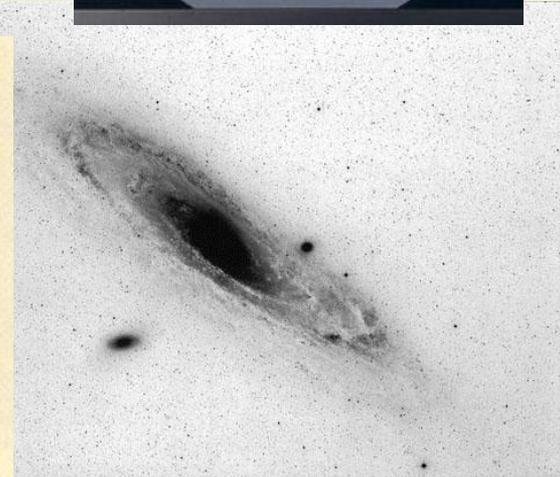
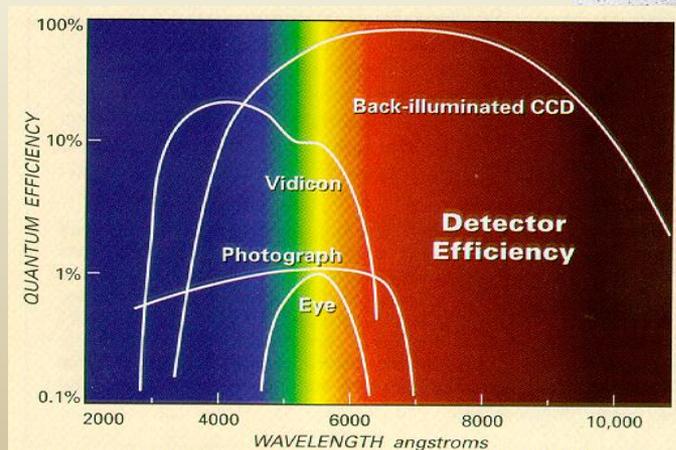
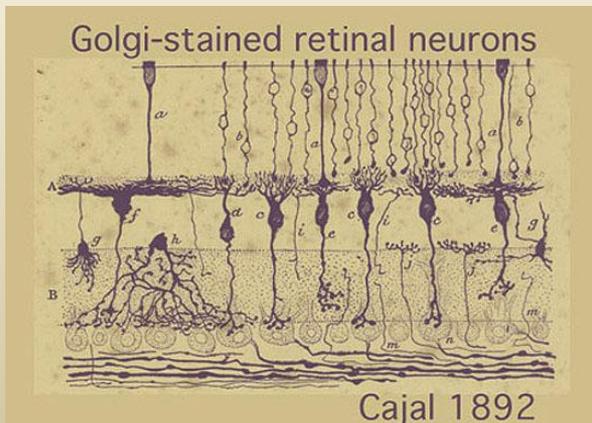
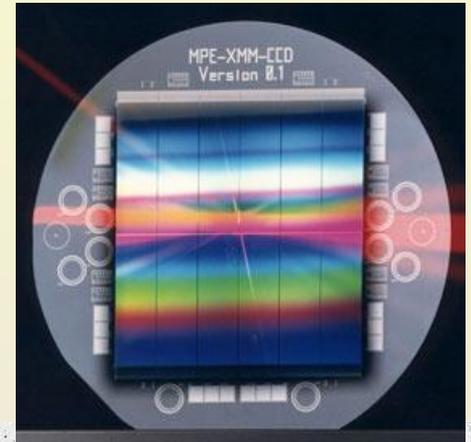




# Tema 6: Detectores, generalidades

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





# DETECTORES (I)

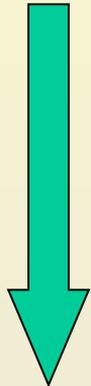
- Detección de la radiación.
- Tipos de detectores.
- Parámetros de los detectores.
- Relación señal-ruido.
- El ojo humano como detector.
- Detectores fotográficos.



# DETECCIÓN DE LA RADIACIÓN

- Proceso de medida en astronomía:

- Colección: Interesa recoger la mayor cantidad de fotones. Objetos celestes luminosos, pero lejanos → poco flujo en tierra.
- Análisis: De los fotones recogidos se seleccionan algunos por su frecuencia de acuerdo a los objetivos científicos del proyecto (Fotometría, Espectroscopía).
- Detección: La interacción con ciertos materiales produce señales que son medibles.





# DETECCIÓN DE LA RADIACIÓN

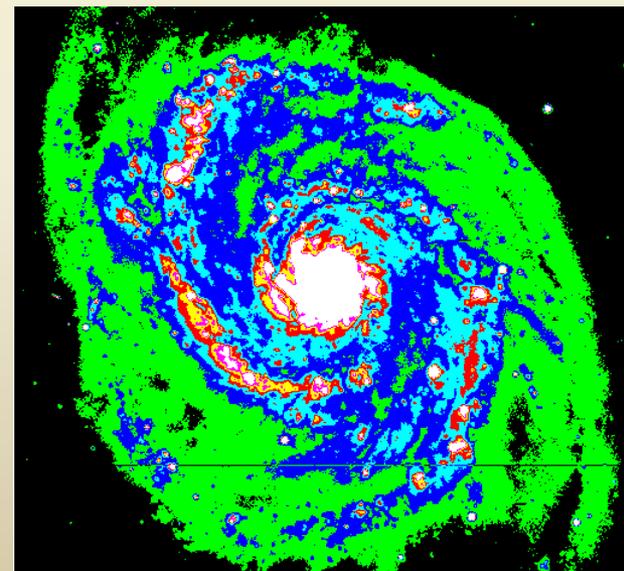
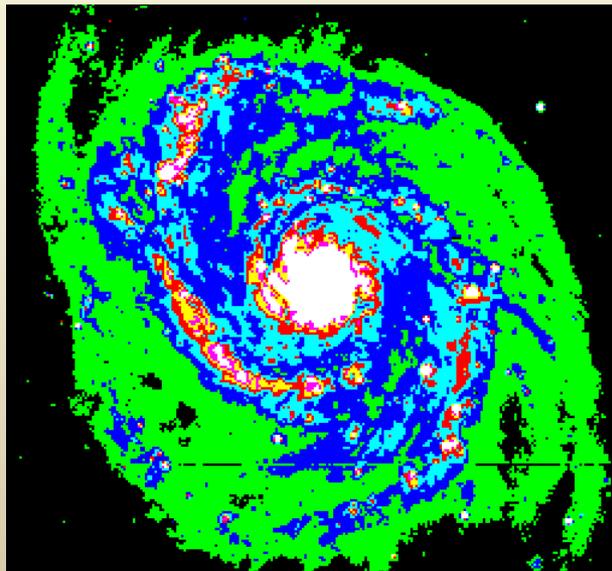
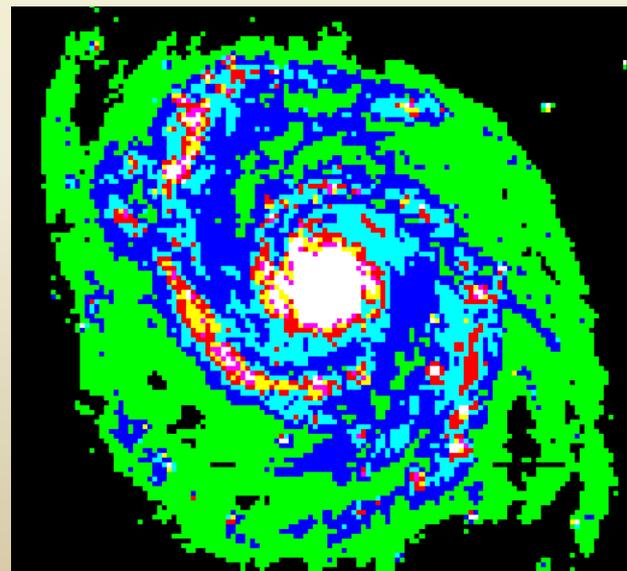
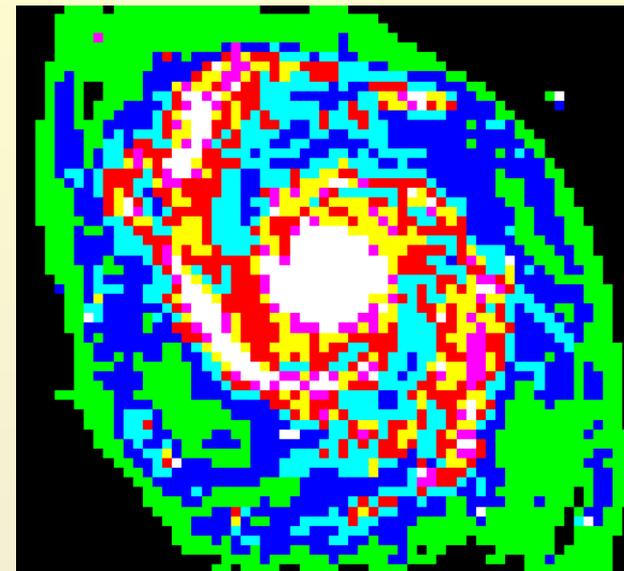
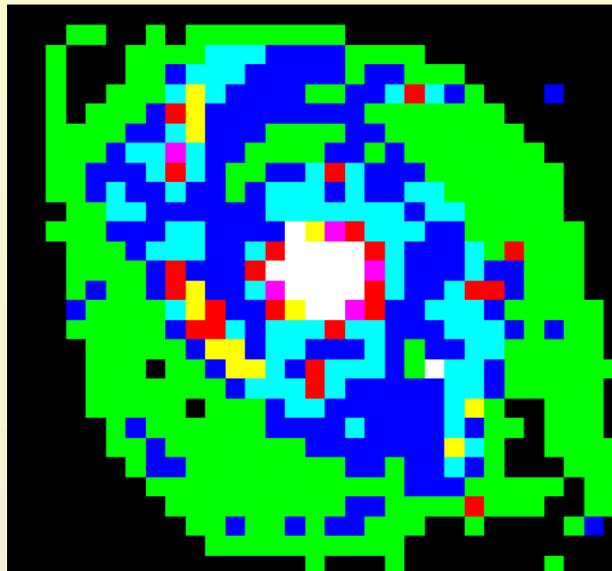
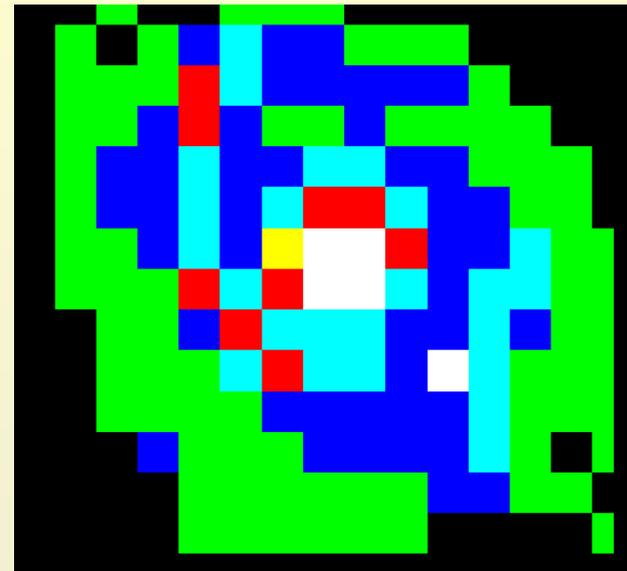
- Pretendemos la mayor resolución posible:
  - Resolución espectral.
  - Resolución espacial.
  - Resolución temporal.

El aumento de resolución implica una disminución del flujo sobre el detector.

Necesitamos telescopios grandes y detectores muy sensibles para estudiar objetos de los que, aunque son muy luminosos, nos llega un flujo muy débil por estar tan alejados del observador.



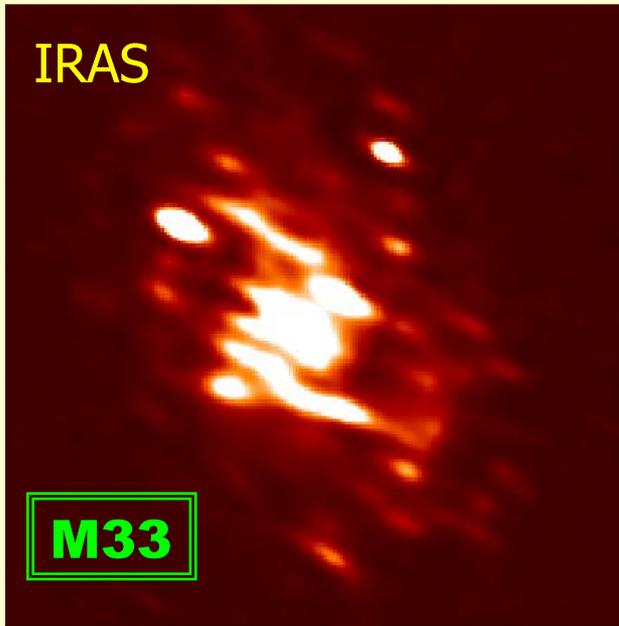
# Resolución espacial



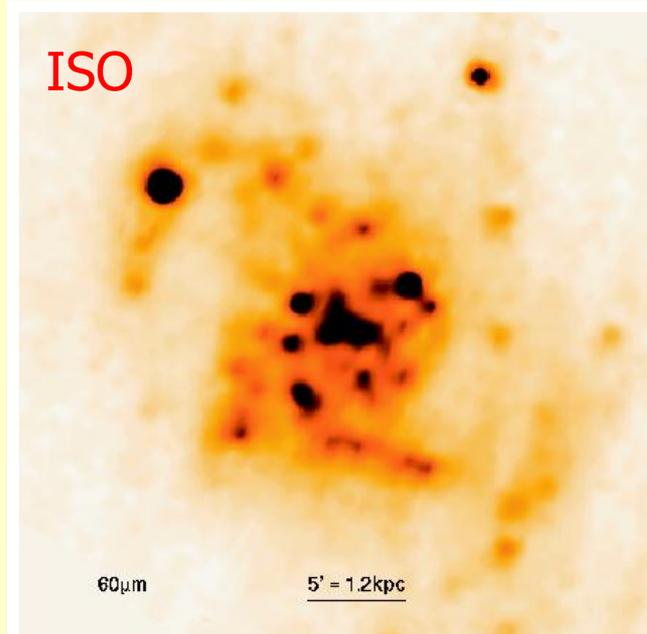


# Resolución espacial

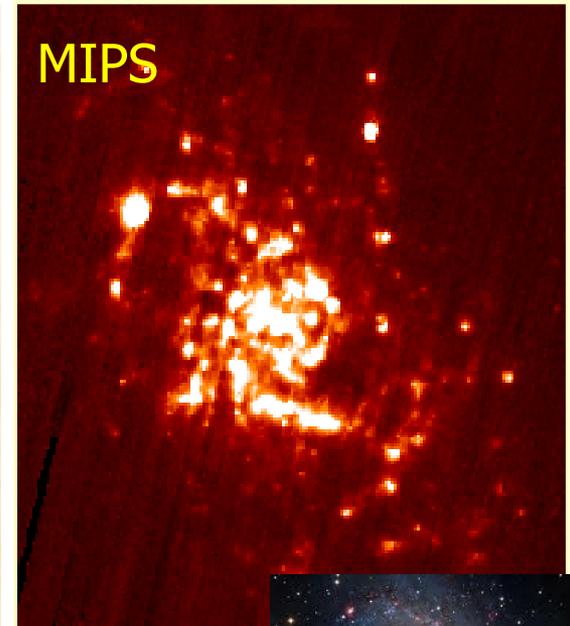
IRAS



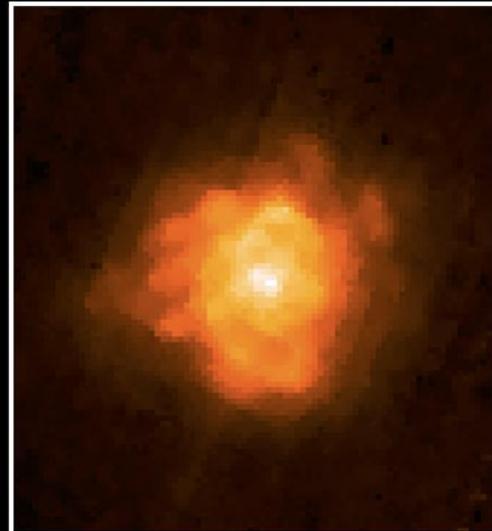
ISO



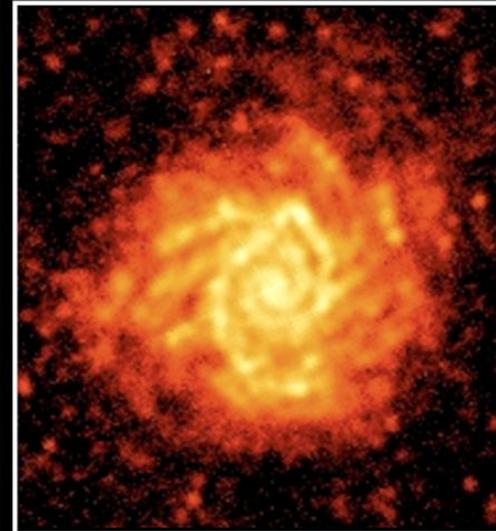
MIPS



M74 Spitzer 160 μm



M74 SPIRE 250 μm





# Regiones Espectrales

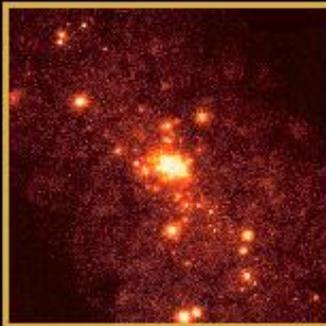
[http://coolcosmos.ipac.caltech.edu/cosmic\\_classroom/multiwavelength\\_astronomy/multiwavelength\\_museum/m31.html](http://coolcosmos.ipac.caltech.edu/cosmic_classroom/multiwavelength_astronomy/multiwavelength_museum/m31.html)

