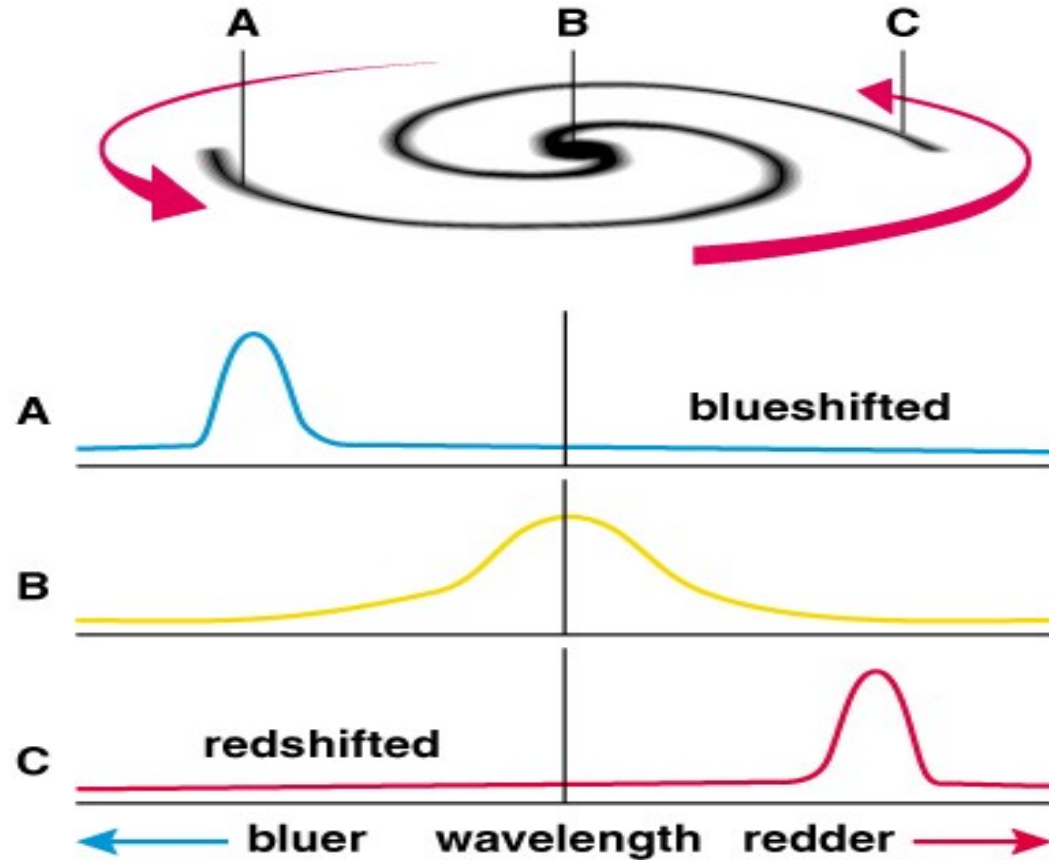


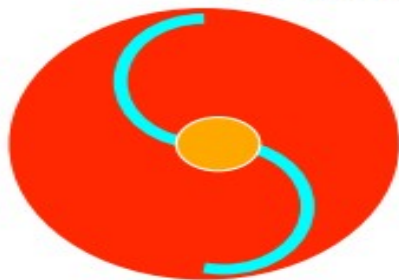
Curvas de rotación

Una galaxia espiral dominada por la rotación del plano del disco



La inclinación

Galaxy Inclination



FACE-ON

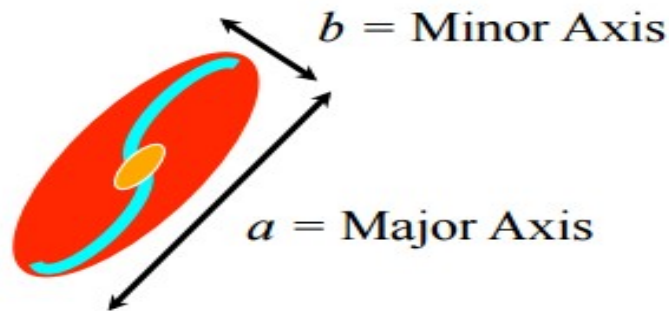
Inclination $i = 0^\circ$



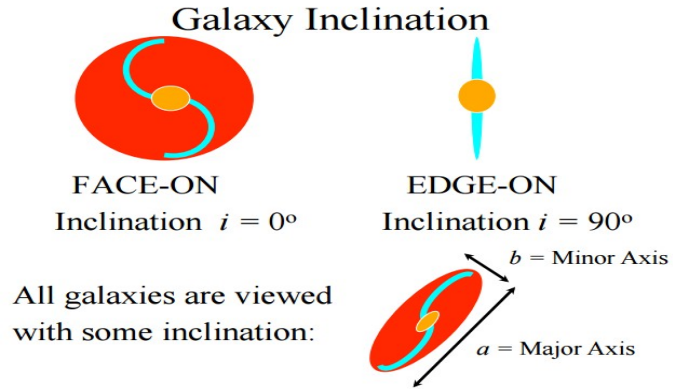
EDGE-ON

Inclination $i = 90^\circ$

All galaxies are viewed
with some inclination:

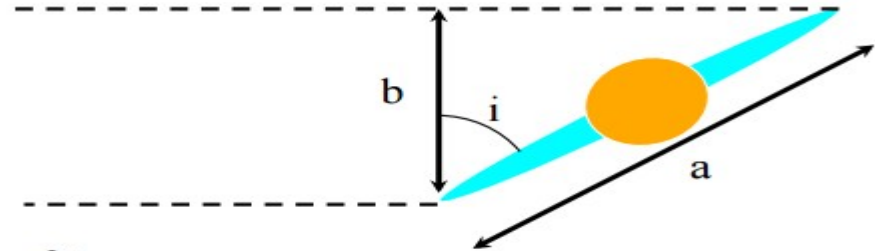


La inclinación



- Assuming a thin circular disc:
- Inclination, i , given by:

$$\cos(i) = \frac{b}{a}$$



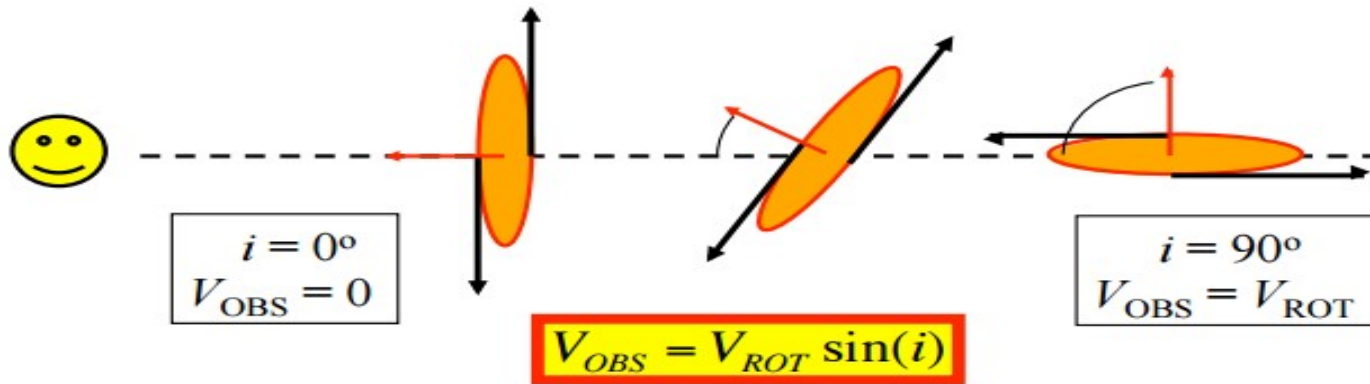
- $a = b, i = 0^\circ$
- $b = 0, i = 90^\circ$

NB: a is always measurable

La inclinación

The **Doppler Shift** measures the component of velocity **along the line of sight**.

Need to correct for inclination.



