

¿A qué distancia está el universo? La escalera de distancias cósmicas

QTC-006 · De los quarks a la consciencia

El universo, la vida y cómo llegamos a saberlo

Autor: Juan Segurola

Versión: v1.1 ES · 2 de septiembre de 2026

Perfil epistémico: Problema abierto

Licencia: All Rights Reserved

Resumen del artículo

No existe una única operación llamada medir «la distancia al universo». La astronomía mide distancias a estrellas, galaxias y superficies concretas mediante observables distintos a escalas distintas. La geometría cercana empieza con la paralaje; anclas geométricas en la Gran Nube de Magallanes y NGC 4258 calibran las Cefeidas; las Cefeidas calibran supernovas de tipo Ia; y las supernovas alcanzan el flujo de Hubble suave. Por eso el trabajo moderno de precisión se parece menos a una escalera simple que a una red de calibración con covarianzas y comprobaciones cruzadas. El corrimiento al rojo no es por sí mismo una distancia, y la cosmología utiliza varias definiciones de distancia para observables distintos. El artículo termina con la tensión de Hubble: una discrepancia real y no resuelta entre mediciones de distancia del universo tardío e inferencias del universo temprano bajo Λ CDM base, sin que se haya demostrado todavía ni un error sistemático ni un descubrimiento de nueva física.

En 60 segundos

Los astrónomos no pueden tender una cinta métrica hasta otra galaxia. Infieren la distancia a partir de observables cuya física ha sido calibrada. Una estrella cercana se desplaza respecto al fondo cuando la Tierra se mueve alrededor del Sol: la paralaje proporciona una escala geométrica. Otras anclas geométricas, entre ellas binarias eclipsantes en la Gran Nube de Magallanes y máseres de agua en NGC 4258, calibran estrellas variables Cefeidas. Las Cefeidas calibran después supernovas de tipo Ia, suficientemente brillantes para alcanzar galaxias que participan en la expansión cósmica general. A bajo corrimiento al rojo, distancia y recesión siguen aproximadamente la relación de Hubble–Lemaître, pero el corrimiento al rojo por sí solo no es una distancia a escalas cosmológicas. Hoy la escalera clásica es una red de indicadores, incertidumbres y covarianzas superpuestos. Esa red también revela un problema no resuelto: las mediciones locales, alrededor de $73 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$, siguen por encima de los aproximadamente $67,4 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ inferidos de los datos de Planck bajo el modelo Λ CDM base. La discrepancia sigue sin resolverse y bajo examen activo.

Por qué importa esta pregunta

La distancia es la coordenada oculta de la astronomía. Sin ella, un brillo observado no puede convertirse en luminosidad, un tamaño angular no puede convertirse en tamaño físico y el

corrimiento al rojo de una galaxia no puede situarse con fiabilidad en una historia de expansión cósmica. La escala de distancias también ofrece un ejemplo de manual de cómo funciona la ciencia cuando ninguna medición alcanza por sí sola todo el problema: métodos independientes se solapan, se calibran entre sí y hacen visibles las discrepancias. La tensión de Hubble actual importa porque una pequeña discordancia en esa red puede señalar tanto sistemáticas sutiles como un modelo cosmológico incompleto.

1. ¿Distancia a qué?

La pregunta

Cuando alguien pregunta a qué distancia está «el universo», ¿qué se supone exactamente que debe medirse: una estrella, una galaxia, la superficie que emitió el fondo cósmico de microondas, el horizonte de partículas o un borde imaginado? Son preguntas distintas.

La astronomía suele medir la distancia a un objeto o a una superficie emisora concreta, no una distancia maestra única al universo. Incluso entonces, la palabra distancia cambia de significado con el observable. Para una estrella cercana, la geometría puede relacionar un ángulo con una longitud. Para una candela estándar, se compara el flujo observado con una luminosidad calibrada. En cosmología relativista, la distancia de luminosidad, la distancia de diámetro angular y la distancia comóvil responden a preguntas operativas diferentes.[1]

Por eso la escalera de distancias cósmicas no debe confundirse con el radio del universo observable. Una escalera enlaza escalas geométricas locales con objetos progresivamente más lejanos. Los horizontes y la extensión espacial global pertenecen a otro problema cosmológico. La distinción no es pedante: mezclarlos hace parecer que una técnica debería acabar alcanzando una pared exterior literal. No ocurre así.[1]

