

# ISM en la Vía Láctea I

Mauro Jélvez

## Rotación de la galaxia

**Local Standard of Rest (LSR):** Representa la velocidad de una partícula imaginaria moviéndose en una órbita cerrada en el plano galáctico coincidiendo con la posición del Sol. Supong-

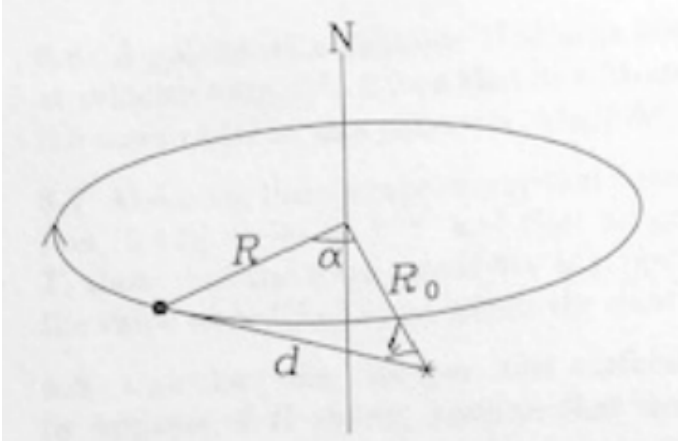


Fig. 1.

amos que el gas rota circularmente.  $R$  es el vector de posición del gas respecto al centro galáctico, con

Velocidad angular de este gas (material)  $\rightarrow \Omega(R)$

Y su velocidad circular será  $\rightarrow v_c = \Omega(R) \times R$

Y la velocidad circular del LSR  $\rightarrow v_0 = \Omega(R_0) \times R_0$

Definiremos  $v_{los}$  como velocidad "line of sight" (línea de visión); proyección de  $v_c - v_0$  en el vector  $(R - R_0)$  del sol hacia el gas

$$v_{los} = \frac{(R - R_0)}{|(R - R_0)|} \cdot [\Omega(R) \times R - \Omega(R_0) \times R_0]$$

Usando  $a \cdot (a \times b) = 0$  y  $a \cdot (b \times c) = b \cdot (c \times a)$ , y del gráfico obtenemos:

- $R_0 \times R = -R_0 R \sin \alpha \hat{n}$  con  $\hat{n}$  vector unitario perpendicular al disco.
- Por Ley del Seno:  $\sin \alpha / |R - R_0| = \sin(l)/R$
- De la dirección de la rotación de la galaxia:  $\Omega = |\Omega| \hat{n}$

Por lo que finalmente tendremos:

$$v_{los}(l) = [\Omega(R) - \Omega(R_0)] R_0 \sin l \quad (1)$$

Supongamos que todo el gas está concentrado en un angosto anillo con radio  $R$ . La velocidad observada a lo largo de la línea de visión ( $v_{los}$ ) está dada por:

$$v_{los}(l) = [\Omega(R) - \Omega(R_0)] R_0 \sin l,$$

donde:

- $\Omega(R)$ : velocidad angular del gas a un radio  $R$ ,
- $R_0$ : radio solar (distancia del Sol al centro galáctico),
- $l$ : longitud galáctica.

## Comportamiento según $R/R_0$

1. Si  $R/R_0 \ll 1$ : Solo un pequeño sector es visible, limitado por  $l = \pm l_{max}$ , donde:

$$l_{max} = \arcsin\left(\frac{R}{R_0}\right).$$

Esto ocurre porque el anillo está contenido dentro del círculo solar.

2. Si  $R/R_0 \sim 1$ : La curva  $v_{los}(l)$  muestra una sección visiblemente curvada.
3. Si  $R > R_0$ : La velocidad observada  $v_{los}(l)$  forma una sinusoide completa.

## Propiedades adicionales

- La pendiente de  $v_{los}(l)$  es proporcional a  $\Omega(R) - \Omega(R_0)$ .
- $\Omega(R)$  aumenta hacia el centro galáctico ( $R \rightarrow 0$ ), lo que implica una pendiente más pronunciada hacia el interior.
- Para  $R = R_0$ , la pendiente es cero.

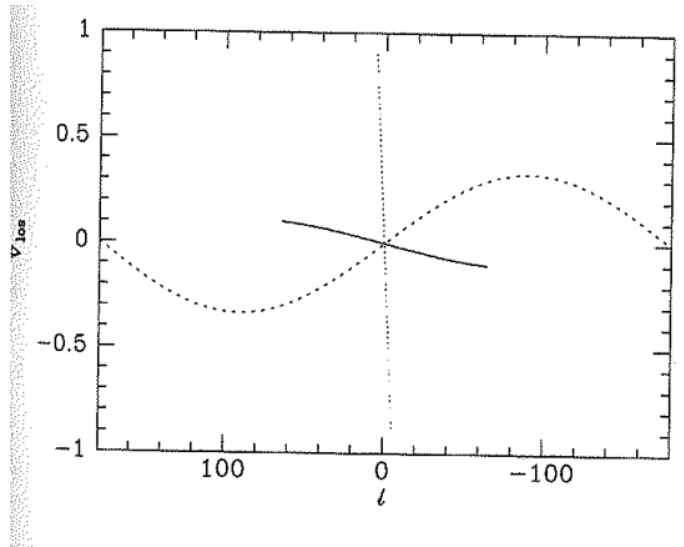


Fig. 2.

Para  $R/R_0 > 1$  la pendiente es opuesta a esta en  $R/R_0 < 1$ . El disco de la vía láctea puede ser presentado como conjunto de anillos con espesor casi 0.

Dentro del círculo solar tendremos:

- $0 \leq l \leq 90$  y  $v_{los} \geq 0$
- $-90 \leq l \leq 0$  y  $v_{los} \leq 0$

La pendiente es más grande en  $r$  pequeño, pero nunca más grande que:

$$R_0 \cdot \Omega(R_0)$$

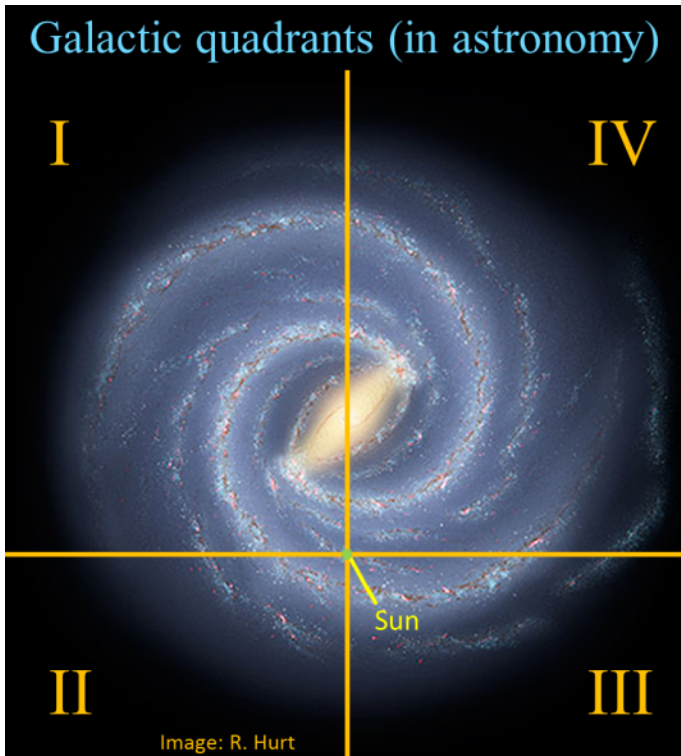


Fig. 3.