Curvas de rotación

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_{rest}} \simeq \frac{v_r}{c} = \frac{V \sin(i)}{c}$$

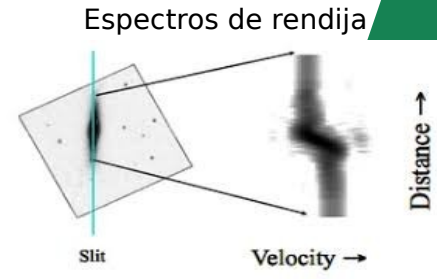
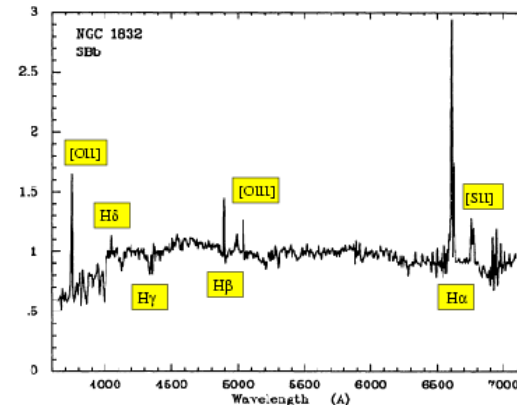
Inclinación:

$i=90^\circ$ cuando está completamente de canto (“edge-on”)

$i=0^\circ$ cuando está de cara (“face-on”)

Por efecto Doppler relativista, tenemos que la longitud de onda observada de un cuerpo en movimiento es distinta a la longitud de onda emitida en reposo.

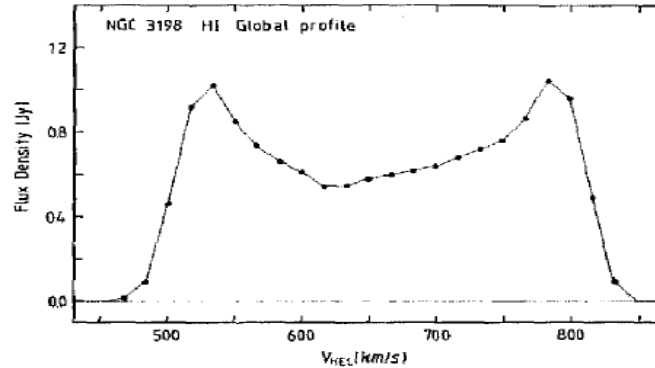
Por lo tanto, la velocidad intrínseca de rotación del disco puede ser medida mirando el corrimiento de una línea espectral conocida



Curvas de rotación

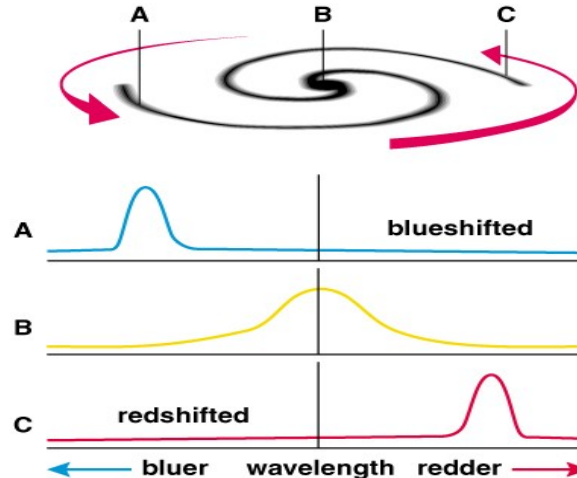
Observación del gas atómico HI (a baja resolución)

“emisión no resuelta”



El espectro muestra la dinámica integrada de toda la galaxia

Una galaxia espiral dominada por la rotación del plano del disco

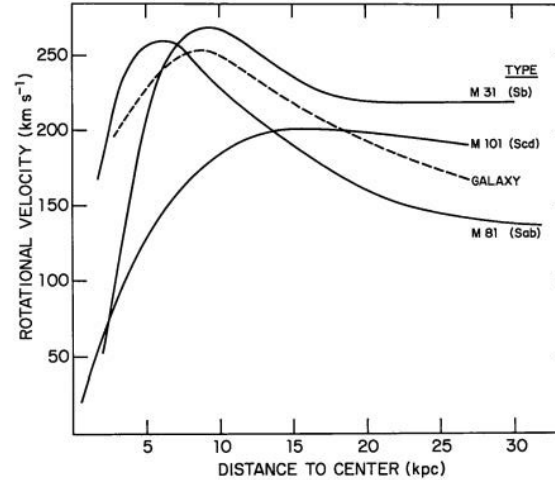


$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_{rest}} \simeq \frac{v_r}{c} = \frac{V \sin(i)}{c}$$

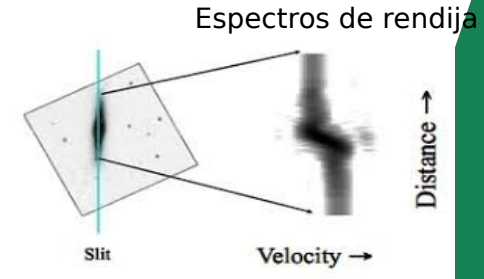
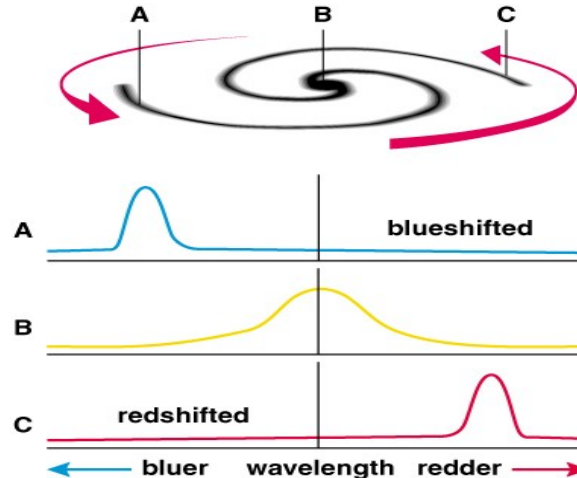
Curvas de rotación

Observación del gas atómico HI (a alta resolución)
 “emisión resuelta”

Es posible conocer la velocidad en la línea de visión como función de la distancia al centro de la galaxia



Roberts and Rots (1973)



$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_{rest}} \simeq \frac{v_r}{c} = \frac{V \sin(i)}{c}$$

Curvas de rotación

Variaciones de curvas de rotación como función del radio para distintas poblaciones de galaxias espirales según clasificación de Hubble

Aunque hay diferencias entre tipos de Hubble la forma no cambia mucho, lo que indica que sus potenciales gravitacionales no necesariamente siguen la distribución de la materia luminosa.

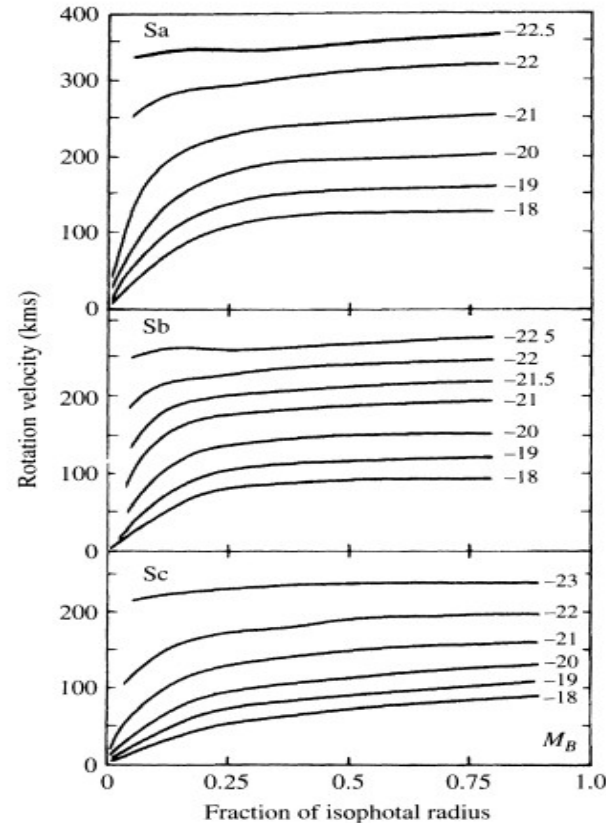
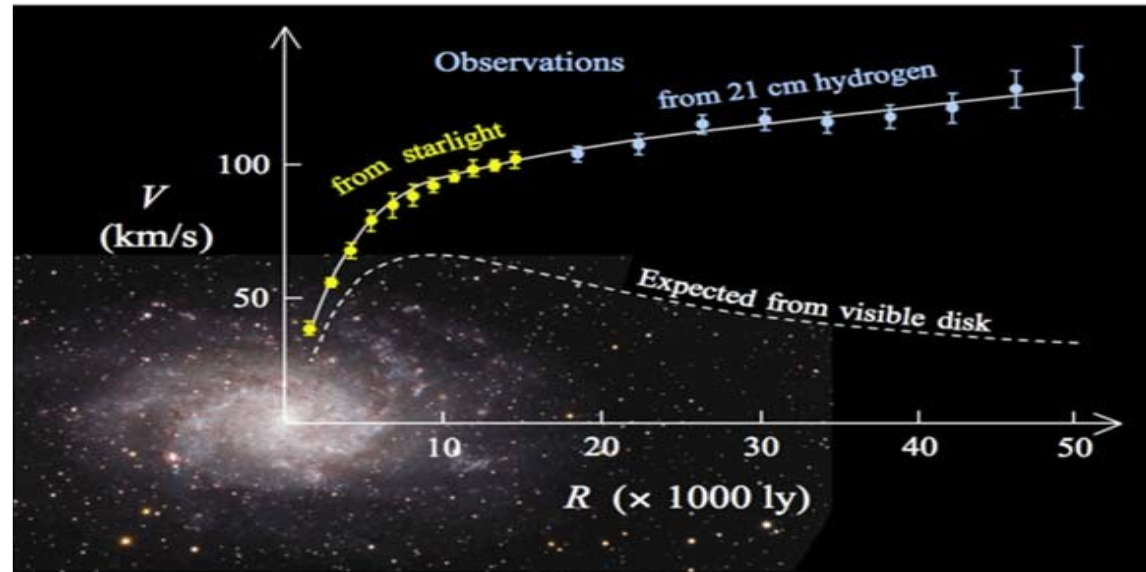


