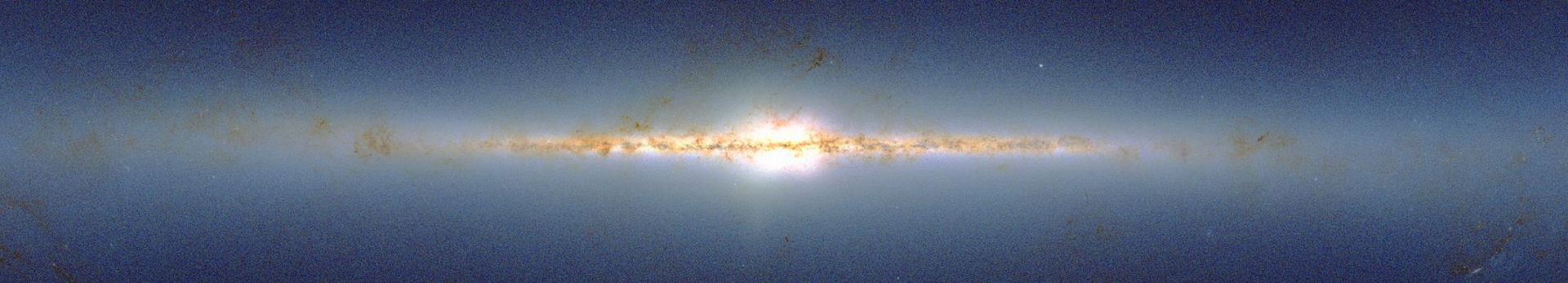


# *ESTRUCTURA GALÁCTICA Y DINÁMICA ESTELAR*

Recuentos de Estrellas  
y  
Cinemática Estelar 1

# *La Distribución de las Estrellas*



# Conceptos Básicos 1

- **Distancias estelares**

- ★ paralajes trigonométricas

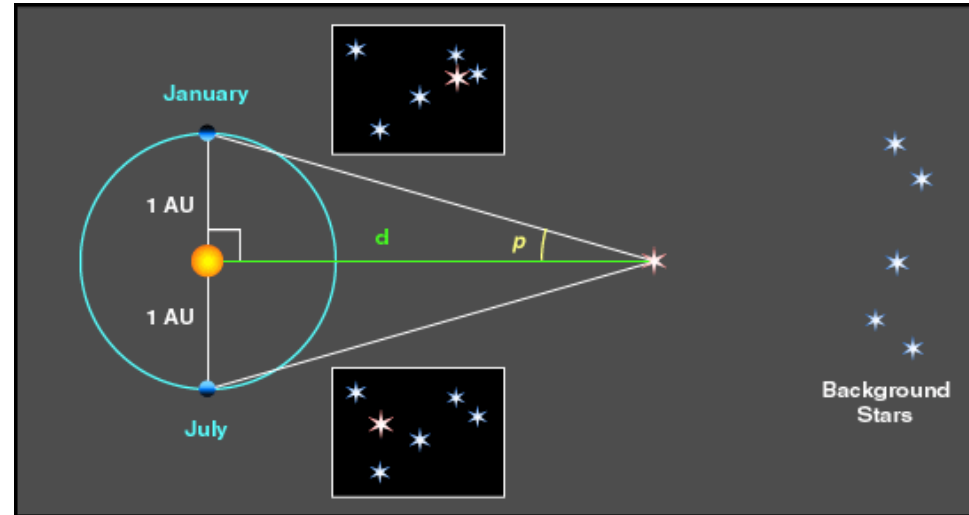
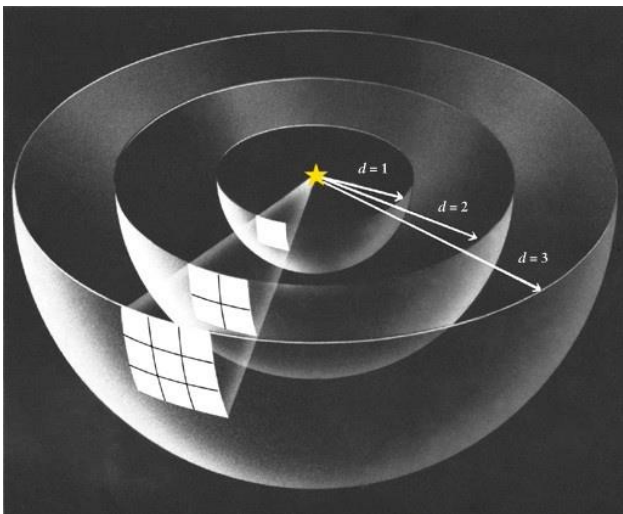
$$1 \text{ UA} / d [\text{UA}] = \tan p \sim p [\text{rad}]$$
$$\Rightarrow d [\text{UA}] = 1/p [\text{rad}]$$

- ★ parsec (pc)

$$p = 1'' \sim 1 / 206,265 \text{ rad}$$
$$\Rightarrow d \equiv 1 \text{ pc} = 206,265 \text{ UA}$$
$$d [\text{pc}] = 1 / p [\text{arcsec}]$$

- ★ diámetros angulares

$$\theta = s / r$$



- **Luminosidades estelares**

- ★ ley del inverso del cuadrado

$$F = L / 4 \pi d^2$$

- ★ modulo de distancia

$$f / F = (D/d)^2$$

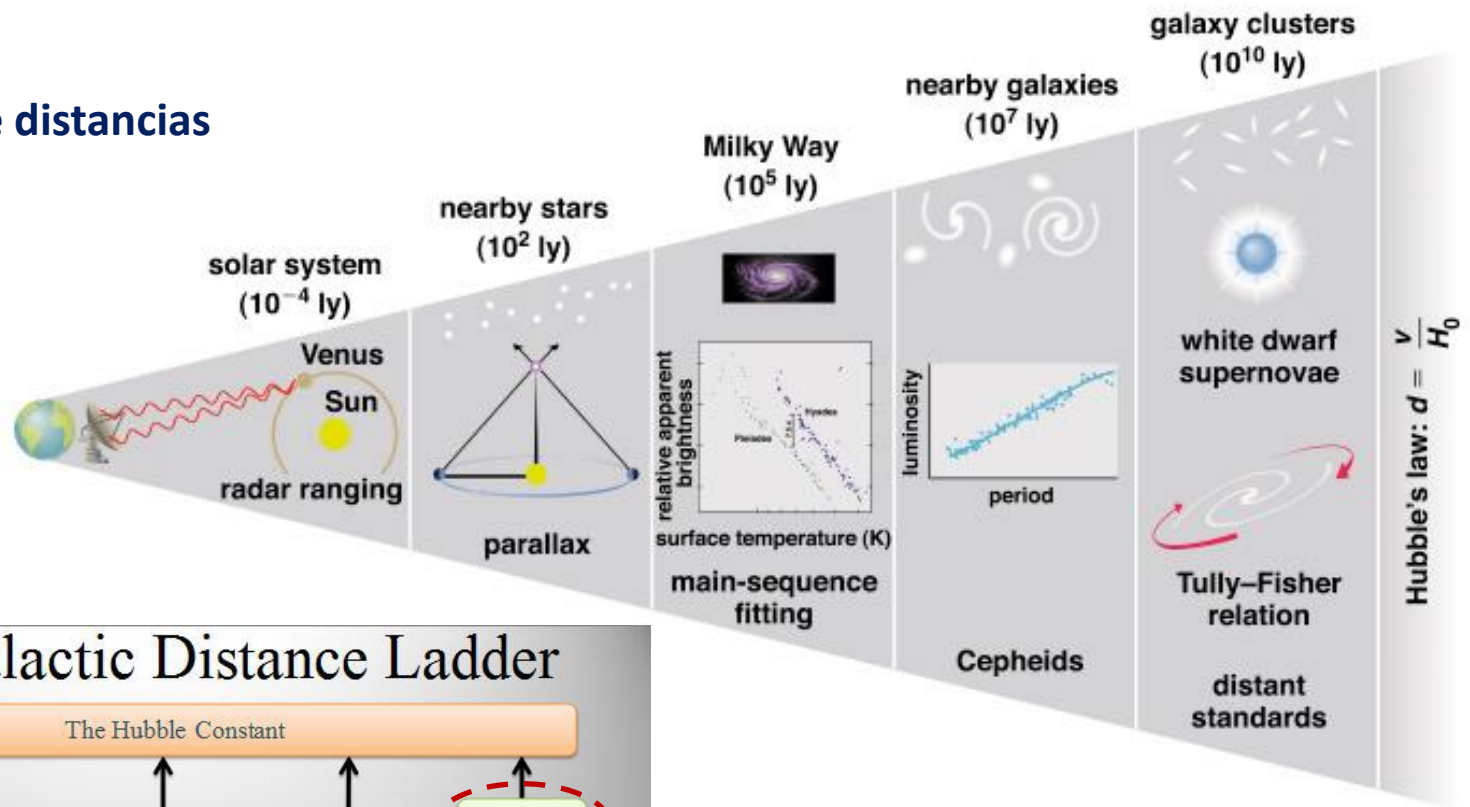
$$m - M = -2.5 \log_{10} (f/F)$$

$$m - M = 5 \log_{10} d[\text{pc}] - 5 + \textcolor{red}{A}$$

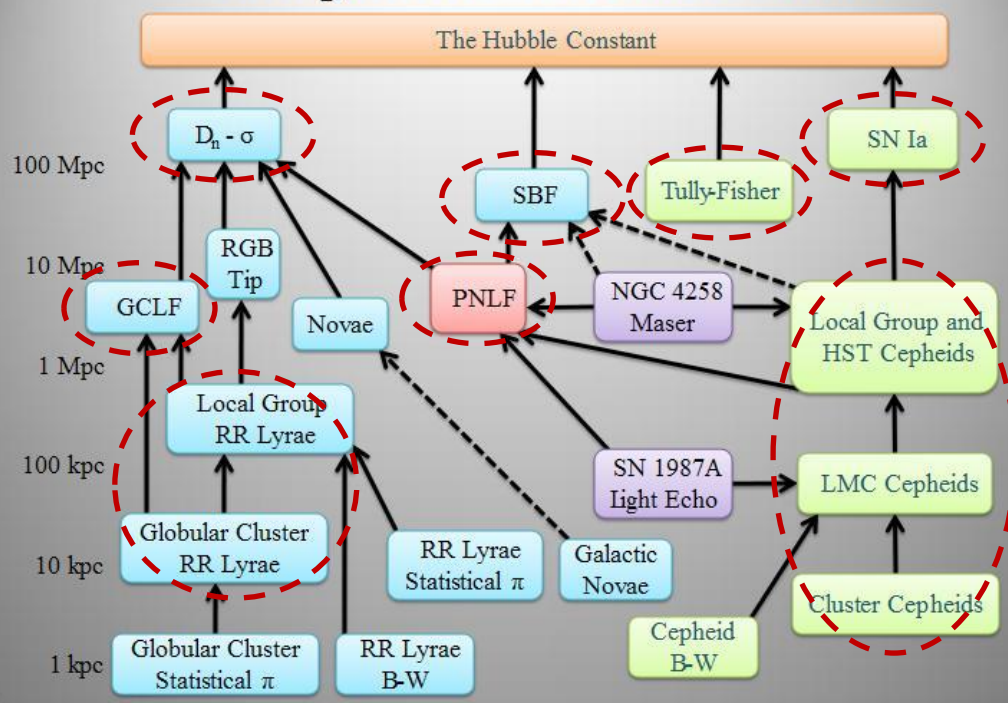
$$m - M = 5 \log_{10} d[\text{kpc}] + 10 + \textcolor{red}{A}$$

$$m - M = 5 \log_{10} d[\text{Mpc}] + 25 + \textcolor{red}{A} + \textcolor{red}{K}$$

