

Capítulo 5

Distancias estelares. Magnitudes estelares

5.1. Distancias estelares

Determinación de distancias esencial para estimar parámetros fundamentales en astrofísica:

$$R_*, M_*, L_*, \dots$$

- Métodos directos: geométricos, p.e. paralaje. Sólo aplicables en estrellas de la vecindad solar.
- Métodos indirectos: p.e. fotométricos

5.1.1. Paralajes trigonométricas

- Movimiento de la Tierra alrededor del Sol: estrellas cercanas cambian sus posiciones aparentes en el plano del cielo

Paralaje trigonométrica π : ángulo subtendido por el semieje mayor de la órbita terrestre desde la posición de la estrella S

- π muy pequeño ($< 1''$) incluso para las estrellas más cercanas.

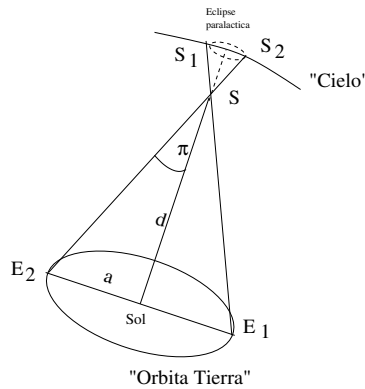


Figura 5.1: Paralaje de la estrella S a una distancia d del Sol. La Tierra se muestra en dos posiciones E_1 y E_2 de su órbita separadas por seis meses

$$d = \frac{206265a}{\pi} \quad (5.1)$$

- $1'' = 1/206265 \text{ rad}$; $a \ll d$; π en segundos de arco.

Parsec: distancia a la que la unidad astronómica (distancia media Tierra-Sol) subtiende una paralaje de $1''$.

$$1pc = 206265 AU = 3,086 \times 10^{16} m = 3,26 \text{ light years}$$

$$d (pc) = \frac{1}{\pi''} \quad (5.2)$$

5.2. Luminosidad. Flujo observado

Luminosidad: energía por segundo irradiada por una estrella a través de su superficie:

$$L = 4\pi R^2 F \quad (5.3)$$

- R = radio estelar; F = flujo total integrado en todas las frecuencias que atraviesa la superficie estelar.

- Unidades de L : $ergs^{-1}$.

• A una distancia r :

$$L = 4\pi r^2 S \quad (5.4)$$

- S = flujo medido en r (en la literatura densidad de flujo)

$$S = \frac{L}{4\pi r^2} = \frac{R^2}{r^2} F \quad (5.5)$$

- $\frac{R}{r}$ = radio angular.

Para el Sol:

$$S_{\odot} = 1,36 \times 10^6 \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$$

$$F_{\odot} = 6 \times 10^{10} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$$

$$L_{\odot} = 3,86 \times 10^{33} \text{ erg s}^{-1}$$

5.3. Magnitudes aparentes

$$m_1 - m_2 = -2,5 \log \frac{S_1}{S_2} \quad (\text{Ley de Pogson}) \quad (5.6)$$

- m_1, m_2 = magnitudes aparentes de las estrellas 1 y 2
- S_1, S_2 = densidades de flujo observadas de.

$$\frac{S_1}{S_2} = 10^{-0,4(m_1 - m_2)} \quad (5.7)$$

- Definición de magnitud tiene connotaciones históricas:
 - Ojo como detector
 - Signo negativo
 - Factor 2.5
- Para el Sol: $m_{\odot} = -26,73$
- # Para asignar una magnitud a una estrella hay que fijar un punto cero:

$$m = -2,5 \log S + cte. \quad (5.8)$$

- Punto cero (cte.) se ha fijado en sucesivas mejoras atendiendo a:
 - Estrella polar
 - Ssecuencia de estrellas polares
 - Secuencias de estrellas patrón ecuatoriales
- Estrellas más brillantes en el cielo (en el visible): $m \approx -1 \text{ mag}$.
 - Límite de detección visual: $5 - 6 \text{ mag}$.
 - Grandes telescopios $\sim 30 \text{ mag}$
 - Ordenes de magnitud, rango: $\Delta m = 5 \Leftrightarrow S_1/S_2 = 10^2$

5.4. Sistemas fotométricos

Magnitud de una estrella es función de:

- Distancia
- Longitud de onda $m(\lambda)$.

