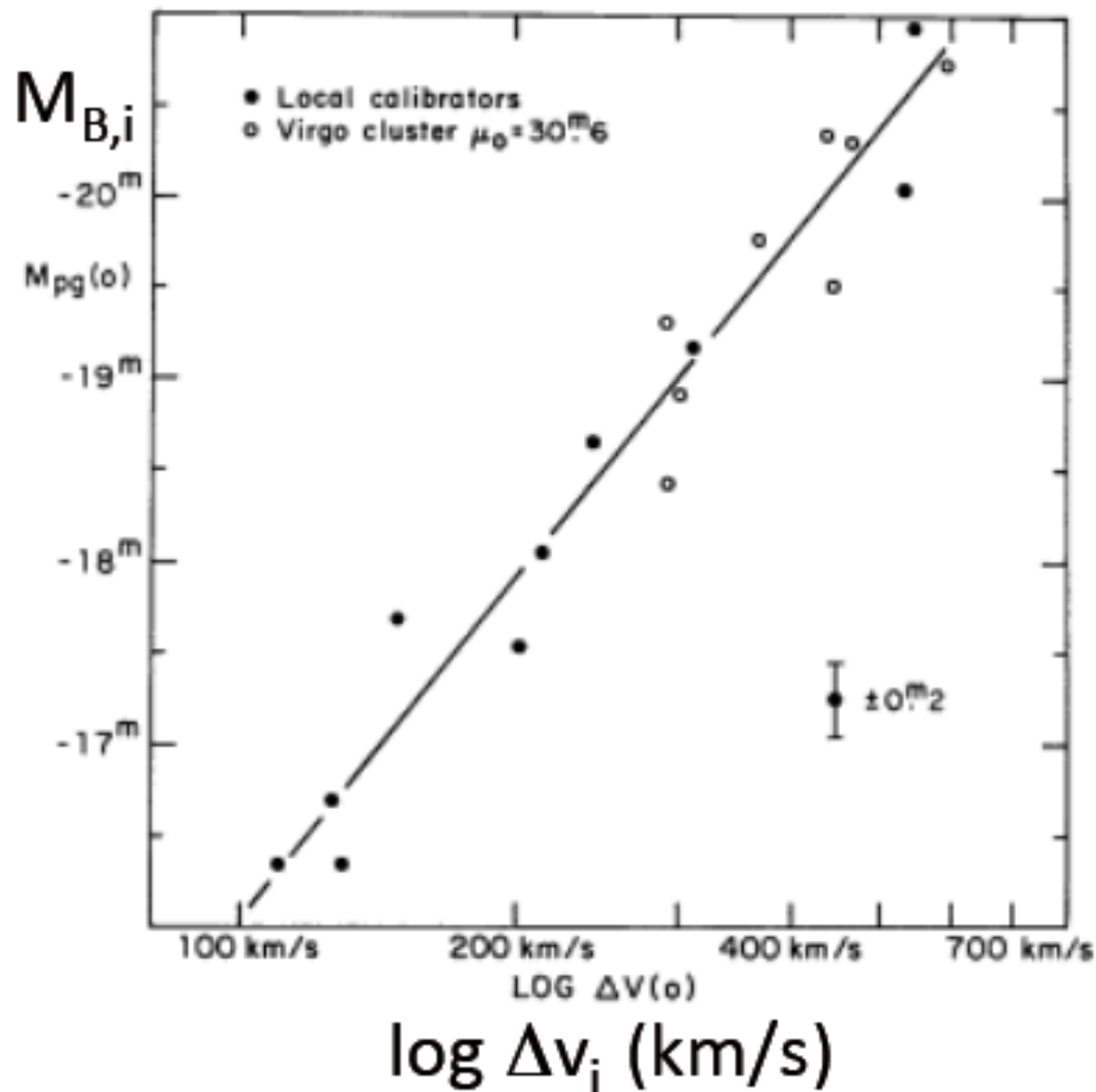


Cinemática de discos: Relación de Tully-Fisher

Clase 13

SG 5.3.3, Schnider 3.4.1 CO p968-972

Relación Tully-Fisher



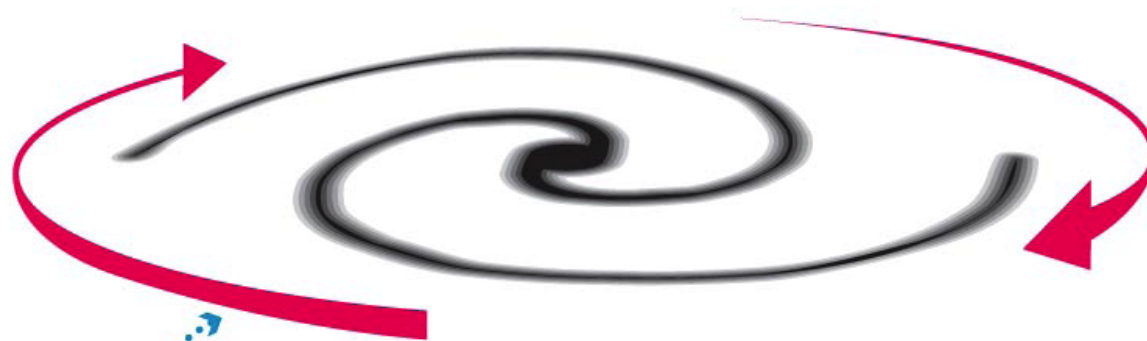
Tully & Fisher 1977, AA, 54, 661

Relación Tully-Fisher tradicional: Buena correlación entre **la luminosidad** de la galaxia (magnitud absoluta) y su **velocidad máxima de rotación** (o ancho de las líneas espectrales, corregido para la inclinación)

