

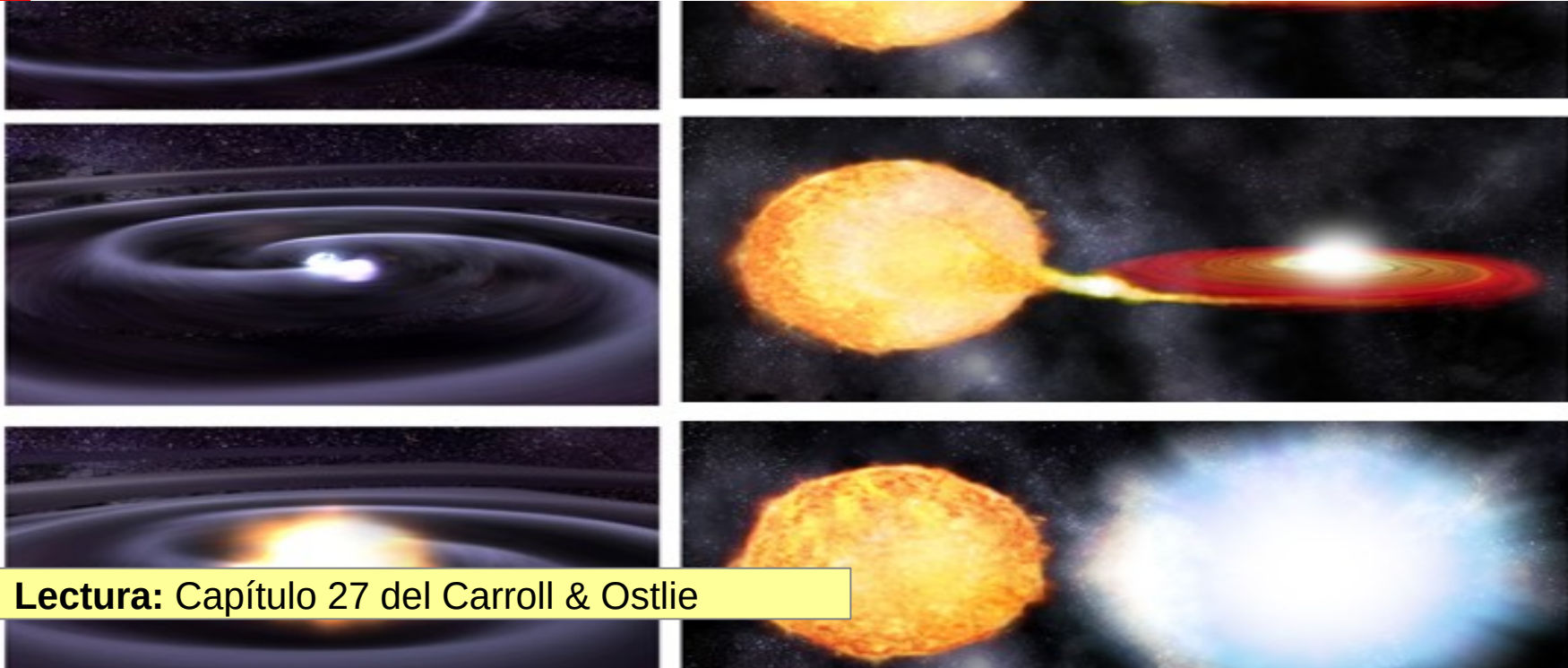
Escalera de Distancia Cosmológica

Distancias extragalácticas

¿Por qué es importante medir la distancia a las galaxias?

- Propiedades fundamentales de las galaxias dependen de la distancia:
Luminosidades, masas (visible y oscura), tamaños, tasas de formación estelar, etc.
- Las galaxias son los ladrillos que construyen el Universo. Por lo tanto entender su distribución en el Universo contribuye directamente a entender la Cosmología:

Escalera de distancias extragaláctica

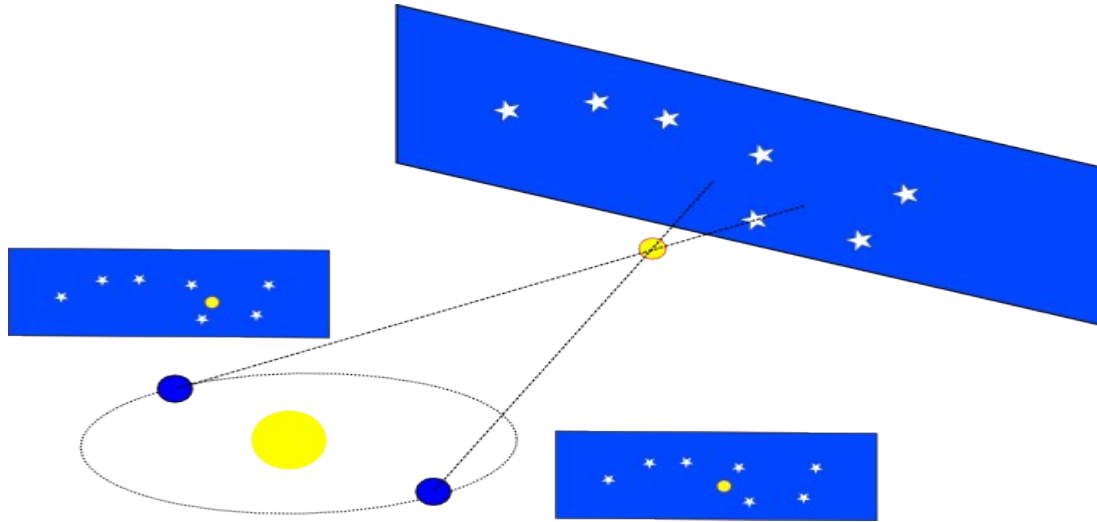


Lectura: Capítulo 27 del Carroll & Ostlie

Es una escalera porque usamos el peldaño de abajo para alcanzar el de arriba

Es fundamental para obtener una medida precisa de H_0 y por tanto la edad del Universo

Escalera de distancias – **Paralaje (método directo)**



La Tierra gira alrededor del Sol a una velocidad aproximada de 30km/s, demorándose un año en dar una vuelta.

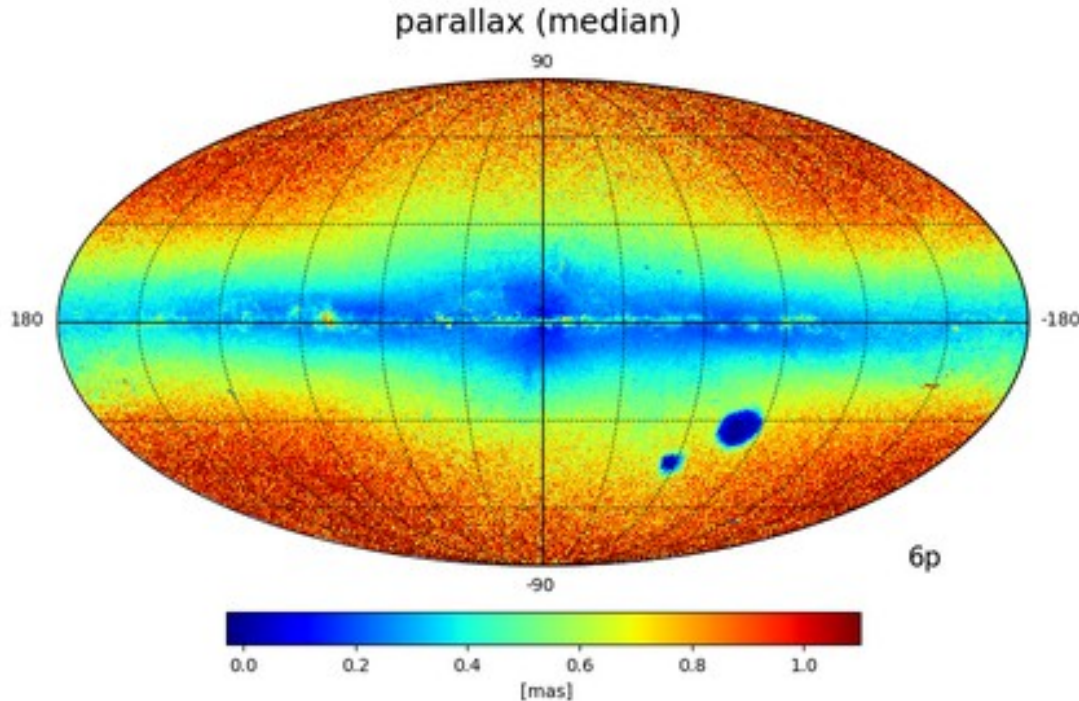
Observaciones deben tomarse en distintas épocas

Distancias Galácticas (para estrellas muy cercanas)

Rango de distancias al que se puede aplicar esta técnica:
desde las estrellas más cercanas hasta ~100pc como máximo

Es la base para calibrar métodos que miden distancias más grandes

Escalera de distancias – **Paralaje (método directo)**



GAIA DR3

El telescopio espacial GAIA recientemente midió el paralaje de todas las estrellas en el cielo.

