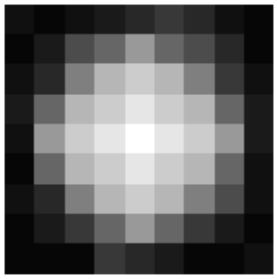
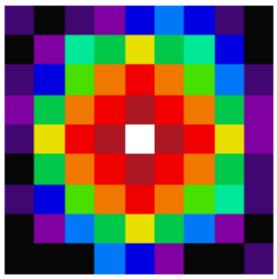
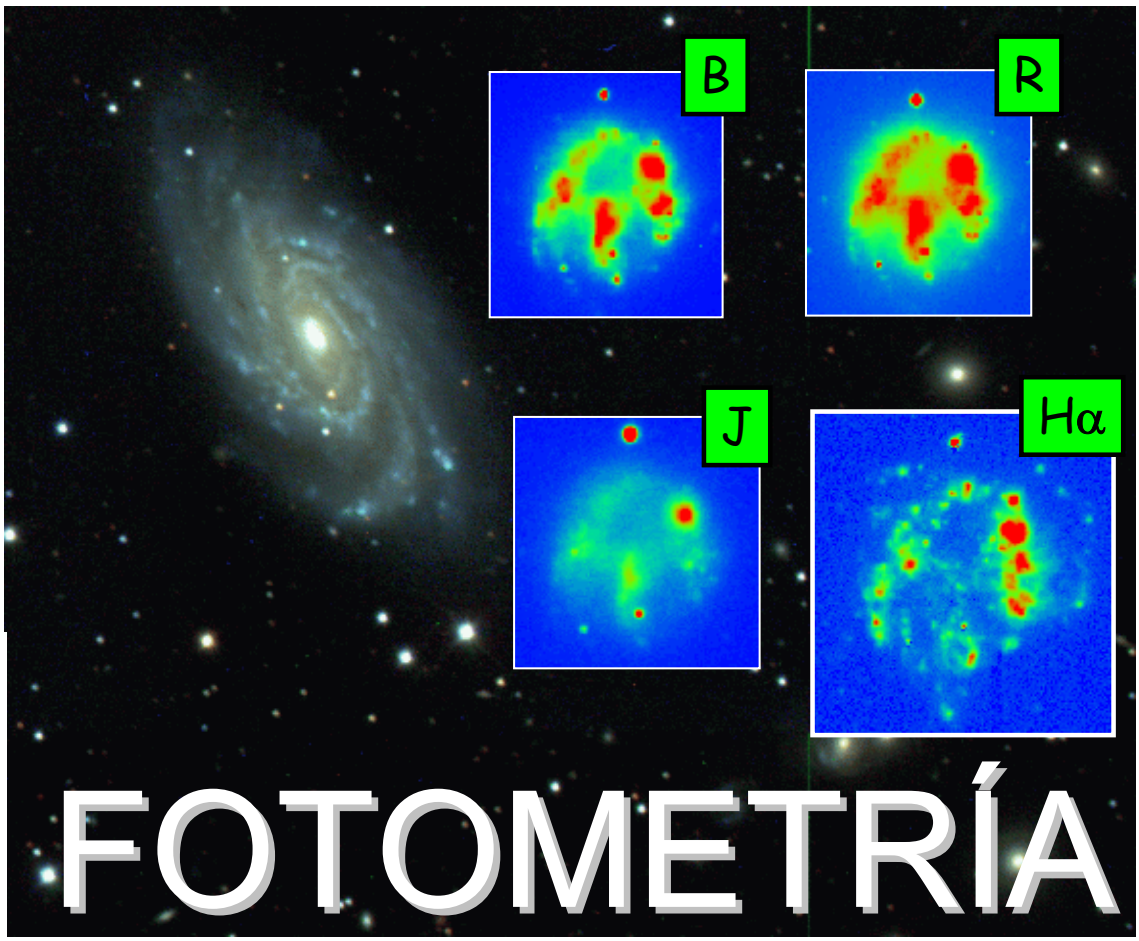






UCM
UNIVERSIDAD COMPLUTENSE MADRID

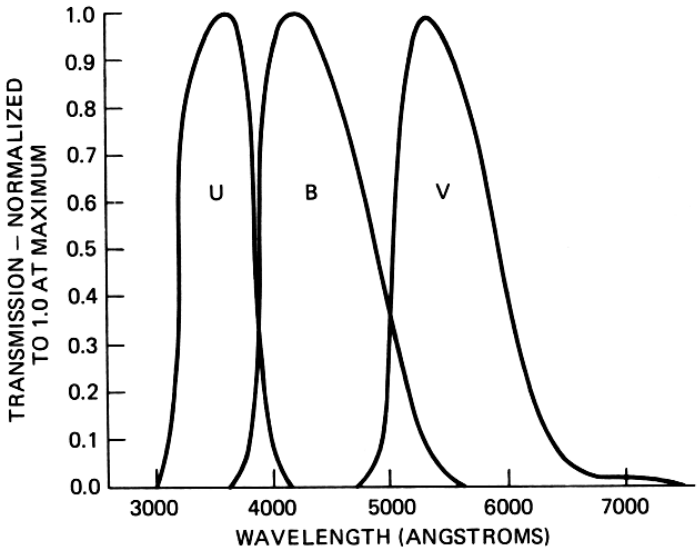
FOTOMETRÍA

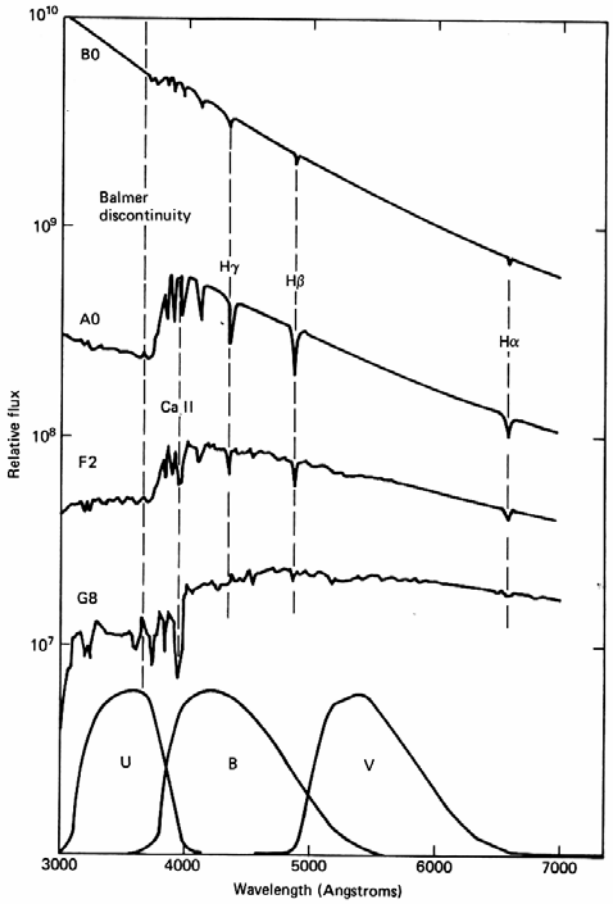
FOTOMETRÍA: Indice de contenido

1. Introducción.
   - Utilidad de la fotometría
2. Escala de magnitudes. Ecuación de Pogson.
3. Fotometría de acuerdo al detector empleado:
   - Fotometría visual.
   - Fotometría fotográfica.
   - Fotometría fotoeléctrica.
   - Fotometría CCD.
4. Métodos observacionales:
   - Fotometría absoluta
   - Fotometría diferencial.
5. Fotometría de objetos extensos.

FOTOMETRÍA: Introducción

- La fotometría proporciona una medida directa del flujo de energía recibido de los objetos celestes en un intervalo de longitud de onda.
- Mucho menos exigente en tiempo de observación que la espectroscopía ya que se integra el flujo en una banda.

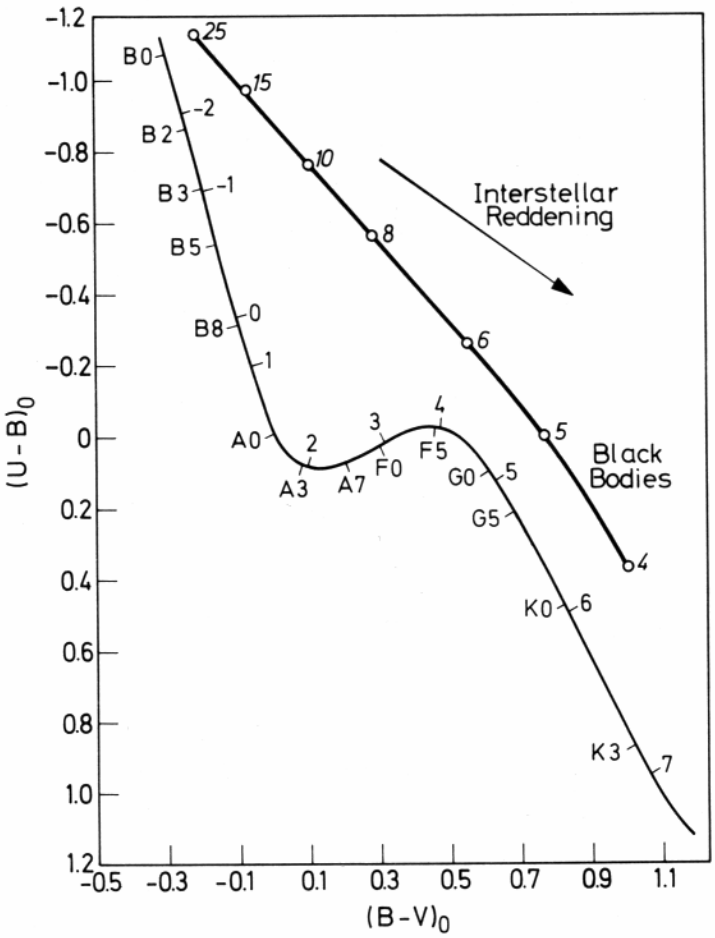




FOTOMETRÍA: Introducción

- Con los datos de magnitudes y colores en diferentes bandas fotométricas obtenemos información muy valiosa de los objetos observados.

- Por ejemplo:
  - Permite clasificar las estrellas usando un diagrama color-color.
  - El análisis de curvas de luz (variación temporal de su magnitud) informa sobre la naturaleza de las estrellas variables y sobre parámetros de las binarias.
  - Sirve para determinar distancias y tamaños.

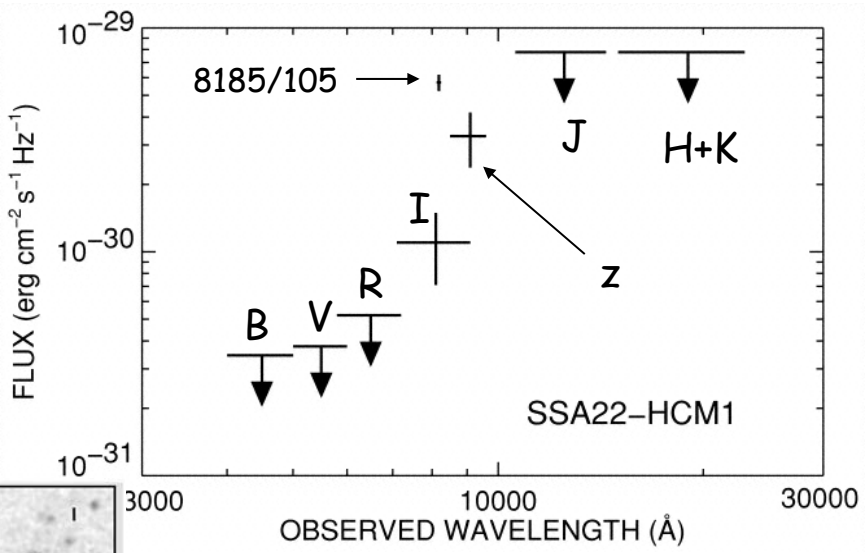


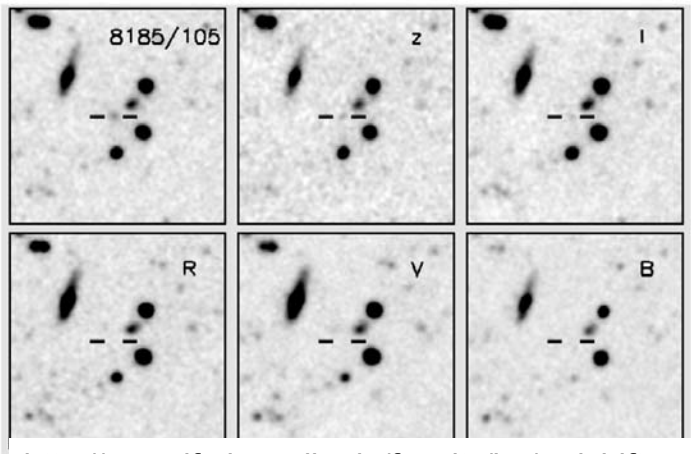
FOTOMETRÍA: Búsqueda de objetos

- Ejemplo de cómo se buscan y encuentran objetos a alto redshift usando técnicas fotométricas.

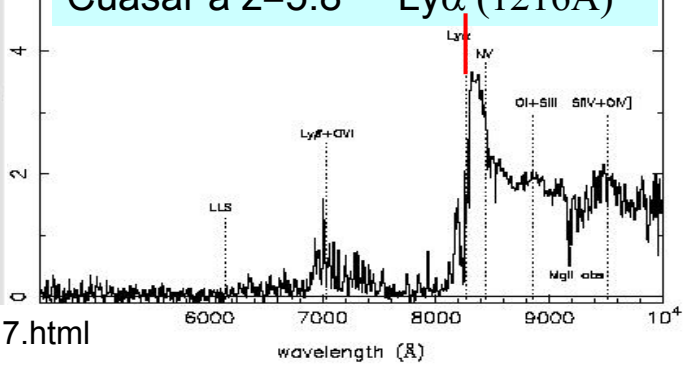
$$\frac{8185}{1216} = (1+z) \Rightarrow z \approx 5.7$$

An Extremely Luminous Galaxy at $z = 5.74$
Esther M. Hu, et al. (1999) ApJ 522:L9





Cuasar a z=5.8 Lyα (1216A)



http://www.ifa.hawaii.edu/faculty/hu/redshift_5.7.html

FOTOMETRÍA: Escala de magnitudes

- Hiparco (s. II a.c.) realizó la primera clasificación de estrellas de acuerdo a su brillo aparente a simple vista estableciendo 6 categorías para ~1000 estrellas.
- La escala es inversa ya que Hiparco colocó en la primera categoría a las estrellas más brillantes y en la sexta a las más débiles visibles.
- La escala de magnitudes es logarítmica debido a la respuesta no lineal del ojo.
- Pogson (1856) con un sistema llamado apertura de desaparición: $m = 5 \log a + 9.2$

a: apertura límite del telescopio en pulgadas que permite todavía ver la estrella.

