

Fundamentos de Astronomía y Astrofísica

*Tema: posición y movimientos
en el Espacio*

Prof. Dr. César A. Caretta

Dep. de Astronomía – Universidad de Guanajuato
2022

Rotación de la Tierra (1)



Período: $T = 23.9345 \text{ h}$
 $(23^{\text{h}} 56^{\text{m}} 4.1^{\text{s}})$

Radio (Ecuador):
 $R_{\oplus} = 6\,378.4 \text{ km}$

Velocidad máxima:

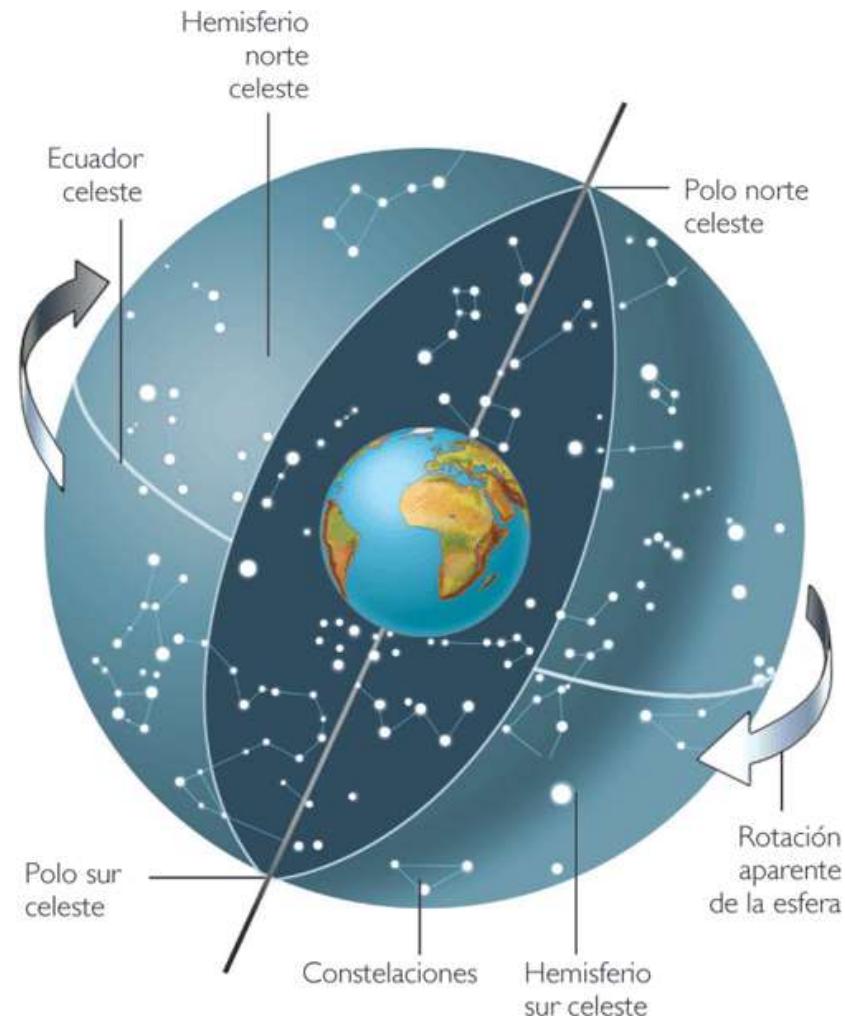
$$V_{Ec} = P / T = (2 \pi R_{\oplus}) / T$$
$$V_{Ec} = \frac{\pi \times 12\,756.8 \text{ km}}{23.9345 \text{ h}}$$

$$V_{Ec} = 1\,674 \text{ km/h}$$
$$(0.47 \text{ km/s})$$

Velocidad en otros puntos
($\phi \rightarrow$ latitud geográfica):

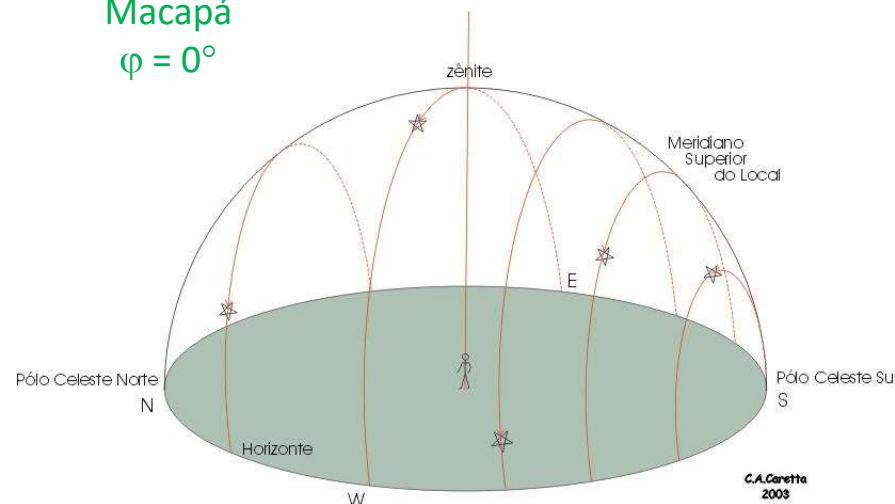
$$V = V_{Ec} \cos(\phi)$$

Movimiento Diurno

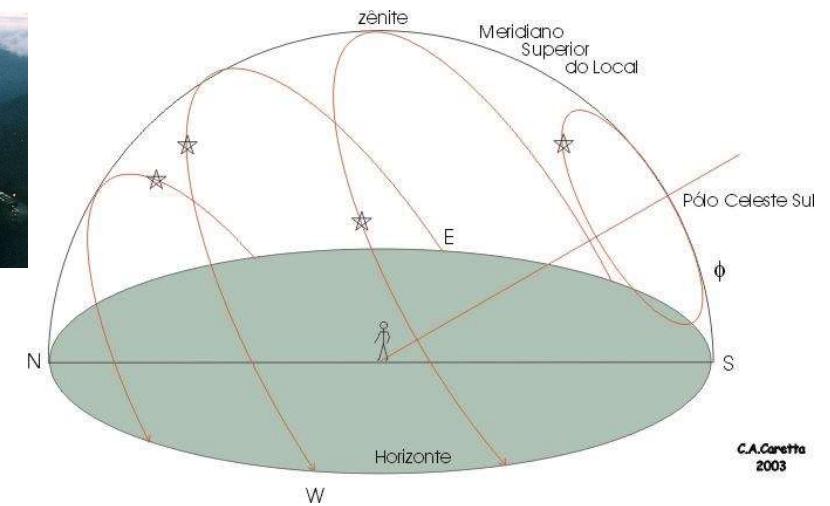




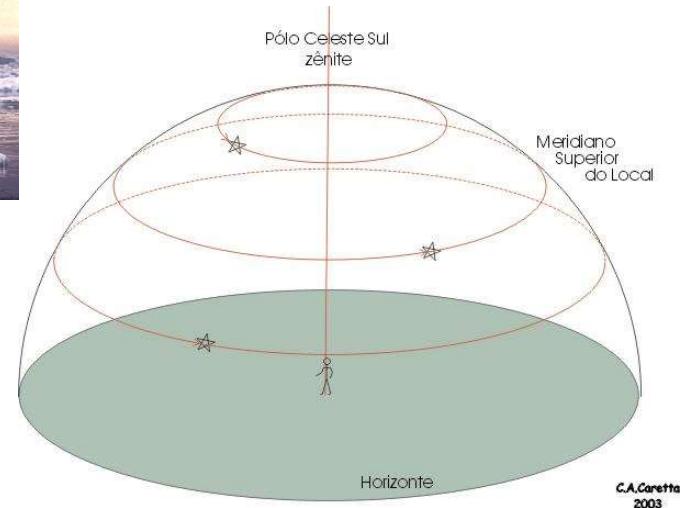
Macapá
 $\phi = 0^\circ$



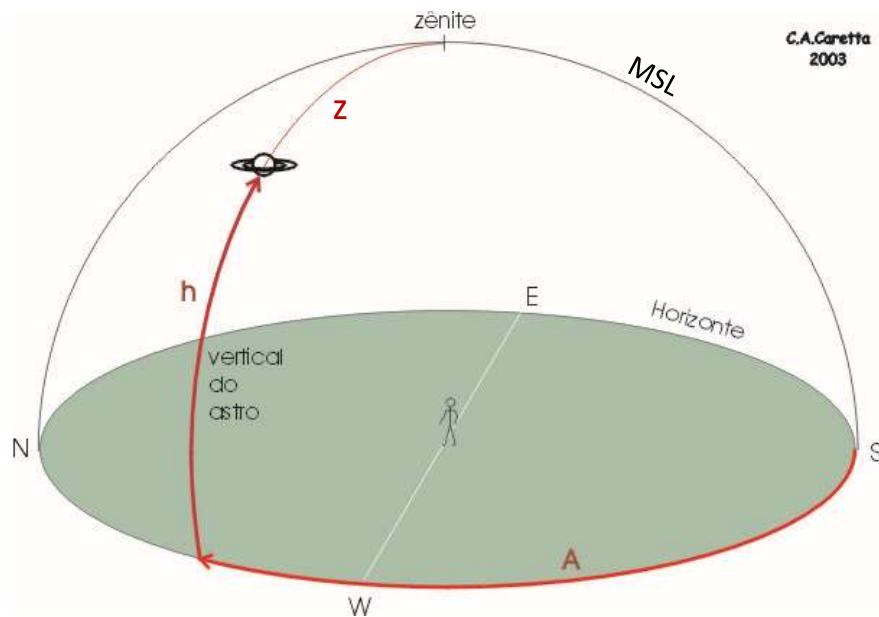
Rio de Janeiro
 $\phi = 23^\circ S$



Antártida
 $\phi = 90^\circ S$



Sistema de Coordenadas Horizontales



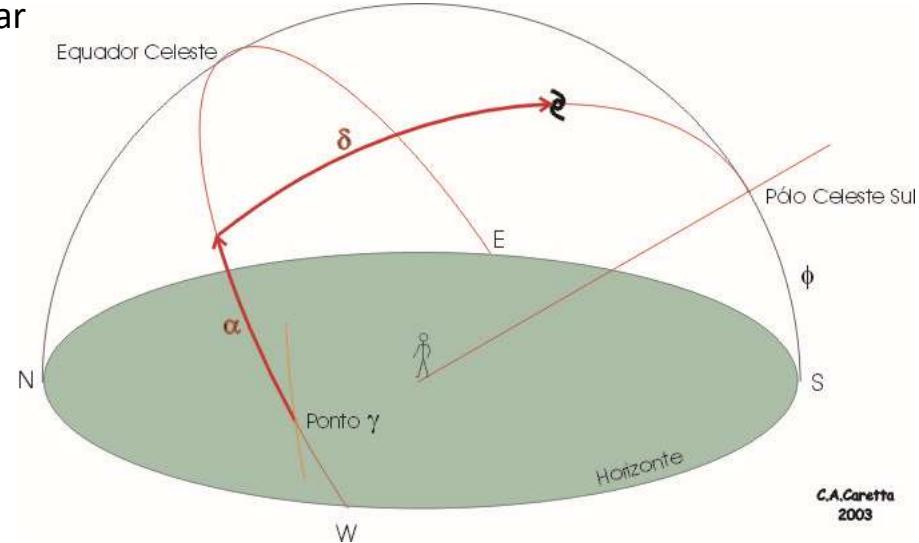
Para ubicar objetos celestes, el sistema más natural del punto de vista del observador es el **Sistema de Coordinadas Horizontales**. El plano de referencia, en ese caso, es el plano tangente a la Tierra en la posición del observador (perpendicular a la vertical del lugar) y, su intersección con la Bóveda Celeste define el **horizonte** del observador.

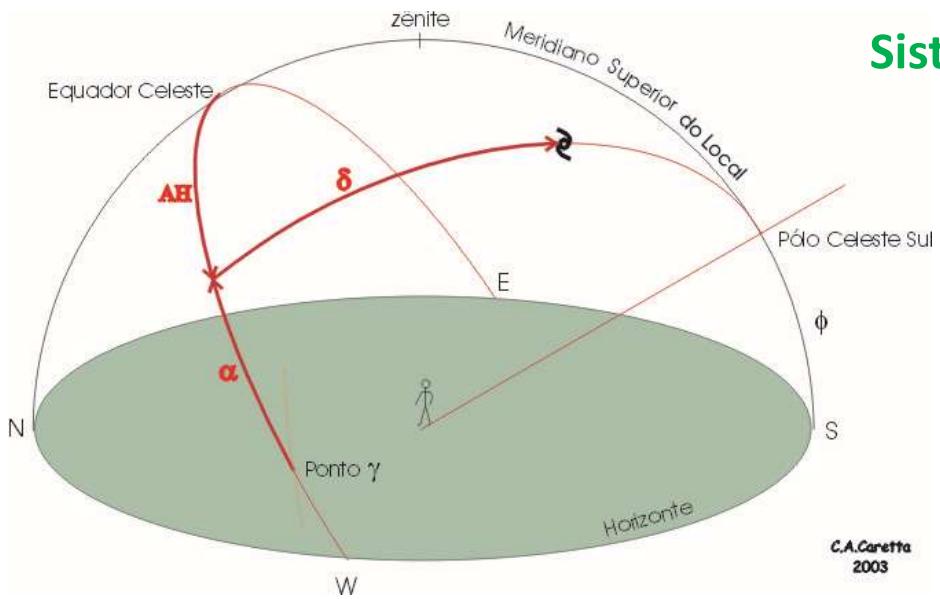
Las coordenadas angulares en ese caso son: el **azimut** (**A**), medido a lo largo del horizonte (en Astronomía empezando en el S, en sentido horario: SWNE), y la **altura** o **elevación** (**h**), medida del horizonte a la posición del astro (a lo largo de un círculo máximo perpendicular al horizonte). El complemento de la altura es llamado **distancia cenital** (**z**). El **cenit** y el **nadir** son los polos correspondientes del horizonte. El plano que corta perpendicularmente el horizonte y contiene los puntos cardinales N y S, y además, el cenit y el nadir, es llamado **Meridiano Superior del Lugar**, **MSL** (otro importante círculo máximo).

Sistema de Coordenadas Ecuatoriales

El problema práctico con el Sistema Horizontal es que, con el paso del movimiento diurno, las dos coordenadas del objeto cambian constantemente. Un sistema más adecuado para marcar la posición de los astros (y construir catálogos de esos objetos) es el **Sistema de Coordenadas Ecuatoriales**. Ese sistema es básicamente una proyección del Sistema Terrestre en la Esfera Celeste. Así, el círculo máximo de referencia es **Ecuador Celeste**, y sus polos los **Polos Celestes N y S** (los puntos donde la extensión del eje de rotación de la Tierra toca la Esfera Celeste).

Las coordenadas de ese sistema son: la **ascensión recta (α o R.A.)**, a lo largo del Ecuador Celeste, y la **declinación (δ o Dec.)**, en un círculo máximo perpendicular al Ecuador (meridiano). La **Dec.** es positiva a N y negativa a S, mientras la **R.A.** es contada a partir de un punto especial denominado **punto vernal** (o equinoccio vernal o punto γ) – el punto donde Ecuador Celeste y la Eclíptica se cruzan (en el paso del Sol del S al N) – contada en el **sentido de W a E**.





Sistema de Coordenadas Horarias

Es un sistema intermedio entre el Horizontal y el Ecuatorial. Su motivación es facilitar la conexión entre esos dos sistemas. Se define una nueva coordinada local pero con referencia al sistema Ecuatorial.

La nueva coordinada es el **ángulo horario (AH)**, medido a lo largo del Ecuador Celeste, con origen en el MSL y contado en el sentido contrario al de la R.A. (como muestra la figura arriba). Decimos que los objetos celestes “culminan” cuando atraviesan el MSL (es el punto donde poseen el mayor valor de altura, h , en relación al horizonte) y, en ese punto, su **$AH = 0^h$** . Nota que el AH es medido en **horas**. Posiciones anteriores son negativas (-6^h hasta 0^h) y posiciones posteriores positivas (0^h hasta 6^h). Hay un AH especial: el **AH del punto vernal**, llamado **Tiempo Sideral Local (TSL)**, definido a partir de la *Ecuación Fundamental de la Astronomía Esférica (EFAE)*:

$$TSL = AH + \alpha$$

Nota que el α (R.A.) también es medido usualmente en **horas** [0^h hasta 24^h].

Transformación de coordenadas

Siguiendo el raciocinio presentado anteriormente, podemos transformar coordenadas medidas localmente (Horizontales: A, h) en coordenadas Horarias (AH, δ), y de ahí

pasar a coordenadas Ecuatoriales (α, δ) utilizando la EFAE.

Las sustituciones son siguientes:

$$\psi = 90^\circ - A, \quad \theta = h,$$

$$\psi' = 90^\circ - AH, \quad \theta' = \delta, \quad \chi = 90^\circ - \phi$$



$$\sin AH \cos \delta = \sin A \cos h,$$

$$\cos AH \cos \delta = \cos A \cos h \sin \phi + \sin h \cos \phi,$$

$$\sin \delta = -\cos A \cos h \cos \phi + \sin h \sin \phi$$

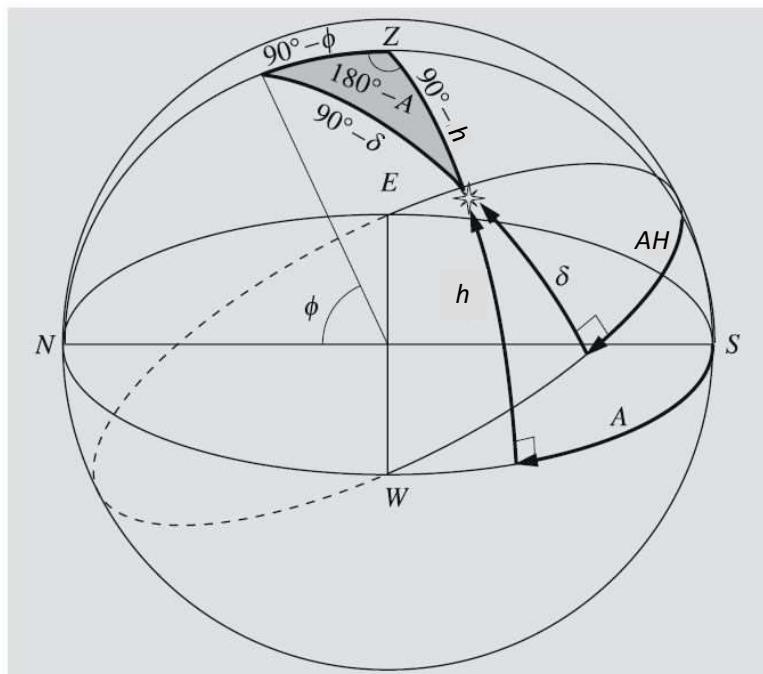


Fig. 2.12. The nautical triangle for deriving transformations between the horizontal and equatorial frames

También podemos hacer la transformación inversa, con la siguiente sustitución:

$$\begin{aligned}\psi &= 90^\circ - AH, \quad \theta = \delta, \\ \psi' &= 90^\circ - A, \quad \theta' = h, \quad \chi = -(90^\circ - \phi)\end{aligned}$$



$$\begin{aligned}\sin A \cos h &= \sin AH \cos \delta, \\ \cos A \cos h &= \cos AH \cos \delta \sin \phi - \sin \delta \cos \phi, \\ \sin h &= \cos AH \cos \delta \cos \phi + \sin \delta \sin \phi.\end{aligned}$$

Nota que hay que checar el cuadrante exacto para los casos donde hay redundancia.

Un caso interesante es el de la culminación: en ese caso, A y AH son cero. Utilizando la tercera ecuación arriba, tenemos:

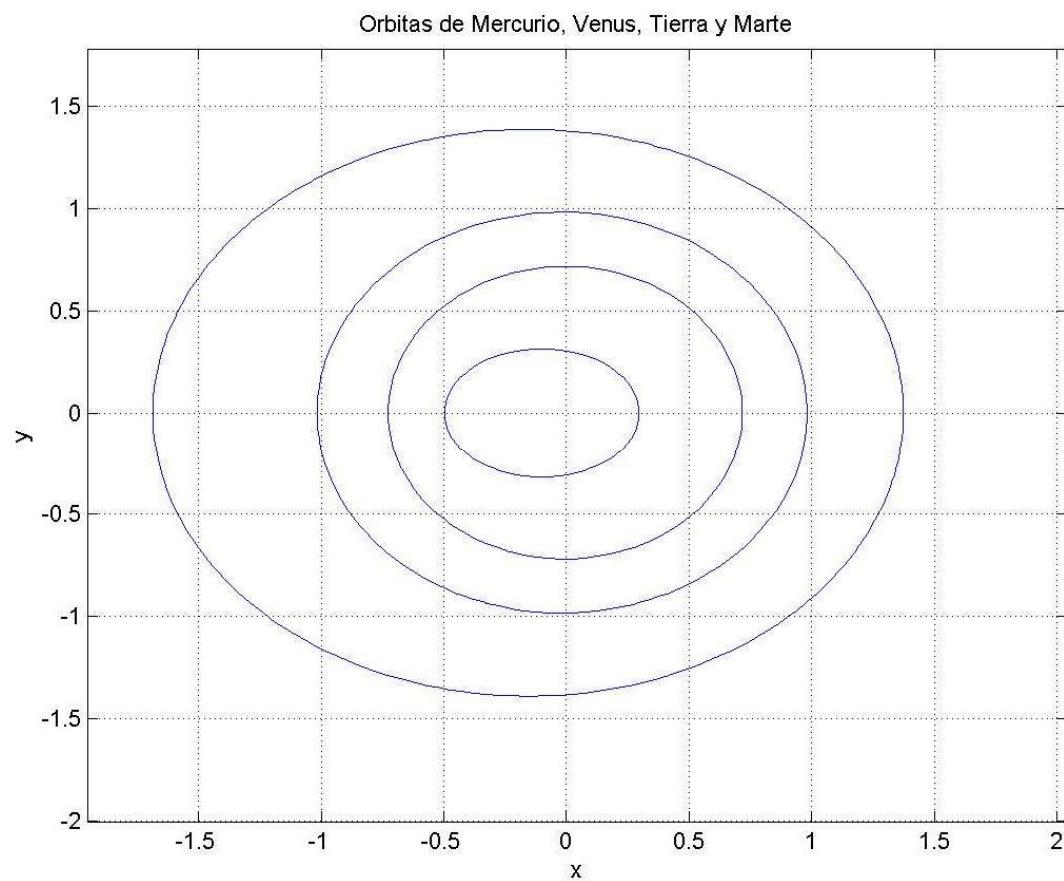
$$\begin{aligned}\sin h &= \cos \delta \cos \phi + \sin \delta \sin \phi \\ &= \cos(\phi - \delta) = \sin(90^\circ - \phi + \delta)\end{aligned}$$

Luego:

$$h_{\max} = \begin{cases} 90^\circ - \phi + \delta, & \text{si el objeto culmina} \\ & \text{a S del cenit} \\ 90^\circ + \phi - \delta, & \text{si el objeto culmina} \\ & \text{a N del cenit} \end{cases}$$

es decir, objetos con $\delta < \phi - 90^\circ$ nunca estarán visibles en esa latitud.

