

CTE II - Origen del Universo I

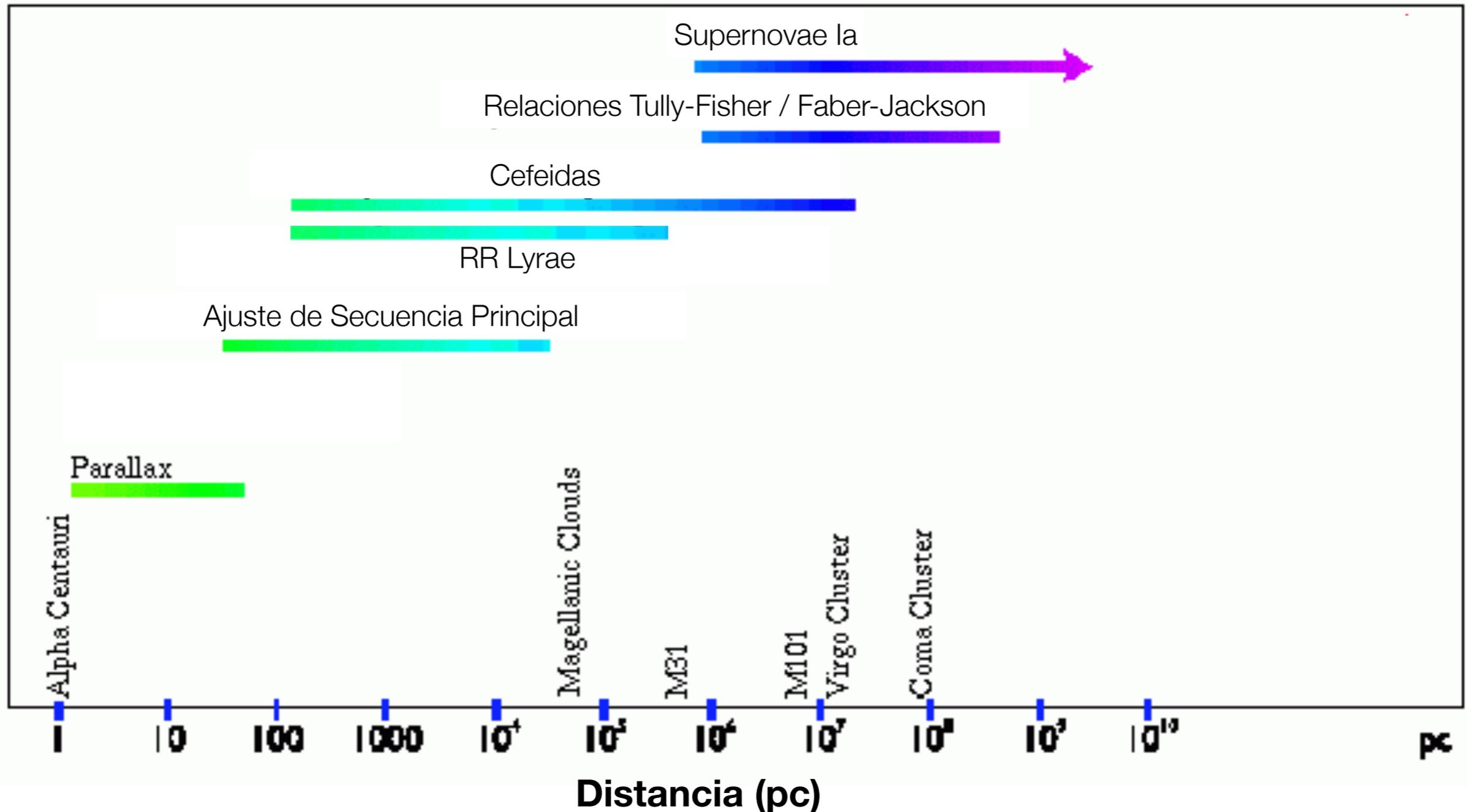
El Universo Local y el Universo Lejano

Cecilia Mateu

Instituto de Física, Facultad de Ciencias
Universidad de la República

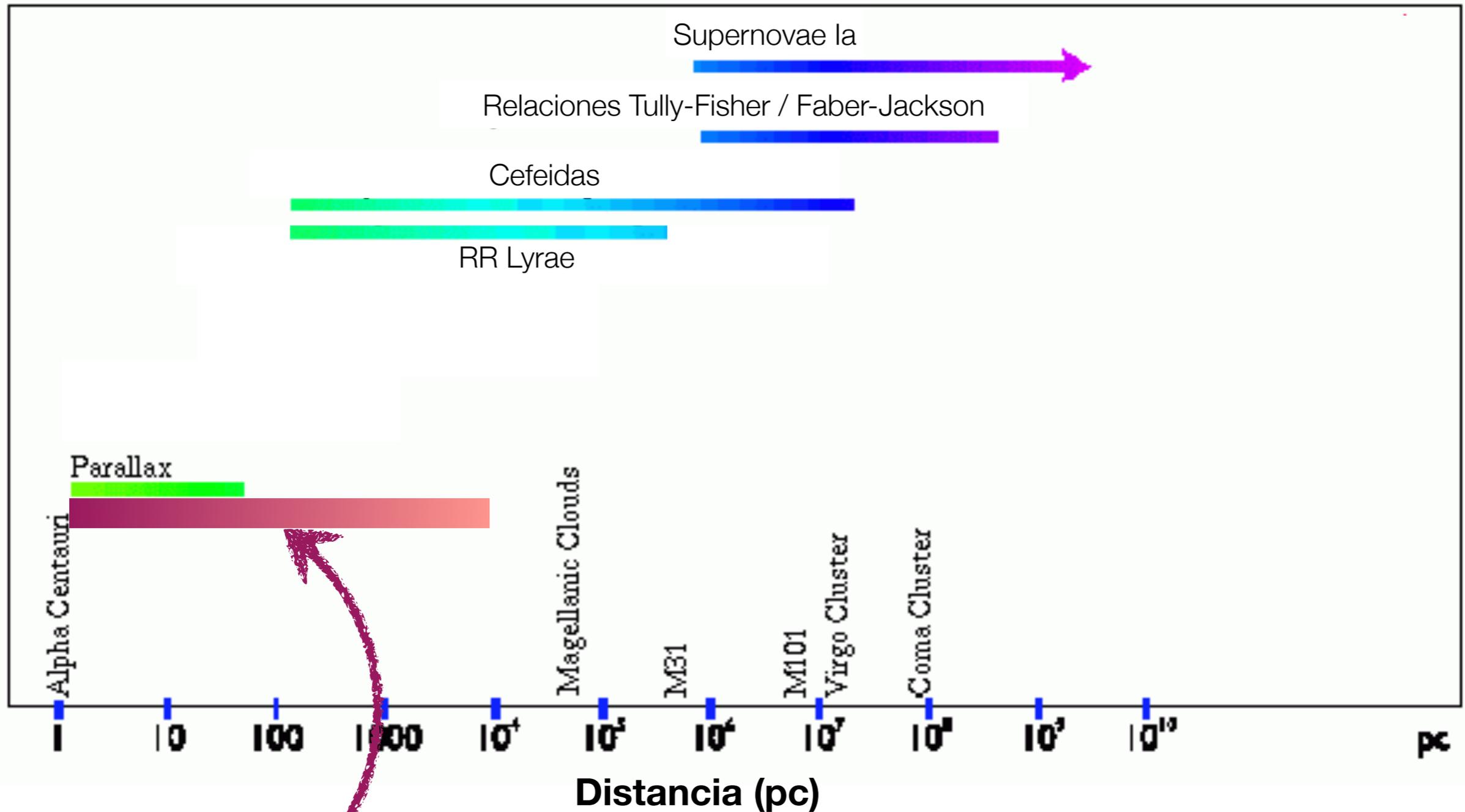
La Escala de Distancias

La escala de distancias



Importante: El rango de distancias que cubre cada “peldaño” solapa con el anterior y depende de éste, y por lo tanto, de todos los anteriores implícitamente.

La escala de distancias



Gaia DR2-DR4

Con Gaia ahora (desde 2018) se pueden calibrar directamente las relaciones P-L con medidas del paralaje de RRLs y Cefeidas (se elimina un peldaño intermedio)

The Gaia Mission: A Short Summary



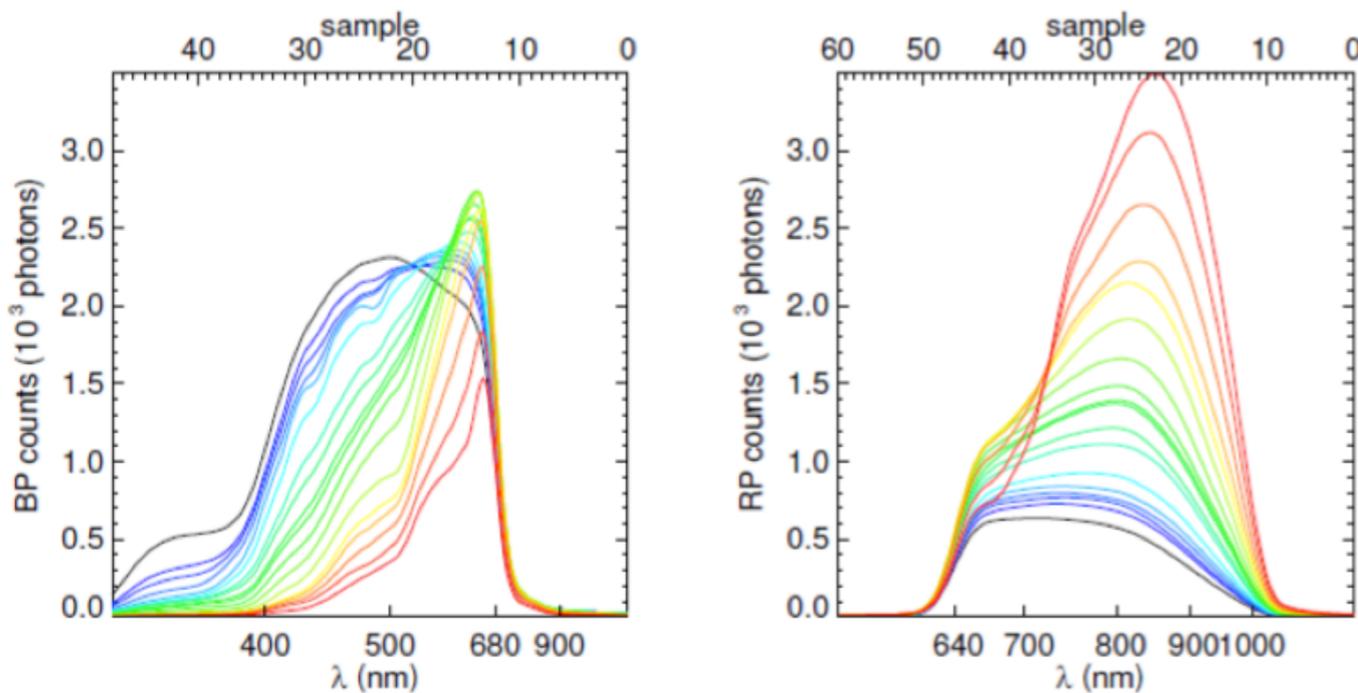
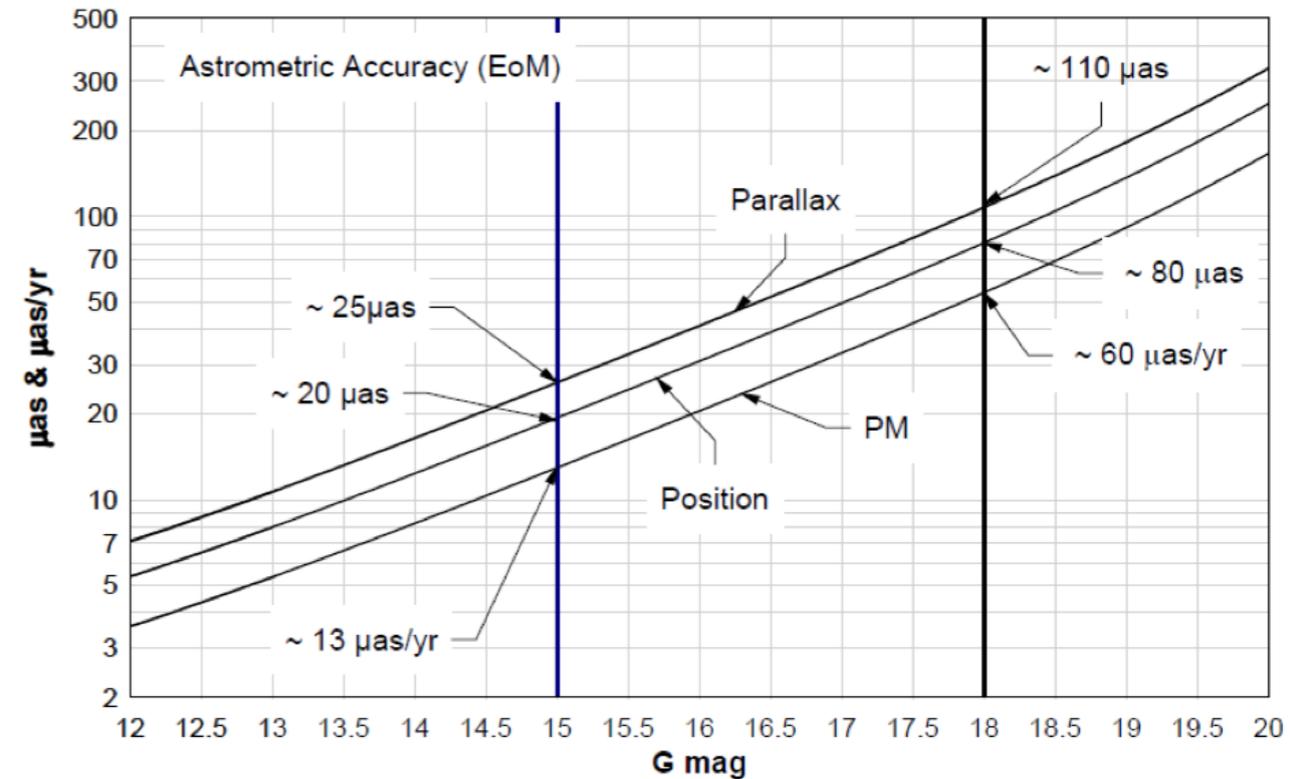
Launched: December 2013

Latest Data Release: E-DR3 12/2020

Mission Span: 5 years + 5yr extension

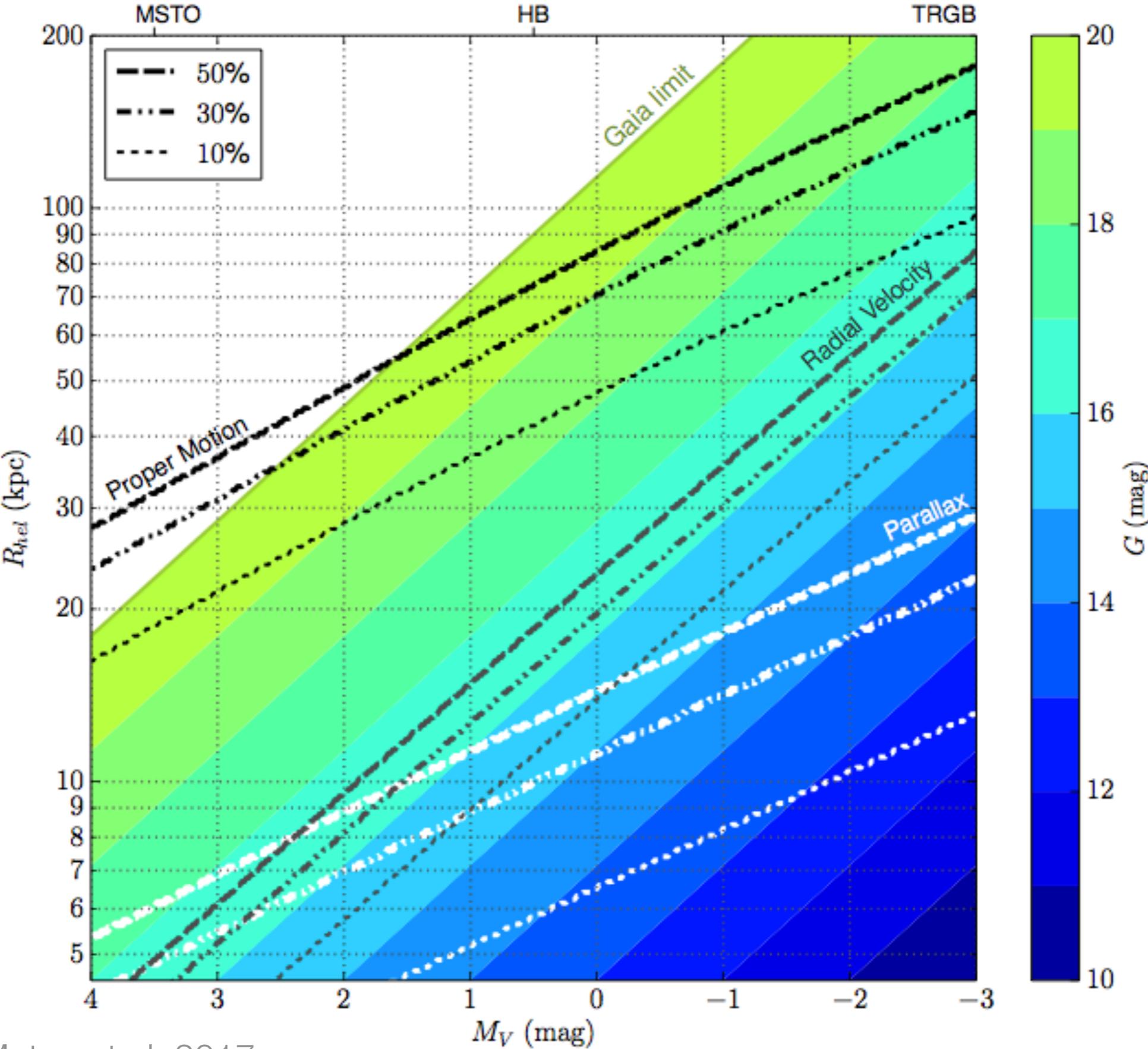
Orbit: Around L2

- Sondeo *all-sky, todo el cielo, completo* para todos los objetos hasta $G=20$ ($V \sim 20-22$)
- Fotometría G + espectros de baja dispersión en 2 bandas BP, RP (y fotometría BP, RP)



