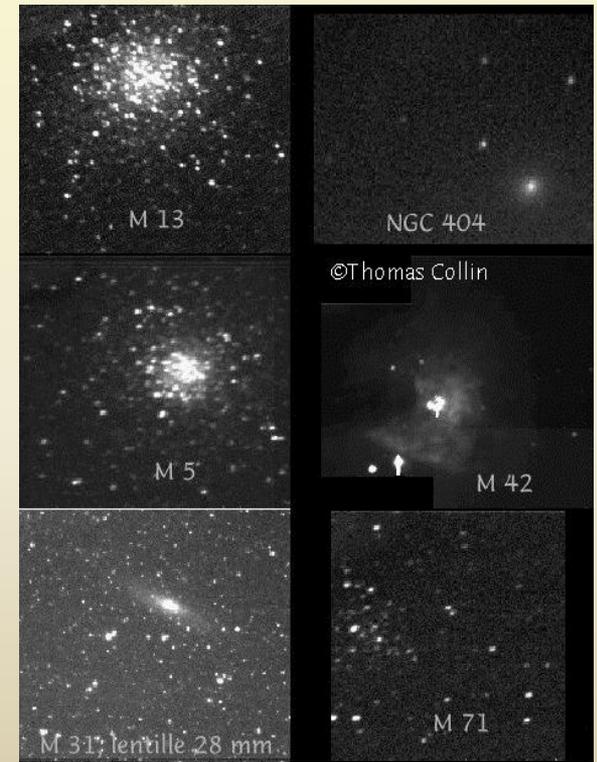
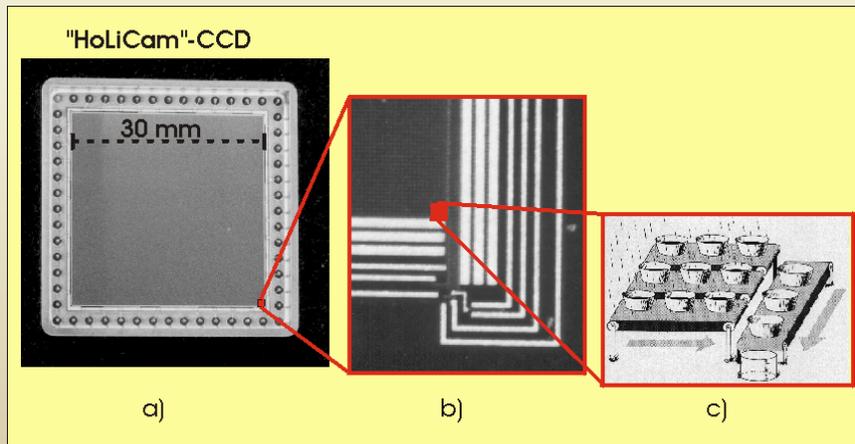
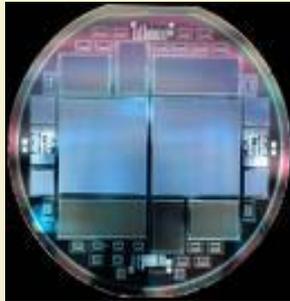




Tema 8: Detectores CCD

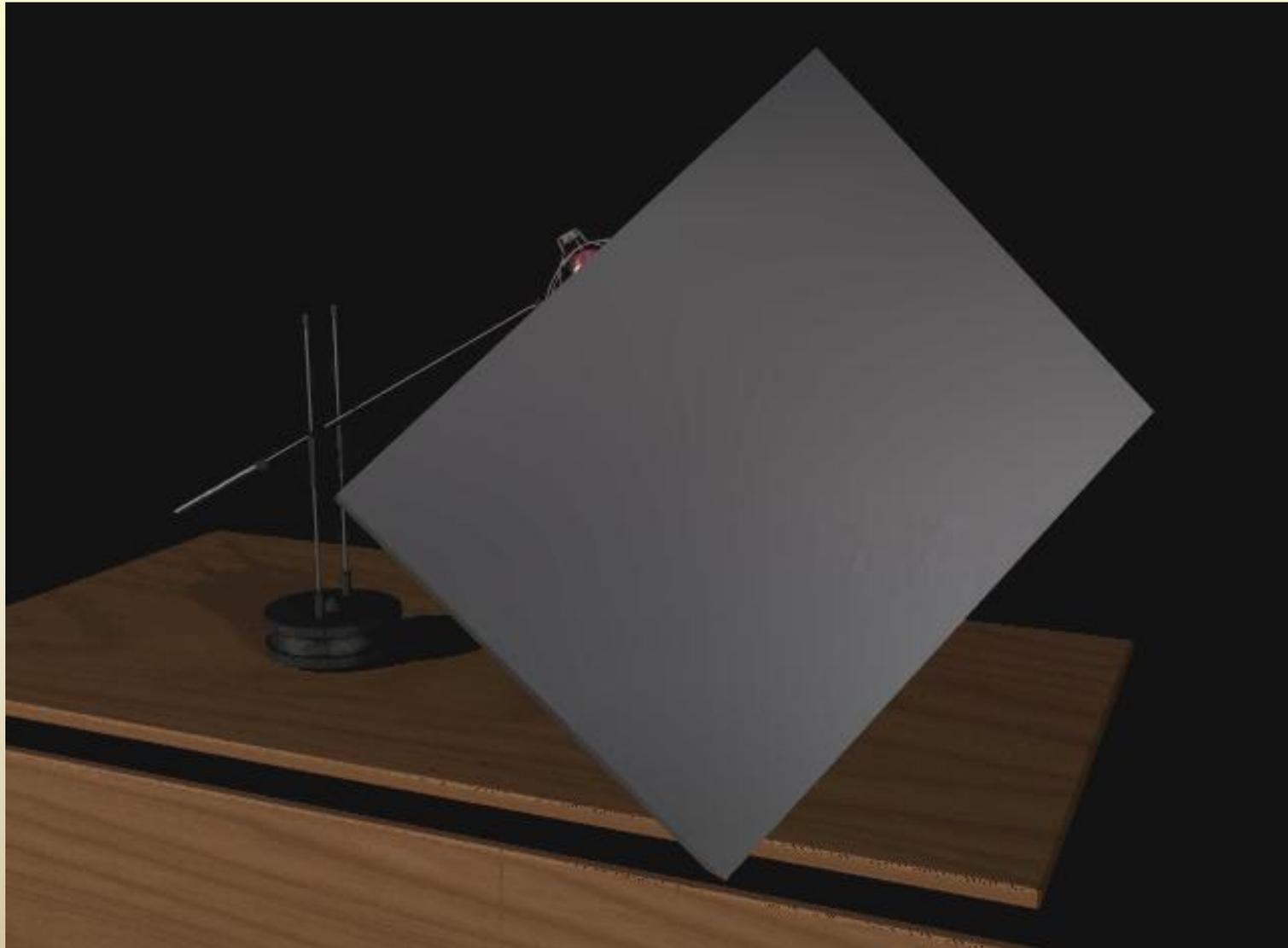
Consultar: "*Astrophysical techniques*", K08; "*Detection of light*", R06; "*Electronic and computer-aided astronomy*", M89.





Detectores de estado sólido

Array bidimensional de unidades sensibles a la luz (píxeles)





Detectores de estado sólido: CCDs

- **Años 60 y 70:** Detectores electrónicos (vidicon...etcétera)
- **1969:** CCDs (del inglés Charge Coupled Device, dispositivo de carga acoplada) Willard Boyle y George Smith (Bell Tech journal 48, 587, abril 1970). Sistema de 1x8 píxeles
- **Comienzos 70:** varios grupos de investigación
- **1973:** JPL, NASA y Texas Instruments (TI) desarrollan un CCD para Galileo (diseño 1981, lanzamiento en 1989, en Júpiter XII-1995)
- **1973:** Sistema de 100x100
- **1976:** CCD + telescopio de 61cm (JPL)
(Júpiter, Saturno, Urano)
- **Finales de los 70:** NASA decide CCDs en lugar de vidicon para el HST
512x320 de RCA
- **1980:** 800x800 (Texas Instruments). Primer CCD permanente en el 1.5m de Mount Hopkins



CCDs en la actualidad

- **Primeros de los 80:** TI (800x800)
RCA (muy sensibles pero más ruidosos)
KPNO
Fairchild
- **1985:** RCA deja de producir CCDs por razones económicas
- **Primeros de los 80:** la astronomía inglesa origina GEC (futuro EEV)
- **1985:** Entra en el mercado Tektronix
- **1988:** 1024x1024 de Tektronix
- **Finales de los 80:** Silicon Imaging Technologies (SITE) absorbe Tektronix
- **Años 90:** Entran en el mercado Ford y Loral
- **En adelante** Mosaicos cada vez mayores



CCDs en la actualidad

- **Tamaños estándar** 1024x1024 y 2048x2048
- **Mosaicos** 8192x8192
CCDs profesionales: Loral, SITE, Orbit, EEV y Thomson
CCDs aficionados: TI y Kodak
- **MegaCAM** 40 x (2048x4612) CCDs
1°x1° FOV @ CFHT
- **Aficionados** 1024x1024 por unos 1500€
- **Cámaras de vídeo** CCDs de formatos rectangulares
- **Dimensiones fijadas en potencias de 2**



no hay razón fundamental para ello

salvo el **tamaño** de las imágenes:

$$2^{10} = 1024$$

$$2 \text{ bytes} \times 1024 \times 1024 = 2 \text{ Mbytes (formato enteros)} \quad 4 \text{ Mb (reales)}$$

$$2^{11} = 2048, \quad 2^{16} = 65536$$

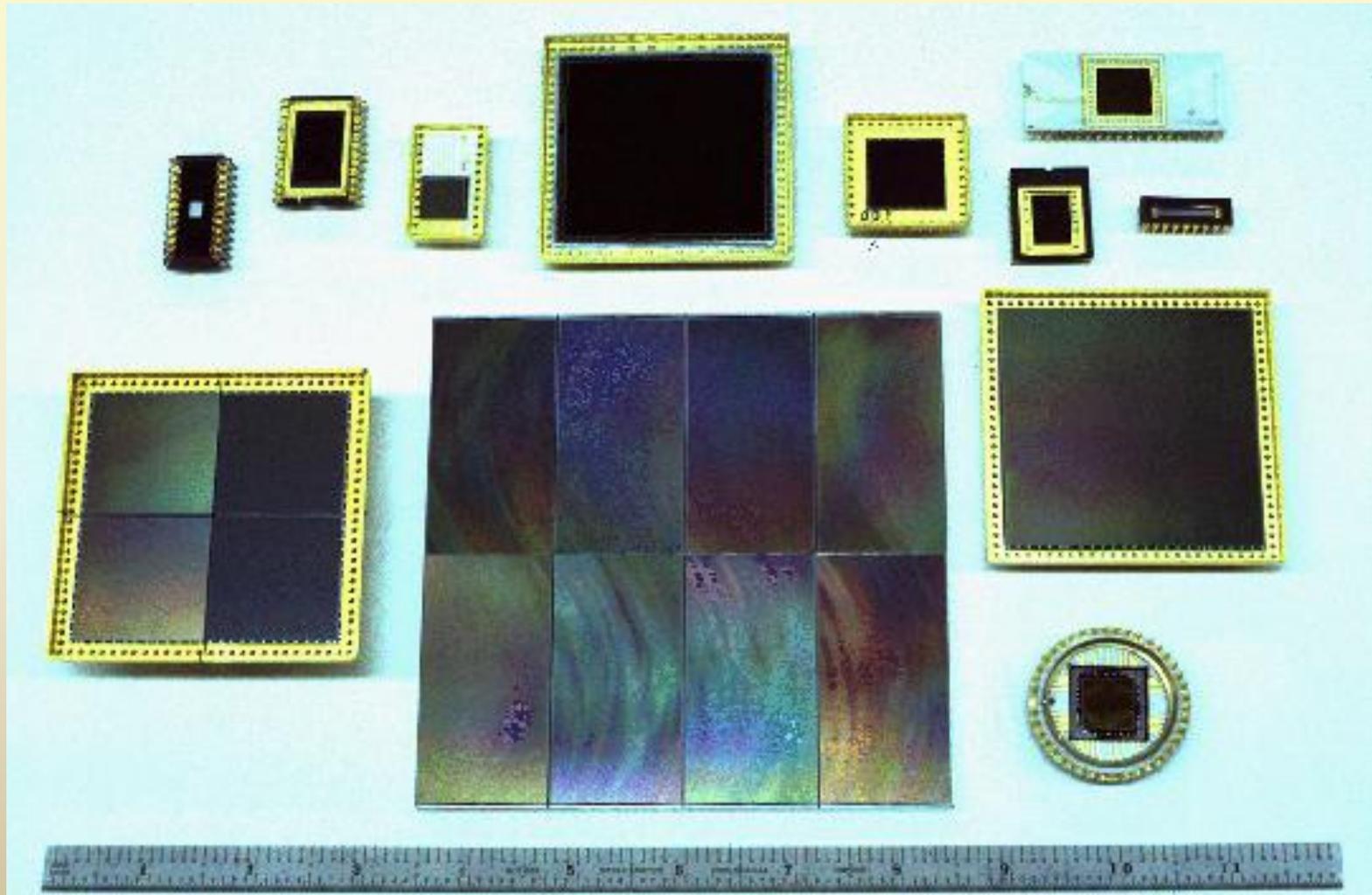
$$2 \text{ bytes} \times 2048 \times 2048 = 8 \text{ Mbytes (formato enteros)} \quad 16 \text{ Mb (reales)}$$



Detectores de estado sólido

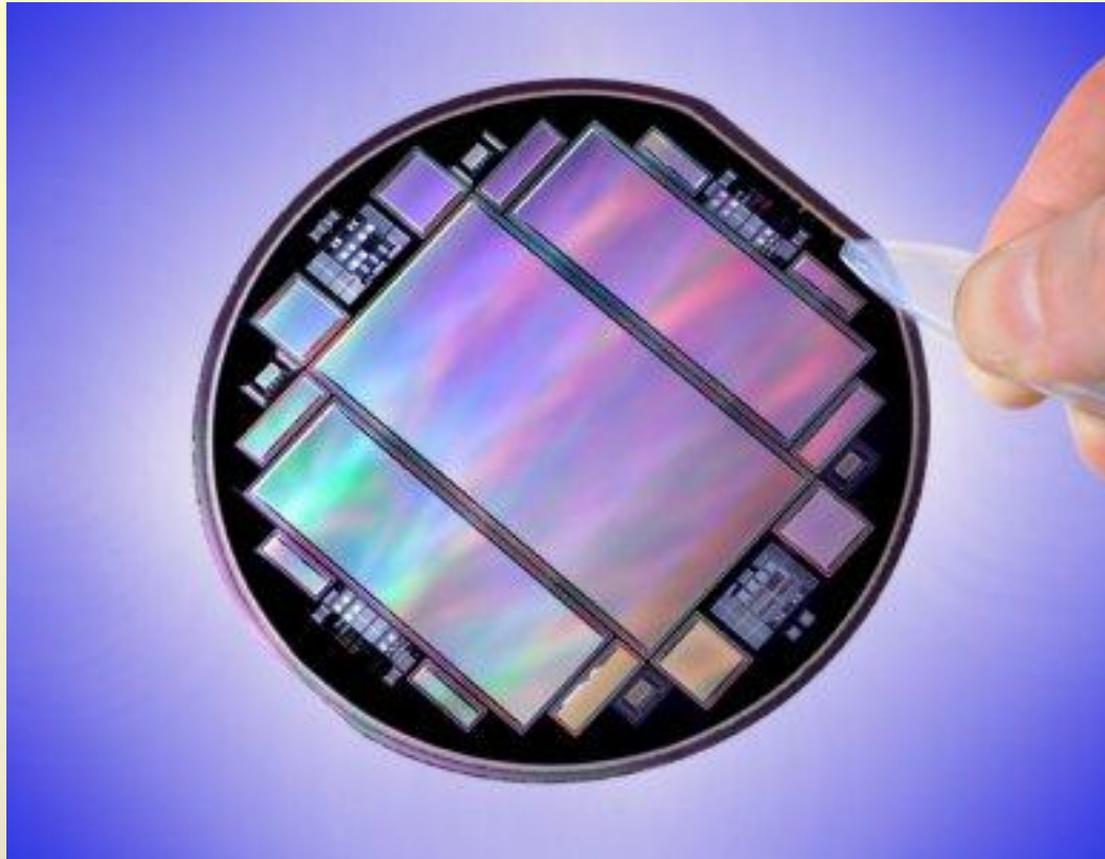
Array bidimensional de unidades sensibles a la luz (píxeles)

100-500 μm de grosor
unos pocos cm de lado
Píxeles de $\sim 15\text{-}24 \mu\text{m}$





Construcción de CCDs



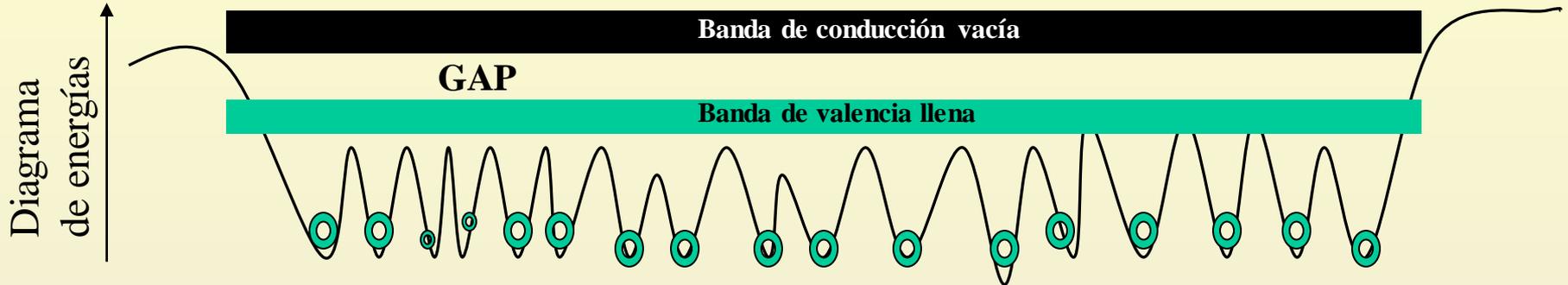
- Obleas de Silicio en las que se graban los chips
- Se obtienen simultáneamente varios de distintos tamaños
- Se adelgazan mediante ataques con ácido



Principios básicos de un CCD

En el **Silicio**, átomos en forma de red cristalina

Las impurezas suponen niveles intermedios permitidos



- Metal conductor: Ambas bandas están mezcladas.
- Metal aislante: El GAP es muy grande y la banda de conducción está completamente vacía.
- Metal **semiconductor**: Unos pocos electrones de la banda de valencia pueden pasar a la de conducción por calor o **efecto fotoeléctrico**.
El material se hace conductor.



Principios básicos de un CCD

$$I(z) = I(0) e^{-\alpha z}$$

flujo de fotones a profundidad z

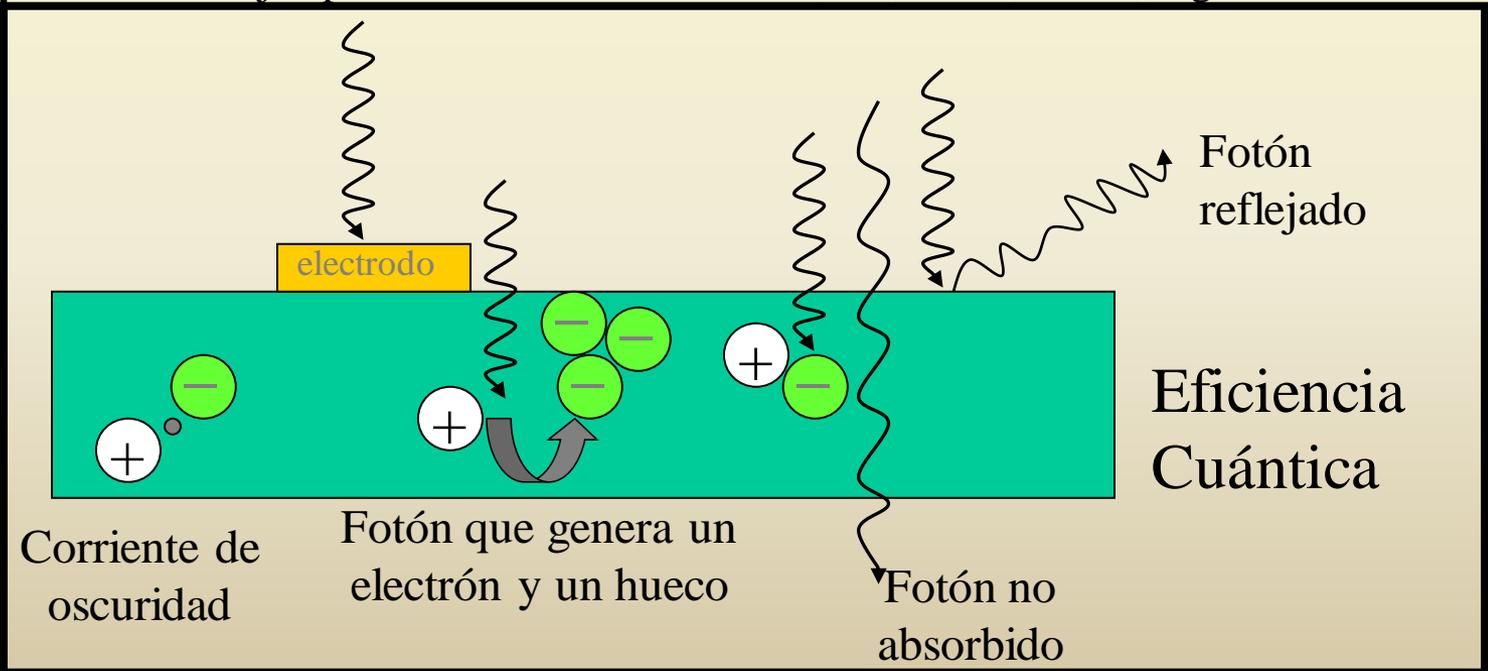
α coeficiente de absorción
a menor α , más penetra la luz

A 300K,	$\alpha \sim 5.0$	μm^{-1} para $\lambda=4000 \text{ \AA}$
Si	$\alpha \sim 0.1$	μm^{-1} para $\lambda=8000 \text{ \AA}$
A 77K,	$\alpha \sim 4.0$	μm^{-1} para $\lambda=4000 \text{ \AA}$
Si	$\alpha \sim 0.005$	μm^{-1} para $\lambda=8000 \text{ \AA}$

Los fotones más rojos penetran más en el semiconductor antes de ser absorbidos.

B	C	N	O	
Al	Si	P	S	
Zn	Ga	Ge	As	Se
Cd	In	Sn	Sb	Te
Hg	Tl	Pb	Bi	Po

Ejemplos de semiconductores: Si, Ge, In-Sb, Ga-As, Hg-Cd-Te





Principios básicos de un CCD

- El GAP de un semiconductor suele ser de ~ 1 eV (~ 30 veces la energía típica de $T=20^\circ\text{C}$).
- A mayor GAP, menor sensibilidad a la temperatura, y por eso es mejor el Silicio al Germanio.
- Si el material se enfría, el paso por calor de e^- a la banda de conducción se elimina.

$$E_G = 1,557 - \frac{7,021 \cdot 10^{-4} T^2}{1108 + T}$$

longitud de onda DE CORTE

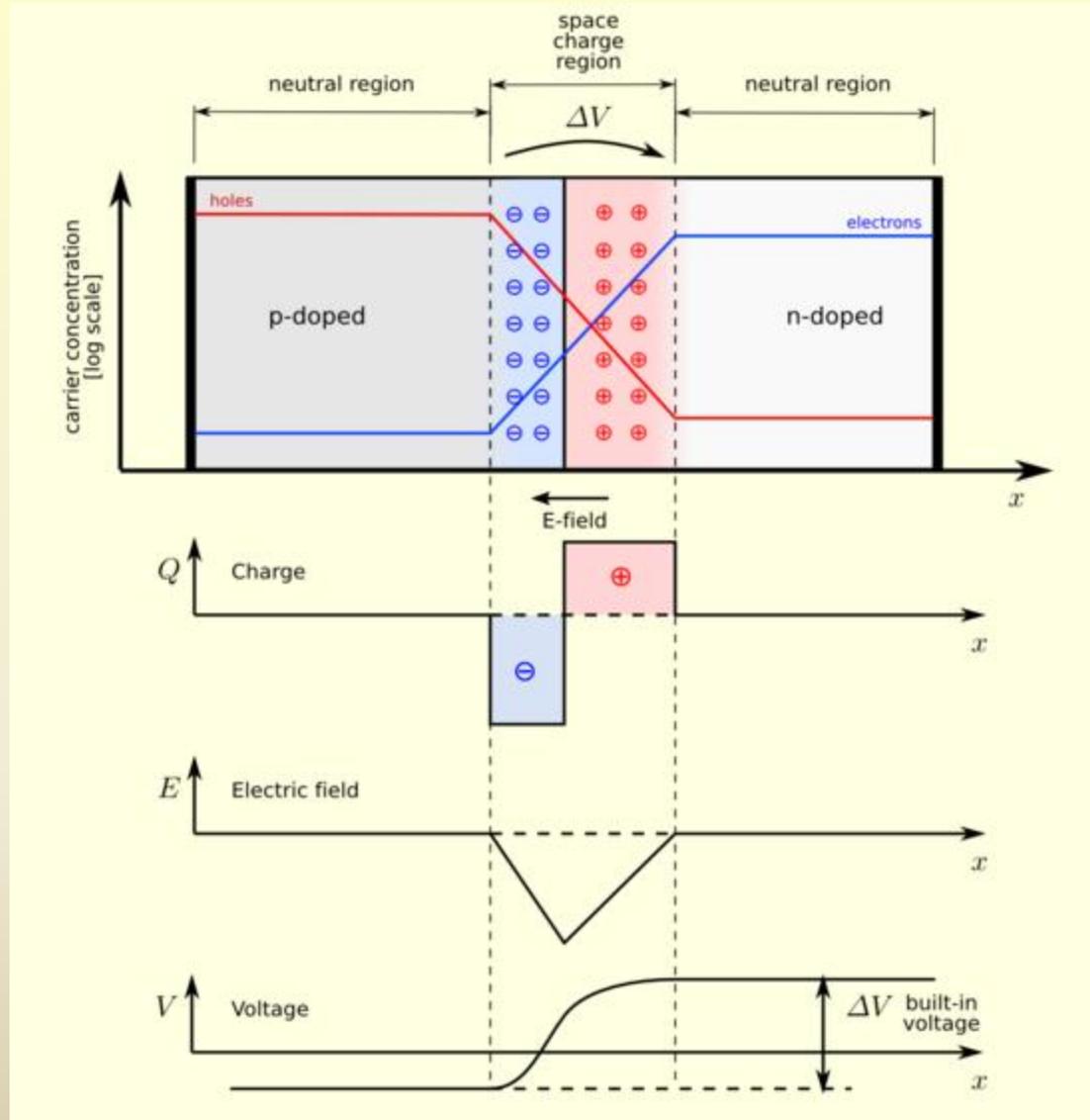
E_G es la energía del GAP

$$\lambda_c = h \frac{c}{E_G}$$

Material		T(K)	E_G (eV)	λ_c (μm)
Sulfuro de Cd	CdS	295	2.40	0.5
Silicio	S	295	1.12	1.11
Germanio	Ge	295	0.67	1.85
Antimoniuro de In	InSb	295	0.18	6.9
		77	0.23	5.4
MerCadTel	HgCdTe	77	0.50	2.5



