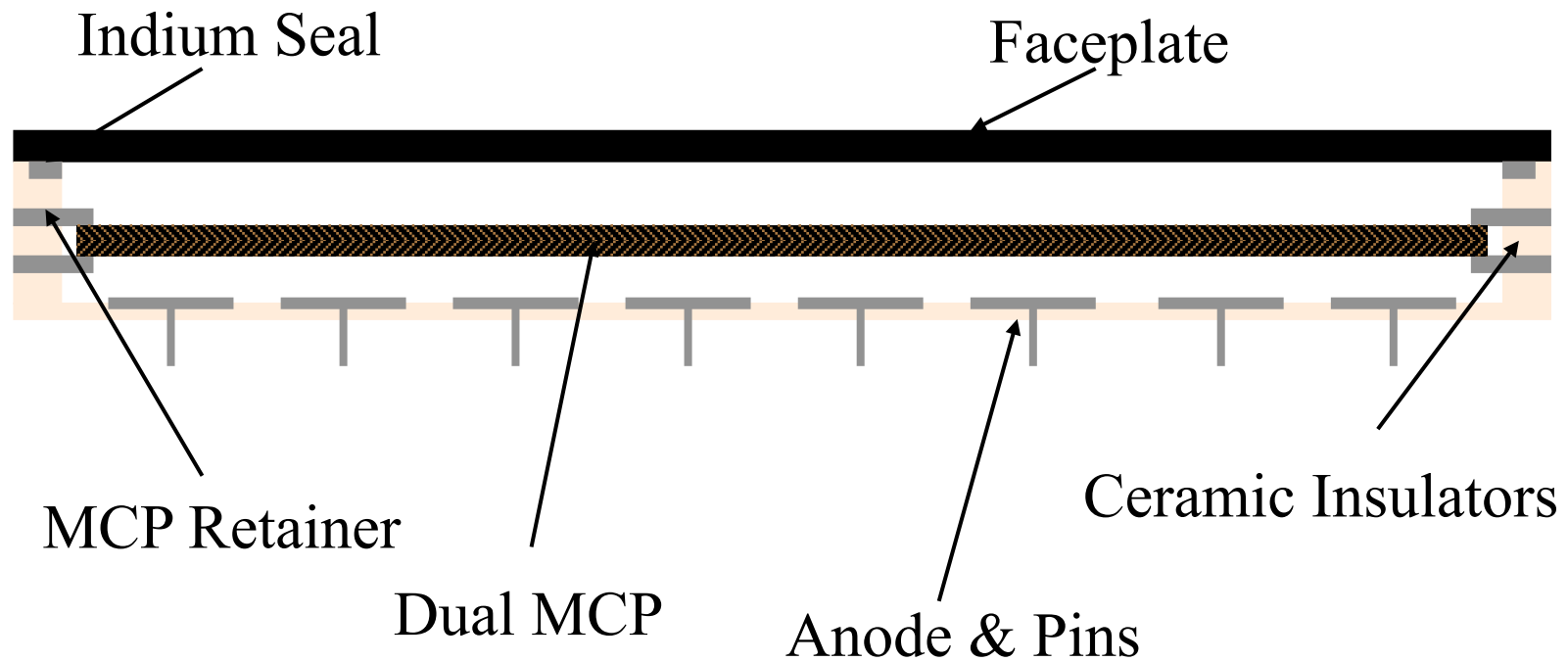
Sistema de Multiplicación. Dínodos (V)

Configuraciones – Placa Microcanal (MCP)