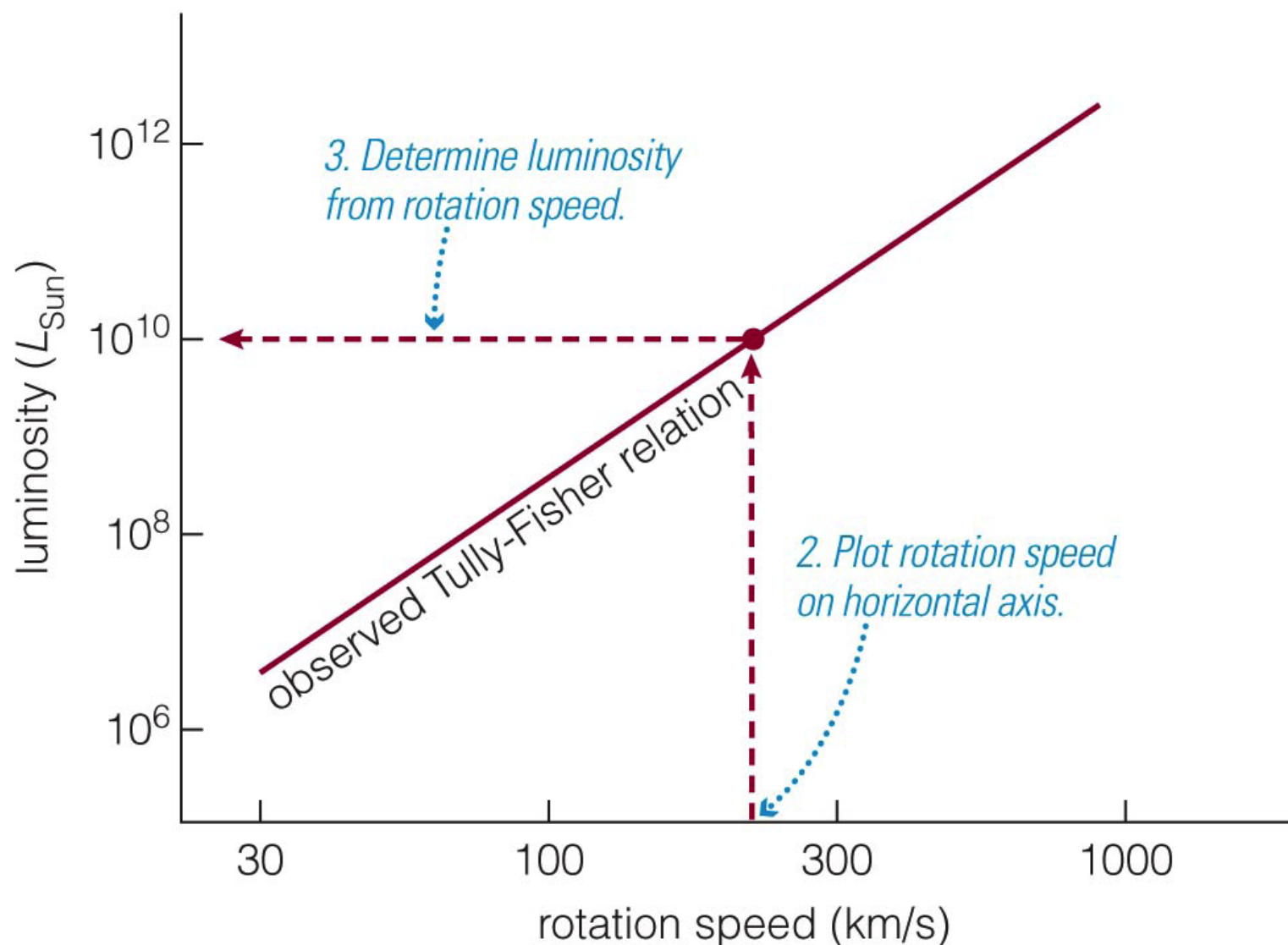
Importancia de la relación TF:

1. Método de determinar la distancia
2. La correlación estrecha entre la luminosidad y la velocidad de rotación máxima. Tiene importantes **implicaciones para la estructura y formación de las galaxias** (implica una coordinación poco comprendida entre la materia oscura y la materia bariónica)

Uso de TF para obtener L y la distancia



1. Measure rotation speed.



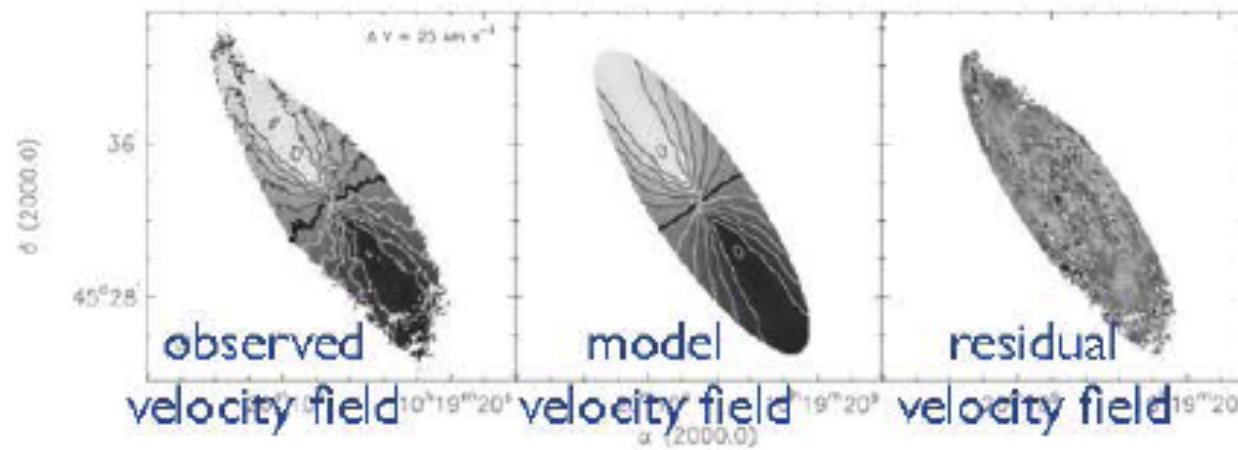
- **Medir** la máxima Velocidad de rotación v_{\max} o ancho global de las líneas de HI: ΔV o W_{20}
- **Medir** la inclinación i (para corregir la velocidad de Doppler observada y transformarla en velocidad galactocéntrica de rotación)

$$V_{\max,i} = v_{\max} / \sin i$$
- **Predecir** M (o luminosidad L) de la relación T-F conocida
- **Medir** m (o flujo f)
- Determinar la distancia desde