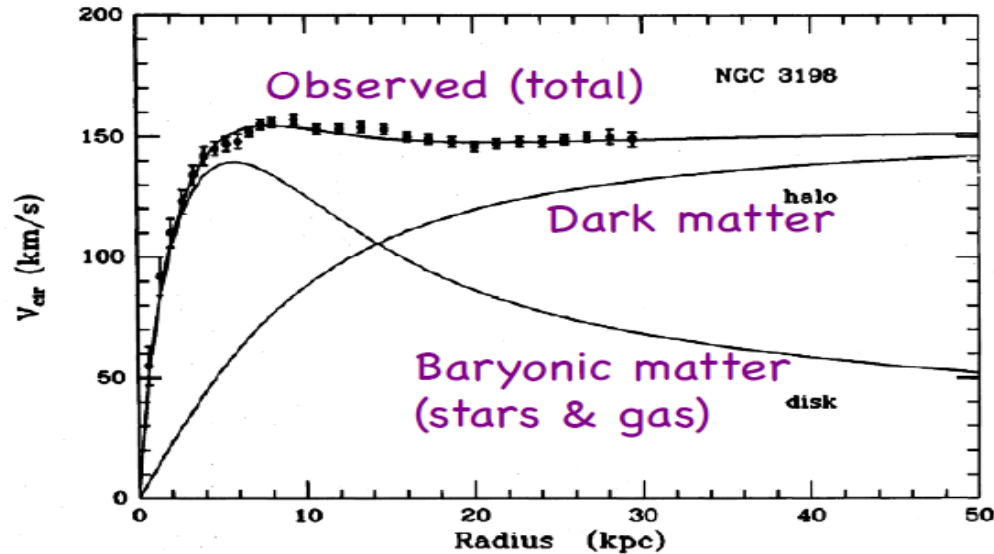
FIGURE 25.8 Variations in the average rotation curves of Sa, Sb, and Sc galaxies for various values of absolute magnitude in the B band. (Figure adapted from Rubin et al., *Ap. J.*, 289, 81, 1985.)

Curvas de rotación de galaxias tipo disco

- El perfil de luminosidad de las galaxias refleja la distribución de materia bariónica, sin embargo esta resulta ser insuficiente para caracterizar las curvas de rotación, principalmente en las partes más externas de las galaxias
- Dado que la curva de rotación refleja directamente el potencial gravitacional, esto implica que hay más materia que la observada
- Esta problemática se considera como una de las evidencias más claras de la existencia de materia oscura en los halos de las galaxias.



Curvas de rotación de galaxias tipo disco



$$\rho(r) = \frac{\rho_0}{\frac{r}{R_s} \left(1 + \frac{r}{R_s}\right)^2}$$

Perfil de Navarro, Frenk & White (NFW) para la materia oscura

$$M = \int_0^{R_{\text{max}}} 4\pi r^2 \rho(r) dr :$$

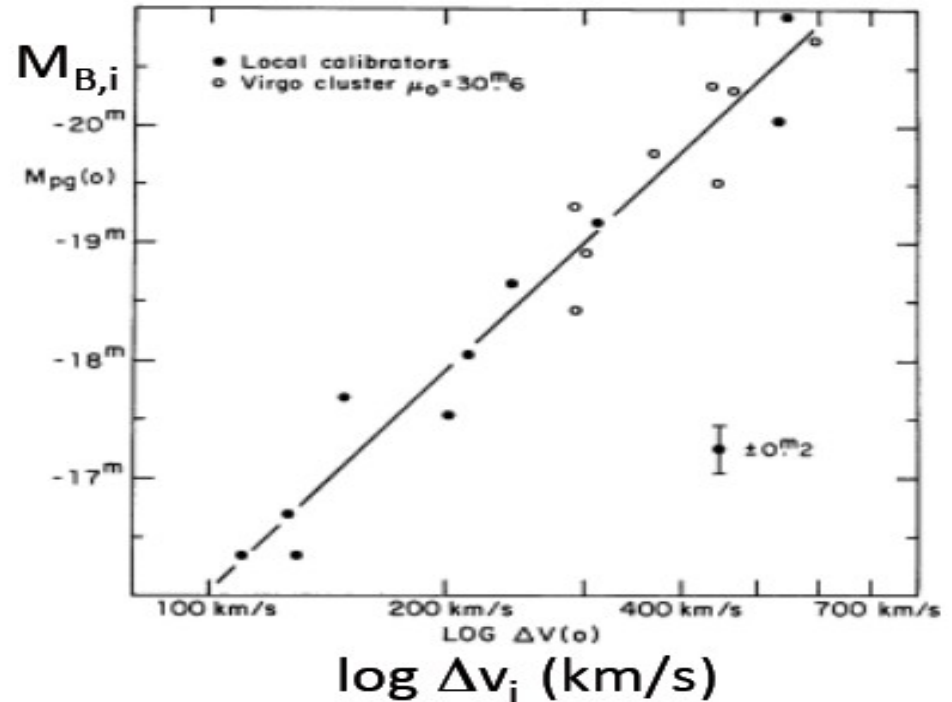
La materia oscura domina en las partes externas

Tanto la materia bariónica como la materia oscura contribuyen a que la materia se mueva más rápido, sin embargo ***la materia bariónica está “más concentrada” que la materia oscura***

Relación de Tully-Fisher (TF)

Buena correlación entre la **luminosidad estelar** de la galaxia (magnitud absoluta) y su **velocidad máxima de rotación** (o ancho de las líneas espectrales, corregido para la inclinación)

La correlación estrecha entre la luminosidad estelar 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)



A New Method of Determining Distances to Galaxies

R. Brent Tully^{1*} and J. Richard Fisher²

¹ Observatoire de Marseille, France

² National Radio Astronomy Observatory**, P.O. Box 2, Green Bank, W. Va. 24944, USA

Received July 15, 1975, revised April 26, 1976

Summary. A good correlation between a distance-independent observable, global galaxian H I profile widths, and absolute magnitudes or diameters of galaxies offers a new extragalactic distance tool, as well as potentially being fundamental to an understanding of galactic structure. The relationships are calibrated with members of the Local Group, the M81 group, and the M101 group and have been used to derive distances to the Virgo cluster ($\mu_0 = 30^m.6 \pm 0^m.2$) and the Ursa Major cluster ($\mu_0 = 30^m.5 \pm 0^m.35$). A preliminary estimate of the Hubble constant is $H_0 = 80$ km/s/Mpc.

Key words: galaxies — distances — neutral hydrogen

total mass and type). It is our contention that this correlation is primarily an accident of the fact that earlier systems that have been studied are intrinsically larger than later systems. The principal correlation should be with luminosity, with modest, if any, type dependence. This point is important with regard to the internal structure of galaxies, as well as offering a valuable tool for the measurement of extragalactic distances.