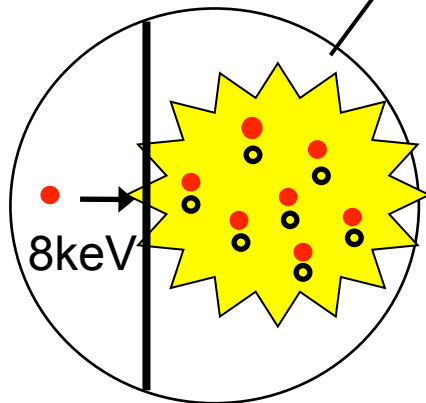
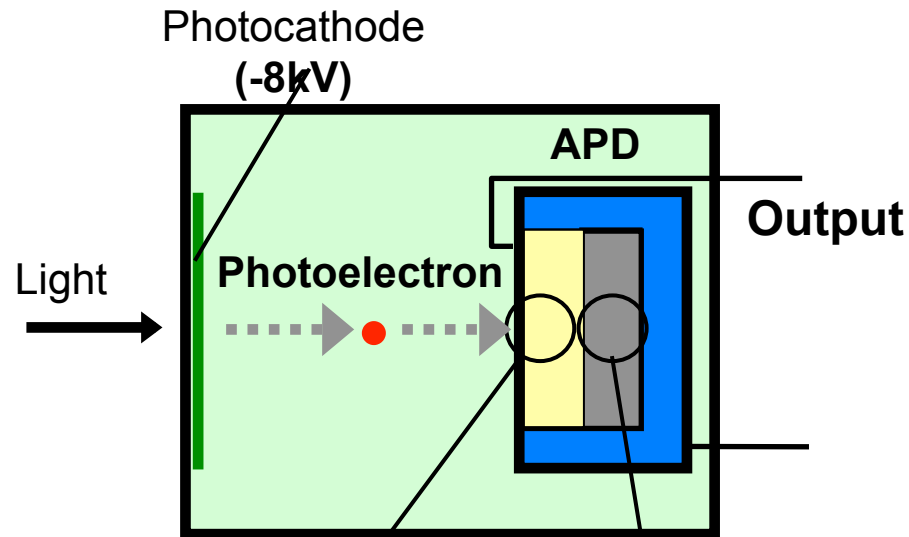


- Placa cristalina perforada → microcanales 1-10 cm
- Superficies interiores recubiertas de material semiconductor → dínodo continuo
- Bases de la placa recubierta con aleación metálica → Electrodo – Diferencia de potencial

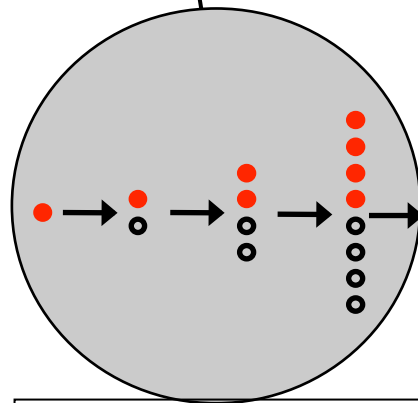
MCP-PMT Construction



Hybrid Photo-detector (HPD)

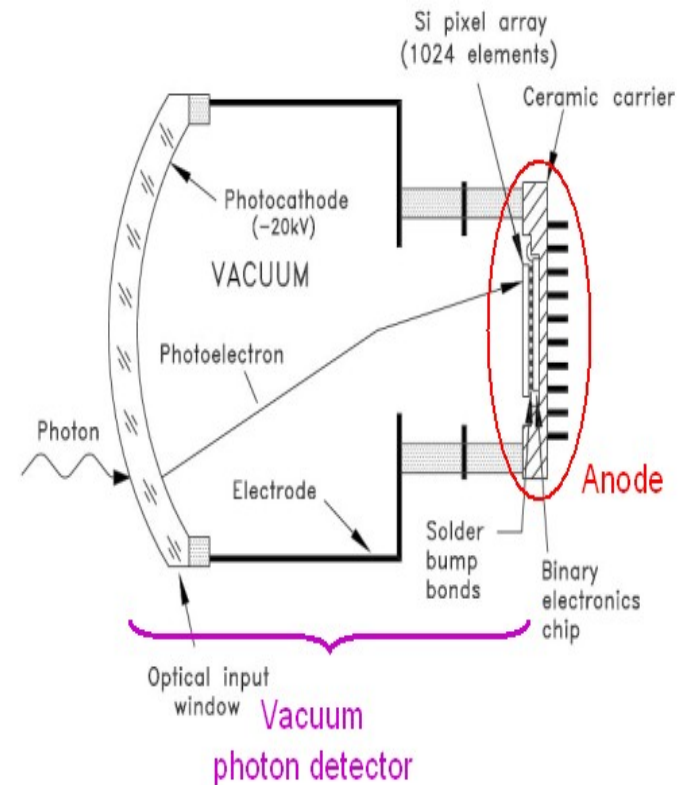


**Electron Bombardment
X 1200**



**Avalanche Gain
X 50**

Combination of EB and avalanche gain



Parámetros de Operación (I)