Tampoco la distancia se «lee» simplemente a partir del corrimiento al rojo. A bajo corrimiento al rojo, recesión y distancia son aproximadamente proporcionales, pero el corrimiento al rojo cosmológico es un observable que debe interpretarse mediante un modelo o una relación de distancia calibrada. La inferencia cambia con la escala.[1,18]

En qué punto estamos

La primera corrección es conceptual: no existe una sola regla para todo el universo ni una única magnitud de distancia que cada observación esté midiendo en secreto. La astronomía construye distancias a partir de observables distintos cuyos dominios se solapan. La escalera es, por tanto, una cadena de inferencias, no una cinta métrica extendida por el espacio. Su credibilidad depende de lo bien que esas inferencias se calibren entre sí.

2. Geometría: el primer peldaño

La pregunta

¿Puede medirse alguna distancia astronómica solo con geometría, antes de invocar cuánto debería brillar una estrella? Las estrellas cercanas ofrecen el ejemplo más limpio: la propia Tierra proporciona la línea de base y el cielo proporciona el ángulo.

La paralaje trigonométrica anual utiliza el cambio de posición del observador mientras la Tierra se mueve alrededor del Sol. Una estrella cercana parece desplazarse respecto a fuentes de fondo más lejanas. En la definición ideal de ángulo pequeño, una paralaje de un segundo de arco corresponde a un pársec, de modo que la distancia en pársecs es el recíproco de la paralaje en segundos de arco. [2,3]

El resultado de Friedrich Bessel de 1838 para 61 Cygni se convirtió en la primera paralaje estelar ampliamente aceptada. No volvió irrelevantes todos los intentos anteriores o casi simultáneos; mostró, más bien, que las distancias estelares podían ligarse a una línea de base geométrica de forma cuantitativamente convincente.[2]

Gaia ha transformado ese peldaño al medir paralajes para aproximadamente 1.500 millones de fuentes. La precisión, sin embargo, no elimina la calibración. Las paralajes de Gaia contienen pequeños sesgos de punto cero que varían con factores como magnitud, color y posición en el cielo. Con una relación señal/ruido alta, la conversión recíproca habitual funciona extremadamente bien; cuando la incertidumbre llega a ser comparable con la paralaje medida, la inversión simple puede volverse sesgada o patológica y se necesita inferencia probabilística con priors explícitos. [3,4,22]

La escalera moderna también utiliza anclas geométricas más allá de la paralaje de la Vía Láctea. Binarias eclipsantes separadas en la Gran Nube de Magallanes dieron $49,59 \pm 0,09(\text{estat}) \pm 0,54(\text{sist})$ kpc en un análisis de 2019.[6] Megamáseres de agua que orbitan el agujero negro central de NGC 4258 ofrecen otra ruta geométrica; Reid, Pesce y Riess obtuvieron $7,576 \pm 0,082(\text{estat}) \pm 0,076(\text{sist})$ Mpc.[7] Aquí «geométrico» significa que la geometría orbital o eclipsante porta la escala, no que desaparezcan el modelado y las sistemáticas.

En qué punto estamos

El primer peldaño es geoméricamente potente, pero no está mágicamente libre de supuestos. La paralaje convierte un ángulo en distancia solo después de tratar correctamente calibración e incertidumbre, mientras que las binarias eclipsantes y los megamáseres aportan anclas geométricas independientes con sus propios modelos. Su valor reside precisamente en que geometrías distintas pueden converger sobre el mismo peldaño siguiente en lugar de obligar a que toda la escala pase por un único instrumento.

3. El puente de Leavitt

La pregunta

La geometría no puede alcanzar directamente todas las galaxias. ¿Qué clase de estrella podría transportar hacia fuera una escala de distancia calibrada sin fingir que todas las estrellas tienen la misma luminosidad? Una estrella variable cuyo ritmo predice su luminosidad puede convertirse en ese puente.

