

LFIS223

Astronomía General

Patricia Arévalo

Tema 10

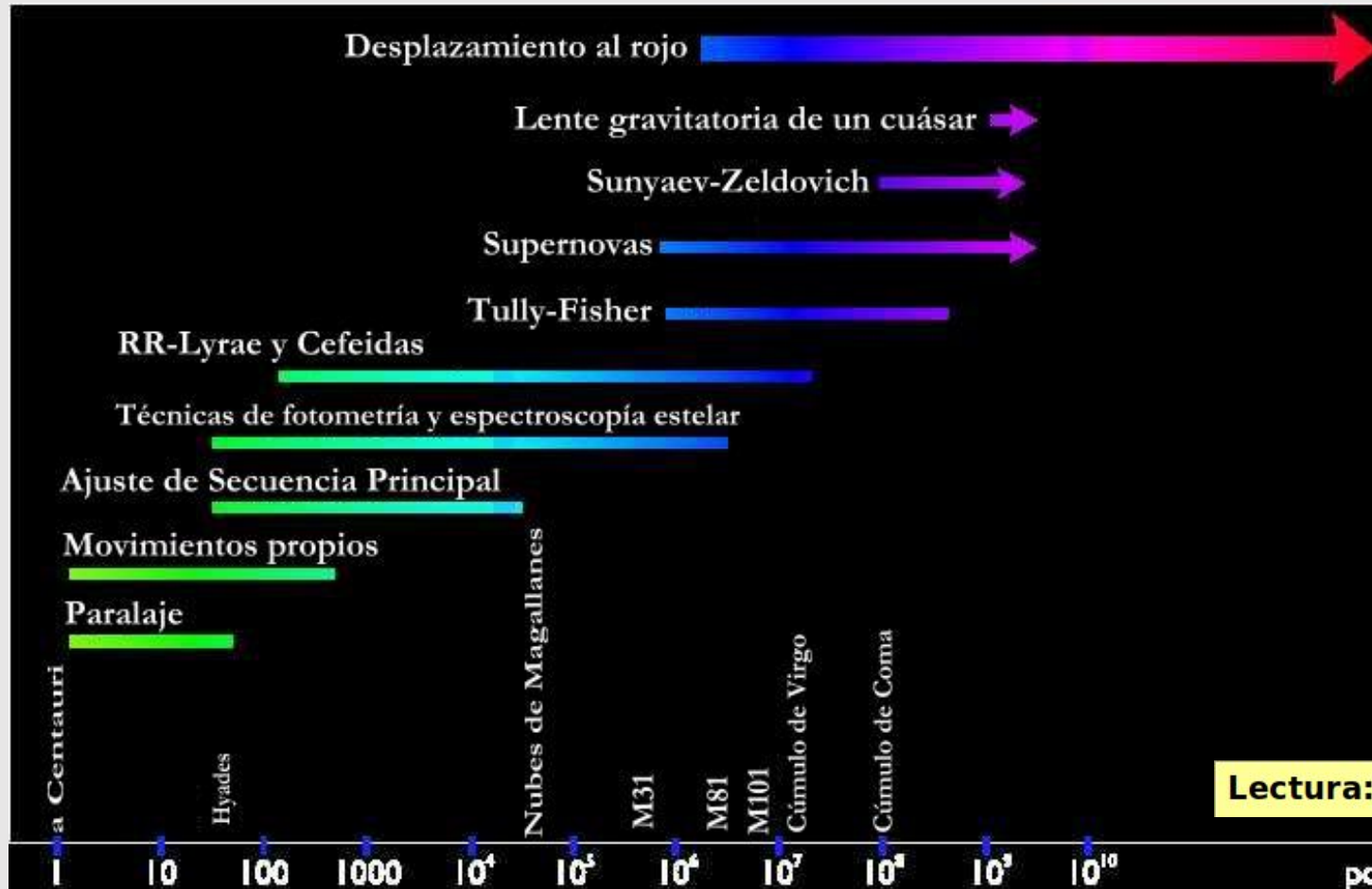
a) Escalas de distancia y
ley de Hubble

22/11

Escala de Distancias

Calcular distancias puede ser muy difícil, sobre todo si hablamos de cosas que están muy lejos.

- En astronomía se usan distintos métodos que dependen de la distancia
- Es una “escalera” porque usamos el peldaño de abajo para alcanzar el de arriba (las medidas más cercanas se usan para calibrar las más lejanas)

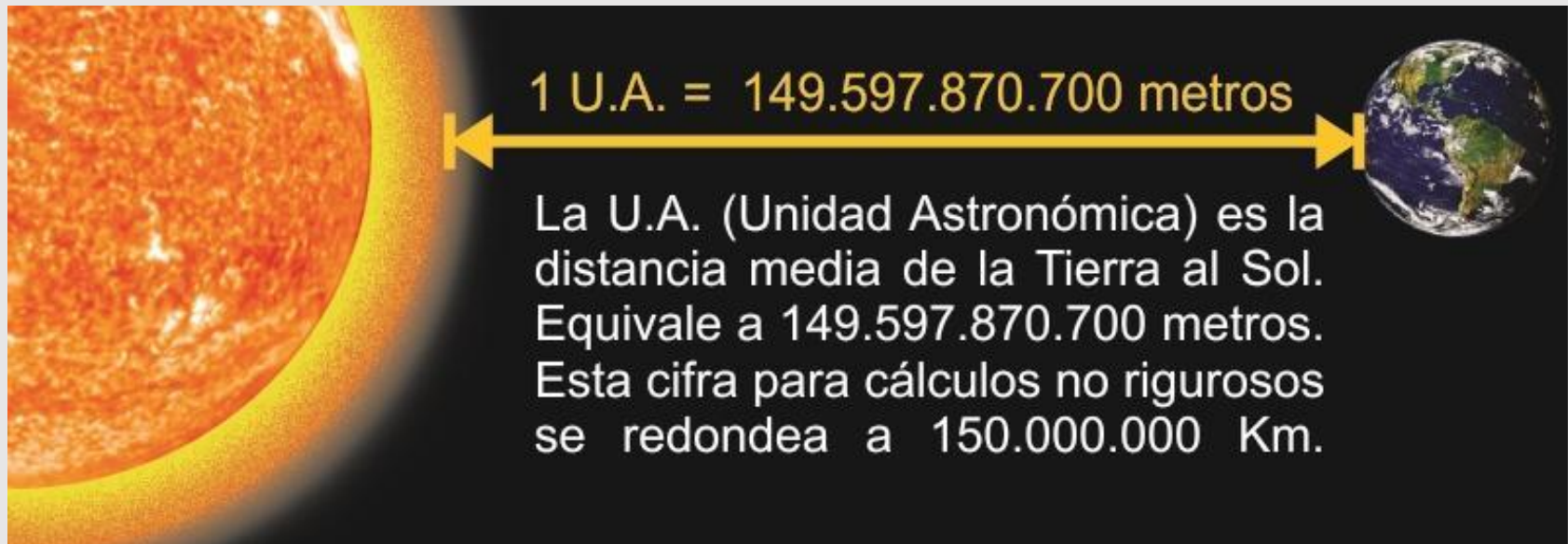


Medir distancias es fundamental para entender el Universo y medir su expansión y edad

Escala de Distancias

- **Escala del sistema solar:**
Mediciones de Radar

Se observan objetos astronómicos cercanos mediante el reflejo de microondas en ellos

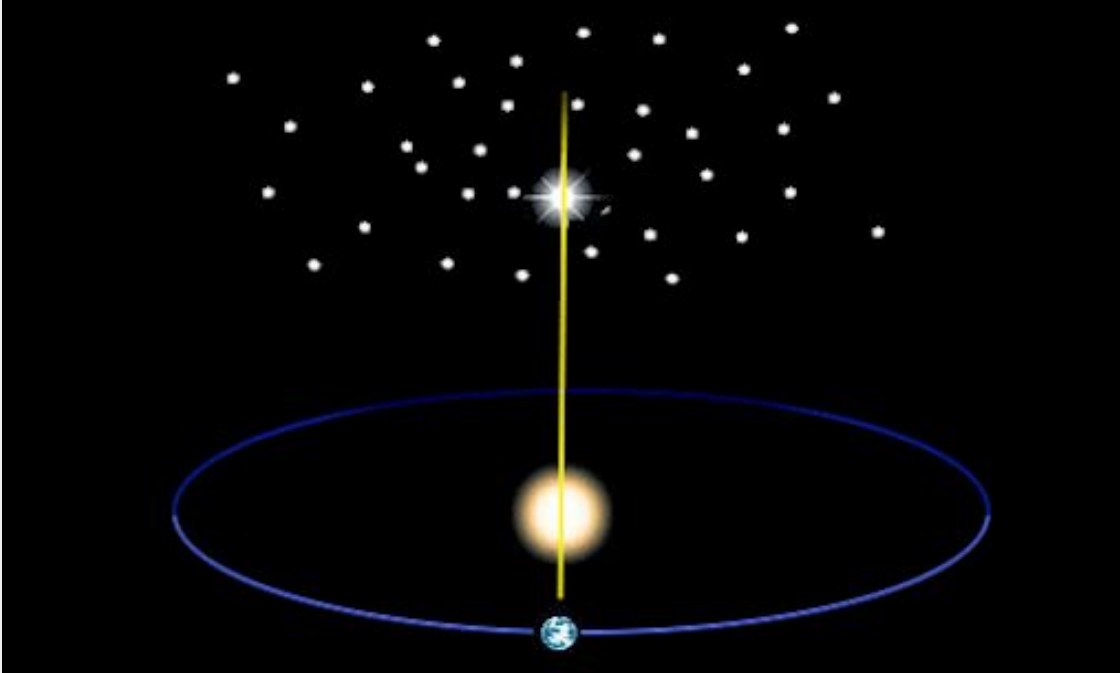


Escala de Distancias

1. Distancia a las estrellas cercanas:

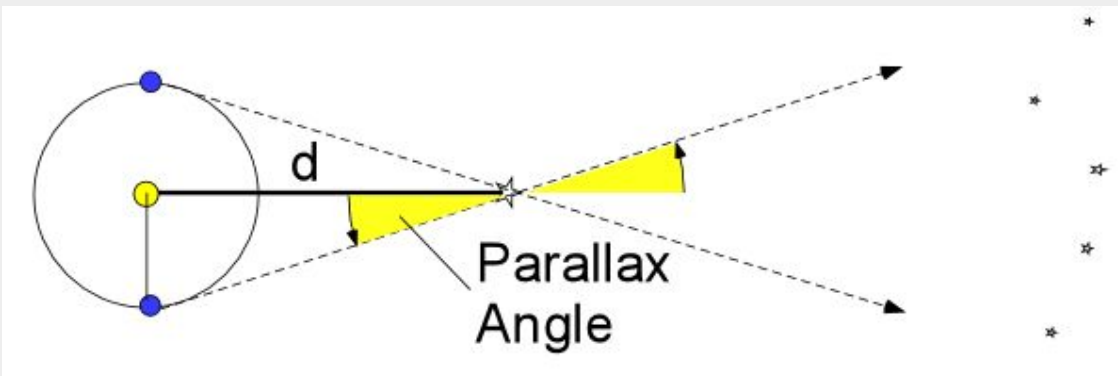
- **Paralajes trigonométricos:** Funciona bien hasta distancias de 100 parsecs (errores menores de 10%)
→ método directo
- **Ajuste de secuencias principales de cúmulos de estrellas**
- **“Ampolletas estándar”:** estrellas variables periódicas como las RR Lyrae.

Paralaje Trigonométrico



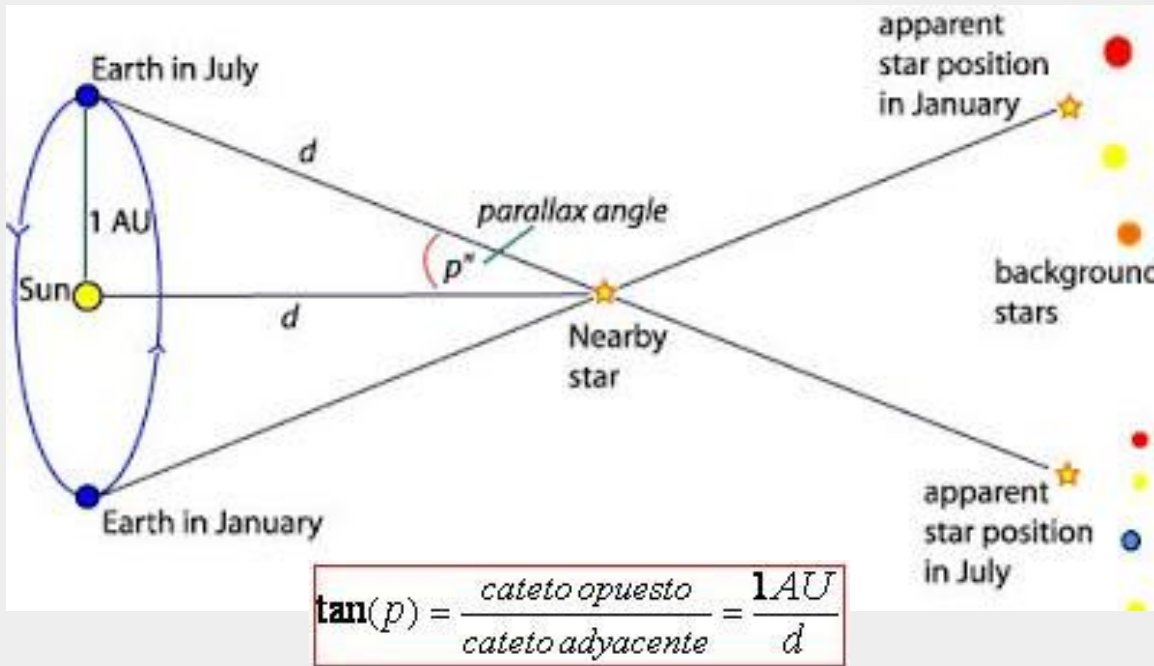
El **paralaje** es el ángulo formado por la dirección de dos líneas visuales relativas a la observación de un mismo objeto desde dos puntos distintos, suficientemente alejados entre sí y no alineados con él.