- Velocidades radiales hasta $G=16$
 - Espectros Alta-Resolución (RVS) alrededor de Ca II Triplet (8500\AA)
- Multi-época: de ~ 80 a 200 tránsitos por objeto (final de misión nominal)

Desempeño de Gaia (tiempo nominal de misión 5 años)



adaptado de Mateu et al. 2017

¿Cuánto de la Vía Láctea está observando Gaia?

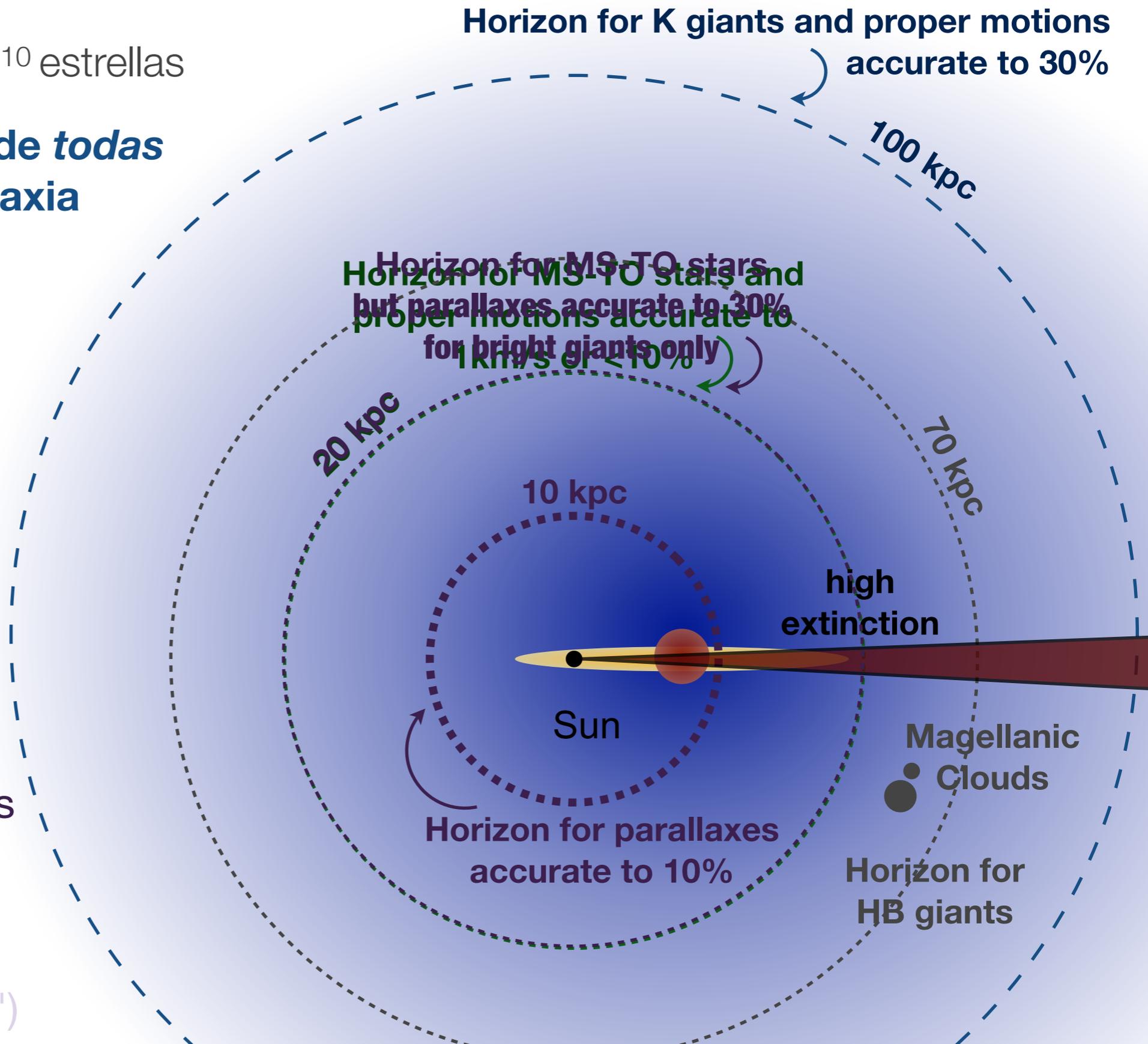
- La Vía Láctea tiene $\sim 10^{10}$ estrellas

- **Gaia observará >1% de todas las estrellas en la Galaxia**

- El volumen cubierto **depende del tipo de estrella que se use** (trazador)

- **Paralajes trigonométricos** con precisión del 30% **hasta ~20 kpc** (para estrellas brillantes)

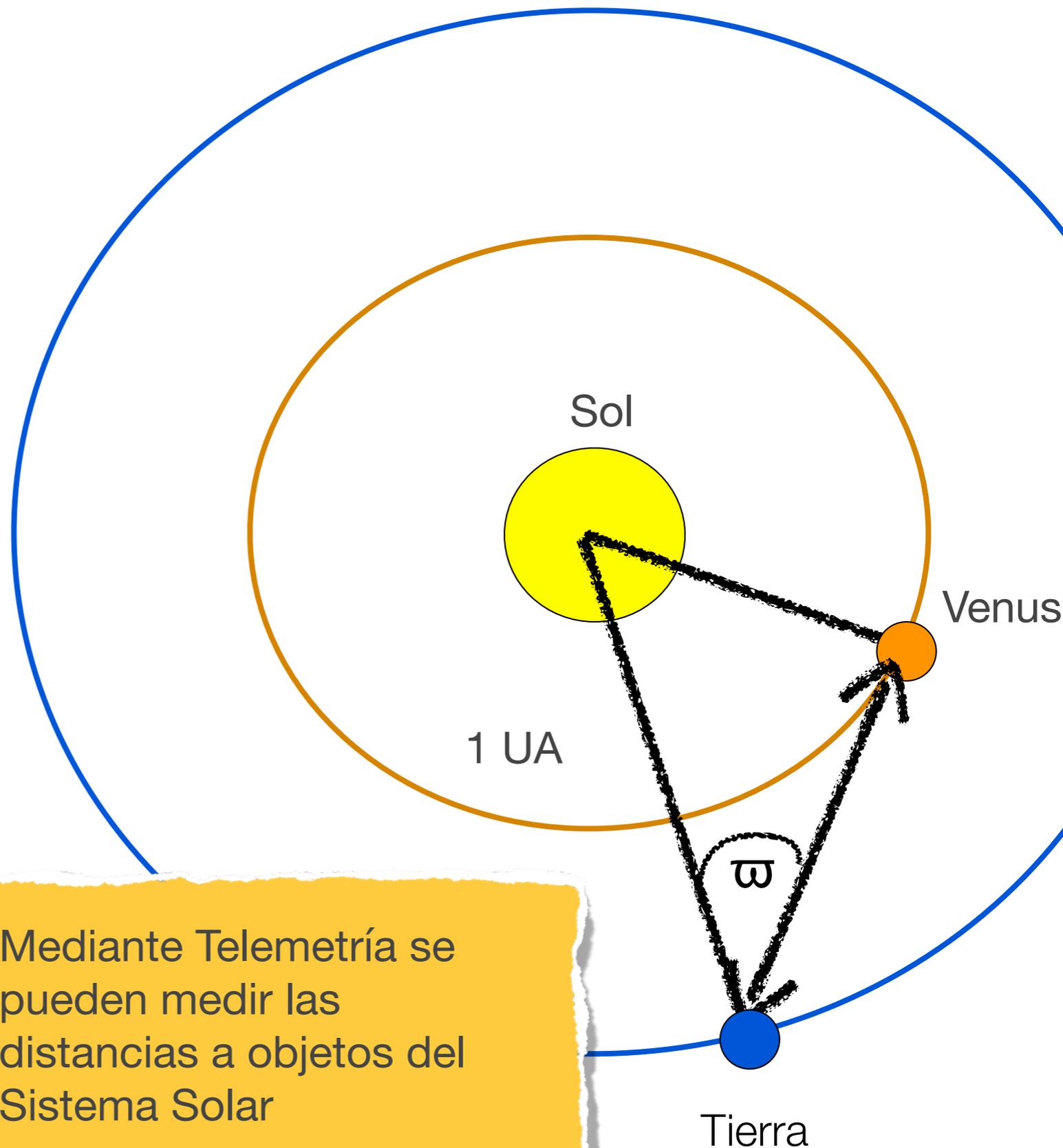
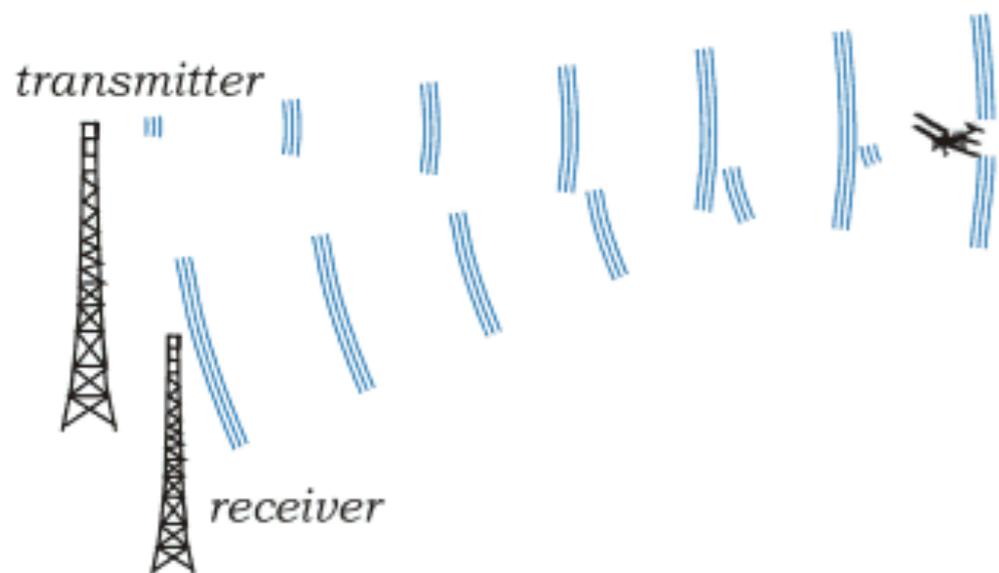
- Para distancias mayores necesitamos usar distancias fotométricas (también llamados "paralajes fotométricos")



1º Peldaño: Telemetría

En un instante de tiempo:

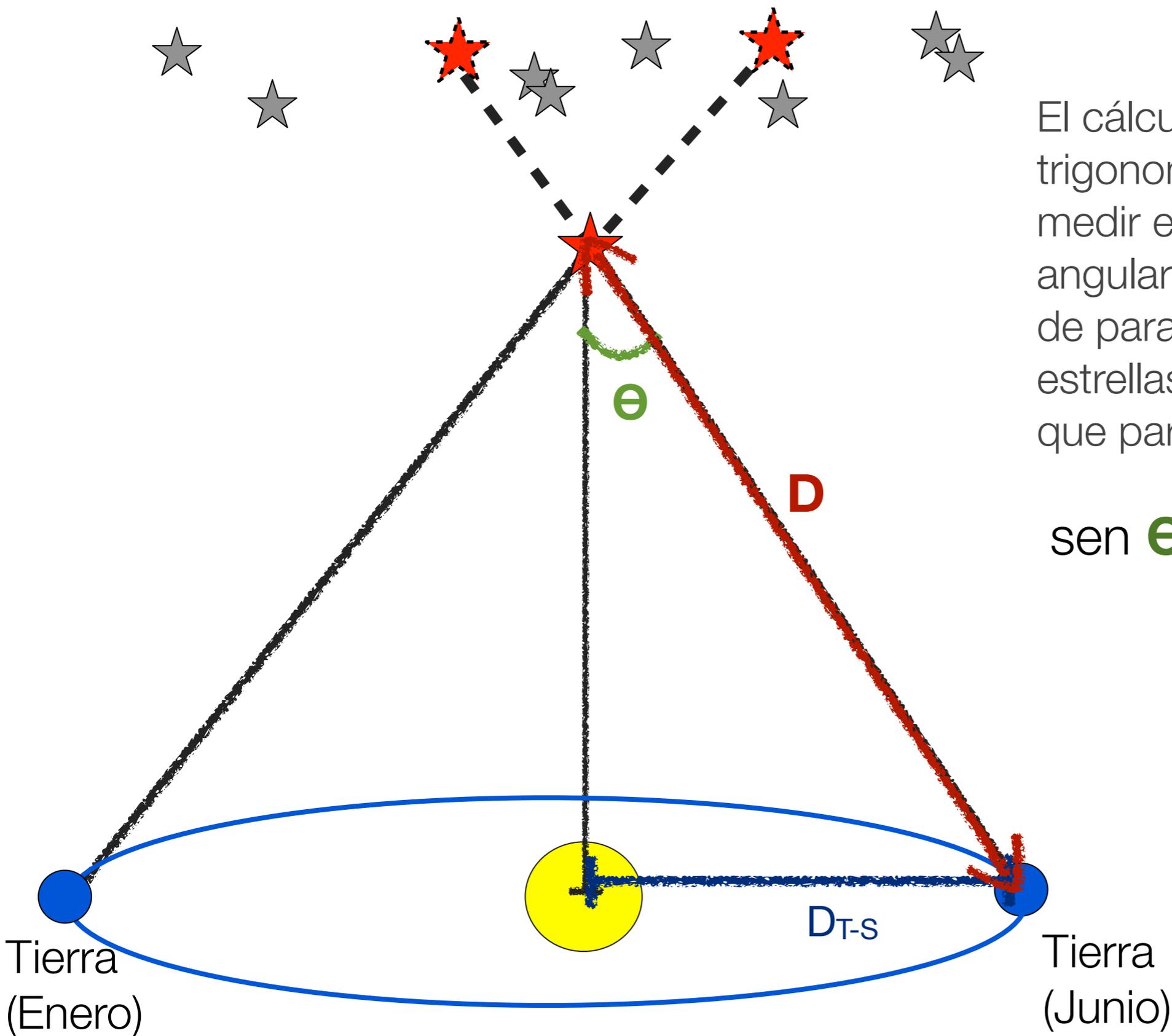
- Se mide la distancia a Venus en cuadratura a partir de la demora en el rebote de una señal de radar ($d=ct$)
- Se mide la elongación ϖ entre Venus y el Sol en ese momento
- Resolviendo este triángulo se calcula el valor de la Unidad Astronómica (UA)