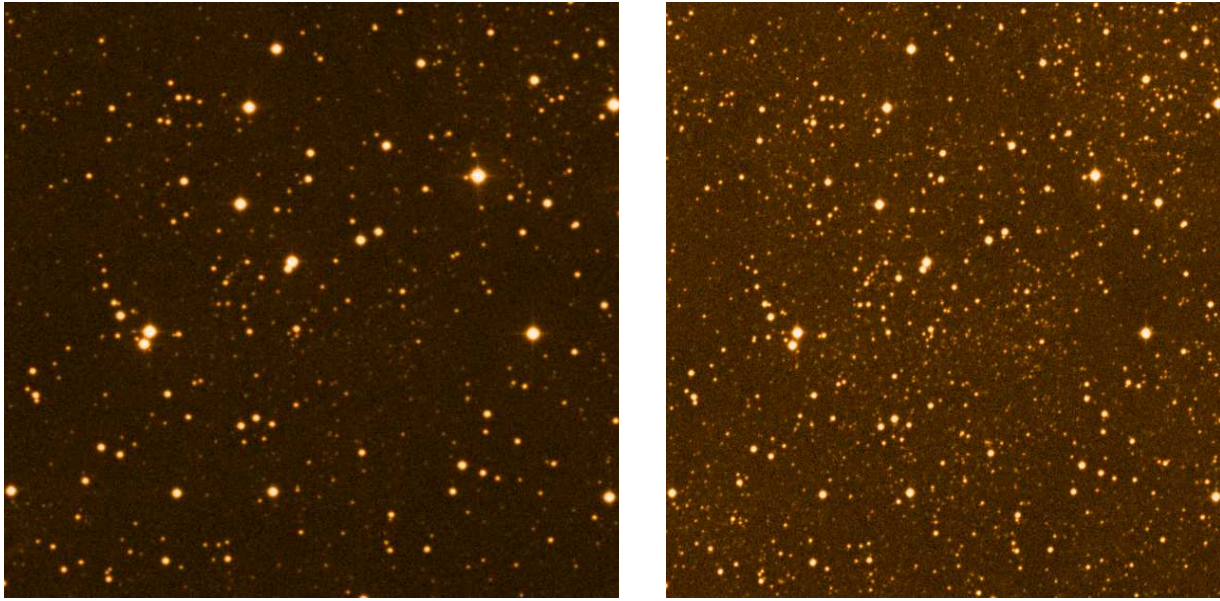


Figura 5.2: Imágenes de un campo de 10 minutos de arco del “Digital Sky Survey”. Izquierda: banda B ; derecha: banda R . Notar el cambio de brillo relativo en muchas estrellas del campo.

- **Sistemas fotométricos** permiten obtener magnitudes estelares en diferentes intervalos espectrales. Dependen de los filtros y detectores utilizados.

Sistema fotométrico de Johnson

Sistema fotométrico UBV (Johnson) es el más utilizado: U = ultravioleta, B = azul y V = visual.

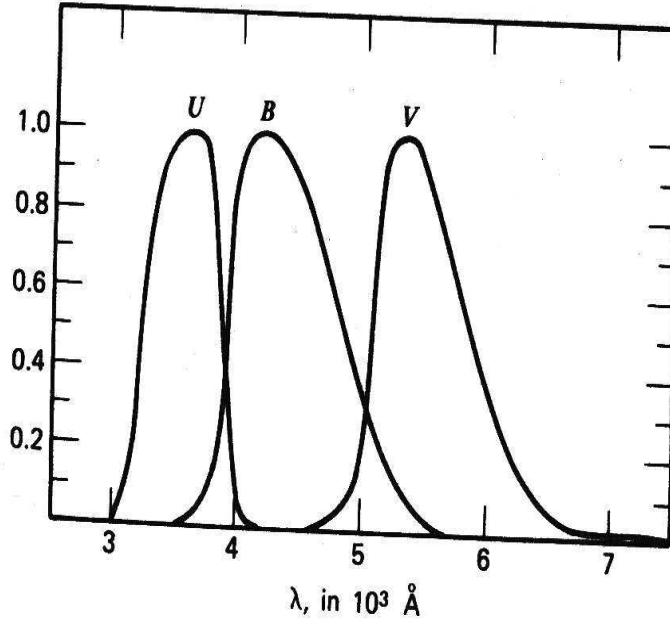


Figura 5.3: Sistema fotométrico UBV de Johnson

– Posteriormente ampliado a RI (rojo) y al infrarrojo $JHKLMNQ$.

