

# Astronomía Extragaláctica

## Las Galaxias: Parte 3

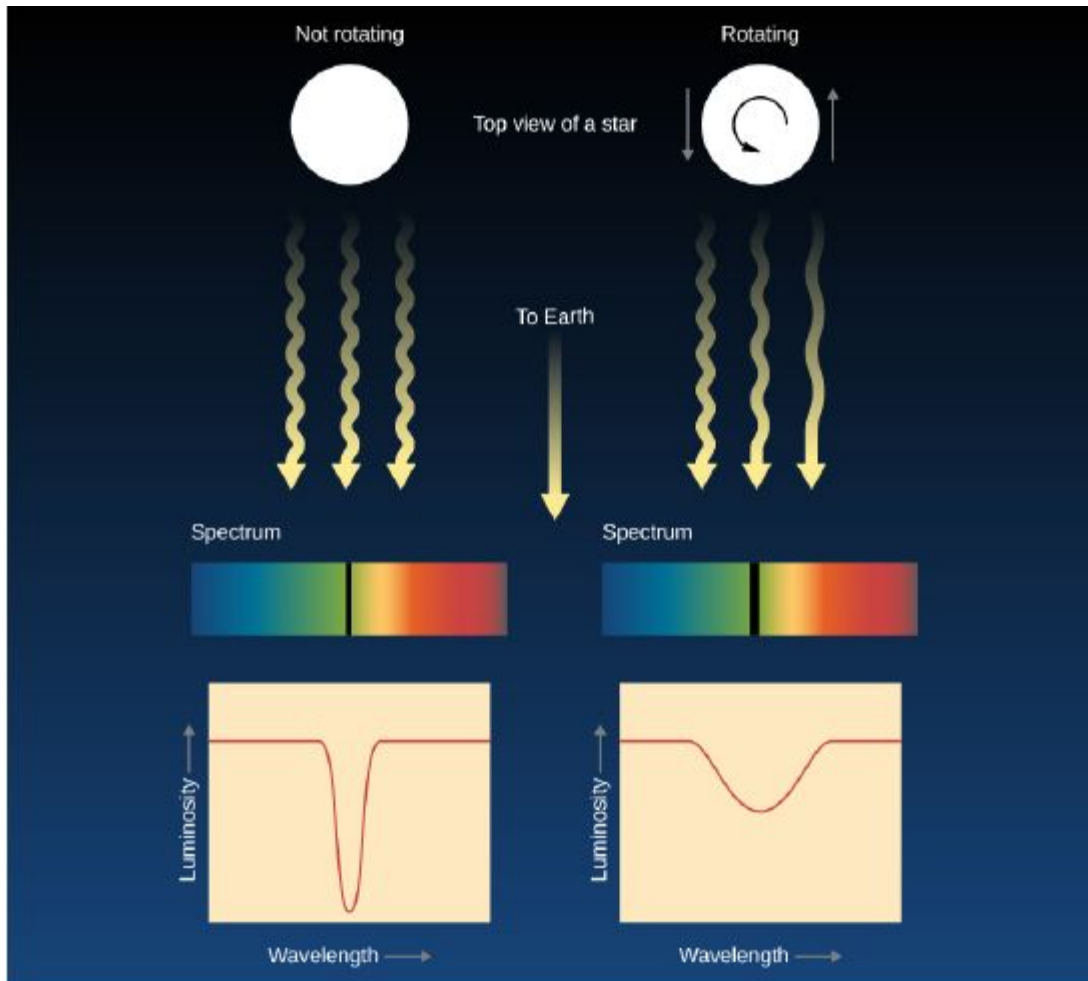
Valeria Coenda

# Dinámica

# Sistemas de Rotación Lento

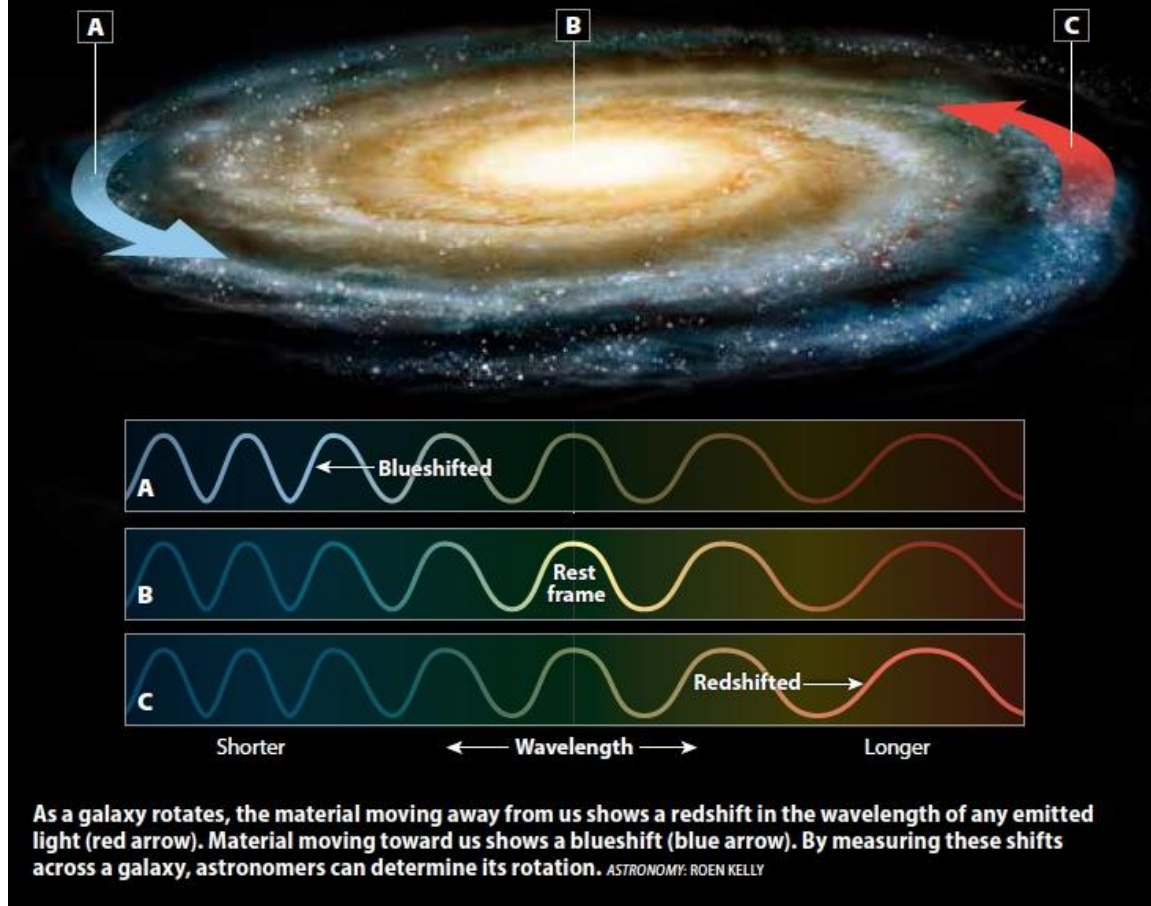
La dinámica de las galaxias elípticas y los bulbos de las galaxias de disco se estudian mediante los cambios Doppler y los ensanchamientos de las líneas de absorción estelar. Dado que una línea de absorción dada es la suma de las contribuciones de muchas estrellas individuales, su desplazamiento Doppler da su velocidad media, mientras que su ensanchamiento se incrementa en una cantidad que depende de la dispersión de las velocidades estelares alrededor de la media.

Al observar cómo se comportan las longitudes de onda y los anchos de las líneas espectrales como funciones del radio, se puede obtener una idea de la distribución de la masa en la galaxia.



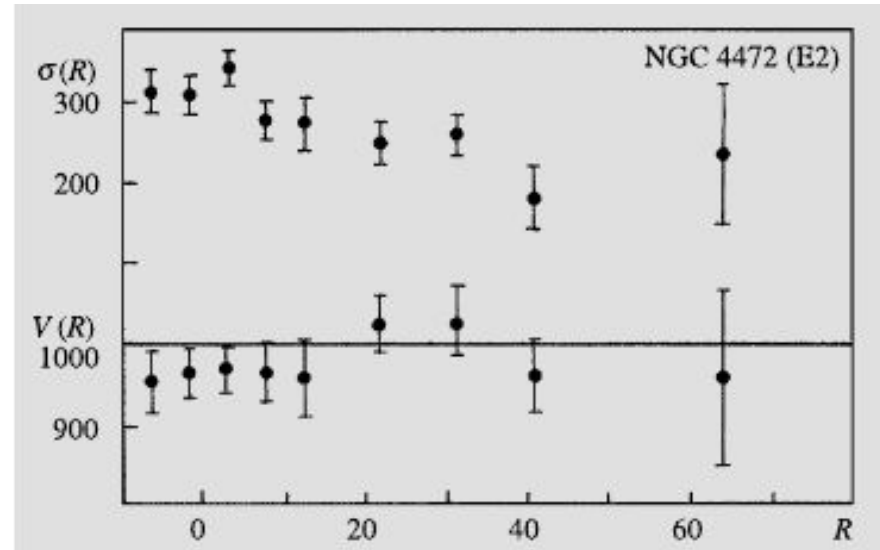
Este ejemplo es sólo para una estrella.

# Measuring a galaxy's rotation



En la figura se da un ejemplo de la dependencia radial observada de la velocidad de rotación y la dispersión de la **velocidad derivada de algunas elípticas**.

Las velocidades de rotación observadas son a menudo pequeñas ( $<100$  km/s), mientras que la dispersión de la velocidad puede ser típicamente de unos 200 km/s. Depende también de donde vive la galaxia.



Espectros de galaxias E: no hay emisiones (ni óptico ni 21 cm). dominado por gigantes G y K. Superposición de millones de estrellas con  $v_R \rightarrow$  líneas ensanchadas por dispersión de velocidades.

