

Escalera de distancias cósmicas

Hollman Daniel Quintero Salazar

Agosto 2022

Resumen

Medir distancias en el Universo es fundamental en astrofísica, sin buenas estimaciones de distancia es prácticamente imposible comprender las propiedades físicas de los objetos celestes. Entender de manera precisa la distancia entre La Tierra y los objetos astronómicos permite elaborar modelos precisos sobre la naturaleza de estos objetos y la evolución del Universo. Varios métodos son empleados para medir distancias relativas en el Universo, esto según el objeto que se observe. En conjunto, estas técnicas se conocen como la escala de distancias cósmicas. Se denomina escalera debido a que cada técnica de medición se basa en el paso anterior para su debida calibración. Cuanto mayor es la distancia medida, más métodos han sido empleados y calibrados para llegar ahí. Así pues, se presentan los métodos más importantes de estimación de distancias usados en astronomía y su relación con el rango de distancias que ocupan.

1 PARALAJE

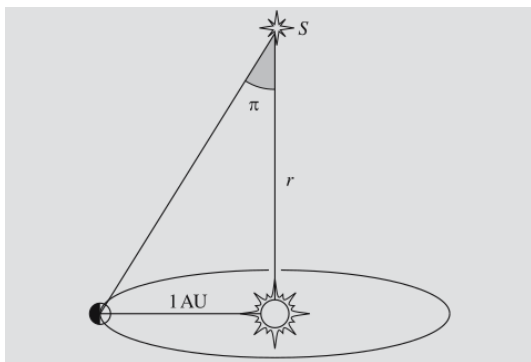


Figura 1: Paralaje trigonométrico. Fuente: [Kar+07]

Uno de los métodos más importantes de estimación de distancias fuera del sistema solar es la medición del paralaje. Este método se basa en un efecto puramente geométrico y por consiguiente es independiente de estimaciones físicas.

Como se muestra en la figura 1, La Tierra traza una órbita alrededor del Sol de una unidad astronómica (1UA) aproximadamente. Al medir el movimiento aparente de una estrella cercana contra el fondo de estrellas más distantes se puede observar un cambio relativo del objeto en la bóveda celeste. Este cambio se expresa con base en un ángulo de un triángulo isósceles con 2 UA de base y la distancia a la estrella son los catetos de igual longitud. La distancia a la estrella es inversamente proporcional al paralaje y sigue la relación:

$$D = \frac{1pc}{p["]}$$

Aunque el paralaje es muy importante en la medición de distancias en el Universo, también se debe tener en cuenta que, además del movimiento debido al paralaje anual, muchas estrellas parecen moverse lentamente en una dirección que no cambia con el tiempo. Este efecto

es causado por el movimiento relativo del Sol y las estrellas a través del espacio (movimiento propio). El rango de medición comúnmente aceptado para estimación con paralaje es de aproximadamente **200 parsecs**.

2 EL DIAGRAMA H-R Y LA SECUENCIA PRINCIPAL

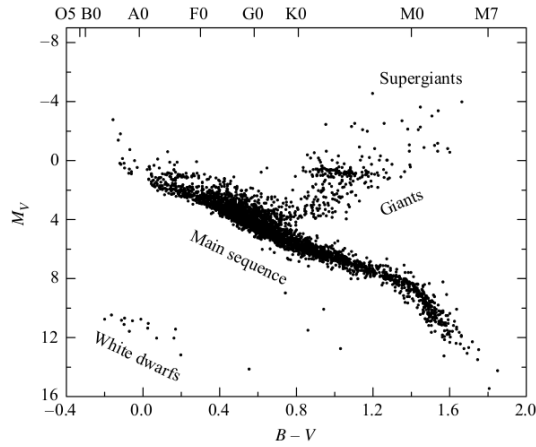


Figura 2: Diagrama Hertzsprung-Russell. Fuente: [CO17]

El período de combustión de hidrógeno de una estrella está relacionado con su posicionamiento en el diagrama H-R en lo que se conoce como la rama de secuencia principal (2). Cuando se miden las propiedades espectrales de una estrella se puede determinar su posición en el diagrama H-R, de esta forma se determina si esta se encuentra en la secuencia principal.

$$m - M = 5 \log \frac{D}{10 \text{ pc}} + A$$

Al posicionar la estrella en el diagrama H-R se puede estimar su magnitud absoluta. Ahora bien, midiendo la magnitud aparente, usando el

modulo de distancia y teniendo en cuenta la extinción interestelar se puede estimar la distancia de la estrella con respecto a La Tierra. El rango de medición comúnmente aceptado para estimación de distancias con ajuste de la secuencia principal es de aproximadamente **10^4 parsecs**.