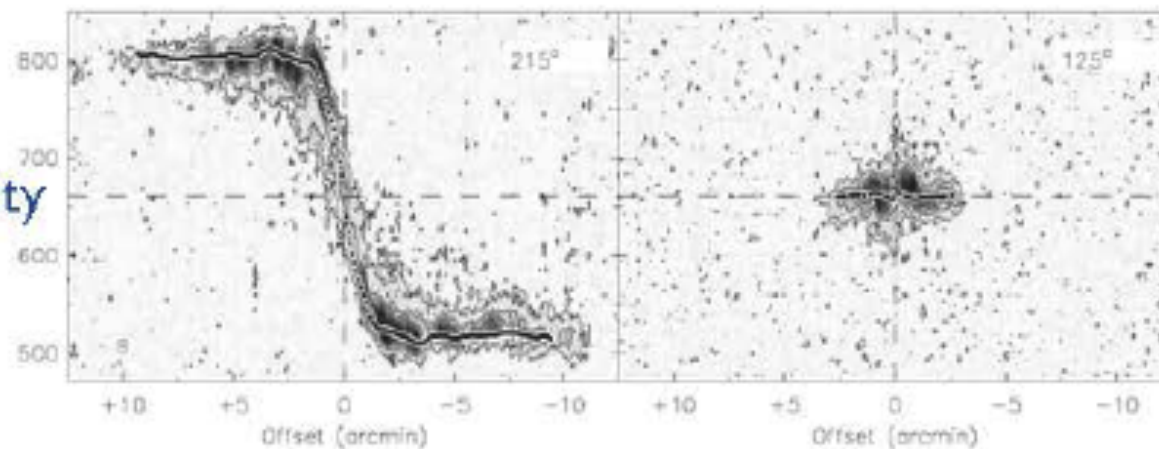
$$d(\text{pc}) = 10^{[(m - M) / 5] + 1}$$
 o

$$d = [L / 4\pi f]^{1/2}$$

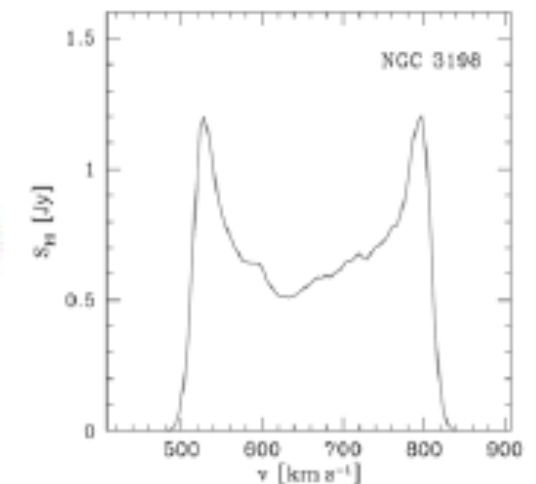
Measuring v_{max} by modelling HI velocity field