## Ejemplo: NGC 1399

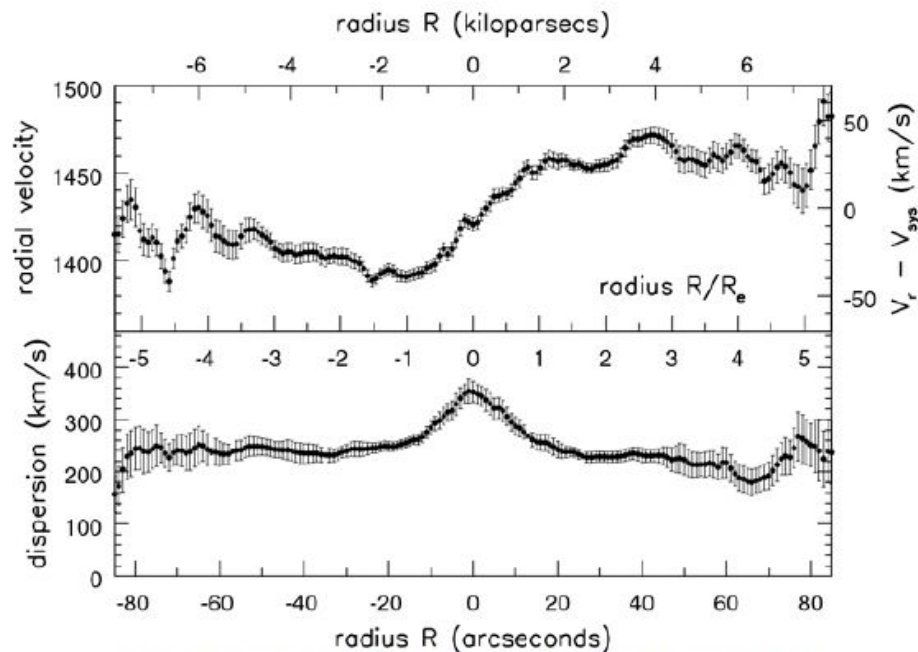
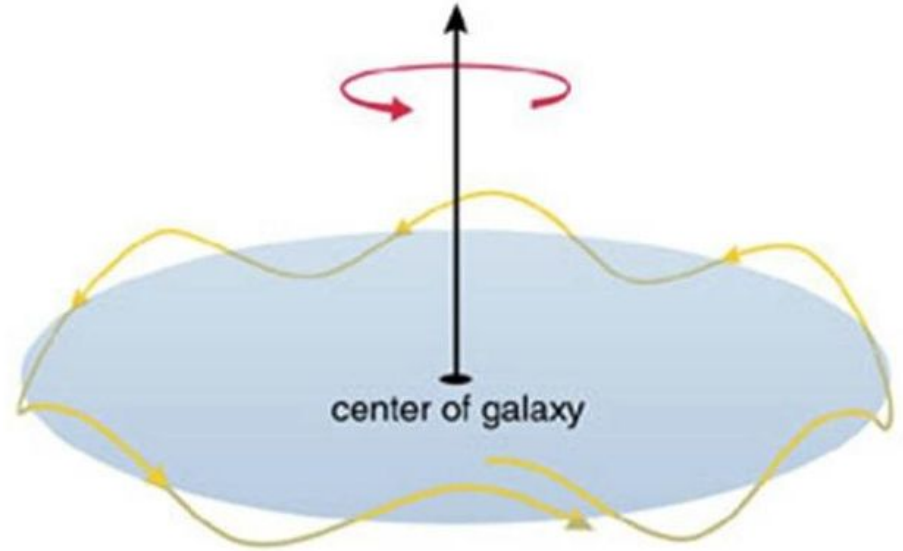


Fig 6.12 (A. Graham) 'Galaxies in the Universe' Sparke/Gallagher CUP 2007

Figura 5.8: Curvas de  $v_R$  y  $\sigma_v$  observadas en función del semieje mayor para la galaxia cD NGC 1399.

# Órbitas de las Estrellas en el Disco

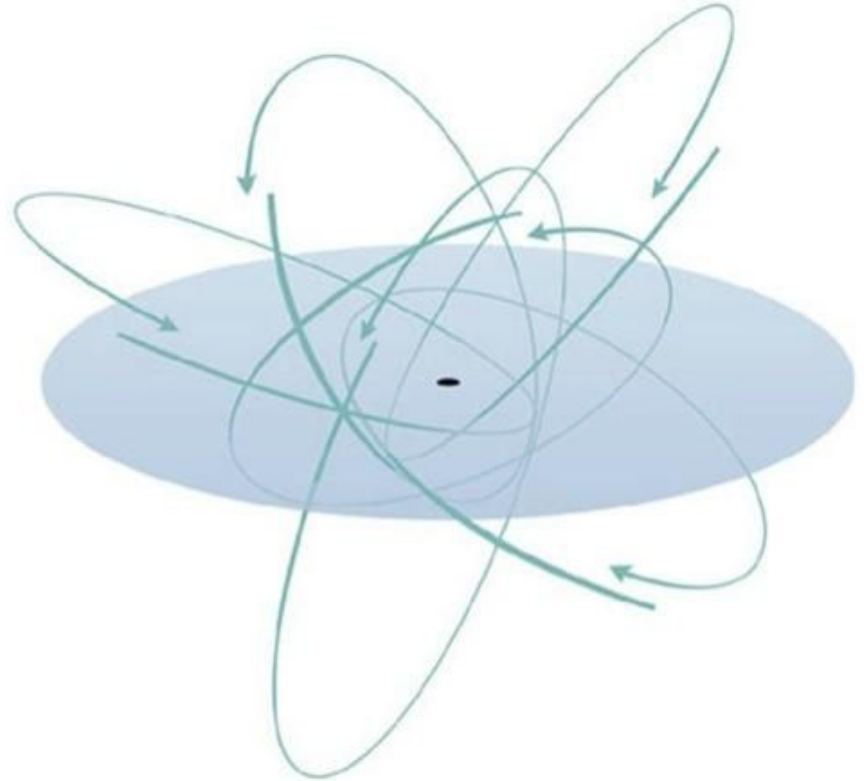
Las estrellas del disco orbitan todas en la misma dirección con apartamientos relativamente pequeños respecto del plano del disco hacia arriba y hacia abajo.





# Órbitas de las Estrellas en el Halo

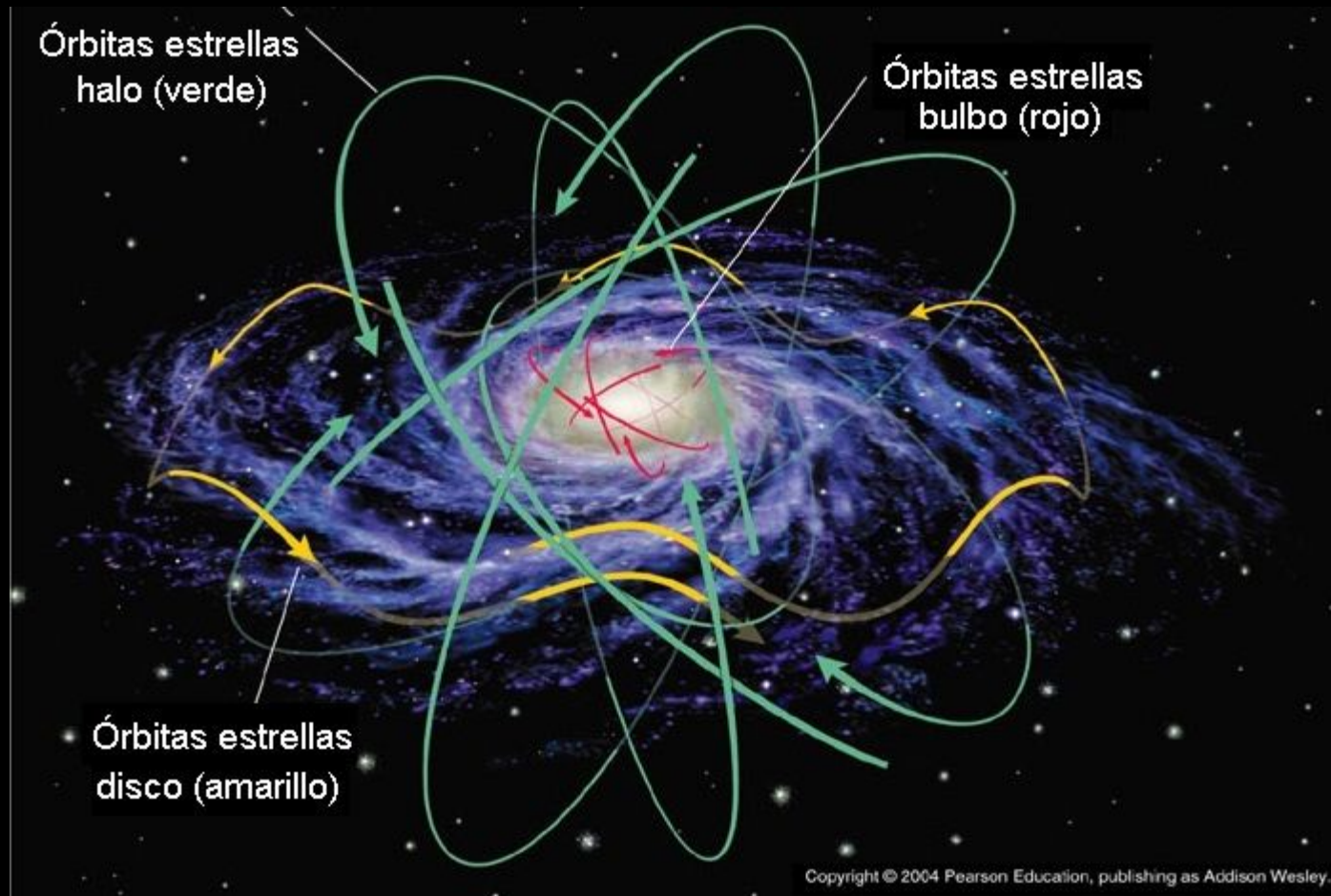
Las órbitas de las estrellas del halo tiene orientaciones aleatorias en el espacio.



Órbitas estrellas  
halo (verde)

Órbitas estrellas  
bulbo (rojo)

Órbitas estrellas  
disco (amarillo)



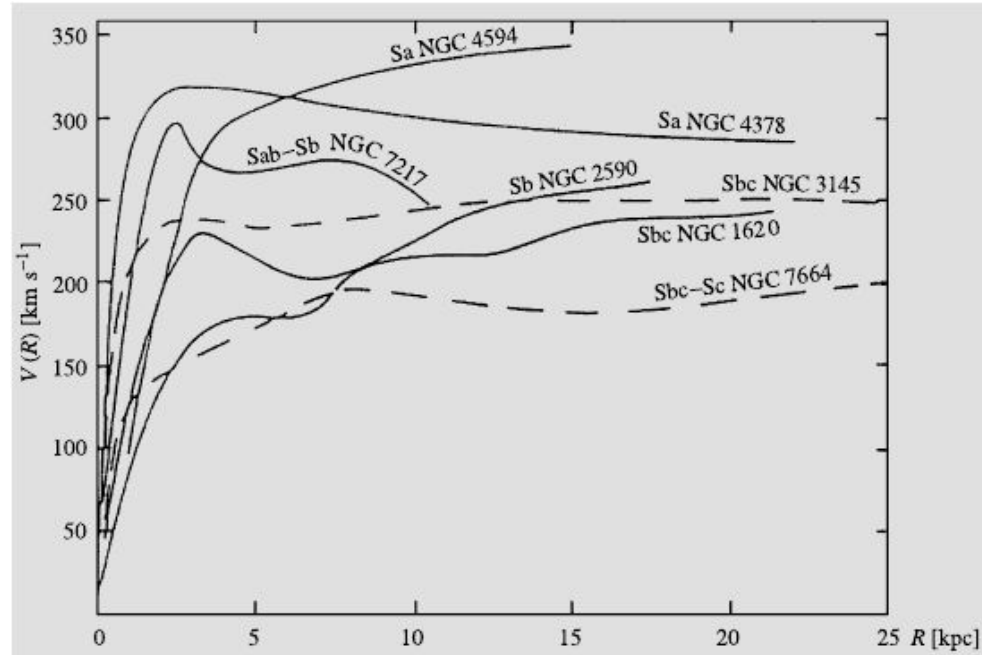
Copyright © 2004 Pearson Education, publishing as Addison Wesley.