Henrietta Swan Leavitt estudió estrellas variables en la Pequeña Nube de Magallanes y comunicó en 1912 que las variables de periodo más largo eran sistemáticamente más brillantes. Como las estrellas de aquella muestra estaban aproximadamente a la misma distancia, el patrón de brillo aparente revelaba una relación intrínseca entre periodo de pulsación y luminosidad.[5]

Leavitt trabajó dentro del mismo programa fotográfico de Harvard que también incluyó a mujeres como Annie Jump Cannon y Antonia Maury. La continuidad es útil: QTC-005 siguió ese programa desde la clasificación hacia la física estelar, mientras que aquí la misma cultura de placas conduce desde la medición de estrellas variables hasta la distancia cósmica.[25] Pero el resultado de Leavitt de 1912 no proporcionó por sí mismo un punto cero absoluto moderno. La geometría tuvo que calibrar la relación antes de que las Cefeidas pudieran convertirse en indicadores cuantitativos de distancia.

Por tanto, una Cefeida es estandarizable, no una lámpara con una potencia universal. Su periodo de pulsación predice la luminosidad mediante una relación calibrada, mientras que siguen importando la extinción, la metalicidad, el crowding, la calibración del detector y la banda espectral. Las Cefeidas ancladas geométricamente calibran después Cefeidas en galaxias que han albergado supernovas de tipo Ia, transfiriendo la escala absoluta al siguiente régimen de distancias.[8,10]

En qué punto estamos

El descubrimiento de Leavitt proporcionó un puente, no una regla cósmica autosuficiente. La relación periodo–luminosidad se convierte en herramienta de distancia solo después de que la geometría fije su punto cero y se propaguen los efectos observacionales. Esa distinción importa en toda la escalera: la fuerza de un indicador no consiste en eliminar la calibración, sino en transferirla a un régimen que el método anterior no puede alcanzar.

4. Las supernovas alcanzan el flujo de Hubble

Las Cefeidas son brillantes, pero las supernovas de tipo Ia son órdenes de magnitud más brillantes. Su utilidad procede de otra relación de estandarización. No son explosiones idénticas con una luminosidad máxima exacta; la forma de la curva de luz se correlaciona con el brillo intrínseco, y los análisis modernos también corrigen color y efectos de población. La relación clásica de Phillips hizo explícita esa estandarización empírica.[9]

Cuando una supernova de tipo Ia aparece en una galaxia cuya distancia ya ha sido fijada por Cefeidas, puede calibrarse la luminosidad de la supernova. Supernovas similares en galaxias mucho más lejanas transportan entonces esa escala hacia fuera. Esta es la conocida ruta geometría → Cefeida → supernova de la escalera local de distancias.[8,10]

El alcance importa porque las galaxias muy próximas tienen velocidades peculiares debidas a movimientos gravitatorios locales que pueden constituir una fracción sustancial de su velocidad de recesión. Más adentro en el flujo de Hubble, esos movimientos locales pasan a ser una perturbación fraccional menor. Las supernovas de tipo Ia son suficientemente luminosas para poblar ese régimen y seguir siendo observables en muestras grandes.[8,10]

En qué punto estamos

La escalera clásica abarca ahora tres tipos de inferencia: la geometría establece una escala local, las Cefeidas transfieren esa escala entre poblaciones estelares y las supernovas estandarizadas la llevan al flujo de Hubble. Ningún peldaño es perfecto por sí solo. Su solapamiento permite la siguiente comparación: las distancias de supernovas calibradas pueden confrontarse con el corrimiento al rojo allí donde los movimientos peculiares locales ya no dominan.

5. Corrimiento al rojo, distancia y expansión

A corrimientos al rojo suficientemente bajos, la relación de Hubble–Lemaître es aproximadamente lineal: la velocidad de recesión inferida del corrimiento al rojo aumenta con la distancia mediante la constante de Hubble H_0 . Las velocidades peculiares cercanas añaden dispersión, otra razón para no tratar un corrimiento al rojo muy local como una distancia independiente.[13,14,18]

La historia también está más repartida de lo que sugiere el atajo «Hubble descubrió la expansión». Georges Lemaître derivó en 1927 una relación distancia–velocidad para un universo en expansión. El artículo de Edwin Hubble de 1929 estableció la relación observacional con una muestra compilada mayor. El nombre moderno ley de Hubble–Lemaître refleja esa historia compartida, dentro de una cadena más amplia que incluye las mediciones anteriores de corrimiento al rojo de Slipher y la cosmología relativista.[13,14]