## M31 – The Andromeda Galaxy

Distance: 2,900,000 light-years (900 kpc)

Image Size = 2.5 x 2.5 degrees

Visual Magnitude = 3.4



X-Ray: ROSAT



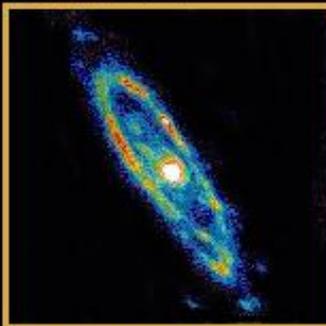
Ultraviolet: GALEX



Visible: DSS



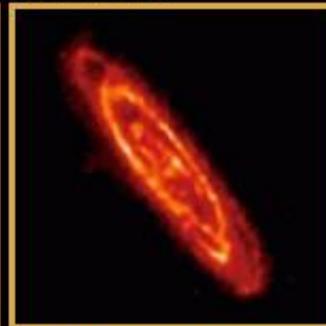
Visible: © Jason Ware



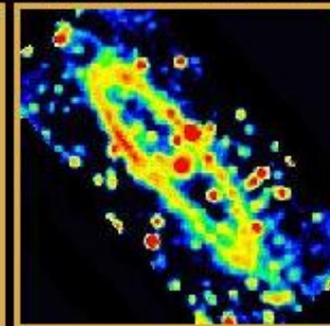
Mid-Infrared: IRAS



Mid-Infrared: Spitzer



Far-Infrared: ISO

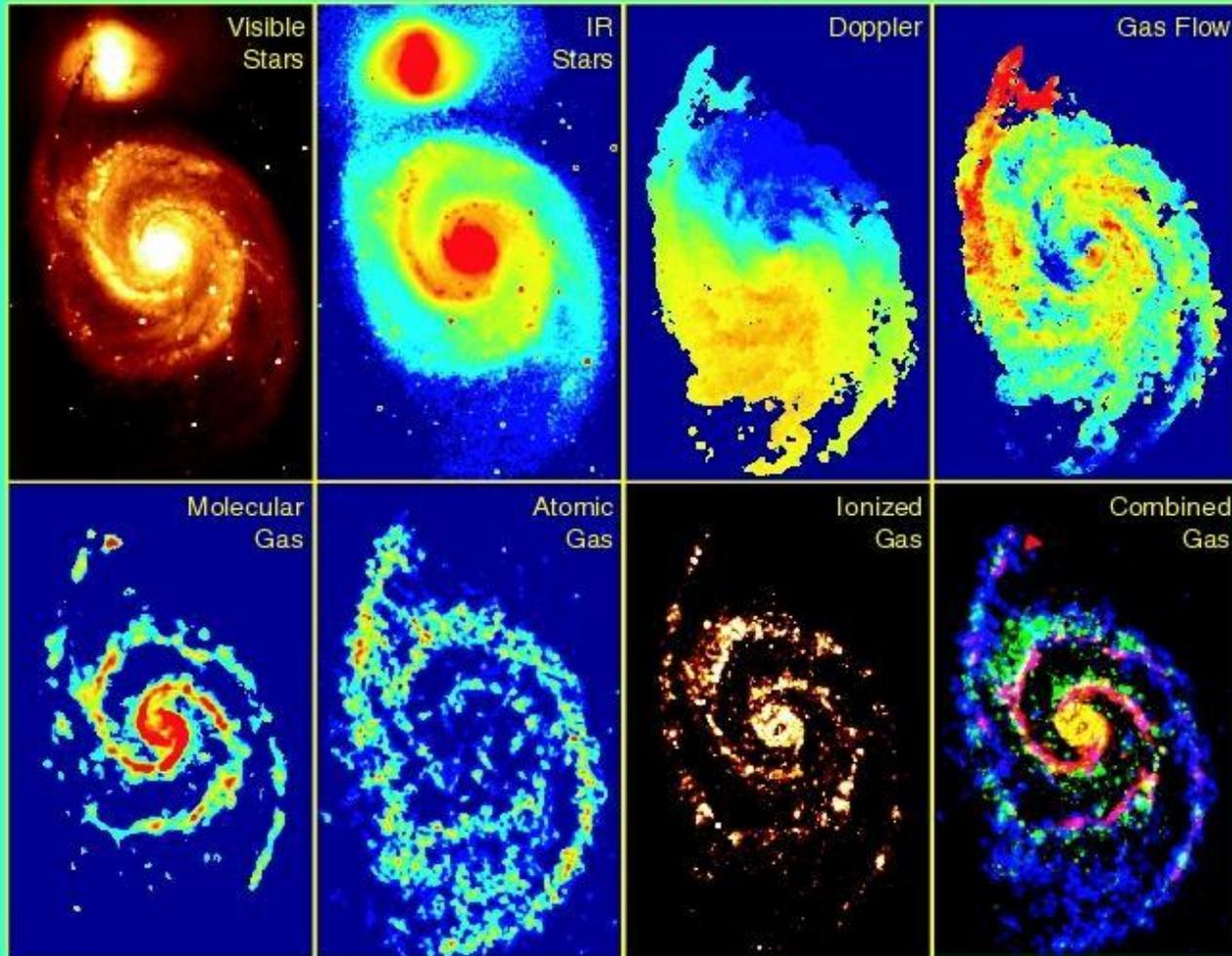


Radio: Effelsberg



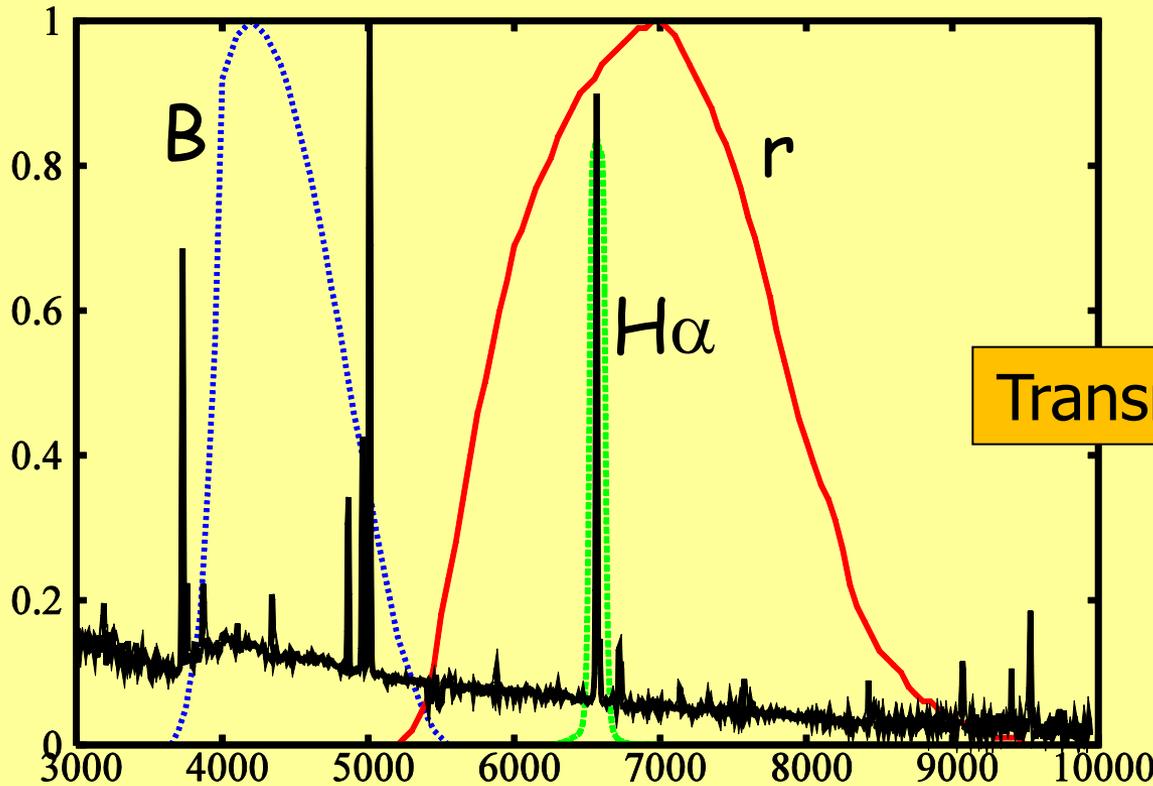
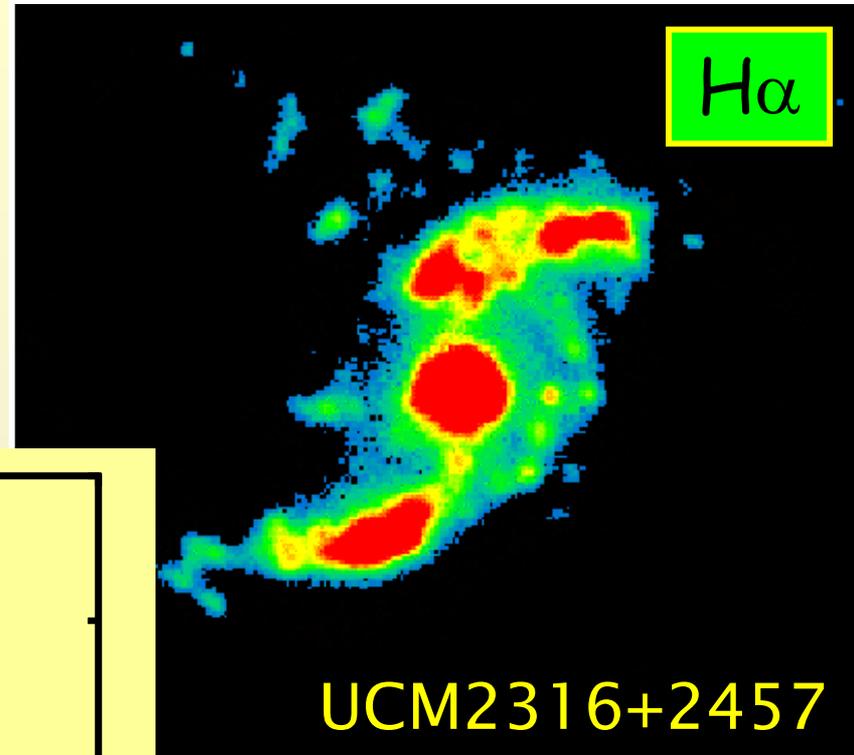
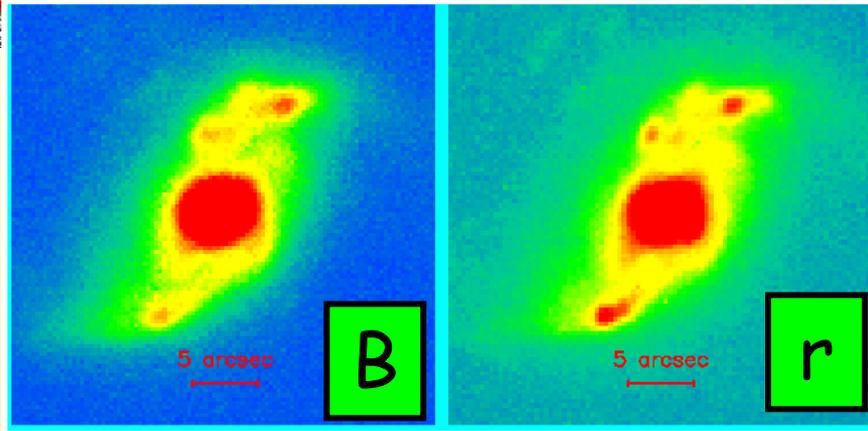
# Regiones espectrales

The Spiral Arms of the Whirlpool Galaxy





# Resolución Espectral

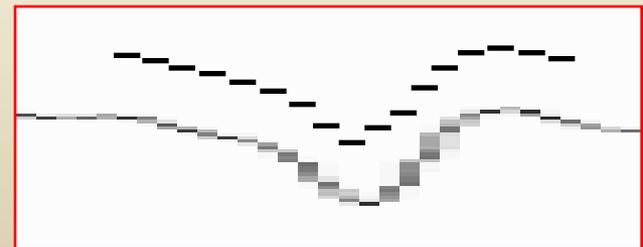
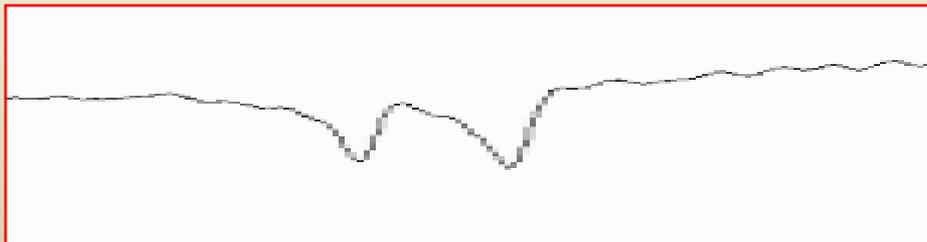
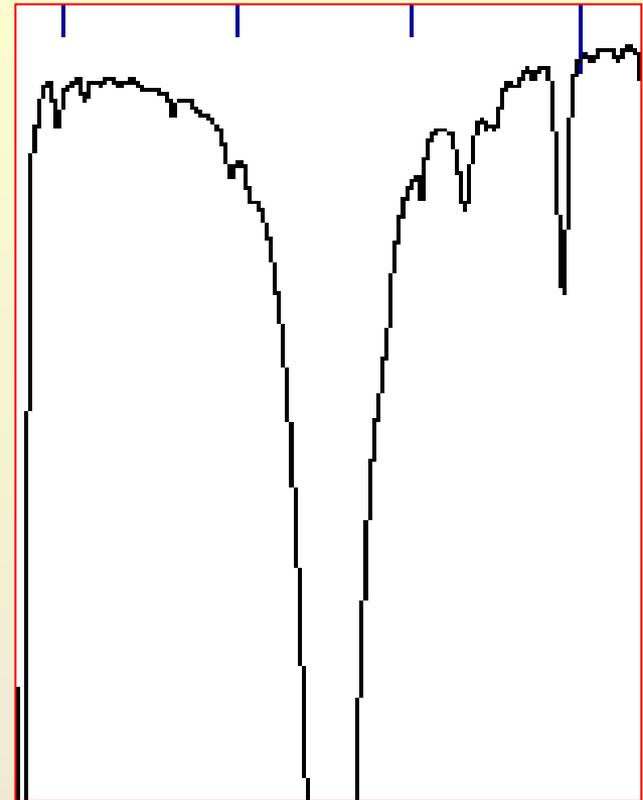
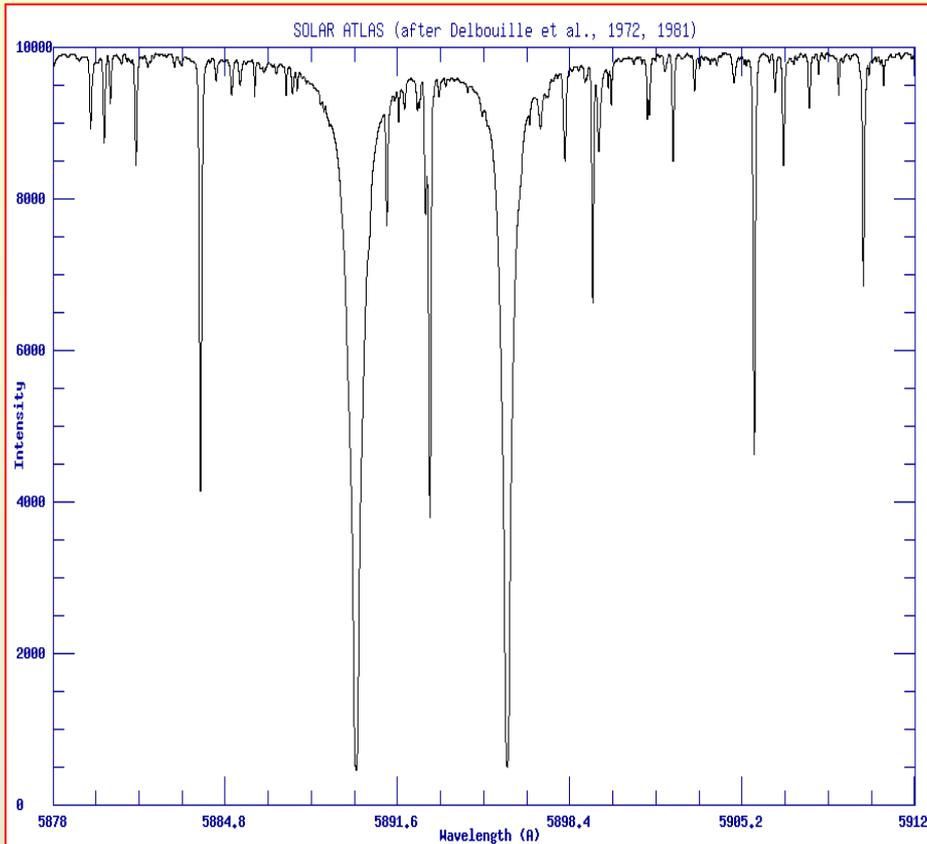


Transmisión de los filtros

|            | FWHM (nm) |
|------------|-----------|
| B          | 93        |
| R          | 207       |
| H $\alpha$ | 11        |



# Resolución Espectral



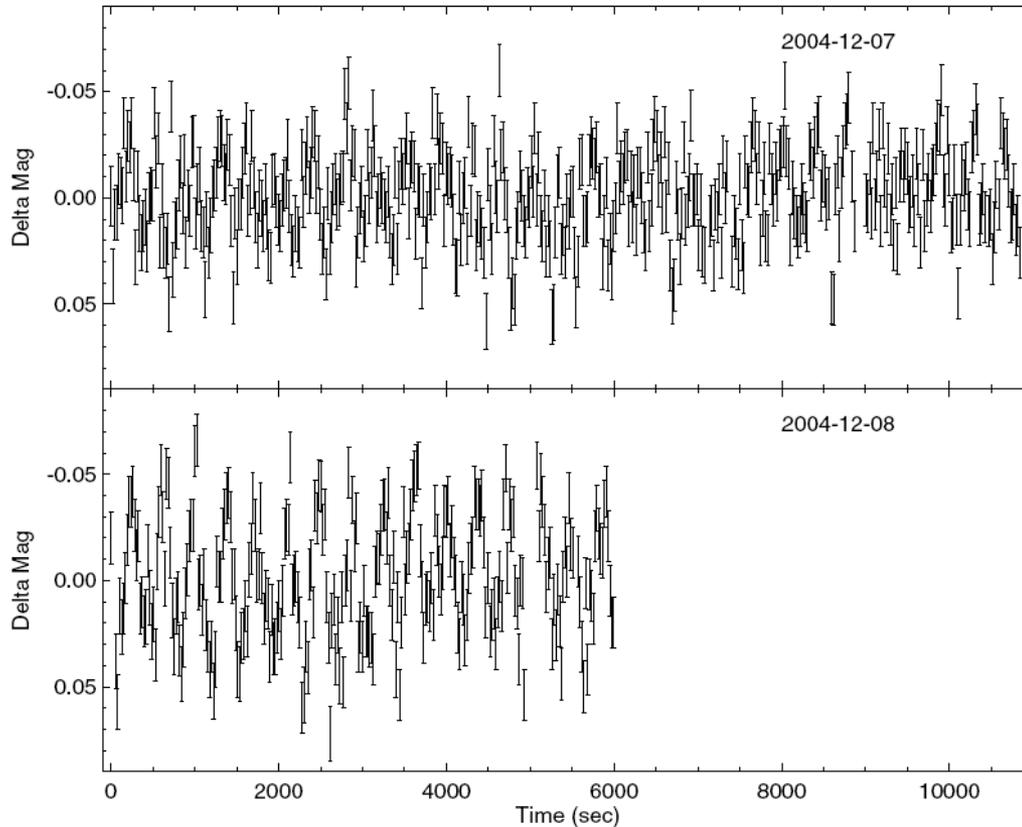
Líneas del doblete del Na en el Sol a muy diferente resolución

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

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



# Resolución Temporal



**Figure 2.** Photometric observations of RAT J0455 + 1305 made in white light using the NOT. The exposure time was 15 s and the dead time was  $\sim 8$  s.