Mediante Telemetría se pueden medir las distancias a objetos del Sistema Solar

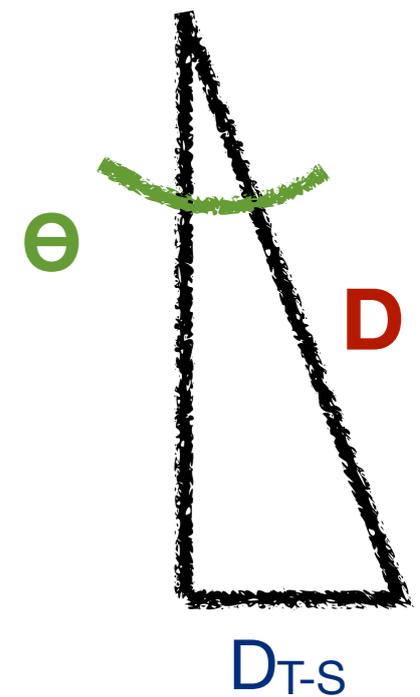
Útil hasta ~50 UA

2º Peldaño: Paralaje Trigonométrica



El cálculo de paralajes trigonométricos consiste en medir el cambio de posición angular de una estrella (ángulo de paralaje θ), respecto de estrellas u objetos más lejanos, que parecen fijos

$$\text{sen } \theta \sim \theta = D_{T-S} / D$$

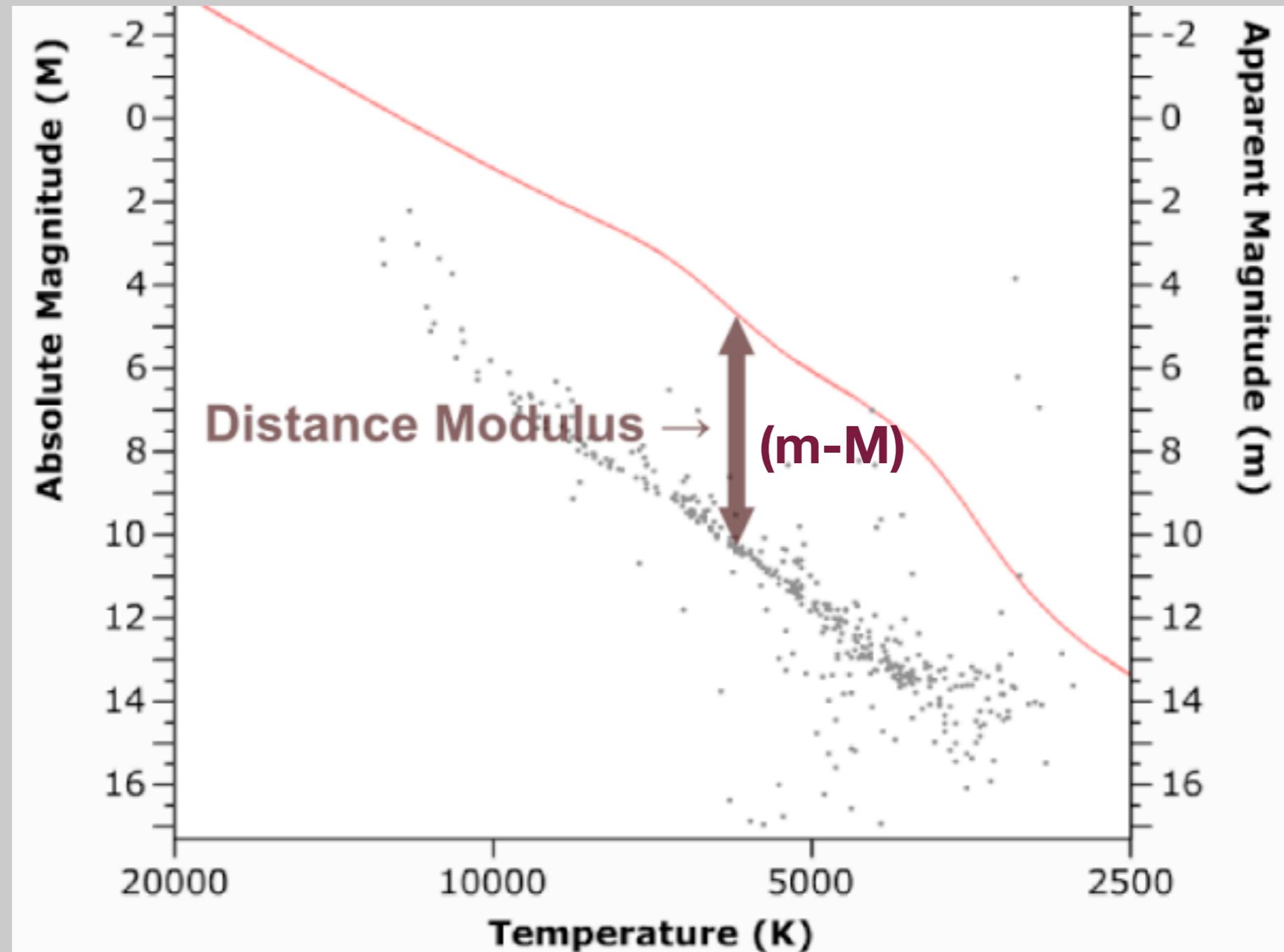


Ajuste de Secuencia Principal

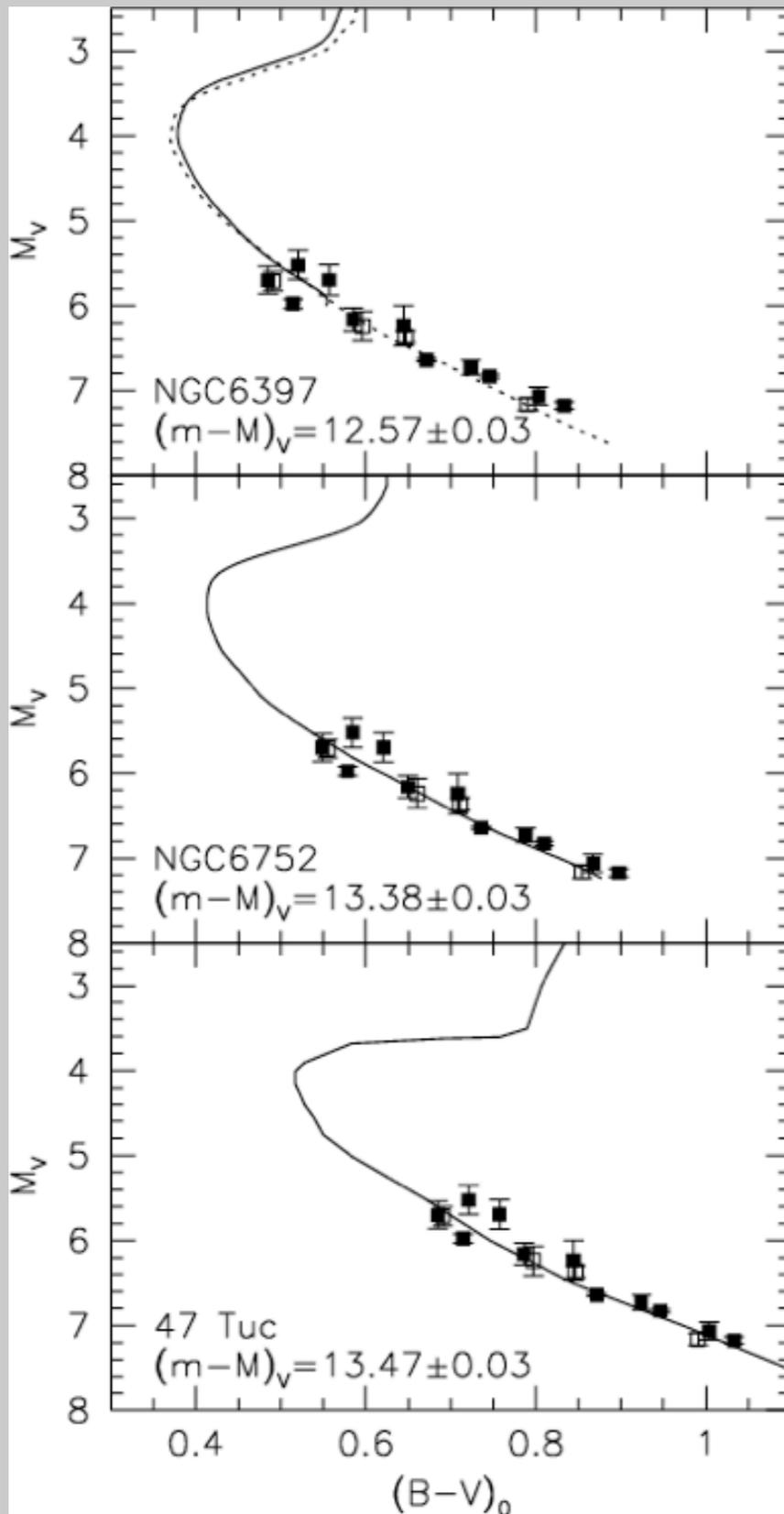
Ajustando la secuencia principal en el Diagrama Color-Magnitud, se calcula el módulo de distancia ($m-M$) a un cúmulo

Una vez conocido el módulo de distancia ($m-M$) se calcula la distancia d mediante la Ec. de Pogson

$$(m-M) = 5 \log(d(\text{pc})) - 5$$



Ajuste de Secuencia Principal



Módulos de distancia a diversos cúmulos galácticos, calculados mediante ajuste de Secuencia Principal

¿A qué distancia se encuentra NGC6397?

$$(m-M) = 5 \log(d) - 5$$

para NGC3697 tenemos $(m-M) = 12.57$

$$d = 3265 \text{ pc} = 3.27 \text{ kpc}$$

3º Peldaño: Cefeidas y RR Lyrae

- En general, las variables pulsantes siguen una **relación Período-Luminosidad** (diferente para cada tipo de variable)

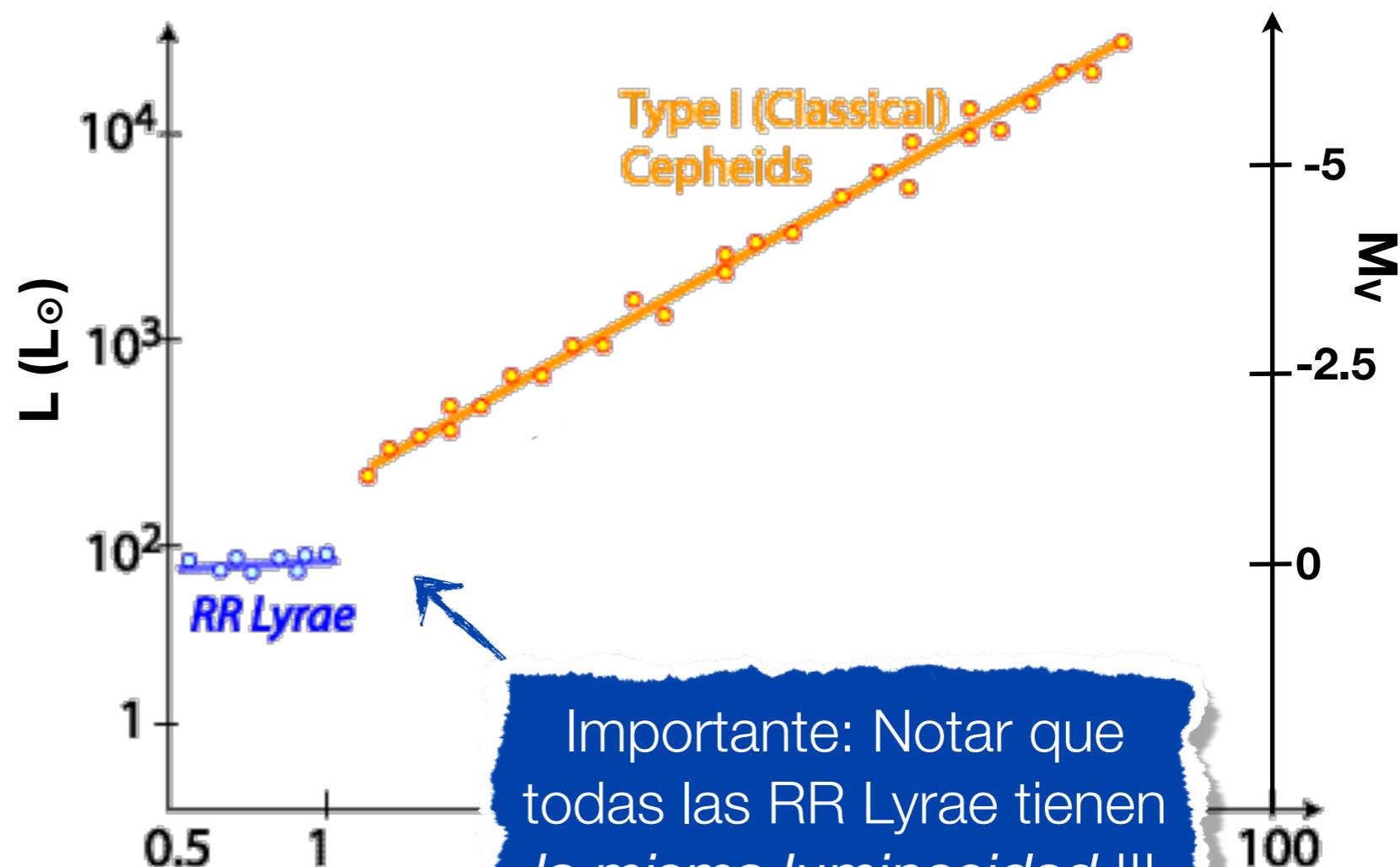
- La Relación P-L en Cefeidas fue **descubierta por Henrietta Swann-Leavitt (1908)** observando Cefeidas en las Nubes de Magallanes

Dada la magnitud absoluta M , calculada a partir del período y la relación P-L, y magnitud la aparente m (observada), podemos calcular d mediante la Ec. de Pogson:

$$(m-M) = 5 \log(d(\text{pc})) + 5$$

$$M = a \log P + b$$

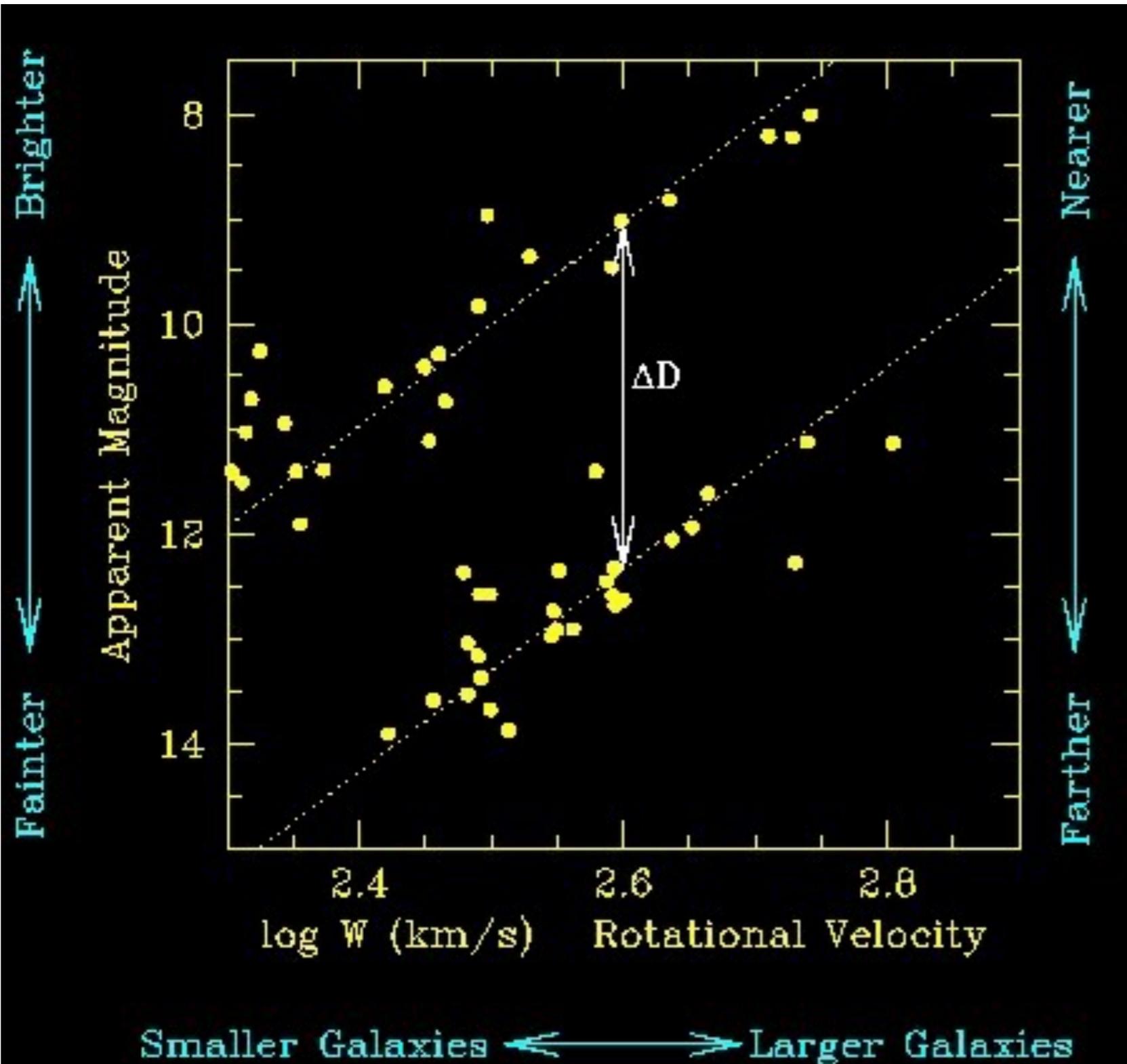
PERIOD - LUMINOSITY RELATIONSHIP



Nota: aunque se llama Período-Luminosidad, la ecuación solemos expresarla en términos de la mag absoluta, porque la relación es logarítmica en L y en P