- Fechner y Weber (1859): $m - m_0 = s \log(I / I_0)$

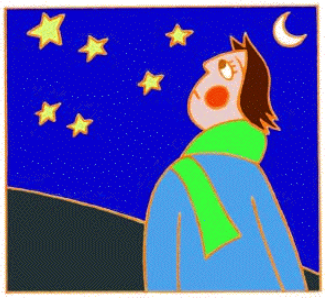
ECUACIÓN de POGSON:

$$m_1 - m_2 = -2.5 \log(F_1 / F_2)$$

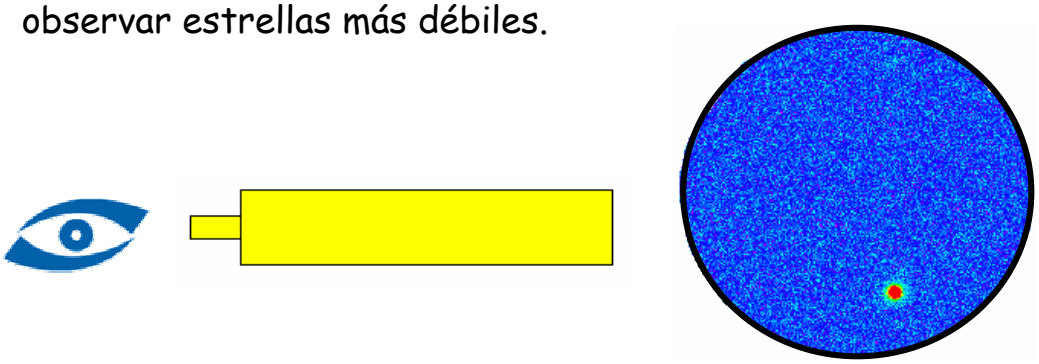
$$F_1 / F_2 = 10^{-0.4(m_1 - m_2)}$$

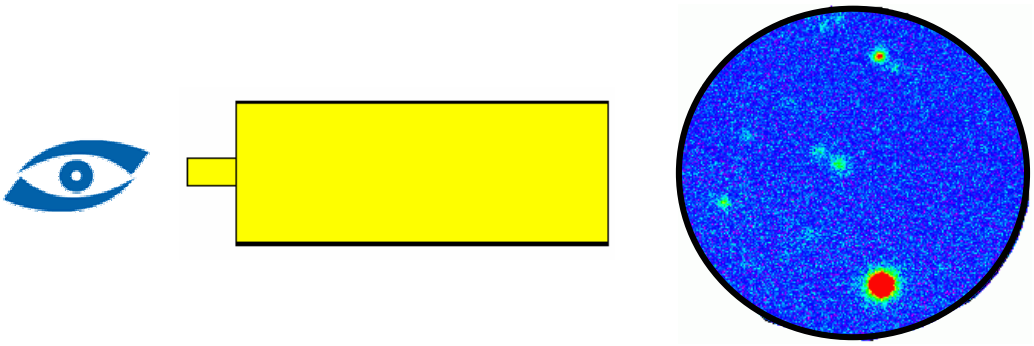
Δm = 1 magn ⇔ x 2.512 en flujo ($100^{1/5} = 10^{2/5}$)
Δm = 5 magn ⇔ x 100 en flujo

FOTOMETRÍA VISUAL



- La fotometría visual emplea como detector el ojo.
- Las observaciones son a simple vista el límite es m=6.
- Empleando un telescopio se pueden observar estrellas más débiles.



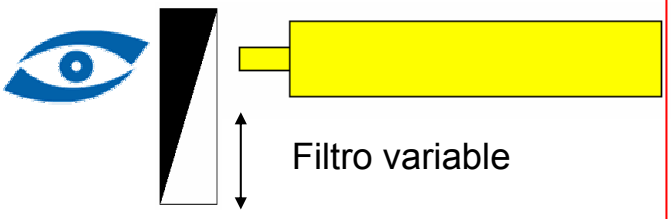


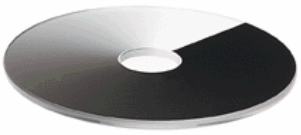
El ojo no integra pero distingue diferencias del 2% en iluminación.

Fotometría VISUAL:

Fotómetro de extinción.

Se varía la transmisión hasta que desaparece la estrella

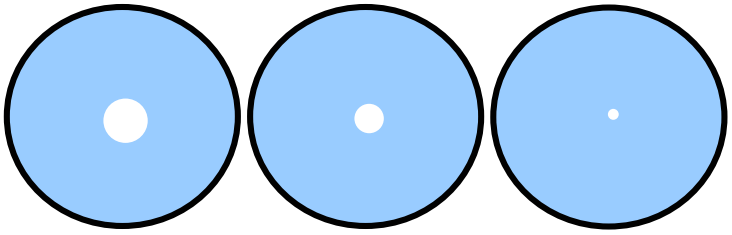




El filtro puede ser circular o lineal

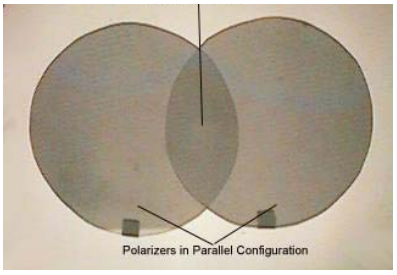
Fotómetros

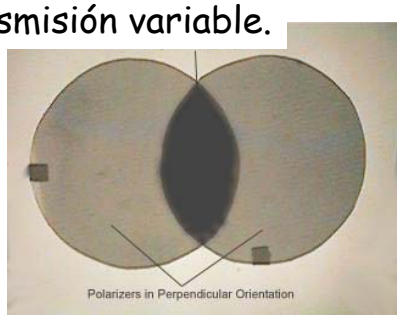
Imágenes a través del ocular con diferentes transmisiones (T) del filtro.

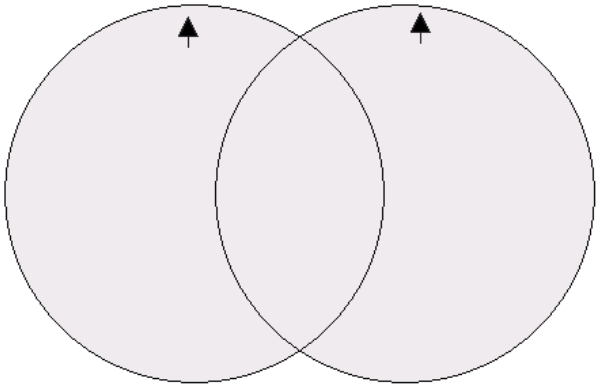


T=80% T=50% T=30%

Un conjunto polarizador – analizador sirve de filtro de transmisión variable.

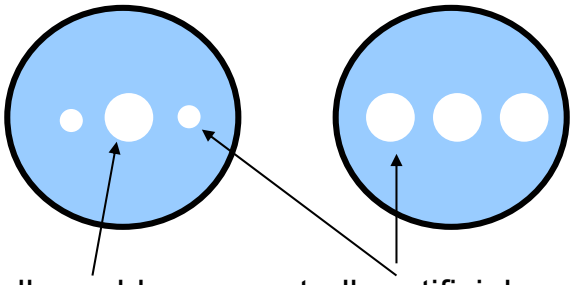




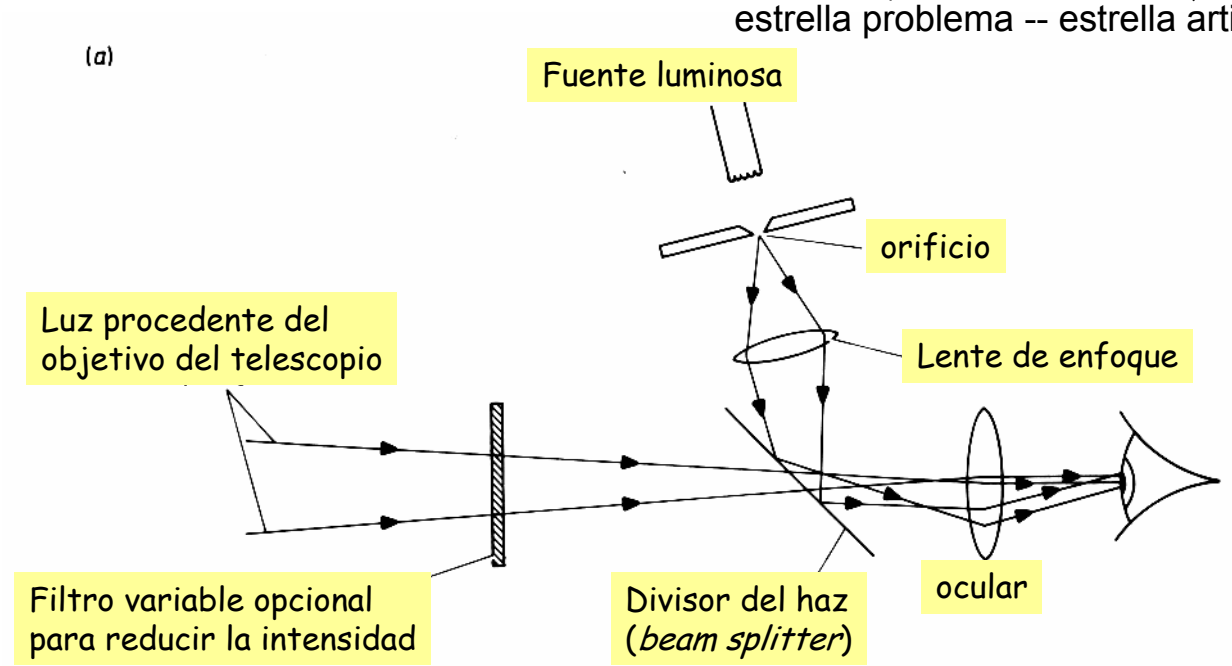


Fotometría VISUAL: Fotómetros

Fotómetro de comparación.
Se observa a la vez una estrella artificial variable. Se varía su intensidad hasta que coincide con la estrella problema.

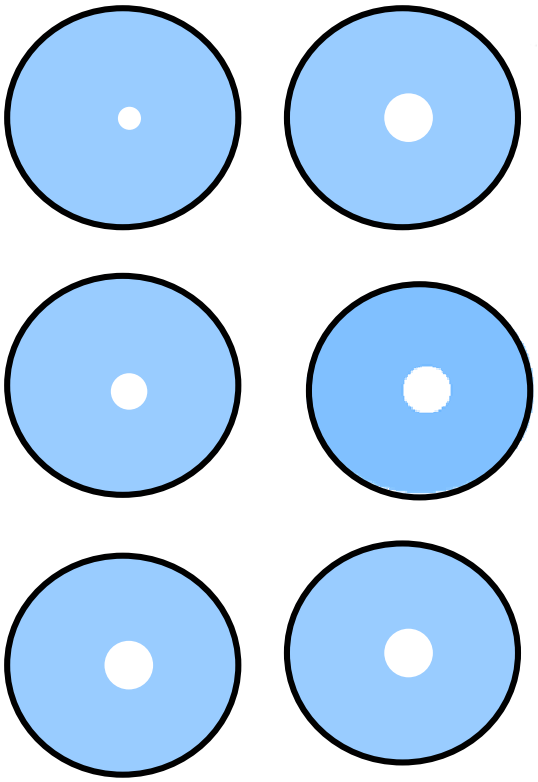


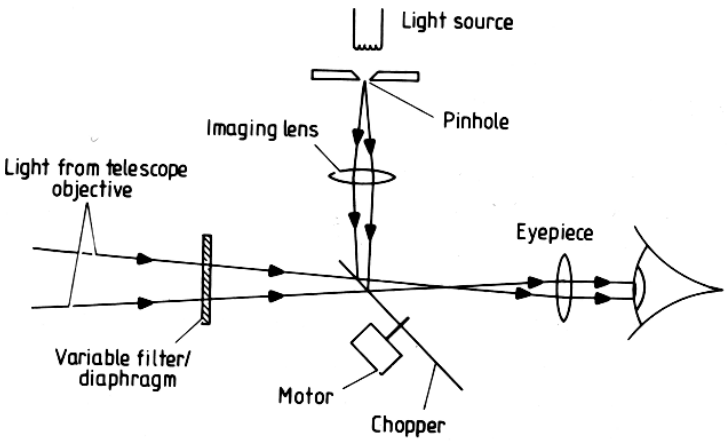
estrella problema -- estrella artificial

