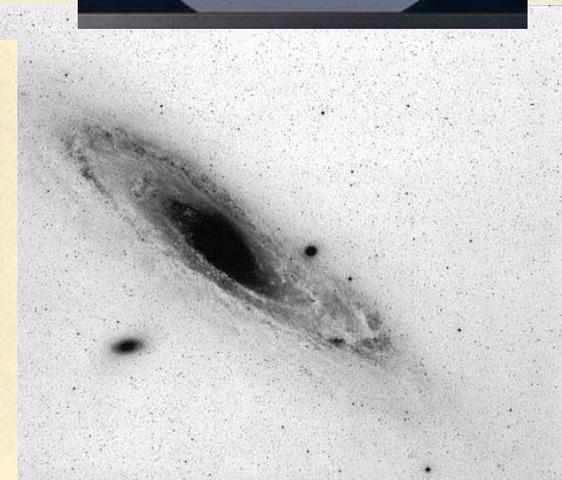
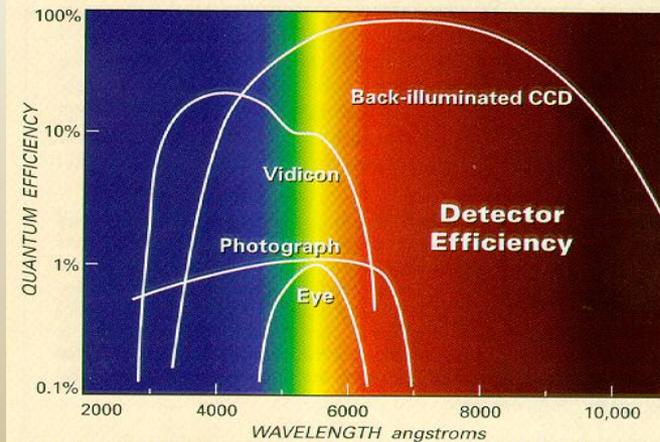
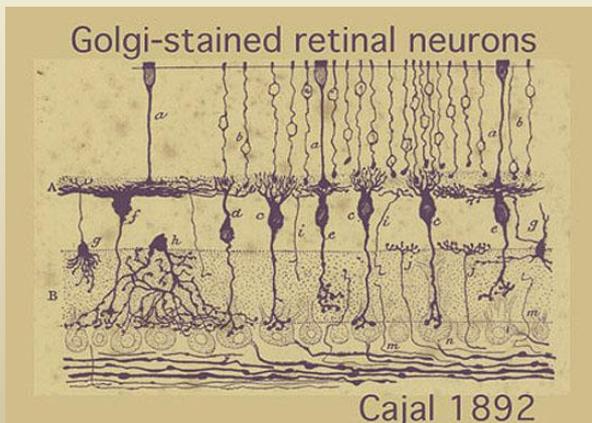
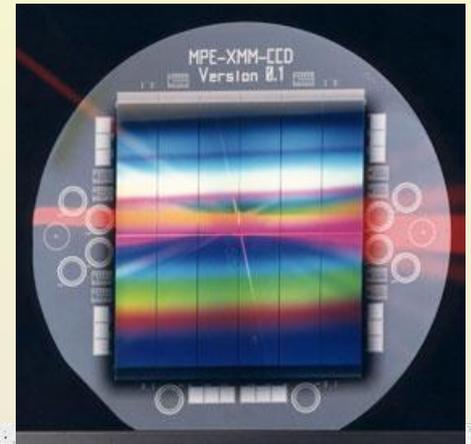
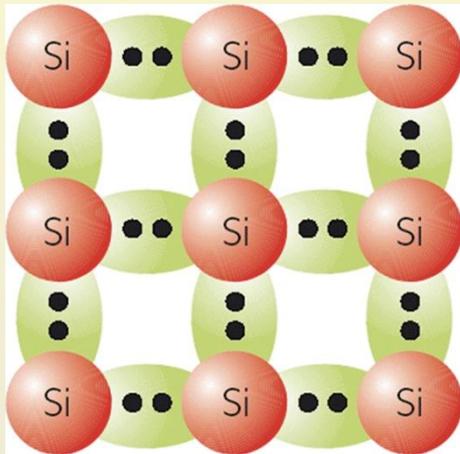




# Tema 7: Detectores fotoeléctricos

Consultar: "*Astrophysical techniques*", K08; "*Detection of light*", R06; "*Electronic and computer-aided astronomy*", M89.





# DETECTORES (II)

- Detectores de estado sólido.
- Semiconductores.
- Fotoconductores. Fotodiodos.
- Efecto fotoeléctrico.
- Detectores fotoemisivos. Fotomultiplicadores.
- Intensificadores-Convertidores de Imagen.
- Placas de microcanales.
- Sistemas de televisión. Disectores
- Vidicon. SEC Vidicon
- Sistemas de cuenta de fotones.



# DETECTORES DE ESTADO SÓLIDO

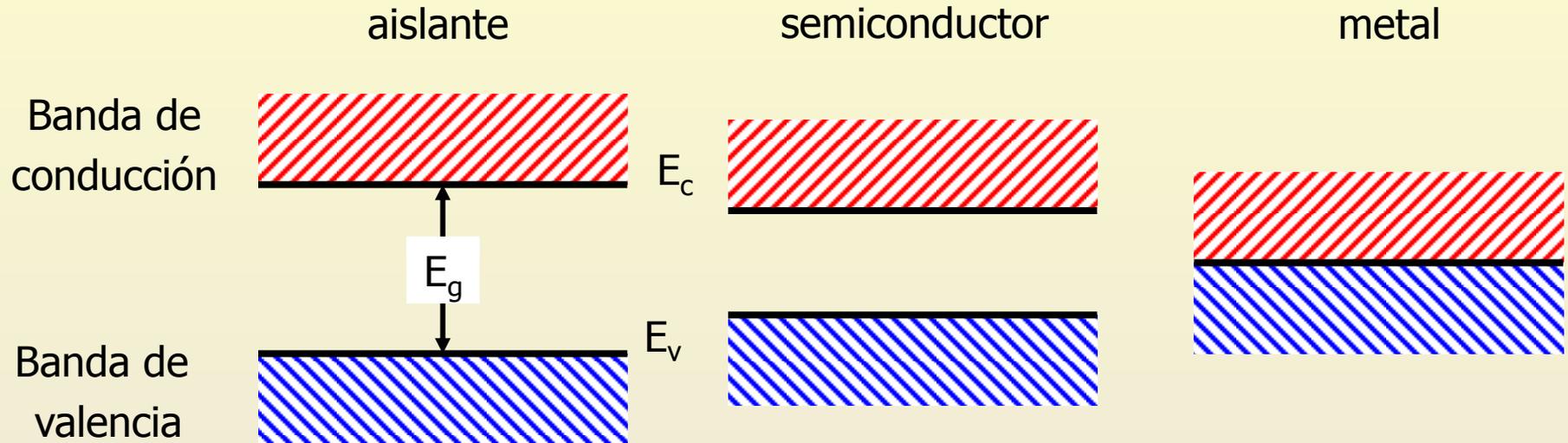
- Desde principio del siglo XX se empezaron a probar dispositivos de estado sólido para detectar la luz de los objetos celestes.
- Los primeros intentos revelaron las ventajas:
  - Mucho más sensibles que fotografía.
  - Detectores lineales.
  - Ideales para fotometría de estrellas (variables).

- 1910 J. Stebbins (Observatorio Washington, Universidad Wisconsin).  
Fotocélula de Selenio en un recipiente con hielo fundido (T cte)  
Medidas con precisión que le permitieron descubrir los mínimos secundarios de Algol que disminuye sólo 0.06 mag.
- 1911 J. Kunz (U. Illinois Observatory) usó células fotoeléctricas.
- 1933 May 27: Light from star Acturus falls on a photocell  
in the U. Illinois Observatory and sends a signal to open the Chicago World's Fair.
- 1953 Johnson & Morgan Fotomultiplicador IP21 + filtros → Sistema de Johnson
- 1974 Primer CCD de imagen (Fairchild 100x100) QE < 1% !!
- 1979 CCD RCA 320x512 refrigerado. Kitt Peak 1m.



# SEMICONDUCTORES

Las propiedades eléctricas de los semiconductores se alteran dramáticamente tras la absorción de fotones. En eso se basan los detectores de estado sólido.



Metal:	Los estados de valencia y conducción unidos. Conductores si $T > 0$ porque se llenan estados de conducción.
Aislante:	Las bandas están separadas (gap) por una energía grande. Banda de conducción vacía. No conduce.
Semiconductor:	Energía del gap pequeña ( $0 < E_g < 3.5\text{eV}$ ). Conductores si se elevan electrones a la banda de conducción.



# SEMICONDUCTORES

Los semiconductores puros se llaman intrínsecos.

Material	$E_g$ (eV)	$\lambda_c$ ( $\mu\text{m}$ )
Diamond	5.33	0.23
Si	1.11	1.12
Ge	0.67	1.85
SiC	2.86	0.43

Material	$E_g$ (eV)	$\lambda_c$ ( $\mu\text{m}$ )
GaAs	1.43	0.87
GaP	2.26	0.55
GaSb	0.7	1.8
InAs	0.36	3.45
InP	1.35	0.92
InSb	0.18	6.9

Se añaden otros átomos como impurezas (semiconductores dopados) para crear nuevos niveles de energía entre las bandas.

Estos semiconductores extrínsecos se pueden excitar con fotones de menor energía.

Material	$E_g$ (eV)	$\lambda_c$ ( $\mu\text{m}$ )
Si:Sb	0.039	31.8
Si:P	0.045	27.6
Si:As	0.054	23.0

<http://astrosun2.astro.cornell.edu/academics/courses//a525/>

Semiconductors

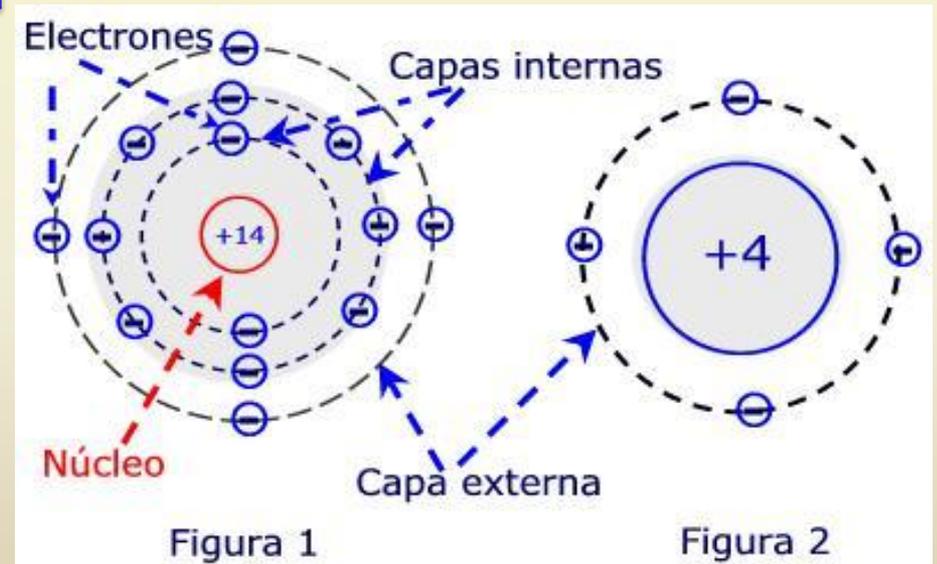
Astronomy 525: Optical, Infrared and Sub-mm Astronomical Techniques by Gordon Stacey



# SEMICONDUCTORES

Elemento	Grupos	Electrones en la última capa
<u>Cd</u>	12	2 e <sup>-</sup>
<u>Al</u> , <u>Ga</u> , <u>B</u> , <u>In</u>	13	3 e <sup>-</sup>
<u>Si</u> , <u>C</u> , <u>Ge</u>	14	4 e <sup>-</sup>
<u>P</u> , <u>As</u> , <u>Sb</u>	15	5 e <sup>-</sup>
<u>Se</u> , <u>Te</u> , ( <u>S</u> )	16	6 e <sup>-</sup>

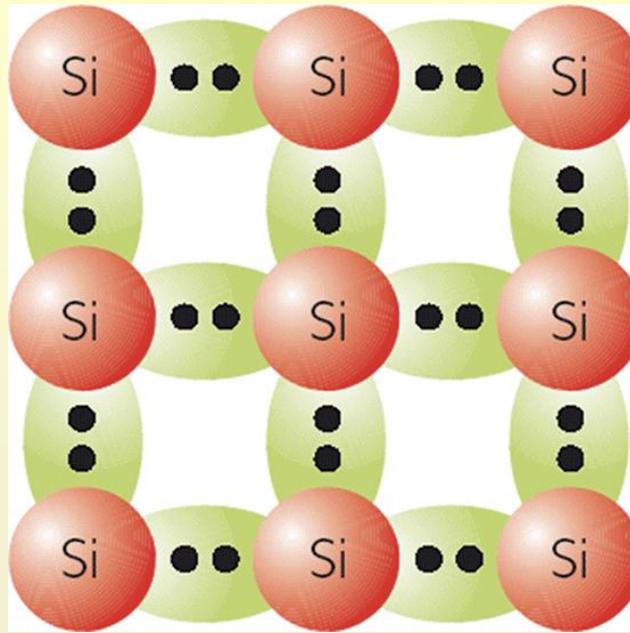
<http://es.wikipedia.org/wiki/Semiconductor>