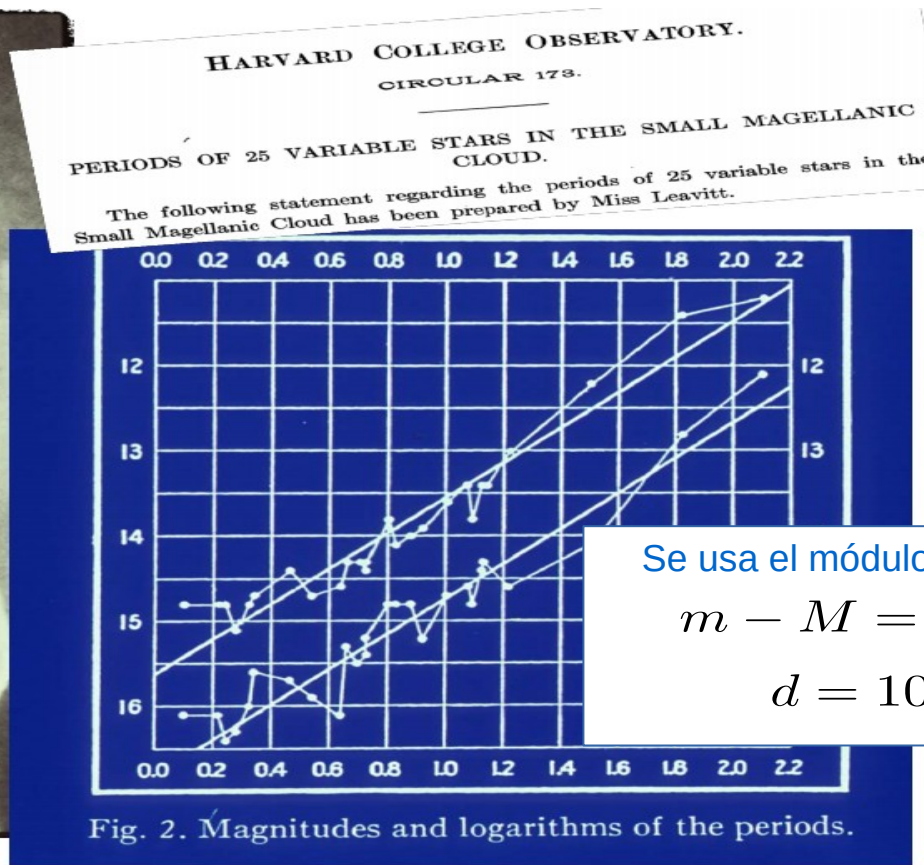
El halo de la Vía Láctea muestra estrellas con grandes velocidades

Las Nubes de Magallanes se observan azules sin paralaje debido a que están a distancias mucho mayores

Escalera de distancias – Las estrellas Cefeidas



Henrietta Swan Leavitt



Leavitt, 1908

Leavitt & Pickering, 1912

Se usa el módulo de distancia para calcular d:

$$m - M = 5 \log_{10} d - 5 + A_v$$

$$d = 10^{(m-M+5-A_v)/5}$$

Escalera de distancias – Las estrellas Cefeidas

Para calibrar la relación período luminosidad se uso la distancia a una Cefeida clásica con el método de paralaje

Ahora se ha calibrado con varias medidas y se usa la relación luminosidad-período-color:

$$M_{\langle V \rangle} = -3.56 \log_{10} P_d - 2.13 + 2.13(B - V)$$

Se usa para medir distancia hasta galaxias en el Cúmulo de Virgo
(la mas distante se ha hecho hasta 29 Mpc)

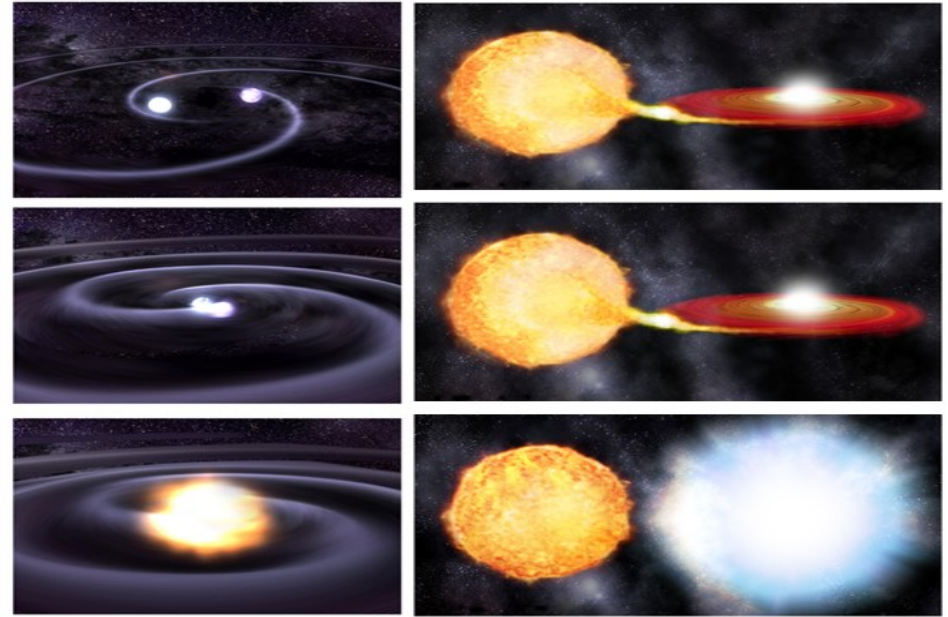
Error en la distancia: 7-15%
Mayor fuente de error: extinción interestelar

Escalera de distancias – Supernovas

SN de tipo Ia:

→ Son muy brillantes y su luminosidad está muy bien relacionada con la forma de su curva de luz.

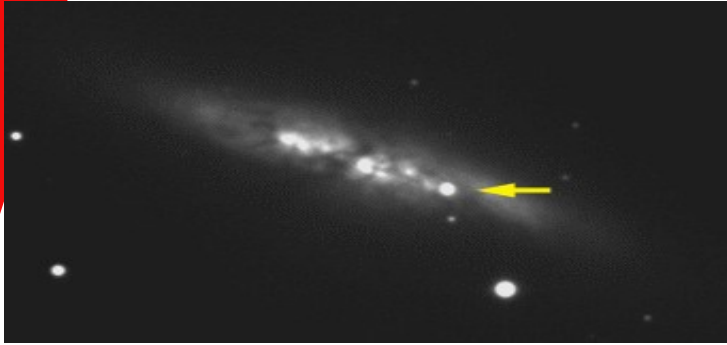
→ Se usan para calcular distancias hasta ~ 100 Mpc



SN Ia: Sistema binario de una enana blanca + otra estrella

El brillo de las SN Ia proviene del colapso de una enana blanca luego de acretar material desde una compañera. Dado el límite de Chandrasekhar para enanas blancas ($1.4M_{\odot}$), se espera entonces que la luminosidad de estas supernovas sean similares en todos estos casos

Escalera de distancias – Supernovas

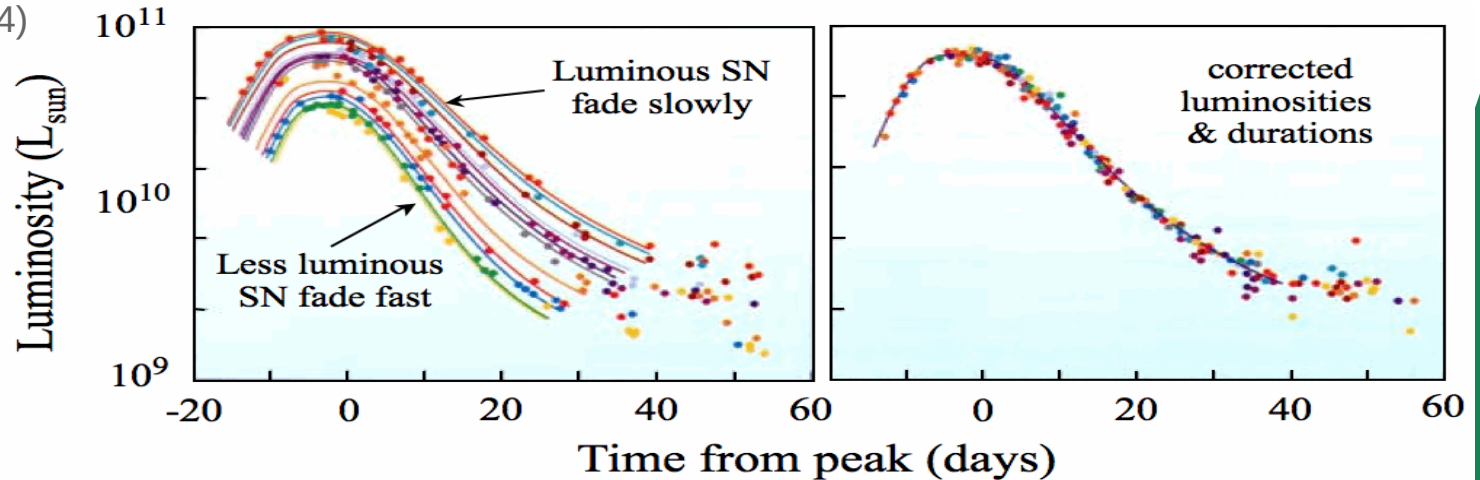


SN Ia en la galaxia M82 (2014)

