

# Edades oscuras, primeras estrellas, galaxias tempranas y reionización

CHO-005 · Cosmic History and Its Observers

Una historia científica cronológica desde el universo temprano hasta el presente

Identificador: CHO-005 · Versión: v1.0 · Autor: Juan Segurola

Idioma: Español

Función del artículo: Columna cronológica

Ventana del artículo: [0.38 Myr, 1.2 Gyr] tBB

Corte de eventos: 11 septiembre 2026 · Corte de búsqueda bibliográfica: 12 septiembre 2026

Tipo de documento: Síntesis académica; no es investigación primaria y no ha sido revisado por pares

## Resumen estructurado

**Contexto.** El desacoplamiento de fotones dejó un Universo mayoritariamente neutro cuyas pequeñas variaciones de densidad siguieron creciendo. En la frontera inicial no había estrellas, pero la distribución de materia ya contenía las condiciones gravitatorias a partir de las cuales podía formarse estructura luminosa.

**Pregunta.** ¿Cómo se transformó el gas neutro en las primeras poblaciones estelares y galácticas, y cómo transformó su radiación el medio intergaláctico?

**Evidencia y método.** La historia se reconstruye mediante simulaciones cosmológicas, física del enfriamiento atómico y molecular, espectroscopia de galaxias a alto corrimiento al rojo, absorción en cuásares, polarización del fondo cósmico de microondas y búsquedas de radiación de 21 cm desplazada al rojo. Estas sondas restringen integrales, entornos y fases diferentes; ninguna proporciona una película completa de los primeros mil millones de años.

**Resultado.** Los halos de materia oscura se ensamblaron jerárquicamente. En algunos minihalos tempranos, el gas primordial se enfrió mediante hidrógeno molecular y colapsó hacia la formación estelar. Las propiedades y la cronología de las estrellas de Población III siguen dependiendo del modelo y no se observa ninguna primera estrella individual. Hoy se han confirmado galaxias a corrimientos al rojo cercanos y superiores a 14, pero los récords son los objetos más tempranos detectados hasta ahora, no necesariamente los primeros que existieron. La radiación ultravioleta y otras emisiones energéticas produjeron regiones ionizadas en expansión que acabaron solapándose, haciendo de la reionización un proceso extendido, parcheado y dependiente de la definición.

**Conclusión.** A los 1.2 Gyr, el artículo transmite de forma conservadora a CHO-006 un medio intergaláctico en el que los modelos de fondo homogéneo describen la transmisión en  $z \leq 5.2$ , mientras se observa que fluctuaciones relacionadas con la reionización persisten al menos hasta  $z = 5.3$ ; también existen galaxias establecidas, formación estelar continuada y una red cósmica en desarrollo. El estado del observador permanece en N0.

**Palabras clave:** edades oscuras cósmicas; Población III; primeras estrellas; galaxias tempranas; reionización; JWST; cosmología de 21 cm

## 1. Orientación cronológica

CHO-005 abarca [0.5 Myr, 1.2 Gyr] después de la frontera formal de coordenadas del Big Bang caliente. Su frontera BOOK inferior se sitúa después del desacoplamiento de fotones. La frontera superior es un límite conservador de contención elegido para incluir la historia completa de reionización, incluidas regiones neutras tardías y la incertidumbre sobre qué significa «completa».

El intervalo no se divide por fechas exactas de nacimiento. La primera nube colapsante, la primera fuente de fusión sostenida, el primer sistema estelar asociado gravitatoriamente, el primer objeto visible para un sondeo concreto y la primera gran burbuja ionizada son candidatos distintos. Los volúmenes de simulación muestrean probabilidad

des; las observaciones muestrean luminosidad, longitud de onda, posición y selección. Por ello, las afirmaciones de prioridad se tratan como distribuciones u observaciones relativas al registro, no como fechas exactas de nacimiento.