**La dependencia radial de la dispersión de la velocidad proporciona información sobre la distribución de masa dentro de la galaxia.** Dado que también depende de cómo se distribuyen las formas de las órbitas estelares en la galaxia, su interpretación requiere modelos dinámicos detallados.

Algunas elípticas tienen diferentes sistemas de velocidad. Un caso extremo es el NGC 4550 clasificado como E7/S0. La mitad de sus estrellas orbitan el centro en una dirección y el resto en la dirección opuesta. Esto indica que la galaxia es una fusión de dos galaxias espirales que originalmente giraban en direcciones opuestas.

# Sistemas con Rotación

En las galaxias espirales, la distribución de masa se puede estudiar directamente utilizando las velocidades de rotación observadas del gas interestelar. Esto puede observarse en longitudes de onda ópticas de las líneas de emisión de gas ionizado en las regiones H II o en longitudes de onda de radio de la línea de 21 cm de hidrógeno neutro (\*).

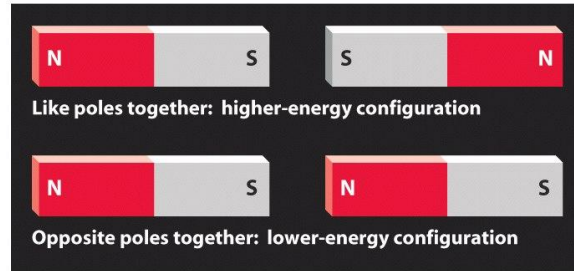


**señales de la materia oscura**

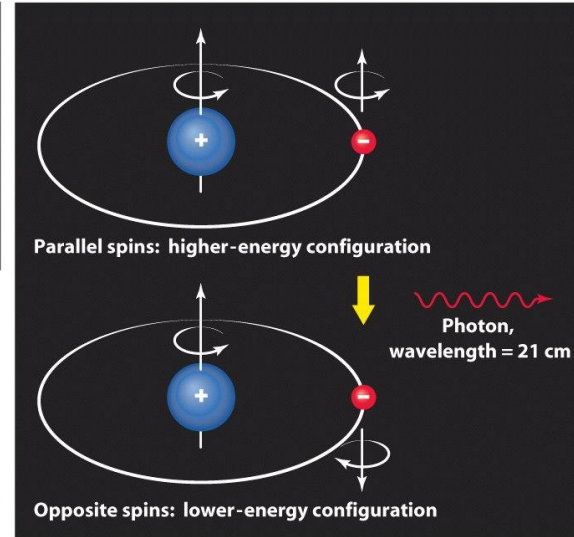
El comportamiento cualitativo de la curva de rotación en todas las galaxias espirales es similar a la curva de rotación de la Vía Láctea: hay una porción central, donde la velocidad de rotación es directamente proporcional al radio, correspondiente a la rotación del cuerpo rígido. En un radio de pocos kpc, la curva se da vuelta y se vuelve plana, es decir, la velocidad de rotación no depende del radio. En los primeros tipos de Hubble, la curva de rotación se eleva más abruptamente cerca del centro y alcanza mayores velocidades en la región plana (Sa unos 300 km/s, Sc unos 200 km/s). Una velocidad de rotación más alta indica una masa mayor y, por lo tanto, los tipos Sa deben tener una densidad de masa mayor cerca del centro. Esto no es inesperado, ya que un bulbo más masivo es una de las propiedades definitorias de los primeros tipos de espirales.

# Hidrógeno Neutro (\*)

Cuando un electrón de un átomo de Hidrógeno neutro pasa de un nivel alto de energía a un nivel más bajo (spin paralelo al protón a spin antiparalelo) emite un fotón de longitud de onda 21.1cm, es decir ondas de radio.



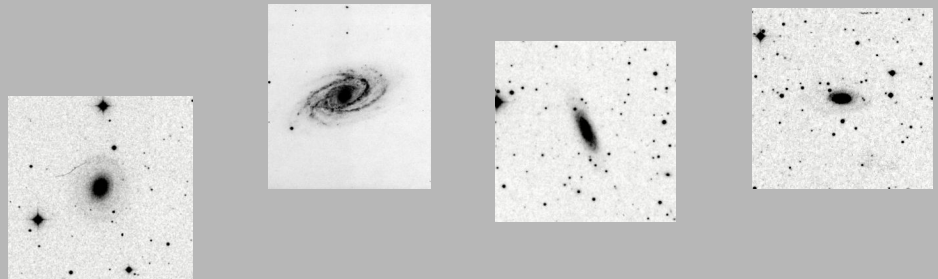
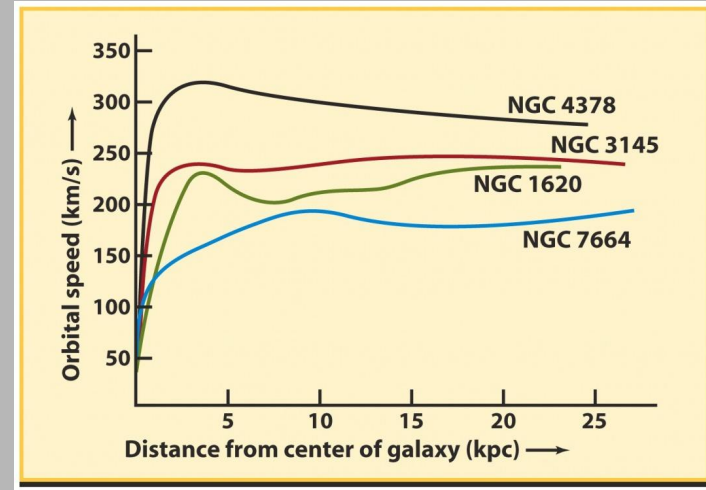
(a) The magnetic energy of two bar magnets depends on their relative orientation



(b) The magnetic energy of a proton and electron depends on their relative spin orientation

El perfil de brillo superficial de una galaxia brinda información acerca de la distribución de su materia luminosa. Las curvas de rotación, en cambio, brindan información acerca de la distribución de materia total, es decir luminosa y oscura.

Al igual que para la Vía Láctea, las curvas de rotación de la mayoría de las galaxias revelan que existen grandes cantidades de materia oscura alrededor de las mismas.



# Determinación de Masas

La distribución de la masa en las galaxias es una cantidad crucial, tanto para la cosmología como para las teorías del origen y evolución de las galaxias. Observacionalmente se determina a partir de las velocidades de las estrellas y el gas interestelar. Las masas totales de galaxias también se pueden derivar de sus movimientos en cúmulos de galaxias. Los resultados generalmente se dan en términos de la correspondiente relación masa-luminosidad  $M/L$ , utilizando la masa solar y la luminosidad como unidades.

El valor medido en la vecindad solar de la Vía Láctea es  $M/L = 3$ . Si  $M/L$  fuera constante, la distribución de masa podría determinarse a partir de la distribución de luminosidad observada multiplicando por  $M/L$ . Desafortunadamente, no existe un valor universalmente válido para la relación  $M/L$ .



Las **masas de las galaxias elípticas** se pueden obtener a partir de la dispersión de la velocidad estelar. El método se basa en el teorema del virial, que dice que en un sistema en equilibrio, la energía cinética  $T$  y la energía potencial  $U$  están relacionadas según la ecuación:

$$2T + U = 0$$

Dado que las elípticas giran lentamente, la energía cinética de las estrellas se puede escribir

$$T = Mv^2/2$$

donde  $M$  es la masa total de la galaxia y  $v$  el ancho de velocidad de las líneas espectrales. La energía potencial es

$$U = -2GM^2/2R$$

donde  $R$  es un radio promedio adecuado de la galaxia que se puede estimar o calcular a partir de la distribución de luz. Obtenemos entonces:

$$M = \frac{2v^2 R}{G}$$

La masa de una galaxia elíptica puede llegar a ser de

$$10^{12} - 10^{13} M_{\odot}$$

Las **masas de las galaxias espirales** se obtienen a partir de su curva de rotación  $v(R)$ , que da la variación de su velocidad de rotación con el radio.

Suponiendo que la mayor parte de la masa está en el bulbo casi esférico, la masa dentro del radio  $R$ ,  $M(R)$ , se puede estimar a partir de la tercera ley de Kepler:

$$M(R) = \frac{Rv(R)^2}{G}$$

Las partes más externas no dependen de  $R$ .

Las masas de las galaxias espirales van

$$10^{11} - 10^{12} M_{\odot}$$

**Tanto para las galaxias elíptica como para las espirales, estas masas incluyen la materia bariónica más la materia oscura.**

# Relaciones de Escala

# Relaciones de Escala

Las **relaciones de escala** describen fuertes tendencias que se observan entre propiedades físicas importantes (como masa, tamaño, luminosidad y colores) de las galaxias. Tanto las galaxias de tipo temprano como las de tipo tardío exhiben relaciones de escala, aunque se utilizan relaciones diferentes para cada tipo.

Entre las relaciones de escala para las galaxias de tipo tardío, la más importante es la relación Tully-Fisher. Esta relación, que puede derivarse del teorema del virial, relaciona la velocidad de rotación de la galaxia con su luminosidad, y se usa a menudo para determinar distancias en el Universo. Por lo tanto, proporciona un peldaño importante en la escalera de distancias.

Hay una serie de relaciones de escala importantes para las galaxias de tipo temprano. Éstas incluyen:

- La Relación Faber-Jackson (FJR): muestra una fuerte correlación entre las masas y luminosidades de las galaxias, con las galaxias más masivas siendo las más luminosas.
- La Relación Color-Magnitud (CMR).
- La relación de Kormendy: muestra una correlación entre los radios efectivos de las galaxias y sus brillos superficiales en ese radio.
- El Plano Fundamental (FP): es un plano tridimensional que muestra fuertes correlaciones entre los radios efectivos, la luminosidad y las dispersiones de velocidad de las galaxias.