¿cómo? → Las SN de tipo Ia tienen magnitudes absolutas muy similares en su peak:

$$\langle M_B \rangle \simeq \langle M_V \rangle \simeq -19.3 \pm 0.3$$

→ Mediante ajustes cuidadosos de las curvas de luz se pueden inferir las distancias al objeto con errores de 5%



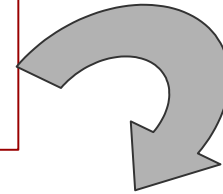
Escalera de distancias – Supernovas

¿cómo? → Las SN de tipo Ia tienen magnitudes absolutas muy similares en su peak:

$$\langle M_B \rangle \simeq \langle M_V \rangle \simeq -19.3 \pm 0.3$$

→ Mediante ajustes cuidadosos de las curvas de luz se pueden inferir las distancias al objeto con errores de 5%

Ver masa de las enanas blancas
y masa de Chandrasekhar



Al igual que para las Cefeidas, se puede usar el módulo de distancia para calcular qué tan lejos están:

$$m - M = 5 \log_{10} D - 5 + A_v$$

$$d = 10^{(m - M + 5 - A_v)/5}$$

Escalera de distancias – Supernovas

Ejercicio: la SN de tipo Ia SN 1963p en la galaxia NGC 1084 tuvo una magnitud aparente en B de 14.0 en su peak. Si la extinción es de 0.49 mag, ¿A qué distancia está la galaxia?

Ayuda:

Recordar que: Las SN de tipo Ia tienen magnitudes absolutas muy similares en su peak
 $M_B = M_V = -19.3$

Y que: $d = 10^{(m - M - A + 5)/5}$

Escalera de distancias – Supernovas

Ejercicio: la SN de tipo Ia SN 1963p en la galaxia NGC 1084 tuvo una magnitud aparente en B de 14.0 en su peak. Si la extinción es de 0.49 mag, ¿A qué distancia está la galaxia?

Ayuda:

Recordar que: Las SN de tipo Ia tienen magnitudes absolutas muy similares en su peak
 $M_B = M_V = -19.3$

Y que: $d = 10^{(m - M - A + 5)/5}$

Respuesta:

$$\begin{aligned} d &= 10^{(14.0 + 19.3 - 0.49 + 5)/5} = 36475394.6926 pc \\ &= 36.5 Mpc \end{aligned}$$

Escalera de distancias – Supernovas

NOTA:

Las SN son ~ 13 -3 mag más brillantes que las Cefeidas más brillantes (-19.3 vs. -6)

→ Éste método es capaz de alcanzar distancias 500 veces más lejanas!

→ Se alcanzan distancias cosmológicas hasta más allá de los 1000Mpc

Escalera de distancias – Novas

Al igual que las SN, las Novas se pueden usar para medir distancias.

En particular hay una relación estrecha entre:

- su magnitud visual máxima y
- el tiempo que toma su luz visible en decaer x 2mag.

$$M_V^{max} = -9.96 - 2.31 \log_{10} \dot{m}$$

Alcance: similar a las Cefeidas (~20Mpc)

Escalera de distancias – Cúmulos Globulares

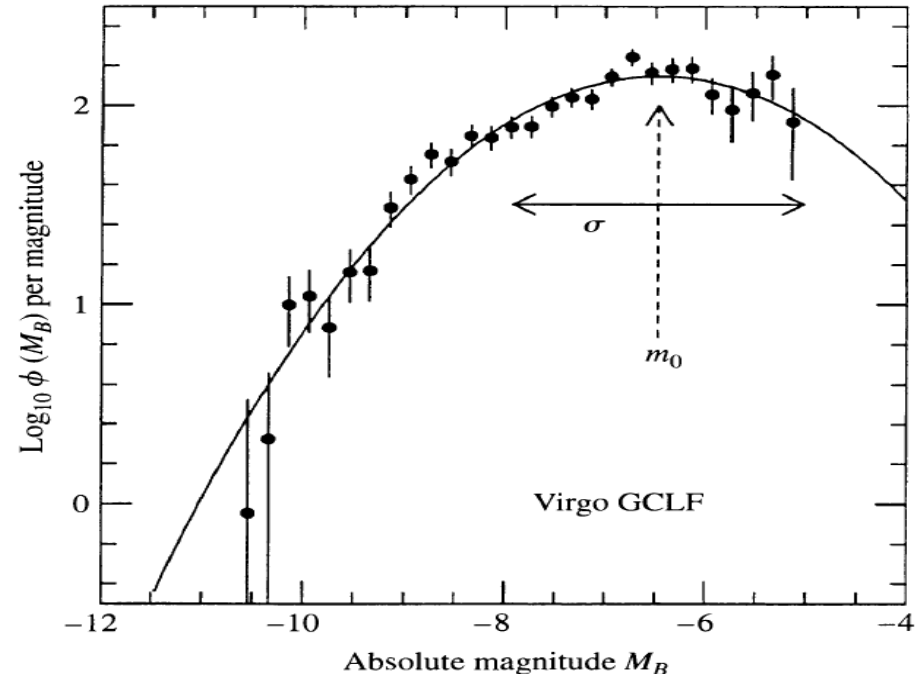
Ahora veremos métodos “secundarios” para medir distancias que dependen de una medición previa de distancia para su calibración.

La función de luminisidad (LF) de los Cúmulos Globulares (Gcs): número de GCs que tengan cierta magnitud ($M_B + dMB$) vs. M_B

LF de los GCs en 4 galaxias elípticas del Cúmulo de Virgo: se describe bien con una función Gaussiana cuyo peak es bien definido a $M_0 = -6.5$

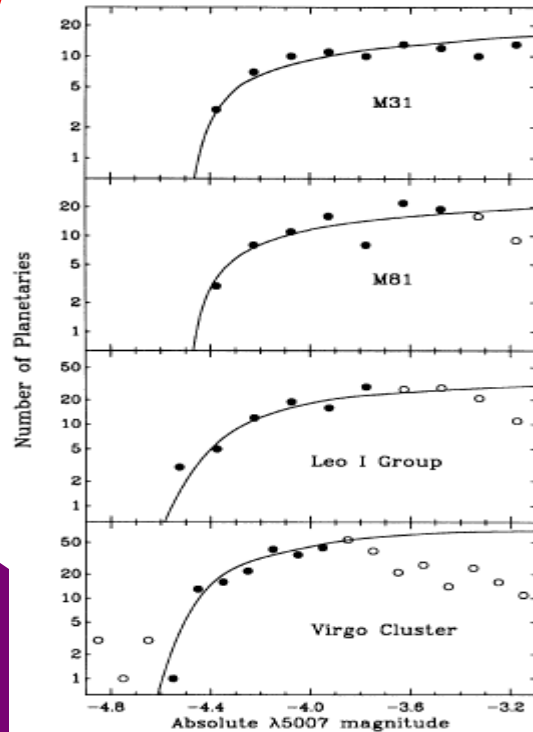
Midiendo la magnitud aparente en el peak (m_0 en otras galaxias (o en varias galaxias de un cúmulo de galaxias) se puede estimar la distancia

Error: 20%. Alcance: ~50Mpc



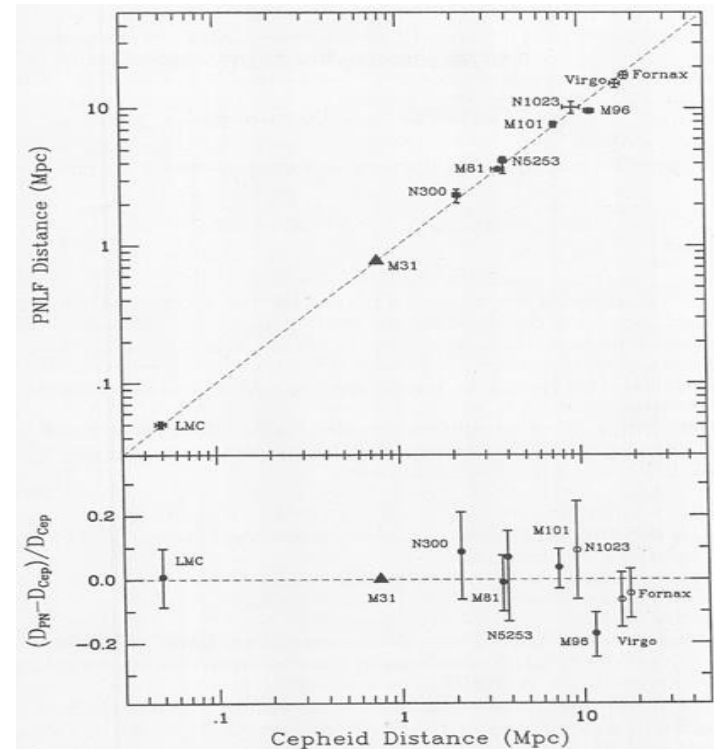
Escalera de distancias – Nebulosas Planetarias