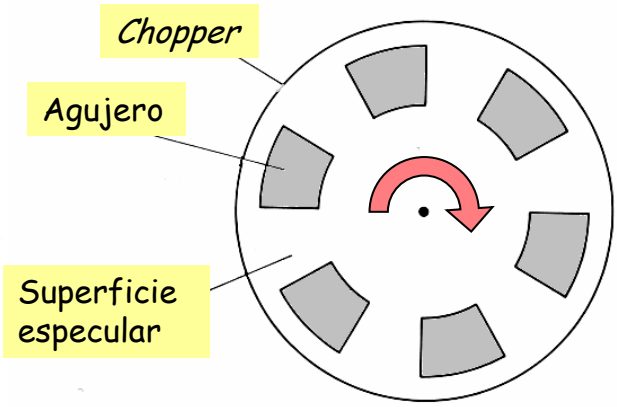


Fotometría VISUAL: Fotómetros

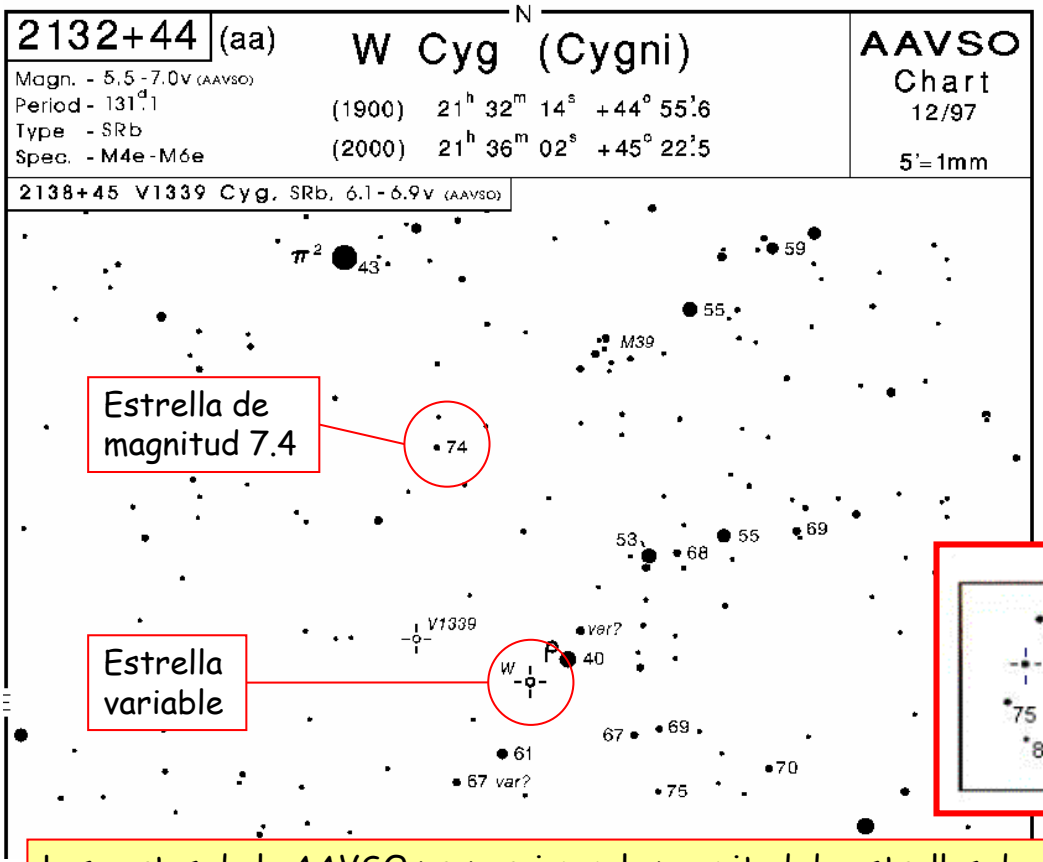
Fotómetro de comparación.
En este caso se observa alternativamente a la estrella problema y a la artificial cuyo brillo se puede variar a voluntad.

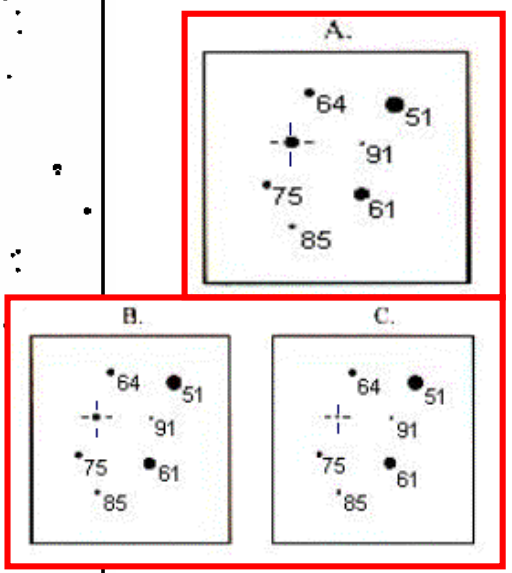






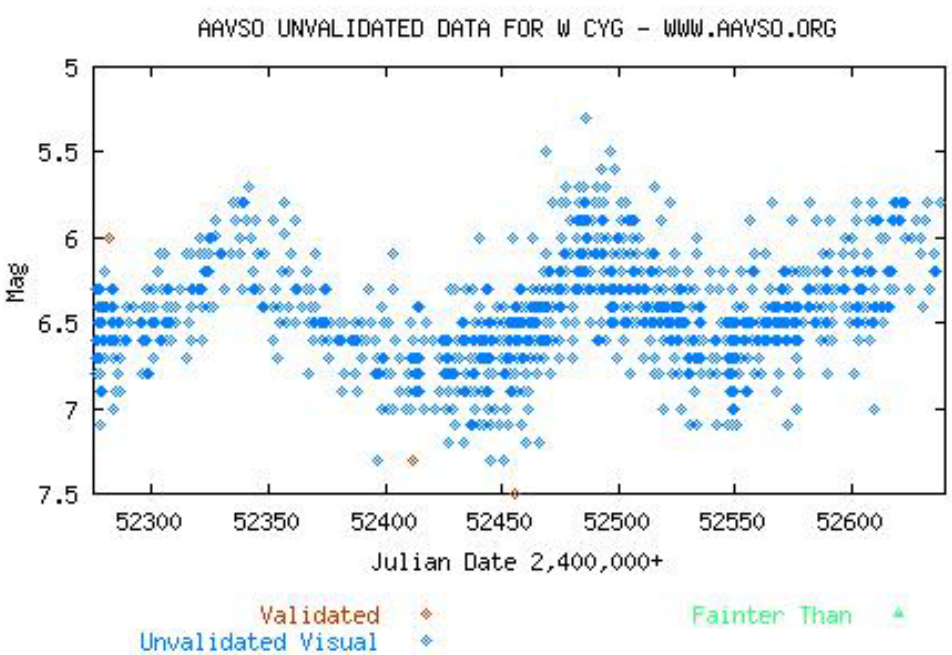
Fotometría VISUAL: AAVSO





Las cartas de la AAVSO proporcionan la magnitud de estrellas de comparación en el campo de la estrella variable

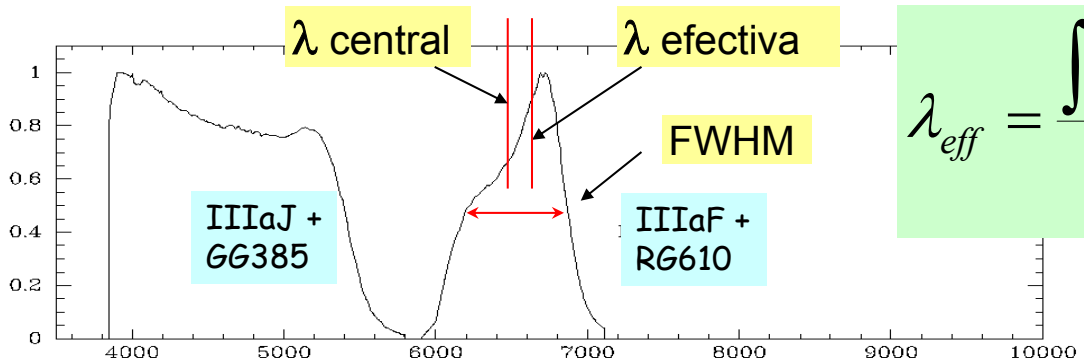
Fotometría VISUAL: AAVSO



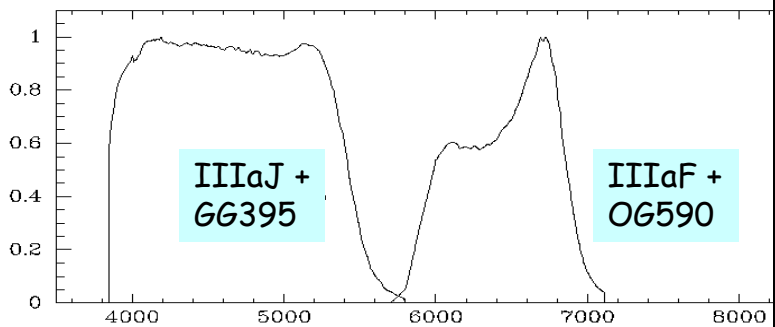
Curva de luz (sólo observaciones visuales) preliminar para W Cyg durante el año 2002 obtenida a partir de 1117 observaciones de 117 diferentes observadores.

Fotometría FOTOGRÁFICA

•La fotometría fotográfica consiste en obtener imágenes de un campo a través de un filtro usando como detector una placa fotográfica.
•La combinación entre la respuesta de la emulsión y la transmisión del filtro define la banda de paso.



$$\lambda_{eff} = \frac{\int \lambda S(\lambda)\, d\lambda}{\int S(\lambda)\, d\lambda}$$



EMULSION	FILTRO	BANDA
IIIaJ	UG1	U
IIIaJ	GG395	B
IIIaD	GG495	V
IIIaF	RG630	R

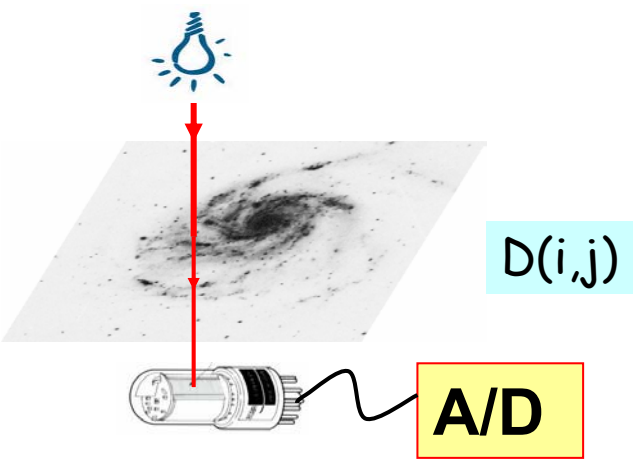
Fotometría FOTOGRÁFICA

VENTAJAS

- REGISTRO PERMANENTE.
- RANGO ESPECTRAL AMPLIADO.
- POSIBILIDAD DE INTEGRACIÓN.
- CAMPO AMPLIO:
  Medida simultánea de muchos objetos celestes.

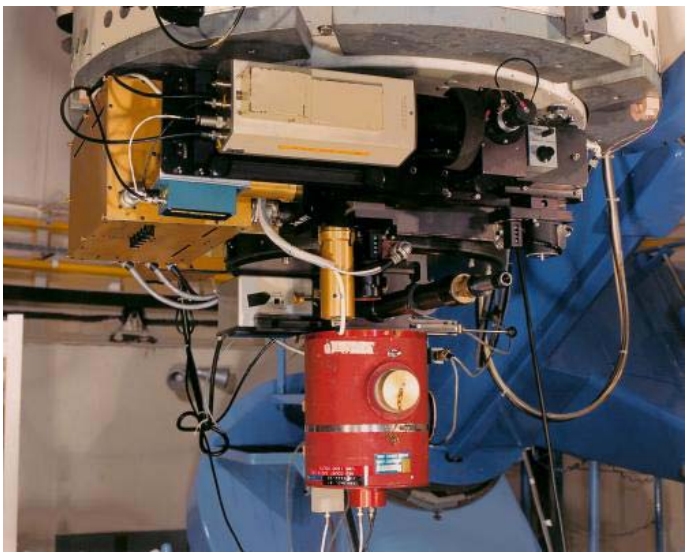
INCONVENIENTES

- FORMATO NO DIGITAL.
- DETECTOR NO LINEAL.



Fotometría FOTOELÉCTRICA

- En fotometría fotoeléctrica se usa un fotómetro acoplado a un telescopio.
- El detector es una fotocélula, un fotodiodo o un fotomultiplicador.

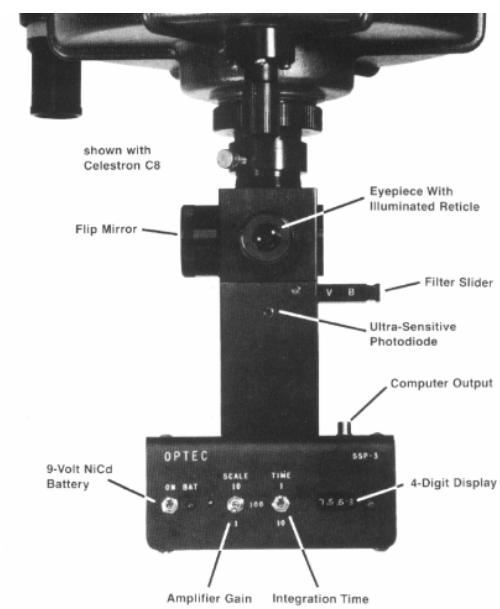


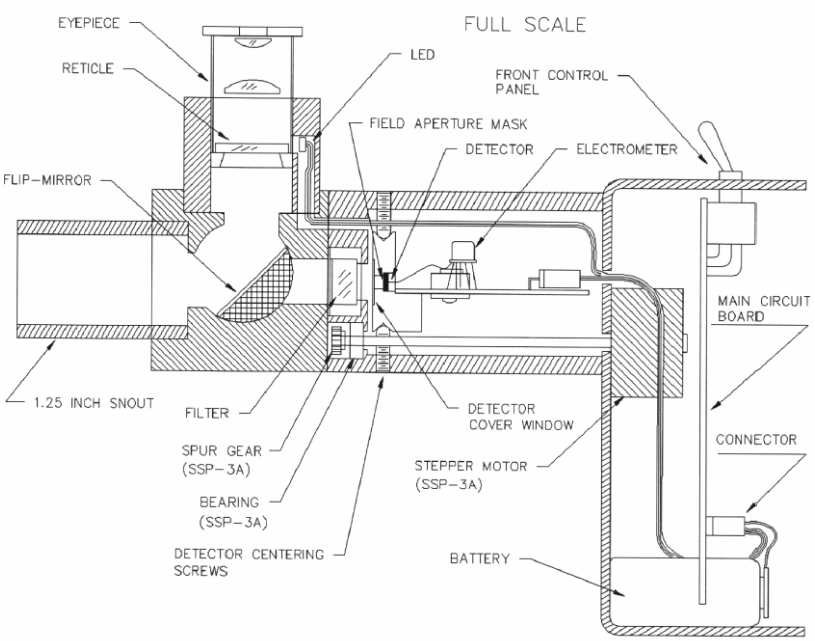
Fotómetro fotoeléctrico (KPNO 0.9m)
NOAO/AURA/NSF
http://www.noao.edu/image_gallery/html/im0210.html

Fotómetro fotoeléctrico donde se observa el contenedor del fotomultiplicador para mantenerlo enfriado y evitar corriente de oscuridad. Se aprecia además la electrónica de alimentación, control y detección y los sistemas de adquisición y guiado.