Para  $r > R_0$ , en otras palabras  $l > 0$  las velocidades son menores que

$$-R_0\Omega(R_0)\sin l$$

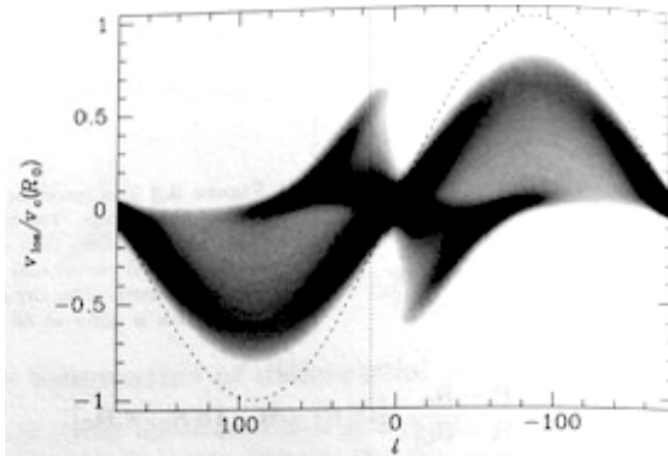


Fig. 4.

El gráfico muestra un mapa en escala de grises que representa la profundidad óptica ( $\tau$ ) en función de la longitud galáctica ( $l$ ) y la velocidad radial normalizada ( $v_{\text{los}}/v_c(R_0)$ ).

Modelo utilizado

- La densidad de átomos de hidrógeno en  $R_0$  se fija en  $2 \times 10^5 \text{ m}^{-3}$ , decreciendo con  $R$  según:

$$n_H(R) \propto \exp\left(-\frac{R}{2R_0}\right).$$

- La velocidad circular está definida como:

$$v_c(R) = \left(\frac{R}{R_0}\right)^{0.1} \times 210 \text{ km/s}.$$

- La curva sinusoidal que define la velocidad observada es:

$$v_{\text{los}} = -v_c(R_0)\sin l,$$

y se encuentra justo fuera del límite de la región ocupada en el gráfico.

Interpretación del gráfico

1. Las regiones más oscuras (*alta profundidad óptica*) indican zonas con mayor densidad de gas.
2. Las trazas siguen un comportamiento sinusoidal, modificado por la densidad y la variación de la velocidad circular con  $R$ .
3. En  $l = 0^\circ$ , la velocidad radial es cero ( $v_{\text{los}} = 0$ ).
4. En  $l = \pm 90^\circ$ , la velocidad radial alcanza su máximo absoluto ( $v_{\text{los}} = \pm v_c(R_0)$ ).
5. La línea discontinua vertical a  $l = 20^\circ$  indica una sección analizada posteriormente.

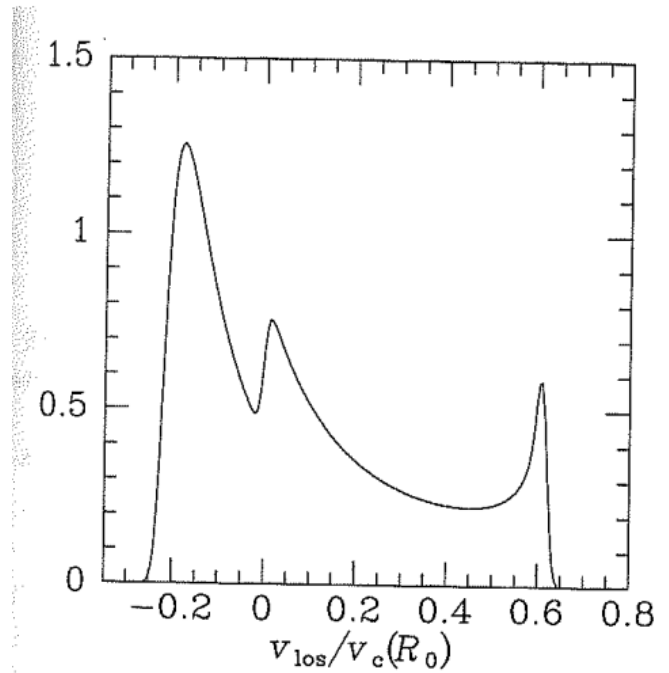


Fig. 5.

La Figura 5 muestra una sección de la superficie  $\tau(l, v)$ , correspondiente a la línea vertical punteada en la Figura 4, para una longitud de  $l = 20^\circ$ . En esta sección se analiza el comportamiento de la velocidad proyectada en la línea de visión,  $v_{\text{los}}$ , en función del radio  $R$  dentro del disco galáctico.

Explicación de la Figura y Fórmulas Relevantes

- La línea de visión es tangente al anillo con el radio más pequeño,  $r_t$ , dado por:

$$r_t = R_0 \sin l_1,$$

donde  $R_0$  es el radio galactocéntrico del Sol y  $l_1$  es la longitud galáctica.

- La velocidad terminal,  $v_{\text{los}}^{(t)}$ , se define en el punto tangente y está dada por:

$$v_{\text{los}}^{(t)}(l_1) = [\Omega(r_t) - \Omega_0]R_0 \sin l_1,$$

donde  $\Omega(r_t)$  es la velocidad angular del anillo más pequeño, y  $\Omega_0$  es la velocidad angular del Sol.

- Combinando estas expresiones, la curva de rotación  $v_c(r_t)$  se determina como:

$$v_c(r_t) = v_{\text{los}}^{(t)}(l_1) + v_c(R_0) \sin l_1,$$

donde  $v_c(R_0)$  es la velocidad de rotación del disco galáctico en el radio del Sol.

### Descripción Gráfica

El gráfico presenta  $v_{\text{los}}/v_c(R_0)$  en función de la velocidad proyectada en la línea de visión,  $v_{\text{los}}$ , normalizada a la velocidad de rotación local  $v_c(R_0)$ . En la figura, la velocidad terminal se aproxima a  $0.6v_c(R_0)$ .

### Consideraciones Adicionales

El análisis permite determinar la curva de rotación  $v_c(R)$  para radios  $R < R_0$ , utilizando los valores observados de  $v_{\text{los}}^{(t)}$  en función de la longitud galáctica  $l$ .