Translación de la Tierra (2)



(alrededor del **baricentro**
del Sistema Solar)

Período (Tierra): $T = 1 \text{ año}_{\text{sid}}$
 $= 365.2564 \text{ d}$
 $= 8766.15 \text{ h}$
 $= 31558150 \text{ s}$

Radio orbital promedio:
 $D = 149\,597\,890 \text{ km} = 1 \text{ UA}$

Velocidad:
 $V = P / T = (2 \pi D) / T$

$V = 107\,225 \text{ km/h}$
 (29.78 km/s)

Correcciones a mediciones de velocidades

Por convención las velocidades radiales publicadas son corregidas al sistema de referencia del **baricentro** del Sistema Solar (v_{hel}). Para eso son necesarias dos correcciones: respectivamente por los movimientos de rotación y orbital de la Tierra.

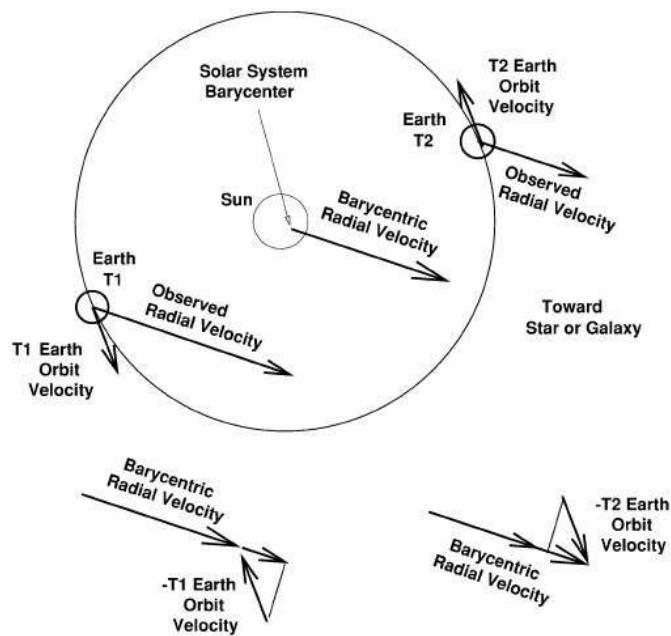


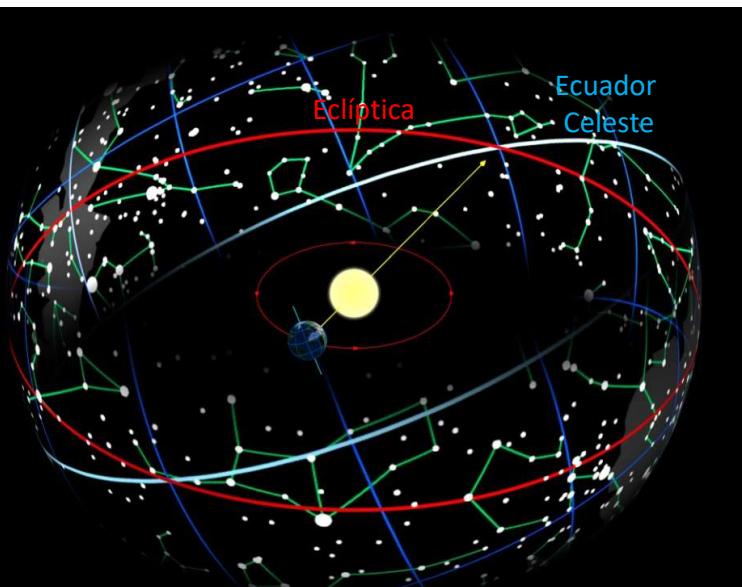
FIG. 51.—The correction of a radial velocity observed from the Earth to that which would be observed from the center of mass of the solar system is shown at two different times in the Earth's orbit.

La corrección por la rotación terrestre depende **latitud** del observador, la **hora** de la observación y la **posición** del objeto celeste, y alcanza, en máximo, $\pm 0.47 \text{ km/s}$ (sobre el Ecuador).

La corrección por el movimiento orbital de la Tierra es normalmente de mayor magnitud:

$$\Delta v = \pm 29.78 \cos(B) \text{ [km/s]}$$

donde **B** es el ángulo entre el vector de velocidad terrestre y la línea de visión (véase la figura al lado). Aquí la **fecha** de observación y las **coordinadas** del objeto son importantes para determinar **B**.



Sistema de Coordenadas Eclípticas

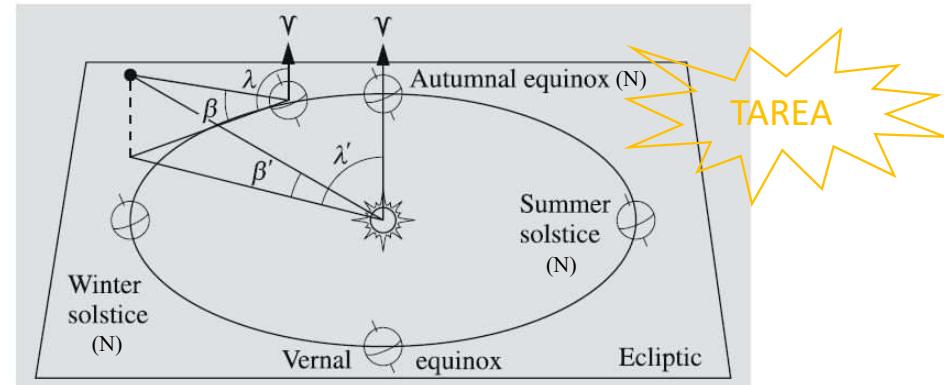
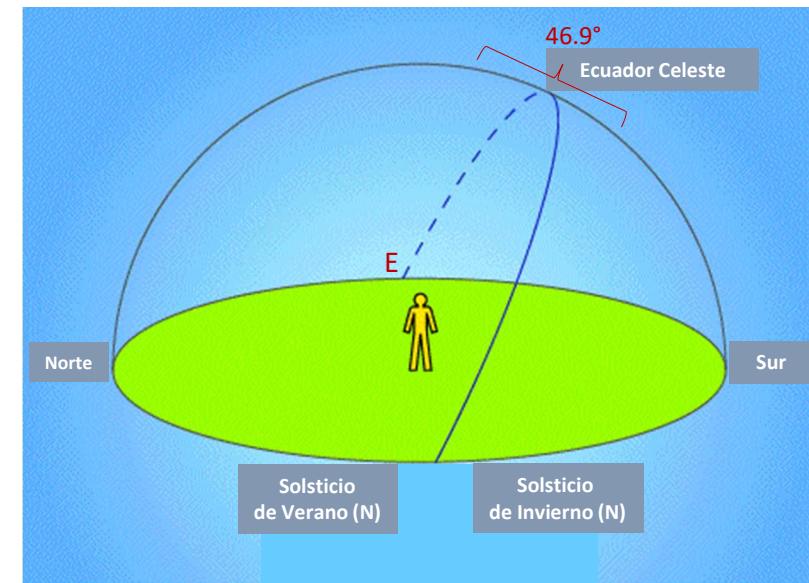
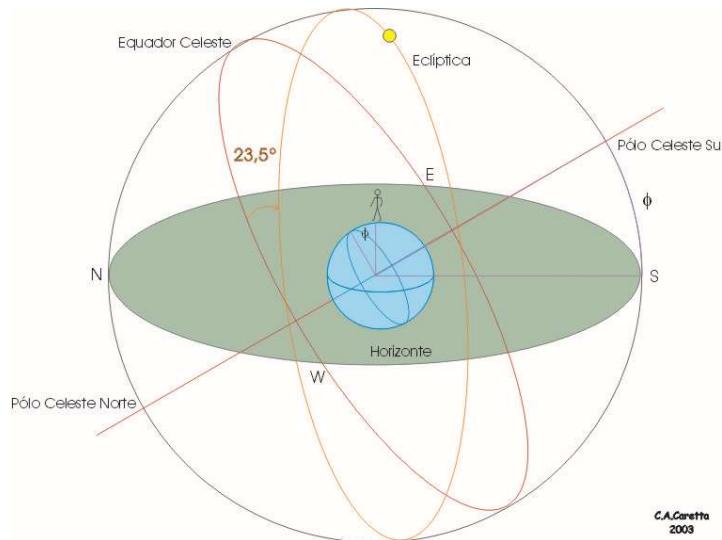
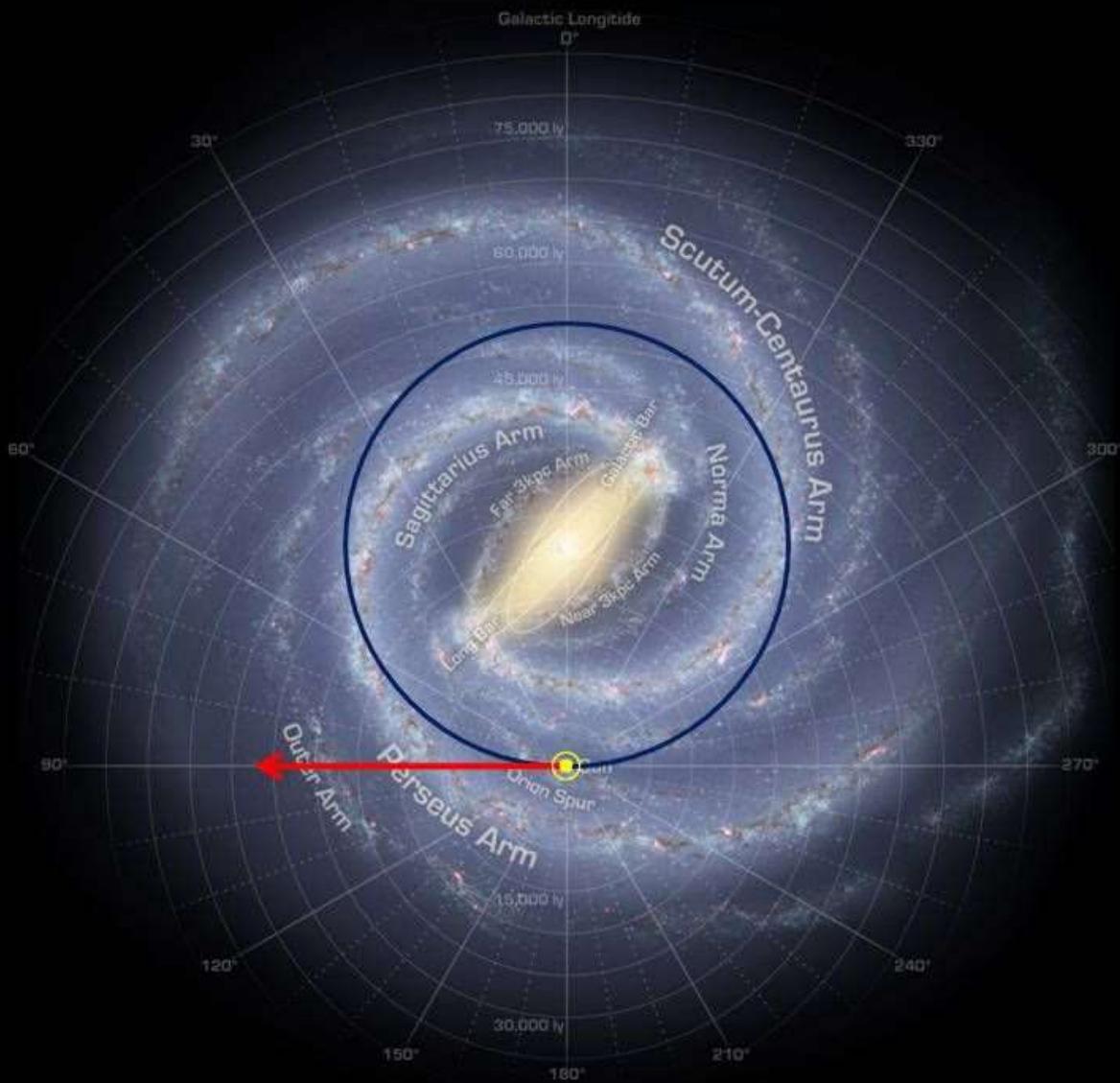


Fig. 2.14. The ecliptic geocentric (λ, β) and heliocentric (λ', β') coordinates are equal only if the object is very far away. The geocentric coordinates depend also on the Earth's position in its orbit



Demostrar como se llega a las ecuaciones de transformación de coordenadas de ecuatoriales a eclípticas geocéntricas (es decir, centradas en la Tierra).



Movimiento del
Sistema Solar

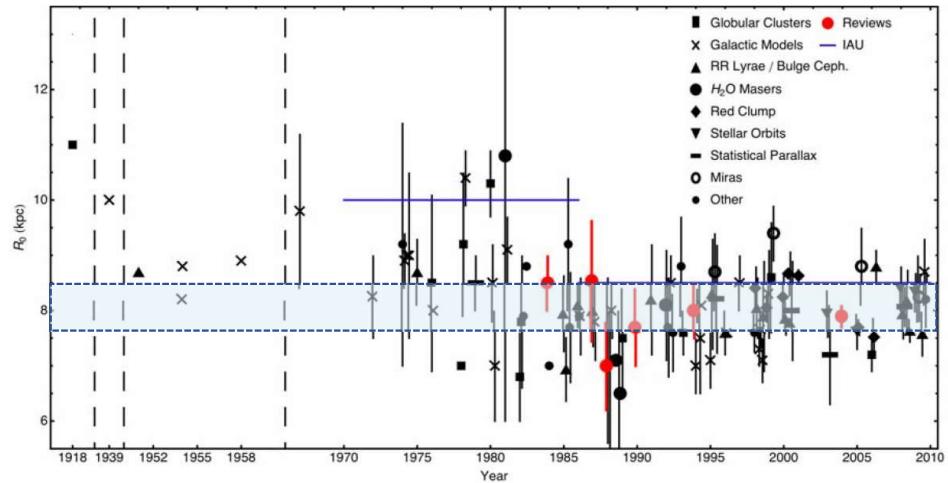
Movimiento del Sistema Solar (3)

(alrededor del **Centro Galáctico**)

Radio orbital promedio:

$$R_0 = 8 \text{ kpc}$$

distancia al Centro Galáctico
 $(8 \pm 0.2 \text{ kpc})$



Movimiento del Sistema Solar (3)

(alrededor del **Centro Galáctico**)

Radio orbital promedio:

$$R_0 = 8 \text{ kpc}$$

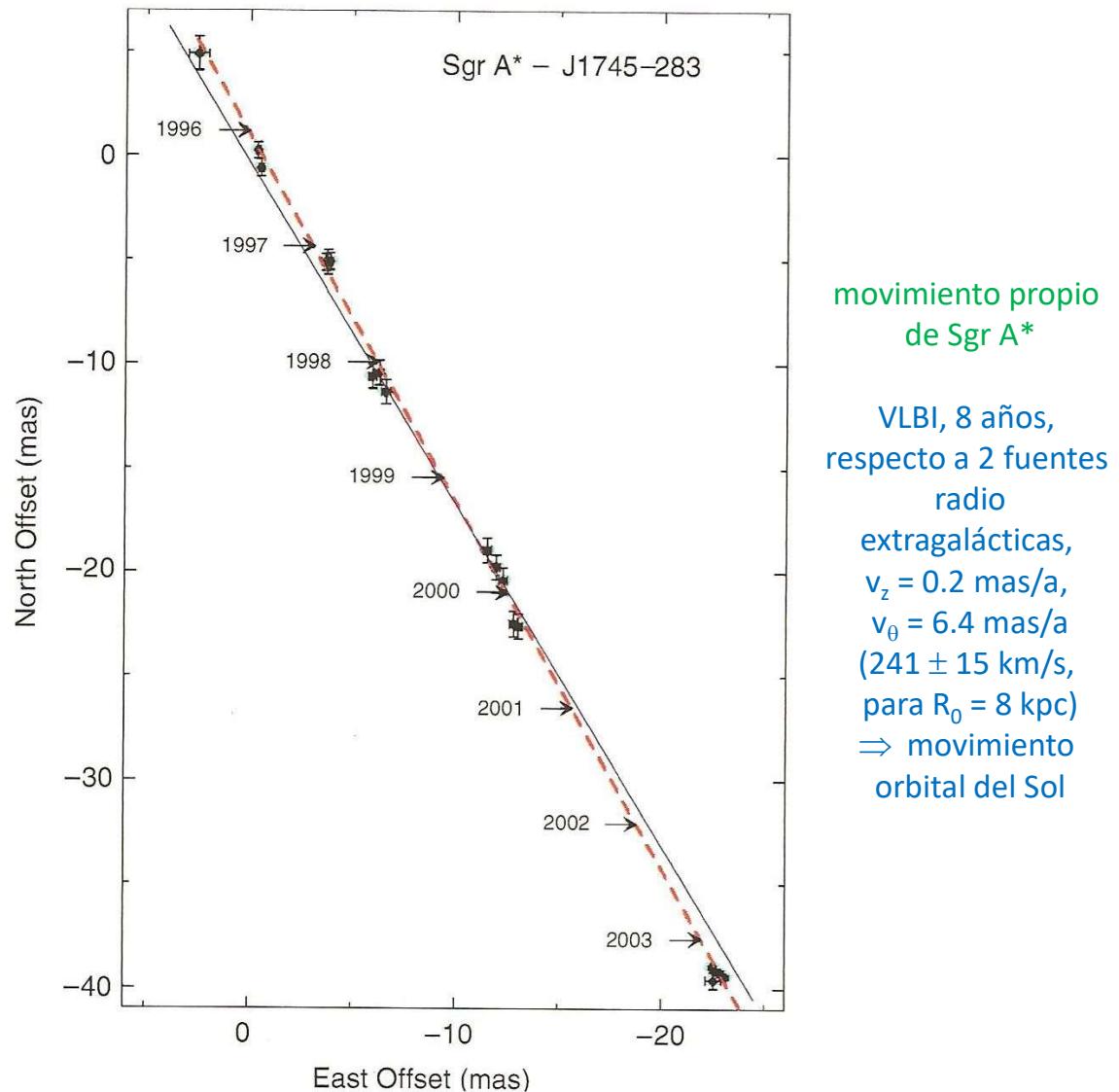
Velocidad:

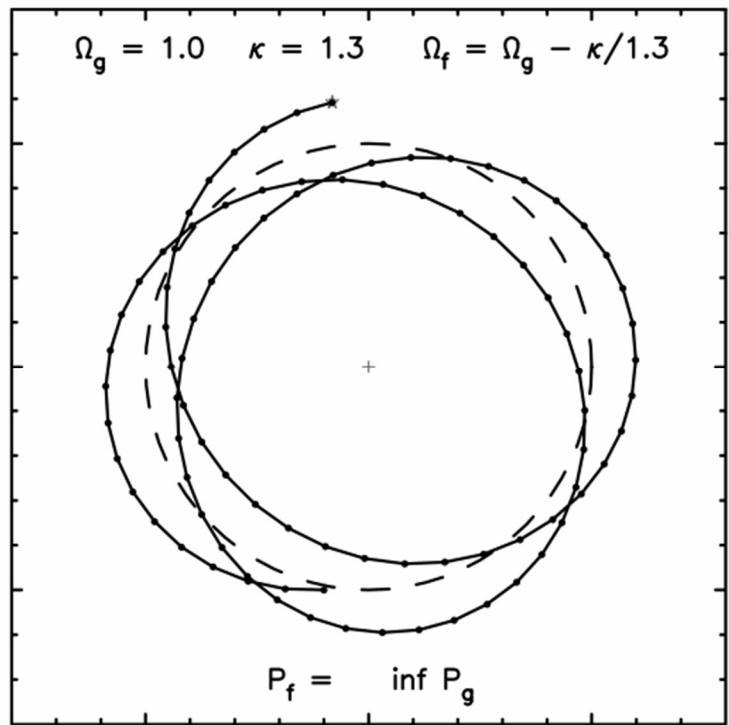
$$V_0 = 867\,600 \text{ km/h} \\ (241 \text{ km/s})$$

$$T = 2 \pi R_0 / V_0 = \\ = 2 \pi (8 \times 10^3 \times 3.1 \times 10^{13} \text{ km}) \\ (241 \text{ km/s}) \\ = 6.5 \times 10^{15} \text{ s} = 206\,000\,000 \text{ a}$$

