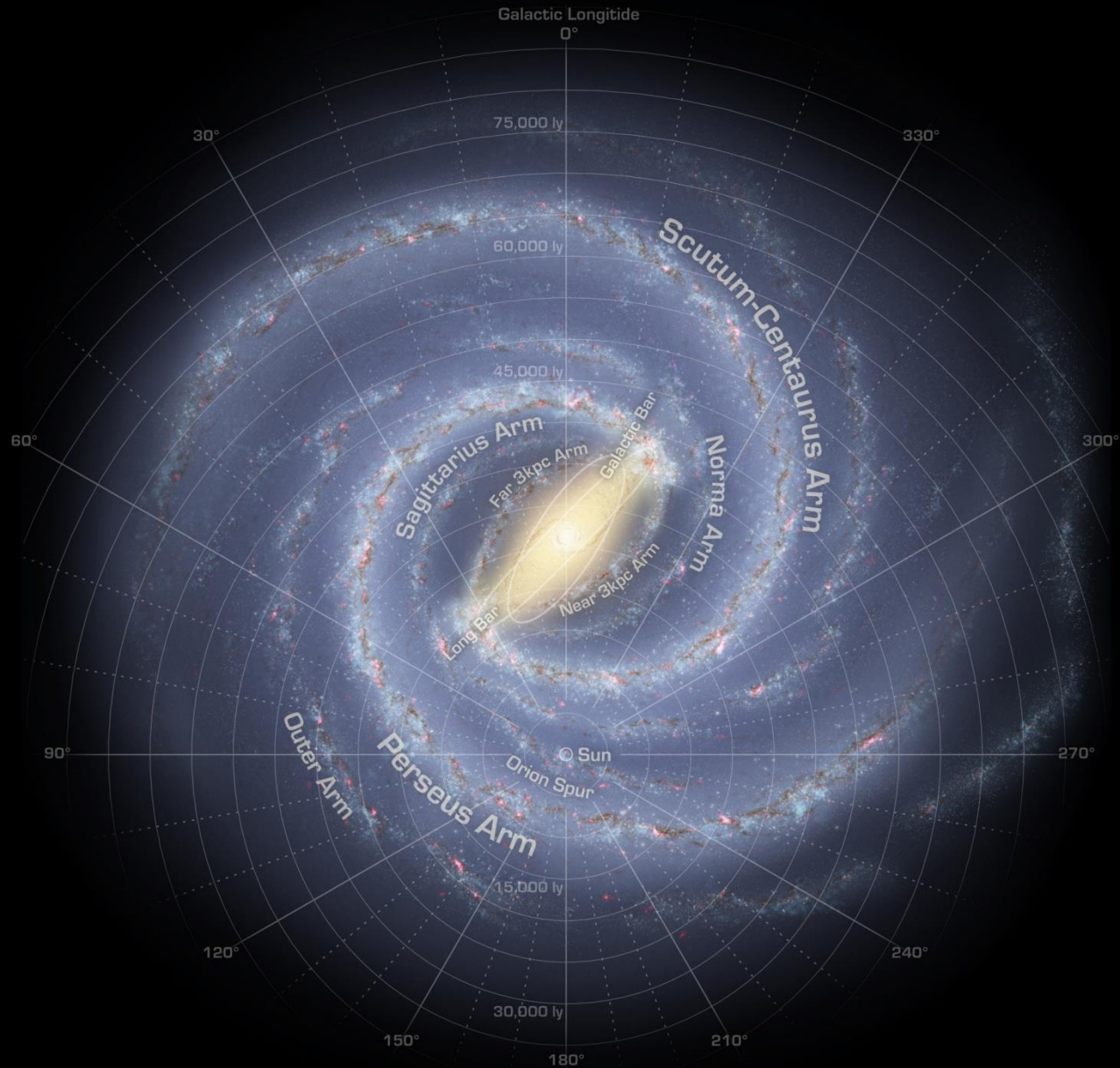


ESTRUCTURA GALÁCTICA Y DINÁMICA ESTELAR

Cinemática Estelar 2

Cinemática Estelar 2



Para simplificar vamos considerar $\mathbf{u}_{\odot} \sim 0$ (LSR)

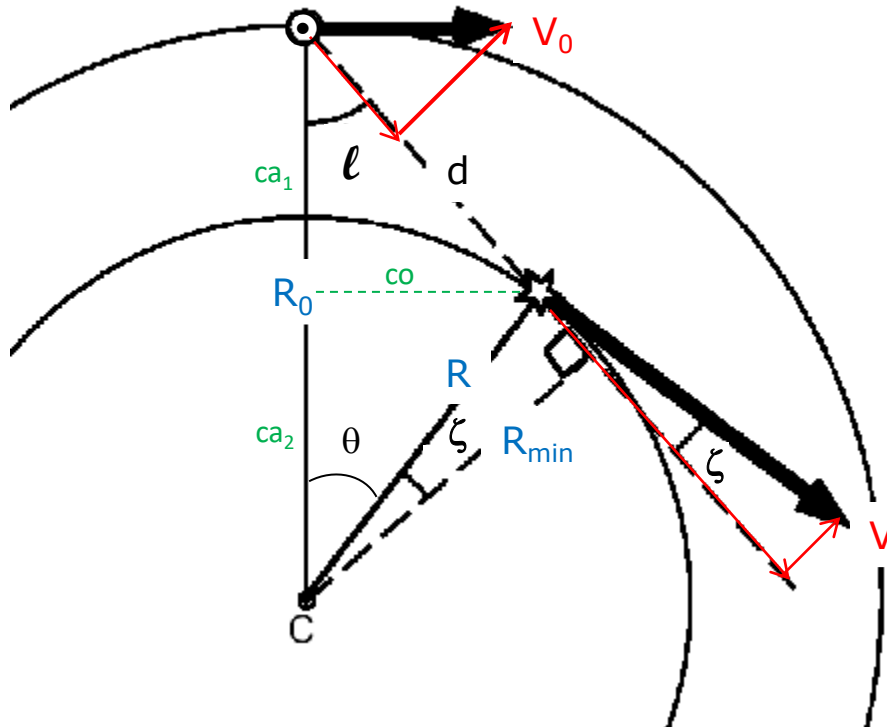
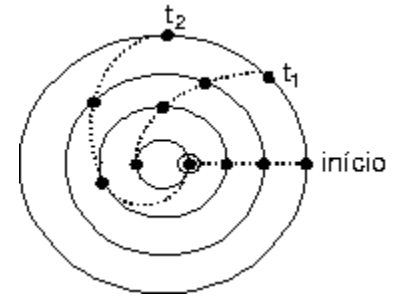
$$\Rightarrow V_{\odot} = V_0$$

y que el objeto (estrella, nube, etc) también se mueve en una orbita aprox. circular.

$$V_r = v_{r\star} + V_{r\odot} = V \cos(\zeta) - V_0 \cos(90^\circ - \ell) = V \cos(\zeta) - V_0 \sin(\ell)$$

$$V_t = v_{t\star} + V_{t\odot} = V \sin(\zeta) - V_0 \sin(90^\circ - \ell) = V \sin(\zeta) - V_0 \cos(\ell)$$

Rotación Diferencial



$$\left\{ \begin{array}{l} \sin(\ell) = co/d; \quad \cos(\ell) = ca_1/d \\ \sin(\theta) = co/R; \quad \cos(\theta) = ca_2/R \\ \\ co = d \sin(\ell) = R \sin(\theta) \\ ca_1 + ca_2 = R_0 = d \cos(\ell) + R \cos(\theta) \end{array} \right.$$

$$\ell + \theta + \zeta + 90^\circ = 180^\circ$$

$$\zeta = 90^\circ - (\ell + \theta) \Rightarrow$$

$$\begin{aligned} \cos(\zeta) &= \sin(\ell + \theta) \\ &= \sin(\ell) \cos(\theta) + \sin(\theta) \cos(\ell) \\ &= \sin(\ell) [R_0 - d \cos(\ell)]/R + \\ &\quad \cos(\ell) [d \sin(\ell)]/R \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sin(\zeta) &= \cos(\ell + \theta) \\ &= \cos(\ell) \cos(\theta) - \sin(\theta) \sin(\ell) \\ &= \cos(\ell) [R_0 - d \cos(\ell)]/R - \\ &\quad \sin(\ell) [d \sin(\ell)]/R \end{aligned}$$