Ganancia y Tensión de Alimentación

Etapa $d = KV_d$ V_d : Tensión entre díodos

Total $G = (KV_d)^n$ n : nº de etapas o díodos

Etapas para un G fijo y V mínimo

$$V = nV_d = nG^{1/n}/K \sim 1000 \text{ V}$$

Ganancia vs. Tensión

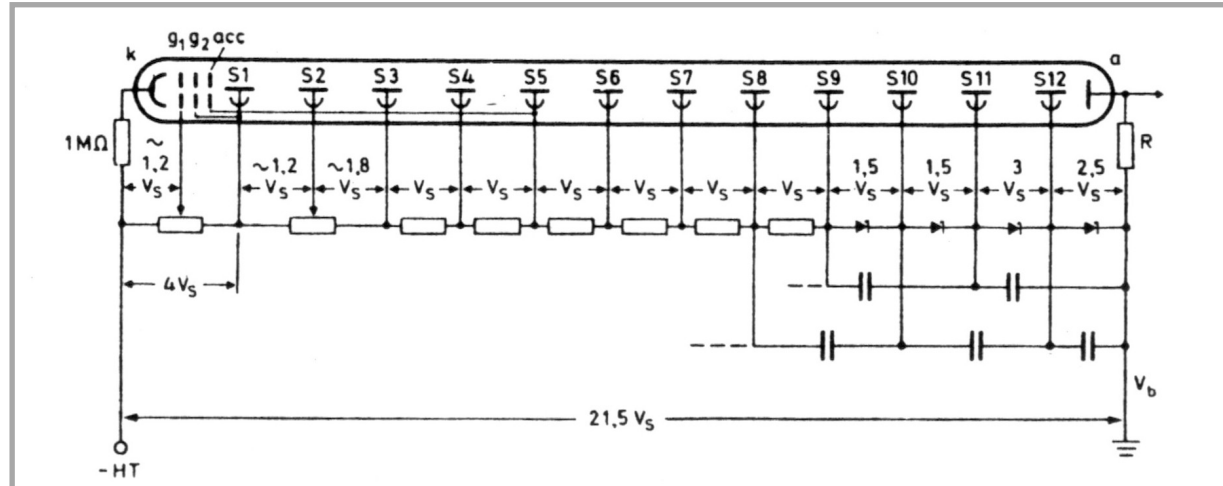
$\Delta G(\%) = n \Delta V(\%) \Rightarrow$ Fuentes de Tensión muy estables

$$\Delta G < 5\% , n = 10 \rightarrow \Delta V < 0.5 \%$$

Parámetros de Operación (II)

Divisores de Tensión

Se utilizan para seleccionar la tensión en cada dínodo



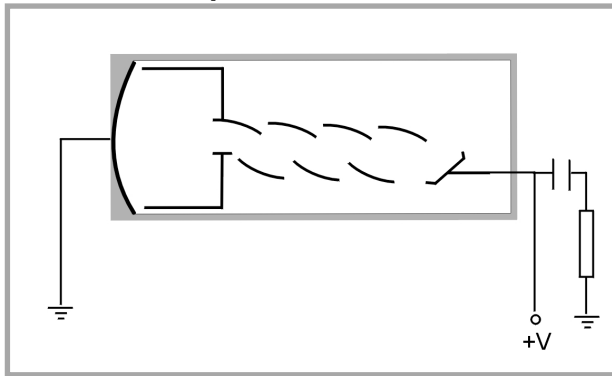
$$\frac{\Delta G}{G} = \frac{I_{\text{ánodo}}}{I_{\text{resist}}} \frac{n(1-d) + 1}{(n+1)(1-d)} \Rightarrow I_{\text{ánodo}} \ll I_{\text{resist.}} \quad (\sim 100 \text{ veces})$$

Modo Pulsado \rightarrow Picos de Corriente $\left\{ \begin{array}{l} \text{Condensadores} - \text{Mantienen la tensión} \\ \text{Diodos Zener} - \text{Potencial cte. sobre un umbral} \end{array} \right.$

Parámetros de Operación (II)