**RATJ0455+1305**  
Curvas de luz obtenidas con exposiciones muy cortas son necesarias para encontrar los periodos de las estrellas variables de muy corto periodo.

| Source          | Period (min) | Magnitude  |
|-----------------|--------------|------------|
| RATJ0449 + 1756 | 40           | $R = 16.1$ |
| RATJ0455 + 1305 | 6.23         | $V = 17.2$ |
| RATJ0455 + 1254 | 66           | $V = 16.0$ |
| RATJ0807 + 1510 | 60           | $V = 15.4$ |

Observaciones con el telescopio NOT de 2.5m de 15s con t muerto de 8s.

Mon. Not. R. Astron. Soc. 371, 957–962 (2006)

**Rapid Temporal Survey (RATS)**

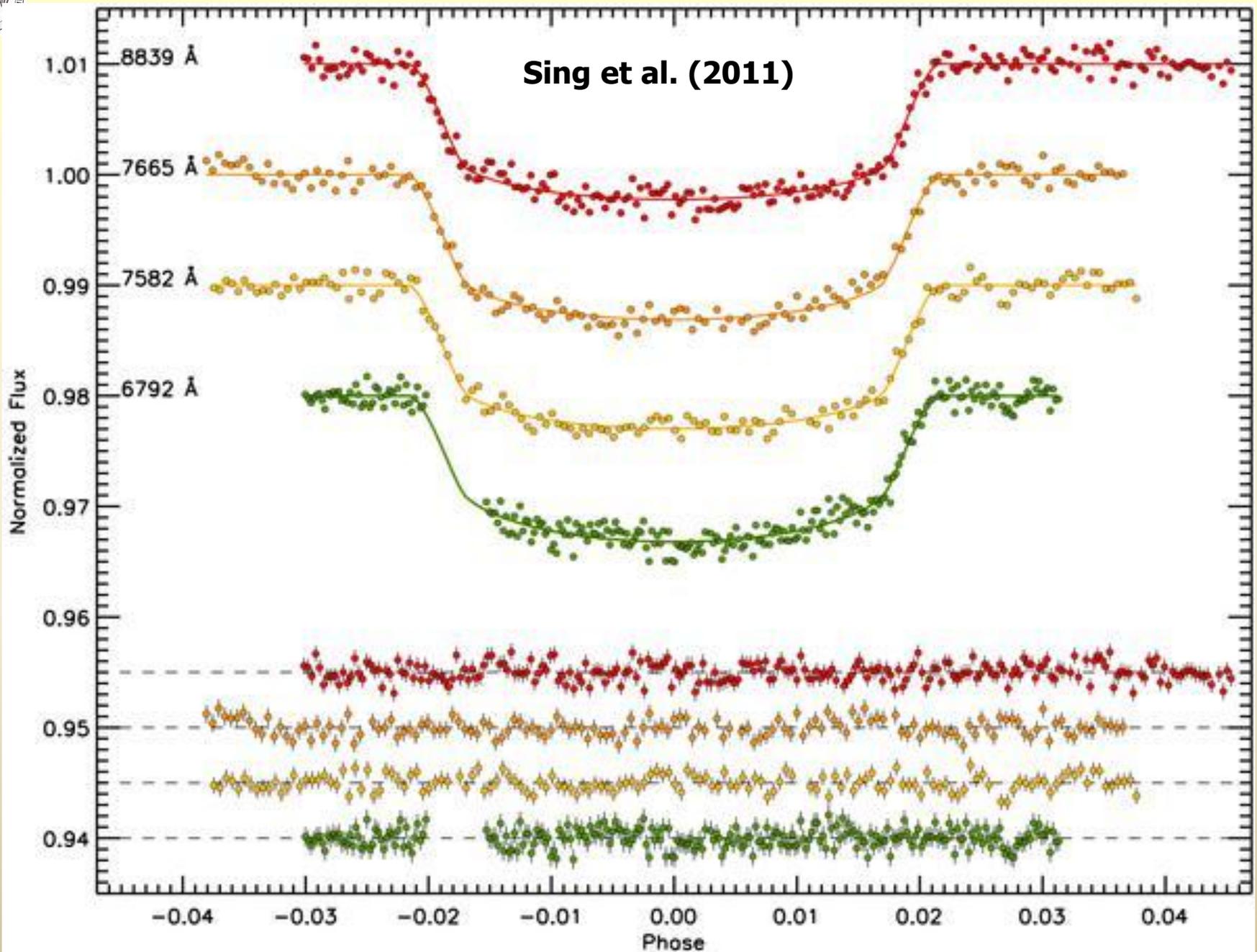
<http://www.astro.ru.nl/amcvn2005/talks/Hakala.pdf>

Instrumentación Astronómica  
Curso 2011/2012

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



# Resolución Temporal





# Parámetros fundamentales

- Tipos de detectores.
- Sensibilidad espectral.
- Eficiencia Cuántica.
- Linealidad.
- Rango dinámico.
- Ruido. Relación Señal-Ruido.
- Otros parámetros:
  - Tamaño.
  - Resolución espacial. Píxel.
  - Estabilidad de la respuesta. Repetibilidad.
  - Estabilidad geométrica.
  - Tiempo muerto.



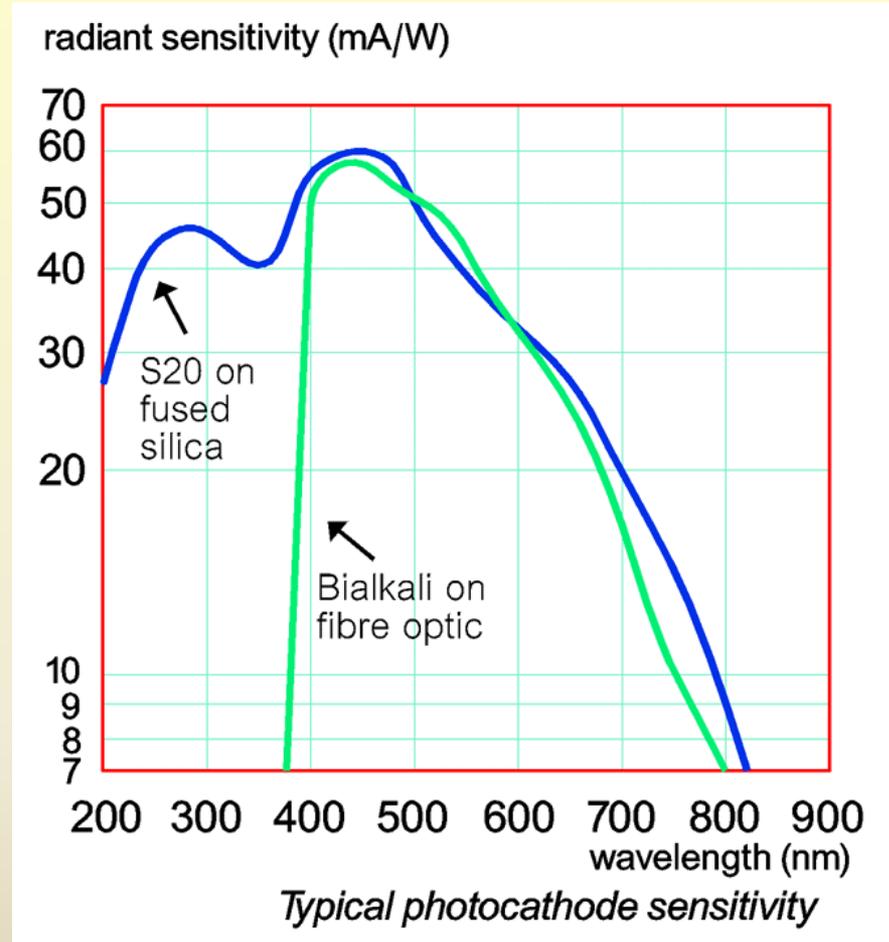
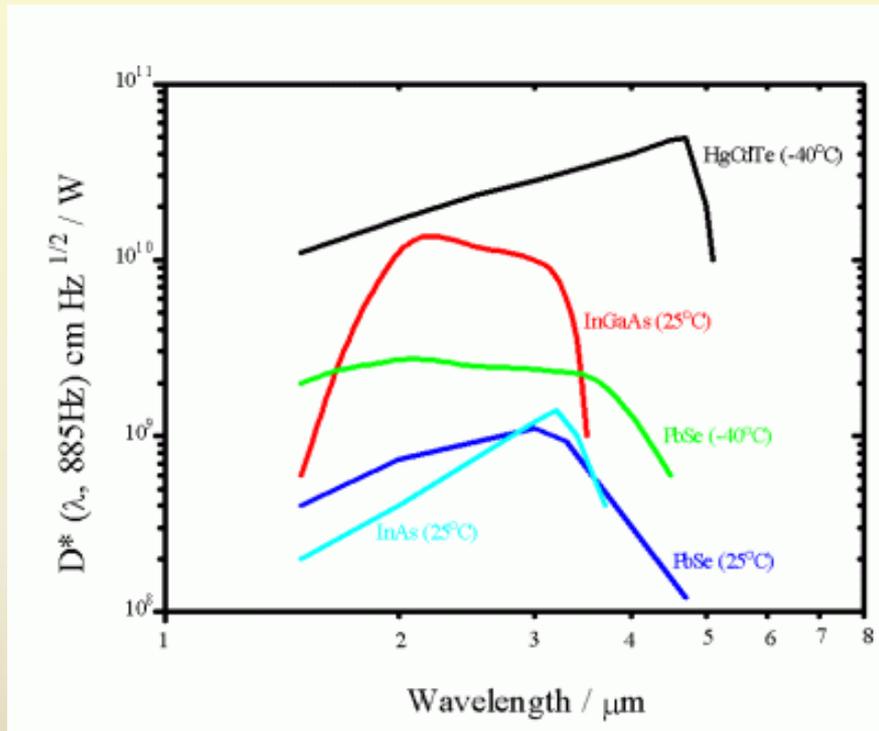
# Parámetros fundamentales: tipos de detectores

- **Detectores de fotones (photon detectors/counters):** un fotón es absorbido y libera uno o más partículas cargadas que (1) modulan una corriente eléctrica en el material; (2) van a un amplificador; (3) producen un cambio químico. Ejemplos: fotoconductores, fotodiodos, detectores fotoemisores y placas fotográficas.
- **Detectores térmicos (thermal detectors):** se absorbe un fotón y se termaliza su energía (calienta un material). Esta energía térmica, por ejemplo, cambia las propiedades eléctricas del material lo que modula la corriente que pasa por él. Ejemplo: bolómetros (sub-mm).
- **Receptores coherentes (coherent receivers):** el material detector responde al campo eléctrico de la radiación, por lo que se puede medir incluso la fase de los fotones. Funcionan midiendo la interacción entre el campo del fotón incidente y un campo creado por un oscilador local coherente. Ejemplo: detectores radio.



# Parámetros fundamentales: sensibilidad espectral

La sensibilidad espectral representa la respuesta del detector a la llegada de radiación de diferente frecuencia.



Se mide con calibradores en el observatorio (fuentes patrón o lámparas espectrales) o con estrellas estándar durante la observación.



# Parámetros fundamentales: respuesta espectral

Curva de respuesta espectral de IRAC

Transmisión de los filtros de IRAC

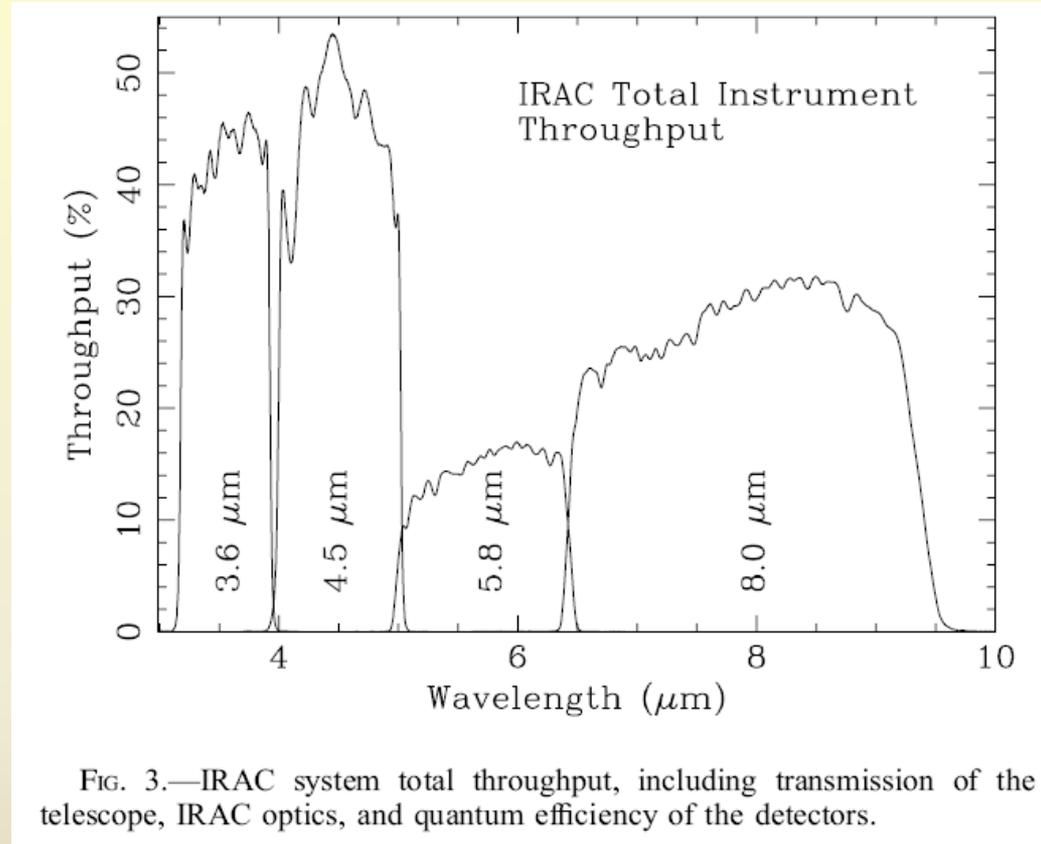
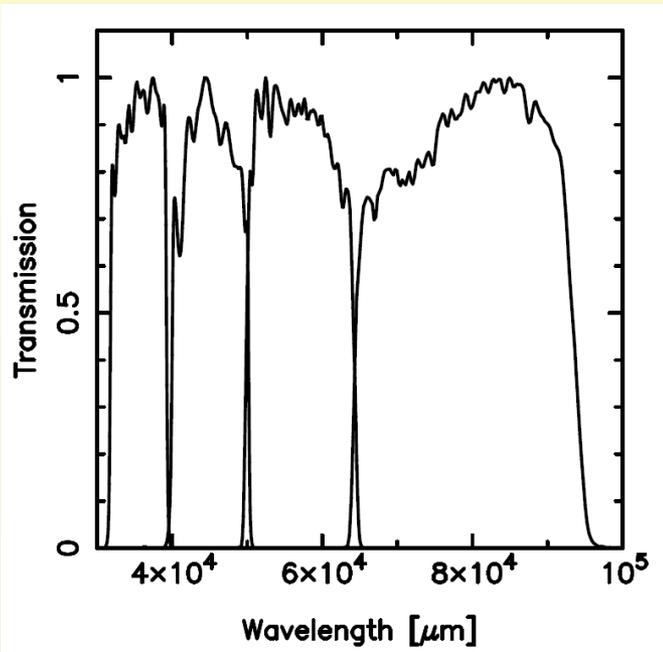


FIG. 3.—IRAC system total throughput, including transmission of the telescope, IRAC optics, and quantum efficiency of the detectors.