3 ESTRELLAS VARIABLES PULSANTES INTRÍNSECAS (CEFEIDAS)

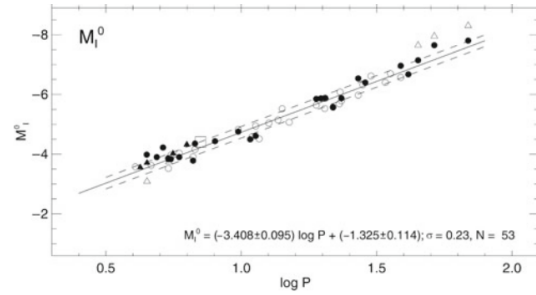


Figura 3: Relación período luminosidad para Cefeidas. Fuente: [Sch06]

A principios del siglo XX la astrónoma Henrietta Leavitt descubrió que algunas estrellas variables con periodos regulares presentaban una relación entre magnitud aparente y periodo de pulsación. En términos más específicos, aquellas estrellas con mayor magnitud aparente presentaban mayor periodo de pulsación(3).

$$M = A * \log(P) + B$$

Al considerar que estas estrellas están ubicadas prácticamente a la misma distancia del observador, se puede intuir que su luminosidad está directamente relacionada con el periodo de pulsación registrado. Al calibrar la relación entre periodo y luminosidad (magnitud absoluta)

y considerar la ecuación de modulo de distancia, se puede utilizar el periodo de pulsación de las estrellas como estimador de longitudes cósmicas.

El cambio de magnitud aparente en algunas estrellas se relaciona directamente con su evolución, esta definición aplica únicamente a estrellas variables intrínsecas. Las estrellas variables intrínsecas son aquellas cuyo cambio de luminosidad se debe a procesos que ocurren dentro de la misma estrella (a diferencia de estrellas variables extrínsecas como los sistemas binarios o sistemas eclipsantes), como ejemplo se tiene las Cefeidas, RRLyrae, W Virgin, Mira entre otras. El rango de medición comúnmente aceptado para estimación de distancias con Cefeidas es de aproximadamente 25×10^6 parsecs.

4 TRAYECTORIA DE LAS GIGANTES ROJAS (RGB METHOD) Y CUMULOS GLOBULARES

Como se observa en la figura (2), algunas estrellas no se encuentran en la clasificación que se denomina como secuencia principal, en contraste, estos objetos estelares están ubicados en lo que se conoce como la rama de las gigantes rojas. En una galaxia dada, las gigantes más brillantes tienen aproximadamente las mismas magnitudes absolutas, si se considera que estos objetos están prácticamente a la misma distancia, se puede estimar su distancia a partir de la medición de su magnitud aparente. Se plantea que las gigantes rojas tienen una magnitud absoluta de -8 (o -9 para el caso de las gigantes azules), por consiguiente, usando este método se pueden estimar distancias del orden de 15×10^6 parsecs a 30×10^6 parsecs.

Más allá de 30 parsecs, incluso las estrellas más brillantes del tipo espectral O o B (las más brillantes en el diagrama H-R) son demasi-

ado tenues, por lo tanto, se tiene que recurrir a la medición de cúmulos estelares enteros. Los cúmulos globulares mas brillantes tienen una luminosidad total de alrededor magnitud -10, y pueden ser vistos hasta una distancia de 40×10^6 parsecs.

5 MÉTODO DE TULLY-FISHER Y MÉTODO DE FABER-JACKSON

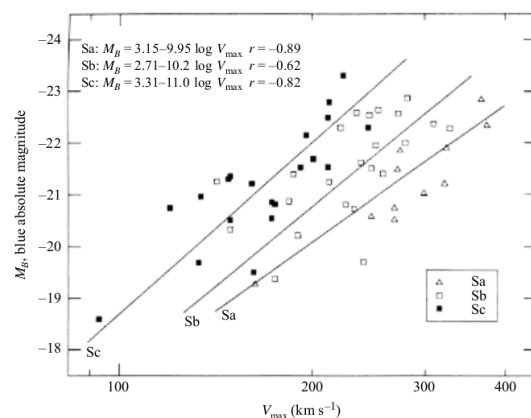


Figura 4: Relación Tully-Fisher para galaxias espirales. Fuente: [CO17]

