

Calendario

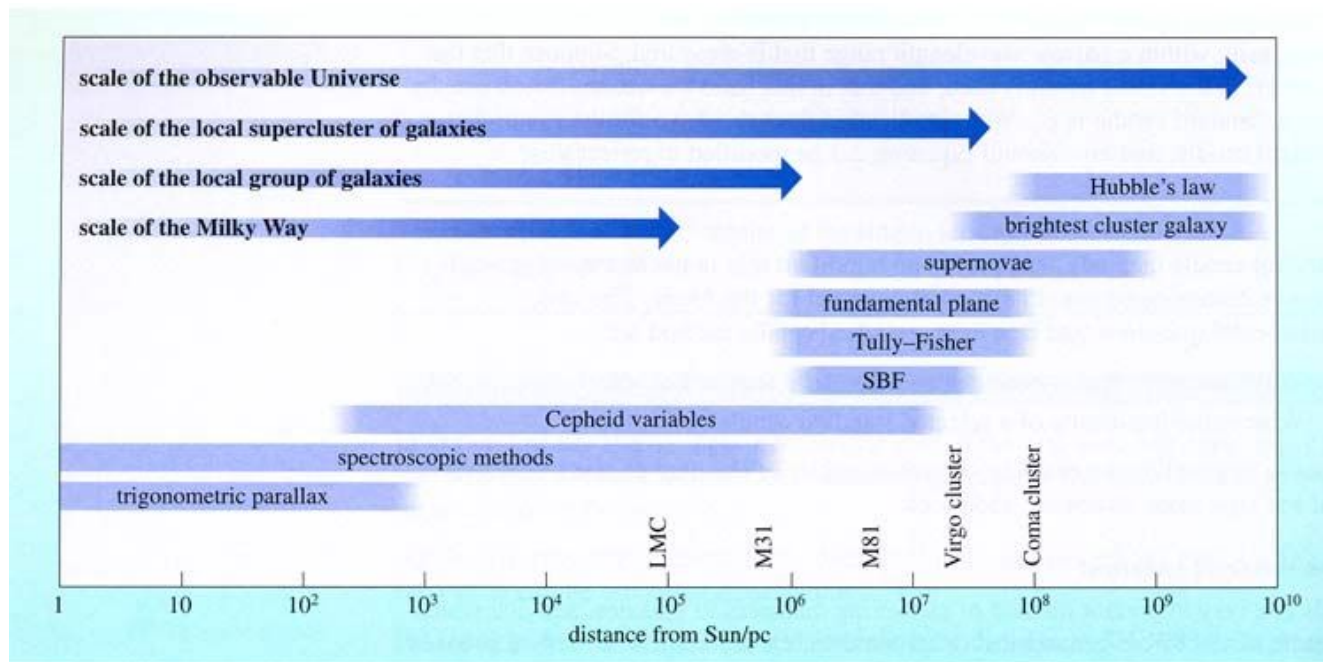
Semana	Martes	Clase	Tareas	Viernes	Clase	Tareas
1	31/3	Presentación / Introducción		3/4	Escalera de distancias	
2	7/4			10/4	FERIADO	Elegir papers 1
3	14/4			17/4		
4	21/4		Presentaciones 1-1	24/4		Presentaciones 1-2
5	28/4		Instrucciones Tarea 1	1/5	FERIADO	
6	5/5			8/5		
7	12/5			15/5		
8	19/5			22/5		Entrega Tarea 1
9	26/5			29/5		Elegir papers 2
10	2/6			5/6		
11	9/6		Presentaciones 2-1	12/6		Presentaciones 2-2
12	16/6		Instrucciones Tarea 2	19/6		
13	23/6			26/6		
14	30/6			3/7		
15	7/7			10/7		Entrega Tarea 2
16	14/7			17/7		
17	21/7	Examen?		24/7		

Unidad II.

Escalera cosmológica de distancias

La necesidad de una escalera de distancias

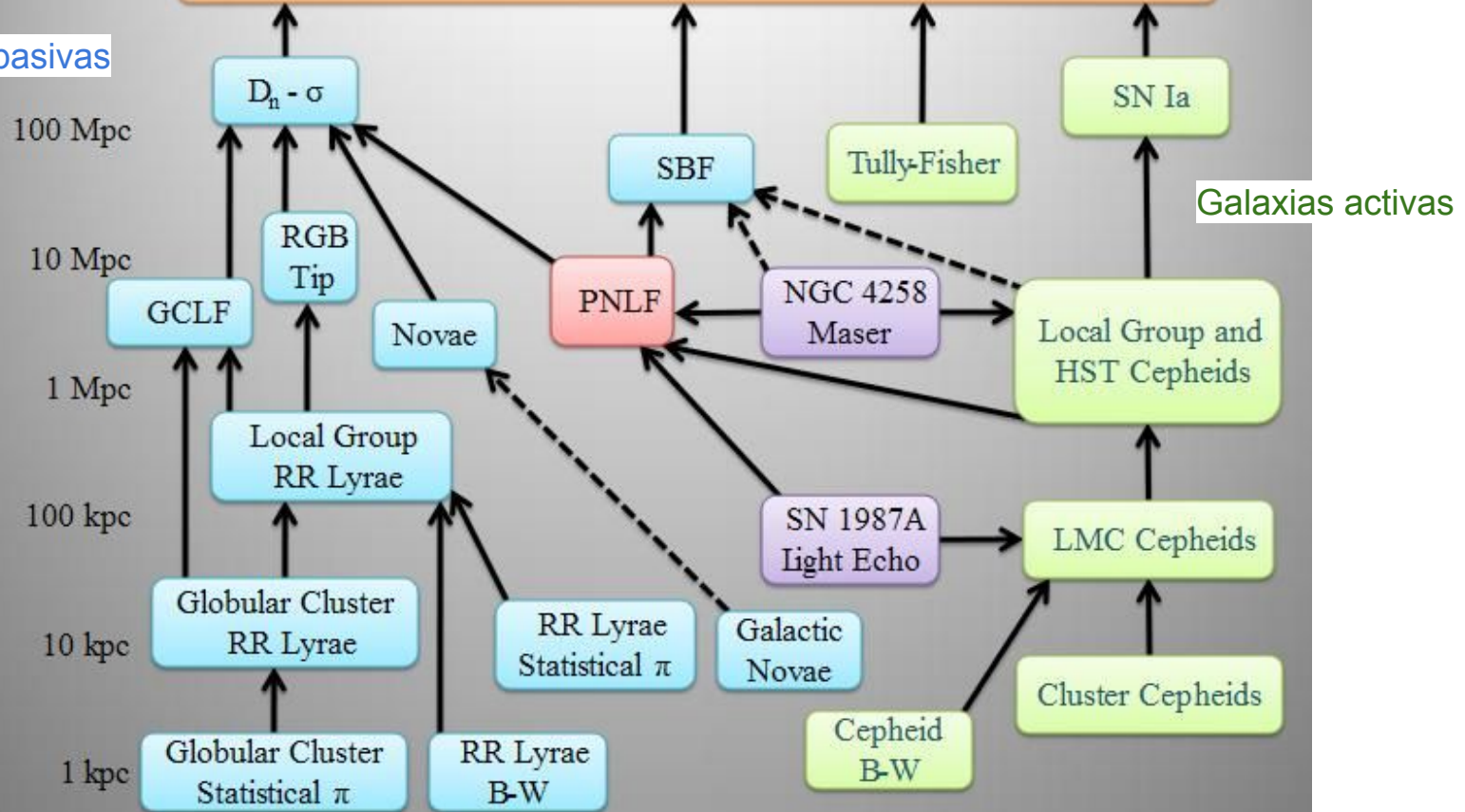
Análogo a la datación radiactiva, distintas fuentes sirven para medir distancias a distintas escalas. En astronomía es un problema de sensibilidad instrumental, no de vida media (o física: claramente no se pueden usar otras galaxias para medir distancias dentro de nuestra galaxia).



