

La formación de los primeros núcleos

CHO-003 · Cosmic History and Its Observers

Una historia científica cronológica desde el universo temprano hasta el presente

Identificador: CHO-003 · Versión: v1.0 · Autor: Juan Seguro

Idioma: Español

Función del artículo: Superposición

Ventana del artículo: [1 s, 20 min) 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. Los «primeros núcleos» no fueron objetos individuales observados con horas de nacimiento registradas. Fueron una población cambiante reconstruida a partir de la historia de expansión, las interacciones débiles, las tasas de reacción nuclear y la evidencia de abundancias posteriores. CHO-003 trata la nucleosíntesis del Big Bang como una superposición desde aproximadamente un segundo hasta menos de veinte minutos después de la frontera formal de coordenadas del Big Bang caliente.

Mecanismo. Las reacciones débiles primero establecen y después dejan de mantener la razón neutrón-protón. La expansión y el decaimiento de neutrones siguen alterando el inventario disponible de neutrones. El deuterio no se acumula en cuanto la temperatura cae por debajo de su energía de enlace de 2.23 MeV porque los fotones superan enormemente en número a los bariones y su cola energética lo fotodisocia con gran eficacia. Cuando la temperatura desciende aproximadamente a 0.1 MeV, el deuterio puede sobrevivir en cantidad y una red rápida construye helio-4, deuterio, helio-3, tritio y núcleos de masa 7 antes de que la disminución de densidad congele las reacciones.

Evidencia. Las secciones eficaces de laboratorio y la vida media del neutrón restringen la red; los datos del CMB restringen la densidad bariónica por una vía independiente [7]; los sistemas de absorción y emisión de baja metalicidad y las atmósferas de estrellas antiguas proporcionan evidencia posterior de abundancias. La síntesis controlada PDG 2026 recomienda $10^5(D/H)_P = 2.508 \pm 0.029$. El valor de referencia de Cooke se distingue en la sección 7. Un cálculo de precisión citado aquí predijo $\Upsilon_P = 0.24709 \pm 0.00017$. La síntesis controlada PDG 2026 recomienda un valor observacional $\Upsilon_P = 0.245 \pm 0.003$, advirtiendo al mismo tiempo que los conjuntos de datos solapados y los sistemáticos impiden una combinación simple ponderada por precisión. El deuterio proporciona una prueba precisa y dependiente de las entradas de la densidad bariónica del CMB; el helio concuerda con menor precisión, mientras que el litio-7 sigue siendo discrepante [1].

Conclusión. La BBN es una prueba rigurosa y exitosa de un Universo temprano caliente, pero su concordancia no es exacta ni independiente de supuestos. Importan las tasas nucleares, los sistemáticos observacionales, el procesamiento estelar, la física de neutrinos y la expansión. El intervalo permanece en N0 dentro del marco de observador de CHO: los núcleos supervivientes son trazas utilizadas por observadores mucho posteriores, no evidencia de consciencia contemporánea.

Palabras clave: nucleosíntesis del Big Bang; primeros núcleos; cuello de botella del deuterio; helio-4; abundancias primordiales; densidad bariónica; problema del litio; capacidades del observador

1. Orientación cronológica

CHO-003 ocupa la superposición declarada [1 s, 20 min) de tBB. Se solapa con CHO-002 porque los procesos físicos se solapan. El desacoplamiento de neutrinos, la aniquilación electrón-positrón, la conversión débil neutrón-protón y el ensamblaje nuclear no pueden cortarse en compartimentos de manual que no interactúan. La responsabilidad temática proporciona la separación: CHO-002 es responsable del fondo térmico de partículas, mientras que CHO-003 lo es de la red de reacciones nucleares y de sus consecuencias sobre las abundancias.

El intervalo se ordena por temperatura y estado de reacción, no por segundos exactos:

Etapa	Orientación de temperatura	Orientación de tiempo cósmico	Significado histórico
Desviación de las tasas débiles	alrededor del régimen de MeV	en términos generales, cerca de un segundo	la razón neutrón-protón deja de seguir exactamente el equilibrio
Intervalo de decaimiento de neutrones	enfriamiento hacia 0.1 MeV	segundos a minutos	se pierden neutrones libres antes del ensamblaje eficiente
Supervivencia del deuterio	aproximadamente 0.1 MeV	inicio a escala de minutos	la red puede retener deuterio y avanzar rápidamente hacia helio
Red activa de núcleos ligeros	por debajo de la temperatura del cuello de botella	primeros minutos	evolucionan las abundancias de D, masa 3, helio-4 y masa 7
Congelación efectiva	temperatura y densidad decrecientes	dentro del límite de contención de 20 minutos	las tasas de reacción se vuelven demasiado lentas para modificar materialmente los rendimientos

Son intervalos de proceso. La expresión «los primeros tres minutos», habitual en las revisiones, resume dónde se determina la mayor parte de las abundancias estándar. No significa que todas las reacciones comiencen a un segundo y terminen exactamente a los 180 segundos. El límite de 20 minutos del artículo contiene la convergencia numérica más lenta sin afirmar que allí ocurra un interruptor físico.