A corrimientos al rojo mayores deja de ser defendible escribir $cz \approx H_0 d$ como si fuese exacto. El corrimiento al rojo cosmológico refleja la evolución del factor de escala a lo largo del trayecto de la luz, y convertirlo en distancia exige un modelo cosmológico o una relación empírica. Incluso entonces hay más de una distancia útil. La distancia de luminosidad se define de modo que el flujo siga $F=L/(4\pi D^2)$; la distancia de diámetro angular convierte un ángulo observado en un tamaño físico transversal; la distancia comóvil describe una separación de coordenadas tratando de forma distinta la expansión cósmica.[1]

Estas magnitudes no son conjeturas rivales sobre una «distancia verdadera» oculta. Son definiciones operativas adecuadas a observaciones distintas en un espacio-tiempo curvo y en expansión.[1]

En qué punto estamos

El corrimiento al rojo extiende la historia de las distancias hacia la cosmología, pero no sustituye la escalera por un número espectral. La relación de Hubble–Lemaître a bajo corrimiento al rojo funciona porque la distancia ya ha sido calibrada de forma independiente. A mayor corrimiento al rojo, la correspondencia depende de la dinámica cosmológica y de la distancia operativa necesaria. Esa dependencia explica por qué el trabajo de precisión debe convertirse en una red de rutas superpuestas y no en una escalera recta.

6. Una escalera que se convirtió en red

La palabra escalera sugiere una única ruta con un peldaño sobre otro. La cosmología de precisión se parece cada vez más a una red. Varias anclas geométricas alimentan distintos indicadores estelares, que conectan con supernovas y otras sondas. Algunas incertidumbres de calibración son independientes; otras se comparten. La estructura de covarianza importa porque añadir más rutas no añade automáticamente información plenamente independiente.[19,20]

La punta de la rama de gigantes rojas, o TRGB, proporciona un indicador estelar alternativo. Las gigantes rojas de baja masa alcanzan una característica de luminosidad muy marcada cuando la ignición del helio cambia su evolución. En poblaciones adecuadas, ese corte puede calibrarse y utilizarse como marcador de distancia, con sus propias dependencias de banda, color, metalicidad, selección de población y punto cero fotométrico.[15,11]

Las sirenas estándar de ondas gravitacionales ofrecen una comprobación todavía más distinta. La forma de onda contiene información sobre la distancia de luminosidad sin una escalera electromagnética de distancias. Pero extraer H_0 sigue exigiendo información de corrimiento al rojo, y el resultado depende de factores como la inclinación de la fuente, la identificación de la galaxia anfitriona y las velocidades peculiares.[16]

Las oscilaciones acústicas bariónicas, o BAO, proporcionan una tercera ruta. El patrón de agrupamiento de las galaxias conserva una escala preferente fijada por el horizonte sonoro del universo temprano. Cuando las BAO se combinan con información de nucleosíntesis del Big Bang y con restricciones adicionales del universo tardío, como supernovas o estructura a gran escala, pueden formar una escalera inversa de distancias e inferir H_0 sin utilizar mapas de anisotropías del CMB ni la escalera local de Cefeidas. Combinaciones independientes de las anisotropías del CMB bajo Λ CDM plano han obtenido H_0 en torno a $67\text{--}68 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$. [26,27] Esta independencia no significa ausencia de supuestos: la calibración del horizonte sonoro sigue dependiendo de la física previa a la recombinación y del marco cosmológico adoptado.

Por eso un programa moderno de distancias se describe mejor como una red de calibración que como una única cadena frágil. Las Cefeidas pueden contrastarse con TRGB u otros indicadores estelares; pueden combinarse anclas geométricas; la calibración de supernovas puede propagarse con covarianzas explícitas; y sondas completamente distintas pueden poner a prueba el resultado desde fuera de la escalera clásica.[19,20]

En qué punto estamos

La escala moderna de distancias gana fuerza gracias a la redundancia. TRGB, Cefeidas, máseres, binarias eclipsantes, supernovas, sirenas estándar y escaleras inversas basadas en BAO no comparten exactamente los mismos supuestos, pero tampoco son perfectamente independientes. La tarea consiste en cartografiar esas covarianzas. Cuando rutas ancladas en épocas distintas convergen —o no lo hacen—, la discrepancia señala qué calibración o qué modelo físico merece la siguiente atención.