Rotación Diferencial

$$\begin{aligned}
 V_r &= V \sin(\ell)/R [R_0 - d \cos(\ell) + d \cos(\ell)] - V_0 \sin(\ell) \\
 &= (V/R) \sin(\ell) [R_0 - V_0 R/V] \\
 &= \mathbf{R_0 \sin(\ell) [V/R - V_0/R_0]} \\
 V_t &= V/R [R_0 \cos(\ell) - d \cos^2(\ell) - d \sin^2(\ell)] - V_0 \cos(\ell) \\
 &= (V/R) [R_0 \cos(\ell) - d - \cos(\ell) V_0 R/V] \\
 &= \mathbf{R_0 \cos(\ell) [V/R - V_0/R_0] - d V/R}
 \end{aligned}$$



Expansión en Serie de Taylor (R en R_0):

$$\begin{aligned}
 V_r &= R_0 \sin(\ell) [V(R_0)/R_0 - V_0/R_0] + R_0 \sin(\ell) d/dR[V/R] (R - R_0) + \dots \\
 &\approx R_0 \sin(\ell) d/dR[V/R] (R - R_0) \\
 V_t &= R_0 \cos(\ell) [V(R_0)/R_0 - V_0/R_0] - d V(R_0)/R_0 + R_0 \cos(\ell) d/dR[V/R] (R - R_0) \\
 &\quad - d d/dR[V/R] (R - R_0) + \dots \\
 &\approx -d V_0/R_0 + R_0 \cos(\ell) d/dR[V/R] (R - R_0)
 \end{aligned}$$

Además, para $d < R_0$:

$$R_0 - R \sim d \cos(\ell) \Rightarrow R = R_0 - d \cos(\ell)$$

y

$$\sin(2\ell) = 2 \sin(\ell) \cos(\ell); \quad \cos(2\ell) = \cos^2(\ell) - \sin^2(\ell) = 2 \cos^2(\ell) - 1$$

Constantes de Oort

$$\begin{aligned}
 V_r &= R_0 \sin(\ell) \, d/dR[V/R] \, (R_0 - d \cos(\ell) - R_0) \\
 &= -d R_0 \sin(\ell) \cos(\ell) \, d/dR[V/R] \\
 &= -\frac{1}{2} d R_0 \sin(2\ell) \, d/dR[V/R] \\
 &= d A \sin(2\ell)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 V_t &= -d V_0/R_0 + R_0 \cos(\ell) \, d/dR[V/R] \, [R_0 - d \cos(\ell) - R_0] \\
 &= -d V_0/R_0 + R_0 \cos(\ell) \, d/dR[V/R] \, [-d \cos(\ell)] \\
 &= -d \{ V_0/R_0 + R_0 \cos^2(\ell) \, d/dR[V/R] \} \\
 &= -d \{ V_0/R_0 + \frac{1}{2} R_0 [\cos(2\ell) + 1] \, d/dR[V/R] \} \\
 &= -d \{ \frac{1}{2} R_0 \cos(2\ell) \, d/dR[V/R] + \frac{1}{2} R_0 \, d/dR[V/R] + V_0/R_0 \} \\
 &= d \{ -\frac{1}{2} R_0 \, d/dR[V/R] \cos(2\ell) - \frac{1}{2} R_0 \, d/dR[V/R] - V_0/R_0 \} \\
 &= d A \cos(2\ell) + d B
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 A &= -\frac{1}{2} R_0 \, d/dR[V/R] \\
 &= -\frac{1}{2} R_0 [dV/dR (1/R) - V/R^2]_{R_0} \\
 &= -\frac{1}{2} \{ [dV/dR]_{R_0} R_0/R_0 - V_0 R_0/R_0^2 \}
 \end{aligned}$$

$$\Rightarrow A = -\frac{1}{2} [dV/dR|_{R_0} - V_0/R_0]$$

$$\begin{aligned}
 B &= -\frac{1}{2} R_0 \, d/dR[V/R] - V_0/R_0 \\
 &= -\frac{1}{2} R_0 [dV/dR (1/R) - V/R^2]_{R_0} - V_0/R_0 \\
 &= -\frac{1}{2} [dV/dR]_{R_0} + \frac{1}{2} V_0/R_0 - V_0/R_0 \\
 &= -\frac{1}{2} [dV/dR]_{R_0} - \frac{1}{2} V_0/R_0
 \end{aligned}$$

$$\Rightarrow B = -\frac{1}{2} [dV/dR|_{R_0} + V_0/R_0]$$

Constantes de Oort

A y **B** nos dan información de la cinemática local:

- **A** mide la **cizalla/distorsión** (*shear*) del disco en la posición del Sol
- **B** mide la **vorticidad** del material del disco (tendencia de circular alrededor de algún punto)

Si combinamos las dos, tendremos:

$$\begin{aligned} \mathbf{A} + \mathbf{B} &= -\frac{1}{2} [d\mathbf{V}/dR|_{R_0} - \mathbf{V}_0/R_0] - \frac{1}{2} [d\mathbf{V}/dR|_{R_0} + \mathbf{V}_0/R_0] \\ &= -\frac{1}{2} d\mathbf{V}/dR + \frac{1}{2} \mathbf{V}_0/R_0 - \frac{1}{2} d\mathbf{V}/dR - \frac{1}{2} \mathbf{V}_0/R_0 \\ &= -d\mathbf{V}/dR|_{R_0} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mathbf{A} - \mathbf{B} &= -\frac{1}{2} [d\mathbf{V}/dR|_{R_0} - \mathbf{V}_0/R_0] + \frac{1}{2} [d\mathbf{V}/dR|_{R_0} + \mathbf{V}_0/R_0] \\ &= -\frac{1}{2} d\mathbf{V}/dR + \frac{1}{2} \mathbf{V}_0/R_0 + \frac{1}{2} d\mathbf{V}/dR + \frac{1}{2} \mathbf{V}_0/R_0 \\ &= \mathbf{V}_0/R_0 = \Omega_0 \quad \leftarrow \text{velocidad angular del LSR (no confundir} \\ &\quad \text{con el parámetro cosmológico } \Omega_0 \dots) \end{aligned}$$

Los valores estimados para dichas constantes, basados en movimientos propios de Cefeidas que fueron medidas por el satélite *Hipparcos* (Feast & Whitelock, 1997), son:

$$\mathbf{A} = 14.8 \pm 0.8 \text{ km s}^{-1} \text{ kpc}^{-1}$$

$$\mathbf{B} = -12.4 \pm 0.6 \text{ km s}^{-1} \text{ kpc}^{-1}$$

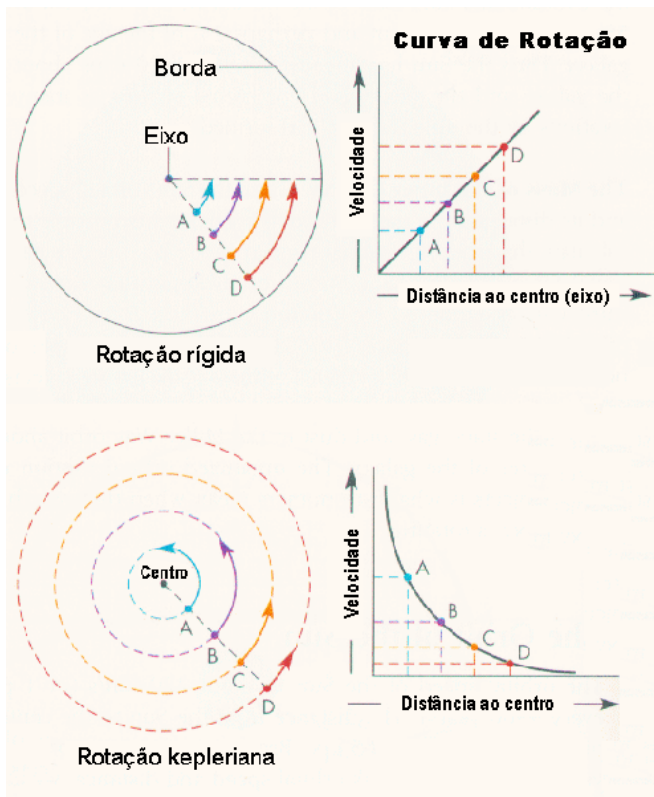
Rotación Diferencial

Podemos comparar el valor de Ω_0 obtenido de los valores medidos de las constantes de Oort:

$$\Omega_0 = \mathbf{A} - \mathbf{B} = 27.2 \text{ km s}^{-1} \text{ kpc}^{-1}$$

con el valor de Ω_0 obtenido por los valores estándares de V_0 (220 km s⁻¹) y R_0 (8.5 kpc):

$$\Omega_0 = V_0/R_0 = 25.9 \text{ km s}^{-1} \text{ kpc}^{-1}$$



Cuerpo rígido:

$$dV/dR = 0 \Rightarrow \mathbf{A} + \mathbf{B} = 0$$

Pero, tenemos: $\mathbf{A} + \mathbf{B} = 2.4 \text{ km s}^{-1} \text{ kpc}^{-1}$

\Rightarrow **rotación diferencial**

La Curva de Rotación de la Galaxia

Si pudiéramos medir V_r para objetos del disco para los cuales sabemos sus distancias, podríamos determinar $V(R)$, es decir, la **curva de rotación** de la Galaxia. Desafortunadamente, la luz **visible** de objetos del disco es fuertemente absorbida por el polvo interestelar. Sin embargo, las ondas de **radio** no son muy afectadas, aunque para las **nubes** que emiten dicha radiación (HI, CO, etc) no se pueda fácilmente medir sus distancias...