La función de luminisidad (LF) de las Nebulosas Planetarias (Pne) también se pueden usar de forma similar



→ La forma de la LF es casi idéntica en todos los casos

Se compara bien con ←
distancias medidas
con Cefeidas



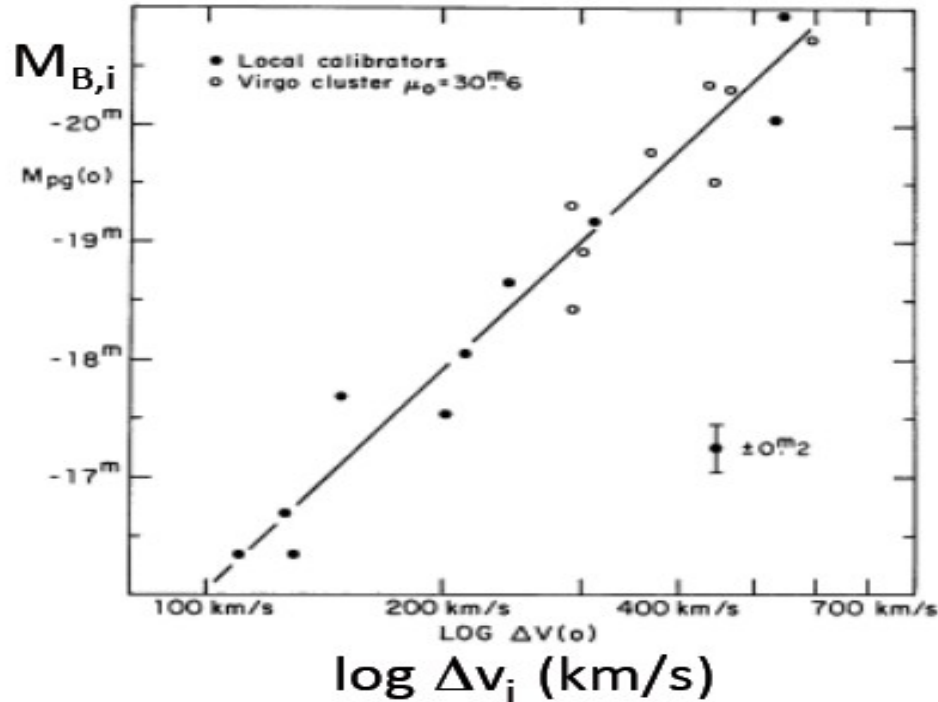
Escalera de distancias

Fluctuaciones de brillo superficial

- Como las galaxias están hechas de un número finito de estrellas. El número de estrellas en un pequeño pedazo de la galaxia variará de punto a punto, generando fluctuaciones que parecen “ruido” en el **brillo superficial**.
- Las fluctuaciones tendrán cierto brillo superficial promedio.
- Una galaxia 2 veces más lejana que otra tendrá un brillo superficial más “suave” como resultado de tomar el promedio
- Alcance $\sim 100\text{Mpc}$



Escalera de distancias – Relación Tully-Fisher



Tully & Fisher 1977, AA, 54, 661

Tully (1992; ec. 25.8 del libro):

$$M_H^i = -9.50(\log_{10} W_r^i - 2.50) - 21.67 \pm 0.8$$

$$W_r^i \equiv (W_{20} - W_{rand}) / \sin i$$

Banda H
(1.66 μ m)

Es una medida de la rotación de la galaxia
(ec. 25.9 del Carroll)

- W_{20} es la diferencia en velocidad entre el peak de emisión corrido al azul y el corrido al rojo (donde la intensidad es el 20% del peak)
- W_{rand} es una medida de las velocidades no-circulares en el disco

Escalera de distancias – Relación Tully-Fisher

$$M_H^i = -9.50(\log_{10} W_r^i - 2.50) - 21.67 \pm 0.8$$

Ejercicio: La galaxia M81 tiene $W_r^i = 484$ km/s
¿Cuánto será su magnitud absoluta en H?



$$M_H^i = -9.50(\log_{10} 484 - 2.50) - 21.67 = -23.43$$

Escalera de distancias – Relación Tully-Fisher

$$M_H^i = -9.50(\log_{10} W_r^i - 2.50) - 21.67 \pm 0.8$$

Ejercicio: La galaxia M81 tiene $W_r^i = 484$ km/s
¿Cuánto será su magnitud absoluta en H?

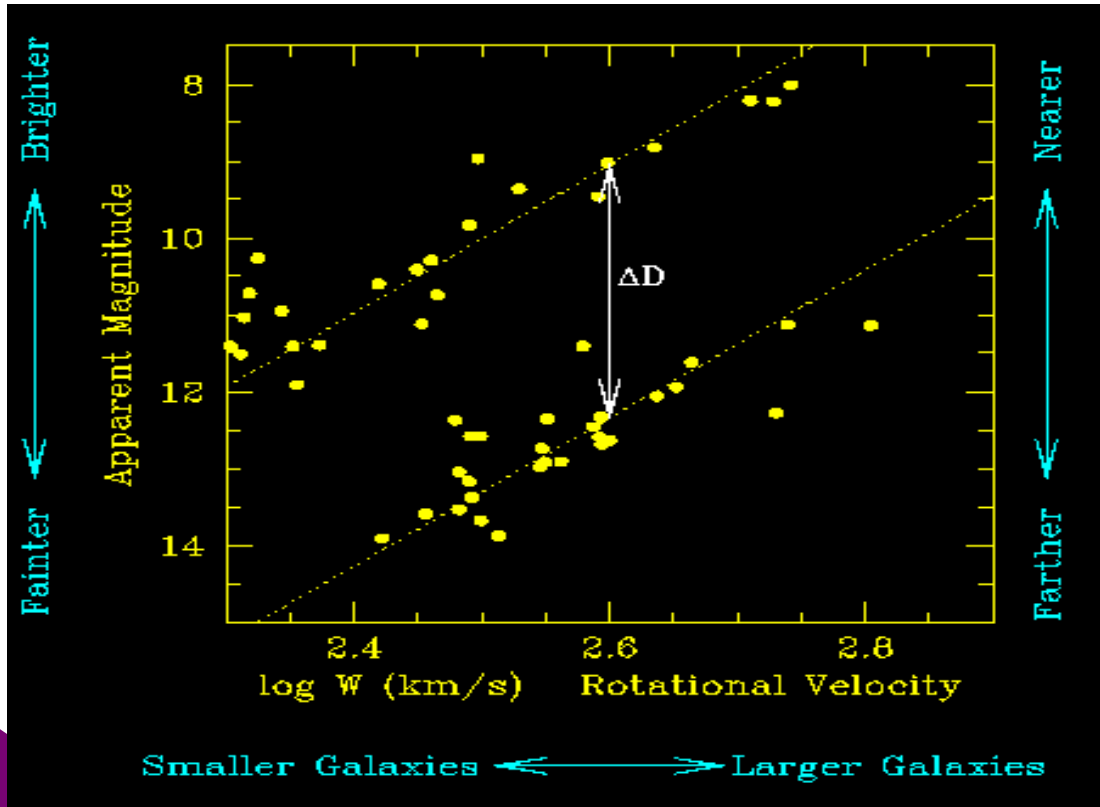


$$M_H^i = -9.50(\log_{10} 484 - 2.50) - 21.67 = -23.43$$

Si su magnitud aparente (corregida por extinción) es $H=4.29$, ¿a qué distancia está?

$$d = 10^{(H - M_H + 5)/5} = 3.50 Mpc$$

Escalera de distancias – Relación Tully-Fisher



Para un ensamble de galaxias, se vería así, donde el corte en el eje-y correspondería a la distancia relativa (ΔD) entre dos cúmulos (los puntos de abajo comparado con los de arriba)

Escalera de distancias – Relación D-sigma

Galaxias Es: La relación entre el diámetro angular (D ; hasta brillo superficial de 20.75 B-mag/arcsec²) y su dispersión de velocidad es más ajustada que la relación Faber-Jackson así que la podemos utilizar para calcular distancias con menor error.