Principios básicos de un CCD



http://en.wikipedia.org/wiki/P-n_junction

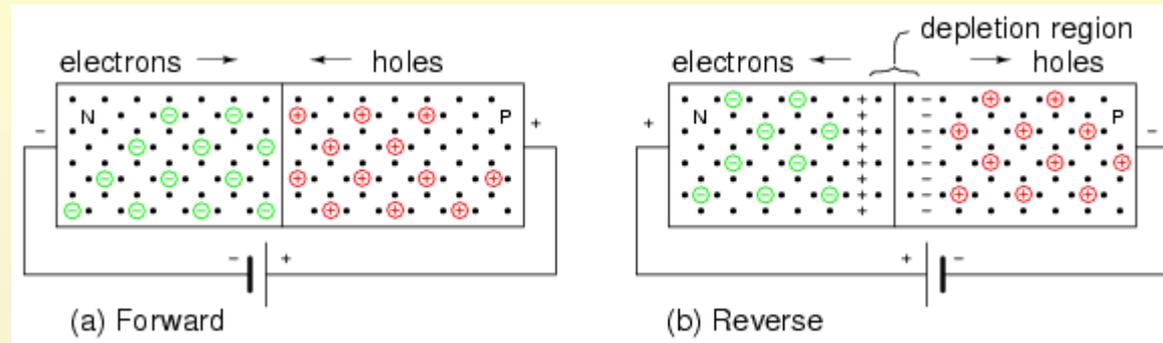
Instrumentación Astronómica

Curso 2011/2012

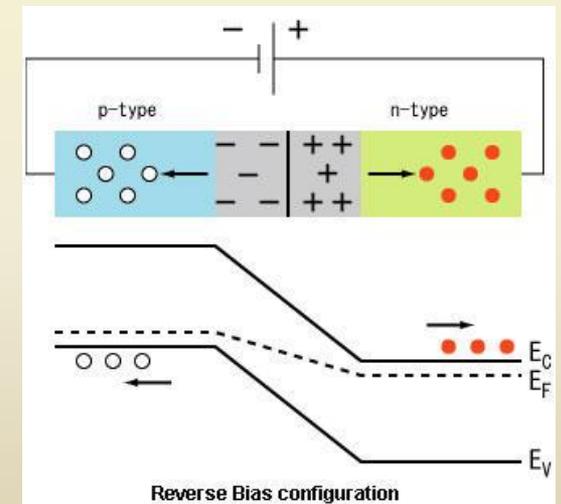
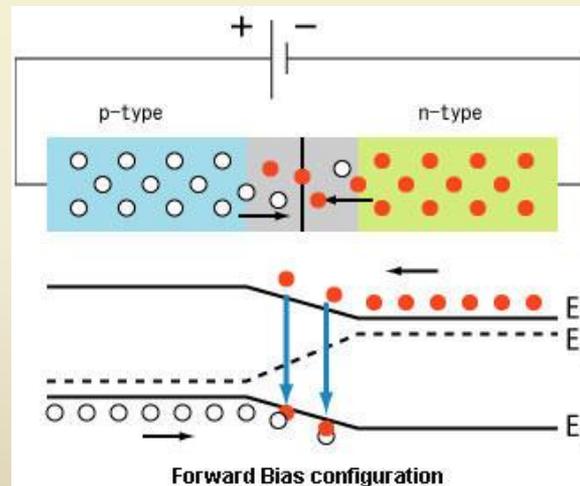
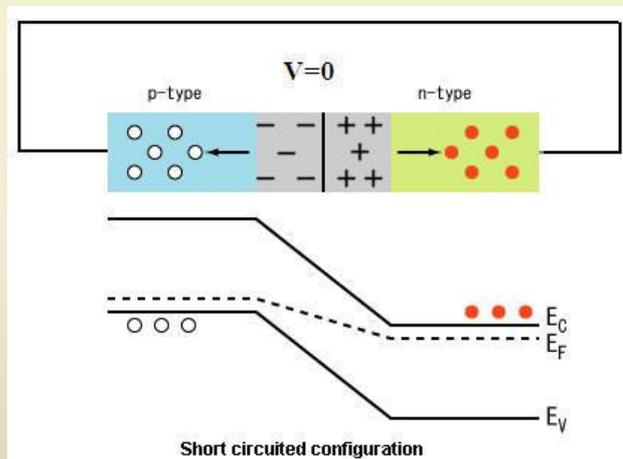
(material compilado por J. Zamorano, J. Gallego, P.G. Pérez-González)



Principios básicos de un CCD



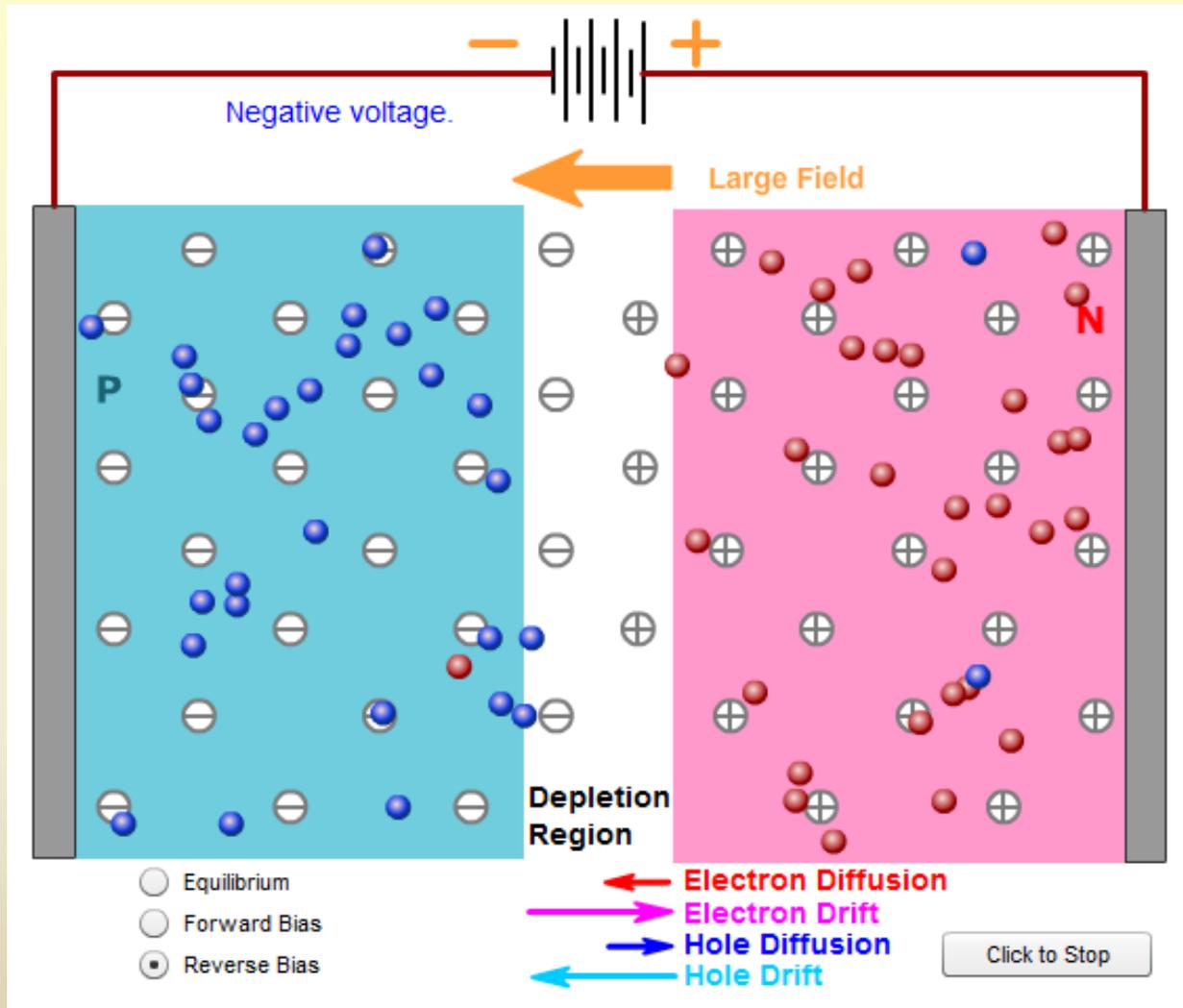
http://www.allaboutcircuits.com/vol_3/chpt_2/6.html



<http://www.engineersgarage.com/tutorials/diodes?page=5>



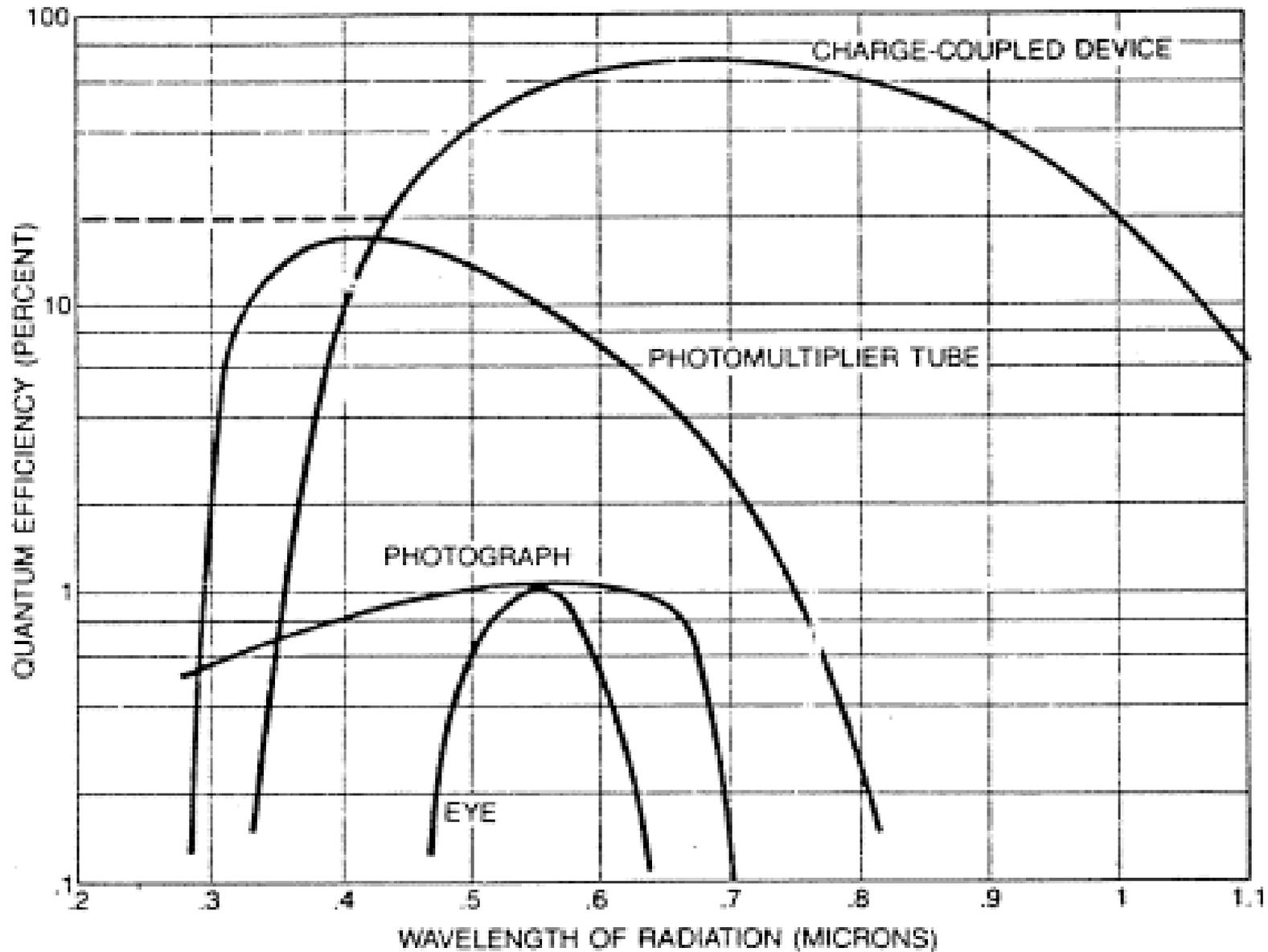
Principios básicos de un CCD



<http://pveducation.org/pvcdrom/pn-junction/bias-of-pn-junction>



CCDs vs. lo demás

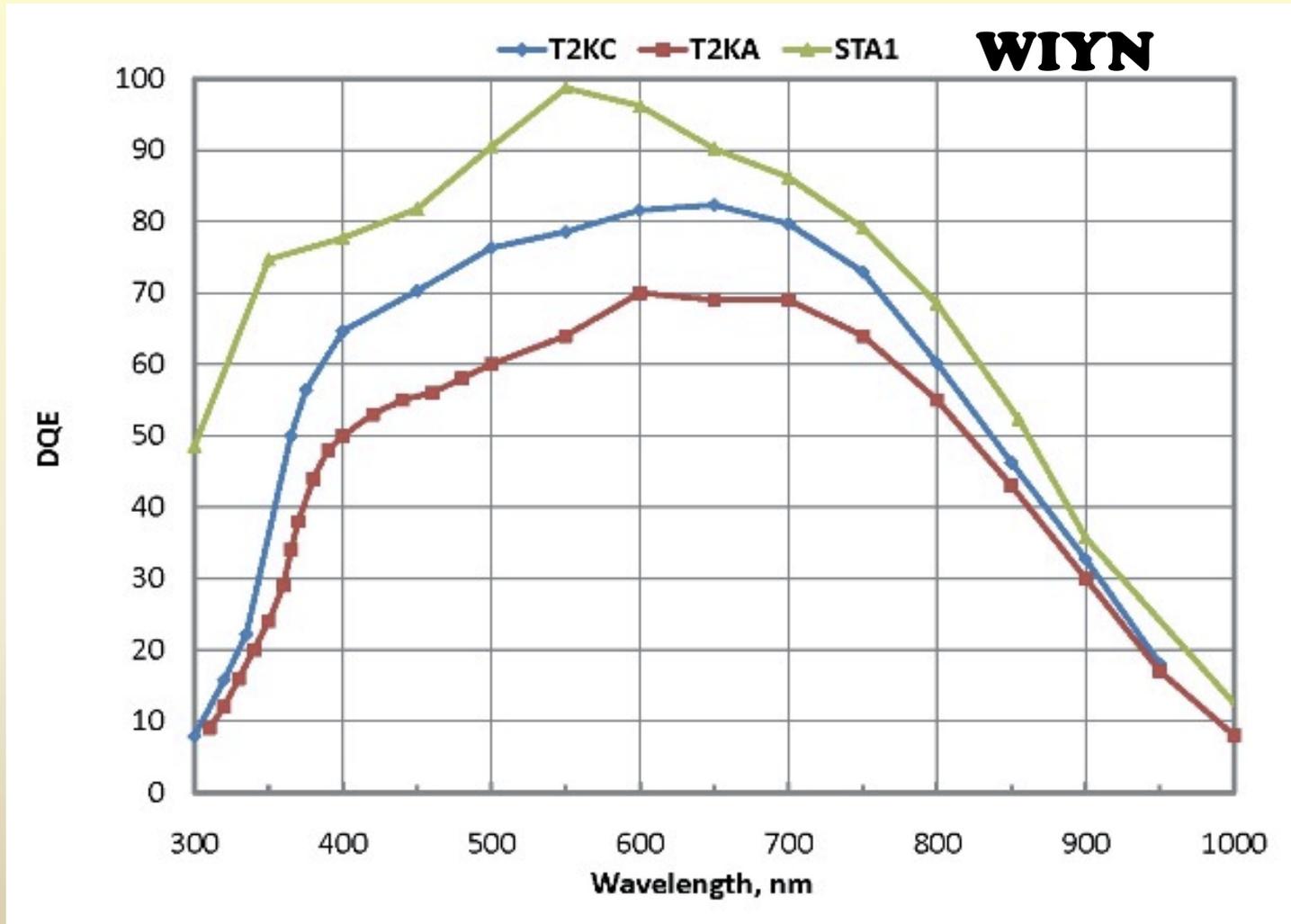


<http://www.physics.uc.edu/~sitko/LightColor/15-Photography3/photography3.htm>



CCDs profesionales

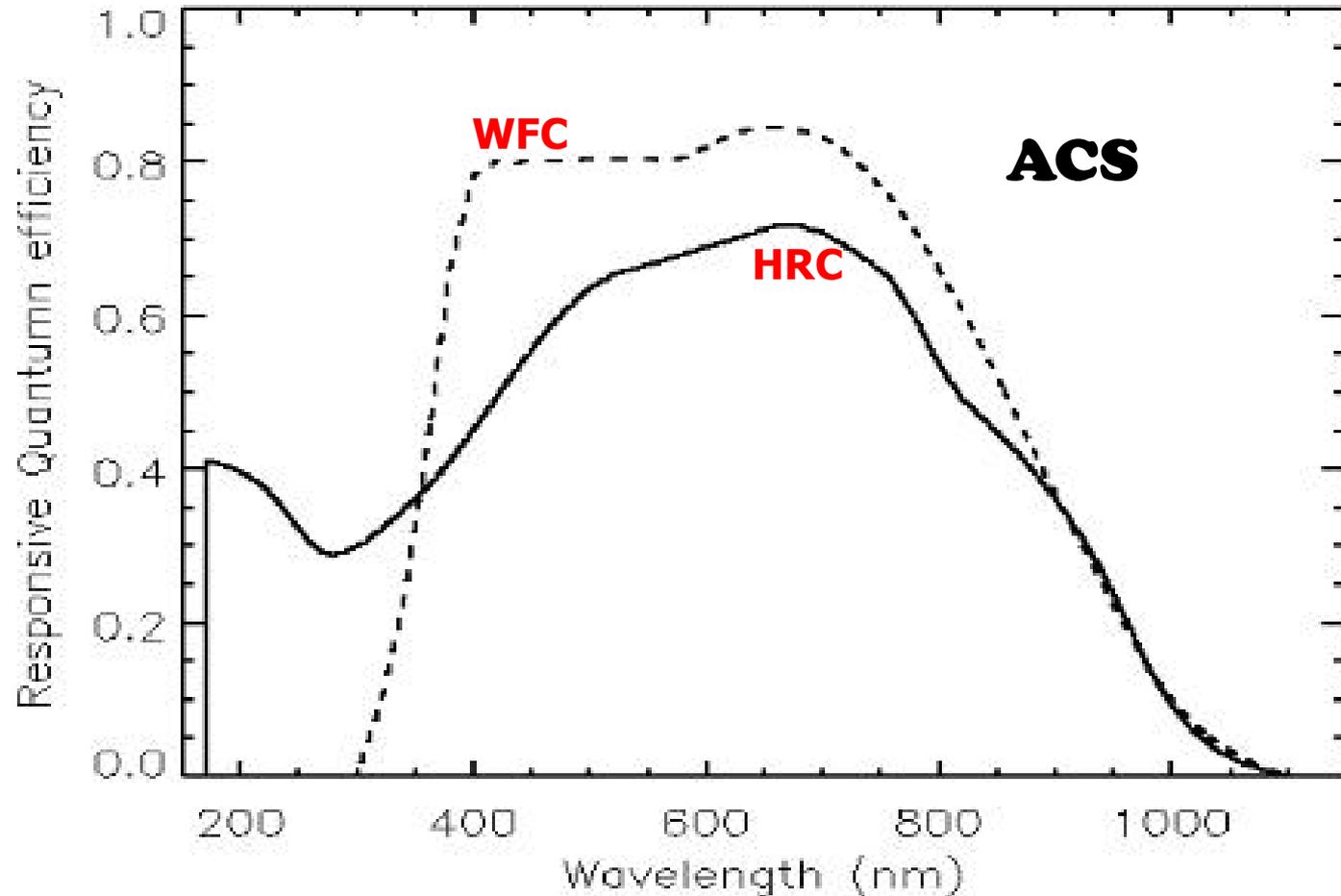
<http://www.noao.edu/wiyn/Instruments/wiynSta1Charac.html>





CCDs profesionales

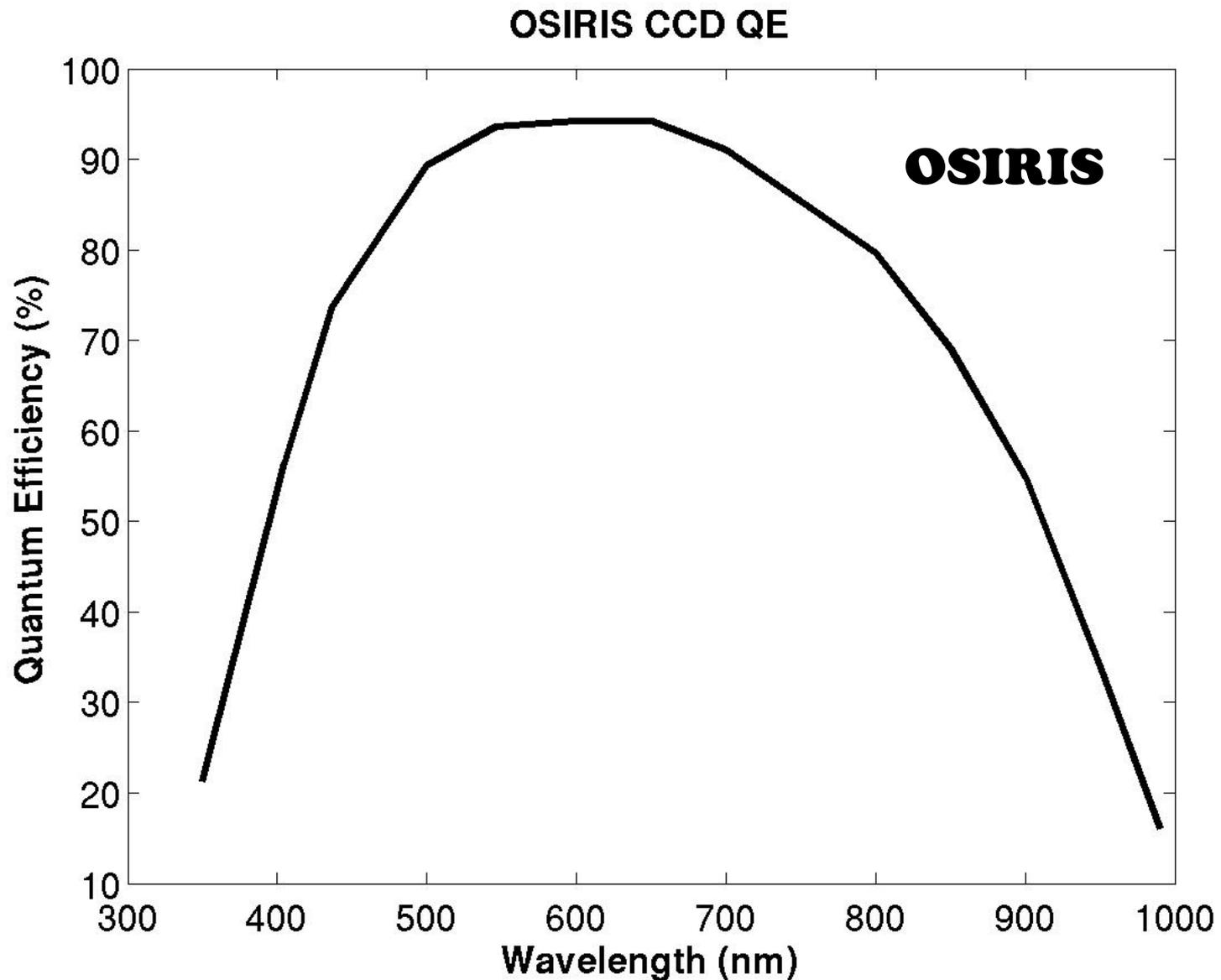
http://www.stsci.edu/hst/acs/documents/handbooks/cycle19/c04_detector3.html





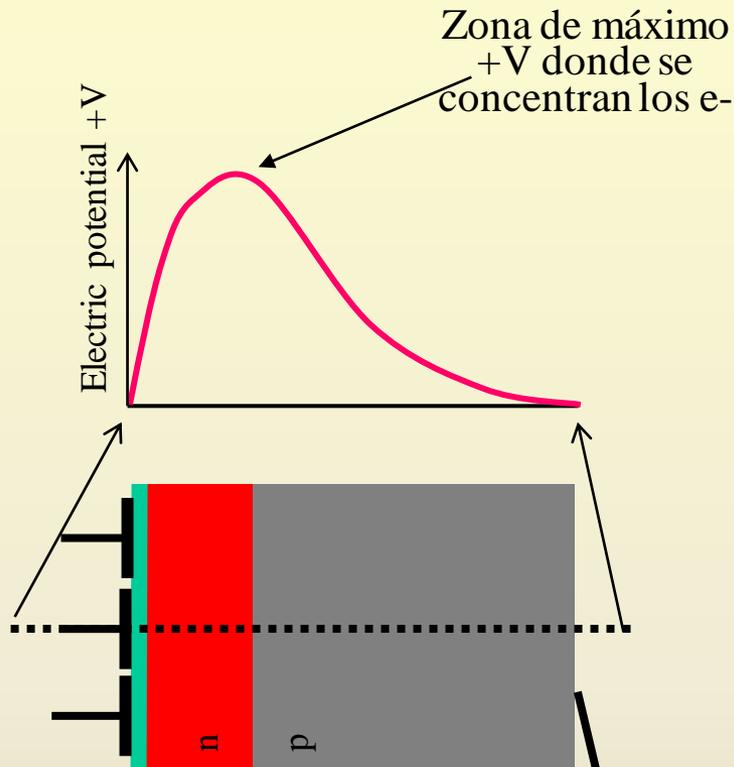
CCDs profesionales

<http://www.gtc.iac.es/en/pages/instrumentation/osiris/data-commissioning.php>



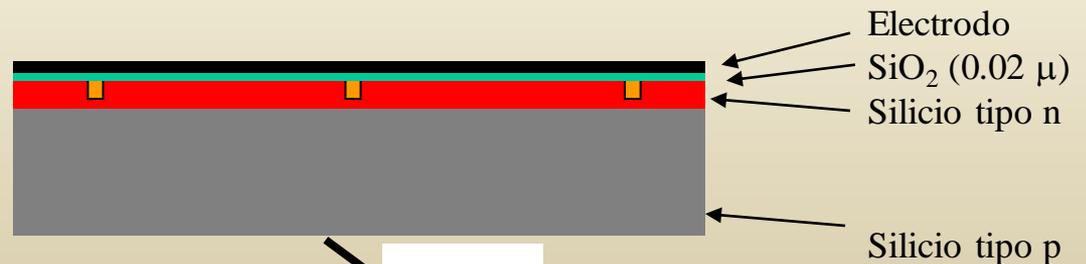
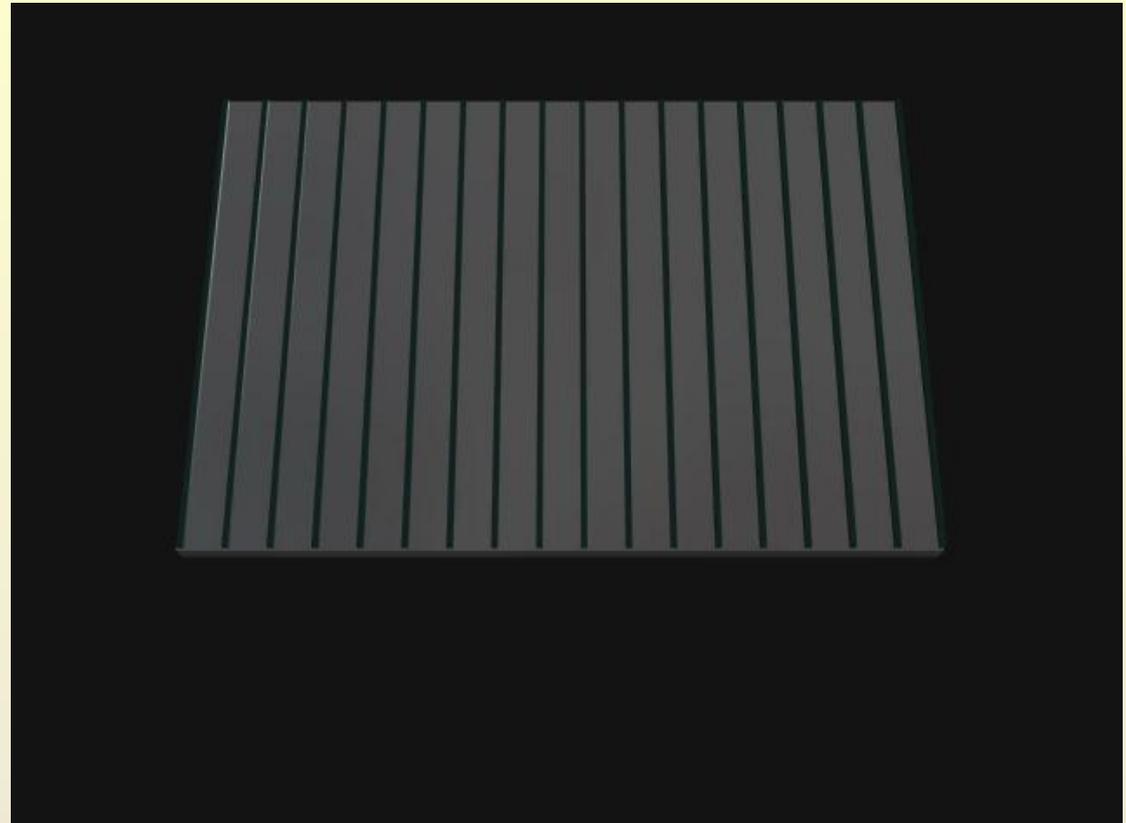