- **$R < R_0$: Método del punto tangente**

Si consideramos el cuadrante $0^\circ < \ell < 90^\circ$, y tomamos cierta dirección fija, la mayor V_r la encontraremos para los objetos que están en el **punto tangente** ($R = R_{\min}$), una vez que corresponde a la órbita más interna y toda la V es tangencial.

En este caso:

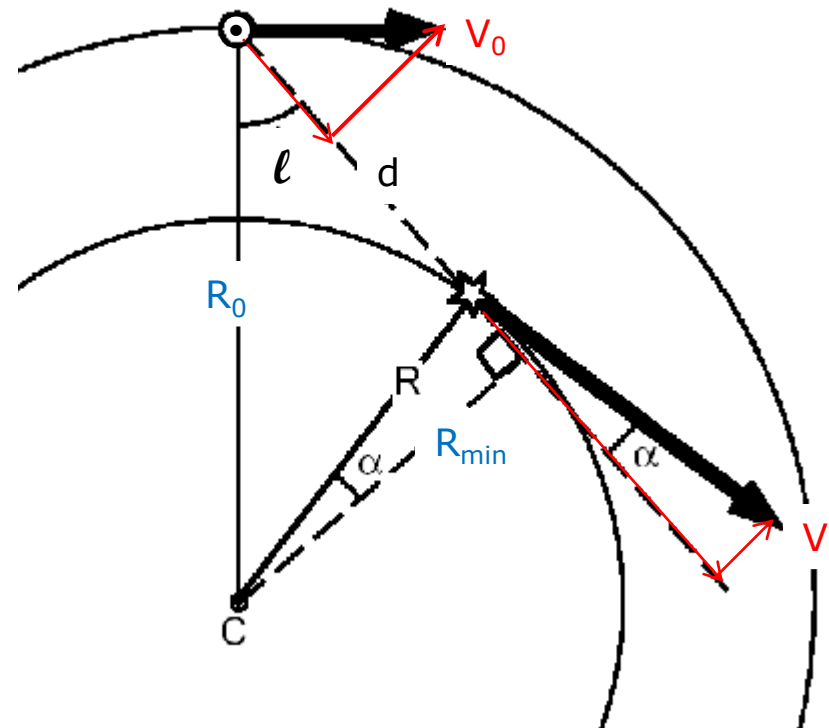
$$d = R_0 \cos(\ell)$$

$$R_{\min} = R_0 \sin(\ell)$$

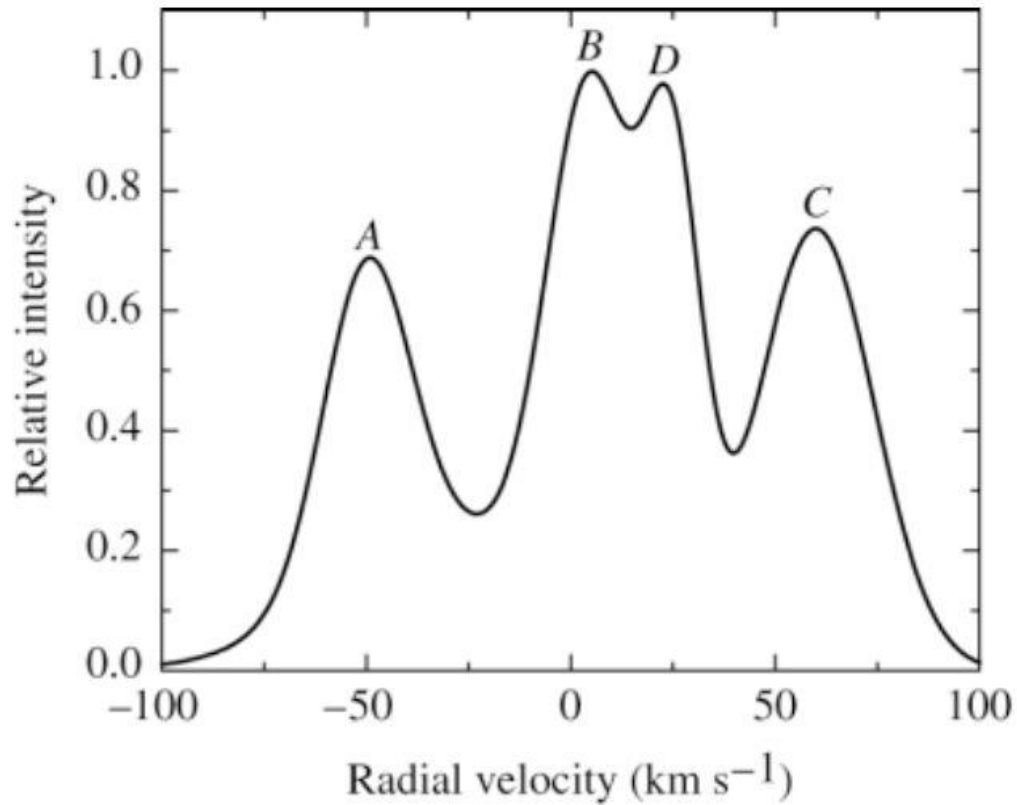
$$V_r = R_0 \sin(\ell) \frac{V}{R} - V_0 \sin(\ell) \quad \leftarrow$$

$$= R_{\min} \frac{V}{R_{\min}} - V_0 \sin(\ell)$$

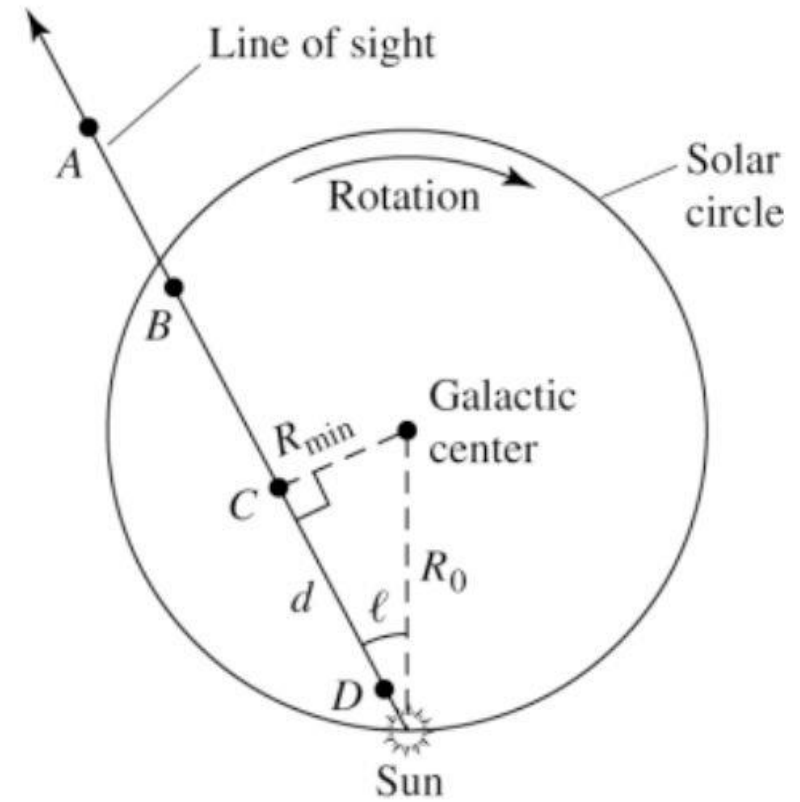
$$V(R) = V_r + V_0 \sin(\ell)$$



El método del punto tangente



(a)



(b)