2. Estado inicial heredado de CHO-002

CHO-002 transmite un entorno en expansión dominado por radiación que contiene fotones, un fondo de neutrinos, electrones y positrones en abundancia decreciente, y materia bariónica dominada por neutrones y protones. La propia asimetría materia-antimateria se heredó de CHO-001 y sigue sin explicación mecanística. La BBN utiliza la densidad bariónica superviviente como entrada; no explica su origen.

A temperatura suficientemente alta, las reacciones débiles interconvierten neutrones y protones con la rapidez necesaria para que su razón permanezca próxima al valor de equilibrio. A medida que el Universo se expande y enfría, la tasa débil pierde frente a la tasa de expansión. La congelación es gradual. Persisten reacciones residuales y el decaimiento beta de neutrones libres reduce la fracción de neutrones antes de que el ensamblaje nuclear estable se vuelva eficiente. Como casi todos los neutrones supervivientes pueden incorporarse después al helio-4, la historia de las tasas débiles y la vida media del neutrón influyen fuertemente en el rendimiento de helio.

3. Qué controla la red

La BBN estándar combina expansión relativista general, física débil del Modelo Estándar, distribuciones termodinámicas y tasas de reacción nuclear medidas o evaluadas. Sus entradas principales son compactas, pero no triviales.

La razón barión-fotón controla con qué frecuencia se encuentran los núcleos dentro de un baño de fotones abrumador. La tasa de expansión controla el tiempo disponible para las reacciones y depende de la densidad de energía de radiación, incluidos los neutrinos y cualquier especie relativista adicional. Las tasas débiles y la vida media del neutrón controlan la historia neutrón-protón. Las secciones eficaces nucleares controlan cómo fluye el material a través de deuterio e intermediarios de masa 3 hacia helio-4 y los canales de masa 7.

La red no es una marcha recta hacia arriba por la tabla periódica. Es un conjunto acoplado de reacciones directas e inversas en un entorno que cambia con rapidez. Al principio, la fotodisociación impide el ensamblaje neto. Más tarde, la disminución de densidad y las barreras de Coulomb impiden que las reacciones continúen indefinidamente. El resultado es una ventana estrecha en la que los núcleos ligeros pueden construirse de manera eficiente.

4. El cuello de botella del deuterio

El deuterón está ligado por unos 2.23 MeV, pero una temperatura apenas inferior a esa energía no basta para que se acumule deuterio. Los fotones superan enormemente en número a los bariones. Incluso cuando la energía media de los fotones es menor, la cola de alta energía contiene suficientes fotones por encima del umbral de disociación para destruir el deuterio recién formado. La condición pertinente depende tanto de la razón fotón-barión como de la energía de enlace.

Solo después de enfriarse hasta aproximadamente 0.1 MeV la fotodisociación se vuelve lo bastante ineficaz para que se forme una población sostenida de deuterio [1] [2]. Llamar a este momento el del «primer deuterio» seguiría siendo engañoso. Pueden formarse antes deuterones transitorios y ser destruidos. Lo que cambia es el balance: el deuterio se convierte en un puente de reacción viable en lugar de una excepción de vida corta.

Una vez abierto el cuello de botella, las reacciones de dos cuerpos procesan rápidamente neutrones y protones a través del deuterio y de núcleos de masa 3. Entre los ejemplos están $D(p,\gamma)^3\text{He}$, las ramas deuterio-deuterio que conducen a helio-3 o tritio y reacciones posteriores que alimentan helio-4. La notación de reacciones resume cambios de especies nucleares; no implica que el plasma fuera espacialmente uniforme hasta el nivel de cada colisión. La BBN estándar supone homogeneidad a gran escala para el cálculo y puede extenderse para poner a prueba desviaciones.