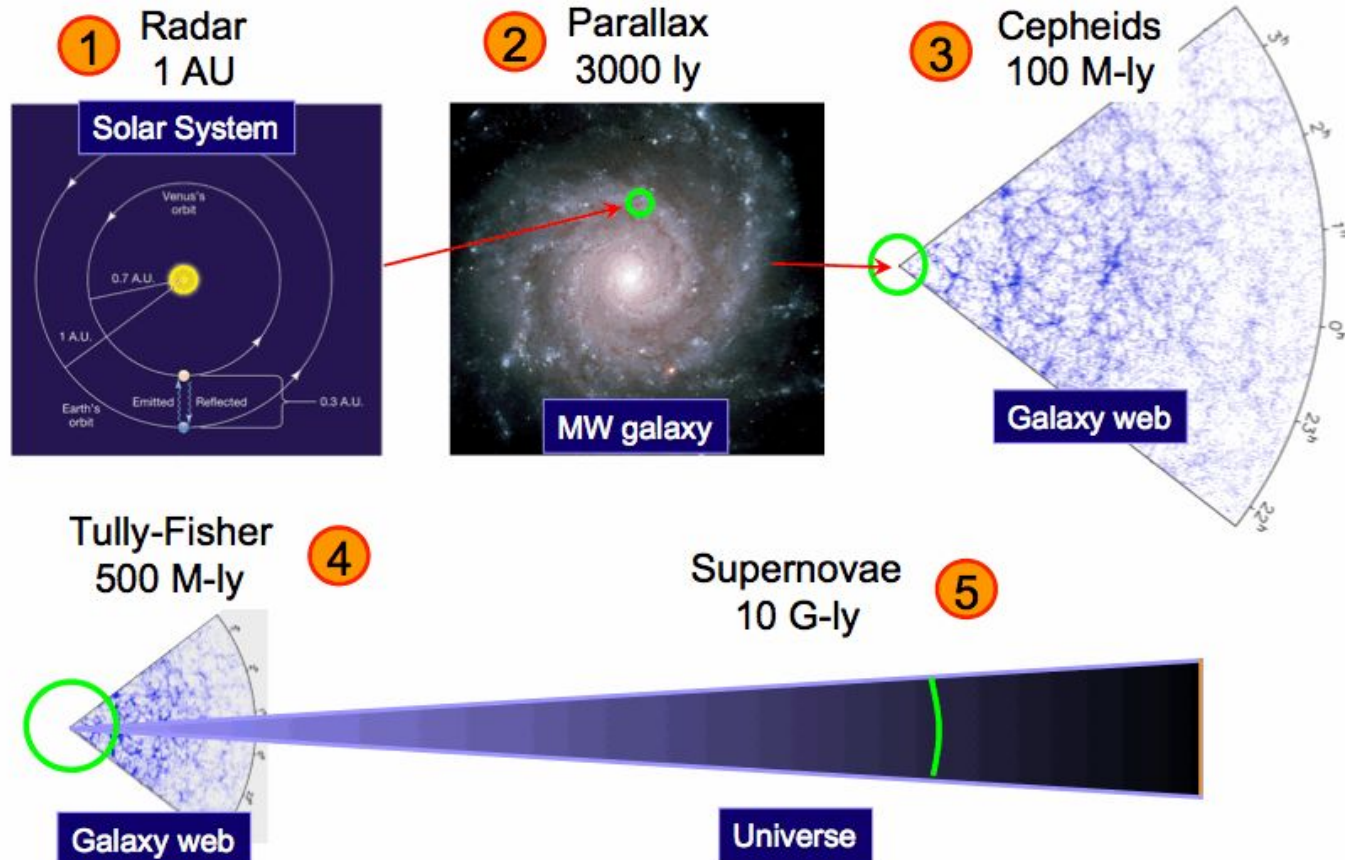
Extragalactic Distance Ladder

The Hubble Constant

Galaxias pasivas



Five Steps in the Distance Ladder



(Distancias desactualizadas en muchos casos)

Medidas directas de distancia

Las medidas de distancias se dividen en dos tipos: directas e indirectas. Los métodos directos se basan en la geometría de la situación, y sirven para medir distancias más bien cercanas, pero son precisos y fiables. Hay cuatro métodos para medir distancias directamente.

Radar

Muy precisos para distancias pequeñas, dentro del sistema solar ($\lesssim 10$ AU). Más allá la señal es muy débil.



$$d = \frac{1}{2} c \Delta t$$

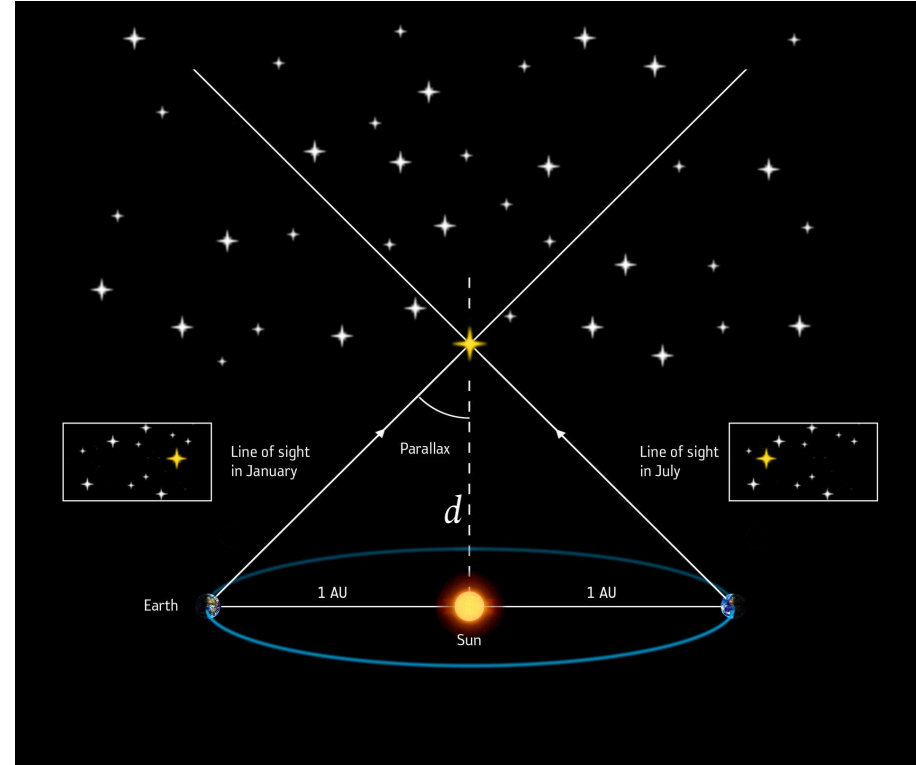
Paralaje trigonométrico

Conocida la distancia de la Tierra al Sol, podemos calcular el movimiento aparente de un objeto cuando se le observa 6 meses después de una observación inicial. Luego, determinar su distancia es trigonometría básica. El paralaje tiene unidades angulares.

Se define **1 parsec (pc)** como la distancia a la cual se mide un paralaje de 1" desde la Tierra, con un desfase de 6 meses, y corresponde a

$$1 \text{ pc} = 206\,265 \text{ AU} = 3.2616 \text{ ly} = 3.086 \times 10^{16} \text{ m}$$