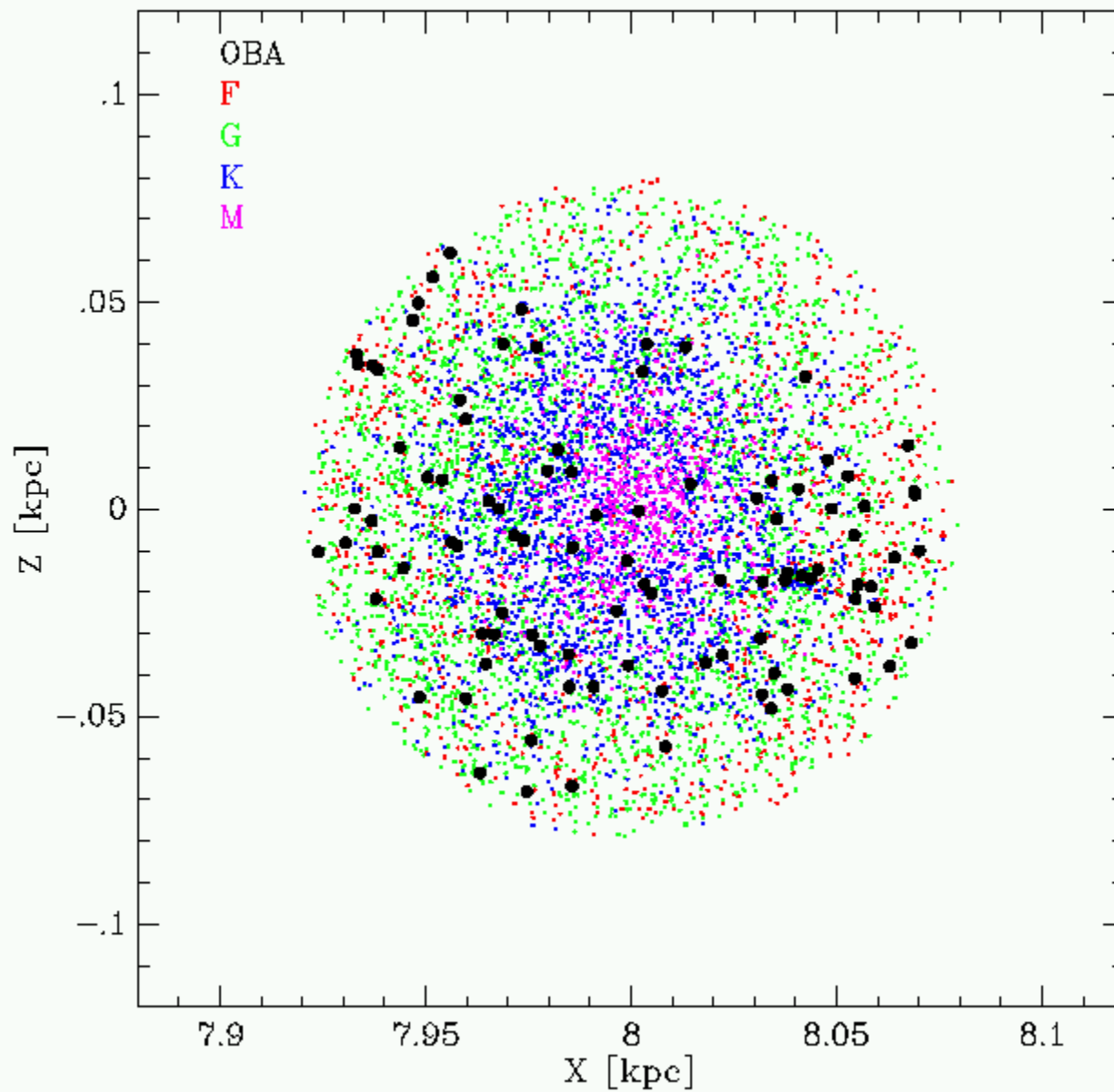
- “Escalera” de distancias



## Extragalactic Distance Ladder



- **Sesgo de *Malmquist***



# Recuentos estelares

- **Conteo en un ángulo solido**

- ★ **ángulo solido**

$$\varpi = A / d^2 \quad [\text{sr}]$$

$$V = d^3 \varpi / 3 = (A d) / 3$$

- ★ **densidad numerica de objetos**

$$n = N / V$$

- ★ **conteo ingenuo (densidad constante)**

$$N = n V = n (d^3 \varpi / 3)$$

$$\log_{10}(N) = 3 \log_{10}(d) + \text{cte}$$

- ★ **magnitudes**

$$m - M = 5 \log_{10} d - 5 + A$$

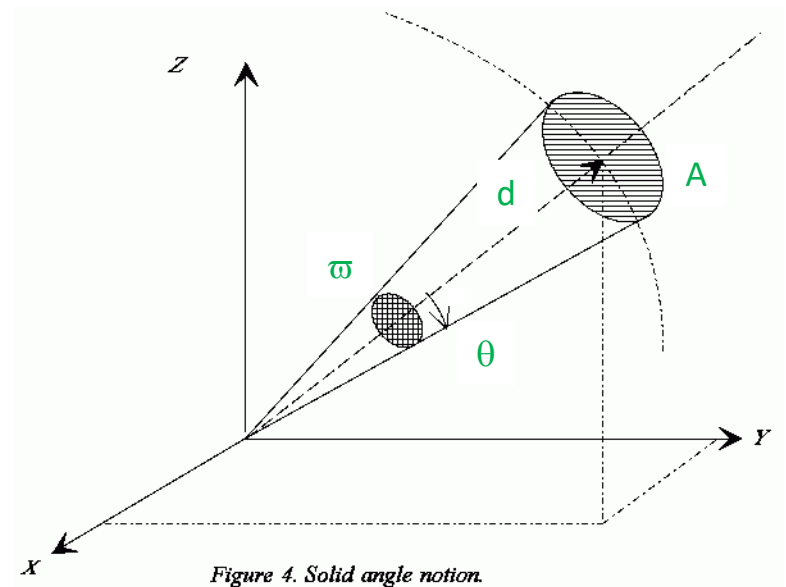
$$m - M - A = 5 (\log_{10} d - 1)$$

$$(1/5)(m - M - A) + 1 = \log_{10} d$$

$$\log_{10} d = (1/5)(\mu_{\text{lim}} - A) + \text{cte}$$

$$\therefore \log_{10}(N) = (3/5)(\mu_{\text{lim}} - A) + \text{cte}$$

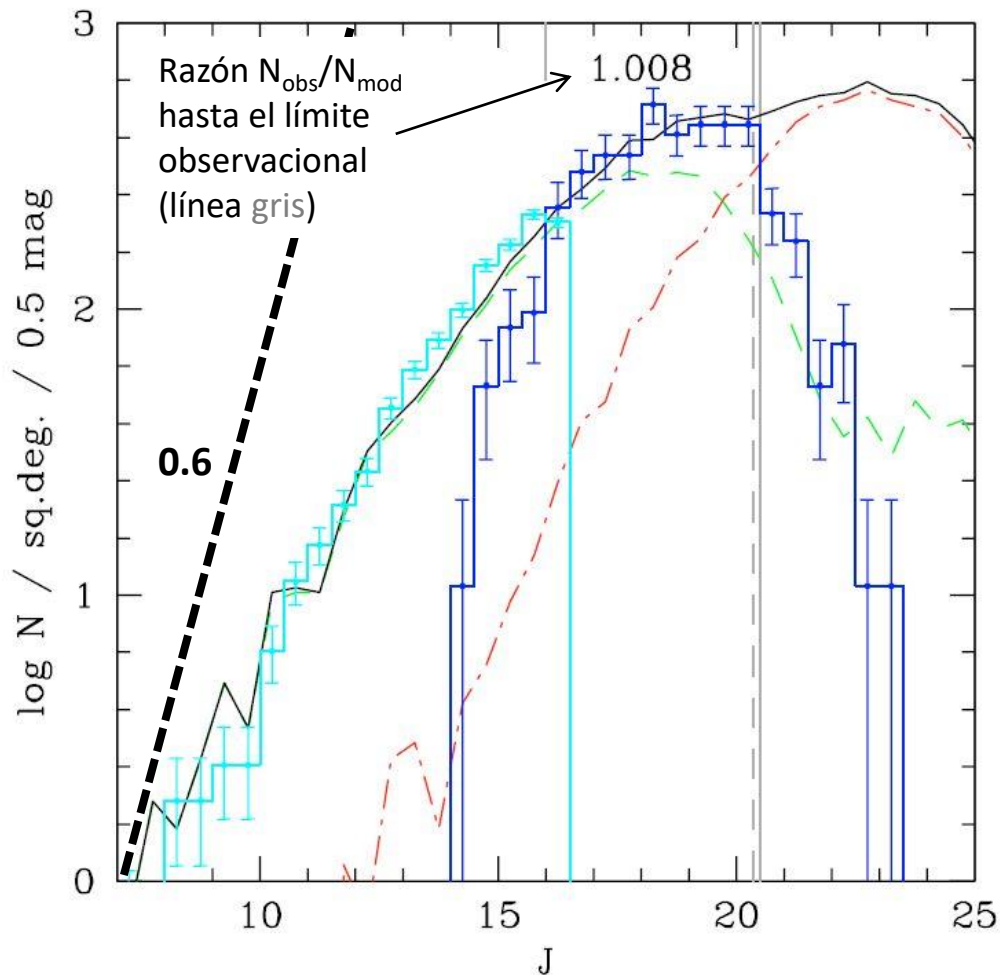
$$\log_{10}(N) = 0.6 (\mu_{\text{lim}} - A) + \text{cte}$$