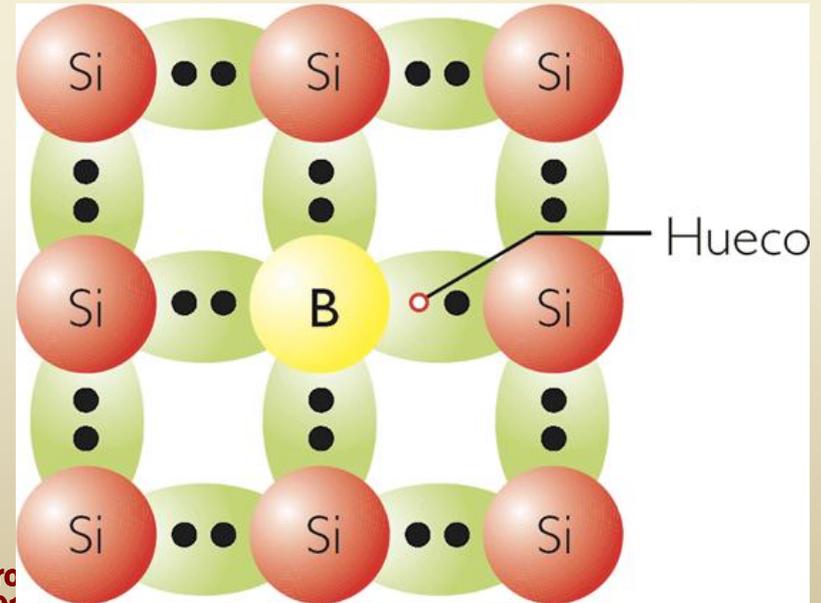
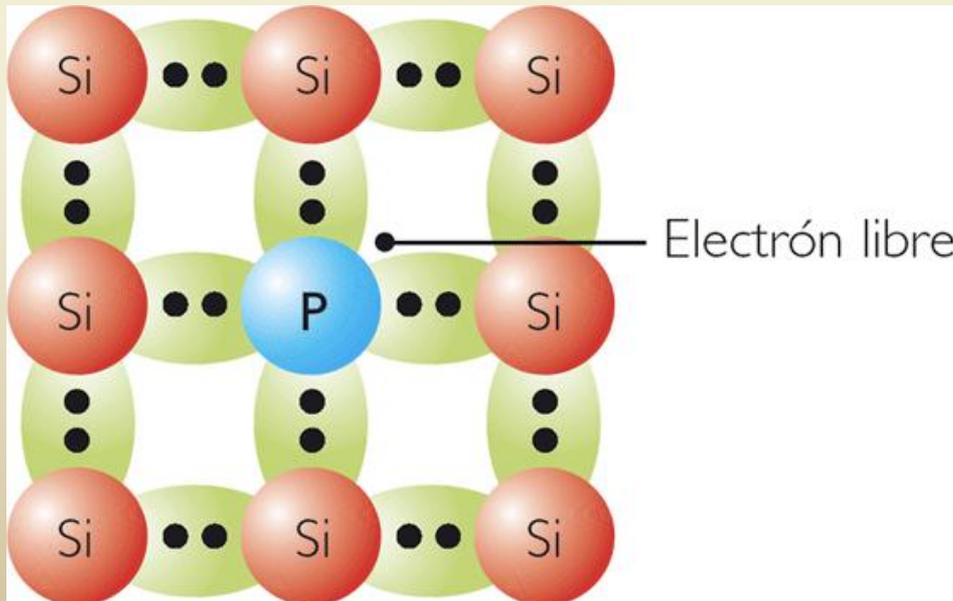
<http://www.ifent.org/lecciones/semiconductor/default.asp>



# SEMICONDUCTORES

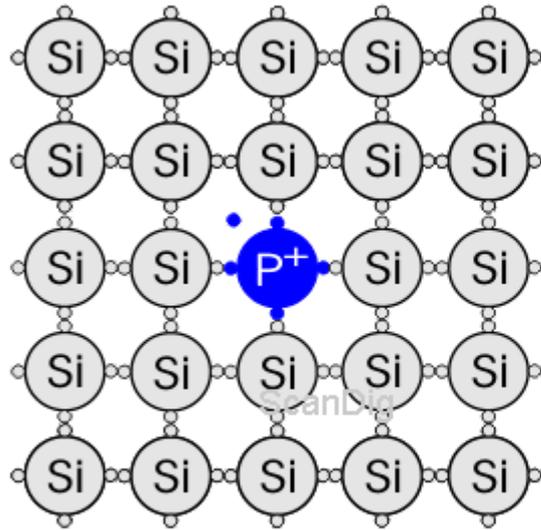


[http://www.kalipedia.com/tecnologia/tema/semiconductores.html?x=20070822klpinctn\\_123.Kes&ap=2](http://www.kalipedia.com/tecnologia/tema/semiconductores.html?x=20070822klpinctn_123.Kes&ap=2)

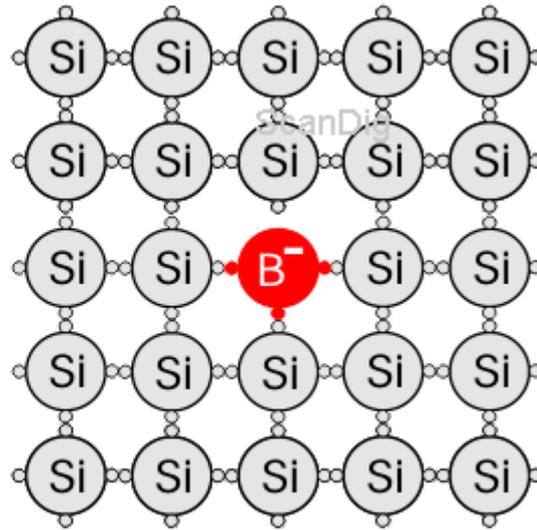




# SEMICONDUCTORES

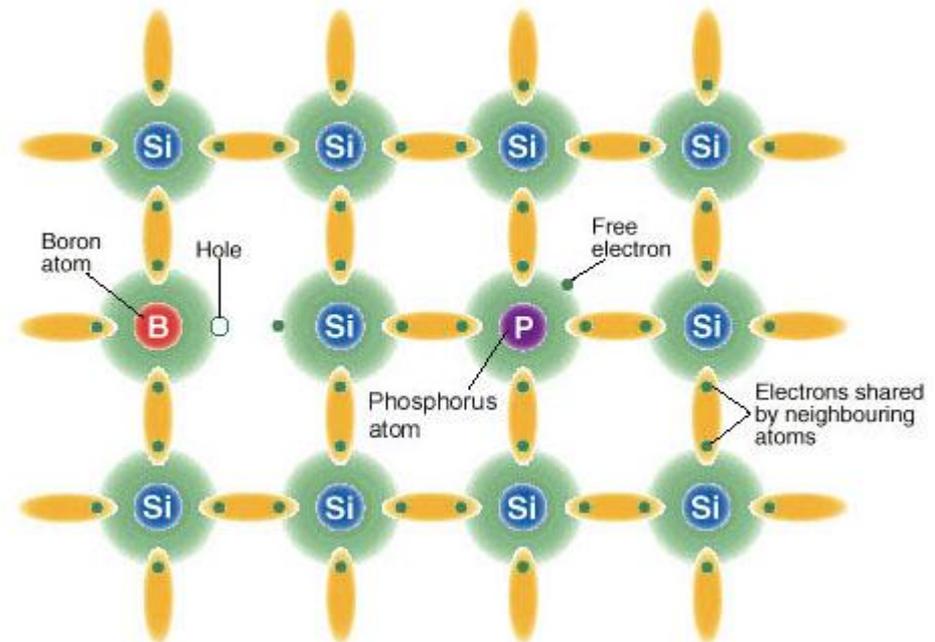


n-Dotierung



p-Dotierung

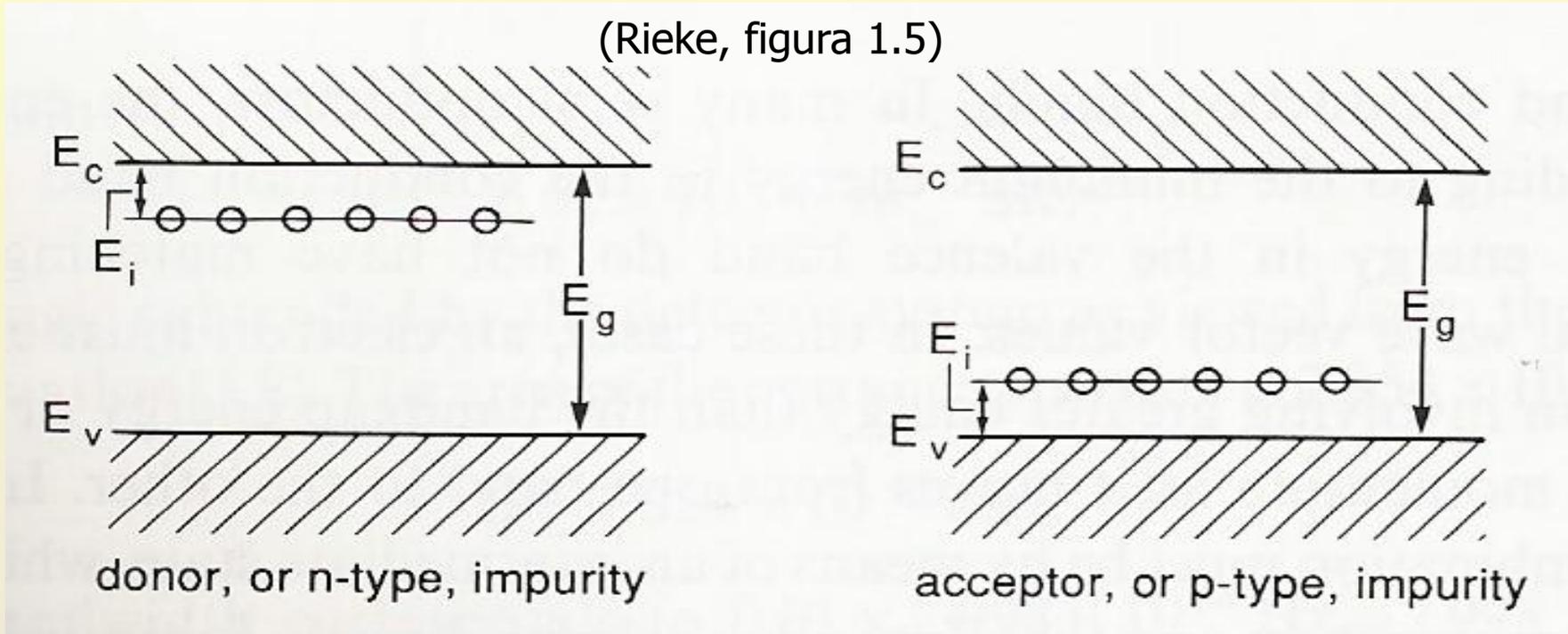
<http://www.datuopinion.com/dopaje-semiconductores>





# SEMICONDUCTORES

Los semiconductores extrínsecos pueden ser de dos tipos de acuerdo a los portadores de carga mayoritarios:



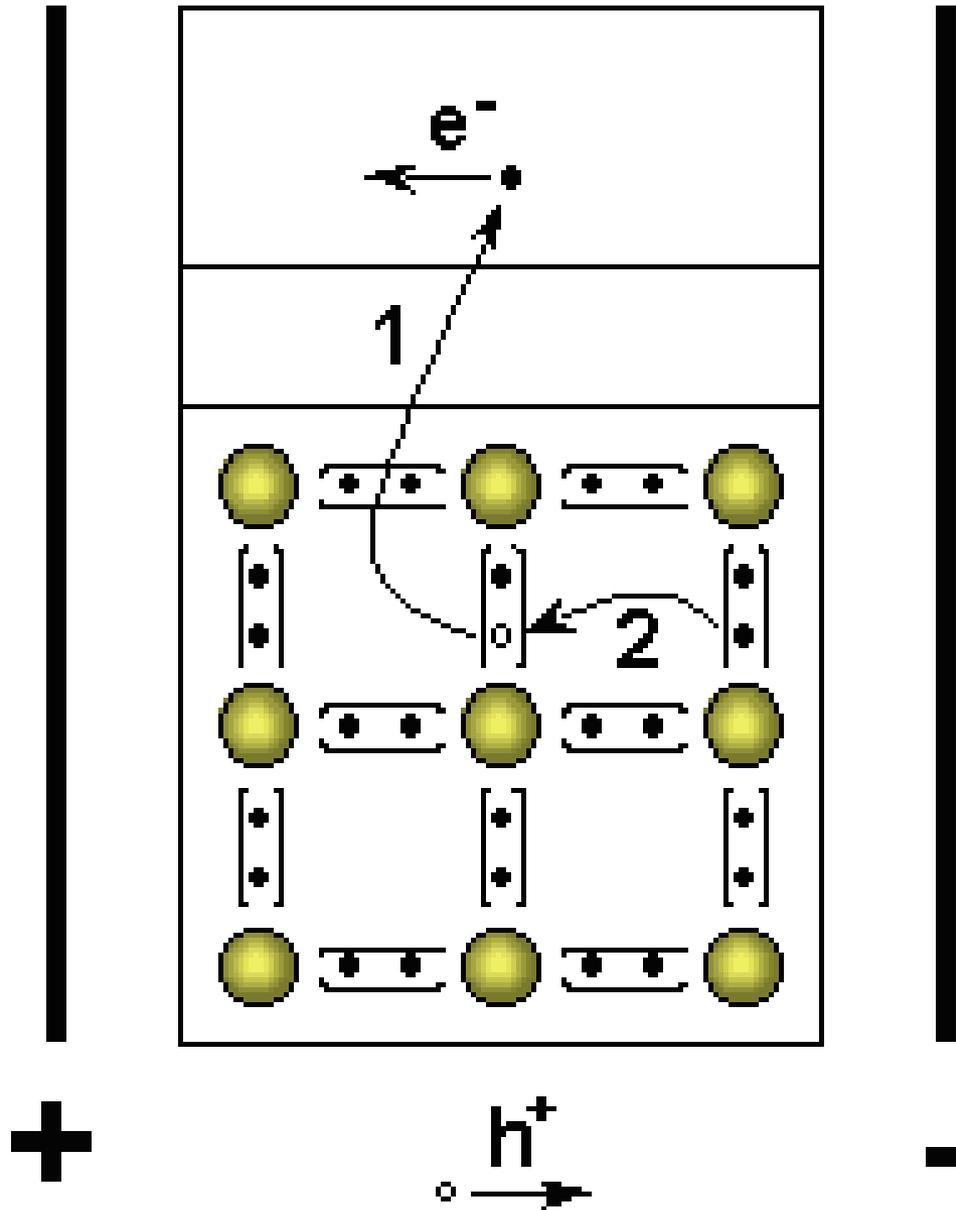
**Tipo n:** Se dopan con impurezas (donantes) con exceso de electrones en la capa de valencia (más de los que se necesitan para crear la estructura cristalina) que se convierten en electrones conductores.