Como el brillo superficial es independiente de la distancia a la galaxia (secciones 6.1 y 9.1 del libro Carroll), D es inversamente proporcional a la distancia (d), i.e. si la galaxia está 2 veces más lejos el D será la mitad

Escalera de distancias – Relación D-sigma

$$\log_{10} D = 1.333 \log \sigma + C$$

C depende de la
distancia al cúmulo

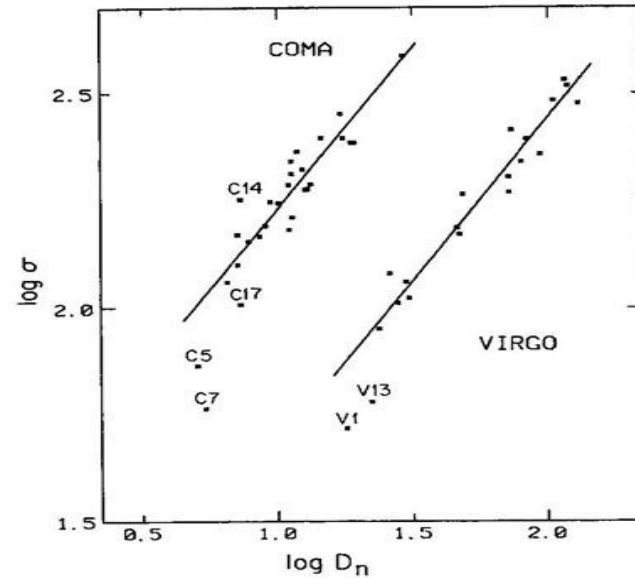


Figure 25.4 A logarithmic plot of diameters D (in arcseconds) and velocity dispersions σ (in km s^{-1}) for galaxies in the Virgo and Coma clusters. (Figure from Dressler et al., *Ap. J.*, 313, 42, 1987.)

Escalera de distancias – Relación D-sigma

$$\log_{10} D = 1.333 \log \sigma + C$$

Como las pendientes son constantes, podemos usar esta ecuación para calcular la distancia relativa entre los cúmulos de Virgo y Coma

$$\log_{10} D_1 - \log_{10} D_2 = C_1 - C_2$$

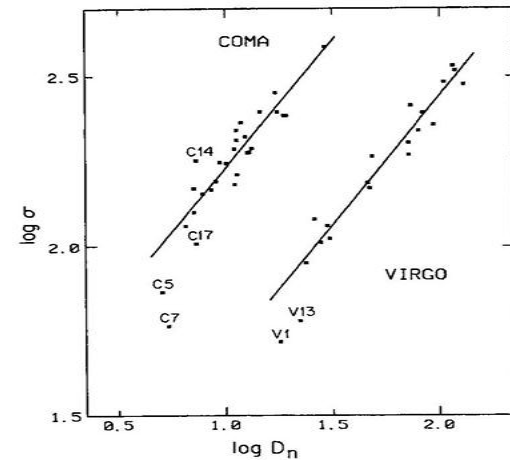
Y como D es inversamente proporcional a d:

$$\frac{d_1}{d_2} = \frac{D_1}{D_2} = 10^{C_1 - C_2}$$

Entonces si $C_{\text{Virgo}} = -1.237$ y $C_{\text{Coma}} = -1.967$.

¿Cuánto más lejos está Coma?

$$\frac{d_{\text{Coma}}}{d_{\text{Virgo}}} = 10^{C_{\text{Virgo}} - C_{\text{Coma}}} = 5.37$$



Escalera de distancias

Las galaxias más brillantes en cúmulos

Se usa la forma de la **función de luminosidad de las galaxias brillantes en cúmulos** (BCG = Brightest Cluster Galaxies).

Como las BCG son muy brillantes. Este método en principio se puede usar para medir grandes distancias.

PERO el problema es que las galaxias evolucionan y no sabemos si las BCG de hoy se pueden comparar con las de hace billones de años atrás.

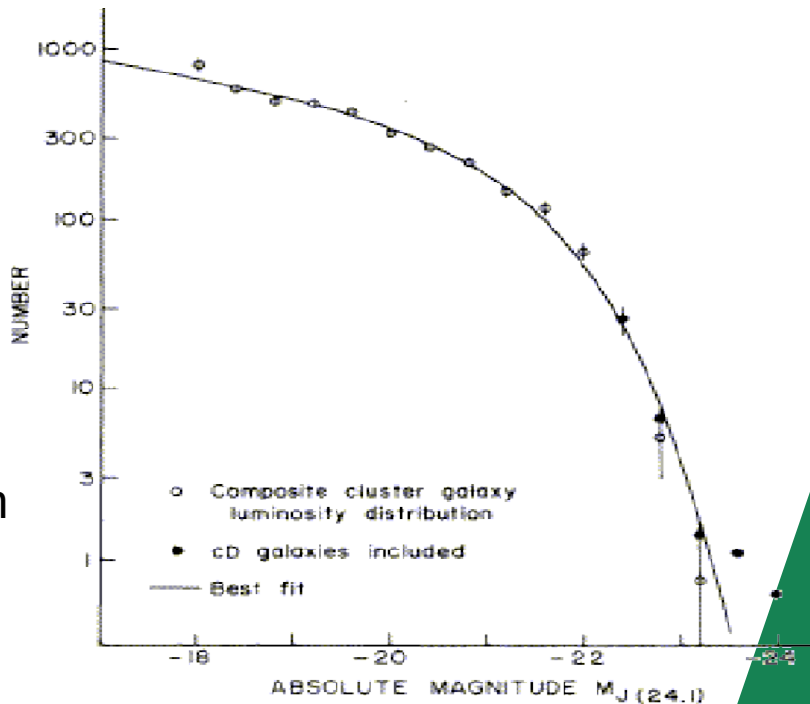


FIG. 2.—Best fit of analytic expression to observed positive cluster galaxy luminosity distribution. Filled circles show the effect of including cD galaxies in composite.

Escalera de distancias – Resumen

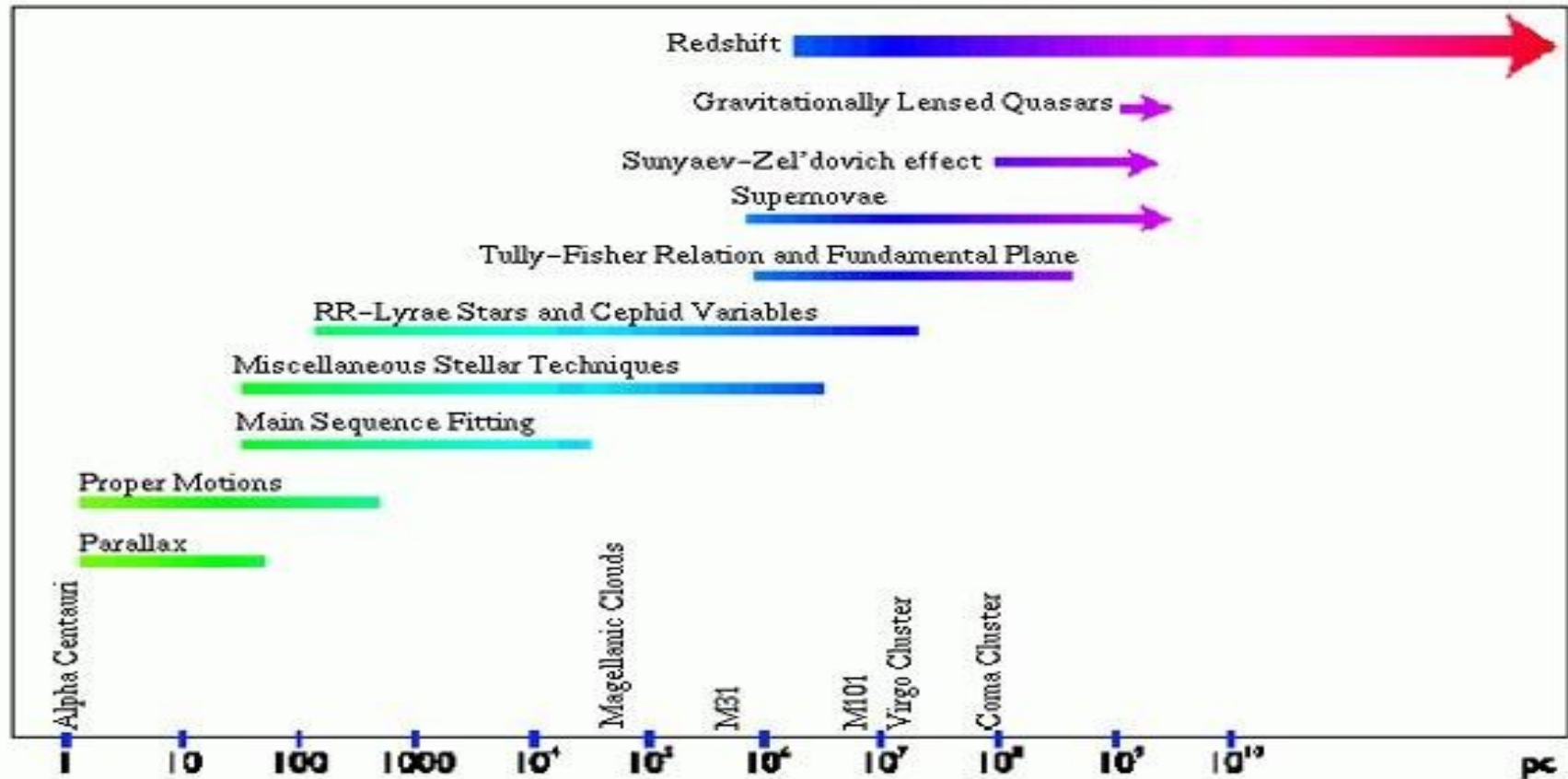
Method	Uncertainty for Single Galaxy (mag)	Distance to Virgo Cluster (Mpc)	Range (Mpc)
Cepheids	0.16	15 – 25	29
Novae	0.4	21.1 ± 3.9	20
Planetary nebula luminosity function	0.3	15.4 ± 1.1	50
Globular cluster luminosity function	0.4	18.8 ± 3.8	50
Surface brightness fluctuations	0.3	15.9 ± 0.9	50
Tully–Fisher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

La escalera de distancia extragaláctica no es una simple escalera.

