

Épocas de partículas y transiciones térmicas

CHO-002 · Cosmic History and Its Observers

Una historia científica cronológica desde el universo temprano hasta el presente

Identificador: CHO-002 · Versión: v1.0 · Autor: Juan Seguro

Idioma: Español

Función del artículo: Columna cronológica

Ventana del artículo: $[10^{-11} \text{ s}, 20 \text{ min})$ 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. Una vez establecido un plasma caliente y en expansión, el Universo temprano puede seguirse a través de una secuencia de regímenes del Modelo Estándar con mayor especificidad física de la que es posible para la inflación, el recalentamiento o la frontera inferior última. La secuencia, no obstante, fue continua. Sus etiquetas habituales describen cambios en los grados de libertad relevantes y en las tasas de interacción, no una hilera de interruptores cósmicos instantáneos.

Evidencia. Los cálculos no perturbativos en red indican que, para la masa medida del Higgs, el cambio electrodébil del Modelo Estándar es un crossover suave. Uno de los cálculos citados sitúa su máximo de susceptibilidad en $159.5 \pm 1.5 \text{ GeV}$. La QCD en red sitúa asimismo un crossover quiral pseudocrítico a potenciales químicos nulos en $156.5 \pm 1.5 \text{ MeV}$, con un valor operativo preciso que depende del observable. A temperaturas aún menores, las interacciones débiles dejan progresivamente de mantener el equilibrio de los neutrinos y la aniquilación electrón-positrón redistribuye la entropía. Un cálculo de transporte de precisión del Modelo Estándar que incluye oscilaciones de sabor y QED a temperatura finita obtiene $N_{\text{eff}} = 3.0440 \pm 0.0002$, en lugar de la idealización de desacoplamiento instantáneo de exactamente tres.

Método. Esta síntesis separa entradas medidas en laboratorio, cálculos numéricos del Modelo Estándar y conversiones cosmológicas de tiempo. La temperatura es la variable de ordenación más defendible para las transiciones. Las orientaciones aproximadas en tBB se derivan dentro de una cosmología dominada por radiación y no se tratan como fechas observadas directamente.

Conclusión. A lo largo del intervalo, el Universo se enfría desde un plasma electrodébil, atraviesa el confinamiento QCD y la redistribución leptónica; el ensamblaje nuclear se solapa con su evolución térmica posterior. CHO-003 es responsable de la red nuclear y de sus rendimientos. Durante todo CHO-002 la clasificación del observador es N0: los observadores posteriores pueden reconstruir trazas, pero no hay evidencia de ningún observador vivo o consciente en el intervalo.

Palabras clave: Universo temprano; crossover electrodébil; crossover QCD; hadronización; desacoplamiento de neutrinos; aniquilación electrón-positrón; historia térmica; capacidades del observador

1. Orientación cronológica

CHO utiliza tBB para el tiempo cósmico dependiente de modelo medido desde la frontera extrapolada formal de una solución especificada del Big Bang caliente. El límite inferior de este artículo, 10^{-11} s , es una frontera BOOK. Es una transición editorial de orden de magnitud desde CHO-001, no el instante medido en que terminó el recalentamiento o comenzó la física electrodébil. El límite superior, 20 minutos, es igualmente un límite conservador de contención compartido con la superposición CHO-003. En los cálculos estándar, las reacciones nucleares han cesado de forma efectiva para entonces, pero la velocidad exacta con la que cada abundancia se aproxima a su asíntota depende del nucleido y de la precisión.