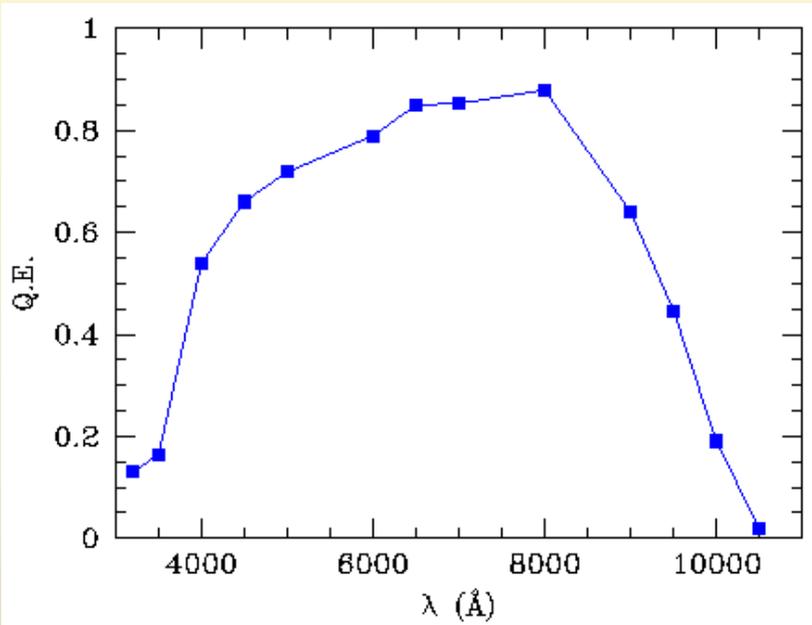
[http://ssc.spitzer.caltech.edu/irac/spectral\\_response.html](http://ssc.spitzer.caltech.edu/irac/spectral_response.html)

La curva de respuesta espectral de un sistema incluye los efectos de transmisión del telescopio, respuesta de los instrumentos y sensibilidad espectral del detector.

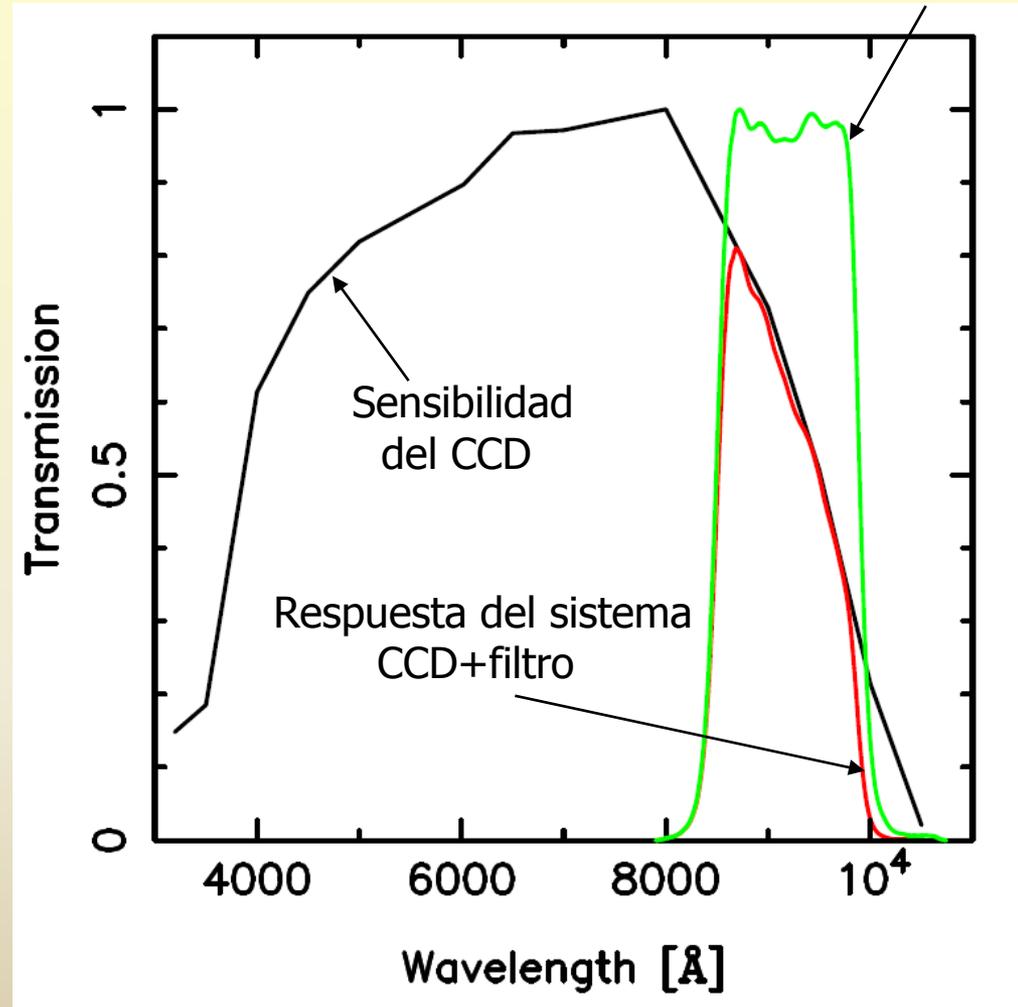


# Parámetros fundamentales: respuesta espectral

Subaru Suprime-Cam  
MIT/LL 2048x4096 CCD



Transmisión del filtro Sloan z



<http://www.naoj.org/Observing/Instruments/SCam/ccd.html>

Instrumentación Astronómica  
Curso 2011/2012

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



# Estrellas estándar

- Ejemplo de estrella estándar: Hiltner 600

ING Name: **SP0642+021**

RA **06<sup>h</sup> 45<sup>m</sup> 13<sup>s</sup>.4 (J2000)**

Dec **+02° 08' 15"**

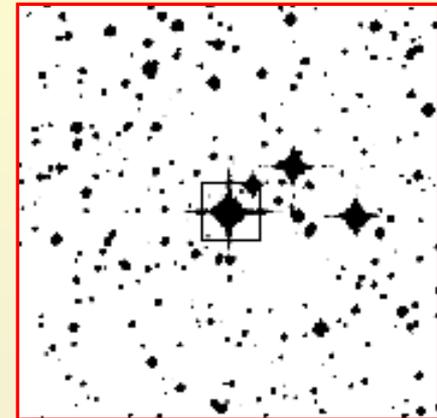
$m_{5556}$  = **10.42**

Spectral Type: **B1V**

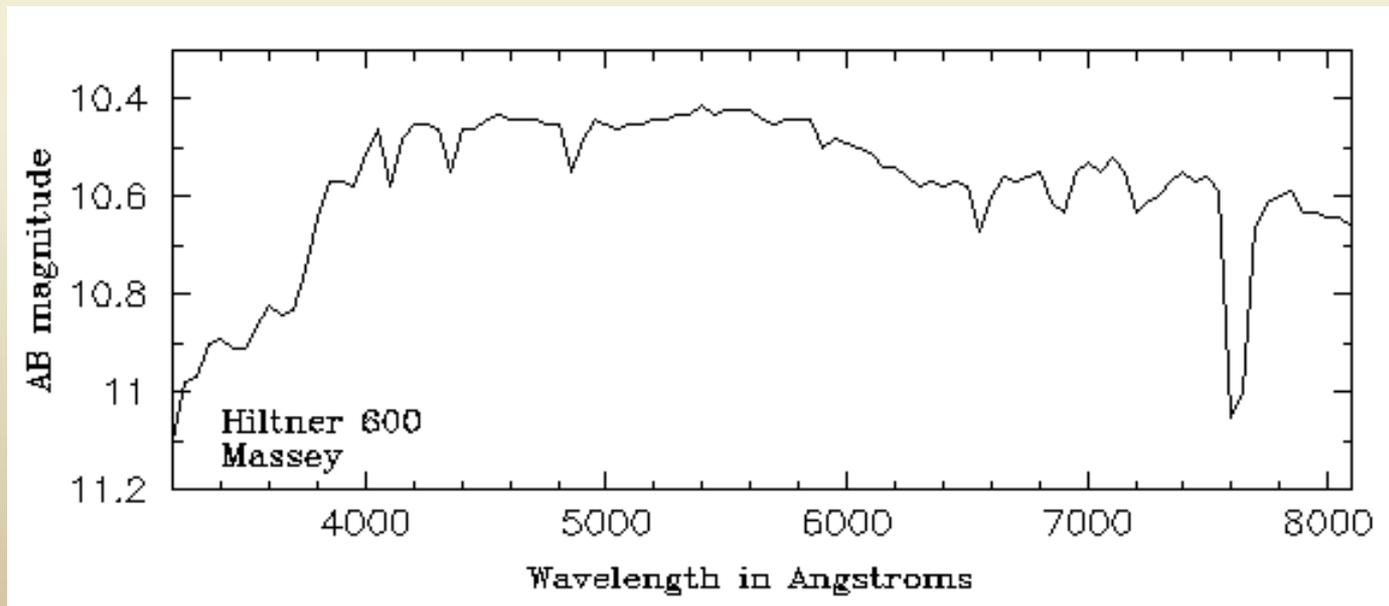
Source for flux data

Stone, ApJ. **218**, 767, 1977.

Massey, ApJ. **315**, 1988.



<http://www.ing.iac.es/~astrosw/standards.html>

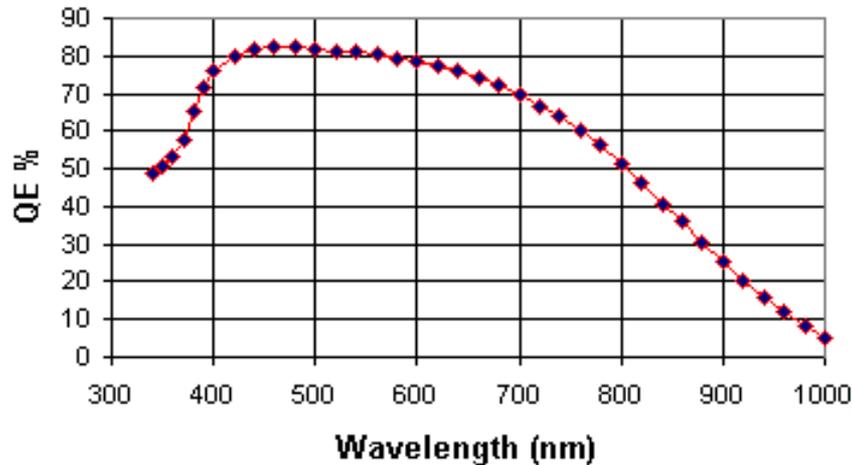




# Parámetros fundamentales: eficiencia cuántica

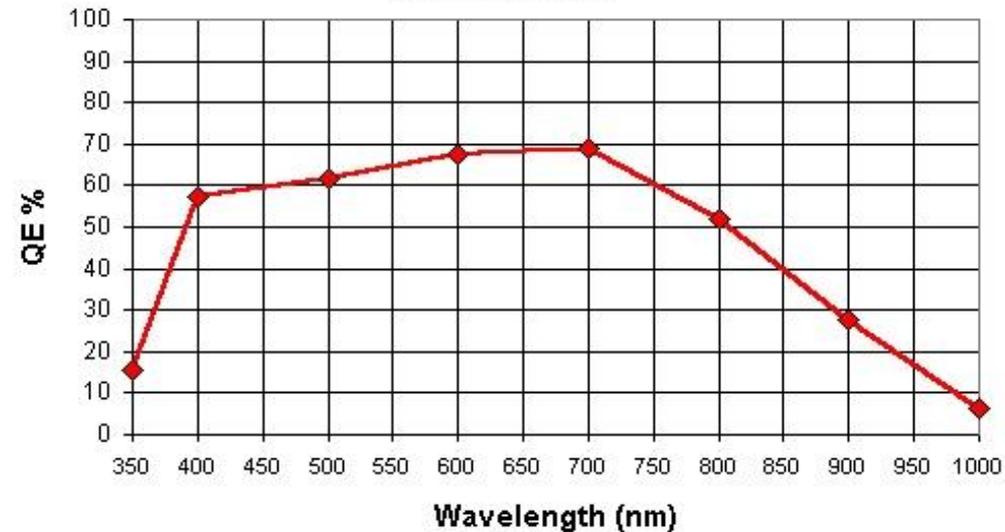
- La eficiencia cuántica (Q.E. Quantum efficiency) es el cociente entre número de fotones que contribuyen a proporcionar la señal y el número total de fotones.

EEV4280 Quantum Efficiency



QE para dos CCDs de la Palma

TEK2 QE Graph  
March 2002 SMT

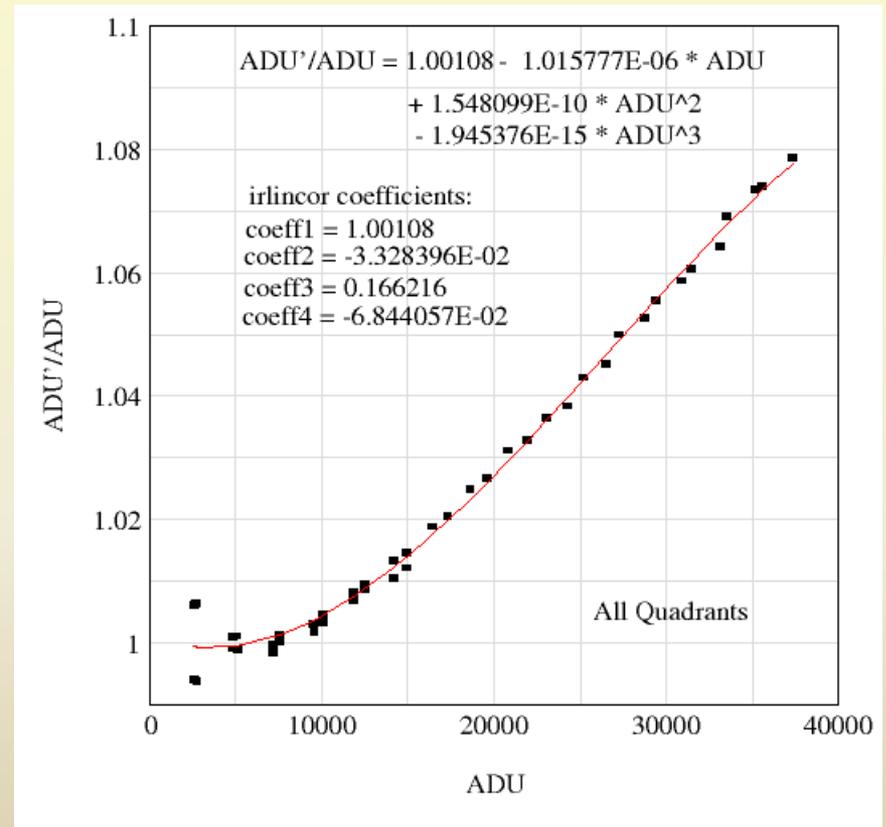
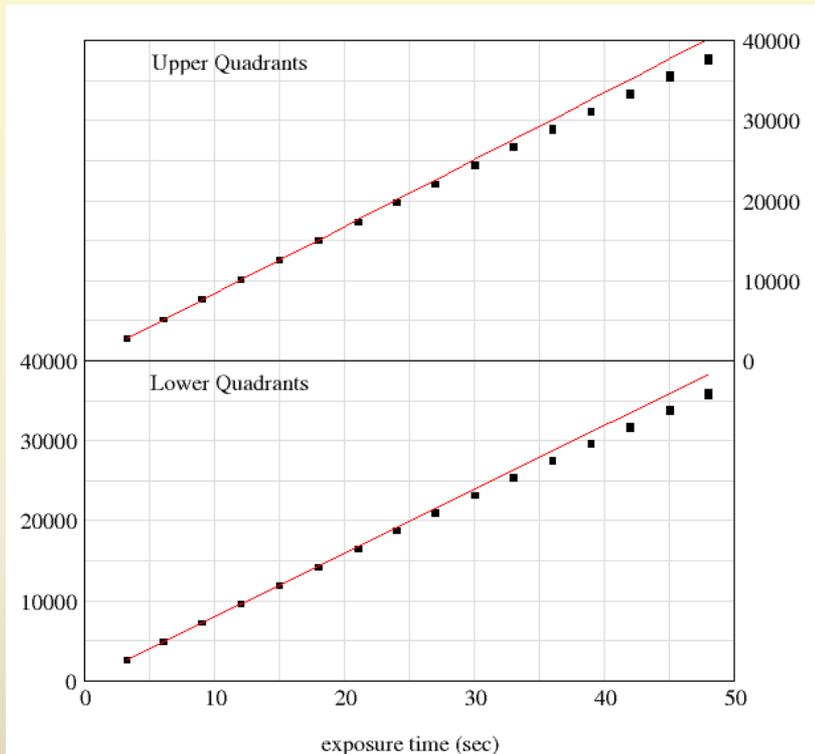


<http://www.ing.iac.es/Engineering/engweb6a.htm>



# Parámetros fundamentales: Linealidad

Linealidad: El detector lineal proporciona señales proporcionales (linealmente) a la llegada de fotones. Los detectores no lineales, como la emulsión fotográfica, necesitan una calibración adicional.



No linealidad de un detector de HgCdTe

[http://www.ctio.noao.edu/instruments/ir\\_instruments/osiris2soar/](http://www.ctio.noao.edu/instruments/ir_instruments/osiris2soar/)

Instrumentación Astronómica

Curso 2011/2012

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



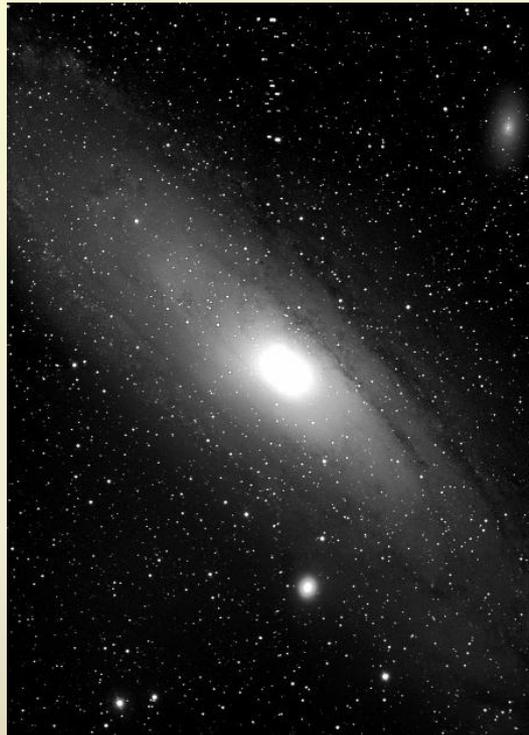
# Parámetros fundamentales: rango dinámico

Rango dinámico Es el cociente entre la máxima y mínima señal registrable.

