

# *Lleva tu fotometría al límite*

David Galadí Enríquez



<https://www.facebook.com/Perito.en.Lunas>



@DGaladi

<https://galadi.net>

Vicecoordinador para España de la Oficina de Divulgación de la Astronomía de la Unión Astronómica internacional



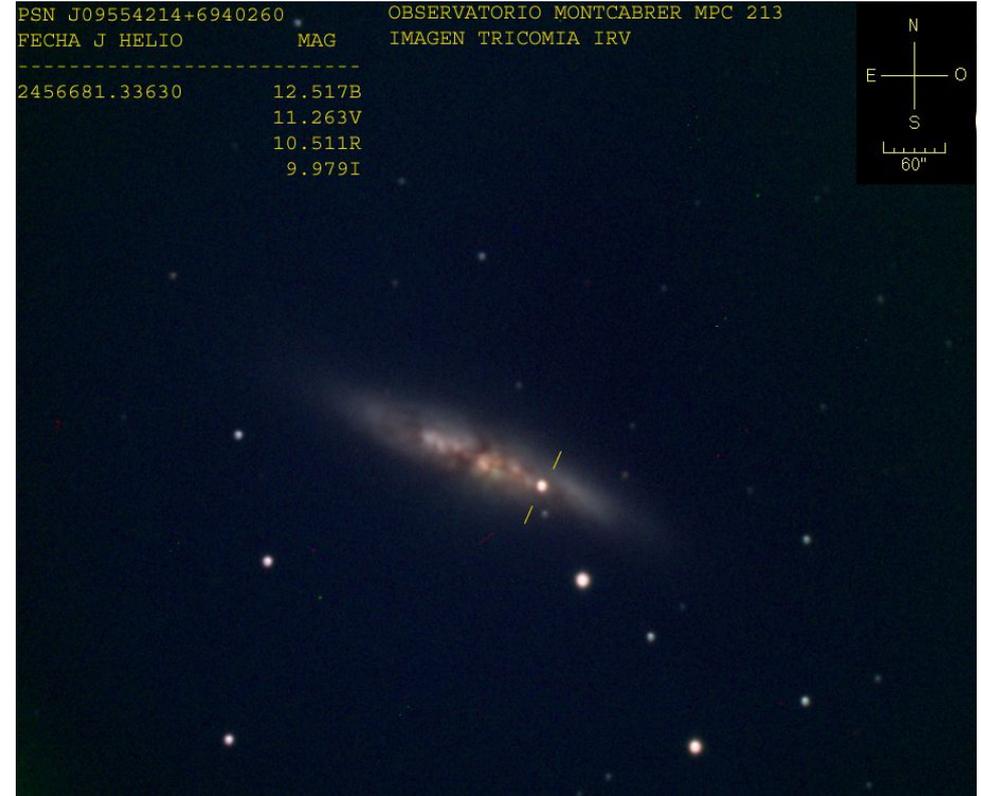
Federación de Asociaciones  
Astronómicas de España



# *Lleva tu fotometría al límite*

Fotometría y astrometría son dos técnicas en las que la colaboración Pro-Am es especialmente provechosa

- Fotometría de asteroides y cometas
- Supernovas y estrellas variables
- Incluso tránsitos planetarios
- Fenómenos violentos transitorios (GRB, FRB)
- Medidas de contaminación lumínica



Ramon Naves  
SN 2014J

# *Lleva tu fotometría al límite*

Fotometría y astrometría son dos técnicas en las que la colaboración Pro-Am es especialmente provechosa

- Fotometría de asteroides y cometas
- Supernovas y estrellas variables
- Incluso tránsitos planetarios
- Fenómenos violentos transitorios (GRB, FRB)
- Medidas de contaminación lumínica

Antecedentes y secuelas de esta charla:

# *Lleva tu fotometría al límite*

Fotometría y astrometría son dos técnicas en las que la colaboración Pro-Am es especialmente provechosa

- Fotometría de asteroides y cometas
- Supernovas y estrellas variables
- Incluso tránsitos planetarios
- Fenómenos violentos transitorios (GRB, FRB)
- Medidas de contaminación lumínica

Antecedentes y secuelas de esta charla:

- XXIII Convención de observadores de la Agrupación Astronómica de Sabadell, 29 nov. 2014



# *Lleva tu fotometría al límite*

Fotometría y astrometría son dos técnicas en las que la colaboración Pro-Am es especialmente provechosa.

- Fotometría de asteroides y cometas
- Supernovas y estrellas variables
- Incluso tránsitos planetarios
- Fenómenos violentos transitorios (GRB, FRB)
- Medidas de contaminación lumínica

Antecedentes y secuelas de esta charla:

- XXIII Convención de observadores de la Agrupación Astronómica de Sabadell, 29 nov. 2014
- Cursos de fotometría orientada a la medida de la CL en Calar Alto (2009, 2010, 2011, 2013)



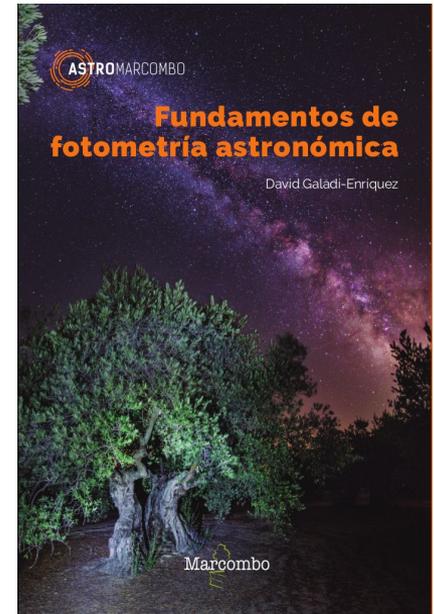
# Lleva tu fotometría al límite

Fotometría y astrometría son dos técnicas en las que la colaboración Pro-Am es especialmente provechosa.

- Fotometría de asteroides y cometas
- Supernovas y estrellas variables
- Incluso tránsitos planetarios
- Fenómenos violentos transitorios (GRB, FRB)
- Medidas de contaminación lumínica

Antecedentes y secuelas de esta charla:

- XXIII Convención de observadores de la Agrupación Astronómica de Sabadell, 29 nov. 2014
- Cursos de fotometría orientada a la medida de la CL en Calar Alto (2009, 2010, 2011, 2013)
- Libro *Fundamentos de fotometría astronómica* (Marcombo, 2020)



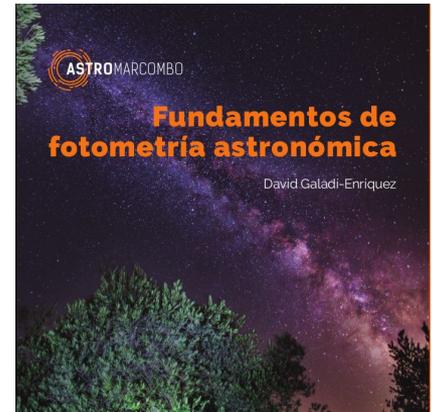
# Lleva tu fotometría al límite

Fotometría y astrometría son dos técnicas en las que la colaboración Pro-Am es especialmente provechosa

- Fotometría de asteroides y cometas
- Supernovas y estrellas variables
- Incluso tránsitos planetarios
- Fenómenos violentos transitorios (GRB, FRB)
- Medidas de contaminación lumínica

Antecedentes y secuelas de esta charla:

- XXIII Convención de observadores de la Agrupación Astronómica de Sabadell, 29 nov. 2014
- Cursos de fotometría orientada a la medida de la CL en Calar Alto (2009, 2010, 2011, 2013)
- Libro *Fundamentos de fotometría astronómica* (Marcombo, 2020)
- Charla Agrupación Astronómica de Madrid, próximo martes 1 de marzo



**Fundamentos de fotometría astronómica**

David Galadí Enríquez  
Astrónomo residente, Observatorio de Calar Alto  
Martes 1 de marzo de 2022, 19:30 h

XX Cyg

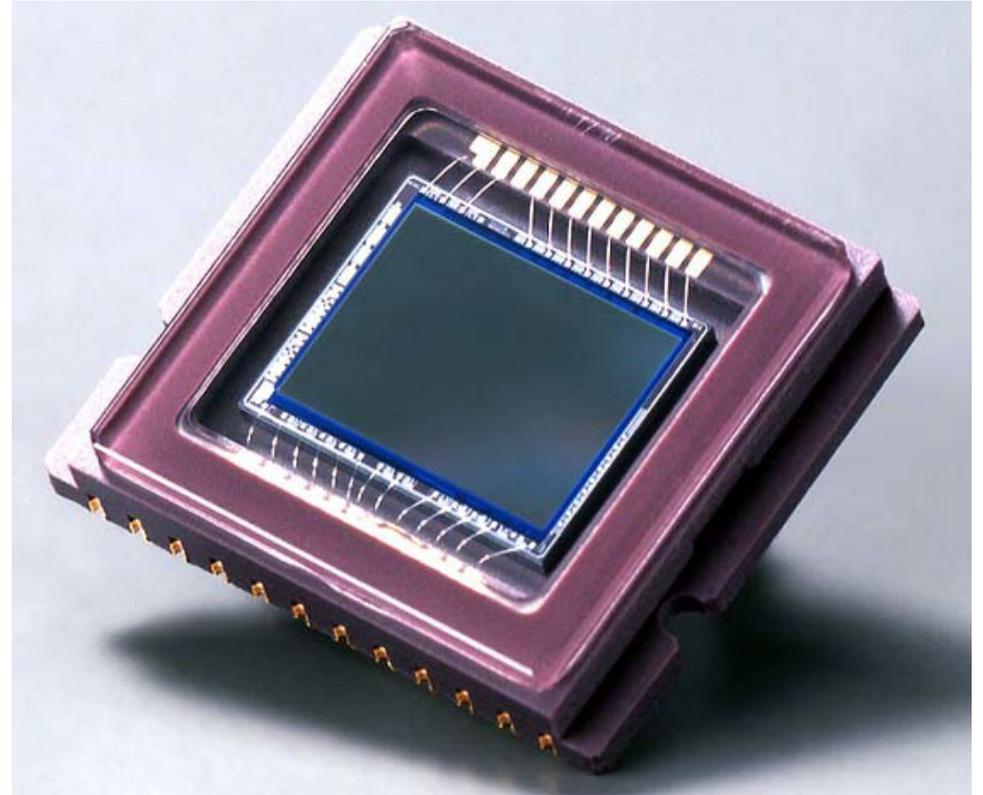
Phase

aam

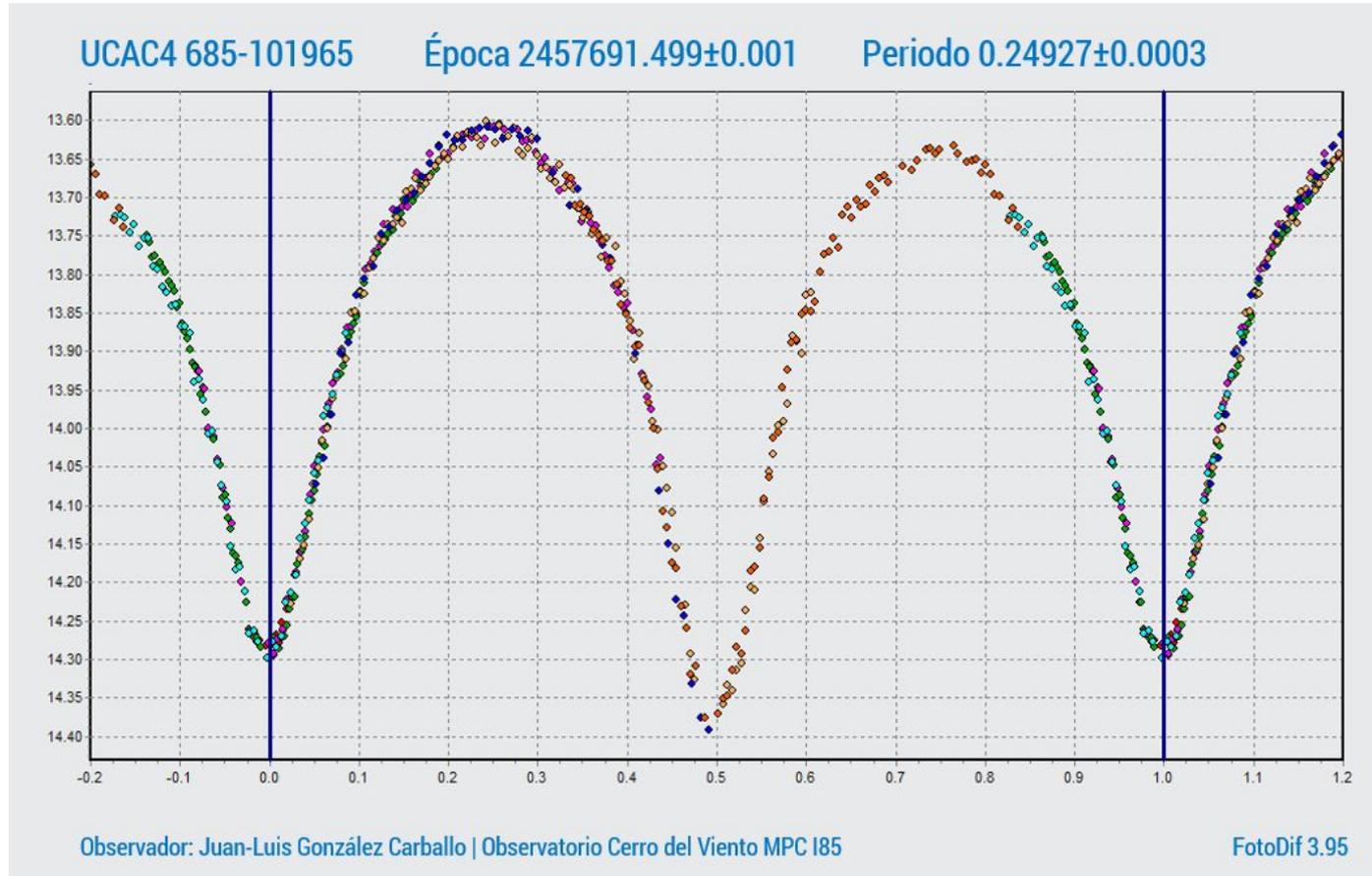
# *Lleva tu fotometría al límite*

Plan de la charla:

- Un par de ejemplos
- Magnitudes y logaritmos
- El problema fundamental
- Linealidad
- Corriente de oscuridad
- Aplanamiento del campo
- Muestreo espacial (tamaño del píxel)
- Abertura fotométrica
- Ruido en las medidas
- Relación señal/ruido
- Más reflexiones sobre la abertura
- Ideas para mejorar la relación señal/ruido
- Extinción atmosférica
- Resumen