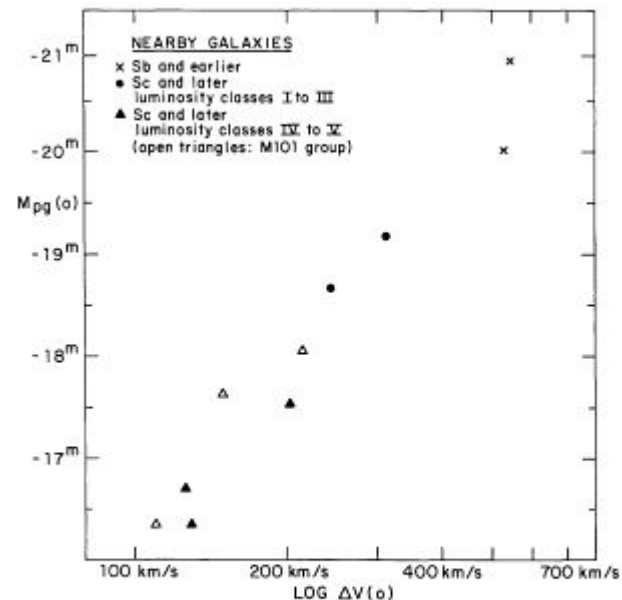
La existencia de relaciones de escala que correlacionan las propiedades físicas de galaxias diferentes indica que los procesos de formación de todas las galaxias dentro de un tipo de galaxia en particular deben ser bastante similares. Por lo tanto, las relaciones proporcionan información sobre la formación y la evolución de las galaxias, y muchas también se utilizan para medir las distancias a las galaxias.

# Espirales: Relación de Tully-Fisher

Establece una relación entre la luminosidad de una galaxia (o su magnitud absoluta) y el máximo de su velocidad de rotación (obtenida de la línea de 21 cm del H). Las más brillantes rotan más rápido. Fue establecida por Brent Tully y J. Richard Fisher en 1977.

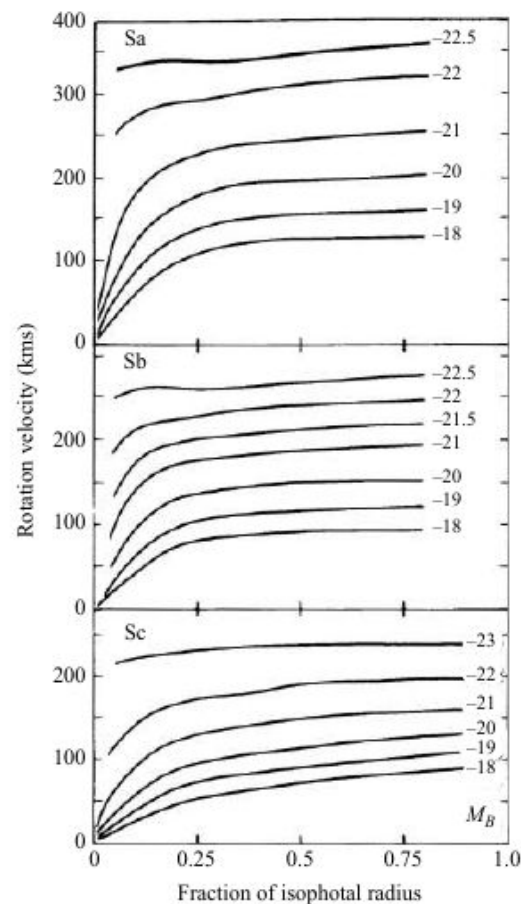
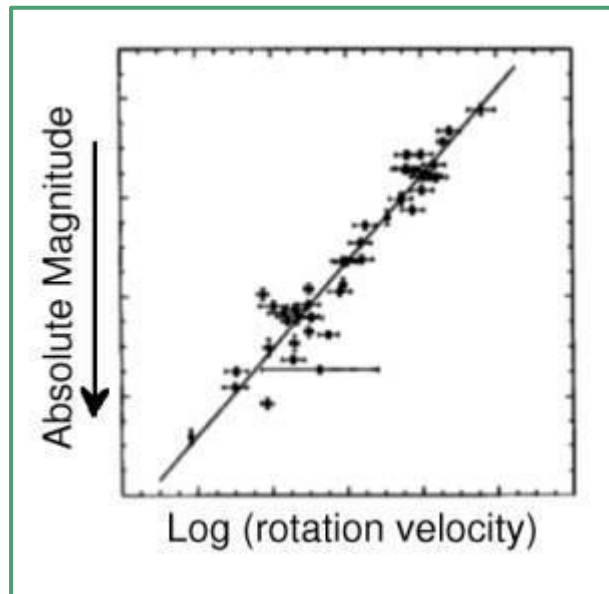
**Esta relación se suele utilizar como un indicador de las distancias a las galaxias.**

R. B. Tully and J. R. Fisher: Distances to Galaxies



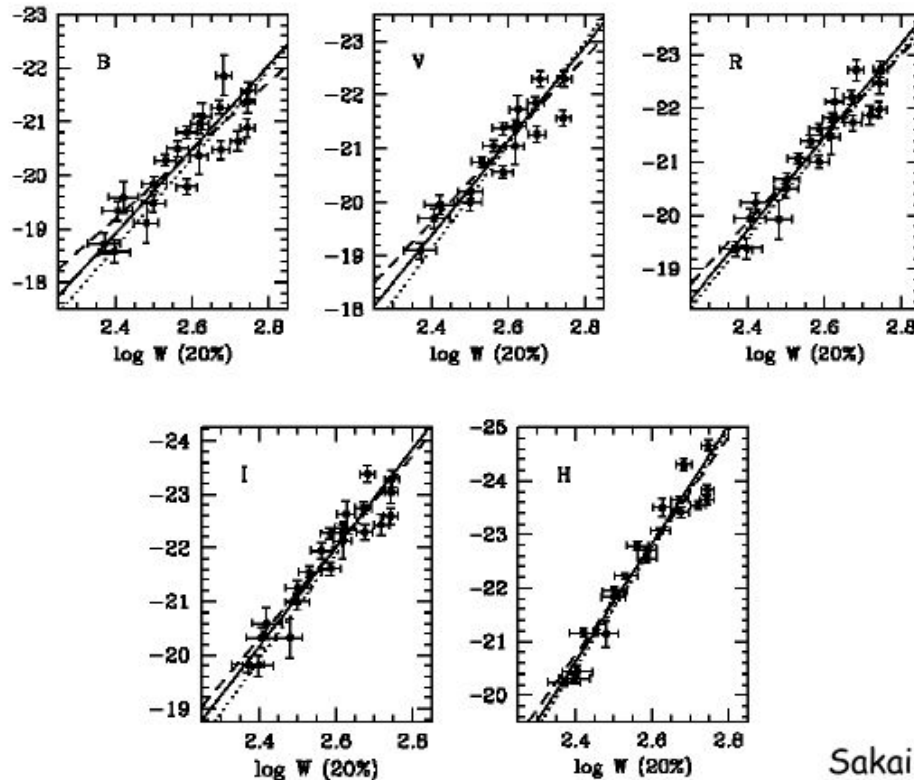
**Fig. 1.** Absolute magnitude—global profile width relation for nearby galaxies with previously well-determined distances. Crosses are M31 and M81, dots are M33 and NGC 2403, filled triangles are smaller systems in the M81 group and open triangles are smaller systems in the M101 group

## Variación con la magnitud.



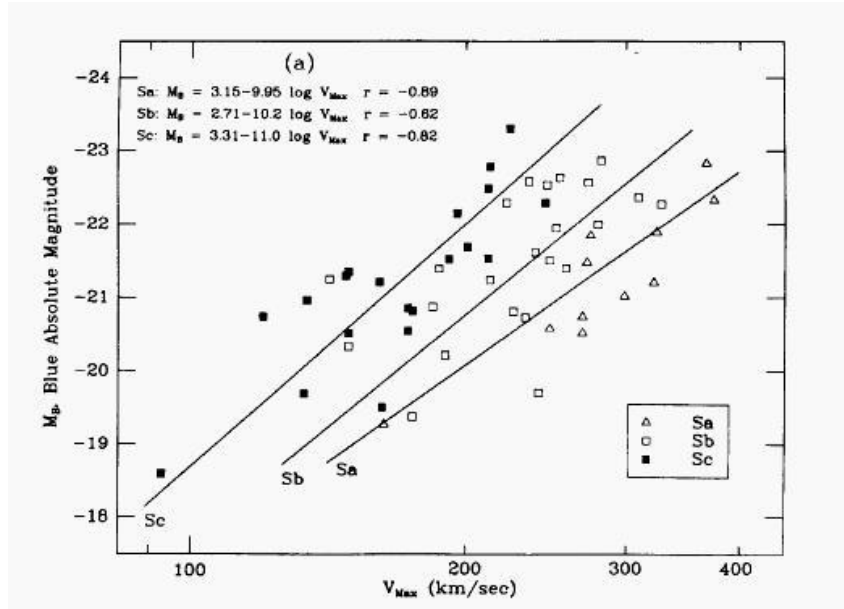
**FIGURE 8** Variations in the average rotation curves of Sa, Sb, and Sc galaxies for various values of absolute magnitude in the  $B$  band. (Figure adapted from Rubin et al., *Ap. J.*, 289, 81, 1985.)

# En Diferentes Bandas



Sakai et al 1999





$$M_B = -9.95 \log(V_{\max}) + 3.15 \quad (Sa)$$

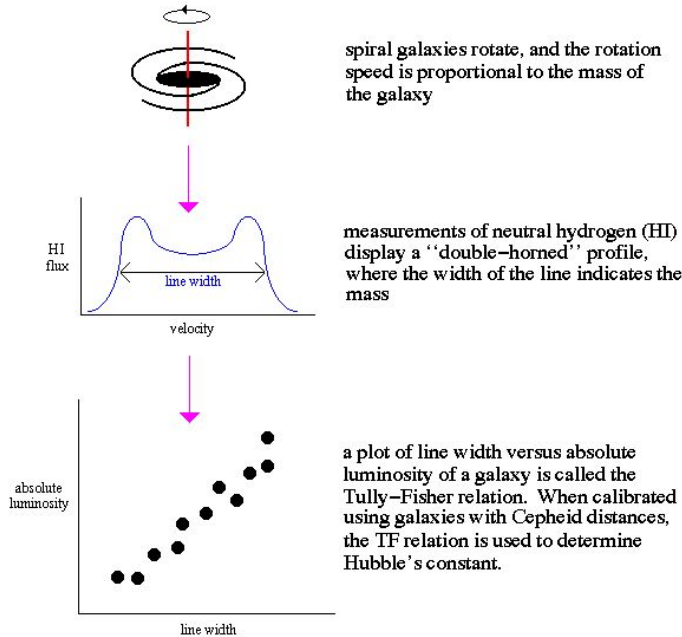
$$M_B = -10.2 \log(V_{\max}) + 2.71 \quad (Sb)$$

$$M_B = -11.0 \log(V_{\max}) + 3.31 \quad (Sc)$$

Sabemos que

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

Tully-Fisher relation



Una luminosidad bien definida frente a la velocidad de rotación (a menudo se mide como una relación de la línea de 21 cm del HI).

$$L \propto V_{rot}^{\gamma}; \gamma \sim 4$$

con  $\gamma$  que, varía con la longitud de onda. En general:

$$M = b \log(W) + c$$

donde  $M$  es la magnitud absoluta y  $W$  es el ancho de línea ampliada por efecto Doppler, corregida por inclinación  $W_{\text{true}} = W_{\text{obs}} / \sin(i)$ .