Fotómetro SSP-3 (prácticas en la UCM)

Fotometría FOTOELÉCTRICA: SSP-3

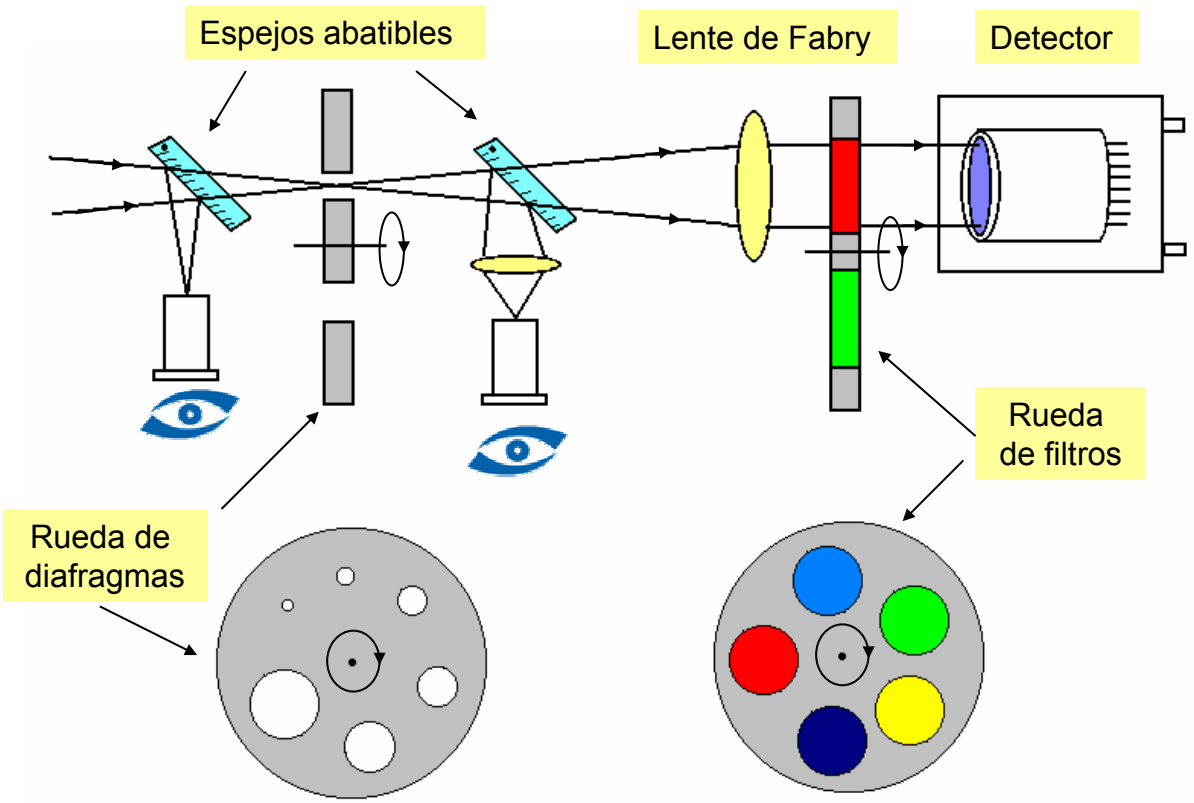




Fotómetro fotoeléctrico utilizado en las prácticas.
http://www.optecinc.com/astronomy/products/ssp-3.html

Fotometría FOTOELÉCTRICA: Fotómetro

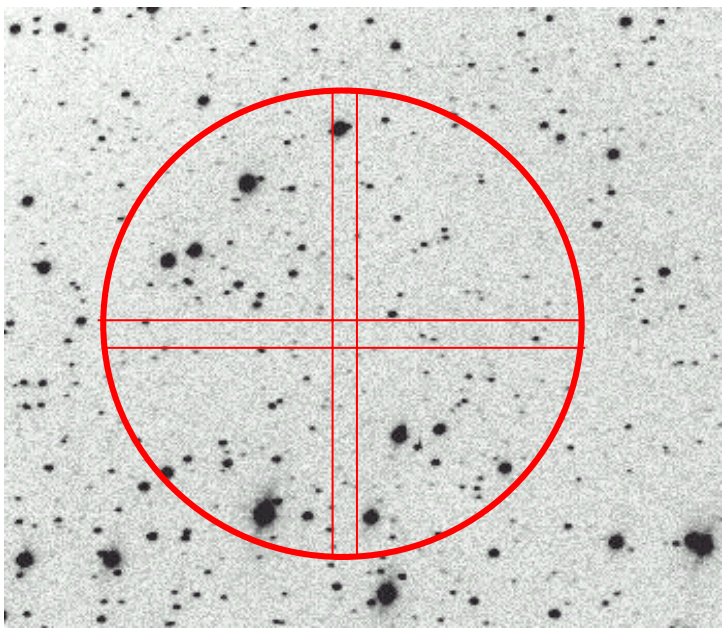
Esquema de un fotómetro fotoeléctrico

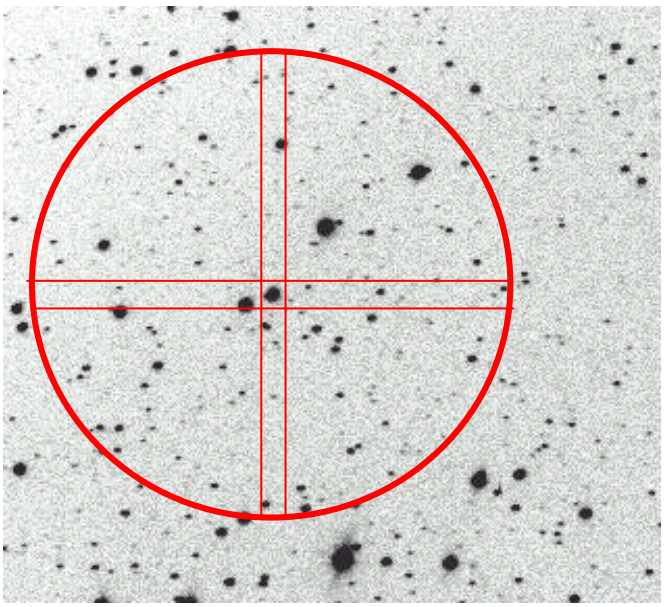


Fotometría FOTOELÉCTRICA: Observación

(1) ADQUISICIÓN Y CENTRADO DE LA ESTRELLA PROBLEMA

Campo al que apunta el telescopio (zona rectangular) y vista a través del primer ocular antes de la rueda de diafragmas (izda) y tras centrar la estrella corrigiendo el apuntado (dcha)

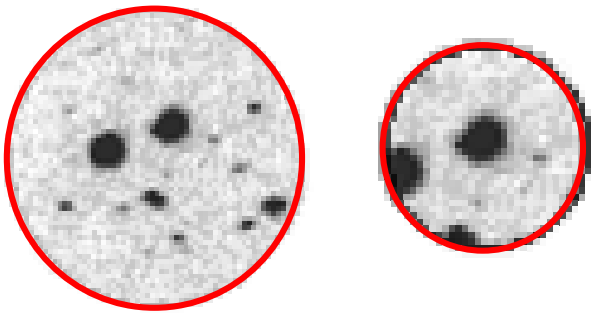


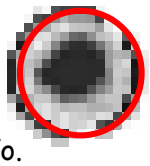


Fotometría FOTOELÉCTRICA: Observación

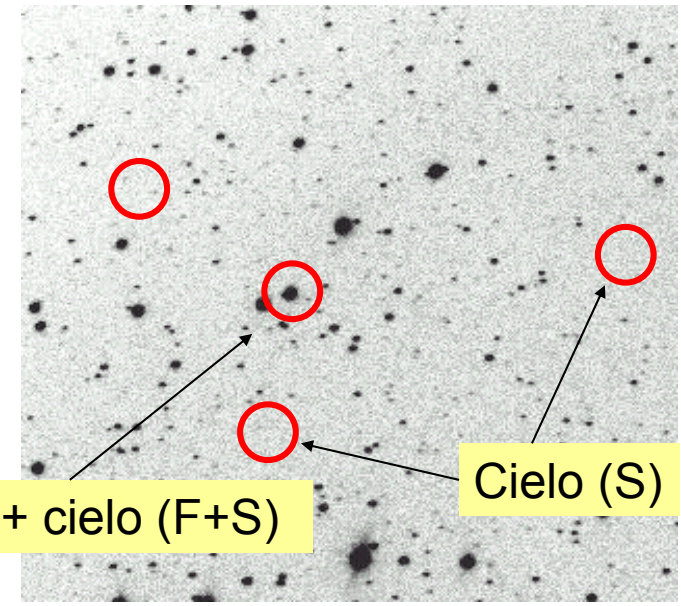
(2) CENTRADO DE LA ESTRELLA EN EL DIAFRAGMA
vista tras la rueda de diafragmas (segundo ocular) con aberturas sucesivamente más pequeñas.

(3) MEDIDA DEL OBJETO + CIELO Y DEL FONDO DE CIELO
Estrella centrada en el diafragma y diferentes zonas libres de estrellas donde puede medirse el cielo.



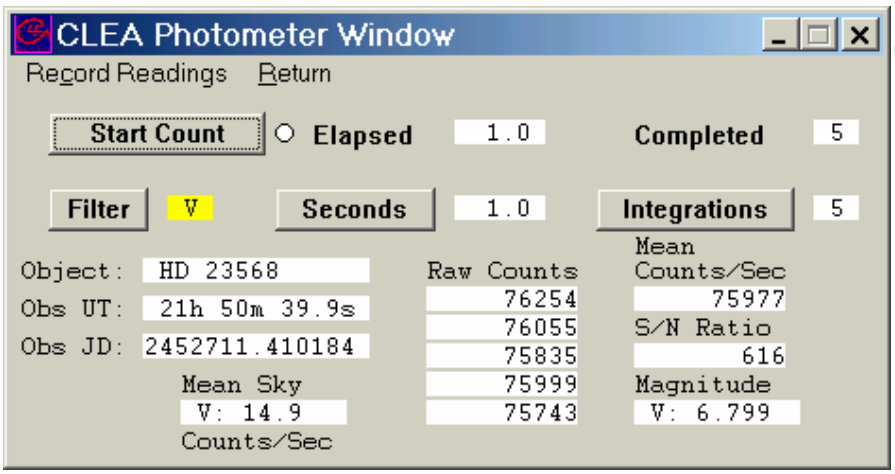


El tamaño del diafragma depende de la calidad de la noche en cuanto a turbulencia atmosférica.
Lo ideal es que el *seeing* sea pequeño.



Flujo neto → F = (F+S) – S (cuentas/s)
Magnitud instrumental → m = -2.5 log F

Fotometría FOTOELÉCTRICA: Relación S/N

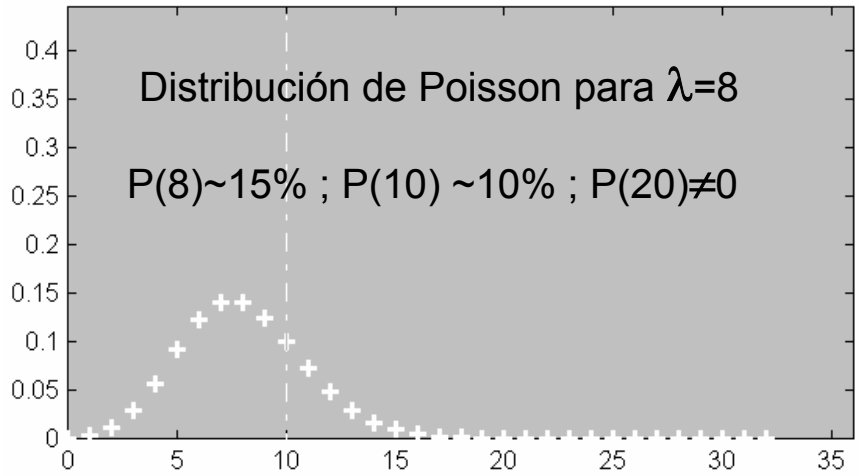


La llegada de fotones sigue la estadística de Poisson.

$$SNR = \sqrt{N}$$

Ejemplo:
10^4 cuentas → SNR=100
Precisión 1%, 0.01 magn

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

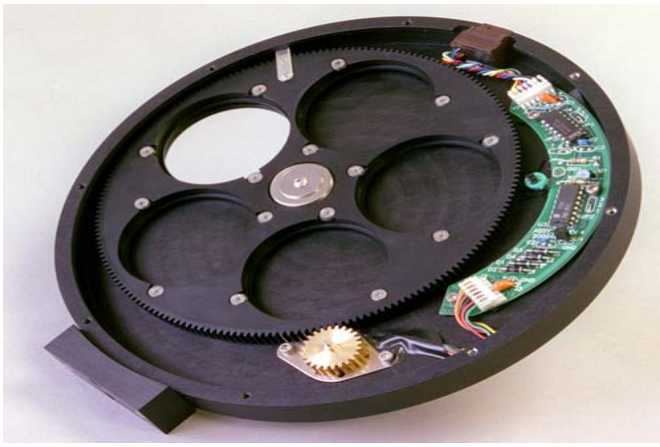


Φ (cm)	F (c/s)	T(s) para SNR=100
20	100	100s
40	400	25 s
80	1600	6.25

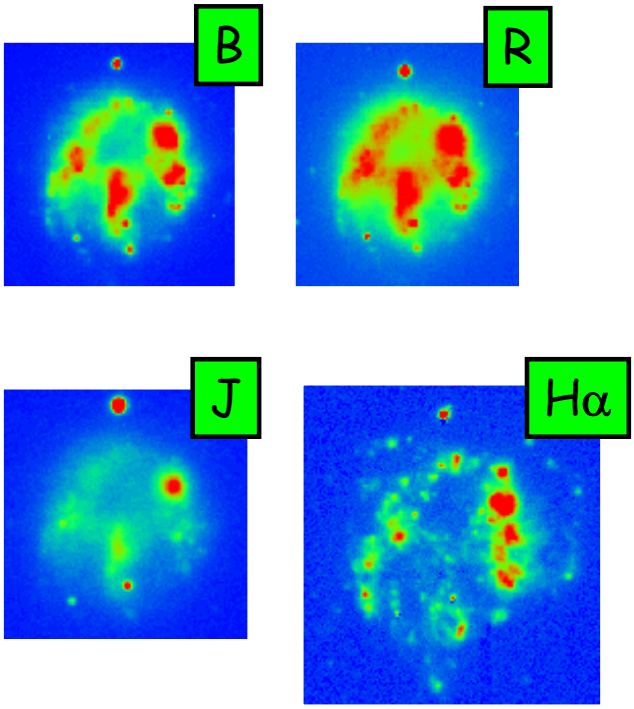
Fotometría CCD: Método e imágenes

- En fotometría CCD se obtienen imágenes a través de filtros, usando como detector un CCD.
- El CCD actúa como un mosaico de detectores (cada pixel) cuya sensibilidad es diferente. Por eso es necesario obtener imágenes de calibración.