### Radii y distancias a partir de $(l, v)$ plot

La determinación de la curva de rotación  $v_c(R)$  en el disco galáctico a partir del gráfico  $(l, v)$  es compleja debido a las siguientes consideraciones:

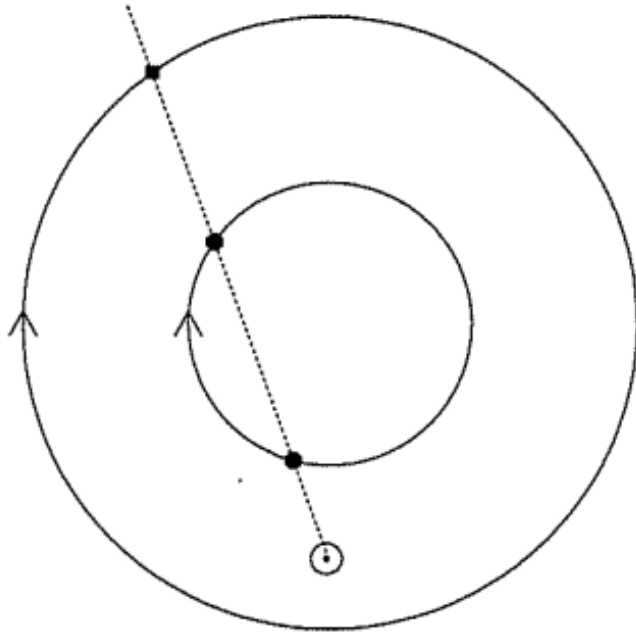


Fig. 6.

- Las líneas de visión para  $|l| < 90^\circ$  cortan cada anillo del disco interno dos veces, mientras que los anillos del disco externo son cruzados una sola vez.

- Para longitudes positivas ( $l > 0$ ):

- Los anillos interiores contribuyen con emisión a velocidades  $v > 0$ .
- Los anillos exteriores contribuyen con emisión a velocidades  $v < 0$ .

### Ecuaciones Fundamentales

La velocidad de rotación  $v_c(r_t)$  en el radio tangente  $r_t$  se obtiene mediante la expresión:

$$v_c(r_t) = v_{\text{los}}^{(t)}(l_1) + v_c(R_0) \sin l_1,$$

donde:

- $v_{\text{los}}^{(t)}(l_1)$  es la velocidad proyectada en la línea de visión en el punto tangente.
- $v_c(R_0)$  es la velocidad de rotación en el radio galactocéntrico del Sol,  $R_0$ .

Para la velocidad proyectada  $v_{\text{los}}(l)$ , se tiene:

$$v_{\text{los}}(l) = [\Omega(R) - \Omega(R_0)] R_0 \sin l,$$

donde:

- $\Omega(R)$  es la velocidad angular a un radio  $R$ .
- $\Omega(R_0)$  es la velocidad angular del Sol.
- $R_0$  es el radio galactocéntrico del Sol.

### Determinación de Parámetros

A partir de las ecuaciones anteriores:

- Es posible determinar  $v_c(R)$  sin necesidad de conocer la distancia al gas, utilizando las velocidades proyectadas  $v_{\text{los}}(l)$ .
- Una vez conocido  $v_c(R)$ , se puede inferir la función  $\Omega(R)$ .

### Ambigüedades en la Determinación de la Distancia

Dentro del círculo solar, para una línea de visión con longitud galáctica  $l$ , dos valores de la distancia  $d$  al gas son posibles debido a que la línea de visión cruza cada anillo dos veces:

- En algunos casos, esta ambigüedad se puede resolver observando el valor absoluto de la latitud galáctica  $|b|$ , ya que las extensiones más grandes en  $|b|$  corresponden al extremo más cercano.

### Movimiento no circular y el gráfico $(l, v)$

#### Expansión Axisimétrica

La Figura 7 muestra la traza en el gráfico  $(l, v)$  de un anillo situado dentro del círculo solar, que está en expansión radial además de rotar alrededor del centro galáctico.

#### Descripción de la Figura 7

- La expansión del anillo se combina con el movimiento de rotación, alterando la traza observada en el gráfico  $(l, v)$ .
- La velocidad de expansión es únicamente  $\frac{1}{20}$  de la velocidad de rotación circular típica del disco galáctico.
- La curva completa en la Figura 2 representa la traza del anillo en ausencia de expansión radial.

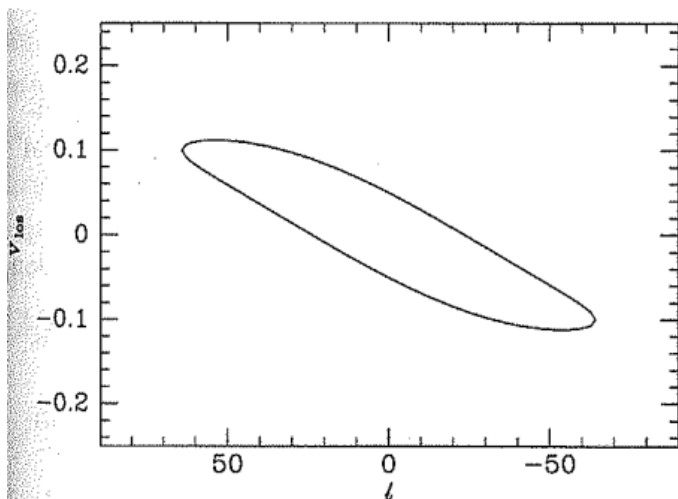
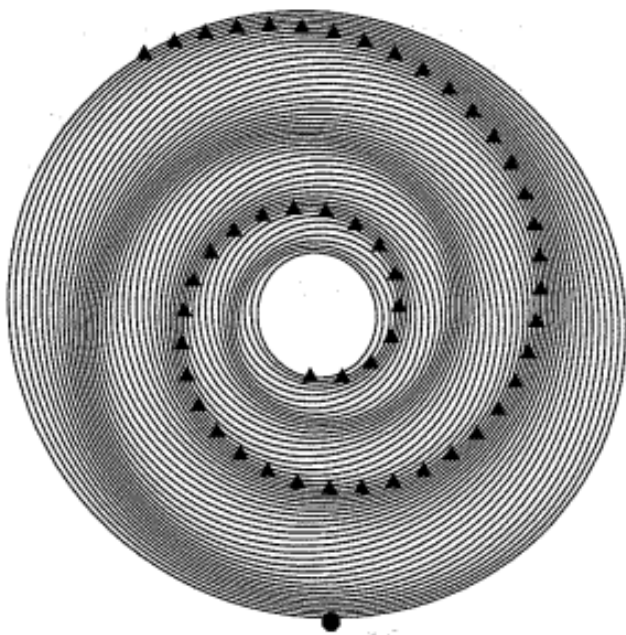


Fig. 7.