5. Helio-4, núcleos ligeros residuales y huecos de masa

El helio-4 está extraordinariamente ligado. Una vez que la red funciona, la mayoría de los neutrones supervivientes se incorporan al helio-4. Por ello, una estimación simple basada en el recuento de neutrones ya sitúa su fracción másica cerca de una cuarta parte, mientras que el trabajo de precisión debe seguir las tasas débiles, las correcciones radiativas y de temperatura finita, la vida media del neutrón y la red de reacciones. Pitrou y colaboradores comunicaron $Y_p = 0.24709 \pm 0.00017$ bajo sus entradas y cálculo declarados [2]. Esa incertidumbre estrecha es un resultado de cálculo de modelo, no la incertidumbre completa de toda inferencia astronómica.

El deuterio y el helio-3 sobreviven como productos residuales porque la expansión acaba haciendo ineficiente una combustión posterior. El tritio decae a helio-3. Gran parte de la masa 7 primordial se produce inicialmente como berilio-7, que después se convierte en litio-7 mediante captura electrónica. Los números finales son sensibles a reacciones diferentes; la etiqueta «abundancia de elementos ligeros» no debe ocultar presupuestos de incertidumbre distintos.

La construcción primordial eficiente de núcleos sustancialmente más pesados queda bloqueada por varios efectos. La densidad cae rápidamente, las barreras de Coulomb suprimen las reacciones entre partículas cargadas y no existen núcleos estables de masa 5 o masa 8 que proporcionen puentes fáciles. La BBN estándar puede predecir una producción traza extremadamente pequeña más allá del litio, por lo que «sin elementos pesados» debe entenderse como ausencia de un inventario cósmico significativo, no como cero matemático. La producción principal de carbono, oxígeno, hierro y muchas especies más pesadas pertenece a las historias estelares y explosivas de las que es responsable CHO-007.

6. Evidencia de laboratorio y reconstrucción mediante cálculo

La BBN se describe a veces como una ventana observacional a los minutos posteriores al Big Bang. La descripción solo es válida si la cadena de inferencia permanece visible. No había ningún detector presente en el plasma. En su lugar, los experimentos de laboratorio miden secciones eficaces a energías que se solapan con el intervalo pertinente o se extrapolan hacia él. La teoría nuclear convierte esas mediciones en tasas promediadas térmicamente. Un código de red evoluciona las abundancias mientras un modelo cosmológico proporciona temperatura, densidad y expansión.

La reacción $D(p,\gamma)^3\text{He}$ ilustra la cadena. La revisión PDG 2026 identifica la medición de LUNA [3] como una mejora en la precisión de la abundancia predicha de deuterio, al tiempo que señala que las incertidumbres de las tasas nucleares todavía superan los errores observacionales en D/H y que los canales deuterio-deuterio requieren mayor refinamiento experimental [1]. Una sección eficaz de laboratorio se mide en su dominio experimental; una abundancia cosmológica o una densidad bariónica solo se obtiene después de introducir la tasa en una red nuclear y un modelo de expansión especificados.

Ninguna reacción individual cierra todo el cálculo de abundancias. Contribuyen las correlaciones entre tasas, la normalización experimental, las correcciones de plasma, la física del neutrón y la integración numérica. Una afirmación de precisión creíble debe identificar qué entradas se varían y qué supuestos de modelo se mantienen fijos.

7. Observaciones posteriores como evidencia de producción primordial

Las abundancias primordiales se miden indirectamente en épocas mucho posteriores. Los astrónomos buscan entornos que hayan experimentado poco procesamiento químico o modelizan cómo dicho procesamiento modifica una abundancia. Cada elemento requiere una estrategia observacional diferente.

El deuterio se destruye en interiores estelares y por ello es especialmente útil en gas de baja metalicidad. Cooke, Pettini y Steidel analizaron sistemas de absorción de cuásares de alto corrimiento al rojo y combinaron siete mediciones de alta precisión tratadas homogéneamente para inferir $10^5(D/H)_P = 2.527 \pm 0.030$ [4]. La absorción espectral se observa directamente; identificar el valor combinado como primordial es una reconstrucción respaldada por la baja metalicidad, argumentos de evolución química y la coherencia entre sistemas.

La síntesis controlada PDG 2026 recomienda $10^5(D/H)_P = 2.508 \pm 0.029$, basada en doce mediciones [1, ec. (24.2) y tabla 24.1]. Su incertidumbre citada está inflada por el factor de escala $S = 1.08$ de la revisión para tener en cuenta la dispersión, con $\chi^2(N - 1) = 1.160$. Esta es la recomendación de síntesis utilizada aquí; el valor de Cooke se conserva como referencia histórica explícitamente atribuida para la comparación siguiente, no como la única abundancia recomendada actualmente.