**Tipo p:** Los donantes tienen menos electrones en la capa de valencia de los necesarios para formar la estructura cristalina por lo que sus átomos tienden a capturar o aceptar electrones de los átomos del semiconductor creando huecos en la banda de valencia del semiconductor, incrementando la conductividad.



# SEMICONDUCTORES

<http://es.wikipedia.org/wiki/Semiconductor>





# FOTOCONDUCTORES

A temperatura baja el material no conduce porque no hay a penas electrones en la banda de conducción.

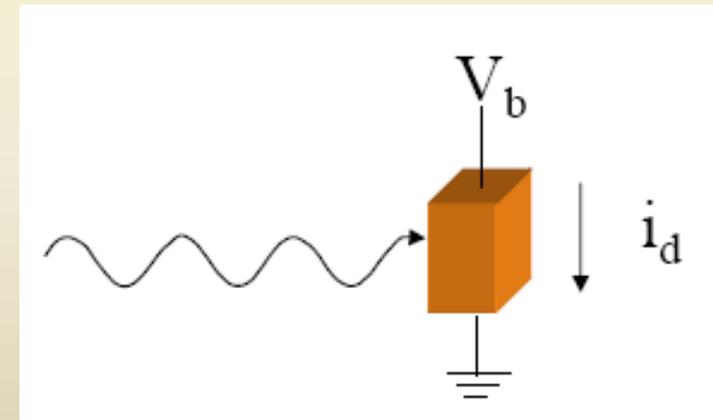
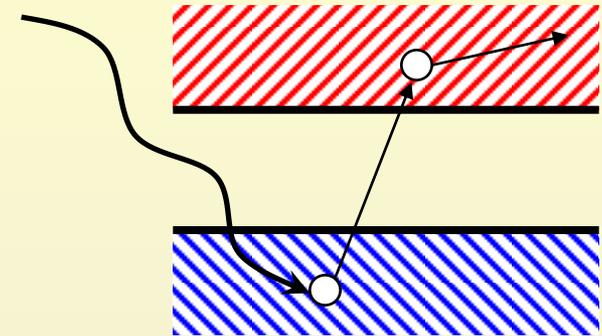
Los fotones de  $E > E_g$  pueden mover electrones de la banda de valencia a la de conducción y el material se vuelve conductor

$$E(\text{eV}) = h\nu = \frac{h c}{q_e \lambda} = \frac{1.24 \text{ eV}}{\lambda[\mu\text{m}]}$$

Fotoconductor:

semiconductor cuya conductividad eléctrica aumenta con la llegada de fotones y que sirve para medir ese flujo.

Si se coloca en un circuito eléctrico, la corriente eléctrica aumenta proporcionalmente al flujo detectado de fotones.



Detection of Light: From UV to Submm by G.H. Rieke

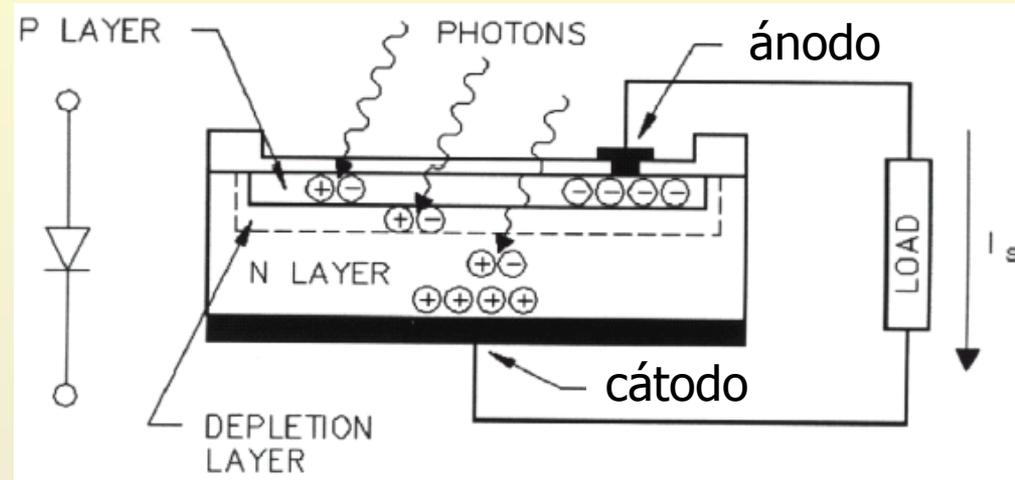
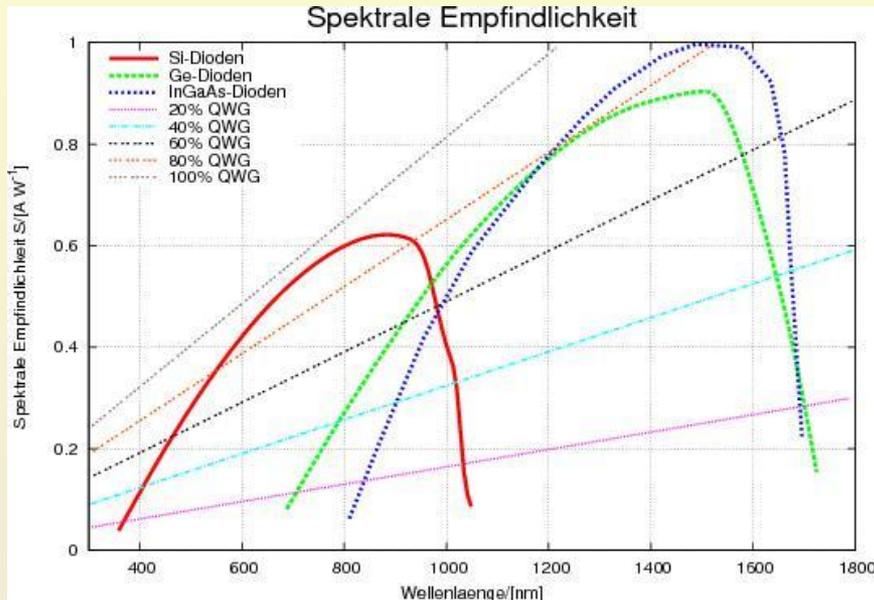
**Instrumentación Astronómica**  
**Curso 2011/2012**

(material compilado por J. Zamorano, J. Gallego, P.G. Pérez-González)



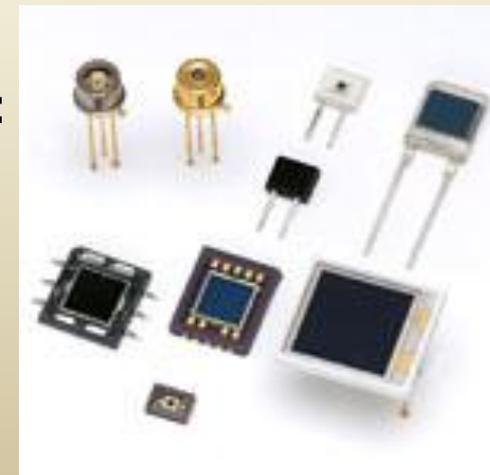
# FOTODIODOS

Los Fotodiodos son dispositivos basados en la unión de dos zonas de un mismo semiconductor con dopado inverso: unión p-n (p-n junction).



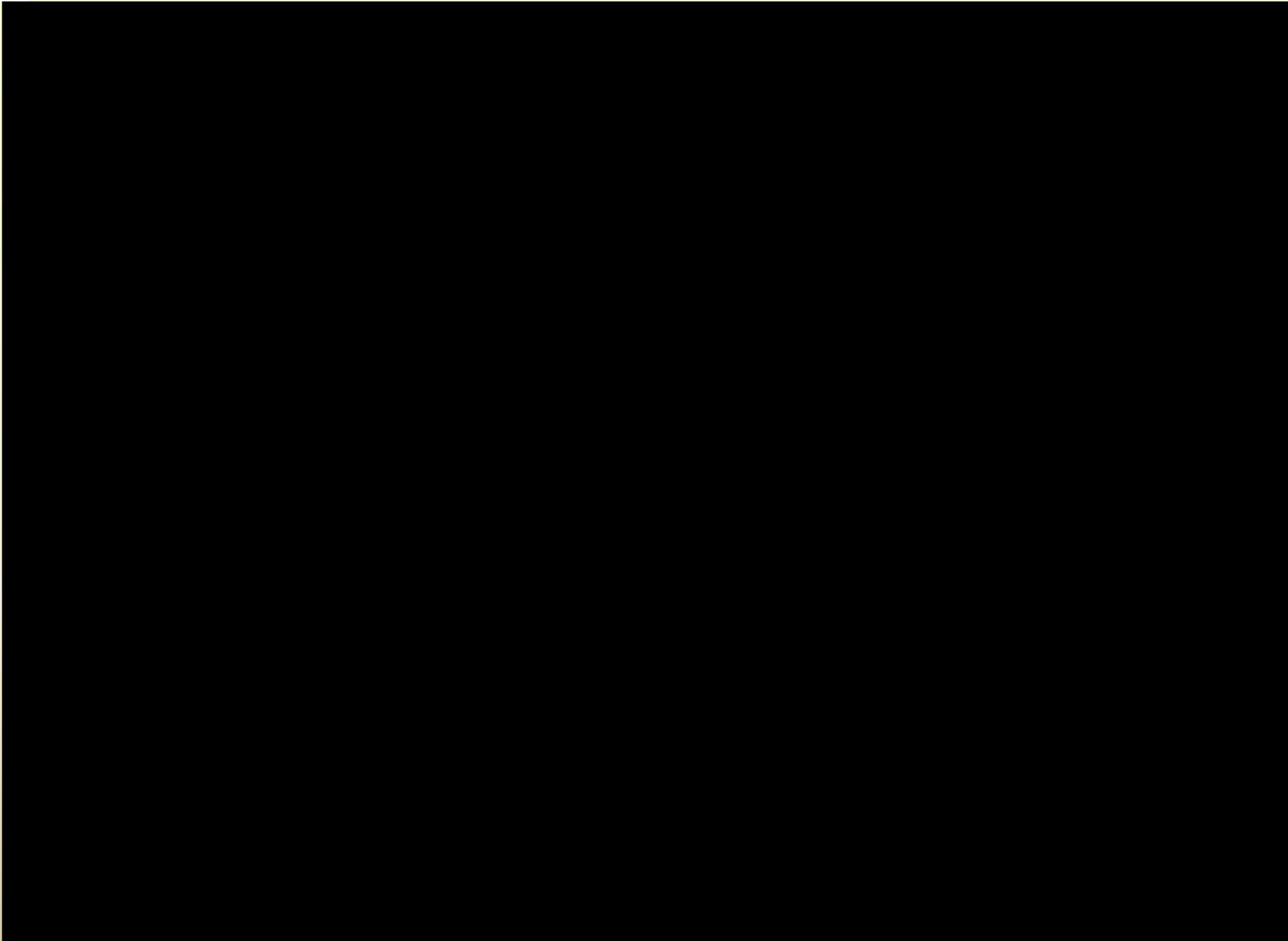
Los fotodiodos generan una corriente o voltaje al ser iluminados:

- Excelente linealidad.
- Bajo ruido.
- Respuesta espectral amplia.