Campo eléctrico en un CCD



Estructura de
"Buried Channel"

Masa
(pol -)



Masa
(pol -)



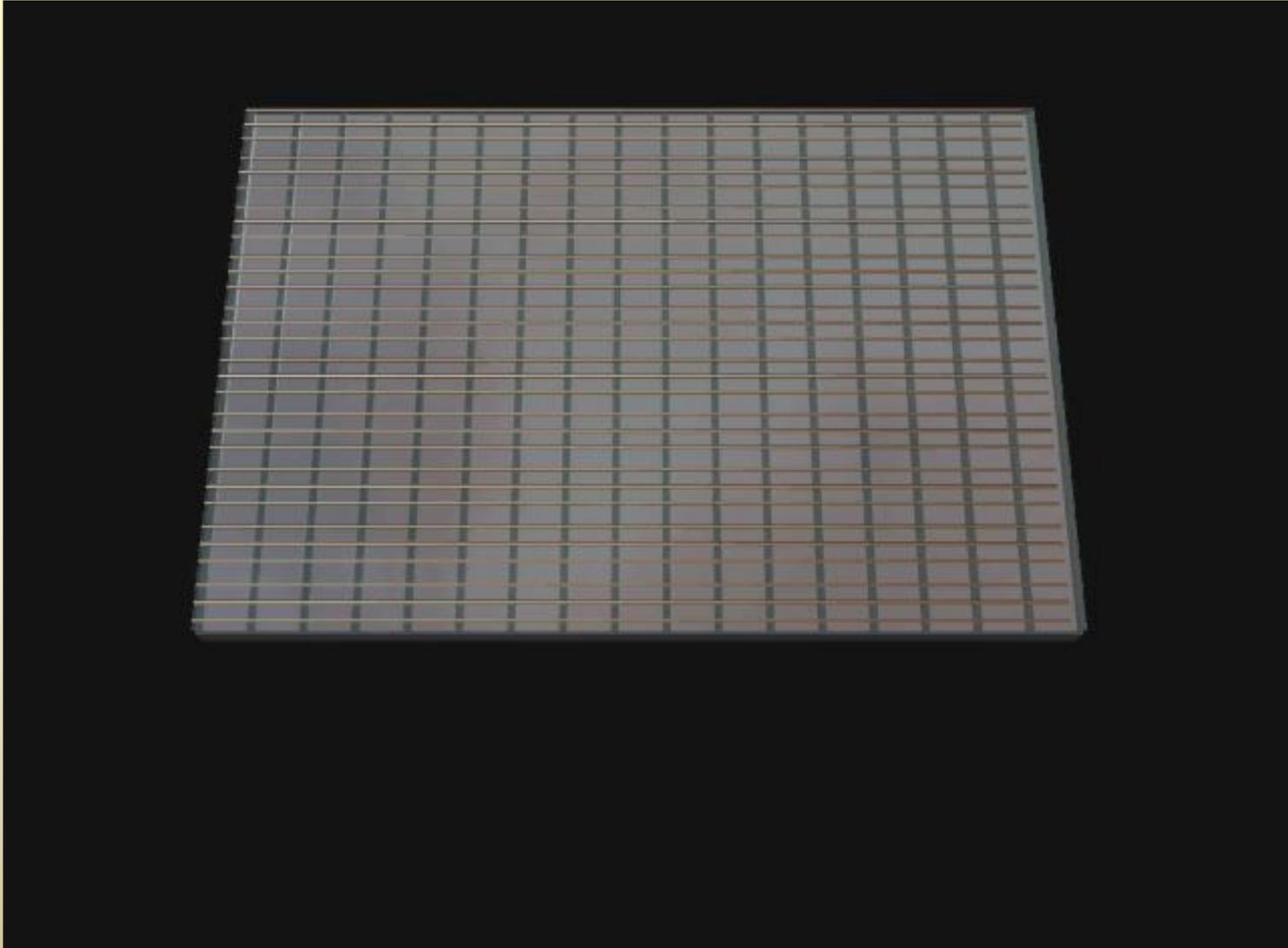
Filas de un CCD





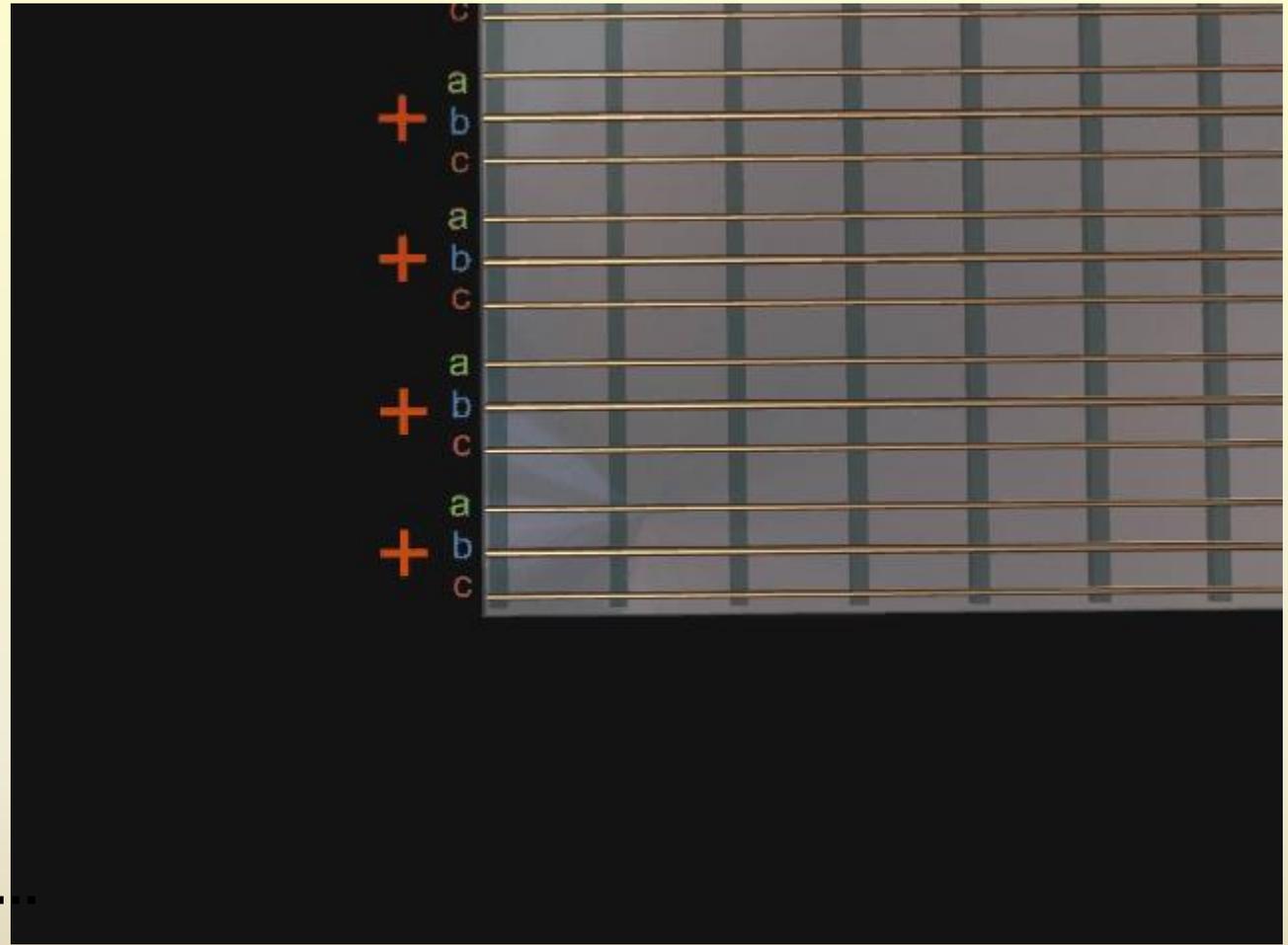
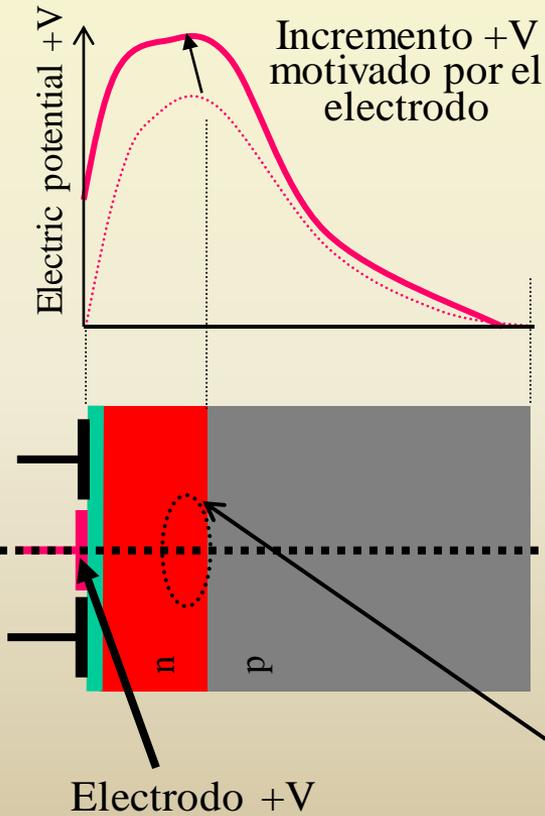
Funcionamiento: CCD de tres electrodos

100-500 μm de grosor
unos pocos cm de lado
Píxeles de $\sim 10\text{-}30 \mu\text{m}$





Integración



Patrón de carga eléctrica

Region de máximo potencial



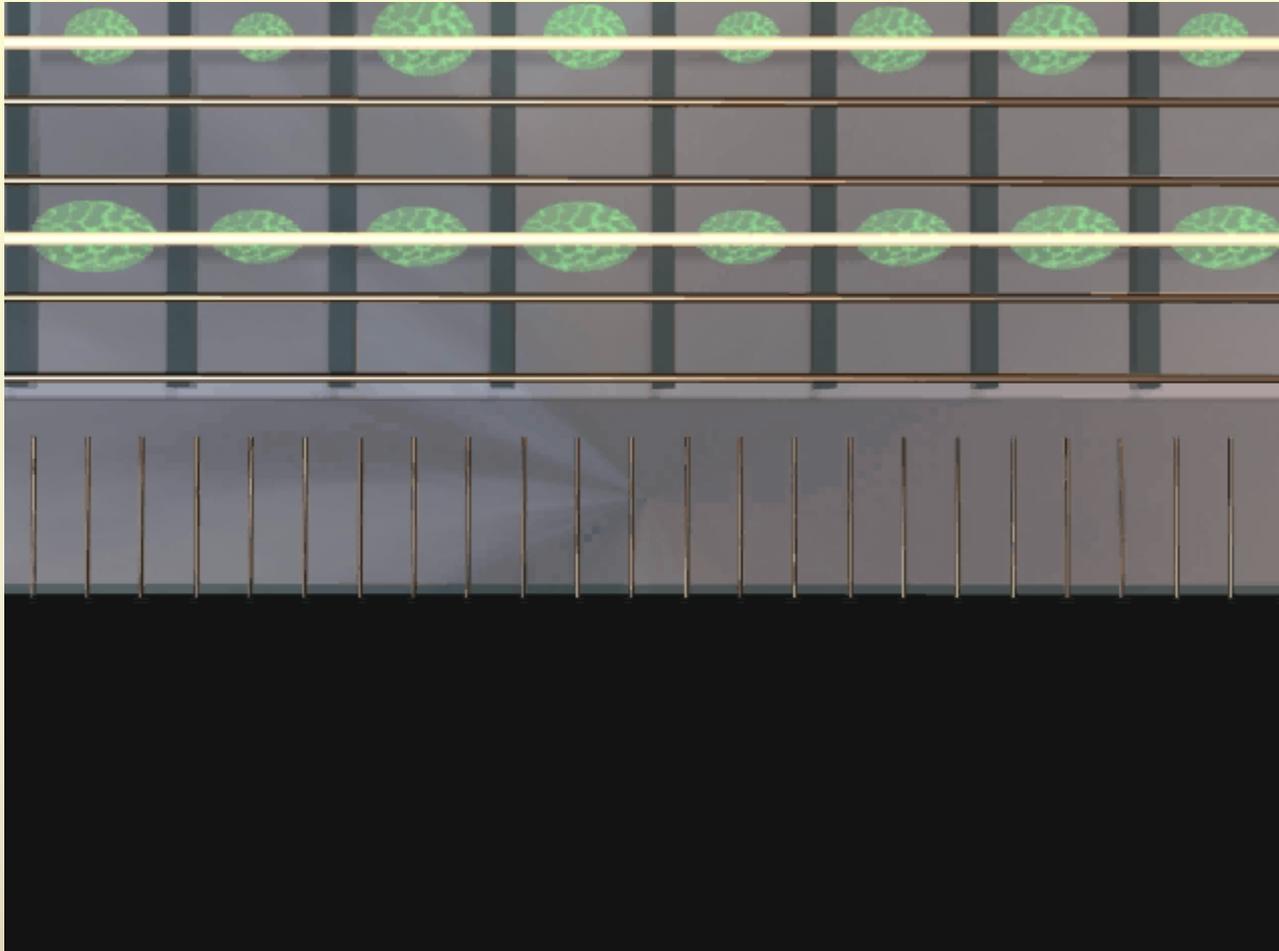
Imagen latente





Registro de salida

Columnas malas



Dispositivo de carga acoplada

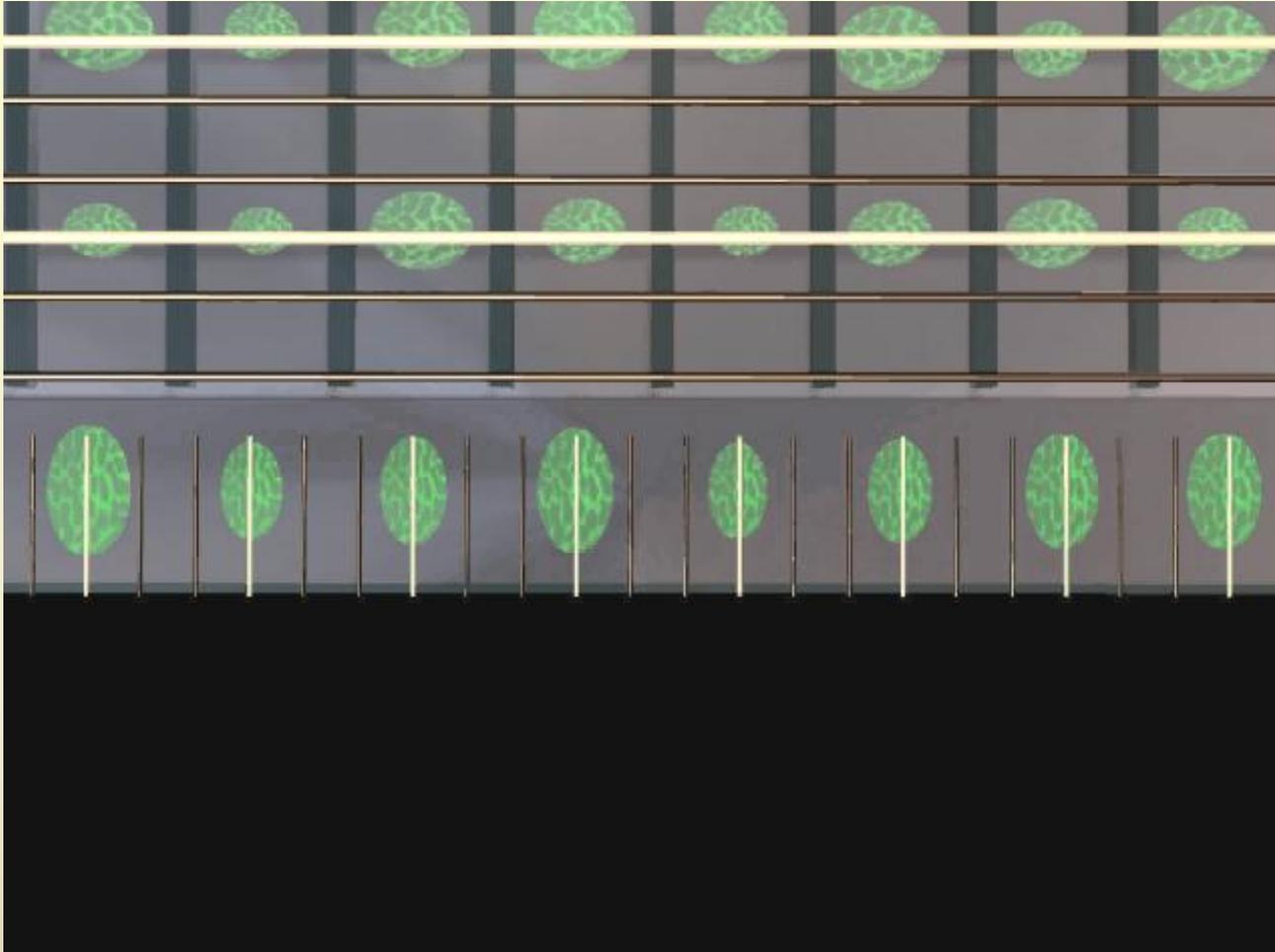
Registro de salida

- Zona sin bandas de dopaje
- Píxeles mayores para evitar saturación

CTE
Eficiencia de Transferencia de carga
0,98
0,99997 (3 e- de 1e5)
Debe ser alta porque hay muchas transferencia
(X*Y)



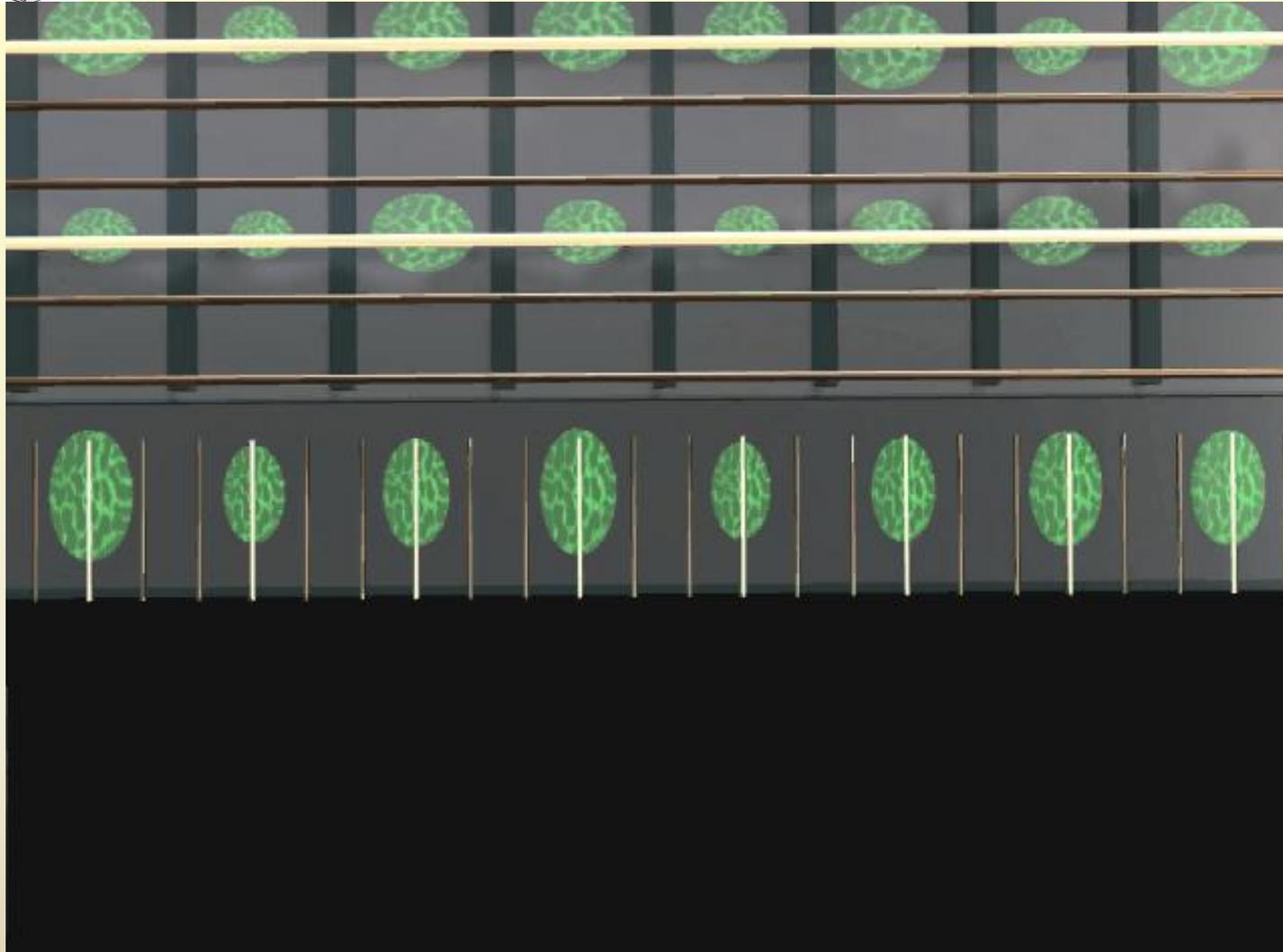
Registro de salida



Registro de salida



Lectura



Registro de lectura
(registro paralelo)

Registro de salida
(registro serie)

Lectura completa en 0,5 – 3 minutos

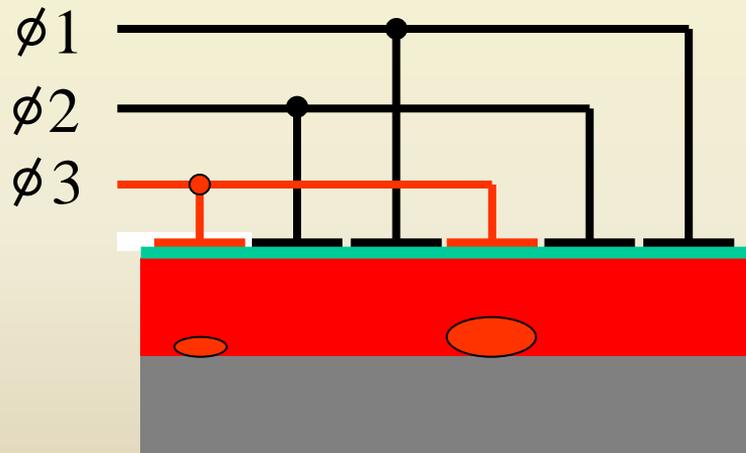
Instrumentación Astronómica
Curso 2011/2012

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



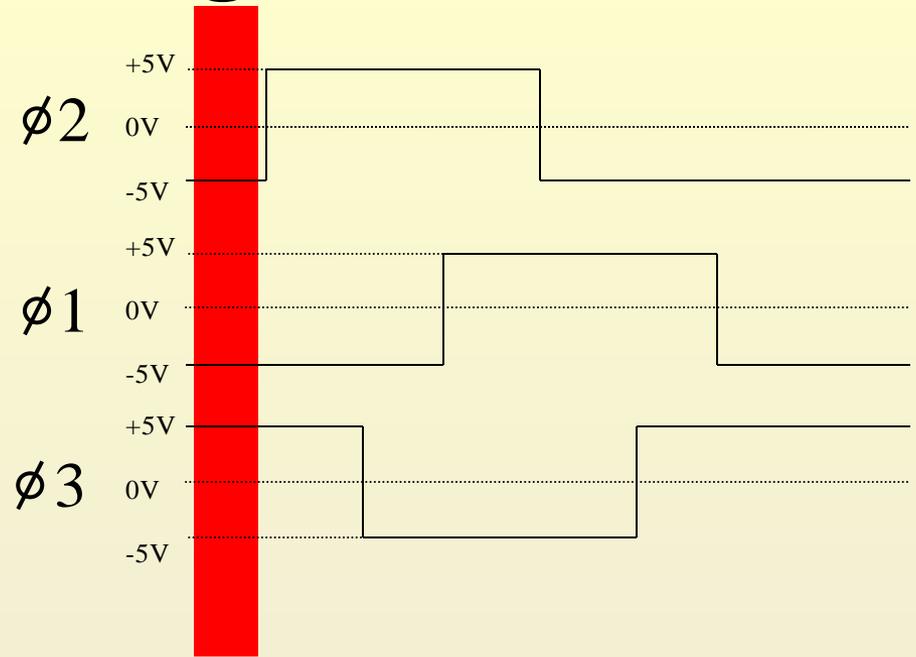
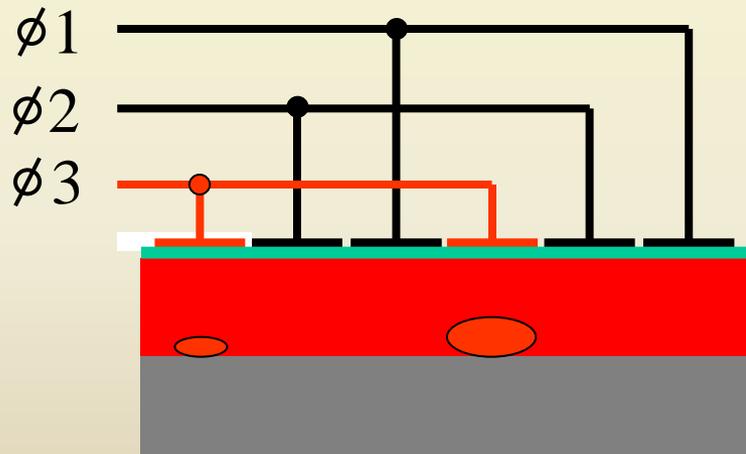
Transferencia de carga en un CCD