$$d = \frac{1 \text{ AU}}{\tan \pi} \approx \frac{1 \text{ AU}}{\pi}$$



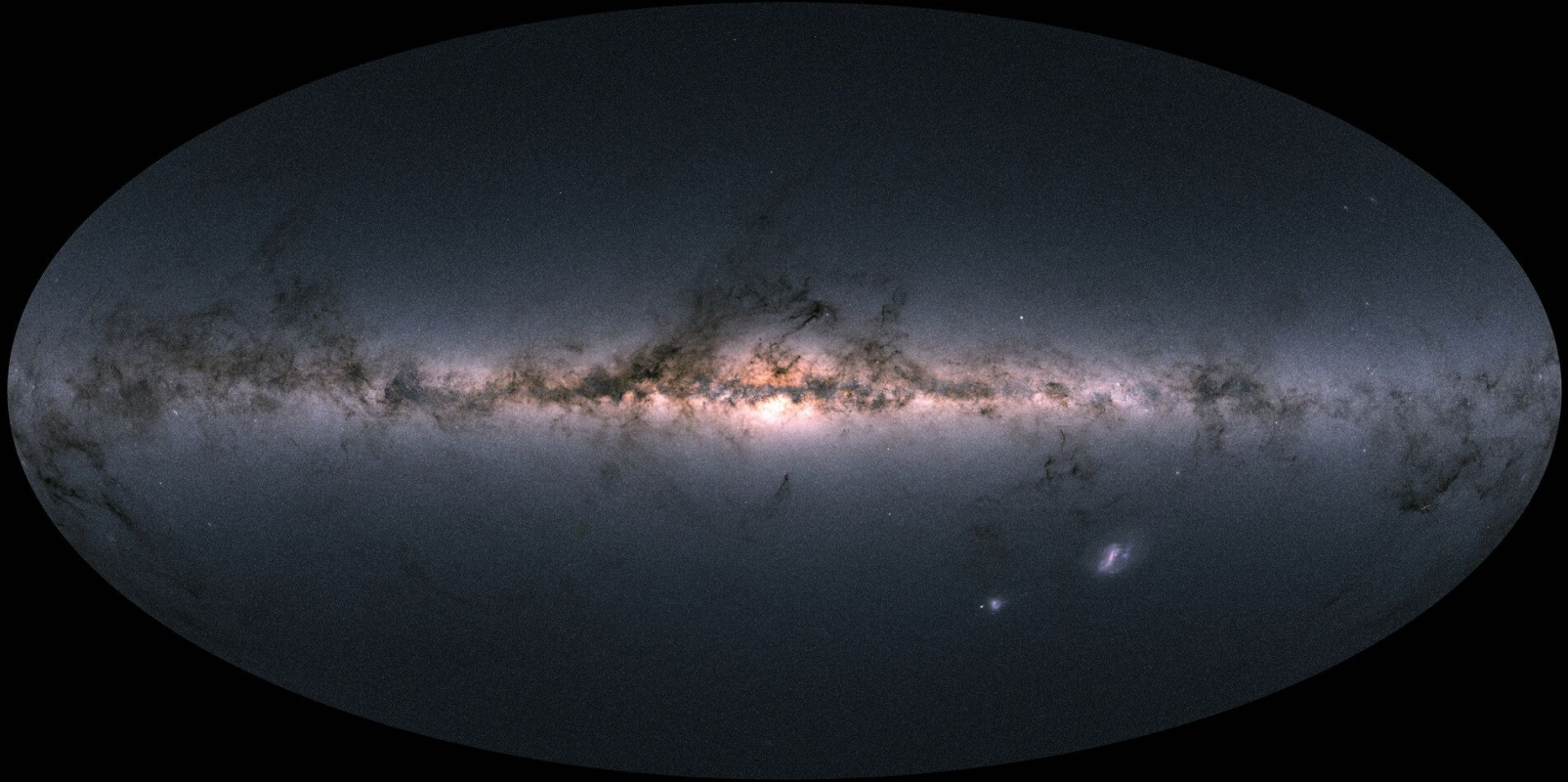
Crédito: ESA

Paralaje trigonométrico

El satélite Hipparcos (1989-1993) fue el primero en producir un catálogo de astrometría de precisión. Al observar objetos en repetidas ocasiones desde distintas posiciones en su órbita, logró producir un catálogo de 118,200 estrellas con paralajes de alta precisión ("Catálogo Hipparcos", ~ 1 mas), y más de un millón de baja precisión (Perryman+97). Hipparcos logró medir distancias hasta aproximadamente 1 kpc.

Los resultados de Hipparcos fueron el estándar astrométrico y de paralaje hasta que el satélite Gaia, lanzado en 2013, publicó su primer catálogo en 2016 (Brown+16), el que ya fue actualizado en Brown+18 y contiene posiciones y paralajes para 1300 millones de estrellas con una precisión de hasta 0.02 mas. Gaia seguirá observando al menos hasta fines de 2020 y probablemente hasta 2022. Luego de dos años de análisis (de 5 que se esperan), Gaia ha medido distancias de hasta unos 10 kpc (Luri+18).

→ GAIA'S SKY IN COLOUR



Cúmulo en movimiento (histórico)

Las estrellas en un cúmulo se mueven en el cielo hacia un punto de convergencia. La distancia de ese punto a la posición actual del cúmulo, comparado con su desplazamiento en el cielo, conocido como movimiento propio, μ , permite determinar su distancia:

$$v_t = d \sin \mu \approx d\mu$$

con d en pc y μ en rad/yr. Además, tenemos

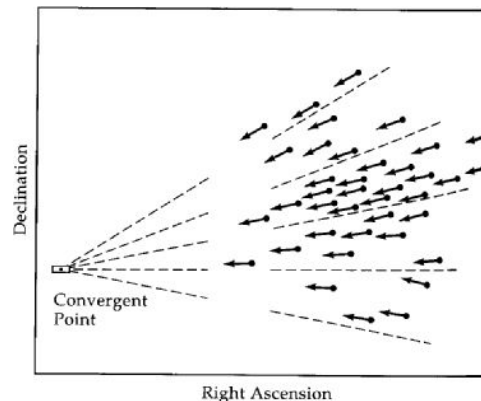
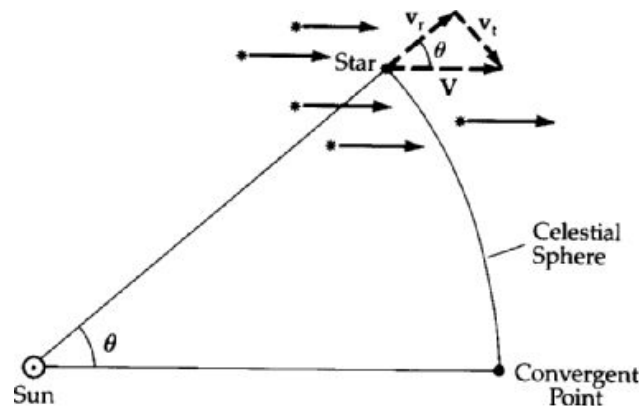
$$V = v_r \cos \theta$$

$$v_t = V \sin \theta = v_r \tan \theta$$

Por lo que

$$d = v_r \tan \theta / \mu$$

donde θ es la distancia angular entre la estrella y el punto de convergencia.



Cúmulo en movimiento

Este método se usó en las primeras décadas de 1900s para medir distancias a un puñado de cúmulos abiertos a distancias de unas decenas de pc. Hoy, las distancias por paralajes son mucho más precisas, y este método ha caído en desuso. Dos ejemplos recientes:

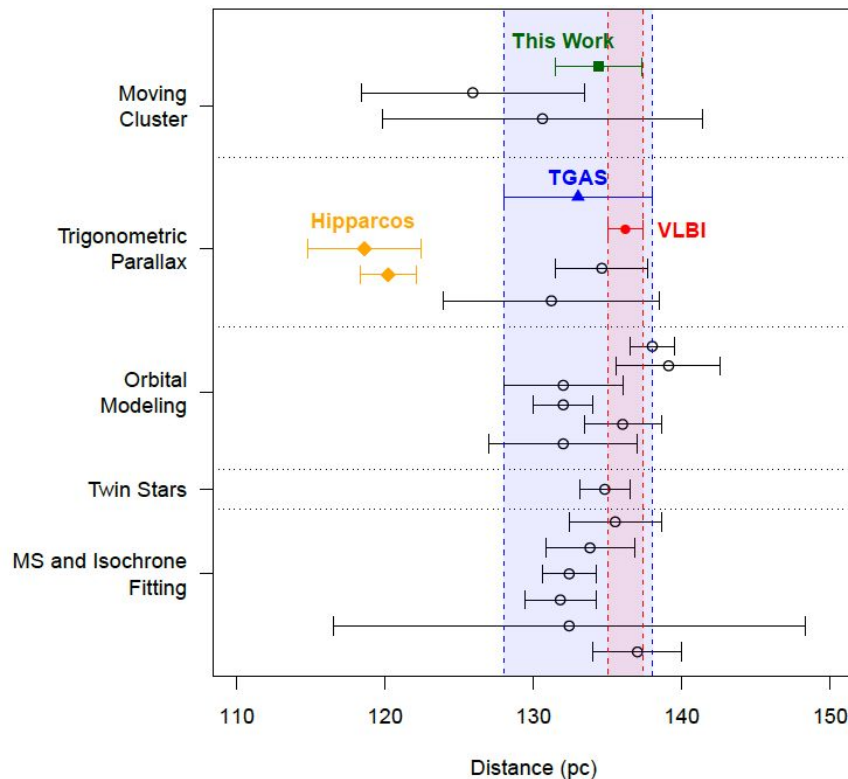
A MOVING CLUSTER DISTANCE TO THE EXOPLANET 2M1207b IN THE TW HYDRAE ASSOCIATION

ERIC E. MAMAJEK¹

Distancia de 53 ± 6 pc a un planeta extrasolar en un sistema miembro de una asociación de estrellas