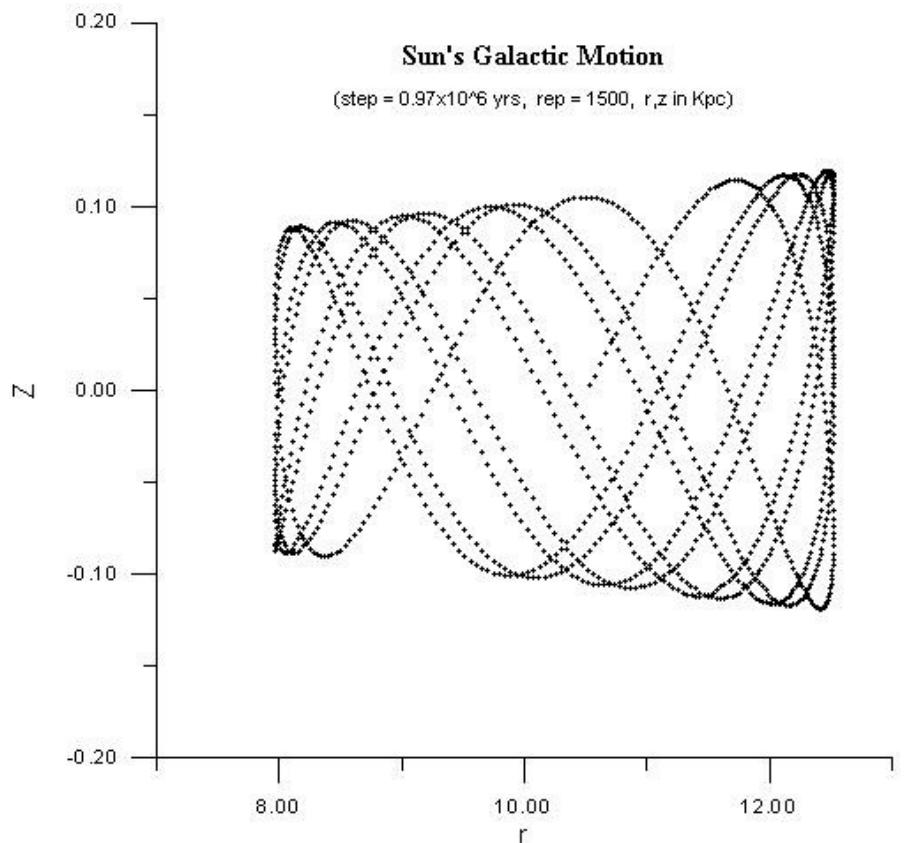
Período: $T = 206 \text{ Ma}$ (mega-años)

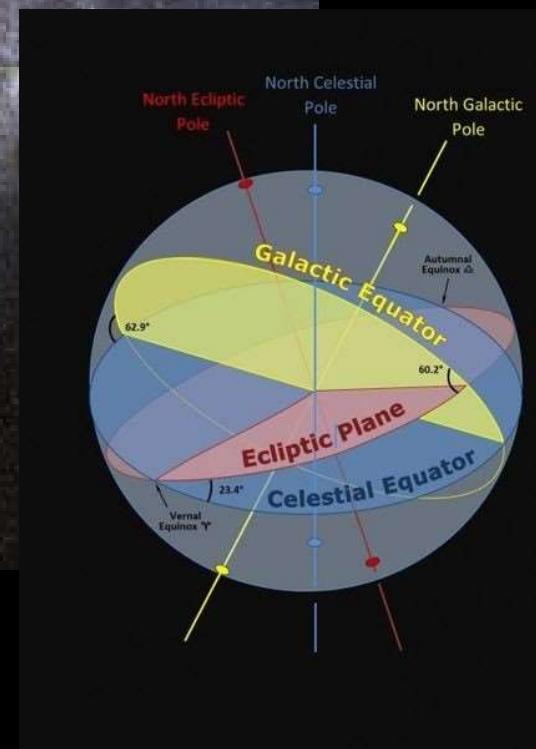
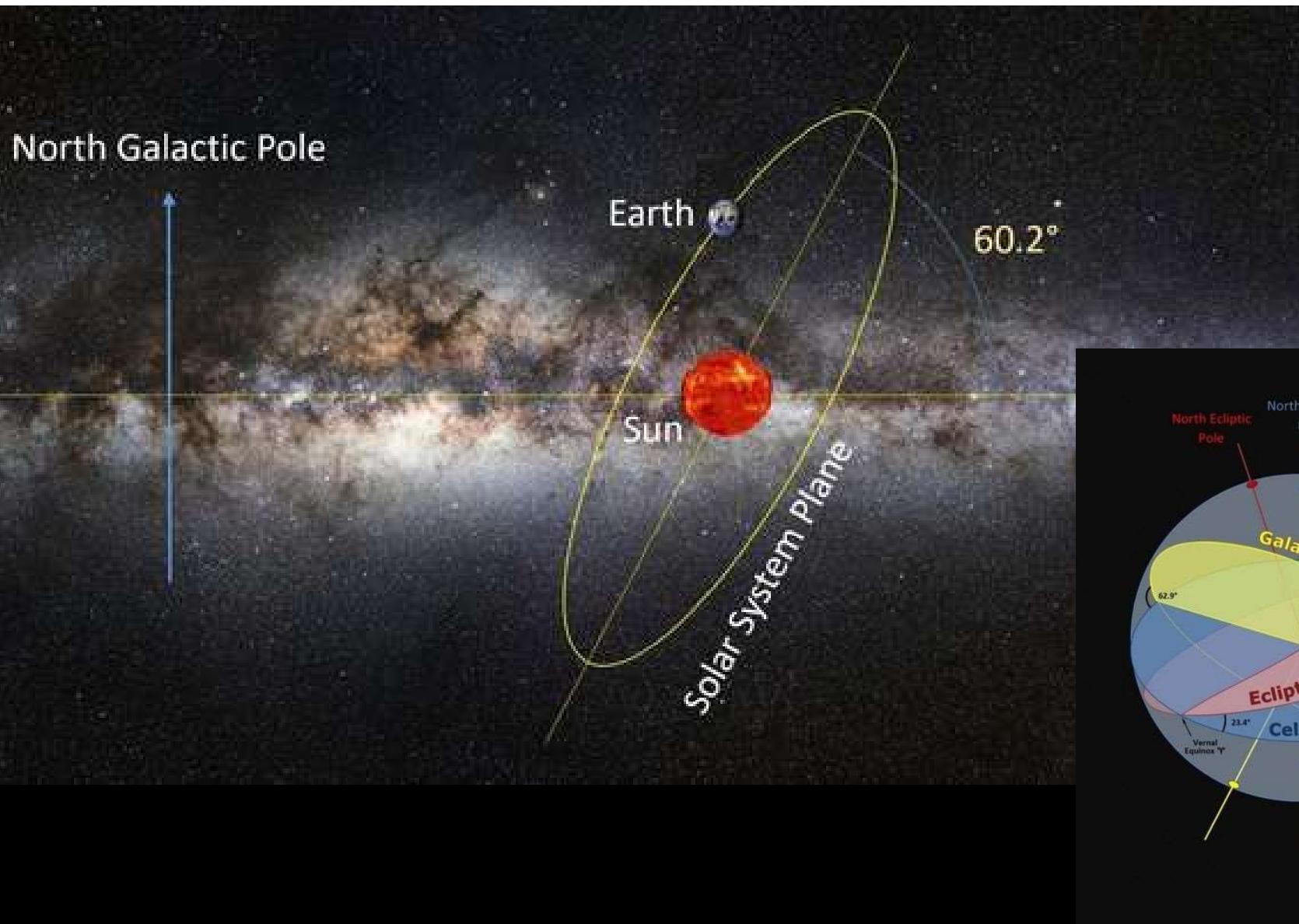
(¡en toda su vida el Sol no ha
completado todavía 25 vueltas!
Edad del Sol: ~5 Ga)





Simulación de 2.5 “vueltas” del Sol alrededor del Centro Galáctico. La frecuencia epicíclica fue tomada como 1.3 veces la frecuencia circular, pero el epiciclo mismo fue hecho circular (y no elíptico, con razón axial 0.65, como debería haber sido).

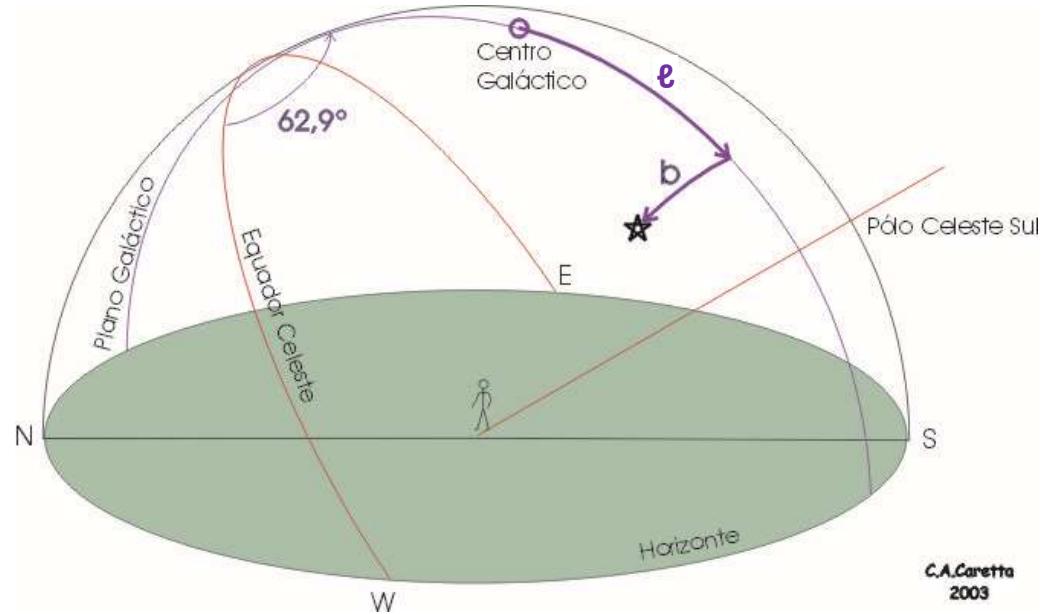




Sistema de Coordenadas Galácticas

Si estamos interesados en escalas mayores que nuestro Sistema Solar (por ejemplo objetos que son parte de nuestra Galaxia), utilizamos el **Sistema de Coordinadas Galácticas**. En ese sistema, el plano de simetría es, naturalmente, el **plano promedio de la Vía-Láctea**, y los respectivos polos son llamados **Polos Galácticos**.

Podemos definir, por supuesto, dos sistemas dependiendo si ponemos el **origen** en el **Sol** o en el **Centro Galáctico**. El primer caso tiene, como coordenadas angulares, la **longitud Galáctica (ℓ)**, medida sobre el círculo máximo del Plano Galáctico, y la **latitud Galáctica (b)**, perpendicular a la anterior. La referencia para la medición de las longitudes Galácticas (punto cero) es el Centro Galáctico[#], ubicado en la constelación de *Sagittarius* ($\alpha = 17^{\text{h}} 45^{\text{min}} 40.04^{\text{s}}$, $\delta = -29^{\circ} 00' 28"$, J2000.0).



[#] Hasta 1958 se utilizaba otra referencia como punto cero: la intersección entre el Plano Galáctico y el Ecuador Celeste. En un inicio, para distinguir los dos sistemas, se utilizaban las siguientes coordinadas: ℓ^I , b^I (para el sistema viejo) y ℓ^{II} , b^{II} para el sistema nuevo.

Transformación de coordenadas

Para esa transformación se utilizan las coordenadas del **Polo Galáctico N**:

$$\alpha_p = 12^h 51.4^m \text{ (J2000.0)}$$

$$\delta_p = 27^\circ 08' \text{ (J2000.0)}$$

y las coordenadas Galácticas del **Polo Celeste N** son:

$$\ell_N = 123^\circ$$

$$b_N = 28^\circ$$

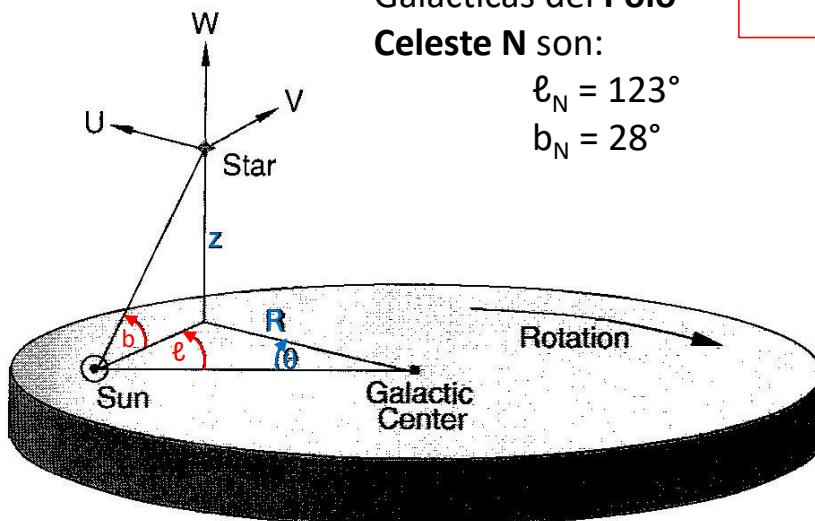
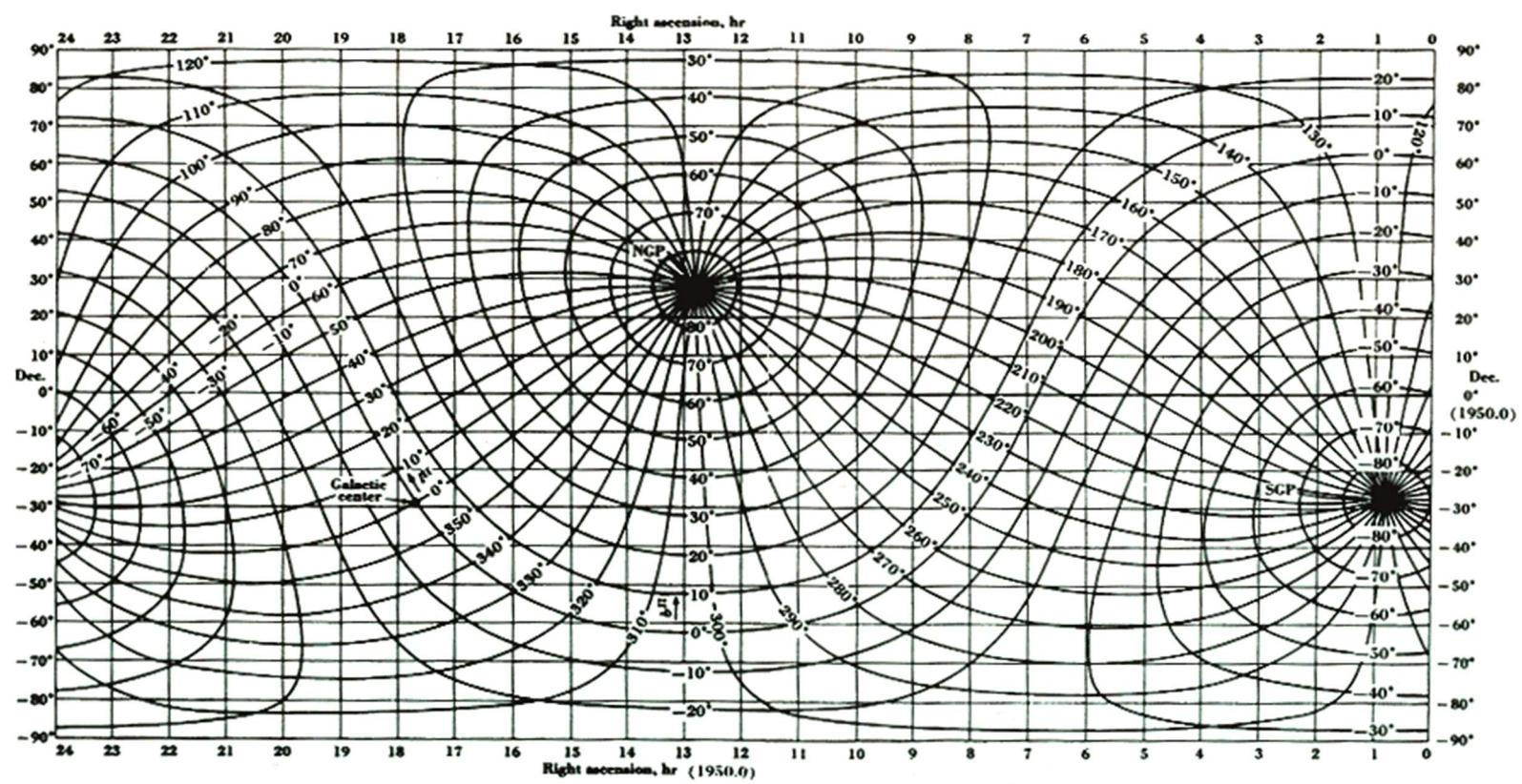
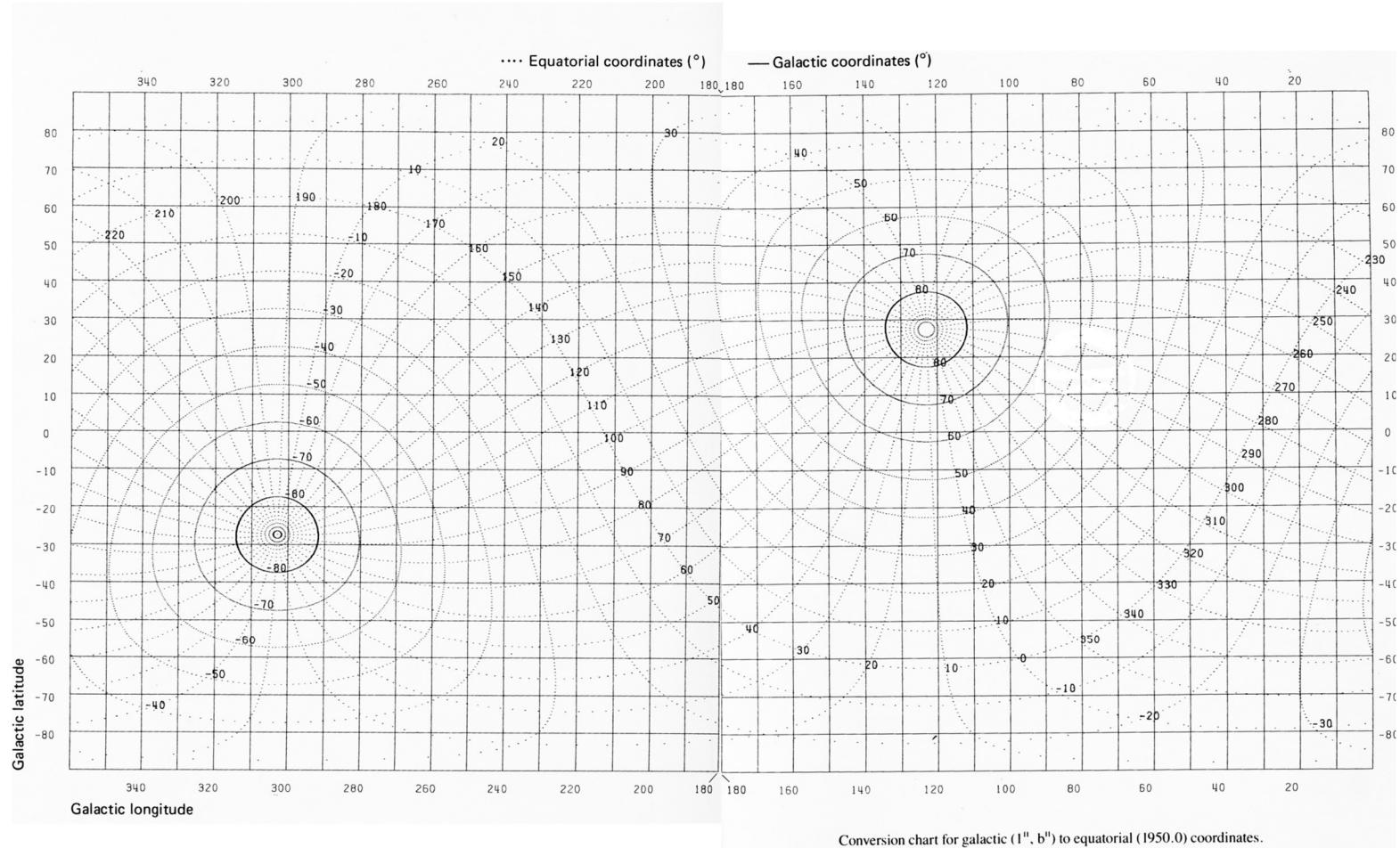