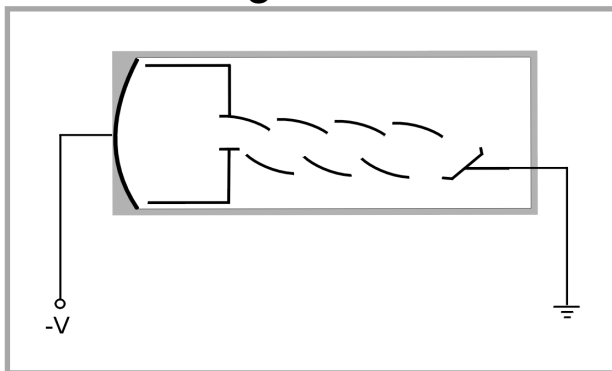
Tensión Aplicada

Tensión positiva



- Evita descargas Fotocátodo-Centelleador o Fotocátodo-Carcasa (minimiza ruido)
- Espectroscopía de Amplitudes

Tensión negativa

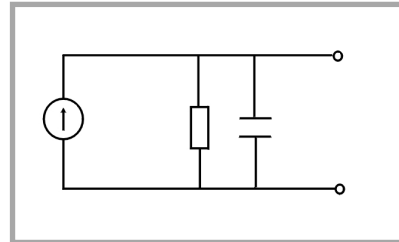


- Ánodo acoplado a la electrónica de análisis
- Aplicaciones de conteo de tiempos
- Cátodo en Alta Tensión → Posibles fugas de corriente

Parámetros de Operación (V)

Forma de los Pulsos

Fotomultiplicador \rightarrow ~ Generador ideal de corriente



R y C intrínsecas $\tau = RC$

$$I(t) = \frac{V}{R} + C \frac{dV}{dt}$$

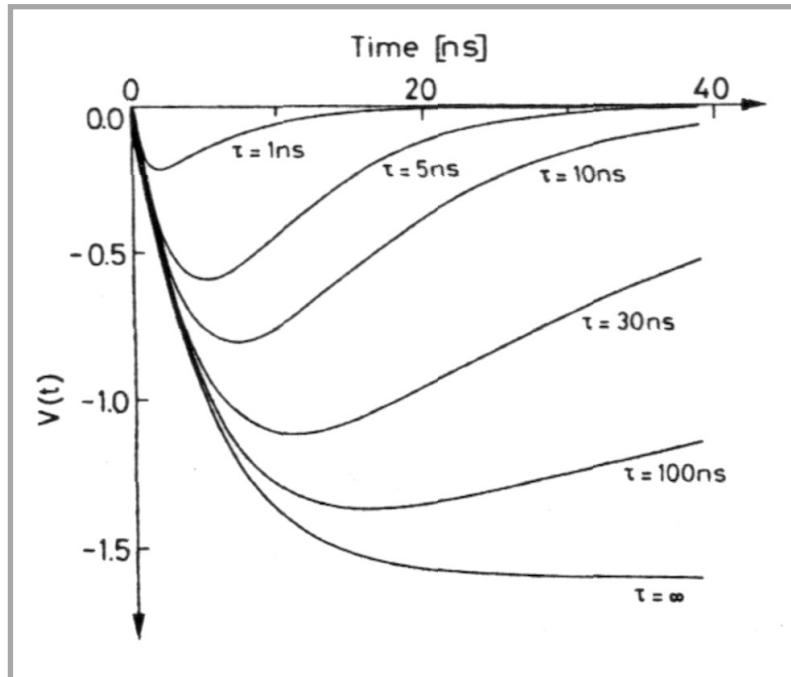
Luz
Centelleador \Rightarrow $I_{\text{ánodo}}(t) = \frac{GNe}{\tau_s} \exp(-t/\tau_s)$
(exponencial τ_s)

$$V(t) = \frac{-GNe}{\tau - \tau_s} [\exp(-t/\tau_s) - \exp(-t/\tau)] \quad \tau \neq \tau_s$$

$$V(t) = \frac{GNe}{\tau_s^2} t \cdot \exp(-t/\tau_s) \quad \tau = \tau_s$$

Parámetros de Operación (VI)

Forma de los Pulsos



$$\tau_s = 5 \text{ ns}$$

$\tau \ll \tau_s \rightarrow$ Modo Impulso “rápido”

Señal Original

Respuesta Rápida

Muy sensible a fluctuaciones
en Fotocátodo

$\tau \gg \tau_s \rightarrow$ Modo impulso “lento”

Señal dominada por RC

(Integración de Corriente)

Resolución $1/\tau$ (apilamiento)