#### Interpretación de los Efectos

- En los extremos de la traza ( $l = \pm 90^\circ$ ), la expansión no tiene efecto observable sobre la velocidad proyectada.
- El efecto de la expansión es máximo en  $l = 0^\circ$ , que corresponde a la dirección hacia el centro galáctico.

#### Estructura Espiral



**Fig. 8.** Los brazos espirales se forman cuando las direcciones de los ejes largos de las órbitas ovaladas cambian sistemáticamente con el radio. El ángulo entre el eje horizontal y el eje largo de una órbita ovalada es proporcional al logaritmo de la longitud del eje largo. Aquí se supone que la velocidad circular es independiente del radio, y que el valor pico de  $v_R$  es para cualquier estrella el 10% de  $v_\phi$  en el marco de referencia rotante de la espiral.

El diagrama en la Figura 8 ilustra cómo se forman los brazos espirales en un disco galáctico. En el centro se encuentra el “sol”,

marcado con un punto. Las órbitas representadas son elípticas y están organizadas de tal manera que las posiciones de sus ejes mayores varían suavemente como una función del radio.

#### Teoría de la estructura espiral

La idea central de la teoría de la estructura espiral es que los brazos espirales se forman si las estrellas y las nubes de gas se mueven en órbitas elípticas cuyos ejes mayores cambian de dirección de manera suave. En la Figura 8, las órbitas ovaladas rotan más de  $540^\circ$  desde las más pequeñas hasta las más grandes.

Si las órbitas estuvieran uniformemente pobladas por nubes de gas, la densidad superficial sería mayor donde las órbitas se acercan unas a otras. Esto es evidente en las áreas donde los brazos espirales están más densamente poblados.

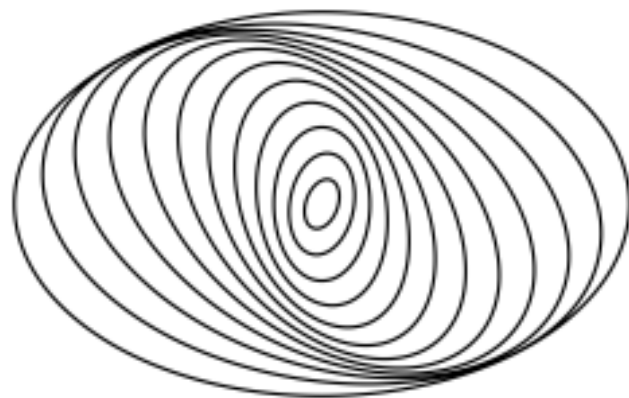


Fig. 9.

#### Cinemática del disco galáctico

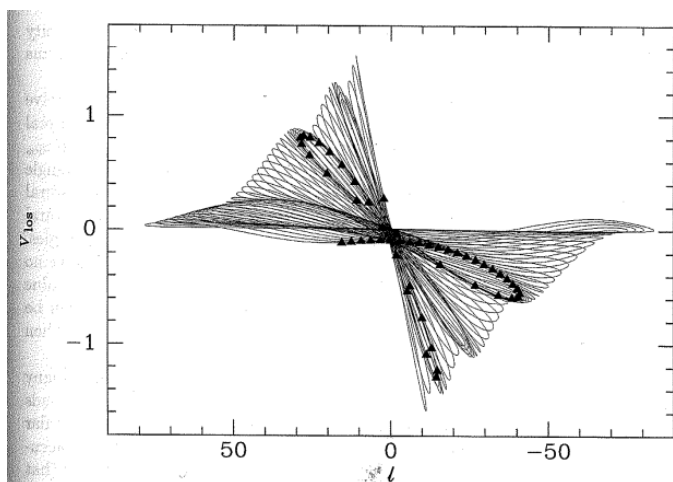
Cuando utilizamos la aproximación de epiciclos para modelar la cinemática de un disco de gas con un patrón espiral bien definido, obtenemos un gráfico  $(l, v)$  como el mostrado en la Figura 8. Este gráfico representa la relación entre:

- $l$ : La longitud galáctica o posición angular en el plano del disco.
- $v_{los}$ : La velocidad a lo largo de la línea de visión, también conocida como velocidad radial.

#### Descripción del gráfico $(l, v)$

Cada órbita ovalada en la Figura 8 se traduce en un trazo delgado, largo y diagonal en el gráfico  $(l, v)$ . A medida que se pasa de las órbitas más pequeñas a las más grandes:

- Las trazas de las órbitas en el gráfico  $(l, v)$  varían desde casi verticales hasta casi horizontales.



**Fig. 10.** El gráfico  $(l, v)$  obtenido al observar el disco mostrado en la Figura 8 desde el punto marcado como “sol”. Los brazos espirales de la Figura 8 provocan una concentración en el gráfico  $(l, v)$  a lo largo de curvas que se extienden desde el origen. Los triángulos marcan las imágenes de los puntos destacados en la Figura 8, que también están indicados por triángulos en esta gráfica.

- La extensión en  $l$  aumenta y la extensión en  $v_{\text{los}}$  disminuye.

Los brazos espirales en la Figura 8 se reflejan en el gráfico  $(l, v)$  como regiones densamente pobladas que siguen curvas características que parten del origen. Estas curvas corresponden a las regiones donde las órbitas ovaladas se superponen más.

### Random Motions (Movimientos aleatorios)

Sabemos que las nubes no se mueven en órbitas perfectamente circulares, ya que las nubes en cualquier ubicación dada tienen velocidades que se extienden a lo largo de unos pocos km/s. Además, dentro de una nube dada hay una dispersión en las velocidades de los átomos de H individuales. Cualitativamente, es fácil ver que esta dispersión de velocidades modificará los gráficos  $(l, v)$  al suavizarlos en velocidad.

Se presenta un análisis de la profundidad óptica,  $\tau$ , como función de la velocidad radial normalizada ( $v_{\text{los}}/v_c(R_0)$ ) para un disco de hidrógeno.

Figura 5

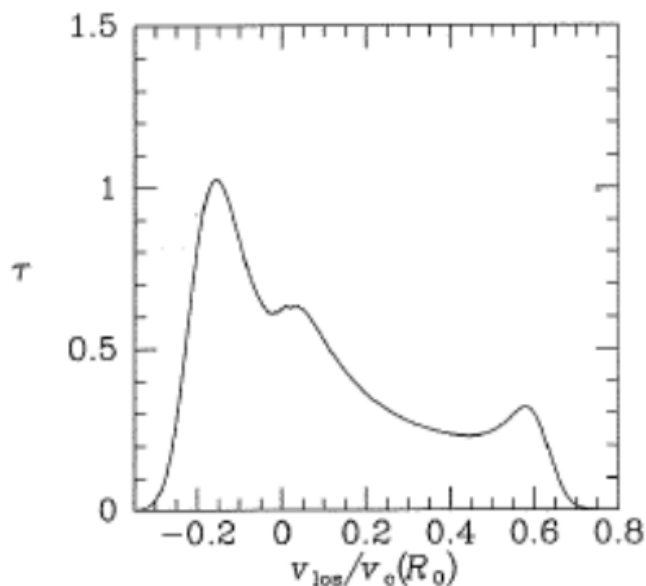
La profundidad óptica  $\tau$  se muestra para una sección de la superficie  $\tau(l, v)$  en una longitud galáctica fija ( $l = 20^\circ$ ). Este caso asume velocidades aleatorias insignificantes dentro del disco, mostrando los picos asociados a la densidad del hidrógeno.