Fig. 2.13. Cylindrical coordinate system (R, θ, z) with the Galactic center at its origin. Note that θ increases in the clockwise direction if the disk is viewed from above. The corresponding velocity components (U, V, W) of a star are indicated

$$\begin{aligned} \sin(l_N - l) \cos b &= \cos \delta \sin(\alpha - \alpha_p), \\ \cos(l_N - l) \cos b &= -\cos \delta \sin \delta_p \cos(\alpha - \alpha_p) \\ &\quad + \sin \delta \cos \delta_p, \\ \sin b &= \cos \delta \cos \delta_p \cos(\alpha - \alpha_p) \\ &\quad + \sin \delta \sin \delta_p, \end{aligned}$$

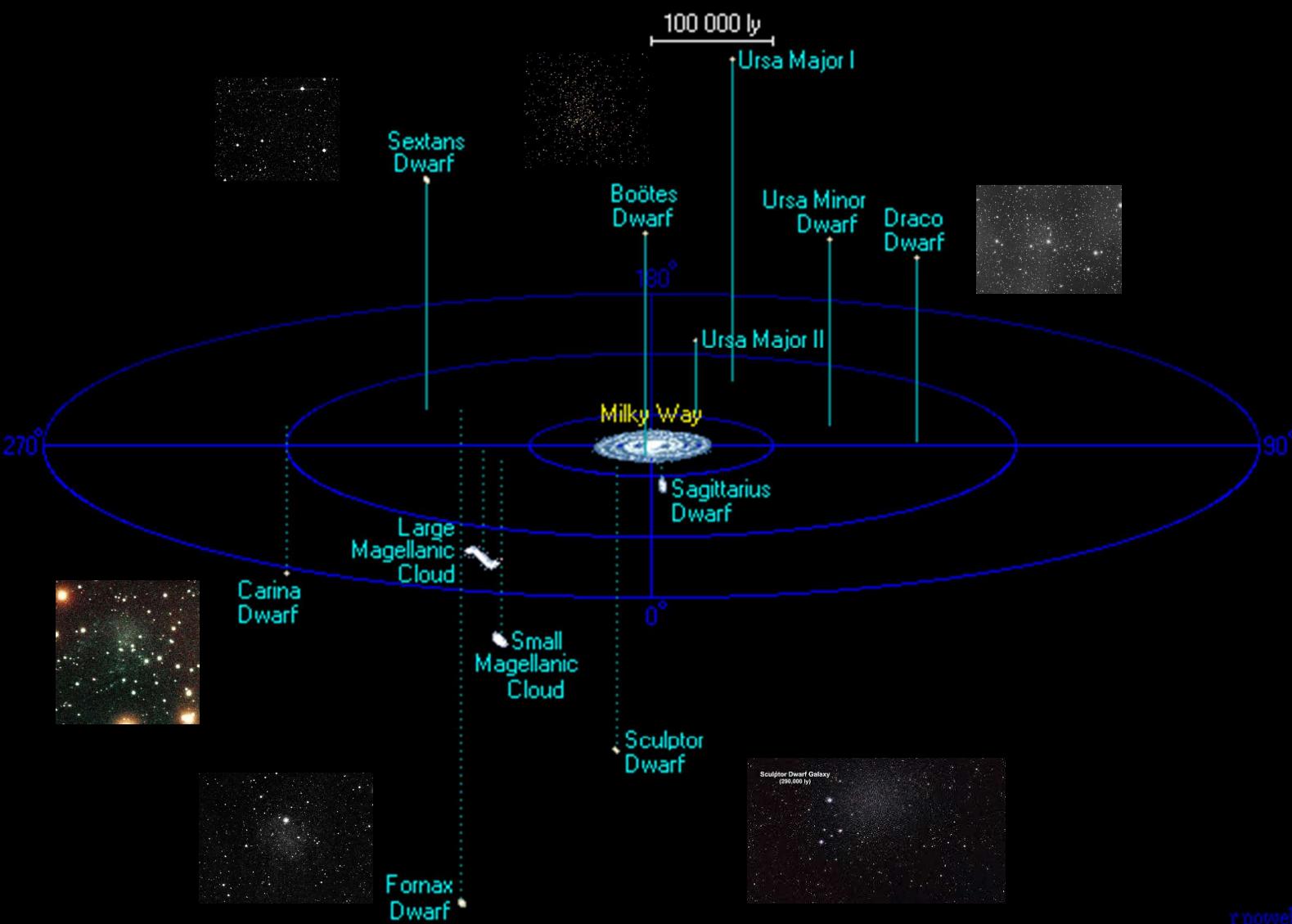
El segundo caso, como dicho, utiliza el Centro Galáctico como **origen**. La otra diferencia es que no es un sistema esférico, pero **cilíndrico** (motivado por la geometría de la Vía-Láctea). Las coordenadas son, entonces: **R**, **θ** y **z** (respectivamente **radial**, **azimutal** y **vertical**), con puntos cero respectivamente en el **Centro Galáctico**, la **dirección del Sol** y el **Plano Galáctico**.





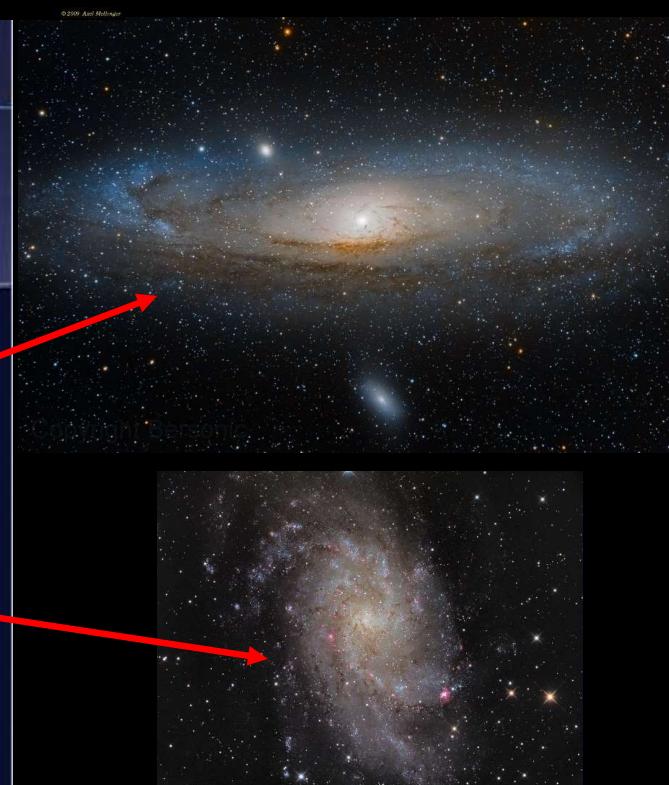
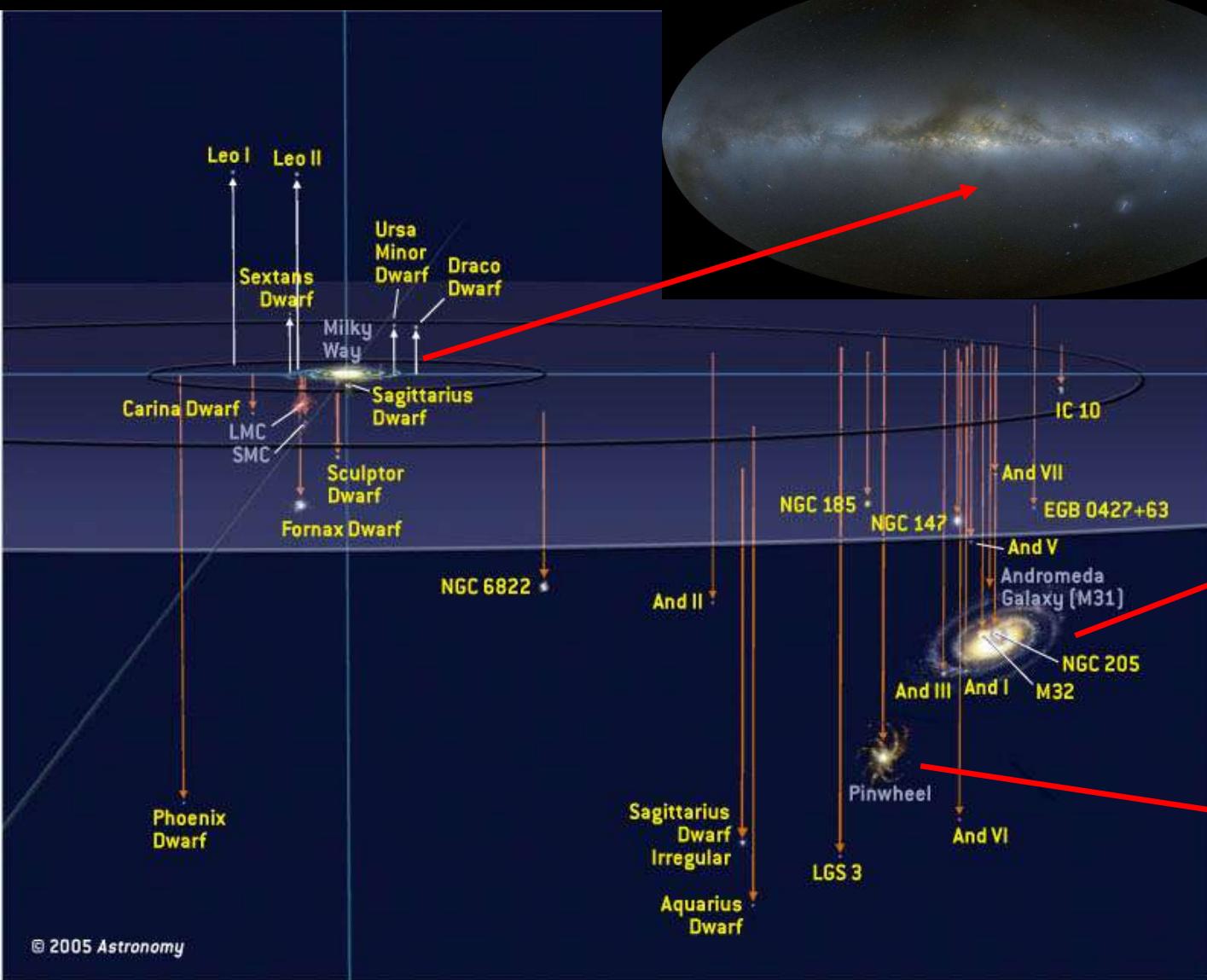
Sistema de Coordinadas Súper-Galácticas

VIDEO

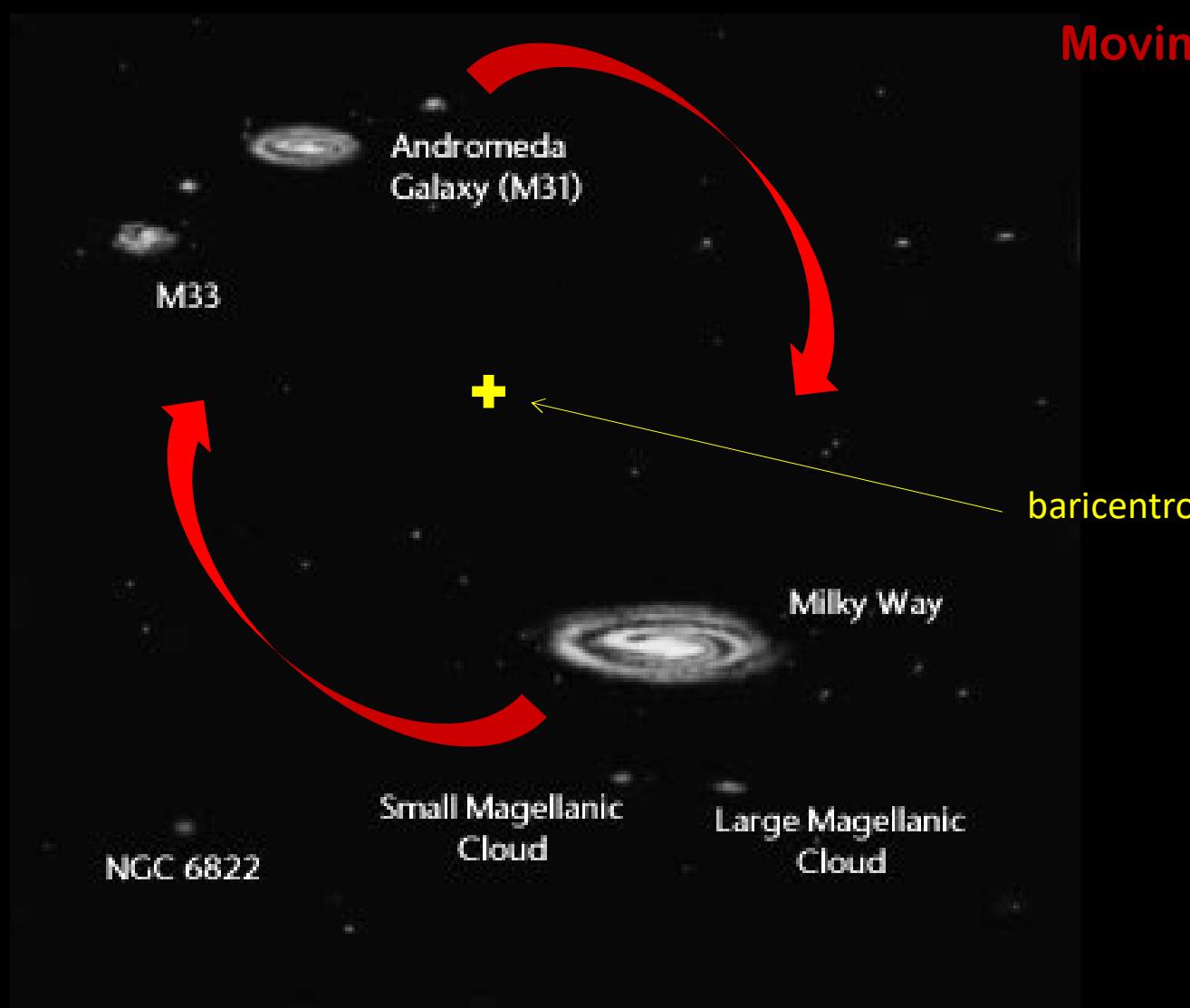


rpowell

EL Grupo Local de Galaxias

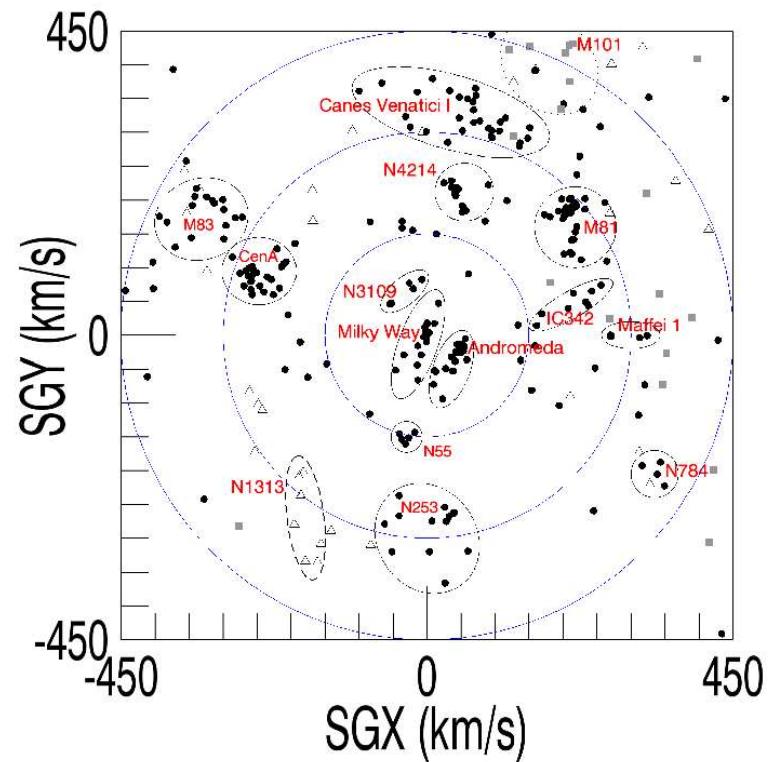
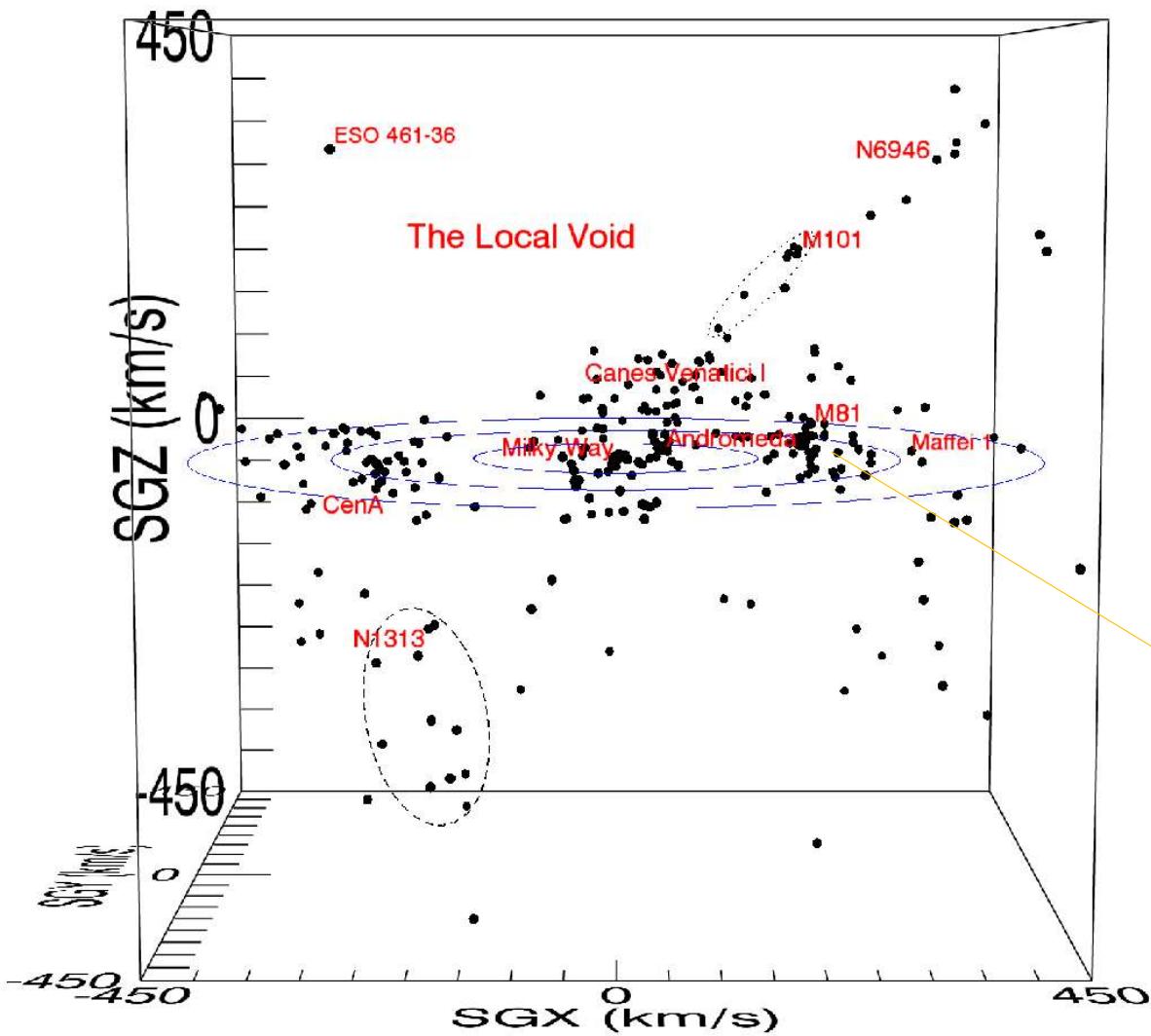


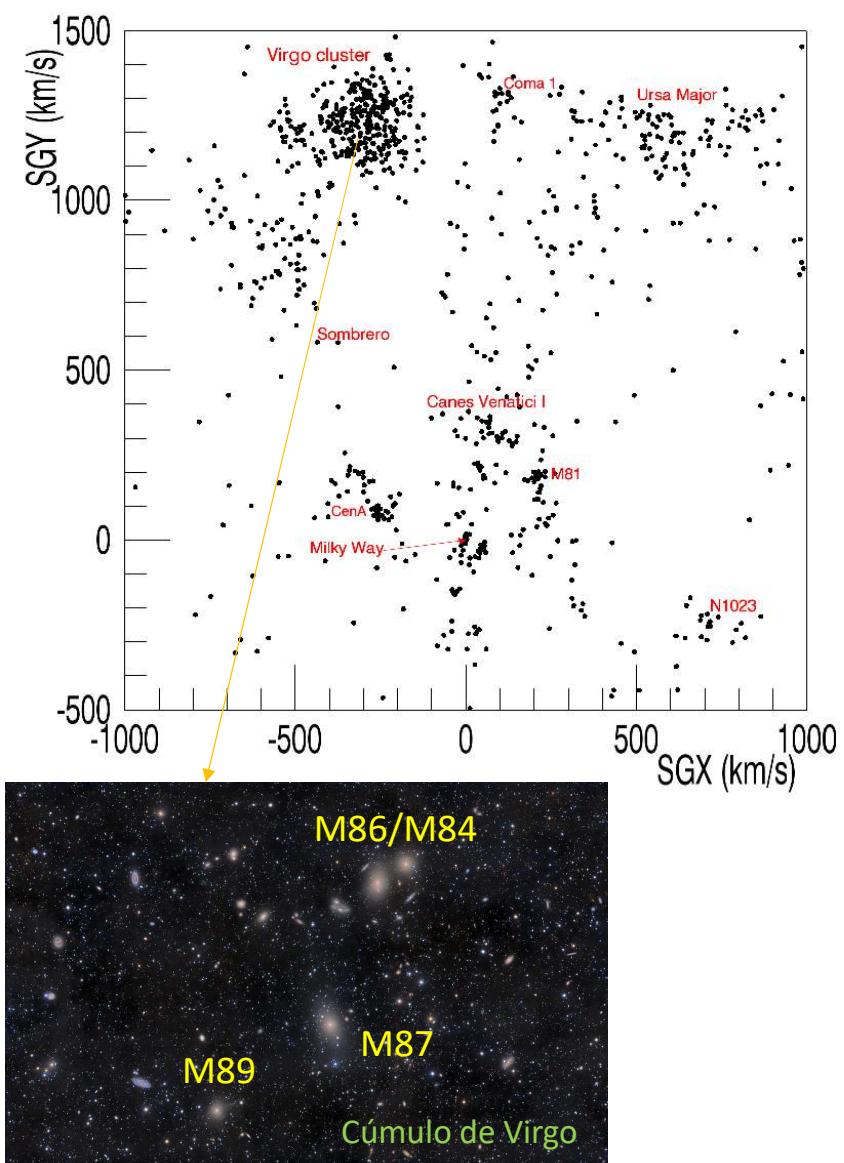
Movimiento de la Vía-Láctea (4)