La carga se transfiere modulando los voltajes de los electrodos CCD de tres fases:





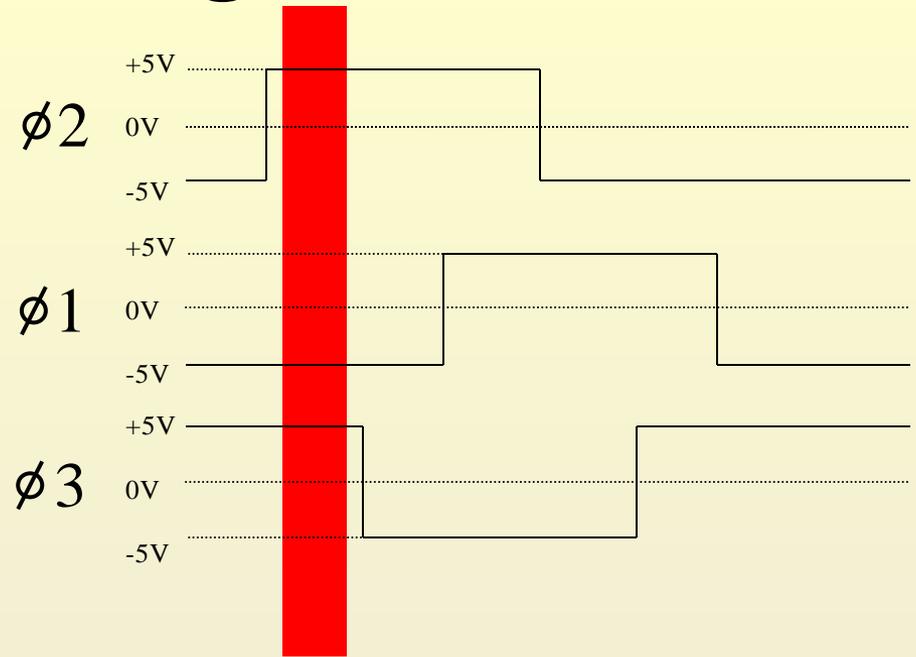
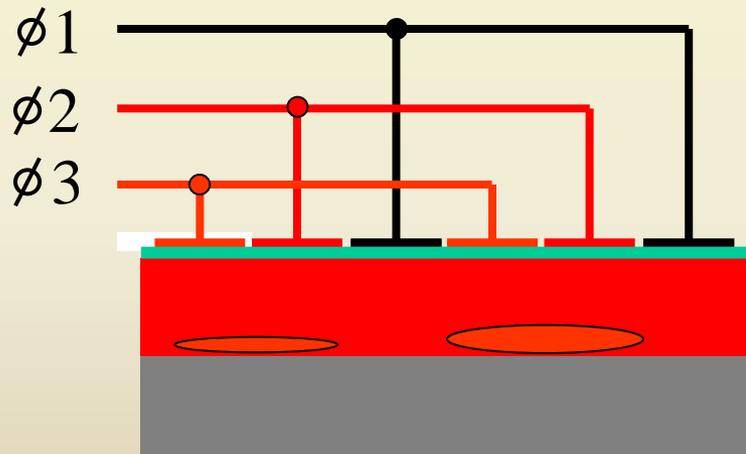
Transferencia de carga en un CCD



Instante de tiempo representado en el diagrama

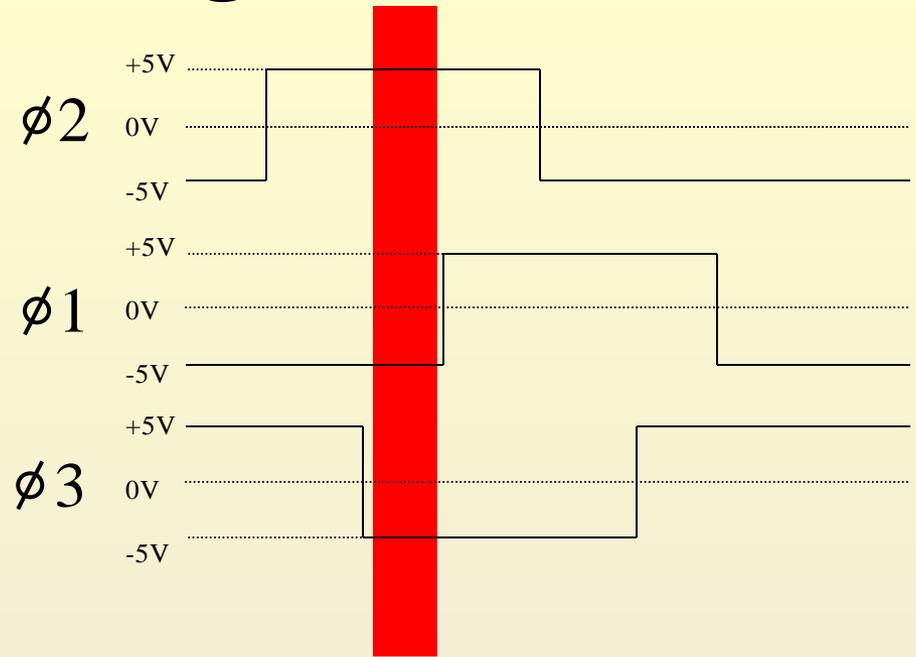
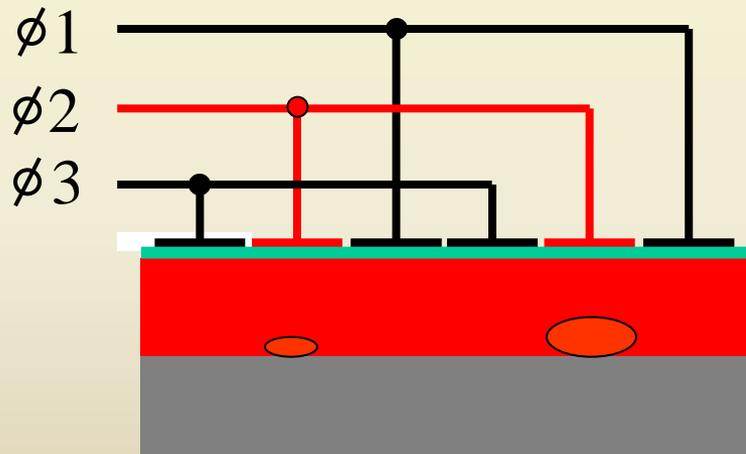


Transferencia de carga en un CCD



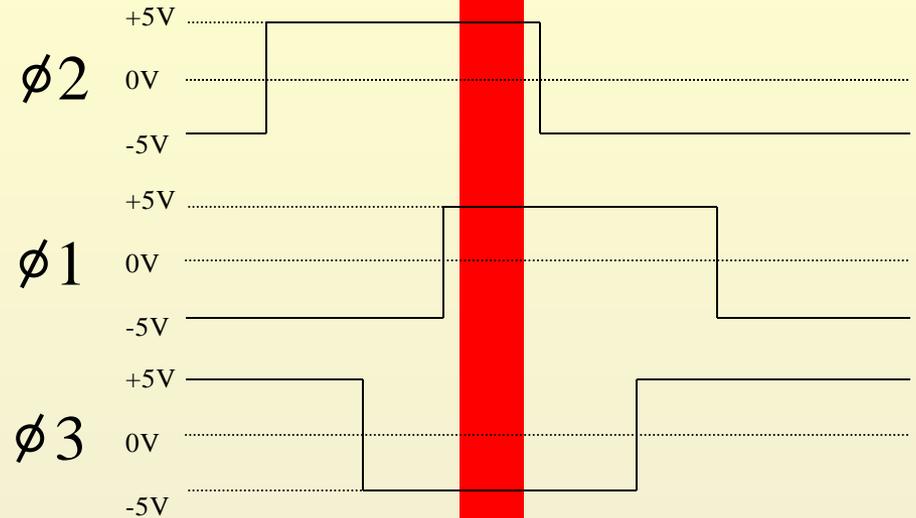
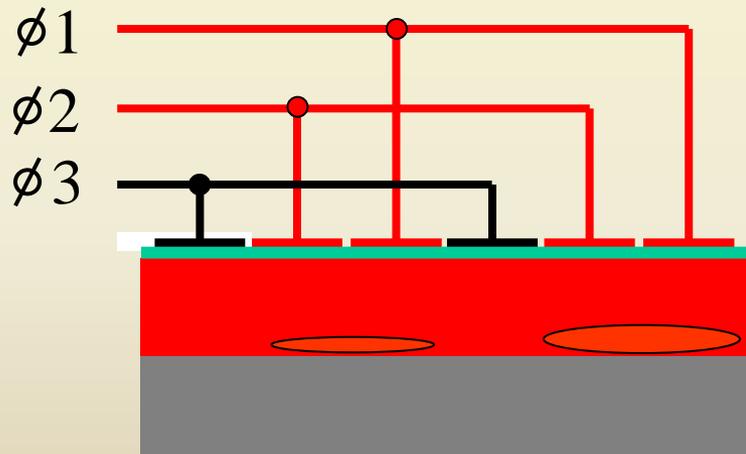


Transferencia de carga en un CCD



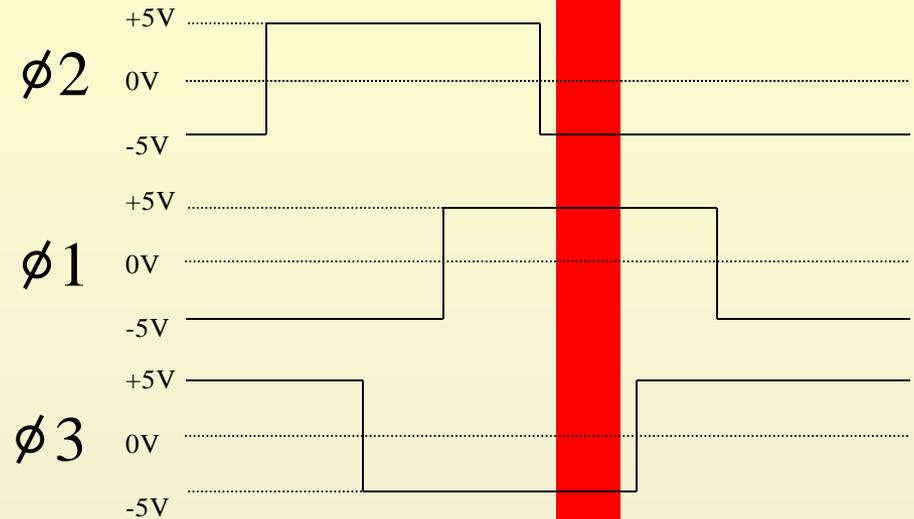
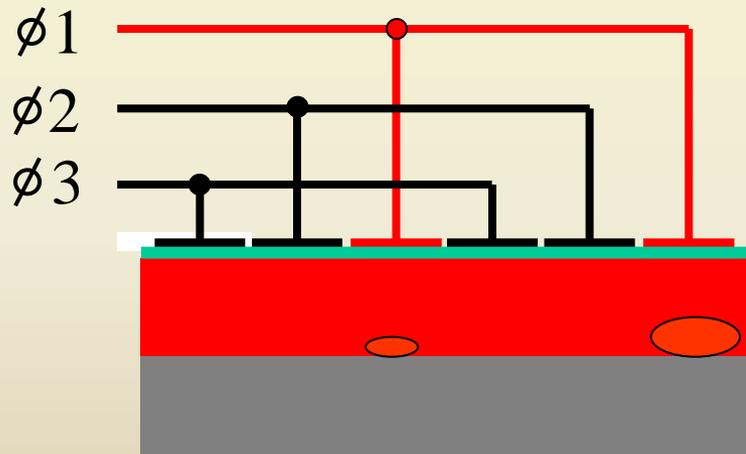


Transferencia de carga en un CCD





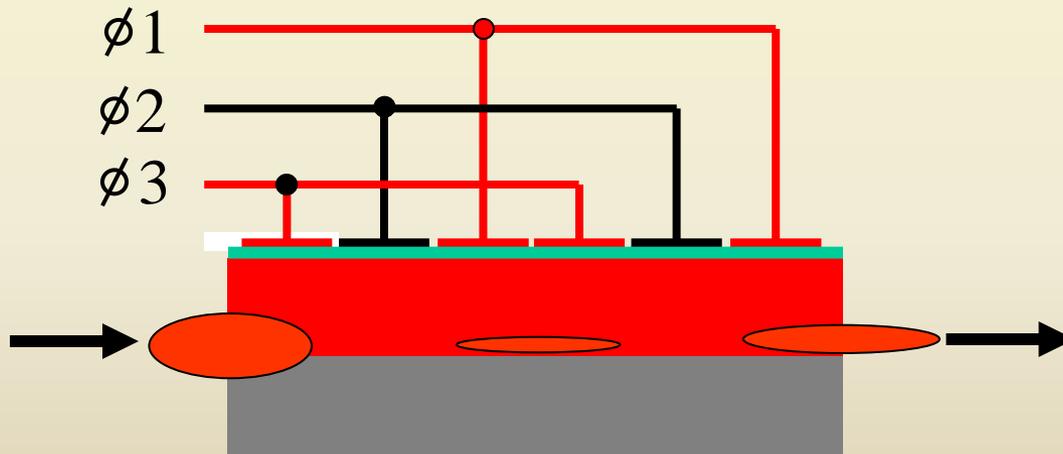
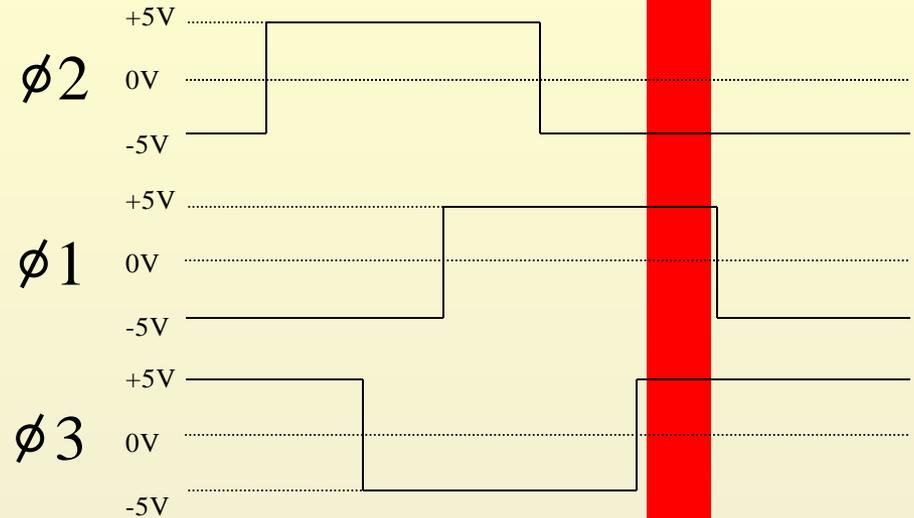
Transferencia de carga en un CCD





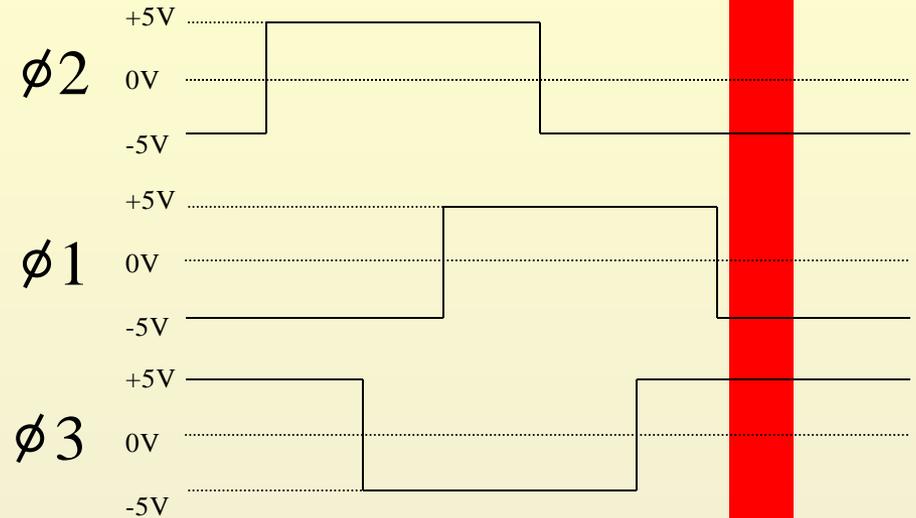
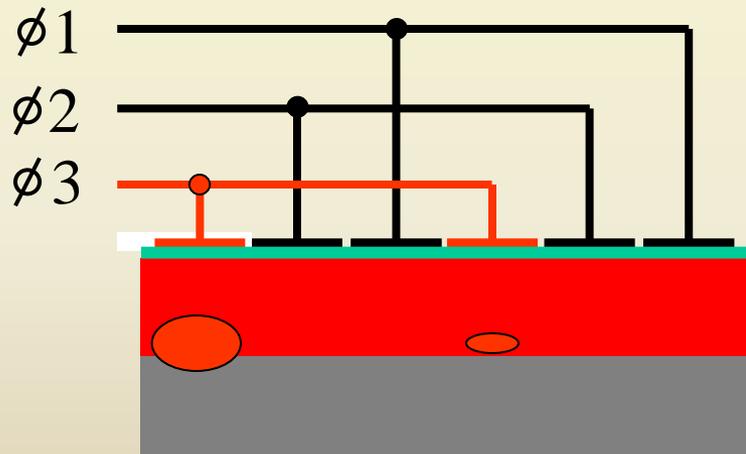
Transferencia de carga en un CCD

El paquete de carga del píxel anterior entra por arriba según el paquete anterior sale por abajo



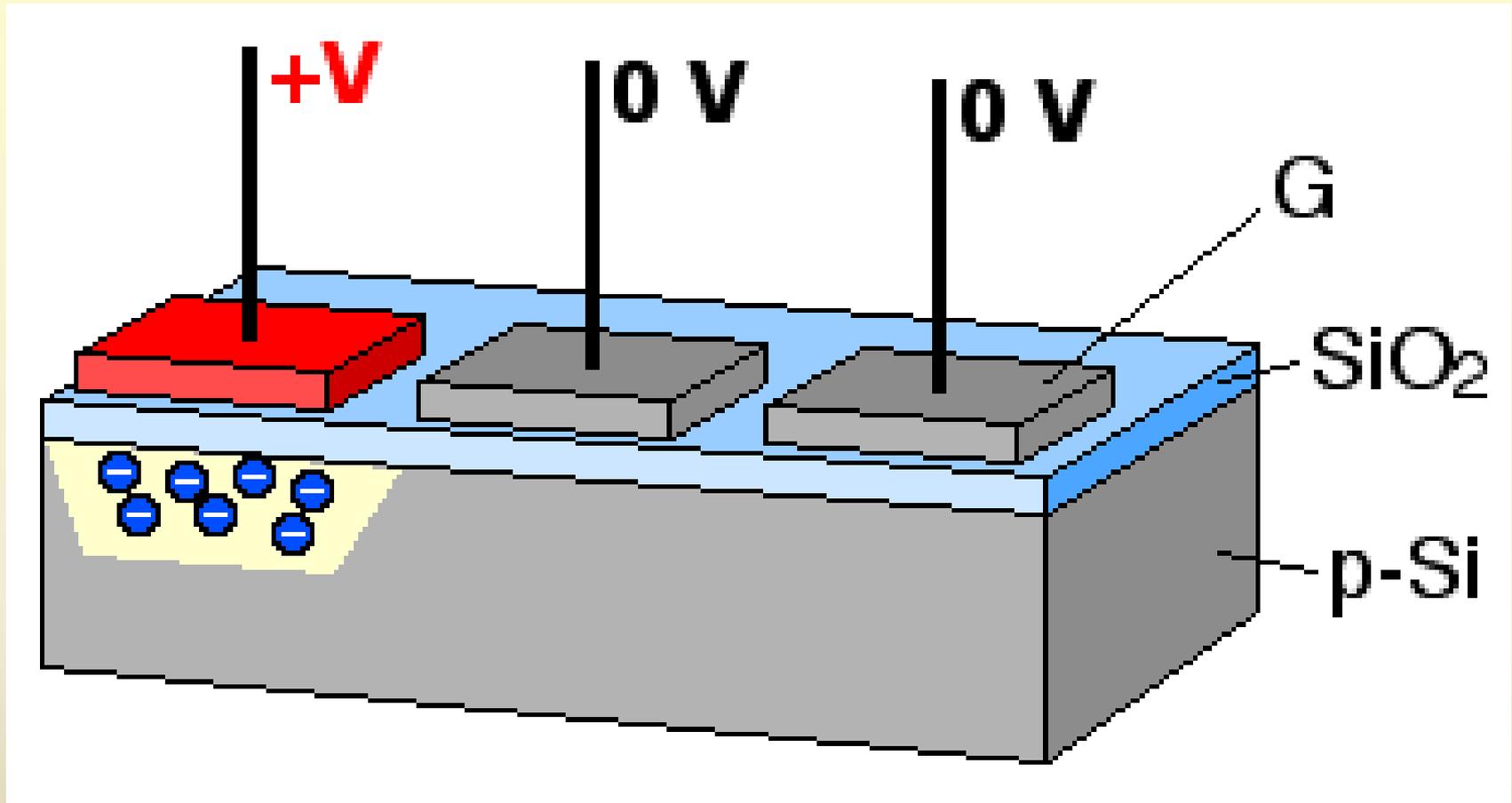


Transferencia de carga en un CCD





Transferencia de carga en un CCD



http://en.wikipedia.org/wiki/File:CCD_charge_transfer_animation.gif



Transferencia de carga en un CCD

Metal Oxide Semiconductor (MOS) Capacitor

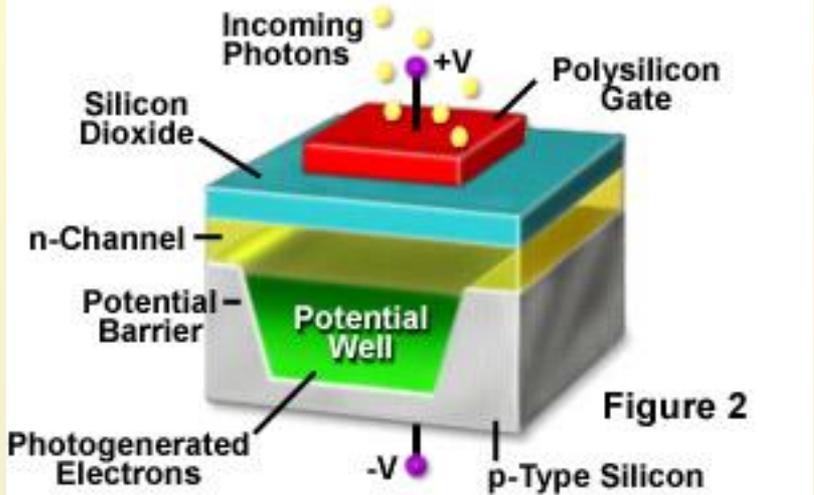


Figure 2

CCD Sense Element (Pixel) Structure

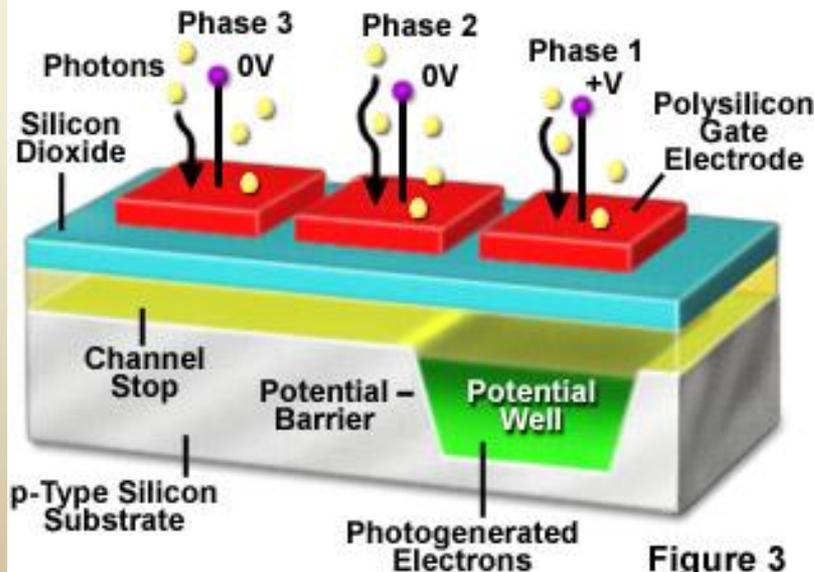


Figure 3

Three Phase CCD Clocking Scheme

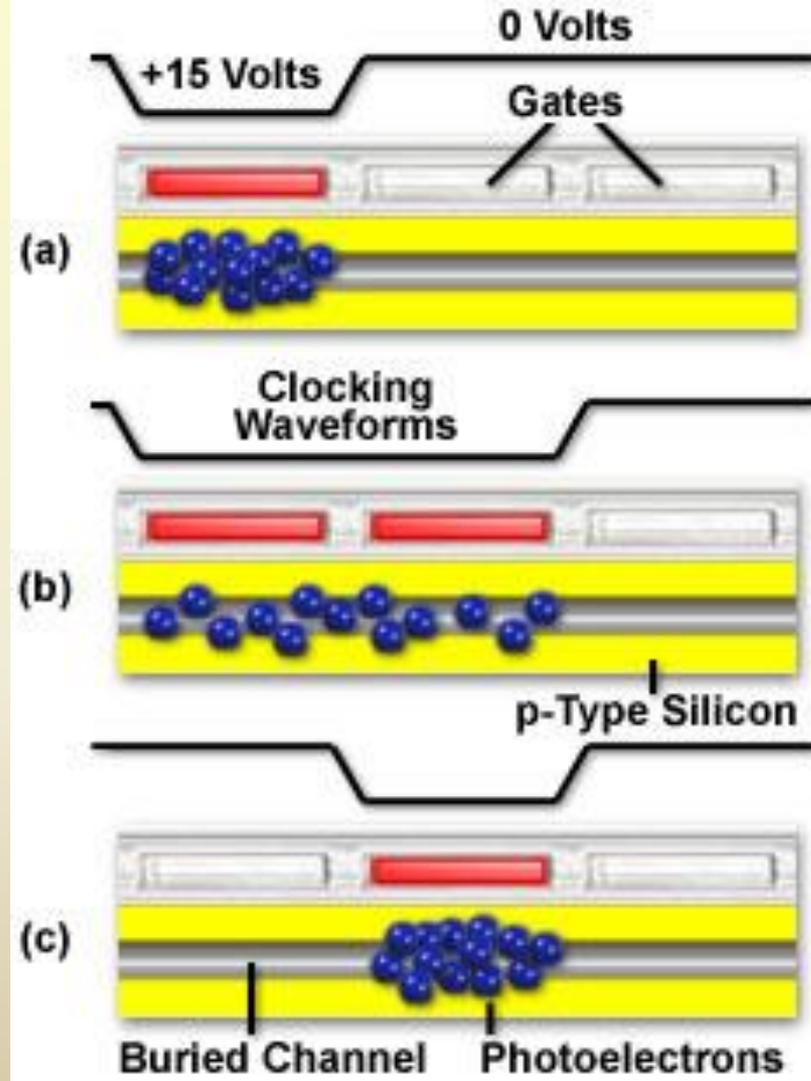
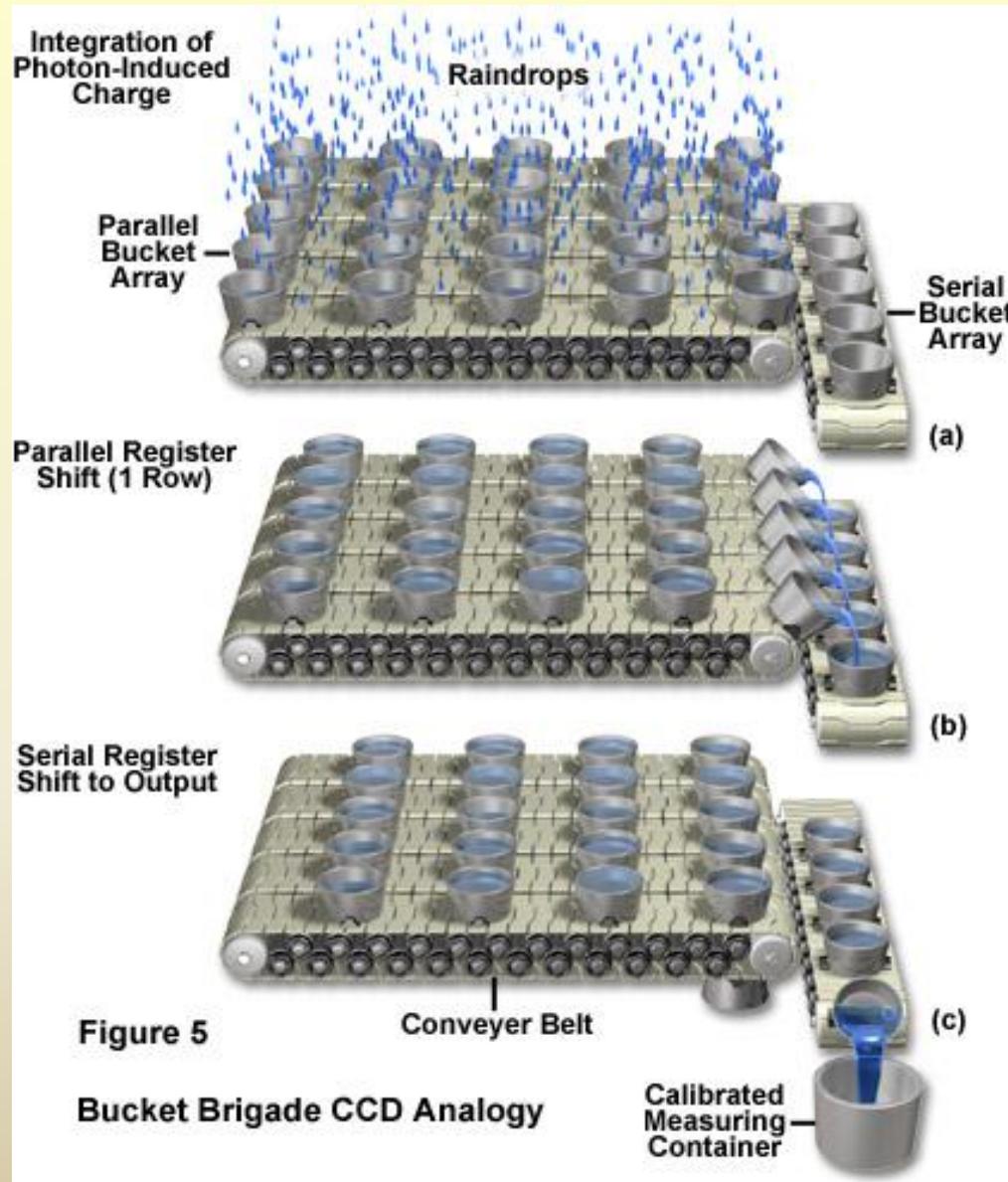