Figura 11

Se examina el mismo caso que en la Figura 5, pero ahora considerando una dispersión de velocidad  $\sigma = 0.04v_c(R_0)$  (aproximadamente 8.4 km/s). Este modelo incluye velocidades aleatorias dentro del disco, ofreciendo un análisis más realista.

### Comparación

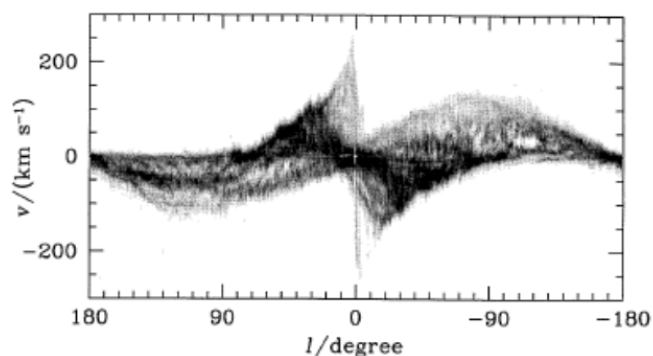
La comparación entre ambas figuras revela que las velocidades aleatorias suavizan y reducen significativamente los picos en  $\tau$ . Este efecto tiene implicaciones importantes para la interpretación de la distribución de hidrógeno en el disco galáctico.



**Fig. 11.**

### Relación con la Densidad de Hidrógeno

La profundidad óptica  $\tau$  está relacionada directamente con la densidad de hidrógeno a través de la expresión  $dN/dv_{\text{los}}$ . Las gráficas ilustran cómo esta relación varía al incluir o excluir el efecto de las velocidades aleatorias en la cinemática del disco.



**Fig. 12.**

### Gráfico de la Figura 12

Este gráfico muestra la temperatura de brillo originada por la línea de 21 cm del H I en el plano galáctico ( $b = 0$ ). Está representada en función de la longitud galáctica ( $l$ ) y la velocidad proyectada ( $v$ ). Los datos provienen del \*Leiden-Dwingeloo Survey\* y el complemento del hemisferio sur de la encuesta IAR de Bajaja et al.

### Características principales:

- Los “cuernos” del gráfico (en valores pequeños de  $|l|$ ) son mucho más tenues que los observados en la Figura 4.
- Esto se interpreta como una ausencia significativa de H I a radios galácticos  $R \lesssim 3$  kpc (correspondiente a  $|l| < 20^\circ$ ), ya que la Figura 4 asume una distribución uniforme de H I hasta el centro de la Galaxia.

#### Gráfico de la Figura 4

Esta figura es un mapa en escala de grises que representa la profundidad óptica en el plano  $(l, v)$ . Supone que la densidad de átomos de hidrógeno decrece exponencialmente con el radio galáctico  $R$ , y utiliza un perfil de velocidad circular basado en  $R$ .

##### Características principales:

- La amplitud de los senos que ajustan los bordes de la emisión es  $\sim 85\%$  de la velocidad circular local en el radio solar.
- En la Figura 12, esta amplitud es  $\sim 130$  km/s, lo que representa  $\sim 60\%$  de la velocidad circular local.

#### Diferencias significativas entre ambas figuras

- La Figura 12 indica que las observaciones no son lo suficientemente sensibles para detectar emisiones débiles a bajos radios galácticos.
- Sin embargo, análisis previos (Knapp & Tremaine, 1978) concluyen que el disco galáctico probablemente no se extiende más allá de  $R \approx 21$  kpc.

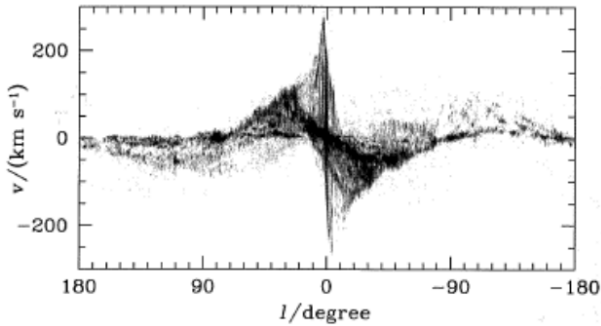


Fig. 13.

La Figura 13 muestra un diagrama  $(l, v)$  de la Vía Láctea en la línea de emisión de 2.6 mm del  $^{12}\text{CO}$ , utilizando datos de Dame et al. (1987) con mayor sensibilidad. El gráfico representa la intensidad de la línea promediada sobre una franja de  $\sim 4^\circ$  centrada en el plano galáctico.

#### Características principales

- La emisión del  $^{12}\text{CO}$  es más irregular que la observada en la línea de 21 cm (Figura 12), aunque ambas muestran características similares.
- En ambos gráficos, los envoltorios en  $(l > 0, v > 0)$  y  $(l < 0, v < 0)$  convergen hacia el origen formando “cuernos” prominentes.
- Los cuernos del  $^{12}\text{CO}$  están a mayores longitudes galácticas ( $|l| \approx 25^\circ$ ) y a velocidades ligeramente menores ( $|v| \approx 130$  km/s).

#### Interpretación de los datos

- Los cuernos y la franja diagonal de emisión que los conecta se interpretan como evidencia de un anillo molecular.
- Este anillo tiene un radio aproximado de  $R_0 \sin 25^\circ \approx 3.6$  kpc.

La Figura 14 muestra las velocidades terminales  $v_{\text{los}}^{(t)}$  en función de  $|l|$ , donde  $l$  es la longitud galáctica, para emisiones de H I (símbolos abiertos) y CO (símbolos llenos). Los datos se obtuvieron de varias fuentes:

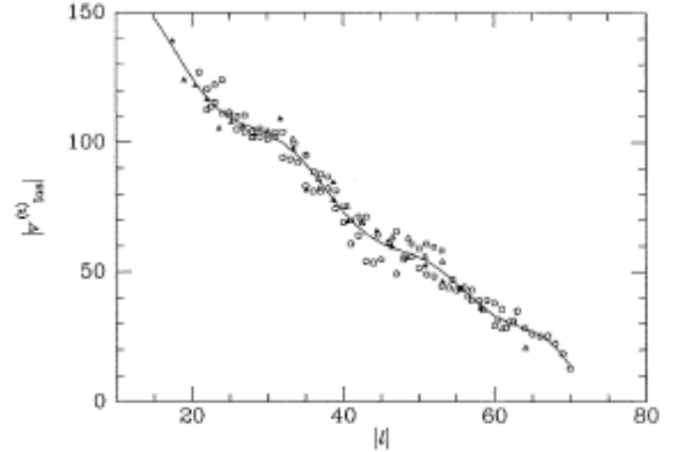


Fig. 14.