- ★ **extinción galáctica (Hubble)**

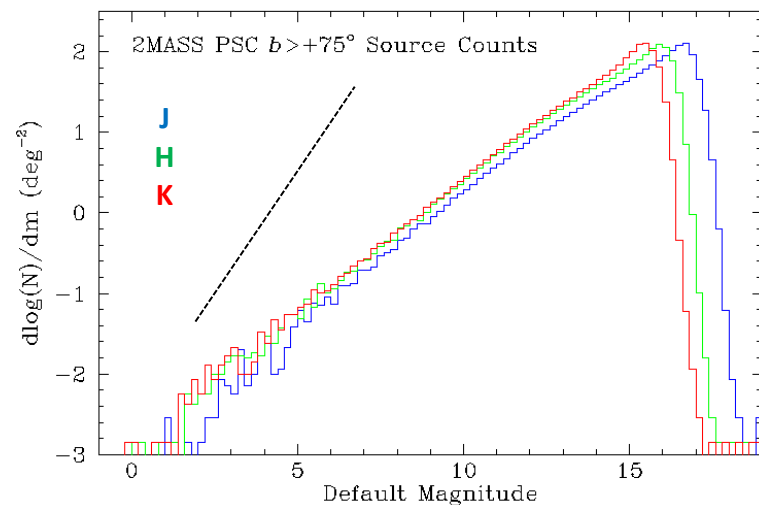
$$A_V \propto \csc |b|$$

$$\therefore \log_{10}(N) = 0.6 (\mu_{\text{lim}} - \csc |b|) + \text{cte}$$

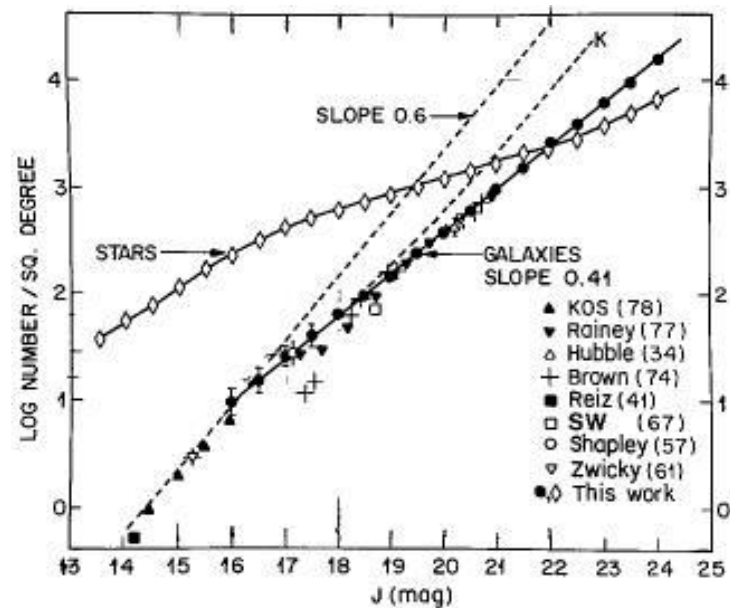


Modelo: Disco      2MASS-J  
 Modelo: Halo      EIS/Chandra DFS  
 Modelo: Total

Girardi et al. 2005, A&A 436, 895 🍷



Tyson & Jarvis 1979, ApJ 230, L153





- **Conteo por componente de la VL**

★ Bahcall & Soneira (1980, ApJ 238, L17)

$$\rho_{\text{disk}}(\mathbf{r}) \propto \exp[-z/H(M) - (x - r_0)/h], \quad (1a)$$

$$\rho_{\text{spheroid}}(\mathbf{r}) \propto (r/r_0)^{-7/8} \exp[-10.1(r/r_0)^{1/4}], \quad (1b)$$

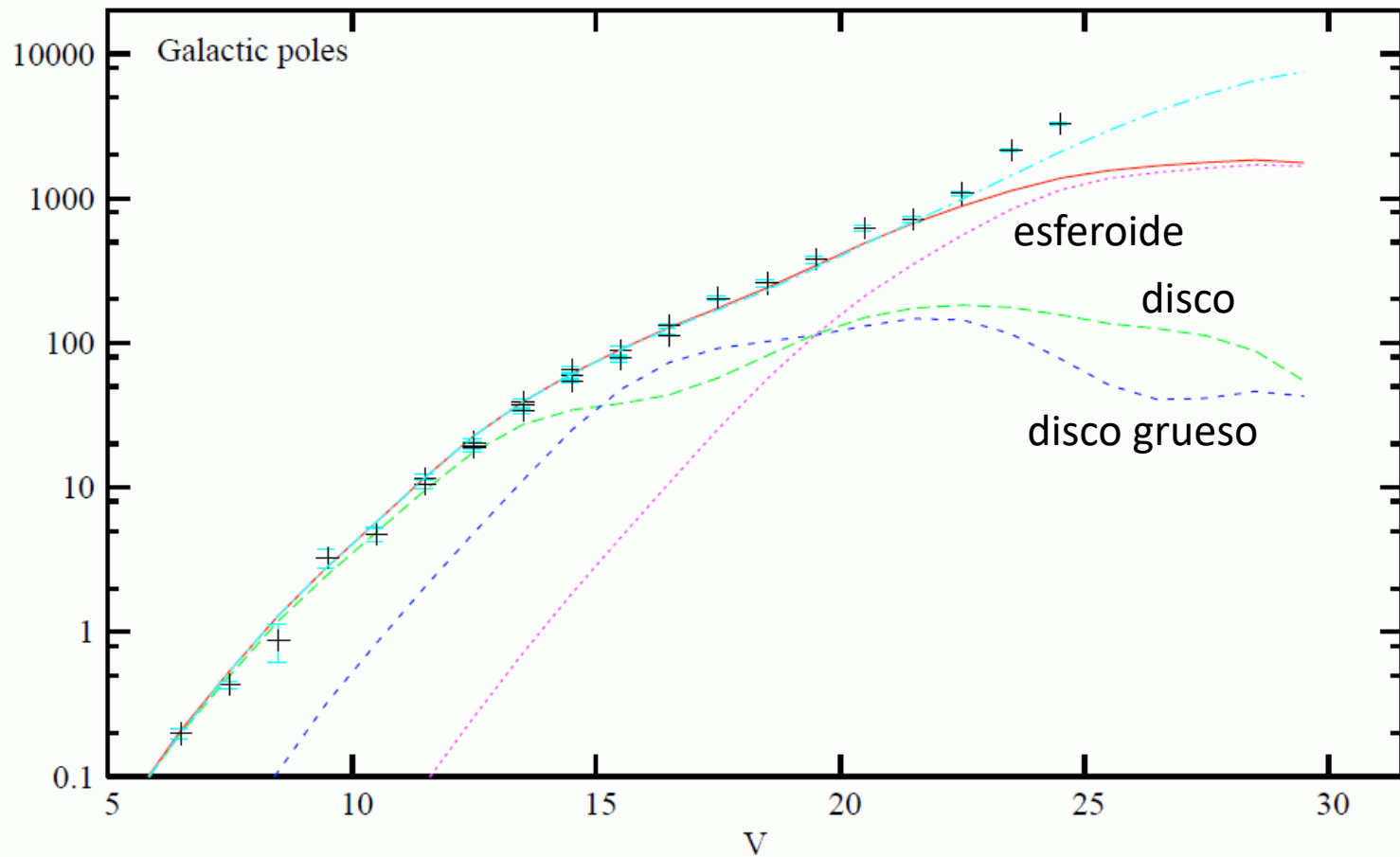
and

$$\rho_{\text{massive halo}}(\mathbf{r}) = \rho_H(r_0)[a^2 + r_0^2]/[a^2 + r^2]. \quad (1c)$$

★ Robin *et al.* (2003, A&A 409, 523)