A revised moving cluster distance to the Pleiades open cluster[★]

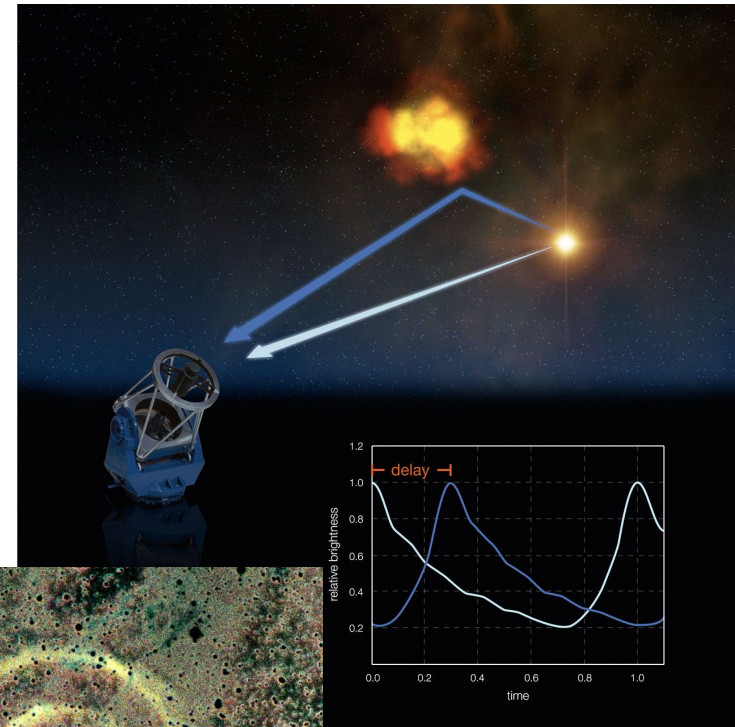
P. A. B. Galli^{1,2,3}, E. Moraux^{1,2}, H. Bouy⁴, J. Bouvier^{1,2}, J. Olivares^{1,2,5}, and R. Teixeira³



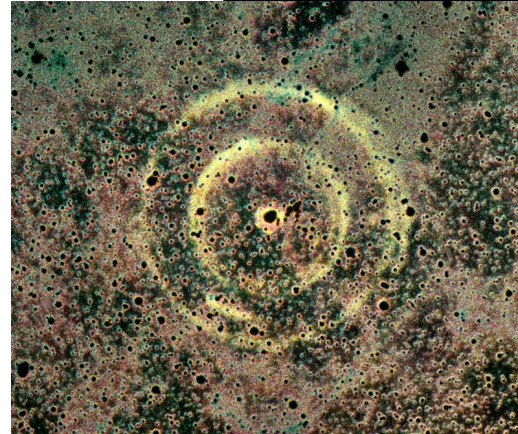
Ecos de luz

Cuando la luz de una estrella es reflejada por una nube de gas cercana, el desfase temporal nos permite calcular directamente el tamaño físico del sistema

- Usando ecos en la supernova 1987A se determinó una distancia a la LMC de 52 ± 3 kpc (Crotts+95)
- Se determinó una distancia de 1.99 ± 0.03 kpc a RS Pup, la única Cefeida ubicada en una nube de gas (ca. 2008; Kervella+08)



Crédito: [ESO](#)

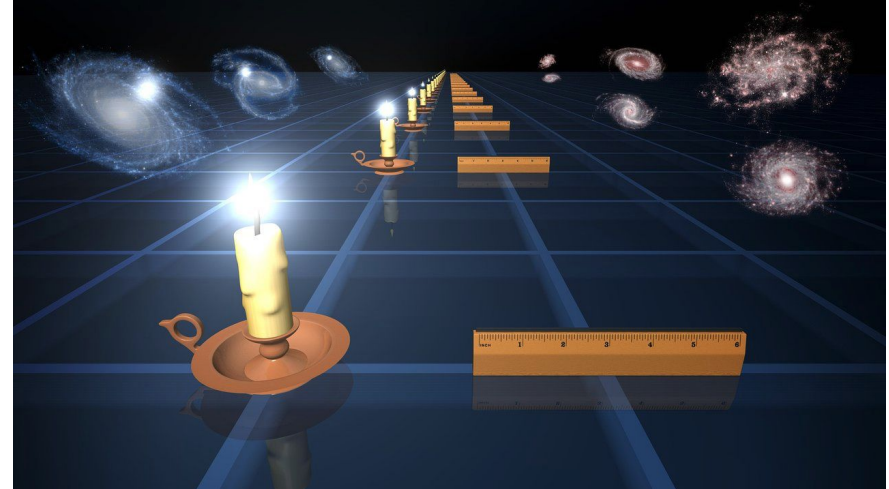


Crédito: [AAT Image Archive](#)

Métodos indirectos de distancia

Existe una serie de métodos que se basan en principios físicos o fenomenológicos para *derivar* distancias a partir de otros observables. Estos métodos deben ser calibrados, últimamente, a distancias medidas directamente, y se dividen en tres categorías:

- **Velas estándar:** objetos cuya *luminosidad* es conocida.
- **Reglas estándar:** objetos cuyo *tamaño* es conocido
- **Sirenas estándar:** ondas de sonido cuya *amplitud intrínseca* es conocida



Distancias con velas estándar

Existen muchos métodos para medir distancias usando velas estándar - objetos cuya luminosidad es conocida. Algunos de los ejemplos más conocidos son:

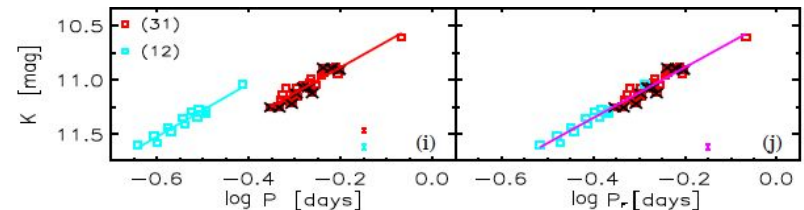
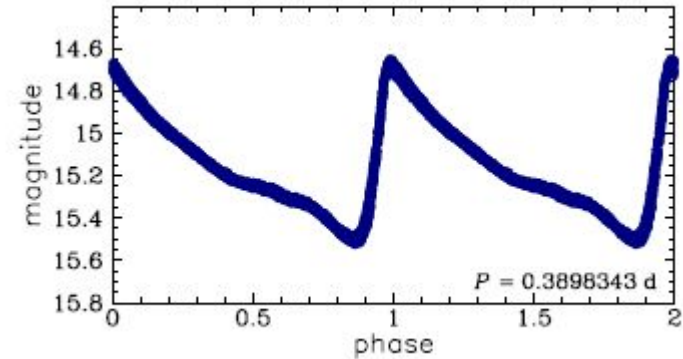
- Estrellas RR Lyrae
- Estrellas cefeidas
- La punta de la rama de gigantes rojas
- Ajuste de la secuencia principal
- Supernovas Tipo Ia

El principal problema al que se enfrentan todas estas mediciones, es determinar el oscurecimiento por polvo, tanto de la misma fuente como en su trayectoria a nosotros (por ejemplo, polvo Galáctico para fuentes extragalácticas). Comúnmente la metalicidad también debe ser tomada en cuenta.