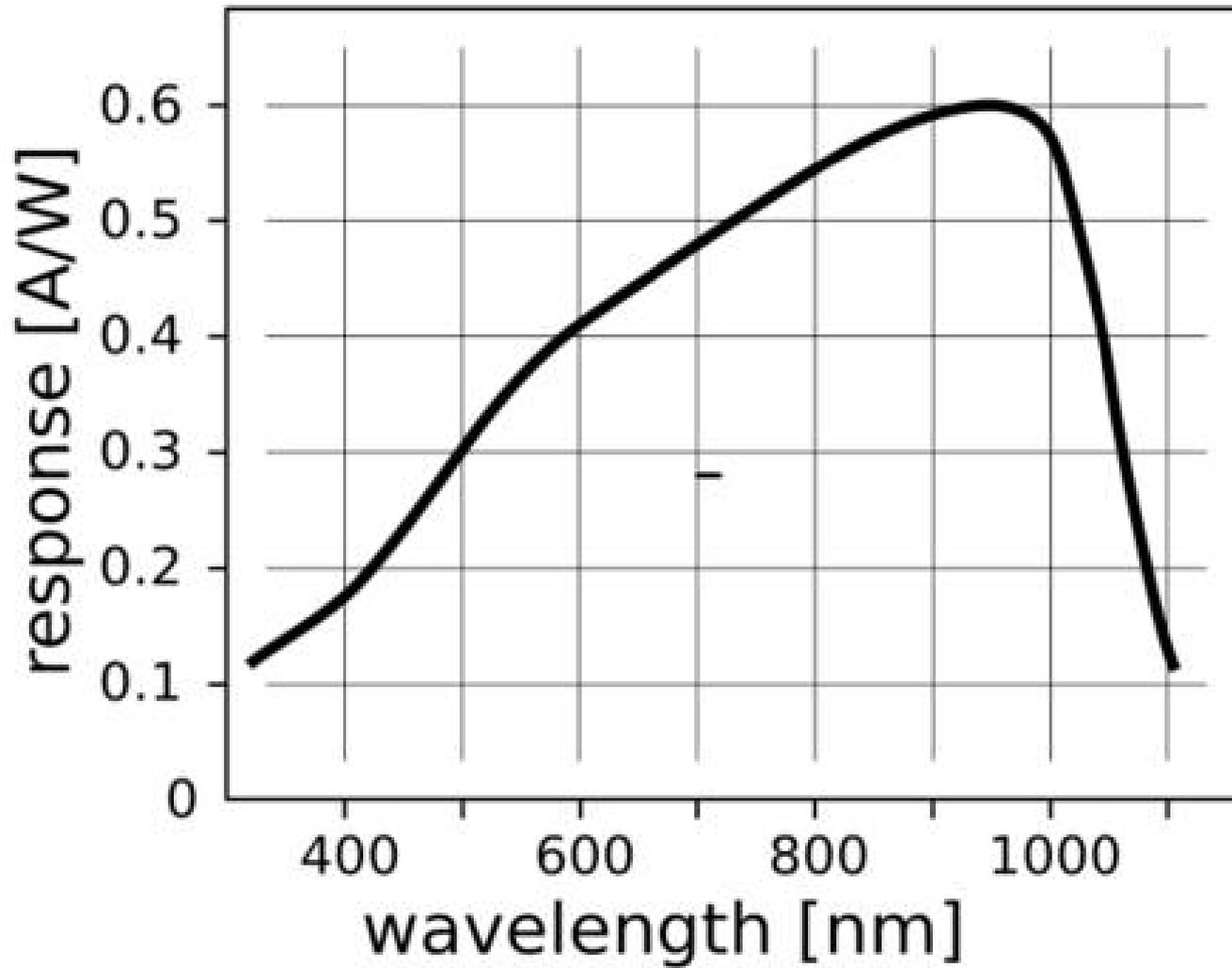


# FOTODIODOS





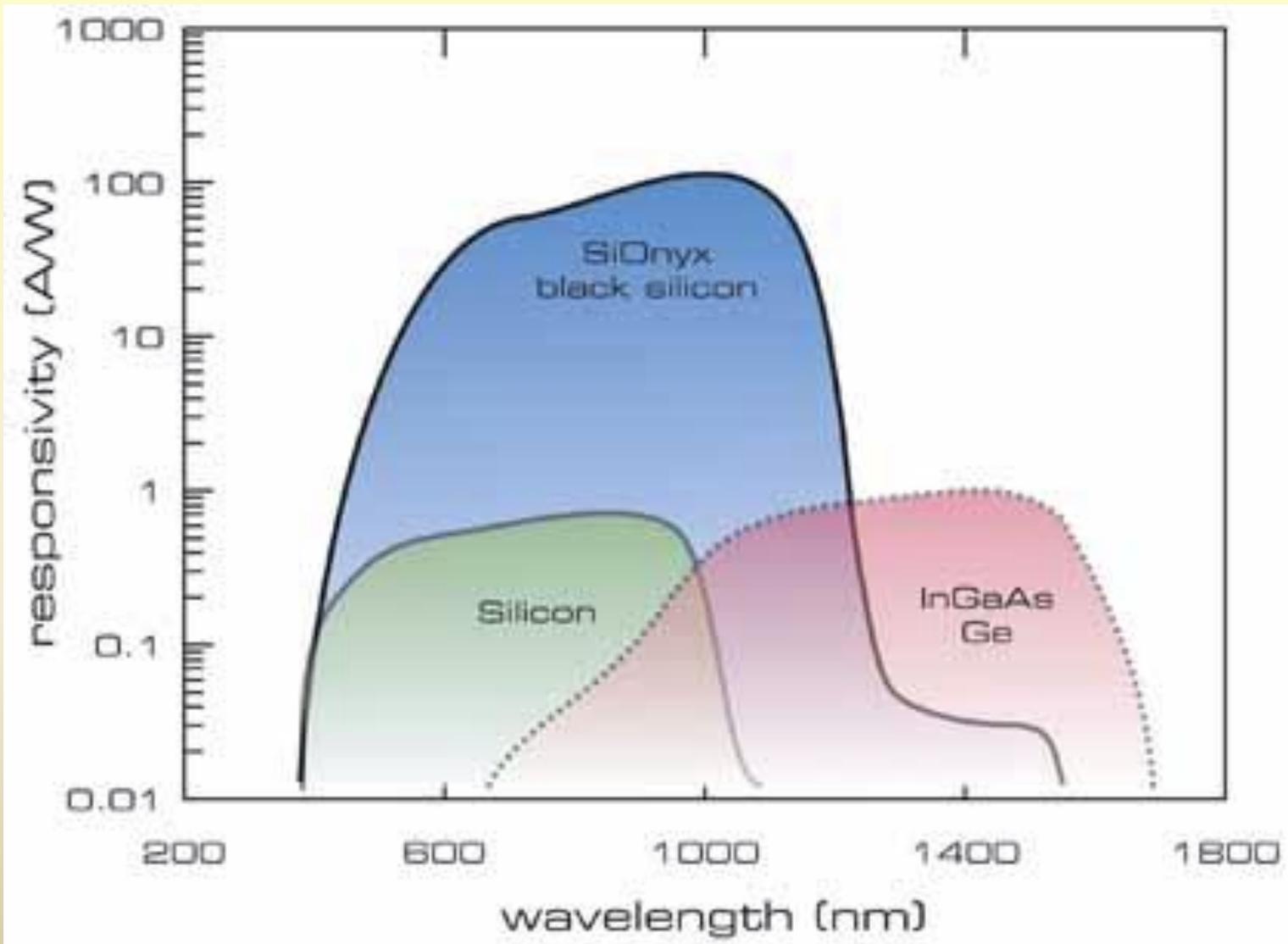
# FOTODIODOS



<http://en.wikipedia.org/wiki/Photodiode>



# FOTODIODOS



<http://spie.org/x31676.xml?ArticleID=x31676>



# EFEECTO FOTOELÉCTRICO

Efecto fotoemisivo: La fotoemisión es el proceso físico en el que un fotón es capaz de arrancar un electrón (fotoelectrón) del material que lo absorbe.

(Energía del gap)  
Función de trabajo

Energía umbral

Frecuencia umbral

$$W = h \nu_0$$
$$E_k = h \nu - W$$

Energía cinética

Energía del fotón

- La emisión del electrón depende de la naturaleza del fotocátodo y de la energía del fotón incidente.
- La energía del fotoelectrón depende de la energía del fotón incidente.
- El número de fotoelectrones depende de la irradiancia: número de fotones incidentes.



# EFEECTO FOTOELÉCTRICO

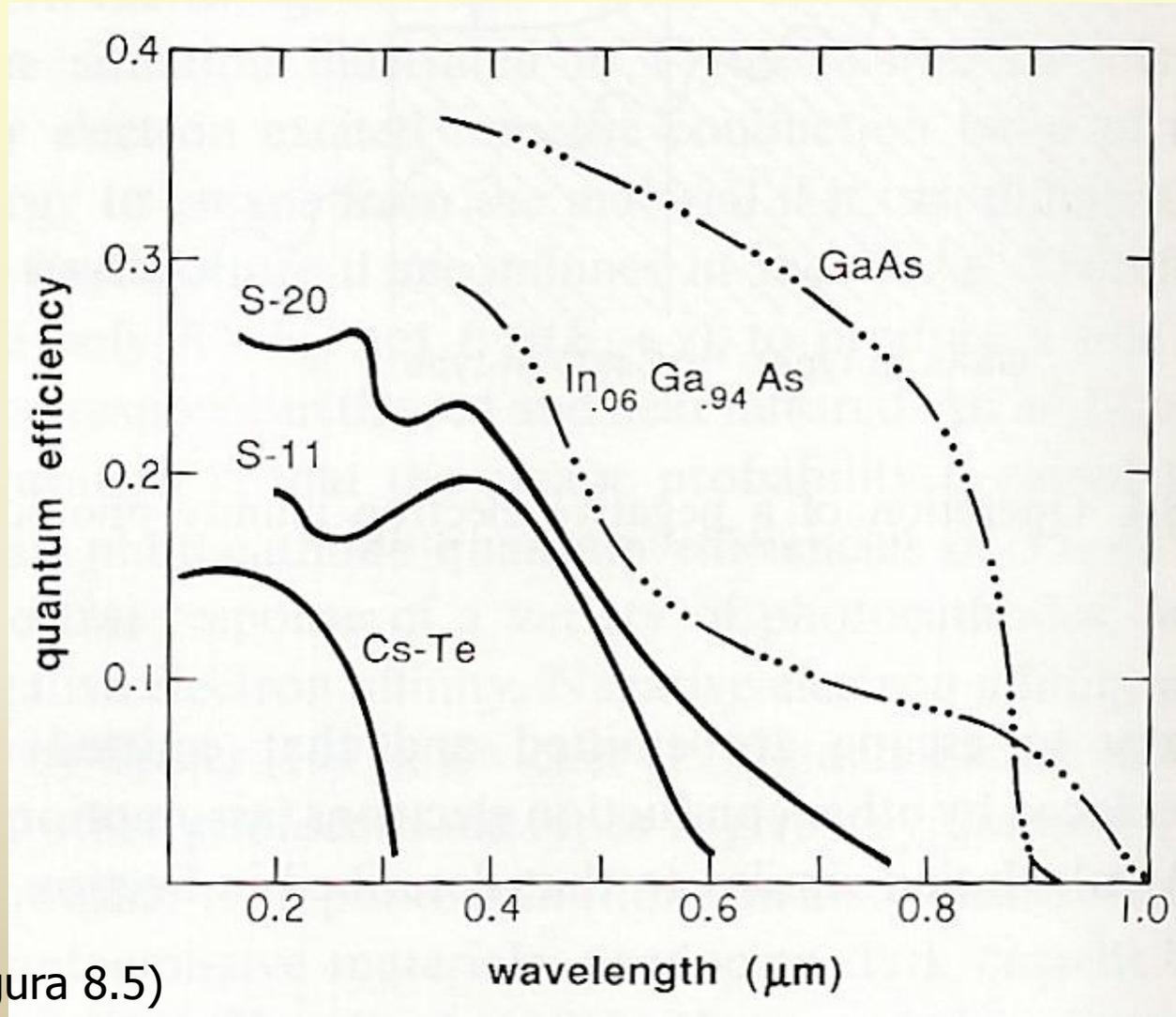
**Fotocátodos:** se emplean en los dispositivos fotoemisivos como blanco de fotones para detectarlos. Son electrodos recubiertos de una sustancia fotosensible.

S20, trialkali or multialkali  
(Na-K-Sb-Cs) UV-nIR

S11 (SbCs)  
UV a visible.

(Na-K-Sb) bialkali

(KBr, CsI, RbTe, CsTe) UV



Zwicker(1977) (Rieke, figura 8.5)



# EFFECTO FOTOELÉCTRICO

**Table 1.1 Composition and typical characteristics of photocathodes**

Type of spectral response	Composition	Type of window	Photo-emission threshold (nm)	Wavelength at maximum sensitivity (nm)	Radiant sensitivity at $\lambda_{\max}$ (mA/W)	Quantum efficiency at $\lambda_{\max}$ (%)
S1	AgOCs	1	1100	800	2.3	0.4
S4	SbCs <sub>3</sub>	1,2,3	680	400	50	16
S11	SbCs <sub>3</sub>	1	700	440	80	22
S13	SbCs <sub>3</sub>	2	700	440	80	22
S20	SbNa <sub>2</sub> KCs	1	850	420	70	20
S20	SbNa <sub>2</sub> KCs	2	850	420	70	20
S20R (ERMA*)	SbNa <sub>2</sub> KCs	1	900	550	35	8
bialkali	SbKCs	1	630	400	90	28
bialkali	SbKCs	2	630	400	90	28
bialkali (GEBA**)	SbKCs	1	700	440	100	28
bialkali	SbNaK	1	700	400	50***	16***
solar blind	CsTe	2	340	235	20	10

<http://www.photonis.com/>

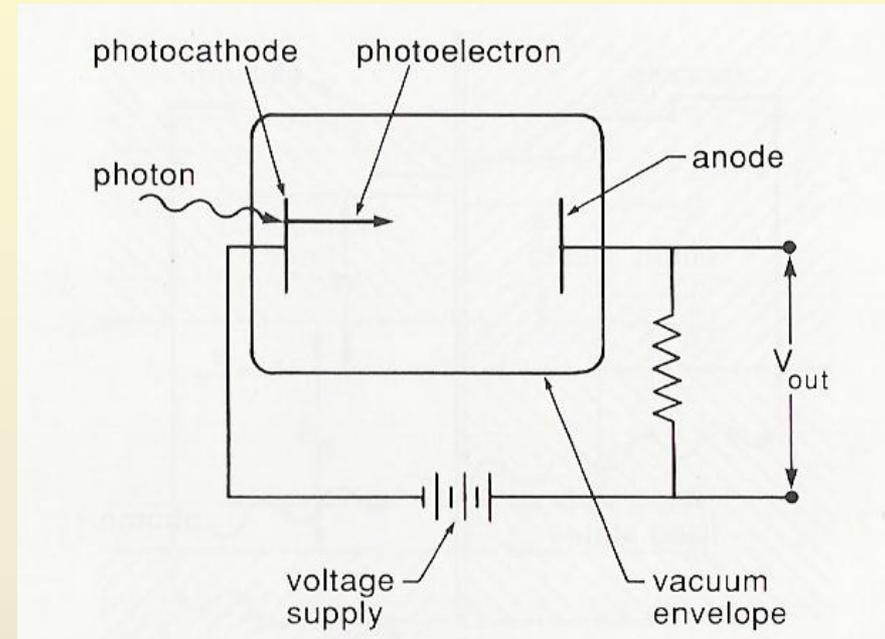


# DETECTORES FOTOEMISIVOS

Los detectores fotoemisivos emplean campos eléctricos (o magnéticos) para acelerar los electrones arrancados de las la superficies fotoemisivas (fotocátodos).

Los fotoelectrones se recogen en el ánodo estableciendo una diferencia de potencial respecto al fotocátodo. De esta manera la llegada de fotones puede ser detectada como corriente eléctrica.