La cronología física se ordena mejor primero por temperatura, siguiendo la secuencia termodinámica sintetizada en la revisión del Particle Data Group [4]:

Régimen	Orientación de temperatura	Orientación aproximada de tBB	Estado de la orientación
Crossover electrodébil	máximo de susceptibilidad 159.5 ± 1.5 GeV en el cálculo citado	orden de 10^{-11} s	la temperatura es un resultado de red; el tiempo se deriva del modelo
Crossover QCD	pseudocrítico 156.5 ± 1.5 MeV a potenciales químicos nulos	orden de decenas de microsegundos	la temperatura se define por observable; el tiempo se deriva del modelo
Redistribución hadrónica y leptónica	desde el régimen QCD hasta temperaturas de MeV	microsegundos a segundos	secuencia amplia; específica de cada especie
Desacoplamiento de neutrinos y aniquilación electrón-positrón	régimen de MeV a sub-MeV	en términos generales, segundos	procesos de transporte solapados
Fondo térmico para la nucleosíntesis	alrededor de 0.1 MeV; una orientación detallada utiliza 0.078 MeV	minutos	los valores describen distintos puntos operativos de un inicio distribuido; red y rendimientos son responsabilidad de CHO-003

En dominación por radiación, temperatura y tiempo se relacionan mediante la tasa de expansión y la densidad de energía efectiva de las especies relativistas. La relación no es un reloj universal independiente de la teoría. Los grados de libertad efectivos cambian a medida que las especies dejan de ser relativistas, y las interacciones a temperatura finita modifican las estimaciones de gas ideal. Por ello, este texto solo imprime tiempos cósmicos de orden de magnitud. El cálculo acompañante conserva el coeficiente aproximado y los supuestos sobre grados de libertad; no se afirma una fecha precisa ni un intervalo de confianza propagado. Las orientaciones gruesas usan la relación dominada por radiación de la revisión PDG citada [4], con los grados de libertad relativistas efectivos declarados en el registro de cálculo acompañante. Son comprobaciones de escala, no fechas precisas de transición; los parámetros tardíos de Planck no son entradas numéricas de este cálculo.

2. Estado inicial heredado de CHO-001

CHO-001 transmite un régimen caliente y en expansión cuyo origen anterior sigue estando incompletamente restringido. Sus perturbaciones primordiales, la asimetría materia-antimateria y el contenido de radiación son condiciones heredadas, no se vuelven a derivar aquí. La palabra «partícula» también requiere cautela. CHO-002 no describe una creación desde la nada. Describe un sistema cuántico y térmico que se enfría y en el que cambian las excitaciones útiles, los alcances de interacción, las poblaciones de equilibrio y los estados compuestos.

A temperatura suficientemente alta, numerosos grados de libertad del Modelo Estándar contribuyen al plasma. La expansión reduce la densidad de energía. Las interacciones solo pueden mantener un equilibrio aproximado cuando sus tasas siguen siendo rápidas respecto a la expansión cósmica. Esta comparación entre tasa microscópica y tasa de expansión es el mecanismo organizador del artículo. Explica tanto por qué algunas transiciones siguen siendo crossovers en equilibrio como por qué algunas especies se desacoplan progresivamente.

3. El crossover electrodébil

La teoría electrodébil unifica las interacciones electromagnética y débil mediante una estructura gauge cuyo estado a baja temperatura incluye un valor esperado no nulo del campo de Higgs. A alta temperatura, el estado termodinámico es diferente. Sin embargo, para la masa medida del Higgs, los cálculos del Modelo Estándar no respaldan una transición de fase fuerte de primer orden. El tratamiento no perturbativo en red de D’Onofrio y Rummukainen encontró un crossover suave, con una región estrecha de aproximadamente 157-162 GeV y una temperatura definida por susceptibilidad $T_c = 159.5 \pm 1.5$ GeV [1].

Ese resultado tiene tres consecuencias cronológicas. Primero, «época electrodébil» es una etiqueta útil de escala, pero el crossover no proporciona una fecha cósmica infinitesimalmente nítida. Segundo, la temperatura citada pertenece a una definición operacional dentro de un cálculo; otro observable termodinámico puede señalar un punto cercano pero no lógicamente idéntico. Tercero, convertirla a segundos requiere un modelo cosmológico de expansión y el contenido de radiación a esa temperatura. La frontera del Master Index en 10^{-11} s se mantiene, por tanto, deliberadamente más gruesa que la temperatura de red.