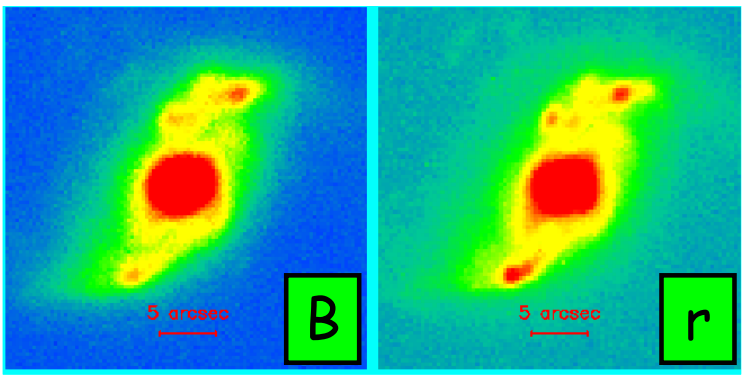
- La banda fotométrica depende de la respuesta del CCD y del filtro utilizado.

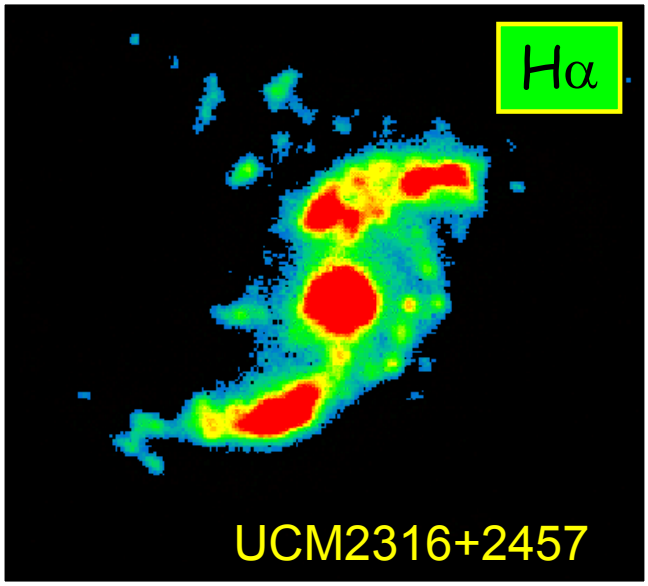


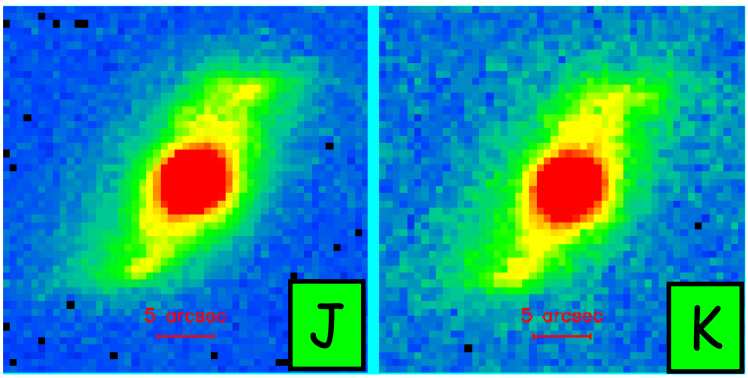
Rueda de filtros de una cámara CCD



Fotometría CCD Imágenes







Fotometría CCD: Imágenes

- Al leer el CCD en conversor analógico digital convierte el número de electrones en cuentas (ADU, analog-to-digital units).
- La imagen es un fichero en el ordenador que contiene una matriz de datos correspondientes a cada píxel del CCD.

Valor medido en cada pixel ← OBSERVADO

Matriz de sensibilidad

$$X_{i,j} = BIAS + B_{i,j} I_{i,j} + A_{i,j}$$

Valor umbral constante

Corriente de oscuridad

PROBLEM A → Intensidad que recibió cada pixel

Fotometría CCD: Imágenes de calibración (1)

Imágenes de calibración (1)

DARK Es una imagen de la corriente de oscuridad
Exposición en ausencia de señal externa obtenida sin abrir el obturador: no llegan fotones al detector.
Suma de la imagen térmica + BIAS

$$DARK_{i,j} = BIAS + B_{i,j} \times 0 + A_{i,j}$$

BIAS Es un DARK de exposición nula: (DARK 0s)
Mide el punto cero del amplificador
Sufre de ruido de lectura
Sufre del ruido de la electrónica de la cámara

Imagen Térmica Contiene sólo la señal térmica: corriente de oscuridad (Dark – BIAS). Crece con el tiempo de exposición.

Fotometría CCD: Imágenes de calibración (2)

Imágenes de calibración (2)

FLATFIELD Es una imagen que permite determinar la variación espacial de sensibilidad (píxel a píxel) para corregir de este efecto.

Exposición apuntando a un campo uniforme.

$$FF_{i,j} = BIAS + B_{i,j} \times I_{\text{constante}} + A_{i,j}$$

- Flatfield de cúpula (dome flats)
  - Se obtienen en el interior de ésta usando lámparas.
  - Se pueden realizar en cualquier momento del día o de la noche.
- Flatfield de cielo (sky flats)
  - Se apunta al cielo libre de objetos o a una nube.
  - Se realizan en los crepúsculos (al anochecer y amanecer).
  - También pueden realizarse combinando muchas imágenes de ciencia obtenidas a lo largo de la noche.

Los Flat Field dependen del CCD y del filtro utilizado !

Fotometría CCD: Imágenes científicas

Imágenes científicas

No Calibrada La imagen tal como sale del detector (*Raw image*)
Luz procedente del campo observado y además BIAS y corriente de oscuridad y sufre de la variación espacial de la sensibilidad.

$$X_{i,j} = BIAS + B_{i,j}\ I_{i,j} + A_{i,j}$$

Calibrada Representa la luz que cayó en cada píxel.
Se encuentra libre de BIAS y corriente de oscuridad.
Sufre de ruido poissoniano, el de lectura y el acumulado en la calibración.

$$I_{i,j} = \frac{X_{i,j} - DARK_{i,j}}{FF_{i,j} - DARK_{i,j}} \times I_{\text{constante}}$$

Fotometría CCD: Calibración CCD

Calibración paso a paso

1) Combina los DARKs $DARK_{i,j}$

2) Selecciona y combina los FLATS $FF_{i,j}$

3) Corrige FLATS de corriente de oscuridad

$$FF_{i,j} = FF_{i,j} - DARK_{i,j}$$

4) Corrige imágenes científicas idem $X_{i,j} = X_{i,j} - DARK_{i,j}$

5) Corrige de variación espacial de sensibilidad $I_{i,j} = X_{i,j} / FF_{i,j}$

6) Si hay varias imágenes del mismo campo, seleccionar y promediar.

Fotometría CCD: Ejemplo (1/2)

CCD: BIAS=100 ; corriente de oscuridad 2 cuentas/min; (respuesta espacial cte)

Estrella m=12 Texpo = 2 min

Observado

120	120	120	120
120	300	300	120
120	300	300	120
120	120	120	120

Obs. - BIAS

20	20	20	20
20	200	200	20
20	200	200	20
20	20	20	20

Obs. – BIAS - DARK

16	16	16	16
16	196	196	16
16	196	196	16
16	16	16	16

Cielo (2 min)

16	16	16	16
16	16	16	16
16	16	16	16
16	16	16	16

estrella (2 min)

0	0	0	0
0	180	180	0
0	180	180	0
0	0	0	0

estrella (1 min)

0	0	0	0
0	90	90	0
0	90	90	0
0	0	0	0

Fotometría CCD: Ejemplo (2/2)

¿Estrella m=11 Texpo = 3 min?

0	0	0	0
0	225	225	0
0	225	225	0
0	0	0	0

m=11, 1min

0	0	0	0
0	675	675	0
0	675	675	0
0	0	0	0

m=11, 3min

Esperado para m=11; 3minutos

130	130	130	130
130	805	805	130
130	805	805	130
130	130	130	130

Cielo (3 min)

24	24	24	24
24	24	24	24
24	24	24	24
24	24	24	24

DARK (3 min)

6	6	6	6
6	6	6	6
6	6	6	6
6	6	6	6

Fotometría CCD: Relación Señal/Ruido (1)

Fuentes de ruido

- fotónico N_0 — de lectura N_r
- de corriente de oscuridad N_d — de fondo de cielo N_s
- (Ruido del procesado)

Si son independientes se suman en cuadratura y el ruido total:

$$N^2 = N_0^2 + N_d^2 + N_r^2 + N_s^2$$

Señal

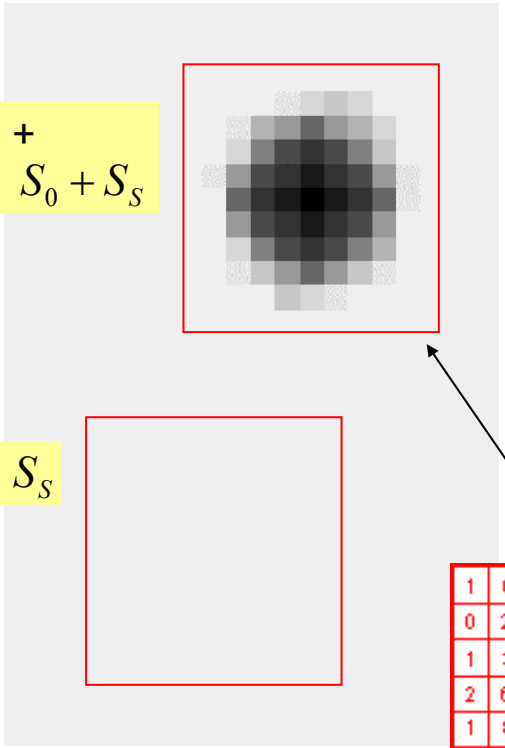
La señal total incluye, además de la producida por el objeto observado y el fondo de cielo, las de BIAS y oscuridad.

Señal

$$S = S_0 + S_d + S_b + S_s$$

Señal del objeto — Corriente de oscuridad — Bias — Cielo

Fotometría CCD: Relación Señal/Ruido (2)



Señal del objeto (cuentas)

$$S_0 = \sum (s_0 + s_S)_{i,j} - \sum (s_S)_{i,j}$$

- Se suma toda la señal dentro de la apertura sintética, que normalmente es circular, en la estrella y en el cielo libre de objetos (fondo de cielo).

1	0	1	2	3	4	3	1	0
0	2	5	6	8	6	5	3	0
1	3	7	9	10	9	7	4	1
2	6	9	10	11	10	9	6	2
1	8	10	11	12	11	10	8	2
0	6	9	10	11	10	9	6	1
1	3	7	9	10	9	7	5	1
0	2	4	6	8	6	4	2	0
0	0	0	4	3	2	0	0	1

-Se suele medir y promediar el cielo en diversas zonas.
- La imagen debe ser previamente procesada.

Fotometría CCD: Relación Señal/Ruido (3)

Hipótesis Supongamos despreciables los ruidos de dark, bias y procesado.
Que el ruido del cielo es sólo fotónico.
Que medimos el objeto en n píxeles.

Relación Señal/Ruido

$$S/N = \frac{S_0}{\sqrt{\frac{S_0}{g} + \frac{S_s}{g} + n\frac{N_r^2}{g^2}}}$$

Ganancia e-/cuentas

Brillo medio del cielo en La Palma (rms 0.1)
B = 22.7 V = 21.9 R = 21.0 mag/arcsec^2

Incremento con la luna

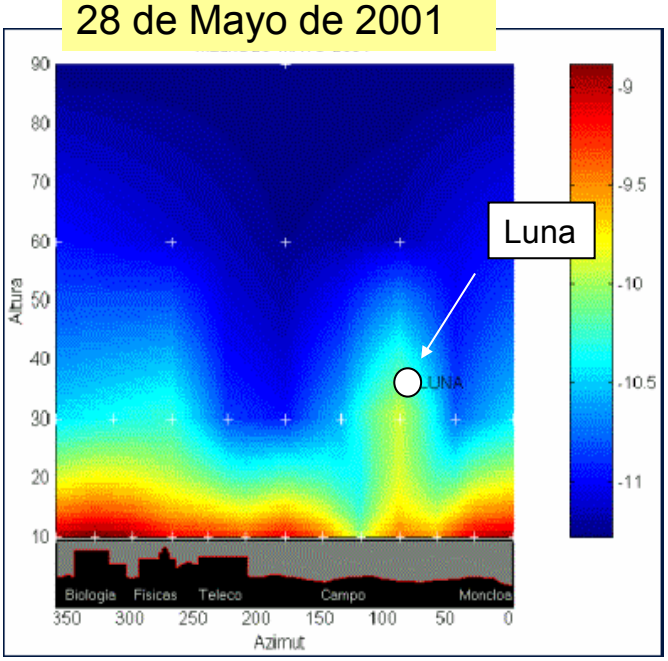
	Creciente	Cuarto	Llena
Fase (grados)	135	90	0
Edad de la luna	4	8	15
Frac. iluminada %	25	50	100
ΔM (U, B, V)	0.5	2.0	4.3
ΔM (R)	0.3	1.3	3.5
ΔM (I)	0.2	1.1	3.3

Interesa observar (S/N mejora):
- en noches oscuras cuando el fondo de cielo (S_s) sea bajo.
- con poca turbulencia (buen seeing)→imágenes de las estrellas más pequeñas.