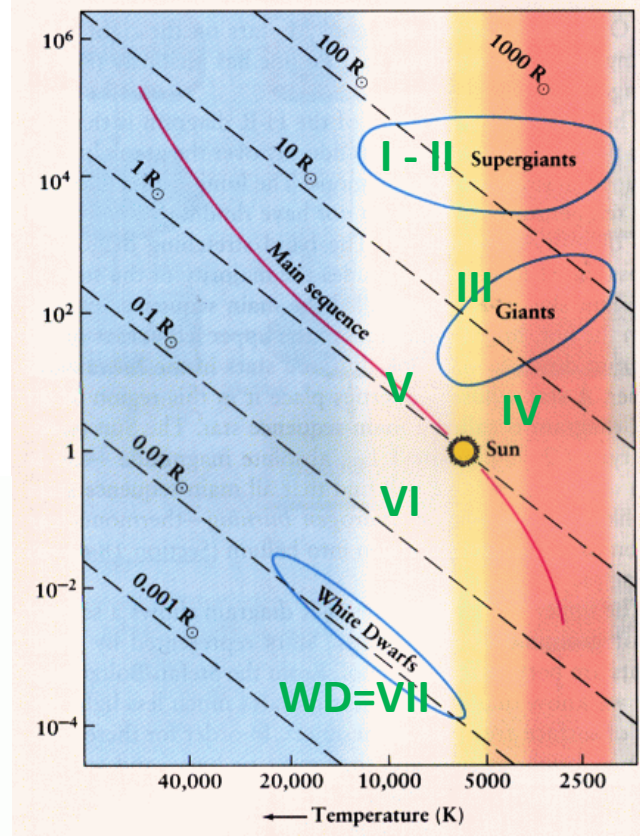
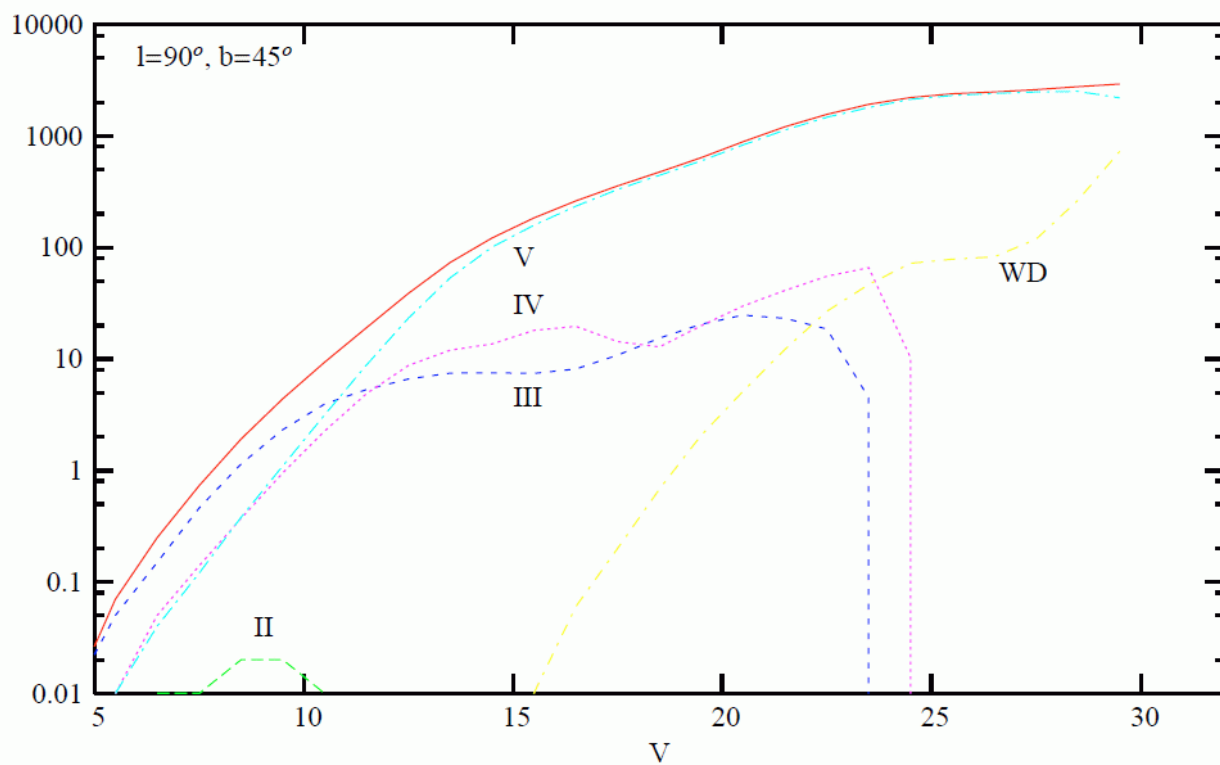
	density law	
Disc	$\rho_0/d_0 \times \{\exp(-(a/h_{R+})^2) - \exp(-(a/h_{R-})^2)\}$ with $h_{R+} = 5000$ pc, $h_{R-} = 3000$ pc $\rho_0/d_0 \times \{\exp(-(0.5^2 + a^2/h_{R+}^2)^{1/2}) - \exp(-(0.5^2 + a^2/h_{R-}^2)^{1/2})\}$ with $h_{R+} = 2530$ pc, $h_{R-} = 1320$ pc	if age $\leq 0.15$ Gyr if age $> 0.15$ Gyr
Thick disc	$\rho_0/d_0 \times \exp(-\frac{R-R_\odot}{h_R}) \times (1 - \frac{1/h_z}{x_l \times (2+x_l/h_z)} \times z^2)$ $\rho_0/d_0 \times \exp(-\frac{R-R_\odot}{h_R}) \times \frac{\exp(x_l/h_z)}{1+x_l/2h_z} \exp(-\frac{ z }{h_z})$ with $h_R = 2500$ pc, $h_z = 800$ pc	if $ z  \leq x_l$ , $x_l = 400$ pc if $ z  > x_l$
Spheroid	$\rho_0/d_0 \times (\frac{a_c}{R_\odot})^{-2.44}$ $\rho_0/d_0 \times (\frac{a}{R_\odot})^{-2.44}$	if $a \leq a_c$ , $a_c = 500$ pc if $a > a_c$
Bulge	$N \times \exp(-0.5 \times r_s^2)$ $N \times \exp(-0.5 \times r_s^2) \times \exp(-0.5(\frac{\sqrt{x^2+y^2}-R_c}{0.5})^2)$ with $r_s^2 = \sqrt{[(\frac{x}{x_0})^2 + (\frac{y}{y_0})^2]^2 + (\frac{z}{z_0})^4}$	$\sqrt{x^2 + y^2} < R_c$ $\sqrt{x^2 + y^2} > R_c$
ISM	$\rho_0 \times \exp(-\frac{R-R_\odot}{h_R}) \times \exp(-\frac{ z }{h_z})$ with $h_R = 4500$ pc, $h_z = 140$ pc	
Dark halo	$\frac{\rho_c}{(1+(a/R_c)^2)}$ with $R_c = 2697$ pc and $\rho_c = 0.1079$	





**Fig. 4.** Star count predictions in the  $V$  band at the Galactic pole. Solid line: total with a spheroid IMF slope of  $\alpha = 0.5$ , long dashed: disc, short dashed: thick disc, dotted: spheroid, dotted dashed: total with a spheroid IMF slope of  $\alpha = 2$ . Various observed counts are indicated as crosses (error bars are the Poisson noise) from Simbad data base, Gilmore et al. (1985), Bok & Basinski (1964), Chiu (1980), Yoshii et al. (1987) and Cr     et al., in preparation.

Class	Description
I	Supergiants
II	Bright giants
III	Giants
IV	Subgiants
V	Main sequence



Robin et al. 2003,  
A&A 409, 523

**Fig. 11.** Star count predictions (stars per magnitude and per square degree) in the  $V$  band at  $l = 90^\circ$  and  $b = 45^\circ$  and contributions of the different luminosity classes. All: solid line, class II: long dashed, class III: short dashed, class IV: dotted, class V: dashed-dotted upper curve, white dwarfs: dashed-dotted lower curve. The giants dominate at  $V < 11$ , main sequence stars at  $V > 14$  in this direction. The rise of the white dwarf curve at  $V > 27$  is due to the dark halo white dwarf population normalized here to 2% of the dark halo.

# Funciones luminosidad y densidad relativa

$$\begin{aligned} dN &= \Phi(M, \mathbf{r}) dM d^3\mathbf{r} \\ &= [\varphi(M) dM][v(\mathbf{r}) d^3\mathbf{r}] \end{aligned}$$

donde:

- $\Phi(M, \mathbf{r}) \rightarrow$  numero de estrellas en el volumen  $d^3\mathbf{r}$ , centrado en  $\mathbf{r}$ , con mags. entre  $M$  y  $M+dM$ .
- $\varphi(M) \rightarrow$  **función de luminosidad**: fracción relativa de estrellas en diferentes mags.
- $v(\mathbf{r}) \rightarrow$  **función densidad**: densidad numérica total de estrellas (de todas mags.) en  $\mathbf{r}$ .

$$\begin{aligned} \mathcal{A}(m, \mathbf{r}) &= dN / dm = \varphi(M) v(\mathbf{r}) r^2 \varpi dr \Rightarrow \mathcal{A}(m) = \varpi \int \varphi(M) v(\mathbf{r}) r^2 dr \\ \mathcal{A} &= \mathcal{A}_{\text{delgado}} + \mathcal{A}_{\text{dgrueso}} + \mathcal{A}_{\text{halo}} + \mathcal{A}_{\text{bulbo}} + \dots \end{aligned}$$

donde:

- $\mathcal{A}(m) \rightarrow$  función de conteo de estrellas (cambia con el límite de magnitud, la dirección, y el tipo de estrellas / color)  
 $\rightarrow$  cada  $\mathcal{A}_i$  tiene su  $v(l, b, z)$ : exponencial (disco, escala de alturas), de Vaucouleurs (halo, bulbo), etc.