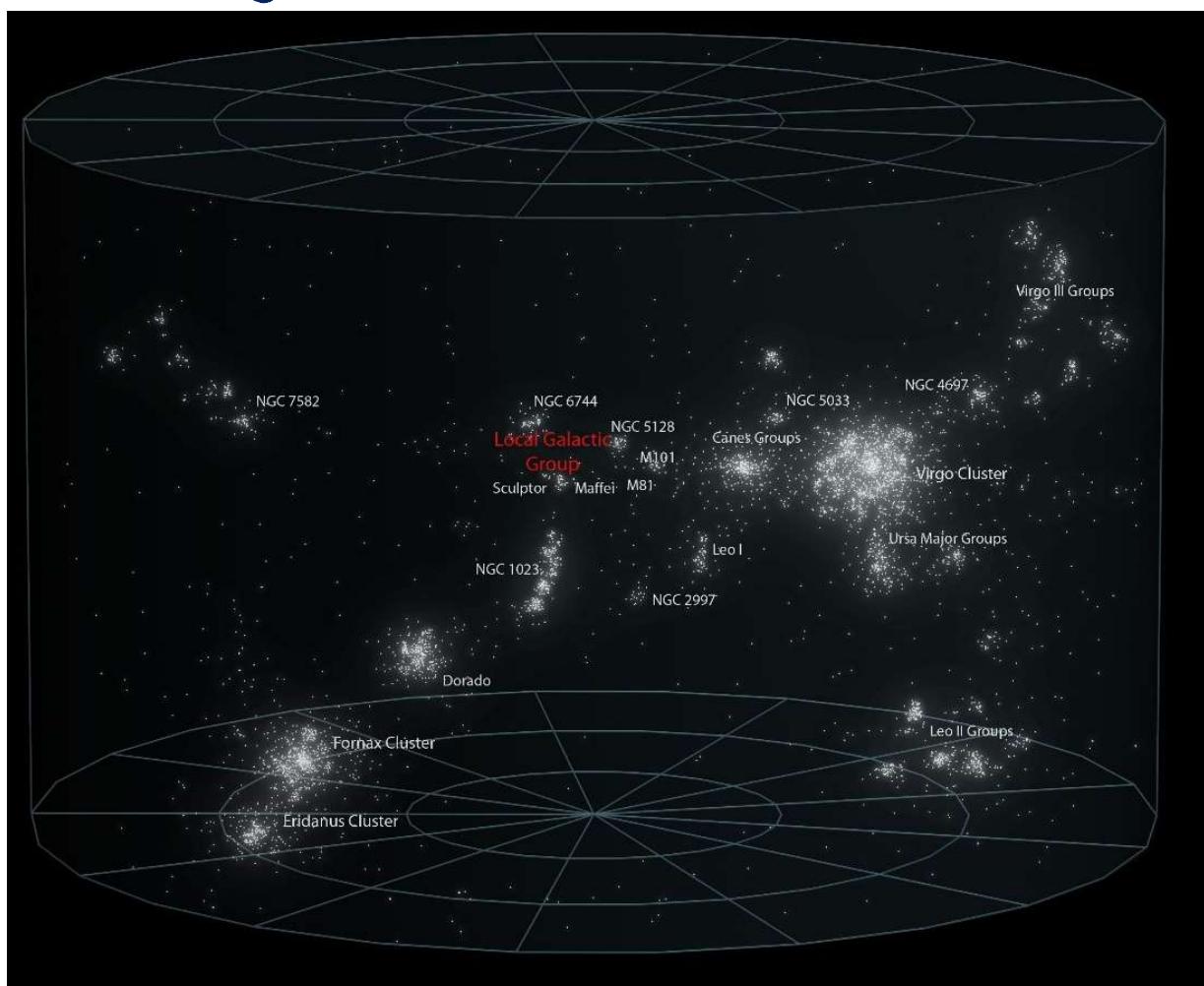
Velocidad radial:
 $v_{\text{los}} = -432\,000 \text{ km/h}$
(120 km/s)

La vecindad del Grupo Local

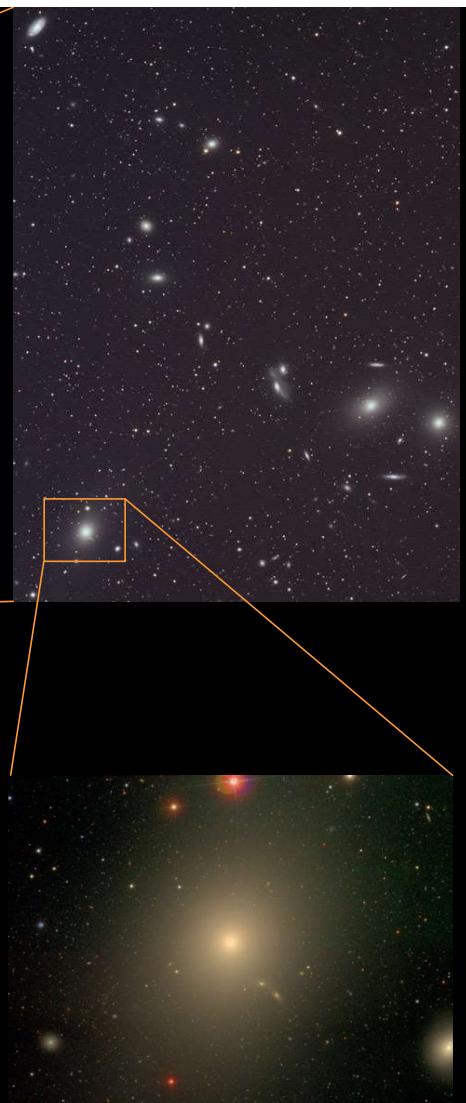
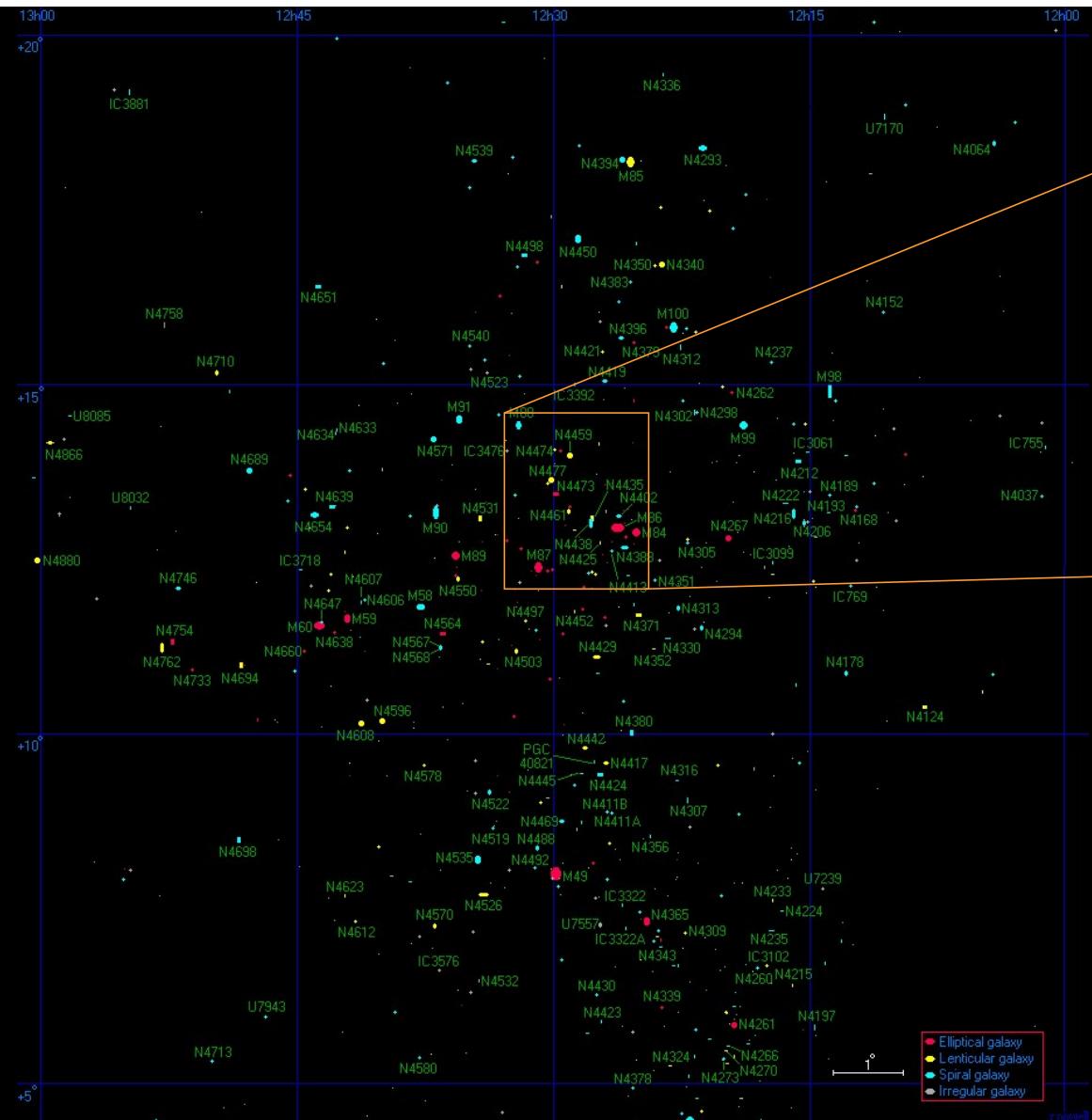


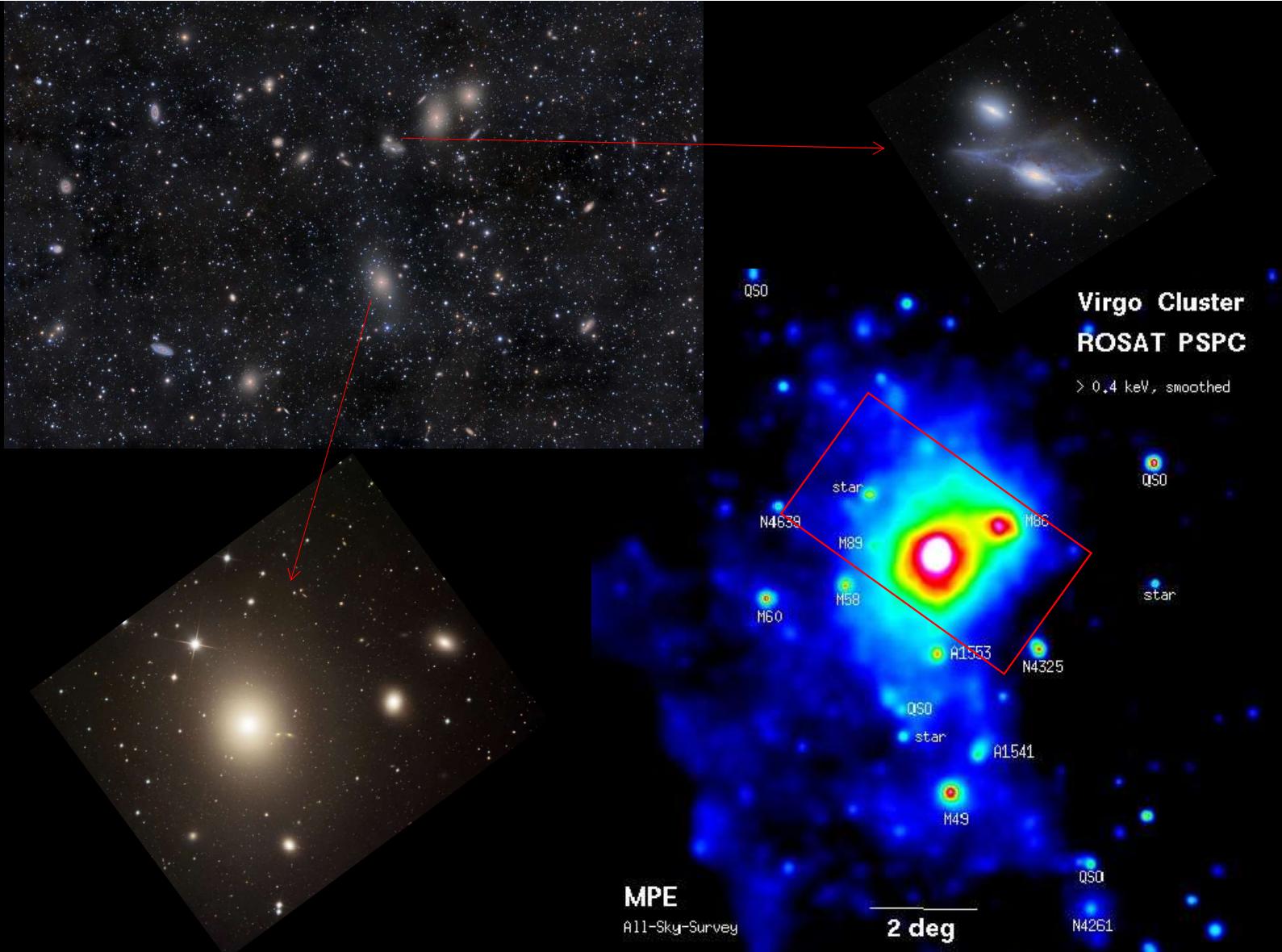


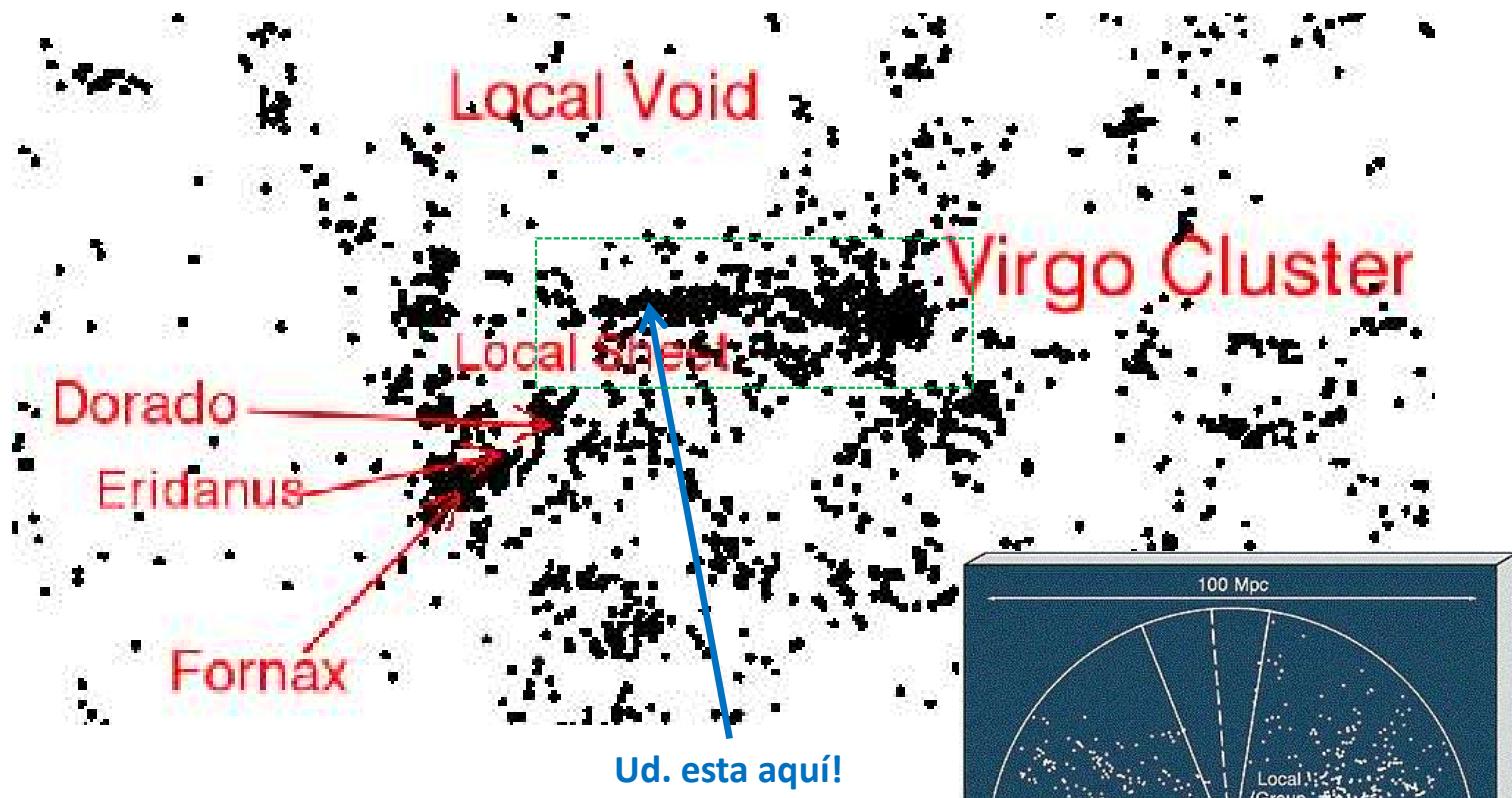
El Supercúmulo Local (Virgo) y el Supercúmulo del Sur



El Cúmulo de Virgo





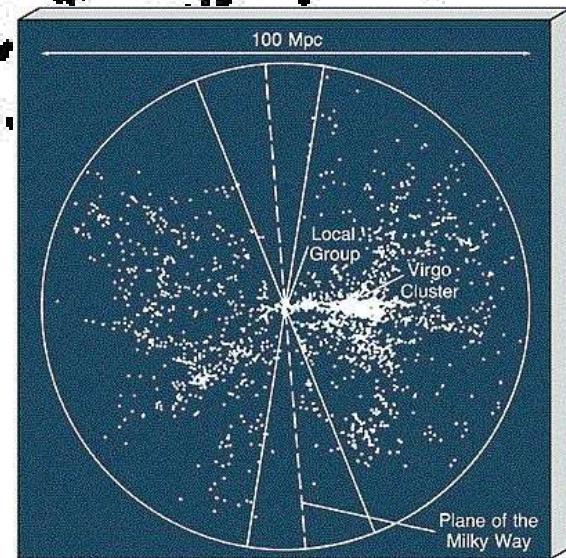


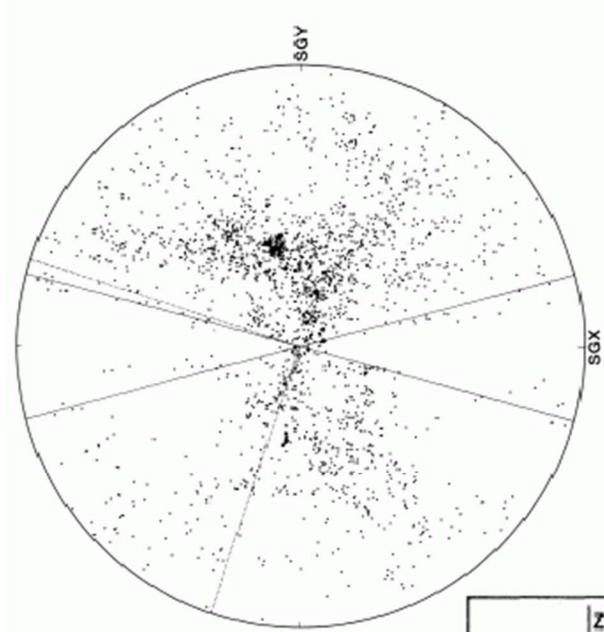
De canto nuevamente (YZ)

Movimiento del Grupo Local (5)