Suele emplearse para medir la distancia a las estrellas más cercanas tomando observaciones desde la tierra en 2 épocas distintas



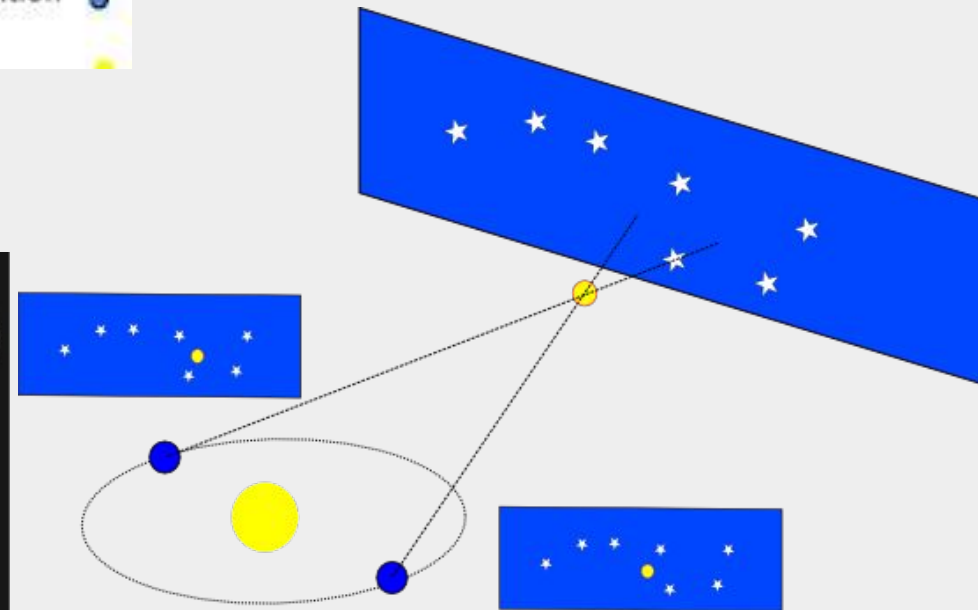
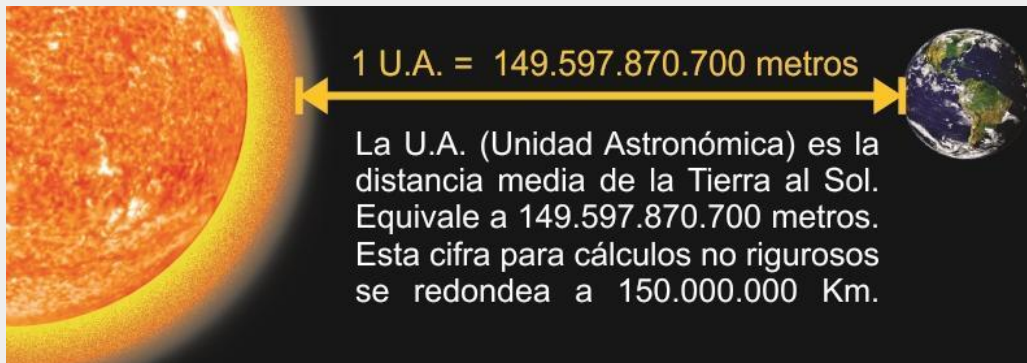
Mientras mayor sea la distancia,
menor será el ángulo

Paralaje Trigonométrico

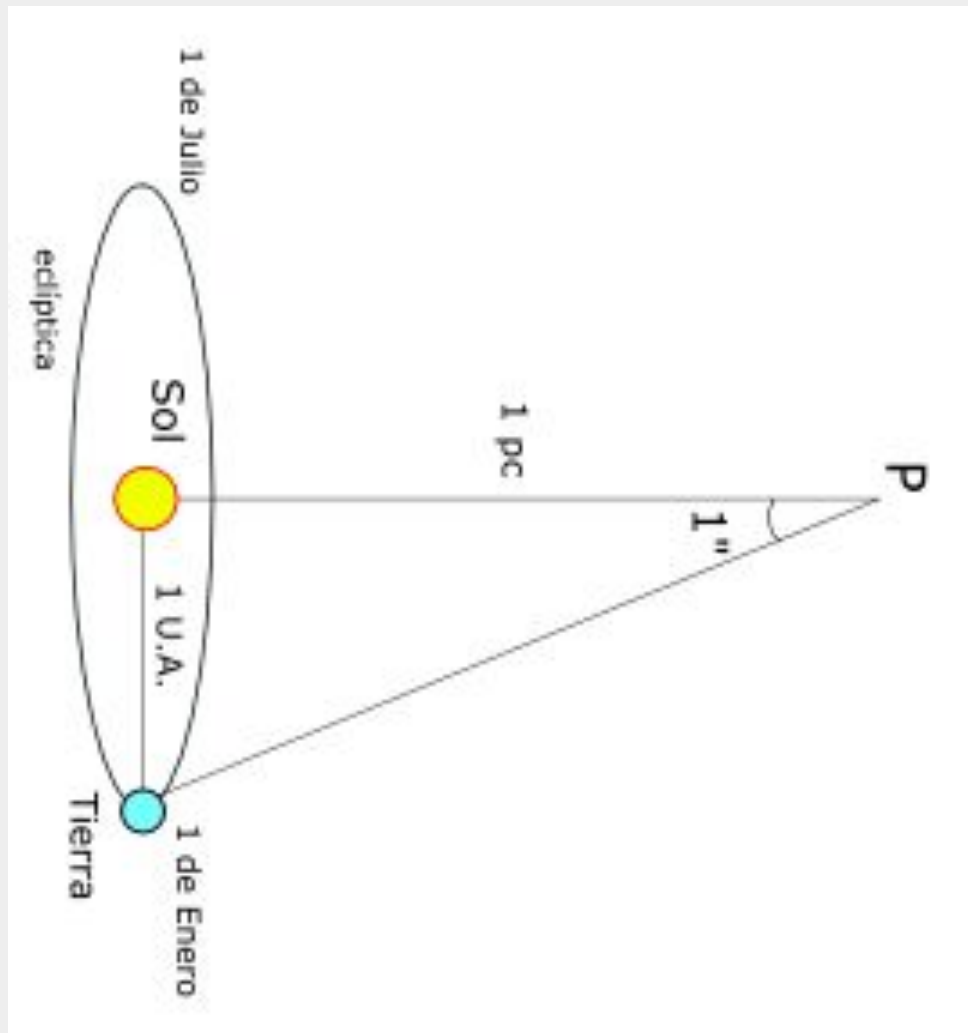


Rango de distancias al que se puede aplicar esta técnica: $\sim 1 \text{ AU} - 100 \text{ pc}$ (estrellas MUY cercanas)

Pero sirve para calibrar métodos que miden distancias más grandes



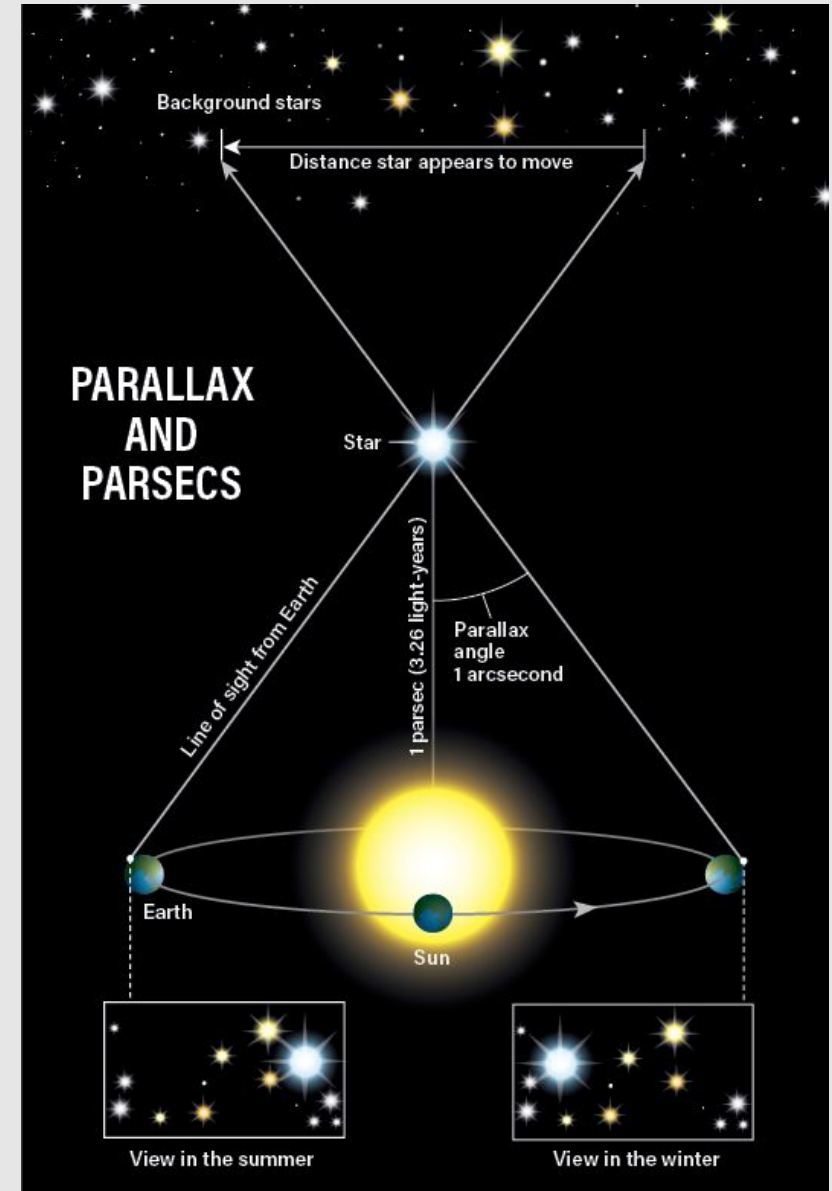
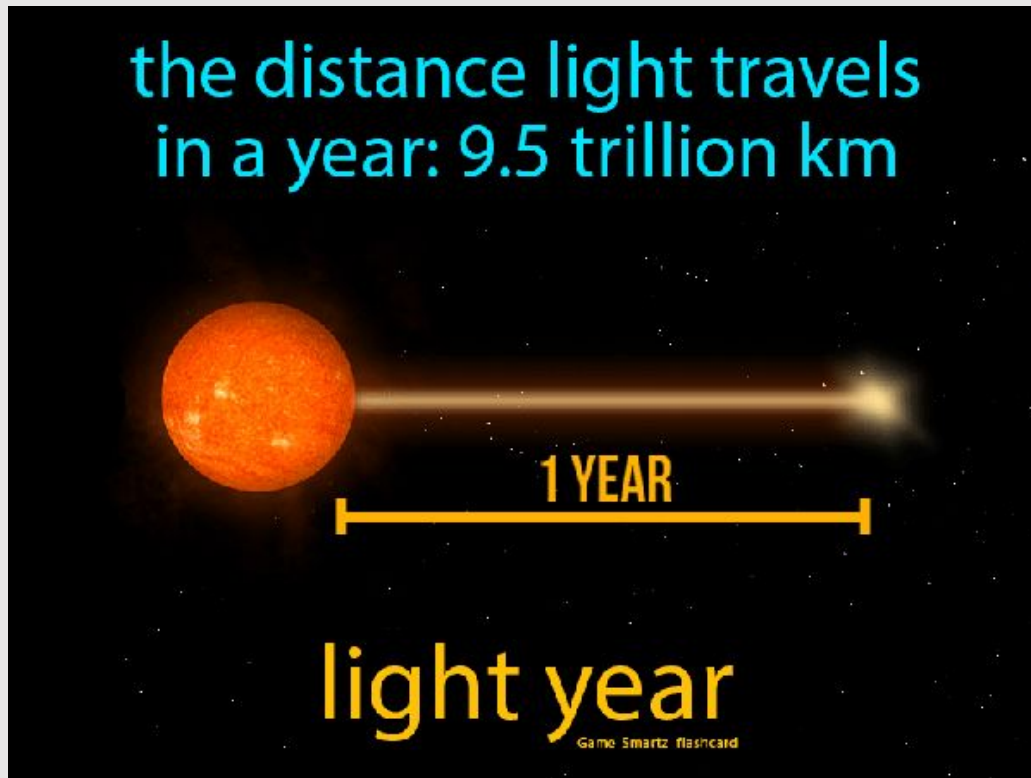
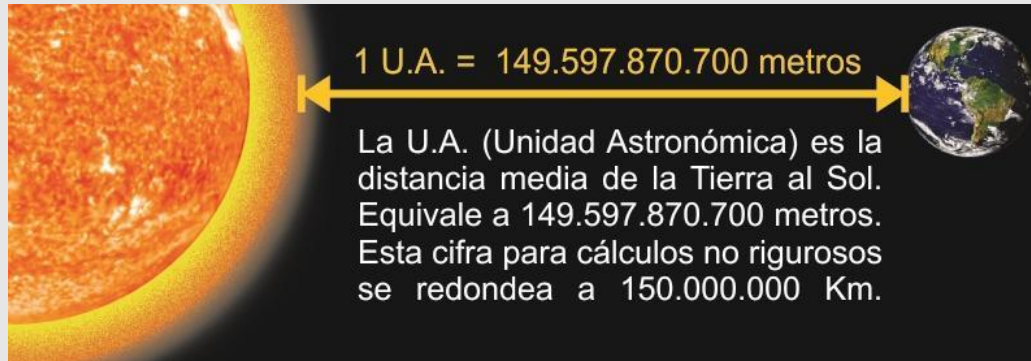
Definición de pársec (pc)



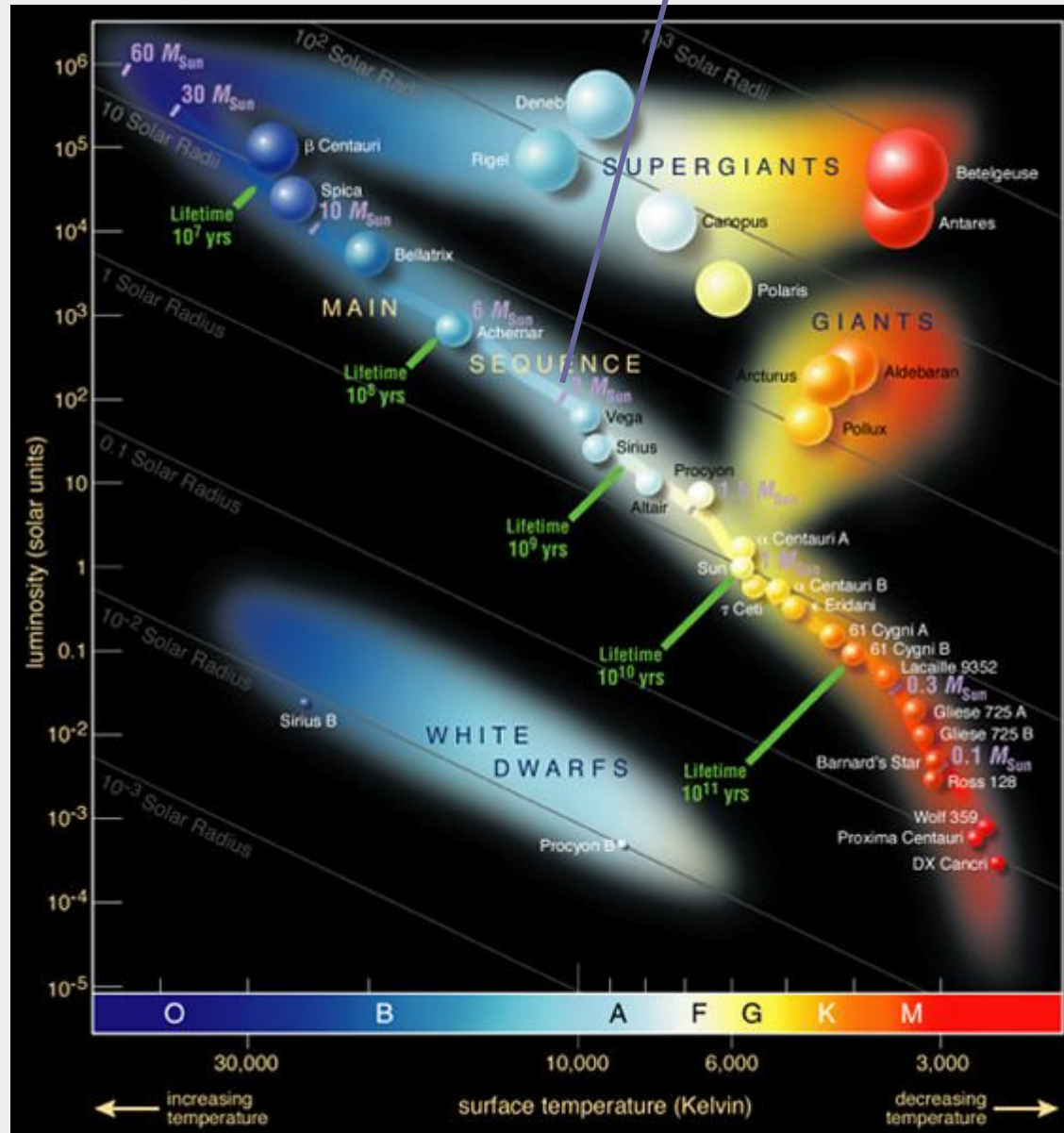
$$\tan(p) = \frac{\text{cateto opuesto}}{\text{cateto adyacente}} = \frac{1 \text{ AU}}{d}$$