Velas estándar: RR Lyrae

En 1901, Willamina Fleming, miembro de las “[Computadoras de Harvard](#)”, descubrió una relación entre el período y la luminosidad de estrellas variables de tipo RR Lyrae. Las RR Lyrae son variables de la rama horizontal con masas $\sim 0.5 M_{\odot}$ y períodos de algunas horas, comúnmente encontradas en cúmulos globulares.

Al ser estrellas intrínsecamente débiles, sólo sirven para medir distancias hasta M31 (Andromeda), a ~ 1 Mpc.

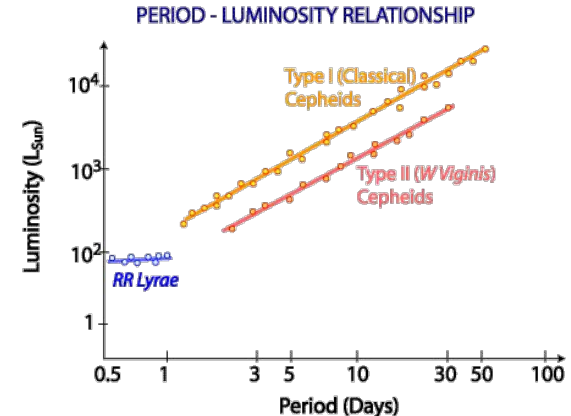
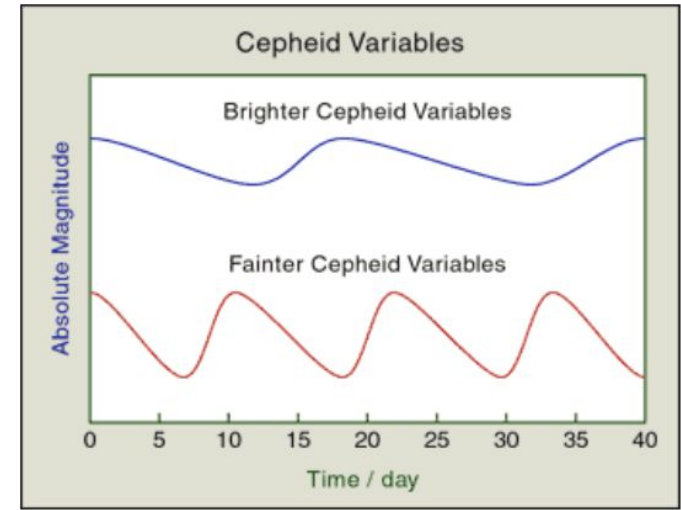


Velas estándar: Cefeidas

La relación P-L de Cefeidas fue descubierta por Henrietta Swan Leavitt (otra de las Computadoras de Harvard) en 1908. Existen distintas clases de cefeidas, pero típicamente tienen períodos de varios días hasta algunos meses, cubriendo un gran rango de masa, desde $\sim 0.5 M_{\odot}$ para Cefeidas de tipo II, hasta incluso $20 M_{\odot}$ para Cefeidas de tipo I, por lo que se pueden usar hasta grandes distancias.

Tienen la desventaja de ser relativamente escasas y, al tener períodos largos, requieren observaciones sobre grandes rangos temporales.

$$L \propto P^{1.3}$$



Calibración de P-L de Cefeidas con paralajes

New Parallaxes of Galactic Cepheids from Spatially Scanning the *Hubble Space Telescope*: Implications for the Hubble Constant

Adam G. Riess^{1,2}, Stefano Casertano^{1,2}, Wenlong Yuan^{2,3}, Lucas Macri³, Jay Anderson¹, John W. MacKenty¹, J. Bradley Bowers², Kelsey I. Clubb⁴, Alexei V. Filippenko^{4,5,6}, David O. Jones², and Brad E. Tucker⁴

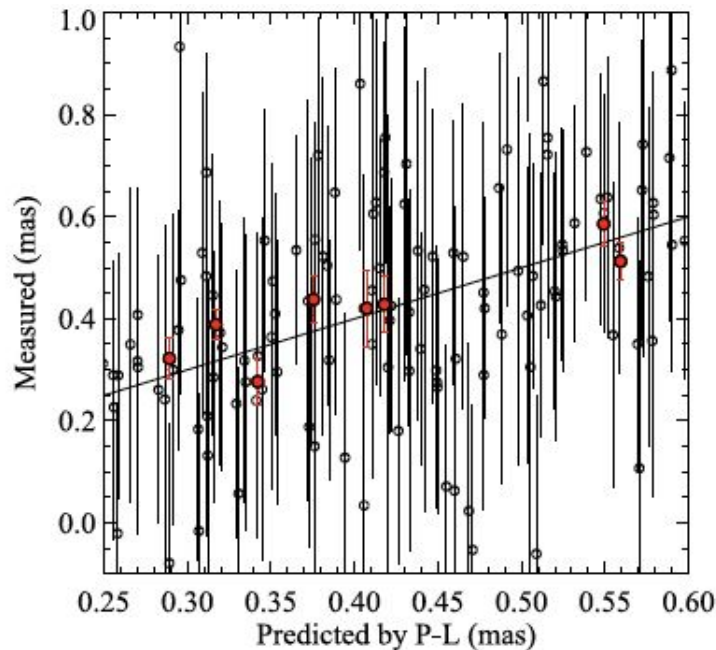
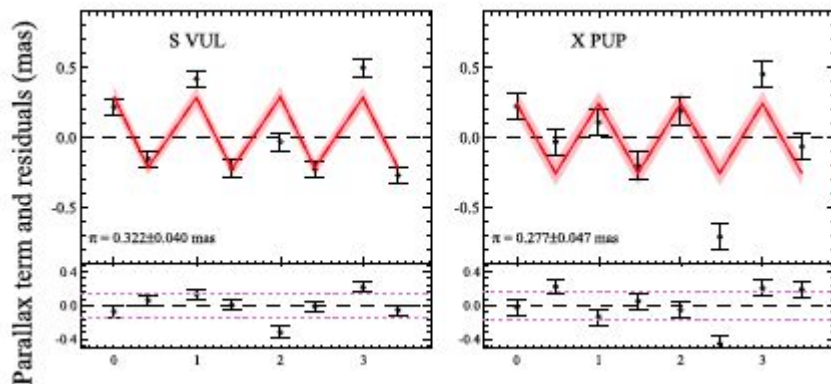


Figure 10. Comparison of predicted and measured parallaxes. The predictions are based on their Wesenheit apparent magnitudes and periods as well as the Cepheid *P-L* calibrated in R16, which yields $H_0 = 73.2 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$. The eight points in red are from the spatial scanning program presented here. The open symbols are based on *Gaia* DR1.

Ley de Hubble-Lemaître

A RELATION BETWEEN DISTANCE AND RADIAL VELOCITY AMONG EXTRA-GALACTIC NEBULAE

BY EDWIN HUBBLE

MOUNT WILSON OBSERVATORY, CARNEGIE INSTITUTION OF WASHINGTON

Communicated January 17, 1929

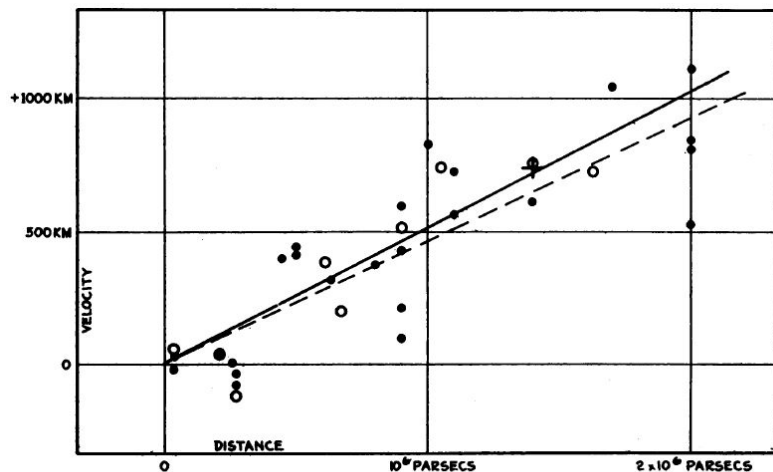


FIGURE 1

Velocity-Distance Relation among Extra-Galactic Nebulae.