Esta precisión no implica concordancia exacta con todos los cálculos modernos de BBN estándar. Launders, Giovannetti y Liu utilizaron ajustes de tasas nucleares basados en datos con la densidad bariónica de Planck y obtuvieron $10^5(D/H) = 2.442 \pm 0.040$, comunicado como 1.70σ por debajo de la medición de Cooke [10]. Esta es una comparación específica del estudio bajo sus supuestos declarados de tasas nucleares y cosmología y con su entrada observacional de abundancia elegida. El 1.70σ comunicado es específicamente relativo a Cooke y no una significación calculada respecto a la recomendación PDG. La magnitud de la discrepancia también depende de qué abundancia observacional se adopte; no es universal entre elecciones de entradas de BBN.

El helio-4 se infiere habitualmente a partir de líneas de emisión en regiones ionizadas de baja metalicidad. Intervienen la temperatura y densidad electrónicas, la absorción estelar, la profundidad óptica, la excitación colisional, las emisividades atómicas, el enrojecimiento y el enriquecimiento químico. Aver, Olive y Skillman comunicaron $Y_P = 0.2449 \pm 0.0040$ en 2015 [5]. Las determinaciones posteriores a 2015 compiladas en la revisión controlada PDG 2026 abarcan valores centrales de aproximadamente 0.2430 a 0.2462; su tabla distingue incertidumbres estadísticas y totales, de modo que esas columnas de error no son intercambiables. La revisión recomienda $Y_P = 0.245 \pm 0.003$ y advierte que los conjuntos de datos solapados no pueden combinarse ingenuamente [1]. Yanagisawa y colaboradores comunicaron $Y_P = 0.2402 \pm 0.0040$ en EMPRESS XV [8]. Aver y colaboradores comunicaron $Y_P = 0.2458 \pm 0.0013$ en LBT Yp Project IV tras su cribado de calidad declarado [9]. La estimación de LBT utiliza una media ponderada de quince objetivos de baja metalicidad no marcados, en lugar del mismo procedimiento de regresión usado por todos los demás estudios. Estos resultados específicos de estudio no se combinan ingenuamente porque las muestras, emisividades, elecciones de modelización y presupuestos sistemáticos se solapan o difieren. Por ello, el helio concuerda con la BBN estándar con una precisión observacional materialmente menor que el deuterio.

El litio-7 es la excepción llamativa a una concordancia simple. Las estrellas calientes y pobres en metales del halo muestran una abundancia de litio relativamente plana en parte de su intervalo de metalicidad, pero a las metalicidades más bajas la meseta se rompe y aumenta la dispersión. Sbordone y colaboradores comunicaron una media $A(Li) = 2.199$ con dispersión de muestra 0.086 para su subconjunto de meseta 3D no-LTE en $[Fe/H] \geq -2.8$ y establecieron un «meltdown» a menor metalicidad en su muestra [6]. La BBN estándar calibrada con la densidad bariónica del CMB predice materialmente más litio-7 de lo que sugiere la meseta estelar clásica. Se han investigado el agotamiento estelar, la difusión, la mezcla, revisiones de tasas nucleares, la modelización observacional y física no estándar. No se ha establecido una única explicación.

El helio-3 es más difícil de utilizar como prueba primordial limpia porque su producción y destrucción estelares complican su historia posterior. La calidad desigual de las cuatro sondas de abundancia forma parte del propio resultado. «La BBN concuerda con la observación» se pone a prueba con mayor precisión mediante el deuterio, con la tensión dependiente del estudio señalada arriba; está ampliamente respaldada pero limitada por sistemáticos en helio-4, es débil como prueba primordial de precisión para helio-3 y permanece sin resolver para litio-7.

8. Capacidades del observador presentes

El intervalo de producción es N_0 . Las reacciones nucleares responden a condiciones físicas; no detectan, interpretan, valoran ni comunican información. Un núcleo puede preservar una consecuencia de una historia temprana de reacciones sin convertirse en observador bajo el marco operacional de CHO.