Los detectores fotoemisivos son análogos a los fotodiodos pero están contruidos como válvulas de vacío

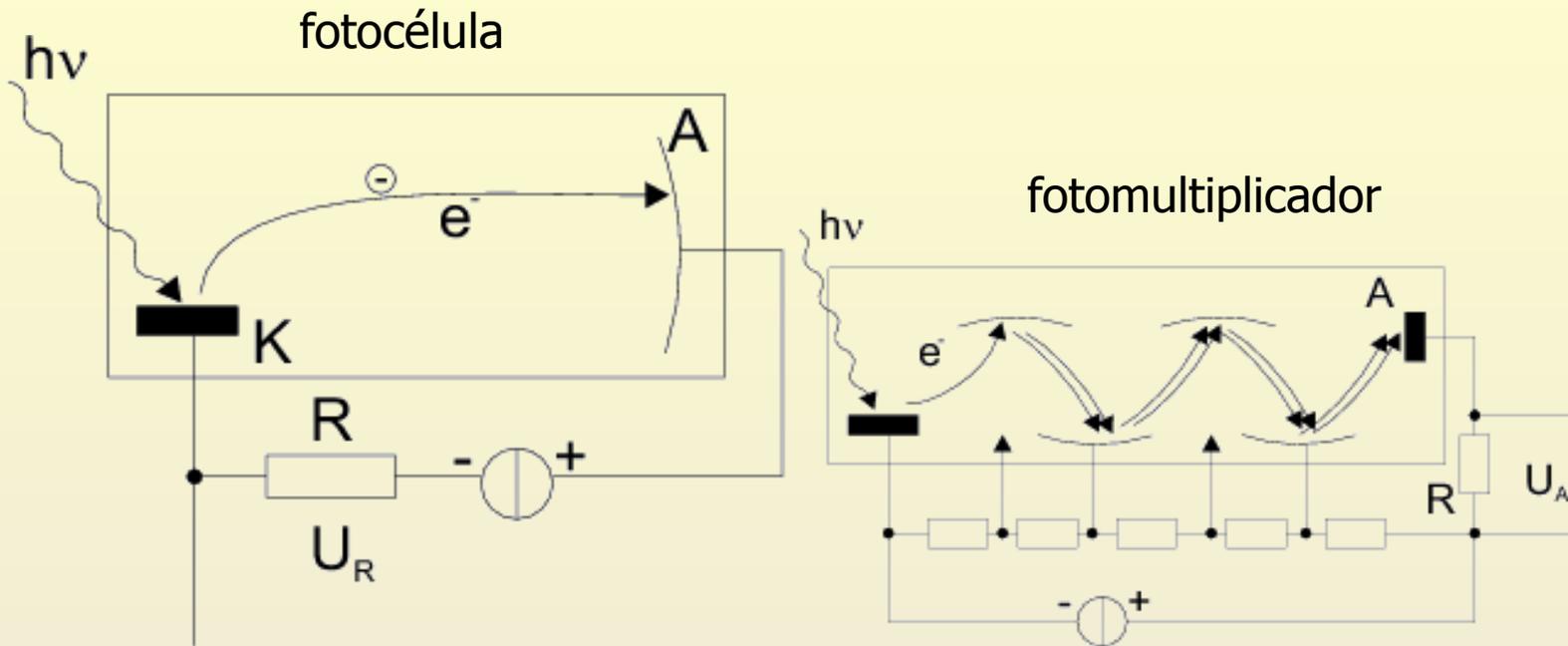


(Rieke, figura 8.1) Operation of a vacuum photodiode.

Eficiencia cuántica QE  $\sim$  10-30% (visible y UV)



# DETECTORES FOTOEMISIVOS



La corriente generada por un detector fotoemisor sencillo es muy pequeña:

Supongamos un flujo de 200 fotones/s y  $QE=20\%$

$$200 \times 0.2 = 40 \text{ electrones/s}$$

$$I = 40 \times 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ C/s} = 6.4 \times 10^{-18} \text{ A}$$

Por ello se prefiere utilizar fotomultiplicadores que poseen un fotocátodo y múltiples dinodos.

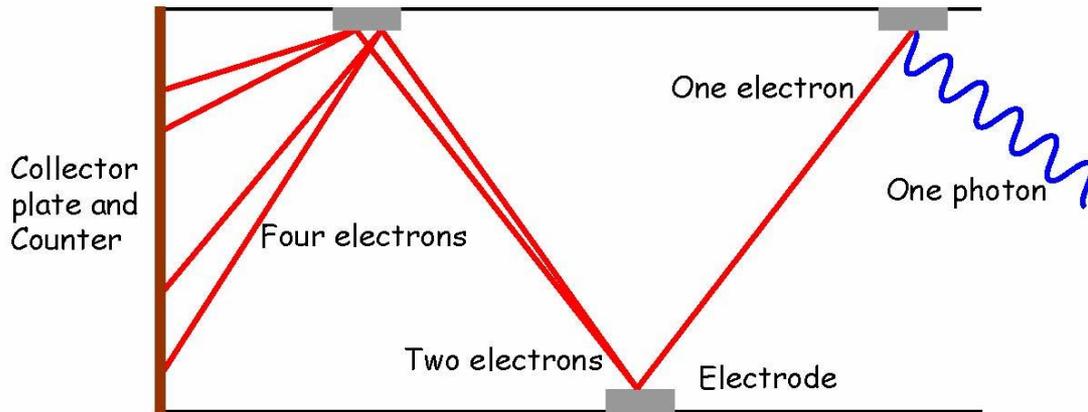


# FOTOMULTIPLICADORES

## Fotomultiplicadores

- Diferencia de potencial entre dinodos 100-150 V
- Ganancia por etapa  $\delta \sim 4$
- Número de dinodos  $n = 10 - 14$
- Ganancia total  $G = \delta^n = 10^6 - 10^8$

Fotomultiplicador con  $\delta=2$  y  $n=2$  (esquema)



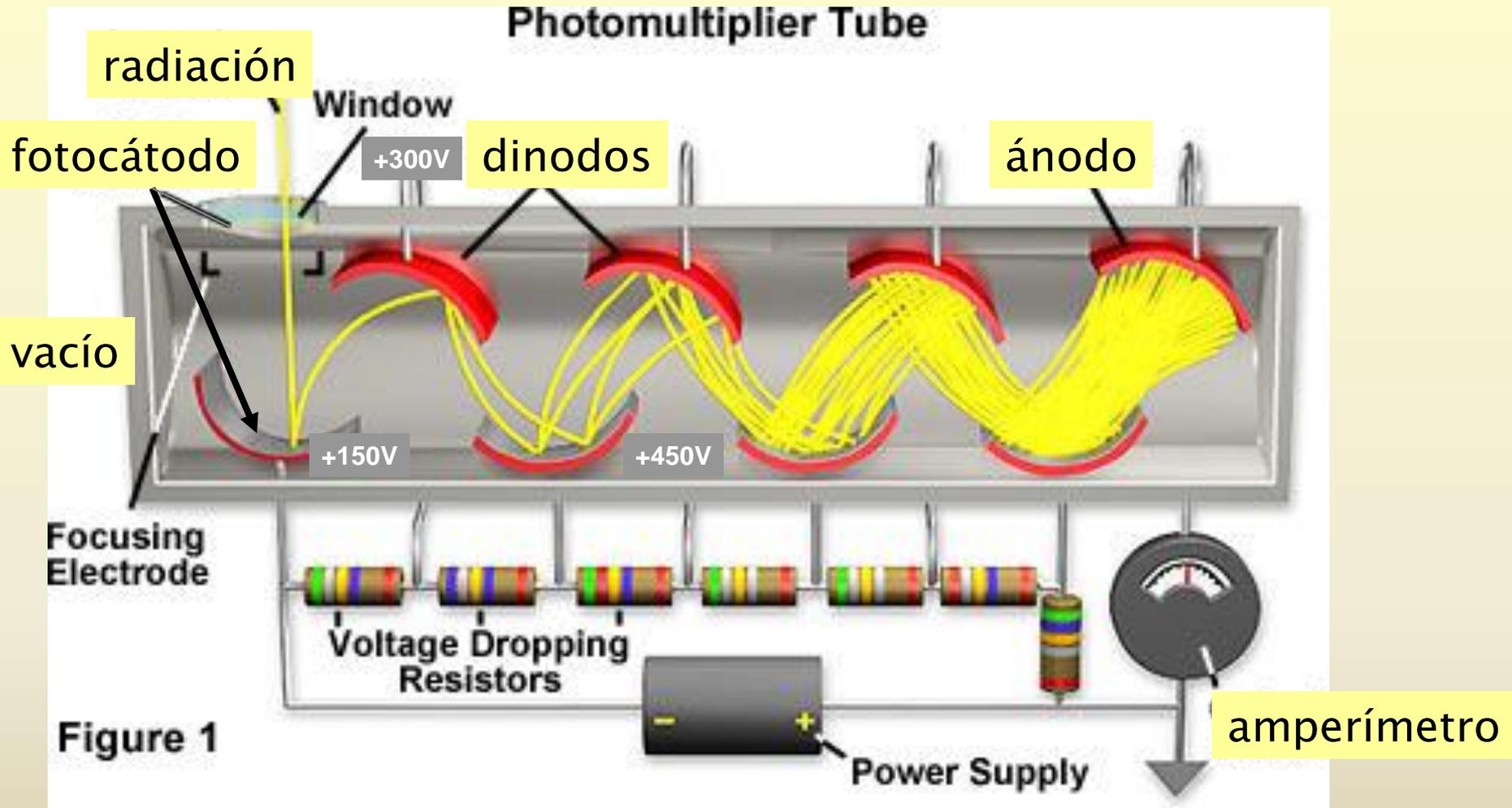
emisión electrónica secundaria (SEC)

	$\delta_{\max}$	$E_{\text{primario}}(\text{eV})$
Ag Mg	10	600
Cs Sb	8	500
Be Cu	5	700

Este detector es lineal y de respuesta constante siempre que se establezca el suministro de la corriente eléctrica.



# FOTOMULTIPLICADORES

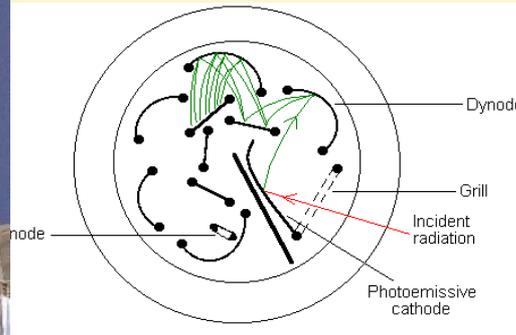




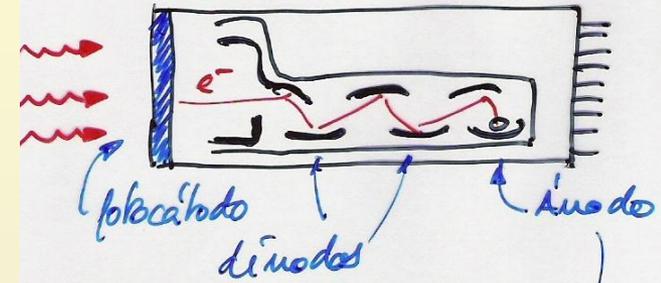
# FOTOMULTIPLICADORES



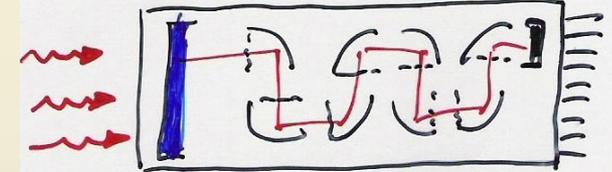
## Jaula de ardilla



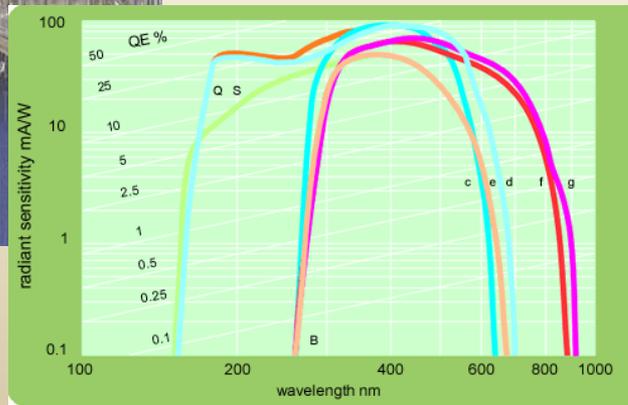
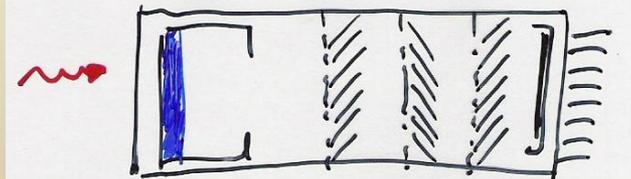
## Enfocado linealmente