- $l > 0$ : Bania & Lockman (1984) (triángulos abiertos), Weaver & Williams (1973, 1974) (cuadrados abiertos) y Malhotra (1995) (triángulos llenos).
- $l < 0$ : Kerr et al. (1986) (pentágonos abiertos).

#### Características principales

- El gráfico representa las velocidades terminales medidas para diferentes regiones galácticas, con una fuerte correlación entre  $|l|$  y  $v_{\text{los}}^{(t)}$ .
- La curva ajustada combina una función lineal de  $|l|$  y una serie de coseno en  $|l|$ , lo que permite modelar la tendencia de los datos.
- Las mediciones de H I y CO coinciden bien en general, confirmando la validez del modelo cinemático adoptado.

#### Interpretación de los datos

Este análisis de velocidades terminales permite inferir propiedades dinámicas del disco galáctico, como la rotación diferencial y la distribución de masa en función del radio galáctico.

#### Distribuciones radiales de H I y CO

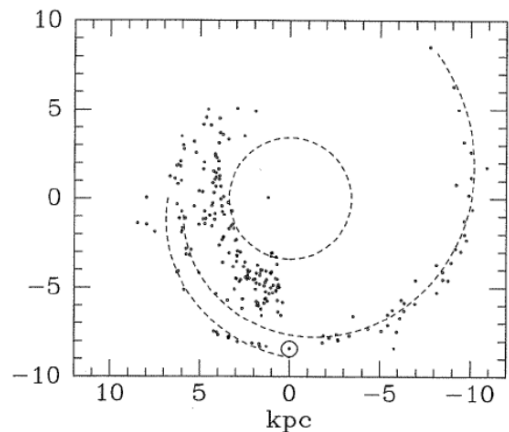


Fig. 15.

El gráfico muestra las posiciones estimadas de las nubes moleculares gigantes en la galaxia. El centro galáctico se encuentra en el origen de coordenadas y la posición del Sol está marcada con  $\odot$ . Una espiral logarítmica con un ángulo de paso de  $10^\circ$  representa el brazo de Sagitario-Carina. Otro segmento de espiral logarítmica indica el brazo de Orión-Cygnus. Un círculo punteado de radio  $0.4R_0$  destaca la distribución alargada de las nubes en el anillo molecular.

### Evidencia de estructura espiral

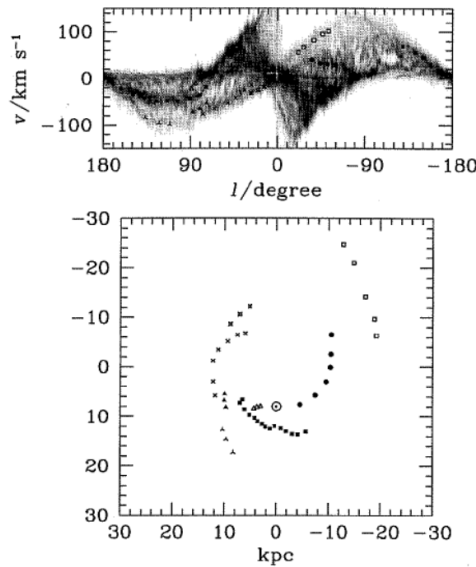


Fig. 16.

La figura 16 ilustra cómo los brazos espirales de la galaxia son mapeados desde el espacio de parámetros  $(l, v)$  al espacio real. A continuación, se describe el contenido de los paneles:

- **Panel superior:** Muestra una sección de la figura 12 con puntos que indican las características lineales más prominentes en el espacio  $(l, v)$ , donde  $l$  es la longitud galáctica en grados y  $v$  es la velocidad radial en km/s.
- **Panel inferior:** Presenta cómo estos puntos se mapean al espacio real, asumiendo que el hidrógeno sigue órbitas circulares con  $v_c = 220$  km/s y  $R_0 = 8.5$  kpc.

El centro galáctico se encuentra en el origen  $(0, 0)$ , mientras que la ubicación del Sol está marcada con el símbolo  $\odot$ .

### Distribución vertical de HI y CO

Este apartado analiza la distribución vertical de trazadores como el hidrógeno neutro (HI) y el monóxido de carbono (CO) en el medio interestelar (ISM) de la galaxia.

- **Plano de referencia:** Se toma como referencia el plano galáctico ( $b = 0$ ) y se desea determinar  $z_c$ , el valor central de  $z$  para las coordenadas  $(R, \phi)$ , donde la densidad del trazador alcanza su máximo. También se define  $z_{1/2}$  como la altura a la cual la densidad del trazador se reduce a la mitad de su valor en  $z = z_c$ .
- **Medición de la extensión vertical:** Es crucial evitar ambigüedades en la distancia al medir las emisiones observadas.

Para puntos en el disco galáctico con  $R < R_0$ , los datos  $(l, v)$  en la curva de velocidad terminal son los más adecuados para estudiar la estructura vertical del ISM.

- **Más allá del círculo solar:** Para  $R > R_0$ , cada punto  $(l, b, v)$  corresponde a una única ubicación en la Vía Láctea. Esto simplifica la determinación de la estructura vertical, siempre que la curva de velocidad circular haya sido determinada.
- **División del disco galáctico:** El disco de la Vía Láctea se divide en tres regiones:
  1. *Disco interno:*  $R < 3$  kpc.
  2. *Disco medio:*  $3 \text{ kpc} < R < R_0$ .
  3. *Disco externo:*  $R > R_0$ .

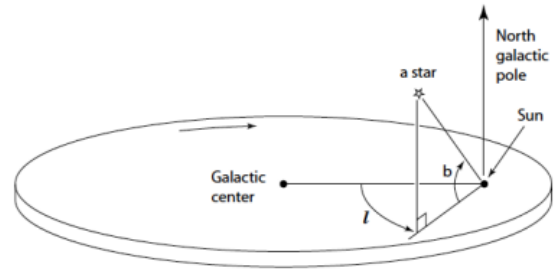
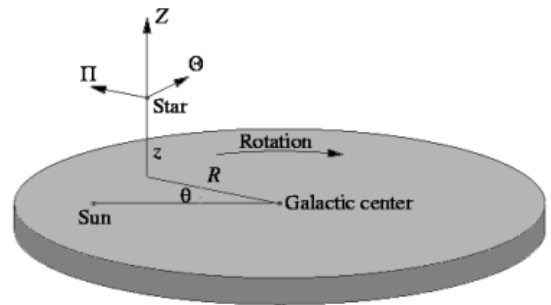


Fig. 17.