A través de planteo newtoniano tenemos que:

$$V^2 = \frac{M}{GR}$$

Asumiendo una relación Masa-Luminosidad constante para todas las galaxias  $M/L=C_1$ , se tiene

$$V^2 = \frac{GLC_1}{R}$$

y asumiendo que además todas tienen el mismo brillo superficial  $C_2=L/4\pi R^2$  se tiene que

$$V^2 = GL^{1/2}$$

por lo que se tiene finalmente que

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

# Relaciones entre el Radio y la Luminosidad

Además de la Relación de Tully-Fisher, existen otras correlaciones entre los parámetros fundamentales de las galaxias espirales de distintos tipos morfológicos, tales como luminosidad  $L$  (en las bandas  $I$  y  $K$ ) y velocidad  $V$ , el parámetro o longitud de escala  $R$ .

Una relación conocida es la del radio correspondiente a la isofota 25 del brillo superficial como función de la magnitud, en la banda  $B$ :

$$\log R_{25} = -0.249M_B - 4.00$$

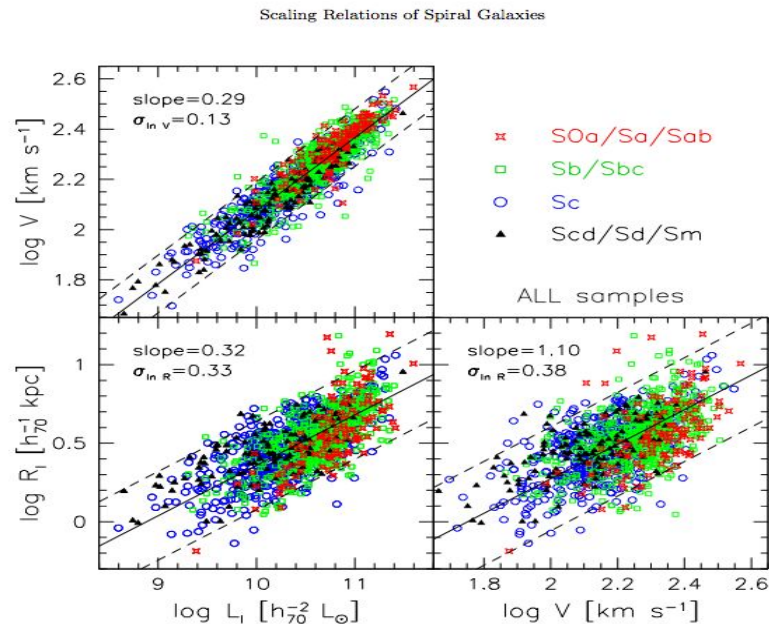


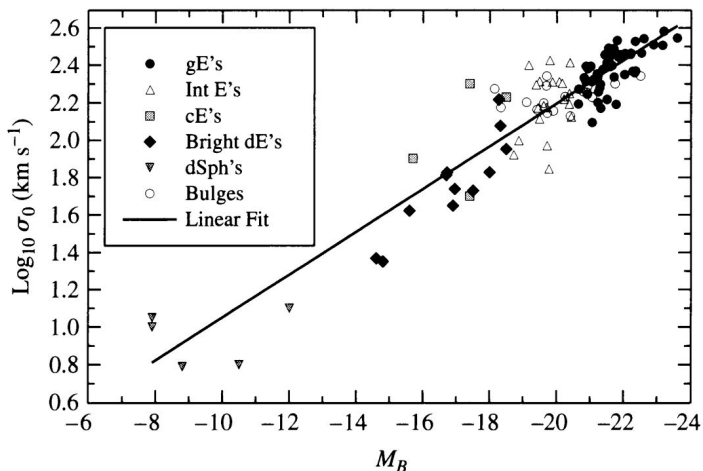
FIG. 3.— VRL scaling relations for all four samples color-coded by Hubble types. The linear orthogonal fits, shown by the solid lines, are reported in Table 2 for the combined samples; the  $2\text{-}\sigma$  observed scatter are given by the dashed lines.

# Elípticas: Relación de Faber-Jackson

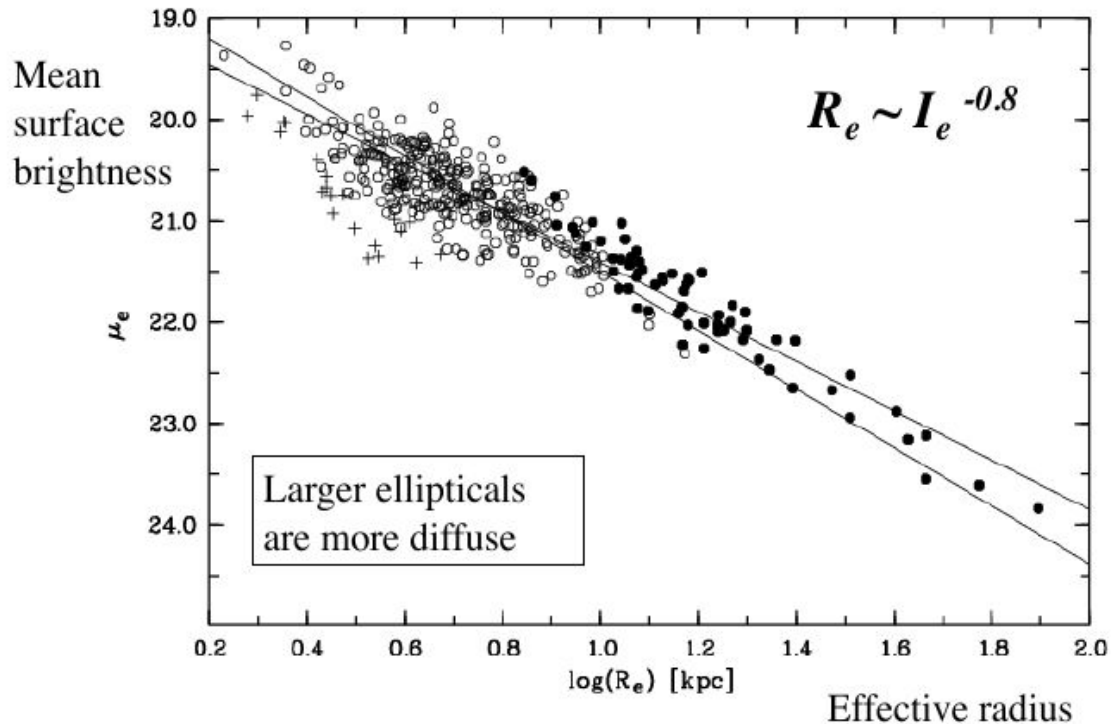
En 1976, Sandra Faber y Robert Earl Jackson encontraron una relación empírica entre la dispersión de velocidades central de galaxias elípticas y su luminosidad. Esta relación establece que las galaxias más brillantes tienen mayor dispersión de velocidad en su zona central:  $L \propto \sigma^4$

$$L \propto \sigma_0^4,$$

$$\log_{10} \sigma_0 = -0.1 M_B + \text{constant.}$$



# Relación de Kormendy



# Plano Fundamental

Las galaxias elípticas están en un plano en el espacio 3D de  $(R_e, \mu, \sigma)$ . Se usa para estimar distancias, y estudiar la dinámica de las galaxias. Restringir modelos de formación y evolución.

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

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

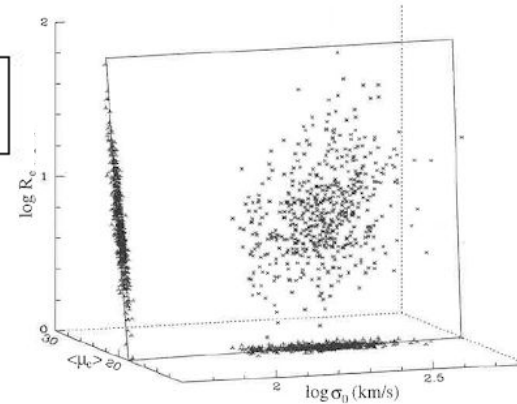
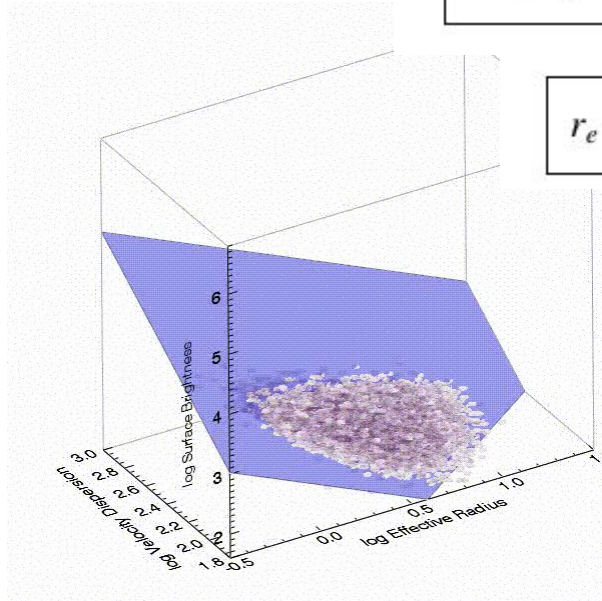
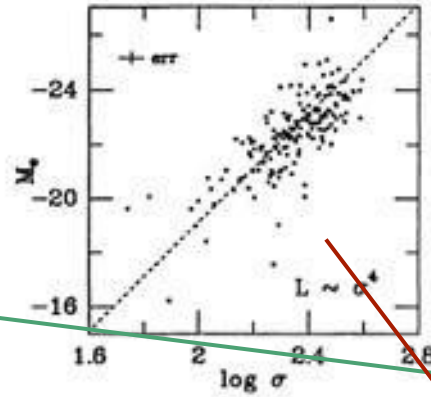
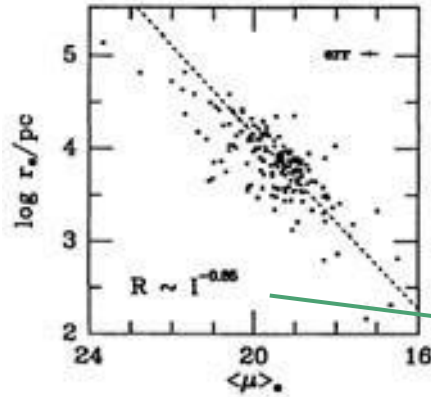