El crossover cambia masas, comportamiento de apantallamiento y tasas de reacción a medida que el plasma se enfría. No explica por sí mismo por qué la materia supera a la antimateria. Las propuestas de bariogénesis electrodé-

bil preguntan si una dinámica adicional podría hacer que este régimen produjera la asimetría observada, pero el crossover conocido del Modelo Estándar no basta para establecer una historia así. CHO-001 conserva la bariogénesis como mecanismo no resuelto; CHO-002 proporciona únicamente el contexto térmico.

4. El crossover QCD y la aparición de la materia hadrónica

La cromodinámica cuántica describe quarks y gluones y sus interacciones fuertes. A alta temperatura, sus grados de libertad activos forman un plasma desconfinado. Al enfriarse con el muy pequeño potencial químico bariónico pertinente para el Universo temprano, los cálculos en red respaldan un crossover y no una frontera simple de primer orden. El cálculo HotQCD de Bazavov y colaboradores obtuvo un valor pseudocrítico extrapolado al continuo $T_c(0) = 156.5 \pm 1.5 \text{ MeV}$ promediando cinco definiciones extrapoladas al continuo basadas en observables quirales a potenciales químicos nulos [2].

Este número no debe narrarse como «el instante en que apareció el primer protón». A lo largo de un crossover, las susceptibilidades y otros observables cambian en un intervalo. Las correlaciones hadrónicas se convierten progresivamente en descripciones más adecuadas, mientras que los grados de libertad de quarks y gluones dejan de comportarse como un plasma de propagación libre. Diferentes observables pueden identificar temperaturas pseudocríticas ligeramente distintas. Además, el plasma térmico crea y destruye continuamente excitaciones de vida corta. Un inventario cósmico estable emerge mediante abundancias de equilibrio cambiantes, aniquilaciones, desintegraciones y leyes de conservación, no mediante un primer miembro de una especie fotografiado.

Las colisiones relativistas de iones pesados proporcionan pruebas empíricas importantes de la materia QCD, pero no reproducen en su conjunto la historia cósmica. El sistema de colisión es pequeño, de vida corta, evoluciona rápidamente y puede presentar condiciones de cargas conservadas diferentes. Su evidencia pone a prueba propiedades de la QCD en condiciones extremas; la aplicación al Universo temprano sigue requiriendo modelización cosmológica. De forma análoga, el resultado de red no es una observación directa del pasado. Es una consecuencia numérica controlada de la teoría usando parámetros anclados en experimentos de partículas.

5. Umbrales térmicos, aniquilación y congelación

Tras el crossover QCD, hadrones y leptones pueblan el plasma según la temperatura, la masa en reposo y las tasas de interacción. Cuando la temperatura cae por debajo de la escala de energía de reposo de una especie, la producción de pares se vuelve ineficiente y la abundancia de equilibrio queda suprimida exponencialmente. Partículas y antipartículas se aniquilan o las partículas inestables se desintegran, transfiriendo energía y entropía a productos que siguen acoplados. Nombres de «época» como época hadrónica, leptónica o fotónica comprimen esta redistribución continua en encabezados memorables.

No deben fusionarse dos ideas distintas. Que una especie deje de ser relativista se refiere a la forma y energía de su distribución. La congelación o desacoplamiento se refiere a si las reacciones siguen siendo suficientemente rápidas para mantener el equilibrio. Una especie masiva puede seguir interactuando después de dejar de ser relativista; una especie con interacción débil puede desacoplarse mientras aún es relativista. El umbral también depende de qué reacción se esté considerando. No existe un único reloj que etiquete simultáneamente todas las desapariciones.

A medida que el Universo se enfría a través del régimen de MeV, a las reacciones débiles les resulta cada vez más difícil seguir la razón neutrón/protón. Ese cambio forma parte del contexto térmico y de interacción débil heredado por la nucleosíntesis [5]. CHO-003 será responsable de sus consecuencias cuantitativas, del decaimiento de neutrones antes del ensamblaje nuclear, de la red de reacciones y de las abundancias resultantes. CHO-002 se detiene deliberadamente antes de convertir una historia térmica en rendimientos nucleares.