The basic difficulty with establishing the relation, and presumably the reason why it has essentially escaped notice, is that if the calibrating systems do not have extremely well known absolute or relative distances, the observational scatter thus introduced renders the rela-

Relación de Tully-Fisher (TF)

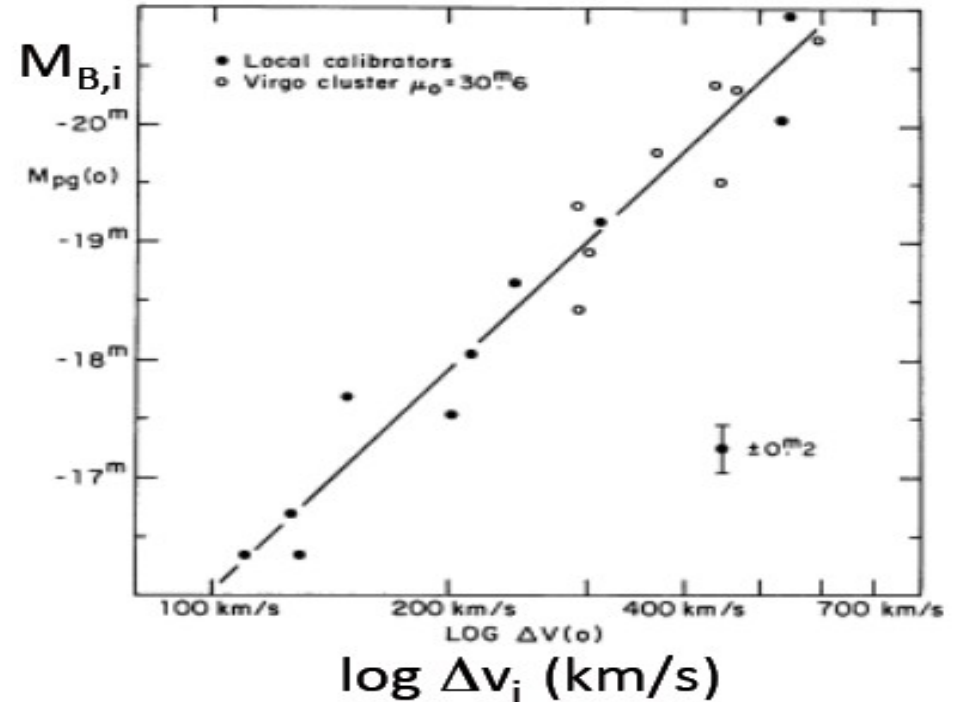
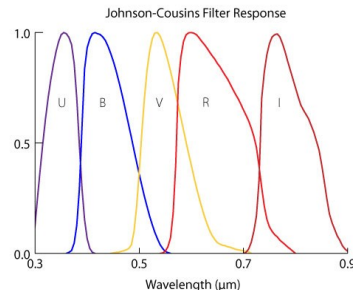
¿Qué tan buen indicador de distancia es la TF?

En la banda *B* la dispersión de $1\sigma \sim 0,6$ mag
→ $\sim 30\%$ error en la distancia

En la banda *I* la dispersión de $1\sigma \sim 0,3$ mag
→ $\sim 15\%$ error en la distancia

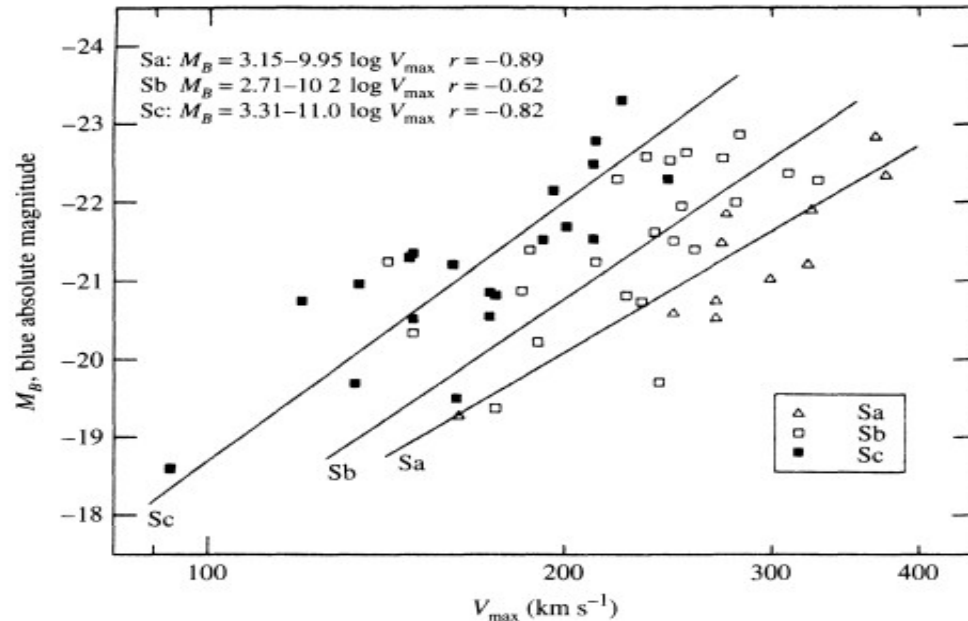
La banda *I* es mejor para minimizar los efectos de poblaciones estelares jóvenes en TF.

Un 15% de error en la distancia es lo suficientemente bueno para medir distancias relativas a galaxias dentro de grupos o clusters



Tully & Fisher 1977, AA, 54, 661

Relación de Tully-Fisher (TF)



Se encuentra que V_{\max} es menor para galaxias con tipo Sc

Nota: la diferencia observada es principalmente debido a los distintos "mass-to-light ratio" en los tipos de galaxias espirales

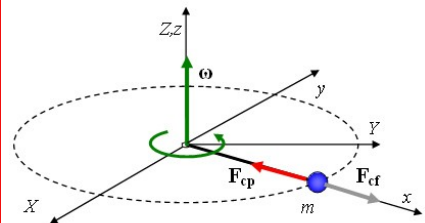
$$M_B = -9.95 \log_{10} V_{\max} + 3.15 \quad (\text{Sa}),$$

$$M_B = -10.2 \log_{10} V_{\max} + 2.71 \quad (\text{Sb}),$$

$$M_B = -11.0 \log_{10} V_{\max} + 3.31 \quad (\text{Sc}).$$



$$M = -2.5 \cdot \log_{10}(L/L_0)$$



Relación de Tully-Fisher (TF)

Para un objeto rotando en un disco (e.g. galaxia espiral), se tiene que la masa dentro de un radio R es

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

Si asumimos que la razón entre la masa y la luz es constante (el “mass to light ratio”) para todas las galaxias

$$\frac{M}{L} \equiv \frac{1}{C_{ML}}$$

Podemos estimar que la luminosidad podría tener la siguiente forma

$$L = C_{ML} \frac{v_{max}^2 R}{G}$$

Y si asumimos también que todas las galaxias espirales tienen el mismo brillo superficial

$$\frac{L}{R^2} \equiv C_{SB}$$

Despejando R de las expresiones:

$$R^2 = \frac{L}{C_{SB}} = \frac{L^2 G^2}{C_{ML}^2 v_{max}^4}$$

Podemos entonces que la luminosidad es proporcional a la velocidad elevado a la cuarta

$$L = \frac{C_{ML}^2}{C_{SB} G^2} v_{max}^4 = Constante \times v_{max}^4$$

$$L \propto v_{max}^4$$

Relación de Tully-Fisher (TF)

¿Cómo se relaciona V_{circ} teórico con V_{rot} observado?

$$V_{\text{circ}}(R) = V_{\text{rot}}(R) + V_{\text{corr}}(R)$$

- V_{rot} es la velocidad de rotación **medida observacionalmente** ($V_{\text{rot}} = V_{\text{max}}$ en las partes externas)
- V_{corr} es la corrección para la dispersión de la velocidad / movimientos desordenados o aleatorios / "asymmetric drift" (todo una misma cosa)

La mayoría del gas y las estrellas no tienen órbitas circulares puras, pero también tienen componentes no-circulares a sus movimientos

V_{corr} es típicamente:

- Pequeño para gas ($V_{\text{rot}} \gg \sigma$)
- Medio para discos estelares ($V_{\text{rot}} > \sigma$)
- Grande para bulbos estelares y galaxias E ($V_{\text{rot}} < \sigma$ o $V_{\text{rot}} \ll \sigma$)

OJO: Notación para V_{rot} y V_{circ} . No siempre consistente (hay personas descuidadas)

Relación Masa-Luminosidad para Galaxias Espirales

- Independientemente del tipo Sa-Sc, se encuentra que el radio es mayor a mayor sea la magnitud absoluta (luminosidad)

