

Plasma, átomos y la liberación del fondo cósmico de microondas

CHO-004 · Cosmic History and Its Observers

Una historia científica cronológica desde el universo temprano hasta el presente

Identificador: CHO-004 · Versión: v1.0 · Autor: Juan Seguro

Idioma: Español

Función del artículo: Columna cronológica

Ventana del artículo: [20 min, 0.38 Myr) 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. Tras la nucleosíntesis primordial, el Universo siguió siendo un plasma caliente y en expansión. Sus núcleos, electrones, fotones, neutrinos y materia no bariónica no formaban un baño de equilibrio sin estructura: la gravedad amplificaba las perturbaciones de densidad heredadas mientras los fotones y los bariones cargados permanecían fuertemente acoplados.

Pregunta. ¿Cómo se convirtió ese plasma en gas predominantemente neutro y por qué pueden los observadores actuales detectar un registro en microondas de la transición?

Evidencia y método. La reconstrucción combina cálculos atómicos y de transferencia radiativa, teoría cosmológica relativista general de perturbaciones, mediciones del espectro del fondo cósmico de microondas y ajustes estadísticos de sus anisotropías de temperatura y polarización. Los tiempos expresados en años son conversiones dentro de un modelo cosmológico especificado; el corrimiento al rojo y la función de visibilidad de los fotones están más próximos a los observables.

Resultado. La igualdad materia-radiación modificó el crecimiento de las perturbaciones. La competencia acústica entre gravedad y presión fotónica imprimió correlaciones dependientes de escala. A medida que la expansión redujo la temperatura, helio e hidrógeno recombinaron mediante vías fuera del equilibrio. La disminución de la abundancia de electrones libres aumentó el camino libre medio de los fotones, produciendo una distribución extendida de última dispersión en lugar de una liberación instantánea exactamente a los 380 000 años. Posteriormente, los fotones se desplazaron al rojo hasta formar el fondo cósmico de microondas.

Conclusión. CHO-004 transmite a CHO-005 un gas mayoritariamente neutro con estructura de densidad heredada, fotones reliquia que se propagan libremente y ningún observador biológico evidenciado. El cielo de microondas es una traza física medida después por observadores, no evidencia de que la consciencia causara el desacoplamiento.

Palabras clave: recombinación; desacoplamiento de fotones; fondo cósmico de microondas; igualdad materia-radiación; oscilaciones acústicas; función de visibilidad; parámetros cosmológicos

1. Orientación cronológica

CHO-004 ocupa el intervalo BOOK desde veinte minutos hasta 0.5 millones de años después de la frontera formal de coordenadas del Big Bang caliente. La frontera inferior comienza tras la congelación efectiva de la producción primordial de elementos ligeros. La frontera superior se sitúa deliberadamente después del máximo de la última dispersión de fotones para que el artículo contenga toda la transición hacia las condiciones neutras y ópticamente delgadas heredadas por CHO-005.

Coexisten varios relojes. El tiempo cósmico tBB se calcula a partir de un modelo de expansión. El corrimiento al rojo, z , describe el estiramiento de las longitudes de onda entre emisión y observación. La temperatura es una coordenada dinámica para el plasma térmico. Ninguno es un reloj universal independiente de supuestos. Una afirma-

ción como «el CMB fue liberado 380 000 años después del Big Bang» es una orientación útil bajo parámetros cosmológicos de referencia, pero comprime una distribución finita de visibilidad y una historia atómica multietapa en un solo número.

El orden controlado es:

Fase	Cambio principal	Carácter evidencial
Plasma post-BBN	Núcleos ionizados de H/He, electrones y fotones continúan enfriándose	Calculado a partir de la composición heredada y la expansión
Igualdad	La materia no relativista supera a la radiación en el presupuesto de densidad de fondo	Parámetro inferido mediante ajustes cosmológicos
Evolución acústica	Fotones y bariones acoplados oscilan en potenciales gravitatorios	Codificado estadísticamente en las anisotropías del CMB
Recombinación	Helio e hidrógeno neutros se vuelven abundantes mediante vías fuera del equilibrio	Cálculo atómico restringido por datos del CMB
Desacoplamiento	La dispersión Thomson se vuelve ineficiente y los fotones pasan a propagarse libremente	Reconstruido como una función de visibilidad

2. Estado inicial heredado de CHO-003

CHO-003 transmite una composición dominada por núcleos de hidrógeno y helio, con trazas de deuterio, helio-3 y núcleos relacionados con litio. Los electrones mantienen la neutralidad de carga. Los fotones dominan el baño térmico electromagnético, mientras que los neutrinos ya han dejado de compartir con él un equilibrio térmico completo. La materia oscura no bariónica, si el modelo de referencia es correcto, contribuye gravitatoriamente sin participar en la dispersión Thomson.