## 2. Estado inicial heredado de CHO-004

CHO-004 transmite hidrógeno y helio neutros, fotones reliquia que se propagan libremente, materia oscura y perturbaciones de densidad. Los bariones han escapado del fuerte arrastre fotónico que antes se oponía a su colapso. La gravedad actúa ahora sobre un fondo dominado por materia, pero el gas no puede caer simplemente hasta escalas arbitrariamente pequeñas: la presión, el momento angular, la química, la radiación y, más tarde, la realimentación regulan el colapso.

El adjetivo «oscuro» se refiere a la ausencia de estrellas y galaxias luminosas ordinarias, no a una ausencia de radiación o actividad física. El CMB persiste; el hidrógeno neutro presenta una transición hiperfina; la materia oscura se agrupa; el gas fluye hacia pozos de potencial. La era es difícil de observar porque sus señales principales son débiles, están desplazadas al rojo y entrelazadas con primeros planos mucho más brillantes.

## 3. De las perturbaciones primordiales a halos colapsados

La materia oscura no colisional puede ensamblar estructuras gravitatorias sin radiar energía térmica. Se forman halos pequeños que se fusionan dentro de entornos mayores, produciendo una red de nodos sobredensos, filamentos, láminas y regiones subdensas. El gas bariónico cae en estos potenciales, se comprime y calienta, y después debe transferir energía antes de continuar contrayéndose.

La palabra «jerárquico» describe una tendencia estadística en los modelos de materia oscura fría, no una regla según la cual cada objeto pequeño sobreviva intacto ni que las galaxias se construyan por una única vía. Contribuyen la acreción suave, las fusiones, el despojo por mareas, los choques y la realimentación. Los picos raros de alta densidad pueden evolucionar antes que el promedio cósmico, de modo que «cuándo se formó el primer halo» también depende del volumen considerado.

## 4. Enfriamiento del gas primordial

El gas que contiene solo los productos de la nucleosíntesis del Big Bang carece de los canales de enfriamiento por líneas metálicas y polvo habituales en nubes posteriores. El hidrógeno molecular puede formarse mediante redes de reacciones en fase gaseosa y radiar energía a través de transiciones rotacionales-vibracionales. En simulaciones, esto permite que el gas más denso de algunos minihalos se contraiga hasta un núcleo protoestelar central [1,2].

El cálculo atraviesa rangos dinámicos enormes. Debe representar condiciones iniciales cosmológicas, colapso de materia oscura, química fuera del equilibrio, enfriamiento, turbulencia, acreción, fragmentación, campos magnéticos y radiación de la protoestrella en crecimiento. Las primeras simulaciones establecieron una ruta plausible hacia el colapso, pero no determinaron una masa estelar primordial universal. Los cálculos posteriores resuelven cada vez mejor la fragmentación y la realimentación, pero la función inicial de masas de Población III sigue siendo incierta.

Las velocidades de streaming entre bariones y materia oscura, heredadas de la dinámica acústica previa al desacoplamiento, pueden retrasar la acumulación de gas en algunos halos. La radiación de fondo puede disociar moléculas. Una vez formadas las estrellas, los fotones ionizantes, las supernovas y el enriquecimiento pueden suprimir o promover la formación estelar posterior dependiendo de distancia, densidad, cronología y profundidad del halo. Por ello, una única fecha de primera estrella es científicamente más débil que una distribución de probabilidad condicional.

## 5. Población III sin una primera estrella fotografiada

Población III designa una población estelar teórica libre de metales. No designa a toda estrella muy antigua, y «sin metales» es una condición química inicial, no una etiqueta observada directamente para una estrella primordial individual. Las estrellas masivas son plausibles porque el gas primordial caliente tiene una escala característica de fragmentación relativamente grande, pero afirmar que todas las primeras estrellas fueron extremadamente masivas ya no está justificado sin cualificaciones de modelo.