7. Dos números que no quieren coincidir

La discrepancia más conocida es numérica. La escalera Cefeidas-supernovas de SH0ES comunicó $H_0 = 73,04 \pm 1,04 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ en 2022.[10] Los datos del fondo cósmico de microondas de Planck, analizados bajo Λ CDM plano base, implican $H_0 = 67,4 \pm 0,5 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$. [12] No son dos instrumentos apuntando a la misma regla. Uno es una medición de distancias calibrada del universo tardío; el otro es una inferencia del universo temprano cuya conversión a H_0 depende del modelo cosmológico.

Esa distinción define la tensión de Hubble con más precisión que la frase «dos mediciones discrepan». La comparación reúne distancias del universo tardío, física del universo temprano y varias rutas independientes, cada una con supuestos y sistemáticas diferentes.[18,19,20,26,27] Combinaciones BAO+BBN independientes de las anisotropías del CMB también han obtenido H_0 alrededor de $67\text{--}68 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ bajo supuestos Λ CDM, de modo que el valor bajo no es un artefacto exclusivo de Planck.[27]

JWST ha puesto a prueba una preocupación importante de la ruta de Cefeidas: el crowding y la mezcla de fuentes no resueltas. Las comparaciones de alta resolución no han revelado en las

muestras estudiadas un sesgo de crowding del HST suficientemente grande para borrar la tensión. [17] Al mismo tiempo, el programa Chicago–Carnegie ha obtenido valores menores de H_0 mediante rutas TRGB y JAGB, con incertidumbres mayores, y su informe de 2025 fue seguido por una fe de erratas publicada que debe acompañar cualquier cita numérica precisa de ese análisis.[11,23] A fecha de 2026, los reanálisis metodológicos y las síntesis comunitarias siguen discrepando sobre qué valor local y qué tratamiento de incertidumbres son más defendibles.[19,20,21]

Si esa discrepancia sobrevive a calibraciones cada vez más independientes, lo que está en juego va más allá de un parámetro. Las inferencias del universo temprano utilizan el horizonte sonoro como escala calibrada. Por ello, las direcciones candidatas de nueva física incluyen cambios en la expansión o en el contenido de radiación antes de la recombinación —como comportamientos semejantes a energía oscura temprana o especies relativistas adicionales— que podrían modificar el horizonte sonoro y desplazar el H_0 inferido.[18,24] Son direcciones de investigación, no explicaciones establecidas. Sigue siendo posible una resolución sistemática ordinaria; también un fallo más interesante del modelo cosmológico base.

En qué punto estamos

La tensión de Hubble es importante precisamente porque su interpretación sigue abierta. No se ha demostrado que la escalera local esté equivocada, Planck no ha medido directamente una regla local y ninguna nueva física propuesta se ha impuesto. Lo que persiste es una discrepancia calibrada entre rutas que interrogan épocas diferentes. Resolverla exige mejores comprobaciones cruzadas, no elegir por preferencia uno de los números.

Lo que sabemos y cómo lo sabemos

- Las distancias a estrellas cercanas pueden ligarse a la geometría de la paralaje anual; la calibración y la inferencia estadística determinan cómo las paralajes medidas se convierten en distancias.[2–4,22]
- Anclas geométricas independientes en la LMC y NGC 4258 calibran la escala estelar de distancias más allá de la paralaje de la Vía Láctea.[6,7]
- Las Cefeidas y las supernovas de tipo Ia son indicadores estandarizables cuyas galaxias anfitrionas solapadas transfieren la escala absoluta hasta el flujo de Hubble.[8–10]
- El trabajo moderno de precisión es una red de covarianzas, no una única escalera, lo que permite que indicadores estelares alternativos, sirenas estándar y escaleras inversas basadas en BAO contrasten el resultado.[15,16,19,20,26,27]
- Un cambio en el valor numérico preferido de H_0 no invalidaría por sí mismo el método: el método es la ruta calibrada desde observables hasta distancias con incertidumbre explícita, mientras que H_0 es un resultado que puede cambiar cuando mejoran calibración y modelado. [18,19]

Lo que todavía no sabemos

- Si la tensión de Hubble actual está dominada por efectos observacionales o sistemáticos no reconocidos, por elecciones de modelado estadístico, por un modelo incompleto del universo temprano o por alguna combinación de ellos.