Fig. 2.18. The fundamental plane of elliptical galaxies in the  $\log R_e$ - $\log \sigma_0$ - $\langle \mu \rangle_0$  space ( $\sigma_0$  is the central velocity dispersion, and  $\langle \mu \rangle_0$  is the mean surface brightness within  $R_e$  expressed in magnitudes per square arcsecond). [Plot kindly provided by R. Saglia, based on data published in Saglia et al. (1997) and Wegner et al. (1999)]

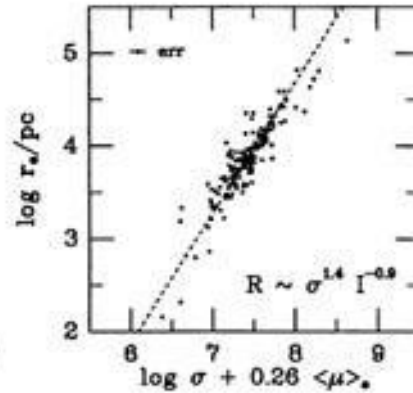
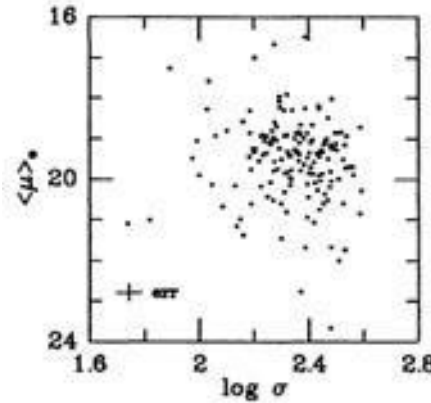
# Proyecciones del Plano Fundamental

Tamaño



Magnitud

Brillo Superficial



*Relación de Kormendy*

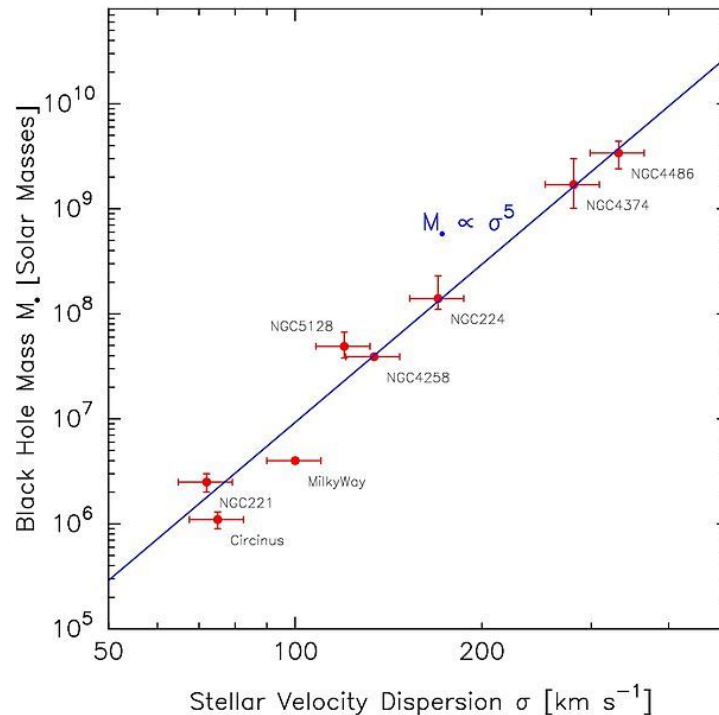
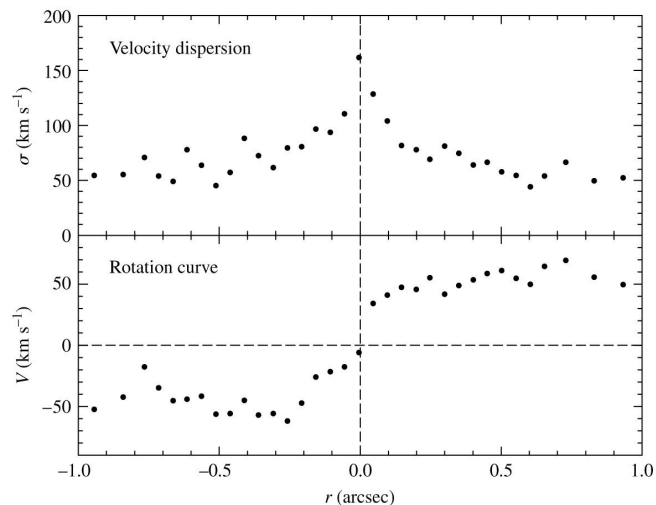
*Relación Faber-Jackson*

dispersión de velocidades

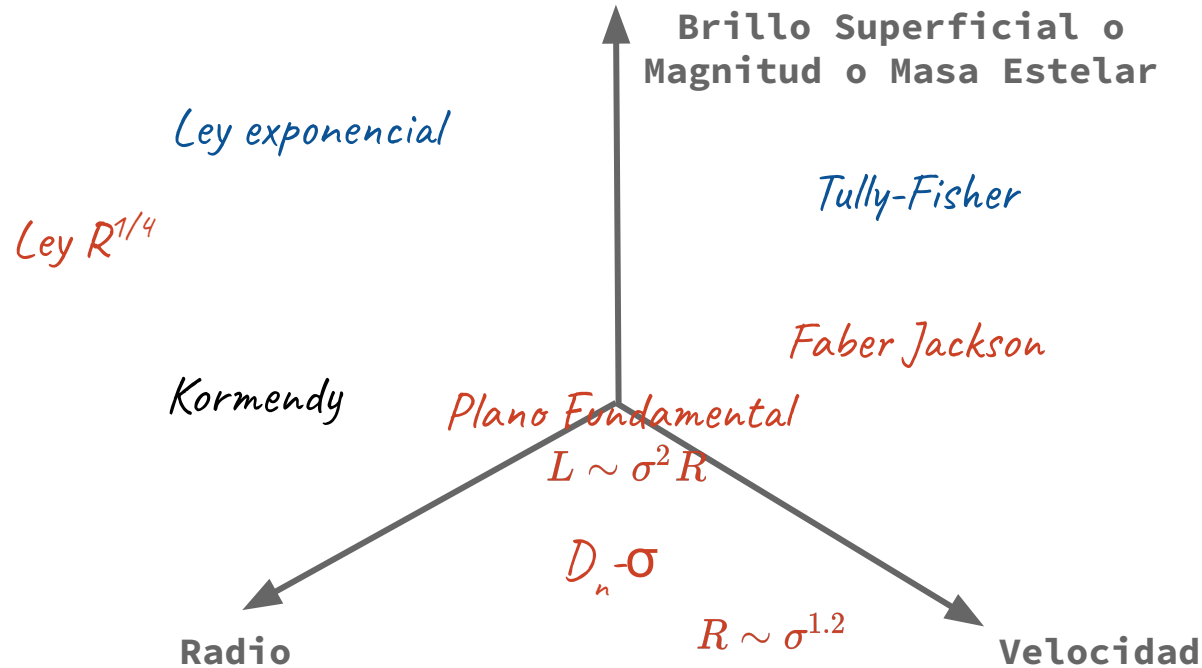


# Relación M- $\sigma$

En el 2000 se encontró una relación empírica entre la **masa del agujero negro central supermasivo M** de una galaxia y la **dispersión de velocidad  $\sigma$  de su componente esferoidal**. En el gráfico de abajo se muestra el perfil de velocidad y su dispersión para la galaxia M32.



Galaxias **espirales** y **elípticas** siguen diferentes relaciones de escala.



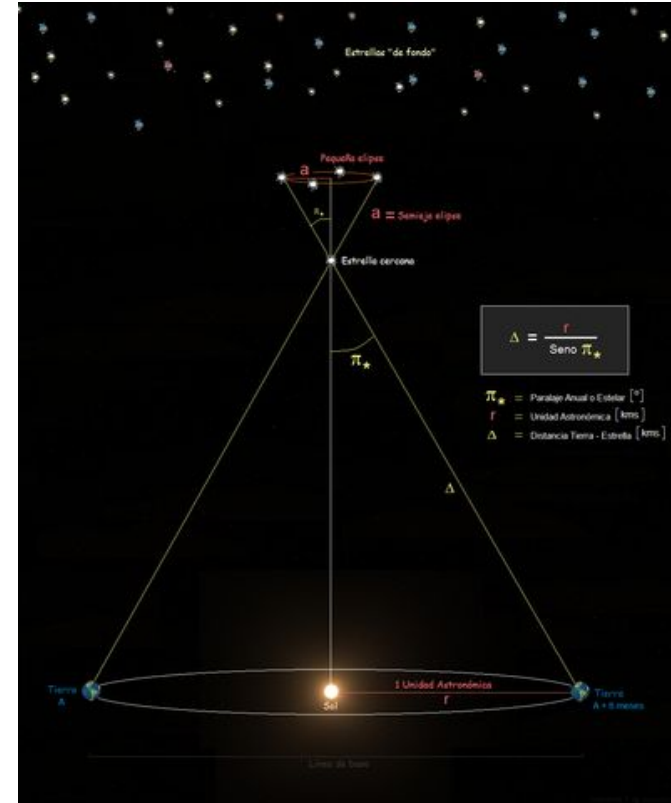
# Indicadores de Distancia

# Indicadores de Distancia

- Se llama indicadores de distancia a los objetos astronómicos con al menos una característica medible de su valor medio y dispersión.
- Hay indicadores *primarios*, que se encuentran en nuestra galaxia.
- Indicadores *secundarios*, en otras galaxias pero calibrados con los indicadores primarios.

# Paralajes Estelar

Sabemos que 1 UA es la distancia Tierra-Sol y que es de alrededor de 150 millones de kilómetros. Con este valor podemos calcular la paralaje y por ende, la distancia a las estrellas.