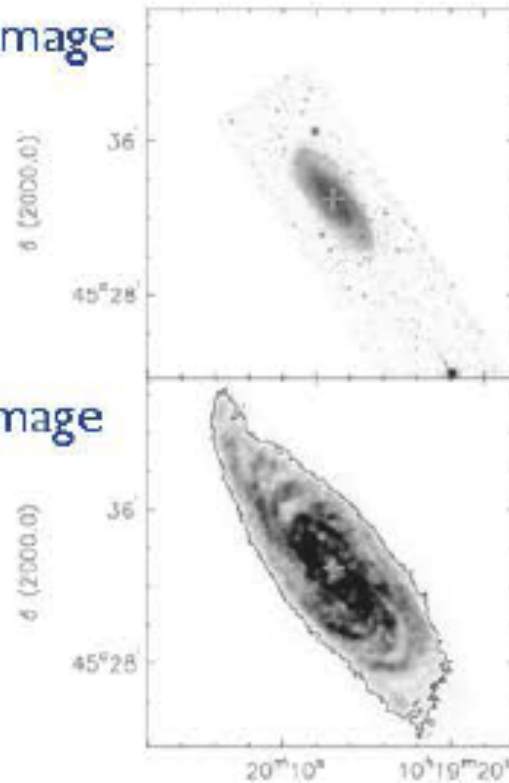
major axis
position-velocity
diagram



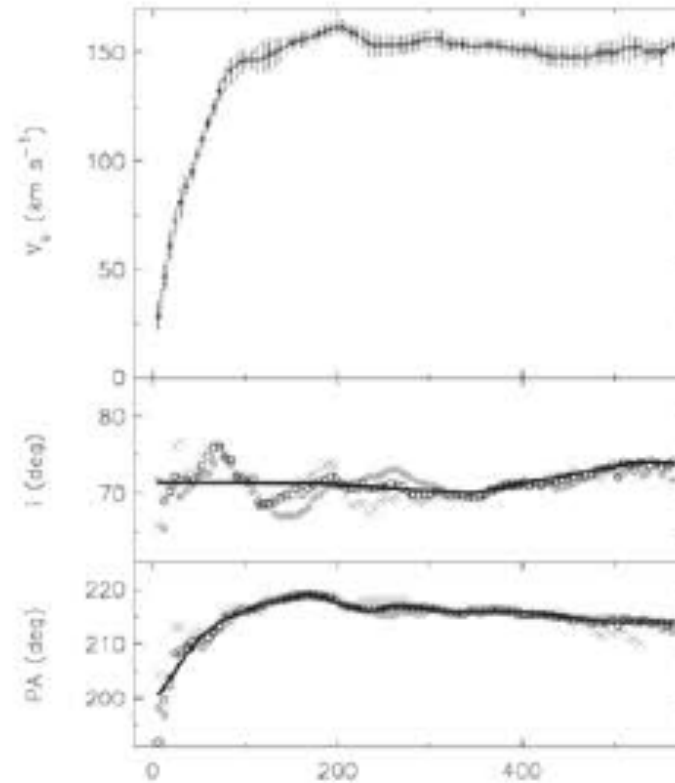
minor axis
position-velocity
diagram



optical image



21cm image



rotation curve

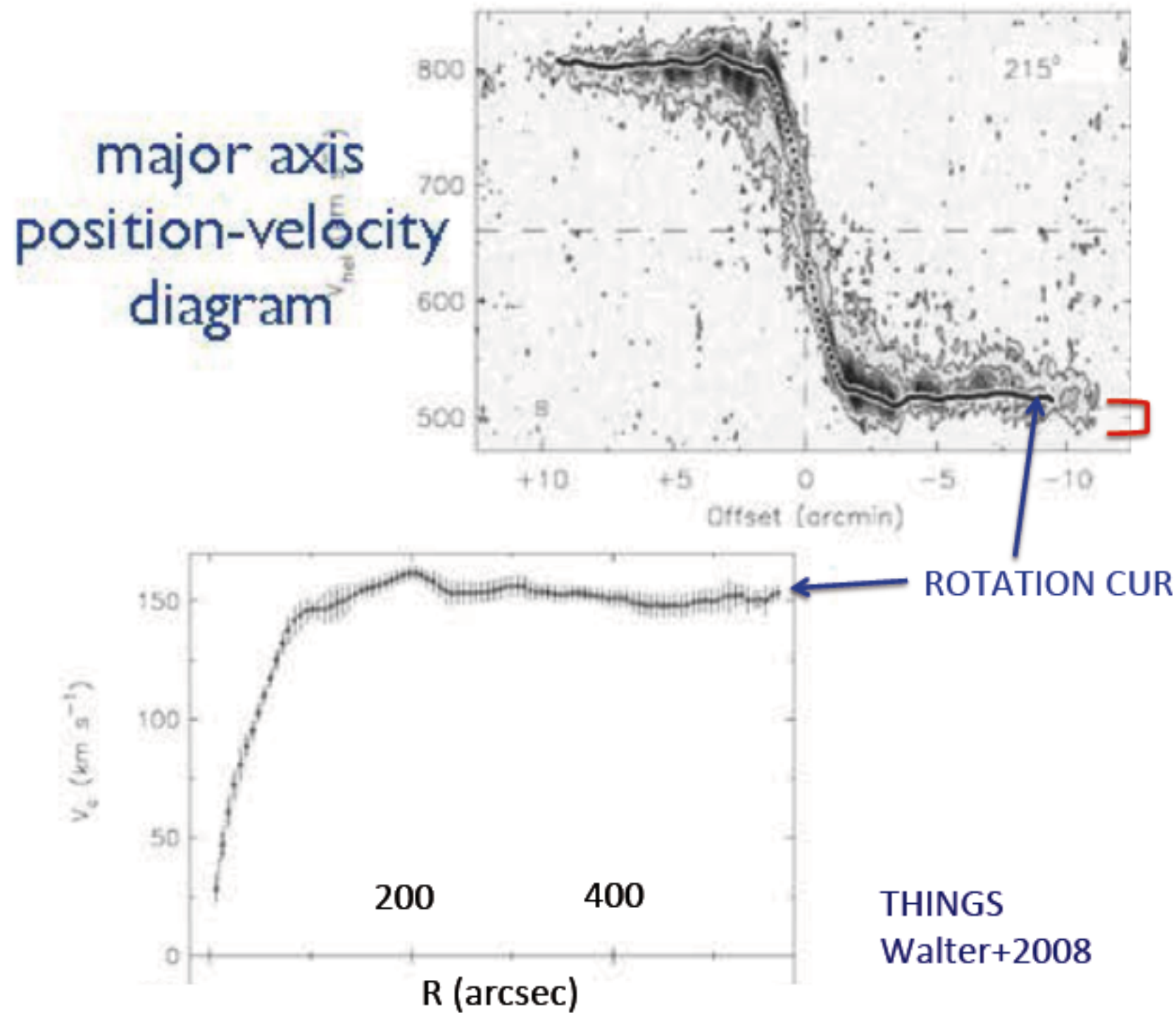
inclination

position angle

global spectrum

spiral NGC 3198
THINGS
Walter+2008

Diagrama velocidad espacial de HI & curva de rotación de la galaxia espiral NGC 3198

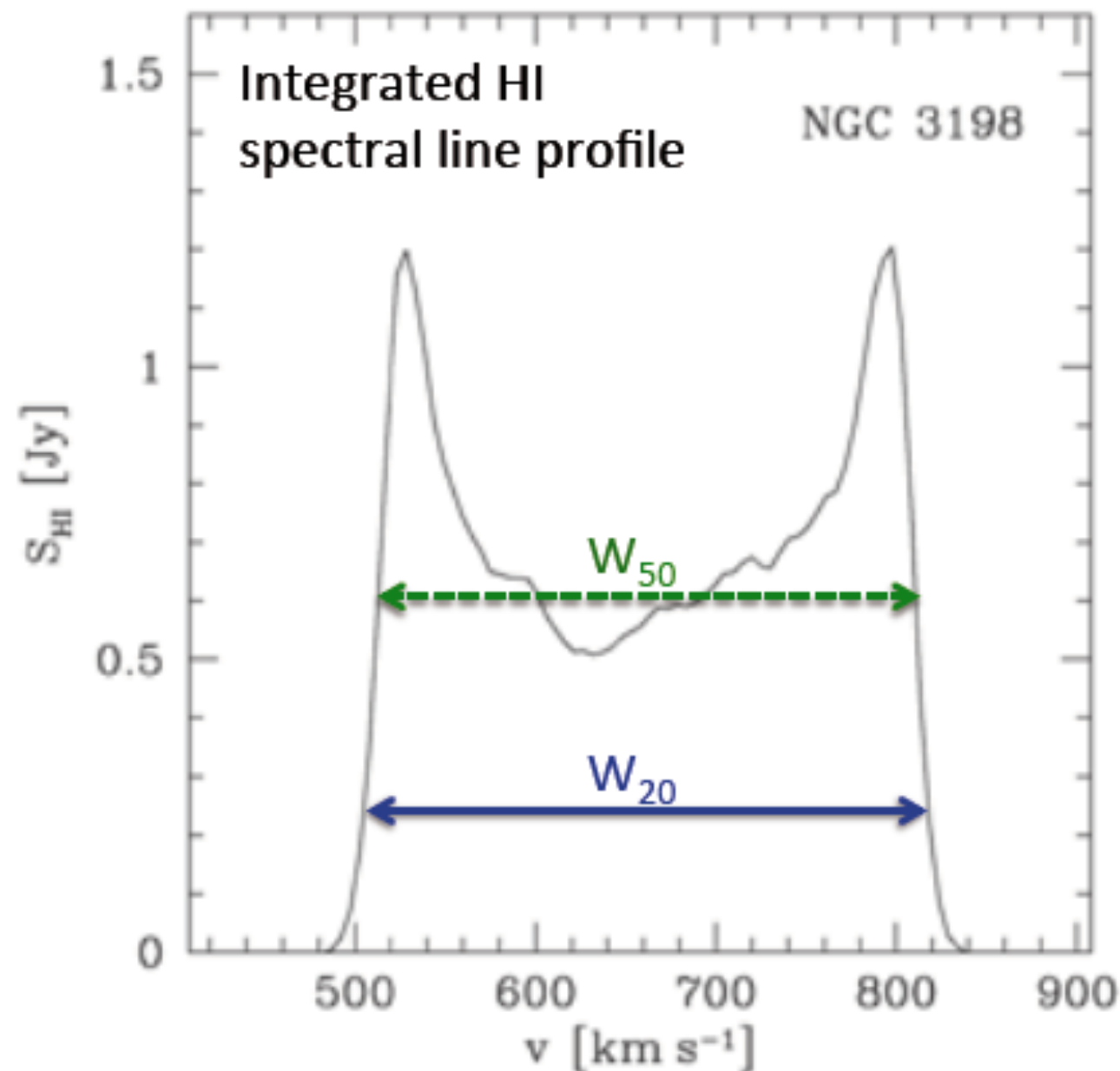


HI gas con velocidades más grandes de la velocidad de rotación V_{rot} debido a turbulencias /dispersión/ flujos en los brazos espirales/“outflows”



Medición del ancho del perfil HI

La mayoría de los perfiles HI son de “dobles cuernos” ya que las curvas de rotación son aproximadamente planas y generalmente hay mucho gas HI en las partes externas de las galaxias.