4º Peldaño:

Las Relaciones de Tully-Fisher y Faber-Jackson



La relación de Tully-Fisher relaciona la velocidad de rotación con la Luminosidad, *para galaxias espirales*

$$L \propto v^4$$

La relación de Faber-Jackson *relaciona en galaxias elípticas* la dispersión de velocidades σ_0 con L, según

$$L_e \sim \sigma_0^4$$

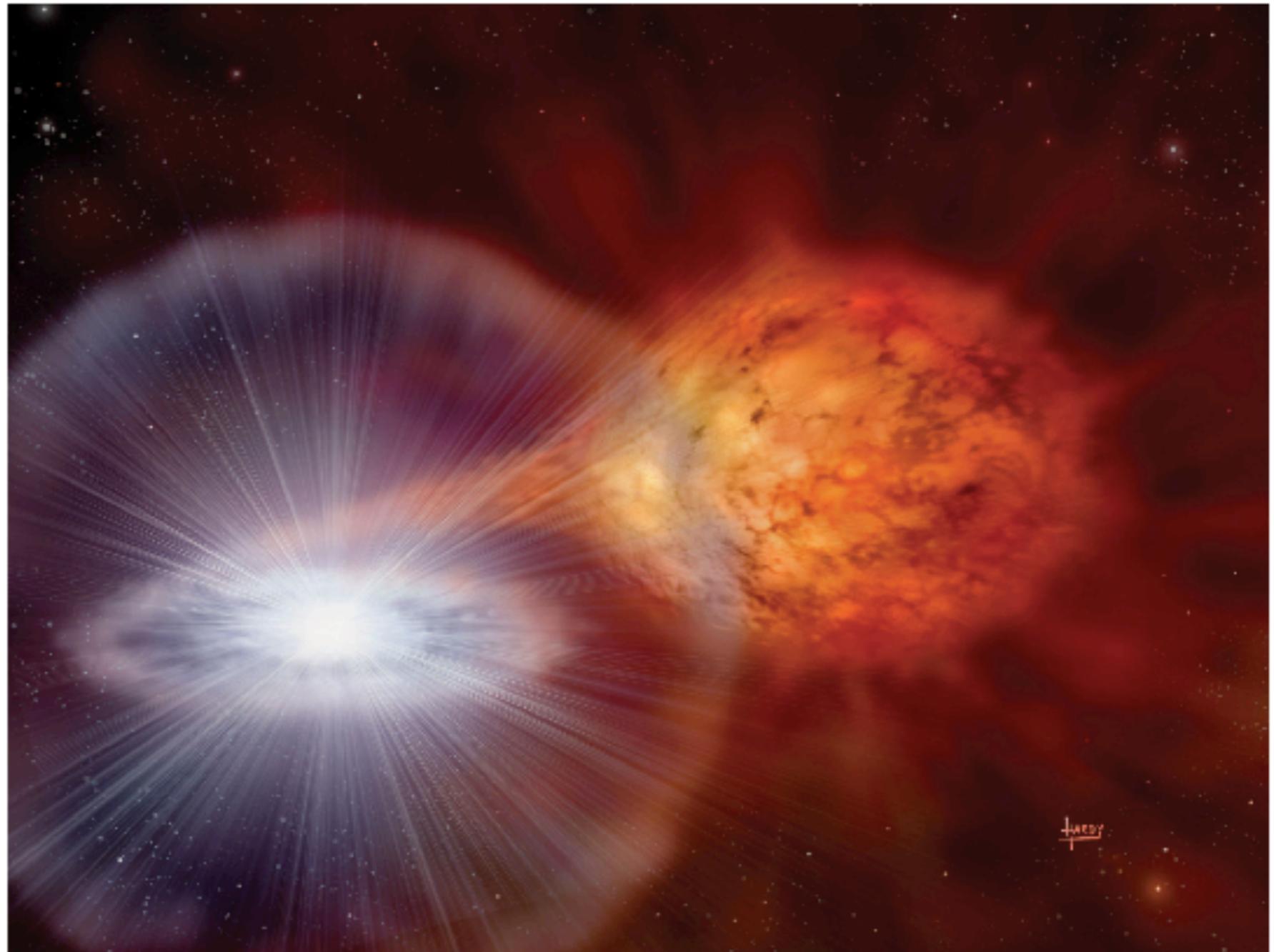
5º Peldaño: Supernovas Tipo Ia

El progenitor de una SN Ia es un sistema binario compuesto por una enana blanca y una estrella gigante

La estrella gigante evoluciona aumentando su radio hasta que comienza a transferir masa a la enana blanca

Al llegar a una masa crítica $M_{CH}=1.4M_{sol}$ la enana blanca explota

Las SN Ia se observan en galaxias de todo tipo (elípticas, espirales ...)

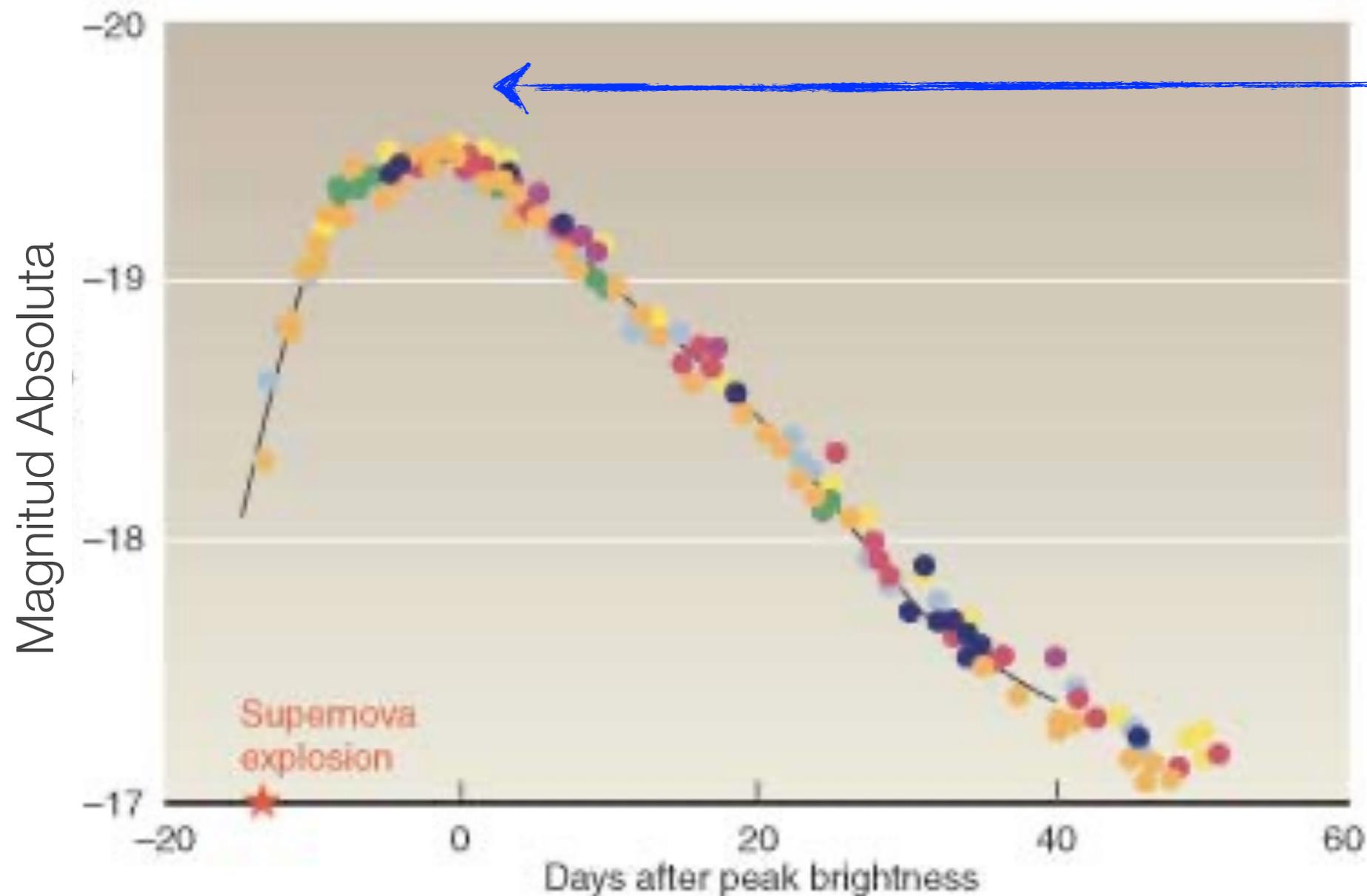


Artist's rendition of a white dwarf accumulating mass from a nearby companion star. This type of progenitor system would be considered singly-degenerate.

Image courtesy of David A. Hardy, © David A. Hardy/www.astroart.org.

6º Peldaño: Supernovas Tipo Ia

Curvas de luz de supernovas tipo Ia



Magnitud en el máximo es aproximadamente el mismo para todas las SNIa !!! (luego de un proceso de estandarización)

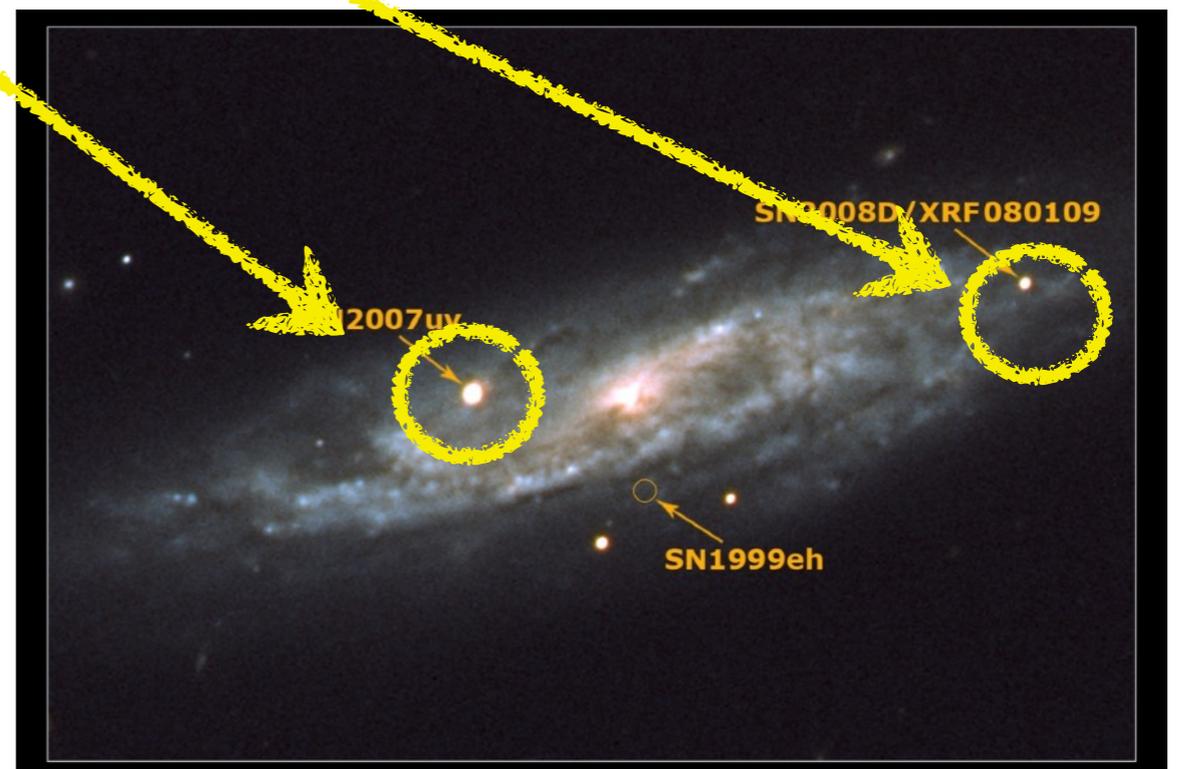
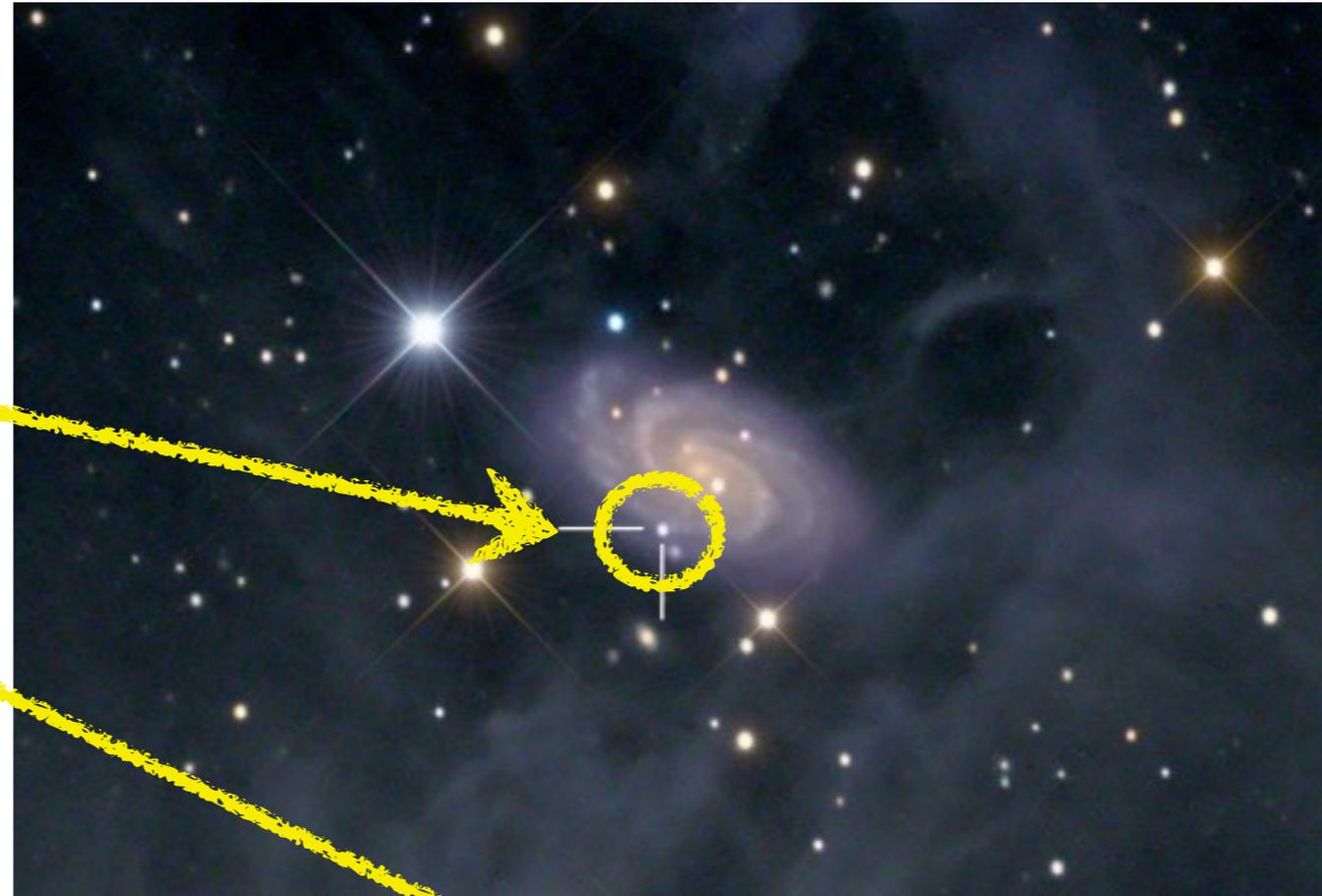
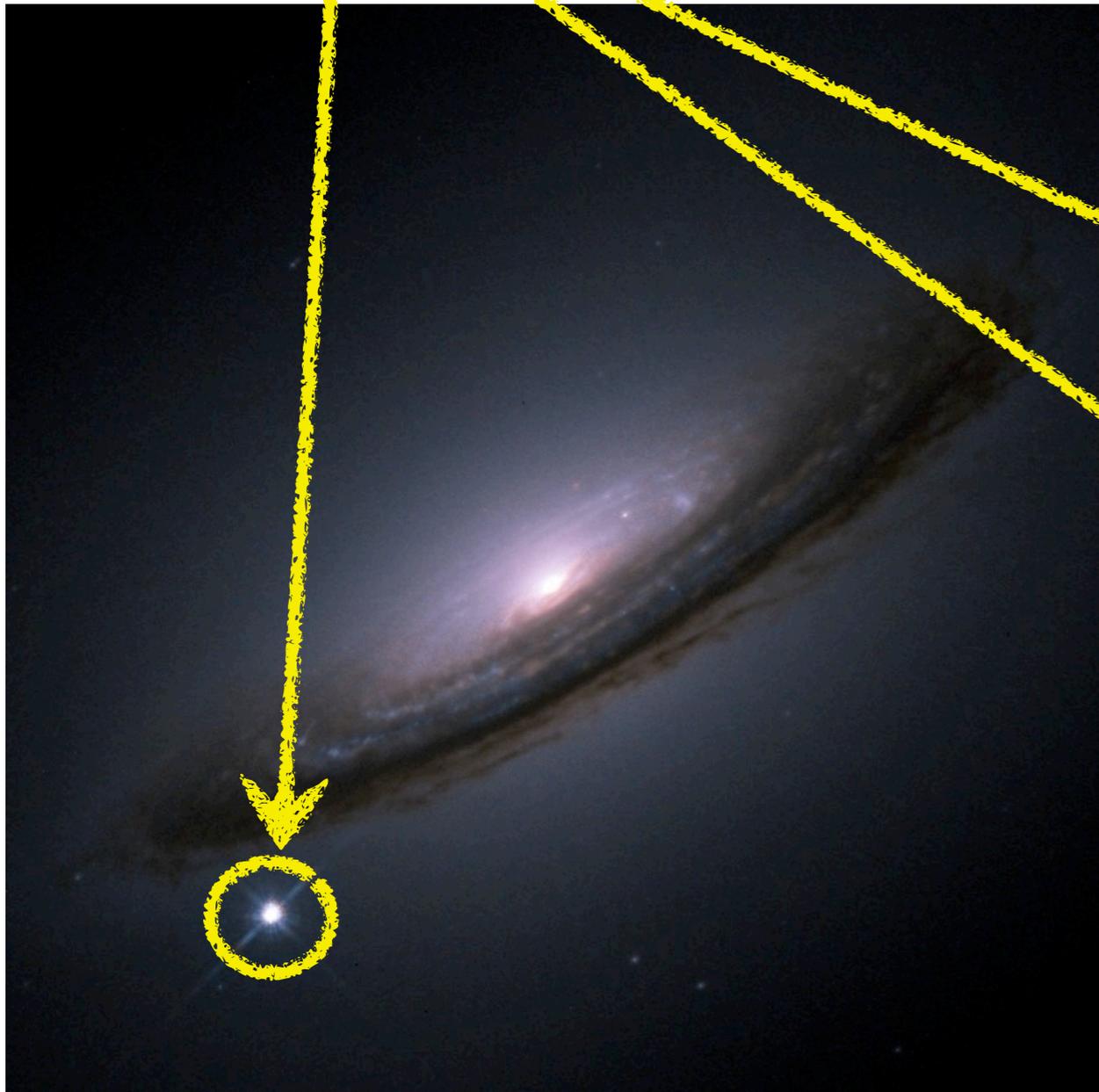
esto es consecuencia de que la masa crítica $M_{CH}=1.4M_{sol}$ es fija