La longitud de onda efectiva para una banda espectral de un sistema fotométrico se define como:

$$\lambda_0 = \frac{\int \lambda S(\lambda) d\lambda}{\int S(\lambda) d\lambda} \quad (5.9)$$

– Otros sistemas fotométricos: Strömgen, RGU, etc..

Diferencia de magnitudes de dos estrellas en una banda (λ):

$$m_1 - m_2 = -2,5 \log \frac{S_1}{S_2} \quad (5.10)$$

- m_1, m_2 = magnitud de una estrella en λ_1 y λ_2
- Cada λ (banda) tiene una constante (punto cero).
- Regla para fijar el punto cero: Estrellas de tipo espectral $A0V$ ($T \sim 10^4 K$) tiene la misma magnitud en todas las bandas (colores):

$$U = B = V = R = I = \dots$$

Cuadro 5.1: Sistema de Johnson: Filtros, longitud de onda efectiva, anchura de la banda, flujos en λ y ν para una estrella de magnitud 0.0

Filtro	$\lambda_0(\mu m)$	$\Delta\lambda(\mu m)$	$F_\lambda(W cm^{-2} \mu m^{-1})$	$F_\nu(W m^{-2} Hz^{-1})$
U	0.3650	0.068	4.35×10^{-12}	1.88×10^{-23}
B	0.4440	0.098	7.20×10^{-12}	4.44×10^{-23}
V	0.5500	0.089	3.92×10^{-12}	3.81×10^{-23}
R	0.7	0.22	1.76×10^{-12}	3.01×10^{-23}
I	0.9	0.24	8.3×10^{-13}	2.43×10^{-23}
J	1.25	0.3	3.4×10^{-13}	1.77×10^{-23}
H	1.65	0.4	1.16×10^{-13}	1.06×10^{-23}
K	2.2	0.6	3.9×10^{-14}	6.3×10^{-24}
L	3.6	1.2	8.1×10^{-15}	3.1×10^{-24}
M	5.0	0.8	2.2×10^{-15}	1.8×10^{-24}
N	10.8		1.2×10^{-16}	4.3×10^{-25}
Q	20			

- Sistemas fotométricos dan la distribución espectral de energía.

5.5. Índice de color

Índice de color: Diferencia de magnitudes de una estrella en dos longitudes de onda distintas.

$$m_{\lambda_1} - m_{\lambda_2} = -2,5 \log \frac{S_1}{S_2} \quad (5.11)$$

- Mide la razón de los flujos en dos rangos espectrales diferentes
- Suministran distribución de energía relativa de los espectros estelares.
- *Índices de color para una estrella A0 V todos ceros.*

- *Ejemplos:*

- $U - B, B - V, V - R, R - I, V - I, J - H, H - K$
- NORMA: $\lambda_1 < \lambda_2$

5.6. Magnitud absoluta

Magnitud aparente de una estrella función:

- Energía irradiada por la estrella (S_λ)
- Longitud de onda λ
- Distancia

Comparación de estrellas distintas \rightarrow eliminar la dependencia con la distancia.

• *Magnitud absoluta*: magnitud de una estrella si estuviese situada a una distancia de 10 pc :

$$m - M = -2,5 \log \frac{S(r)}{S(r = 10)} \quad (5.12)$$

- M = magnitud absoluta
- m = magnitud aparente
- S = flujo

Teniendo en cuenta la dependencia de S con r :

$$m - M = -2,5 \log \left(\frac{10}{r} \right)^2 = -5 + 5 \log r = -5 - \log \pi \quad (5.13)$$

- r en pc .
- Para cada longitud de onda un valor de M .