W_{20} : Ancho de línea HI medida a 20% de la intensidad máxima HI

W_{50} : Ancho de línea HI medida a 50% de la intensidad máxima HI

W_{20} sólo un poco mayor que W_{50} pero generalmente mejor indicador de V_{max}

Medir el ancho de línea global (normalmente HI) o la máxima velocidad de rotación (a partir de las curvas de rotación ópticas H_{alpha}, CO, HI)

¿Cómo se relaciona el ancho de la línea de HI con la velocidad de rotación máxima?

$$\Delta v_i = (W_{20} - v'_{\text{corr}}) / \sin i = 2 v_{\text{max}} / \sin i = 2 v_{\text{max},i}$$

Todas estas cantidades son independientes de la distancia

W_{20} HI medido a 20% de la intensidad máxima de HI

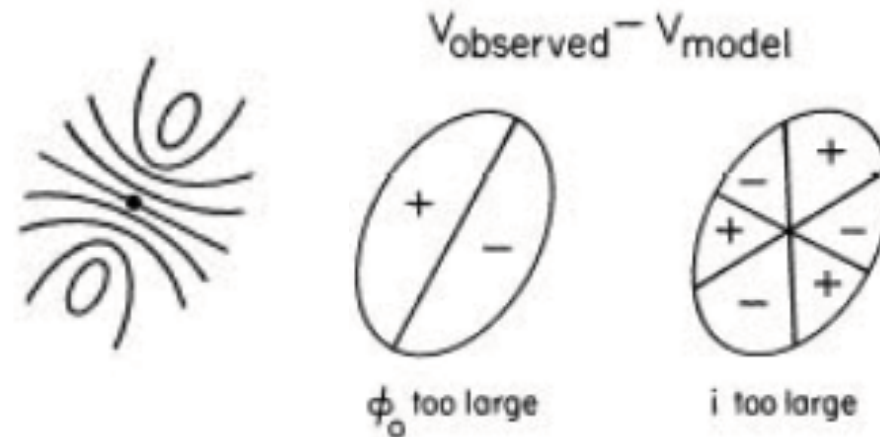
v'_{corr} - para movimientos no circulares (por ejemplo, turbulencia, movimiento en brazo espiral); $v'_{\text{corr}} \sim 3,6 \sigma = 3,6 (10 \text{ km / s}) \sim 36 \text{ km / s}$

v_{max} - velocidad de rotación máxima observada (sin corregir para la inclinación)

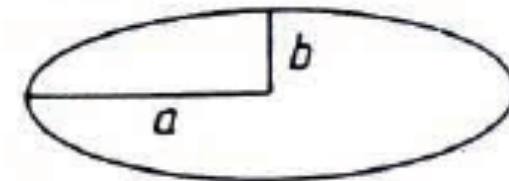
$v_{\text{max},i}$ - velocidad de rotación máxima observada (corregida para la inclinación)