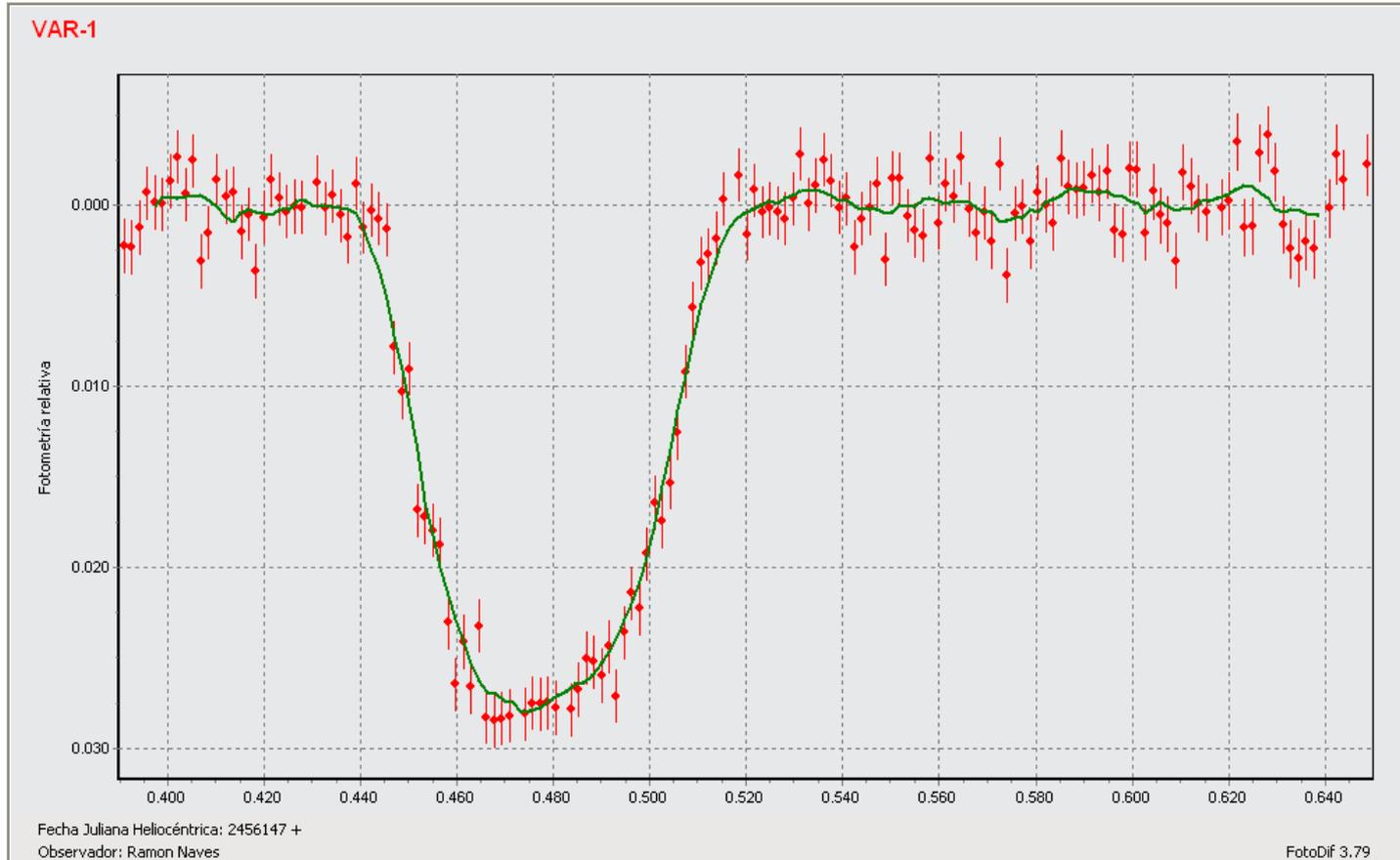


# *Algunos ejemplos*



Juan-Luis González Carballo

# Algunos ejemplos



Ramon Naves

## *Objetivo: precisión*

No aplicar las recetas ciegamente

Tomar decisiones bien informadas

# *Magnitudes, logaritmos*

Escala de Hiparco (S. -II): magnitudes primera a sexta

Formalización por Pogson, S. XIX:

$F$ : flujo, irradiancia recibida del objeto, a través de un filtro determinado bien especificado, y medida en algunas unidades determinadas

2.5: es un número exacto, justamente  $5/2$

$C$ : una constante, llamada *punto cero*.

¿Qué vale la constante?

Pues depende de las unidades en las que se mida  $F$ .

Hay unas unidades de medida para  $F$  que harán  $C = 0$ : **unidades «naturales»**

$$m = C - 2.5 \log_{10} F$$

12 *Mr. Pogson, Magnitudes of Thirty-six Minor Planets.*

*Magnitudes of Thirty-six of the Minor Planets for the First Day of each Month of the Year 1857.* By Norman Pogson, Esq., Assistant at the Radcliffe Observatory, Oxford.

(Communicated by M. J. Johnson, Esq., Radcliffe Observer.)

# *Magnitudes, logaritmos*

Recordemos qué son los logaritmos:

$$\log_b a$$

es el número al que hay que elevar  $b$  para que dé  $a$ .  
Dicho de otro modo:

$$b^{\log_b a} = a$$

Admitimos que las unidades de  $F$  son las que hacen  $C = 0$ . Entonces, la fórmula de Pogson original podría escribirse así:

$$m = -\log_{\sqrt[5]{100}} F$$

Pero recordemos que:

$$\sqrt[x]{y} = y^{1/x}$$

Por tanto:  $\sqrt[5]{100} = \sqrt[5]{10^2} = (10^2)^{1/5} = 10^{2/5}$

$$m = -\log_{\sqrt[5]{100}} F = -\log_{10^{2/5}} F$$

Un par de propiedades.  
Esta es bastante conocida:

$$\log_b (a^c) = c \log_b a$$

Esta otra resulta utilísima y es bastante menos conocida:

$$\log_{b^c} a = \frac{1}{c} \log_b a$$

Y nos lleva a:

$$m = -\log_{10^{2/5}} F = -\frac{5}{2} \log_{10} F$$

## *El problema fundamental de la fotometría:*

Medir  $F$  en mis propias unidades, «cuentas por segundo». De ahí saco la magnitud en mi propia escala, que llamo magnitud instrumental:

Existe un factor  $k$  que convierte mis unidades en las unidades «naturales». Si  $kF$  está en unidades naturales:

A partir de una o varias estrellas de magnitud conocida determinar el valor de  $C$ :

Y ya para cualquier otra estrella medida:

$$m' = -2.5 \log_{10} F$$

$$\begin{aligned} m &= -2.5 \log_{10} (kF) \\ &= -2.5 \log_{10} k - 2.5 \log_{10} F \\ &= C + m' \end{aligned}$$

$$C = m - m'$$

$$m = C - 2.5 \log_{10} F$$

## ***El problema fundamental de la fotometría DIFERENCIAL:***

Comparamos estrellas captadas dentro de la misma imagen

Damos por supuesto que la atmósfera afecta del mismo modo a todo lo que hay dentro de la imagen