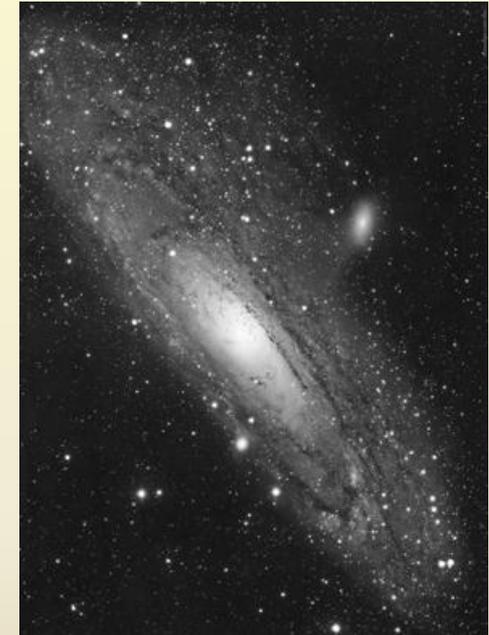
Mide la capacidad del detector para registrar señales de muy diferente nivel, sin saturarse.



1765, Isaac Roberts, Photo  
Great Andromeda Nebula, M31



M31 CCD 19x30s  
<http://www2.tcworks.net/~djlewis/>



M31 Mosaico (CCD)

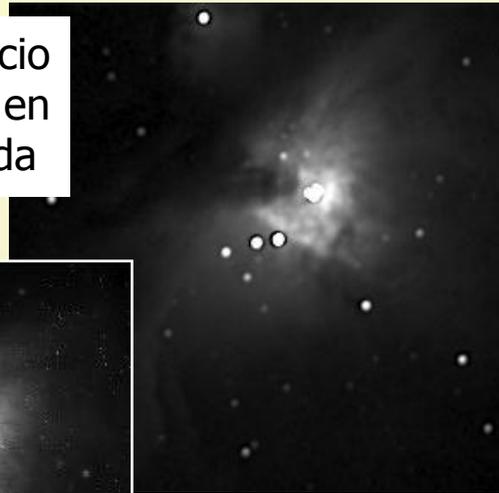
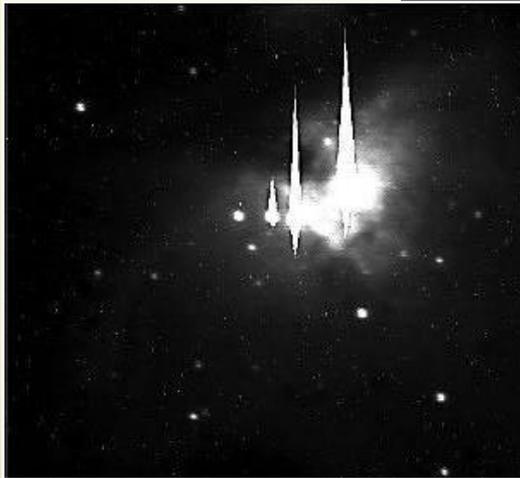
<http://www.robendlerastropics.com>



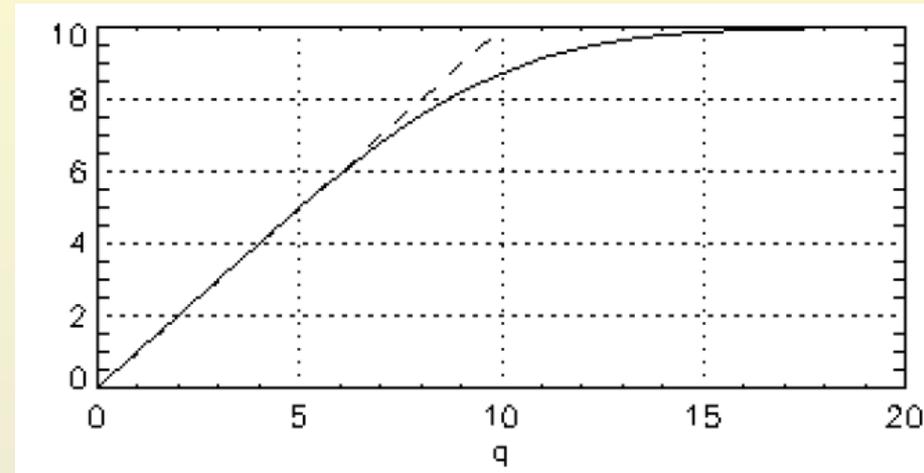
# Parámetros fundamentales: rango dinámico

Imágenes de la nebulosa de Orión

Las estrellas del Trapecio han saturado el CCD en la imagen de la izquierda



Relación entre la respuesta de un detector y el ritmo de llegada de fotones para un sistema de cuenta de fotones que se satura en 10 fotones/s.



Harvey E. Rhody SIMG-713  
Noise and Random Processes

<http://www.cis.rit.edu/class/simg713/notes/chap5-photon.pdf>

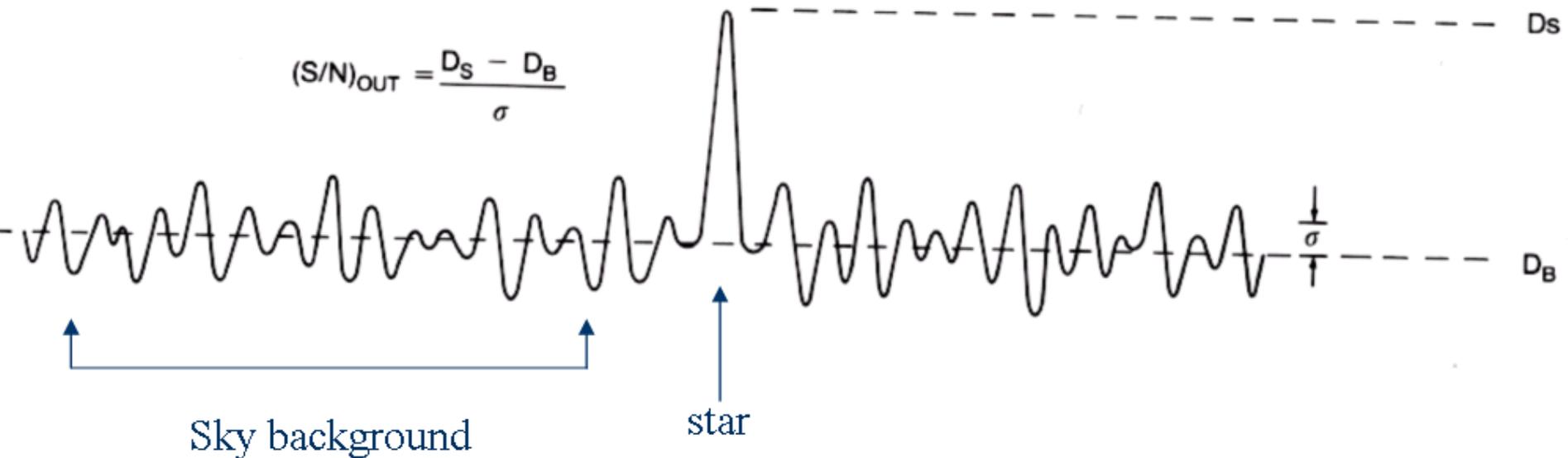
La saturación puede ocurrir porque el detector no es capaz de detectar todos los fotones incidentes en flujos altos de señal (sistemas de cuenta de fotones). También cuando el tiempo de exposición es demasiado alto (CCDs y fotografía).



# Parámetros fundamentales: Ruido

## Ruido

- Acompaña a toda señal registrada.
- El producido por el propio detector y puede ser reducido en parte.
- Ruido fotónico debido a la naturaleza estadística del proceso de medida.





# Ruido: Estadística de Poisson

La llegada y detección de fotones sigue la estadística de Poisson. Distribución de probabilidad  
Para la detección de gran número de fotones, la distribución de Poisson se acerca a una distribución normal (Gaussiana).

## Estadística de Poisson:

|                             |                             |
|-----------------------------|-----------------------------|
| N: fotones/s                | t: tiempo de exposición (s) |
| Señal N . t                 | (fotones)                   |
| Ruido (N .t) <sup>1/2</sup> | (rms de la señal)           |

$$f(k; \lambda) = \frac{e^{-\lambda} \lambda^k}{k!},$$

Media y varianza

$$\mu = \lambda$$

$$\sigma^2 = \lambda$$

$$S/N = \text{señal} / \text{ruido} = (N \cdot t)^{1/2}$$

$$SNR = \sqrt{N t}$$

Ejemplo:

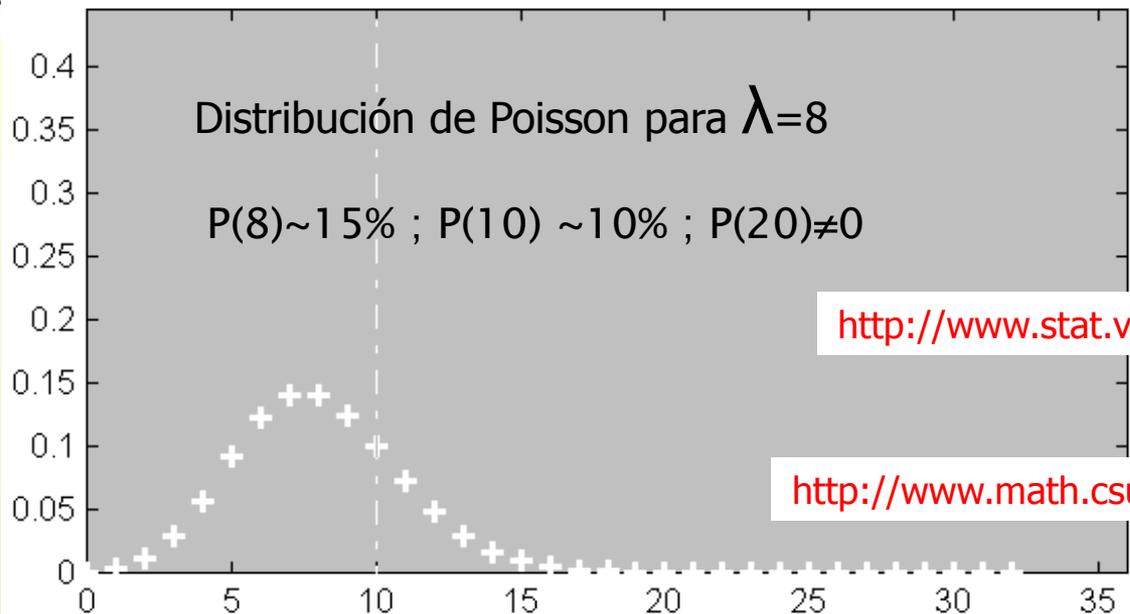
10<sup>4</sup> cuentas → SNR=100

Precisión 1%, 0.01 mag

Telescopios más grandes necesitan menos tiempo de integración para alcanzar una cierta S/N

| $\Phi$<br>(cm) | F<br>(c/s) | T(s) para<br>SNR=100 |
|----------------|------------|----------------------|
| 20             | 100        | 100s                 |
| 40             | 400        | 25 s                 |
| 80             | 1600       | 6.25                 |

# Relación Señal/Ruido



Applets de estadística en:

<http://www.stat.vt.edu/~sundar/java/applets/Distributions.html>

Applet de Distribución de Poisson:

<http://www.math.csusb.edu/faculty/stanton/probstat/poisson.html>

Simulación de observaciones de fotometría con CLEA:  
 5 exposiciones de 1s  
 Cuentas/s 75977 (media)  
 Señal (cuentas) 379886  
 $S/N = (379866)^{1/2} = 616$

**CLEA Photometer Window**

Record Readings    Return

**Start Count**     Elapsed    1.0    **Completed**    5

**Filter**    V    **Seconds**    1.0    **Integrations**    5

|         |                |            |            |
|---------|----------------|------------|------------|
| Object: | HD 23568       | Raw Counts | Mean       |
| Obs UT: | 21h 50m 39.9s  | 76254      | Counts/Sec |
| Obs JD: | 2452711.410184 | 76055      | 75977      |
|         |                | 75835      | S/N Ratio  |
|         |                | 75999      | 616        |
|         | Mean Sky       | 75743      | Magnitude  |
|         | V: 14.9        |            | V: 6.799   |
|         | Counts/Sec     |            |            |

<http://public.gettysburg.edu/~marschal/clea/>



# Relación Señal/Ruido

## Ejemplo de fotometría:

### Supongamos:

Estrella de  $m=15$  de la que se reciben  $10^{-3}$  fotones/cm<sup>2</sup>/s/Å ( $\lambda=5000$  Å).

Usamos un fotómetro que integra en una banda de  $\Delta\lambda=30$  Å.

Observamos con un telescopio de  $\Phi=500$  cm

La eficiencia del sistema es del 50% (incluyendo QE y transmisión de la óptica)

### ¿ S/N para 1s de integración ?

$$S = 10^{-3} \text{ fotones/cm}^2/\text{s}/\text{Å} \times \pi (500/2)^2 \text{ cm}^2 \times 30 \text{ Å} \times 1 \text{ s} \times 0.5 = 2945.2 \text{ cuentas}$$

$$S/N = \text{sqrt}(2945.2) = 54.3$$

### Otras cuestiones:

¿ S/N para 100s de integración ?

¿ T integración para SNR=30 observando una estrella de  $m=20$  ?

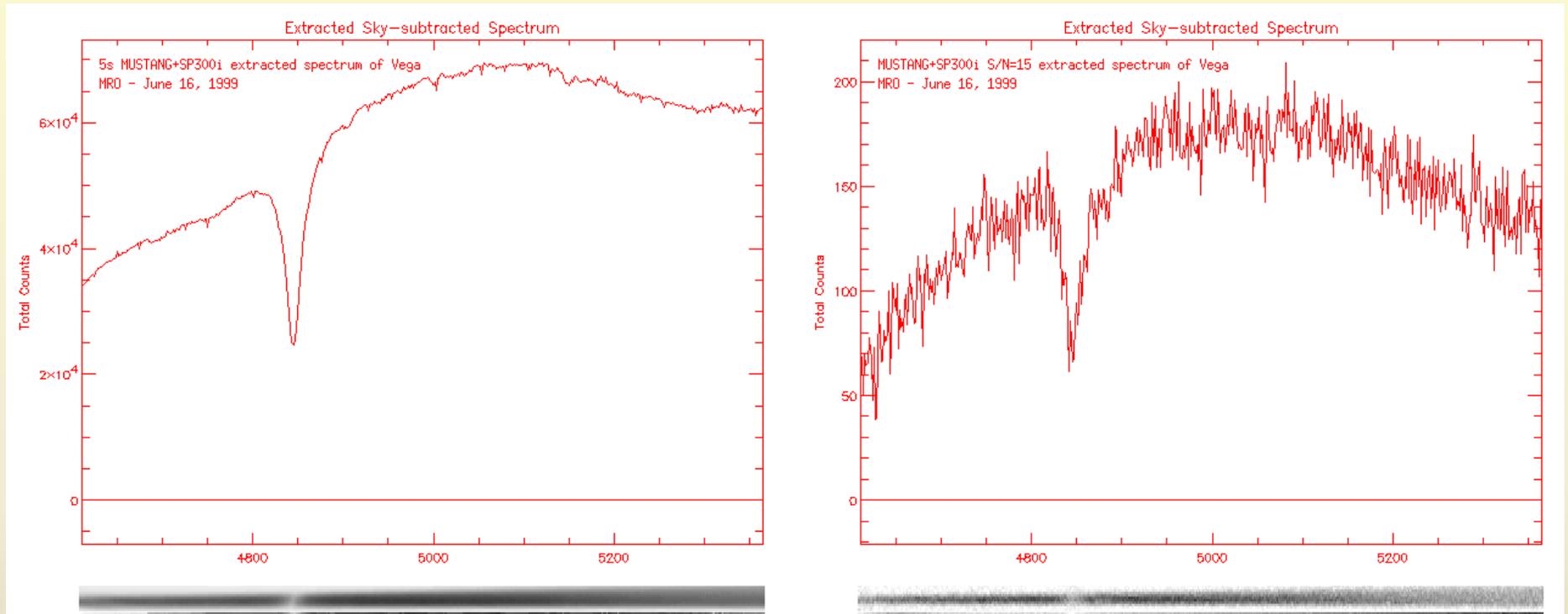
(en la misma banda y suponiendo que el detector es lineal)



# Relación Señal/Ruido

Relación Señal/Ruido (S/N signal-to-noise ratio)

- Cociente entre el valor de la señal y el del ruido.
- Sirve para valorar la calidad de la medida.



Espectro de Vega obtenido con el espectrógrafo SP300i.

La relación señal-ruido es mucho mejor en el primero que en el segundo.