Medir la inclinación de la galaxia

i. Modelo del campo de velocidad



ii. Medir la razón axial b/a de las isofotas exteriores de imagen NIR/óptico



$\cos i = (b/a)$ para un disco delgado



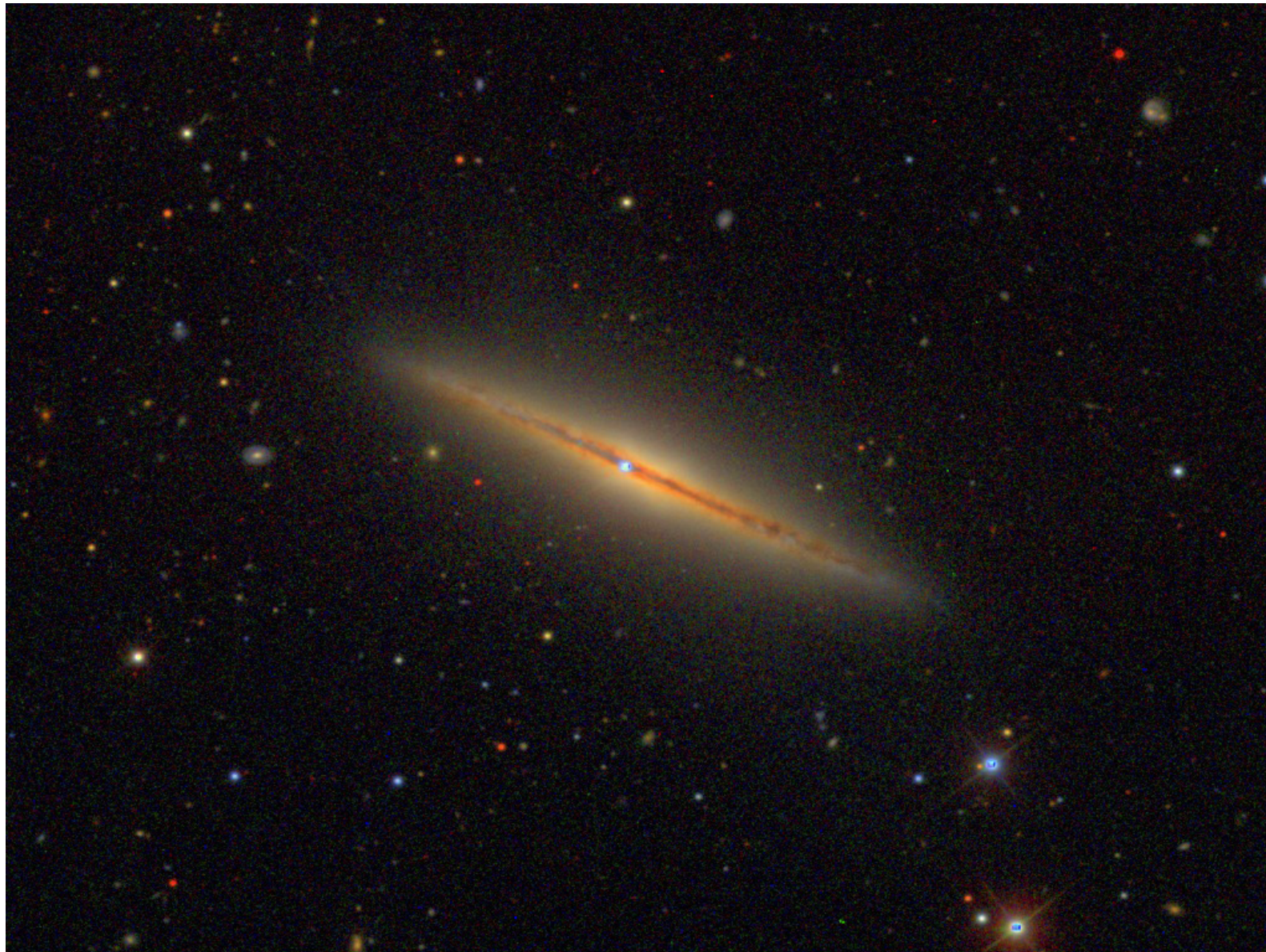
$q = y/x$

$$\cos i = \sqrt{\frac{(b/a)^2 - q^2}{1 - q^2}}$$

si razón axial intrínseco = q
cuando la galaxia es edge-on para galaxias
con bulbo o disco más grueso

Medir la magnitud aparente (flujo)

- Corregido para la extinción del polvo dentro de la galaxia y de la Vía Láctea (más pequeñas correcciones en el NIR que para el óptico)



La dispersión y la pendiente de TF son de gran interés

¿Qué tan bueno es un indicador de distancia TF?

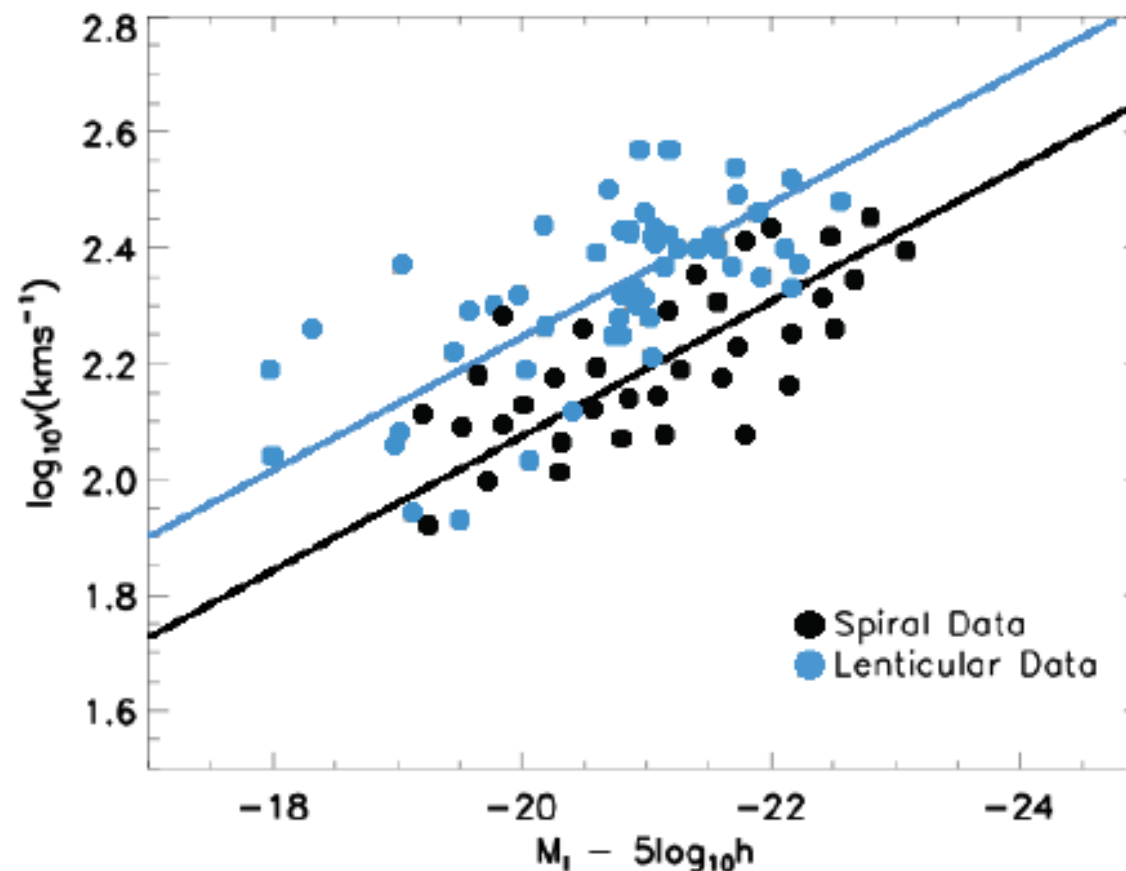
Para la banda **B** la dispersión de $1\sigma \sim 0,6 \text{ mag}$ $\rightarrow \sim 30\%$ error en la distancia

Para la banda **I** la dispersión de $1\sigma \sim 0,3 \text{ mag}$ $\rightarrow \sim 15\%$ error en la distancia

La menor dispersión es en NIR (0,9-2 μm), la peor en la óptica (0,4-0,7 μm) y de IR mediano (3-5 μm) debido a mayores variaciones en M^*/L . La banda **I** (0,9 μm) es mejor para minimizar los efectos de poblaciones estelares jóvenes en TF. Estrellas OBA de MS producen mucha luz en el óptico pero menos en NIR y mid-IR. Estrellas de TPAGB (estrella de la rama gigante asimptótica donde hay pulsaciones térmicas) se hacen importantes a 3-5 μm , menos importante a 1 μm .

15% de errores de distancia no son lo suficientemente buenos para medir distancias relativas a galaxias dentro de grupos o clusters

Desplazamiento entre espirales y S0s en la relación TF tradicional



Bedregal+2006
Courteau+2007

Las líneas de mejor ajuste para espirales y S0s tienen la misma pendiente, pero están separadas por $\Delta I \approx 1,5$. Así ambos siguen una relación de Tully-Fisher pero con diferentes constantes (puntos cero). Puede usar TF para estimar distancias tanto a espirales como a S0s, si conoce los puntos cero para ambos.