***Una variante del problema si solo nos interesan los cambios de brillo, y no tanto su valor absoluto:***

Se toma una estrella de brillo fijo como «unidad de medida», su flujo es  $f$  en cuentas/segundo

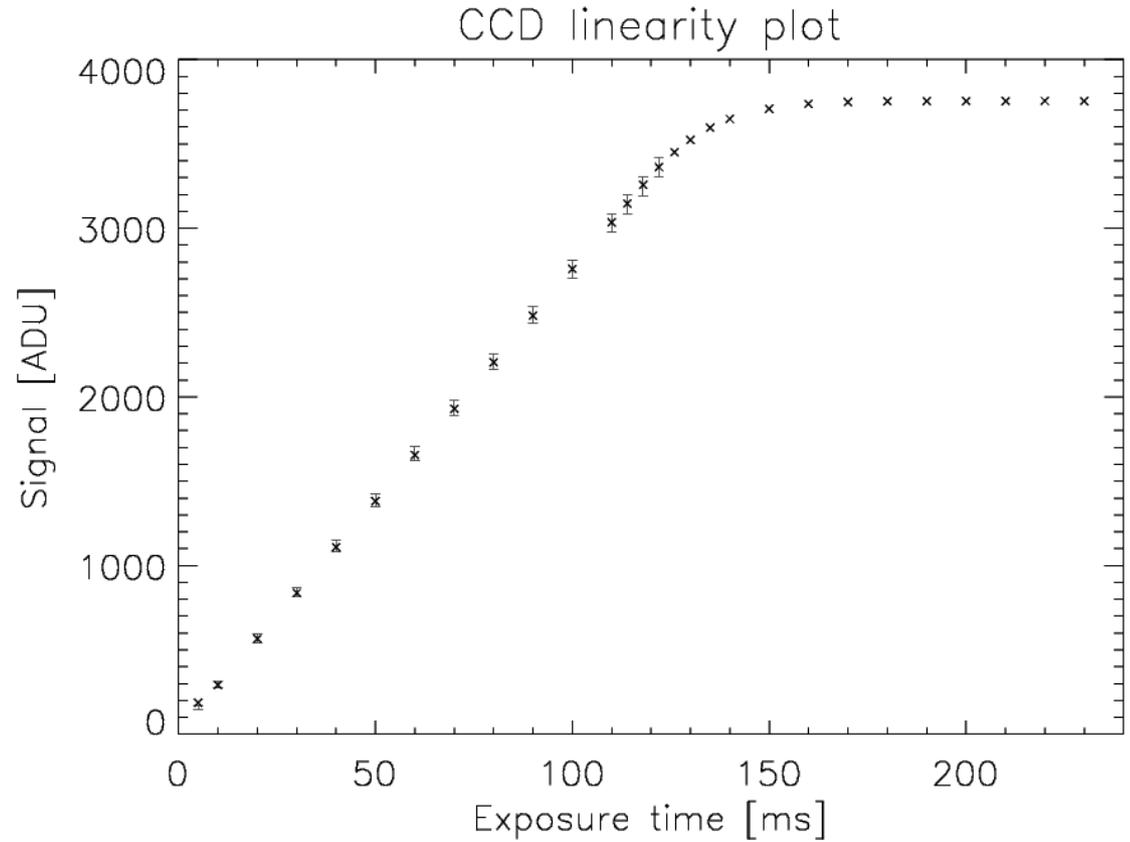
Se compara con el flujo  $F$  en cuentas por segundo de la estrella problema:

$$\Delta m = -2.5 \log_{10} \frac{F}{f}$$

*¿Qué puede alterar las medidas?*

## *Linealidad:*

- Garantizar iluminación estable, no tiene que ser uniforme
- Tomar imágenes con tiempos de integración cada vez mayores
- Comprobar cuándo la gráfica deja de ser lineal

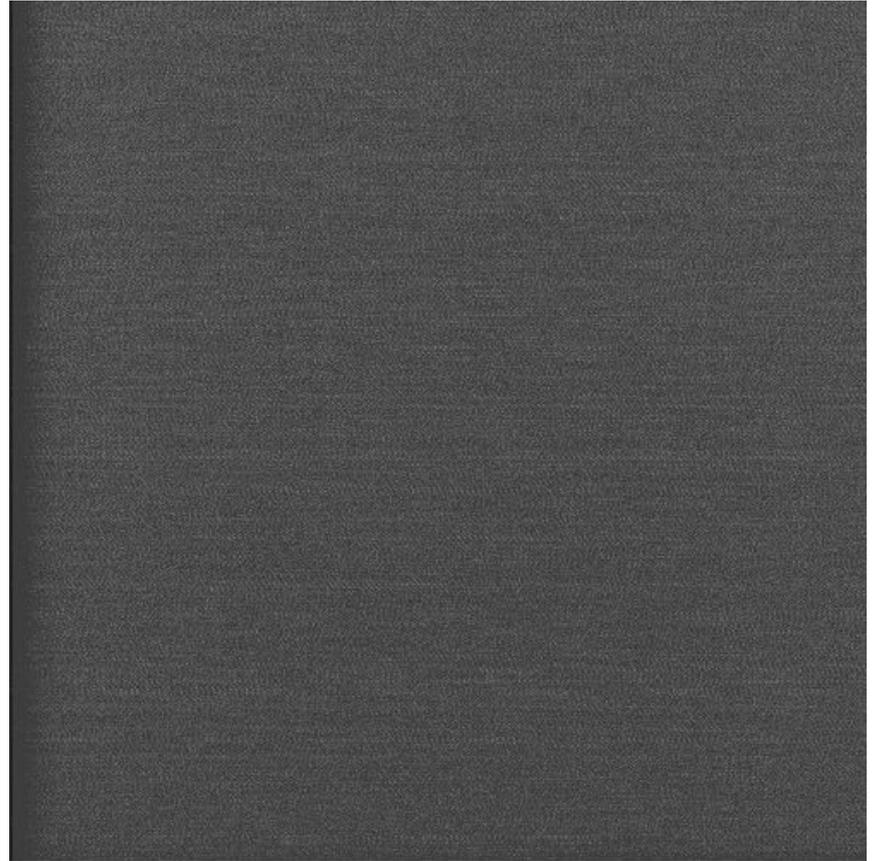


## *Tratamiento básico de las imágenes:*

- Sustracción de la corriente de oscuridad (tomas oscuras, «darks»)
- Irregularidades de sensibilidad (tomas planas, «flats»)