By Eric Deutsch Department of Astronomy, University of Washington

<http://www.astro.washington.edu/deutsch/mro/spec/>

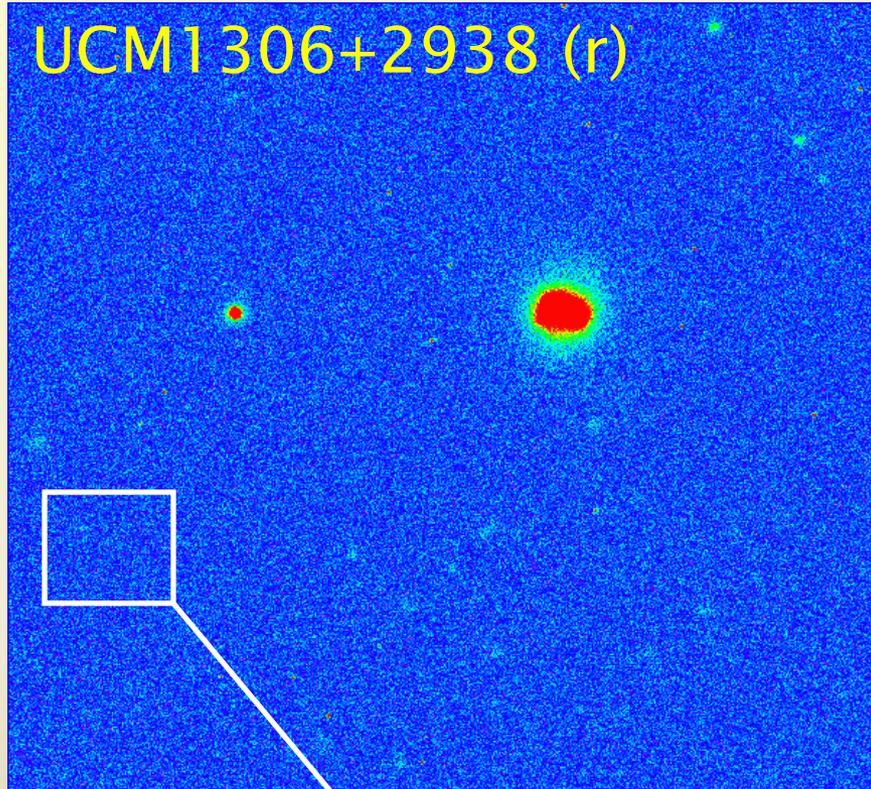
Instrumentación Astronómica  
Curso 2011/2012

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



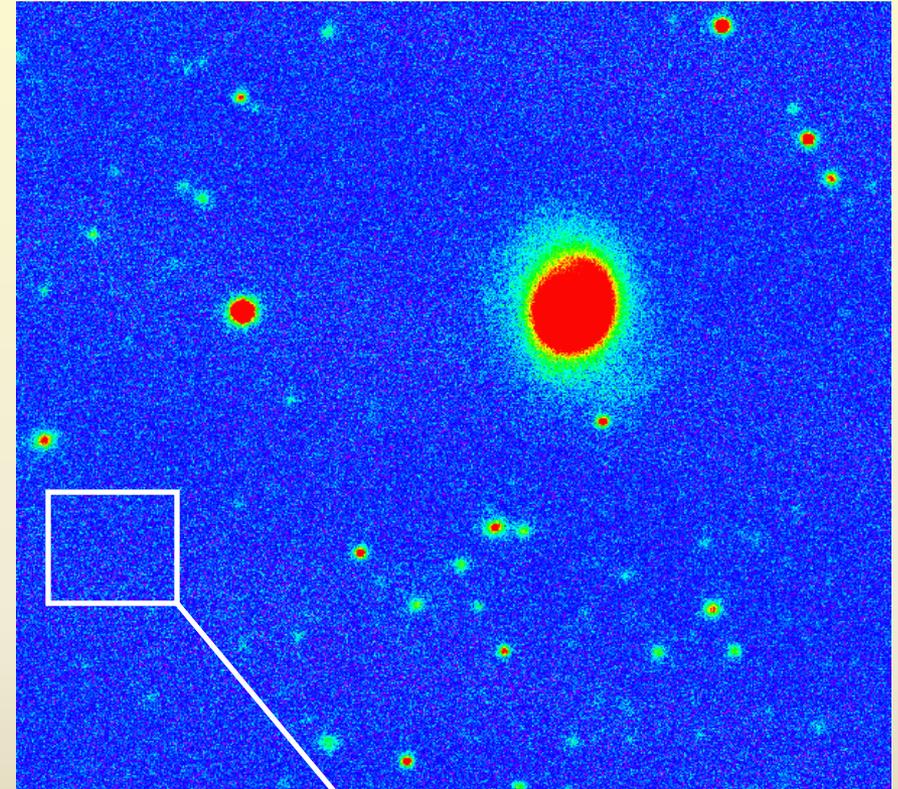
# Relación Señal/Ruido

Dos imágenes del mismo campo y con diferente S/N



$18.5 \pm 6$

$S/N \approx 3$



$1150 \pm 30$

$S/N \approx 40$



# DETECTORES: Parámetros fundamentales

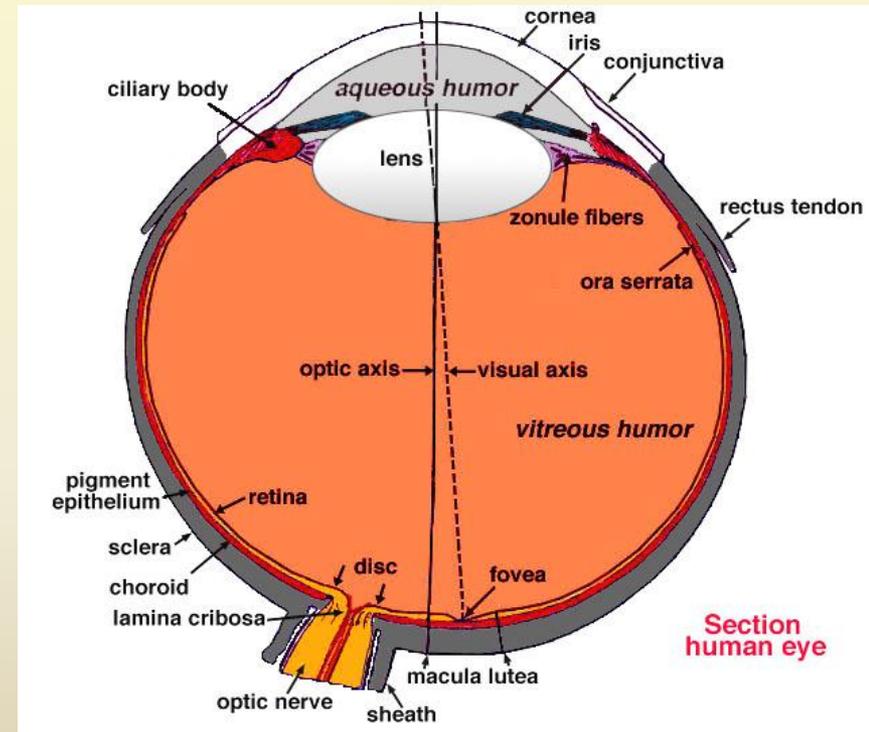
- Otros parámetros:
  - Tamaño.
  - Resolución espacial. Píxel.
  - Estabilidad de la respuesta. Repetibilidad.
  - Estabilidad geométrica.
  - Tiempo muerto.
  - Señal umbral.



# El ojo humano como detector

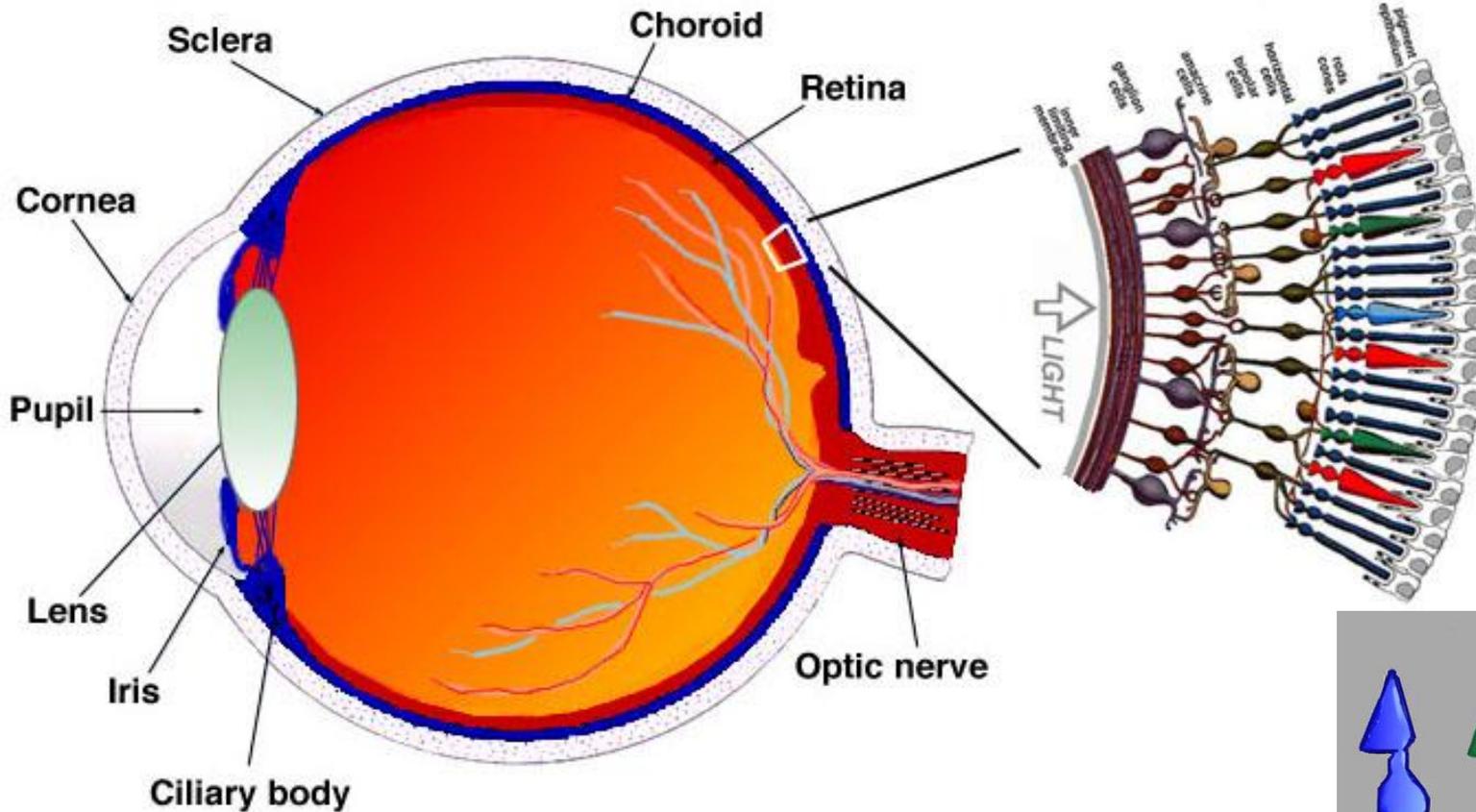
- El ojo fue el primer detector empleado en astronomía.
- Es un instrumento óptico (ojo)  
+ detector (retina)  
+ procesador (cerebro)
- La imagen (invertida) en la retina sufre de aberración cromática.
- Rango de iluminación  $\sim 10^8$   
(pero rango dinámico pequeño)
- Resolución espacial  $\sim 2'$
- Percibe diferencias del 2% en iluminación y de 1nm en color.
- Detecta variaciones rápidas (30Hz).
- QE:  $\sim 1-2\%$ .

El cerebro procesa la información en tiempo real.



La respuesta del ojo es logarítmica → No es un detector lineal  
El ojo no es capaz de integrar. mag límite  $\sim 6$  ( $3 \times 10^{-15}$  vatios)

# El ojo humano como detector



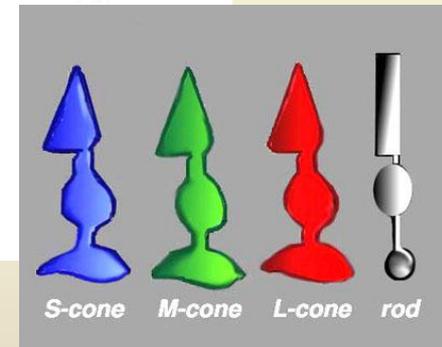
- Dos tipos de células fotorreceptoras:

–Conos (RGB, inoperantes con baja iluminación)

detectan color

–Bastoncillos (BW, 100x más sensibles)

no detectan color





# El ojo humano como detector

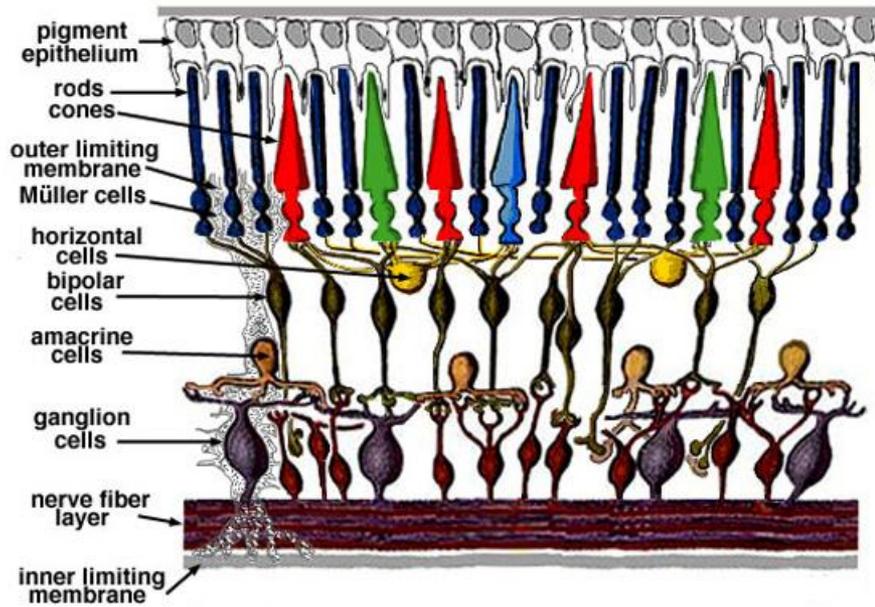


Fig. 2. Simple diagram of the organization of the retina.

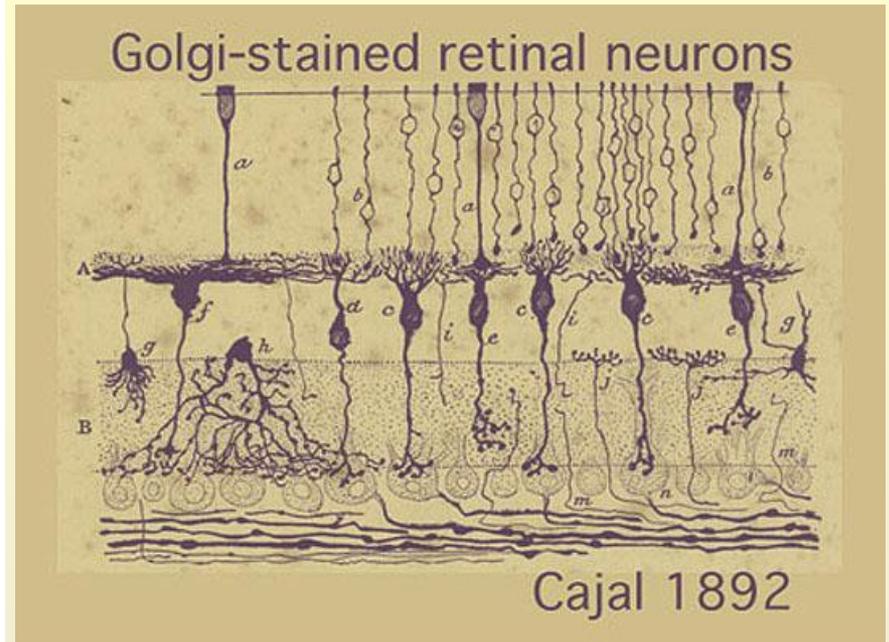


Fig. 2. A drawing done by Cajal to show some of the neurons of the retina in vertical section.

Visión fotópica  
Visión escotópica

con suficiente iluminación  
baja iluminación

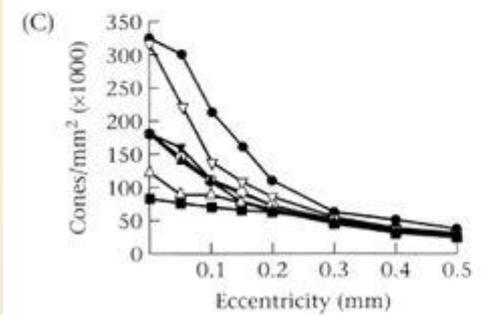
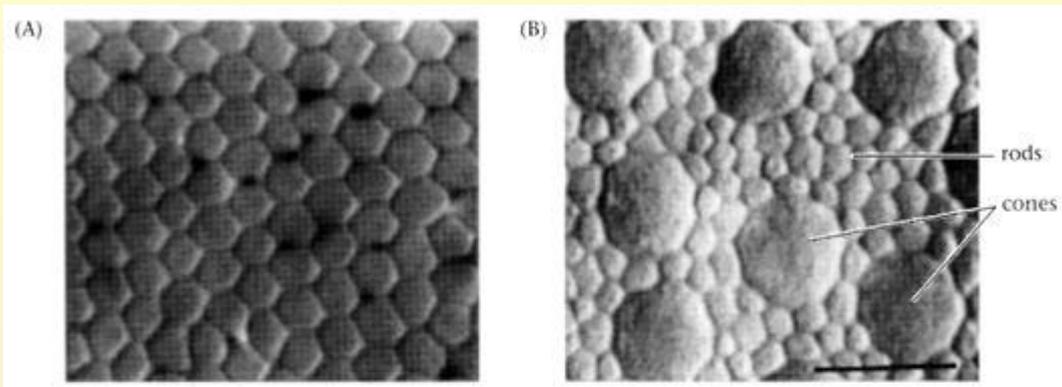
conos  
bastoncillos

color  
grises

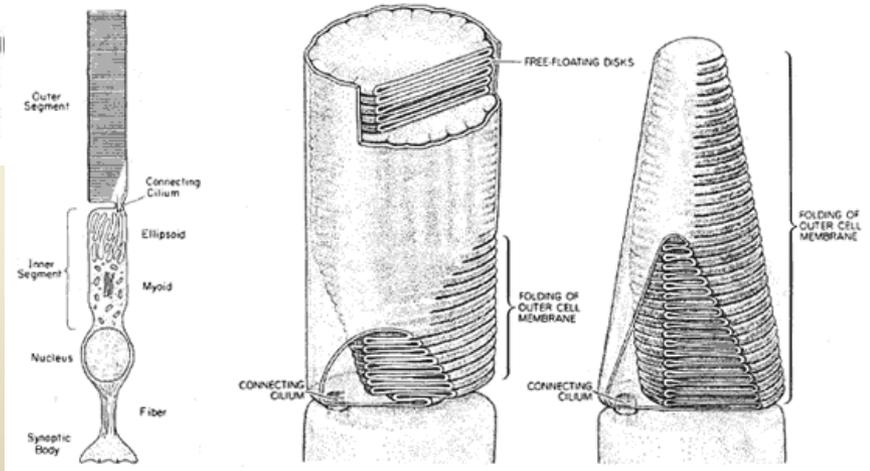
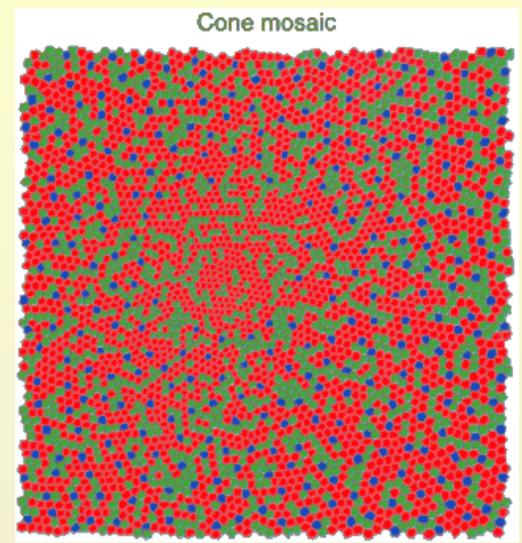
*‘Por la noche todos los gatos son pardos’*



# El ojo humano como detector



**3.4 THE SPATIAL MOSAIC OF THE HUMAN CONES.** Cross sections of the human retina at the level of the inner segments showing (A) cones in the fovea, and (B) cones in the periphery. Note the size difference (scale bar = 10  $\mu$ m), and that, as the separation between cones grows, the rod receptors fill in the spaces. (C) Cone density plotted as a function of distance from the center of the fovea for seven human retinas; cone density decreases with distance from the fovea. Source: Curcio et al., 1990.