### Disco medio

El disco medio de nuestra galaxia es una estructura fundamental que alberga la mayor parte de la formación estelar. A pesar de su gran extensión, este disco presenta una característica notable: es extremadamente plano.

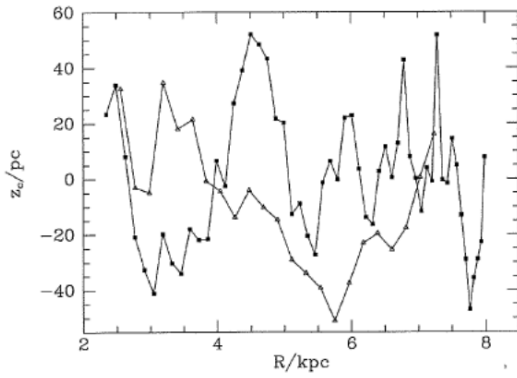
### Planitud del Disco Medio

Al analizar la distribución de trazadores como el monóxido de carbono (CO), se observa que la altura  $z$  a la que se concentra este gas define una superficie casi planar para distancias al centro galáctico mayores a 3 kpc. Matemáticamente, esta relación puede expresarse como:

$$z = aR + b \quad (2)$$

Donde  $a$  y  $b$  son constantes que dependen de las características del disco.





**Fig. 18.**

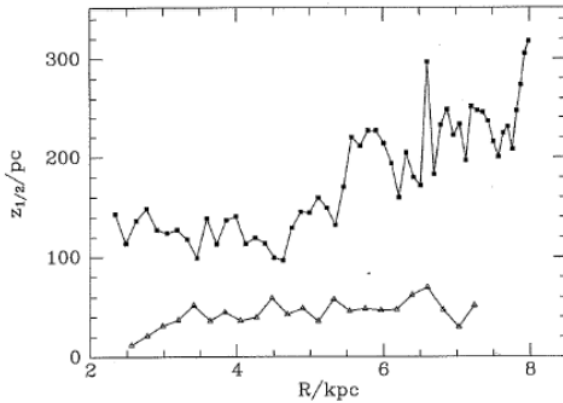
### Ondulaciones en el Disco

Si bien la planitud es una característica dominante, el análisis detallado revela pequeñas oscilaciones en la altura del disco. Estas ondulaciones sugieren la presencia de procesos dinámicos que perturban ligeramente esta estructura ideal.

La Figura 18 muestra las desviaciones de las capas de HI y CO respecto al plano  $z = 0$  en función del radio galactocéntrico  $R$ , para  $3 \text{ kpc} < R < R_0$ . Se presentan los valores de  $z_c$  estimados de los puntos tangentes  $l > 0$ :

- Cuadrados: datos para HI.
- Triángulos: datos para CO.

Estas oscilaciones son coherentes y tienen una amplitud  $\text{RMS} \sim 30 \text{ pc}$ , lo que corresponde a menos del 1% de  $R_0$ . Ambas capas muestran correlación entre los puntos adyacentes y oscilan aproximadamente en fase, lo que sugiere un proceso dinámico que corruga el disco. No obstante, el origen de este proceso aún no está claro.



**Fig. 19.** Grosor a media intensidad  $z_{1/2}$  de las capas de HI y CO en función de  $R$ .

### Interpretación

- El grosor de la capa de CO aumenta lentamente con  $R$ , pasando de  $\sim 35 \text{ pc}$  a  $R = 3 \text{ kpc}$  a  $\sim 70 \text{ pc}$  en  $R = R_0$ .
- La capa de HI es aproximadamente tres veces más gruesa que la capa de CO en un radio dado.
- Este comportamiento sugiere que el medio interestelar (ISM) en el disco medio refleja un balance entre:

- La gravedad, que tiende a atraer las nubes hacia el plano ecuatorial.
- Las energías asociadas al campo magnético interestelar, los rayos cósmicos y el movimiento aleatorio de las nubes, que tienden a empujarlas fuera del plano.

### Dispersión de Velocidad de las Nubes

#### Descripción

Mediante la modelización de los movimientos aleatorios en la estructura del diagrama  $(l, v)$  cerca de la curva de velocidad terminal, Malhotra (1995) mostró que los movimientos a lo largo de la línea de visión de las nubes de HI pueden caracterizarse por una dispersión de velocidad:

$$\sigma_{\text{HI}} = 9 \pm 1 \text{ km s}^{-1},$$

independiente de  $R$  para  $0.3 \lesssim R/R_0 < 1$ . Esta dispersión concuerda bien con:

- Las dispersiones de velocidad observadas en nubes de HI a altos valores de latitud galáctica  $|b|$  (Merrifield, 1993).
- Las mediciones de los anchos de las líneas de 21 cm en galaxias vistas de frente, como se mencionó anteriormente.

En la Vía Láctea, la línea de visión suele encontrarse dentro del disco, mientras que en una galaxia vista de frente, es perpendicular al disco. Por ello, parece probable que la dispersión de velocidad de las nubes en todas las galaxias sea casi isotrópica.

### Balance Dinámico

Si la atracción gravitatoria sobre las nubes de HI hacia el plano galáctico fuera equilibrada únicamente por una dispersión de velocidad de  $9 \text{ km s}^{-1}$  perpendicular al plano, se puede demostrar que el grosor de la capa de HI sería aproximadamente un tercio del actual. Este cálculo subraya la importancia de las presiones magnéticas y de rayos cósmicos en la dinámica de la capa de HI.

### Disco exterior

Se ha observado que la mayoría de los discos galácticos presentan una deformación o curvatura en sus regiones externas. Nuestra propia galaxia, la Vía Láctea, no es una excepción. De hecho, la Vía Láctea fue la primera galaxia en la que se detectó esta deformación. Gracias a los datos obtenidos en la longitud de onda de 21 centímetros (emitida por el hidrógeno neutro) para el hemisferio sur, a mediados del siglo XX (Burke 1957, Kerr 1957, Westerhout 1957), se pudo evidenciar claramente esta curvatura en el disco galáctico.

Nuestra posición dentro de la Vía Láctea resulta ser ideal para estudiar esta deformación en detalle. Desde los primeros trabajos pioneros de Oort, Kerr y Westerhout (1958 y 1960), numerosos investigadores han analizado esta característica del disco galáctico. Uno de los estudios más recientes fue realizado por Diplás y Savage (1991), quienes utilizaron el sondeo de hidrógeno neutro de Stark y colaboradores (1992).

La Figura 20 presenta una representación gráfica de la deformación del disco exterior de la Vía Láctea, específicamente en las intersecciones de la capa de hidrógeno neutro (HI) con cilindros de diferentes radios. Este tipo de representación nos permite visualizar la estructura tridimensional del disco y cuantificar la magnitud y forma de la deformación.