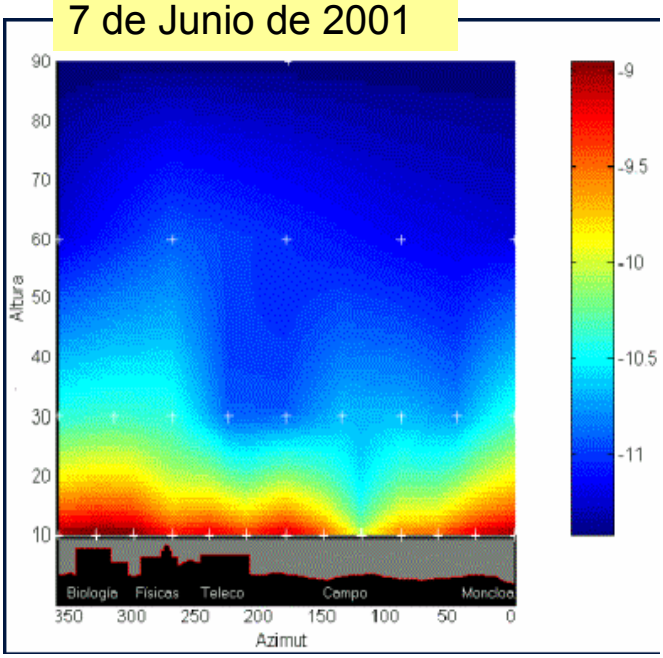
LUMINOSIDAD DEL FONDO DE CIELO EN EL OBSERVATORIO DE LA UCM

Luis Alejandro Ramírez González (curso 2000-2001)

28 de Mayo de 2001



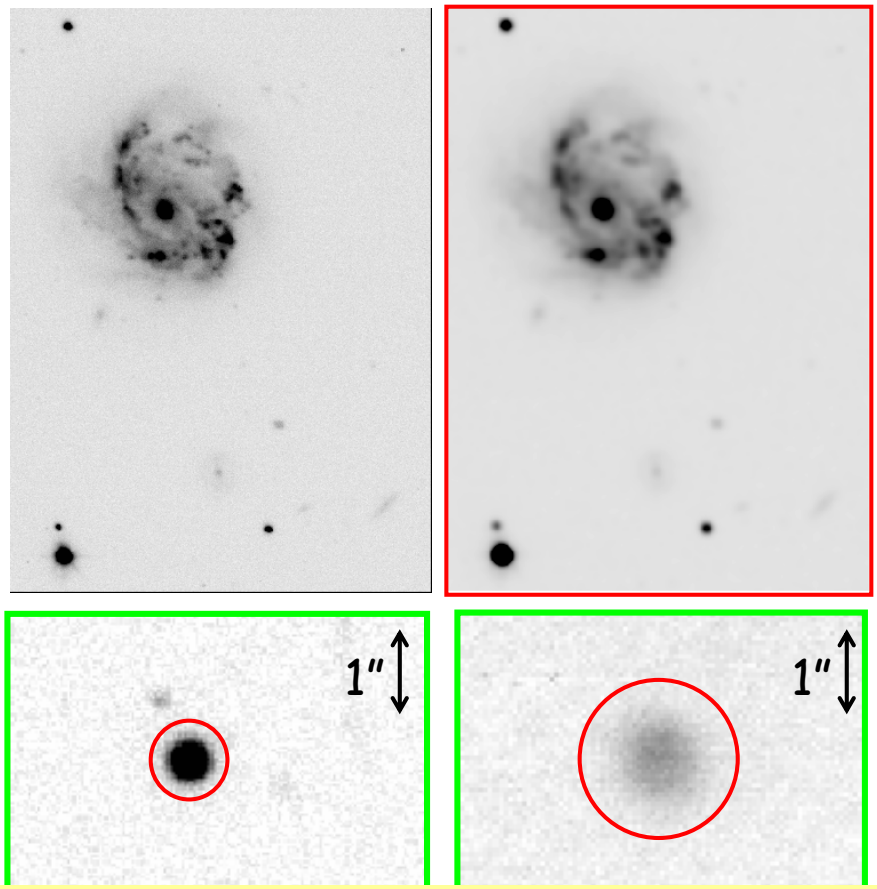
7 de Junio de 2001



Biológicas Físicas Teleco Campo Moncloa

http://www.ucm.es/info/Astrof/JAZ/TRABAJOS/BRILLO/brillo1.htm

FOTOMETRÍA: S/N y seeing



-El seeing determina el tamaño de las imágenes de las estrellas (FWHM).

- En las imágenes de la izda. El seeing durante la observación fue bueno y como resultado tenemos mejor resolución espacial.

- Además, muy importante para fotometría, permite medir el flujo de las estrellas dentro de una apertura sintética más pequeña, mejorando la relación S/N.

Dos imágenes obtenidas con el mismo equipo en diferentes noches

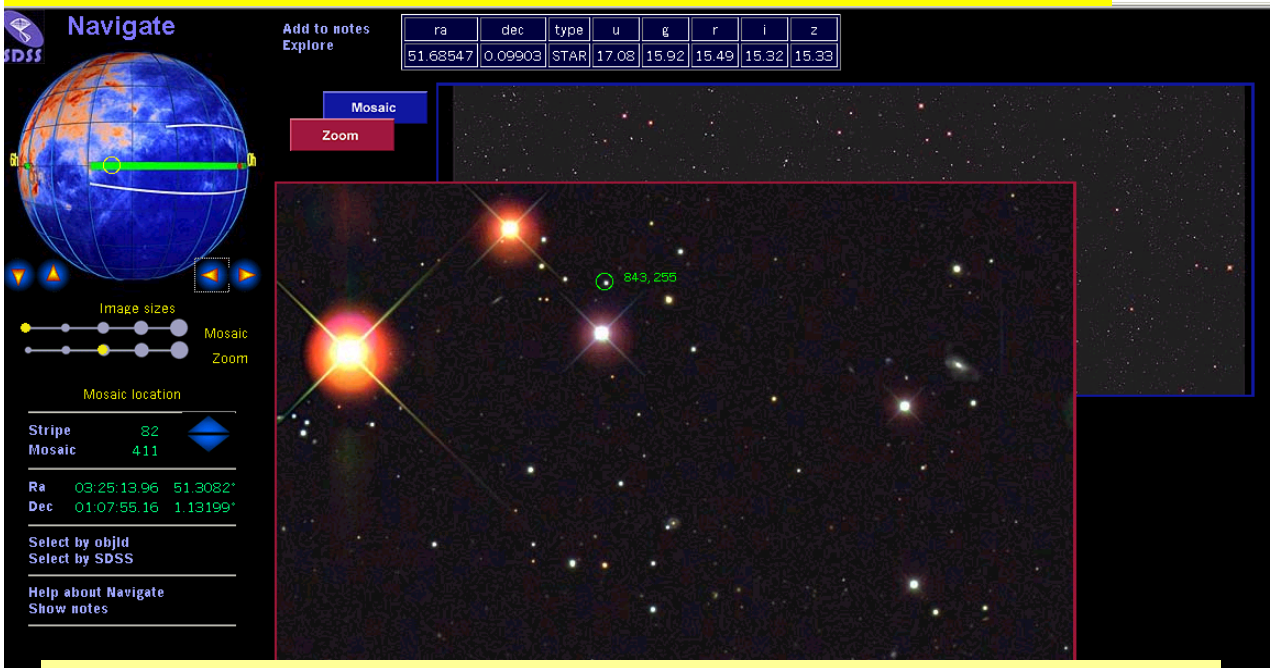
FOTOMETRÍA: Un ejemplo de exploración

Página ppal.: http://www.sdss.org/

Datos on-line:
http://skyserver.fnal.gov/en/sdss/skyserver/

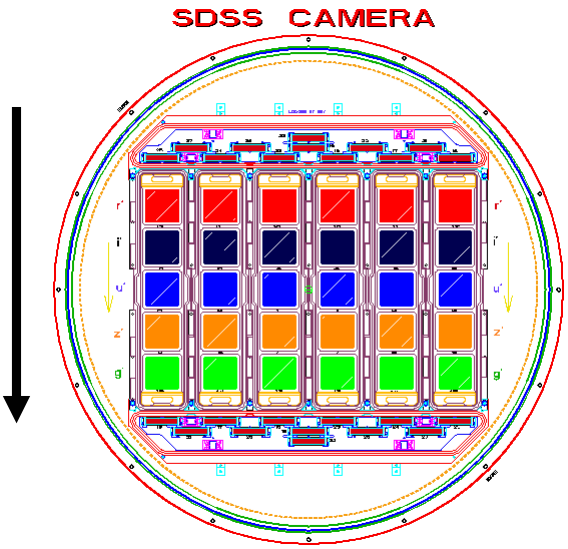
Sloan Digital Sky Survey

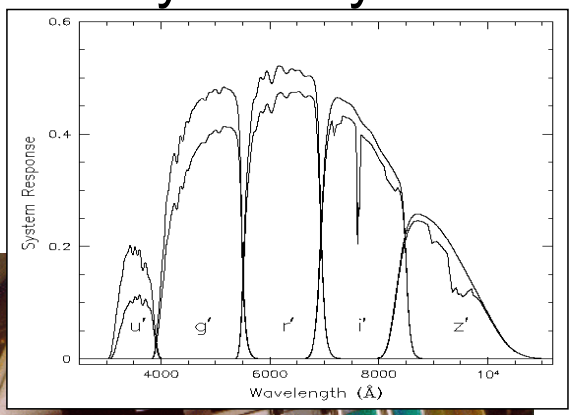
http://skyserver.fnal.gov/en/tools/navi/getmosaic.asp

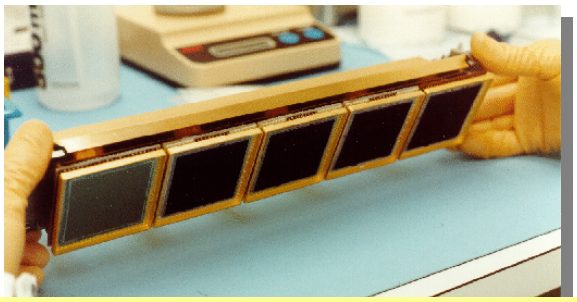


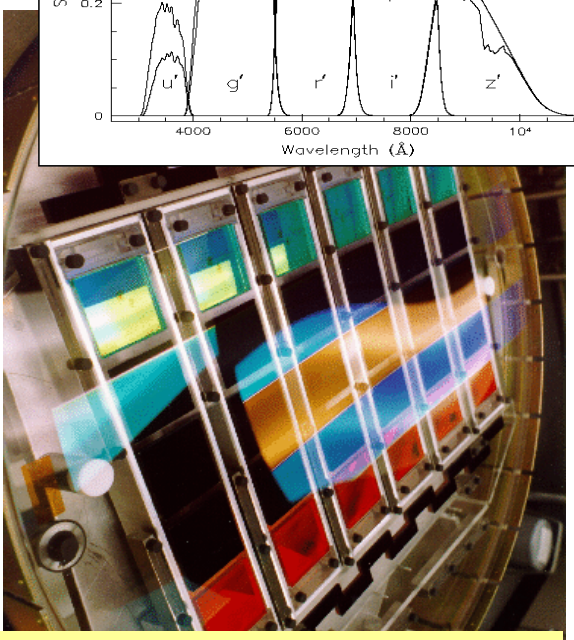
Pretende cartografiar $\frac{1}{4}$ de todo el cielo y obtener posiciones y magnitudes de unos 100 millones de objetos celestes

FOTOMETRÍA: Sloan Digital Sky Survey





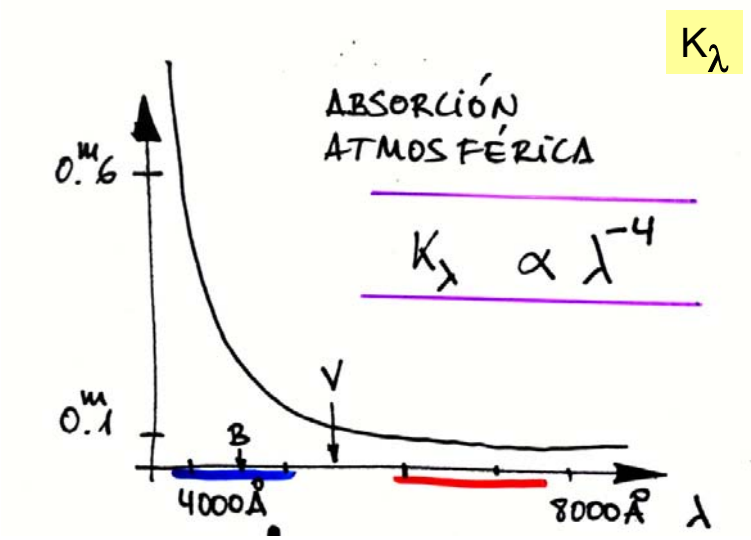




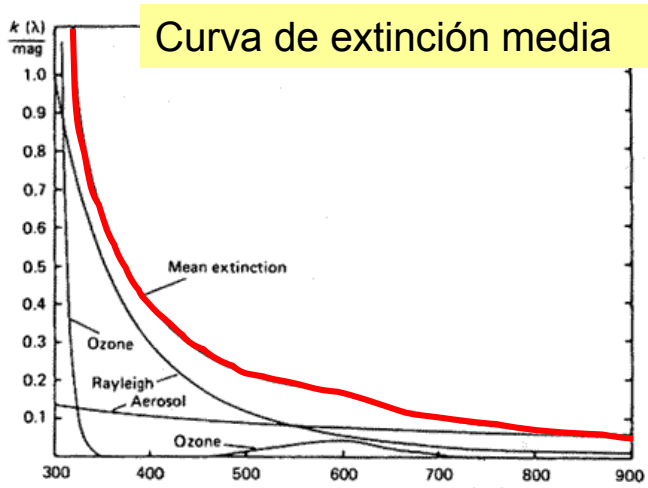
Usa un método de observación llamado drift-scan en el que el cielo va siendo registrado en tiras a través de cinco filtros simultáneamente en 6x5 CCDs.

FOTOMETRÍA: Extinción atmosférica (1)

- La atmósfera terrestre actúa como un filtro absorbiendo parte de la radiación que la atraviesa.
- La absorción depende de la frecuencia de los fotones.