Si la distancia al objeto es 1 parsec (1 pc), el ángulo de paralaje será 1 segundo de arco (1")

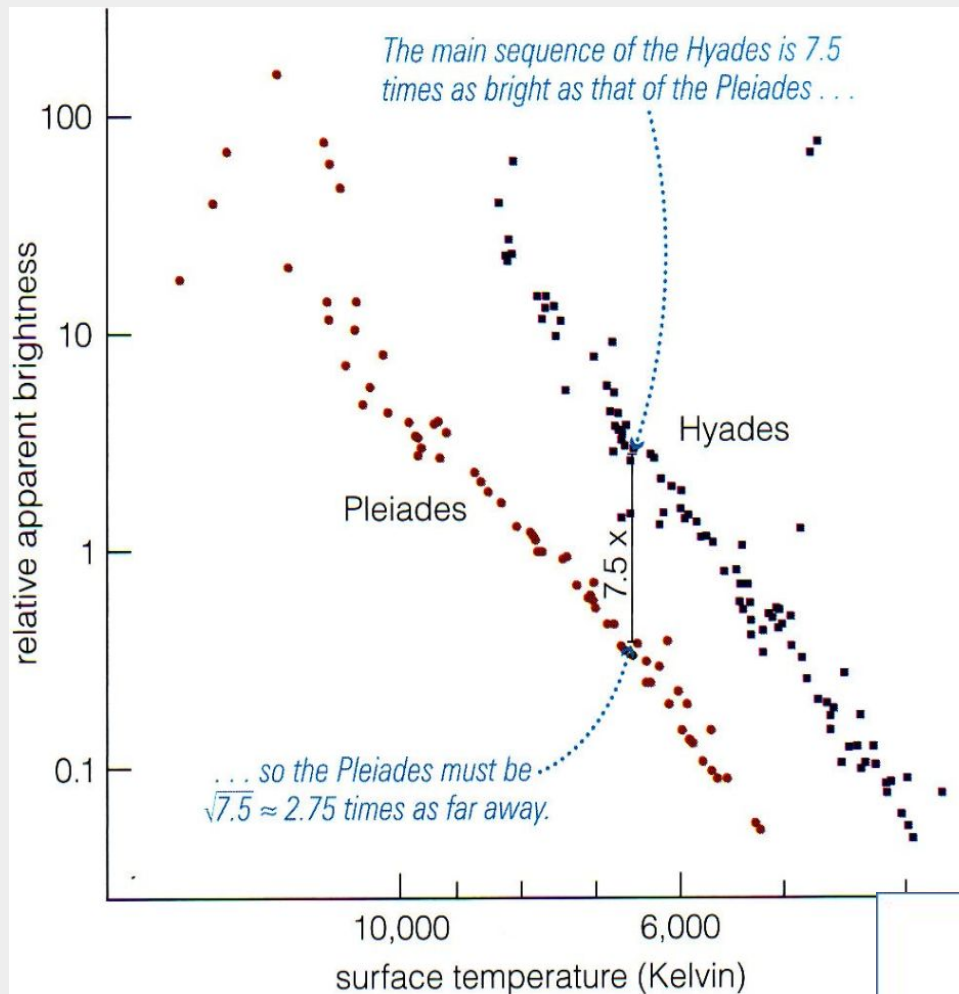
Unidades de distancia en astronomía



Ajuste de secuencia principal



Ajuste de secuencia principal



Se compara el brillo aparente de estrellas de la secuencia principal de un cúmulo al que se le quiere estimar la distancia con el de las estrellas de un cúmulo al que ya se le haya estimado la distancia con otro método.

Como comparación se suele usar el cúmulo Hyades, al cual se le conoce la distancia a partir de paralajes.

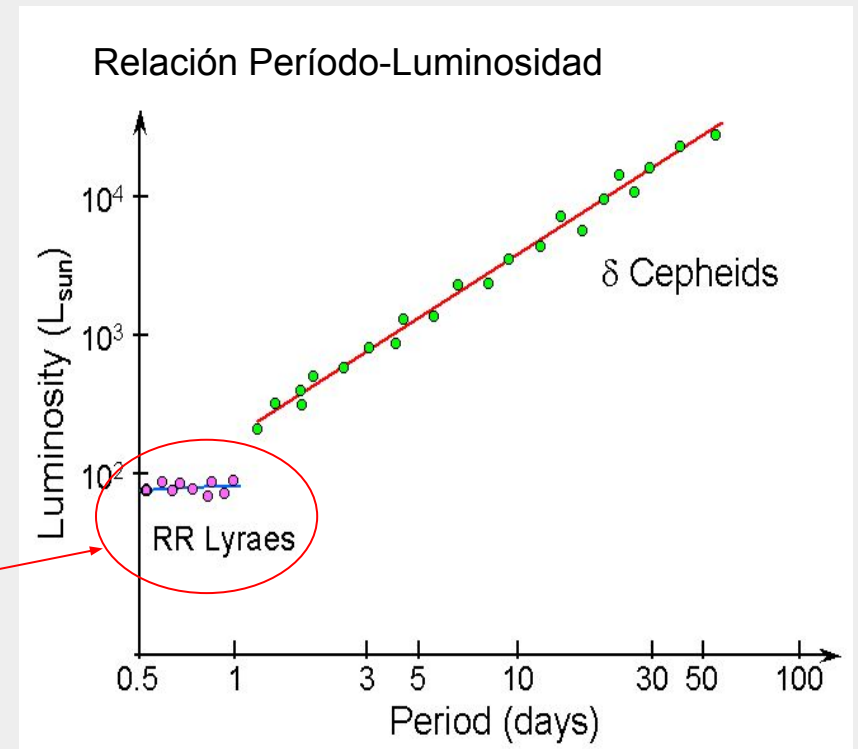
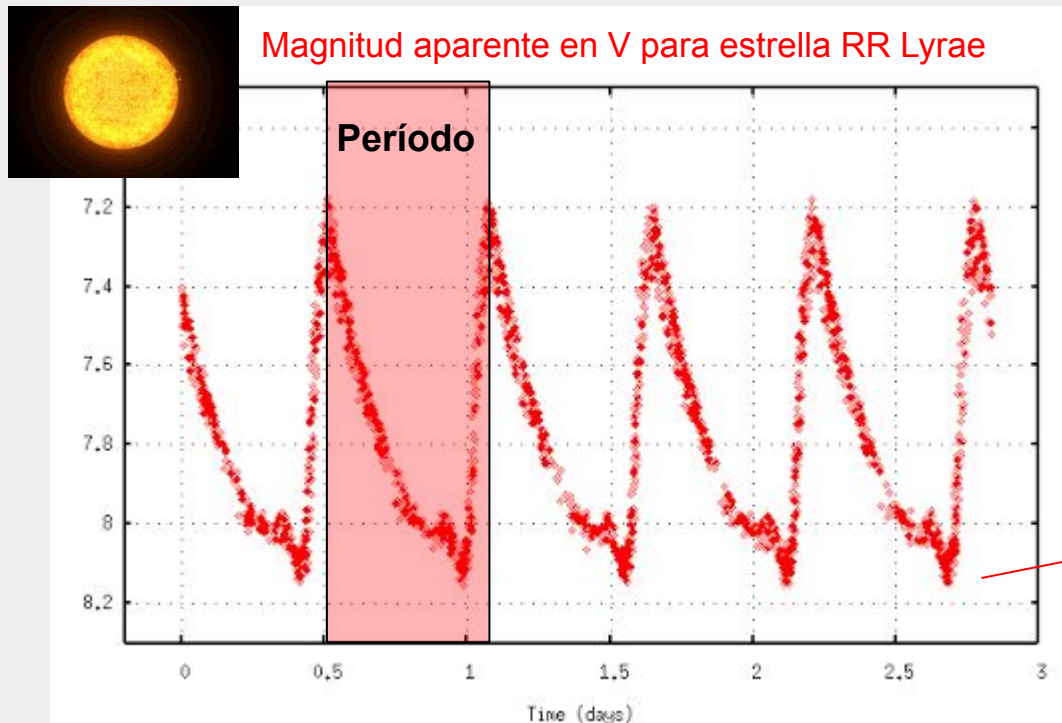
Se usa el módulo de distancia para calcular d:

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

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

RR Lyrae

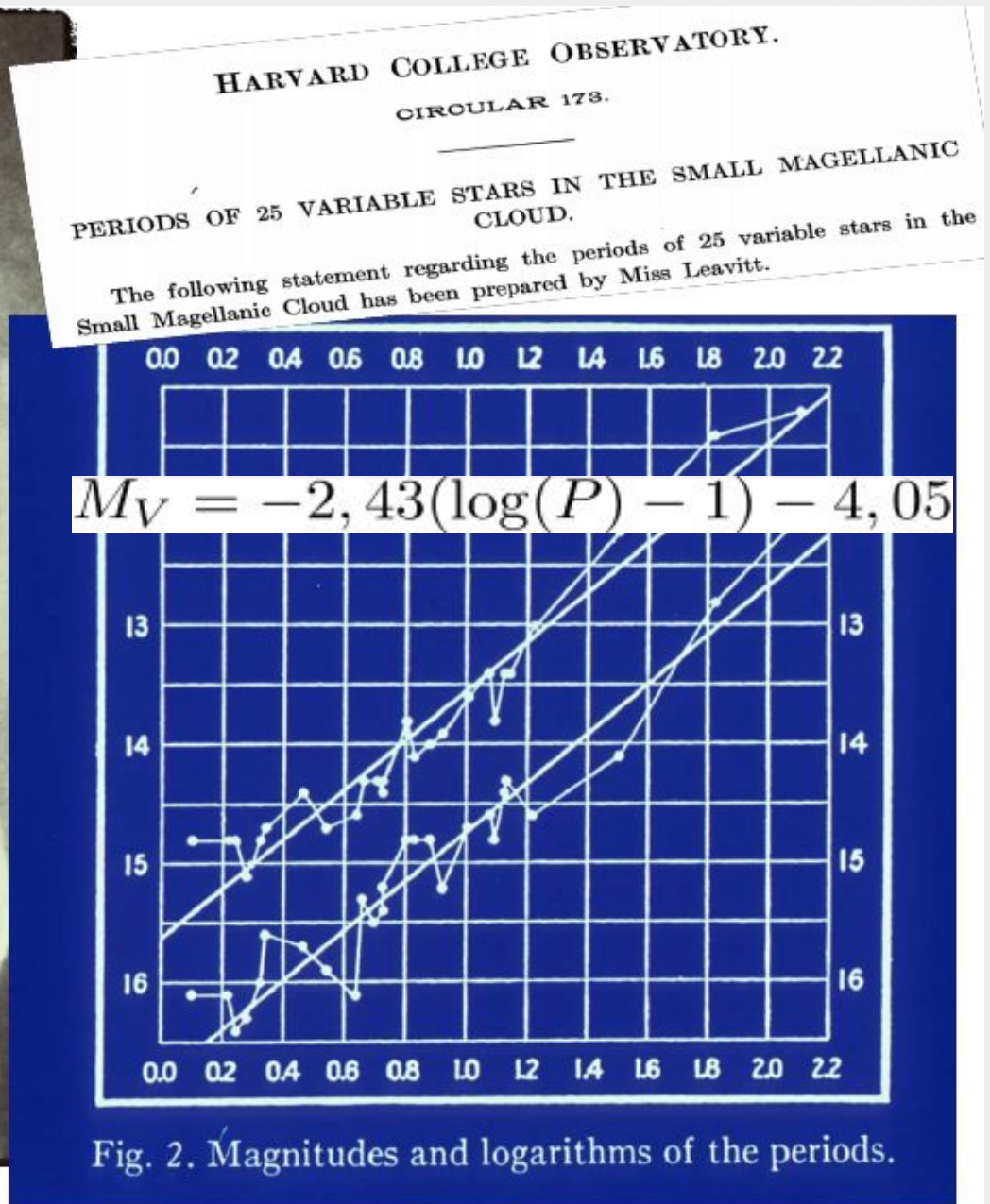
- Estrellas variables pulsantes, de población II (viejas) en la **rama horizontal** del diagrama H-R (están quemando He en el núcleo y H en una cáscara).
- Su magnitud absoluta es +0,5 (~50 veces más luminosas que el Sol).
- Usando la relación periodo-luminosidad, pueden ser utilizadas para determinar distancias en la Vía Láctea (el centro galáctico y algo más), o en las Nubes de Magallanes. En M31 ya es muy difícil
- De nuevo se usa el módulo de distancia.



Variabilidad de las Cefeidas



Henrietta Swan Leavitt



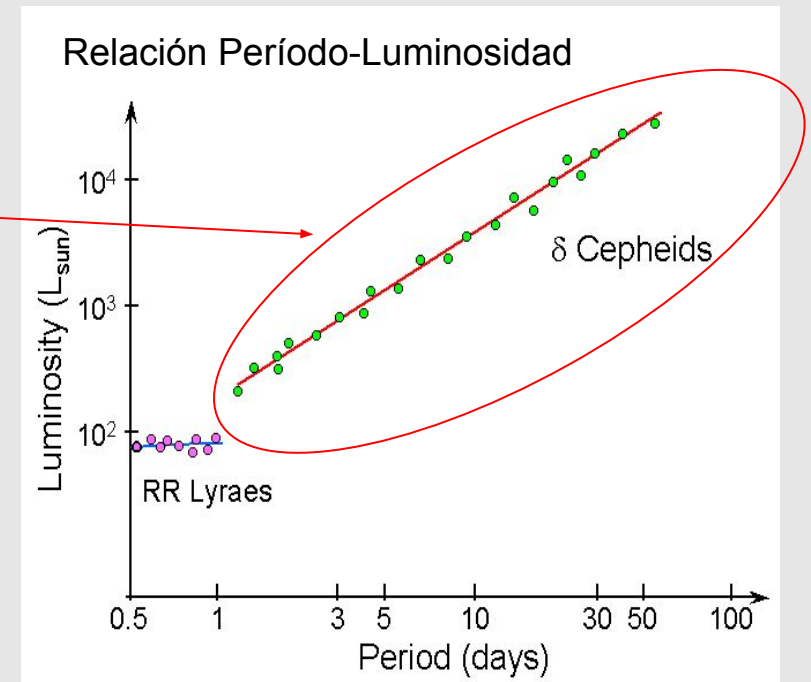
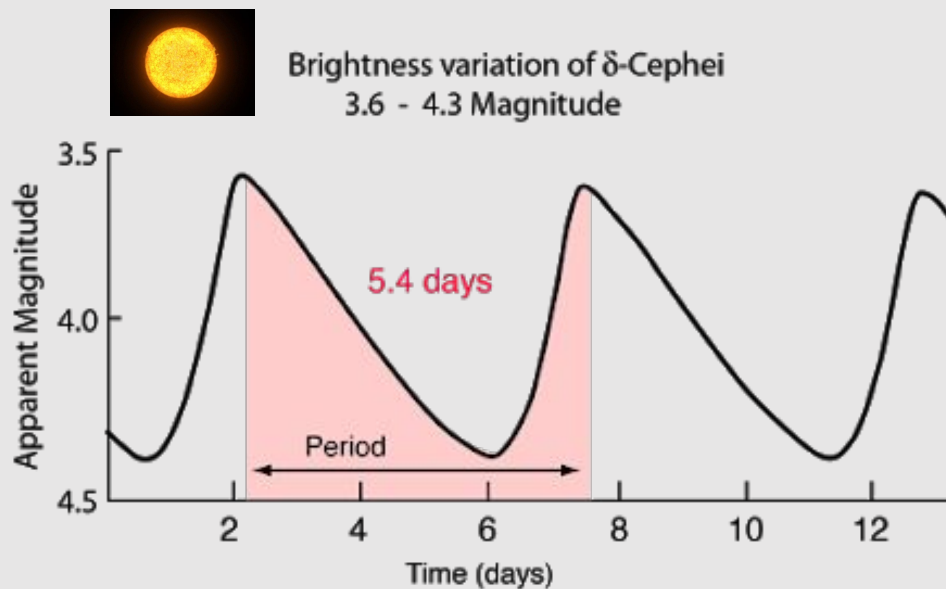
Leavitt, 1908