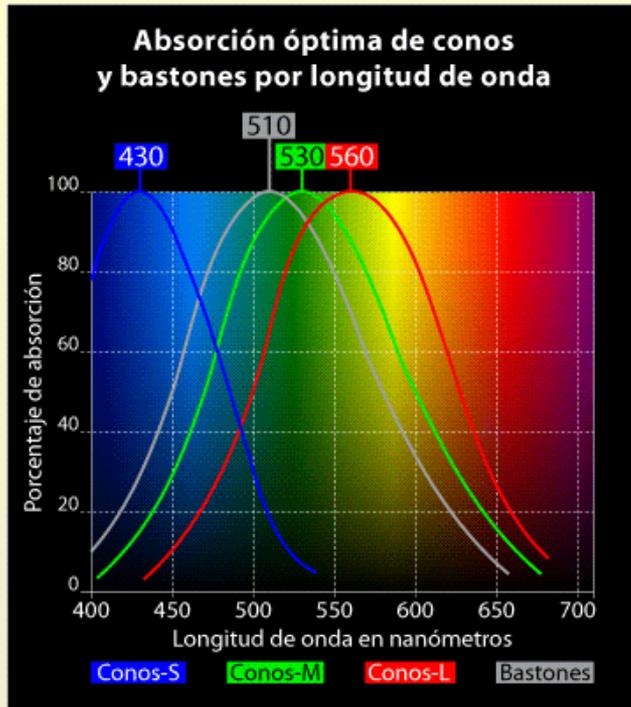
At the left is a generalized conception of the important structural features of a vertebrate photoreceptor cell. At the right are shown the differences between the structure of rod (left) and cone (right) outer segments. These diagrams are from Young (1970) and Young (1971).

[http://www.cis.rit.edu/people/faculty/montag/vandplite/pages/chap\\_9/ch9p1.html](http://www.cis.rit.edu/people/faculty/montag/vandplite/pages/chap_9/ch9p1.html)



# El ojo humano como detector

[http://www.gusgsm.com/vision\\_color](http://www.gusgsm.com/vision_color)



## Efecto Purkinje

Máxima respuesta de los bastoncillos en  $\sim 500$  nm, mientras que la respuesta combinada de los conos es máxima en  $\sim 550$  nm.

## Proceso de la visión

En los bastones existe un pigmento (Rodopsina) que es una proteína que absorbe la radiación.

Se desprende Retinaldehído (un derivado de la vitamina A) en la absorción de fotones.

La molécula de rodopsina se regenera poco a poco.

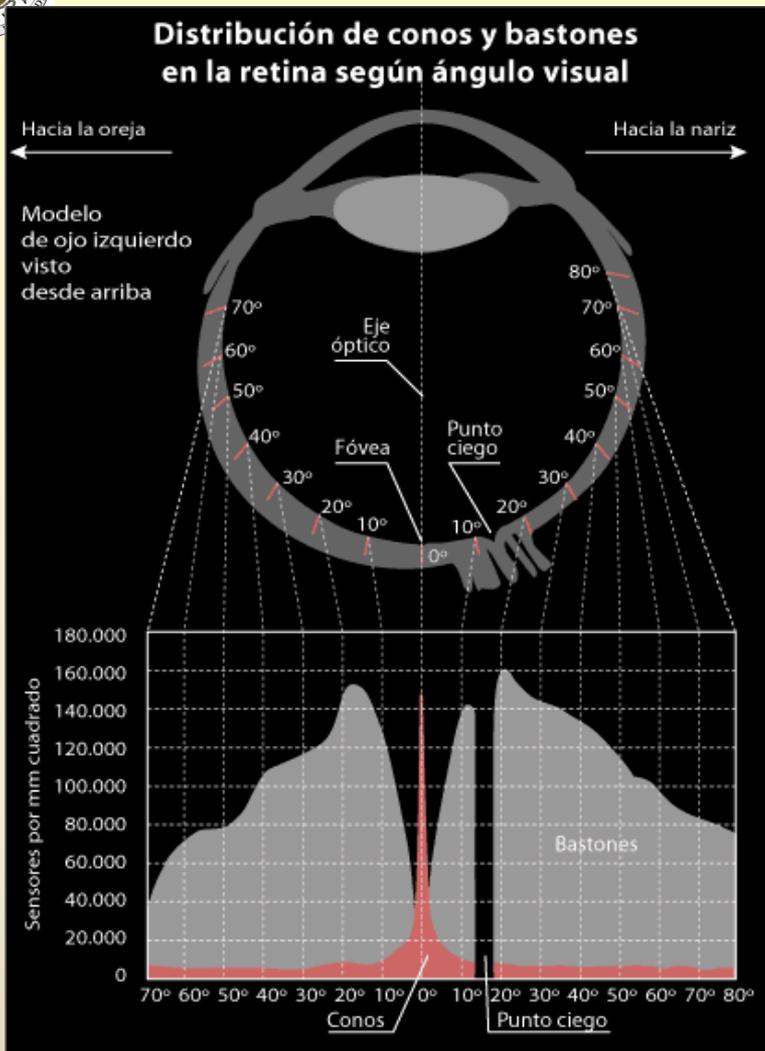
El ojo necesita un periodo de adaptación para observar en niveles bajos de iluminación.

Más información en la página sobre la visión de Milagros Medicina en la Universidad de Zaragoza

[http://www.unizar.es/departamentos/bioquimica\\_biologia/docencia/Biofvirtual/Tema-Vis/Vision.htm](http://www.unizar.es/departamentos/bioquimica_biologia/docencia/Biofvirtual/Tema-Vis/Vision.htm)



# El ojo humano como detector



$\sim 6 \times 10^6$  Conos (cerca fovea centralis)

$\sim 10^8$  Bastoncillos (periferia)

$\sim 10^6$  Nervios

Para observación visual astronómica se emplean los bastoncillos.

Técnicas de aficionados para observación  
Vision and the amateur Astronomer  
(1984) Sky & Telescope 67,321 Bowen & Ford

<http://www.fortunecity.com/roswell/borley/49/visual.htm>

[http://www.gusgsm.com/vision\\_color](http://www.gusgsm.com/vision_color)

Visión periférica (averted vision) *'Por la noche se ve mejor con el rabillo del ojo'*

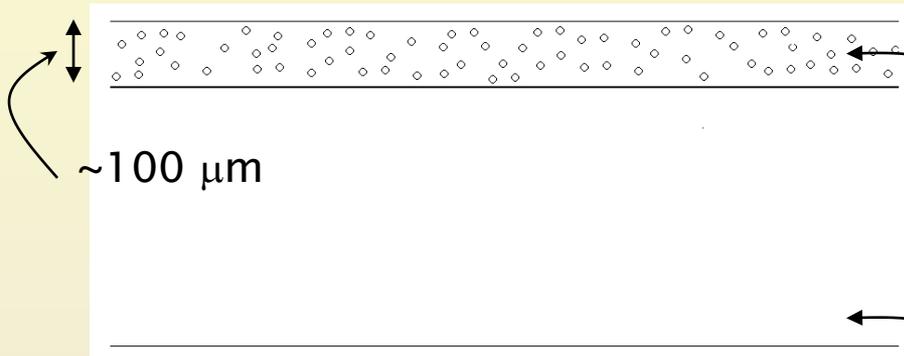
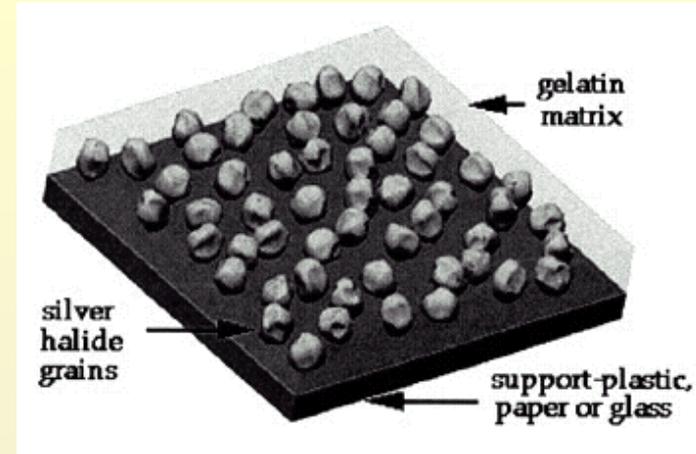
**Instrumentación Astronómica**  
**Curso 2011/2012**

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



# Emulsión fotográfica

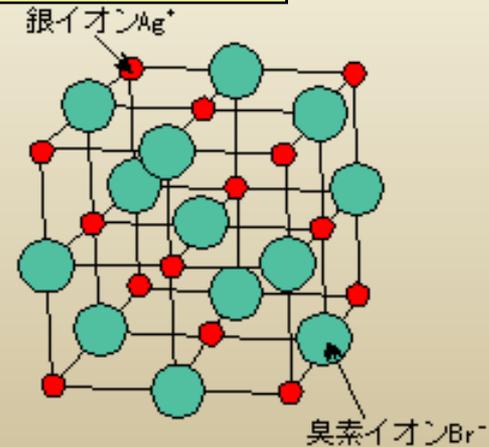
- Utilizada desde el siglo XIX.
- Placa fotográfica: emulsión depositada sobre un vidrio.



Gelatina + granos de haluros de plata.

Vidrio o acetato, actúa como soporte y le da estabilidad.

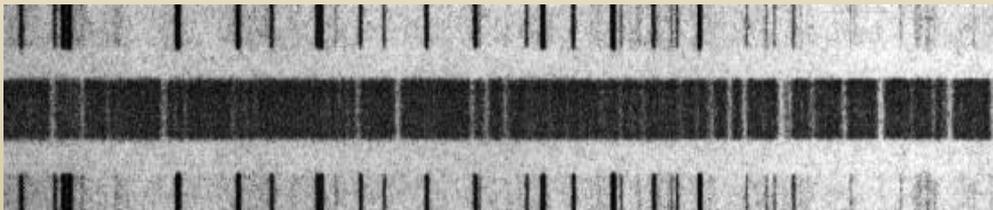
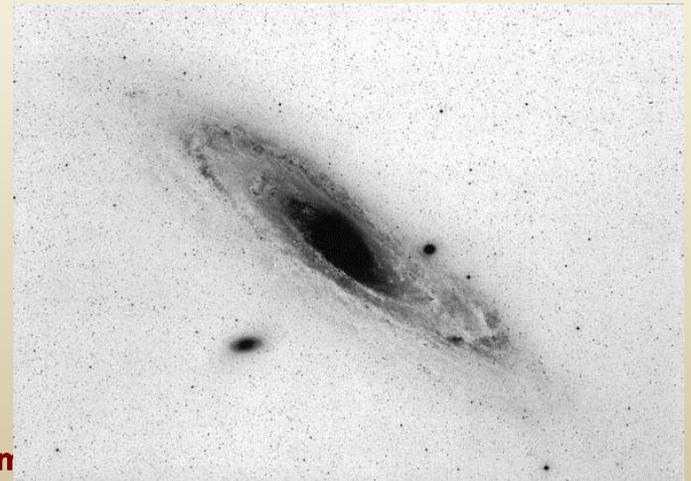
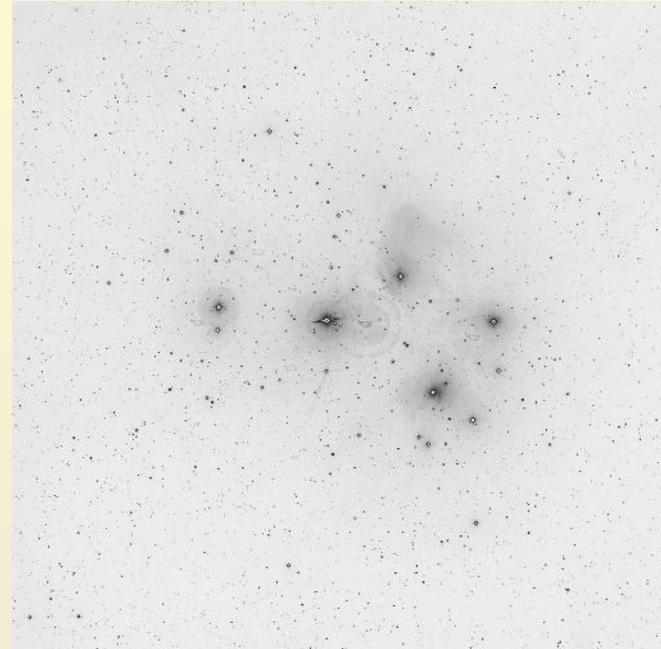
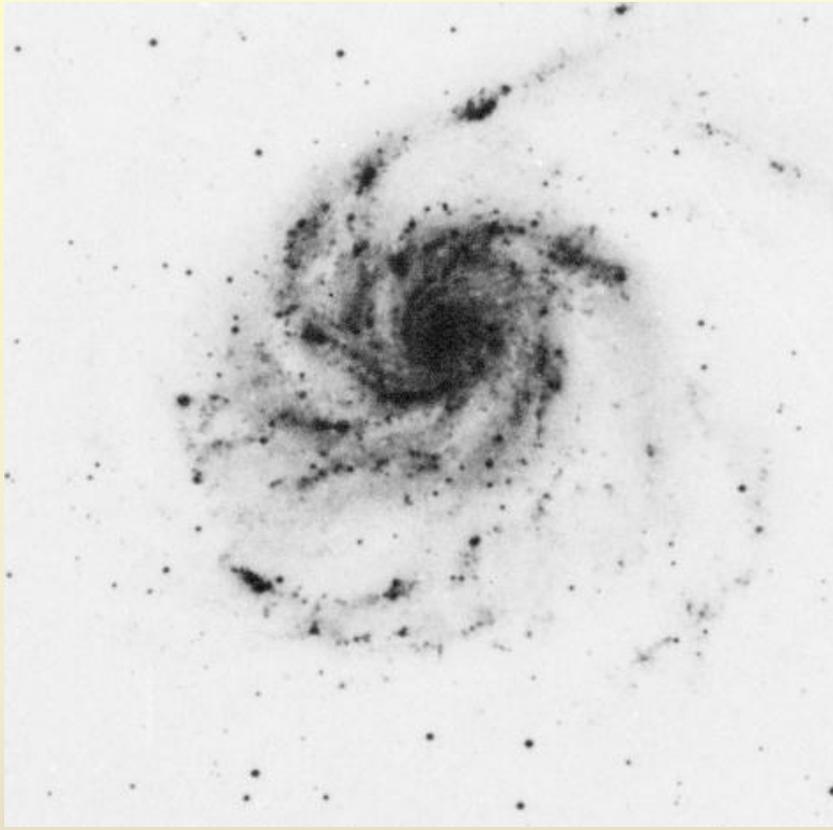
- Emulsión:
  - + Gelatina (contenedor)
  - + Cristales de haluros de plata (AgBr)
    - Ocupan 10% del volumen (estructura cúbica)
    - Distancia entre iones  $\sim 2.8 \cdot 10^{-4}$  mm
    - Tamaño del grano 0.1 - 1.4  $\mu$ m
  - + Sensibilizadores químicos.





# Emulsión fotográfica

En astronomía fotografía B y N  $\rightarrow$  escala de grises.