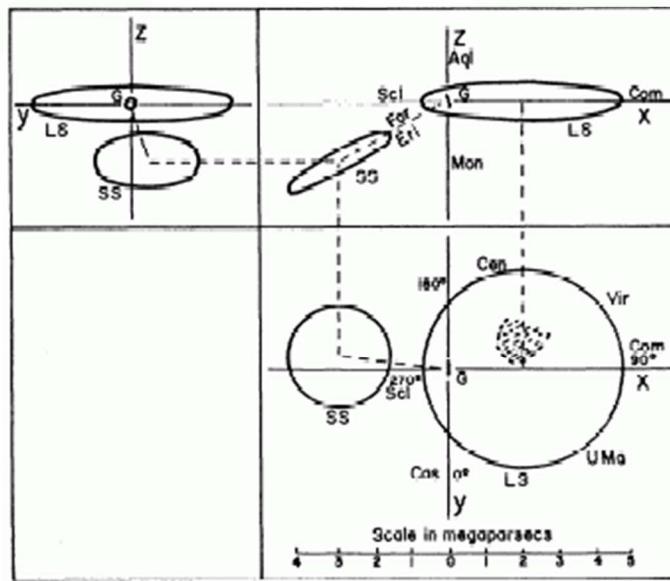
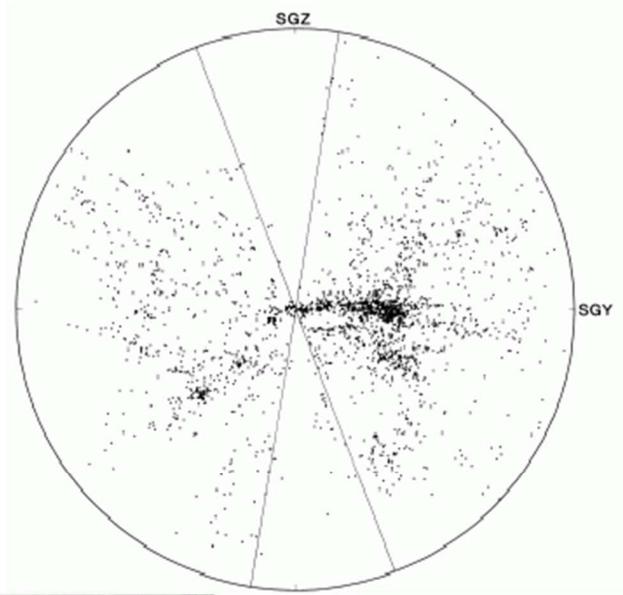
$$V_{\text{Virgo}} = 666\,000 \text{ km/h}$$

(185 km/s)

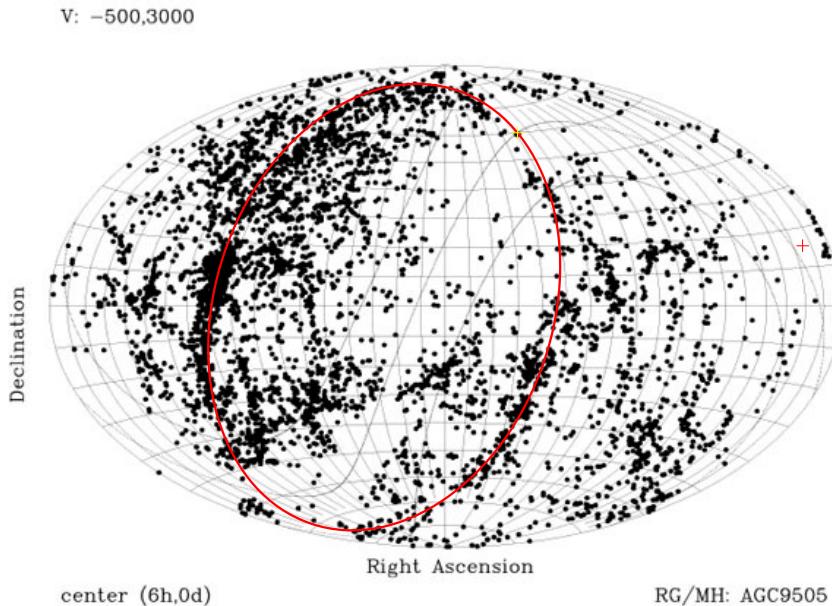




Tully, B. 1982,
ApJ 257, 389.



de Vaucouleurs, G. 1953,
AJ 58, 30.



Coordinadas Ecuatoriales (galaxias HI)

Salzer & Haynes 1996,
ASPC 106, 357.

Polo Supergaláctico N:

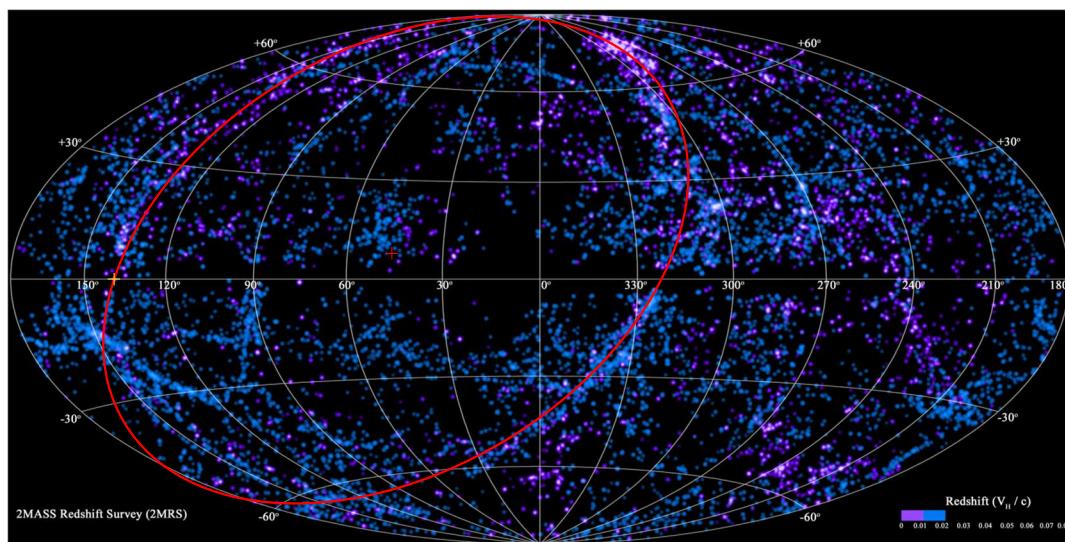
$$\alpha_{SGP} = 18.9^{\text{h}} \text{ (J2000.0)}$$

$$\delta_{SGP} = +15.7^\circ \text{ (J2000.0)}$$

Punto cero (SGL = 0):

$$\alpha_0 = 2.82^h$$

$$\delta_0 = +59.5^\circ$$



Coordinadas Galácticas (2MASS RS)

Huchra, J. et al. 2012,
ApJS 199, 26.

Polo Supergaláctico N:

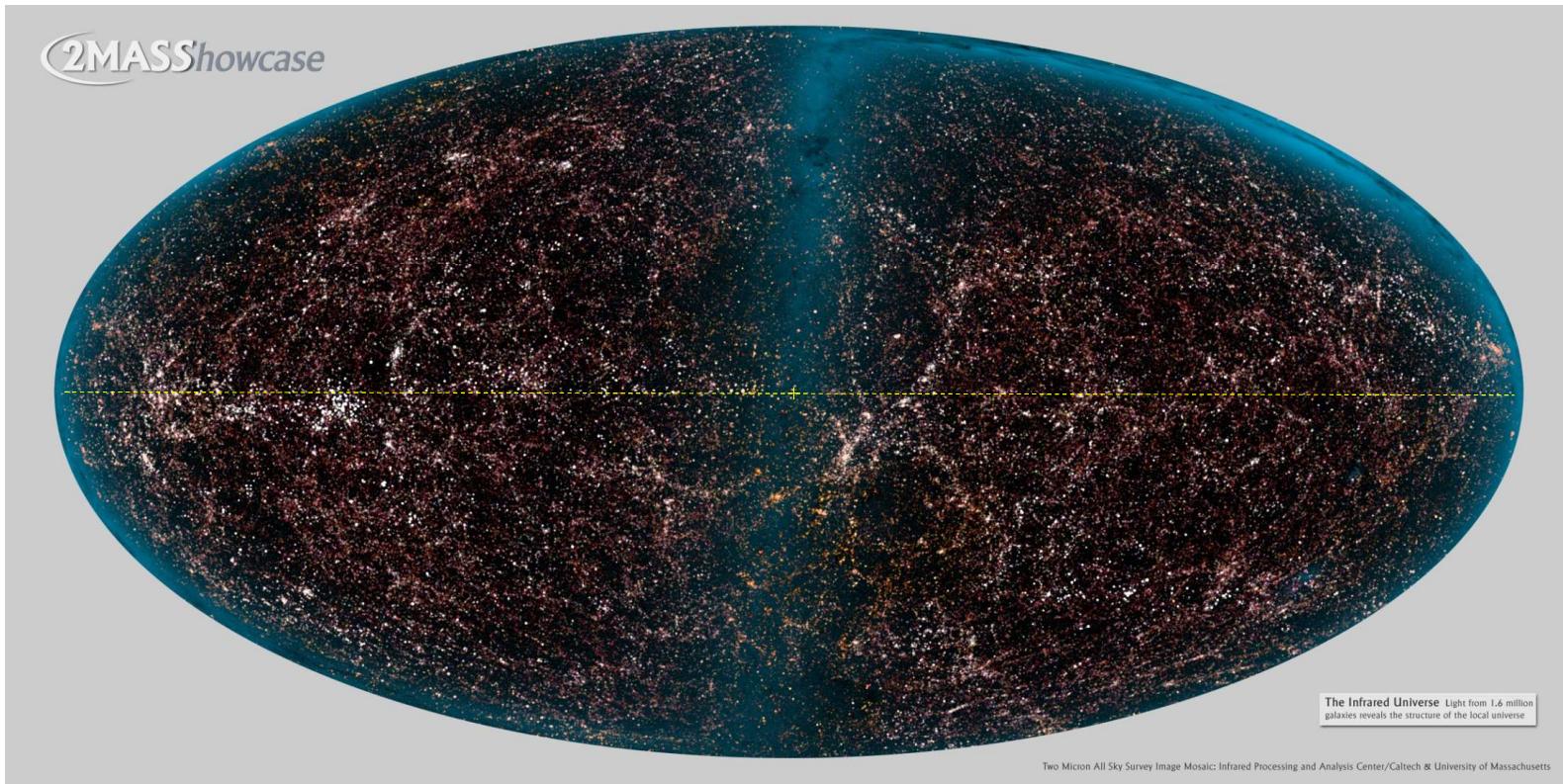
$$\ell_{SGP} = 47.37^\circ$$

$$b_{SGP} = +6.32^\circ$$

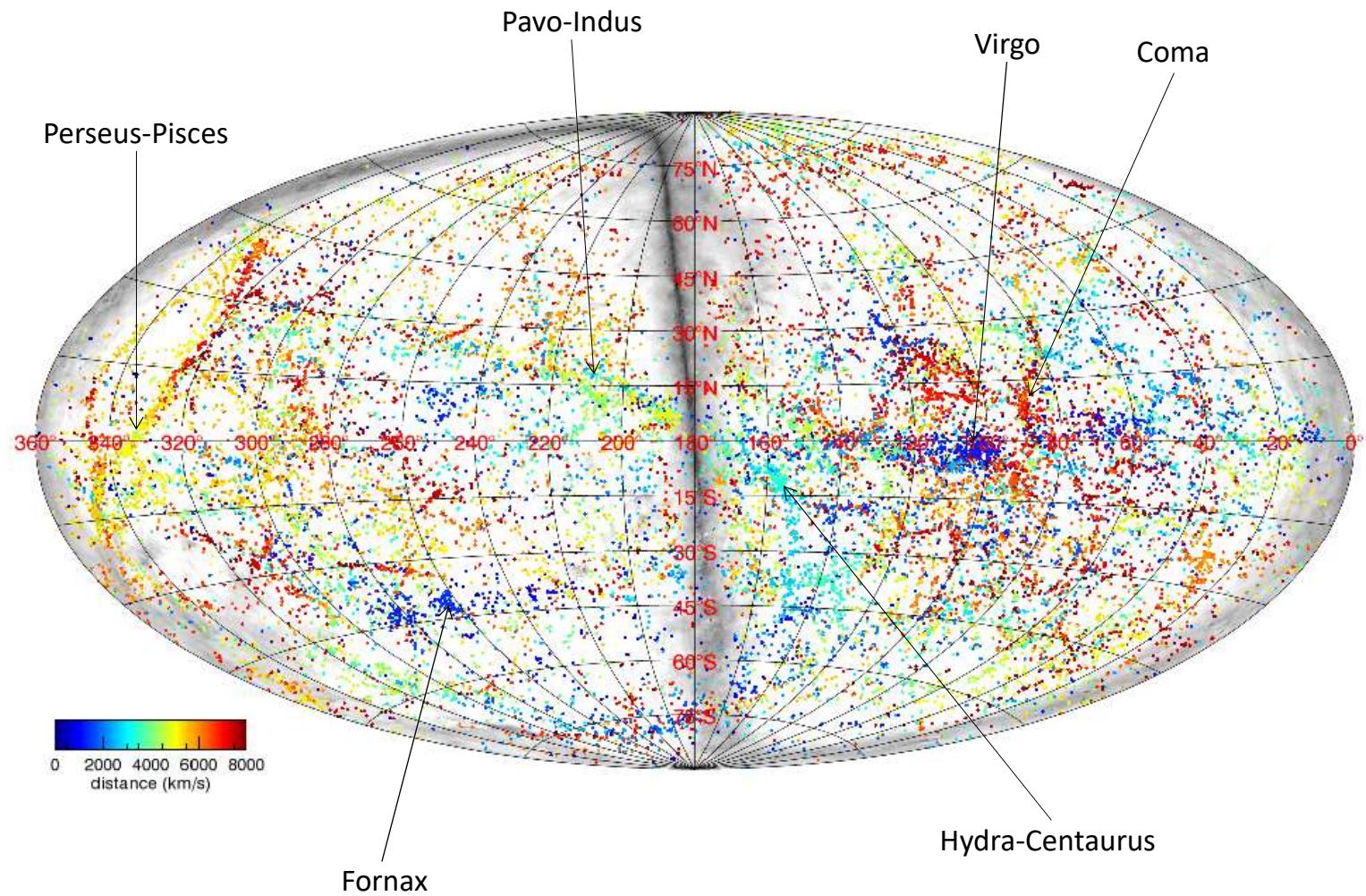
Punto cero (SGL = 0):

$$\ell_0 = 137.37^\circ$$

$$b_0 = 0^\circ$$



Es decir, el origen del Sistema de Coordinadas Supergalácticas es la **Vía-Láctea** y el plano de referencia es el **plano del Supercúmulo Local (LSC)**. Las coordinadas angulares en ese caso son: la **longitud supergaláctica (SGL)**, medida a lo largo del plano del LSC y empezando en el punto donde ese plano intercepta el plano de la Vía-Láctea, y la **latitud supergaláctica (SGB)**, medida perpendicularmente al plano del LSC. Nota que el plano del LSC es prácticamente perpendicular al plano del disco de la Vía-Láctea.



Coordinadas Supergalácticas Cartesianas

La transformación para un sistema cartesiano (rectangular), representado en este caso con **X**, **Y** y **Z** (mayúsculas), es hecha de forma sencilla, con las ecuaciones presentadas en el inicio de esa clase. Lo mas usual es partir de las Coordinadas Esféricas Ecuatoriales:

$$\begin{aligned} X &= r \cos \alpha \cos \delta \\ Y &= r \sin \alpha \cos \delta \\ Z &= r \sin \delta \end{aligned}$$

e.g. Chow-Martínez, M. 2014,
MNRAS 445, 4073.

donde r es la distancia comóvil (D_C):

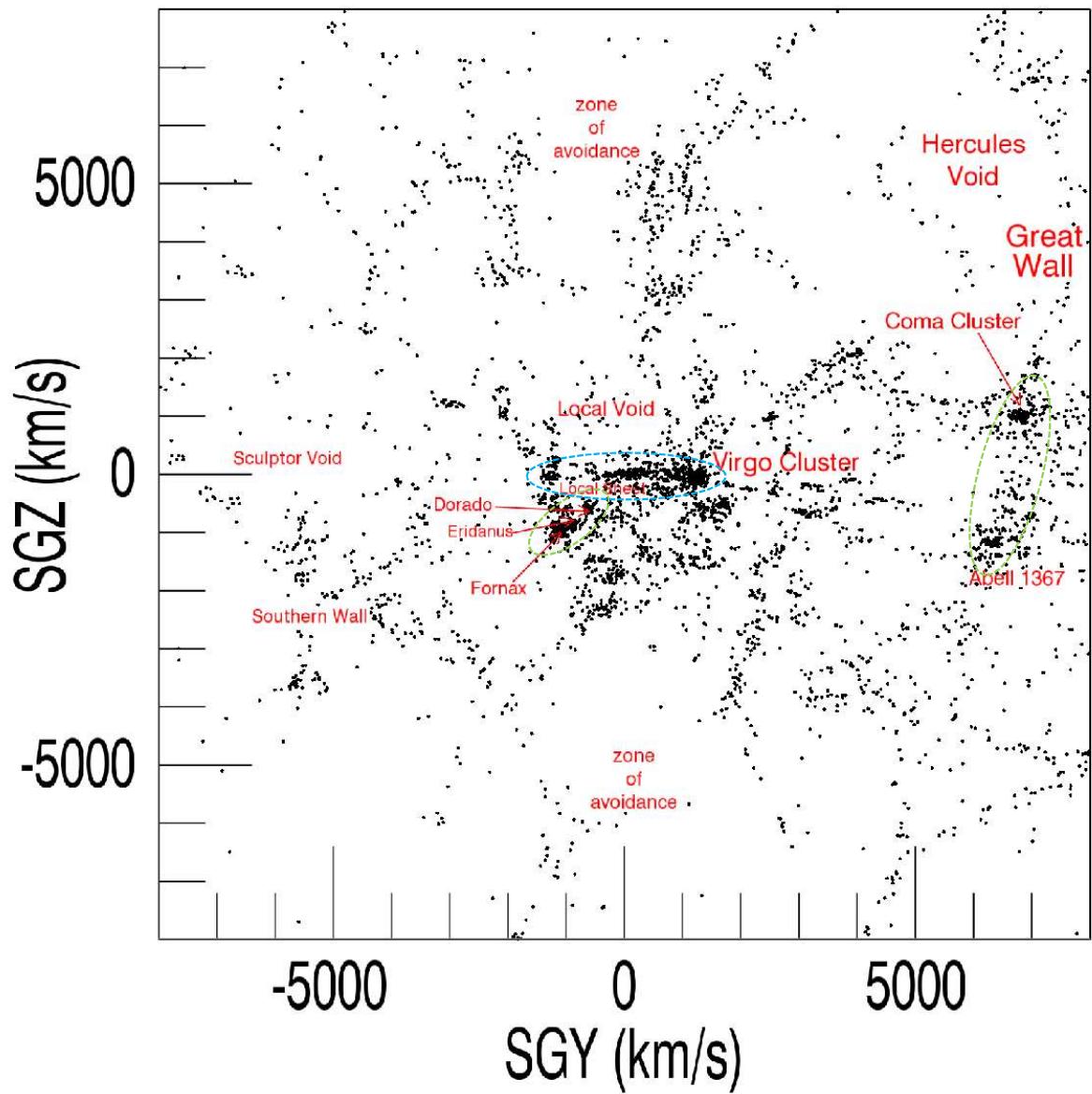
$$D_C = D_H \int_0^z \frac{dz'}{E(z')}$$