La capacidad del observador aparece miles de millones de años después. Las comunidades científicas construyen espectrógrafos, calibran modelos atómicos, miden tasas de reacción en laboratorios subterráneos, comparan inferencias independientes de densidad bariónica y revisan redes. Estas actividades convierten las abundancias supervivientes en evidencia. La afirmación histórica conecta, por tanto, dos tiempos: los núcleos se produjeron durante los primeros minutos, mientras que las observaciones que respaldan la reconstrucción ocurren mucho más tarde en estrellas, nubes de gas, laboratorios e instituciones científicas.

Esa separación bloquea una confusión frecuente. La medición cambia lo que los investigadores pueden afirmar justificadamente sobre la BBN; no hizo existir a los núcleos primordiales. La red no utiliza ningún postulado de observador consciente.

9. Contingencia y contemporáneos

El resultado general está restringido, pero no es lógicamente inevitable. Una densidad bariónica diferente cambiaría la combustión del deuterio. Una tasa de expansión diferente alteraría el tiempo disponible para las reacciones débiles y nucleares. Radiación adicional, asimetría de neutrinos, una vida media del neutrón modificada, energías de enlace alteradas o nuevas desintegraciones podrían desplazar los rendimientos. La comparación conjunta de deuterio y helio con una cosmología restringida independientemente limita, por tanto, muchas alternativas, a la vez que conserva la tensión del deuterio dependiente del estudio.

Entre los procesos contemporáneos estaban el transporte de neutrinos, la aniquilación electrón-positrón, el decaimiento de neutrones, la termalización electromagnética, las reacciones nucleares y la expansión. Su solapamiento obliga a las explicaciones causales a resistirse a relatos de «épocas» aisladas. El rendimiento de helio, por ejemplo, contiene información sobre la congelación débil y la expansión aunque su ensamblaje ocurra después.

También existieron vías nucleares alternativas sin convertirse en inventarios principales. Persistieron ramas de masa 3 y masa 7; las rutas más pesadas quedaron fuertemente suprimidas. La historia estelar posterior seleccionó un entorno de reacción muy diferente y abrió rutas no disponibles durante la BBN. La complejidad química cósmica se retrasó, no quedó prohibida en principio.

10. Interpretaciones en competencia y cuestiones no resueltas

Los principales desacuerdos se refieren a precisión y anomalías, no a si ocurrió una fase nuclear caliente. Las evaluaciones nucleares siguen refinando tasas y correlaciones. Las mediciones de la vida media del neutrón mediante técnicas diferentes siguen siendo relevantes para la predicción precisa del helio. Los análisis astronómicos de helio difieren en selección de muestras, datos atómicos, estructura térmica y tratamiento de sistemáticos. Las muestras de deuterio son precisas pero pequeñas y requieren una modelización compleja de la absorción.

El problema del litio atraviesa fronteras disciplinares. Si las superficies estelares han agotado litio primordial, los modelos deben reproducir tanto la meseta como su comportamiento a baja metalicidad sin borrar otras restricciones de abundancias. Si las entradas nucleares son responsables, las tasas revisadas deben seguir siendo coherentes con los datos de laboratorio. Si se invocan nuevas partículas o una expansión alterada, el deuterio, el helio, el CMB y otras evidencias cosmológicas restringen el cambio. La discrepancia es evidencia de un problema no resuelto, no permiso para seleccionar cualquier mecanismo preferido.

Las comparaciones de fuentes conservadas distinguen las predicciones históricas, la síntesis PDG y las estimaciones de helio más recientes específicas de estudios. Las diferentes muestras, estimadores y supuestos sistemáticos impiden que un valor combinado simple sustituya esa comparación.

11. Declaración de clases de afirmaciones

Clase	Uso en CHO-003
E1, medido directamente	Secciones eficaces de laboratorio; flujos de líneas espectrales y perfiles de absorción dentro de los análisis declarados
E2, reconstruido	Estimaciones de abundancias primordiales a partir de entornos posteriores; existencia general de una fase nuclear caliente
E3, dependiente de modelo	Rendimientos de red, mapeo tiempo-temperatura, densidad bariónica inferida de BBN y sensibilidad al contenido de radiación
E4, activamente controvertido	Causa y significado completo de la discrepancia del litio; algunos sistemáticos del helio de precisión
E5, especulativo/abierto	Soluciones concretas de nueva física no seleccionadas por la evidencia convergente actual

Los códigos clasifican proposiciones, no artículos ni párrafos completos. El estado de verificación se mantiene separado de la clase evidencial.