Ruido

Corriente de oscuridad

- Emisión Termoiónica $\Rightarrow I(t) = AT^2 \exp\left(\frac{-ef}{kT}\right) \Rightarrow$ Bajar Temperatura
- Corrientes de Fuga \Rightarrow Aislar electrodos
- Contaminación Radioactiva \Rightarrow Provocan emisiones en el cátodo o en los dínodos (Corrientes pequeñas)
- Fenómenos de Ionización \Rightarrow Gases residuales ionizados por e^- Iones positivos se aceleran y liberan electrones en el cátodo (*afterpulses*)
- Fenómenos Luminosos \Rightarrow Luz emitida en las últimas etapas alcanza el fotocátodo
Retraso $\sim 30-60$ ns Amplitud pequeña

Ruido

Ruido Estadístico

Naturaleza estadística del efecto fotoeléctrico

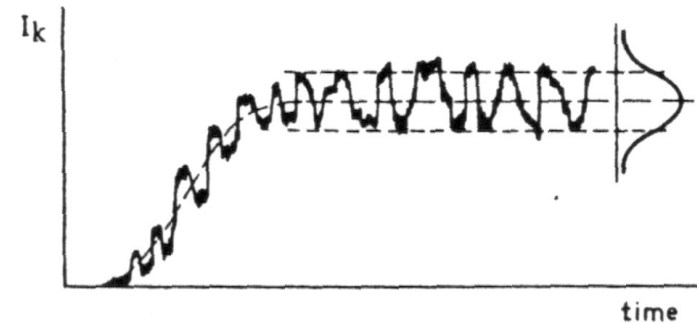
Fuentes

Fotocátodo (límite fundamental)

$$\langle \Delta I^2 \rangle = I_e / \tau$$

Dínodos (~10%)

- Emisión electrónica
- Tiempos de Tránsito
- Variación superficial de d , ...



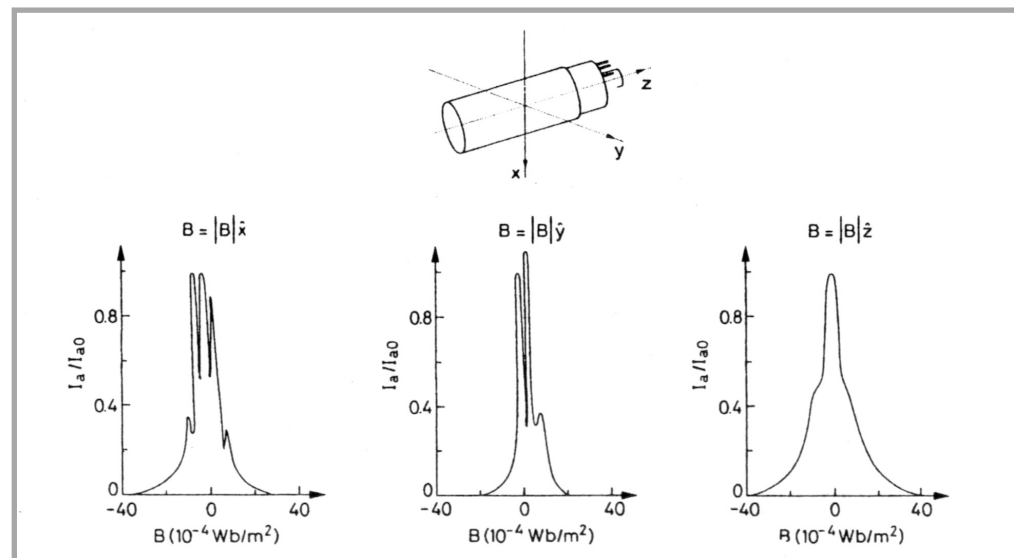
Factores Ambientales (I)

Luz Ambiental

- Con Tensión → Destrucción, Fatiga, Aumento de la Corriente de Oscuridad
- Sin Tensión → Aumento de Corriente de Oscuridad (Recuperable)

Campos Magnéticos

- $I_{\text{ánodo}}$ decrece con el campo magnético
- Menor efecto si $B \parallel$ eje del fotomultiplicador
- Detectores recubiertos con mu-metal (aleación Ni-Fe)