En 1977 R. Brent Tully y J. Richard Fisher encontraron que la velocidad máxima de rotación de las galaxias espirales está estrechamente relacionada con su luminosidad (4). Cuanto mayor es la longitud de onda del filtro en el que se mide la luminosidad, menor dispersión presenta la relación Tully-Fisher. Esto sucede debido a que la radiación en longitudes de onda más largas se ve menos afectada por la absorción de polvo y por la tasa de formación de estrellas. La relación Tully-Fisher se puede representar de forma matemática como:

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

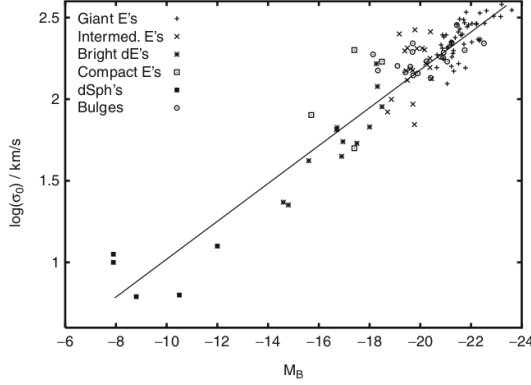


Figura 5: Relación Tully-Fisher para galaxias espirales. Fuente: [Sch06]

Por otro lado, Sandra M. Faber y Robert Earl Jackson propusieron una relación similar para galaxias elípticas la cual relacionaba la luminosidad de una galaxia y la dispersión de la velocidades estelares centrales (5). La relación se expresa como sigue:

$$L \propto V_0^\gamma$$

Estos dos métodos brindan una estimación de distancia de aproximadamente 200×10^6 **par-secs**.

6 SUPERNOVAS

La mayoría de objetos astronómicos utilizados como indicadores físicos de distancia tienen un brillo conocido. Al comparar esta luminosidad conocida con la magnitud aparente del objeto se puede estimar su distancia usando, efectivamente, el modulo de distancia. Estos objetos de brillo conocido se denominan candelas o velas estándar (termino acuñado por Henrietta Swan Leavitt).

No obstante, y como es de imaginar, cuanto más lejos se intenta observar en el firmamento

más difícil es comprender si el objeto que se observa es luminoso debido a sus características intrínsecas, su tamaño, etc.; además, toda medición de magnitud deberá estar sujeta a una corrección por extinción. Así pues, establecer una candela estándar para distancias muy lejanas es una labor bastante compleja.

Se conoce por argumentos teóricos que algunas estrellas en fases muy evolucionadas acaban su existencia en forma de supernovas. Las supernovas son explosiones estelares extremadamente luminosas. Existen varios tipos de supernovas, pero solo las supernovas de tipo IA se utilizan para determinar distancias. Las supernovas de tipo IA se producen cuando la compañera enana blanca en un sistema estelar binario acumula materia hasta el punto en que se vuelve inestable y expulsa sus capas más externas (explota). Se conoce que esta explosión ocurre en cierto punto del proceso de acreción; una vez este limite se alcanza la estrella explotará.

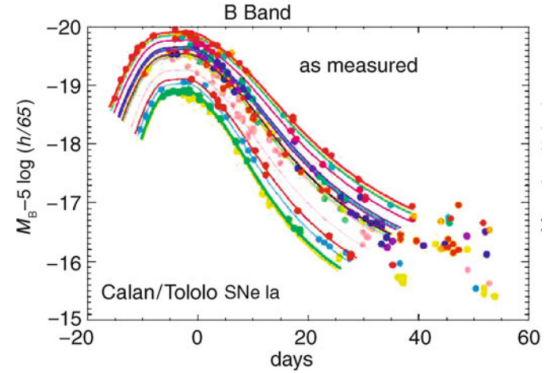


Figura 6: Curvas de luz de las explosiones de supernovas tipo IA. Fuente: [Sch06]

Ahora bien, lo especial de este tipo de eventos (y lo que los hace los candidatos perfectos para establecer una candela estándar cósmica), es que son medianamente predecibles y no cambian. Cada supernova de tipo IA ocurre exactamente después de la misma serie de eventos. Las supernovas de tipo IA emiten la misma cantidad

de luz y producen la misma curva de luz después de la explosión (6).