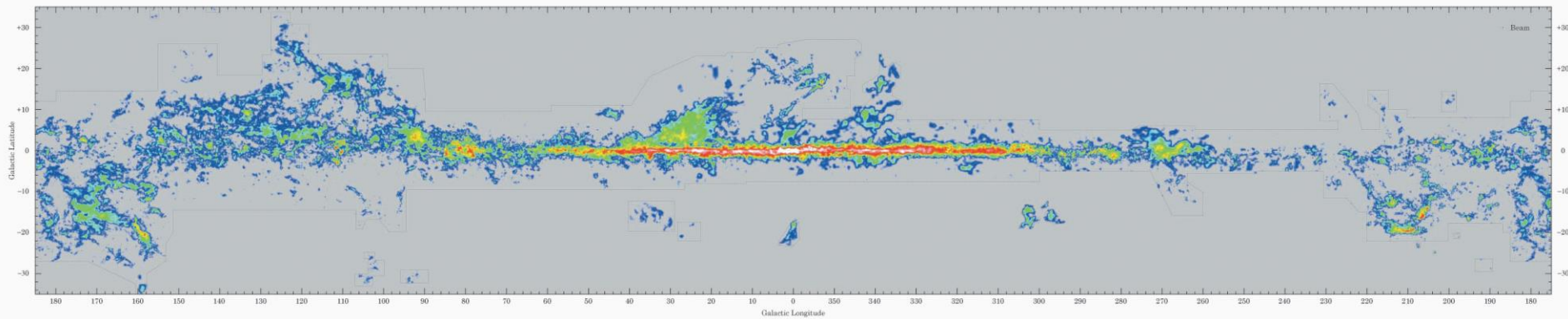


FIG. 2.—Velocity-integrated CO map of the Milky Way. The angular resolution is $1''$ over most of the map, including the entire Galactic plane, but is lower (15' or 30') in some regions out of the plane (see Fig. 1 & Table 1). The sensitivity varies somewhat from region to region, since each component survey was integrated individually using moment masking or clipping in order to display all statistically significant emission but hide some low S/N. A dotted line marks the sampling boundaries, given in more detail in Fig. 1.

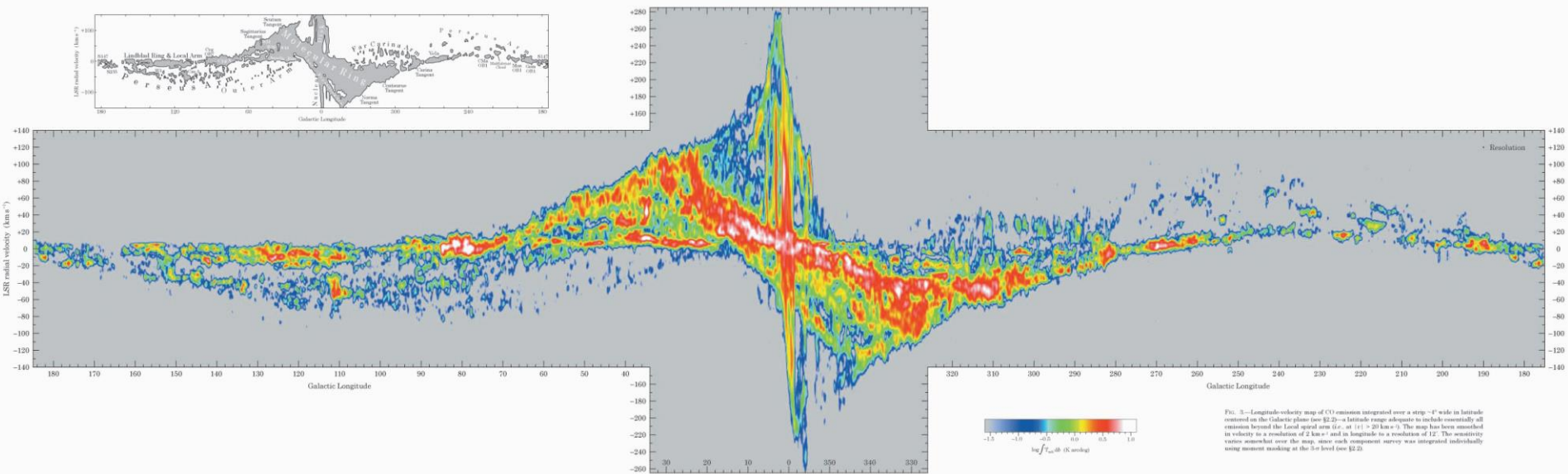
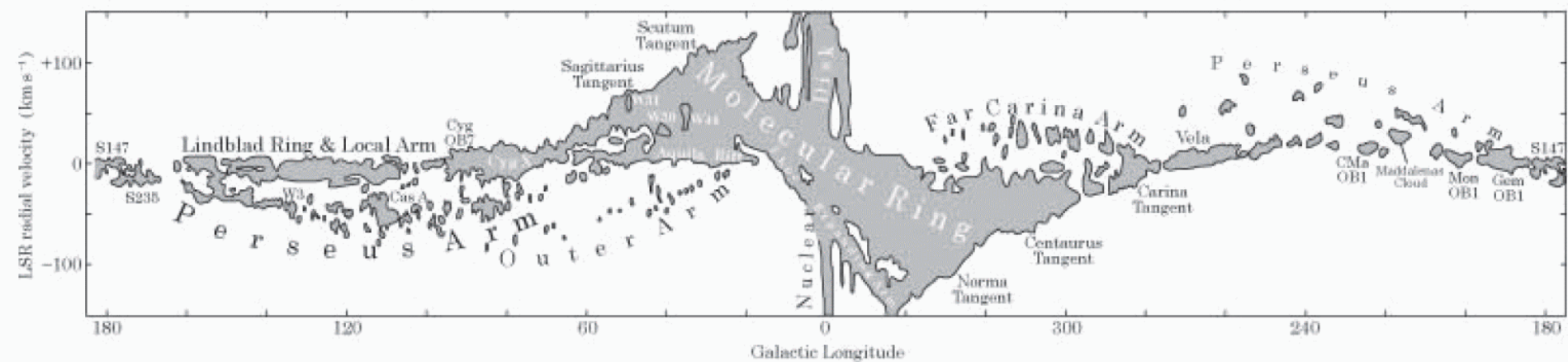
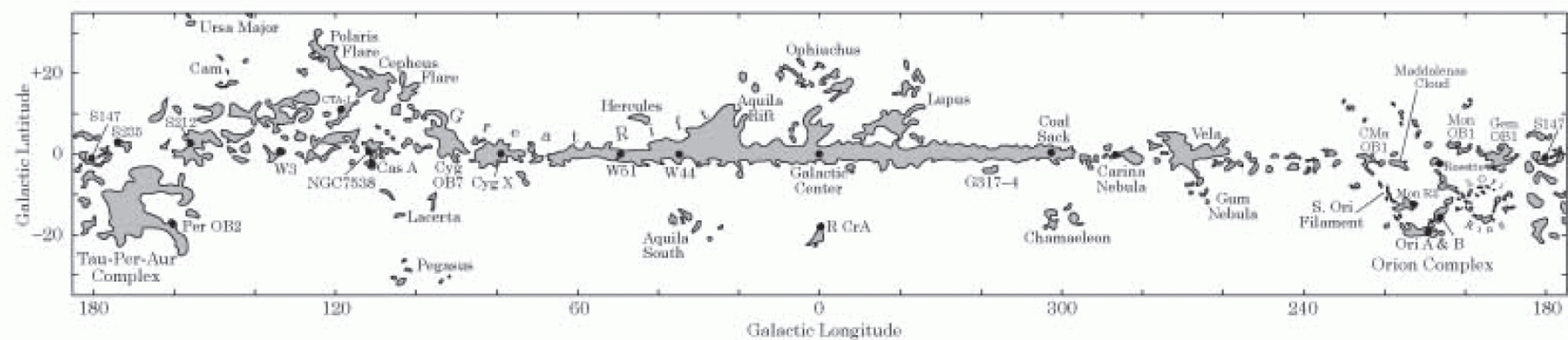


