

Antes de los átomos

QTC-013 · De los quarks a la consciencia

El universo, la vida y cómo llegamos a saberlo

Autor: Juan Segurola

Versión: v1.0 ES · 2 de septiembre de 2026

Perfil epistémico: Interpretación científica actual

Licencia: All Rights Reserved

Resumen del artículo

No existe una fotografía electromagnética del universo anterior a que los átomos fueran suficientemente neutros para dejar viajar la luz. Pero la historia previa no está vacía. Se reconstruye combinando expansión cósmica, física nuclear y de partículas medida, abundancias primordiales, efectos de neutrinos, experimentos en aceleradores y cálculos de retículo. Este artículo sigue esa evidencia desde los primeros minutos hasta el desacoplamiento de neutrinos, el plasma de quarks y gluones y el cruce electrodébil. Sustituye además las caricaturas de partículas persistentes por campos cuánticos y grados de libertad dependientes de la temperatura. Las colisiones de iones pesados prueban materia QCD relevante sin recrear el universo temprano, y la masa medida del Higgs fija una historia electrodébil de cruce suave, no la transición violenta dibujada en muchas cronologías. La confianza disminuye hacia energías mayores. Partículas de gran unificación y régimen de Planck siguen siendo posibilidades etiquetadas, no escenas observadas de una película continua.

En 60 segundos

Nuestra imagen electromagnética más antigua es la superficie de última dispersión, de anchura finita. Los tiempos anteriores se infieren. Durante el dominio de radiación, la temperatura se relaciona con el tiempo cósmico mediante la ecuación de Friedmann, el inventario de partículas relativistas y la historia de entropía. Las reacciones siguen el equilibrio mientras son más rápidas que la expansión y se desacoplan gradualmente cuando dejan de serlo. Cerca de la escala MeV, la conversión débil neutrón–protón sale del equilibrio, los neutrinos se desacoplan y los núcleos ligeros se ensamblan cuando el deuterio logra sobrevivir a fotones energéticos. Los neutrinos relictos no se han capturado individualmente, pero nucleosíntesis y CMB restringen su población. A temperaturas mayores, quarks y gluones son los grados de libertad útiles. QCD en retículo encuentra un cruce suave para condiciones cosmológicas, mientras RHIC y LHC prueban gotas minúsculas y breves de materia QCD fuertemente interactuante. Cerca de 160 GeV, la masa medida del Higgs implica otro cruce suave del Modelo Estándar. Más arriba, la confianza depende cada vez más de modelos. Nombrar una «época GUT» o «época de Planck» no demuestra sus partículas ni una historia de gravedad cuántica.

Por qué importa esta pregunta

Las cronologías populares parecen una secuencia de fotogramas: los átomos se disuelven en núcleos, los núcleos en quarks y los quarks en partículas cada vez más especulativas. Esa continuidad visual oculta un cambio de evidencia. Algunas etapas quedan restringidas por abundancias relictas; otras

por secciones eficaces de laboratorio, cálculos de retículo o extrapolaciones a través de enormes saltos de energía. Marcar las transiciones evita dos errores: declarar incognoscible el pasado invisible y tratar cada época etiquetada como igualmente observada. El logro real es una reconstrucción graduada con incertidumbre explícita.

1. No hay fotografía anterior a los átomos

La pregunta

¿Cómo describimos un tiempo que ningún fotón puede mostrarnos? No fingiendo que vemos a través del plasma opaco. Reconstruimos condiciones anteriores a partir de reliquias liberadas después, microfísica probada en otros lugares y un modelo cosmológico que conecta temperatura, densidad y tiempo.

La imagen electromagnética ordinaria termina en una época de última dispersión de anchura finita. Antes de que se formaran átomos neutros eficazmente, los fotones se dispersaban repetidamente en materia cargada y no transportaban imágenes intactas a distancias cósmicas. Los estados anteriores se reconstruyen mediante radiación posterior, abundancias, dinámica y teoría probada; no son fotografías más antiguas ocultas tras el CMB. [1,3,5,19]

Los nombres usados para la materia también cambian con la temperatura. Átomo, núcleo, nucleón y excitación elemental no son el mismo objeto con mayor aumento. Son niveles de organización cuya utilidad depende de qué interacciones ligan estructuras y qué energías las rompen. Una cronología correcta cambia de descripción cuando cambia la física. [3–6]

Por la misma razón, «plasma» no es una sustancia cósmica permanente. Cerca de la recombinación significa principalmente iones, electrones y fotones. Antes, la población térmica incluye neutrinos abundantes, pares electrón–positrón, quarks, gluones y otras excitaciones del Modelo Estándar. La palabra indica condiciones colectivas ionizadas o desconfinadas, no una receta fija. [3,4,6]