Suponiendo $M_v=-19.5$, ¿hasta qué distancia se puede observar una SNIa con un instrumento cuya magnitud límite es $m_{lim}=20$?

Comparar con la distancia hasta la cual se puede observar una RR Lyrae

6º Peldaño: Supernovas Tipo Ia

Supernovas observadas en galaxias cercanas



El Universo Local

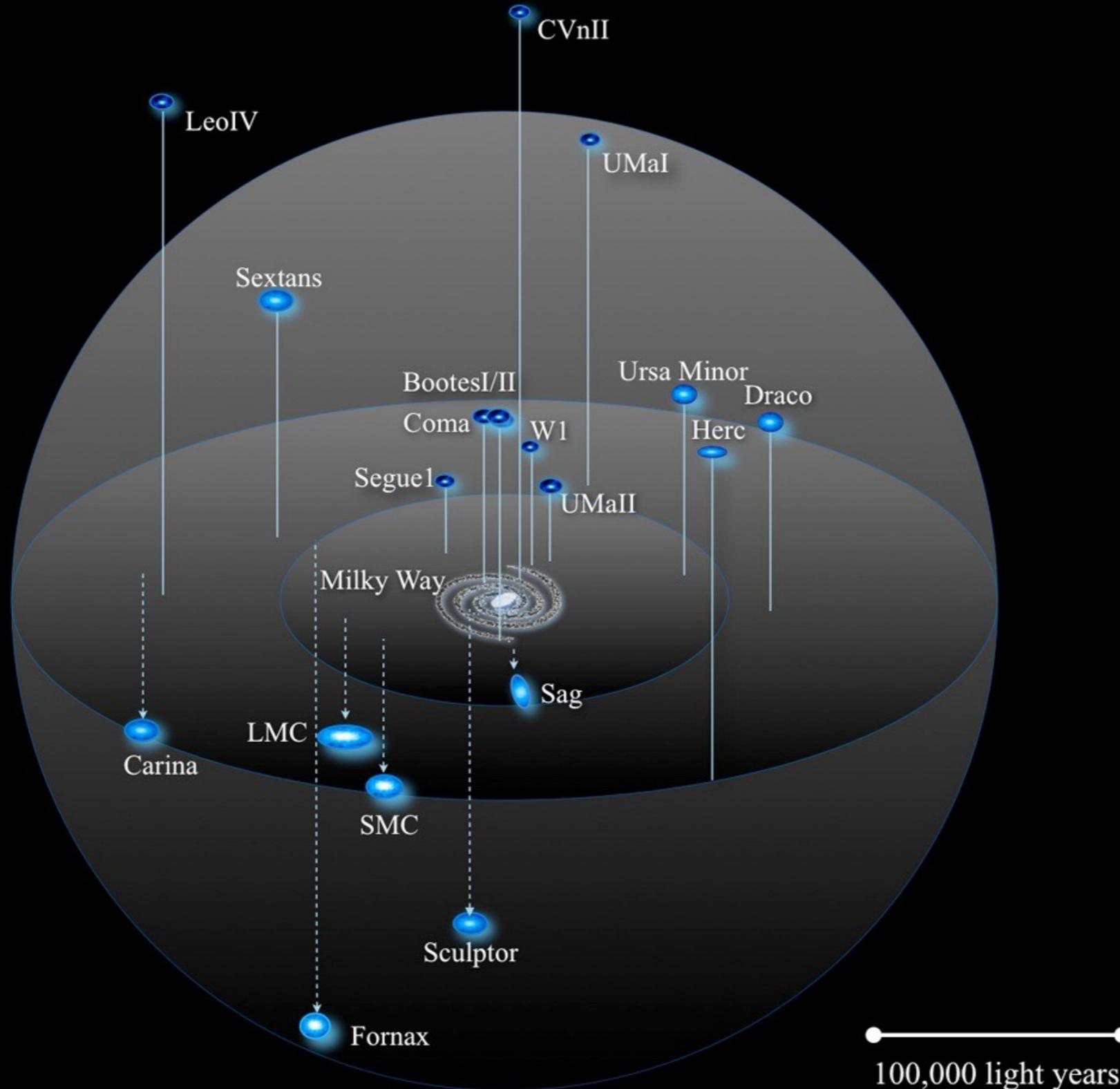
EL GRUPO LOCAL

M31 M33

VÍA LÁCTEA



LA VECINDAD DE LA VÍA LÁCTEA



El censo de galaxias enanas satélite de la Vía Láctea cambia todos los años. Actualmente se conocen ~60 satélites (las 12 clásicas + las ultra-débiles)

CÚMULOS DE GALAXIAS: EL GRUPO LOCAL

La mayoría de las galaxias tienen compañeras, habiendo desde grupos pequeños hasta grupos muy grandes y masivos.

La Vía Láctea pertenece a un grupo **pequeño** que contiene:

3 galaxias espirales grandes (Vía Láctea, Andrómeda y M33)

~50 enanas conocidas, conocido como el **Grupo Local**. Actualmente se conocen ~34 enanas satélite de la Vía Láctea

No hay galaxias elípticas en el Grupo Local

Los cúmulos pueden tener desde unas pocas galaxias hasta varios miles de galaxias (cúmulos ricos)



GALAXIAS ESFEROIDALES ENANAS SATÉLITE DE LA VÍA LÁCTEA

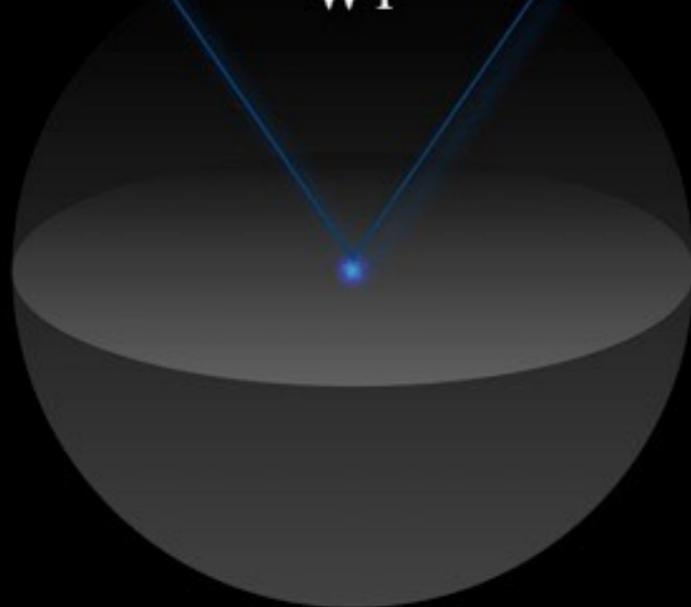
enanas ultra-débiles
(desde 2005)

$$L = 1000 L_{\text{sun}}$$

300 lt yrs



W1



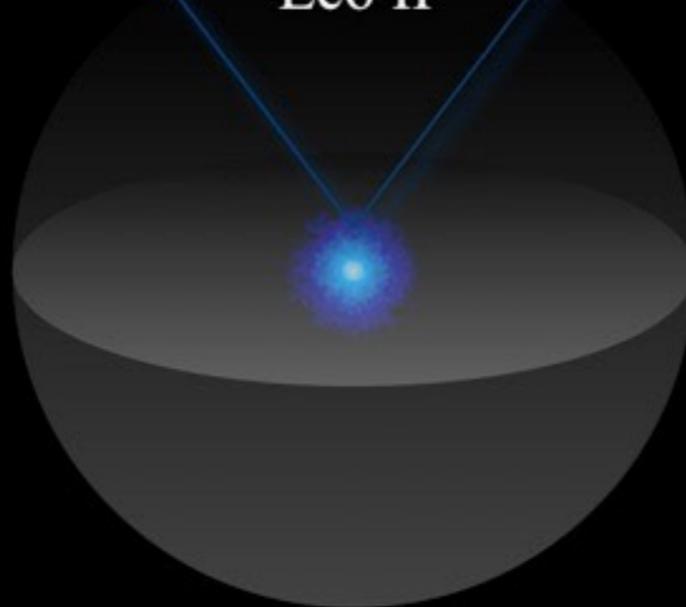
$$M = 10,000,000 M_{\text{sun}}$$

$$L = 500,000 L_{\text{sun}}$$

1500 lt yrs



Leo II



$$M = 10,000,000 M_{\text{sun}}$$

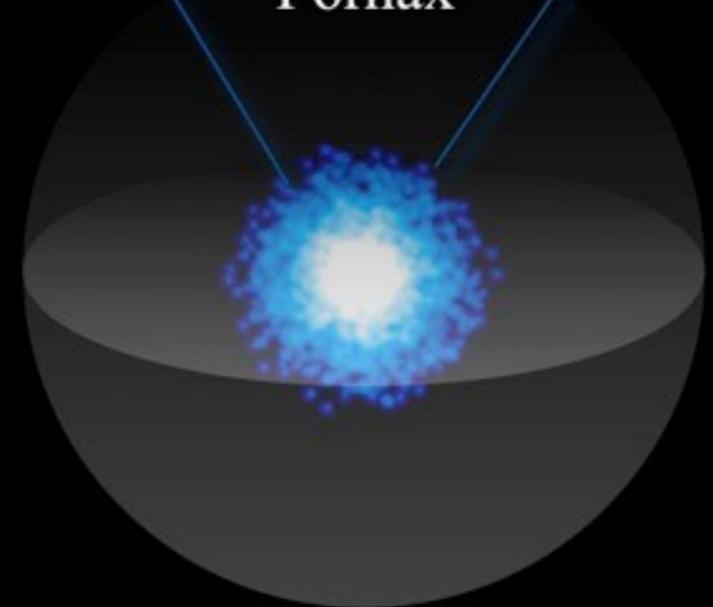
enanas "clásicas"

$$L = 10,000,000 L_{\text{sun}}$$

8000 lt yrs

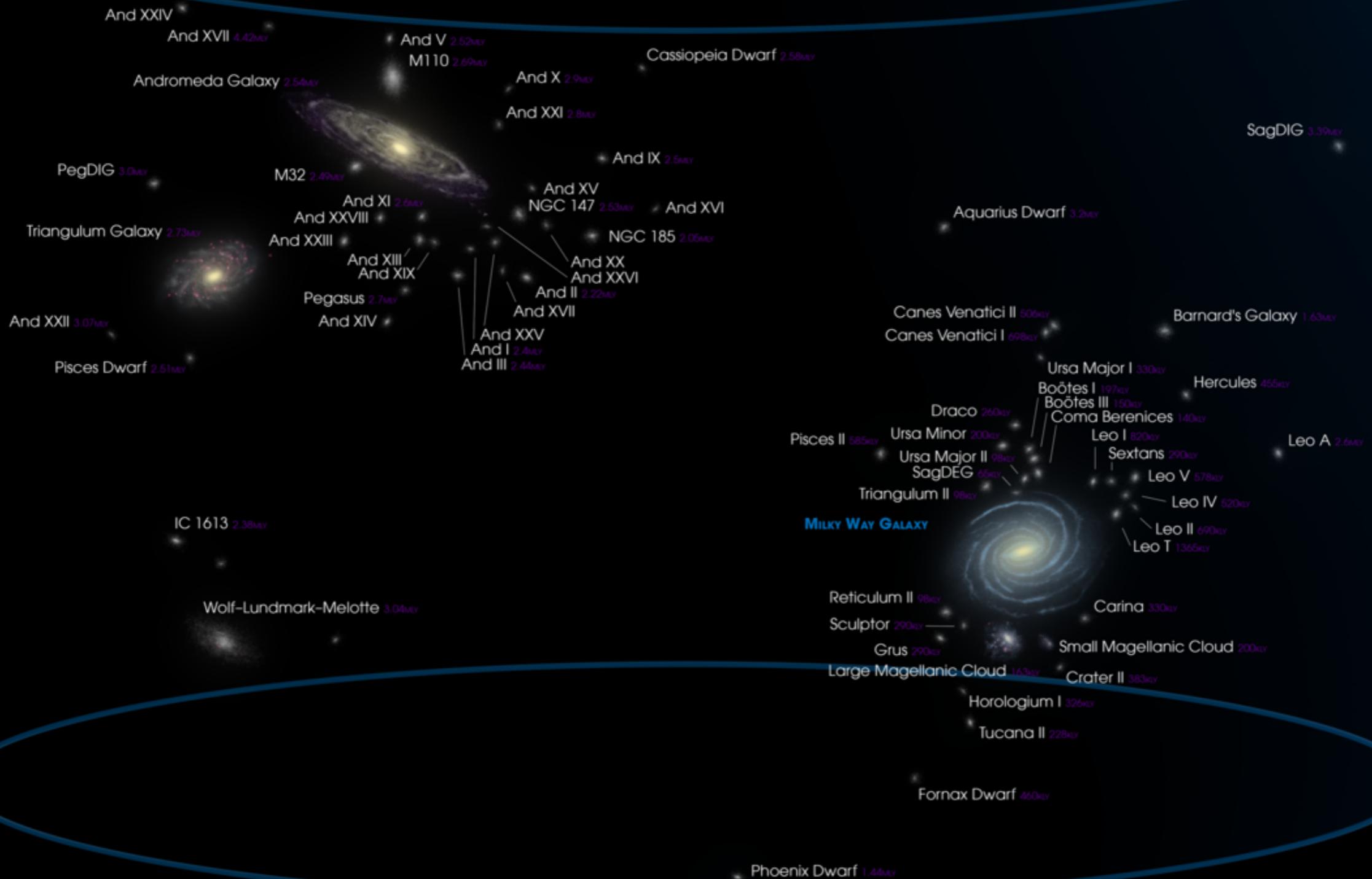


Fornax



$$M = 10,000,000 M_{\text{sun}}$$

LOCAL GROUP



CÚMULOS DE GALAXIAS

Los cúmulos pueden ser:

POBRES (grupos):

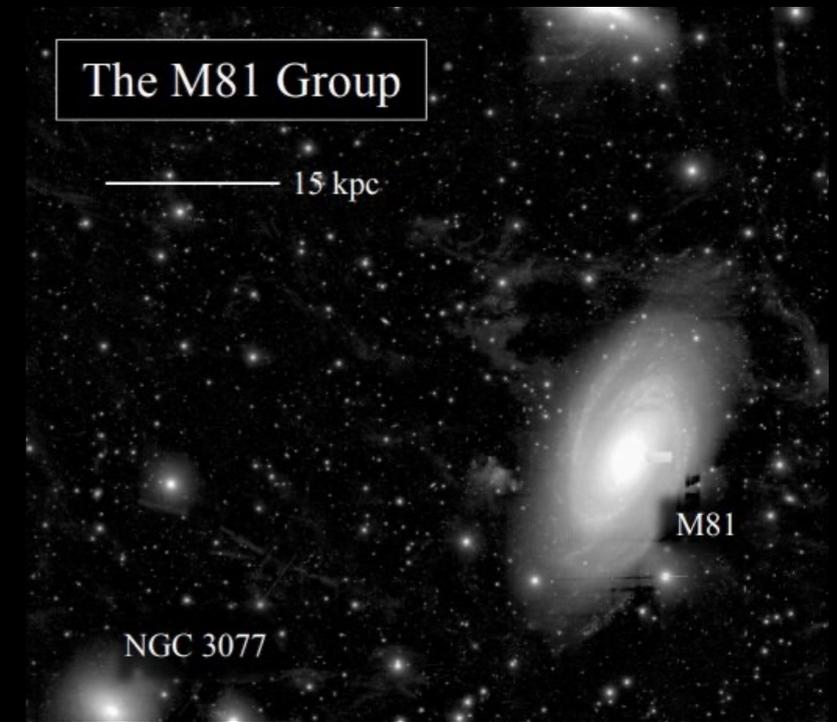
- Unas pocas decenas de galaxias
- Radios $\sim 1\text{Mpc}$