12. Fronteras y exclusiones

CHO-003 es responsable del ensamblaje nuclear y de las pruebas de abundancias primordiales dentro de [1 s,20 min) . No vuelve a apropiarse del desacoplamiento de neutrinos, la aniquilación electrón-positrón ni de toda la historia térmica hadrónica de CHO-002. Hereda sus efectos como entradas. Tampoco es responsable del origen de la asimetría bariónica tratado en CHO-001.

La producción posterior de elementos en estrellas, supernovas, fusiones de objetos compactos y espalación de rayos cósmicos pertenece a CHO-007. Galaxias y estrellas posteriores proporcionan evidencia de abundancias, pero no adquieren la responsabilidad de la red primordial. El título no afirma un primer núcleo individual observado, un instante exacto de nacimiento nuclear, la producción de todos los elementos en el Big Bang ni concordancia exacta entre todas las observaciones de elementos ligeros.

13. Estado final transmitido a CHO-004

En la congelación efectiva de la BBN, el Universo en expansión contiene fotones, neutrinos, electrones, materia bariónica dominada por núcleos de hidrógeno y helio-4, deuterio y helio-3 residuales y trazas de núcleos de masa 7. Todavía no contiene átomos neutros. Los núcleos cargados y los electrones permanecen inmersos en un plasma acoplado a la radiación.

CHO-004 hereda esa composición y sigue un intervalo mucho más largo a través de la igualdad materia-radiación, la evolución acústica, la recombinación y el desacoplamiento de fotones. La mezcla elemental afecta a la densidad electrónica y a la recombinación, mientras que el CMB proporciona después una prueba independiente de la densidad bariónica utilizada en BBN. La siguiente transición conserva así la continuidad causal sin duplicar la red nuclear.

Referencias

1. Fields, B. D., Molaro, P., and Sarkar, S. “Big Bang Nucleosynthesis.” In *Review of Particle Physics 2026*, section 24, revised August 2025 and published 2026. <https://pdg.lbl.gov/2026/reviews/rpp2026-rev-bbang-nucleosynthesis.pdf>
2. Pitrou, C., Coc, A., Uzan, J.-P., and Vangioni, E. “Precision big bang nucleosynthesis with improved Helium-4 predictions.” *Physics Reports* 754, 1-66 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.physrep.2018.04.005>. Consulted author version: <https://arxiv.org/abs/1801.08023v2>
3. Mossa, V. et al. “The baryon density of the Universe from an improved rate of deuterium burning.” *Nature* 587, 210-213 (2020). <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2878-4>
4. Cooke, R. J., Pettini, M., and Steidel, C. C. “One Percent Determination of the Primordial Deuterium Abundance.” *Astrophysical Journal* 855, 102 (2018). <https://doi.org/10.3847/1538-4357/aaab53>. Consulted author version: <https://arxiv.org/abs/1710.11129v2>
5. Aver, E., Olive, K. A., and Skillman, E. D. “The effects of He I lambda10830 on helium abundance determinations.” *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics* 07 (2015) 011. <https://doi.org/10.1088/1475-7516/2015/07/011>. Consulted author version: <https://arxiv.org/abs/1503.08146v1>

6. Sbordone, L. et al. “The metal-poor end of the Spite plateau. I. Stellar parameters, metallicities, and lithium abundances.” *Astronomy & Astrophysics* 522, A26 (2010). <https://doi.org/10.1051/0004-6361/200913282>. Consulted author version: <https://arxiv.org/abs/1003.4510v2>
 7. Aghanim, N. et al. (Planck Collaboration). “Planck 2018 results. VI. Cosmological parameters.” *Astronomy & Astrophysics* 641, A6 (2020), corrected 2021. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201833910>. Consulted author version: <https://arxiv.org/abs/1807.06209v4>
 8. Yanagisawa, H., et al. “EMPRESS. XV. A New Determination of the Primordial Helium Abundance Suggesting a Moderately Low Yp Value.” *The Astrophysical Journal* 1004(1), 55 (2026). <https://doi.org/10.3847/1538-4357/ae64fc>. Consulted author version: <https://arxiv.org/abs/2506.24050v3>
 9. Aver, E., et al. “The LBT Yp Project IV: A New Value of the Primordial Helium Abundance.” arXiv:2601.22238v1 (2026). <https://doi.org/10.48550/arXiv.2601.22238>
 10. Launders, T., Giovanetti, C., and Liu, H. “A data-driven prediction for the primordial deuterium abundance.” Consulted author version: arXiv:2604.16600v1 (2026), Table II and accompanying results discussion. <https://arxiv.org/abs/2604.16600v1>. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2604.16600>
-

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.