Leavitt & Pickering, 1912

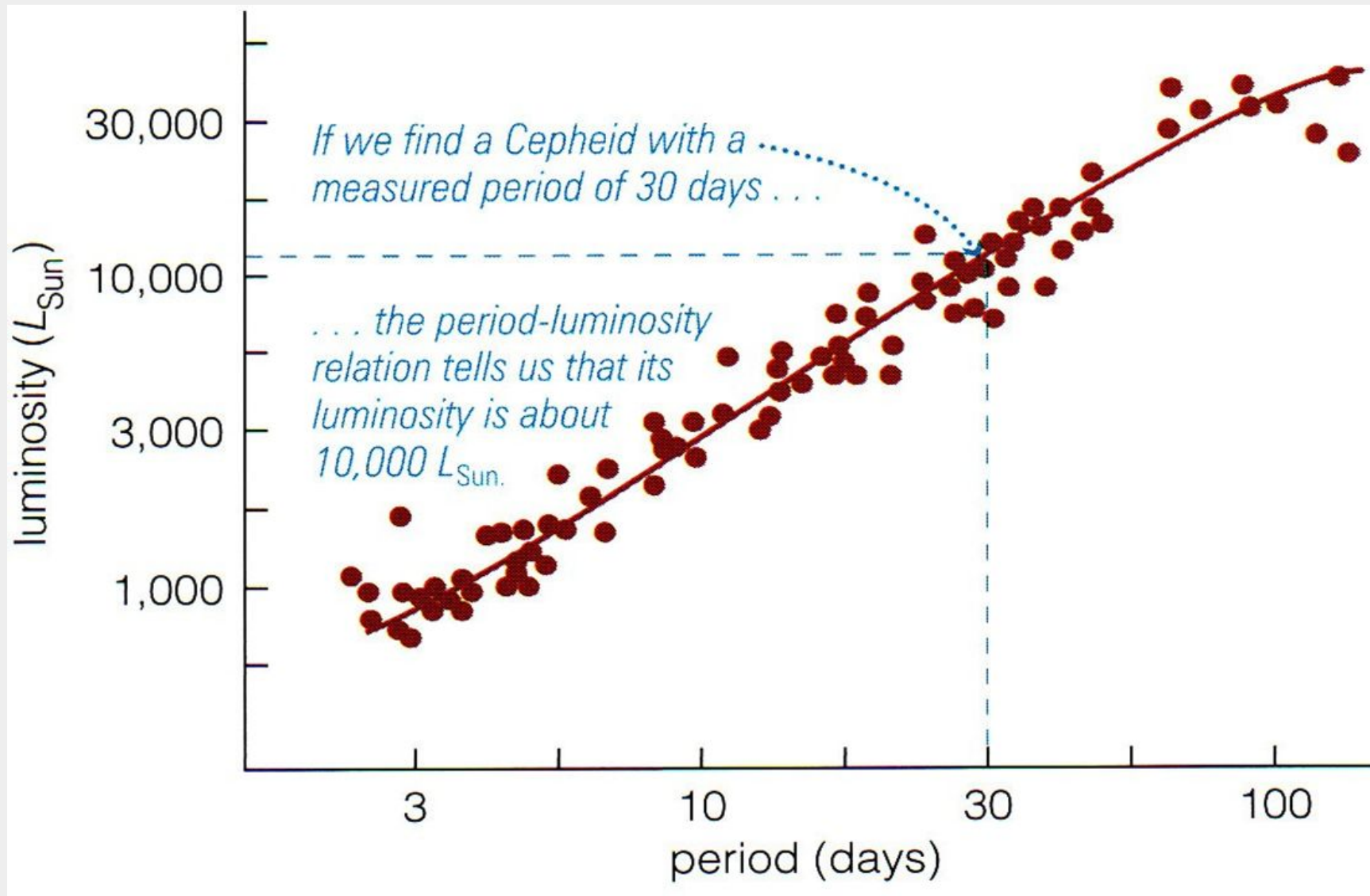
Cefeidas

Las cefeidas son estrellas **gigantes** que pulsan periódicamente con periodos desde 2-3 días hasta 100 días.

Su magnitud puede llegar hasta -7, por lo que pueden ser utilizadas en todas las galaxias del Grupo Local, y con mayor dificultad (con el telescopio Espacial Hubble) se pueden usar también para estimar distancias a galaxias del cúmulo de Virgo



Relación Período-Luminosidad de las Cefeidas



Cefeidas - *tarea*

Observaciones en distintas épocas de una estrella Cefeidas en una galaxia del **cúmulo de Virgo** permitieron obtener un período de 40 días y una magnitud aparente en la banda V de 25.5mag (ya corregida por extinción).

Usando la relación período-luminosidad para las Cefeidas calibrada:

$$M_V = -2,43(\log(P) - 1) - 4,05$$

donde P es el período en unidades de días y Mv la magnitud absoluta en la banda V,

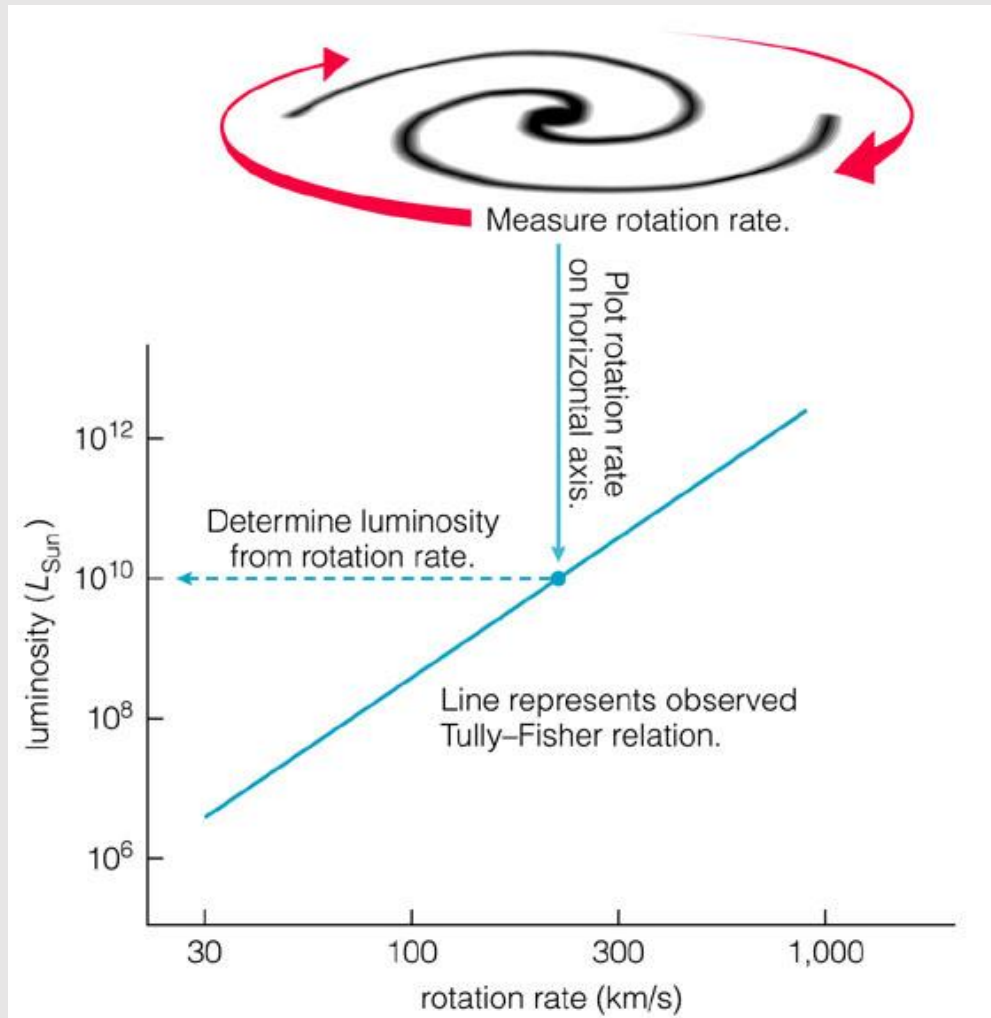
calcule la distancia al cúmulo de Virgo

Distancias extragalácticas

2. Distancia a galaxias lejanas:

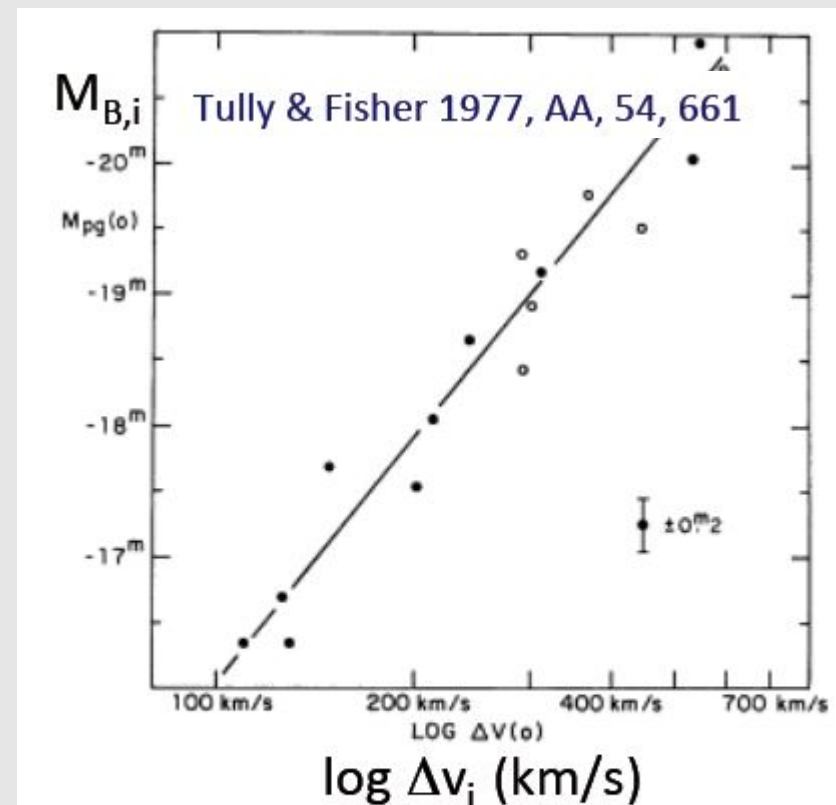
- Relación Tully Fisher de las galaxias espirales
- Supernovas
- Ley de Hubble, redshift cosmológico

Relación Tully Fisher

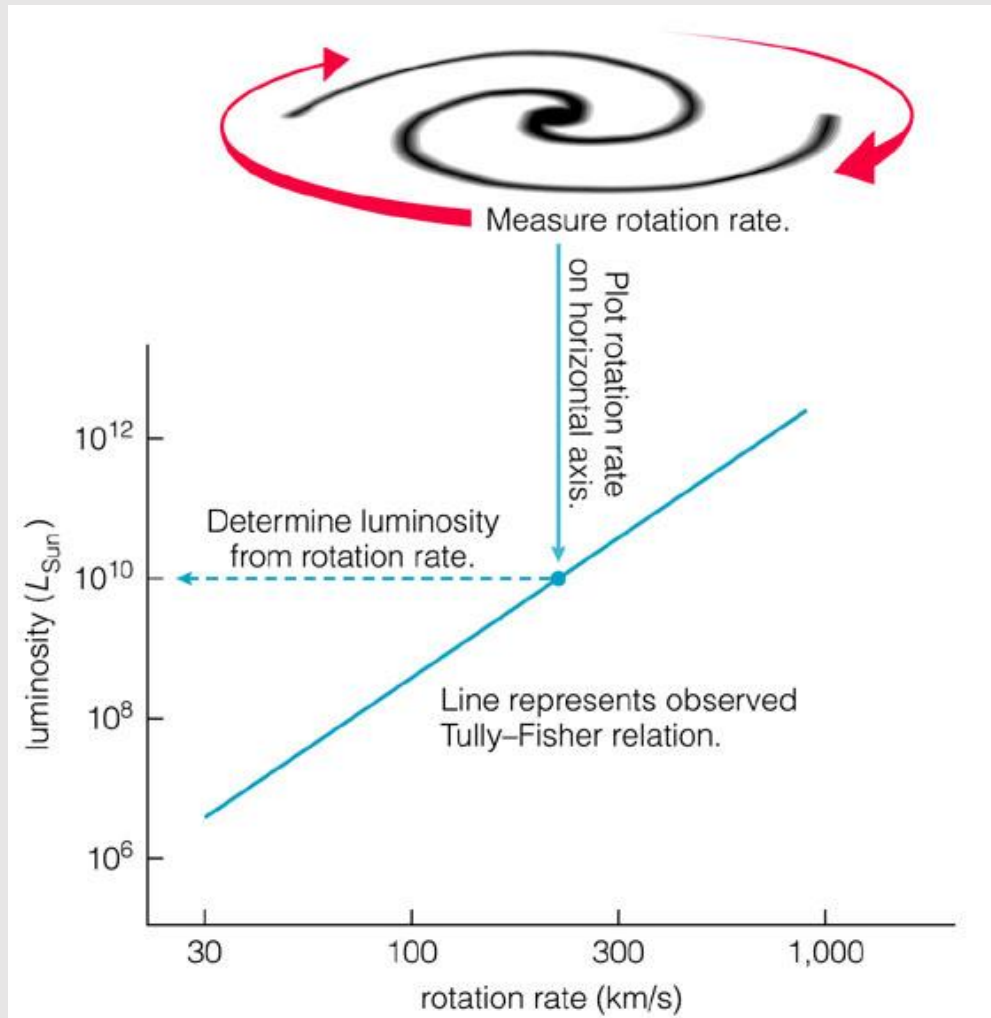


Conociendo la velocidad de rotación derivamos L y de la magnitud aparente tenemos la distancia

En **galaxias espirales**, la **velocidad máxima de rotación** es proporcional a la masa de la galaxia, que a su vez es un indicador de su **luminosidad absoluta**.