## Función de masa

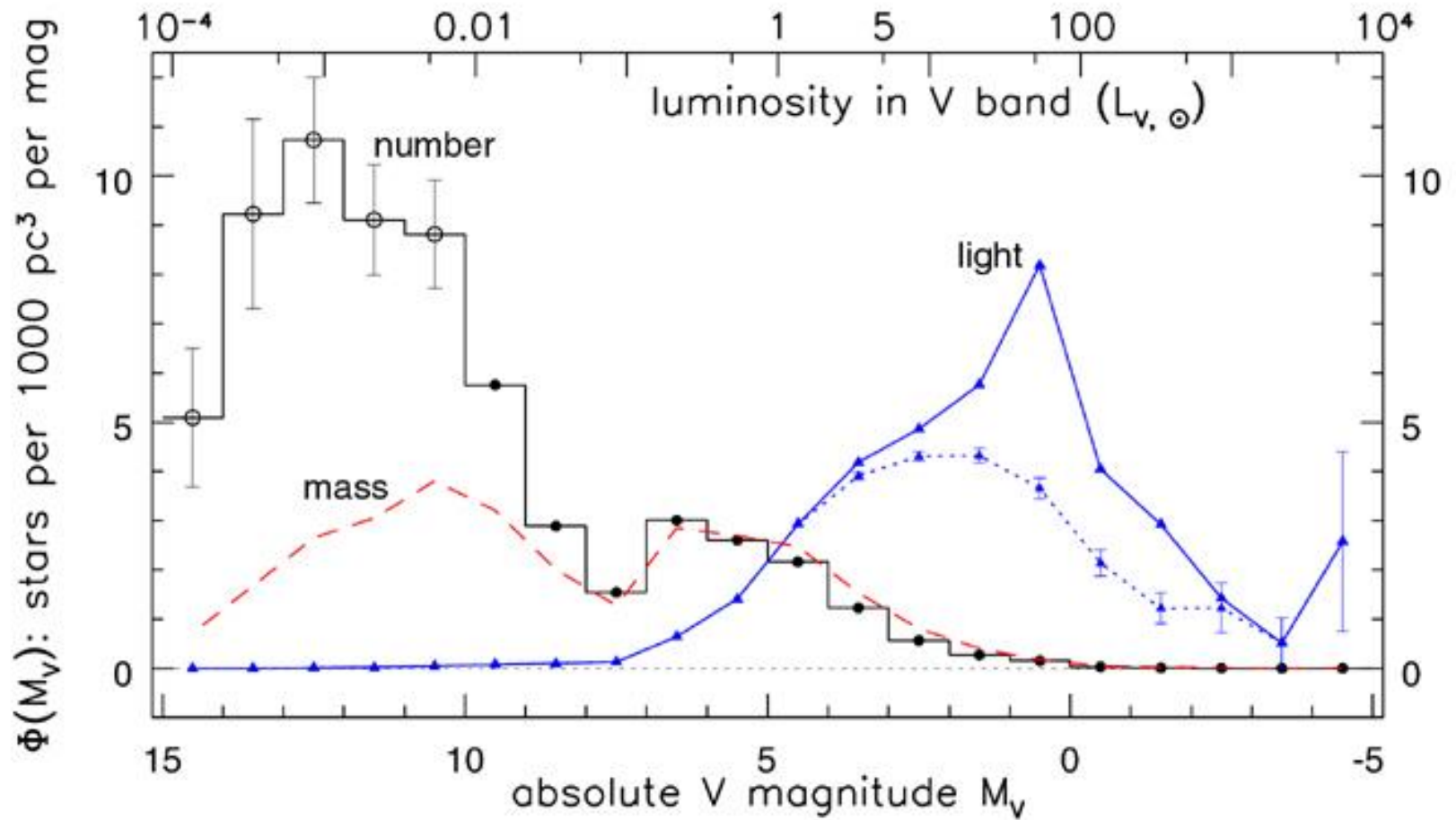
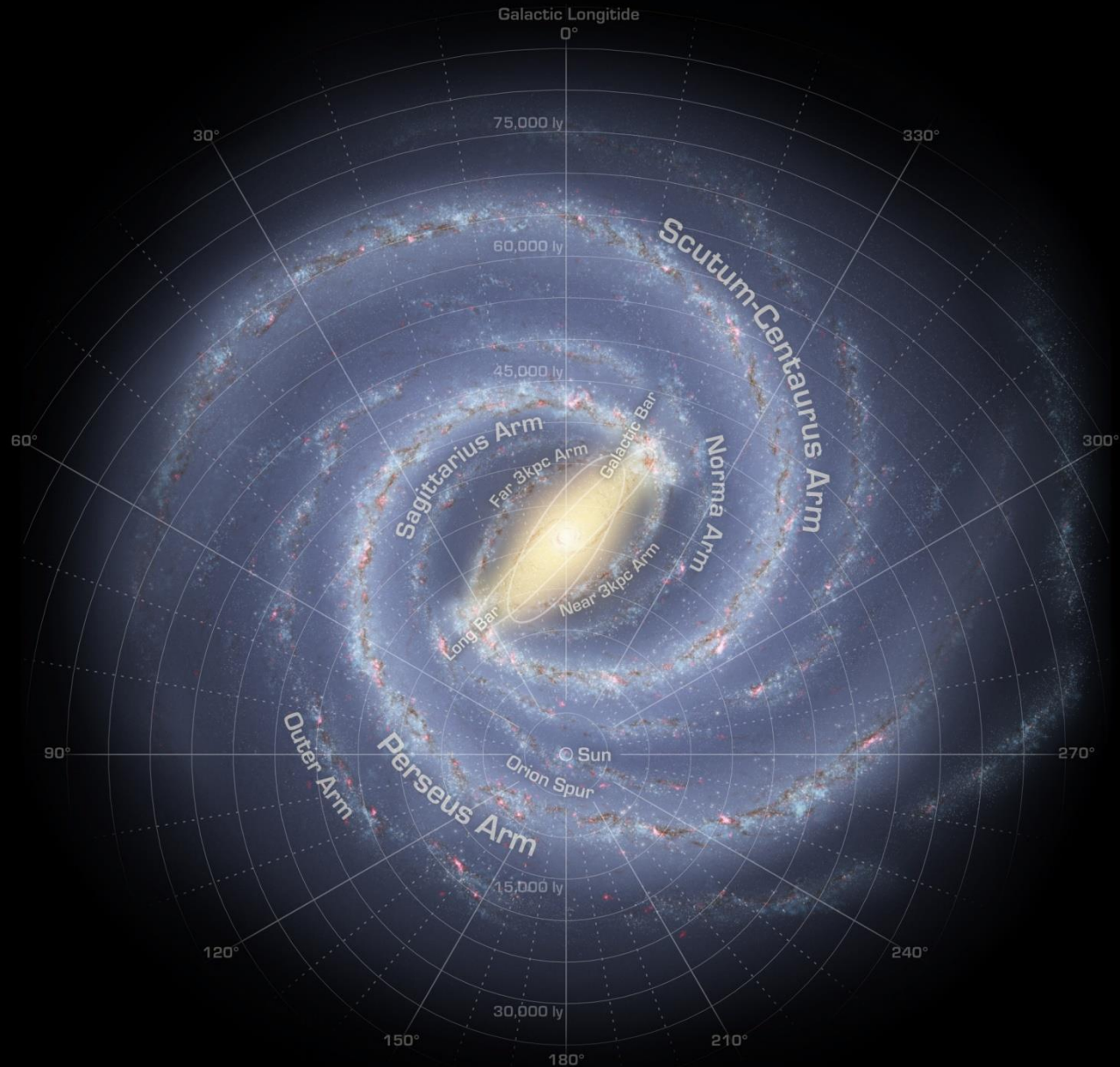
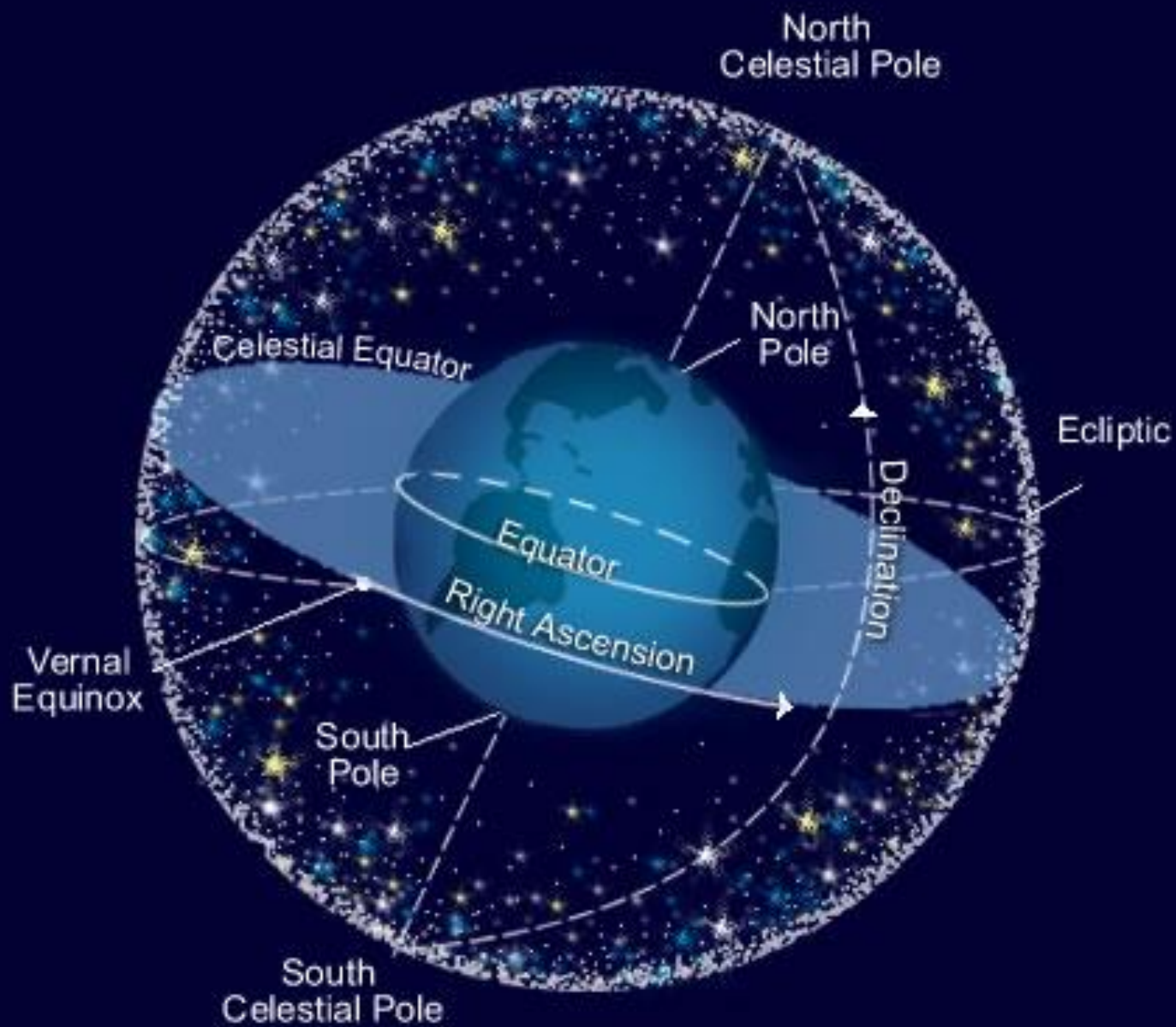