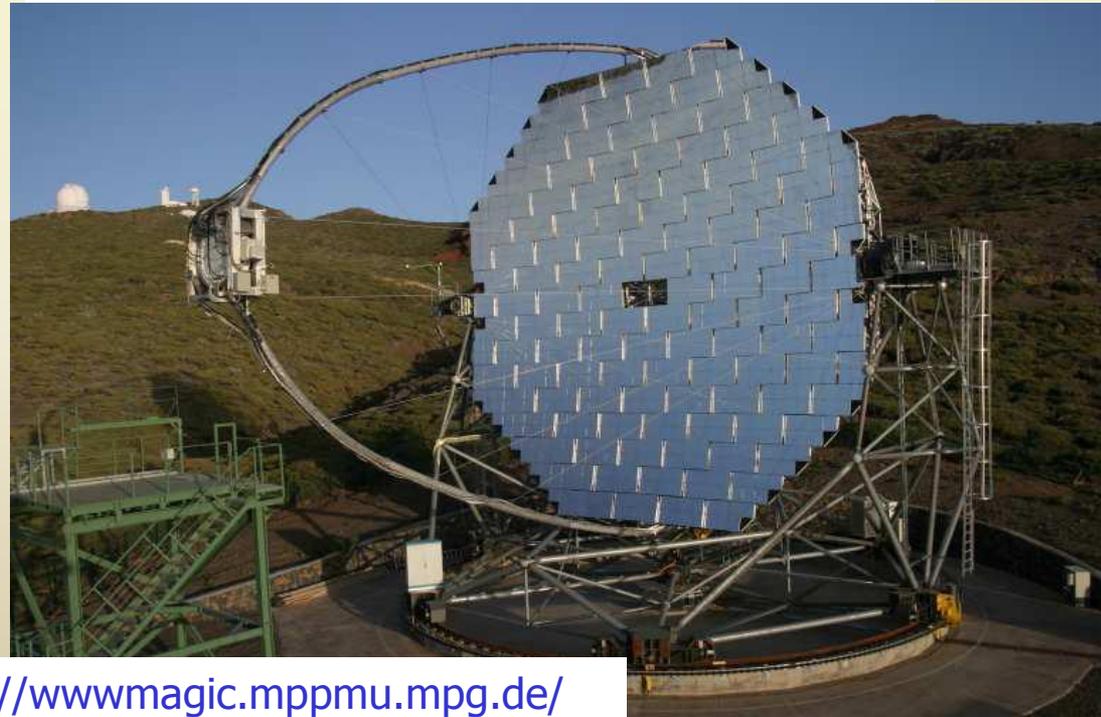
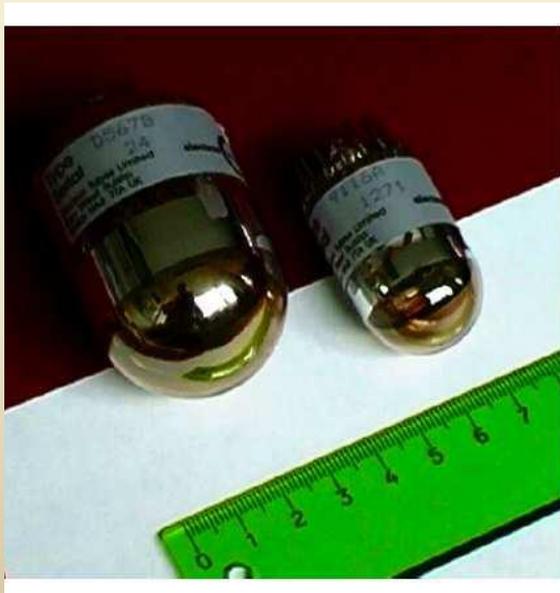
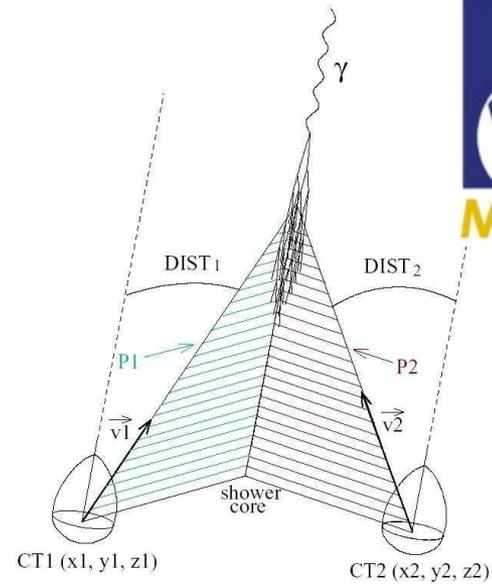
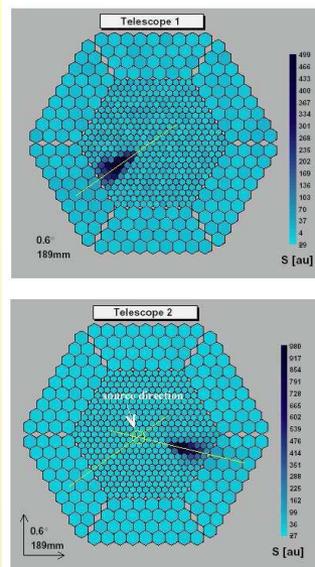


## Caja y Rejilla



## Persiana Veneciana





<http://wwwmagic.mppmu.mpg.de/>



# FOTOMULTIPLICADORES

## VENTAJAS

- Detector lineal.
- Rango dinámico elevado.
- Eficiencia cuántica  $QE=15-20\%$

## INCONVENIENTES

- Sólo se mide un objeto cada vez.
- Voltaje de trabajo  $\sim kV$
- Respuesta diferente de cada fotomultiplicador y dependiente del voltaje de los dinodos.
- Presencia de ruido de fondo (electrónico) que debe ser reducido mediante enfriamiento durante la operación.
- Otros problemas: le afectan los campos magnéticos, envejecen con el uso, etc.

Este detector es lineal y de respuesta constante siempre que se establezca el suministro de la corriente eléctrica.



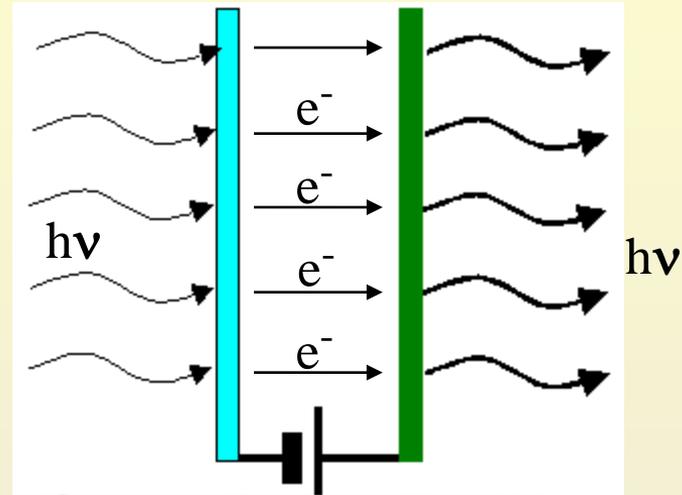
# INTENSIFICADORES- Conversores de imagen

## Tubos de imagen

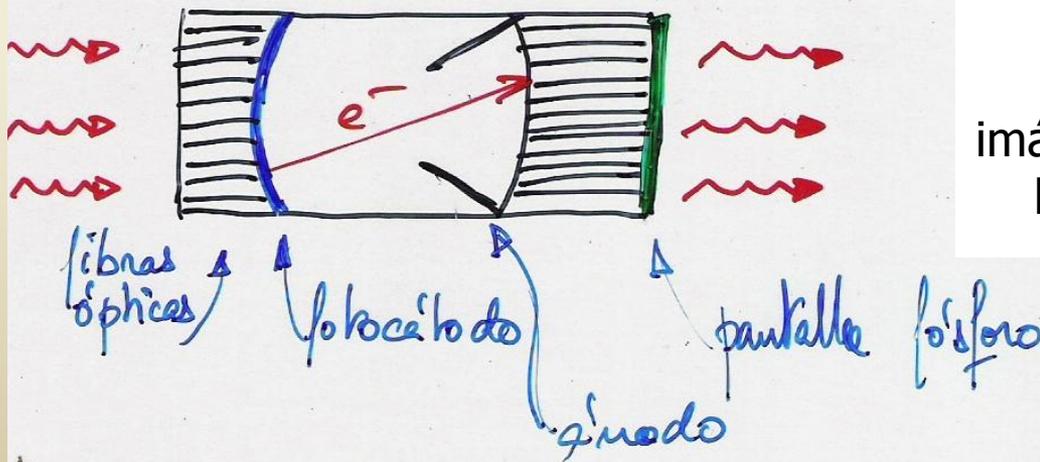
- Diferencia de Potencial  $\Delta V \sim 15 \text{ kV}$
- Ganancia  $G \sim 20-50$
- Enfocado por proximidad: trayectoria de los electrones es recta. Los electrones se aceleran y comunican su energía a la pantalla de fósforo donde impactan.
- Enfoque electrostático

fotocátodo

pantalla de fósforo



Enfoque electrostático

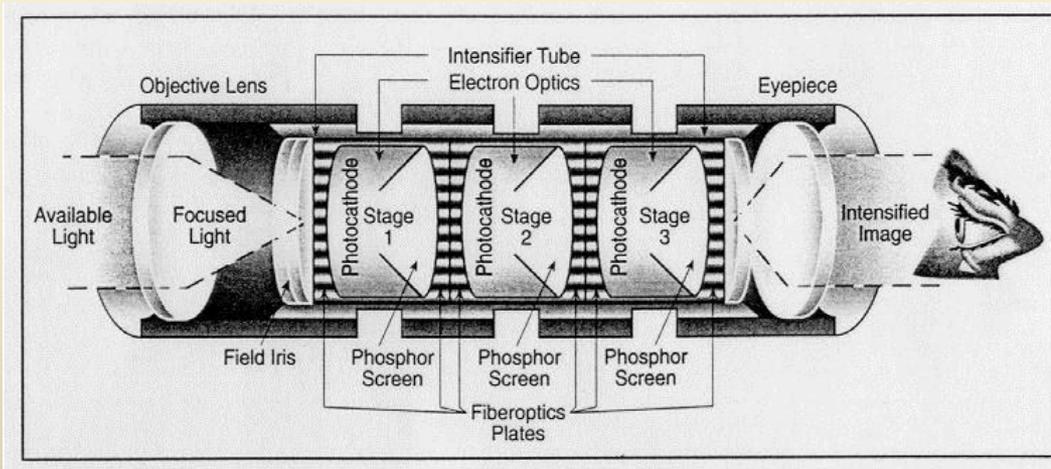
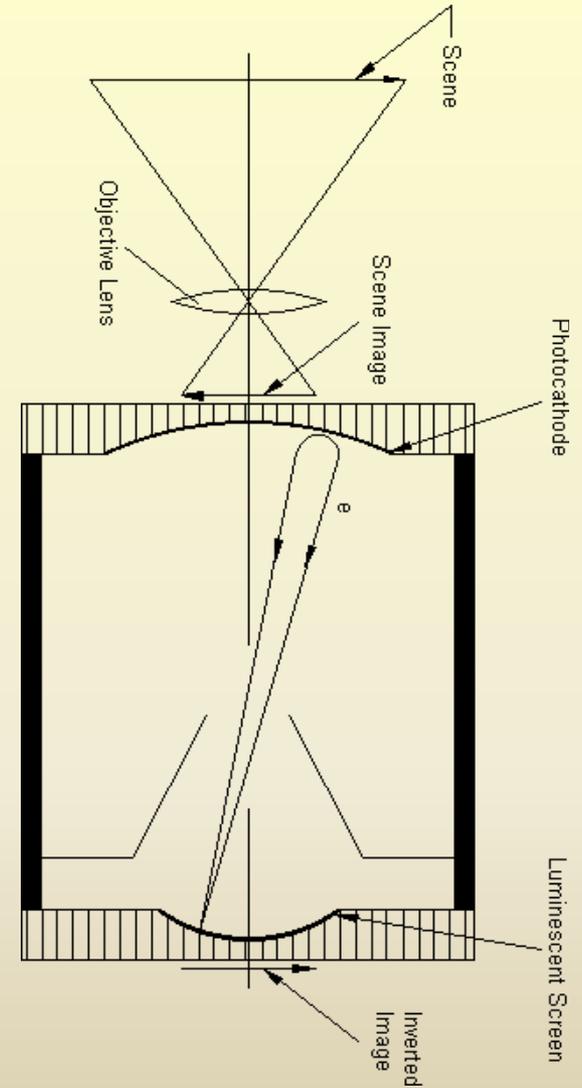
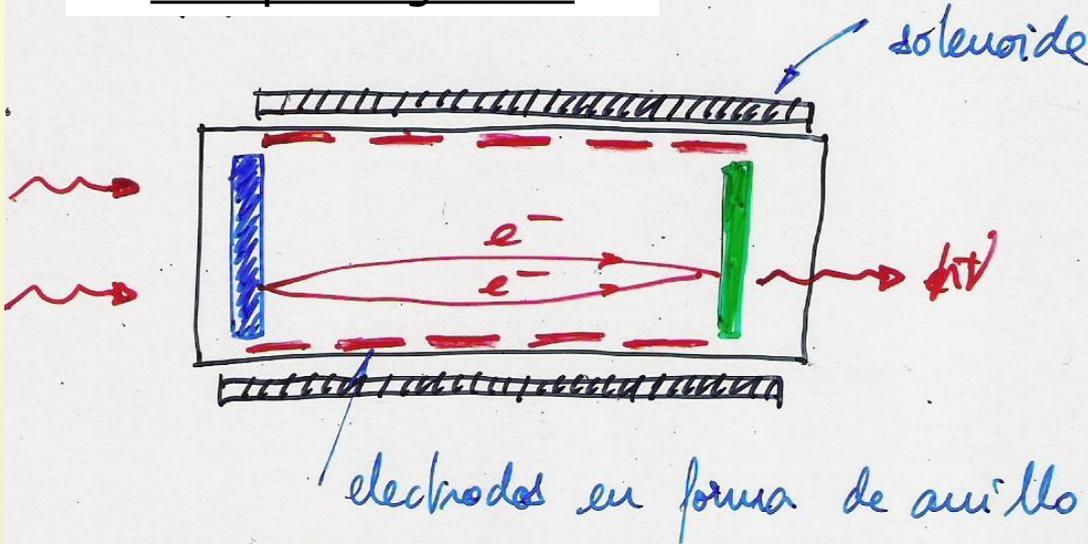


Es importante notar que las imágenes enfocadas en el fotocátodo se convierten en imágenes más intensas y/o en otra longitud de onda en la salida.



# INTENSIFICADORES- Conversores de imagen

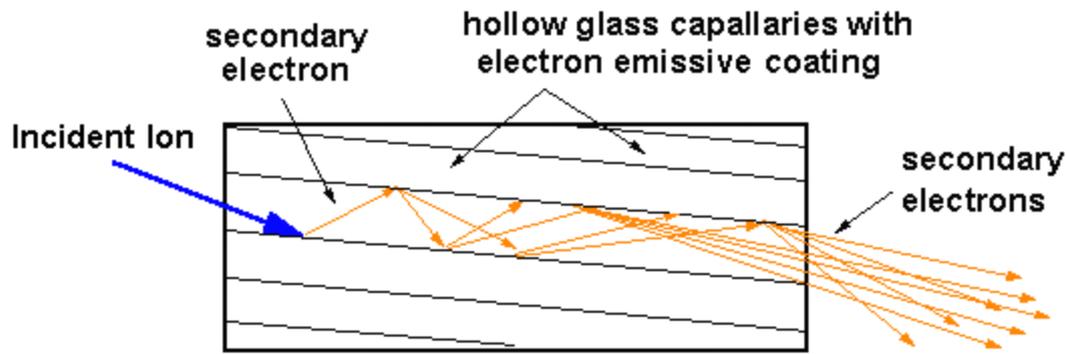
Enfoque magnético.