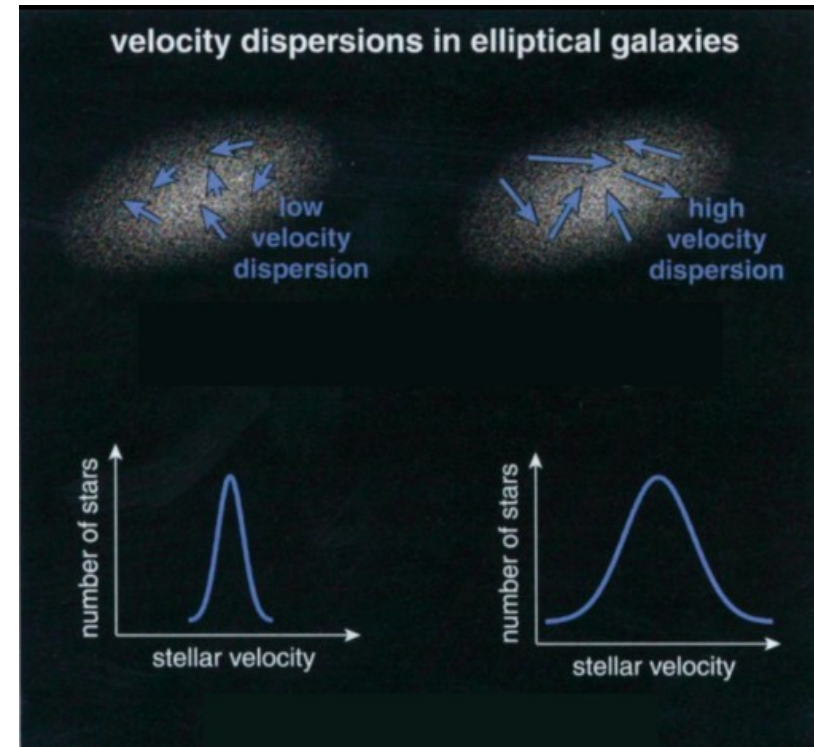
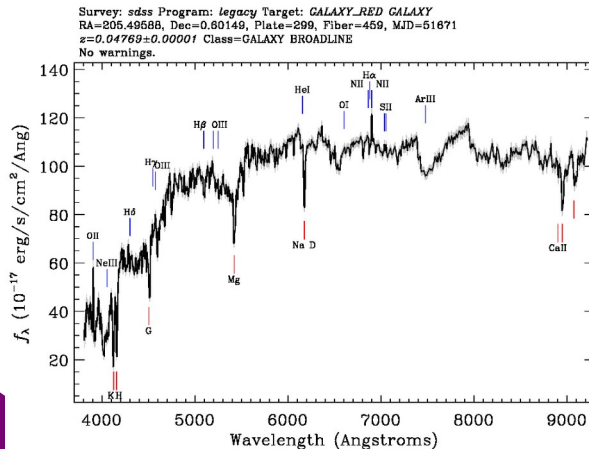
$$\log_{10} R_{25} = -0.249 M_B - 4.00,$$

R_{25} = radio correspondiente al nivel de brillo superficial = 25 B-mag/arcsec² en unidades de kpc.

La Relación Faber Jackson y el Plano Fundamental

La dispersión de velocidad de las estrellas en las galaxias Es va de $\sigma \sim 50 \text{ km/s}$ en las más chicas hasta $\sigma \sim 500 \text{ km/s}$ en las más luminosas.

Como las galaxias elípticas no son ricas en gas, implica que los anchos de las líneas deben calcularse con líneas de absorción de atmósferas estelares



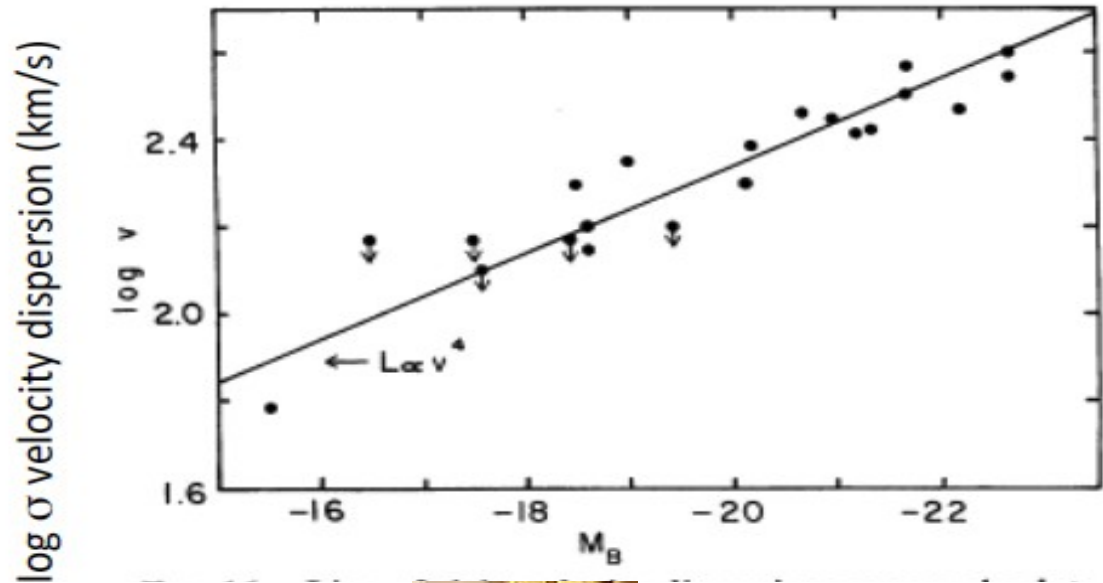
La Relación Faber Jackson y el Plano Fundamental

Existe una correlación entre la luminosidad y la dispersión de velocidad

$$L \propto \sigma^4$$

conocida como la **relación de Faber Jackson**

(deducida igual que la relación TF para las Ss)



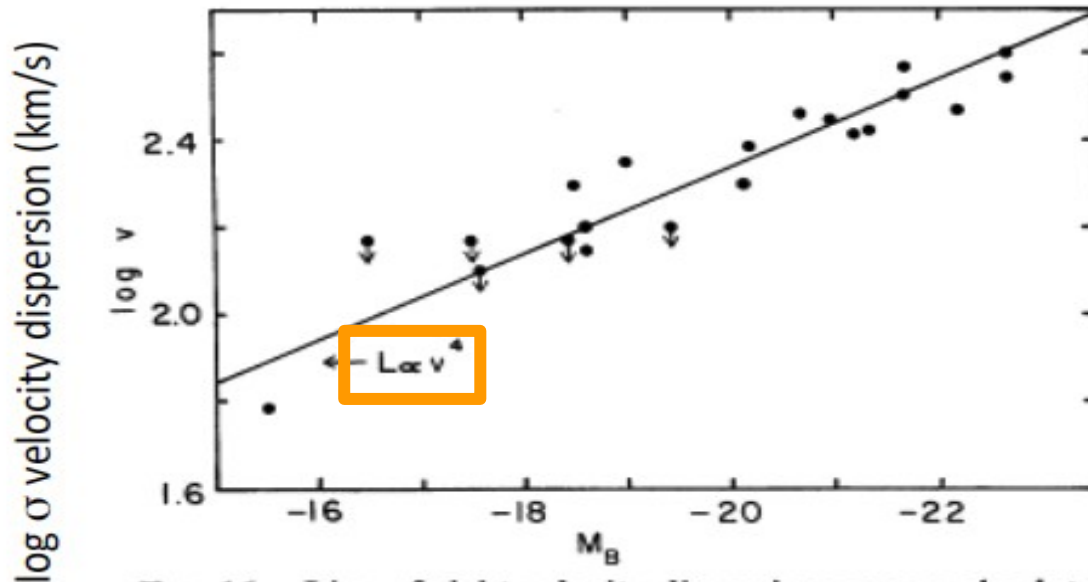
Faber & Jackson (1976)

La Relación Faber Jackson y el Plano Fundamental

Similar a la relación de Tully Fisher para las espirales ya que **correlaciona luminosidad con cinemática** y se puede usar para **calcular distancias**, PERO....