Figure 6

<http://www.microscopyu.com/articles/digitalimaging/ccdintro.html>



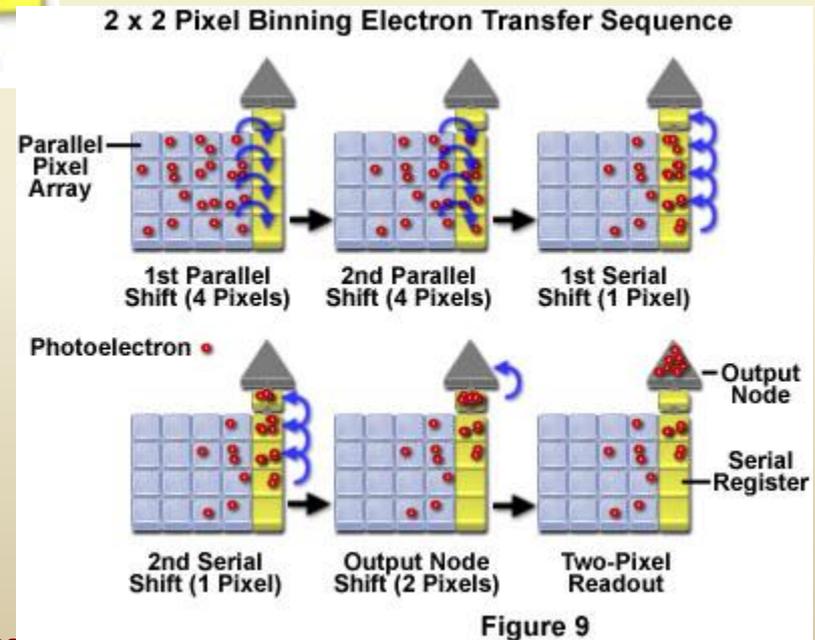
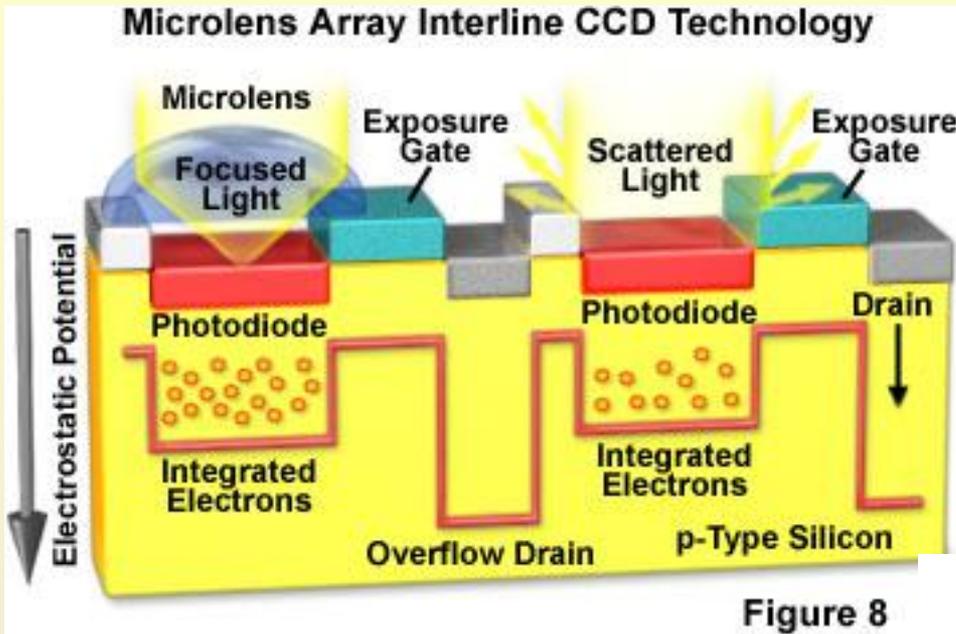
Transferencia de carga en un CCD



<http://www.microscopyu.com/articles/digitalimaging/ccdintro.html>



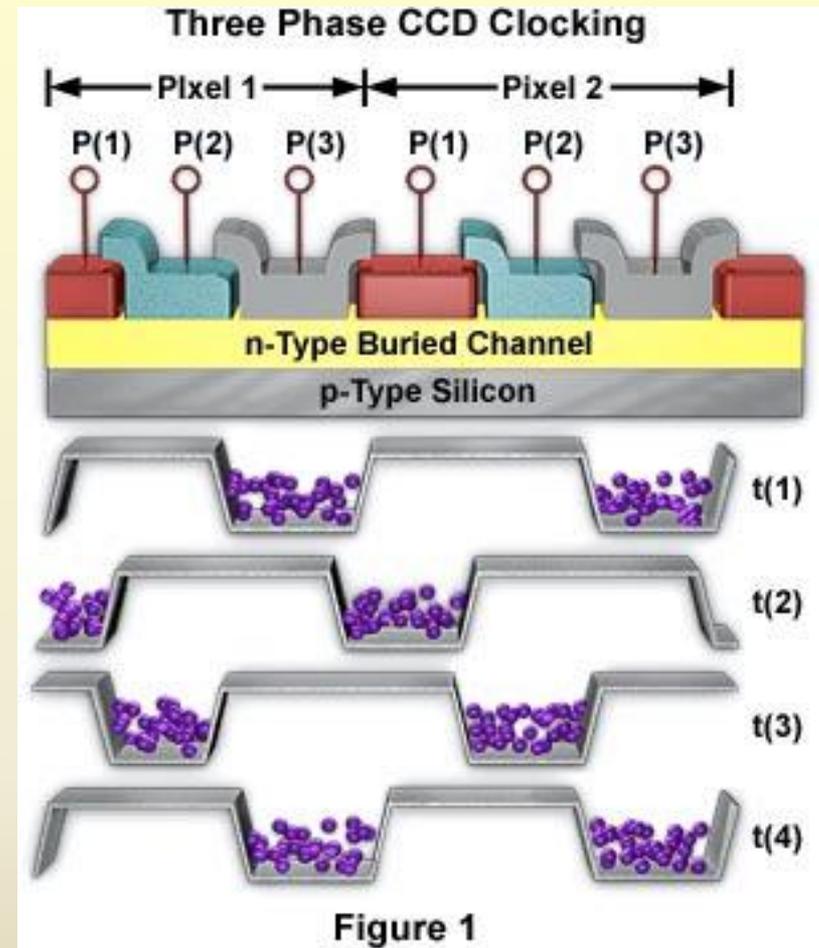
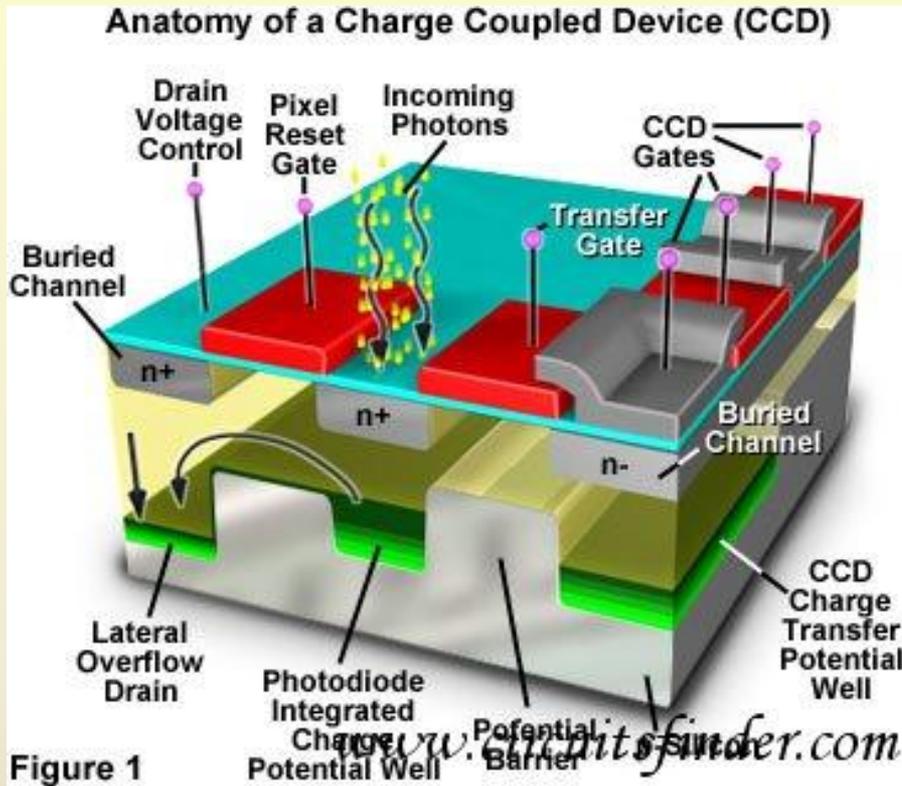
Transferencia de carga en un CCD



<http://www.microscopyu.com/articles/digitalimaging/ccdintro.html>



Transferencia de carga en un CCD



http://www.circuitsfinder.com/basic/Charge_Coupled_Devices__CCD__663.html

<http://learn.hamamatsu.com/articles/threephase.html>

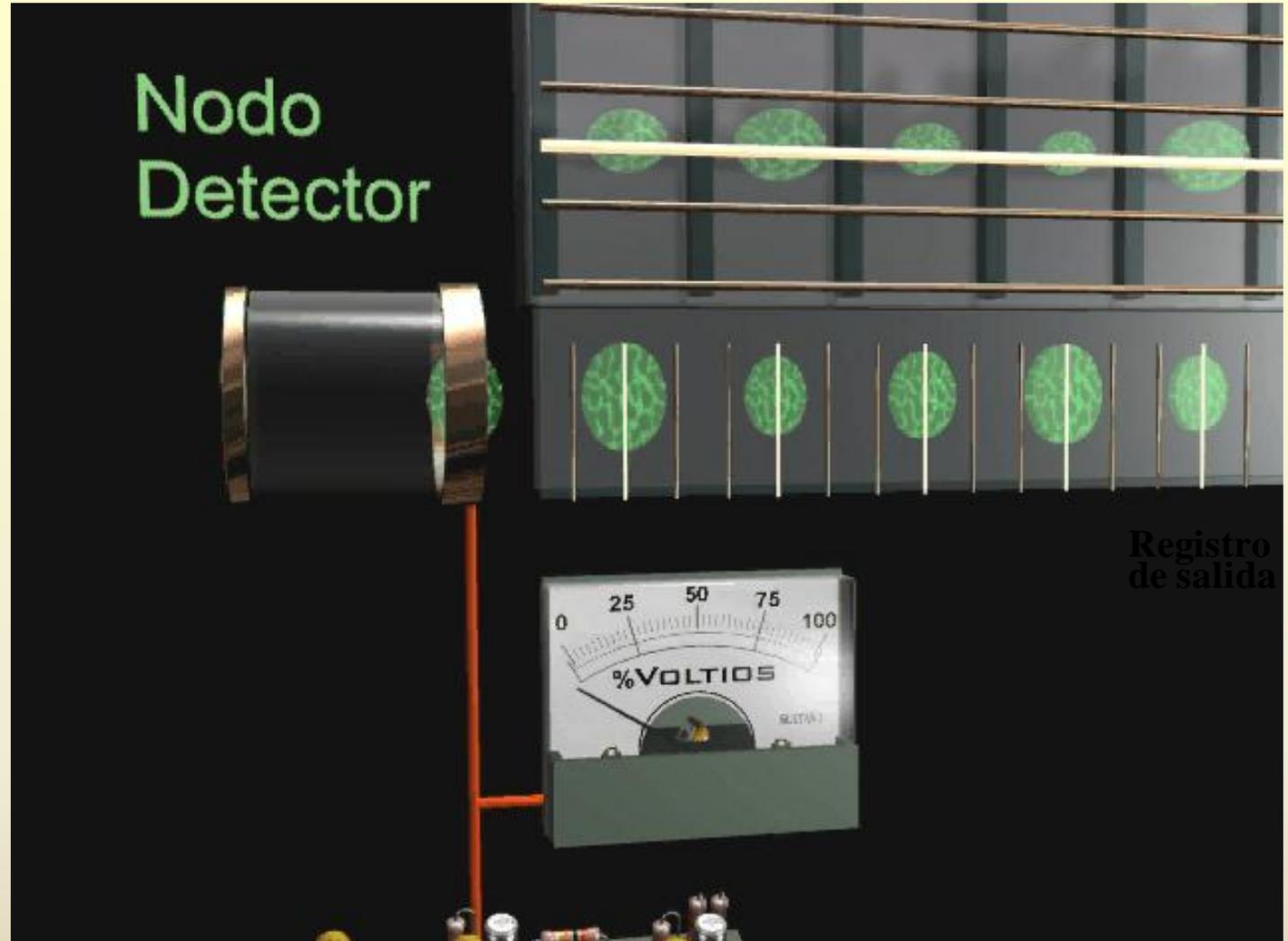


Nodo Detector

Amplificador de salida

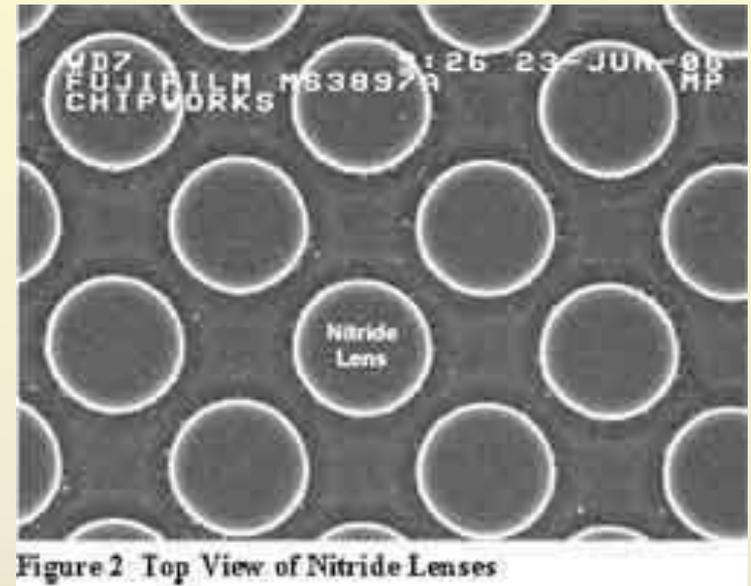
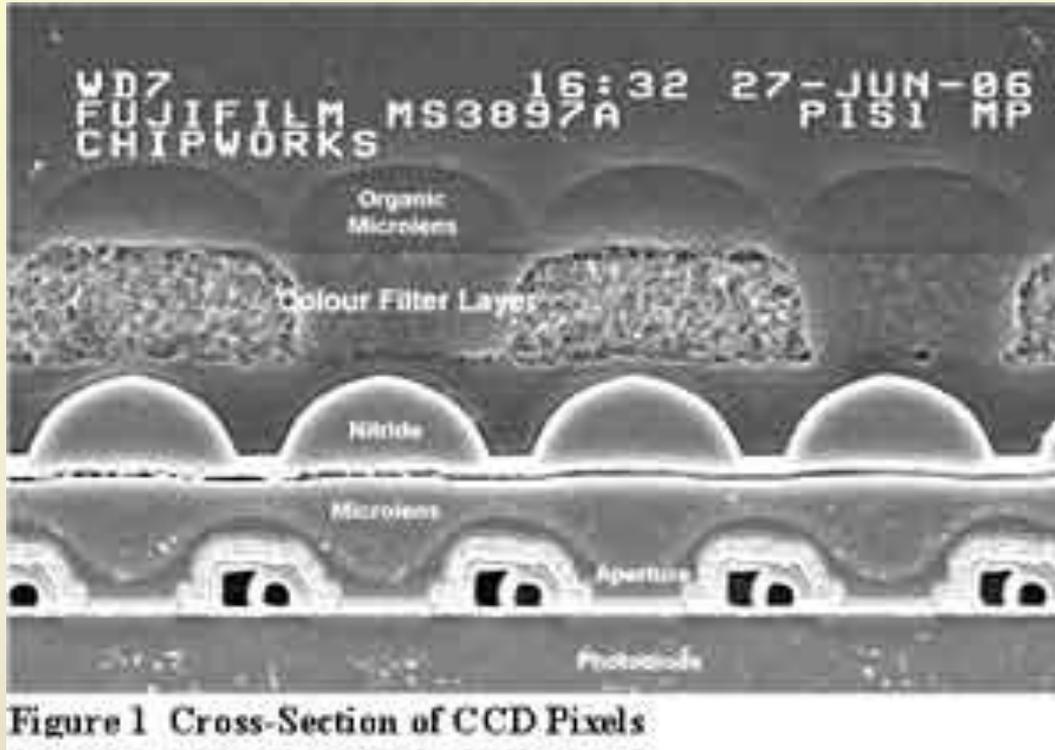
$$V = Q / C$$

- Recarga en cada píxel
- Lectura destructiva





Estructura de un CCD



<http://www.ipfrontline.com/depts/article.aspx?id=18624&deptid=5>



Estructura de un CCD

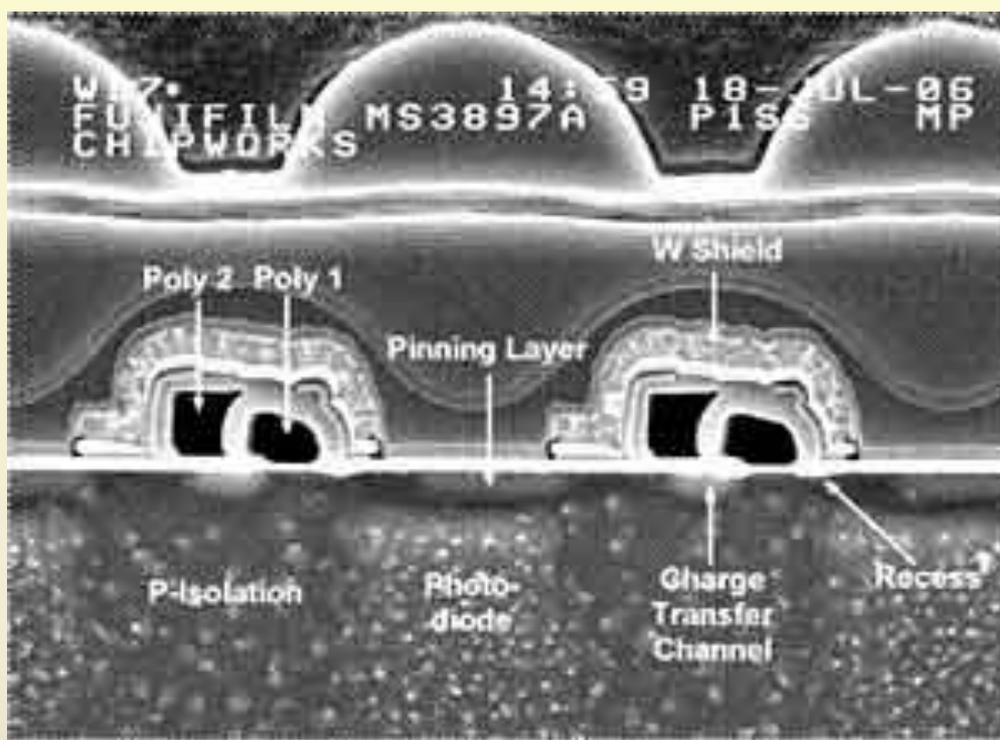


Figure 3 Close-up of Pixel Structure

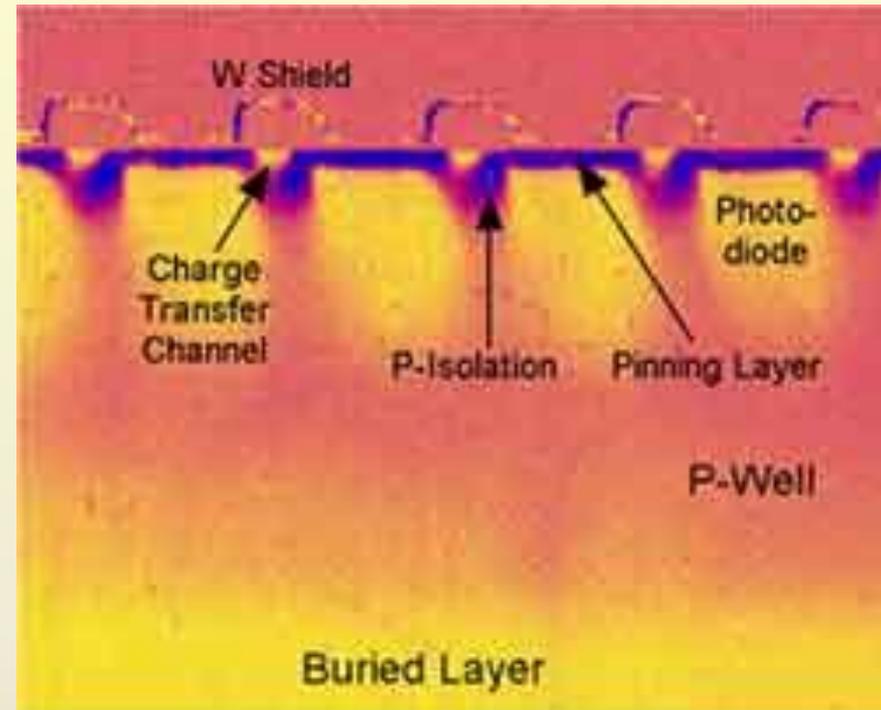
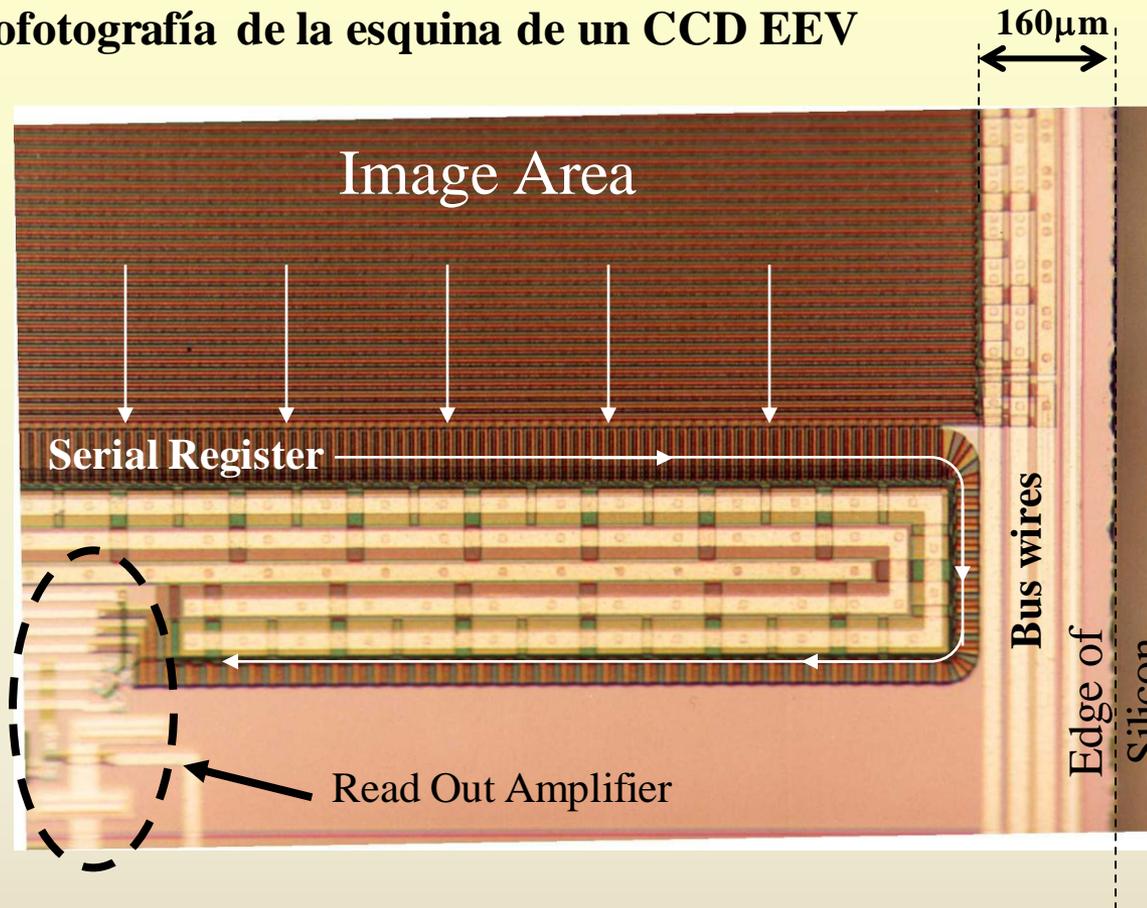