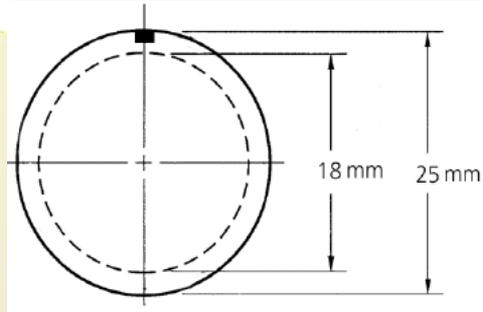
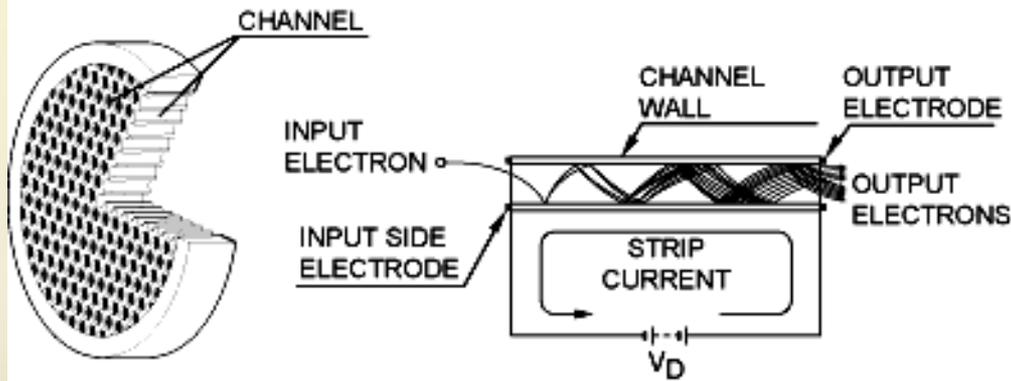
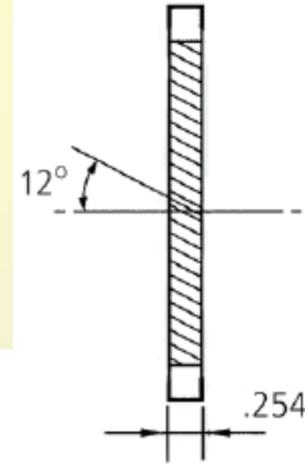
Tubo de imagen de tres etapas de enfoque electrostático.



# INTENSIFICADORES: Placas de microcanales



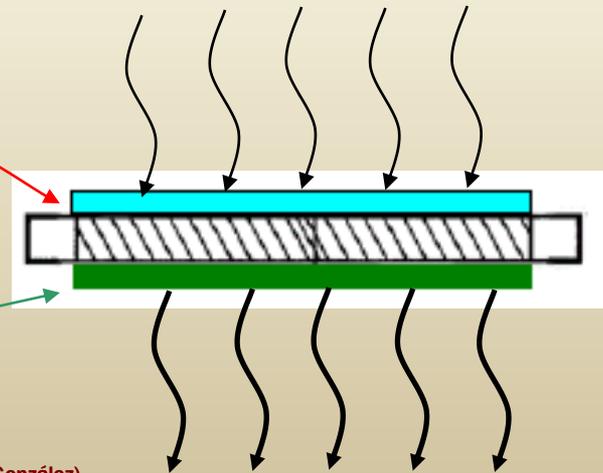
© 1996 B.M. Tissue



Diámetro de los microcanales 8-20  $\mu\text{m}$

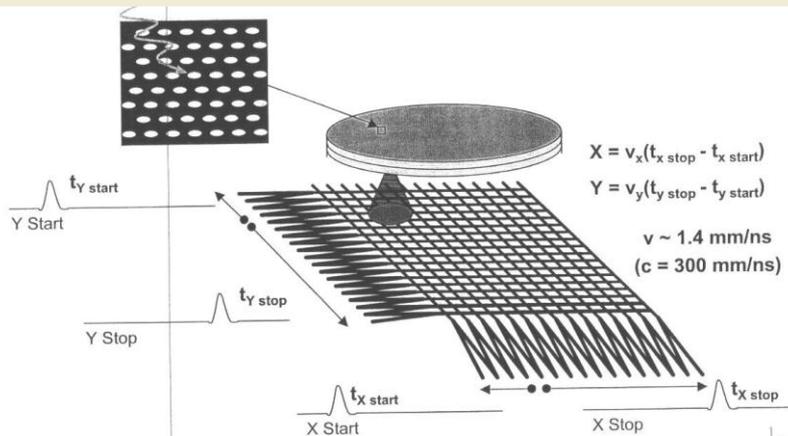
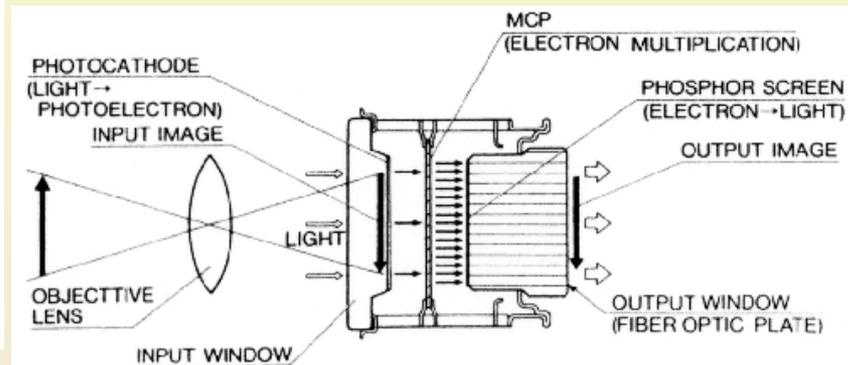
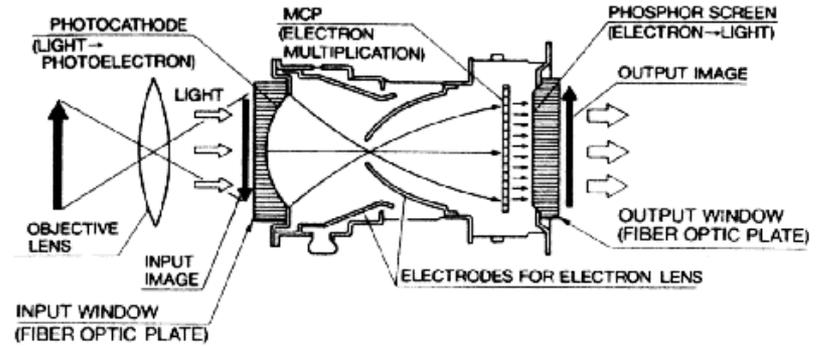
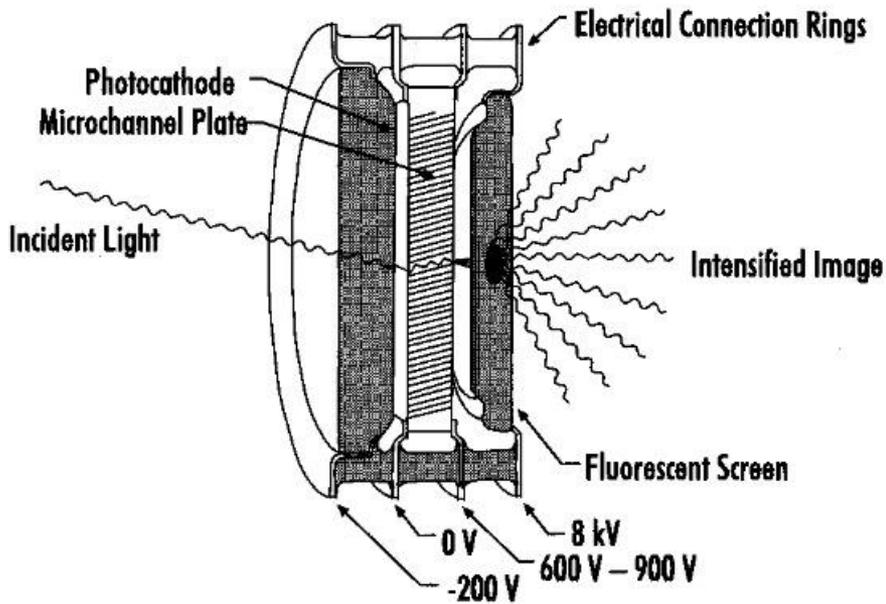
$G = 10^5$  (1  $e^- \rightarrow 10^5 e^-$ )

Intensifican la imagen si se coloca a la entrada un fotocátodo y a la salida una pantalla de fósforo.