Relación Tully Fisher

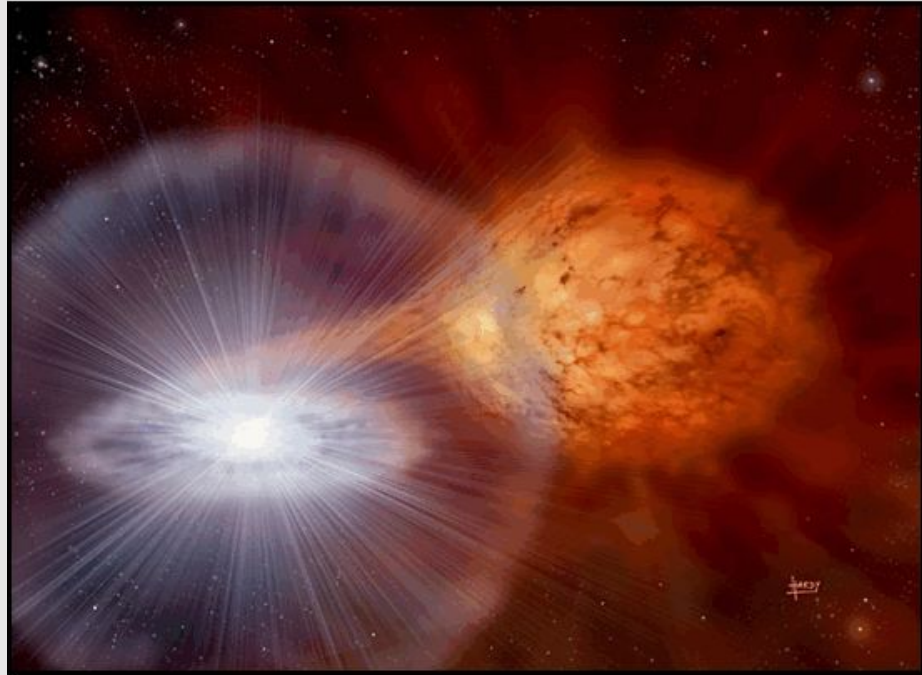


$$L \sim V_{\text{max}}^4$$

Donde V_{max} es la velocidad máxima de rotación de la galaxia, estimada a partir de la línea de 21 cm del H neutro (HI) u otros indicadores

En **galaxias elípticas**, existe una relación similar, pero entre la luminosidad y la **dispersión de velocidades**, llamada relación de **Faber-Jackson**

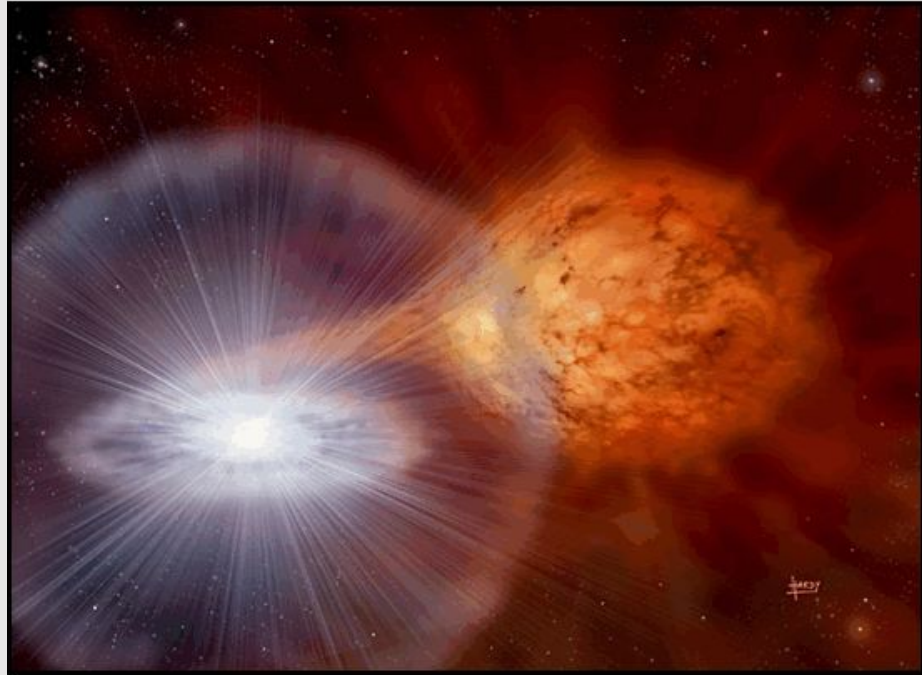
Supernovae tipo Ia



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

→ Son **muy brillantes** y su magnitud absoluta máxima ($M_{B \text{ max}}$) es esencialmente la misma siempre. Esto tiene sentido porque la SN se produce cuando la enana blanca llega a su límite de Chandrasekhar

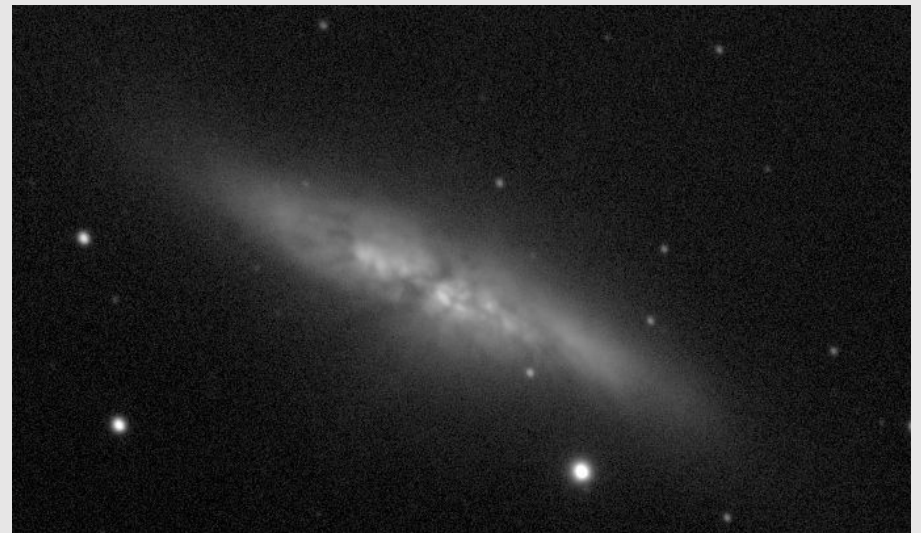
Supernovae tipo Ia



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

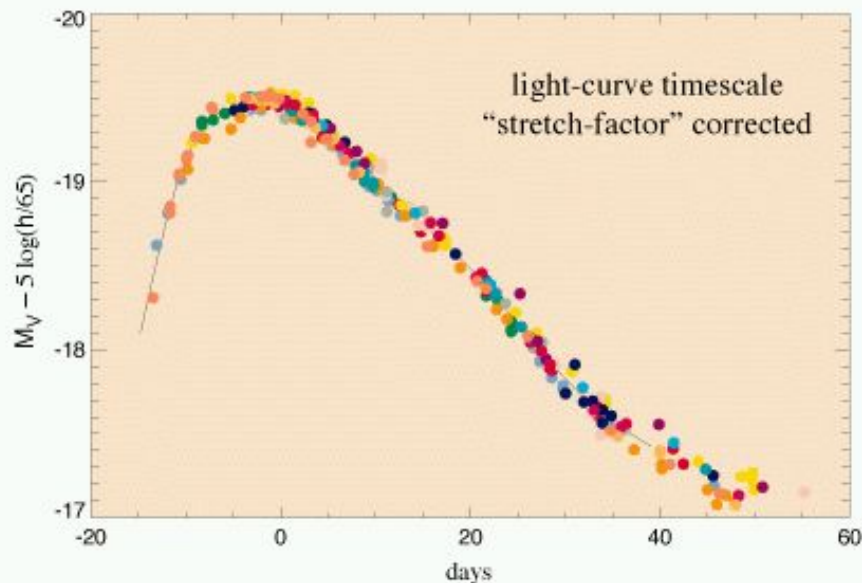
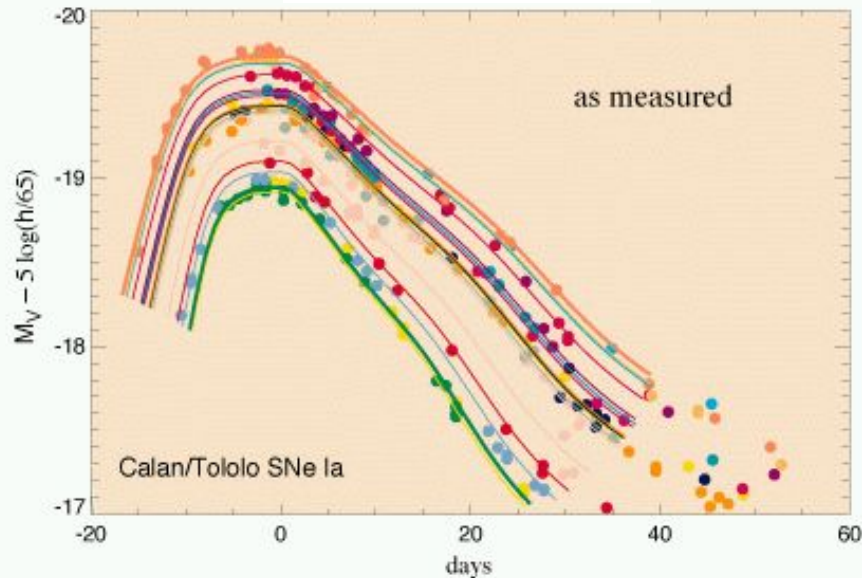
→ Son **muy brillantes** y su magnitud absoluta máxima ($M_{B \text{ max}}$) es esencialmente la misma siempre. Esto tiene sentido porque la SN se produce cuando la enana blanca llega a su límite de Chandrasekhar

→ Como son tan brillantes se pueden ver en galaxias muy distantes, hasta ~ 100 Mpc desde la Tierra.



Supernovae tipo Ia

Curva de Luz

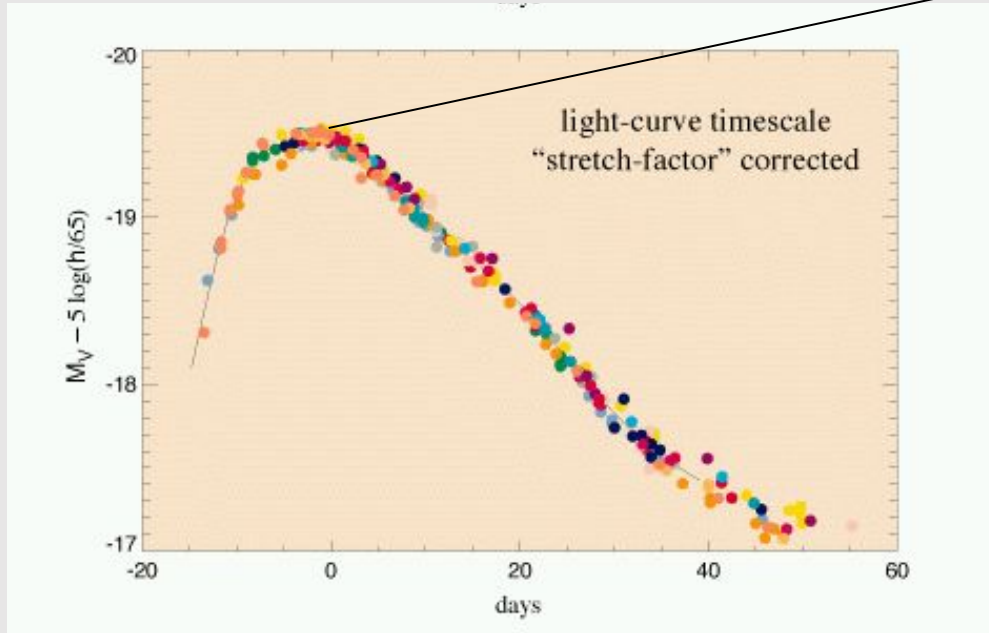


Sin embargo en la práctica vemos que hay algunas variaciones en la Luminosidad máxima ya que en algunos casos hay por ejemplo dos enanas blancas o la única enana blanca no explota por completo.

Para compensar por esas variaciones se puede tomar en cuenta el hecho de que las supernovas más brillantes decaen más lentamente; las menos brillantes lo hacen más rápidamente.

**Tasa de decaimiento → Mag. absoluta
+ magnitud aparente = distancia**

Supernovae tipo Ia



$$M_{B \max} \sim M_{V \max} - 19.3$$
$$(L \sim 5 \times 10^9 L_o)$$

**Mag. absoluta + magnitud aparente
(considerando extinción) = distancia**

Se usa el módulo de distancia para calcular d:

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

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

Supernovae tipo Ia - *tarea*

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:

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

Distant galaxies before supernova explosions



The same galaxies after supernova explosions

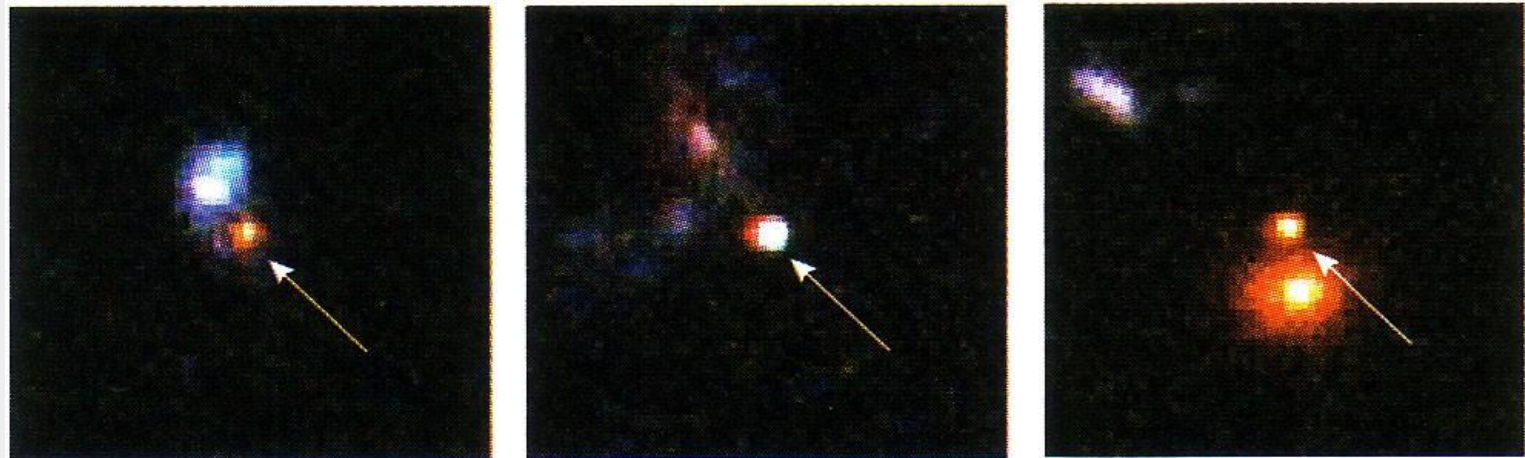


Figure 15.13

White dwarf supernovae in galaxies approximately 10 billion light-years away. White arrows in the lower images indicate the supernovae, and the upper images show what these galaxies looked like without supernovae.

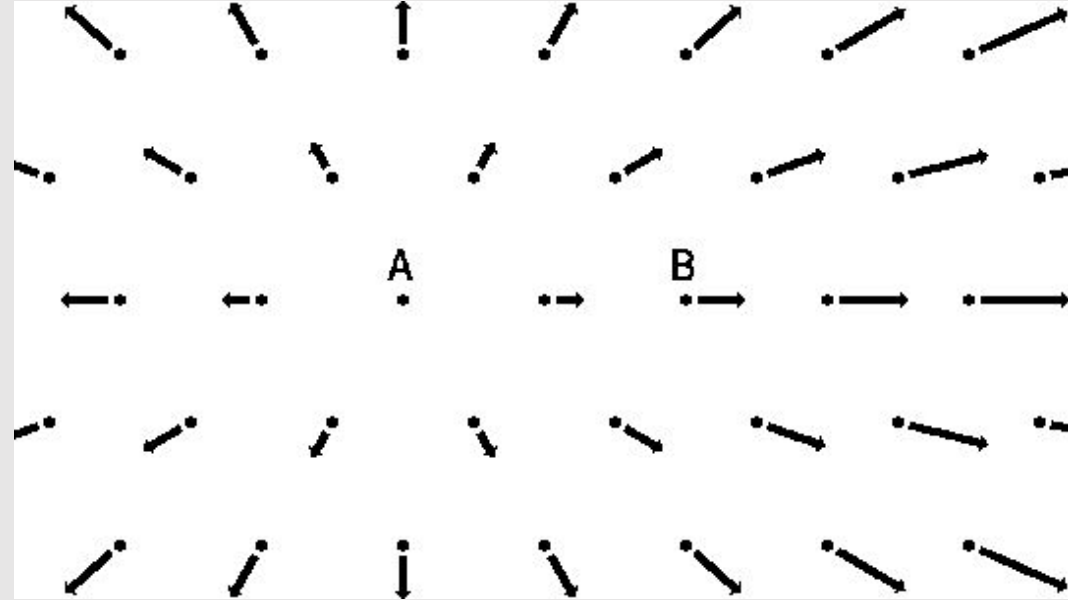
Supernovae tipo Ia

- Las supernovas de tipo Ia son los objetos individuales más luminosos que pueden ser calibrados para indicar distancias.
- La calibración de distancia con supernovas puede hacerse hasta **300 veces más lejos que con cefeidas**.
- Gracias a ella se descubrió en 1998 que **la expansión del universo se está acelerando**.