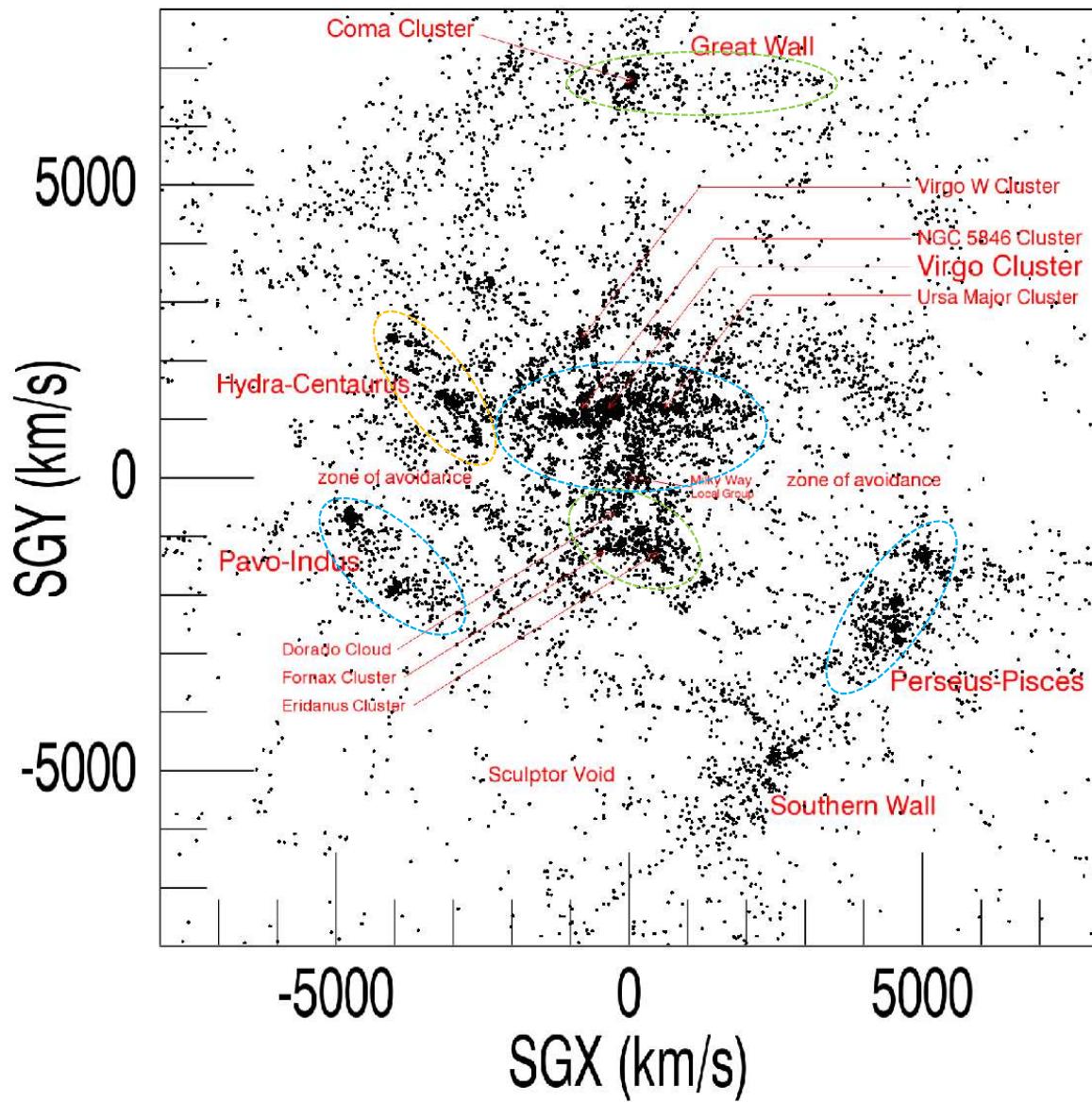
$$H(z) = H_0 E(z)$$

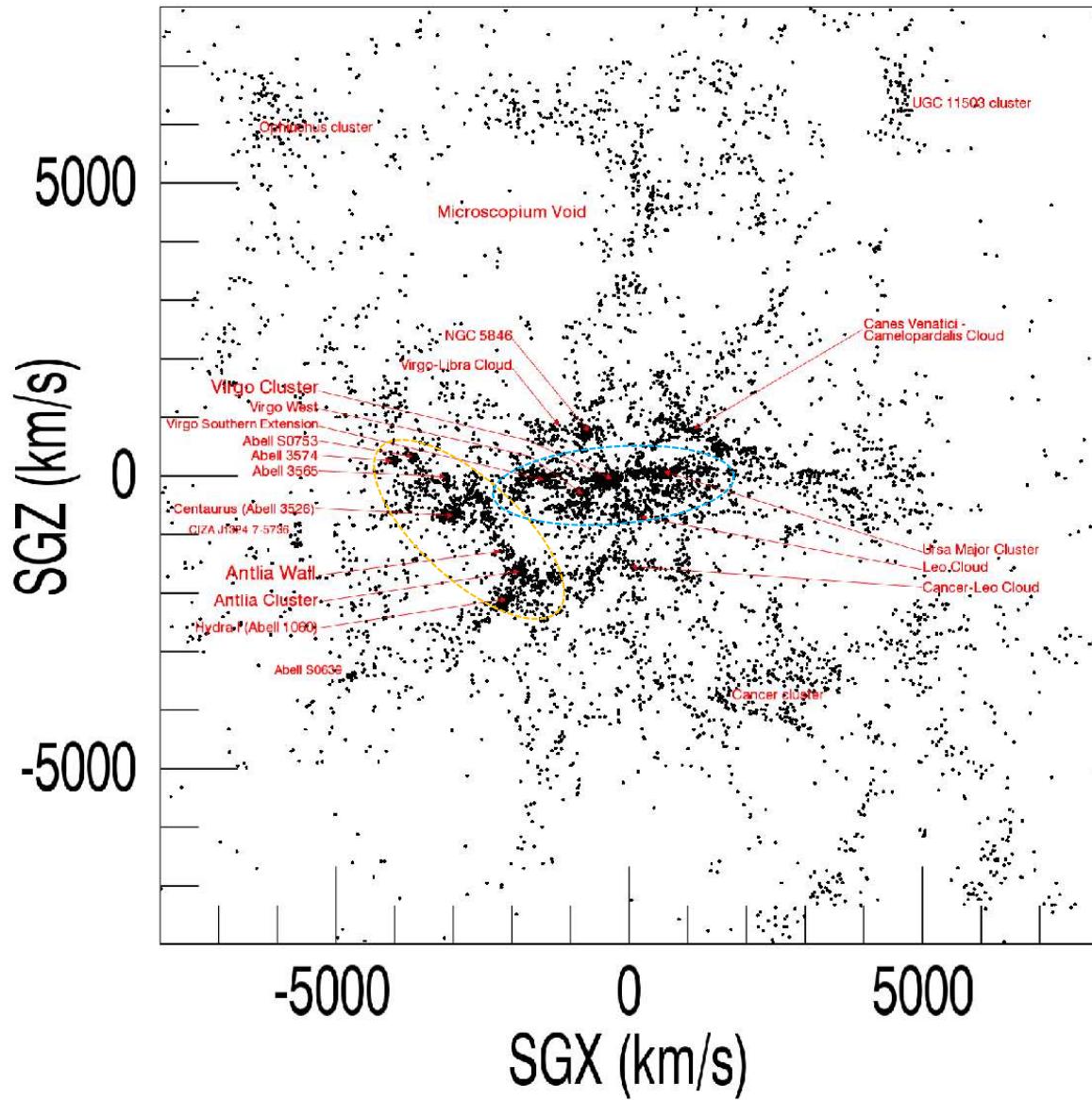
$$D_H = \frac{c}{H_0}$$

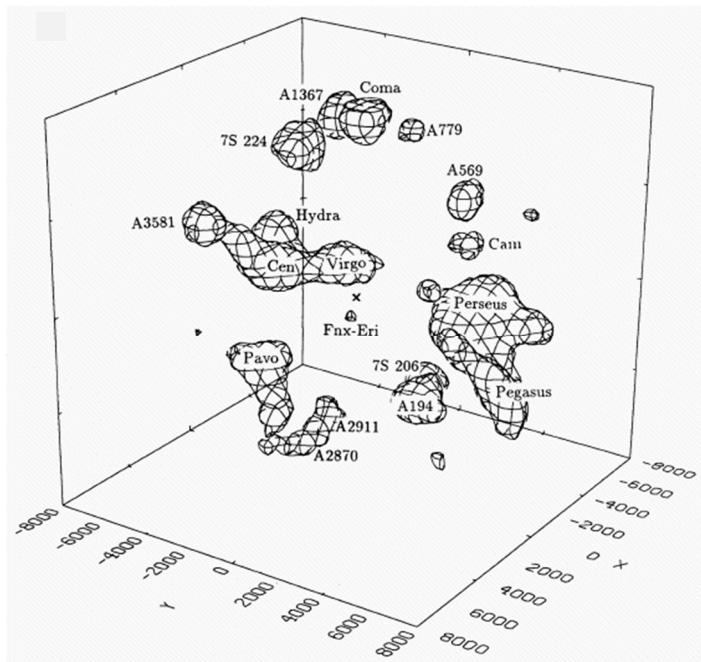
$$E(z) \equiv \sqrt{\Omega_r(1+z)^4 + \Omega_m(1+z)^3 + \Omega_k(1+z)^2 + \Omega_\Lambda}$$

Hogg, D. 2000, arXiv/astro-ph 9905116.

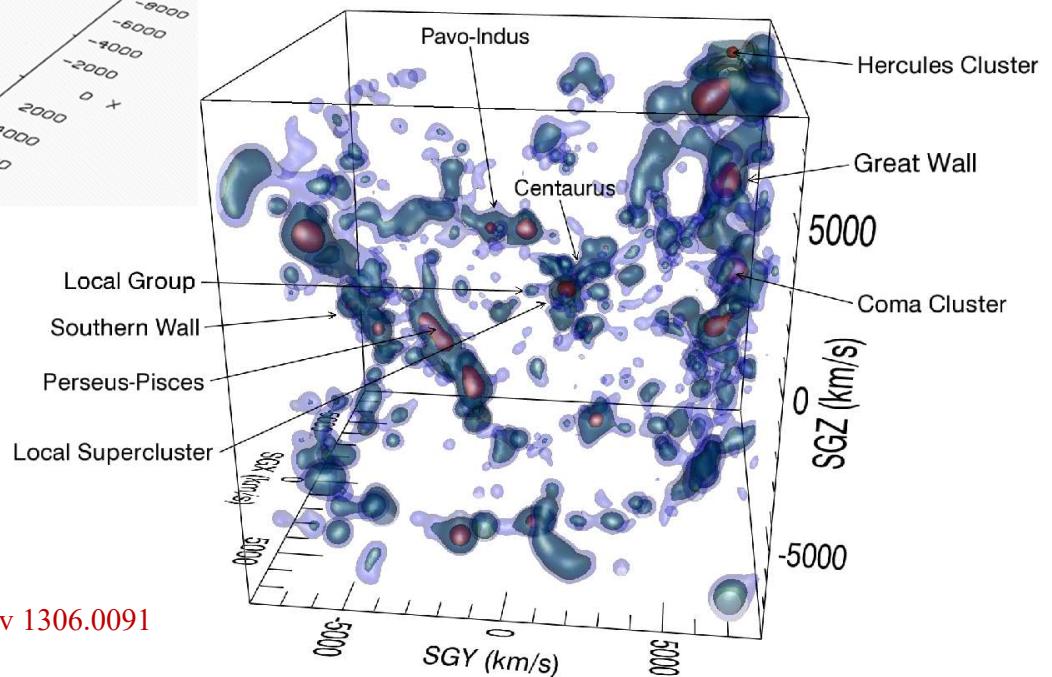








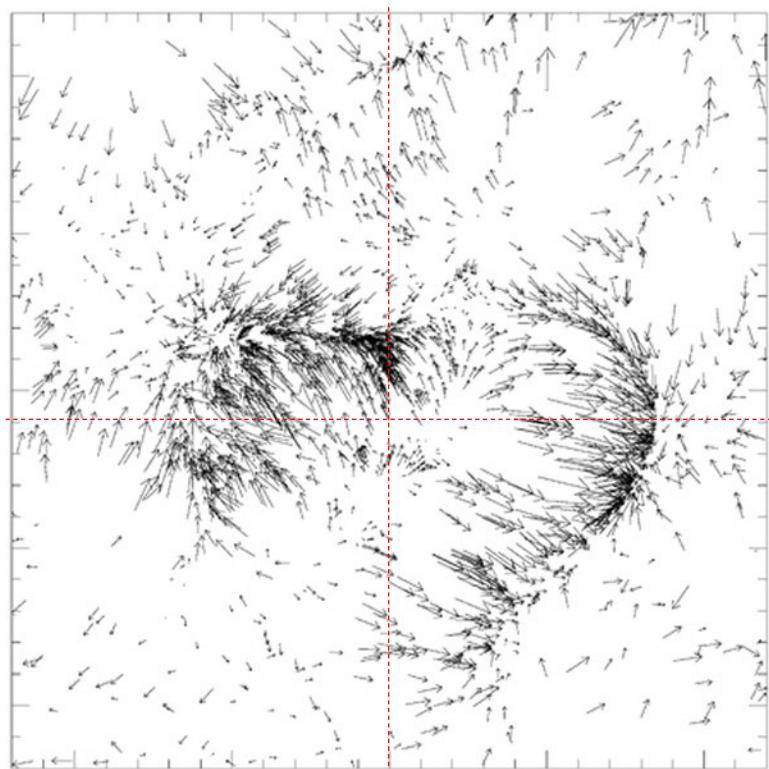
Hudson, M.J. 1993, MNRAS 265, 43



Courtois, H. et al. 2013, arXiv 1306.0091

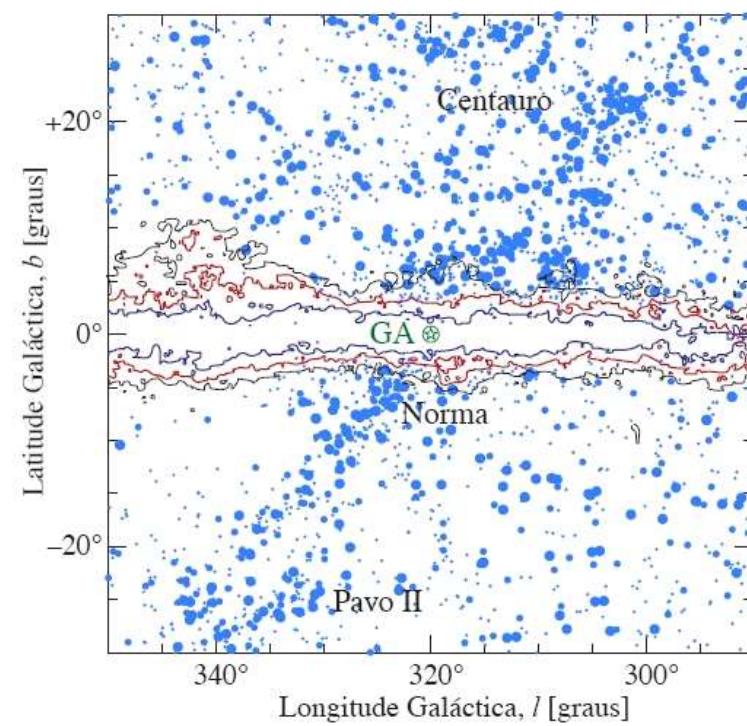
El Gran Atractor (6)