K_λ



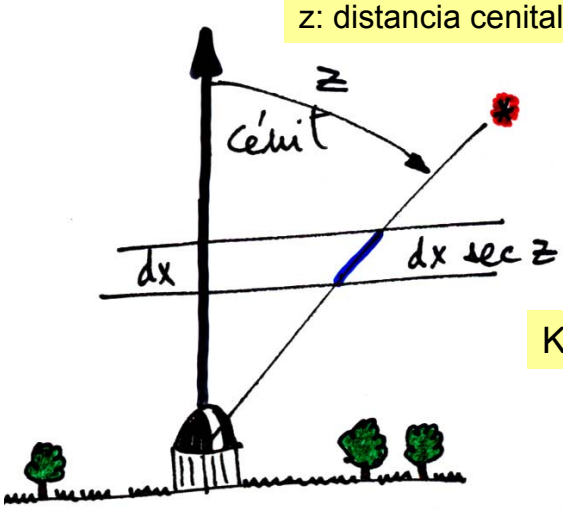
Curva de extinción media

Longitud de onda (nm)

- El contribuyente principal de la extinción es la difusión Rayleight
- El ozono impide observar por debajo de ~300nm.
- La extinción por aerosoles depende menos de la ldo: es muy gris.

FOTOMETRÍA: Extinción atmosférica (2)

- La absorción depende también de la cantidad de atmósfera atravesada.



z: distancia cenital

Flujo observado

Flujo fuera de la atmósfera

$$F_\lambda = F_\lambda^0 \, 10^{-0.4 K_\lambda \sec z}$$

Masa de aire

K_λ Coeficiente de absorción

$$m_\lambda = m_\lambda^0 + K_\lambda \sec z$$

Magnitud observada

Magnitud fuera de la atmósfera

- Para corregir nuestras observaciones de la absorción atmosférica necesitamos conocer el coeficiente de extinción en el momento de la observación.

FOTOMETRÍA: Fotometría absoluta (1)

Fotometría absoluta

(véase la práctica 5)

- Es un método de observación que permite obtener la magnitud de los objetos observados.
- Se puede realizar sólo en noches fotométricas.
  - Noches despejadas, cielo transparente, poca extinción.
  - Condiciones atmosféricas estables.
- Hay que observar estrellas estándar a lo largo de la noche para determinar el coeficiente de extinción y la constante instrumental.

$$m_\lambda = m_\lambda^0 + K_\lambda \sec z \qquad m_\lambda = C_\lambda - 2.5 \log F_\lambda \ (c/s)$$

$$m_\lambda^0 + 2.5 \log F_\lambda \ (c/s) = C_\lambda - K_\lambda \sec z$$

FOTOMETRÍA: Fotometría absoluta (2)

Observaciones de las estrellas estándar

Flujo de la estrella estándar (observado)

Constante instrumental

Coeficiente de extinción

$$m_\lambda^0 + 2.5 \log F_\lambda \ (c/s) = C_\lambda - K_\lambda \sec z$$

Magnitud de la estrella estándar (tabulada)

Masa de aire de la estándar en el instante de la observación

- La constante instrumental depende de las características de la instrumentación empleada: telescopio, fotómetro, detector, etc. y no debe variar de noche a noche si se controla el equipo.

- El coeficiente de extinción varía incluso dentro de la noche para noches de baja calidad (noches no fotométricas).

FOTOMETRÍA: Fotometría absoluta (3)

Recta de Bouguer (1)

- Se obtiene uniendo las observaciones de las estrellas estándar.
- Conviene que las estrellas se observen a diferentes alturas o masas de aire.

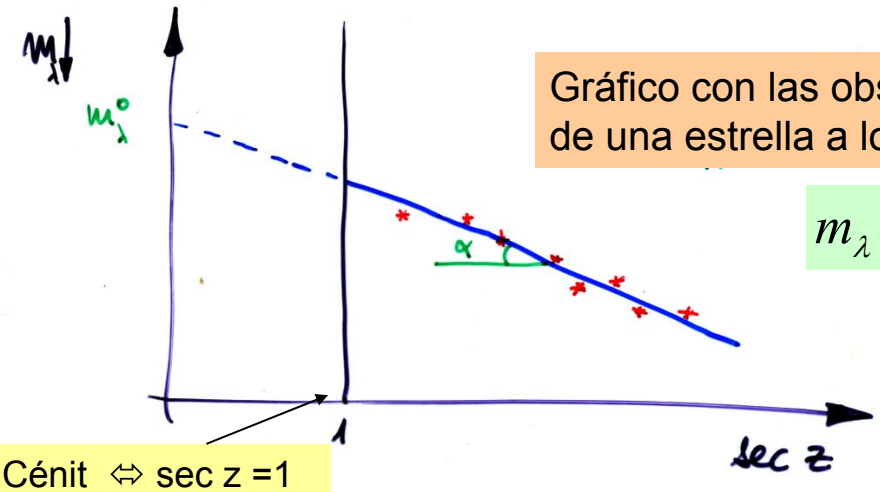


Gráfico con las observaciones de una estrella a lo largo de una noche

$$m_\lambda = m_\lambda^0 + K_\lambda \sec z$$

$$\operatorname{tg} \alpha = K_\lambda$$

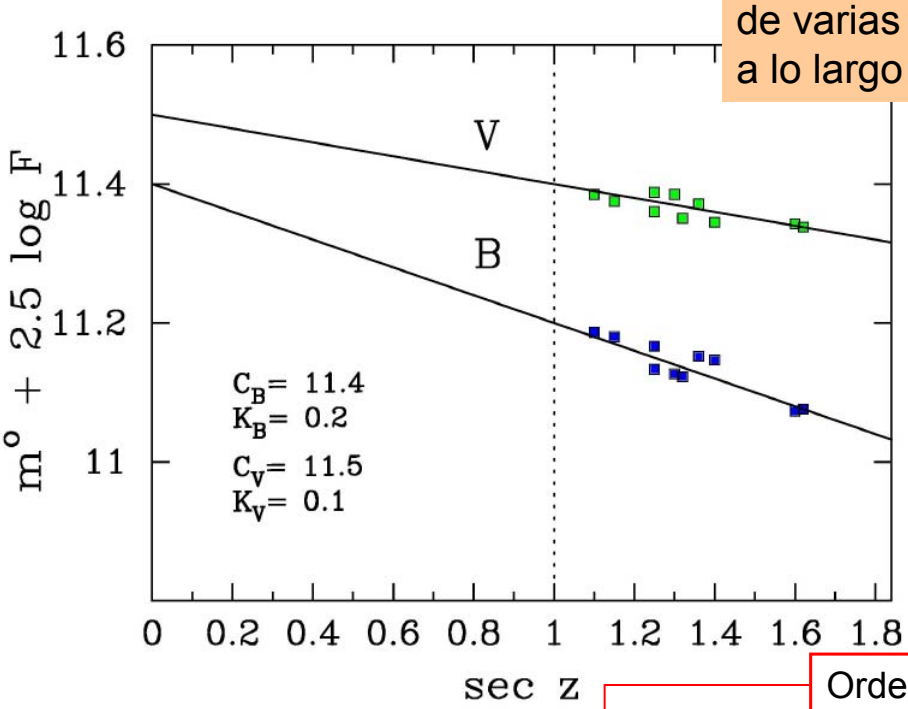
Cénit ⇔ sec z =1

- Si la noche es fotométrica se obtiene una recta.
- Su pendiente es el coeficiente de extinción en esa banda.
- La extrapolación a sec z = 0 nos da la magnitud de la estrella fuera de la atmósfera.

FOTOMETRÍA: Fotometría absoluta (4)

Recta de Bouguer (2)

Gráfico con las observaciones de varias estrellas estándar a lo largo de una noche



$$K_R < K_V < K_B$$

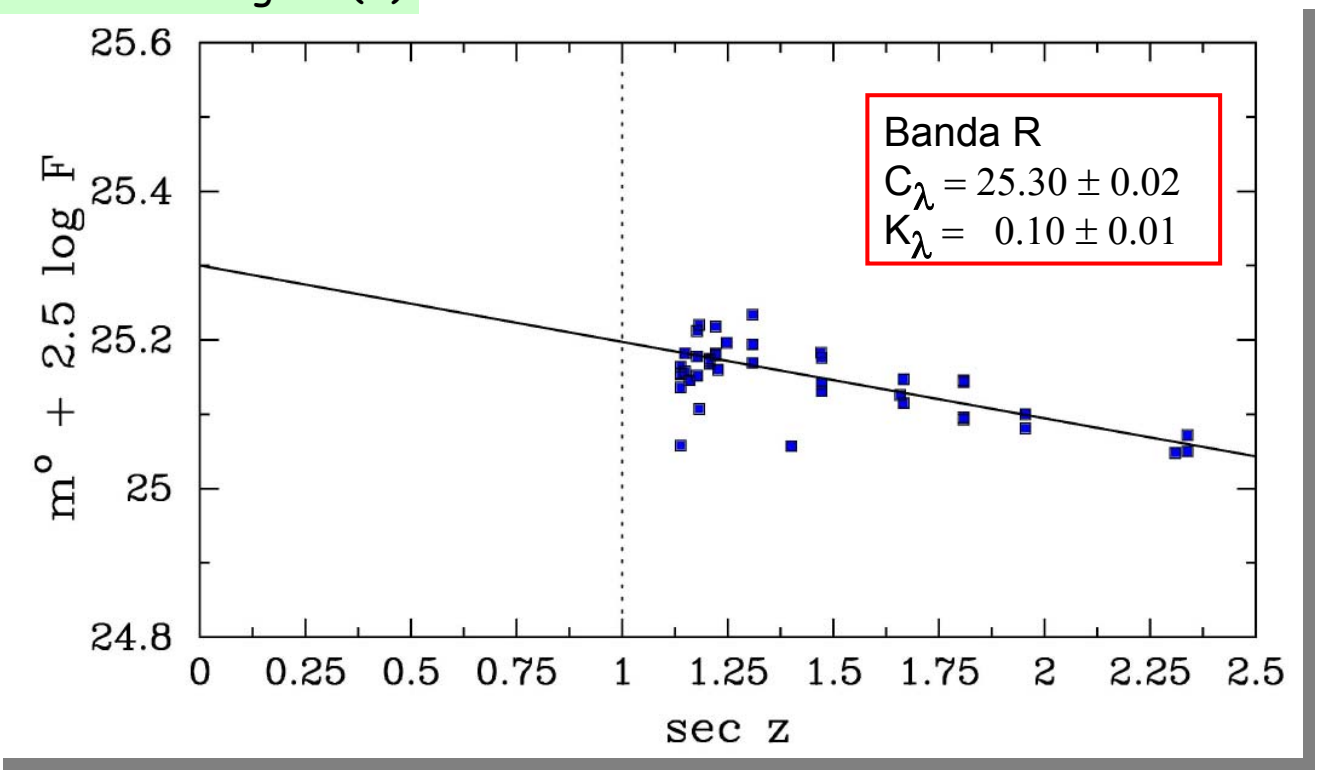
Ordenada en el origen

$$m_\lambda^0 + 2.5 \log F_\lambda \ (c/s) = C_\lambda - K_\lambda \sec z$$

pendiente

FOTOMETRÍA: Fotometría absoluta (5)

Recta de Bouguer (3)



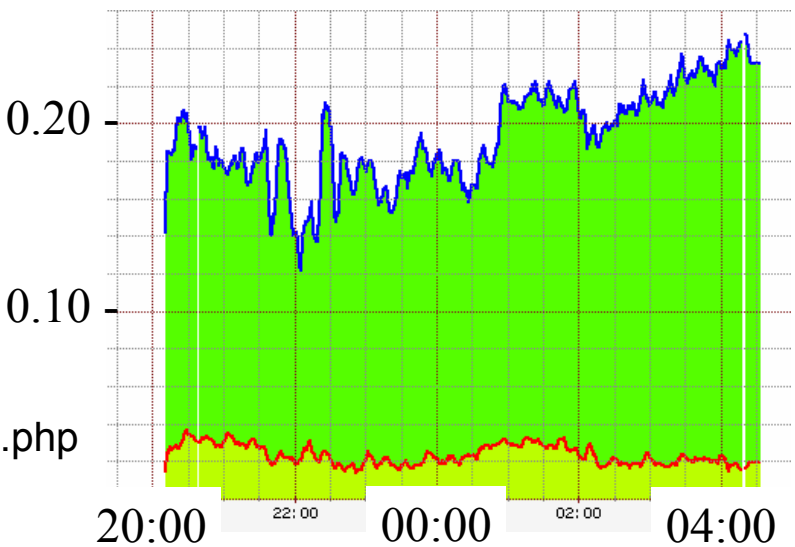
La dispersión de los datos da idea de la calidad de la noche y permite estimar la precisión de la fotometría.

FOTOMETRÍA: Fotometría absoluta (6)

Si se dedica un telescopio a medir la extinción a lo largo de una noche se aprecian variaciones importantes.

En nuestros observatorios internacionales se puede ver los registros de extinción en la banda V

Calar Alto 19/08/2003
variación de la extinción en la banda V (magn/masa de aire)

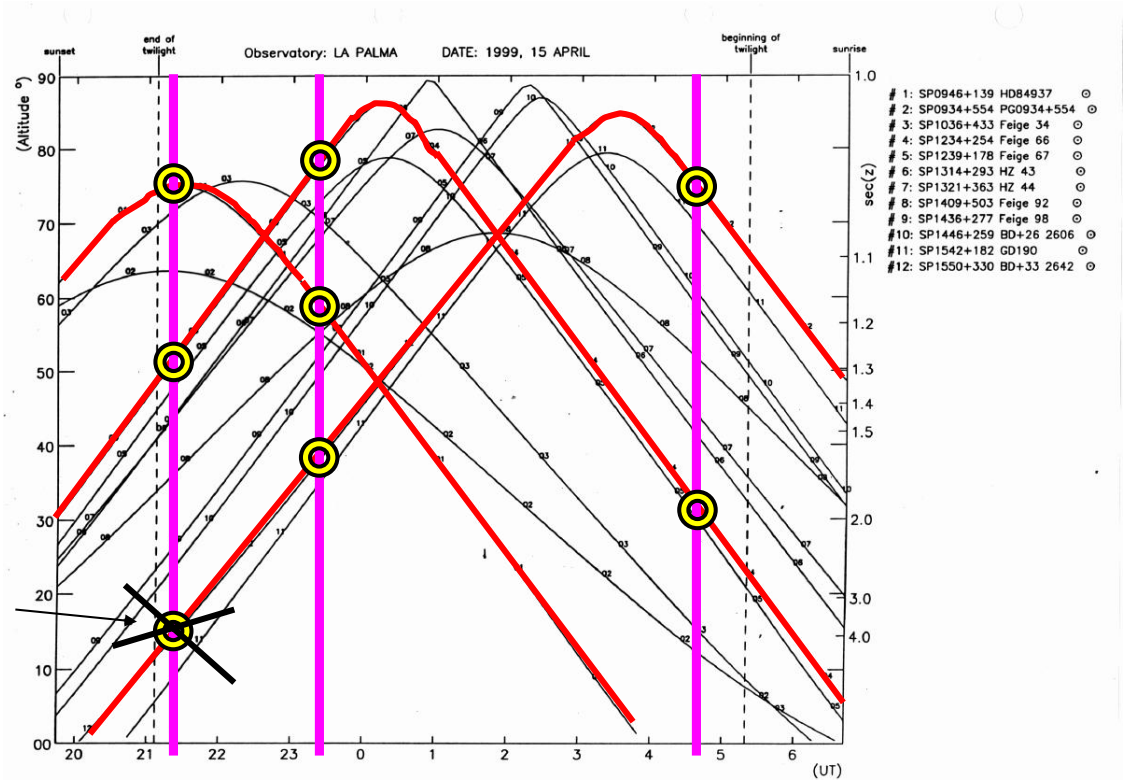


El Calar Alto Extinction Monitor
http://www.caha.es/CAVEX/cavex.php

El Carlsberg Meridian Telescope en el Observatorio del Roque de los Muchachos

http://www.ast.cam.ac.uk/~dwe/SRF/camc_extinction.html

FOTOMETRÍA: Fotometría absoluta (7)



Muy bajo

Gráfico con las alturas y masas de aire de estrellas estándar que pueden ser observadas una noche particular.