**Instrumentación Astronón**  
**Curso 2011/2012**

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

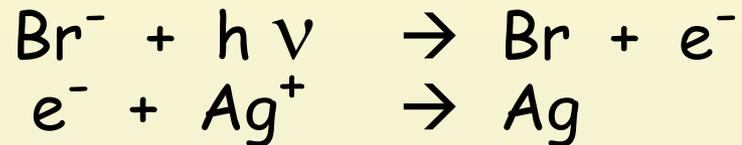


# Emulsión fotográfica

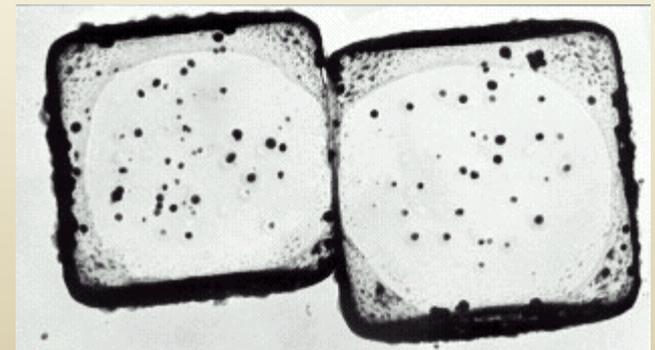
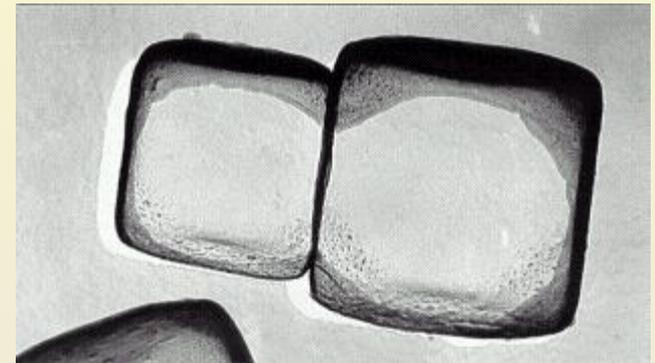
- Exposición:

Absorción de un fotón →

- Electrón salta a la banda de conducción (fotoelectrón)
- Fotoelectrón atrapado por un defecto en el cristal.
- Fotoelectrón atrae a un ión de plata.



- Si 3 ó 4 veces en el mismo sitio  
→ grano revelable → Imagen latente.
- El proceso es reversible  
(por eso hay que revelar pronto)





# Emulsión fotográfica

- **Revelado:** proceso de reducción química selectiva que afecta sólo a los granos de la imagen latente. En estos granos todos los iones de plata se convierten en plata metálica durante el proceso ( $\text{Ag}^+ \rightarrow \text{Ag}$ )

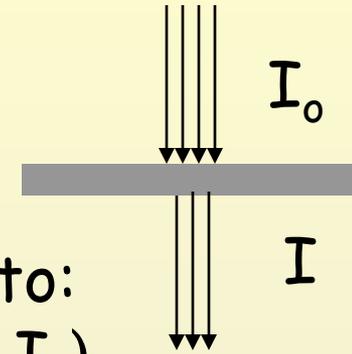


Imagen negativa en escala de grises  
Más oscuras las zonas más expuestas

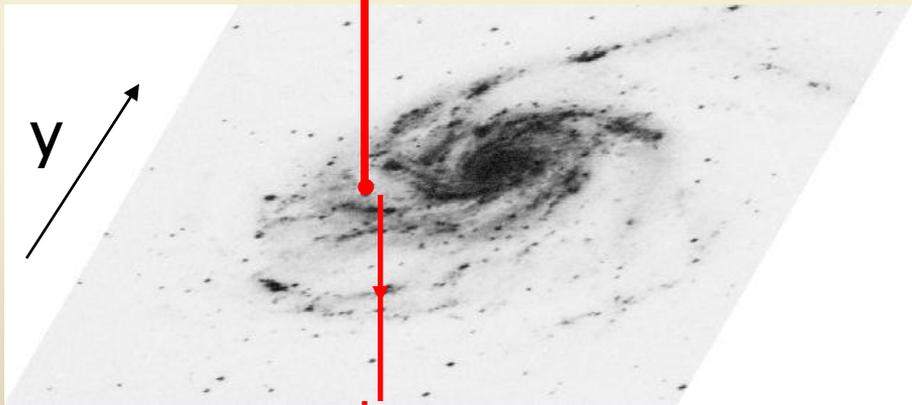


# Emulsión fotográfica

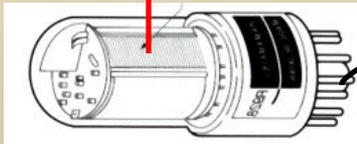
Se necesitan microdensitómetros para convertir las placas fotográficas en imágenes digitales



Medida de ennegrecimiento:  
 $D$  (densidad) =  $\log ( I_0 / I )$



$D(i,j)$



**A/D**



Instrumentación Astronómica  
Curso 2011/2012

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



# Emulsión fotográfica

$$E = I \cdot t$$

Exposición: energía recibida por unidad de área.

I  
t

Irradiancia: energía por unidad de área y tiempo.

Tiempo de exposición.

La emulsión fotográfica NO es un detector lineal y se necesita conocer la **curva característica** (respuesta de la emulsión a la llegada de radiación) para calibrar.

Transmisión

$$T = I/I_0$$

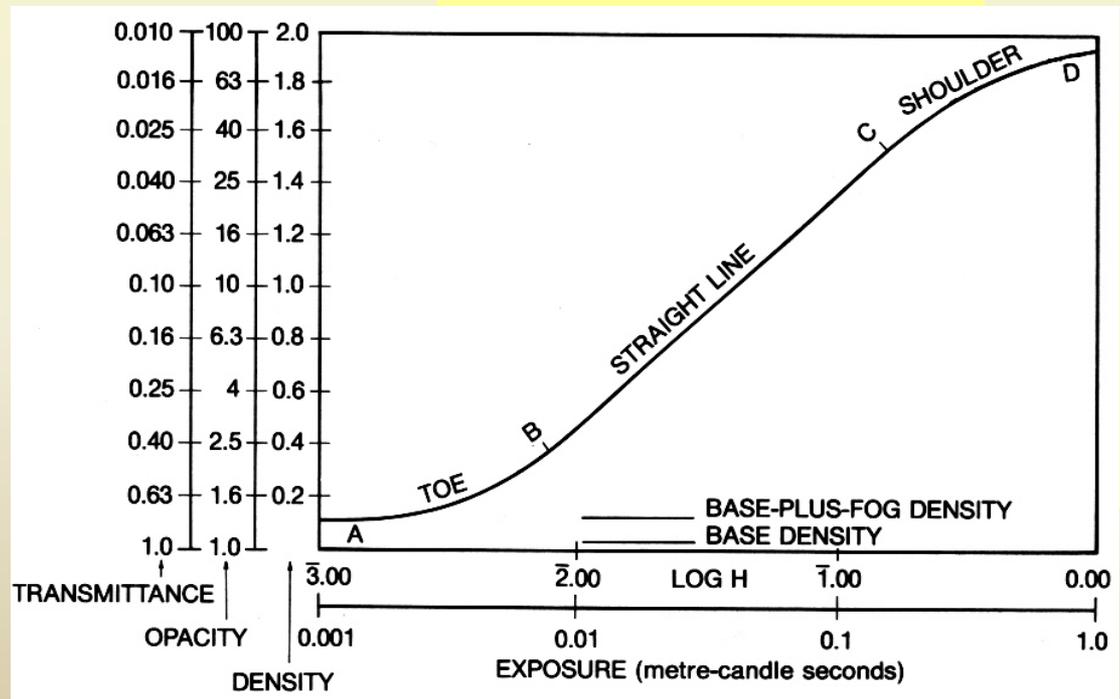
Opacidad

$$O = 1/T = I_0/I$$

Densidad

$$D = \log_{10} O = -\log_{10} T$$

exposición (log E)



Densidad (D)



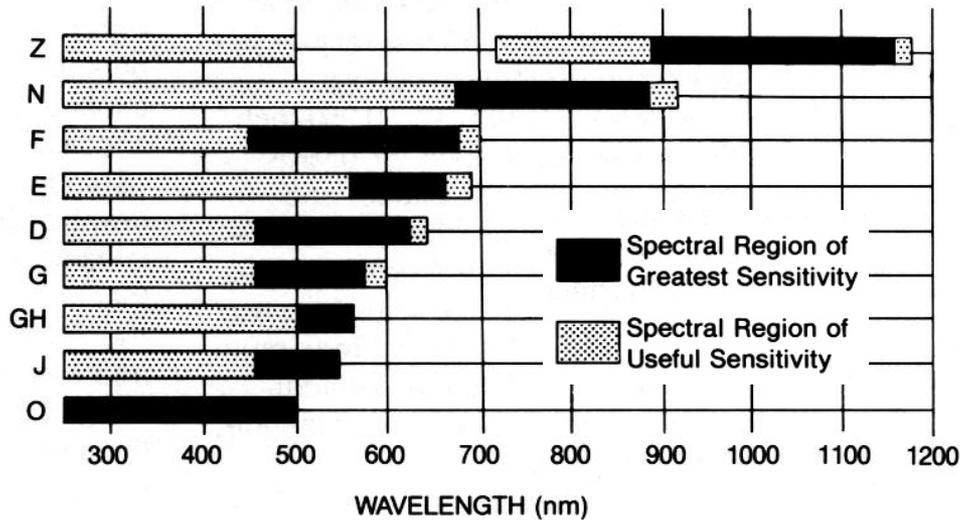
# Emulsión fotográfica

La curva característica de una placa fotográfica depende de:

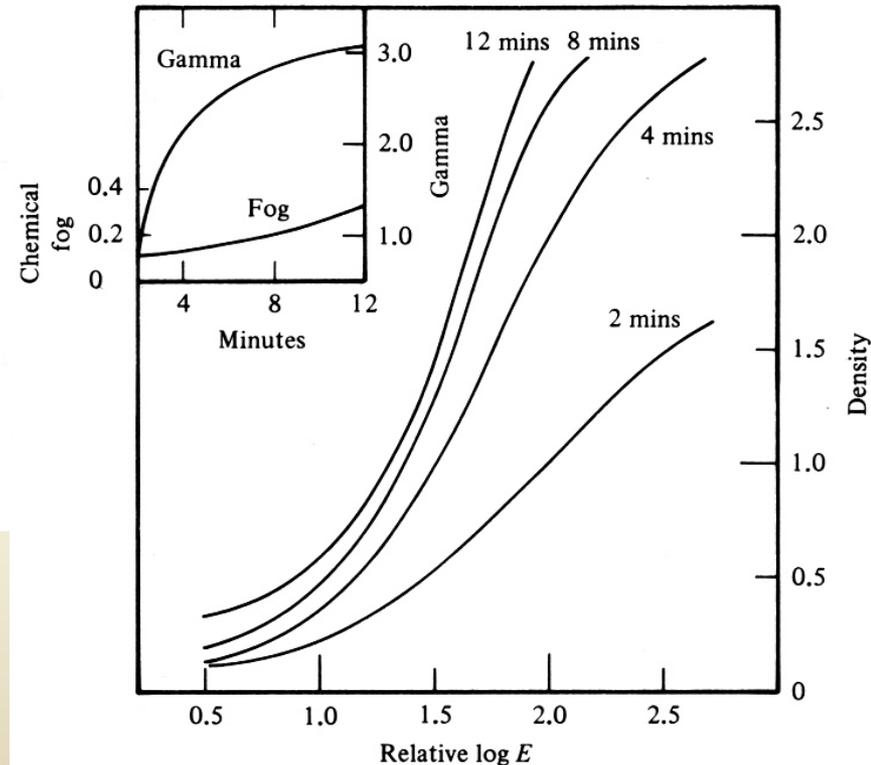
- Las características de la emulsión

- Revelado (composición, pureza, temperatura y tiempo de revelado)

## SPECTRAL SENSITIZATION



- Iluminación, duración de la exposición, lote, estado de la emulsión...

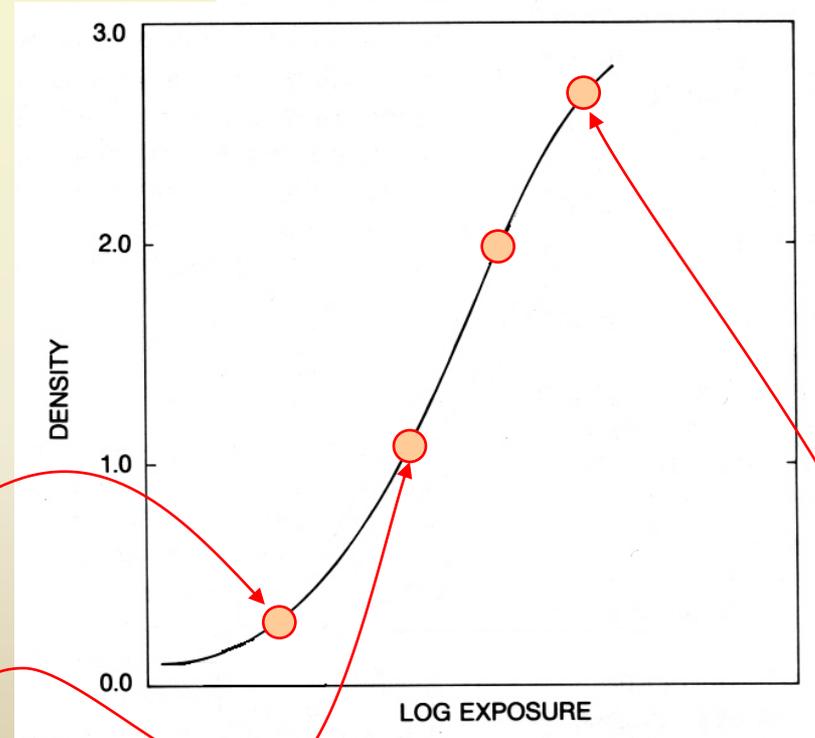
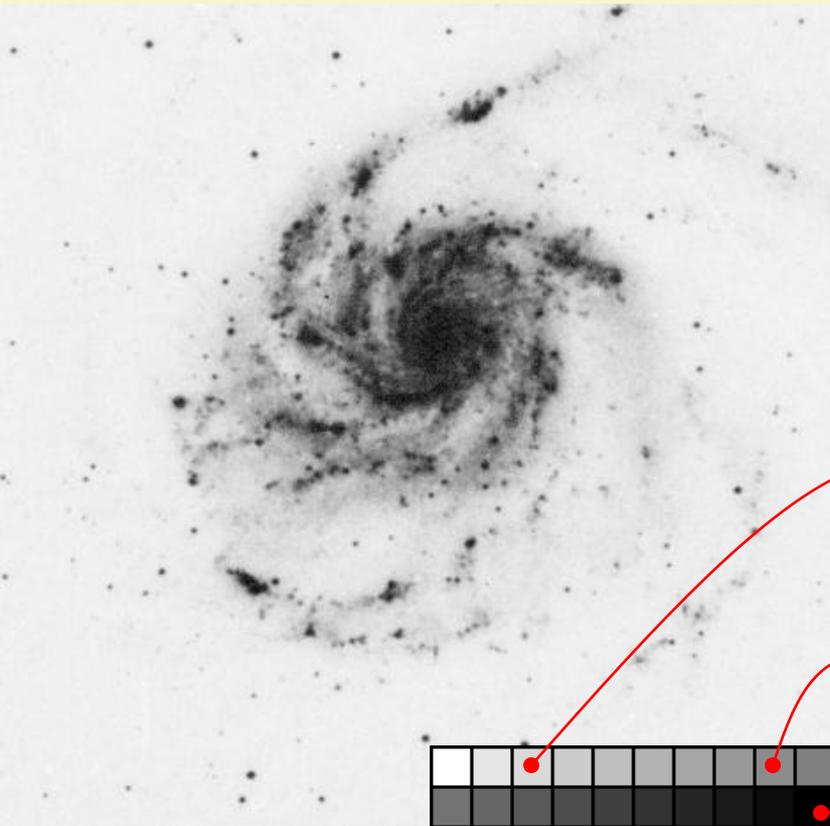
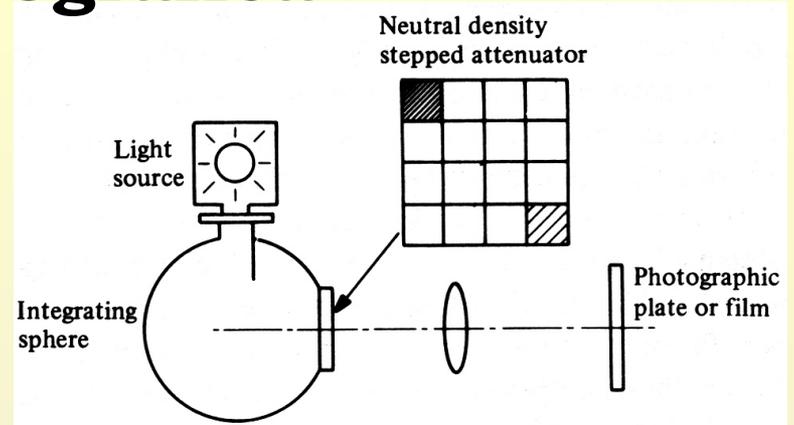


¡Una curva característica diferente para cada emulsión y exposición !



# Emulsión fotográfica

Obtención de la curva característica en una placa fotográfica mediante escala de exposiciones.





# Emulsión fotográfica

## VENTAJAS

- TAMAÑO: hasta  $50 \times 50 \text{ cm}^2$
- CAPACIDAD DE ALMACENAMIENTO:
  - Píxel de  $5 \mu\text{m} \rightarrow 4 \times 10^4$  píxeles/ $\text{mm}^2$  ,  
 $2^8$  ó 256 niveles  $\rightarrow$  una placa de  $356 \times 356 \text{ mm}^2$   
almacena  $3 \times 10^{10}$  bits de información.
- PERMANENCIA
- ESTABILIDAD GEOMÉTRICA

## INCONVENIENTES

- INEFICIENCIA: Q.E.  $< 5\%$  (sensibilizando)
- RANGO DINÁMICO PEQUEÑO
- NO LINEAL
- NO FORMATO DIGITAL

¡Es muy engorroso trabajar con placas fotográficas,  
cada vez se usan menos !



# Resumen de contenidos

- **Resolución espacial, espectral y temporal en Astronomía.**
- **Tipos de detectores de luz.**
- **Parámetros principales de los detectores.**
- **SNR. Dependencia con distintos parámetros de la observación.**
- **El ojo como detector.**
- **Las placas fotográficas.**