Ley de Hubble-Lemaître

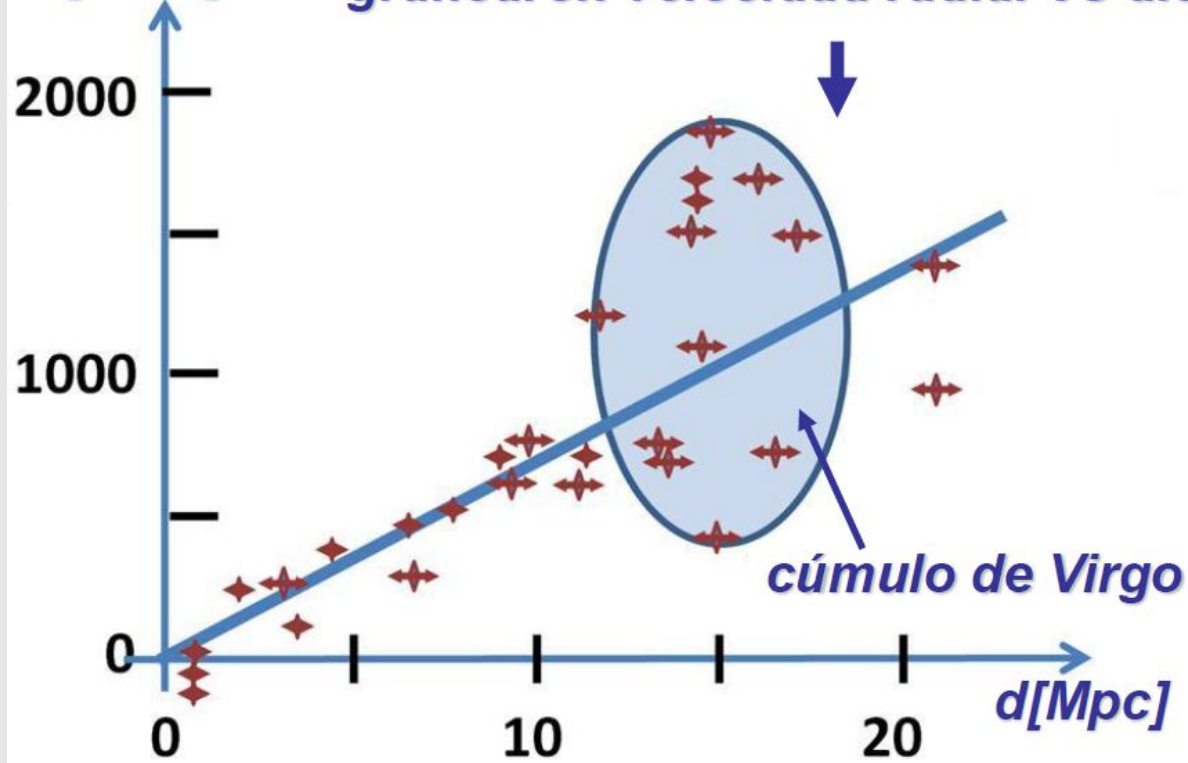
En los 1920s Lemaître y Hubble se dan cuenta que las distancias a Galaxias cercanas (calculadas con Cefeidas) se correlacionaban con las velocidades medidas a estas galaxias → **¡El Universo se está expandiendo!**

(Lemaître lo publicó en Francés 2 años antes)



$V_r[\text{km/s}]$

graficaron velocidad radial Vs distancia



Cte de Hubble

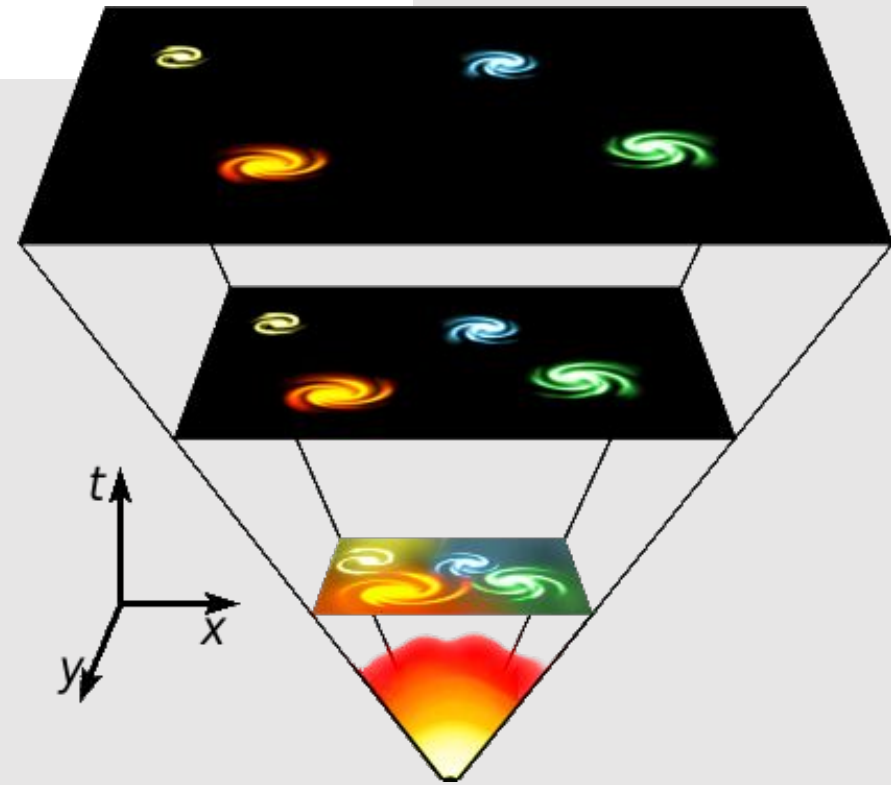
$$V_r = H_0 d$$

ley de Hubble

Mientras más lejos está algo de nosotros,
más rápido se aleja

$$v_r = H_o \times d$$

donde H_o es la **constante de Hubble**

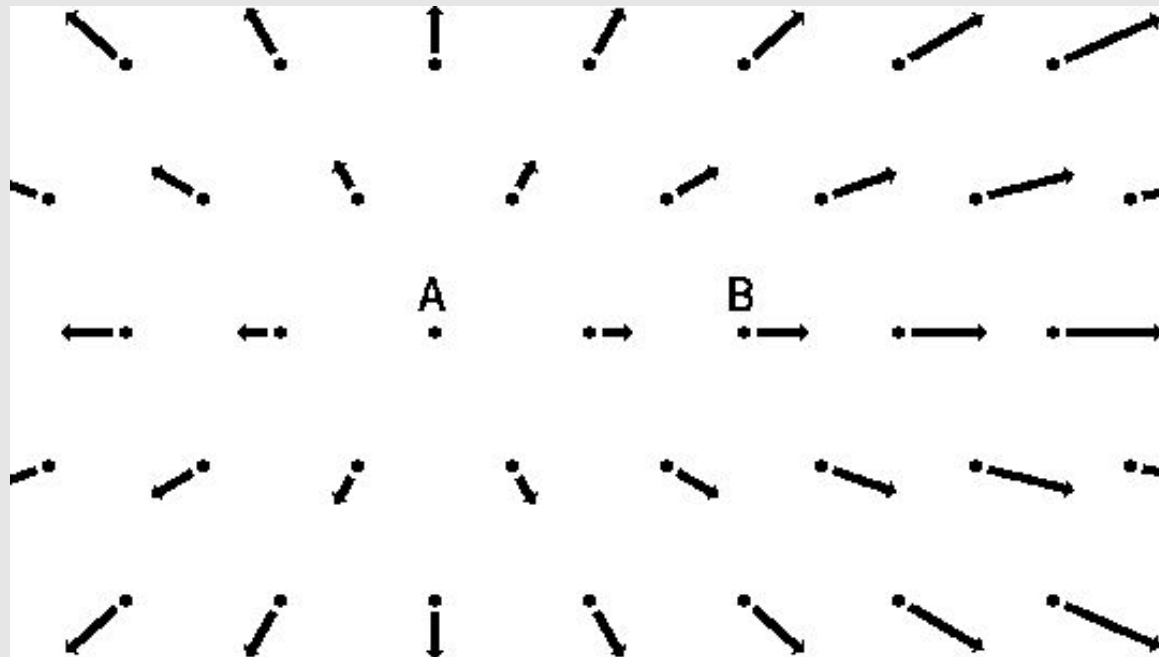


Ley de Hubble.

- Mientras más lejos está algo de nosotros, más rápido se aleja

$$v_r = H_o \times d$$

donde H_o es la **constante de Hubble**

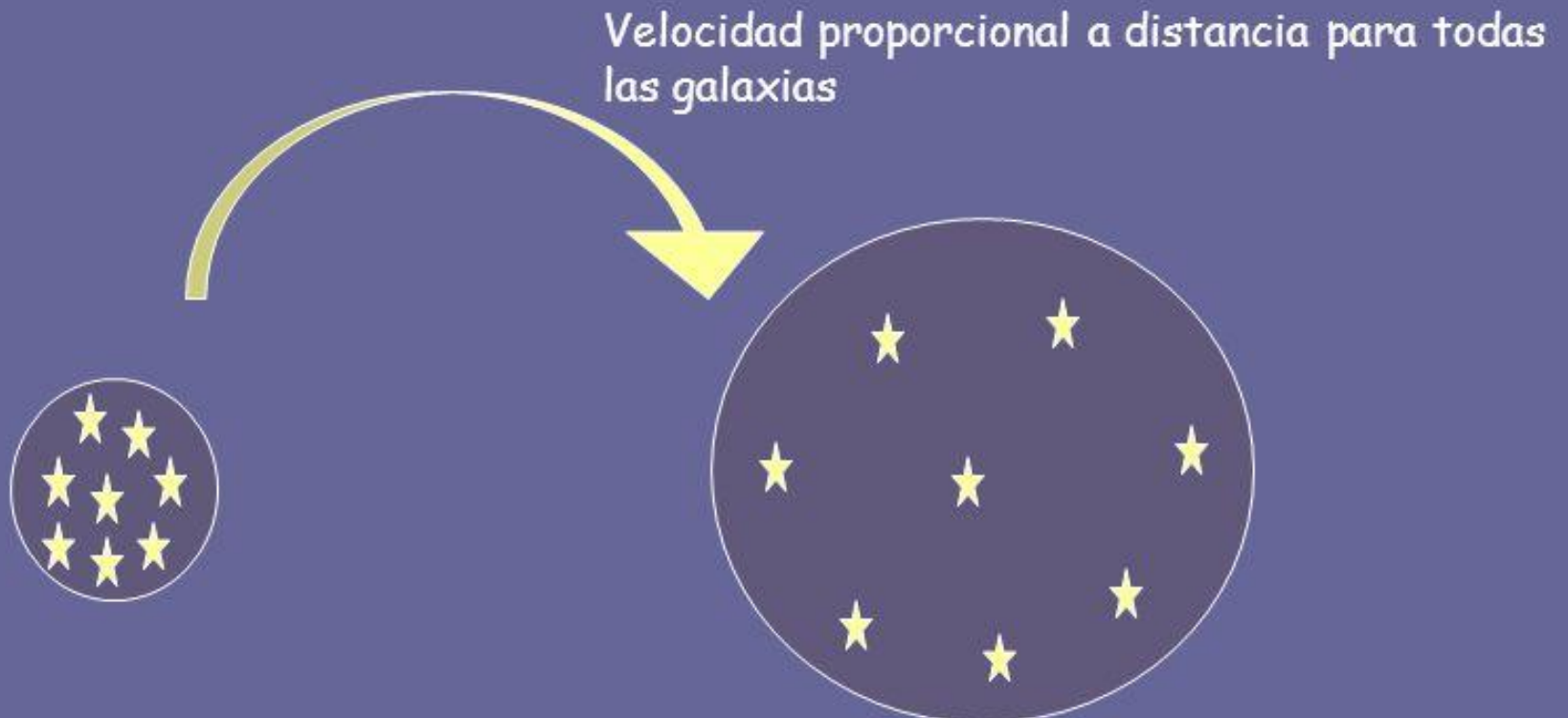


Ley de Hubble-Lemaître

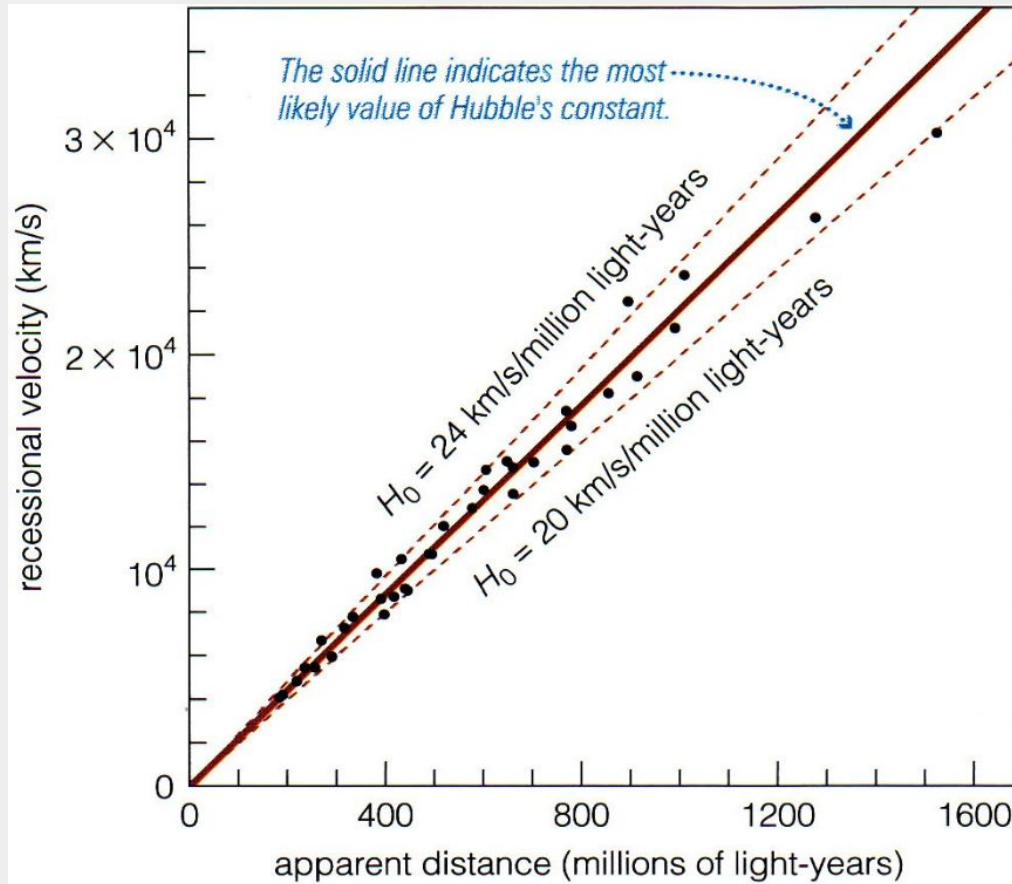
- Universo está en expansión
- En el pasado era más pequeño
- Tiene que haber tenido un comienzo

→ Big Bang

Estamos nosotros un sitio privilegiado? No. Es igual para todos los sitios



Las SN Ia se usan para estimar H_0 a grandes distancias.



Los puntos en la figura corresponden a distancias aparentes a distintas SN Ia y velocidades con que se alejan de nosotros las galaxias en las que se encuentran esas supernovas.

El hecho de que todas las SN Ia se ubiquen cerca de la línea recta, demuestra que las SN Ia son buenos estimadores de distancias.