El plasma es extraordinariamente uniforme, pero no perfecto. Los modelos inflacionarios de CHO-001 proporcionaron un posible origen de las perturbaciones primordiales; CHO-004 no vuelve a apropiarse de ese origen. Pregunta cómo evolucionan esas condiciones iniciales cuando distintos componentes responden de forma diferente a presión, gravedad y dispersión.

3. Expansión, enfriamiento e igualdad materia-radiación

La densidad de radiación disminuye con la expansión más rápidamente que la densidad de materia no relativista. Los fotones pierden energía a medida que se estiran sus longitudes de onda, además de diluirse por volumen, mientras que la masa en reposo no relativista conservada se diluye principalmente por volumen. Por ello, ambas densidades de fondo se cruzan. En el análisis de referencia de Planck, la igualdad se sitúa cerca de un corrimiento al rojo 3400, pero no es un acontecimiento fotografiado directamente. Se infiere a partir de un modelo que conecta el espectro primordial, el contenido de materia, la expansión y las correlaciones observadas [1].

La igualdad importa porque la presión de radiación y el libre transporte relativista resisten el agrupamiento en escalas relevantes, mientras que la materia sin presión puede construir potenciales gravitatorios de manera más eficaz. El crecimiento no comienza bruscamente en la igualdad, y los bariones siguen acoplados a los fotones mucho después. La igualdad es un cambio en el término dominante del fondo y en la eficiencia del crecimiento de estructura, no el instante en que toda formación de estructura se enciende.

4. Un medio fotón-barión acoplado

Los electrones libres dispersan fotones mediante el proceso Thomson. Las interacciones de Coulomb acoplan los electrones a los núcleos, de modo que el componente bariónico es arrastrado por el campo de radiación. La gravedad intenta comprimir las regiones sobredensas; la presión fotónica se opone a la compresión. El resultado es una familia de oscilaciones acústicas forzadas cuya fase y amplitud dependen de la escala, la composición, la expansión, los potenciales gravitatorios y las condiciones iniciales.

Llamar a estas características «ondas sonoras» es útil solo si se especifica el medio. No son sonido que se propaga por aire neutro. Son perturbaciones en un plasma relativista de fotones y bariones, acoplado a los efectos gravitatorios de la materia oscura y otros componentes. Los modos de distinta longitud de onda han completado fracciones

diferentes de una oscilación cuando los fotones se desacoplan. Su proyección sobre el cielo produce la estructura de picos de los espectros angulares de potencia [5].

Los bariones aportan inercia al medio oscilante. La materia oscura influye en los pozos gravitatorios. Las especies relativistas alteran la expansión y la evolución de perturbaciones. En consecuencia, el patrón de picos contiene información sobre múltiples parámetros, pero ningún pico es un medidor de una única magnitud. Los valores de parámetros surgen de verosimilitudes conjuntas, calibración, modelos de primeros planos y un marco cosmológico asumido.

5. La recombinación no fue un simple interruptor de equilibrio

El nombre histórico «recombinación» es ligeramente engañoso: los protones y electrones cósmicos no habían ocupado antes una fase neutra de larga duración. El helio recombina en varias etapas antes de que el hidrógeno pase a ser predominantemente neutro. La formación de hidrógeno se retrasa respecto a una estimación ingenua de equilibrio porque los fotones atrapados cerca de transiciones resonantes, los canales de decaimiento de dos fotones, la expansión y la transferencia radiativa controlan la rapidez con la que los electrones llegan al estado fundamental [2,3].

Un cálculo de equilibrio de Saha proporciona una orientación útil cuando las reacciones son lo bastante rápidas para seguir el equilibrio. El trabajo de precisión sobre el CMB requiere ecuaciones de tasas fuera del equilibrio y correcciones de transferencia radiativa. Códigos como RECFAST, CosmoRec e HyRec incorporan niveles sucesivos de aproximación y precisión. Sus concordancias y diferencias importan porque incluso pequeños cambios en la historia de ionización pueden desplazar los espectros de anisotropías predichos a la precisión alcanzada por los experimentos modernos.

«Se formaron átomos» designa, por tanto, una población cambiante. No existe un primer átomo de hidrógeno observado con una marca temporal. Los estados ligados transitorios no tienen por qué coincidir con la época en la que los átomos neutros se vuelven abundantes, y el helio sigue una secuencia distinta. CHO evita convertir una historia distribuida de poblaciones en una afirmación de prioridad individual.