Ninguna observación confirmada identifica la primera estrella que existió. Las firmas candidatas son indirectas: patrones de abundancias inusuales en estrellas posteriores, rendimientos de supernovas por inestabilidad de pares, espectros ionizantes, remanentes de agujeros negros o fondos integrados. Cada firma es degenerada con poblaciones estelares posteriores y con procesamiento astrofísico. CHO-007 es responsable de los canales de producción de elementos; CHO-005 utiliza el enriquecimiento únicamente como realimentación sobre el enfriamiento y el cambio poblacional.

Las primeras estrellas alteraron rápidamente su entorno. Los fotones ultravioleta ionizaron hidrógeno localmente y disociaron hidrógeno molecular a mayores distancias. Las muertes estelares inyectaron energía cinética y núcleos recién producidos. Los remanentes pudieron sembrar agujeros negros. Estos efectos hicieron del amanecer cósmico una transición ecológica acoplada y no una sucesión limpia de una generación estelar a la siguiente.

## 6. Qué cuenta como galaxia temprana

Una galaxia no se define únicamente por la presencia de una estrella. Es un sistema bariónico y de materia oscura organizado gravitatoriamente, con alguna combinación de estrellas, gas, ensamblaje continuado y coherencia espacial. A corrimientos al rojo extremos, las observaciones suelen resolver únicamente distribuciones compactas de luz y espectros. Masa estelar, edad, polvo, tasa de formación estelar, magnificación por lente y contribución de núcleo activo se infieren mediante modelos.

La espectroscopia de JWST ha desplazado de forma drástica la frontera observada. Carniani y colaboradores confirmaron dos sistemas luminosos cerca de corrimiento al rojo 14, incluido JADES-GS-z14-0 [4]. Naidu y colaboradores comunicaron posteriormente MoM-z14 en  $z_{\text{spec}} = 14.44 \pm 0.02$ , correspondiente en su conversión cosmológica a aproximadamente 280 millones de años después de la frontera formal [3]. El estudio está publicado en *The Open Journal of Astrophysics*. La frontera mantenida también incluye PAN-z14-1 en  $z_{\text{spec}} = 13.53$  [13], JADES-GS-z13-0 en  $z_{\text{spec}} = 13.20 +0.03/-0.04$  [14], UNCOVER-z13 en  $z_{\text{spec}} = 13.079 +0.013/-0.001$  [10] y JADES-GS-z13-1-LA cerca de  $z = 13.0$  [11,12]. No se identificó ningún sistema confirmado espectroscópicamente por encima de MoM-z14 en la literatura elegible al corte del 12 de septiembre; esto sigue siendo un resultado de ausencia de evidencia, no evidencia de que no existiera ningún sistema anterior.

Son los objetos más tempranos *detectados y respaldados espectroscópicamente* dentro de programas y criterios concretos. No pueden llamarse las primeras galaxias. Sistemas más débiles pudieron precederlos; el volumen de sondeo y la selección favorecen objetos luminosos; el corrimiento al rojo mide cuándo se emitió la luz observada, no cuándo se formó el primer constituyente del sistema. Un brillo sorprendente puede exigir eficiencias revisadas, formación estelar episódica, poblaciones estelares inusuales, núcleos activos, evaluación de lente o cambios en las estimaciones de abundancia. Por sí solo no falsifica el marco cosmológico.

## 7. Burbujas ionizadas y un medio intergaláctico cambiante

Los fotones energéticos por encima del umbral de ionización del hidrógeno escapan de algunas galaxias y crean regiones ionizadas. La recombinación dentro de gas denso consume fotones, mientras que la expansión, el agrupamiento de fuentes, la dureza espectral, las fracciones de escape y la realimentación controlan el crecimiento de las burbujas. Los núcleos galácticos activos y otras fuentes pueden contribuir, especialmente a ciertas luminosidades y épocas, pero el presupuesto fraccional sigue en investigación.