Bennett, J.O. et al.1999, *The Cosmic Perspective*,
Addison-Wesley-Longman

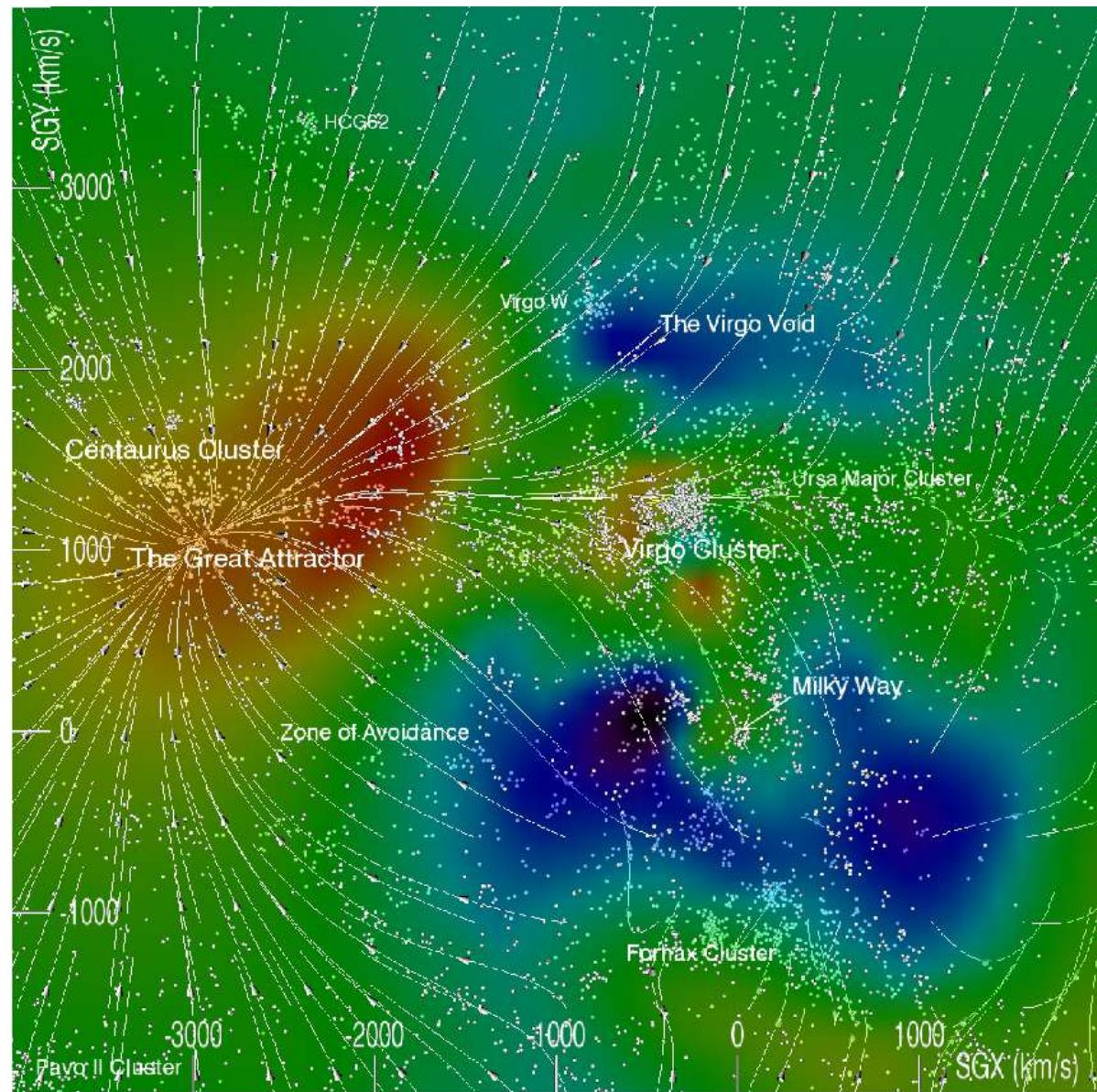


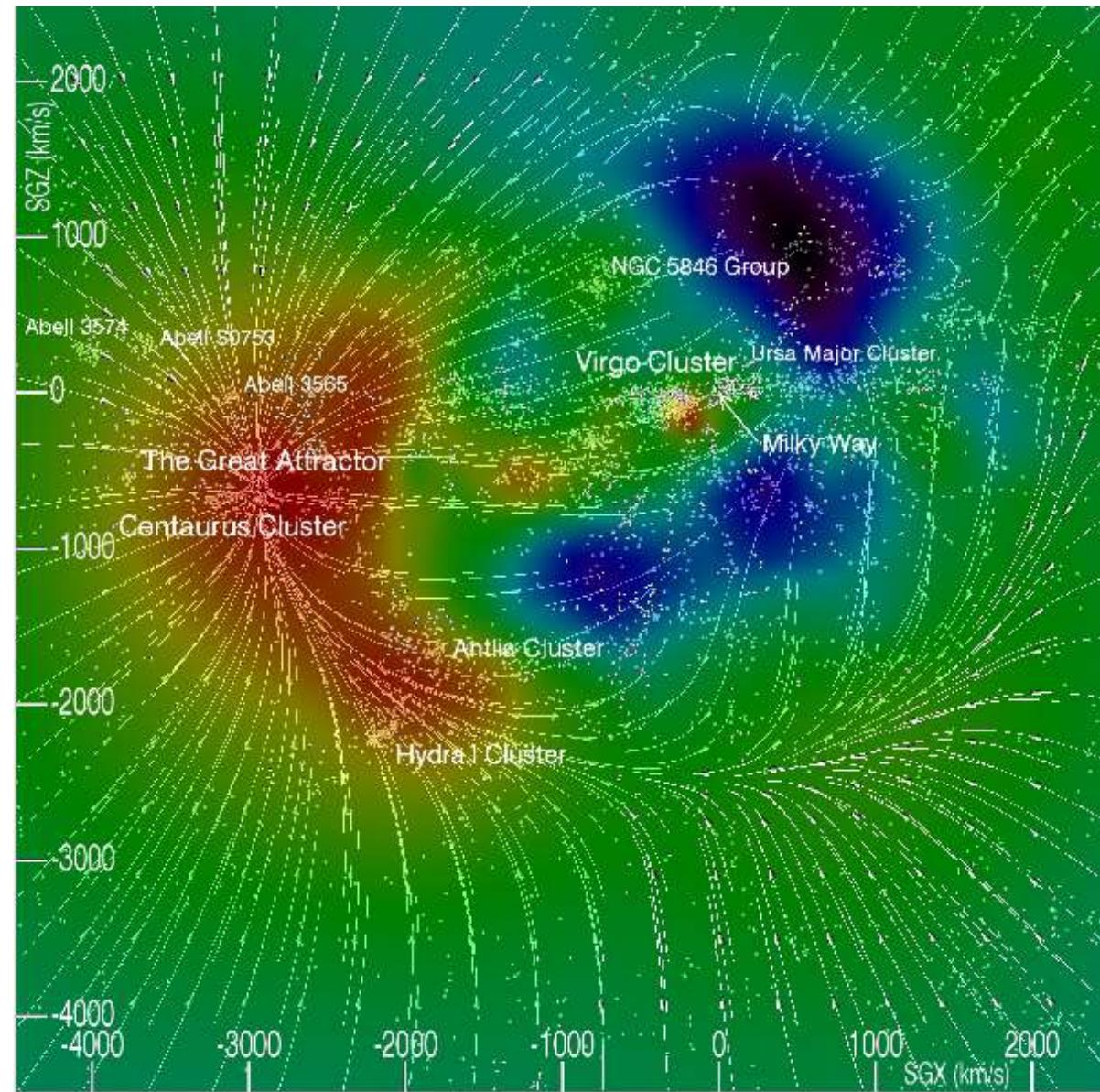
$$V_{GA} = 1\,638\,000 \text{ km/h}$$

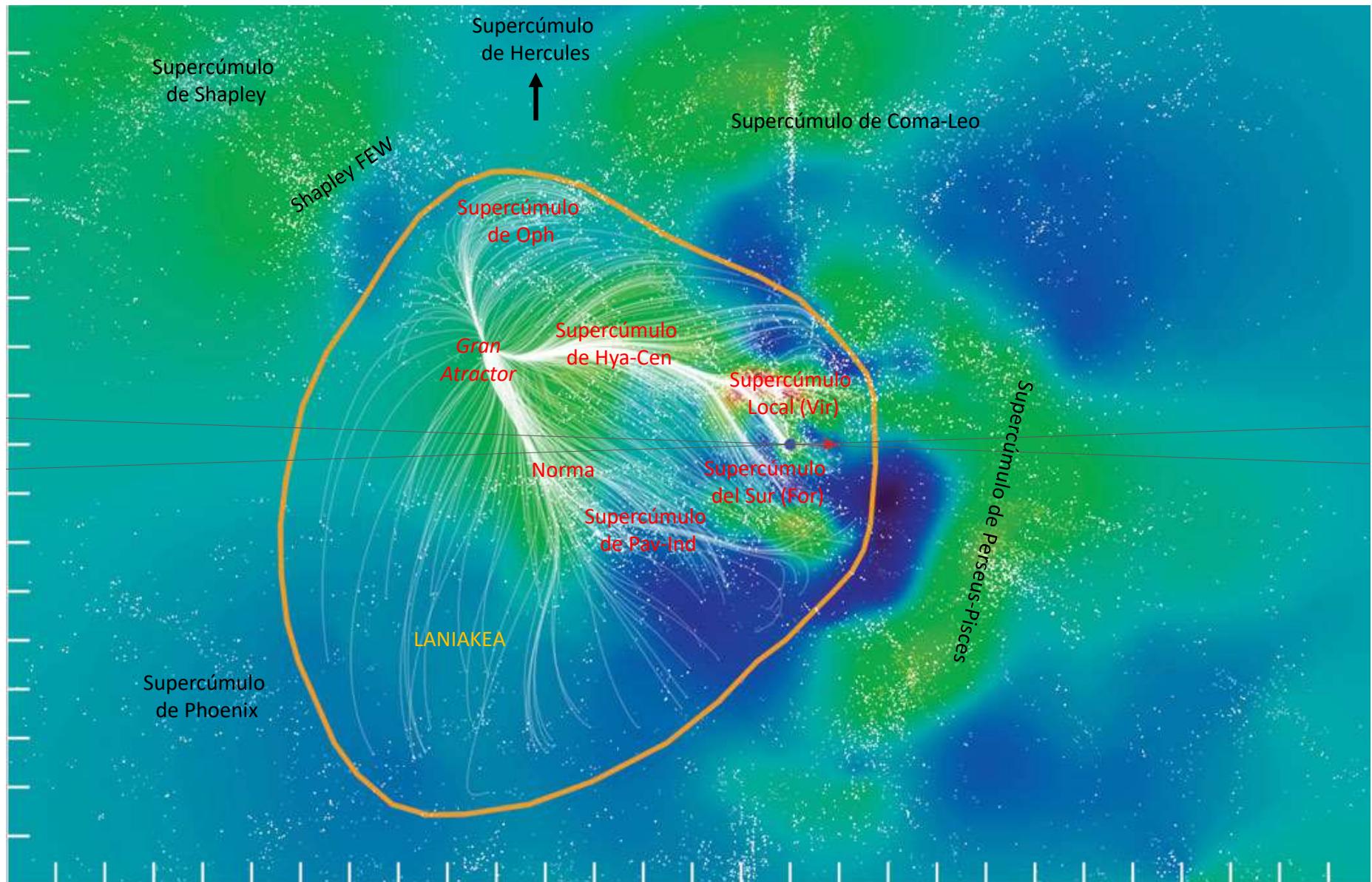
(455 km/s)

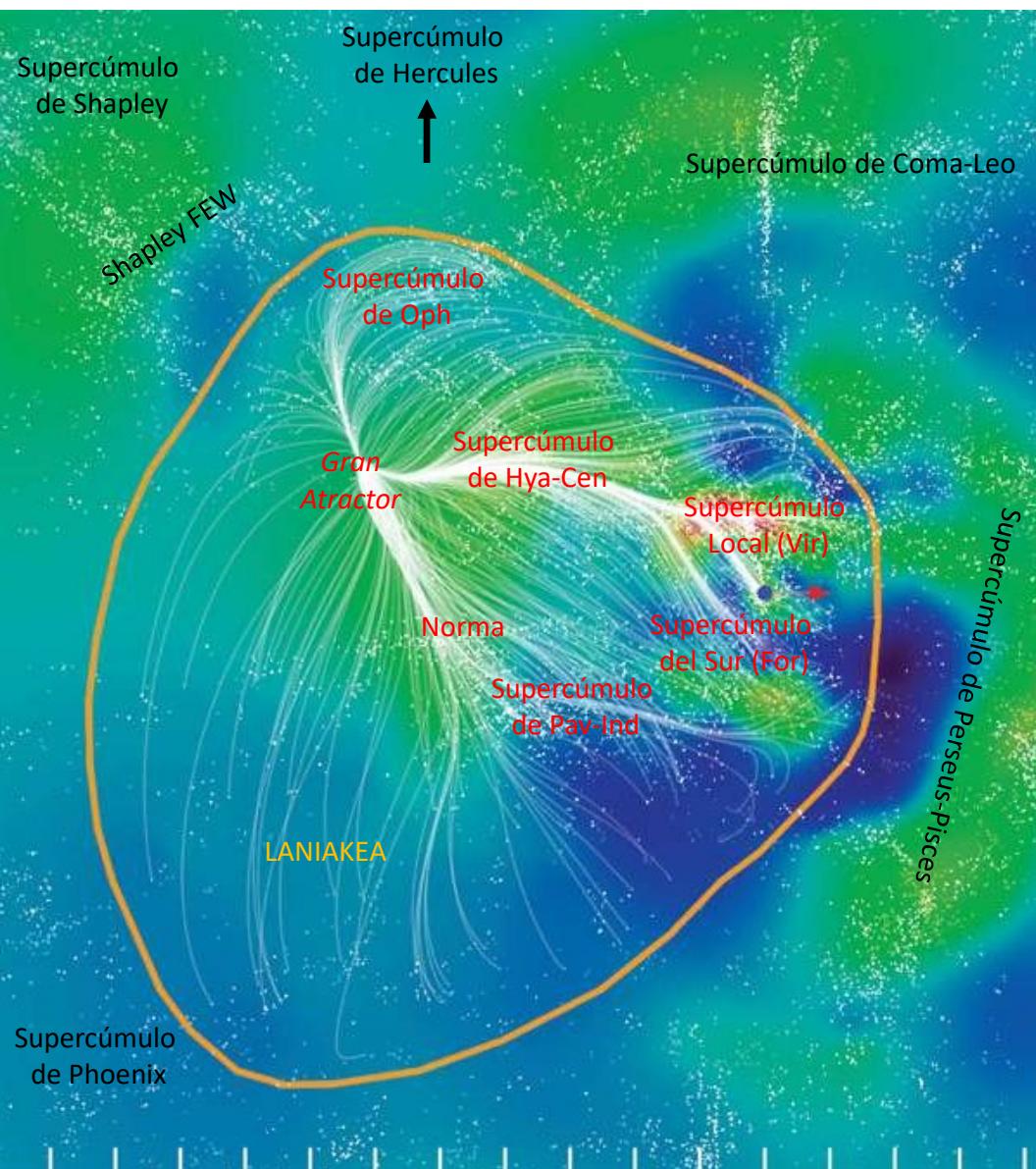


Woudt & Kraan-Korteweg 2001, A&A 380, 441

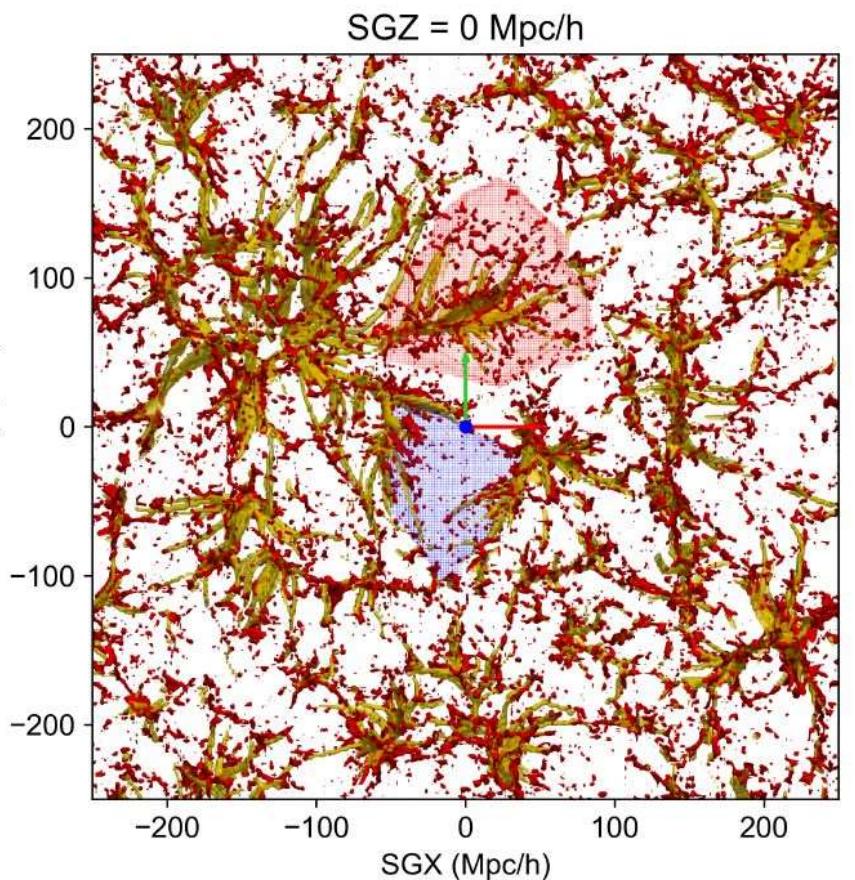








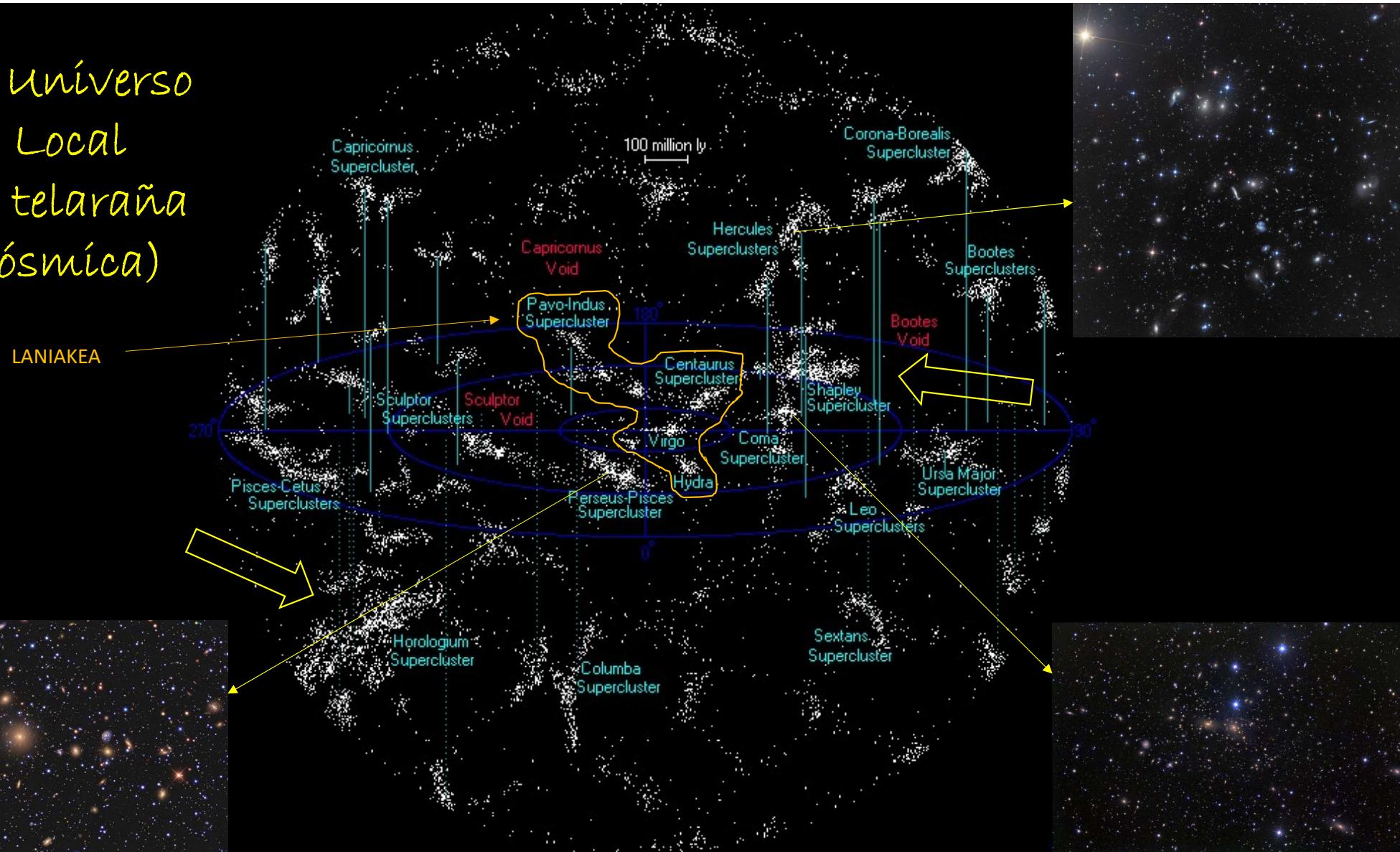
“Bases de atracción” (cocoons) y “bases de repulsión”



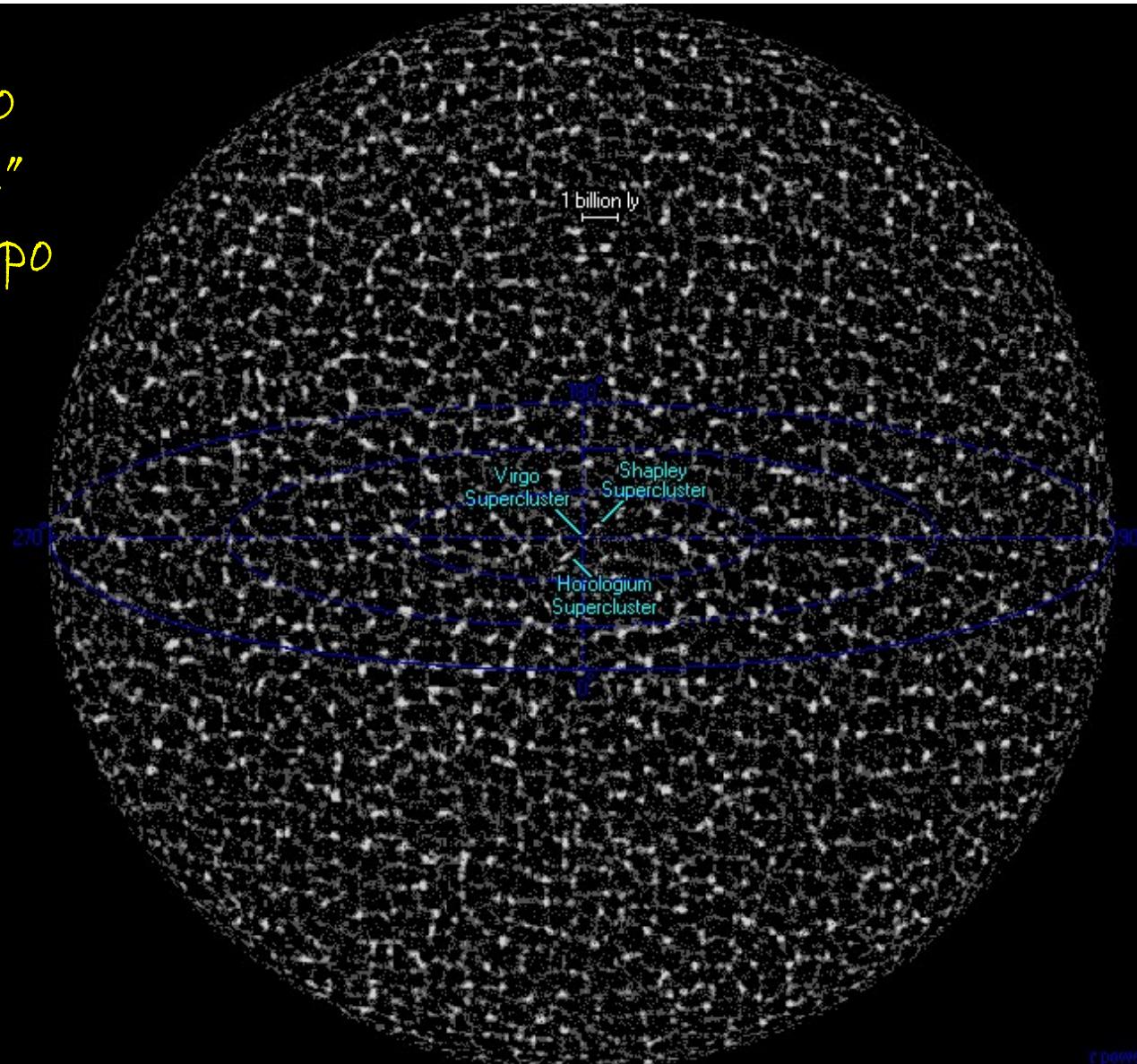
El Universo puede ser dividido en células (cocoons)

e.g. Dupuy et al. (2018), Einasto et al. (2019)

El Universo Local (La telaraña cósmica)

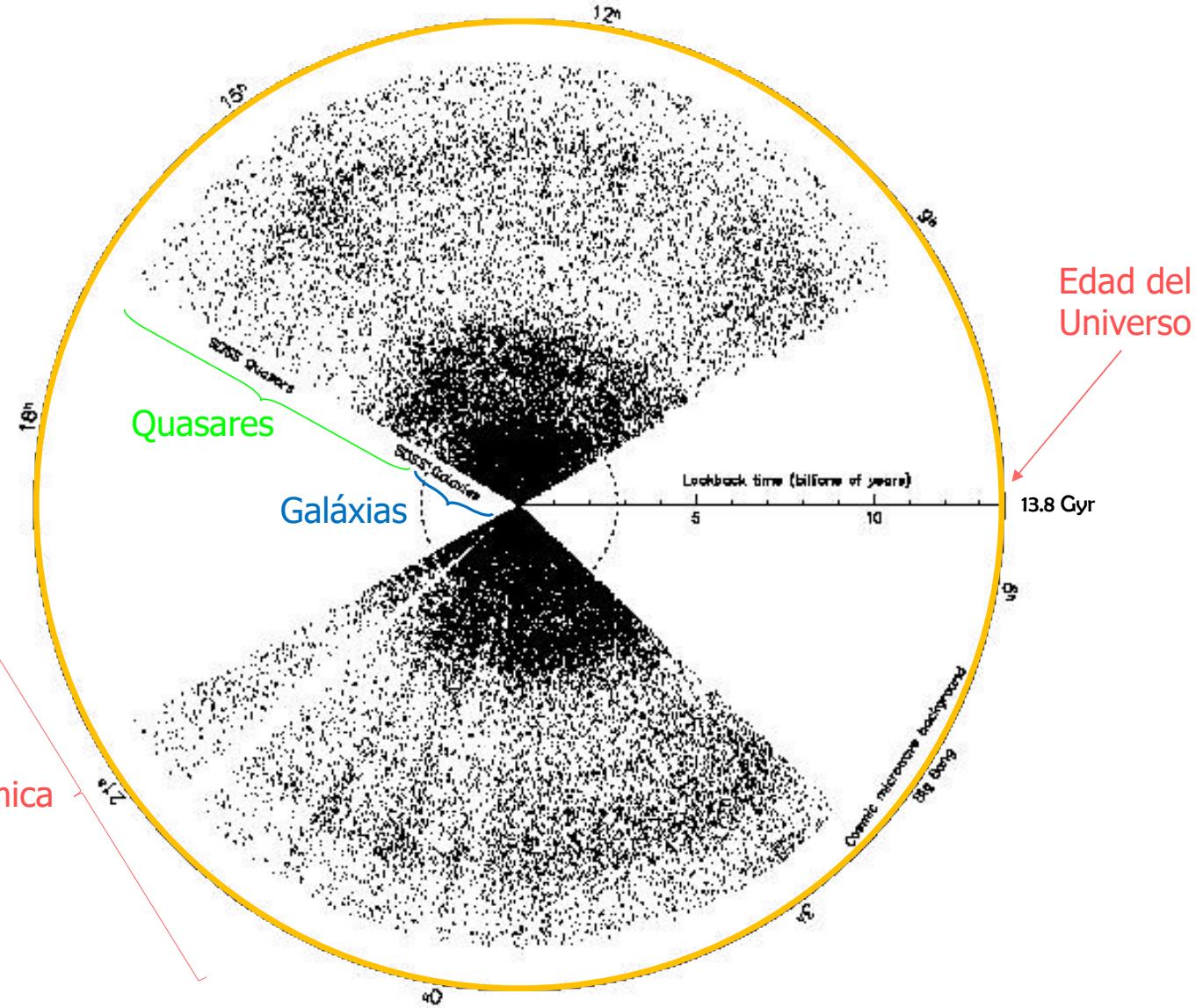


El Universo “Observable” (en un tiempo fijo)



c powell

El Universo
“real”
(en el espacio y
en el tiempo,
al mismo
tiempo)



Movimiento (7) - La Radiación Cósmica de Fondo