- Hay mayor dispersión (~35% vs ~15%)
- El scatter disminuye si incluimos un tercer parámetro → **Plano Fundamental**

$$L \propto \sigma_0^{2.65} r_e^{0.65}.$$



Faber & Jackson (1976)

También se puede expresar en términos del brillo superficial (I) en re:

$$r_e \propto \sigma_0^{1.24} I_e^{-0.82}.$$

La Relación Faber Jackson y el Plano Fundamental

El Plano Fundamental

relaciona 3 propiedades de las galaxias elípticas:

- Radio efectivo (r_e)
- Brillo superficial (μ)
- Dispersión de velocidad (σ)

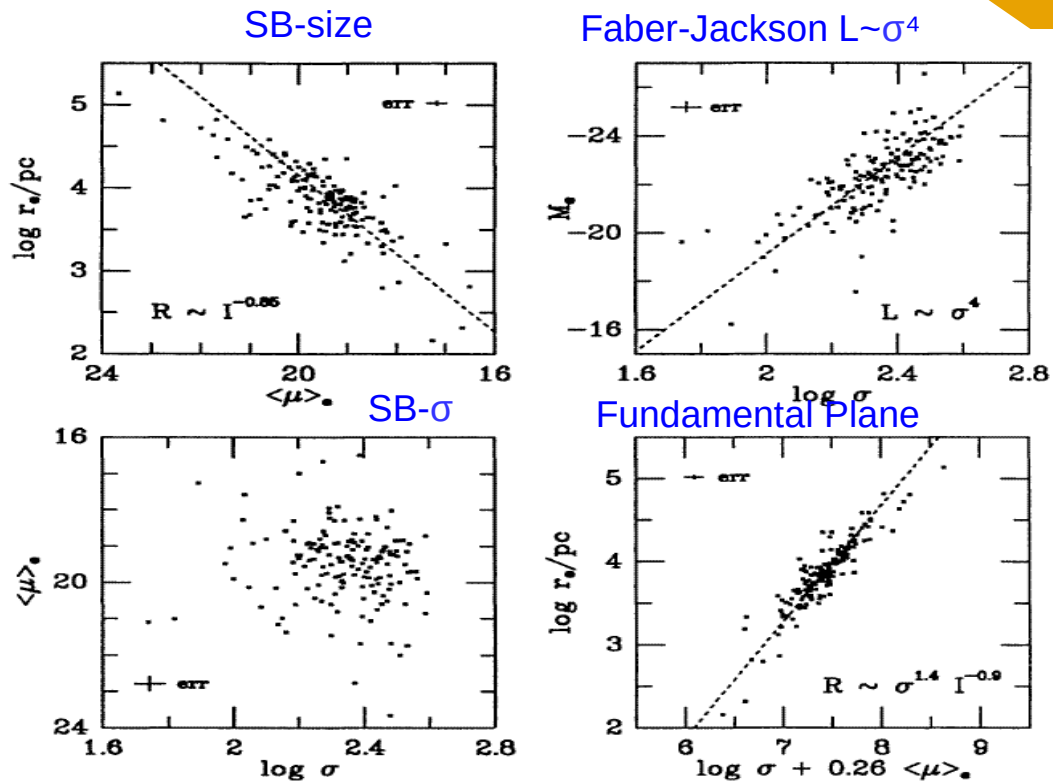
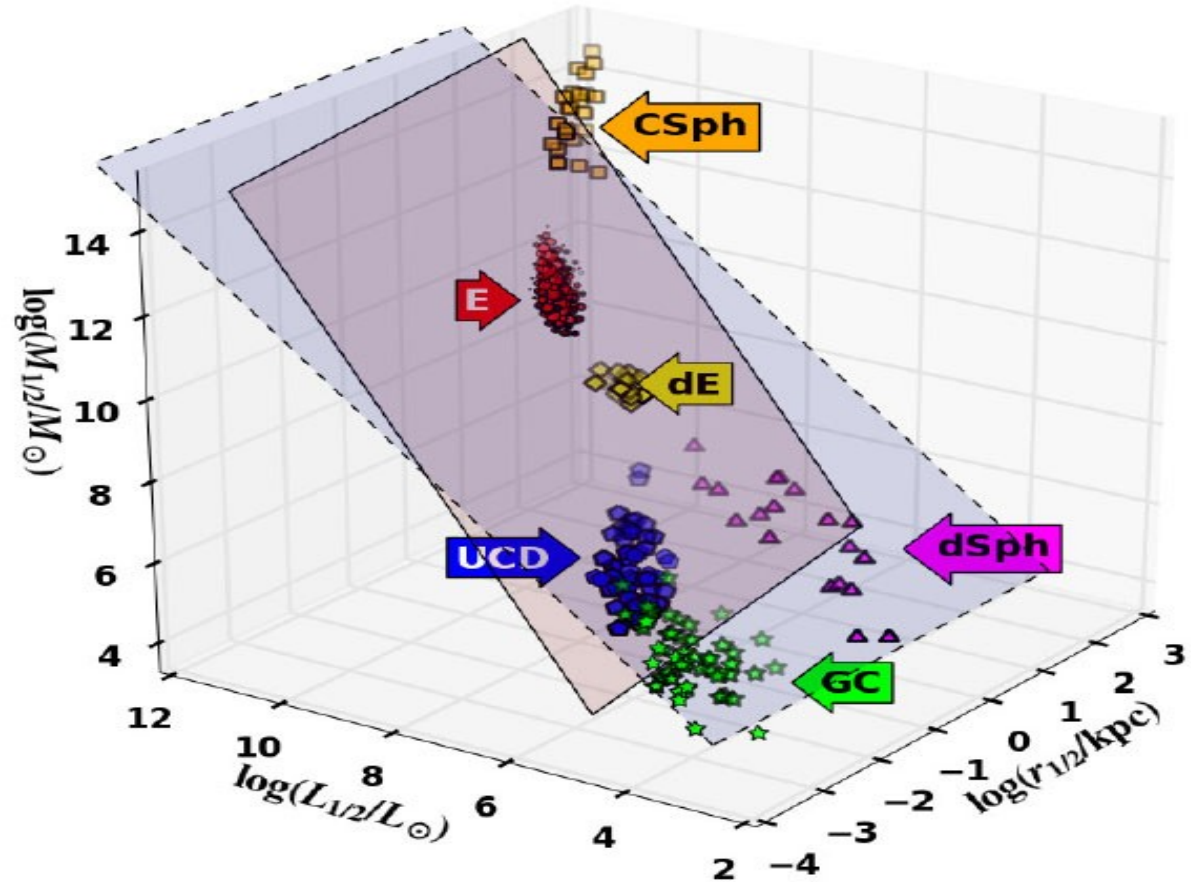


Figure 2 Projections of the fundamental parameter plane of elliptical galaxies. Top panel

Kormendi & Djorgovski (1989)

La Relación Faber Jackson y el Plano Fundamental

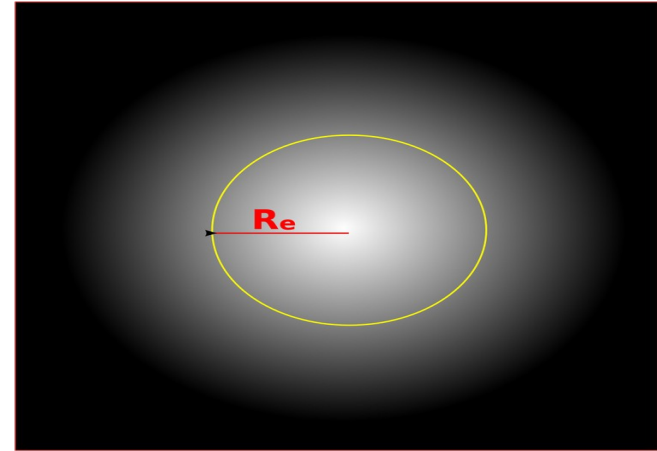
- Versión moderna de las propiedades de las galaxias de tipo temprano + cúmulos globulares (GC) + cúmulos de galaxias (CSph).
- Todavía no se entiende qué genera la continuidad de las propiedades de los fragmentos de sistemas masivos en 2 ramas de enanas ultra-compactas (UCD) y cúmulos globulares por un lado y enanas esferoidales (dSph) por el otro.



The red and blue planes respectively represent the Fundamental Plane and the "virial plane" of constant M/L .