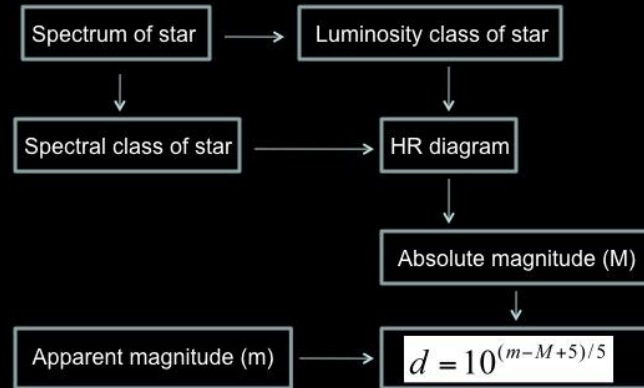


# Paralajes Espectroscópica

Se utiliza el diagrama HR. Se puede vincular un tipo espectral a una magnitud o luminosidad en el diagrama HR.

## Spectroscopic Parallax

**Spectroscopic Parallax** is a method of determining distances to stars summarized with the following flowchart:

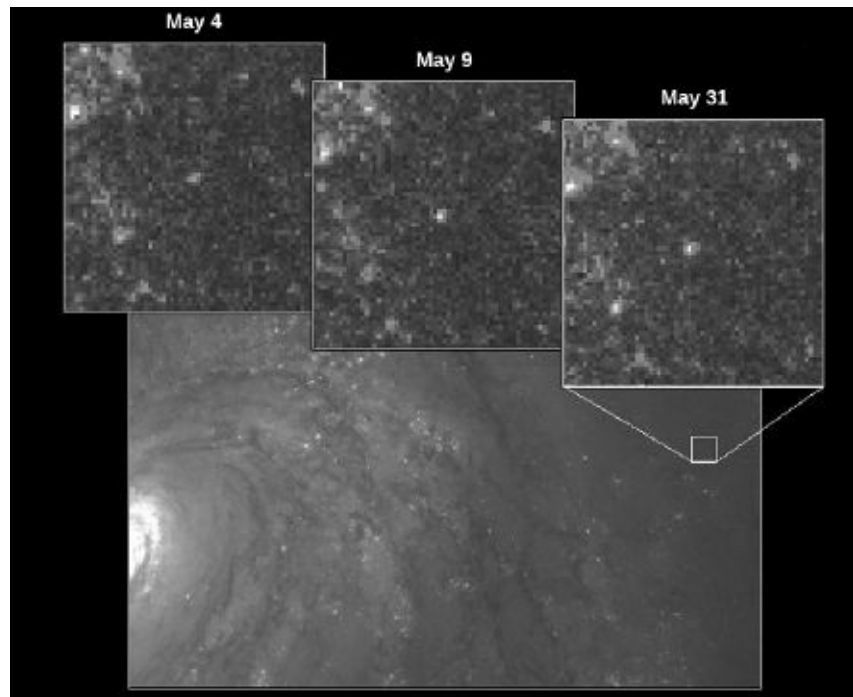


where  $d$  is distance in parsecs

# Variables Cefeidas: Relación Periodo-Luminosidad

Una de las maneras de determinar distancias es utilizando ciertos tipos de estrellas variables intrínsecamente luminosas, como las cefeidas, que pueden verse a distancias muy grandes.

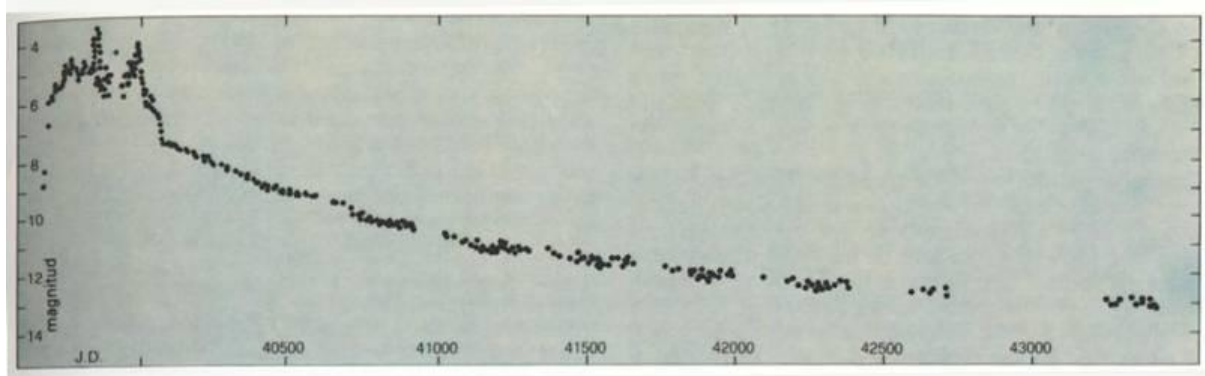
- Pueden verse hasta 30-50 Mpc gracias al telescopio Hubble! Lo más lejos que podemos llegar es hasta el cúmulo de Virgo.
- Estrellas con magnitudes -2 a -7 en el visual y de fácil detección.
  - Medición de la magnitud aparente y corrección por absorción.
  - Confección de la curva de luz: relación entre el período y la luminosidad.
  - Derivación de la magnitud absoluta.
  - Módulo de distancia.



$$M_V = -3.53 \log P_d - 2.13 + 2.13(B - V)$$

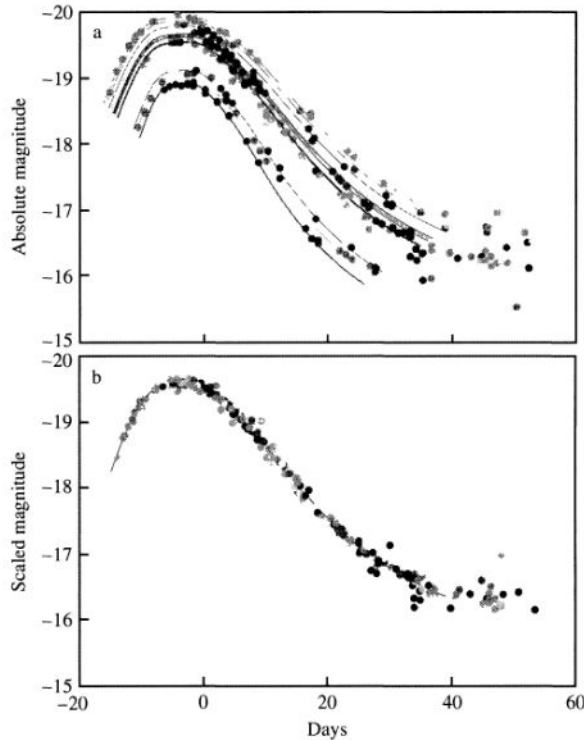
# Supernovas

Objetos luminosos y fáciles de reconocer. Se deriva la distancia a partir de la relación entre el máximo de luminosidad y su tasa de decaimiento. A partir de esta calibración se deriva la magnitud absoluta.



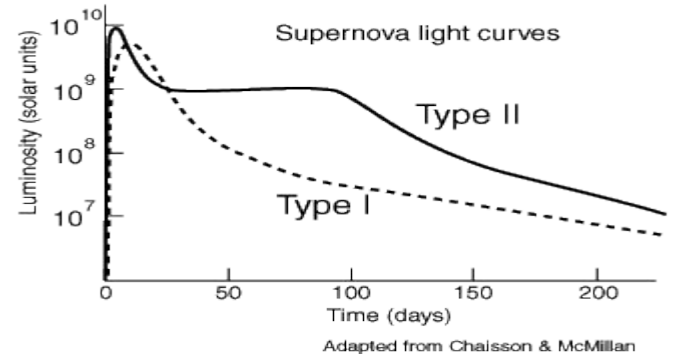


# Supernovas Tipo Ia



**FIGURE 27.1** Low-redshift Type Ia template light curves. (a) The light curves of several Type Ia supernovae, as measured. (b) The light curves after applying the time scale stretch factor. The blue absolute magnitude is displayed on the vertical axis. (Figure adapted from Perlmutter, *Physics Today*, 56, No. 4, 53, 2003.)

Son objetos puntuales y muy luminosos y su luminosidad no tiene mucha dispersión. Se calibra la magnitud absoluta y de allí se deriva luego el módulo de distancia.



## Ejemplo:

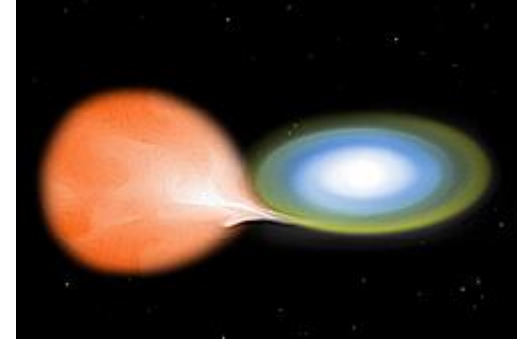
La supernova SN 1963p en la galaxia NGC 1084 tuvo una magnitud aparente  $B=14.0$  en el pico de luminosidad. Con una extensión de 0.49 mag, la distancia a la supernova, y por ende, a la galaxia es:

$$d = 10^{(m-M-A+5)/5} = 41.9 \text{ Mpc}$$



# Novas: enana blanca + estrella evolucionada

Pueden ser usadas análogamente a las supernovas. Hay una amplia variación del pico donde ocurre la nova. Hay una relación entre la magnitud visual en el máximo y el tiempo en el cual la luz declina en 2 magnitudes ( $\text{mag d}^{-1}$ ).



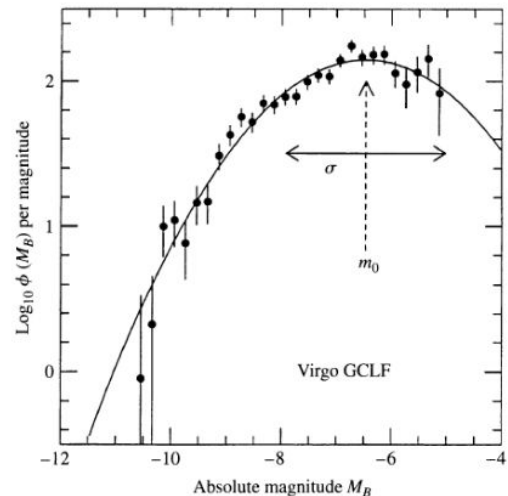
$$M_V^{max} = 9.96 - 2.31 \log \dot{m}$$

# Cúmulos Globulares

Permiten determinar distancias hasta unos 50 Mpc.

Misma función de luminosidad en todas las galaxias, de donde se deriva una magnitud absoluta.

La FL de GCs es una función gaussiana, con un pico en  $M_0 \sim -6.5$ . Este valor provee una “candela estándar” para determinar distancias.