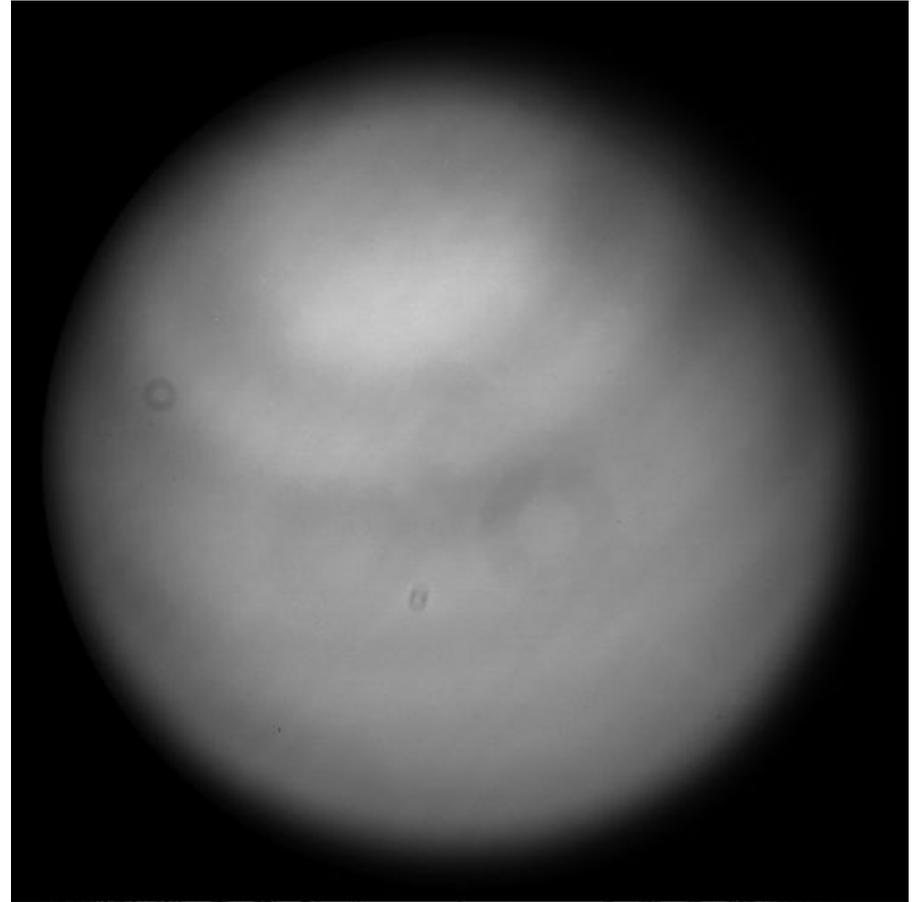
## *Sustracción de la corriente de oscuridad:*

- Lineal con el tiempo
- Exponencial con la temperatura del sensor
- No depende del filtro
- Crucial: estabilidad térmica
- Promediar muchas tomas oscuras (con mediana)
- Sustraer el promedio a todas las demás tomas



## *Irregularidades (aplanamiento del campo):*

- Viñeteo
- Irregularidades del detector
- Motas de polvo
- Depende del filtro
- Restar a cada toma plana la corr. oscuridad
- Promediar muchas tomas planas (con mediana)
- Normalizar (dividir entre el valor medio)
- Tomas de ciencia: restarles corr. oscuridad y dividir entre toma plana normalizada



## *Reflexiones sobre el aplanamiento del campo:*

- ¿Cielo o pantalla?
- La normalización afecta al punto cero
- Motas de polvo: limpiar
- Si la toma plana **normalizada** difiere de la unidad en una cantidad  $d$ , no aplicarla implica cometer errores en magnitud aproximadamente iguales a  $d$
- Precisión crucial
- Mantener el encuadre

$$m = -2.5 \log_{10} F$$

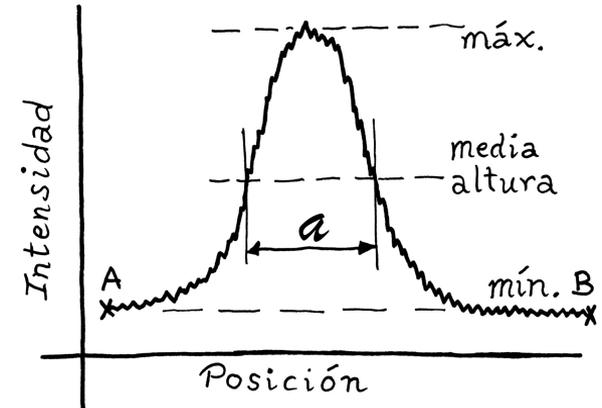
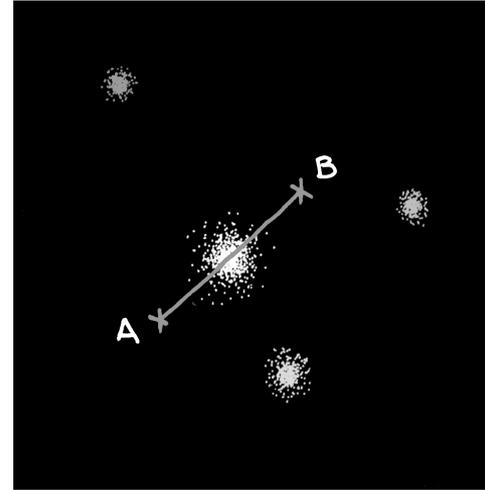
$$m' = -2.5 \log_{10} [(1+d)F]$$

$$|\Delta m| = |2.5 \log_{10} (1+d)|$$

$$2.5 \log_{10} (1+d) \simeq d \cdot 2.5 \log_{10} e = 1,0857 d \simeq d$$

## *Muestreo espacial: tamaño del píxel*

- Estructura interna de los píxeles → ocupar varios
- Pero no demasiados si la estrella es débil
- Compromiso: criterio de Nyquist
- Anchura a media altura entre 2 y 3 píxeles



# *Tomamos la medida: abertura y corona*

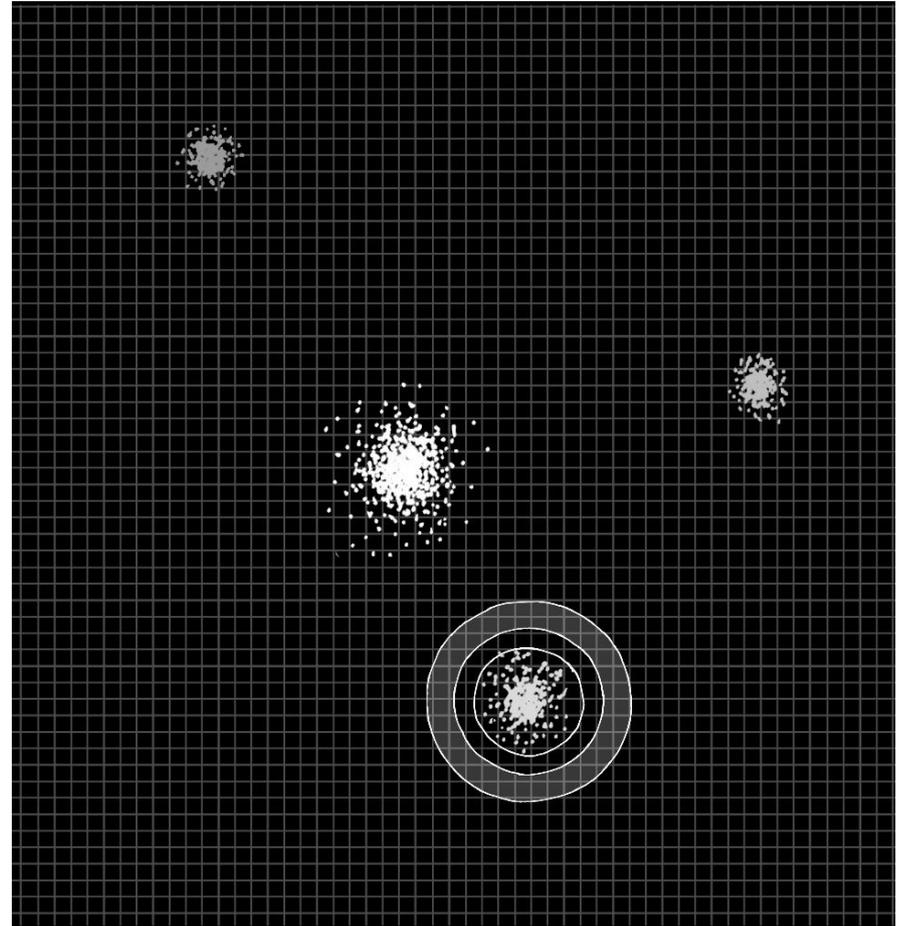
Corona: para estimar el fondo

Radio de la abertura, elección óptima:

- **Mayor** para astros brillantes
- **Menor** para astros débiles
- ¡Pero hay que usar el mismo radio para todas!
- No pasarse:

radio =  $\pi/2$  veces la anchura a media altura  
incluye **toda** la luz  
más solo añade ruido

$$2.2 \text{ px} \cdot \pi/2 = 4 \text{ px radio}$$



# *La señal y el ruido*

Ganancia:  $G$  electrones/cuenta

Los cálculos de ruido se hacen en electrones, no en cuentas

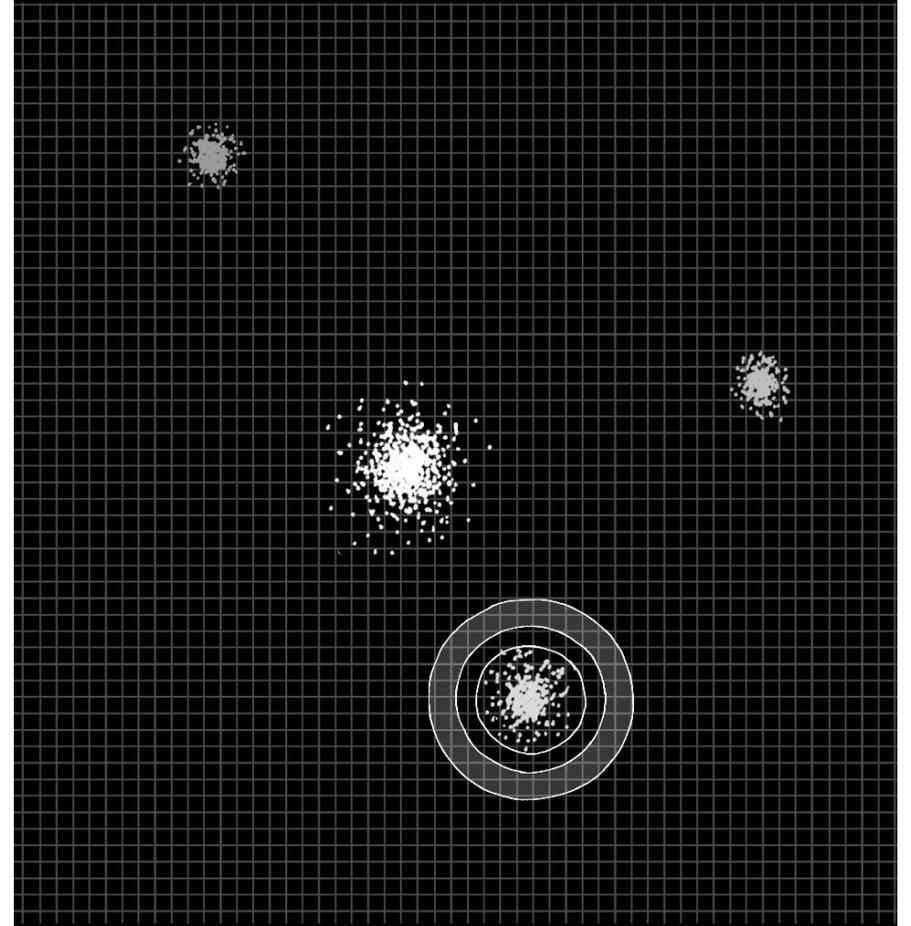
Ruido de la medida:

$$R = \sqrt{N + 2n(N_O + N_F + R_L^2)}$$

$N$ , electrones totales debidos a la estrella  
 $n$ , área en píxeles del círculo en que se mide  
 $N_O$ , electrones de corr. oscuridad en un px  
 $N_F$ , electrones de luz de fondo en un px  
 $R_L$ , ruido de lectura para un px

Paradoja:

Reducir ruido  $\rightarrow$  medir cero electrones en cero píxeles



# La relación señal/ruido

$$\frac{S}{R} = \frac{N}{\sqrt{N + 2n(N_O + N_F + R_L^2)}}$$

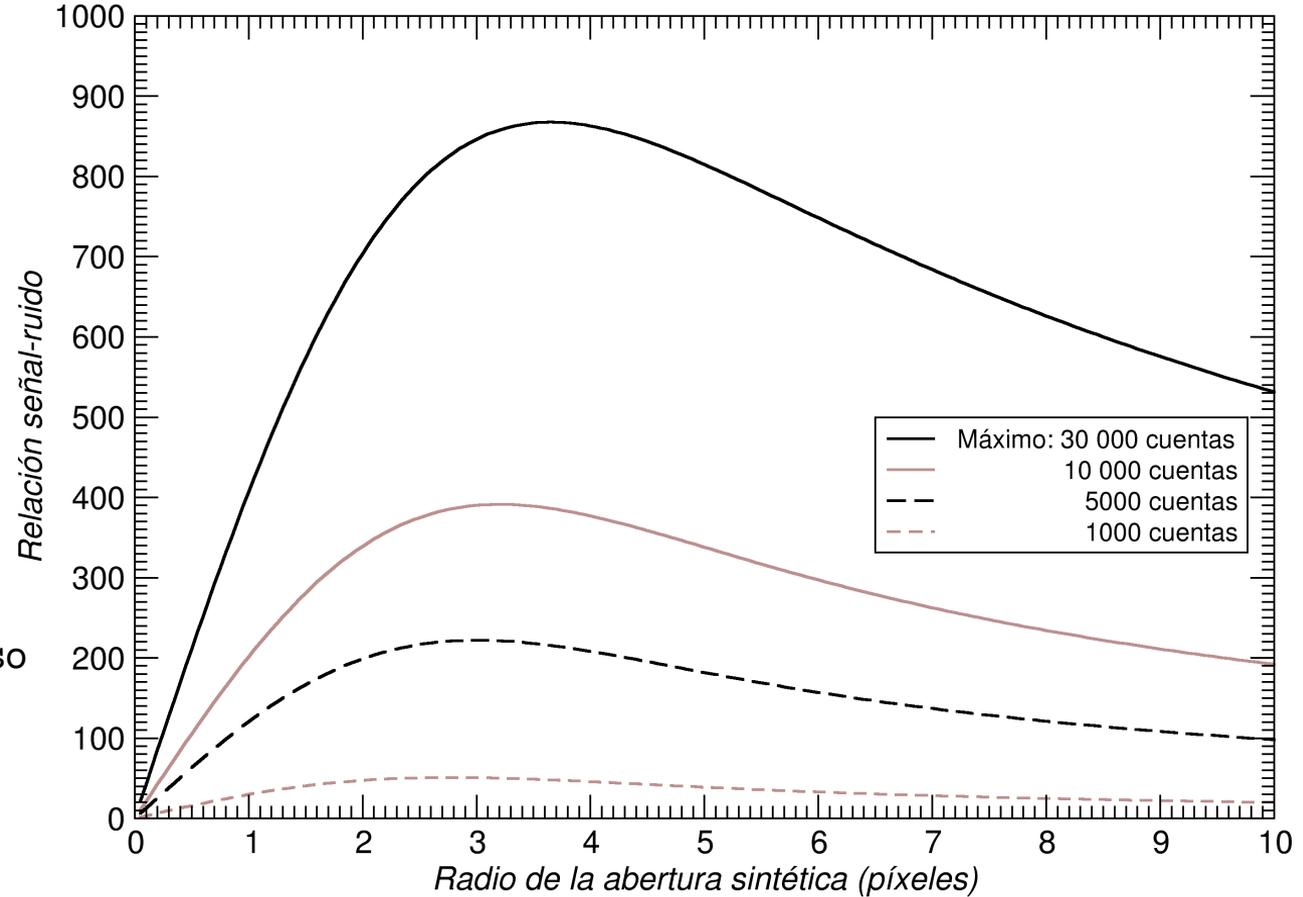
Objetos muy brillantes:  $N$  grande

$$\frac{S}{R} \approx \frac{N}{\sqrt{N}} = \sqrt{N}$$

Magia logarítmica: el error en magnitudes se parece mucho al inverso de la relación señal/ruido