6. Desacoplamiento de neutrinos y aniquilación electrón-positrón

A temperatura suficientemente alta, los neutrinos intercambian energía y número mediante interacciones débiles con electrones, positrones y entre sí. A medida que la expansión supera a esas interacciones, sus distribuciones se apartan progresivamente del equilibrio perfecto con el plasma electromagnético. No se trata de un acontecimiento instantáneo a una única temperatura o segundo. Diferentes momentos y sabores responden de forma distinta, y las oscilaciones de neutrinos redistribuyen las distorsiones entre sabores.

Los pares electrón-positrón también se vuelven escasos cuando la temperatura cae por debajo de la escala de masa del electrón. Su aniquilación transfiere la mayor parte de su entropía a los fotones. En un cálculo idealizado con

desacoplamiento de neutrinos completamente instantáneo y previo, el baño de fotones se calienta respecto a un baño de neutrinos que se enfría por separado, dando lugar a la conocida razón límite de temperaturas. El desacoplamiento real se solapa con el proceso de aniquilación. Las interacciones débiles residuales transfieren una pequeña cantidad de energía a los neutrinos, la QED a temperatura finita modifica el plasma electromagnético y las oscilaciones de sabor importan.

Bennett y colaboradores resolvieron el problema de transporte pertinente con oscilaciones de sabor, efectos de QED a temperatura finita hasta el orden declarado e integrales completas de colisión neutrino-neutrino. Comunicaron el valor de referencia del Modelo Estándar $N_{\text{eff}} = 3.0440 \pm 0.0002$ [3]. N_{eff} es un parámetro efectivo de densidad de radiación, no un recuento literal que implique 0.044 de una nueva especie de neutrino. El exceso sobre tres combina la historia térmica, las distorsiones espectrales, las oscilaciones de sabor y los efectos de QED a temperatura finita en una magnitud utilizada por la cosmología posterior.

Este resultado ilustra la jerarquía evidencial de CHO. Las mediciones de laboratorio restringen los parámetros débiles y de neutrinos. La teoría cinética y la teoría cuántica de campos a temperatura finita especifican las interacciones. El transporte numérico evoluciona las funciones de distribución sobre un fondo en expansión. Las observaciones posteriores del CMB y de abundancias restringen la densidad de radiación. El proceso antiguo se reconstruye mediante esta cadena; no queda cronometrado directamente por un reloj superviviente.

7. Base evidencial, métodos de datación y límites de resolución

En este intervalo operan tres tipos de justificación.

Primero, las mediciones de colisionadores y laboratorio determinan masas de partículas, acoplamientos, tiempos de vida, parámetros de mezcla y entradas nucleares. Son mediciones directas dentro de marcos experimentales, aunque su uso a temperaturas cósmicas presupone el Modelo Estándar y extrapolaciones especificadas.

Segundo, la teoría de campos en red calcula la termodinámica de equilibrio allí donde la teoría perturbativa ordinaria es insuficiente. Las temperaturas de crossover electrodébil y QCD citadas aquí son resultados teóricos numéricos restringidos por parámetros medidos. Sus incertidumbres describen el cálculo y sus extrapolaciones; no son errores de cronómetro de un acontecimiento cósmico observado directamente.

Tercero, la inferencia cosmológica combina la expansión de Friedmann con densidad de energía, redes de reacción y ecuaciones de transporte. Las relaciones aproximadas tiempo-temperatura son lo bastante robustas para ordenar la secuencia, pero su precisión impresa debe mantenerse por debajo de la entrada de modelo menos cierta. Especies relativistas adicionales desconocidas, una expansión alterada, propiedades de los neutrinos o interacciones no estándar modificarían el mapeo y pueden restringirse precisamente porque dejarían firmas posteriores en abundancias o radiación.

Este texto no fija una tabla detallada tiempo-temperatura. Tampoco infiere la naturaleza del crossover QCD únicamente de la fenomenología de iones pesados, trata una temperatura pseudocrítica de red como observación del cosmos ni utiliza el éxito posterior de la BBN para borrar la incertidumbre de todos los cálculos térmicos anteriores.