Distintos astrónomos han utilizado distintos métodos (muchas veces independientes) para calcular distancias.

En general los distintos métodos coinciden (dentro de sus errores) que la distancia al cúmulo de galaxias de Virgo es ~16Mpc

Escalera de distancias – Resumen



El Universo en Expansión

En los 1920s Lemaître y Hubble se dan cuenta que las distancias a Galaxias cercanas que se calculaban con el método de las Cefeidas se correlacionaban con las velocidades medidas a estas galaxias.

(Lemaître lo publicó
en Francés 2 años antes)



El Universo en Expansión: *Ley de Hubble-Lemaître*

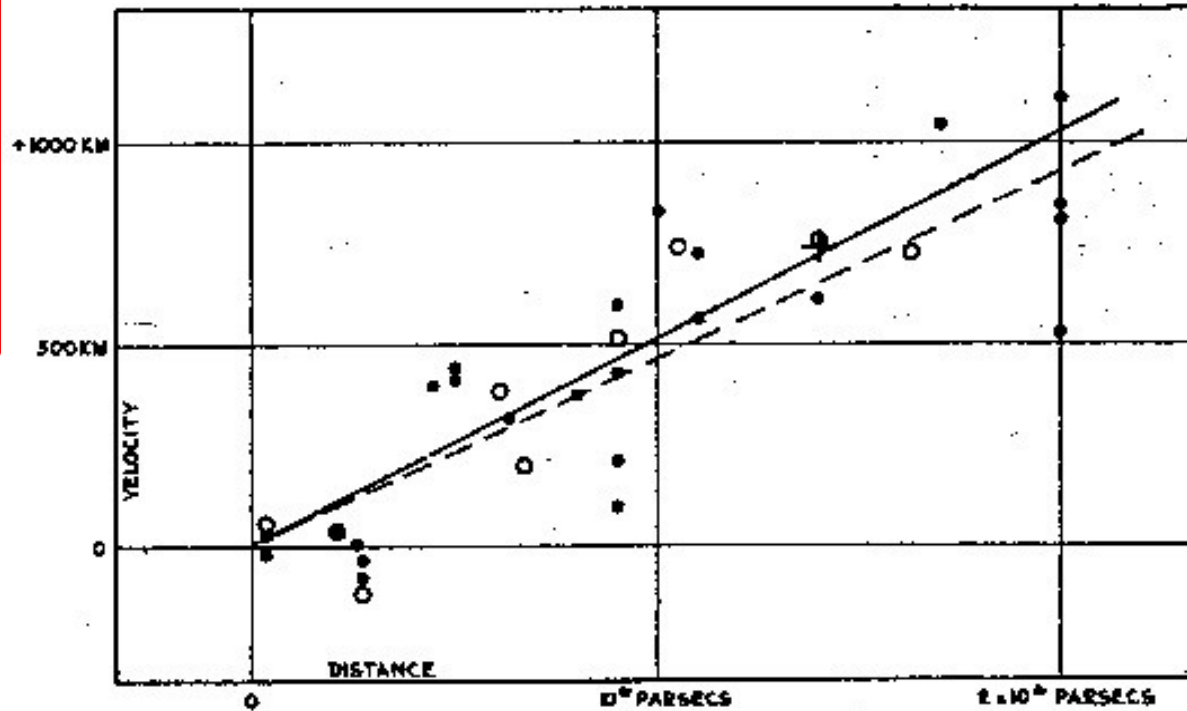


FIGURE 1

La velocidad de recesión es proporcional a la distancia:

$$v = H_0 d$$

H_0 = constante de Hubble [km/s/Mpc]

d = distancia [Mpc]

v = velocidad [km/s]

H_0 : La **constante de Hubble** es el valor que mide la velocidad de expansión del Universo local. Para calcular H_0 se debe dividir la velocidad con la que se aleja una galaxia por su distancia.

El Universo en Expansión: *Ley de Hubble-Lemaître*

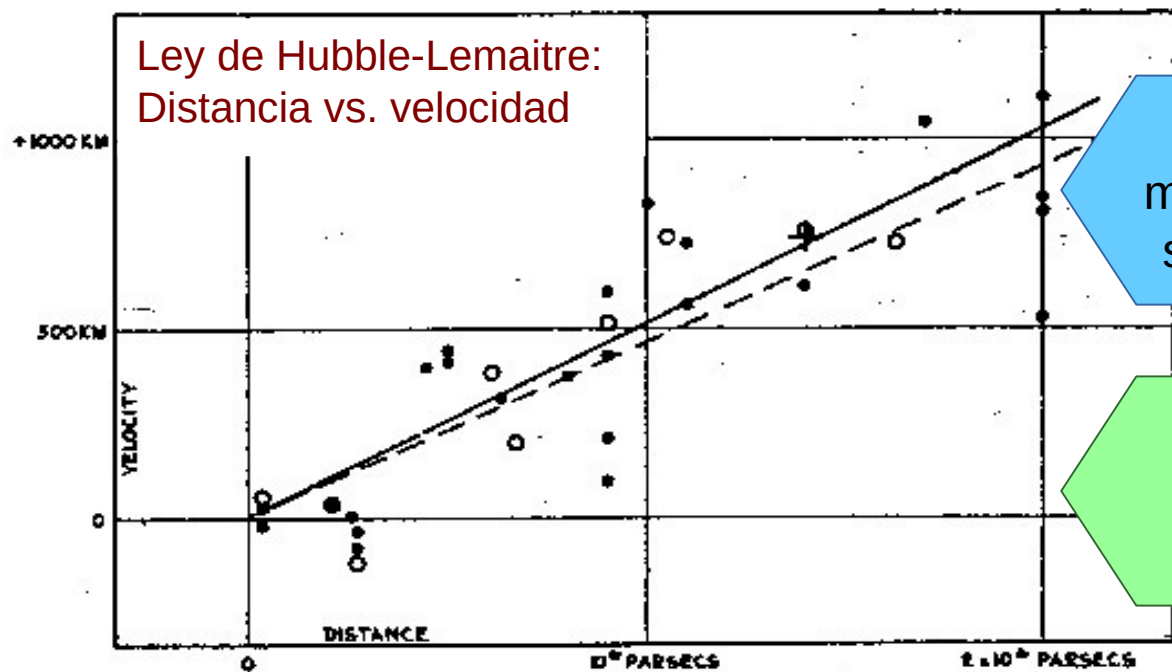


FIGURE 1

Increíble método para medir distancias con tan solo conocer el redshift

!!!El Universo está en expansión!!!!

Para reducir el error en H_0 a $dH_0/H_0 < 1\%$ es necesario controlar los errores sistemáticos utilizando métodos independientes para calcular distancias

El Universo en Expansión: *Ley de Hubble-Lemaître*



Albert Einstein, Edwin Hubble, and Walter Sydney Adams

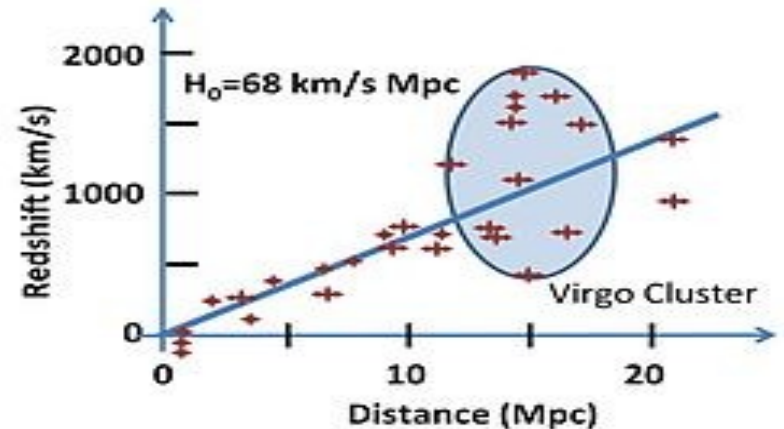
El Universo en Expansión: *Ley de Hubble-Lemaître*



La Vía Láctea no está en ningún lugar privilegiado del Universo.