$$\sigma \approx \pm 1.0857 \frac{R}{S} \approx \frac{\pm 1}{S/R}$$

Fondo 3000 cuentas; anchura a media altura 4 píxeles



# La relación señal/ruido

$$\frac{S}{R} = \frac{N}{\sqrt{N + 2n(N_O + N_F + R_L^2)}}$$

Objetos muy brillantes:  $N$  grande

$$\frac{S}{R} \approx \frac{N}{\sqrt{N}} = \sqrt{N}$$

Magia logarítmica: el error en magnitudes se parece mucho al inverso de la relación señal/ruido

$$\sigma \approx \pm 1.0857 \frac{R}{S} \approx \frac{\pm 1}{S/R}$$

Objetos muy brillantes:

Podemos ocupar muchos px, incluso desenfocar, ¡los resultados mejoran!

Objetos débiles:

Ocupar pocos px, pero sin inframuestrear

Importante enfocar y buen *seeing* (anchura a media altura reducida), concentrar la luz

Ejemplo:  $G = 5$  electrones/cuenta  
→ miles de cuentas para 0.01 mag  
→ cientos de miles para 0.001 mag

# *La abertura y el punto cero*

La abertura determina la fracción de la luz que entra en la medida

Misma abertura para todas las medidas

→

Misma fracción de luz para todos los objetos

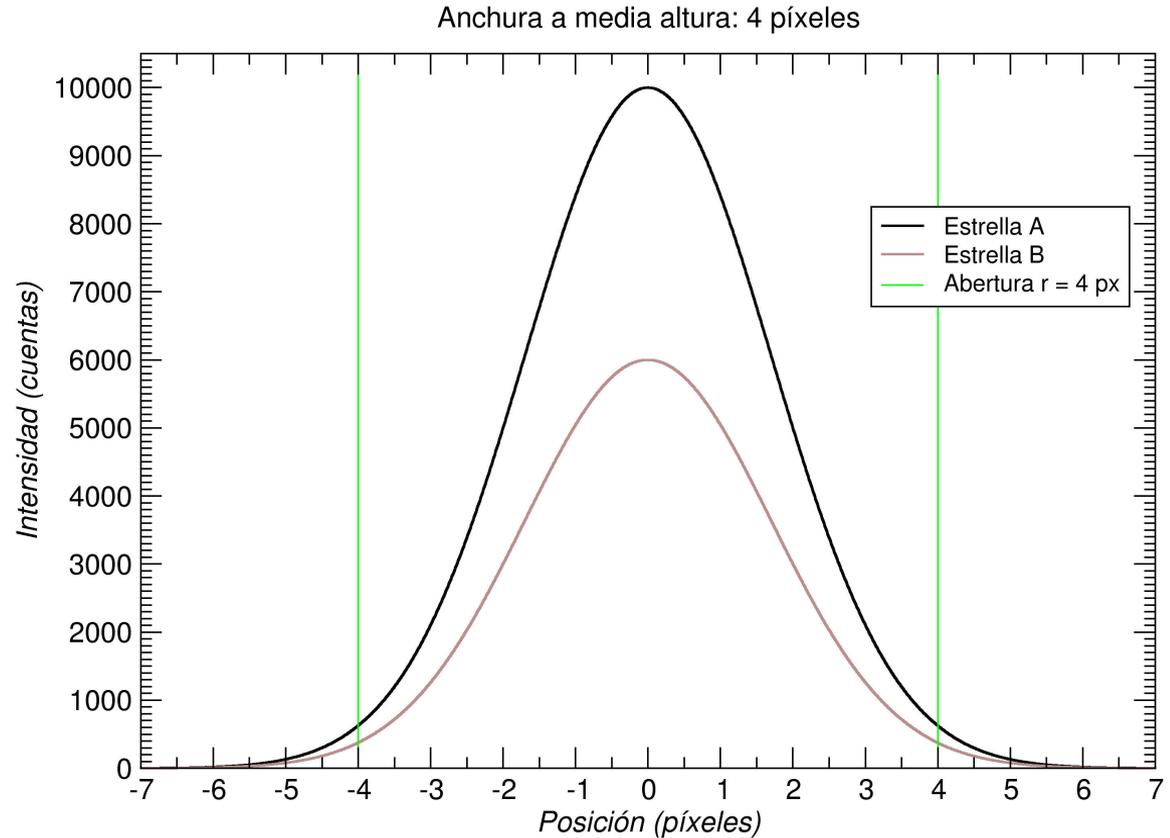
→

Medidas correctas

Diferente punto cero si se usan distintas aberturas

Jamás mezclar medidas tomadas con aberturas diferentes

**Perfil uniforme** en todo el campo de visión



# *Más ideas para mejorar la relación señal/ruido*

Incrementar numerador, reducir denominador

## **Incrementar numerador:**

- Más tiempo de integración, crece  $N$
- Sumar varias imágenes, crece  $N$
- Telescopio de más abertura, crece  $N$
- Incrementar la ganancia, reducir la sensibilidad

$$\frac{S}{R} = \frac{N}{\sqrt{N + 2n(N_O + N_F + R_L^2)}}$$

# *Más ideas para mejorar la relación señal/ruido*

Incrementar numerador, reducir denominador

## **Incrementar numerador:**

- Más tiempo de integración, crece  $N$
- Sumar varias imágenes, crece  $N$
- Telescopio de más abertura
- Incrementar la ganancia, reducir la sensibilidad

## Más tiempo:

- La relación señal-ruido mejora con la raíz cuadrada del tiempo
- Dificultades de seguimiento
- Más rayos cósmicos y otras perturbaciones

$$\frac{S}{R} = \frac{N}{\sqrt{N + 2n(N_O + N_F + R_L^2)}}$$

# *Más ideas para mejorar la relación señal/ruido*

Incrementar numerador, reducir denominador

## **Incrementar numerador:**

- Más tiempo de integración, crece  $N$
- Sumar varias imágenes, crece  $N$
- Telescopio de más abertura
- Incrementar la ganancia, reducir la sensibilidad

## Sumar imágenes:

- La relación señal-ruido mejora con la raíz cuadrada del número de imágenes
- Sin problemas de seguimiento
- Más ruido de lectura: ojo objetos débiles

$$\frac{S}{R} = \frac{N}{\sqrt{N + 2n(N_O + N_F + R_L^2)}}$$

# *Más ideas para mejorar la relación señal/ruido*

Incrementar numerador, reducir denominador

## **Incrementar numerador:**

- Más tiempo de integración, crece  $N$
- Sumar varias imágenes, crece  $N$
- Telescopio de más abertura
- Incrementar la ganancia, reducir la sensibilidad