En 1929, Edwin Hubble comparó los corrimientos al rojo de 24 galaxias (medidos en parte, y sin el crédito necesario, por Vesto Slipher) con distancias estimadas usando estrellas cefeidas y otras velas estándar, y comprobó que existe una relación lineal entre velocidad de recesión y distancia, lo que hoy se conoce como **Ley de Hubble-Lemaître**:

$$v = H_0 d$$

(Georges Lemaître había publicado observaciones similares en una revista francesa de bajo impacto en 1927, y su nombre fue agregado a esta ley por la IAU [recién en 2018](#).) Errores en la calibración de distancias llevaron a Hubble a estimar un valor $H_0 \sim 500$ km/s/Mpc. Para historias interesantes relacionadas a la ley de Hubble-Lemaître, ver Trimble96,12,13.

Implicaciones de la Ley de Hubble-Lemaître

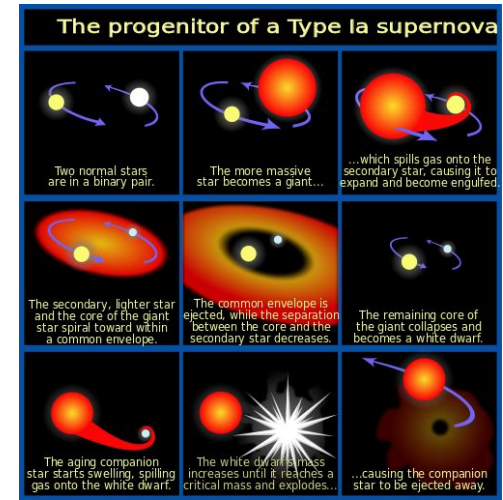
Una relación lineal entre velocidad y distancia como la Ley de Hubble-Lemaître tiene implicaciones astrofísicas (y filosóficas!) importantísimas. Como una relación lineal se mantiene sin importar la ubicación ni la dirección, esto sugiere no que las galaxias se estén alejando específicamente de nosotros, sino que el espacio se está expandiendo, alejando a todas las galaxias unas de otras en todas las direcciones y desde todas las posiciones.

No hay posiciones ni ubicaciones privilegiadas en el Universo.

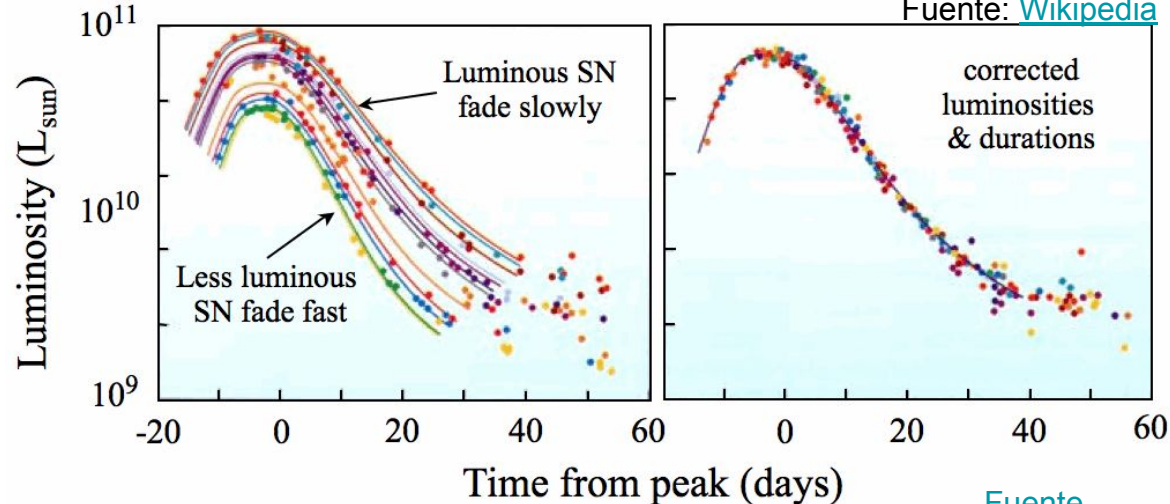
Velas estándar: Supernovas Tipo Ia

El mecanismo físico de las supernovas de tipo Ia es bien entendido y, dado su enorme brillo, provee la vela estándar más importante a distancias cosmológicas. Sus progenitores son enanas blancas (estrellas soportadas por presión de degeneración) que, al acretar materia de una compañera, superan el límite de Chandrasekhar, de $1.44 M_{\odot}$.

Su aplicación más famosa es el descubrimiento de la expansión acelerada en 1998, y hoy son una de dos partes en el problema actual más grande del modelo Λ CDM: la discrepancia en el valor de H_0 , entre SN Ia y CMB. Más de esto más adelante.



Fuente: [Wikipedia](#)

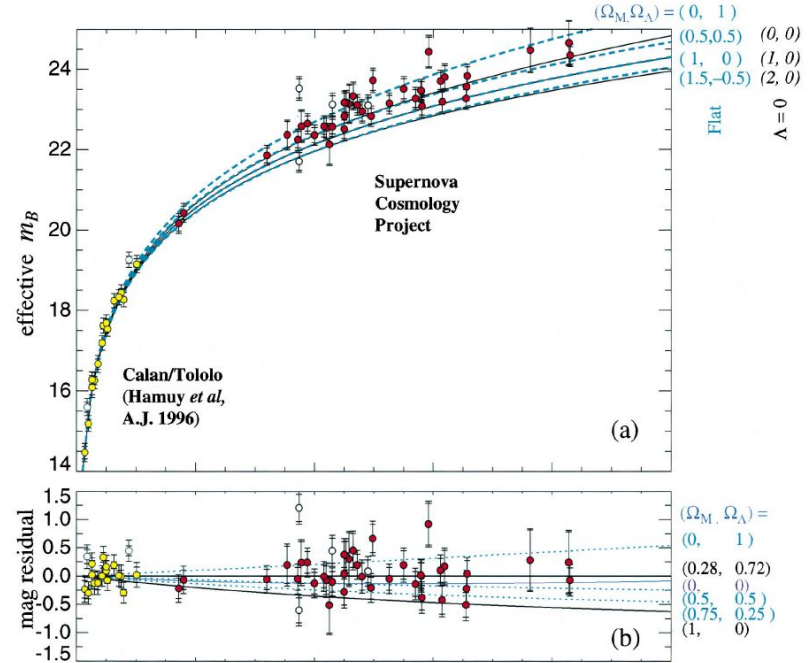
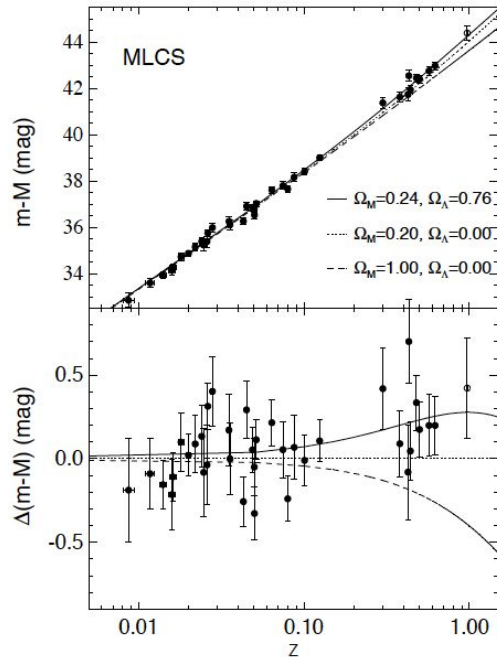