Figure 4 SCM Cross-Section of Pixel Doping

<http://www.ipfrontline.com/depts/article.aspx?id=18624&deptid=5>



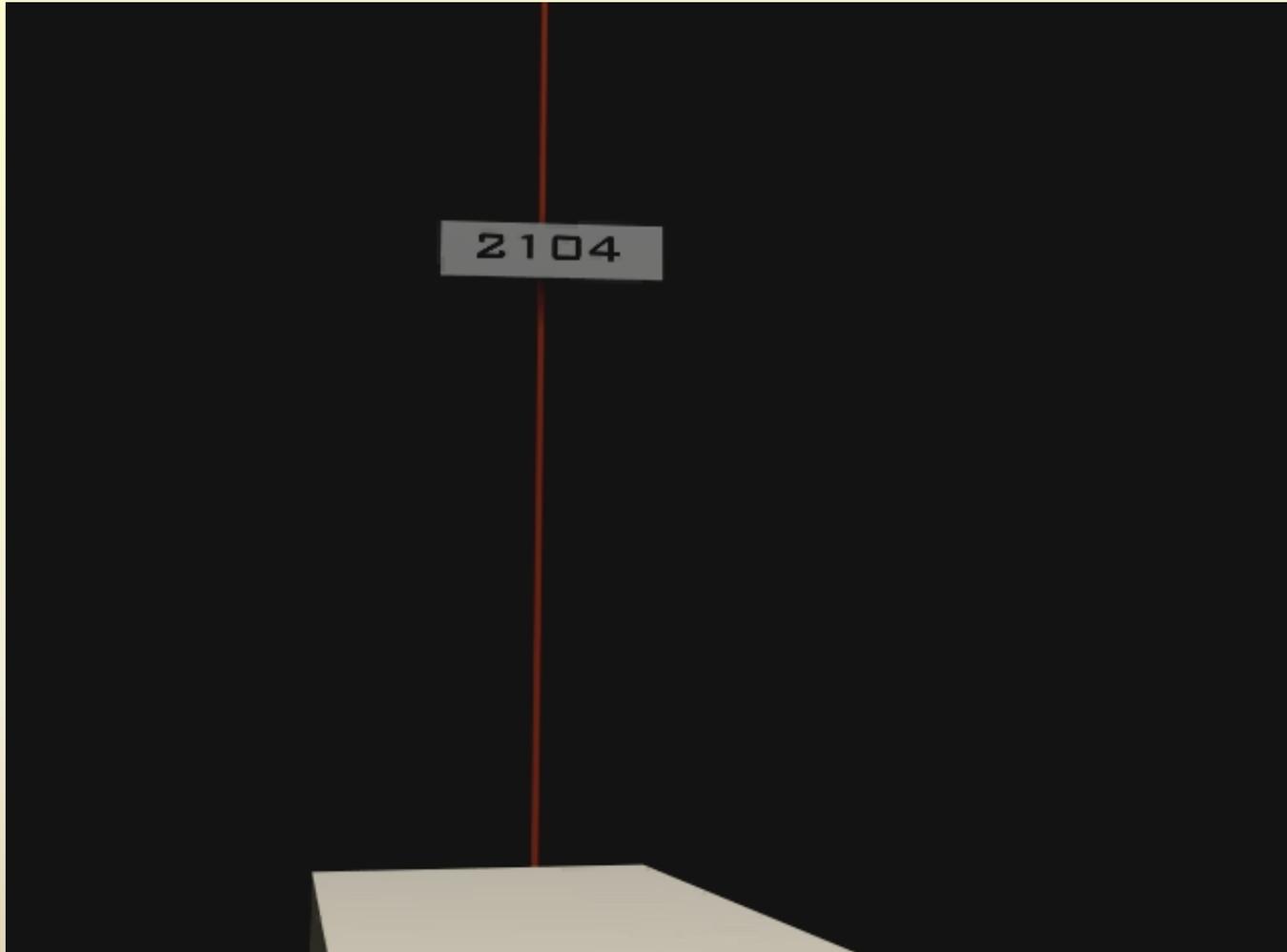
Microfotografía de la esquina de un CCD EEV



El registro serie es doblado para alejar el amplificador del borde del chip.



Adquisición





Instrumentación Astronómica
Curso 2011/2012

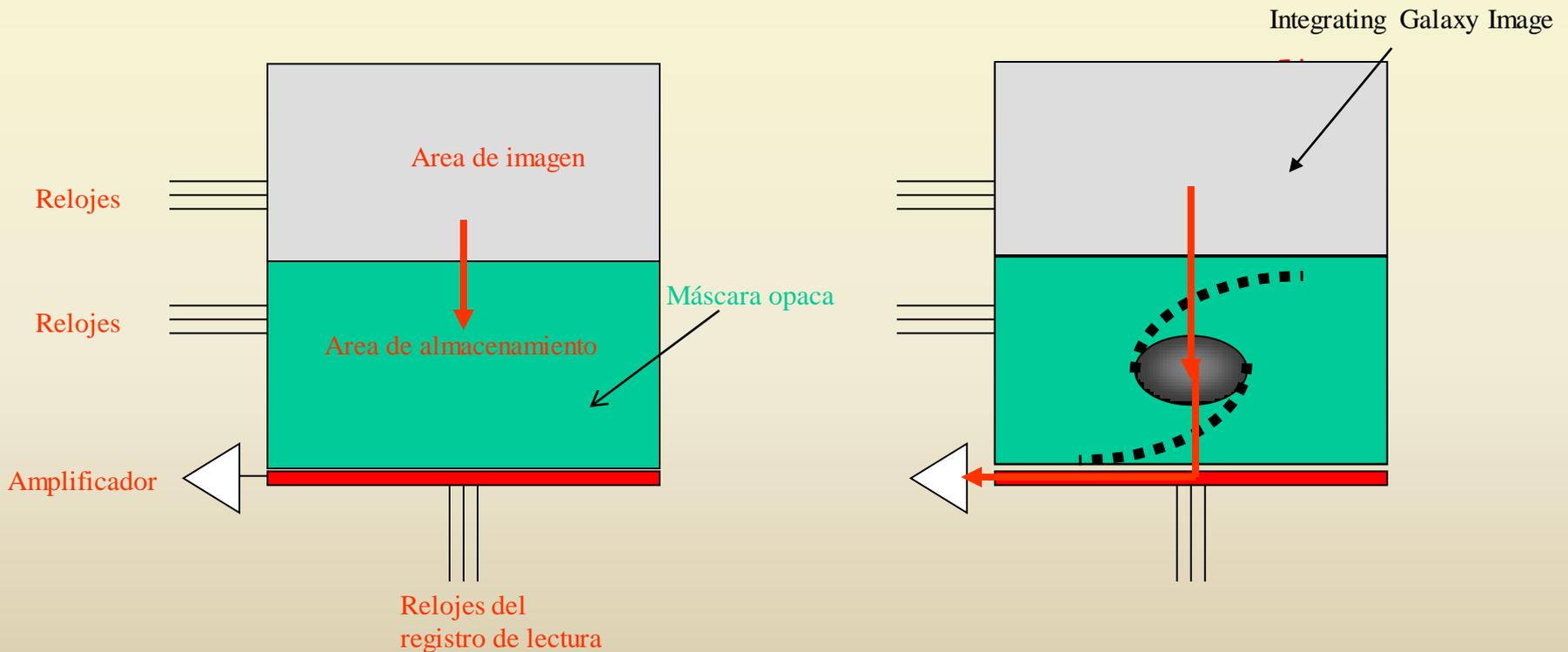
(material compilado por J. Zamorano, J. Gallego, P.G. Pérez-González)



Diseños de CCD

CCDs con imagen de transferencia (frame transfer)
(charge chaffling)

Zona enmascarada para almacenar imagen





Diseños alternativos de CCD

CCDs con canales en superficie
con canales integrados

(surface channel, CTE~98%)

(buried channel, CTE~99,999%)

CCDs interlineados

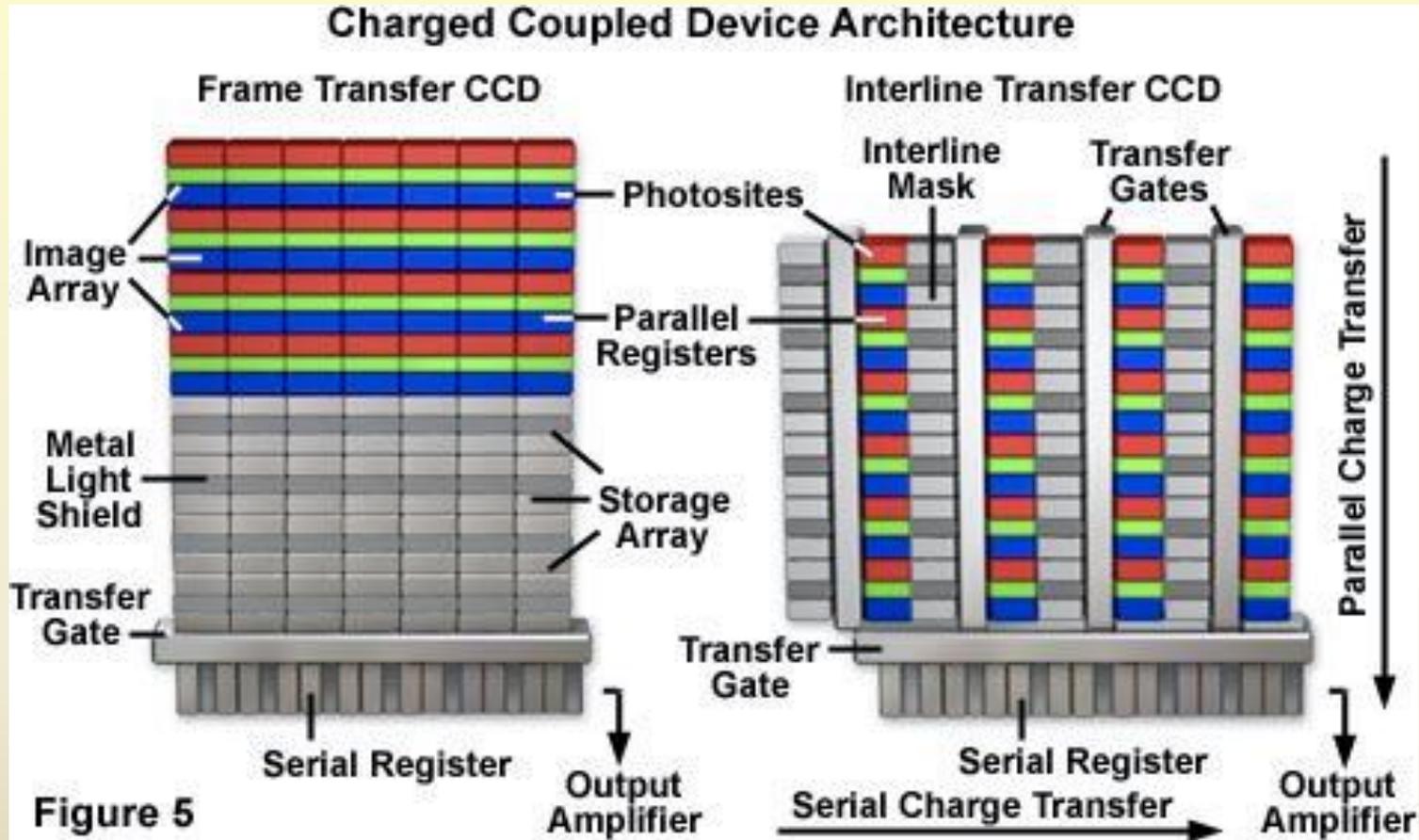
(interline transfer)

Usados en cámaras de vídeo

Líneas enmascaradas para lectura rápida



Tipos de lectura de un CCD



<http://www.olympusmicro.com/primer/digitalimaging/digitalimagingdetectors.html>



CCD gruesos iluminados de frente

CCDs grueso iluminado de frente (Front illuminated)

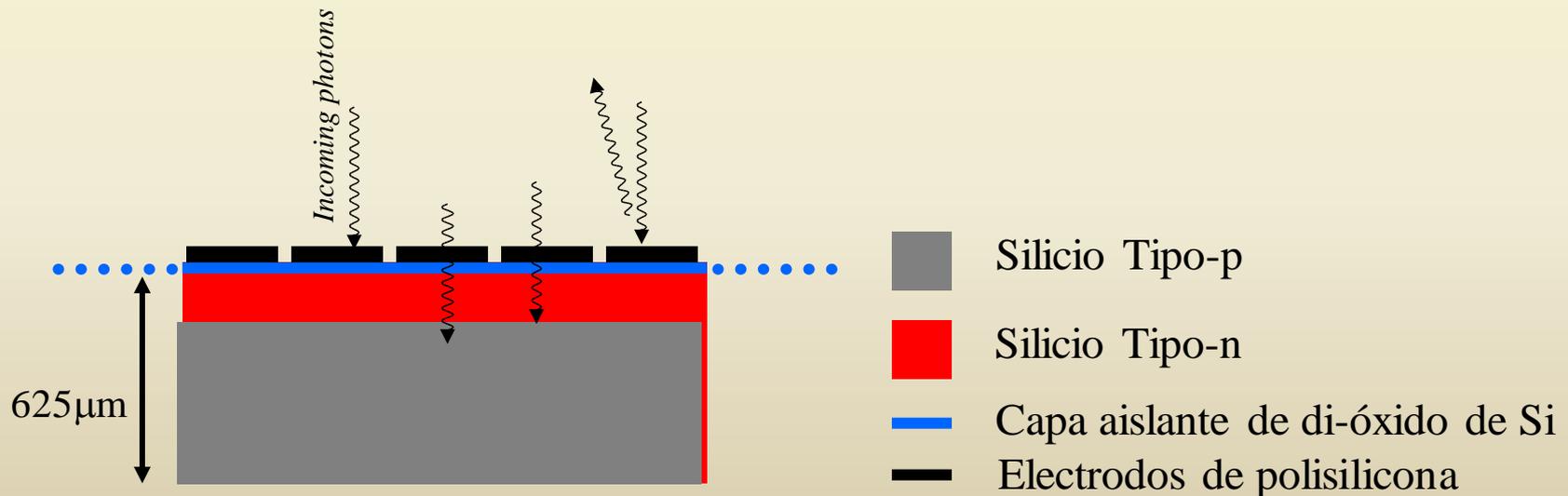
Baratos de fabricar

La luz atraviesa los electrodos

Baja QE en general

absorción y reflexión en los electrodos supone $QE \ll 1$ en el azul

Sin recubrimiento AR pues los electrodos no lo permiten





CCD delgados retroiluminados

Muy caros de fabricar

La luz ilumina el chip directamente

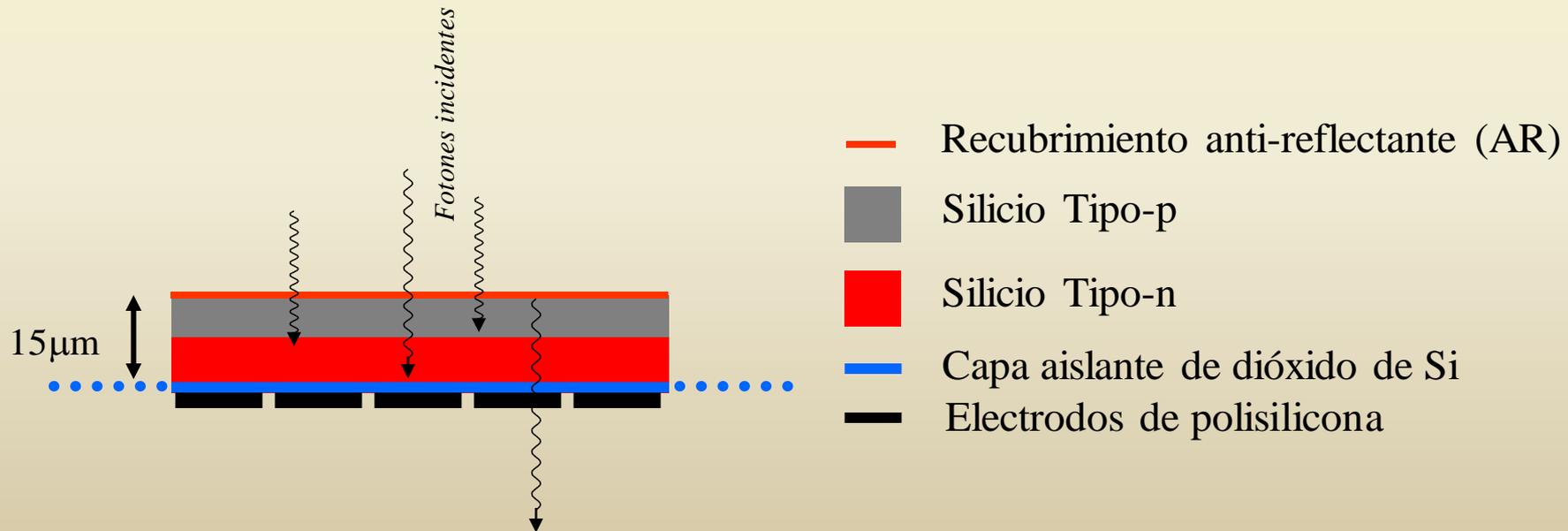
Muy alta QE

Chip delgado $\sim 15\mu\text{m}$ (difícil de fabricar)

Sensibilidad en el UV y azul (Si demasiado fino, no sensible en el rojo)

Fragilidad mecánica

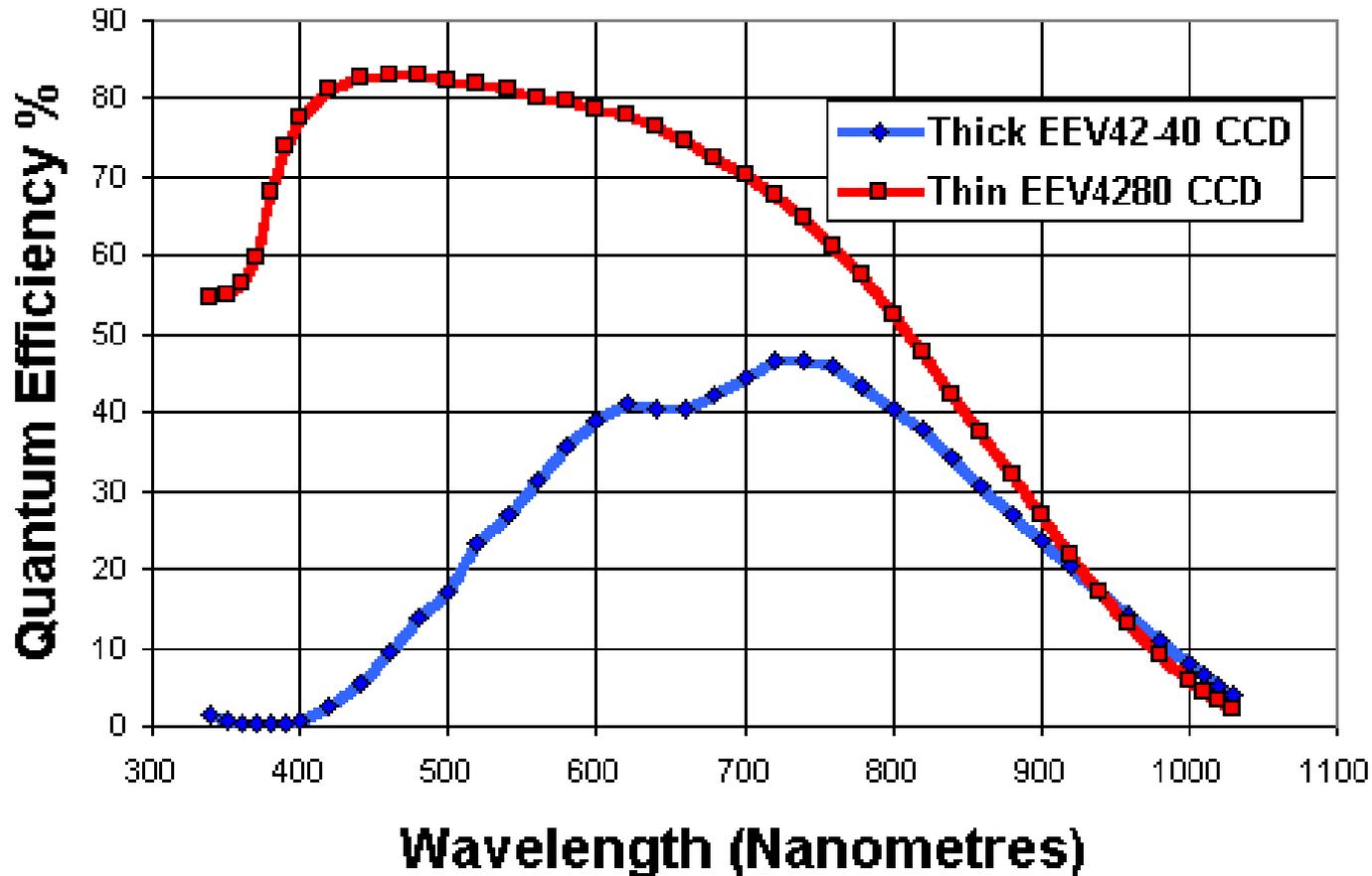
Fringing





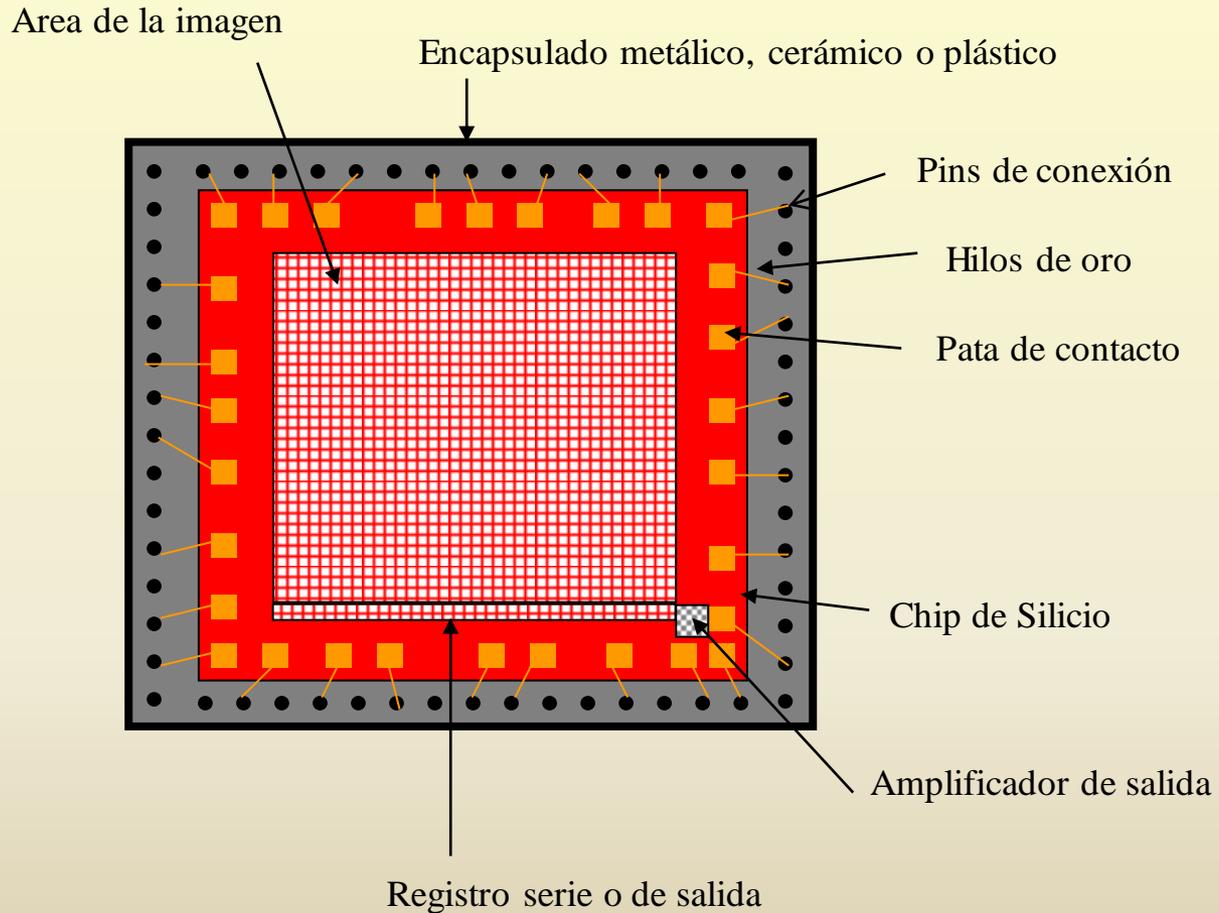
CCDs Delgados vs. Gruesos

Quantum Efficiency Improvements from Thinning





Encapsulado de los CCDs

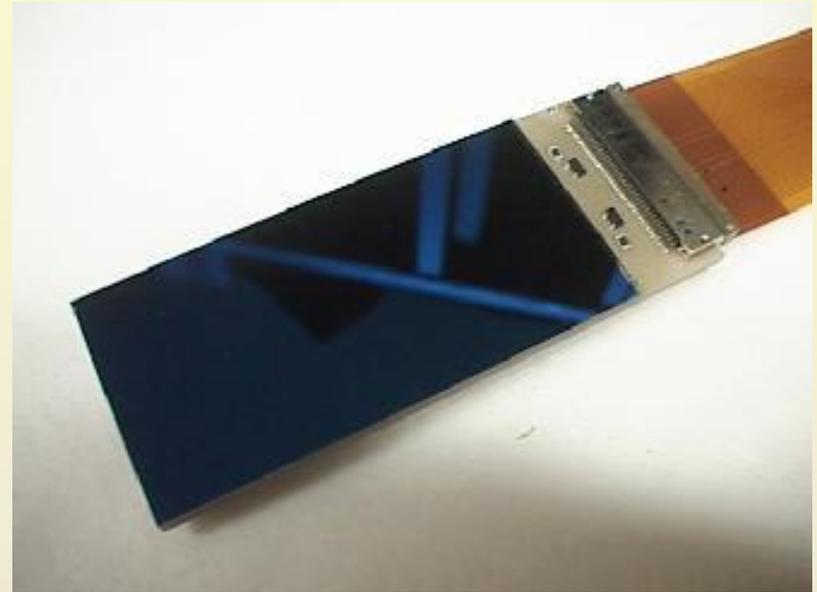




Encapsulado de los CCDs



CCD grueso Kodak Kaf-1401



CCD delgado MIT/LL CC1D20



Criostatos

Mounting clamp

Pre-amplifier

Pressure Vessel

Vacuum pump port

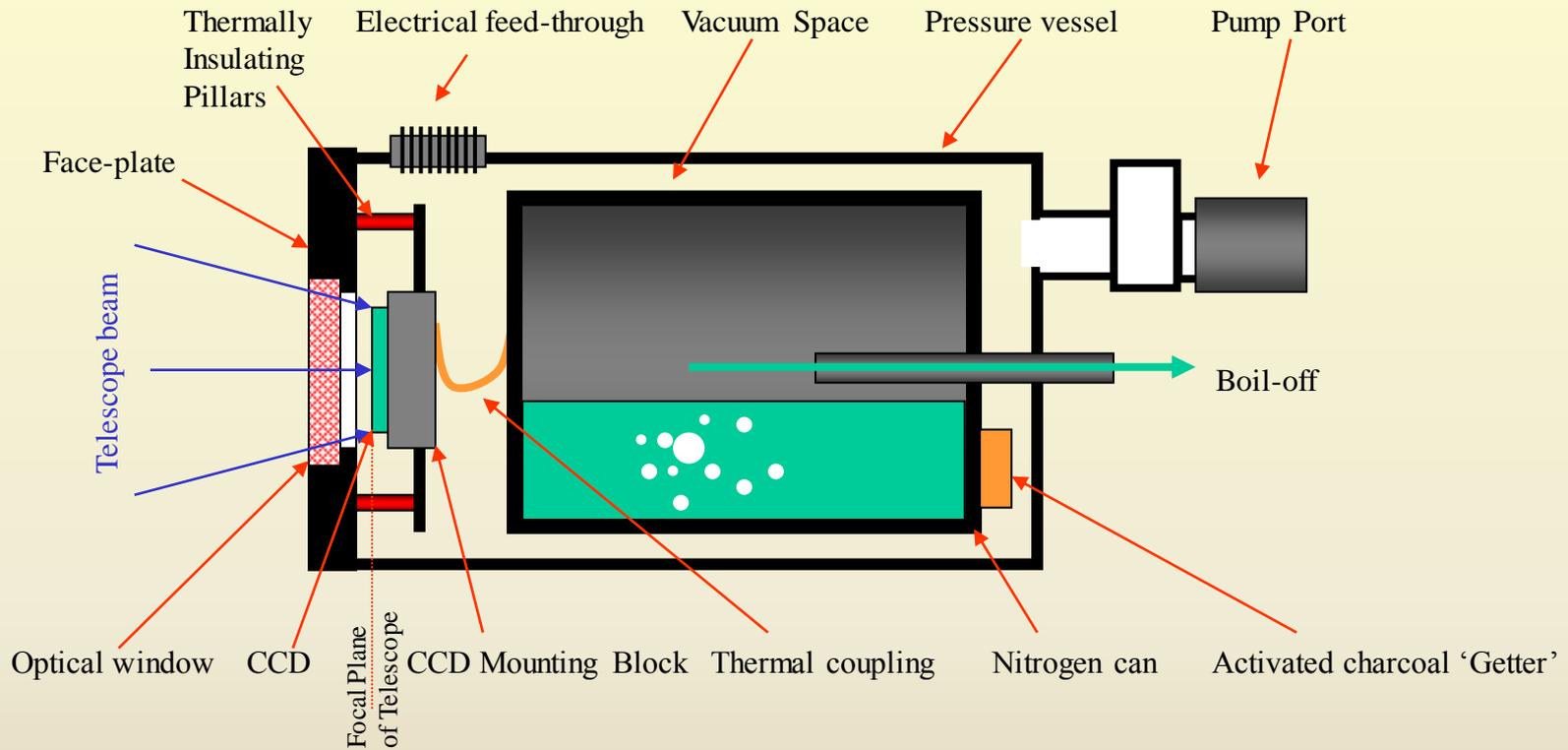


Camera mounting
Face-plate.