# INTENSIFICADORES: Placas de microcanales



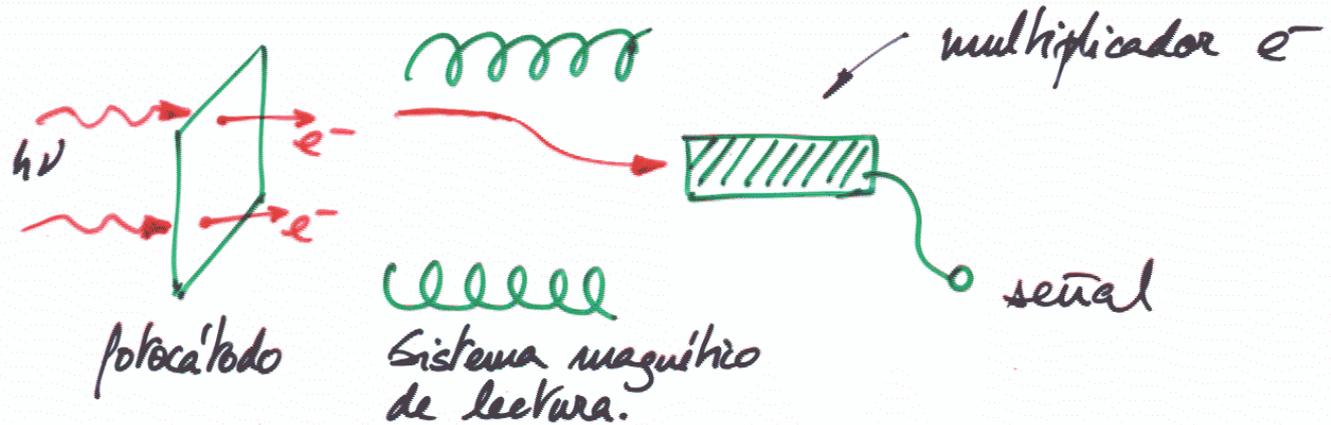
## GALEX - MCP



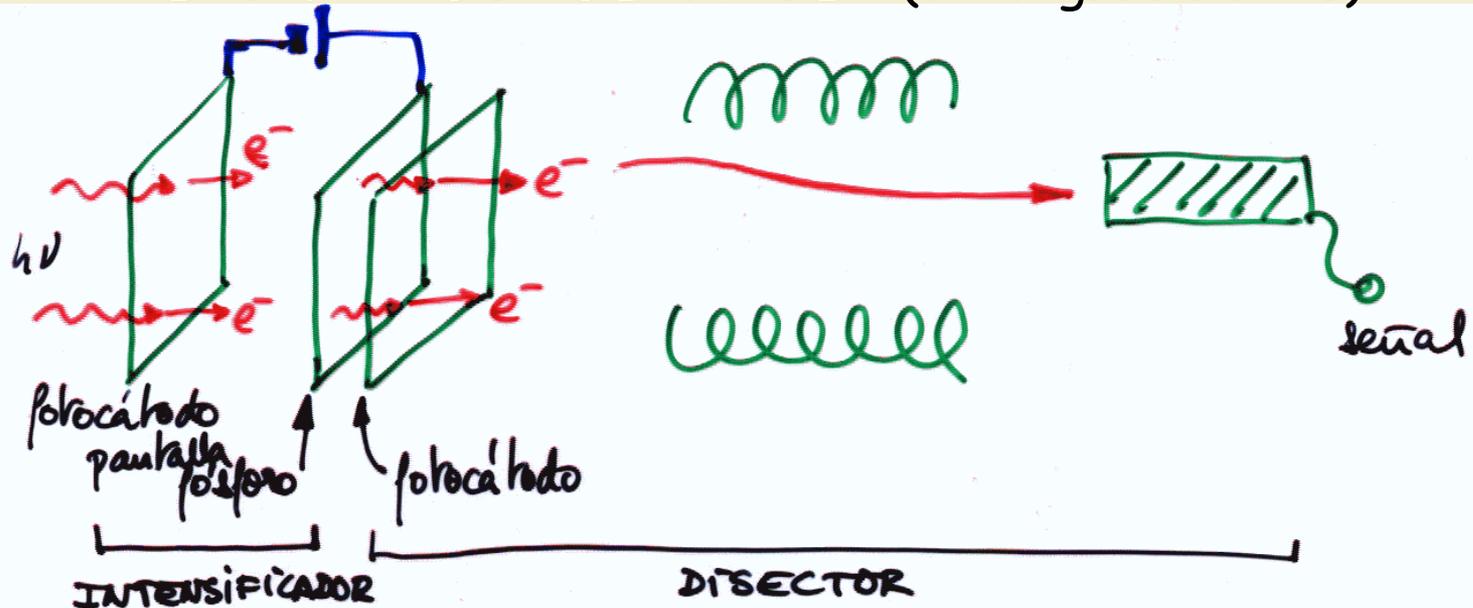


# SISTEMAS DE TV: Disectores

## DISECTOR DE IMAGEN (no integra)



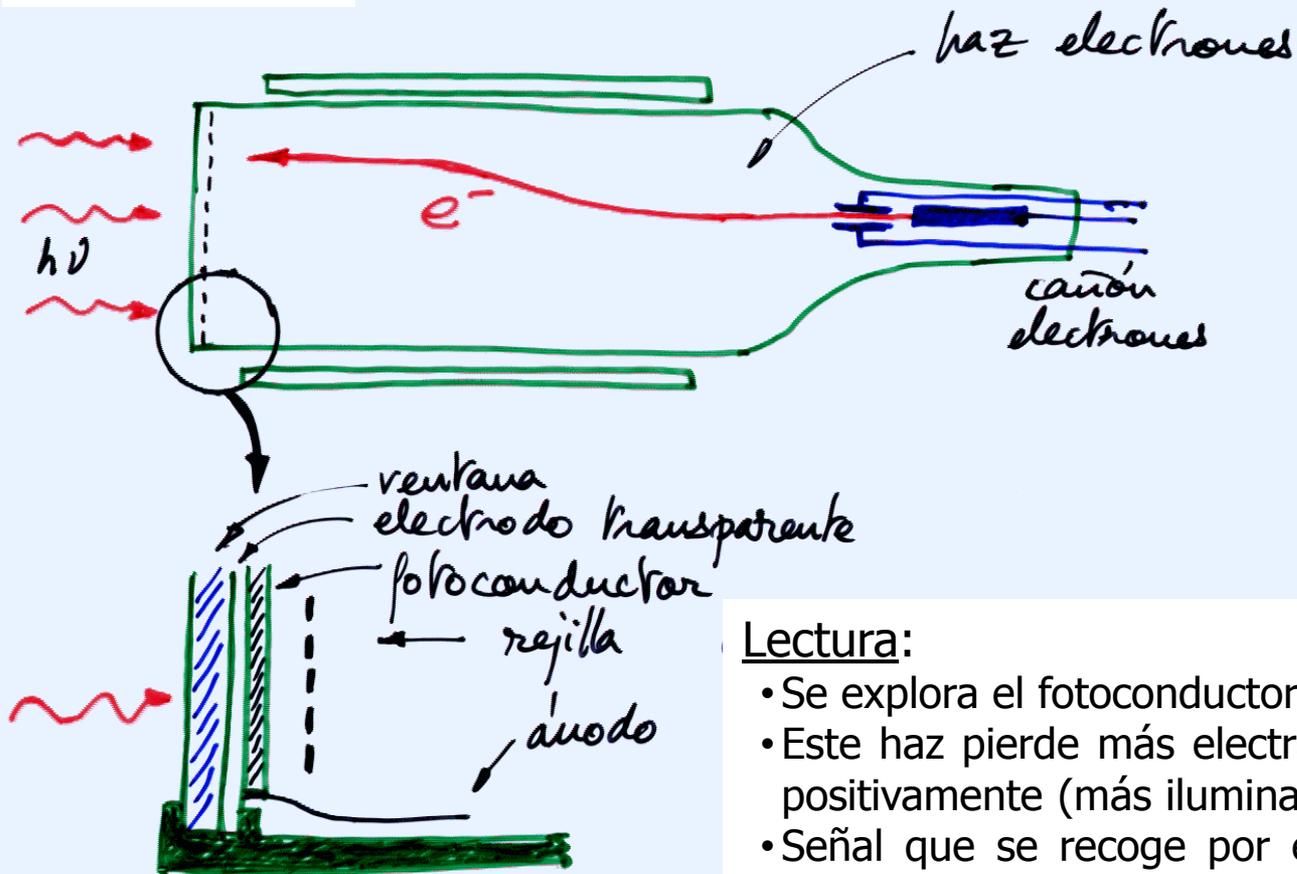
## DISECTOR + INTENSIFICADOR DE IMAGEN (+ integración < 1s)





# SISTEMAS DE TV: VIDICON

## VIDICON



### Exposición:

Imagen óptica →  
→ imagen electrónica (zonas más iluminadas se hacen más conductoras y se cargan + a través del electrodo transparente que hace de ánodo).

### Lectura:

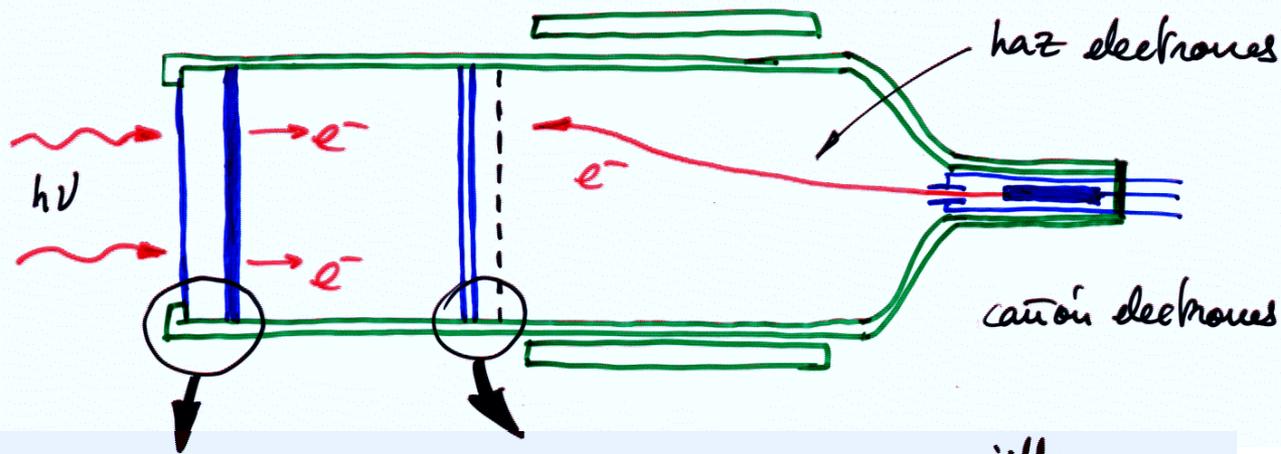
- Se explora el fotoconductor con el haz de  $e^-$
- Este haz pierde más electrones en las zonas cargadas positivamente (más iluminadas).
- Señal que se recoge por el ánodo (proporcional a la llegada de fotones) es pequeña ( $\sim nA$ ) y ha de ser amplificada.
- El tiempo de lectura es de  $\sim 1s$  y el tiempo de integración bajo.

La rejilla está cargada + para repeler los iones + creados dentro del tubo.



# SISTEMAS DE TV: SEC VIDICON

## SEC VIDICON



### Exposición:

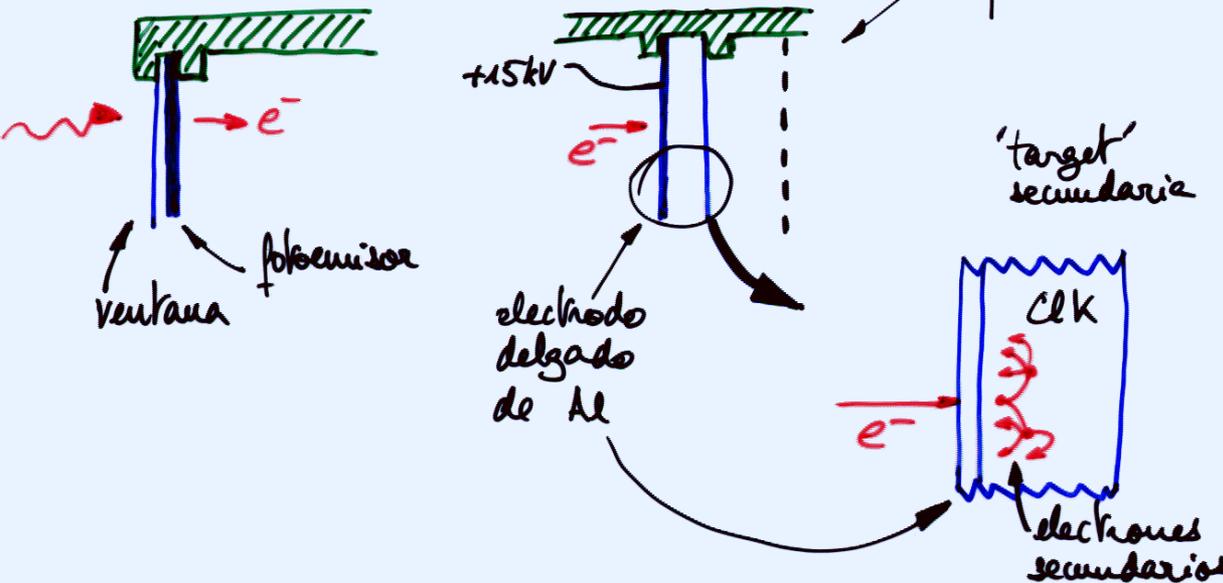
Los  $e^-$  acelerados en la primera fase ( $\sim 15\text{kV}$ ) inciden en el blanco secundario produciendo  $e^-$  secundarios que son cazados por el electrodo de Al dejando zonas cargadas +

### Lectura:

Como el VIDICON

### Ventajas:

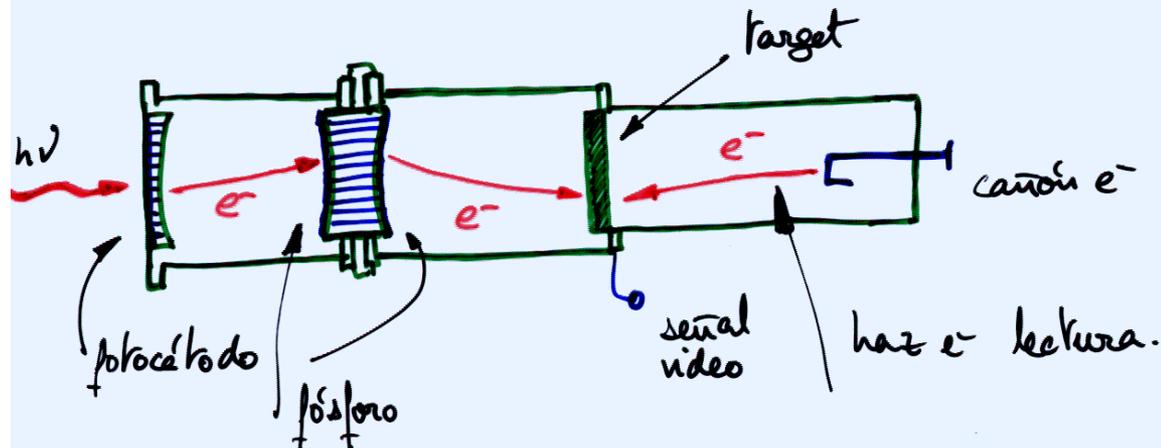
- Rango espectral variable
- $G=100$  en primera fase
- T integración de horas ya que los  $e^-$  secundarios van siendo retirados.



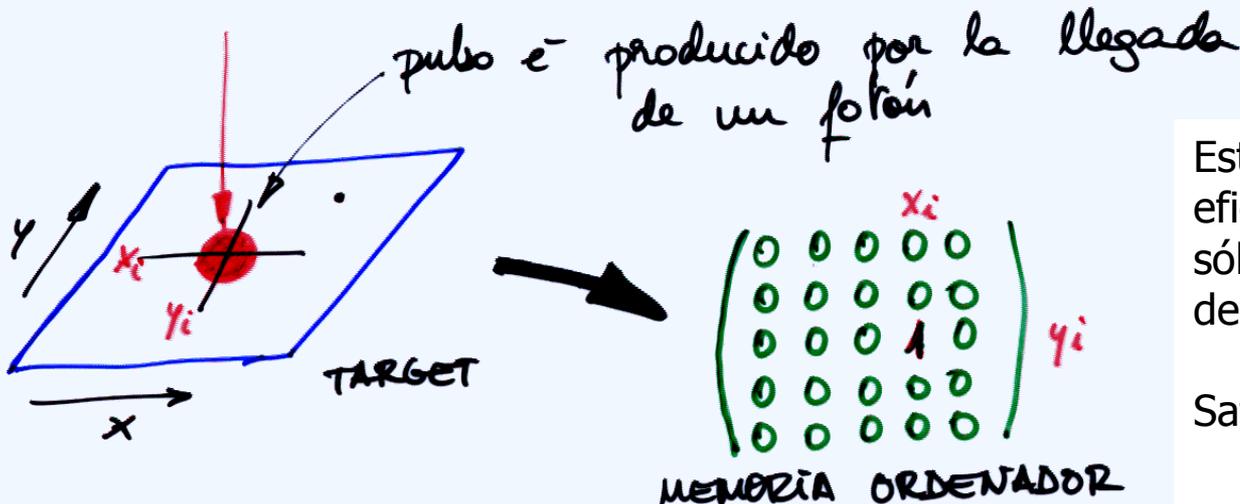


# SISTEMAS DE TV: IPCS

En tubos de TV intensificados con varias etapas se pueden obtener altas ganancias de forma que un fotoelectrón generado en el fotocátodo se convierte en  $10^7$  pares  $e^-h$ .



El IPCS (Image Photon Counting System: sistema contador de fotones) lee continuamente el blanco, determina la posición del centroide y asigna una cuenta más a la posición de memoria correspondiente.



Este sistema era muy lineal y eficiente, con rango dinámico sólo limitado por la memoria del ordenador.

Satura para ritmos altos.



# SISTEMAS DE TV

## VENTAJAS

- RANGO ESPECTRAL AMPLIADO  
120 – 1100 nm (variando el fotocátodo).
- RANGO DINÁMICO ALTÍSIMO  
para sistema de cuenta de fotones.
- LINEALIDAD EXCELENTE  
para bajo ritmo de llegada de fotones

## INCONVENIENTES

- EFICIENCIA DISCRETA: Q.E.  $\sim$  20%
- RESOLUCIÓN ESPACIAL BAJA  
pixel de  $\sim$ 1mm
- TAMAÑO DEL DETECTOR PEQUEÑO.
- PROBLEMAS DE DISTORSIONES  
debido al enfoque magnético.



# Resumen de contenidos

- **El efecto fotoeléctrico.**
- **Principios físicos de los semiconductores.**
- **Tipos de detectores usados en Astronomía. Ventajas e inconvenientes.**