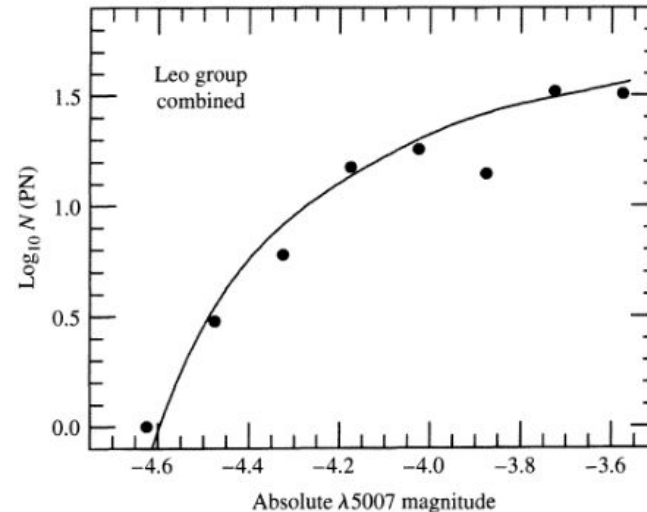


**FIGURE 27.2** The luminosity function for the globular clusters around four giant elliptical galaxies in the Virgo cluster. About 2000 clusters brighter than  $B = 26.2$  were used. A distance of 17 Mpc was adopted for the Virgo cluster. [Adapted from a figure courtesy of Jacoby (KPNO/NOAO), as provided by Harris (McMaster Univ.) for *Publ. Astron. Soc. Pac.*, 104, 599, 1992.]

# Nebulosas planetarias

Están en todas las galaxias, con una función de luminosidad invariante en todas las galaxias. De allí se obtiene  $M$ .

Se usa una magnitud absoluta de corte en -4.53 (en 5007 Amstrongs) y permite determinar distancias hasta unos 20 Mpc.



**FIGURE 27.3** The planetary nebula luminosity function for the Leo I group of galaxies. (Figure adapted from Ciardullo, Jacoby, and Ford, *Ap. J.*, 344, 715, 1989.)

# Fluctuaciones de Brillo Superficial

Las galaxias siguen unos perfiles de brillo superficial bien conocidos. La presencia de estrellas gigantes muy luminosas en la galaxia hace que aparezcan pequeñas fluctuaciones en este brillo superficial. Este método se puede realizar gracias a la tecnología de los CCD.

Se realiza un estudio estadístico que describe la variación de la magnitud por pixel, lo cual correlaciona con la distancia.

- ➔ Usando estadística de Poisson en las fluctuaciones del brillo superficial se puede estimar el número de estrellas por unidad de superficie y deducir, en función de este número, la distancia a la galaxia.

→ Relación Tully – Fisher para S's

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

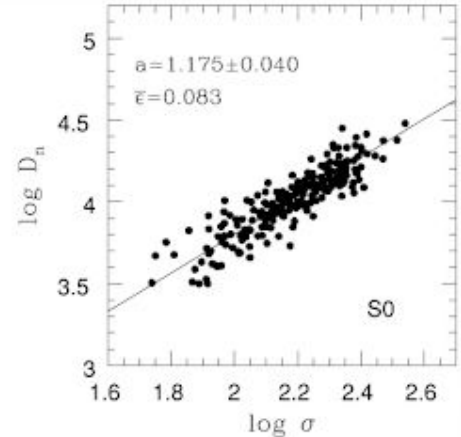
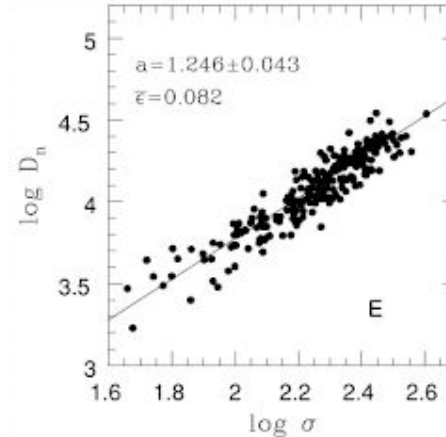
→ Relación Dn- $\sigma$  para E's o Faber- Jackson

$$L \propto \sigma^4$$

# Relación $D_n$ - $\sigma$

$D_n$  es un radio en arcsec que encierra un brillo superficial de  $20.75 \text{ mag arcsec}^{-2}$ . Esta relación tiene la ventaja de que el brillo superficial no depende de la distancia. Este diámetro es inversamente proporcional a la distancia.

$$\log(D_n) = 1.333 \log \sigma + C$$



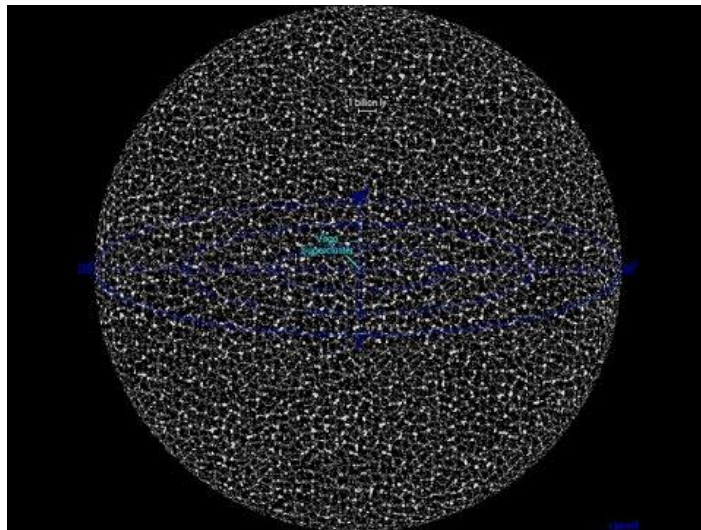


**TABLE 27.1** Distance Indicators. (Adapted from Jacoby et al., *Publ. Astron. Soc. Pac.*, 104, 599, 1992.)

Method	Uncertainty for Single Galaxy (mag)	Distance to Virgo Cluster (Mpc)	Range (Mpc)
Cepheids	0.16	15 – 25	29
Novae	0.4	$21.1 \pm 3.9$	20
Planetary nebula luminosity function	0.3	$15.4 \pm 1.1$	50
Globular cluster luminosity function	0.4	$18.8 \pm 3.8$	50
Surface brightness fluctuations	0.3	$15.9 \pm 0.9$	50
Tully–Fisher relation	0.4	$15.8 \pm 1.5$	> 100
$D$ – $\sigma$ relation	0.5	$16.8 \pm 2.4$	> 100
Type Ia supernovae	0.10	$19.4 \pm 5.0$	> 1000

# Determinación de Distancias: Ley de Hubble

De acuerdo a las observaciones el Universo parece ser *homogéneo* e *isotrópico* en grandes escalas, base del **principio cosmológico**. Esto implica que un observador en una galaxia ve moverse a las otras galaxias con el mismo cuadro de velocidades. Entonces, la velocidad relativa de dos galaxias será proporcional a la distancia que hay entre ella.



$$v = H_0 r$$

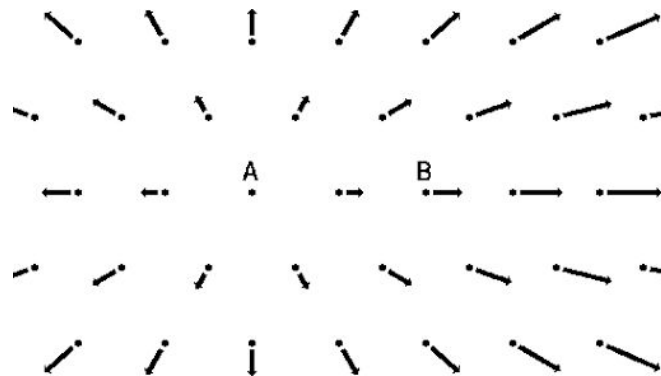
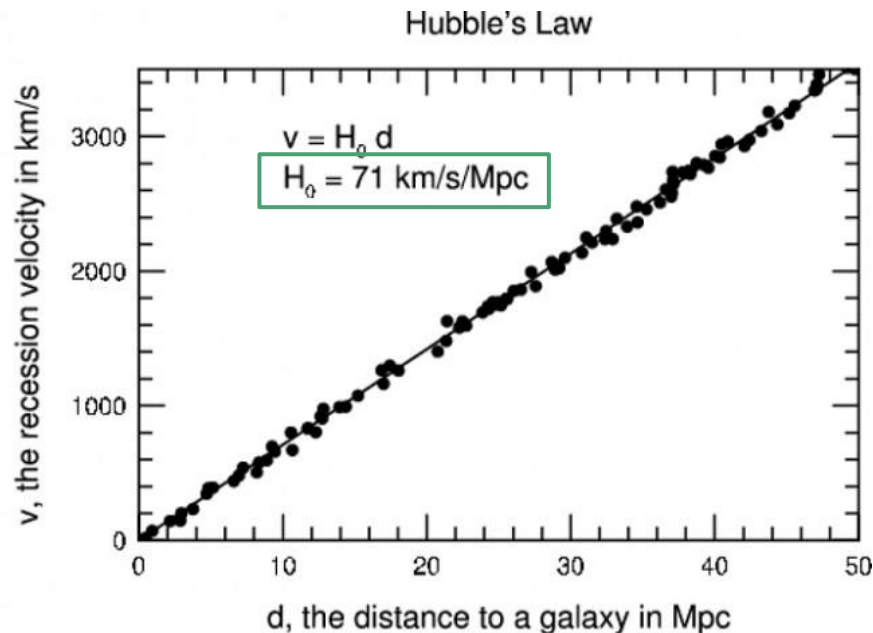
$v$  = velocidad de recesión  
 $H_0$  = parámetro de Hubble  
 $r$  = distancia

Entonces, mientras más lejana está la galaxia, más rápido se aleja de nosotros, entonces el Universo está en expansión.

Ojo: la constante de Hubble varía con el tiempo a medida que el universo evoluciona.

En 1936 Hubble determinó  $H=536 \text{ km/sMpc}$ .

Esta relación es válida cuando consideramos un volumen grande.



La velocidad radial de un objeto se mide con el efecto Doppler.

$$z = \frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{\sqrt{1 + v/c}}{\sqrt{1 - v/c}} - 1; \quad z = \frac{v}{c} \text{ si } v \ll c$$

Donde  $z$  es el **redshift** cosmológico.

El corrimiento al rojo de una galaxia es debido a dos términos: uno correspondiente a la parte cosmológica y otro a la velocidad peculiar radial:

$$v = H_0 r + v_p$$

Por lo tanto, no toda la velocidad medida por el efecto Doppler debe atribuirse a la expansión del Universo.

El valor actual de  $H_0 \sim 67\text{-}72 \text{ km/sMpc}$ .

# THE HUBBLE CONSTANT