- Qué indicadores locales de distancia y qué tratamientos de covarianza proporcionarán el H_0 al uno por ciento más estable a medida que JWST y futuros sondeos amplíen la red de calibración.
- Si cambios candidatos anteriores a la recombinación, como energía oscura temprana o radiación adicional, pueden ajustar el conjunto completo de datos cosmológicos en lugar de limitarse a desplazar H_0 .

Qué podría hacernos cambiar de opinión

- Un desplazamiento de calibración reproducible en anclas, Cefeidas, supernovas o indicadores alternativos que lleve rutas independientes del universo tardío a un acuerdo consistente con la inferencia del universo temprano.
- Una convergencia comunitaria de métodos independientes de escalera de distancias, sirenas estándar y escalera inversa sobre un H_0 común con covarianza controlada.
- Evidencia convergente de que Λ CDM base falla específicamente en la física previa a la recombinación, junto con un nuevo modelo que prediga el desplazamiento requerido del horizonte sonoro y sobreviva a otras pruebas cosmológicas.
- Futuros datos de Gaia, JWST, ondas gravitacionales y sondeos que revelen una sistemática antes oculta o, por el contrario, agudicen la discrepancia más allá de la libertad de modelado actual.

Si solo recuerdas una cosa

La distancia cósmica no se lee de un único observable: se construye mediante calibraciones superpuestas, y las discrepancias entre esas calibraciones pueden ser tan informativas como los acuerdos.

Artículos relacionados

- QTC-001 — Todo lo que ves pertenece al pasado
- QTC-005 — ¿Cómo sabemos de qué están hechas las estrellas?
- QTC-011 — La luz más antigua que podemos observar
- QTC-015 — Las estrellas que nunca hemos visto

Referencias

- [1] David W. Hogg. Distance measures in cosmology. 1999 (updated versions online). <https://arxiv.org/abs/astro-ph/9905116>
- [2] Friedrich W. Bessel. On the Parallax of 61 Cygni. 1838. DOI 10.1093/mnras/4.17.152. <https://doi.org/10.1093/mnras/4.17.152>
- [3] L. Lindegren et al. Gaia Early Data Release 3: Parallax bias versus magnitude, colour, and position. 2021. DOI 10.1051/0004-6361/202039653. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202039653>
- [4] Coryn A. L. Bailer-Jones. Estimating distances from parallaxes. 2015. DOI 10.1086/683116. <https://arxiv.org/abs/1507.02105>
- [5] Henrietta S. Leavitt; Edward C. Pickering. Periods of 25 Variable Stars in the Small Magellanic Cloud. 1912. <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1912HarCi.173....1L/abstract>