Fuente

Descubrimiento de expansión acelerada

OBSERVATIONAL EVIDENCE FROM SUPERNOVAE FOR AN ACCELERATING UNIVERSE
AND A COSMOLOGICAL CONSTANT

ADAM G. RIESS,¹ ALEXEI V. FILIPPENKO,¹ PETER CHALLIS,² ALEJANDRO CLOCCHIATTI,³ ALAN DIERCKS,⁴



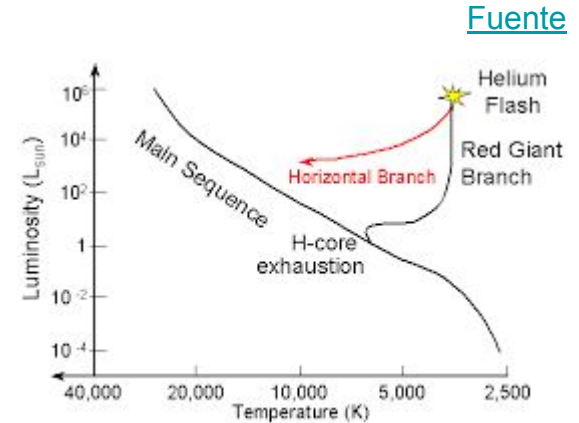
MEASUREMENTS OF Ω AND Λ FROM 42 HIGH-REDSHIFT SUPERNOVAE

S. PERLMUTTER,¹ G. ALDERING, G. GOLDBERGER,¹ R. A. KNOP, P. NUGENT, P. G. CASTRO,² S. DEUSTUA, S. FABBRO,³

Punta de la Secuencia de Gigantes Rojas

Cuando el núcleo de He de una gigante roja alcanza una temperatura de 10^8 K se desencadena el [proceso triple- \$\alpha\$](#) , lo que desata una fuga térmica. La estrella se contrae rápidamente y se traslada a la rama horizontal del diagrama H-R, por lo que hay una luminosidad bolométrica máxima para la punta de la rama de gigantes rojas. En particular, la luminosidad en la banda óptica I resulta ser independiente de edad y metalicidad.

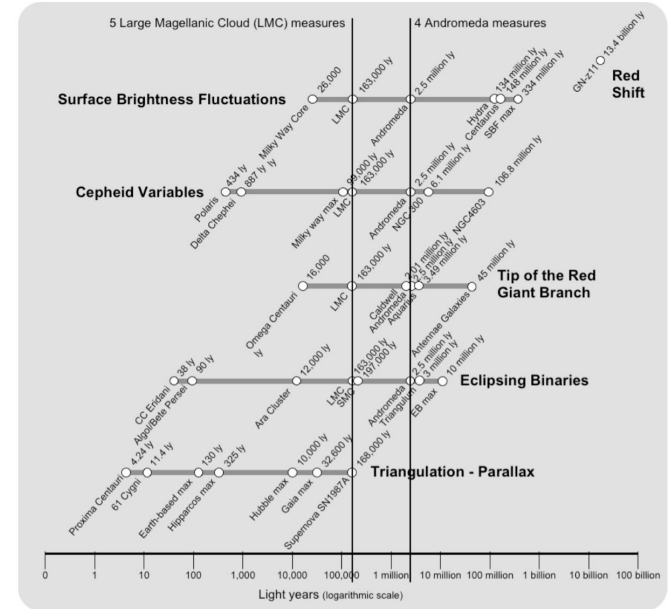
Sirven para distancias relativamente cercanas, hasta algunos Mpc, pero proveen una importante validación de distancias medidas con otros métodos



Punta de la Secuencia de Gigantes Rojas

Cuando el núcleo de He de una gigante roja alcanza una temperatura de 10^8 K se desencadena el [proceso triple- \$\alpha\$](#) , lo que desata una fuga térmica. La estrella se contrae rápidamente y se traslada a la rama horizontal del diagrama H-R, por lo que hay una luminosidad bolométrica máxima para la punta de la rama de gigantes rojas. En particular, la luminosidad en la banda óptica *I* resulta ser independiente de edad y metalicidad.

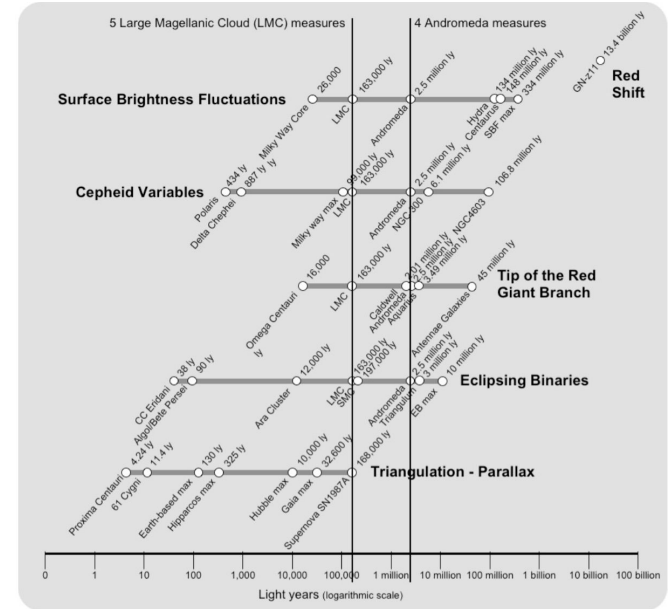
Sirven para distancias relativamente cercanas, hasta algunos Mpc, pero proveen una importante validación de distancias medidas con otros métodos



Punta de la Secuencia de Gigantes Rojas

Cuando el núcleo de He de una gigante roja alcanza una temperatura de 10^8 K se desencadena el [proceso triple- \$\alpha\$](#) , lo que desata una fuga térmica. La estrella se contrae rápidamente y se traslada a la rama horizontal del diagrama H-R, por lo que hay una luminosidad bolométrica máxima para la punta de la rama de gigantes rojas. En particular, la luminosidad en la banda óptica *I* resulta ser independiente de edad y metalicidad.

Sirven para distancias relativamente cercanas, hasta algunos Mpc, pero proveen una importante validación de distancias medidas con otros métodos.



Otras velas estándar

Existen muchas otras velas estándar, menos populares y en general menos precisas que las anteriores. Algunas de éstas son:

Escalas hasta \sim Mpc:

- **La secuencia principal de estrellas.** La secuencia principal sigue un trazo bien definido en el diagrama H-R de temperatura y luminosidad.
- **Función de luminosidad de nebulosas planetarias.** El valor de corte de estas funciones exponenciales es constante en unidades físicas.
- **Función de luminosidad de cúmulos globulares.** El máximo de estas funciones es constante.
- **Fluctuaciones de brillo superficial.** Las variaciones en el brillo de una galaxia se van diluyendo a distancias mayores. Más útil para galaxias elípticas, que tienen poblaciones estelares conocidas.

Escalas cosmológicas:

- **Relación Tully-Fisher.** La velocidad de rotación de galaxias espirales depende de su luminosidad.
- **Relación Faber-Jackson.** La dispersión de velocidades de galaxias elípticas depende de su luminosidad.