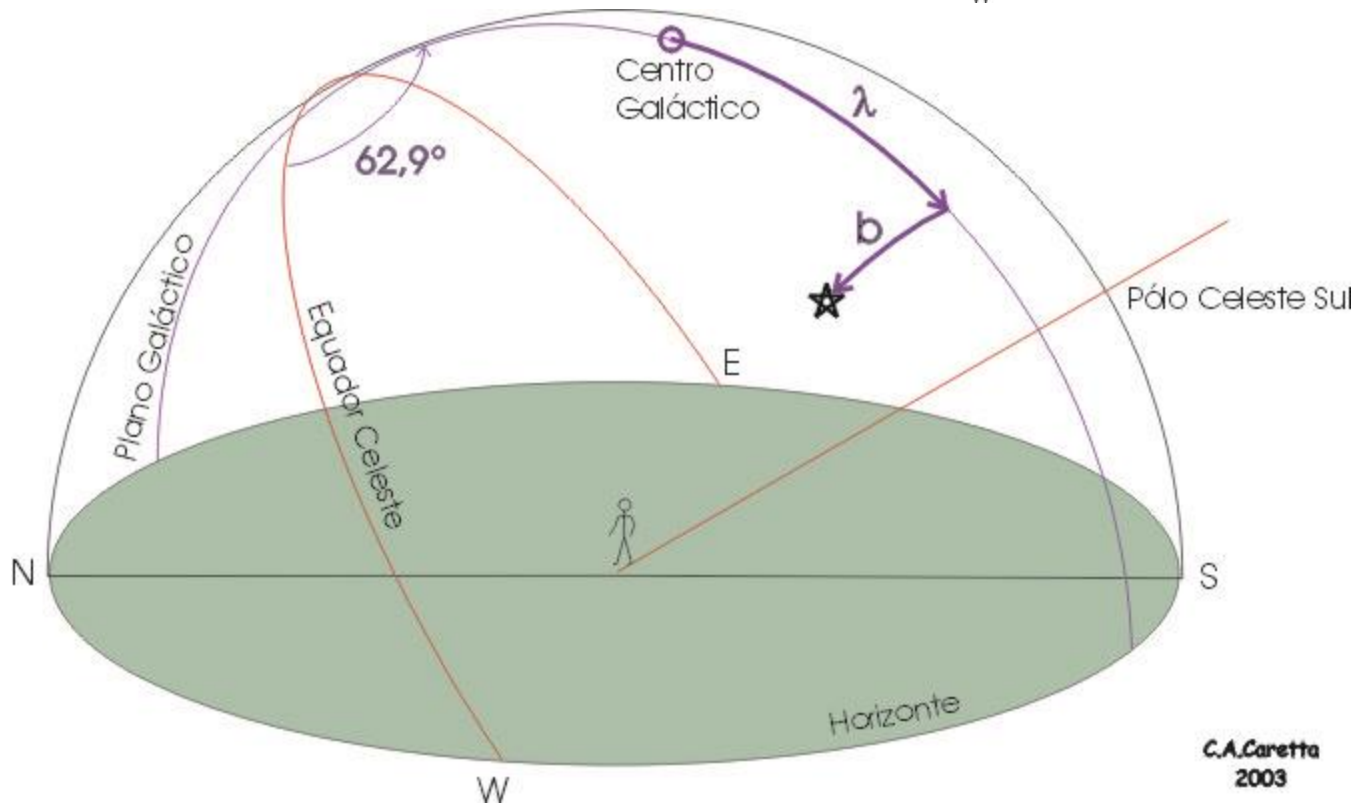
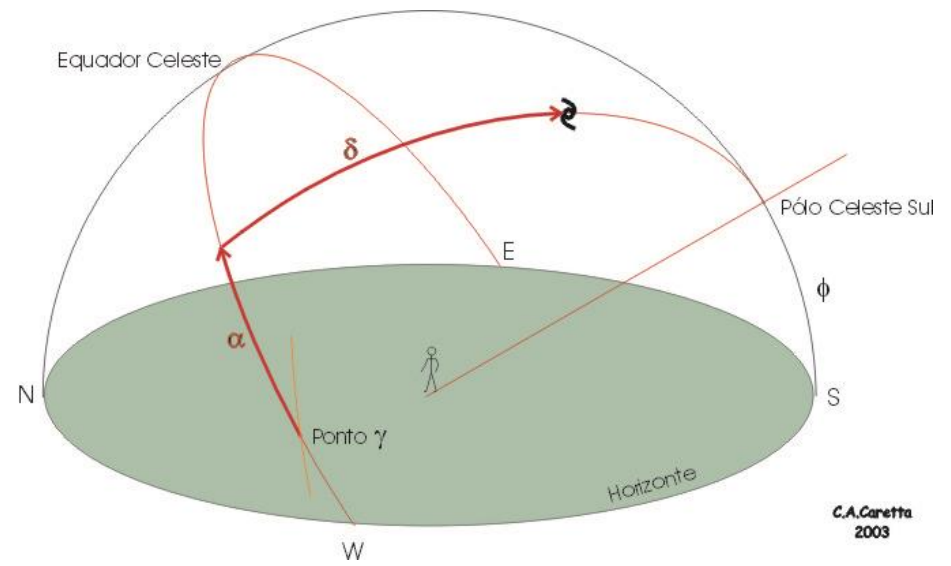
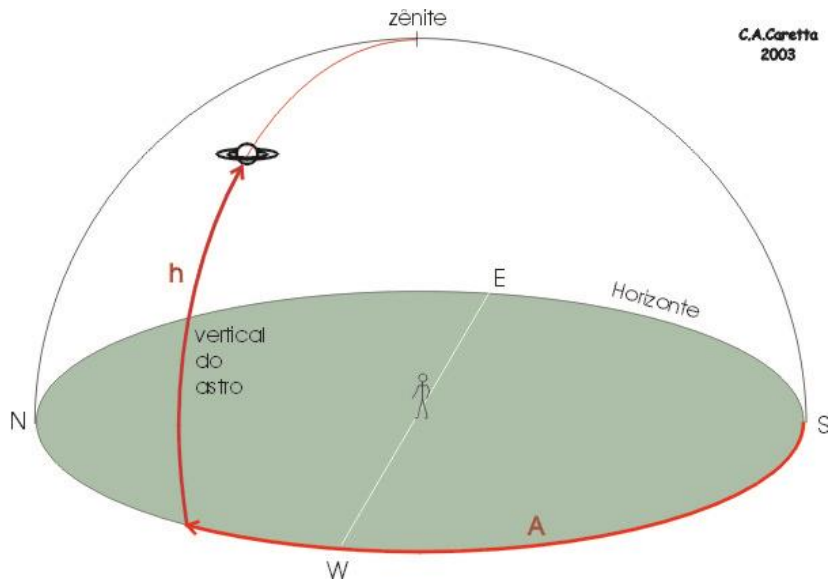
Fig 2.3 'Galaxies in the Universe' Sparke/Gallagher CUP 2007

# *Cinemática Estelar 1*





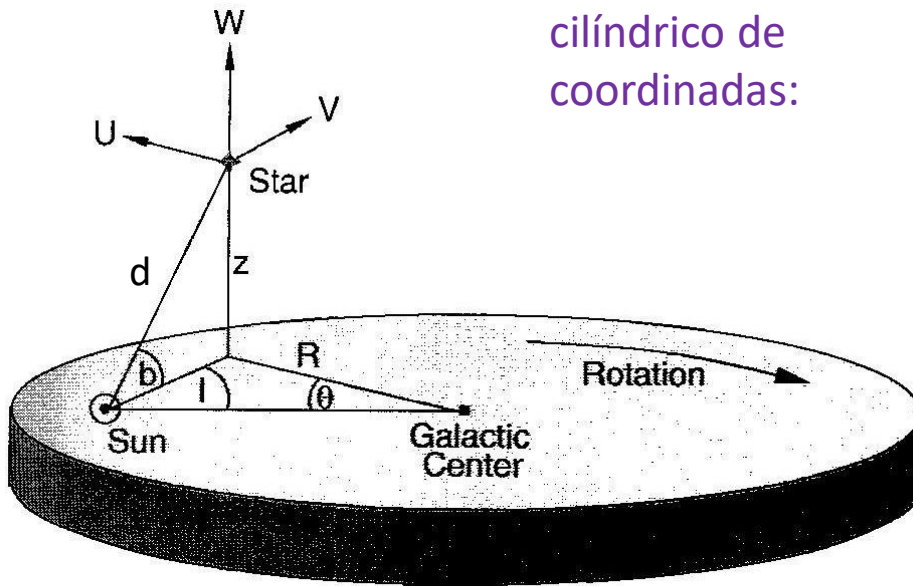








Sistema  
cilíndrico de  
coordenadas:



**Fig. 2.13.** Cylindrical coordinate system  $(R, \theta, z)$  with the Galactic center at its origin. Note that  $\theta$  increases in the clockwise direction if the disk is viewed from above. The corresponding velocity components  $(U, V, W)$  of a star are indicated

$\odot \rightarrow$  Sol

$l, b \rightarrow$  coordenadas galácticas

$d \rightarrow$  distancia al Sol

$\theta \rightarrow$  ángulo galactocéntrico

$R \rightarrow$  distancia galactocéntrica

$z \rightarrow$  altura

Componente de la velocidad:

$V \rightarrow$  tangencial a la rotación

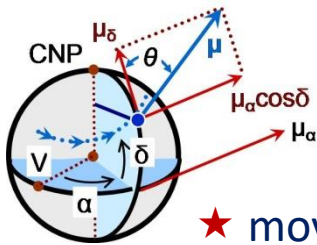
$U \rightarrow$  radial galactocéntrica

$W \rightarrow$  perpendicular al plano

$$U = dR/dt, \quad V = R \, d\theta/dt, \quad W = dz/dt$$

# Conceptos Básicos 2

## • Velocidades estelares



### ★ velocidad radial

$$v_r = c z = c (\lambda_o - \lambda_e) / \lambda_e$$

$$[\text{km/s}] = [\text{km/s}]$$

### ★ movimiento propio (corregido de la paralaje)

$$\mu \rightarrow [\mu_\alpha \cos(\delta), \mu_\delta] = [\mu_l \cos(b), \mu_b]$$

$$= [\mu \sin(\text{PA}), \mu \cos(\text{PA})]$$

$$[\text{arcsec} / \text{año}] \text{ o } [\text{mas} / \text{año}]$$

### ★ velocidad transversal

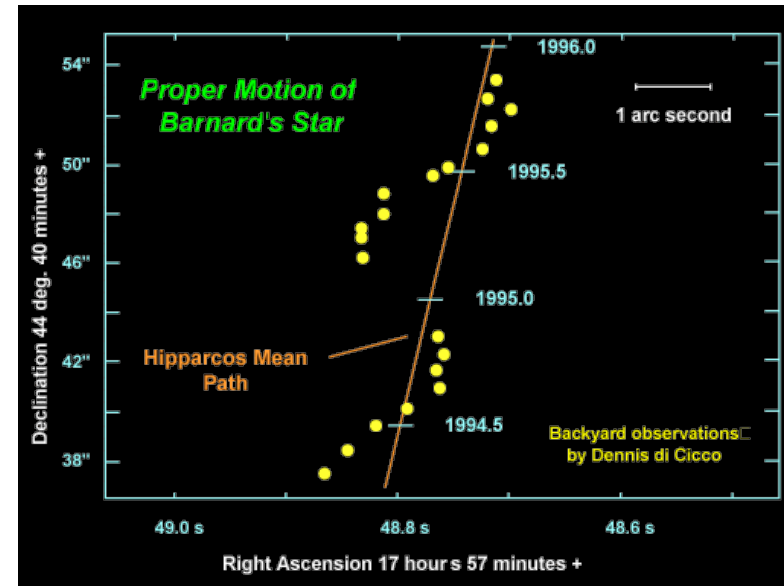
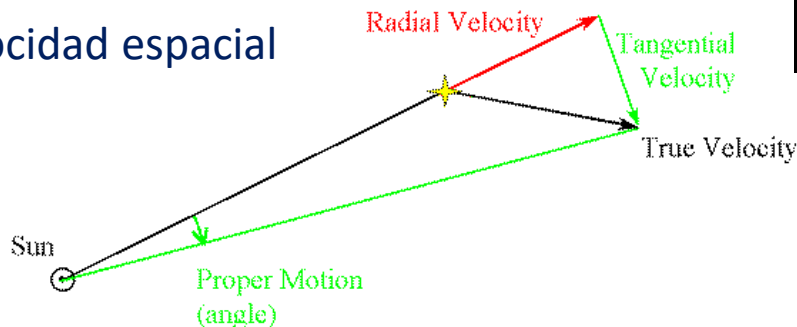
$$v_t = d \tan(\mu) \approx d \mu$$