### Descripción de la Figura

- La figura muestra cuatro paneles, cada uno correspondiente a un cilindro de radio diferente (12, 16, 20 y 24 kpc). En cada panel, se representa la densidad de hidrógeno neutro en función de la coordenada azimutal ( $\phi$ ) y la distancia perpendicular al plano del disco ( $z$ )
- Características clave de la deformación:
  - Inicio de la deformación: La deformación del disco se hace evidente a partir de un radio de 16 kpc.
  - Forma de la deformación: Para radios menores a 17 kpc, la deformación puede aproximarse a una curva senoidal cuya amplitud aumenta linealmente con el radio.
  - Asimetría: Más allá de 17 kpc, se observa una asimetría pronunciada entre las regiones con  $\phi > 0$  y  $\phi < 0$ .
  - Aproximación matemática: Para radios mayores a 11 kpc, la deformación se puede aproximar mediante la siguiente ecuación:

$$z_c = \frac{R/\text{kpc} - 11}{6} \sin \phi + 0.3 \left( \frac{R/\text{kpc} - 11}{6} \right)^2 (1 - \cos 2\phi)$$

### Intepretación

- La deformación del disco exterior de la Vía Láctea es significativa y presenta una estructura compleja.
- La asimetría observada sugiere la influencia de procesos físicos aún no completamente comprendidos.
- La posición del Sol cerca de la línea de nodos de la deformación explica por qué no observamos una deformación tan pronunciada en nuestra vecindad solar.

### Aumento del Espesor de la Capa de Hidrógeno Neutro

Tenemos que para el análisis del comportamiento del espesor de la capa de hidrógeno neutro (HI) en el disco galáctico a medida que aumenta la distancia radial ( $R$ ) desde el centro galáctico.

#### Observaciones clave:

- Incremento continuo: El espesor de la capa de HI aumenta de manera continua a medida que nos alejamos del centro galáctico, tanto para radios menores como mayores al radio de referencia ( $R_0$ ).
- Aceleración del incremento: Este aumento se acelera significativamente para radios mayores a  $R_0$ .
- El espesor de la capa de HI se incrementa desde aproximadamente 250 parsecs en  $R_0$  hasta cerca de 600 parsecs a una distancia de  $2R_0$ , y continúa aumentando a valores aún mayores para radios más grandes.
- Este aumento en el espesor de la capa de HI tiene importantes implicaciones físicas, ya que está directamente relacionado con el equilibrio hidrostático entre la fuerza de gravedad que atrae el gas hacia el plano galáctico y la presión del medio interestelar (ISM) que lo empuja hacia afuera.
- El aumento del espesor de la capa de HI con el radio proporciona una medida directa de la masa total cerca del plano galáctico en función de la distancia radial. Este resultado es de gran interés para comprender la distribución de masa en la galaxia y los procesos físicos que gobiernan la estructura del disco galáctico.

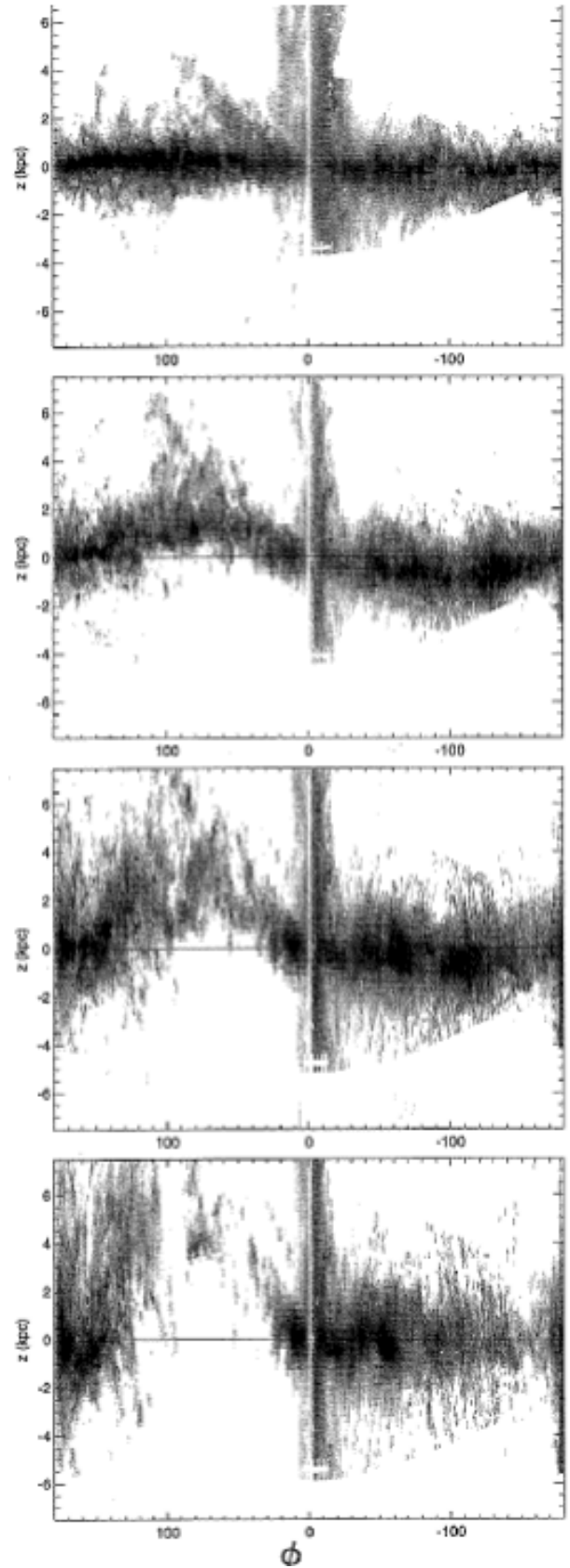


Fig. 20.

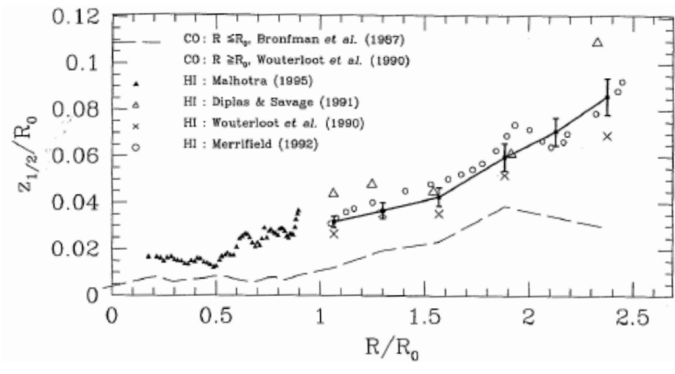


Fig. 21.