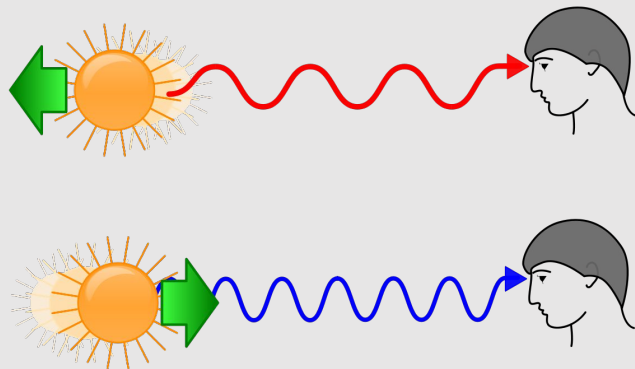
$$20 \text{ km/s/millón de años-luz} = 65 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$$

$$24 \text{ km/s/millón de años-luz} = 78 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$$

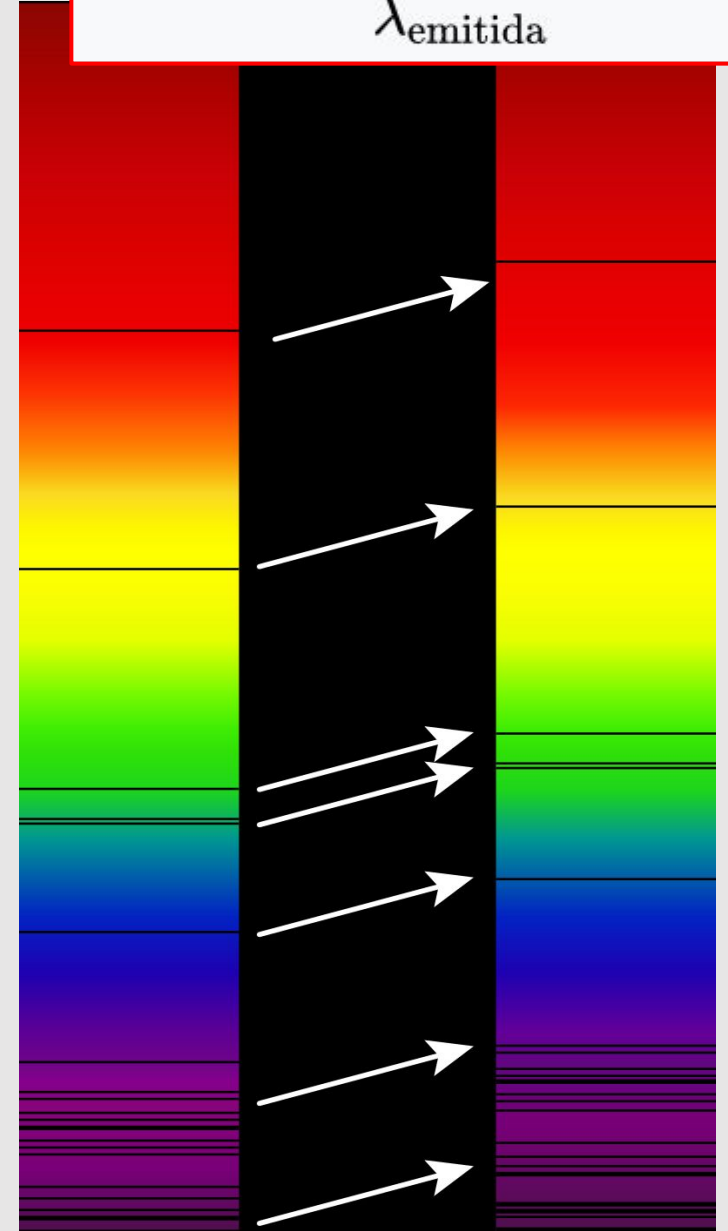
Hoy se estima el valor de la H_0 es de $73 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$

Ley de Hubble-Lemaître y Redshift

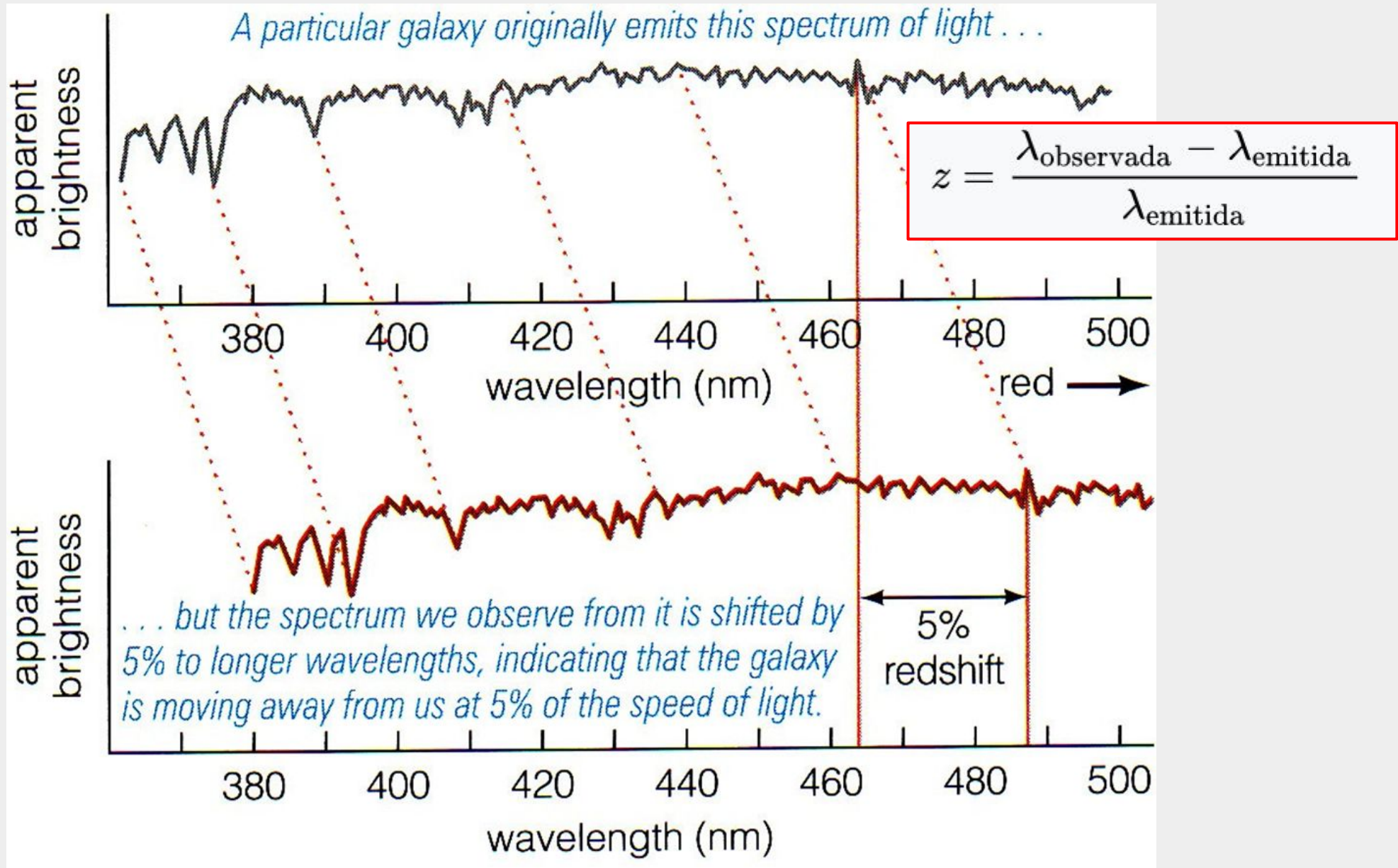
- Si se mide la velocidad con la que una galaxia se aleja de nosotros, conociendo H_0 se puede estimar su distancia.
- La velocidad radial con que se aleja de nosotros una galaxia (**velocidad de recesión**), se estima a partir del desplazamiento por **efecto Doppler** de sus líneas espectrales (“redshift” o corrimiento al rojo, porque se está alejando)



$$z = \frac{\lambda_{\text{observada}} - \lambda_{\text{emitida}}}{\lambda_{\text{emitida}}}$$



Redshift



Resumen de la escala de distancias

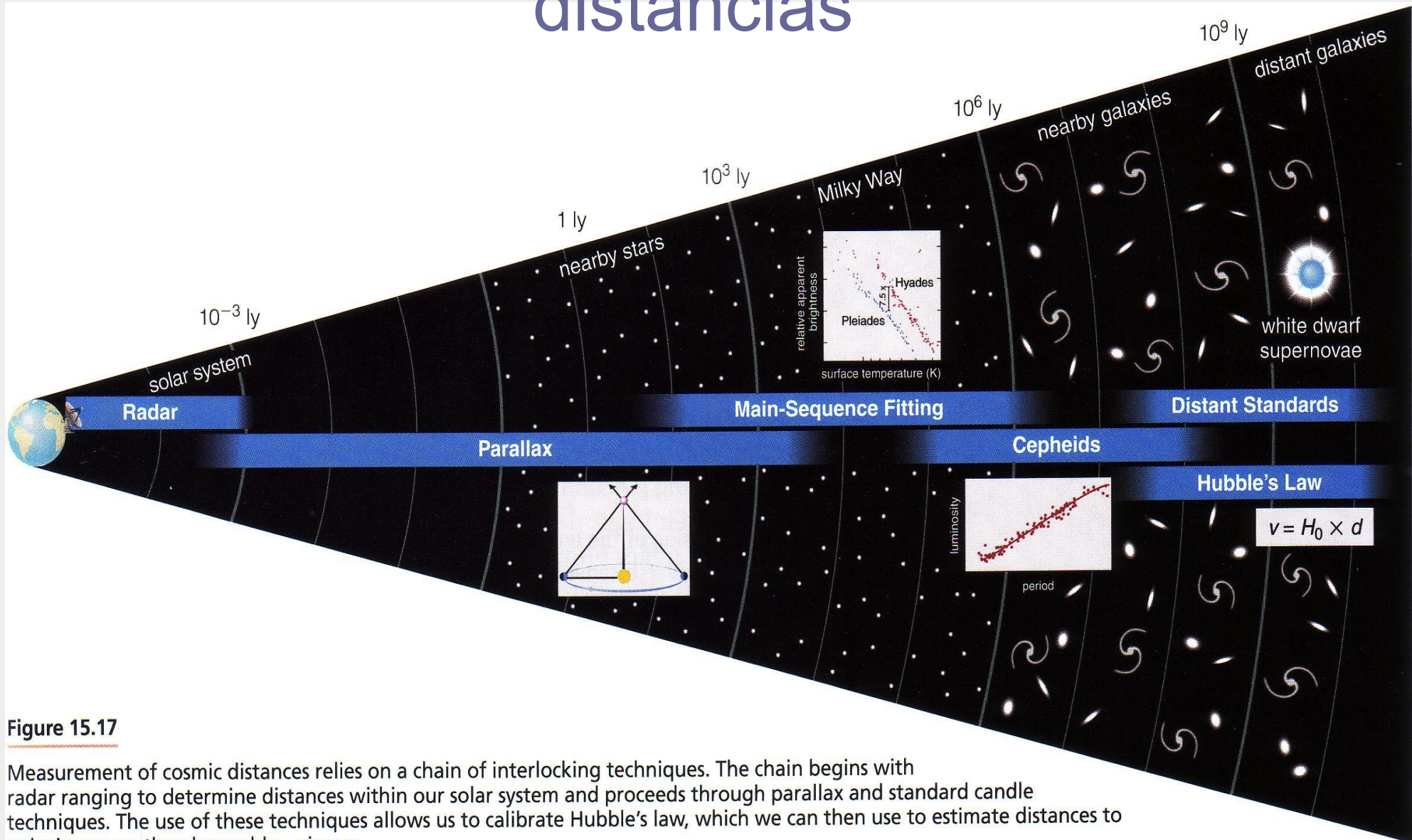
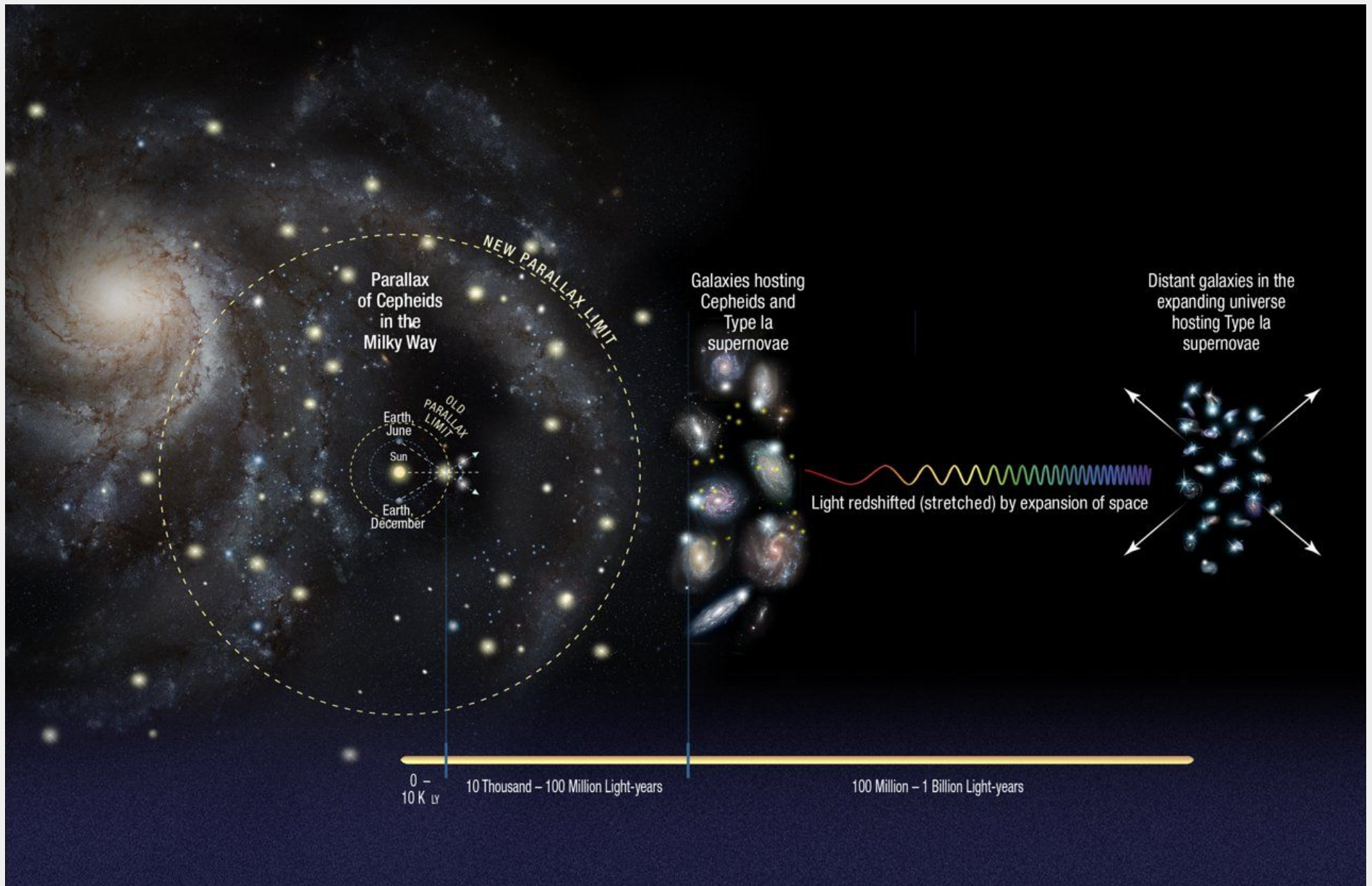