La teoría cuántica de campos elimina otra imagen engañosa. Las partículas son excitaciones cuantizadas de campos, no bolitas indestructibles que deban viajar sin cambios desde la primera etapa hasta hoy. Al variar la temperatura, las excitaciones aparecen, desaparecen, se mezclan o confinan, mientras cantidades conservadas e interacciones aportan una continuidad que la imagen ingenua no puede ofrecer. [2,6]

Incluso «un segundo después del Big Bang caliente» es una coordenada inferida. Ningún reloj superviviente muestra esa lectura. Parámetros de expansión, densidad energética, tasas de reacción e inventario de partículas calibran la relación entre temperatura modelada y tiempo cósmico. La coordenada es potente precisamente porque sus supuestos pueden declararse y comprobarse. [3–5]

En qué punto estamos

Antes de los átomos, la evidencia cambia de imágenes a reconstrucción, y los constituyentes útiles cambian con el régimen de interacción. Los campos, no bolitas inmortales, aportan el lenguaje profundo. Para ordenar esos estados, la cosmología necesita un reloj que no sobrevivió como objeto: la temperatura solo se convierte en reloj mediante dinámica expansiva y contenido de partículas especificado.

2. La temperatura se convierte en reloj mediante un modelo

La pregunta

Una temperatura no es una fecha. Solo se convierte en ella cuando un modelo indica la velocidad de expansión, qué especies transportan energía y entropía y si las reacciones mantienen el equilibrio. Si cambia el inventario, la misma temperatura puede corresponder a otro tiempo.

Durante el dominio de radiación, la densidad energética relativista controla la tasa de expansión de Hubble mediante la ecuación de Friedmann. Especificados el contenido efectivo de partículas y la evolución de entropía, una temperatura medida o calculada se relaciona aproximadamente con tiempo cósmico. La relación no es arbitraria, pero tampoco independiente del inventario térmico supuesto. [3–5]

Una especie permanece en equilibrio térmico mientras las interacciones que la crean, destruyen o redistribuyen sean mucho más rápidas que la expansión. El desacoplamiento es la pérdida gradual de ese seguimiento cuando la tasa de interacción cae por debajo de Hubble. Depende de secciones eficaces, densidades numéricas y expansión, no de un interruptor universal en un segundo exacto. [6,7]

Los grados de libertad relativistas efectivos cuentan cuántas excitaciones contribuyen a energía y entropía con los pesos estadísticos adecuados. Al hacerse no relativistas, aniquilarse o desacoplarse especies, cambia el recuento. Por ello temperatura, densidad energética y factor de escala no siguen una proporcionalidad fija durante toda la cronología temprana. [3,4,6]

Bajo las condiciones simplificadas de dominio radiativo adiabático y contenido relativista casi constante, el tiempo cósmico escala aproximadamente con el inverso del cuadrado de la temperatura, corregido por la raíz de los grados de libertad efectivos. La relación explica por qué un aumento moderado de temperatura alcanza tiempos inferidos muchísimo más tempranos. [3–5]

Las épocas nombradas pueden desplazarse en segundos si se añaden reliquias ligeras, producción de entropía o una ley de expansión distinta, aunque el orden microfísico sea parecido. «Un segundo» es una afirmación calibrada por modelo; el desacoplamiento débil o la supervivencia del deuterio es el suceso físico que da contenido a la etiqueta. [3–6]

En qué punto estamos

La temperatura ordena el universo temprano porque expansión y microfísica están acopladas, no porque sobreviviera un termómetro. Las tasas de reacción compiten con Hubble y los grados de libertad cambiantes alteran la calibración. La primera gran aplicación de este reloj es nuclear: determinar cuándo neutrones, protones y deuterio dejaron de ser reiniciados continuamente por la radiación.

3. Cuando pudieron sobrevivir los núcleos

El deuterio tiene 2,23 MeV de energía de enlace, pero no pudo acumularse en cuanto la temperatura media bajó de ese valor. La enorme relación fotones–bariones dejaba suficientes fotones en la cola energética para fotodisociar el deuterio recién formado. El ensamblaje nuclear tuvo que esperar a que la cola, no solo la media, fuera suficientemente inofensiva. [8–11]

Las interacciones débiles que convertían neutrones y protones empezaron a salir del equilibrio cerca de 1 MeV, correspondiente a una edad del orden de un segundo en la historia estándar. Los neutrones siguieron decayendo mientras la expansión enfriaba el plasma hacia la apertura posterior de la red nuclear. [9–11]