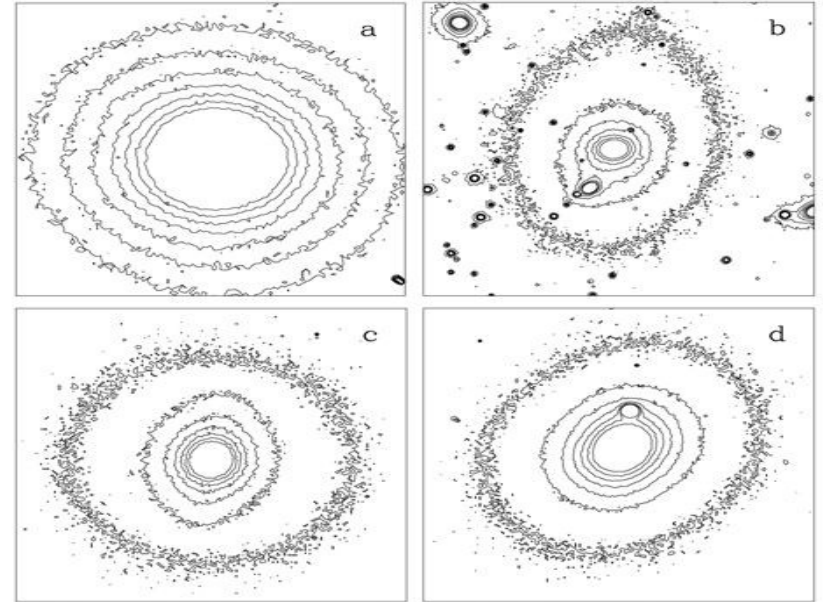
Los Radios

- Es posible mapear los contornos de brillo superficial constante i.e. *isofotas*
- Esto es útil para definir el **radio de una galaxia**.
- Un radio comunmente usado es el **radio efectivo, r_e** , definido como el radio proyectado donde la mitad de la luz de la galaxia es emitido.
- El brillo superficial en r_e (μ_e) dependerá de la distribución radial de μ



Isofotas – perfil de brillo superficial

- Es posible mapear los contornos de brillo superficial constante i.e. *isofotas*
- Esto es útil para definir el **radio de una galaxia**.



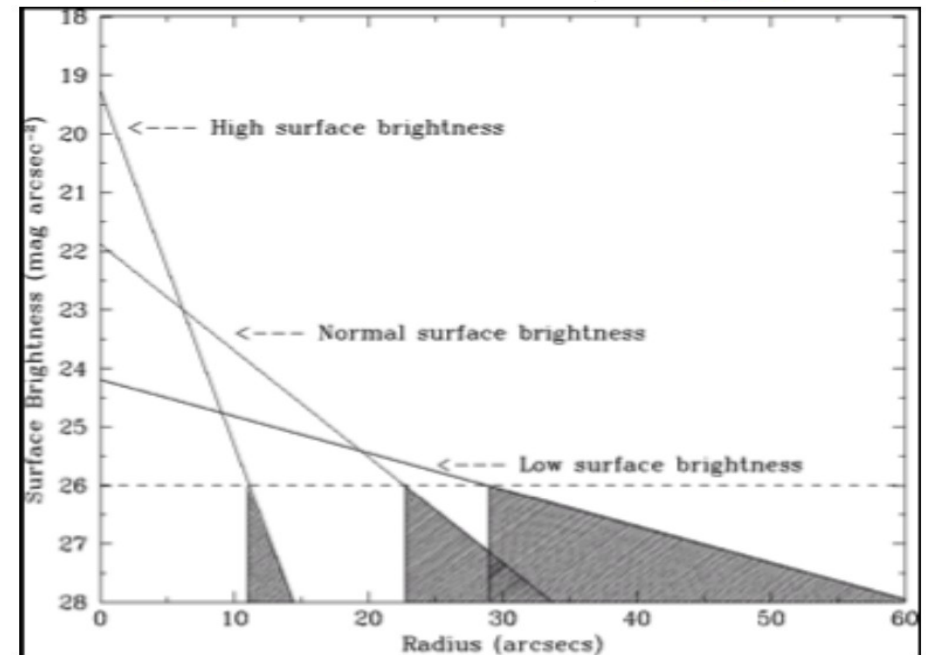
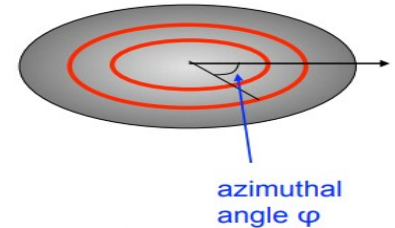
¿Cómo medir el brillo superficial de una galaxia?

Podemos integrar el brillo superficial para obtener el brillo total de la galaxia dentro de un radio determinado.

$$SB \sim \text{Flujo} / \Delta\Omega$$

(flujo por unidad de ángulo sólido)

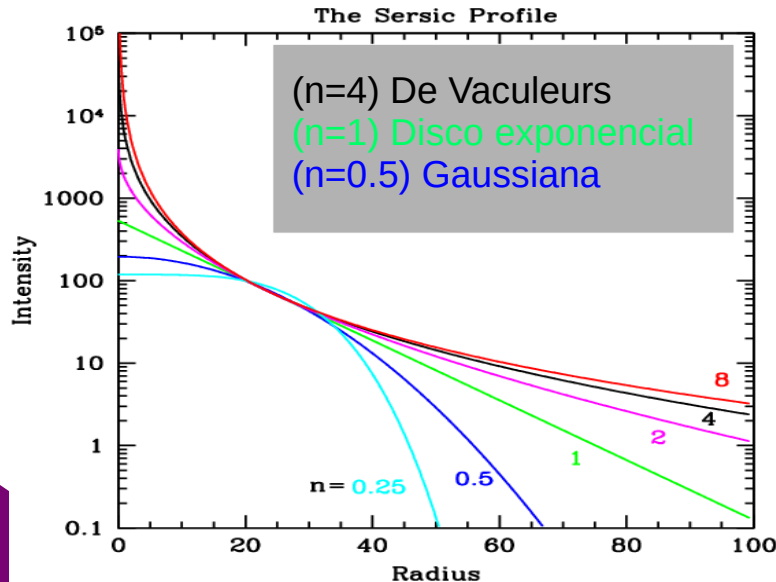
- SB no depende de la distancia a la fuente ya que tanto f como $\Delta\Omega$ son proporcionales a $\sim 1/r^2$ en el Universo local
- Típicamente se mide las magnitudes integradas hasta el radio de una isophota (contornos de BS constante) de una magnitud dada, usualmente $26 \mu_B$.



Isofotas – perfil de brillo superficial

El perfil de Sersic

$$\mu(r) = \mu_e + 8.3268 \left(\left(\frac{r}{r_e} \right)^{1/n} - 1 \right)$$



n=4: de Vaculeurs (Es/bulbos)

$$\mu(r) = \mu_e + 8.3268 \left(\left(\frac{r}{r_e} \right)^{1/4} - 1 \right)$$

n=1: Exponencial (disco)

$$\mu(r) = \mu_0 + 1.09 \left(\frac{r}{h_r} \right)$$

h_r = “scale length” del disco
radio al cual el brillo en una galaxia de disco cae por un factor de e (~ 2.71828) desde el centro