Ambos siguen el mismo TF bariónico sin desplazamiento pero tienen diferentes poblaciones estelares. $M/L \sim 1,5$ para espirales y $M/L \sim 6$ para S0s ($\Delta I = 1,5$ corresponde a un factor de 4 en luminosidad). Esto sugiere que los S0 fueron galaxias espirales una vez, pero ahora están dominadas por estrellas rojas viejas

Misterios de Tully-Fisher

¿Por qué $v_{\text{max}}^4 \sim L$?

¿Por qué las galaxias LSB obedecen a la relación TF?

**Vamos a predecir qué relación podríamos esperar
Entre L , v_{max} para galaxias de discos ...**

Explicación de la relación TF

Explaining the Tully–Fisher Relation. The shapes of the rotation curves of spirals are very similar to each other, in particular with regard to their flat behavior in the outer part. The flat rotation curve implies

$$M = \frac{v_{\max}^2 R}{G},$$

(3.15)

where the distance R from the center of the galaxy refers to the flat part of the rotation curve. The exact value is not important, though, if only $v(R) \approx \text{const.}$ By re-writing (3.15),

$$L = \left(\frac{M}{L}\right)^{-1} \frac{v_{\max}^2 R}{G}, \quad (3.16)$$

and replacing R by the mean surface brightness $\langle I \rangle = L/R^2$, we obtain

$$L = \left(\frac{M}{L}\right)^{-2} \left(\frac{1}{G^2 \langle I \rangle}\right) v_{\max}^4. \quad (3.17)$$

This is the Tully–Fisher relation *if* M/L and $\langle I \rangle$ are the same for all spirals. The latter is in fact suggested by Freeman’s law (Sect. 3.3.2). Since the shapes of rotation curves for spirals seem to be very similar, the radial dependence of the ratio of luminous to dark matter may also be quite similar among spirals. Furthermore, since the red or infrared mass-to-light ratios of a stellar population do not depend strongly on its age, the constancy of M/L could also be valid if dark matter is included.

The Baryonic Tully–Fisher Relation. The above “derivation” of the Tully–Fisher relation is based on the assumption of a constant M/L value, where M is the total mass (i.e., including dark matter). Let us assume that (i) the ratio of baryons to dark matter is constant, and furthermore that (ii) the stellar populations in spirals are similar, so that the ratio of stellar mass to luminosity is a constant. Even under these assumptions we would expect the Tully–Fisher relation to be valid only if the gas does not, or only marginally, contribute to the baryonic mass. However, low-mass spirals contain a significant fraction of gas, so we should expect that the Tully–Fisher relation does not apply to these galaxies. Indeed, it is found that spirals with a small $v_{\text{max}} \lesssim 100$ km/s deviate significantly from the Tully–Fisher relation – see Fig. 3.21(a).

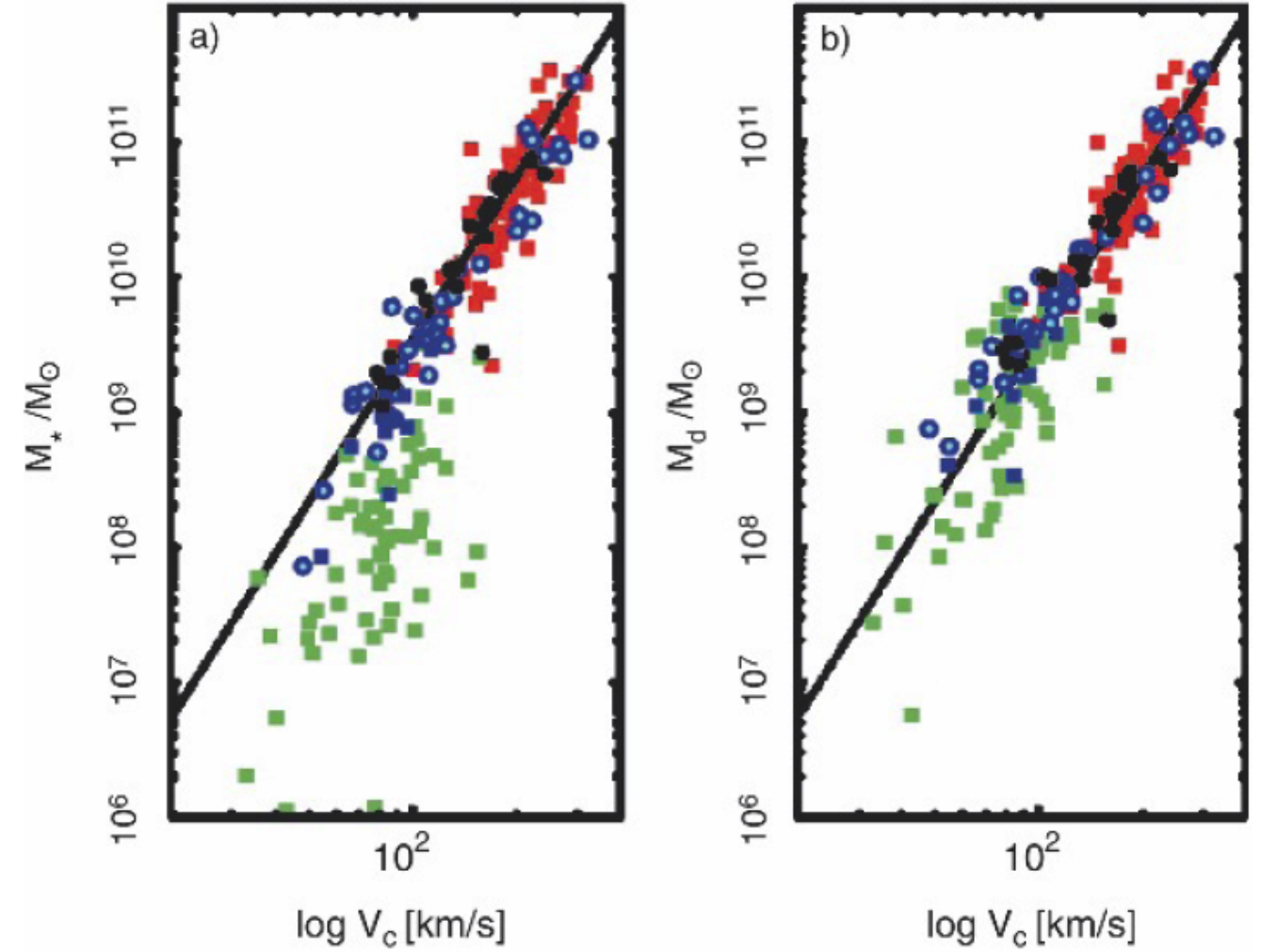


Fig. 3.21. Left panel: the mass contained in stars as a function of the rotational velocity V_c for spirals. This stellar mass is computed from the luminosity by multiplying it with a suitable stellar mass-to-light ratio which depends on the chosen filter and which can be calculated from stellar population models. This is the “classical” Tully–Fisher relation. Squares and circles denote galaxies for which V_c was determined from the 21-cm line width or from a spatially resolved rotation curve,