## Más abertura:

- O sea, más dinero
- También vale reducir la focal, pero ojo: inframuestreo
- Se reduce la importancia relativa del resto de ruidos

$$\frac{S}{R} = \frac{N}{\sqrt{N + 2n(N_O + N_F + R_L^2)}}$$

# *Más ideas para mejorar la relación señal/ruido*

Incrementar numerador, reducir denominador

## **Incrementar numerador:**

- Más tiempo de integración, crece  $N$
- Sumar varias imágenes, crece  $N$
- Telescopio de más abertura
- Incrementar la ganancia, reducir la sensibilidad

## **Incrementar ganancia:**

- «Pasarse a ISO menor»
- Empeora el rango dinámico
- No siempre es viable y no es una mejora obvia
- Los fabricantes saben lo que hacen: no lo toques

$$\frac{S}{R} = \frac{N}{\sqrt{N + 2n(N_O + N_F + R_L^2)}}$$



ISO speed 					
Auto	100	125	160	200	250
320	400	500	640	800	1000
1250	1600				

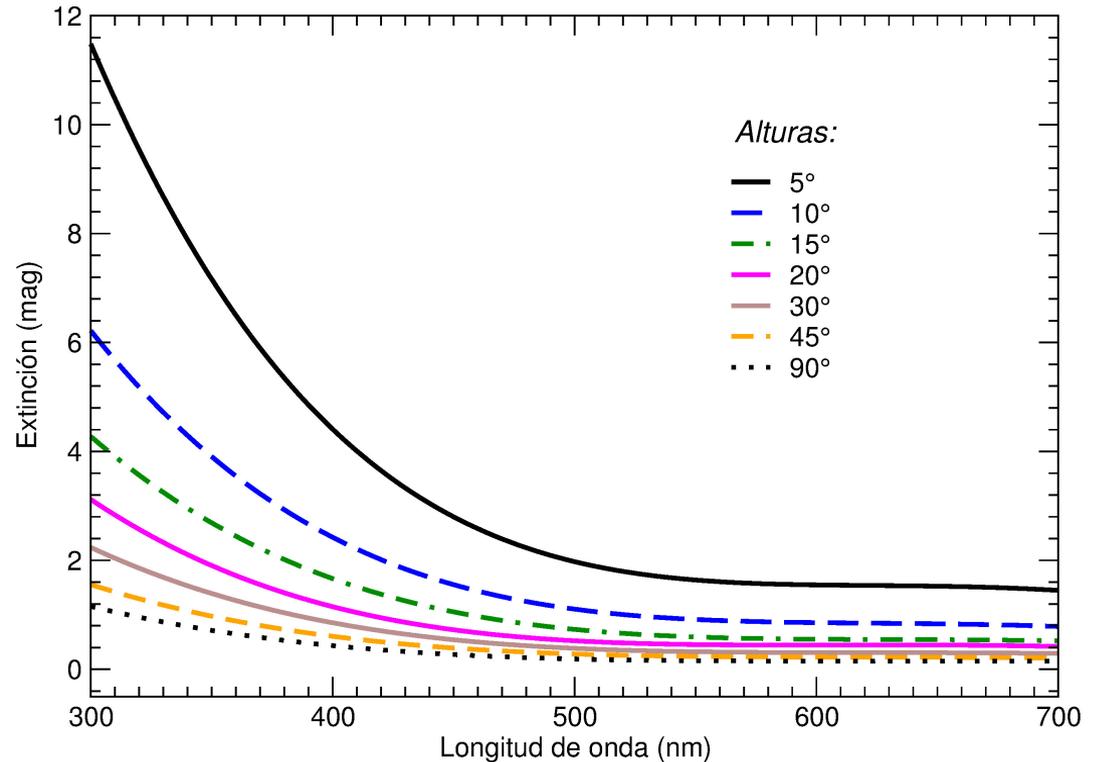
# *Extinción atmosférica*

¿Realmente la atmósfera afecta igual a todas las estrellas del campo?

Ojo al color: estrellas azules se extinguen más

Si la comparación es muy azul, parecerá que la estrella problema se abrillanta al ir bajando el campo observado

→ Tendencias «lineales» en resultados



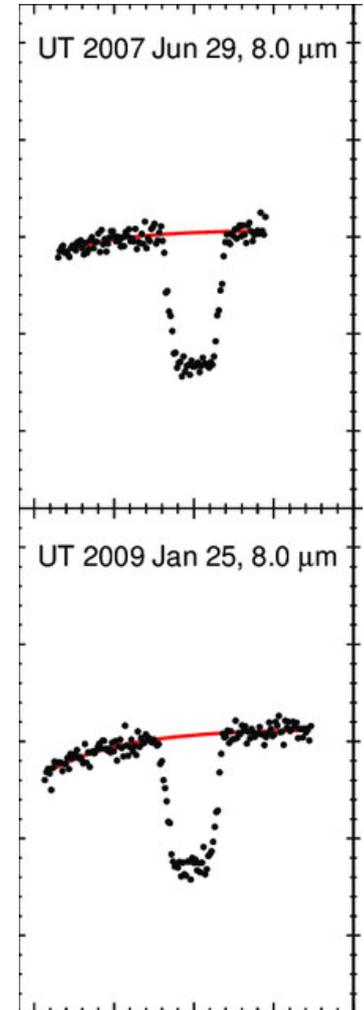
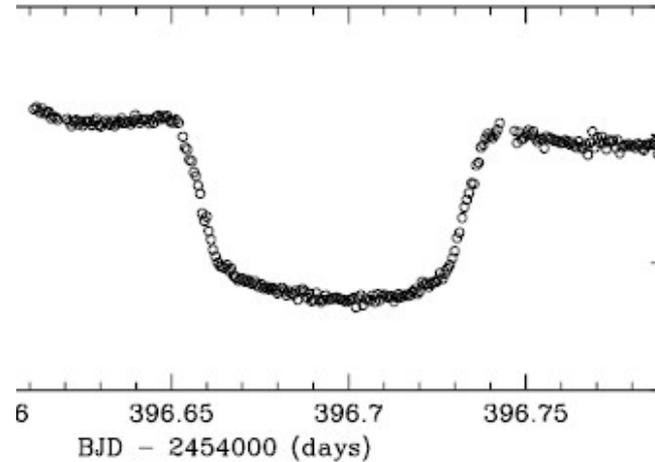
# *Extinción atmosférica*

¿Realmente la atmósfera afecta igual a todas las estrellas del campo?

Ojo al color: estrellas azules se extinguen más

Si la comparación es muy azul, parecerá que la estrella problema se abrillanta al ir bajando el campo observado

- Tendencias «lineales» en resultados
- Restringir ancho de banda (filtros)
- Comparación mismo color



## *En síntesis*

- Cuide sus tomas planas
- Evite el polvo
- No inframuestree
- Exponga bien el objeto problema
- No exagere con el tamaño de la abertura sintética
- Razone la elección de la abertura, sobre todo para objetos problema débiles
- Use estrellas de comparación más brillantes
- Trabaje con filtros
- Evite estrellas de comparación de colores diferentes al del objeto
- No observe demasiado lejos del cenit
- Use el mismo encuadre siempre
- Compruebe que los perfiles estelares sean uniformes