El cuello de botella del deuterio terminó cerca de 0,1 MeV, cuando el número de fotones capaces de destruir deuterio por barión cayó por debajo del orden de la unidad. El deuterio pudo persistir y alimentar reacciones rápidas hacia helio y otros núcleos ligeros. El retraso conecta directamente física estadística y abundancias primordiales. [9,10]

La nucleosíntesis del Big Bang acopla reacciones nucleares medidas con expansión y predice las principales abundancias de deuterio, helio-3, helio-4 y litio-7 en los primeros minutos. La red es cuantitativa y revisable: cambios en secciones eficaces o vidas medias alteran abundancias concretas sin convertir el cálculo en un relato indivisible de origen. [8–12]

Esas reacciones hicieron núcleos, no átomos neutros. Los electrones permanecieron en un plasma ionizado durante cientos de miles de años antes de que la recombinación permitiera dominar a hidrógeno y helio neutros. Llamar a BBN «formación de los primeros átomos» colapsa dos épocas y borra el largo intervalo cargado entre ambas. [1,9,10]

En qué punto estamos

Los primeros minutos se reconstruyen mediante un cuello de botella, una red de reacciones y abundancias relictas medidas. Los núcleos se estabilizaron mucho antes que los átomos, dando dos hitos distintos a la historia térmica. Cerca de la misma escala MeV, otra población dejó de compartir equilibrio con los fotones y empezó a viajar casi libremente: el fondo cósmico de neutrinos.

4. Un mar relictos que no hemos capturado directamente

La pregunta

El universo debería contener cientos de neutrinos relictos por centímetro cúbico, pero ningún detector ha identificado miembros individuales de ese mar. ¿Cómo cuenta como evidencia una población no detectada? Su energía y libre propagación alteran otros observables de formas calculables y contrastables.

Los neutrinos del Modelo Estándar se desacoplan de forma no instantánea cerca de la escala MeV, cuando la historia térmica estándar tiene aproximadamente un segundo. Sus interacciones débiles dejan de mantener el equilibrio completo y la población empieza a propagarse libremente, conservando pequeños efectos espectrales de la duración finita del desacoplamiento. [13–15]

La aniquilación electrón–positrón calienta después más a los fotones que a los neutrinos ya desacoplándose. En la idealización instantánea, la conservación de entropía da una relación de temperaturas neutrino–fotón igual a la raíz cúbica de 4/11. El desacoplamiento real se solapa con la aniquilación y modifica ligeramente el resultado simple. [14–16]

Los cálculos de precisión del Modelo Estándar incluyen oscilaciones de sabor y electrodinámica cuántica a temperatura finita. Producen un parámetro efectivo de radiación $N_{\text{eff}} = 3,0440 \pm 0,0002$, no exactamente tres. La diferencia es pequeña, pero registra física real de transporte y vuelve la cosmología sensible a reliquias ligeras adicionales. [15]

N_{eff} parametriza densidad energética de radiación; no es un censo literal de sabores de neutrino. Con la temperatura fotónica medida y la relación estándar de desacoplamiento, la temperatura relicta actual es de unos 1,95 K y la densidad media total de unos 336 neutrinos más antineutrinos por centímetro cúbico entre tres sabores. [15–17]

Aún no se han capturado directamente neutrinos relictos cósmicos individuales. Su población se infiere por efectos en nucleosíntesis, amortiguamiento del CMB y desplazamiento de fase acústica producido por radiación libre; PTOLEMY representa una vía propuesta de detección directa. La convergencia indirecta es evidencia, pero no debe llamarse recuento de partículas completado. [16–19]

En qué punto estamos

Los neutrinos relictos ilustran la escala de evidencia: el transporte preciso del Modelo Estándar predice una población que deja señales cosmológicas independientes, mientras la captura directa sigue propuesta, no lograda. A temperaturas mayores cambian otra vez los portadores relevantes. Neutrinos, electrones y núcleos ceden paso a una descripción térmica dominada por grados de libertad de quarks y gluones.

5. Antes de protones y neutrones

La pregunta

¿Existieron protones desde el principio? A temperatura suficiente, tratar la materia como gas diluido de hadrones estables deja de funcionar. Quarks y gluones se vuelven los grados térmicos útiles, pero quarks «libres» no significan gas ideal débil ni copia del cosmos en laboratorio.