La forma de la curva de luz es la misma para todas las supernovas de tipo IA, así pues, la cantidad de luz producida después de la explosión es la misma y la disminución del brillo sigue una curva constante. Se puede determinar si se localizó una supernova de tipo IA examinando su curva de luz. Debido a que se conoce la magnitud absoluta máxima alcanzada por todas las supernovas de tipo IA, se puede determinar la distancia a la supernova. Este método tiene un alcance de aproximadamente 1000×10^6 parsecs.

7 ALTO REDSHIFT Y LA LEY DE HUBBLE

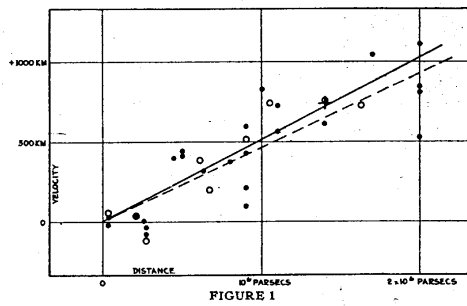


Figura 7: Relación de Hubble entre distancias y velocidad. Fuente: [De 11]

El último peldaño en la escalera de distancias cósmicas aduce a distancias extremadamente lejanas, o, en el sentido cosmológico, muy en el pasado. Objetos tan distantes, del orden de 100×10^6 parsecs o mucho mayores, cuya estimación de distancia con los métodos nombrados anteriormente sería inútil.

A fines de la década de 1920, Edwin Hubble descubrió que las líneas espectrales de las galaxias se desplazaban hacia el rojo en una cantidad

proporcional a sus distancias (7). Si este redshift se debe al efecto Doppler, esto significa que las galaxias se alejan unas de otras con velocidades proporcionales a sus separaciones. En términos de redshift z , esto se expresa como:

$$z = \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda}$$

$$z = (H/c)r$$

$$V = H_0 r$$

Entonces, conociendo la velocidad a la que se aleja el objeto, y estimando un valor para la constante H_0 , se puede calcular la distancia a la que se encuentra. La Ley de Hubble es el medio principal que se tiene para estimar las distancias de los cuásares y las galaxias distantes en las que no se pueden ver los indicadores de distancia individuales.

8 CALIBRACIÓN

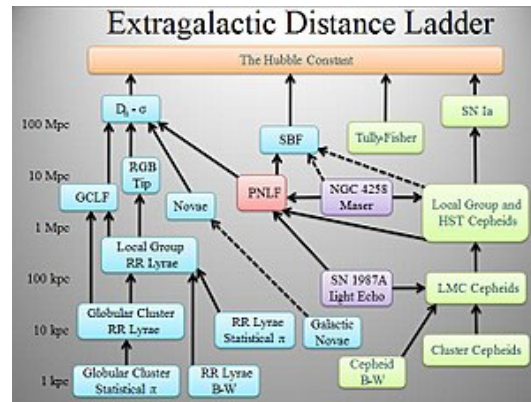


Figura 8: Relación de calibración entre los distintos métodos de estimación de distancias. Fuente: <https://bit.ly/3wwJltW>

Debido a que los métodos de estimación de distancia para objetos más lejanos dependen de

los más cercanos, los métodos más distantes incluyen los efectos de errores en los métodos más cercanos, tanto sistemáticos como estadísticos.

La figura 8 muestra la relación sistemática entre algunos métodos de estimación de distancias y sus correspondientes calibraciones.

- Recuadros verdes: Técnica aplicable a las galaxias en formación estelar.
- Recuadros cian: Técnica aplicable a galaxias de Población II.
- Recuadros violetas: Técnica de la distancia geométrica.
- Recuadros rosa: La técnica de la función de luminosidad de la nebulosa planetaria es aplicable a todas las poblaciones del supercúmulo de Virgo.

- Líneas negras sólidas: escalón de escalera bien calibrado.
- Líneas negras discontinuas: escalón de escalera de calibración incierto.

REFERENCIAS

- [CO17] Bradley W Carroll and Dale A Ostlie. *An introduction to modern astrophysics*. Cambridge University Press, 2017.
- [De 11] Richard De Grijs. *An introduction to distance measurement in astronomy*. John Wiley & Sons, 2011.
- [Kar+07] Hannu Karttunen et al. *Fundamental astronomy*. Springer, 2007.
- [Sch06] Peter Schneider. *Extragalactic astronomy and cosmology: an introduction*. Vol. 146. Springer, 2006.