Liquid Nitrogen
fill port



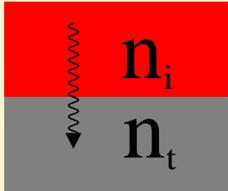
Criostatos





Recubrimiento antirreflejante

Cambio de propagación con discontinuidad en índice de refracción supone una fracción de fotones reflejados.



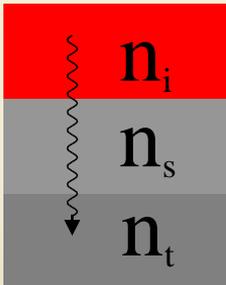
Fracción de fotones reflejados en la Superficie entre dos medios de índices de refracción diferentes

$$= \left[\frac{n_t - n_i}{n_t + n_i} \right]^2$$

Aire	$n_i=1,0$
Vidrio	$n=1,46$
Si	$n=3,6$

Aire – vidrio 3,5%

Aire – Si 32%



Aire

AR Coating

Silicio

Fracción de fotones reflejados

$$= \left[\frac{n_t \times n_i - n_s^2}{n_t \times n_i + n_s^2} \right]^2$$

$$n_s^2 = n_t$$

Fracción de fotones reflejados

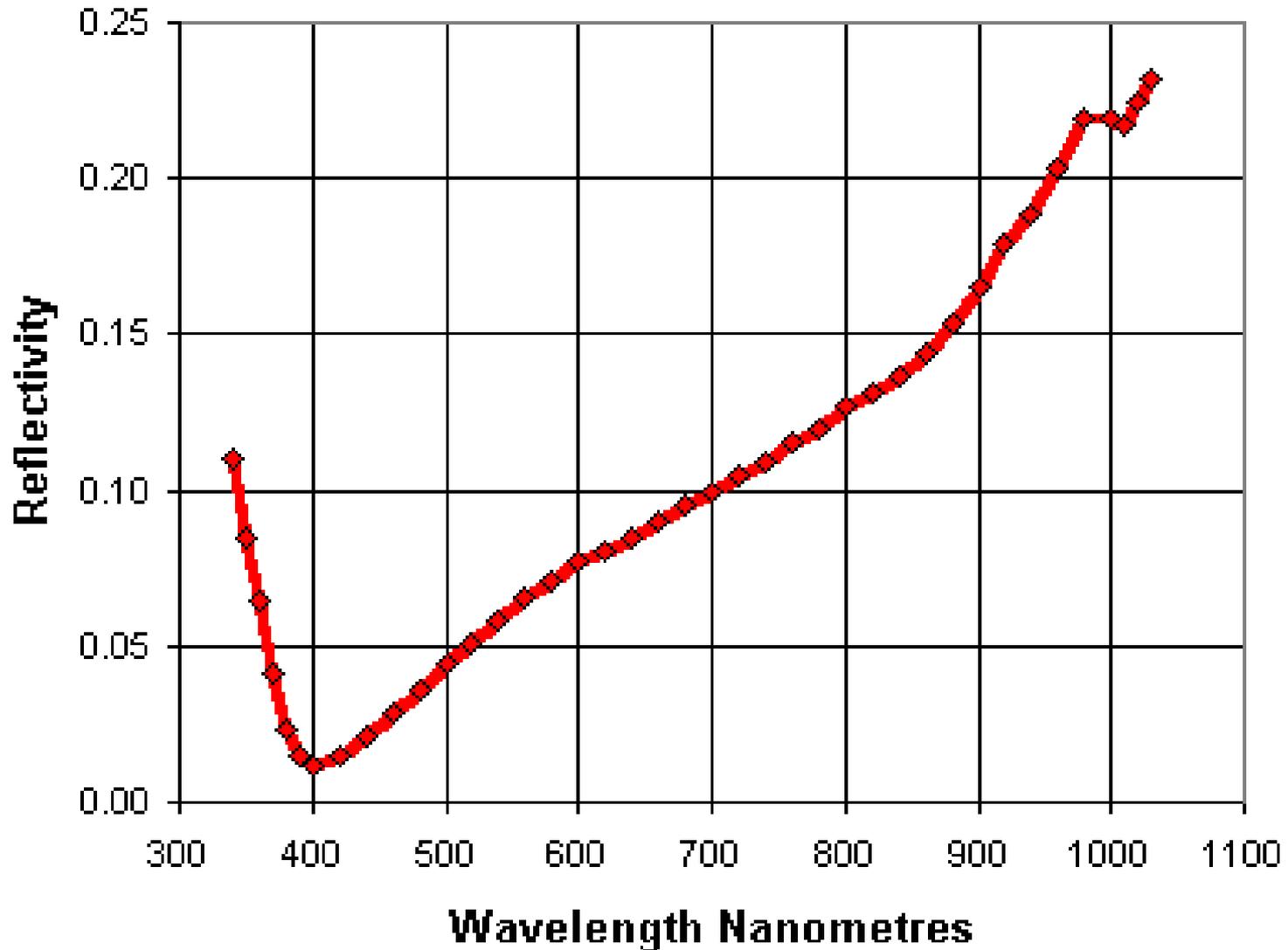
$$= 0$$

$$n_s=1,9$$

Dióxido de Hafnio



Recubrimiento antireflectante



La capa AR se optimiza para una cierta λ

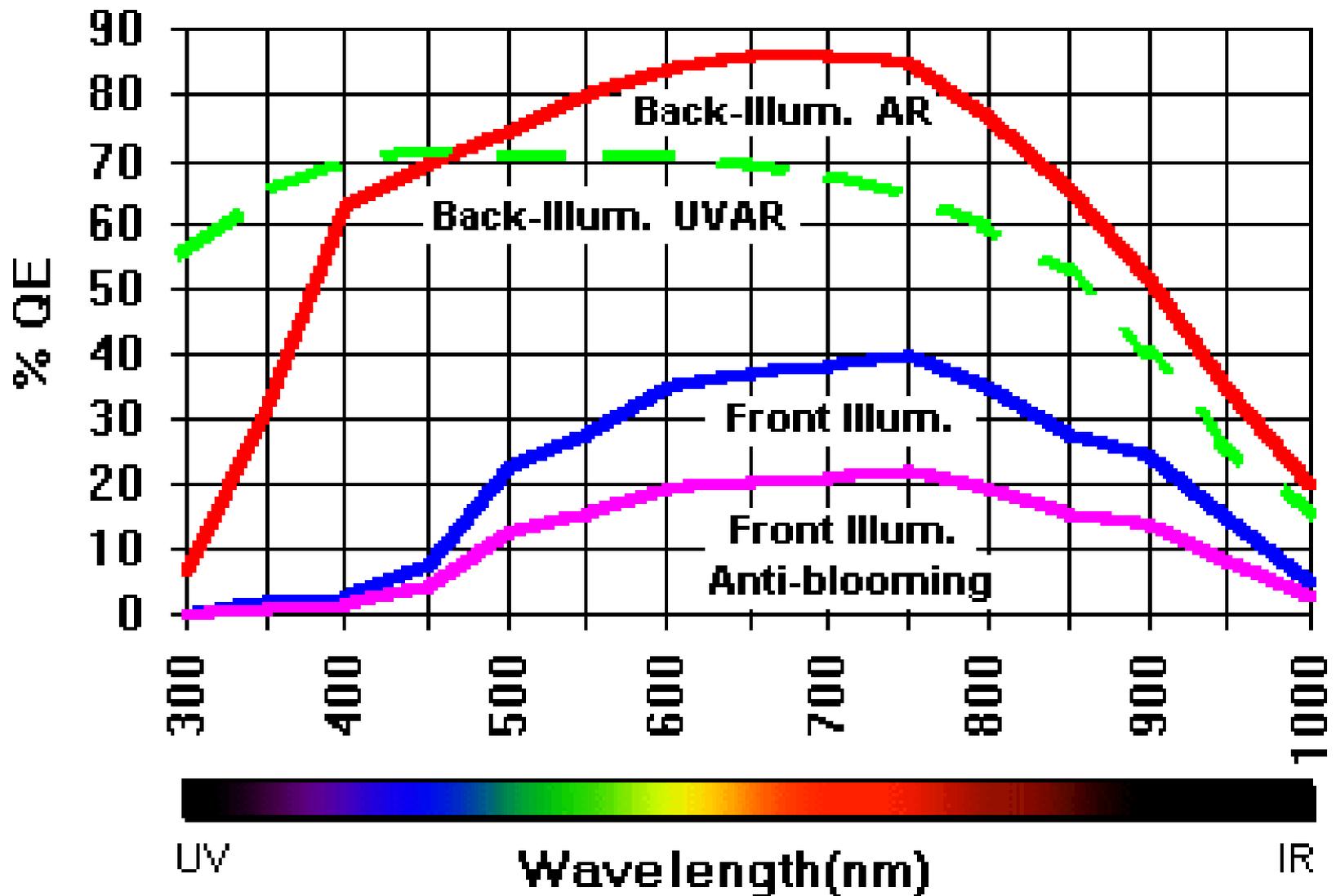
Instrumentación Astronómica

Curso 2011/2012

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



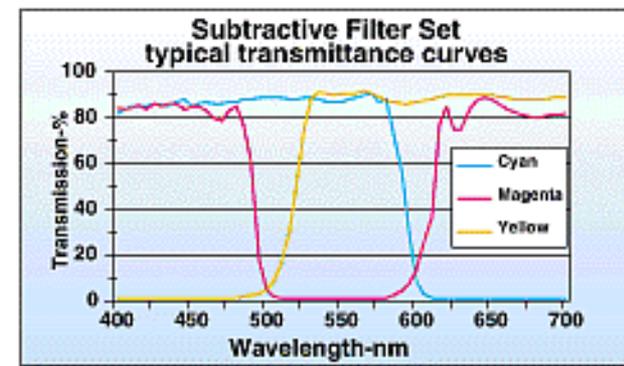
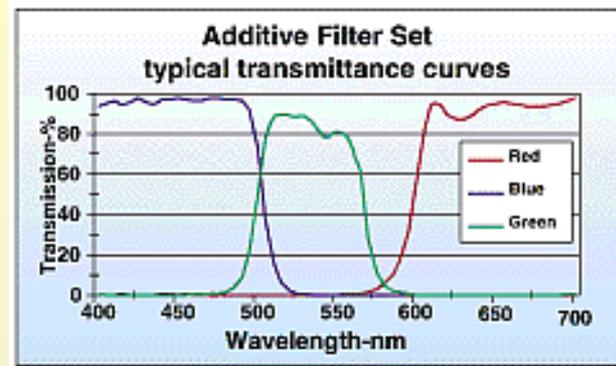
Recubrimiento antireflectante





Imágenes en color con CCDs

- Filtro de bloqueo del IR
- Imágenes en tres colores



- RGB rojo, verde, azul No muestrea [OIII]5007 Exp 2x CMY
- CMY cian(azul+verde), magenta(azul+rojo), amarillo(verde+rojo)
- Tri-color mejorada LRGB, WCMY
 Imagen de LUMINANCIA para mejor SNR
- Combinación por software. Compensación del tipo 4:3:2
- Estrellas análogos-solares para calibración

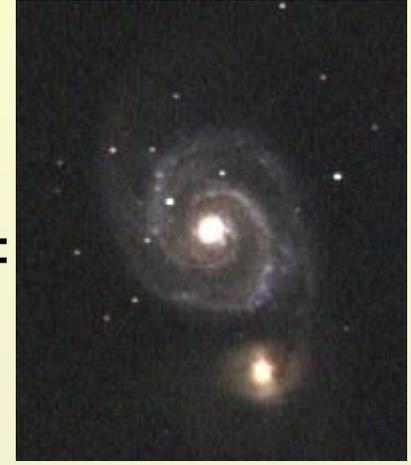


Imágenes en color con CCDs

RGB



=



CMY



=





Características de un CCD

1. Ruido de lectura (RON):

- Está causado por errores en el circuito de lectura y amplificación
- Cuanto más rápido es el proceso de lectura, mayor ruido de e- se introduce
- LECTURAS LENTAS
- En Astronomía se suelen utilizar frecuencias de 50 KHz (50.000 píxeles / s)

Un 1024x1024 se lee en unos 20s

Un 2048x2048 se lee en unos 85s

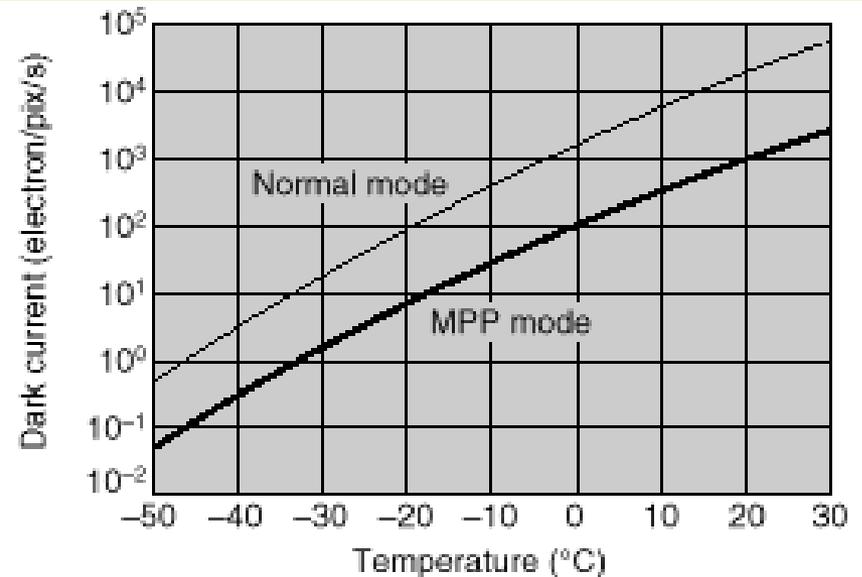
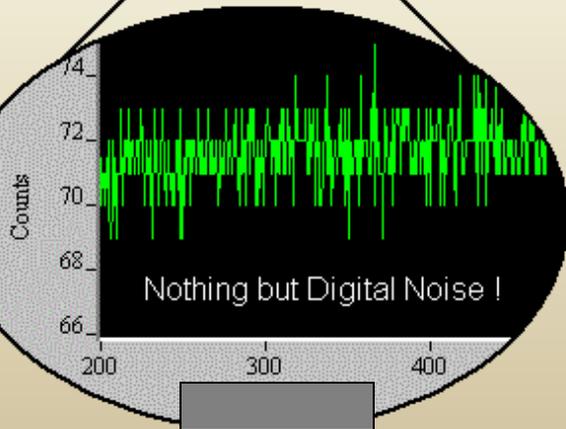
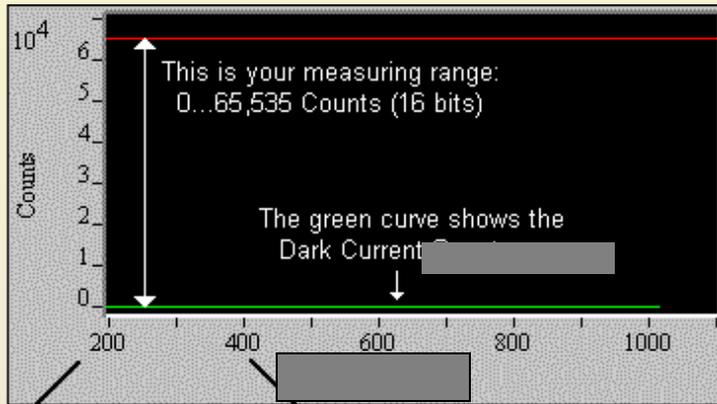
- Cada CCD se puede leer con varias velocidades en función de los requerimientos
 - Modo lento
 - Modo normal
 - Modo turbo



Características de un CCD

2. Corriente de oscuridad (Dark):

- En las exposiciones largas, la corriente de oscuridad puede hacerse relevante
- Para evitar la corriente de oscuridad se baja la temperatura de funcionamiento
La señal de Dark se reduce 1/3 cada 10°C que se baja la temperatura
A -110°C, tenemos alrededor de 1 e⁻ / píxel / hora
- El vacío se hace necesario para evitar la formación de hielo

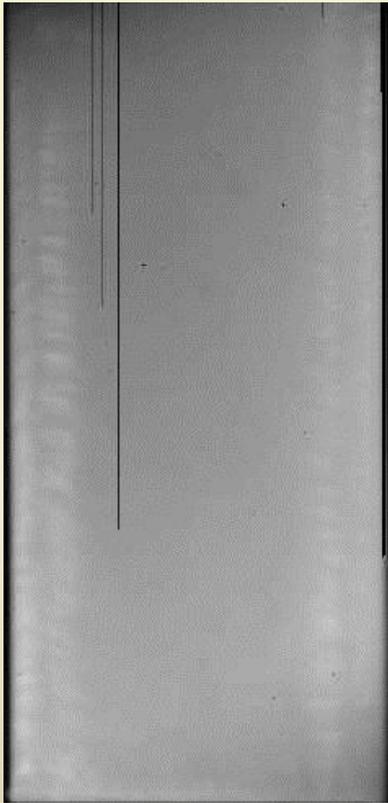




Características de un CCD

3. Defectos cosméticos:

- Columnas muertas
- Columnas brillantes, píxeles calientes, → máscara



Flat field de un CCD EEV42-80



PF WHT



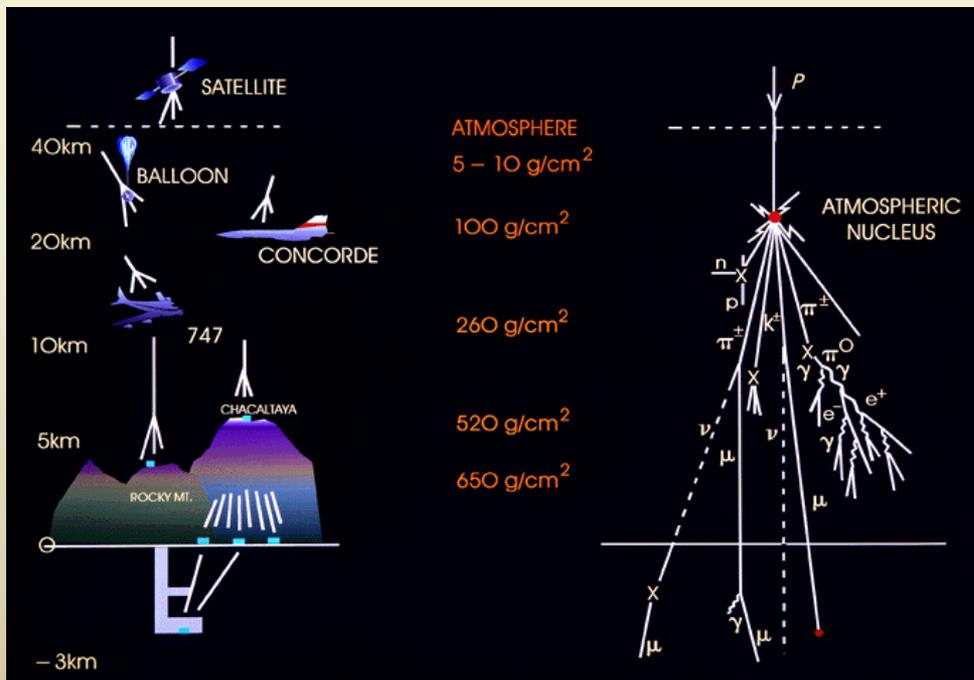
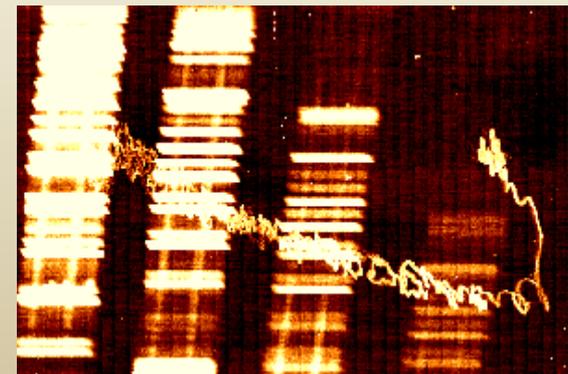
dark 900s de un CCD EEV42-80



Características de un CCD

4.- Rayos cósmicos:

- Partículas de alta energía que inciden en la atmósfera y que generan cascadas de subpartículas a las que los CCD son sensibles
 - Núcleos atómicos (90% protones); electrones; positrones y otras partículas
 - Cargadas eléctricamente (sensibles a los campos magnéticos)
- Se producen de manera aleatoria:
 - Galácticos
 - Anómalos (ISM; heliopausa)
 - Partículas energéticas solares



Astronómica
1/2012

Courtesy of M. A. Shea, Geophysics Directorate, Phillips Laboratory

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



Función Weibull:

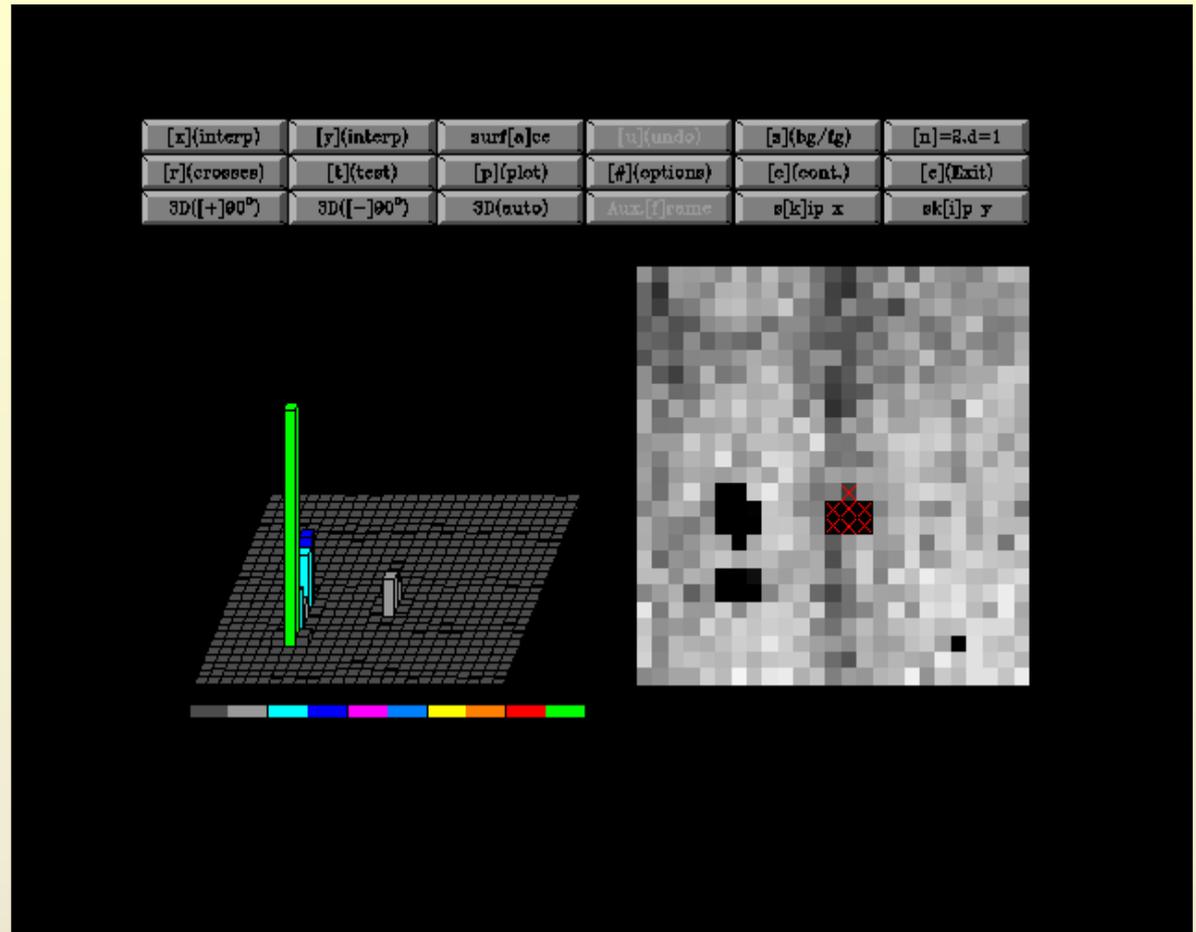
$$N(> S) = N_0 e^{[-\lambda(S^{1/4} - S_0^{1/4})]}$$

No válido para eventos de baja señal

$$S_0 = 700 \text{ e-}$$

$$N_0 = 1.4 \text{ eventos / chip / s}$$

$$\lambda = 0.57$$



Eliminación de RC:

Sustitución de píxeles anómalos mediante un estimador local

- Combinación de imágenes
- Tratamiento estadístico
- Interpolación



Características de un CCD

5.- Área y resolución espacial:

Se busca un equilibrio entre muestreo (sampling) espacial (píxel pequeño) y área cubierta (píxel grande).