respectively. The colors of the symbols indicate the filter band in which the luminosity was measured: H (red), K' (black), I (green), B (blue). Right panel: instead of the stellar mass, here the sum of the stellar and gaseous mass is plotted. The gas mass was derived from the flux in the 21-cm line, $M_{\text{gas}} = 1.4M_{\text{HI}}$, corrected for helium and metals. Molecular gas has no significant contribution to the baryonic mass. The line in both plots is the Tully–Fisher relation with a slope of $\alpha = 4$

La relación TF da $L \sim v_{\max}^4$

$$M_H = c - s \log v_{\max}$$

$$2.5 \log L_H = c_1 + s \log v_{\max}$$

$$\log L_H^{2.5} = c_1 + \log v_{\max}^s$$

$$L_H^{2.5} = 10^{c_1} v_{\max}^s$$

$$L_H \sim v_{\max}^{s/2.5}$$

$$L_H \sim v_{\max}^b$$

$$b = 3.5 \text{ in B band}$$

$$b = 4.0 \text{ in I,J,H bands}$$

$$\rightarrow L \sim v_{\max}^4$$

c = intercept or 'zero-point'

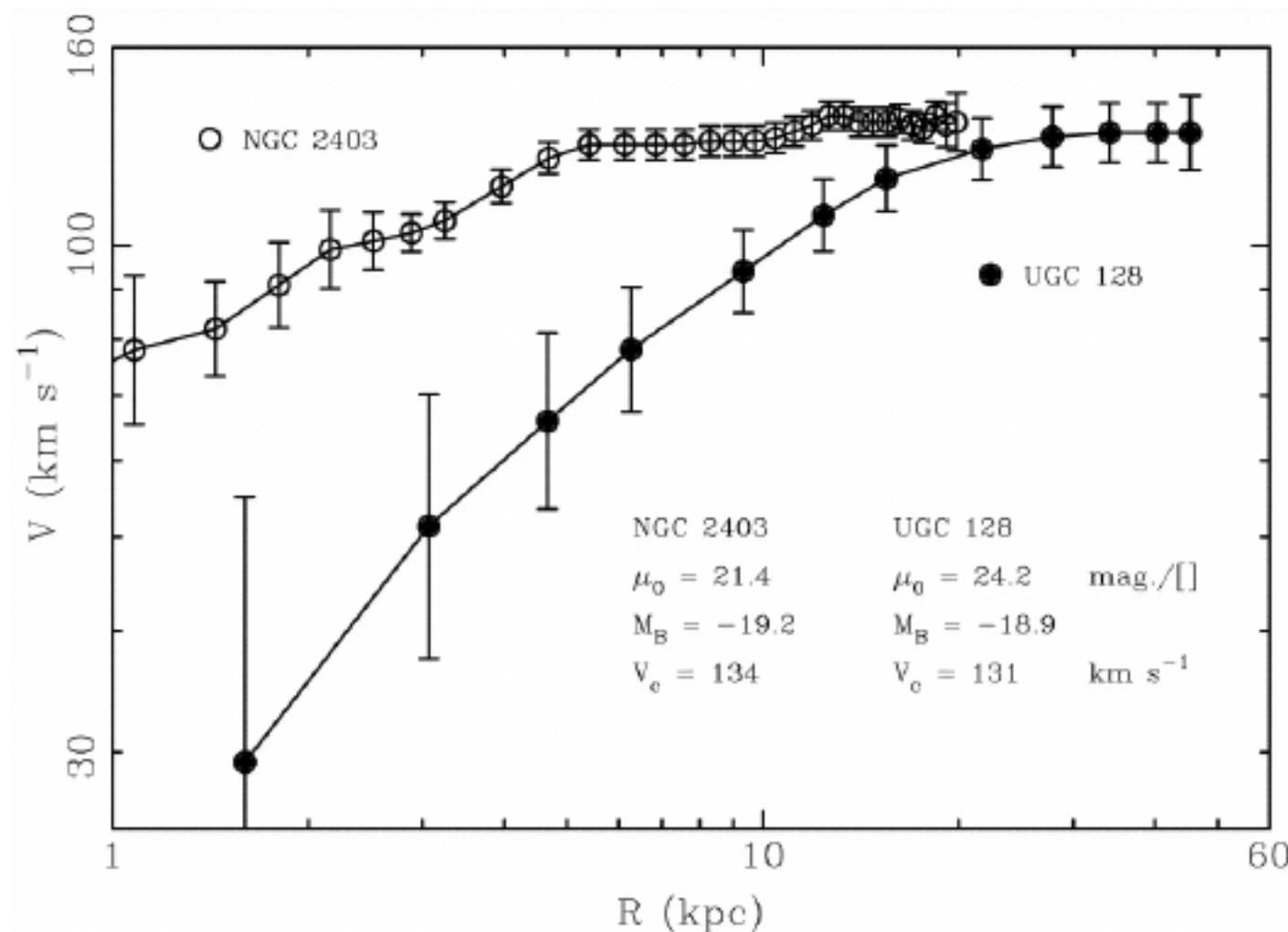
s = slope (for TF in magnitudes)

b = slope (for TF in luminosity)

$$b = s/2.5$$

La diferencia de la pendiente proviene de relación color-luminosidad o color-masa: TF es menos pronunciada en B ya que las galaxias de baja **masa/luminosidad** son más azules en promedio, ya que ambas son más pobres en metales y más jóvenes (mayor fracción de estrellas jóvenes, que emiten mucha luz en el óptico)

La relación TF y curvas de rotación vs. brillo superficial



Curvas de rotación de las espirales HSB y LSB con la misma luminosidad estelar y la misma v_{\max} !

¡La relación TF no depende del brillo superficial central!