La reionización es, por tanto, topológica además de temporal. Las regiones alrededor de fuentes agrupadas pueden ionizarse antes; sistemas densos autoapantallados pueden permanecer neutros después de cambiar sus alrededores. Las burbujas se expanden y solapan, pero persiste hidrógeno neutro residual en galaxias y absorbentes. En  $z \approx 13$ , la brillante emisión Lyman-alfa de JADES-GS-z13-1-LA se interpretó como indicio de una región localmente ionizada alrededor de una fuente ionizante intensa, y espectroscopia más profunda de 2026 reafirmó la línea y el continuo azul [11,12]. Es evidencia de ionización local temprana, no de un medio intergaláctico globalmente ionizado. «Finalización» requiere un umbral operacional, como una pequeña fracción neutra promediada en volumen, no la ionización de cada átomo de hidrógeno.

CHO-005 es responsable de toda esta transición. CHO-006 puede heredar sus efectos sobre el suministro posterior de gas y los entornos galácticos, pero no debe volver a narrar la cronología de ionización como un segundo propietario.

## 8. Evidencia de sondas integradas y de línea de visión

La polarización del CMB a grandes escalas restringe la profundidad óptica Thomson producida por electrones libres entre el desacoplamiento y el presente. El análisis de referencia Planck 2018 proporciona  $\tau = 0.0544 \pm 0.0073$  [8]. La profundidad óptica es una integral: historias de ionización diferentes pueden producir totales similares. Convertirla en un corrimiento al rojo instantáneo de reionización es un resumen de modelo, no una medición de un interruptor global repentino. La corrección de 2021 revisó límites sobre una contribución ionizada temprana, por lo que las afirmaciones anteriores derivadas de esos límites no se conservan silenciosamente.

Los espectros de cuásares y galaxias de alto corrimiento al rojo sondan hidrógeno neutro a lo largo de líneas de visión concretas. La profundidad óptica de Gunn-Peterson se hace grande incluso para una pequeña fracción neutra, lo que convierte la absorción completa en un indicador sensible pero en un medidor lineal deficiente una vez saturada [5]. En el análisis XQR-30 de 67 líneas de visión de cuásares, las simulaciones con fondo ultravioleta homogéneo concuerdan con la distribución de transmisión hasta  $z \leq 5.2$ , mientras que el exceso de dispersión en  $z \geq 5.4$  indica fluctuaciones relacionadas con la reionización que persisten al menos hasta  $z = 5.3$ , aproximadamente 1.1 Gyr en esa cosmología [9]. Las alas de amortiguamiento, los picos de transmisión, la atenuación de líneas de emisión y las estadísticas de huecos oscuros añaden información, aunque dependen de los entornos de las fuentes y de sus espectros intrínsecos.

Las funciones de luminosidad de galaxias estiman la abundancia de fuentes emisoras de ultravioleta. Convertir luz en un presupuesto ionizante requiere extrapolar por debajo de los límites de detección, asumir poblaciones estelares, eficiencia de producción de fotones y una fracción de escape. La concordancia entre estas rutas es evidencia de una historia general, no prueba de un censo único de fuentes.

## 9. La oportunidad y la advertencia de 21 cm

La transición hiperfina del hidrógeno neutro, desplazada al rojo hasta longitudes de onda métricas, puede en principio cartografiar la historia térmica y de ionización a lo largo del amanecer cósmico. Su brillo respecto al fondo de radio depende de la fracción neutra, la temperatura del gas, la densidad y la temperatura de espín fijada por colisiones y radiación. Los experimentos globales buscan una característica espectral de todo el cielo; los interferómetros buscan fluctuaciones.

EDGES comunicó un perfil de absorción aplanado centrado cerca de 78 MHz, asociado habitualmente bajo una interpretación cosmológica con corrimiento al rojo cercano a 17 [6]. La amplitud comunicada motivó modelos con gas inesperadamente frío o un fondo de radio reforzado. SARAS 3 comunicó después una no detección que desfavorecía clases de perfiles compatibles con el resultado de EDGES bajo su análisis [7]. Los primeros planos son muchos órdenes de magnitud más brillantes que el objetivo y la cromaticidad instrumental puede acoplar estructura del cielo a los espectros.