FOTOMETRÍA: Fotometría absoluta (8)

Procedimiento

Observaciones de estrellas estándar → $C_\lambda \quad K_\lambda$ ← Coeficiente de extinción y constante instrumental

Observaciones de los objetos problema → $F_\lambda(c/s) \quad \sec z$

Calibración final

Magnitud instrumental

$$m_\lambda = C_\lambda - 2.5 \log F_\lambda \ (c/s)$$

Magnitud corregida de extinción (fuera de la atmósfera)

$$m_\lambda^0 = m_\lambda + K_\lambda \ \sec z$$

FOTOMETRÍA: Fotometría diferencial (1)

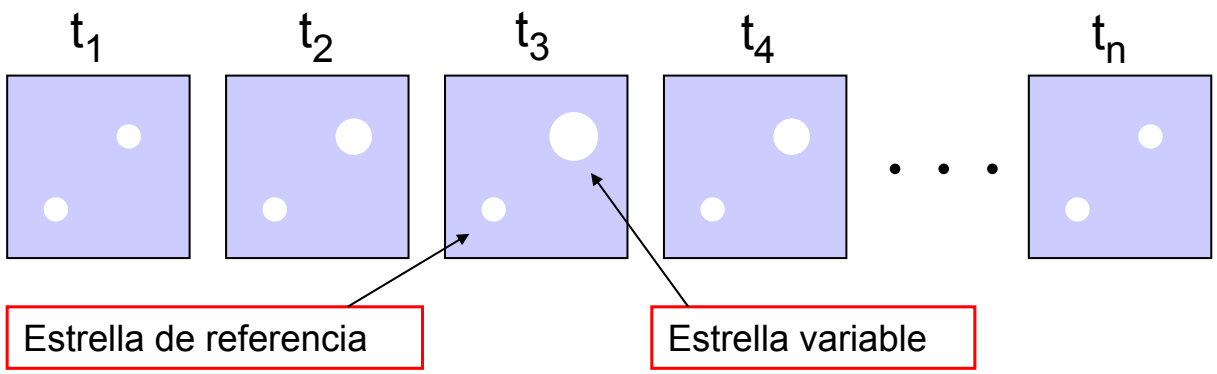
Fotometría diferencial

(véase la práctica 6)

- Es una técnica fotométrica más sencilla que permite obtener diferencias de magnitud respecto a una estrella de referencia.
- Es ideal para obtener curvas de luz de estrellas variables.
- Se puede realizar incluso en noches no fotométricas.

observaciones

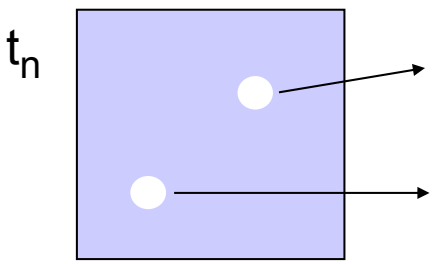
- Hay que observar a la vez el objeto problema y la estrella de referencia.



FOTOMETRÍA: Fotometría diferencial (2)

medidas

- Al ser observaciones simultáneas y encontrarse la estrella de referencia próxima la constante instrumental, el coeficiente de extinción, el fondo de cielo y la masa de aire son idénticos.

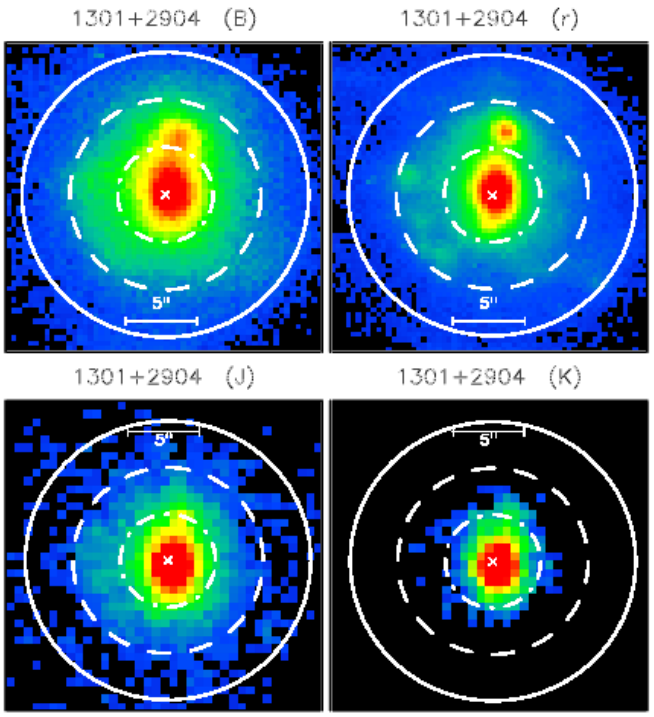


$$m_\lambda^{\text{var}} = C_\lambda - 2.5 \log F_\lambda^{\text{var}} + K_\lambda \sec z_\lambda$$

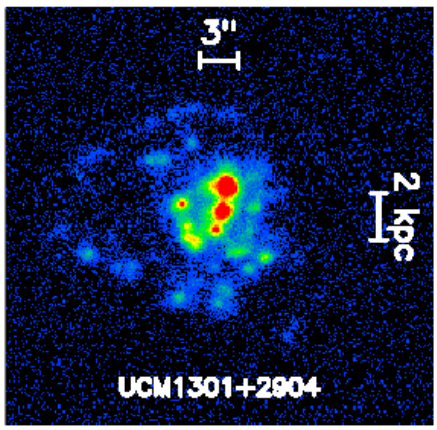
$$m_\lambda^{\text{ref}} = C_\lambda - 2.5 \log F_\lambda^{\text{ref}} + K_\lambda \sec z_\lambda$$

$$\Delta m_\lambda = m_\lambda^{\text{var}} - m_\lambda^{\text{ref}} = -2.5 \log \frac{F_\lambda^{\text{var}}}{F_\lambda^{\text{ref}}}$$

FOTOMETRÍA: objetos extensos (1)



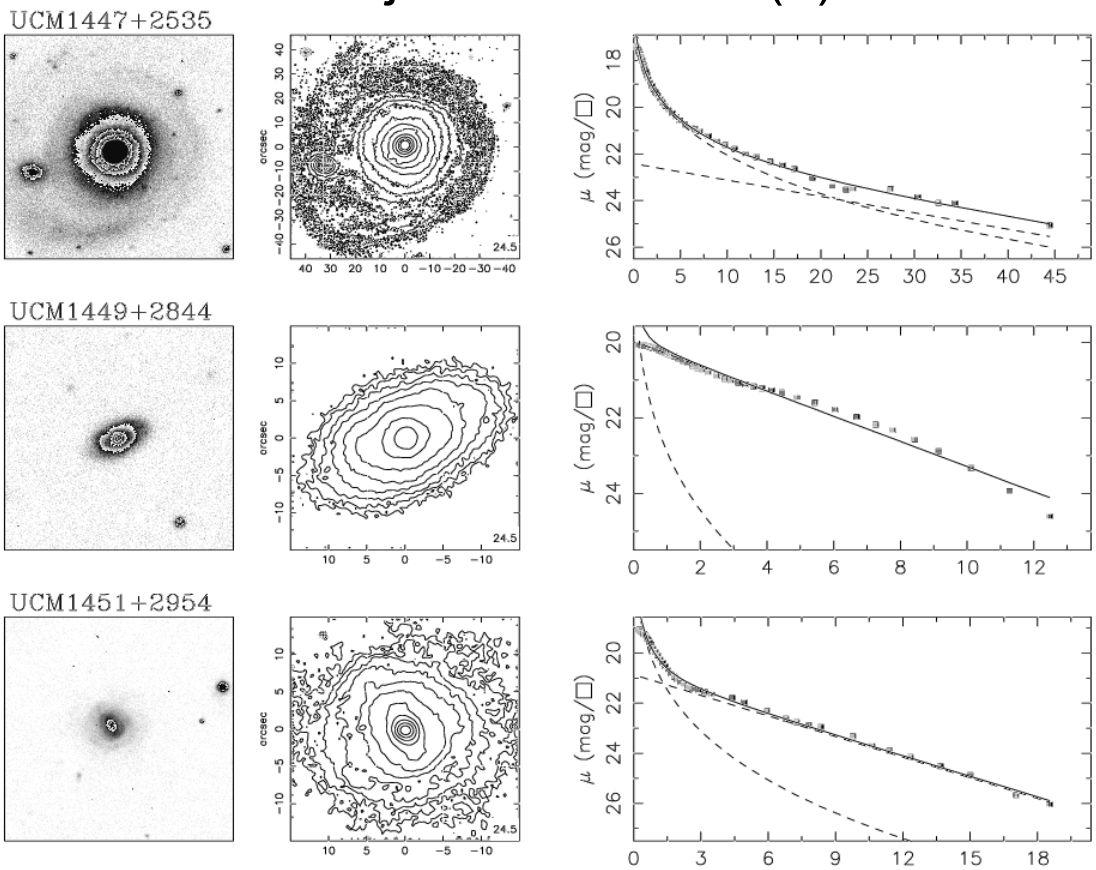
UCM1301+2904



$13^h\,04^m\,22.6^s$ $+28°\,48'\,41''$

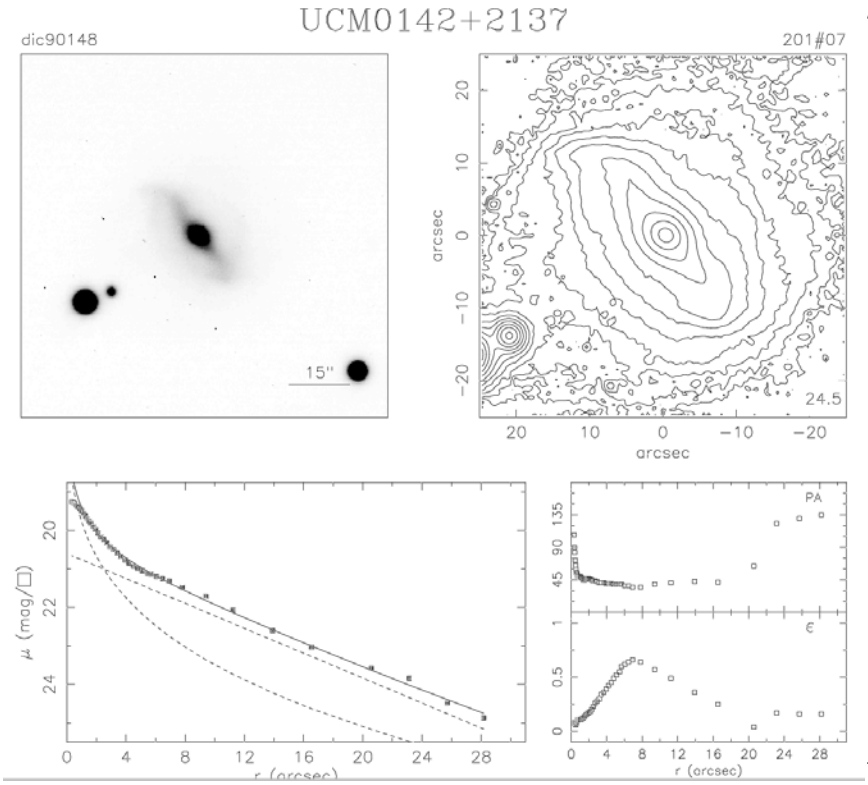
B	15.97	−19.41	z	0.02660	116
r	15.57	−19.79	$L_{H\alpha}$	41.49	41.41
J	14.07	−21.27	$EW_{H\alpha}$	65.9	59.8
K	13.39	−21.94	log(b)	−1.45	
$D_{24.5}$	16.6	8.9	log(t)	6.78	
$\log(\mathcal{M})$	9.71		O/H	8.49	
	Sb			HIIH	

FOTOMETRÍA: objetos extensos (2)



Representación gráfica en escala de grises, en contornos (isofotas) y perfil de brillo ajustado a un bulbo y un disco.

FOTOMETRÍA: objetos extensos (3)



$m_r = 14.19 \pm 0.09$

$\Phi_{24} = 51.8 \times 43.7$ arcsec

$\mu_e = 23.31 \pm 0.11$	$r_e = 9.17 \pm 0.64$
$\mu_o = 20.60 \pm 0.01$	$d_L = 6.71 \pm 0.01$
$B/D = 0.56 \pm 0.02$	$\sigma = 0.06$

$r_{24} = 23.78$	$m_{24} = 14.19$
$a_e = 9.50$	$\bar{\mu}_e = 21.02$
$c_{31} = 3.04$	$c_{42} = 3.07$

$r_{24.5} = 25.83$	$m_{24.5} = 14.16$
$\bar{\mu}_{24.5} = 22.46$	$CI = 0.42$

Representación gráfica en escala de grises, en contornos (isofotas), perfil de brillo ajustado a un bulbo y un disco y variación del ángulo de posición y elipticidad de elipses ajustadas a las isofotas .