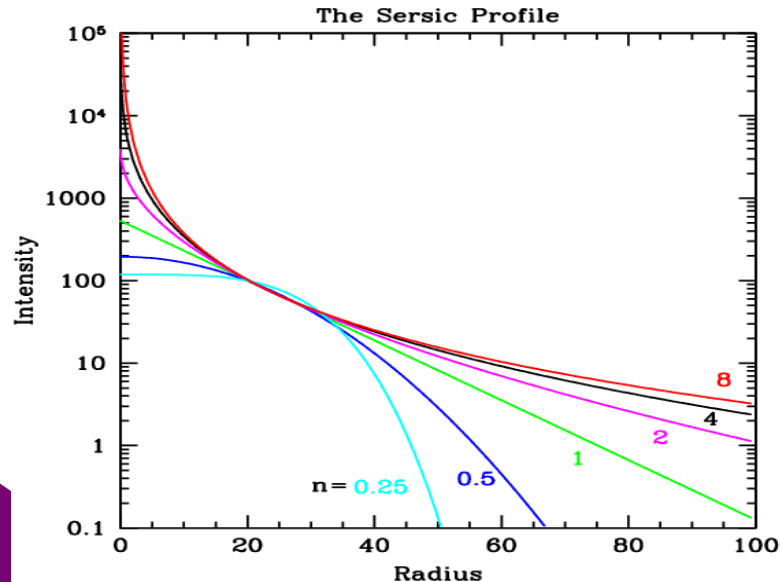
Isofotas – perfil de brillo superficial

El perfil de Sersic

$$\mu(r) = \mu_e + 8.3268 \left(\left(\frac{r}{r_e} \right)^{1/n} - 1 \right)$$

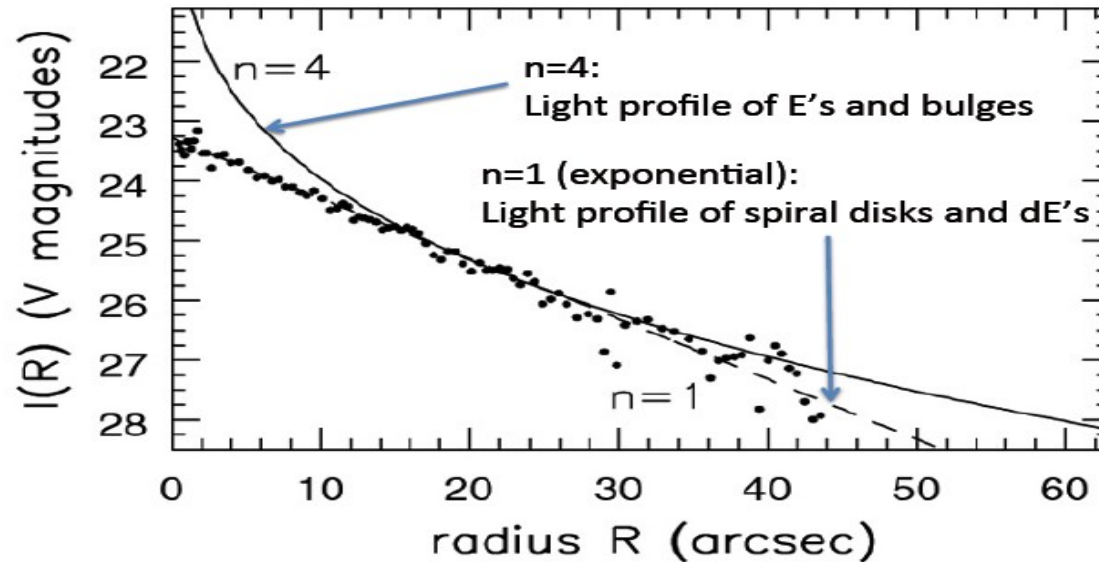


$$\log \left[\frac{I(r)}{I_e} \right] = -3.3307 \left(\left(\frac{r}{r_e} \right)^{1/n} - 1 \right)$$



Tarea: Probar que la expresión para μ (en unidades de $\text{mag}/\text{arcsec}^2$) es equivalente a la expresión para la intensidad, I (en unidades de Lsun/pc^2)

Galaxias elípticas: **Perfil $n=4$**



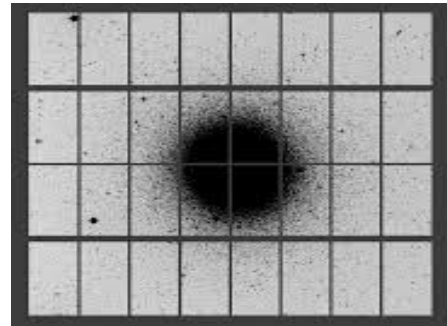
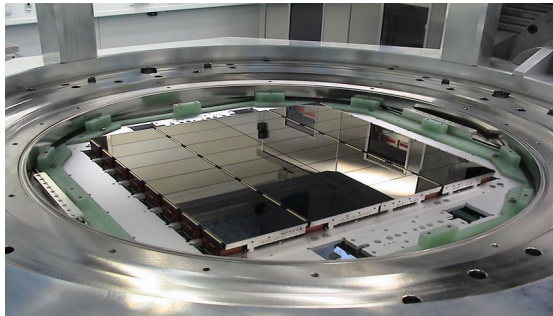
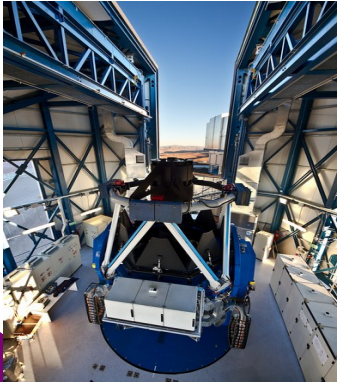
Comparada con una distribución exponencial ($n = 1$), una distribución $n = 4$ tiene más estrellas en radios pequeños y grandes, y menos en radios intermedios

El Flujo

Paso 1. Observarla

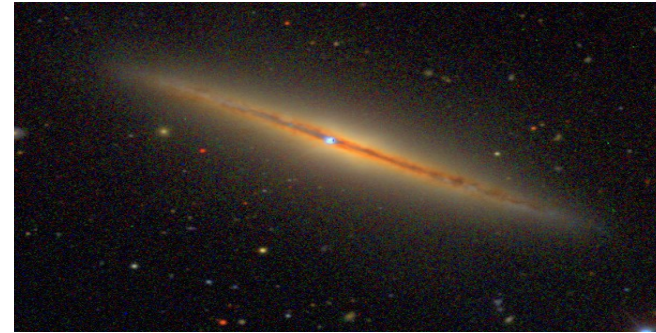
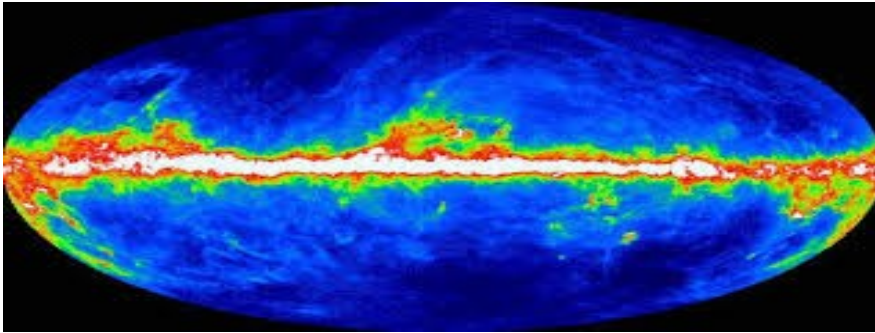
Cuando un foton llega al detector (CCD), libera un electron que genera una corriente. Dicha corriente es amplificada y la señal producida debiera ser linealmente proporcional al numero de fotones incidentes

- **Flat fielding:** los pixeles no responden de manera uniforme por lo que se mide la respuesta usando una pantalla plana
- **Calibration:** Se deben observar estrellas estándares conocidas para determinar cuántas cuentas corresponden a un flujo o magnitud dada
- **Sky subtraction:** Se debe eliminar la contribución del cielo nocturno, sobre todo para objetos debiles por lo que medimos el cielo aparte



El Flujo

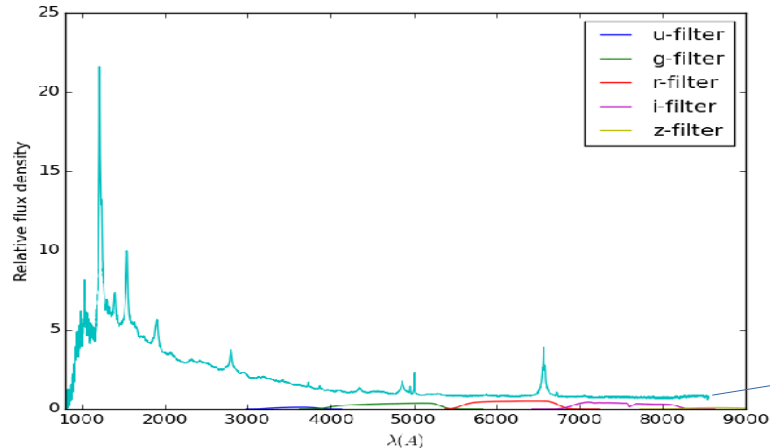
Se debe corregir por la extinción* del polvo que hay dentro de la Vía Láctea y en la galaxia misma



*La “extinción” se refiere a la absorción y la dispersión de la radiación electromagnética emitida por objetos astronómicos. Estos fenómenos se deben a la existencia de gas y polvo entre el objeto emisor y el observador.

Y para obtener la magnitud absoluta: K-correction

- Para objetos extragalácticos es necesario considerar que se encuentran a un *redshift* considerable.
- $\lambda_o/\lambda_e = 1 + z$
- La luz que normalmente caería en cierta banda (e.g. B) se verá desplazada a λ más largas



- La “**corrección K**” corrige este efecto y es naturalmente más grande para las galaxias más lejanas

$$M = m - 5(\text{Log}_{10}D_L - 1) - K_{\text{corr}}$$

- M = mag absoluta
- m = mag aparente
- D_L = Distancia de luminosidad
- K_{corr} = corrección