- [6] G. Pietrzyński et al. A distance to the Large Magellanic Cloud that is precise to one per cent. 2019. DOI 10.1038/s41586-019-0999-4. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-0999-4>
- [7] M. J. Reid; D. W. Pesce; A. G. Riess. An Improved Distance to NGC 4258 and Its Implications for the Hubble Constant. 2019. DOI 10.3847/2041-8213/ab552d. <https://doi.org/10.3847/2041-8213/ab552d>
- [8] Adam G. Riess; Louise Breuval. The Local Value of H_0 . 2024. <https://www.cambridge.org/core/journals/proceedings-of-the-international-astronomical-union/article/local-value-of-h0/75DBDCF94208B500A14452478D7679AE>
- [9] M. M. Phillips. The absolute magnitudes of Type IA supernovae. 1993. DOI 10.1086/186970. <https://doi.org/10.1086/186970>
- [10] Adam G. Riess et al. A Comprehensive Measurement of the Local Value of the Hubble Constant with 1 km s⁻¹ Mpc⁻¹ Uncertainty from the Hubble Space Telescope and the SH0ES Team. 2022. DOI 10.3847/2041-8213/ac5c5b. <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2022ApJ...934L...7R/abstract>
- [11] Wendy L. Freedman et al. Status Report on the Chicago-Carnegie Hubble Program: Measurement of the Hubble Constant Using the Hubble and James Webb Space Telescopes. 2025. DOI 10.3847/1538-4357/adce78. <https://doi.org/10.3847/1538-4357/adce78>
- [12] Planck Collaboration. Planck 2018 results VI. Cosmological parameters. 2020. DOI 10.1051/0004-6361/201833910. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201833910>
- [13] Edwin Hubble. A relation between distance and radial velocity among extra-galactic nebulae. 1929. DOI 10.1073/pnas.15.3.168. <https://doi.org/10.1073/pnas.15.3.168>
- [14] International Astronomical Union. IAU members vote to recommend renaming the Hubble law as the Hubble–Lemaître law. 2018. <https://iauarchive.eso.org/news/pressreleases/detail/iau1812/>
- [15] M. G. Lee; W. L. Freedman; B. F. Madore. The Tip of the Red Giant Branch as a Distance Indicator for Resolved Galaxies. 1993. DOI 10.1086/173334. <https://doi.org/10.1086/173334>
- [16] LIGO Scientific Collaboration; Virgo Collaboration et al. A gravitational-wave standard siren measurement of the Hubble constant. 2017. DOI 10.1038/nature24471. <https://doi.org/10.1038/nature24471>
- [17] Adam G. Riess et al. JWST Observations Reject Unrecognized Crowding of Cepheid Photometry as an Explanation for the Hubble Tension at 8 sigma Confidence. 2024. DOI 10.48550/arXiv.2401.04773. <https://arxiv.org/abs/2401.04773>
- [18] Licia Verde; Nils Schöneberg; Héctor Gil-Marín. A Tale of Many H_0 . 2024. DOI 10.1146/annurev-astro-052622-033813. <https://doi.org/10.1146/annurev-astro-052622-033813>
- [19] Xiaodian Chen; Shu Wang. Distance-ladder Measurements of the Hubble Constant: Recent Progress, Systematics, and Prospect. 2026. DOI 10.1088/1674-4527/ae842e. https://www.raa-journal.org/issues/all/2026/v26n8/SpecialIssueArticles/202607/t20260716_849824.html
- [20] S. Casertano et al. The Local Distance Network: A community consensus report on the measurement of the Hubble constant at ~1% precision. 2026. DOI 10.1051/0004-6361/202557993. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202557993>

- [21] Marcus Högas; Edvard Mörtzell. Physically motivated priors in the local distance ladder significantly reduce the Hubble tension. 2026. DOI 10.1093/mnras/stag724. <https://doi.org/10.1093/mnras/stag724>
- [22] ESA / Gaia DPAC. Gaia Data Release 3 Documentation, release 1.3. 2023–2026 consulted. <https://gea.esac.esa.int/archive/documentation/GDR3/>
- [23] Wendy L. Freedman et al. Erratum: “Status Report on the Chicago-Carnegie Hubble Program (CCHP): Measurement of the Hubble Constant Using the Hubble and James Webb Space Telescopes” (2025, ApJ, 985, 203). 2025. DOI 10.3847/1538-4357/ae146d. <https://doi.org/10.3847/1538-4357/ae146d>
- [24] Eleonora Di Valentino et al. In the realm of the Hubble tension—a review of solutions. 2021. DOI 10.1088/1361-6382/ac086d. <https://doi.org/10.1088/1361-6382/ac086d>
- [25] Center for Astrophysics | Harvard & Smithsonian. Henrietta Swan Leavitt / Harvard Plate Stacks historical record. consulted 2026. <https://platestacks.cfa.harvard.edu/women-at-hco/henrietta-swan-leavitt>
- [26] Pablo Lemos; Elizabeth Lee; George Efstathiou; Steven Gratton. Model independent $H(z)$ reconstruction using the cosmic inverse distance ladder. 2019. DOI 10.1093/mnras/sty3082. <https://doi.org/10.1093/mnras/sty3082>
- [27] T. M. C. Abbott et al.; Dark Energy Survey and South Pole Telescope Collaborations. Dark Energy Survey Year 1 Results: A Precise H_0 Estimate from DES Y1, BAO, and D/H Data. 2018. DOI 10.1093/mnras/sty1939. <https://doi.org/10.1093/mnras/sty1939>