• $m - M = \text{módulo de distancia}$.

5.7. Magnitud bolométrica

- *Magnitud bolométrica*: magnitud de una estrella sobre todas las longitudes de onda.
- *Corrección bolométrica*: diferencia de la magnitud bolométrica con la magnitud en una banda espectral (normalmente se considera la banda V):

$$BC = m_{bol} - V \quad (5.14)$$

- Corrección bolométrica, en principio, siempre negativa: m_{bol} se refiere a toda la energía irradiada por la estrella (luminosidad).
- Punto cero: $BC_{\odot} = 0$ (cuidado con textos).

Valores solares:

$$\begin{aligned} BC &= m_{bol} - V = 0,0 \\ V &= -26,73 \quad ; \quad m_{bol} = -26,73 \\ M_V &= 4,84 \quad ; \quad M_{bol} = 4,84 \end{aligned}$$

5.8. Relación magnitud bolométrica - luminosidad

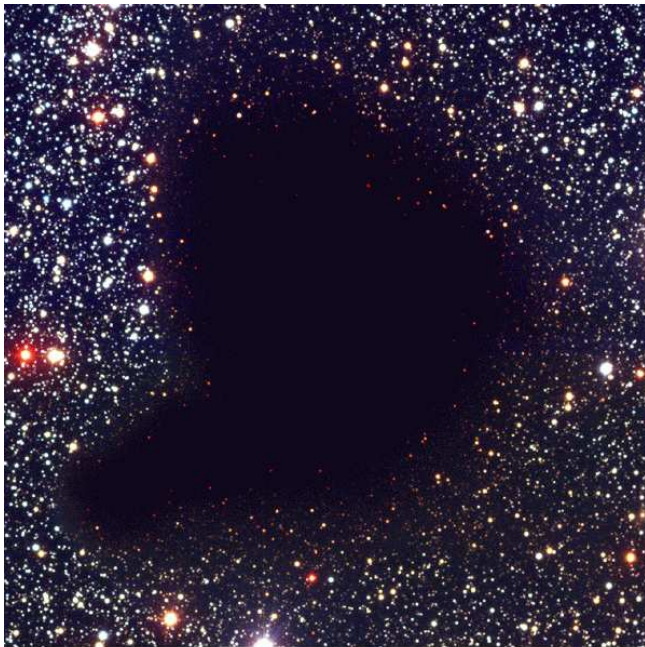
$$M_{bol}^* - M_{bol}^{\odot} = -2,5 \log \frac{L^*}{L_{\odot}} = -2,5 \log \left(\frac{R_*}{R_{\odot}} \right)^2 \left(\frac{T_*}{T_{\odot}} \right)^4 \quad (5.15)$$

$$\frac{L}{L_{\odot}} = 10^{-,4(M_{bol} - M_{bol}^{\odot})} \quad (5.16)$$

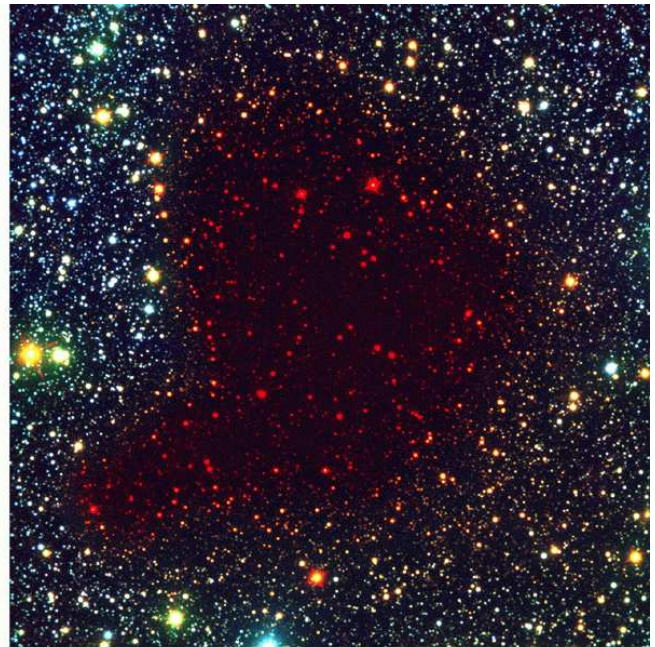
5.9. Extinción interestelar. Enrojecimiento

Partículas pequeñas (granos de polvo) en el medio interestelar producen una extinción de la radiación estelar,

- Extinción depende de la longitud de onda.
- Se habla de enrojecimiento de la radiación: las estrellas se hacen más débiles y rojas.