CHO registra por ello una medición controvertida, no un descubrimiento establecido de las primeras estrellas a un corrimiento al rojo exacto. Una futura detección coherente entre instrumentos y mediciones complementarias del espectro de potencia podría transformar la cronología. Hasta entonces, el desacuerdo es científicamente informativo pero no está resuelto.

## 10. Capacidades del observador presentes

Todo el intervalo es N0. Las estrellas procesan radiación y materia; las galaxias conservan registros; el hidrógeno neutro puede codificar historia térmica. Nada de esto demuestra detección biológica, uso de información o conciencia. «Observador» en CHO no es sinónimo de cualquier sistema que interactúe físicamente.

Los telescopios posteriores actúan como observadores retrospectivos. Sus funciones de selección importan: una galaxia brillante aparece en un catálogo porque su luz sobrevive, entra en la huella de un sondeo, supera umbrales de detección y permite una inferencia de corrimiento al rojo. La frontera observada es por tanto en parte una propiedad de instrumentos y métodos, no una etiqueta móvil para el objeto objetivamente primero.

## 11. Contingencia y contemporáneos

El amanecer cósmico no estuvo dirigido hacia observadores posteriores. Su trayectoria dependió del agrupamiento de materia oscura, la química molecular, las abundancias primordiales, los fondos de radiación, la realimentación y

la ubicación azarosa dentro de la estructura a gran escala. Muchos minihalos pudieron permanecer oscuros. Algunas estrellas tempranas pudieron colapsar silenciosamente; otras explotaron y alteraron regiones extensas. Coexistieron entornos ionizados y neutros.

No existe un único lugar representativo cuya historia equivalga a la del Universo. En un tiempo cósmico determinado, una región podía albergar una galaxia luminosa mientras otra permanecía químicamente prístina. La cronología debe, por tanto, incorporar variación espacial en lugar de narrar la época como una marcha global uniforme.

## 12. Interpretaciones en competencia y clases de afirmaciones

Entre las incertidumbres están la distribución de masas de Población III, los canales de semillas de agujeros negros, la abundancia y ciclos de actividad de galaxias débiles, las fracciones de escape ionizante, el papel de núcleos activos, la temperatura del medio intergaláctico y la interpretación de objetos muy brillantes en  $z > 10$ . Las restricciones de reionización suelen aportar información mutua, pero no son intercambiables.

| Clase                    | Uso en CHO-005                                                                                 |
|--------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|
| E1 medido                | Espectros, imágenes, mediciones cielo-frecuencia, transmisión de cúasares                      |
| E2 reconstruido          | Corrimientos al rojo, luminosidades, profundidad óptica, fracciones neutras                    |
| E3 dependiente de modelo | Distribuciones de primeras estrellas, presupuestos ionizantes, conversiones temporales         |
| E4 controvertido         | Característica EDGES, algunas interpretaciones de galaxias extremas, contribuciones de fuentes |
| E5 especulativo          | Mecanismos exóticos de enfriamiento o de fondo de radio no confirmados                         |

## 13. Fronteras, estado final y transición

CHO-005 no es responsable de la recombinación primordial, de los canales de producción de elementos ni de la evolución galáctica posterior a la reionización. Es responsable de las edades oscuras, el problema de las primeras fuentes luminosas, las galaxias tempranas y todo el intervalo de reionización dentro de su envoltente BOOK.

A 1.2 Gyr, la transición operacional no es «cada átomo ionizado». Significa que los modelos de fondo homogéneo describen la distribución de transmisión XQR-30 en  $z \leq 5.2$ , mientras el artículo conserva las fluctuaciones tardías observadas en  $z = 5.3$  como parte de las etapas finales de la reionización [9]. Las galaxias contienen múltiples poblaciones estelares; la realimentación y el enriquecimiento han cambiado el enfriamiento del gas; existen agujeros negros y remanentes estelares; y los entornos a gran escala moldean cada vez más el ensamblaje. CHO-006 hereda estas condiciones en dirección a la frontera del Sistema Solar.