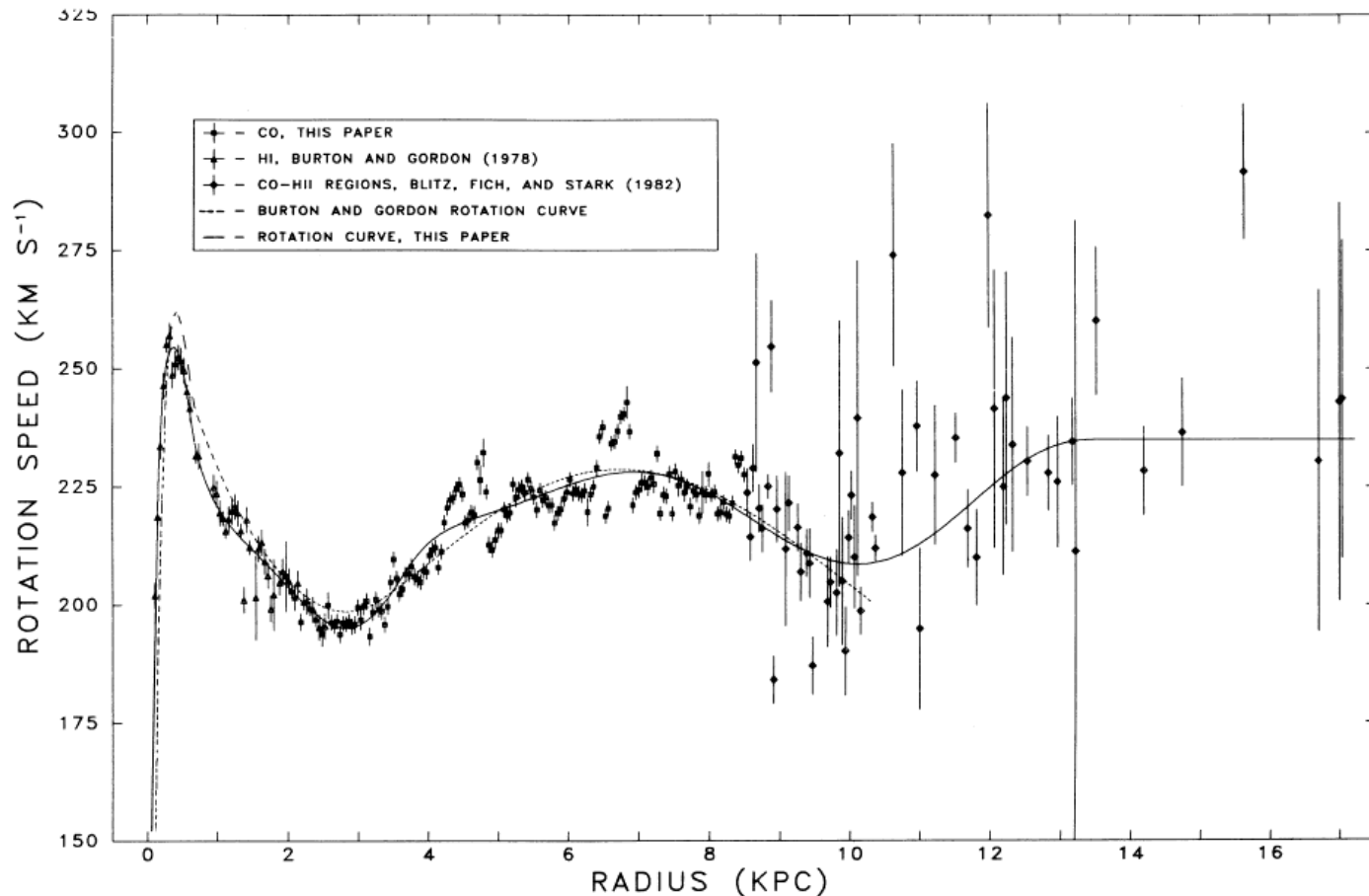
FIG. 3.—Longitude-velocity map of CO emission integrated over a strip $\sim 4''$ wide in latitude centered on the Galactic plane (see §2.2) \rightarrow latitude range adequate to include essentially all emission beyond the Local spiral arm (i.e., at $|l| > 20^\circ$). The map has been smoothed in velocity to a resolution of 2 km s^{-1} and in longitude to a resolution of $12'$. The sensitivity varies somewhat over the map, since each component survey was integrated individually using moment masking at the 3- σ level (see §2.2).



La Curva de Rotación de la Galaxia

- $R > R_0$

Para las partes externas de la Galaxia, la medición de $V(R)$ es más complicada. Los marcadores son, usualmente, **regiones HII**, **Cefeidas** o **nebulosas planetarias** para los cuales se puede medir la **distancia**. Las velocidades radiales son medidas por el corrimiento de sus **líneas de emisión**.



Clemens 1985, ApJ 295, 422
Fich & Tremaine 1991, ARAA 29, 409.
Merrifield 1992, AJ 103, 1552

Reid et al. 2014, ApJ 783, A130

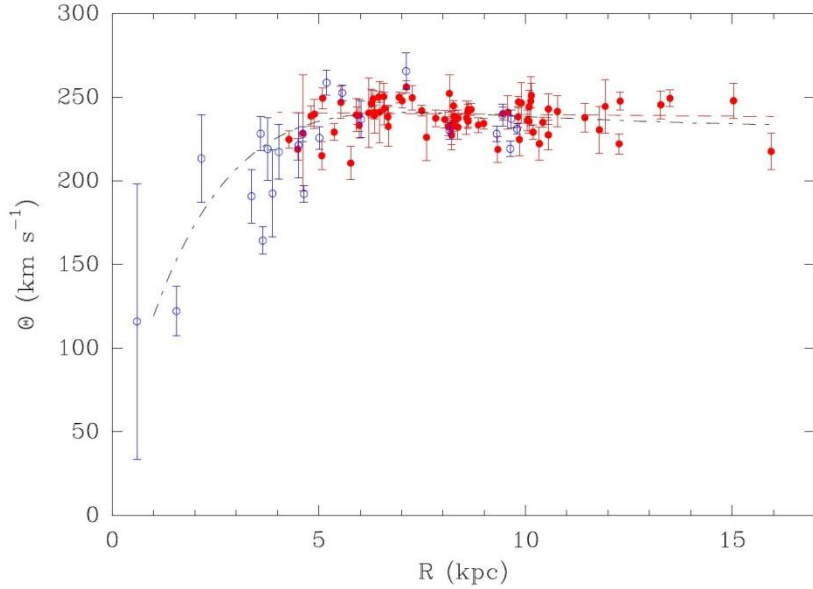


Fig. 4.— Rotation curve for all high mass star forming regions with measured parallax and proper motion in Table 1. Plotted is the circular velocity component, Θ , as a function of Galactocentric radius, R . The transformation from heliocentric to Galactocentric frames uses the parameter value of fit A5, based only on sources with $R > 4.0$ kpc; these sources are plotted with *filled red symbol*. The sources not used in the final fitting are plotted with *open blue symbols*. The *dashed red line* indicates the fitted rotation curve (model A5) given by $\Theta = \Theta_0 - 0.2(R - R_0)$ km s⁻¹, where Θ_0 and R_0 are in kpc. The *dash-dot black line* is the best fit “Universal” rotation curve (model D1) fit spiral galaxies (Persic, Salucci & Stel 1996), which begins to capture the clear velocity turn down for stars with $R \lesssim 5.0$ kpc.

Sofue et al. 2013, PASJ 65, 118

Fig. 7. Top: Rotation velocities (grey dots) in the Galactic Center obtained by the LV ridge terminal method. The error bars represent effective spatial resolutions taken to be twice the effective angular resolution in the data [15'' for our innermost CO data by the 45-m telescope; 37'' for CO data by Oka et al. (1989); 48'' for CS data by Tsuboi et al. (1991)], and eye-estimated terminal velocity errors of ± 10 km s⁻¹. Open circles show the running-averaged values every 3 points using the neighboring 5 data points. The error bars denote the standard deviation in the averaged data used in each plotted point. Bottom: Same up to 0.6 kpc, but Gaussian-running averaged velocities combined with the data by Sofue et al. (2009). Deconvolved components (inner and main bulges, disk and dark halo) are indicated by the full lines.