$$[\text{km/s}] = [(1/206,265) \text{ rad} / 3.155815 \times 10^7 \text{ s}]$$

$$[3.085678 \times 10^{13} \text{ km}]$$

$$= 4.74 \mu d [\text{arcsec} / \text{año} \times \text{pc}]$$

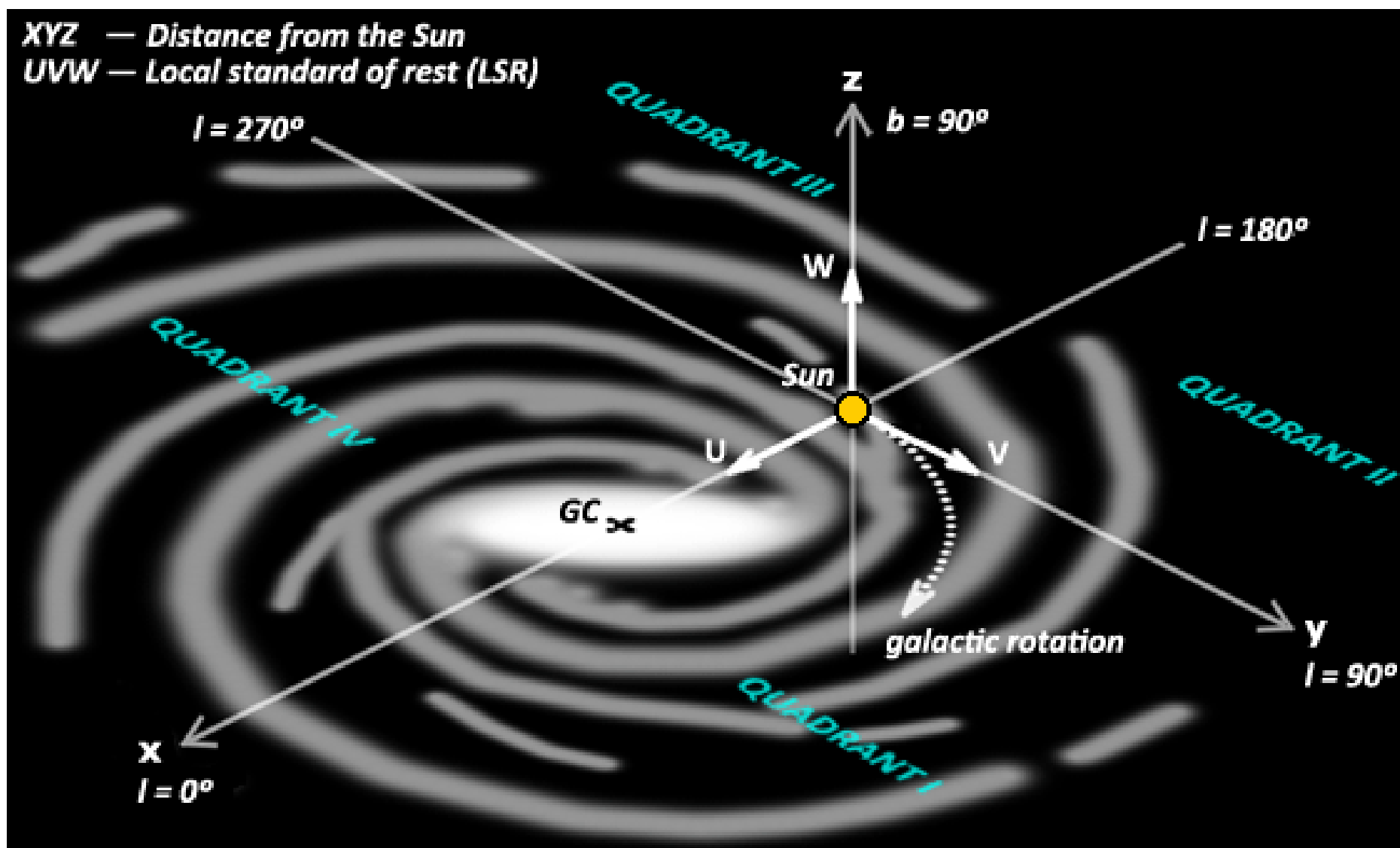
### ★ velocidad espacial



$$v_h^2 = v_r^2 + v_t^2$$

**XYZ** — Distance from the Sun

**UVW** — Local standard of rest (LSR)



## *Local Standard of Rest (LSR)*

El Sol **no** se encuentra exactamente en el plano de la Galaxia, pero unos 10-20 pc “arriba” (N) de él. Además, la órbita del Sol no es exactamente circular. Para establecer un **referencial** local, definimos el **Padrón Local de Reposo (LSR)**, un punto ficticio que se mueve alrededor del centro galáctico en el plano medio del disco, que representa una **proyección de la posición del Sol**. Si consideramos el caso más sencillo de una órbita circular, se llama **LSR dinámico**.

$$U_{\text{LSR}} = 0, \quad V_{\text{LSR}} = V_0, \quad W_{\text{LSR}} = 0$$

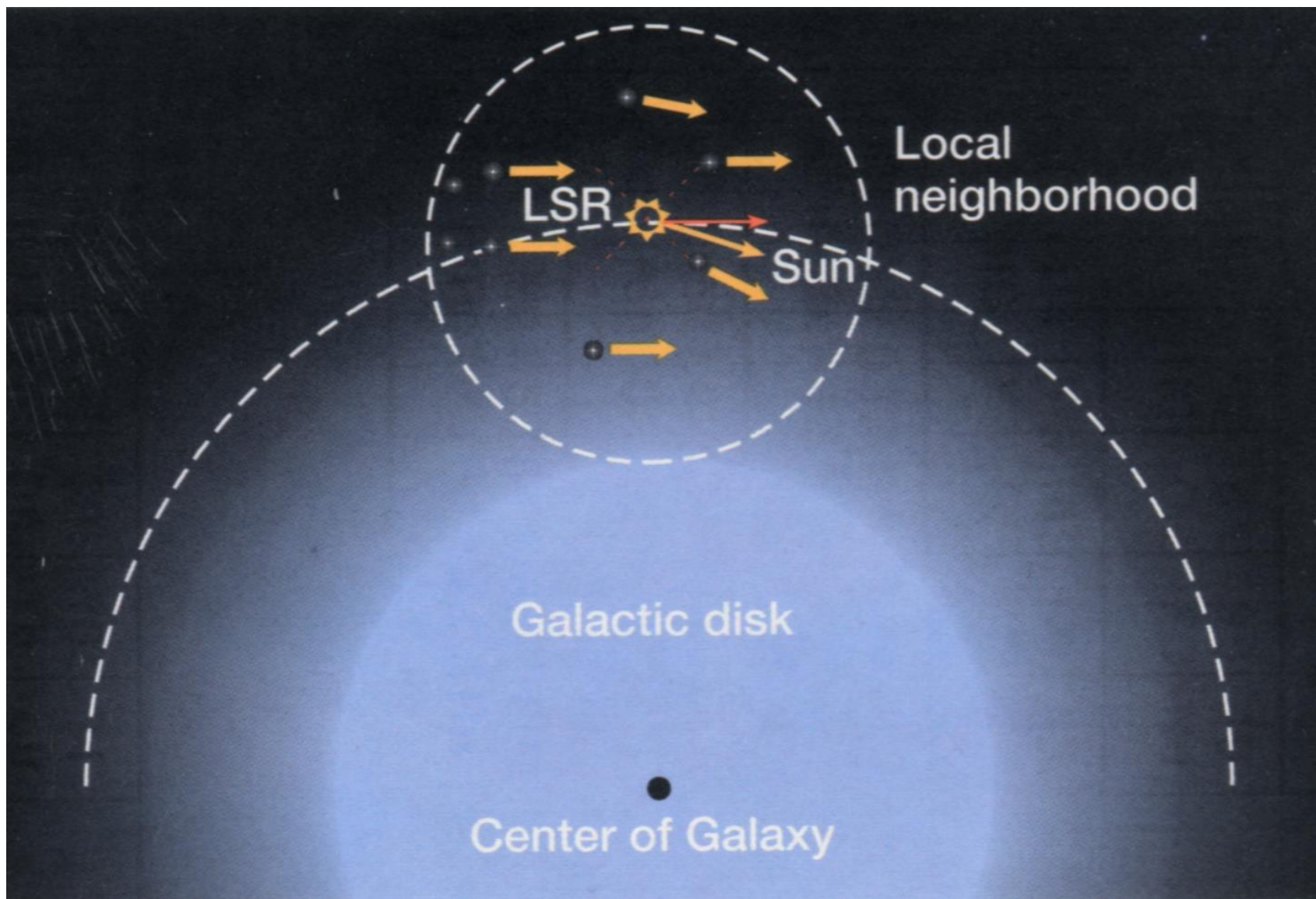
La velocidad del LSR es obtenida **promediándose las velocidades de las estrellas** en la vecindad del Sol (incluyendo al Sol mismo), llamado **LSR cinemático**.

En 1985, la IAU recomendó los valores  $R_0 = 8.5$  kpc y  $V_0 = 220$  km/s para el movimiento circular del LSR, aunque las estimaciones actuales están más cercanas a  $R_0 \sim 8.0$  kpc y  $V_0 \sim 200$  km/s. De esa forma podemos calcular el periodo del LSR:

$$P = 2 \pi R_0 / V_0 = 2 \pi (8 \times 10^3 \times 3.1 \times 10^{13} \text{ km}) / (200 \text{ km/s}) = 7.8 \times 10^{15} \text{ s} = 246 \text{ Ma}$$

La velocidad de un objeto en relación al LSR es llamada **velocidad peculiar**:

$$\mathbf{u} = (U - U_{\text{LSR}}, V - V_{\text{LSR}}, W - W_{\text{LSR}}) = (U, V - V_0, W)$$



# Velocidad del Sol

- **Promedio de las velocidades estelares en la vecindad solar**

- ★ velocidades peculiares

$$\mathbf{u}_{\star} = \mathbf{v}_h + \mathbf{u}_{\odot}$$

$$(\mathbf{v}_h = \mathbf{v}_r + \mathbf{v}_t)$$

$$(u_h, v_h, w_h)$$

- ★ velocidad del Sol

$$\mathbf{u}_{\odot} = \langle \mathbf{u}_{\star} \rangle - \langle \mathbf{v}_h \rangle$$

$$(u_{\odot}, v_{\odot}, w_{\odot}) =$$

$$(\langle u_{\star} \rangle - \langle u_h \rangle, \langle v_{\star} \rangle - \langle v_h \rangle, \langle w_{\star} \rangle - \langle w_h \rangle) =$$

$$(\langle U_{\star} \rangle - \langle u_h \rangle, \langle V_{\star} - V_0 \rangle - \langle v_h \rangle, \langle W_{\star} \rangle - \langle w_h \rangle)$$

componentes  
(promedios) de  
las velocidades  
**heliocéntricas**  
de las estrellas

promedios de  
las velocidades  
**galactocéntricas**

★ si la Galaxia tiene simetría axial y está en un estado estacionario, sólo tendremos valores distintos de cero para el promedio de velocidades peculiares  $\langle V_{\star} - V_0 \rangle$  (por cuenta de las orbitas elípticas), es decir:

$$\langle U_{\star} \rangle = 0, \quad \langle W_{\star} \rangle = 0$$

- ★ así:

$$u_{\odot} = -\langle u_h \rangle$$

$$v_{\odot} = \langle V_{\star} - V_0 \rangle - \langle v_h \rangle$$

$$w_{\odot} = -\langle w_h \rangle$$

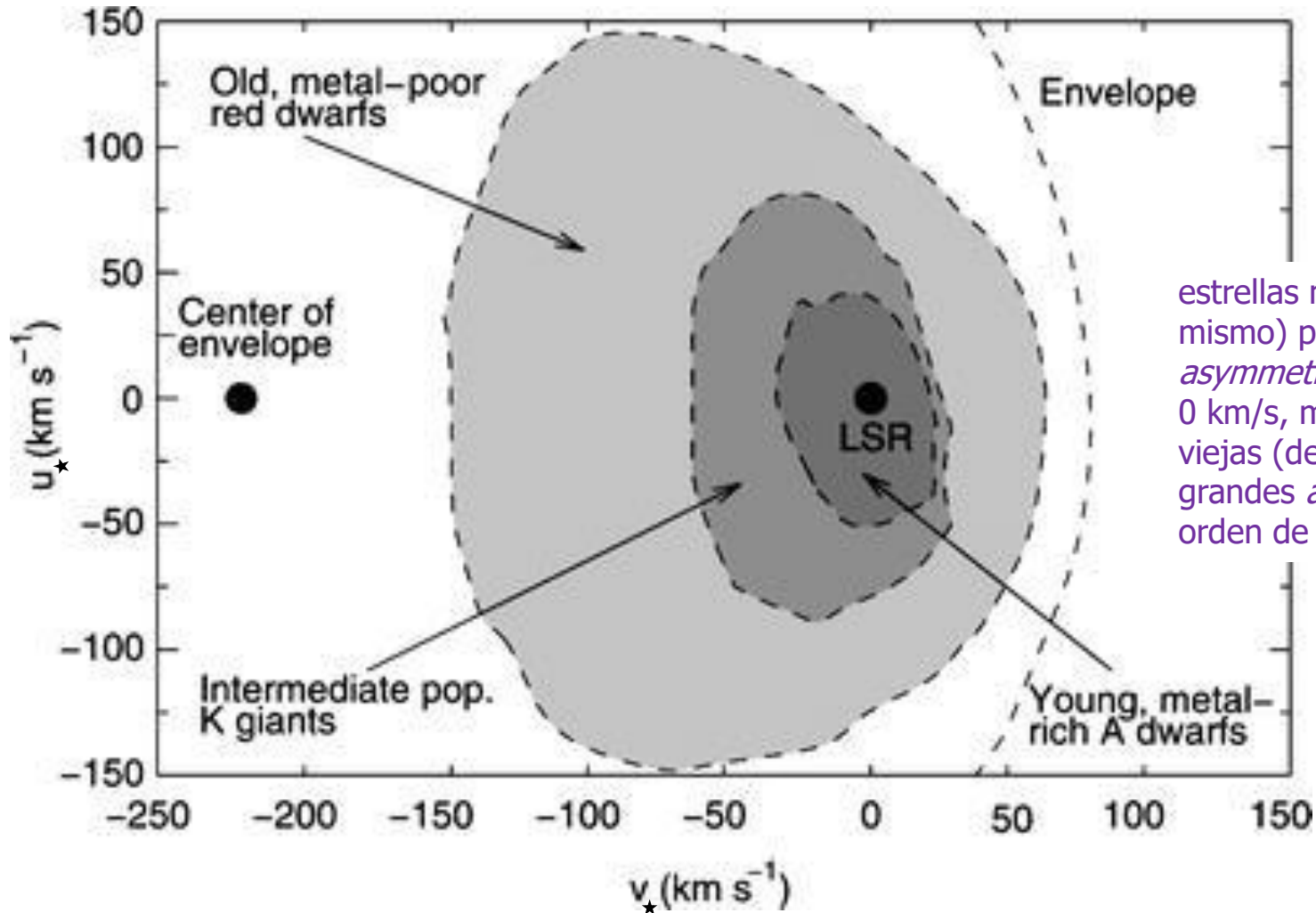
★ además, los análisis estadísticos de las orbitas posibles por la dinámica estelar nos llevan a considerar que:

$$\langle V_{\star} - V_0 \rangle = - \text{cte} \langle u_h^2 \rangle$$

La señal negativa aparece porque las orbitas elípticas tienen menor velocidad tangencial que las orbitas circulares . Tal fenómeno está relacionado al llamado ***asymmetric drift***.



## Asymmetric Drift



estrellas más jóvenes (del disco mismo) presentan más bajas *asymmetric drifts*, del orden de 0 km/s, mientras estrellas más viejas (del halo) presentan grandes *asymmetric drifts*, del orden de -100 km/s.

★ además, los análisis estadísticos de las orbitas posibles por la dinámica estelar nos llevan a considerar que:

$$\langle V_{\star} - V_0 \rangle = -\text{cte} \langle u_h^2 \rangle$$

La señal negativa aparece porque las orbitas elípticas tienen menor velocidad tangencial que las orbitas circulares. Tal fenómeno está relacionado al llamado *asymmetric drift*.

★ Luego:

$$u_{\odot} = -\langle u_h \rangle$$

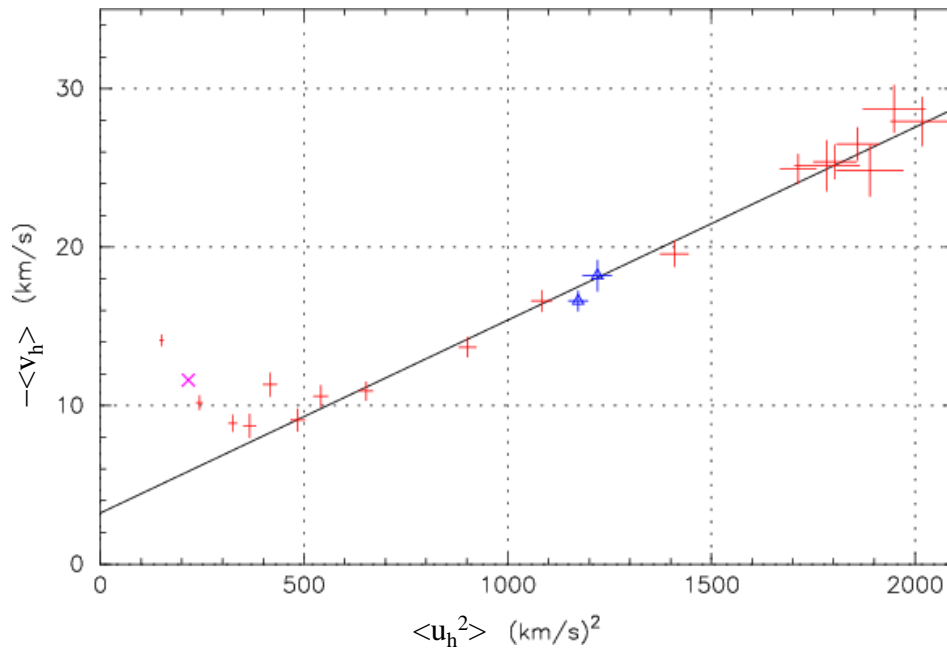
$$v_{\odot} = -\text{cte} \langle u_h^2 \rangle - \langle v_h \rangle \Rightarrow -\langle v_h \rangle = \text{cte} \langle u_h^2 \rangle + v_{\odot}$$

$$y = a \cdot x + b$$

$$w_{\odot} = -\langle w_h \rangle$$

★ para estimar los valores para  $v_{\odot}$  hay que considerar diferentes poblaciones estelares y medir  $\langle v_h \rangle$  y  $\langle u_h^2 \rangle$  separadamente para cada una de ellas. En un diagrama de  $\langle v_h \rangle \times \langle u_h^2 \rangle$ , en el cual se puede ajustar una relación lineal, la pendiente nos da la cte y la extrapolación al eje de  $\langle v_h \rangle$  nos da el valor de  $v_{\odot}$ .

# Velocidad del Sol

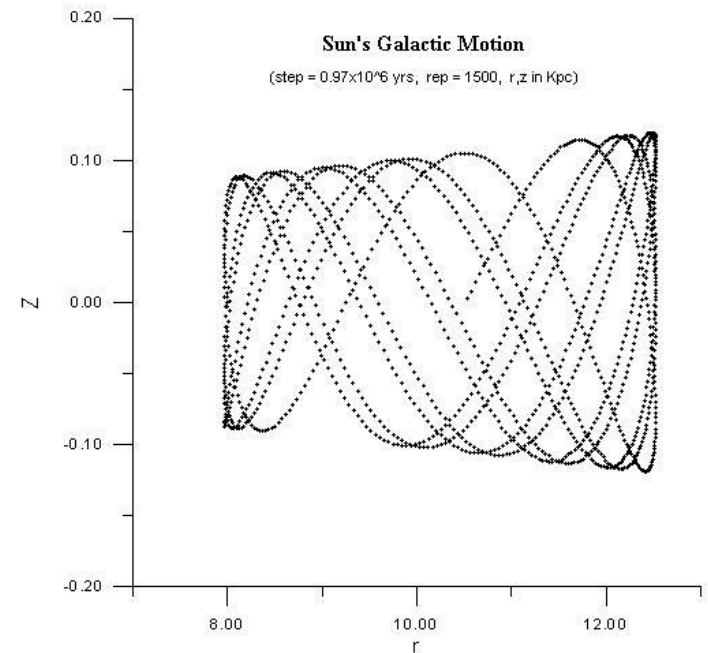
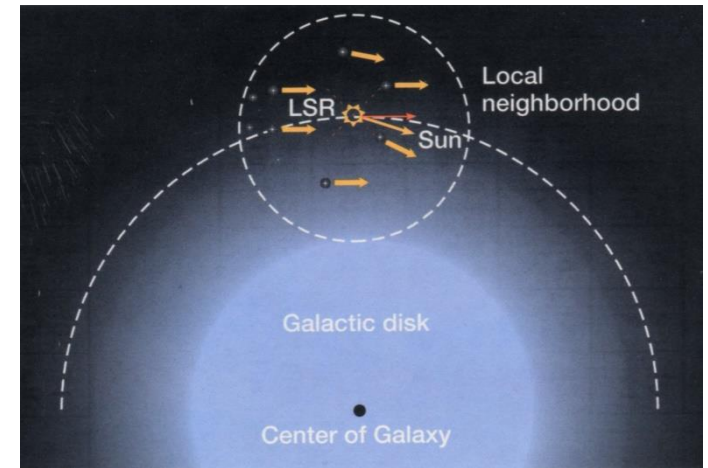


★ en fin, la **velocidad peculiar del Sol:**

$$\mathbf{u}_{\odot} = (-10, 5, 7)$$

$$|\mathbf{u}_{\odot}| = 13.2 \text{ km s}^{-1}$$

es decir, el Sol se mueve actualmente **hacia dentro, más rápido y hacia “arriba”** del LSR.



## Tarea 2:

- Presentar un reporte (3-5 páginas de texto) sobre los métodos de determinación de distancias en Astrofísica.