Todas las galaxias en todas partes del Universo se alejan de las otras galaxias con una velocidad que obedece la **Ley de Hubble**

El movimiento de las galaxias mientras participan de la expansión del Universo se denomina **Flujo de Hubble**



El Universo en Expansión: *Ley de Hubble-Lemaître*



El redshift cosmológico de una galaxia se produce por la expansión del Universo que se da mientras la luz viaja en su camino hacia el observador

Un fotón que viaja por un universo en expansión, será detectado a una longitud de onda mayor. Si viene desde más lejos, entonces más hacia el rojo (redshift) se va

El Universo en Expansión: *Ley de Hubble-Lemaître*

Tipo de corrimiento al rojo	Ejemplo de métrica	¹⁷ Definición ¹⁸
Corrimiento al rojo Doppler	Distancia euclidiana	$z = \frac{v}{c}$
Doppler relativista	Métrica Minkowski	$z = \left(1 + \frac{v}{c}\right) \gamma - 1$
Corrimiento al rojo cosmológico	FLRW	$z = \frac{a_{\text{now}}}{a_{\text{then}}} - 1$
Corrimiento al rojo gravitacional	Métrica de Schwarzschild	$z = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{2GM}{rc^2}\right)}} - 1$

$z \ll 1; v \ll c$

$z \ll 1; v \sim c$

Corrimiento al rojo cosmológico que domina a alto z

En espacio-tiempos extremadamente curvos como en las cercanías de un agujero negro

Factor de Lorentz

$$\gamma \equiv \frac{dt}{d\tau} = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}}$$

$\beta = v/c$

τ = tiempo propio

El Universo en Expansión: *Ley de Hubble-Lemaître*

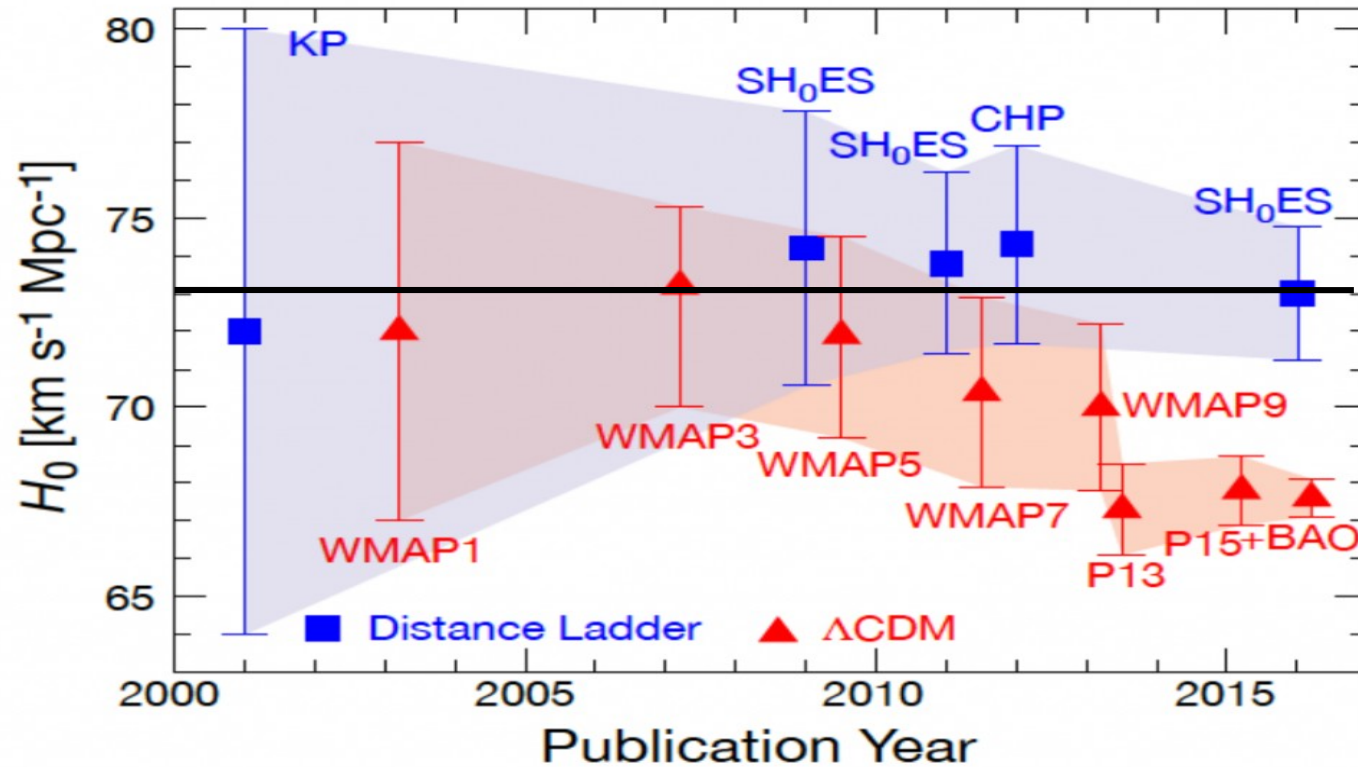
Tipo de corrimiento al rojo	Ejemplo de métrica	¹⁷ Definición ¹⁸
Corrimiento al rojo Doppler	Distancia euclidiana	$z = \frac{v}{c}$
Doppler relativista	Métrica Minkowski	$z = \left(1 + \frac{v}{c}\right) \gamma - 1$
Corrimiento al rojo cosmológico	FLRW	$z = \frac{a_{\text{now}}}{a_{\text{then}}} - 1$
Corrimiento al rojo gravitacional	Métrica de Schwarzschild	$z = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{2GM}{rc^2}\right)}} - 1$

Lxs astrónomxs frecuentemente usan la versión relativista de z para calcular distancias usando la ley de Hubble (en el Universo cercano).

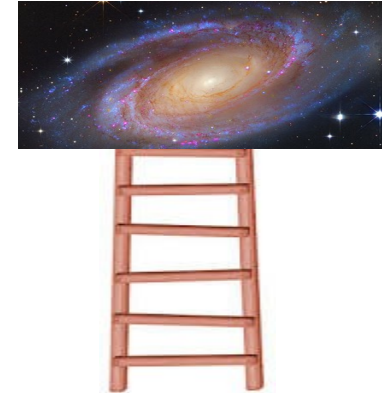
$$d \simeq \frac{c(z + 1)^2 - 1}{H_0(z + 1)^2 + 1}$$

Haciendo esto se está asumiendo que el z representa el movimiento peculiar de la galaxia en un espacio tiempo de Minkowski (plano)

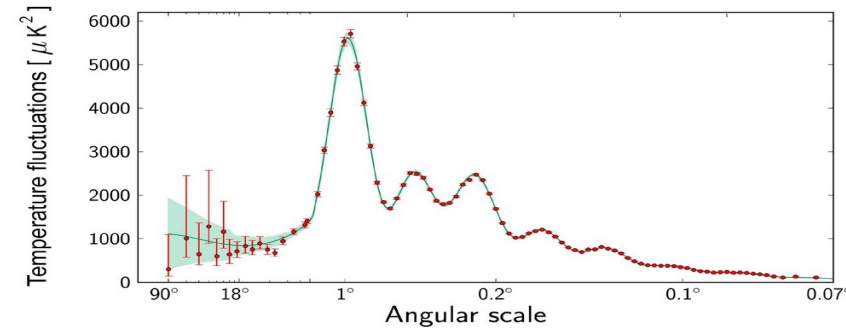
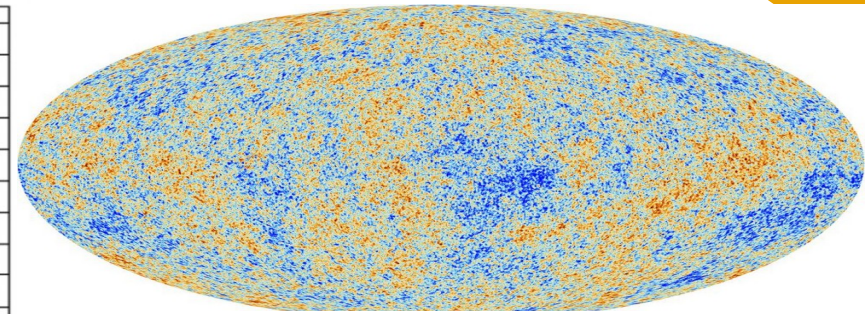
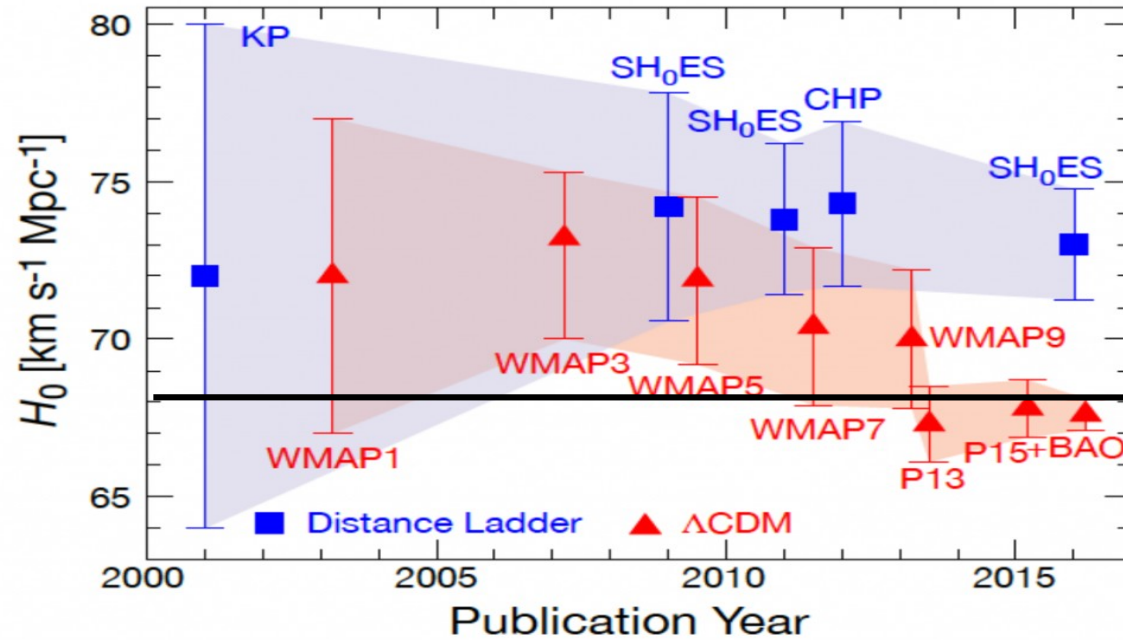
Mediciones de la constante de Hubble