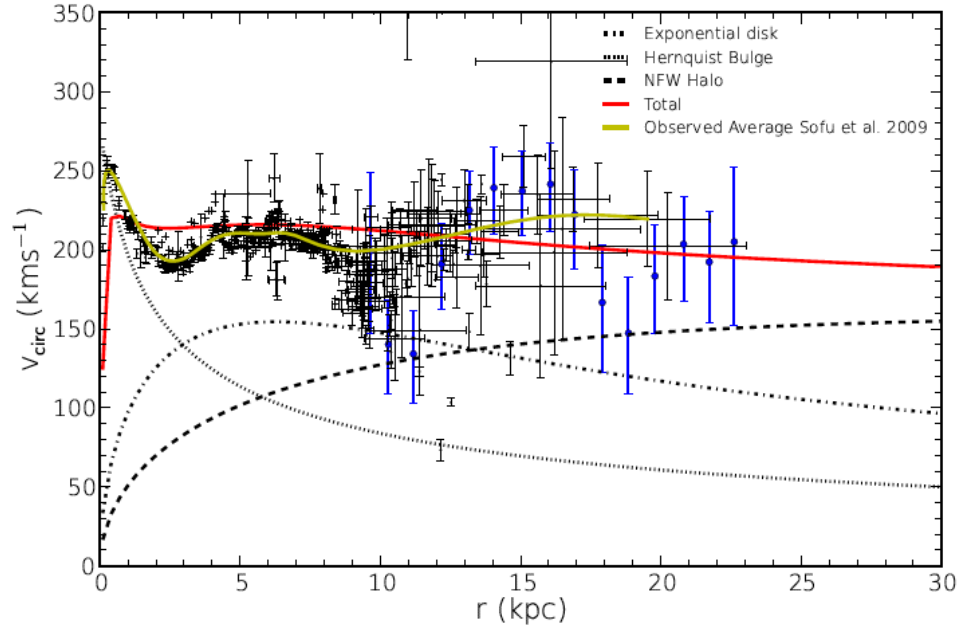
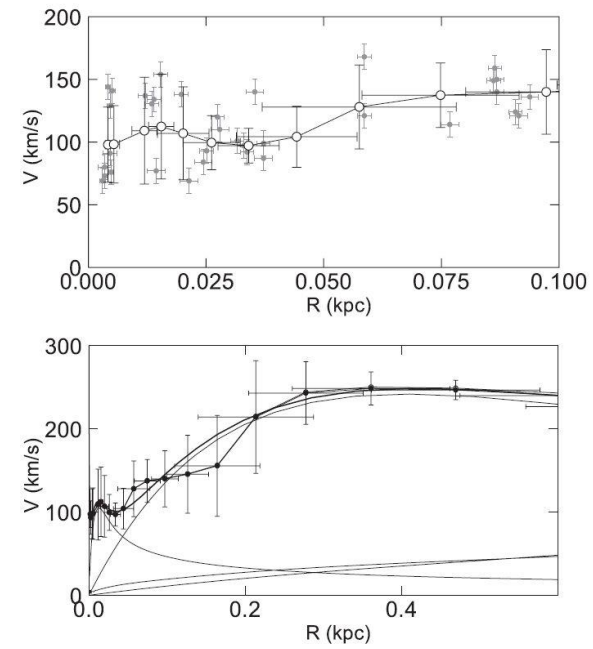
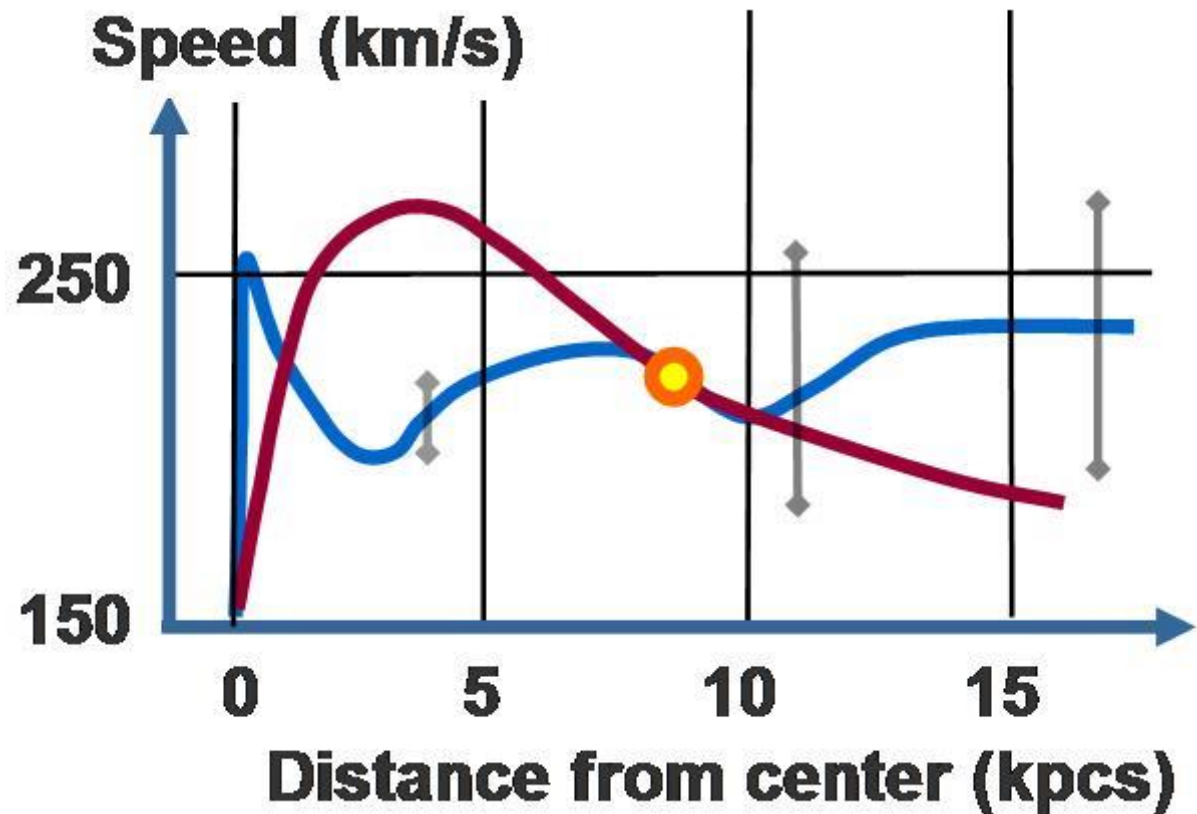
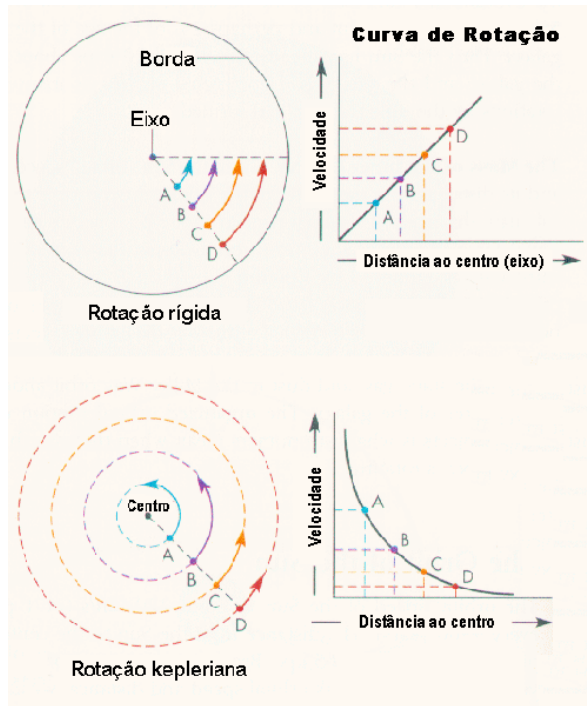