B, V, I



B, I, K

Pre-Collapse Black Cloud B68 (comparison)
(VLT ANTU + FORS 1 - NTT + SOFI)

ESO PR Photo 02c/01 (10 January 2001)

© European Southern Observatory



Figura 5.4: Efectos de la extinción en el globulo de Book B68

- *Extinción* se define como:

$$A_\lambda = \Delta m_\lambda = m_{\lambda_1} - m_{\lambda_{1,0}} \quad (5.17)$$

– $A_\lambda \sim \lambda^{-1}$ en el visible/ir cercano

- *Exceso de color*: índices de color cambian debido a la absorción interestelar:

$$m_{\lambda_{1,0}} \rightarrow m_{\lambda_1} : \Delta m_{\lambda_1} = m_{\lambda_1} - m_{\lambda_{1,0}} = A_{\lambda_1}$$

$$m_{\lambda_{2,0}} \rightarrow m_{\lambda_2} : \Delta m_{\lambda_2} = m_{\lambda_2} - m_{\lambda_{2,0}} = A_{\lambda_2}$$

$$E_{\lambda_1-\lambda_2} = A_{\lambda_1} - A_{\lambda_2} = (m_{\lambda_1} - m_{\lambda_2}) - (m_{\lambda_{1,0}} - m_{\lambda_{2,0}})$$

Ejemplo: $E_{B-V} = (B - V)_{obs} - (B - V)_0$

Módulo de distancia debe tener en cuenta la absorción:

$$m_\lambda - M_\lambda = -5 + 5 \log r + A_\lambda \quad (5.18)$$

5.9.1. Relación entre A_λ y τ_λ

- Variación de la intensidad en su propagación en el medio interestelar:

$$I_\lambda = I_0 e^{-\tau_\lambda}$$

- La extinción interestelar en magnitudes es:

$$A_\lambda = m - m_0 = -2,5 \log \frac{I}{I_0} = -2,5 \log e^{-\tau_\lambda}$$

$$A_\lambda = 1,086 \tau_\lambda \quad (5.19)$$

En función de las propiedades de las partículas:

$$\tau_\lambda = \alpha_\lambda \cdot L = n_g \pi a^2 Q_{ext} L$$

- a = radio de los granos de polvo
- n_g = número densidad de granos de polvo
- L = camino recorrido
- Q_{ext} = coeficiente de extinción = función de las propiedades ópticas de los granos (λ , geometría, composición). ($Q_{ext} \approx 2$ para gran número de partículas)

Caso general:

$$A_\lambda = 1,086 L \int \pi a^2 Q_{ext}(a) n(a) da$$

- Solución: Ecuaciones de Maxwell con condiciones de contorno en la superficie de los granos (teoría de Mie).

Observacionalmente: $A_V \approx 2 \text{ mag/kpc}$

Forma práctica para determinar $A_V(\tau_\lambda)$: comparación de dos estrellas del mismo tipo espectral, una enrojecida y otra no.

La curva de enrojecimiento depende de las características de las partículas de polvo del medio interestelar.

Similar en todas las direcciones, con algunas variaciones locales, principalmente en el UV

Curva típica teórica de enrojecimiento: van de Hulst n. 15

Cuadro 5.2: Ley de extinción interestelar observada y teórica

Banda	A_λ/A_V (van de Hulst n. 15)	A_λ/A_V (empírica)
U	1.555	1.531
B	1.329	1.324
V	1.000	1.000
R	0.738	0.748
I	0.469	0.482
J	0.246	0.282
H	0.155	0.175
K	0.089	0.112
L	0.045	0.058
M	0.003	0.023