RICOS

- Hasta ~ 4000 galaxias
- Radios $\sim 3\text{Mpc}$



Cúmulo de Hércules

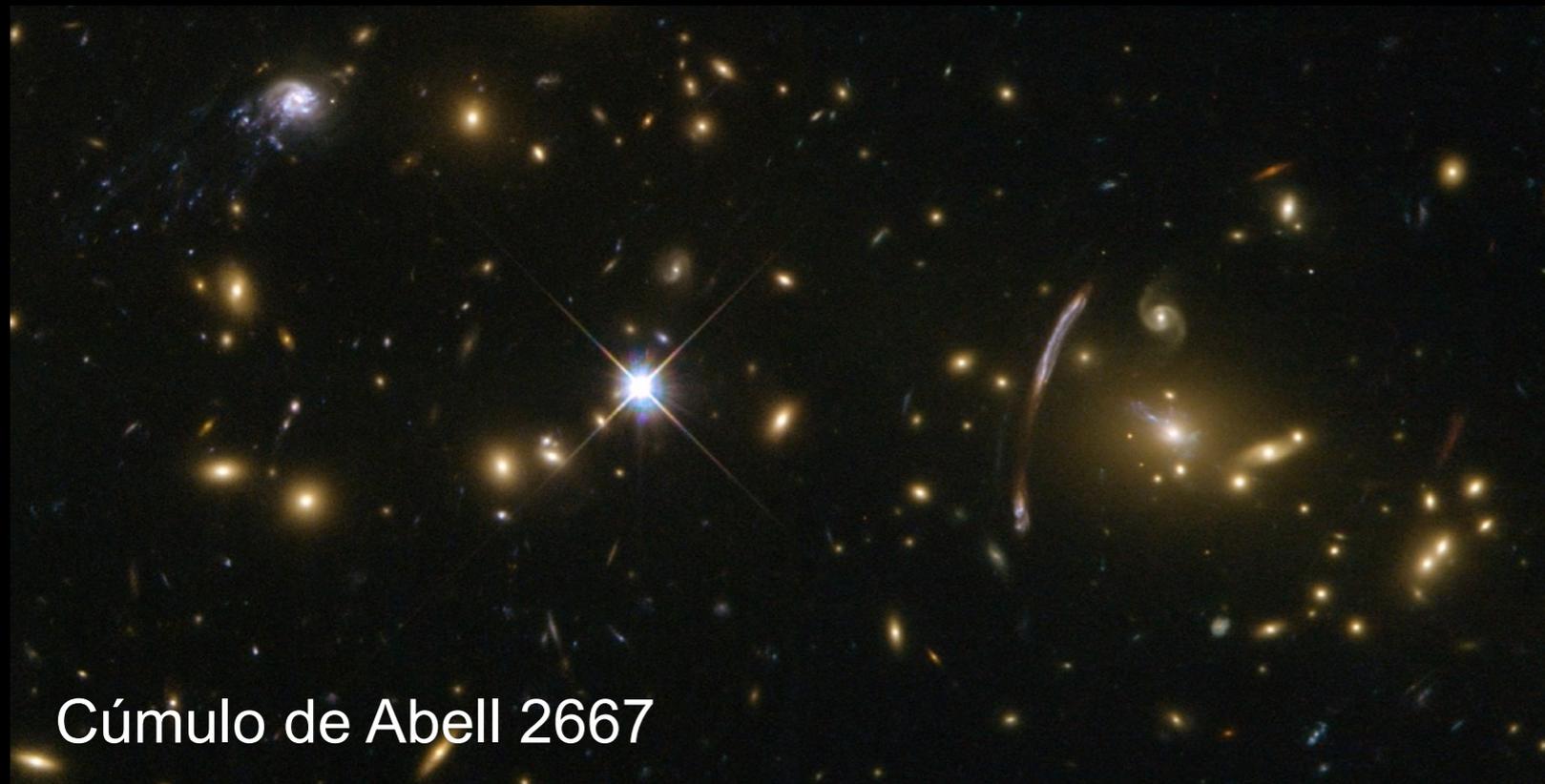


The M81 Group

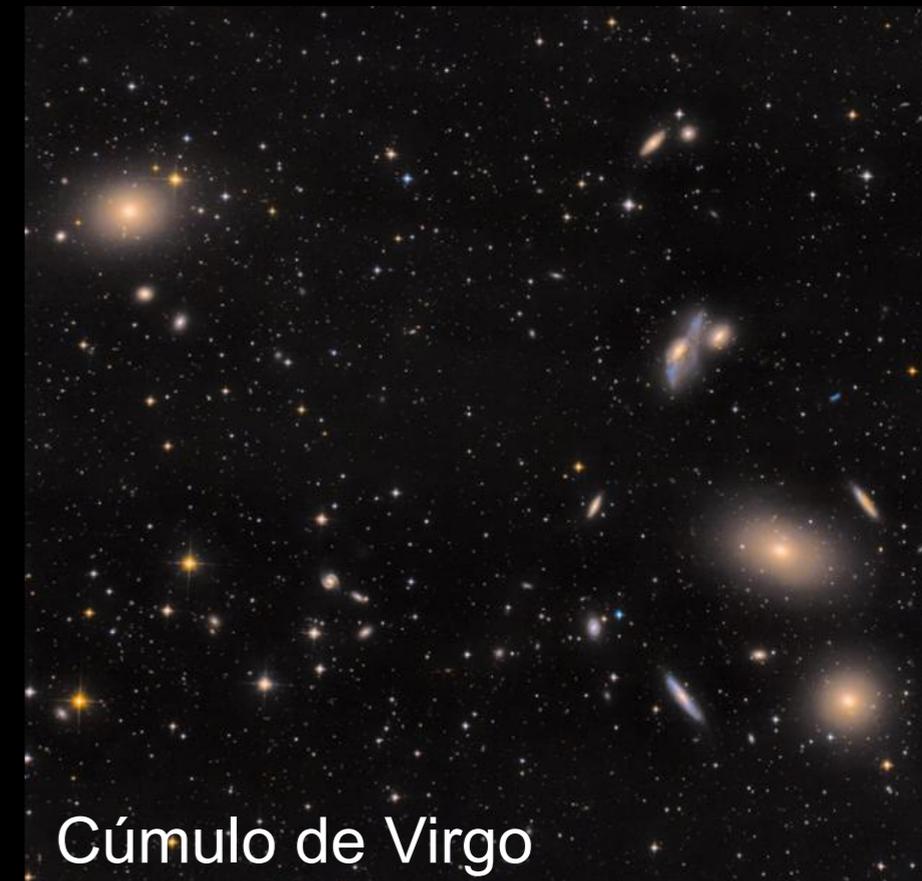
15 kpc

M81

NGC 3077



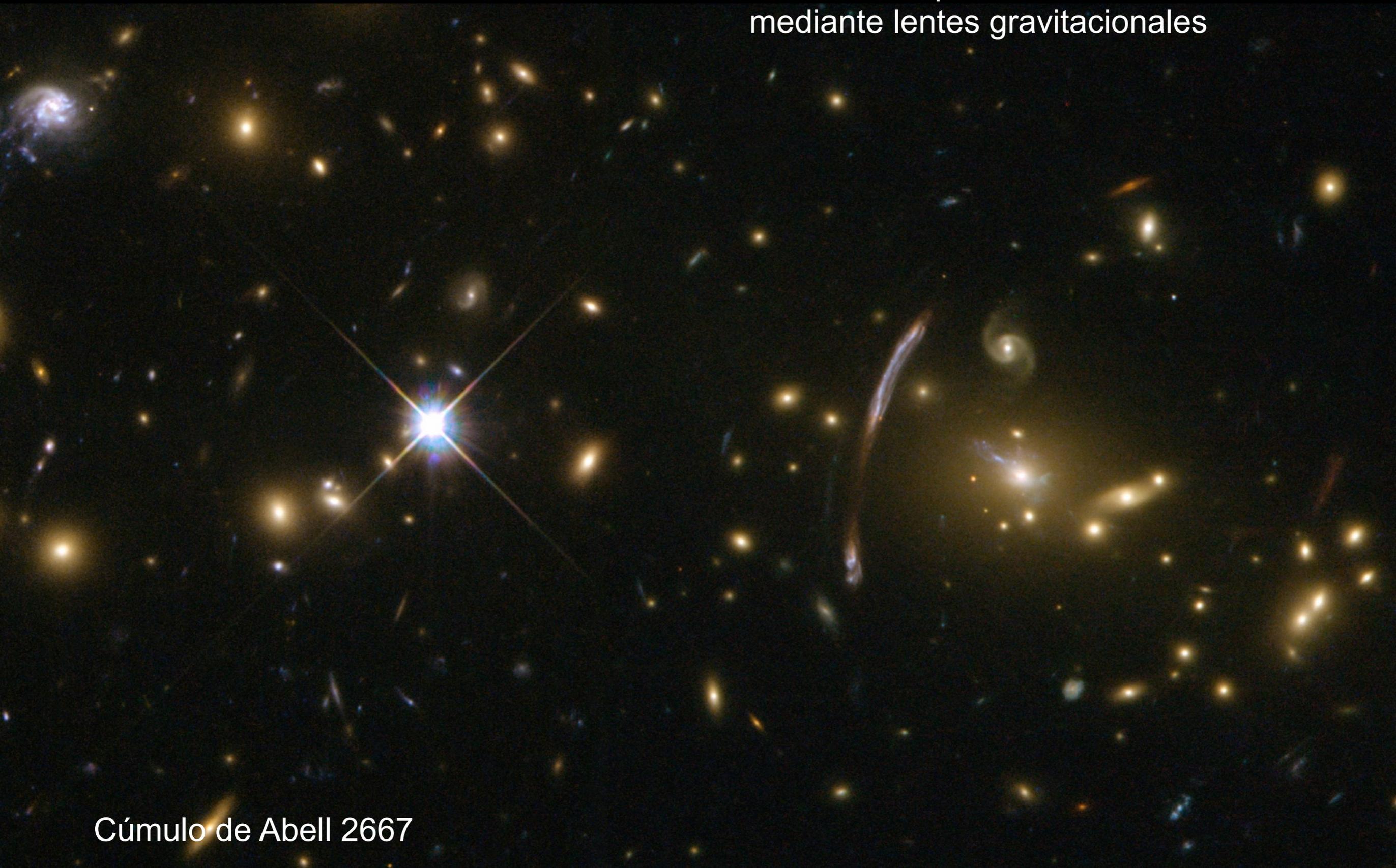
Cúmulo de Abell 2667



Cúmulo de Virgo

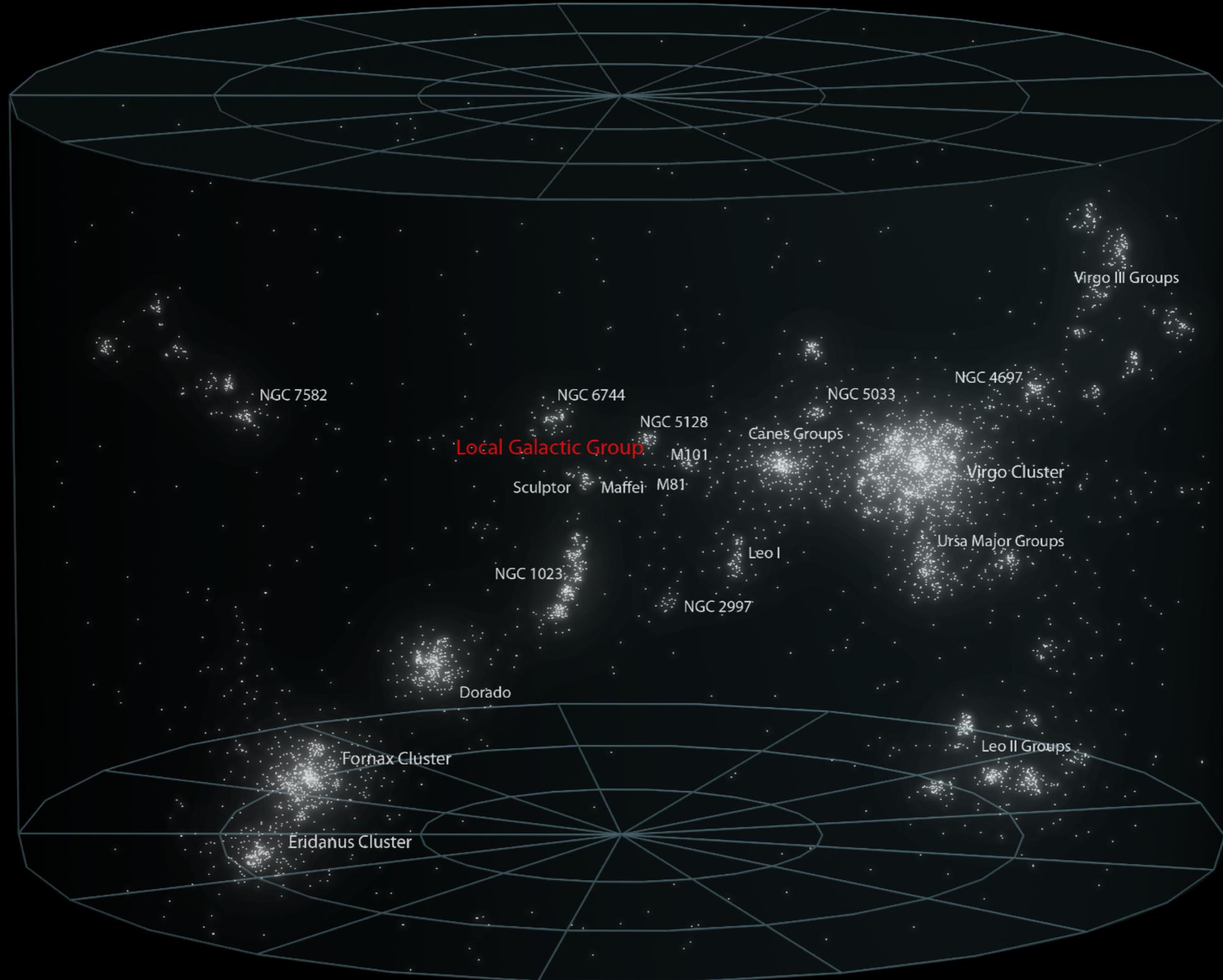
CÚMULOS DE GALAXIAS

Medición de perfil de materia oscura
mediante lentes gravitacionales



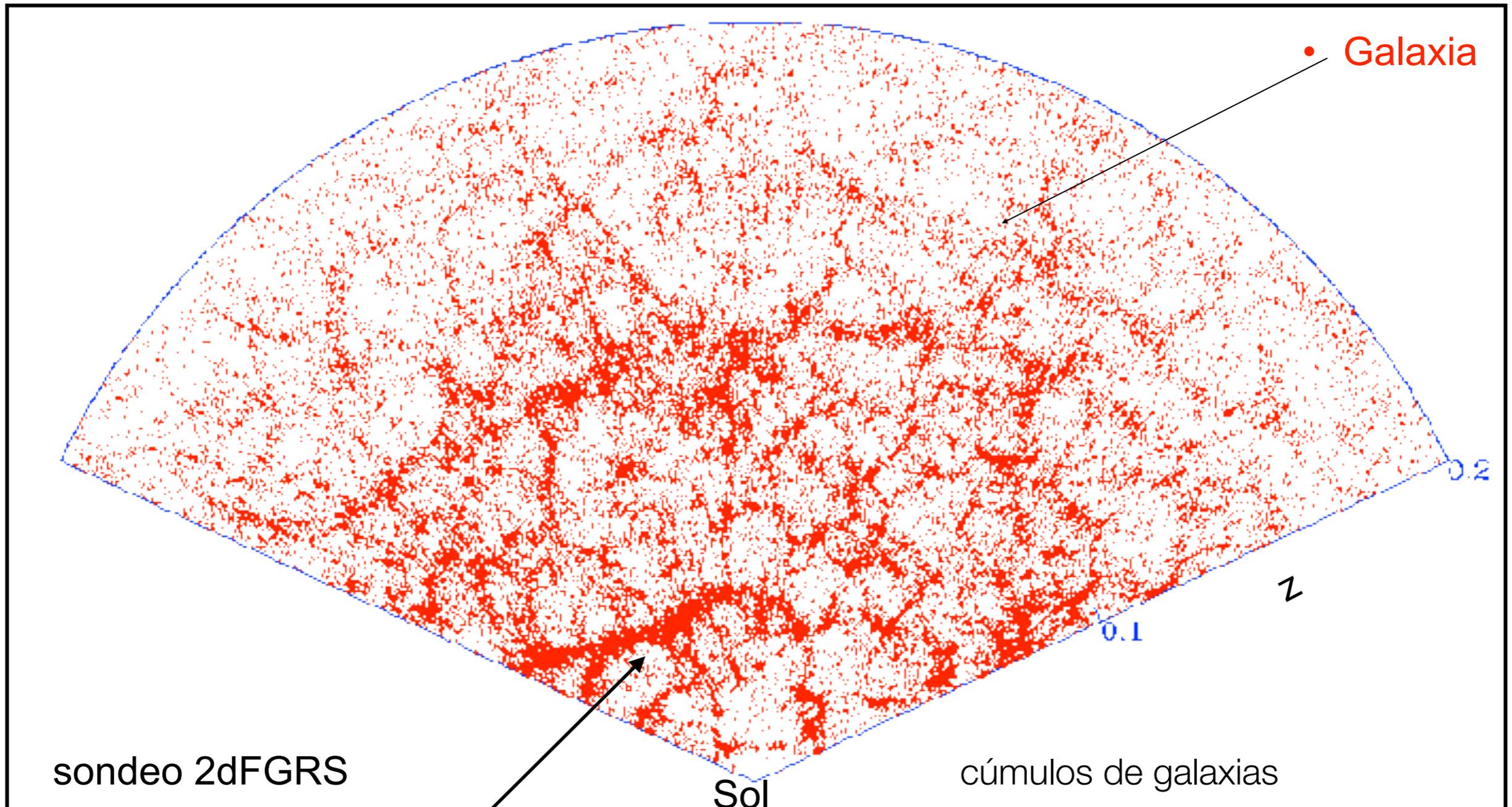
Cúmulo de Abell 2667

VIRGO SUPERCLUSTER



Estructura a Gran Escala

Estructura a Gran Escala (LSS=Large Scale Structure)



Filamentos

La Estructura a Gran Escala es filamentaria
los cúmulos se distribuyen en zonas de alta densidad
a lo largo de filamentos y zonas de baja
densidad llamadas vacíos (voids)

Cosmología: del Universo temprano (lejano) al
Universo actual ($z \sim 0$)

RECORDANDO: EL CORRIMIENTO AL ROJO (REDSHIFT)

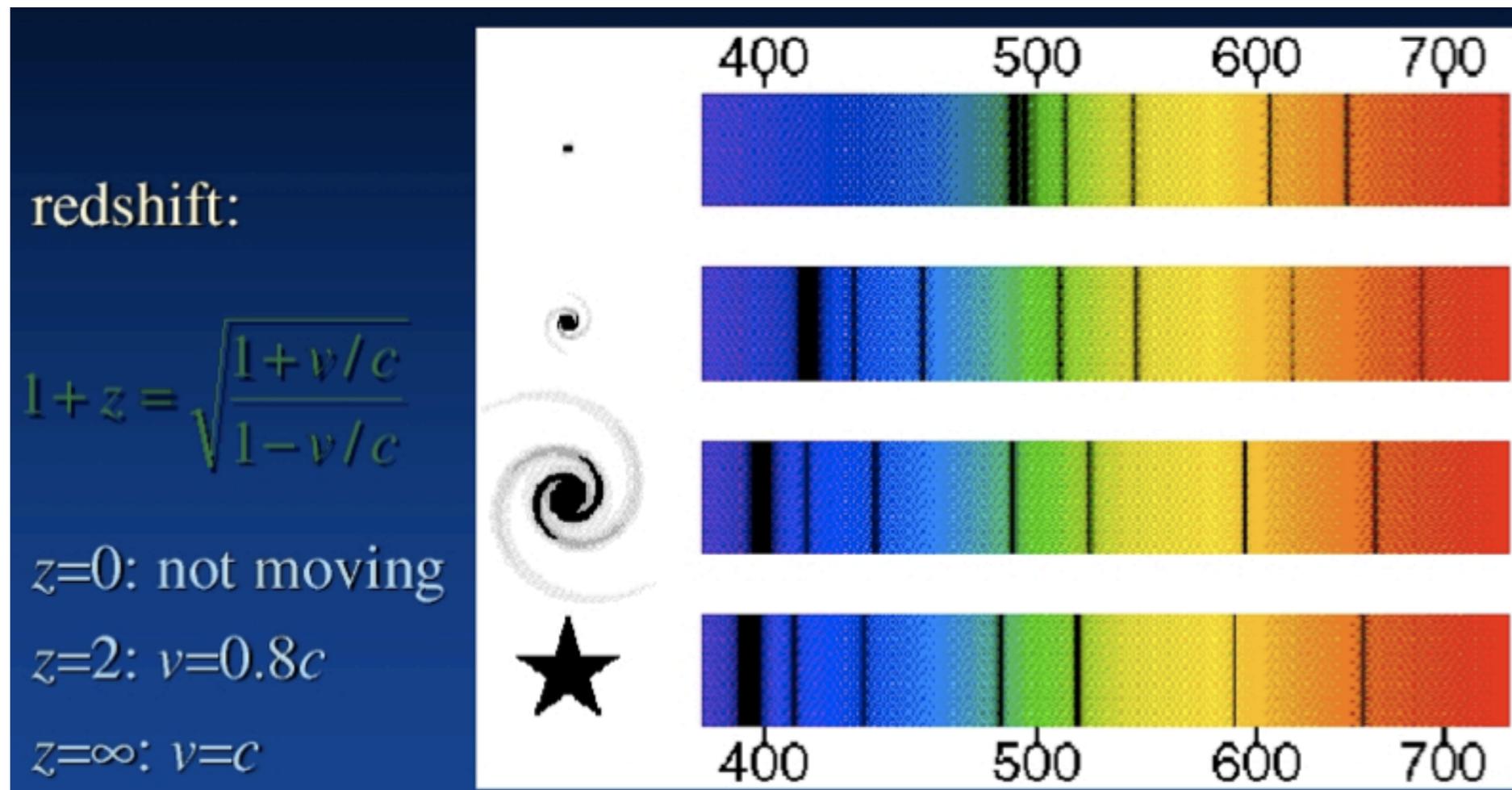
El corrimiento al rojo z se define como

$$z = \frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{\lambda_{obs} - \lambda_{reposo}}{\lambda_{reposo}}$$

La expresión clásica que relaciona z con la velocidad radial:

$$z = \frac{v_r}{c}$$

La expresión relativista es la más general y está dada por:
$$z = \frac{1 + v_r/c}{\sqrt{1 - v_r^2/c^2}} - 1$$



Ley de Hubble

En 1931 E. Hubble y M. Humason publicaron los resultados de un sondeo de galaxias externas, para las cuales midieron la distancia (utilizando Cefeidas) y velocidad (mediante efecto Doppler) con respecto al Sol y obtuvieron que las galaxias más distantes, se alejan del Sol con una velocidad mayor.

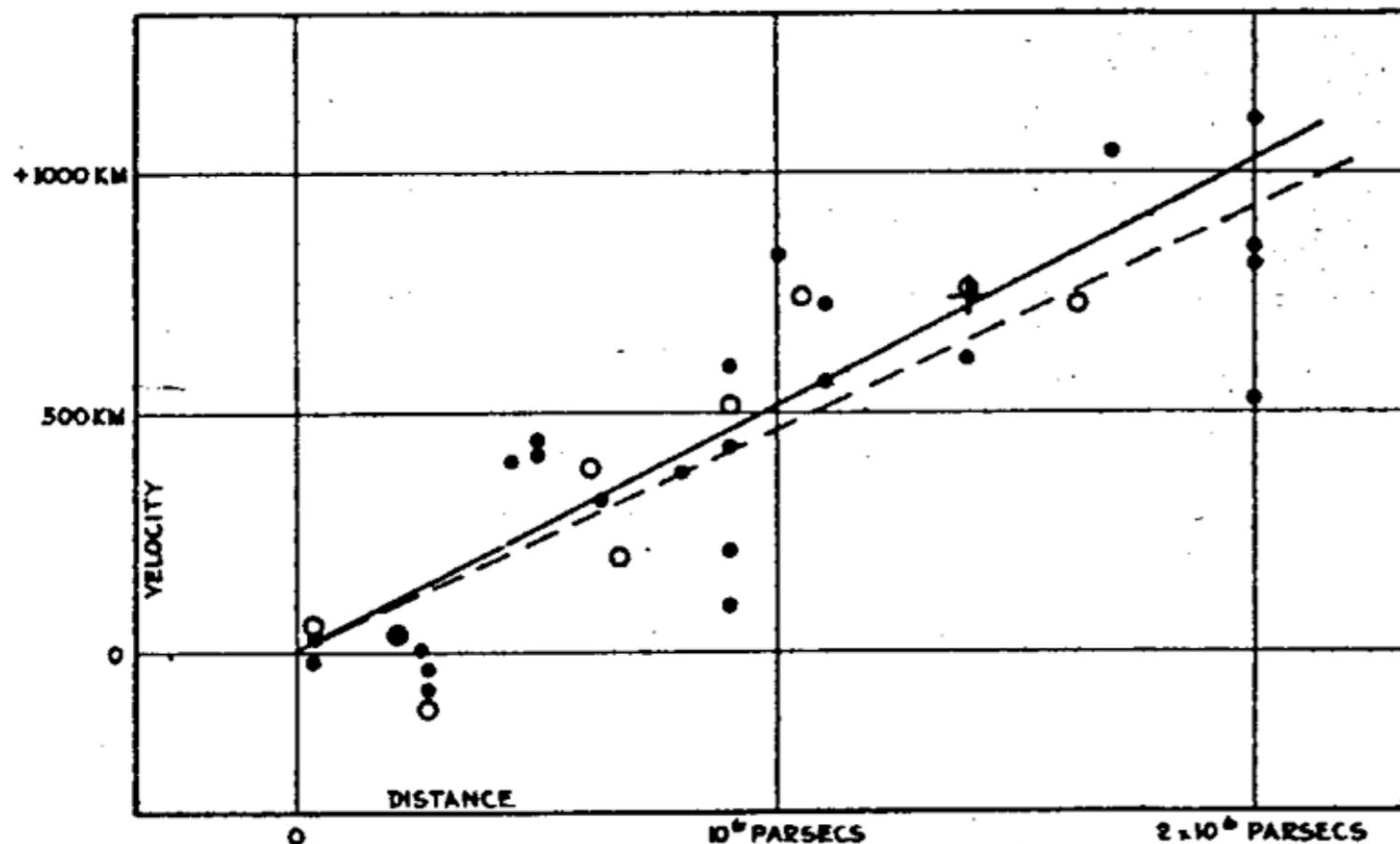


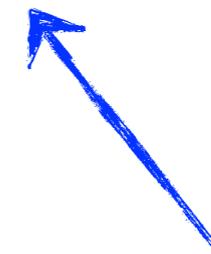
GRÁFICO ORIGINAL

FIGURE 1

La relación que obtuvieron entre la velocidad de recesión V y la distancia d es lineal

Ley de Hubble-Lemaître

$$v = H_0 D$$



Cte de Hubble

¿Cómo se interpreta?