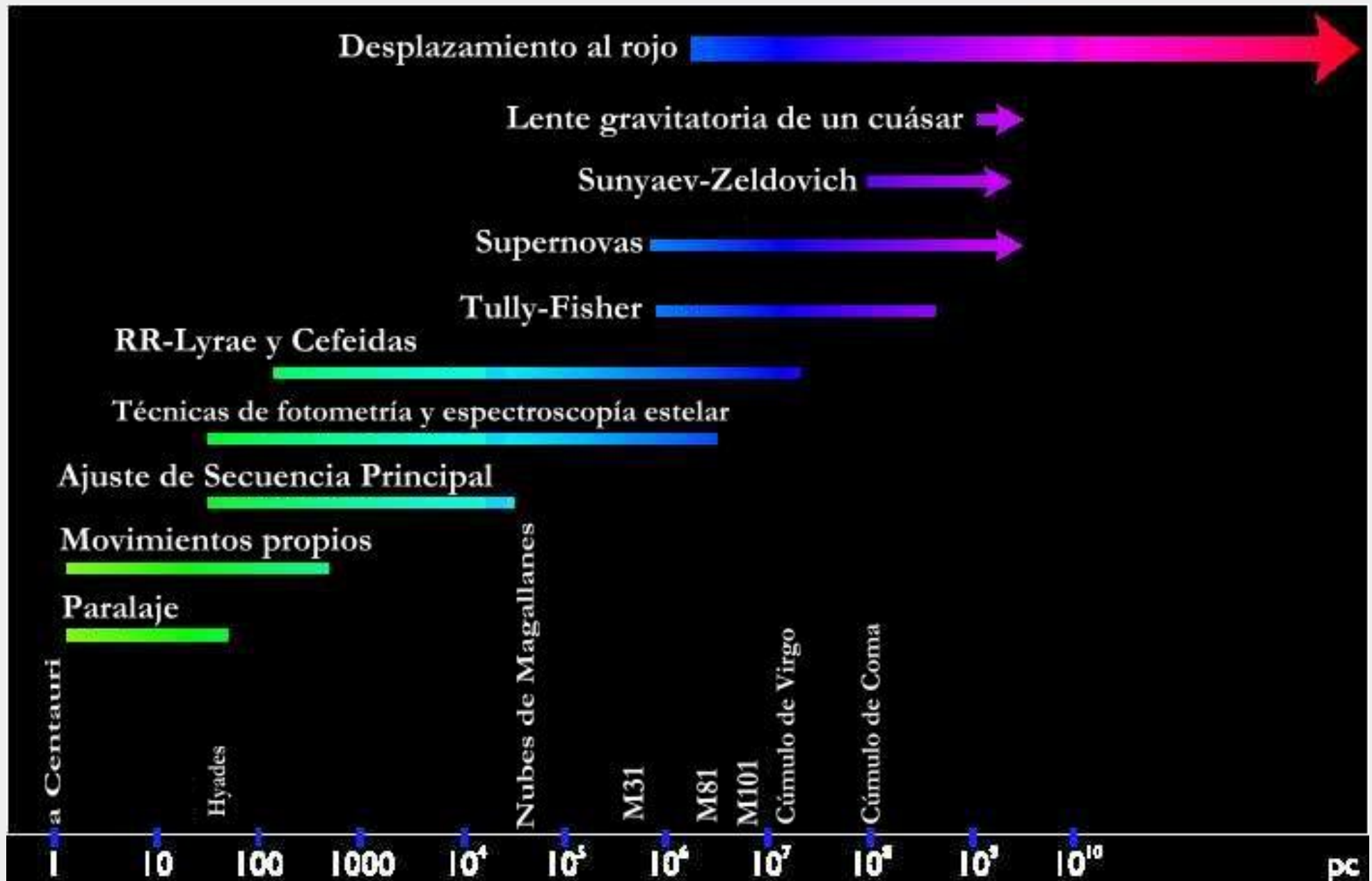
Figure 15.17

Measurement of cosmic distances relies on a chain of interlocking techniques. The chain begins with radar ranging to determine distances within our solar system and proceeds through parallax and standard candle techniques. The use of these techniques allows us to calibrate Hubble's law, which we can then use to estimate distances to galaxies across the observable universe.

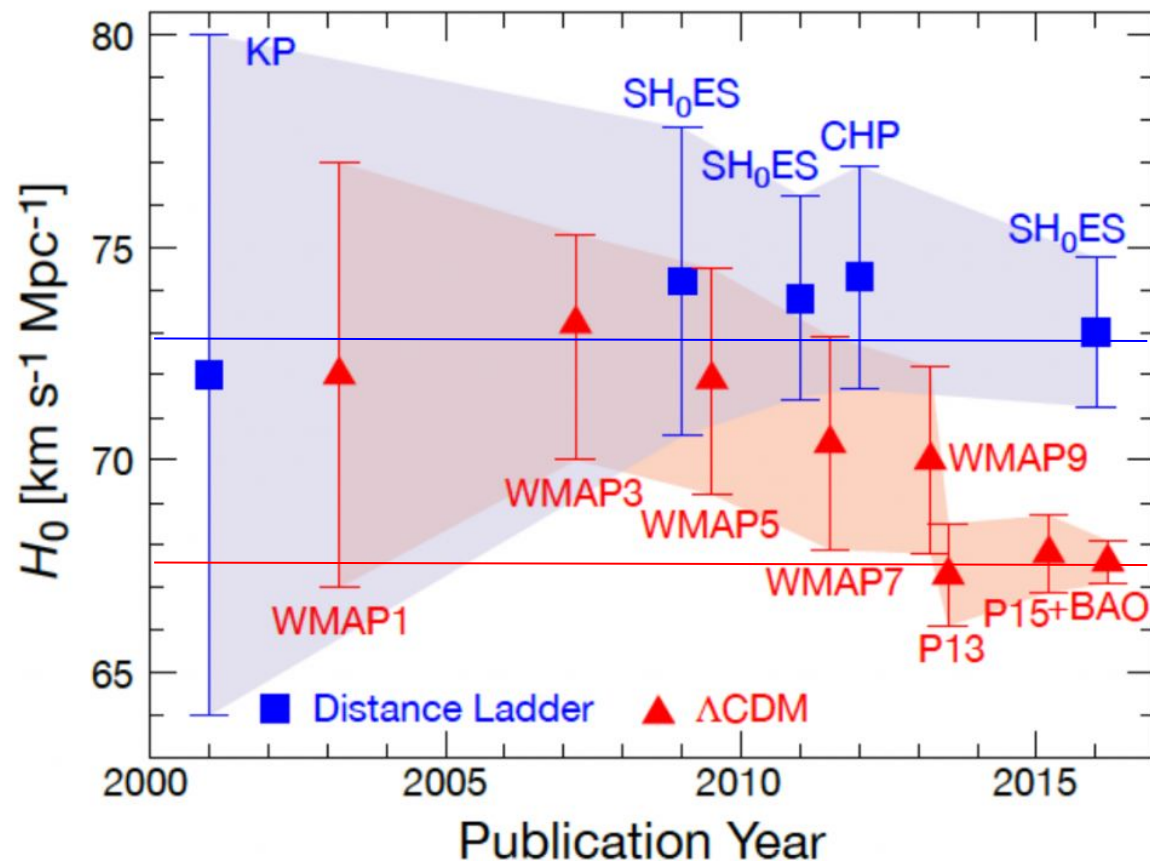
Resumen de la escala de distancias



Resumen de la escala de distancias



Discrepancia en la constante de Hubble



¿Por qué la diferencia?

Tal vez no estamos calculando bien los errores en las mediciones

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

Escala de distancias y la edad del Universo.

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 resección v (según la Ley de Hubble-Lemaître), asumiendo (incorrectamente) que v ha permanecido constante, es:

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

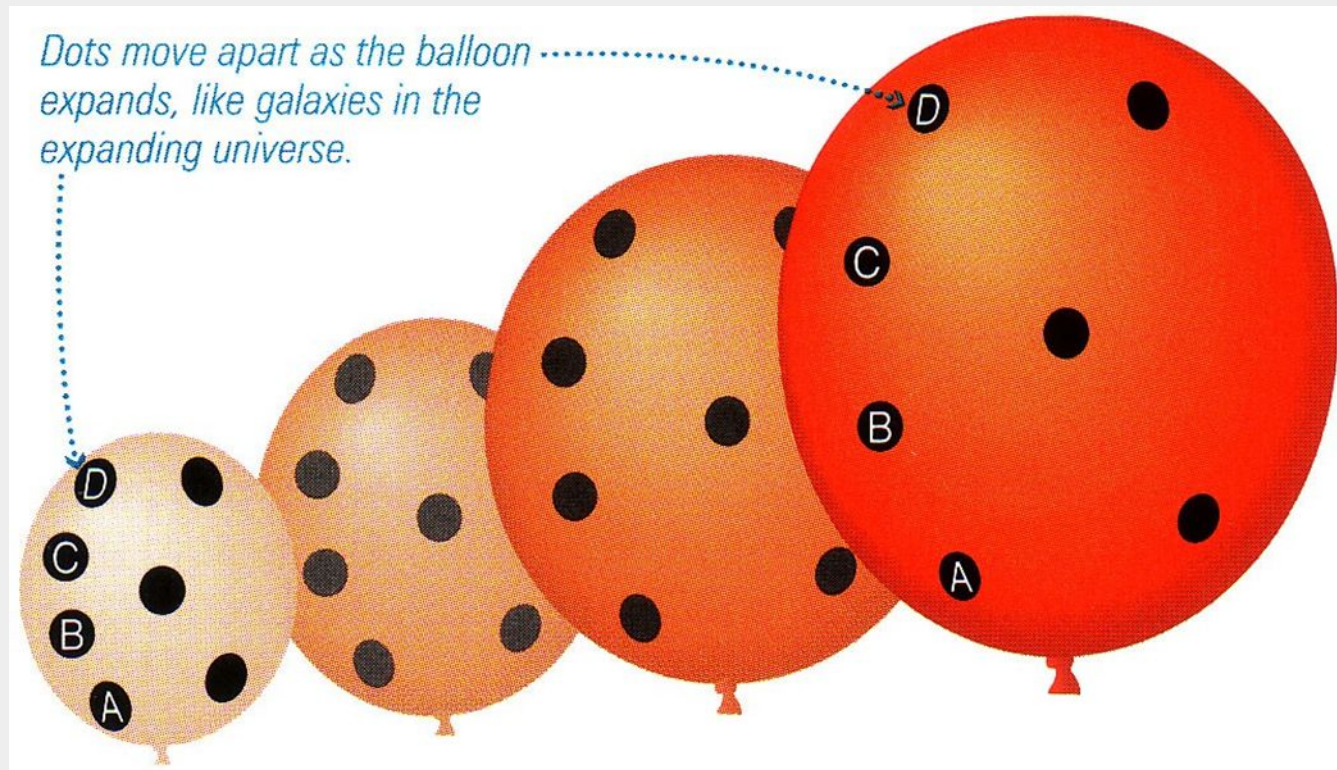
$$t_H \equiv \frac{1}{H_0} \sim 13.8 Gyr$$

tiempo de Hubble

Expansión del Universo y redshift cosmológico (z)

Analogía del globo inflándose (o el queque de pasas).

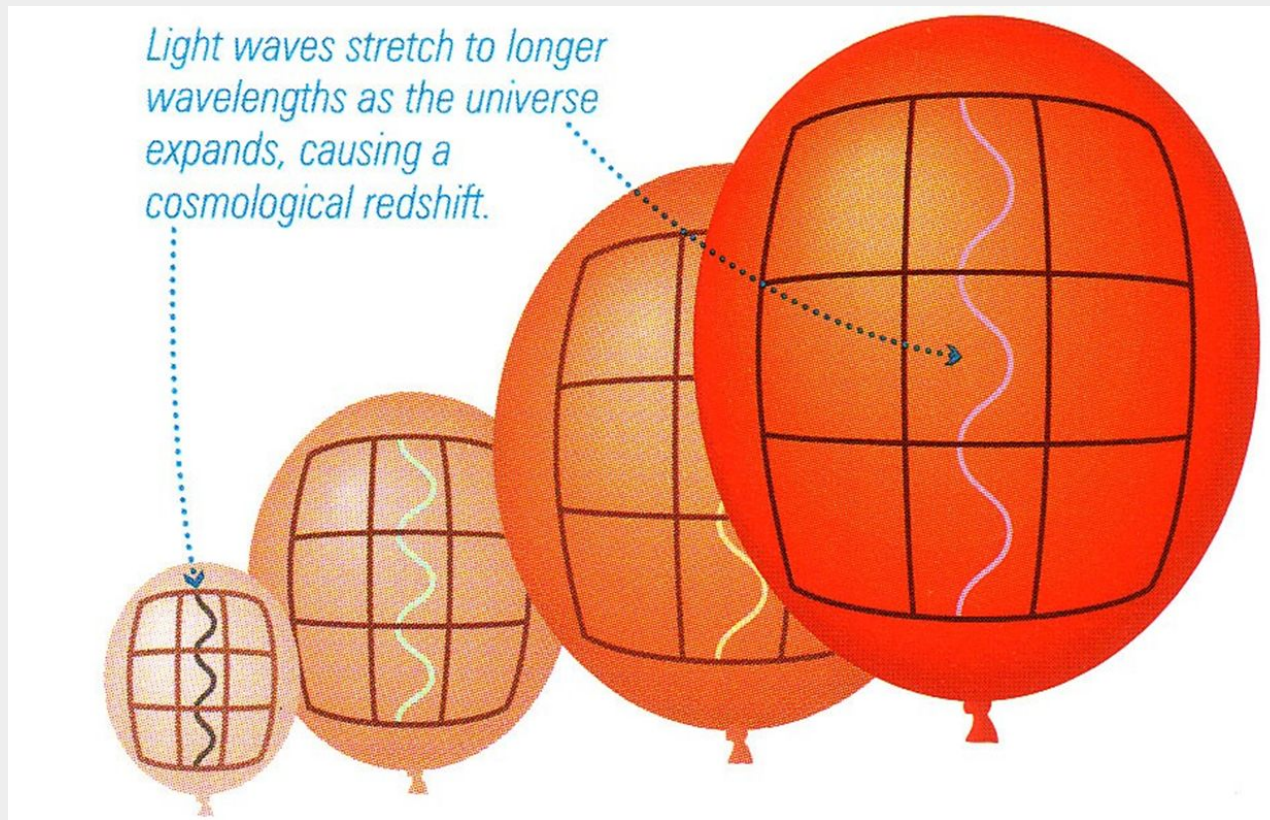
A medida que el globo se expande, los puntos en el se alejan de la misma forma que las galaxias se alejan en nuestro universo.



Expansión del Universo

A medida que el Universo se expande, la longitud de onda de los fotones que viajan hacia nosotros “se estira”, hacia longitudes de onda mayores (más rojas).

Esto es el **Redshift Cosmológico**



Si la luz viene de una galaxia más distante, se demora más tiempo en llegarnos.

En este tiempo el Universo se expande y su redshift será mayor si viene de más lejos

Redshift cosmológico

ley de Hubble

$$V_r = H_0 d$$

$$\Delta\lambda / \lambda_0 = v / c$$

z
corrimiento al rojo
(redshift)

$$Z = v/c$$

para $v \ll c$!

para velocidades cercanas a c

$$z = \sqrt{\frac{1 + v/c}{1 - v/c}} - 1$$

fórmula relativística

el corrimiento al rojo observado en el espectro de galaxias lejanas puede representarse matemáticamente con la misma expresión que el corrimiento Doppler debido al movimiento de los objetos en el espacio con respecto al observador. Sin embargo es de una naturaleza diferente. No son los objetos los que se mueven en el espacio, si no el espacio-tiempo que se expande

El Horizonte del Universo

- Sólo vemos hasta el lugar desde el cual la luz ha tenido tiempo para llegar a nosotros.
- El Horizonte va creciendo día a día.
- El universo es infinito pero en el pasado veíamos un universo pequeño que crece día a día.