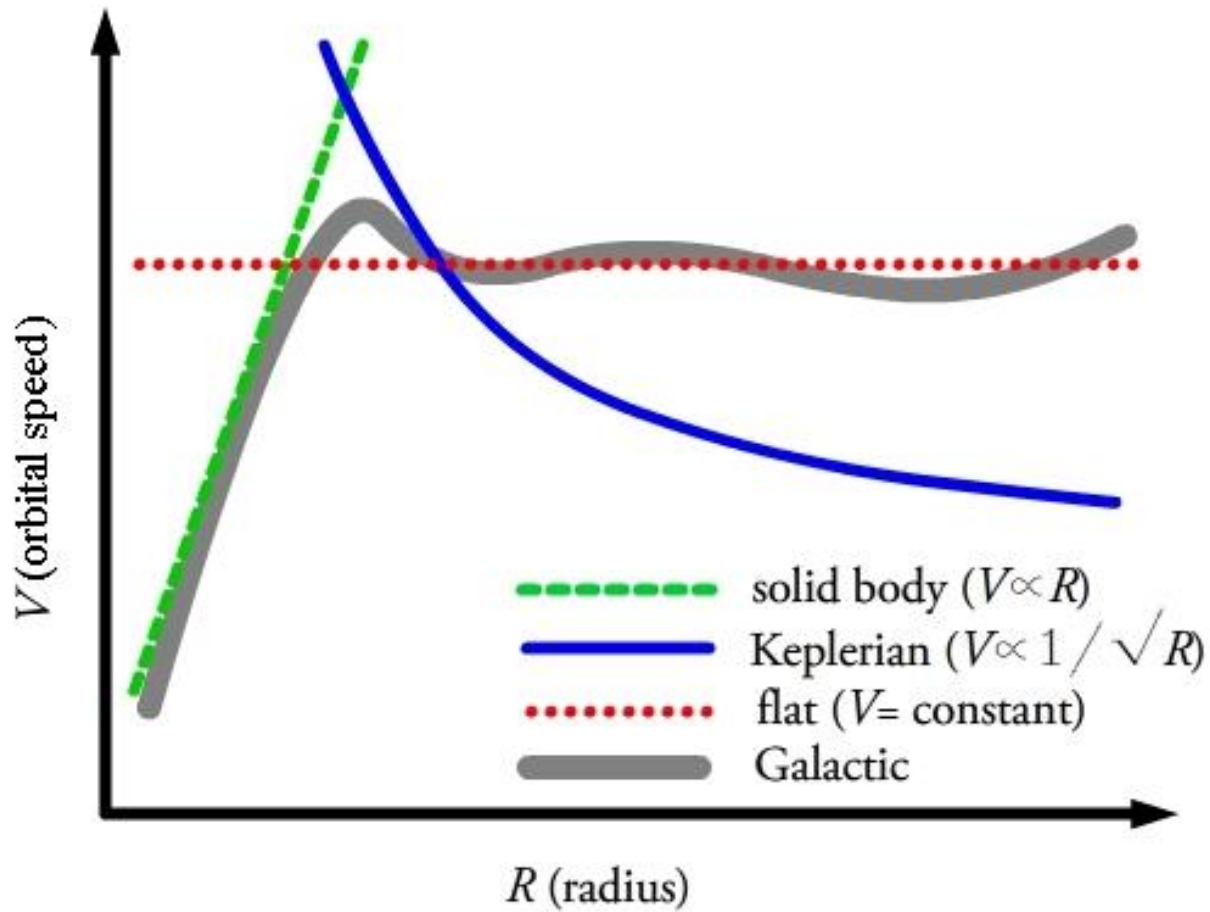
Figure 10. Circular velocity curve of the Galaxy and their individual components along a galactocentric distance (r). The blue marker represents the value of V_{circ} obtained in the CME bins in r . Red solid line is our fit of the total potential. Black dotted and dotted-dashed lines are the fixed disk and the bulge circular velocity profile for set of adopted values of masses and scale radii. Dashed line is the fitted NFW profile. Black dots with error bars are the collated V_{circ} values given by Sofue et al. (2009) whereas yellow solid line is the average of the given observed values.

La Curva de Rotación de la Galaxia

La característica más notable de la curva de rotación de la Vía-Láctea es que, aunque sea dominada por rotación diferencial (solamente la parte interna, llamada **disco central**, tiene rotación de cuerpo rígido), no sigue una curva kepleriana (como el Sistema Solar, por ejemplo). La curva de rotación es **aprox. constante** para grandes R .



Constantes de Oort



Solid body:

$$A = 0$$

$$B = -\Omega_0$$

Keplerian:

$$A = 3/4 (V_0 / R_0)$$

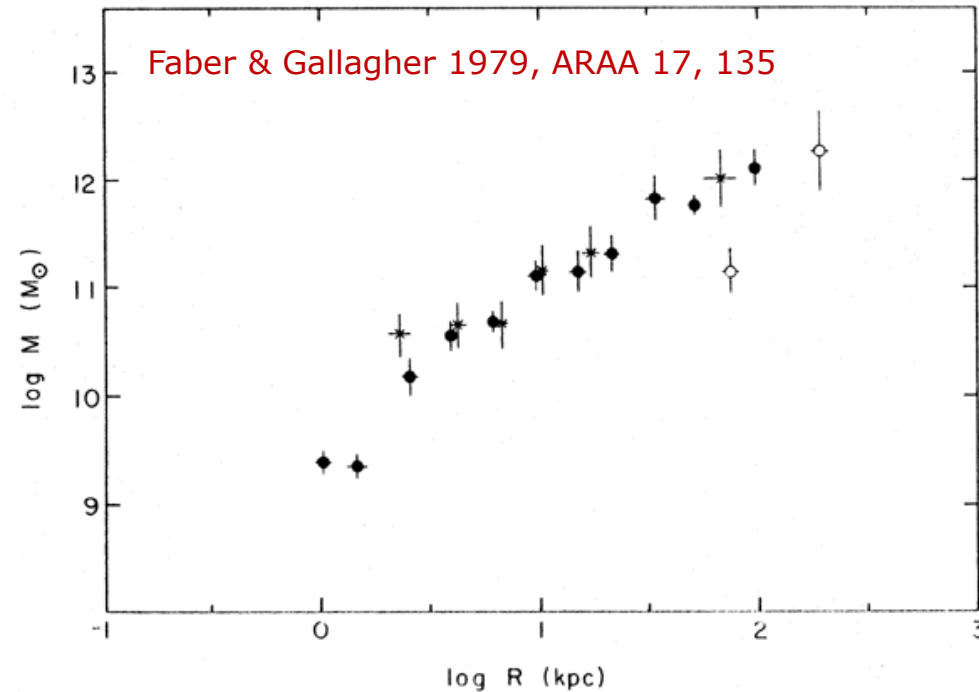
$$B = -1/4 (V_0 / R_0)$$

Flat:

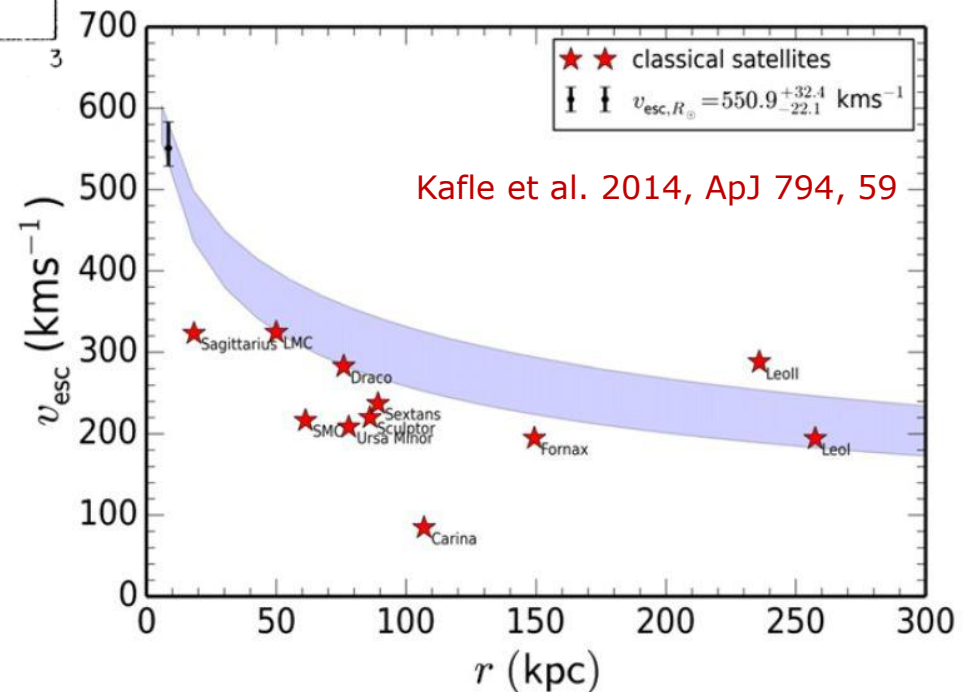
$$A = 1/2 (V_0 / R_0)$$

$$B = -1/2 (V_0 / R_0)$$

La Curva de Rotación de la Galaxia



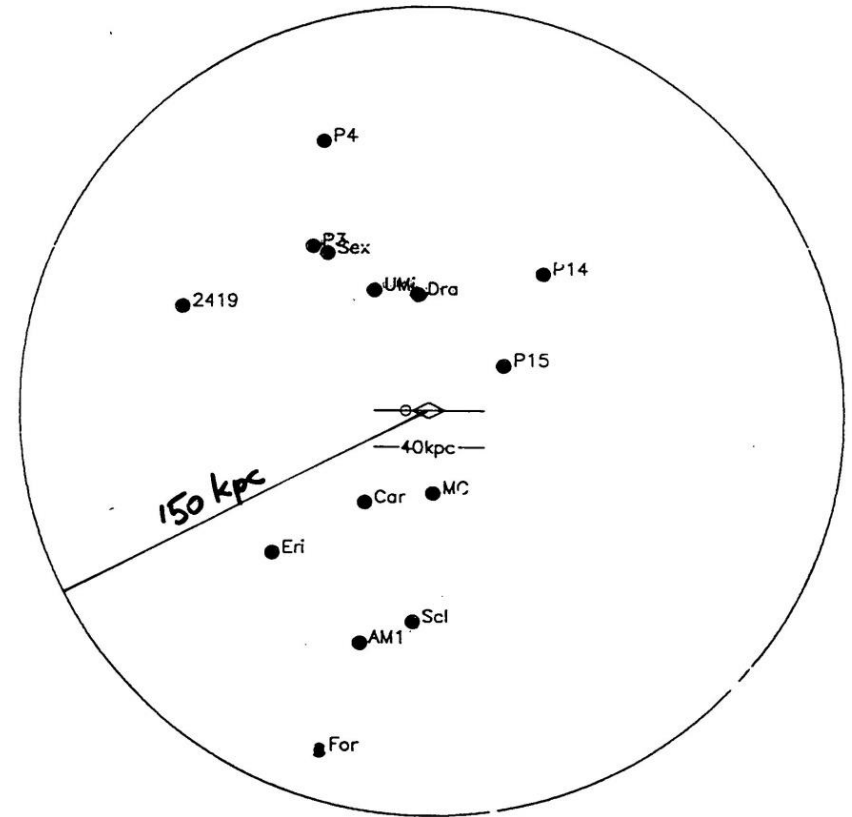
Mediciones de la cinemática de **cúmulos globulares y galaxias satélites** indican que la curva de rotación sigue plana hasta más de 100 kpc.



La Curva de Rotación de la Galaxia

La implicación de eso es que la Vía-Láctea tiene más masa que la que vemos (en estrellas y el MIS). Esa **masa faltante** es conocida como “materia oscura” y se supone forma un **halo/corona** alrededor de la Galaxia (así como de otras galaxias).

Bahcall et al. 1995, ApJ 447, L81 👍



$$\rho(r) = \rho_0 / (r/a) (1 + r/a)^2$$

La “Materia Oscura”

Principales problemas cosmológicos que se suele solucionar con el paradigma de la materia oscura:

- **curva de rotación** de galaxias dominadas por disco: siguen planas hasta grandes radios;
- **dinámica** de las galaxias miembros de **cúmulos de galaxias**: el Teorema del Virial, p. ex., implica una masa mucho mayor para la dispersión de velocidades observada;
- **anisotropías en la RCF**: la formación de estructuras debe haber empezado antes del desacople entre radiación y materia (luego, una materia no bariónica debe haber se desacoplado antes).

Propiedades de la materia oscura (velocidades de las partículas):

- **Caliente**: velocidades relativistas, bajas masas, pero altas energías
alta dispersión → formación de estructuras “*top-down*” (**fragmentación**)
- **Fría**: velocidades mas bajas, masa pueden ser mas altas, energías mas bajas
baja dispersión → formación de estructuras “*bottom-up*” (**jerárquica**)
- **Tibia?**

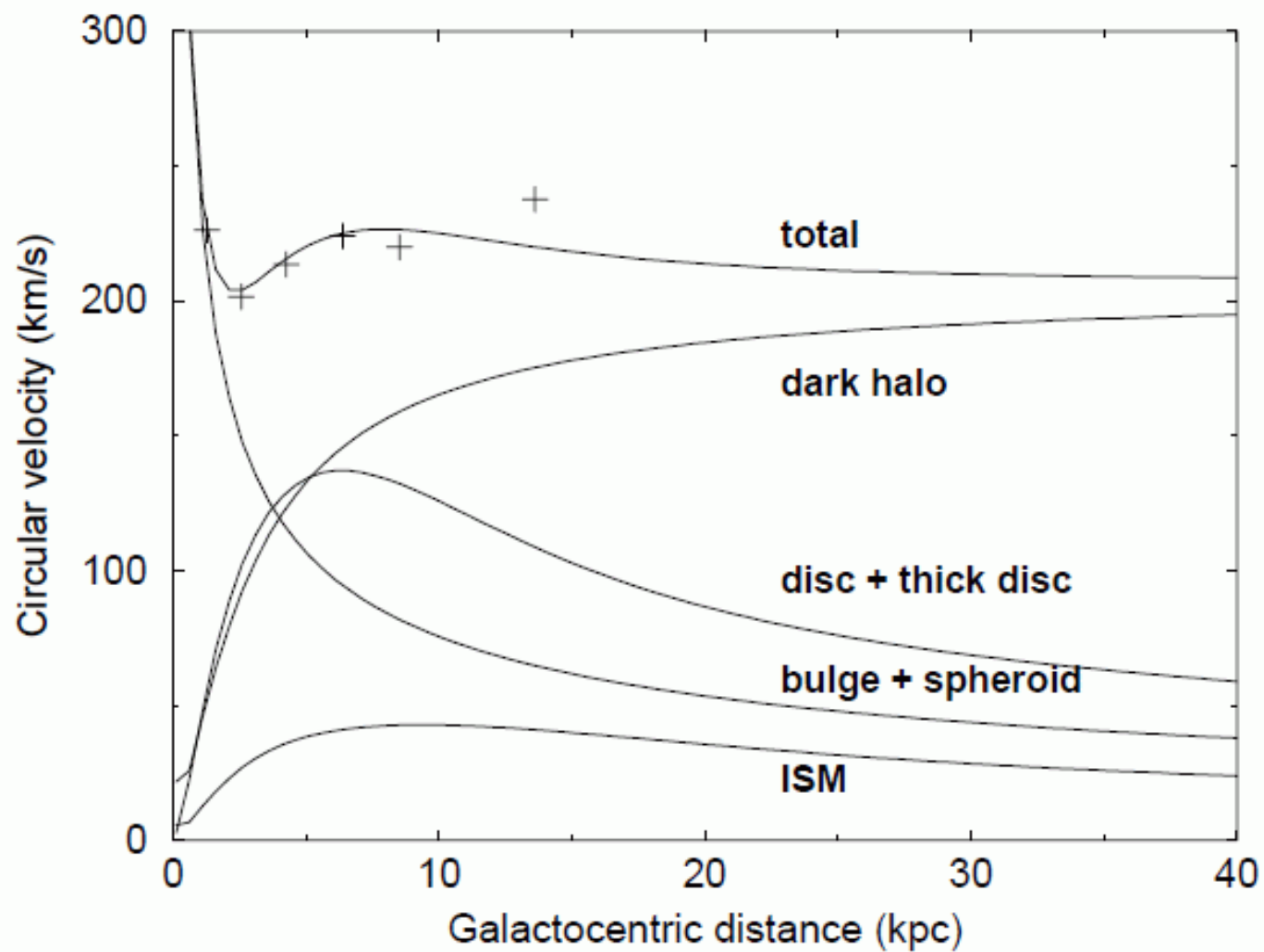


Fig.2. Circular velocity of the self-consistent model. Crosses are observational constraints from Caldwell & Ostriker (1981). Contributions from main Galactic components are also given.

Robin et al. 2003, A&A 409, 523
Bershady et al. 2011, ApJL 739, L47

Tarea 3:

- Buscar los datos del satélite *Hipparcos* y datos de velocidades radiales para sus estrellas, por ejemplo, los datos del catálogo OSACA (Bobylev et al. 2006, ARep 50, 733). Esos datos están disponibles en la internet, en sitios específicos para datos Astrofísicos como CDS, VO, etc.
- No considerar sistemas binarios (algunos de los parámetros para esos sistemas son promedios y no para cada componente...)
- Considerar solamente estrellas de la secuencia principal (clase de luminosidad V)
- Separar los datos en tipos estelares (por tipos espectrales, índices de color, etc)
- Limitar las sub-muestras en volumen (por paralajes, distancias, módulos de distancia, etc).
- Hacer/utilizar un programa para calcular los promedios de velocidades necesarios para estimar la velocidad peculiar del Sol.
- Construir la gráfica de $\langle v_h \rangle \times \langle u_h^2 \rangle$ y determinar el ajuste y el valor de la componente v_{\odot} .

Tarea 3':

Lectura: secciones 9.1 y 9.2 de Binney & Merrifield
artículo de Bahcall et al., 1995