8. Capacidades del observador presentes

CHO asigna N0 a todo el intervalo: existen trazas físicas, pero no hay evidencia de un sistema capaz de detección biológica, uso de información, sentiencia o reflexión simbólica. La categoría no es un rango inferior a la vida posterior. Simplemente indica que los criterios de capacidad del observador no están instanciados por la evidencia disponible para este periodo.

El plasma formó, no obstante, correlaciones y preservó consecuencias. Las densidades relativas de energía de fotones y neutrinos, la historia neutrón-protón y las abundancias posteriores de elementos ligeros contienen información sobre tasas y expansión. Los observadores actuales extraen esa información mediante instrumentos y modelos miles de millones de años después. Su acto posterior de inferencia no causó las transiciones.

En física estadística y cuántica, «observador» puede referirse a un marco, una medición ideal o un subsistema dentro de una descripción formal. Ningún uso de ese tipo autoriza la afirmación de que la consciencia fuera necesaria para el cambio de simetría electrodébil, el confinamiento QCD, la aniquilación o el desacoplamiento. El título de CHO trata de la aparición posterior de sistemas que utilizan evidencia, no del control consciente de la física temprana.

9. Contingencia y contemporáneos

La secuencia no es inevitable bajo cualquier conjunto posible de leyes o parámetros. La masa medida del Higgs ayuda a determinar por qué la transición electrodébil del Modelo Estándar es un crossover. Extensiones de la teoría pueden producir comportamiento de primer orden, alterar la producción de reliquias o generar señales de ondas gravitacionales. Partículas ligeras adicionales podrían cambiar la tasa de expansión y el presupuesto de radiación de neutrinos. Diferentes masas de quarks o condiciones de cargas conservadas modificarían la termodinámica QCD.

Dentro de la historia reconstruida, muchos procesos fueron contemporáneos: expansión, dispersión, desintegración, aniquilación, oscilación y correlaciones de campos cambiantes. La ordenada secuencia de los manuales es una descripción dependiente de escala de qué procesos dominaban la explicación. No constituye evidencia de que el Universo se detuviera entre épocas con nombre.

La contingencia también debe separarse de la posibilidad sin restricciones. Los modelos que cambian la historia térmica se enfrentan a pruebas posteriores. Las abundancias primordiales, las anisotropías del CMB, la estructura a gran escala y los datos de partículas de laboratorio restringen las desviaciones. Las historias alternativas solo conservan relevancia científica en la medida en que produzcan consecuencias coherentes y potencialmente discriminantes.

10. Interpretaciones en competencia y cuestiones no resueltas

Entre las cuestiones abiertas importantes están la influencia exacta de efectos de orden superior sobre la termodinámica de los crossovers, la definición operacional más útil de temperaturas pseudocríticas y el tratamiento del transporte a través de umbrales solapados. Preguntas más radicales plantean si partículas no detectadas contribuyeron a la radiación, alteraron el desacoplamiento de neutrinos o se congelaron como materia oscura. Esas cuestiones pertenecen en parte a estudios temáticos posteriores, pero CHO-002 define el fondo térmico sobre el que se formulan.

Algunas disputas de lenguaje también son sustantivas. «Transición de fase» se utiliza a menudo en sentido amplio tanto para transiciones singulares como para crossovers suaves. CHO especifica este último caso cuando así lo exige el resultado citado del Modelo Estándar. «El plasma de quarks y gluones se convirtió en hadrones» es aceptable como resumen de escala solo si no implica una conversión universal instantánea. «Los neutrinos se desacoplaron a un segundo» es una regla mnemotécnica de orientación, no un resultado completo de transporte.

El mapa de fuentes acompañante distingue resultados de red, cálculos de transporte y estimaciones gruesas de tiempo cósmico. Estas últimas establecen el orden general de la secuencia, no intervalos de incertidumbre que cubran cualquier modelo no estándar.