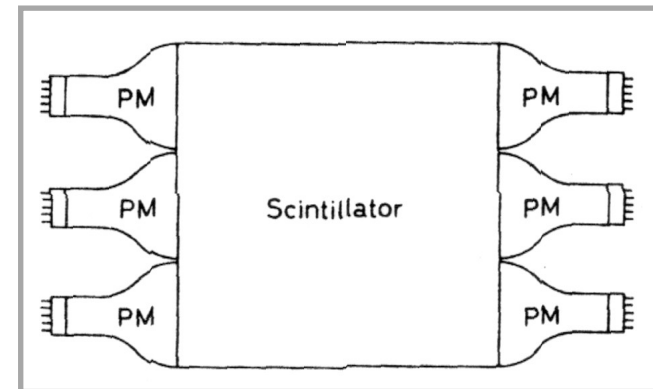
Acoplamiento a un Fotomultiplicador (I)

Un Fotomultiplicador

- Acoplamiento →
- Debe permitir máxima transmisión → Siliconas
 - Índice de refracción similar a PM y Centelleador.

Múltiples Fotomultiplicadores

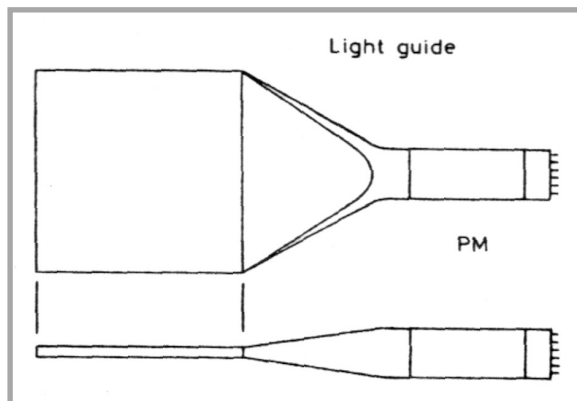
- Se aumenta la fracción de luz detectada
- Complica el montaje y la electrónica
- Útil en detectores de gran tamaño



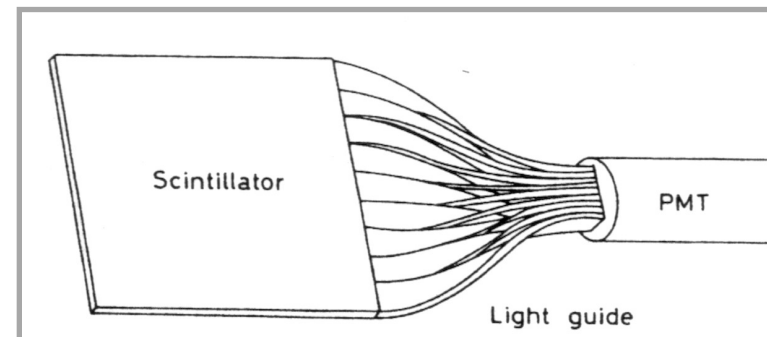
Acoplamiento a un Fotomultiplicador (II)

Guías de Luz → Transmisión de la luz por reflexión interna total

- Plexiglass, Perpex, Lucite / Fibras Ópticas (conexión flexible)
- Permiten mayor distancia Centelleador – PM
- Flujo de luz “incompresible” → Eficiencia $\sim S_{\text{salida}} / S_{\text{entrada}}$
→ “Adiabática” → Sección cte.
- Mayor rendimiento → Guía Luz + Capa Aire + Reflector Externo



“Fish Tail”



“Twisted” (Mas eficiente, $S=cte$)