Se buscan mosaicos con un máximo actual de $1^\circ \times 1^\circ$

Criterio de Nyquist: una señal de frecuencia f se caracteriza de forma completa con un muestreo cada $1/2f$ segundos (“*la resolución del CCD debe ser el doble que la del telescopio*”).

Muestreo espacial optimizado (normalmente más allá del criterio de Nyquist para evitar efecto pixelado).



$\text{FWHM} = 2$ píxeles

Ejemplo:

WHT, 4.2m f/3, seeing $0''7$

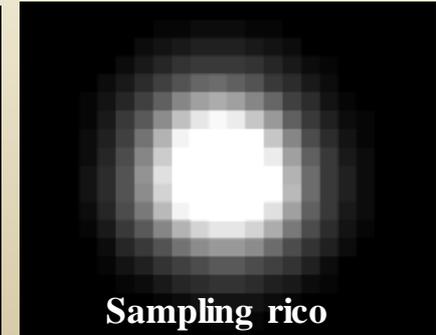
Escala placa (EP) = $206265 / F = 16''4 / \text{mm}$

Tamaño * = $0''7 / \text{EP} = 42$ micras

Tamaño óptimo píxel ~ 20 micras



Sampling pobre



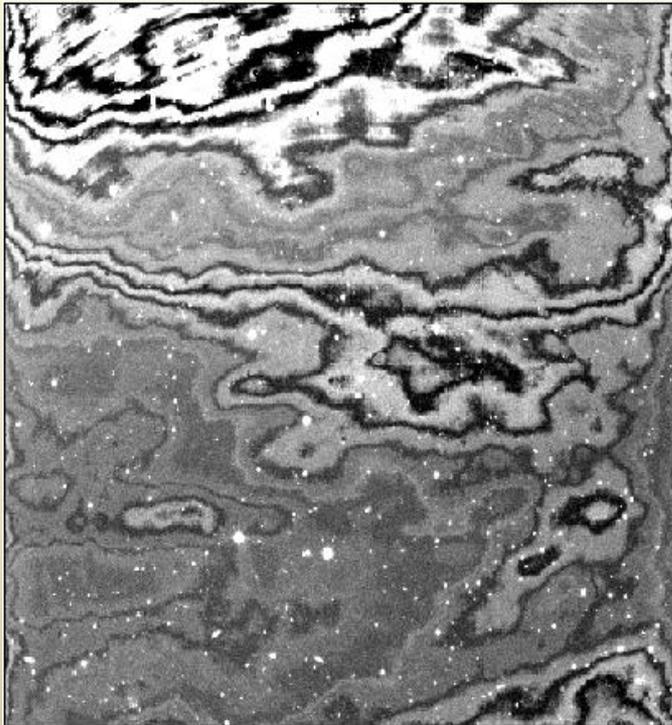
Sampling rico



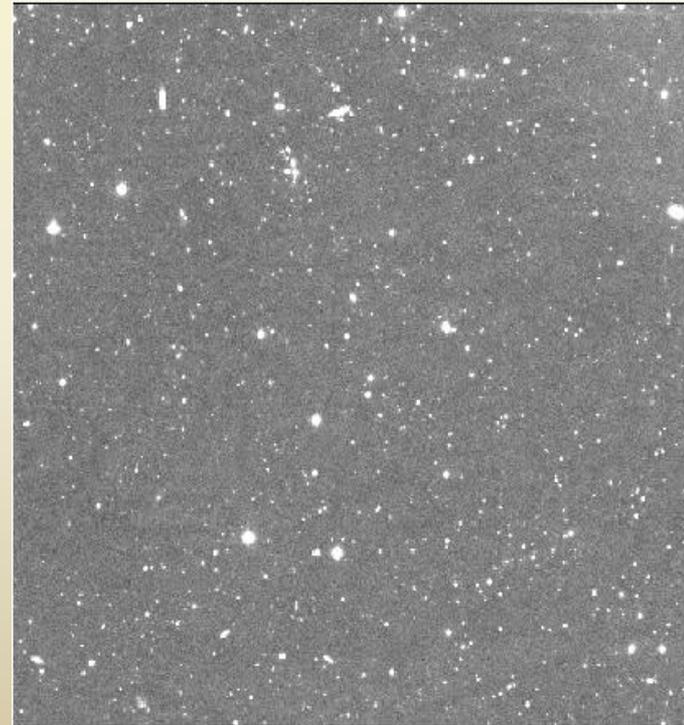
Características de un CCD

6. Fringing:

- Las líneas de OH actúan como luz pseudo-monocromática generando interferencias debidas a reflexiones múltiples internas (sobre todo en los CCDs delgados)
- Efecto fundamental en bandas rojas debido a las líneas de OH
- 10% - 15% señal, diferencia entre picos (banda I, 8000Å)
- Efecto aditivo difícil de corregir
- PATRÓN DE FRINGING



Con fringing



Sin fringing



Calibración de imágenes astronómicas

Conversión de fotones detectados a microvoltios:

- La cantidad observada es un flujo de fotones, pero la cantidad medida es un pequeño voltaje V_0
- El voltaje es amplificado y digitalizado
- Para N_p fotones incidentes, los e- detectados serían $Q = \eta G N_p$
 - $\eta < 1$, eficiencia cuántica
 - $G \sim 1$, ganancia fotoconducciona debida a la ampliación intrínseca del semiconductor
 - $G = 1$ para CCDs y detectores nIR
- La carga total será $Q \cdot e$ (voltaje asociado V)
de manera que el voltaje V_0 tras el amplificador será

$$V = \frac{Q}{C} e \text{ Voltios}$$

$$V_0 = \frac{A_{SF} \eta G N_p e}{C} \text{ Voltios}$$

C: Capacitancia de salida del detector
 A_{SF} : Amplificación del amplificador de salida

Ejemplo: Un objeto de magnitud $m=22$, tras 10s de exposición genera unos 500 e- en un telescopio de 4m



Calibración

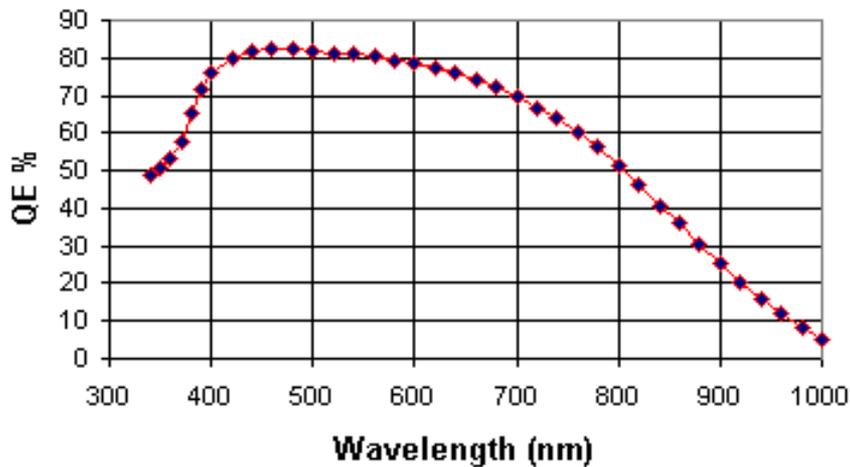
☐ Eficiencia cuántica.

Se mide experimentalmente en el laboratorio

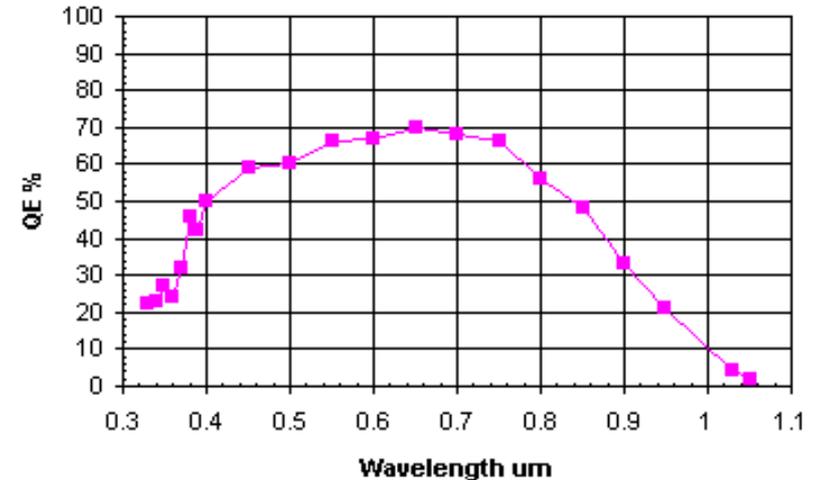
Es una función de la longitud de onda

Problemas en las zonas azul y UV

EEV4280 Quantum Efficiency



Tek4 QE



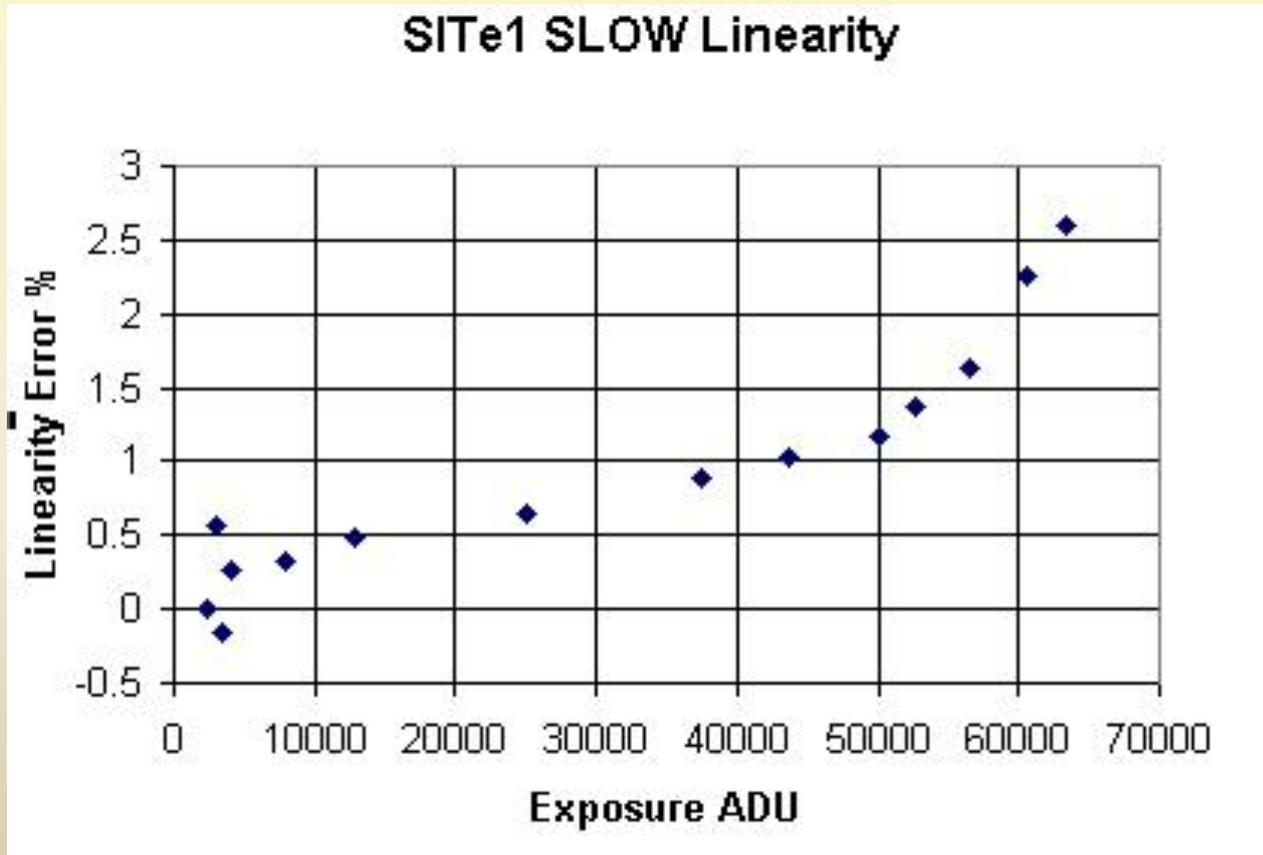
WFC INT



Calibración y caracterización

☐ Linealidad

Los detectores CCD son lineales con un error de $\sim 2\%$



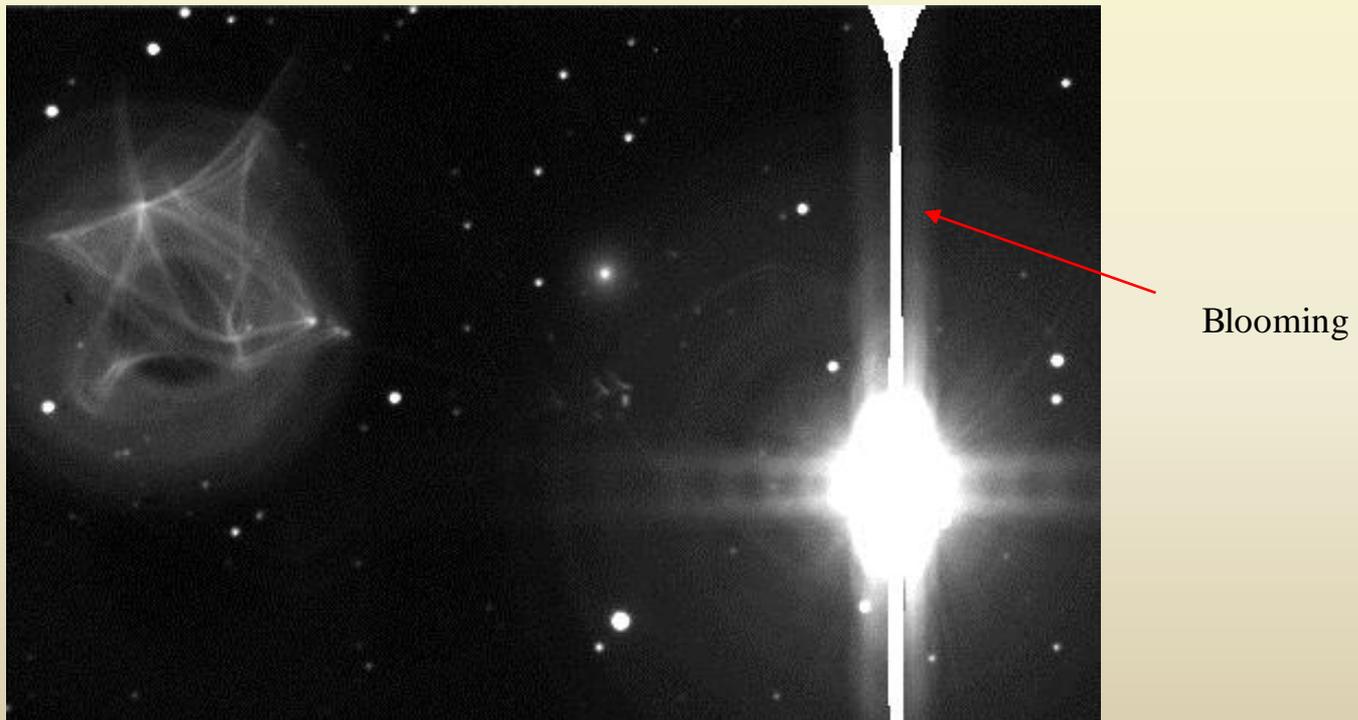


Calibración y caracterización

☐ Saturación

Todos los CCDs tienen un **umbral de saturación**.

Si incide mucha luz, se generan tantos e- que desbordan el píxel y el píxel se satura





Calibración y caracterización

□ Ganancia

La imagen digital es una tabla de números que indican la intensidad registrada en cada píxel
Los números almacenados son el número de e- dividido por una cierta **Ganancia**
La **Ganancia** se mide en e- / cuenta

$$\text{Señal}(ADU) = \frac{1}{G} N_{e^-}$$

$$G \sim 1-10 \text{ e- / ADU}$$

El resultado se llaman **cuentas** o **ADU** (del inglés Analog-to-Digital-Units)

□ Rango dinámico

Los programas almacenan las cuentas como números enteros,
con un intervalo de intensidades limitado. Este intervalo es el **rango dinámico**

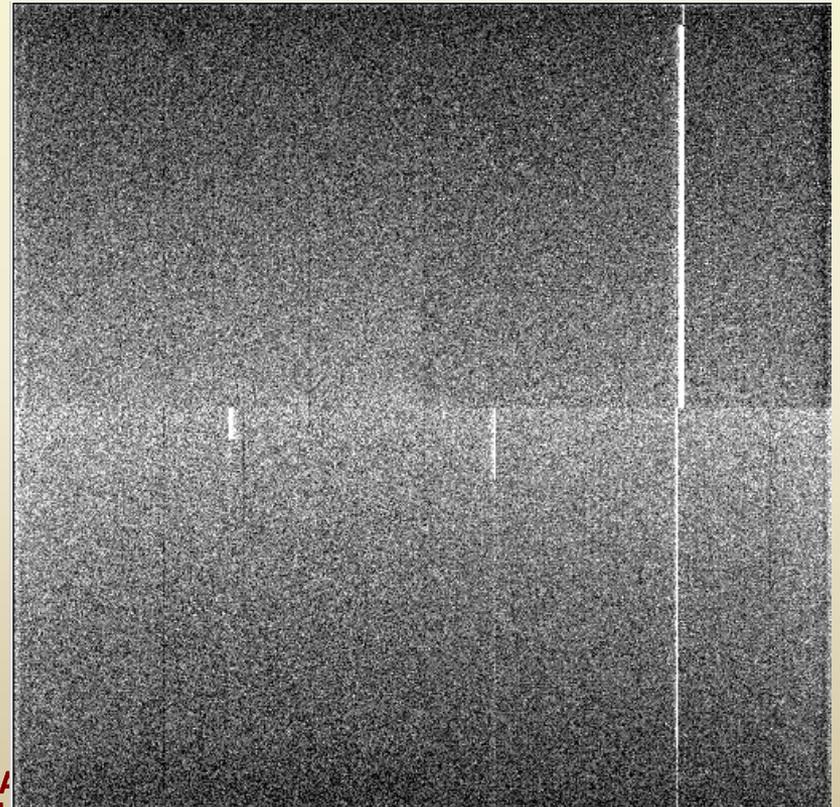
En las cámaras profesionales el rango va de 0 a 65535 (2 bytes, $2^{16}=65536$) posibilidades
Mayor precisión supone ficheros más grandes



Calibración y caracterización

❑ Bias.

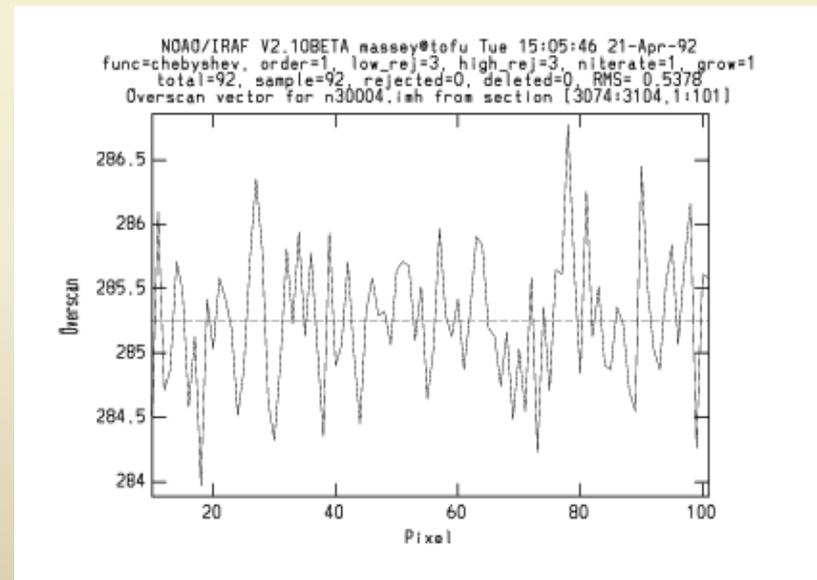
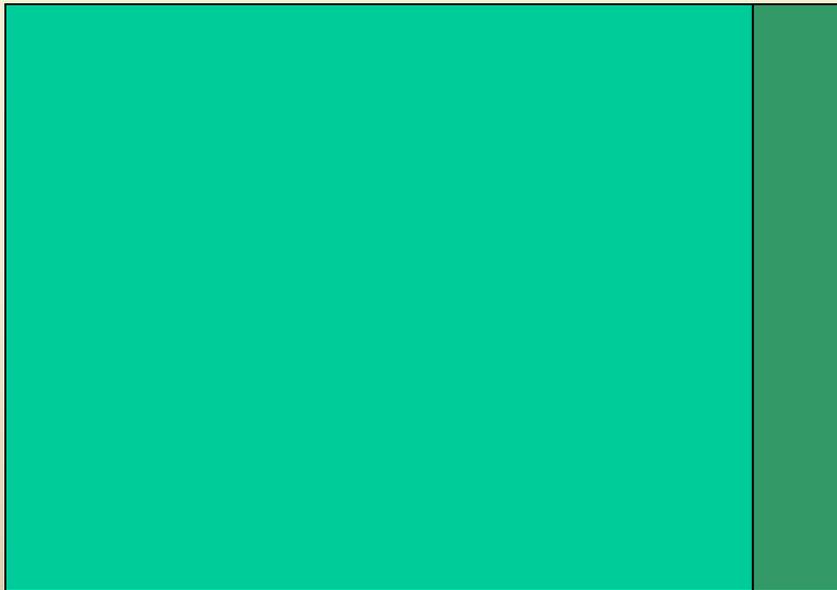
- Offset en el nivel de cuentas para evitar la entrada de valores negativos en el convertidor A/D
- Se determina tomando una o varias imágenes oscuras de exposición nula (imagen **ZERO**)
- Si esta imagen de BIAS es muy uniforme, se puede substituir por una constante





Calibración y caracterización

- ❑ **Overscan.**
Zona fuera de la zona física del detector.
El proceso de lectura manda más ciclos de los necesarios.
Se suele comprobar si hay diferencias entre el BIAS y el OVERSCAN.





Variación espacial de la sensibilidad

❑ Variación espacial de la sensibilidad. Flat Fielding.

Los píxeles no tienen una respuesta uniforme a la luz. Depende de λ

La QE varía de píxel a píxel

diferencias en la fabricación

pequeñas atenuaciones por partículas de polvo microscópicas

Las variaciones son de $\sim 10\%$ o menores

Se toma una o varias imágenes (N)
iluminando el CCD con luz uniforme
(imagen **FLAT**)

$$S/N = \text{SQRT}(S_ADU * G * N_aver)$$

El Flat puede variar

El Flat se suele normalizar para evitar
efectos aditivos

Los flats pueden ser de:

- Cúpula
- Lámpara interna
- Cielo





Calibración y caracterización

❑ Binning.

El binning de carga es el proceso de sumar o combinar paquetes de carga de grupos rectangulares de píxeles en el capacitor o en la fila de lectura.

Consecuencias secundarias:

Mayor sensibilidad

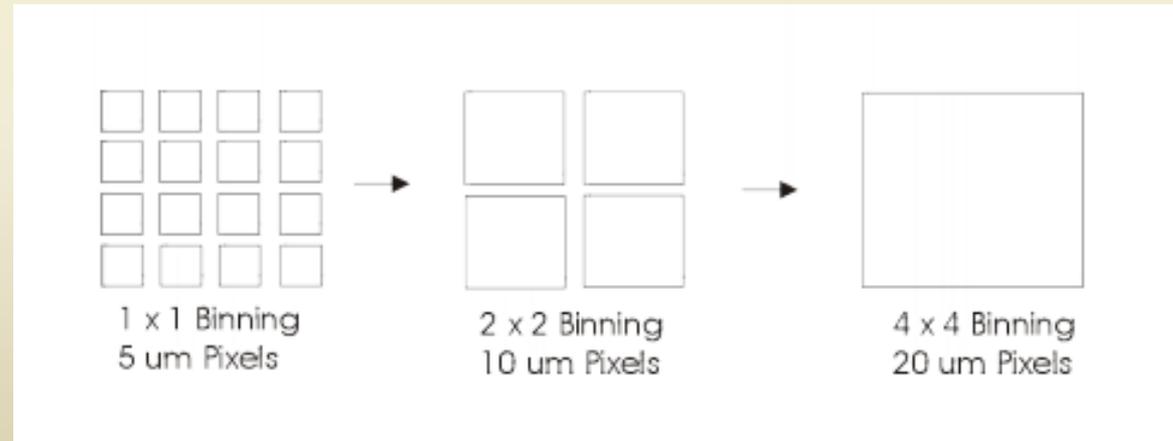
El tamaño del píxel se hace mayor

Menor resolución

La velocidad de lectura de la imagen se hace mayor

Menor tamaño del fichero

Binning adaptativo





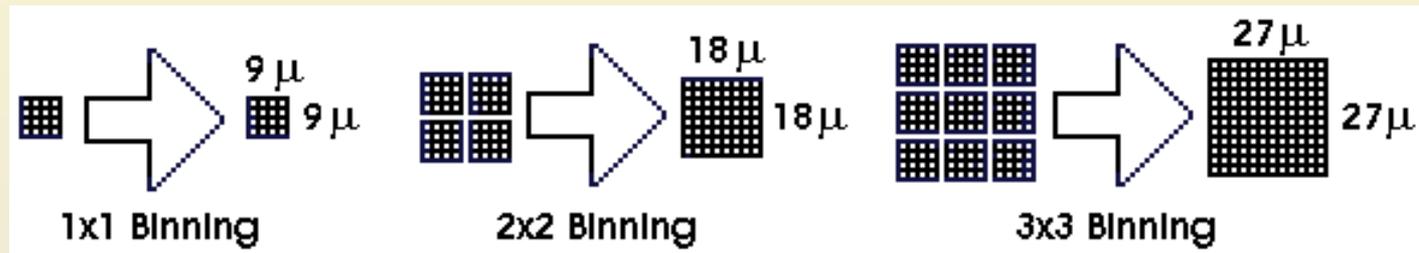
Calibración y caracterización

❑ Binning.

Combinación de la carga de píxeles reales para crear píxeles de la imagen

La carga se suma antes del proceso de lectura, el ruido de lectura se reduce

La corriente de oscuridad se transfiere al superpíxel resultante, por lo que se conserva igual



Ejemplo:

$$1 \times 1 \quad \sigma_{TOT} = \left(\sum_{i=1}^4 \sigma_{POISSON,i}^2 + 4\sigma_{RN}^2 \right)^{1/2}$$

$$4 \times 4 \quad \sigma_{TOT} = \left(\sum_{i=1}^4 \sigma_{POISSON,i}^2 + \sigma_{RN}^2 \right)^{1/2}$$



Resumen de contenidos

- **¿Cómo funciona un CCD?**
- **Características típicas de los CCDs.**
- **Mejoras en la fabricación para CCDs de uso astronómico.**
- **Calibración de los CCDs: bias, dark, flat,...**