11. Declaración de clases de afirmaciones

Clase	Uso en CHO-002
E1, medido directamente	Parámetros de partículas de laboratorio y observables de colisionadores en sus contextos experimentales declarados
E2, reconstruido	La secuencia térmica caliente general y su coherencia con evidencia posterior de reliquias
E3, dependiente de modelo	Temperaturas de crossover de red, predicción de transporte para N_{eff} y toda conversión de temperatura a t_{BB}
E4, activamente controvertido	Contenido de partículas o historias de transición no estándar en las que alternativas vigentes cambian materialmente la interpretación
E5, especulativo/abierto	Sectores o señales no detectados que no están establecidos por el conjunto de evidencia utilizado aquí

Ninguna fuente completa ni párrafo recibe una sola etiqueta de confianza. Las proposiciones individuales conservan su propio estado epistémico y evidencial; no se asigna una única etiqueta de confianza a una fuente o párrafo completos.

12. Fronteras y exclusiones

CHO-002 comienza en la frontera BOOK 10^{-11} s y termina antes de 20 minutos. Es responsable de las transiciones térmicas del Modelo Estándar posteriores a la frontera, incluidos los crossovers electrodébil y QCD, la redistribución hadrónica y leptónica, el desacoplamiento de neutrinos y la aniquilación electrón-positrón.

CHO-001 conserva la inflación, el recalentamiento y el problema de la bariogénesis. Solo CHO-003 es responsable de la red de nucleosíntesis del Big Bang, las predicciones de abundancias, las pruebas observacionales de abundancias y el problema del litio. CHO-007 es responsable de los canales posteriores de producción de elementos. Este artículo no data una «primera partícula», no afirma que las colisiones de iones pesados reproduzcan exactamente el plasma cósmico ni infiere observación consciente a partir de la formación de registros físicos.

13. Estado final transmitido a CHO-003

Dentro del intervalo compartido, el enfriamiento establece un baño de fotones, un fondo de neutrinos que se desacopla progresivamente aunque recibe un ligero recalentamiento, y nucleones cuya interconversión débil se vuelve ineficiente. La supervivencia del deuterio y el ensamblaje nuclear se producen después durante la parte tardía de ese mismo intervalo. La transición a CHO-003 es, por tanto, temática: proporciona el contexto térmico para el cálculo nuclear, en lugar de situar el comienzo de la nucleosíntesis después del límite superior de veinte minutos.

CHO-003 plantea ahora una pregunta diferente: dadas esas condiciones, ¿qué vías de reacción convierten neutrones y protones en núcleos ligeros, qué abundancias resultan y cómo ponen a prueba el cálculo las observaciones posteriores? Esa transferencia es un cambio de responsabilidad temática dentro de un solapamiento autorizado, no una afirmación de que los procesos térmicos y nucleares ocupen segundos no solapados.

Referencias

1. D'Onofrio, M., and Rummukainen, K. "The Standard Model cross-over on the lattice." *Physical Review D* 93, 025003 (2016). <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.93.025003>. Consulted author version: <https://arxiv.org/abs/1508.07161v1>
2. Bazavov, A. et al. "Chiral crossover in QCD at zero and non-zero chemical potentials." *Physics Letters B* 795, 15-21 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.physletb.2019.05.013>. Consulted author version: <https://arxiv.org/abs/1812.08235v2>
3. Bennett, J. J. et al. "Towards a precision calculation of N_{eff} in the Standard Model II: Neutrino decoupling in the presence of flavour oscillations and finite-temperature QED." *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics* 04 (2021) 073. <https://doi.org/10.1088/1475-7516/2021/04/073>. Consulted author version: <https://arxiv.org/abs/2012.02726v3>, abstract and §6, Table 5; no whole-version equivalence is asserted.
4. Olive, K. A., and Peacock, J. A. "Big-Bang Cosmology." In *Review of Particle Physics 2026*, section 22, revised August 2025 and published 2026. <https://pdg.lbl.gov/2026/reviews/rpp2026-rev-bbang-cosmology.pdf>
5. 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>

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.