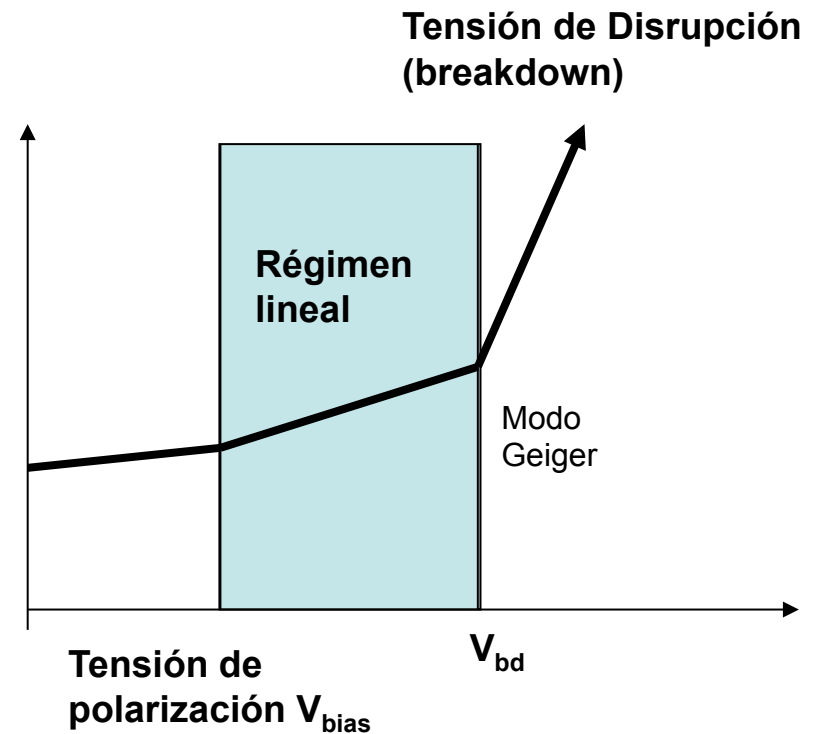
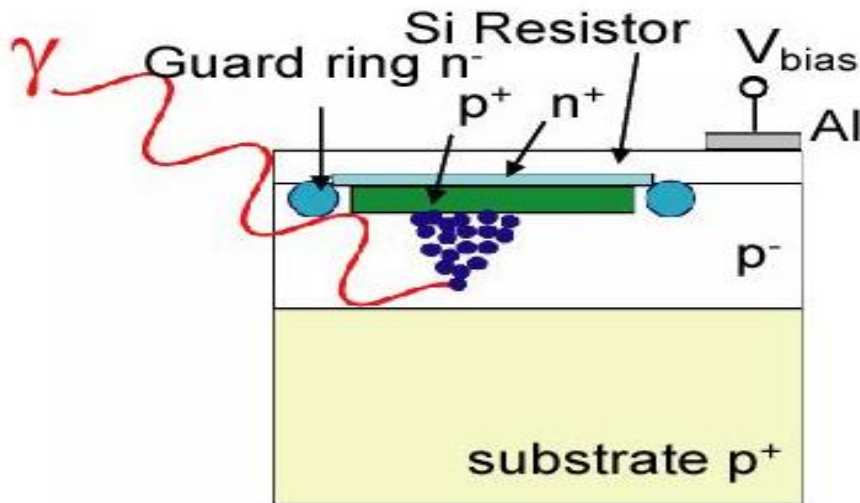
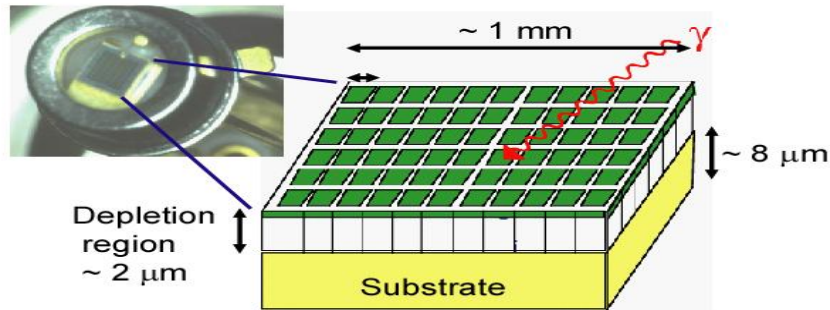
Detectores de partículas

- Propiedades generales (1.5 h)
- Técnicas de Montecarlo (0.5 h)
- Detectores de radiaciones ionizantes (2 h)
 - Cámaras de ionización
 - Detectores de centelleo
 - Detectores de estado sólido
- **Fotodetectores (1 h)**
 - Fotomultiplicadores
 - **Detectores de estado sólido**
- Técnicas de detección (1 h)
 - Espectroscopía con centelleadores
 - Detectores de trazas
 - Calorímetros
 - Detectores combinados (LHC)

APDs

- Fotodiodos de avalancha
- Detectores de luz de estado sólido, rápidos y con sensibilidad a fotones aislados.
- Alta eficiencia. Insensibilidad al campo magnético.
- Necesidad de refrigeración.
- Posibilidad de tener muchos canales. Modo geiger.

Avalanche Photo Diode = Amplificación Interna por avalanchas



Pixellated Photon Detector = Matriz de APDs en modo Geiger