6. Desacoplamiento de fotones y función de visibilidad

A medida que disminuye la fracción de electrones libres, aumenta la distancia media que recorre un fotón entre dispersiones. El desacoplamiento se hace efectivo cuando la tasa de dispersión ya no puede mantener el acoplamiento fuerte en la escala temporal de expansión. La recombinación provoca esta transición hacia la transparencia, pero ambos términos no son sinónimos: la recombinación describe poblaciones atómicas, mientras que el desacoplamiento describe transporte radiativo.

Para un fotón observado hoy, la función de visibilidad proporciona la densidad de probabilidad de que su última dispersión ocurriera en un tiempo o corrimiento al rojo determinados. En el cálculo estándar alcanza un máximo alrededor de $z \sim 1100$. Un análisis basado en Planck 2015 comunicó un espesor conforme característico de 19 ± 0.065 Mpc y citó junto a él la orientación estándar $\Delta z \sim 90$ [6]. Son afirmaciones de distinto estatus, no una conversión directa de una en la otra, y ninguna define una frontera universal. La «superficie de última dispersión» es, por tanto, la proyección de una distribución a través de un Universo inhomogéneo, no una esfera rígida ni una capa material infinitamente delgada.

Los fotones no empezaron de repente a viajar por espacio vacío. Comenzaron a propagarse libremente a través de materia que se estaba volviendo neutra, transportando un registro de condiciones de temperatura, velocidad, gravedad y generación de polarización. El lente gravitatorio posterior, la dispersión durante la reionización, la emisión de primeros planos y la respuesta instrumental alteran los mapas recibidos hoy. La reconstrucción debe modelizar esos efectos intermedios.

7. Qué registra realmente el fondo de microondas

COBE/FIRAS midió que el espectro monopolar del CMB de todo el cielo es extraordinariamente próximo a un cuerpo negro cerca de 2.725 K [4]. Este espectro es distinto de las diferencias direccionales de temperatura, mucho menores, cartografiadas por COBE, WMAP, Planck y experimentos terrestres. La expansión desplazó al rojo la temperatura característica de la radiación desde miles de kelvin cerca del desacoplamiento hasta microondas en la actualidad.

Las anisotropías son campos estadísticos. Sus espectros angulares de potencia resumen correlaciones por escala; la polarización añade información sobre cuadrupolos de velocidad, geometría, lente gravitatorio y dispersión posterior. Los espectros respaldan un modelo cosmológico de referencia compacto, pero ese éxito no hace directamente visible cada componente. La densidad de materia oscura, los parámetros espectrales y la escala del horizonte acústico se infieren mediante su influencia combinada sobre las correlaciones predichas [1,5].

Esta cadena evidencial es especialmente potente porque converge física independiente: las tasas de transición atómica determinan la historia de ionización; la gravedad y la dinámica de fluidos determinan la evolución de perturbaciones; un telescopio mide señales del cielo dependientes de frecuencia; los métodos de separación de componentes eliminan primeros planos galácticos y extragalácticos; una verosimilitud compara mapas o espectros con predicciones. Cada etapa introduce supuestos e incertidumbre.

8. Evidencia, datación y límites de resolución

Tres distinciones evitan exageraciones cronológicas.

Primero, un corrimiento al rojo medido no es automáticamente una edad independiente de modelo. Convertir el máximo de visibilidad en años requiere la historia de expansión. Segundo, el máximo no es toda la distribución. Distintos resúmenes pueden citar magnitudes de recombinación, última dispersión, época de arrastre o máximo de visibilidad, que no tienen por qué compartir el mismo valor numérico. Tercero, el CMB observado en la Tierra no es una imagen prístina. Ha sido lenteado gravitatoriamente, parcialmente redispersado, contaminado por primeros planos, filtrado por haces y reconstruido estadísticamente.

La precisión también crea dependencia de convención. Los parámetros citados de Planck deben especificar la combinación de datos y el modelo. La corrección de 2021 alteró límites sobre la profundidad óptica de reionización temprana, no la secuencia básica de recombinación utilizada aquí; sus implicaciones son materiales para CHO-005 [1]. Por ello, CHO-004 utiliza valores redondeados para orientación y reserva los números exactos para informes específicos de fuente cuando la evidencia respalda esa precisión.

9. Capacidades del observador presentes

La ventana del artículo permanece en N0: existen trazas físicas portadoras de información, pero no hay evidencia de un sistema vivo que las detecte o utilice. Las perturbaciones de densidad, las poblaciones atómicas y las correlaciones de fotones no requieren consciencia. Son estados físicos que observadores posteriores pueden medir.