## Referencias

1. Abel, T., Bryan, G. L., and Norman, M. L. “The Formation of the First Star in the Universe.” *Science* 295, 93–98 (2002). <https://doi.org/10.1126/science.1063991>

2. Bromm, V., and Larson, R. B. “The First Stars.” *Annual Review of Astronomy and Astrophysics* 42, 79–118 (2004). <https://doi.org/10.1146/annurev.astro.42.053102.134034>

3. Naidu, R. P., et al. “A Cosmic Miracle: A Remarkably Luminous Galaxy at  $z_{\text{spec}}=14.44$  Confirmed with JWST.” *The Open Journal of Astrophysics* (2026). <https://doi.org/10.33232/001c.156033>

4. Carniani, S., et al. “Spectroscopic confirmation of two luminous galaxies at a redshift of 14.” *Nature* 633, 318–322 (2024). <https://doi.org/10.1038/s41586-024-07860-9>

5. Fan, X., Carilli, C. L., and Keating, B. “Observational Constraints on Cosmic Reionization.” *Annual Review of Astronomy and Astrophysics* 44, 415–462 (2006). <https://doi.org/10.1146/annurev.astro.44.051905.092514>

6. Bowman, J. D., et al. “An absorption profile centred at 78 megahertz in the sky-averaged spectrum.” *Nature* 555, 67–70 (2018). <https://doi.org/10.1038/nature25792>

7. Bevens, H. T. J., et al. “Astrophysical constraints from the SARAS 3 non-detection of the cosmic dawn sky-averaged 21-cm signal.” *Nature Astronomy* 6, 1473–1483 (2022). <https://doi.org/10.1038/s41550-022-01825-6>

8. Planck Collaboration. “Planck 2018 results. VI. Cosmological parameters.” *Astronomy & Astrophysics* 641, A6 (2020); corrigendum 652, C4 (2021). <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201833910>

9. Bosman, S. E. I., et al. “Hydrogen reionization ends by  $z = 5.3$ : Lyman-alpha optical depth measured by the XQR-30 sample.” *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 514, 55–76 (2022). <https://doi.org/10.1093/mnras/stac1046>

10. Wang, B., et al. "UNCOVER: Illuminating the Early Universe—JWST/NIRSpec Confirmation of  $z > 12$  Galaxies." *The Astrophysical Journal Letters* 957, L34 (2023). <https://doi.org/10.3847/2041-8213/acfe07>
  11. Witstok, J., et al. "Witnessing the onset of reionization through Lyman-alpha emission at redshift 13." *Nature* 639, 897–901 (2025). <https://doi.org/10.1038/s41586-025-08779-5>
  12. Witstok, J., et al. "An OASIS of Lyman-alpha within a neutral intergalactic desert: reaffirmed line and blue continuum reveal efficient ionising agents at  $z = 13$ ." arXiv:2603.18775 (2026). <https://doi.org/10.48550/arXiv.2603.18775>
  13. Donnan, C. T., et al. "Spectroscopic Confirmation of a Large and Luminous Galaxy with Weak Emission Lines at  $z = 13.53$ ." arXiv:2601.11515 (2026). Journal DOI: <https://doi.org/10.3847/1538-4357/ae5c05>
  14. Hainline, K. N., et al. "Searching for Emission Lines at  $z > 11$ : The Role of Damped Lyman-alpha and Hints About the Escape of Ionizing Photons." arXiv:2404.04325v2 (2024). <https://doi.org/10.48550/arXiv.2404.04325>
- 

## Declaración

Este documento es una síntesis académica; no es investigación primaria y no ha sido revisado por pares. Juan Segurola es el único autor. Aprobó el texto final y es responsable de su contenido.