EXPANSIÓN DEL UNIVERSO



Vista desde galaxia A

EXPANSIÓN DEL UNIVERSO

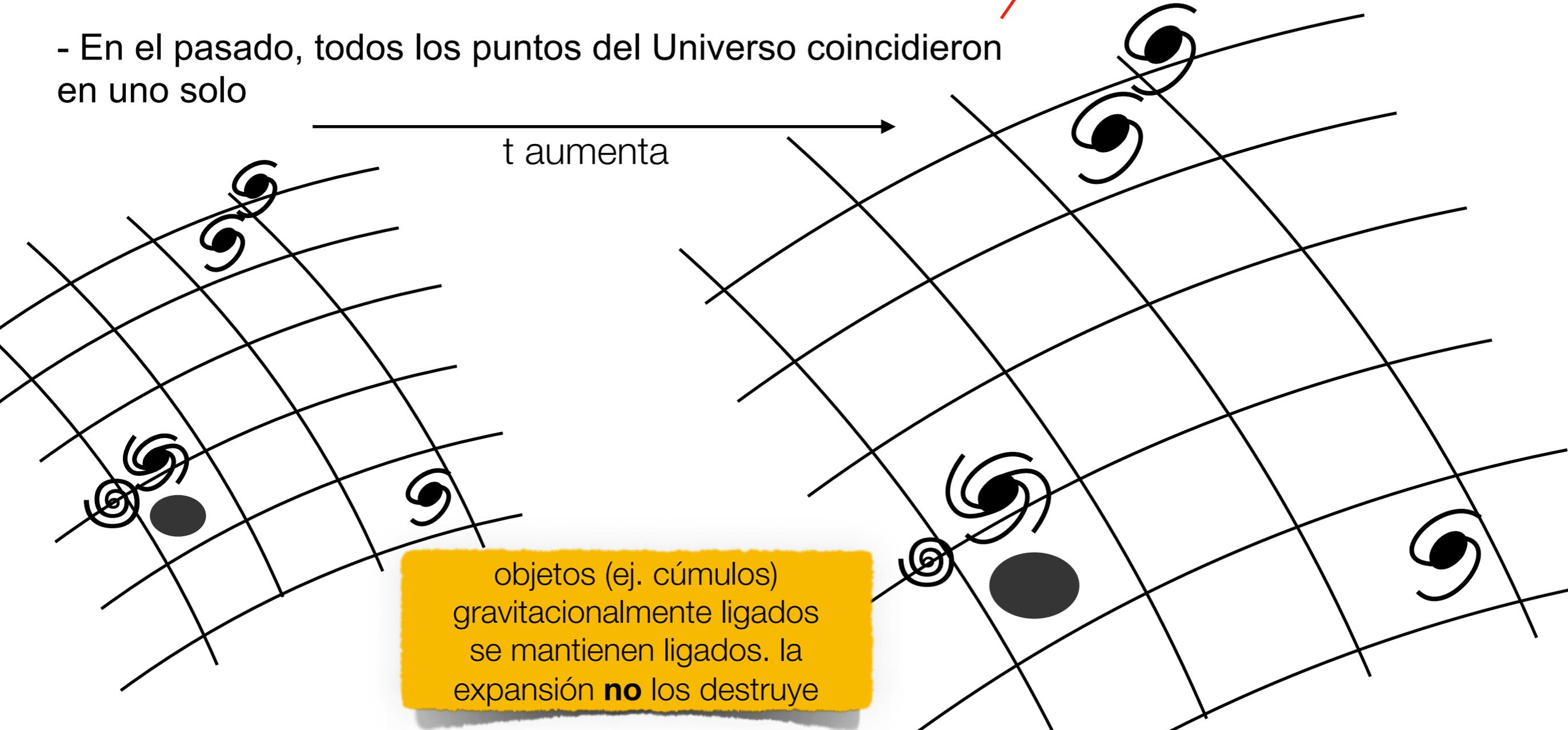


Vista desde galaxia B

COSMOLOGÍA: CONSECUENCIAS DE LA LEY DE HUBBLE

- En cada punto del espacio se ve la misma expansión
- Todos los puntos se alejan entre sí por igual, **NO hay un centro de la expansión**. Cada punto pareciera ser el centro de ésta
- En el pasado, todos los puntos del Universo coincidieron en uno solo

TEORÍA DEL BIG BANG

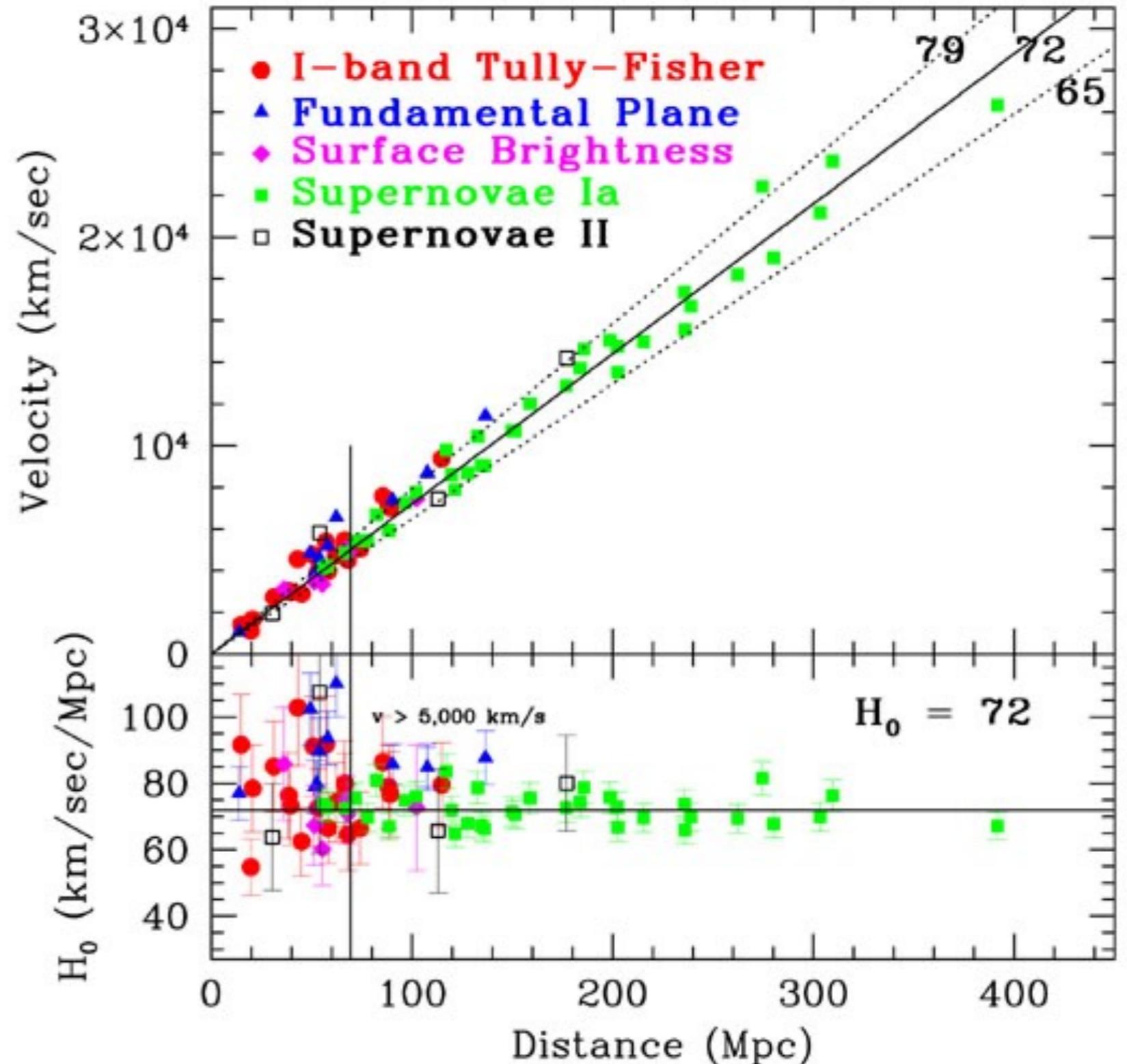


objetos (ej. cúmulos) gravitacionalmente ligados se mantienen ligados. la expansión **no** los destruye

LA LEY DE HUBBLE

La constante H_0 que corresponde a la pendiente de esta relación, a sido medida numerosas veces, utilizando diversos métodos. El valor actualmente aceptado de la constante de Hubble H_0 es $\sim 70-72 \text{ kms}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$

Esta relación es interpretada como una expansión isotrópica del Universo, i.e. el Universo se expande, todos los puntos se alejan entre sí por igual

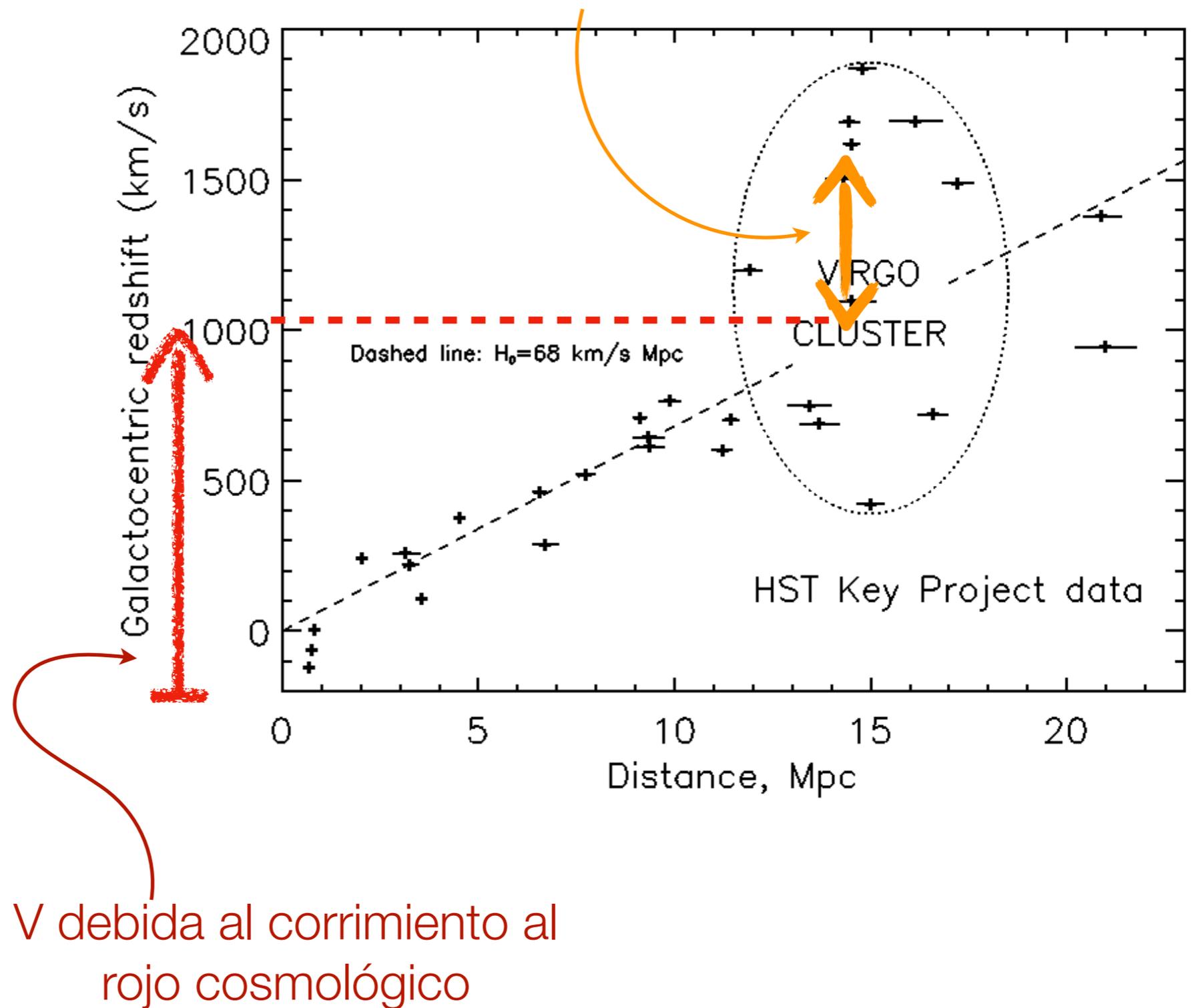


LA LEY DE HUBBLE

Notar que en los cúmulos masivos de galaxias la dispersión de velocidades puede ser muy alta, generando una gran dispersión de velocidades de recesión.

La velocidad media del cúmulo es la que sigue la Ley de Hubble (correspondiente a su centro de masa)

V debida a la dispersión de velocidades intrínseca del cúmulo



COSMOLOGÍA: CORRIMIENTO AL ROJO

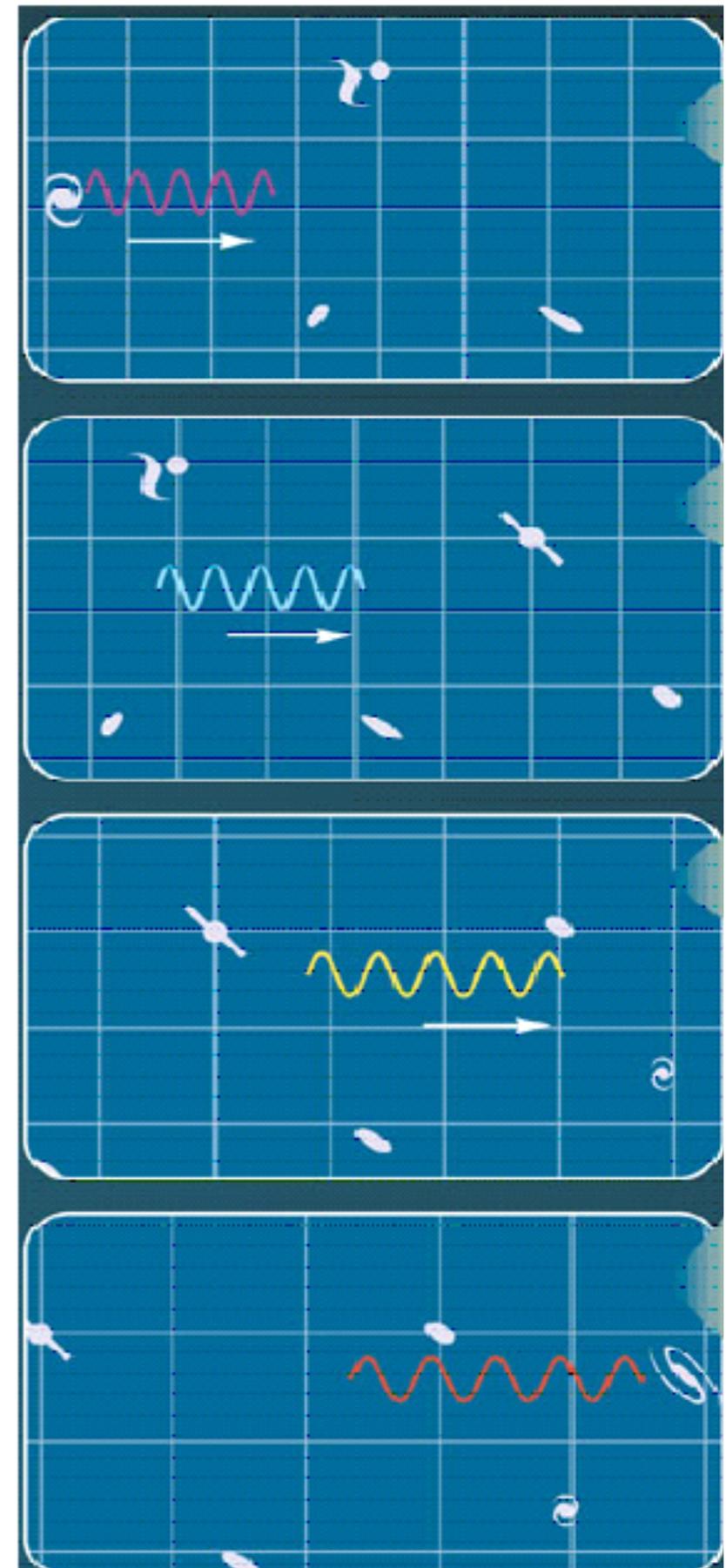
Volviendo al ejemplo del pan, las galaxias (pasas) se mantienen fijas, lo que cambia es el espacio entre ellas debido a la expansión

De manera que una consecuencia de la expansión del Universo, es el **Corrimiento Cosmológico al Rojo**.

La longitud de onda λ de la luz emitida por un objeto en un instante t , va aumentando conforme el tiempo pasa pues el espacio se va expandiendo. Así que se define el corrimiento al rojo z como

$$z = \frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{(\lambda_{obs} - \lambda_{em})}{\lambda_{em}}$$

Objs. cercanos $z \sim 0.001$; lejanos $z \sim 0.1$
Campo profundo del HST $z \sim 0.5 - 3$
Galaxia más distante observada **$z \sim 11.1$ (campo GOODs de HST)**



COSMOLOGÍA: CORRIMIENTO AL ROJO

Volviendo al ejemplo del pan, las galaxias (pasas) se mantienen fijas, lo que cambia es el espacio entre ellas debido a la expansión

De manera que una consecuencia de la expansión del Universo, es el **Corrimiento Cosmológico al Rojo**.

La longitud de onda λ de la luz emitida por un objeto en un instante t , va aumentando conforme el tiempo pasa pues el espacio se va expandiendo. Así que se define el corrimiento al rojo z como

$$z = \frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{(\lambda_{obs} - \lambda_{em})}{\lambda_{em}}$$

Objs. cercanos $z \sim 0.001$; lejanos $z \sim 0.1$
Campo profundo del HST $z \sim 0.5 - 3$
Galaxia más distante observada **$z \sim 11.1$ (campo GOODs de HST)**

Oesch et al. 2016