Los astrónomos actuales ocupan una posición causal radicalmente posterior. Los detectores absorben fotones de microondas; los equipos calibran instrumentos; los modelos estadísticos infieren parámetros. Esa actividad epistémica posterior explica cómo se conoce la historia. No causó la recombinación ni seleccionó los acontecimientos de última dispersión de los fotones.

10. Contingencia y contemporáneos

La secuencia general se deriva de la expansión más los contenidos heredados, pero su resultado detallado depende de dichos contenidos. Una densidad bariónica distinta cambiaría la carga acústica y la recombinación. Un contenido de radiación distinto cambiaría la expansión y la igualdad. La inyección de energía de partículas inestables podría distorsionar la historia de ionización o el espectro. Un comportamiento alternativo de la materia oscura podría alterar el crecimiento gravitatorio.

La historia de referencia es, por tanto, condicional y no inevitable. Su éxito empírico restringe alternativas, pero no demuestra que estos parámetros fueran necesarios en todos los universos posibles. Tampoco la vida posterior confiere propósito a una transición del plasma.

11. Interpretaciones en competencia y cuestiones no resueltas

El cálculo estándar de recombinación es maduro, aunque siguen abiertas cuestiones de precisión: correcciones de transferencia radiativa, tasas atómicas, tratamiento del helio, inyección de energía, pequeñas distorsiones espectrales y coherencia entre conjuntos de datos del CMB. La tensión de la constante de Hubble ilustra un punto metodológico más amplio. Una tasa de expansión actual derivada del CMB está condicionada al modelo cosmológico que co-

necta el desacoplamiento con el presente; el desacuerdo con rutas del Universo tardío no es una disputa directa sobre un reloj únicamente en la recombinación.

Las extensiones propuestas pueden cambiar la expansión temprana, los horizontes acústicos, el crecimiento de perturbaciones o la recombinación. Su valor debe juzgarse mediante la evidencia global y no por su capacidad para desplazar un único parámetro ajustado. CHO-004 registra la secuencia térmica y radiativa robusta sin declarar metafísicamente definitivo el modelo de referencia.

12. Declaración de clases de afirmaciones

Clase	Uso en CHO-004
E1 medido	Espectro de frecuencia del CMB, mapas del cielo, correlaciones angulares calibradas
E2 reconstruido	Historia de ionización, época de igualdad, distribución de visibilidad
E3 dependiente de modelo	Valores de parámetros y conversiones temporales dentro de una cosmología identificada
E4 controvertido	Interpretación de tensiones entre conjuntos de datos y extensiones propuestas
E5 especulativo	Inyección de energía no estándar o nuevos sectores no comprobados

13. Fronteras, estado final y transición

CHO-004 no vuelve a derivar la nucleosíntesis primordial, no origina las perturbaciones primordiales ni es responsable de la reionización. Es responsable de la transformación desde el plasma post-BBN hasta gas predominantemente neutro y radiación reliquia de propagación libre dentro de [20 min,0.5 Myr).

En la frontera superior, los fotones se propagan a distancias cosmológicas; los bariones son principalmente neutros; las perturbaciones de materia oscura y bariónica proporcionan semillas para la estructura posterior; el Universo ha entrado en el intervalo observacionalmente difícil denominado edades oscuras. CHO-005 hereda estas condiciones y pregunta cómo la gravedad, el enfriamiento, la formación estelar, las galaxias y la radiación ionizante pusieron fin a esa oscuridad.

Referencias

1. 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>

2. Seager, S., Sasselov, D. D., and Scott, D. “How Exactly Did the Universe Become Neutral?” *Astrophysical Journal Supplement Series* 128, 407–430 (2000). <https://doi.org/10.1086/313388>

3. Ali-Haïmoud, Y., and Hirata, C. M. “HyRec: A fast and highly accurate primordial hydrogen and helium recombination code.” *Physical Review D* 83, 043513 (2011). <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.83.043513>

4. Fixsen, D. J. “The Temperature of the Cosmic Microwave Background.” *Astrophysical Journal* 707, 916–920 (2009). <https://doi.org/10.1088/0004-637X/707/2/916>

5. Planck Collaboration. “Planck 2018 results. V. CMB power spectra and likelihoods.” *Astronomy & Astrophysics* 641, A5 (2020). <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201936386>

6. Hadzhiyska, B., and Spergel, D. N. “Measuring the Duration of Last Scattering.” *Physical Review D* 99, 043537 (2019). <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.99.043537>

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.