Mediciones de SN la usando escalera de distancias



Mediciones de la constante de Hubble



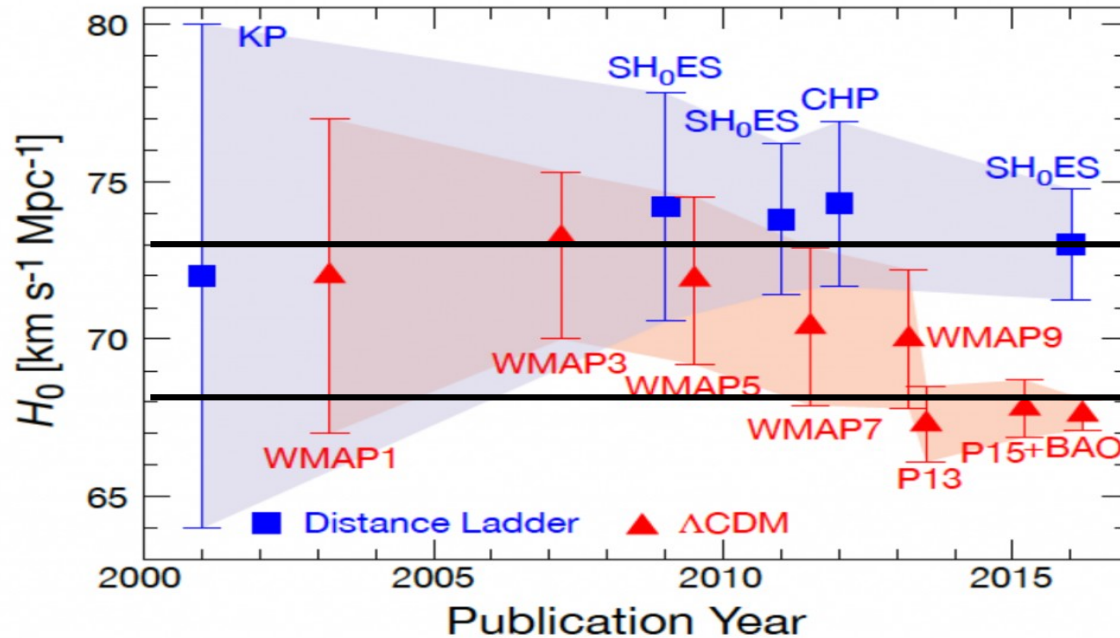
Mediciones usando el Universo temprano (LCDM): Uno de los parámetros que se ajustan al espectro de potencias proveniente del CMB es H_0

Mediciones de la constante de Hubble

¿Por qué la diferencia?

Tal vez no estamos calculando bien los errores en las mediciones

O.... tal vez Materia Oscura y Energía Oscura no se comportan como esperamos, o la gravedad actúa de otra forma, o el Universo no es tan plano como creemos...



El tiempo de Hubble

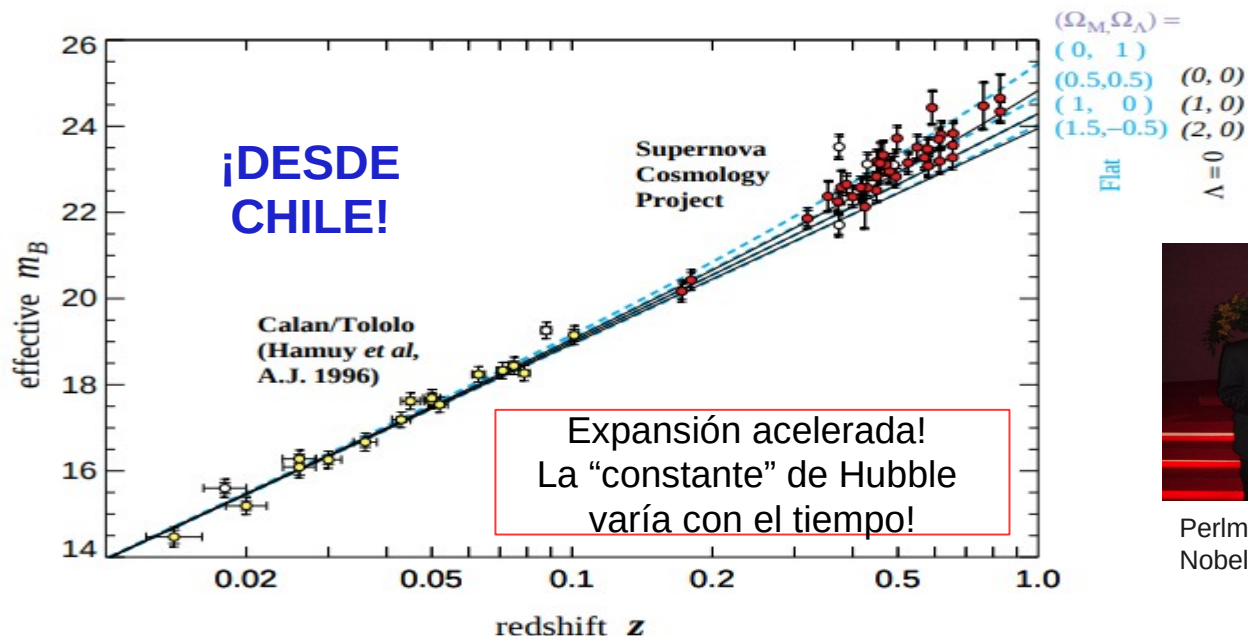
Por ejemplo, estimemos hace cuánto tiempo ocurrió el Big Bang (t_H):

El tiempo para que una galaxia llegase a su distancia actual d mientras se movía una velocidad de recesión v (según la Ley de Hubble-Lemaitre), asumiendo (incorrectamente) que v ha permanecido constante, es:

$$d \simeq v \times t_H = H_0 \times d \times t_H$$

$$t_H \equiv \frac{1}{H_0} \sim 13.8 Gyr$$

El Universo en Expansión: *Ley de Hubble-Lemaître*



Perlmutter, Riess Y Schmidt
Nobel de Física 2011

FIG. 1.— Hubble diagram for 42 high-redshift Type Ia supernovae from the Supernova Cosmology Project, and 18 low-redshift Type Ia supernovae from the Calán/Tololo Supernova Survey, after correcting both sets for the SN Ia lightcurve width-luminosity relation. The inner error bars show the uncertainty due to measurement errors, while the outer error bars show the total uncertainty when the intrinsic luminosity dispersion, 0.17 mag, of lightcurve-width-corrected Type Ia supernovae is added in quadrature. The unfilled circles indicate supernovae not included in Fit C. The horizontal error bars represent the assigned peculiar velocity uncertainty of 300 km s^{-1} . The solid curves are the theoretical $m_B^{\text{effective}}(z)$ for a range of cosmological models with zero cosmological constant: $(\Omega_M, \Omega_\Lambda) = (0, 0)$ on top, (1, 0) in middle and (2, 0) on bottom. The dashed curves are for a range of flat cosmological models: $(\Omega_M, \Omega_\Lambda) = (0, 1)$ on top, (0.5, 0.5) second from top, (1, 0) third from top, and (1.5, -0.5) on bottom.

El Universo es muy pero muy grande

<https://www.youtube.com/watch?v=2sUrauA0iq4&t=49s>