Distancias con reglas estándar

También existen algunos métodos para medir distancias usando reglas estándar - objetos cuyo tamaño físico es conocido. Ahora veremos las ondas gravitacionales como reglas estándar. Otras reglas estándar que veremos más adelante:

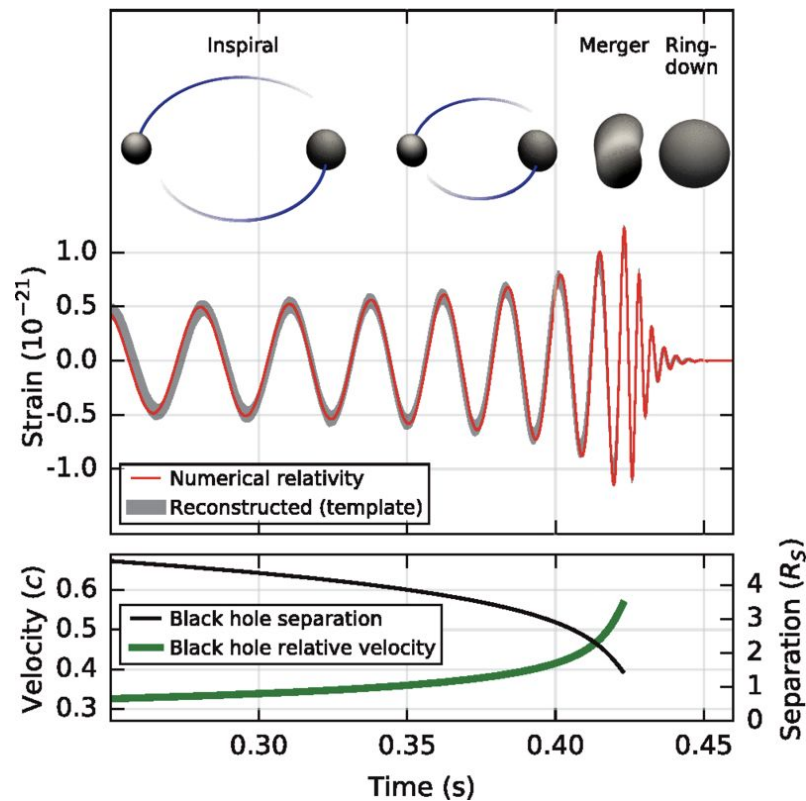
- **Oscilaciones acústicas de bariones.** Oscilaciones del tamaño del horizonte en el momento de recombinación, pues las ondas de densidad del plasma primordial dejaron de expandirse en ese momento, determinando su tamaño posterior. Estas ondas pueden observarse tanto en el fondo cósmico de microondas (CMB), como en la distribución a gran escala de galaxias.
- **La prueba Alcock-Paczynski** sobre distorsiones en las direcciones radial y angular.
- La combinación de observaciones de cúmulos de galaxias en rayos X y efecto Sunyaev-Zel'dovich, que sólo depende de la distancia.

Ondas gravitacionales como reglas estándar

La amplitud y la variación temporal de frecuencia de las ondas gravitacionales producidas por la colisión de dos objetos muy densos (estrellas de neutrones, agujeros negros) dependen de dos cantidades: la “masa de chirrido”, \mathcal{M} , que corresponde a la energía liberada en la onda luego de la fusión, y la distancia, D :

$$h(t) = \frac{4\pi^{2/3}(GM)^{5/3}}{c^4 D} f(t)^{2/3} \cos \left[\int_0^t f(t') dt' \right]$$

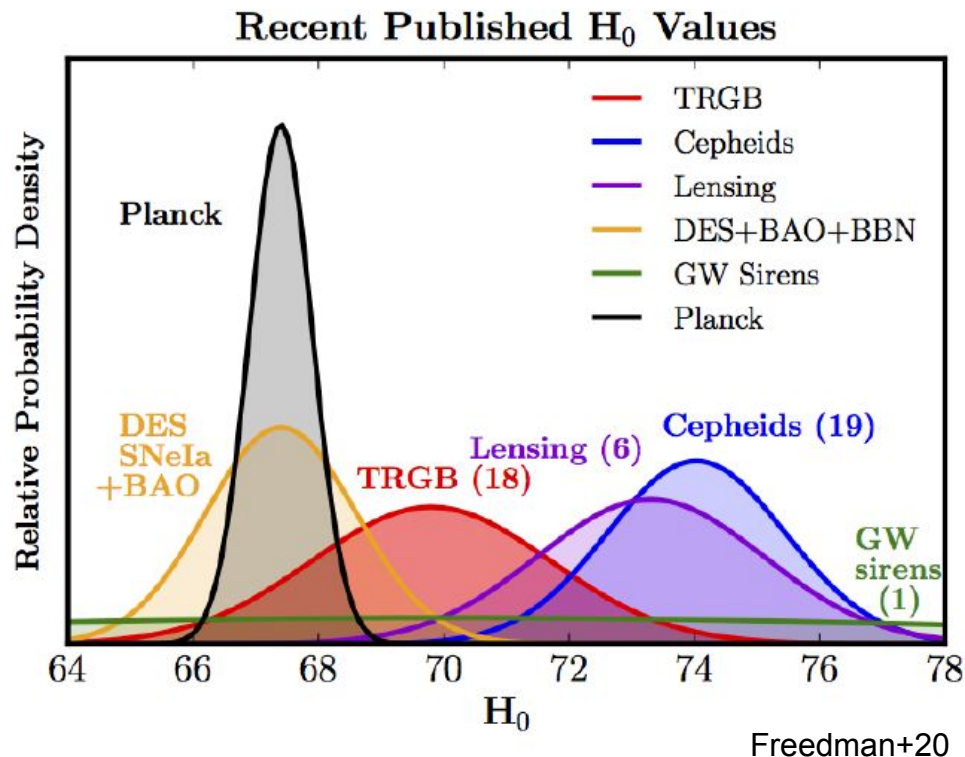
$$\frac{df}{dt} = \frac{96\pi^{8/3}}{5} \left(\frac{GM}{c^3} \right)^{5/3} f^{11/3}$$



Abbott+16

Conclusión: La constante de Hubble

La escalera cosmológica de distancias entrega muchas maneras distintas de medir la expansión del Universo, expresada a través de la constante de Hubble. Veremos más detalles más adelante, pero como se ve en el gráfico de la derecha, estas determinaciones no siempre están de acuerdo. En particular, existe una diferencia formal de más de 4σ entre algunas estimaciones hechas con SN Ia (calibradas con Cefeidas) y mediciones del CMB. Es interesante que la punta de la rama de gigantes rojas entrega un valor intermedio, incluso luego de una revisión (Freedman+20) al valor original (Freedman+19), luego de algunas críticas (Riess+19).



Referencias

- Abbott, B.P., et al., 2016, *Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger*. [PhRvL, 116, 061102](#)
- Crotts, A., et al., 2005, *The Circumstellar Envelope of SN 1987A. I. The Shape of the Double-lobed Nebula and Its Rings and the Distance to the Large Magellanic Cloud*. [ApJ, 438, 724](#)
- Freedman, W.L., et al., 2019, *The Carnegie-Chicago Hubble Program. VIII. An Independent Determination of the Hubble Constant Based on the Tip of the Red Giant Branch*. [ApJ, 882, 34](#)
- Freedman, W.L., et al., 2020, *Calibration of the Tip of the Red Giant Branch*. [ApJ, 891, 57](#)
- Gaia Collaboration, 2016, *Gaia Data Release 1. Summary of the astrometric, photometric, and survey properties*. [A&A, 595, 2](#)
- Gaia Collaboration, 2018, *Gaia Data Release 2. Summary of the contents and survey properties*. [A&A, 616, 1](#)
- Galli, P.A.B., et al., 2017, *A revised moving cluster distance to the Pleiades open cluster*. [A&A, 598, A48](#)
- Hoeg, E., et al., 1997, *The TYCHO Catalogue*. [A&A, 323, L57](#)
- Høg, E., et al., 2000, *The Tycho-2 catalogue of the 2.5 million brightest stars*. [A&A, 355, L27](#)
- Kervella, P., et al., 2008, *The long-period Galactic Cepheid RS Puppis. I. A geometric distance from its light echoes*. [A&A, 480, 167](#)

Referencias (2)

- Luri, X., et al., 2018, *Gaia Data Release 2. Using Gaia parallaxes*. [A&A, 616, A9](#)
- Mamajek, E., 2005, *A Moving Cluster Distance to the Exoplanet 2M1207b in the TW Hydrae Association*. [ApJ, 634, 1385](#)
- Perryman, M. A. C., et al., 1997, *The Hipparcos Catalogue*. [A&A, 323, L49](#)
- Riess, A. G., et al., 2019, *New Parallaxes of Galactic Cepheids from Spatially Scanning the Hubble Space Telescope: Implications for the Hubble Constant*. [ApJ, 855, 136](#)
- Trimble, V., 1996, *H_0 : The Incredible Shrinking Constant, 1925-1975*. [PASP, 108, 1073](#)
- Trimble, V., 2012, *Eponyms, Hubble's Law, and the three princes of parallax*. [The Observatory, 132, 33](#)
- Trimble, V., 2013, *Anybody but Hubble!* [arXiv:1307.2289](#)