Por encima del cruce QCD, grados de libertad de quarks y gluones describen mejor el medio térmico que una población diluida de protones, neutrones y mesones estables. Es desconfinamiento en sentido colectivo y de temperatura finita. No significa que puedan extraerse quarks aislados y almacenarse como electrones. [20–22]

Con potencial químico bariónico casi nulo, relevante para el universo temprano, QCD en retículo encuentra un cruce quiral suave, no una transición de primer orden. Una temperatura pseudocrítica representativa es $156,5 \pm 1,5$ MeV. El valor marca el cruce, no un instante discontinuo en que una sustancia se convierte abruptamente en otra. [20,21]

Las colisiones de iones pesados en RHIC y LHC crean gotas minúsculas de materia QCD con flujo colectivo y fuerte pérdida de energía de partones. La evidencia muestra un plasma de quarks y gluones fuertemente interactuante, no el gas ideal débil esperado antaño. Múltiples experimentos restringen observables y sistemáticas complementarios. [23–30]

Esas colisiones no recrean el universo temprano completo. Sus gotas son microscópicas, breves y se expanden con geometría distinta; también difieren sus condiciones bariónicas y estado inicial. Prueban microfísica QCD bajo extremos controlados, aportando restricciones en lugar de una reproducción cosmológica en miniatura. [23,24,28,29]

Al enfriarse el medio cósmico a través del cruce QCD, los grados térmicos se reorganizaron en hadrones, incluidos protones y neutrones usados después por la nucleosíntesis. Materia y antimateria casi simétricas se aniquilaron en gran parte y sobrevivió un pequeño exceso

bariónico. QCD describe la reorganización; QTC-014 conserva el origen todavía abierto de ese exceso. [3,20–23]

En qué punto estamos

Los cálculos de retículo y datos de colisionadores vuelven la época QCD una reconstrucción restringida, aunque su traducción cósmica depende de modelos. Los hadrones emergieron mediante cruce suave y el exceso de materia superviviente exige otra explicación. A temperatura mayor, el sector de Higgs medido determina otra reorganización: cambia la simetría electrodébil sin la transición violenta requerida por muchas imágenes de bariogénesis.

6. Cuando cambió la simetría electrodébil

La pregunta

Los diagramas suelen dibujar la época electrodébil como transición abrupta. La masa medida del Higgs cambia la imagen. Dentro del Modelo Estándar, el cambio térmico es un cruce suave, resultado que elimina además un ingrediente necesario para la explicación electrodébil más sencilla del exceso de materia.

Con un bosón de Higgs cercano a 125 GeV, el Modelo Estándar no produce una transición electrodébil fuerte de primer orden. Límites teóricos anteriores y mediciones posteriores de colisionadores sitúan el universo real en régimen de cruce. La conclusión pertenece al Modelo Estándar medido, no a toda posible extensión de su sector escalar. [31,32,34,35]

Los cálculos no perturbativos sitúan un cruce representativo cerca de $159,5 \pm 1,5$ GeV, con una región estrecha de cambio rápido pero continuo. Puede citarse una temperatura pseudocrítica sin calor latente ni discontinuidad termodinámica. Nombrar la época no debe reintroducir furtivamente una transición de primer orden. [32,33]

A través del cruce evolucionan el valor térmico esperado del Higgs y las masas de apantallamiento, cambiando tasas de reacción y propagación efectiva de excitaciones en el plasma. «Las partículas adquieren masa en un instante» es un relato demasiado brusco. El medio térmico y la realización de simetría cambian continuamente en un intervalo finito. [6,32]

Las mediciones de ATLAS y CMS de un nuevo bosón cerca de 125 GeV aportan el dato de laboratorio usado en el cálculo térmico del Modelo Estándar. Mediciones posteriores refinan sus propiedades. Es un ejemplo concreto de reconstrucción cosmológica dependiente de datos de colisionador, no de una imagen relictas de la época electrodébil. [32,34–36]

Un cruce suave del Modelo Estándar no puede aportar por sí solo el suceso fuerte de primer orden y fuera del equilibrio exigido por la bariogénesis electrodébil convencional. Las extensiones pueden cambiar la transición y añadir violación CP, pero son hipótesis comprobables. El exceso de materia atraviesa el cruce; su origen sigue siendo problema de QTC-014. [31–33]

En qué punto estamos

La época electrodébil se reconstruye desde un sector de Higgs medido y cálculo térmico no perturbativo, no se observa como destello cósmico. Su cruce suave restringe la bariogénesis sin resolverla. Ya podemos ensamblar la secuencia preatómica, pero solo si experimentos, reliquias y cálculos conservan funciones distintas en vez de fundirse en una animación continua.

7. Reconstruir una secuencia invisible

La confianza procede de una trenza. Masas y secciones eficaces de acelerador restringen física de partículas; experimentos nucleares, BBN; transporte de neutrinos, efectos de reliquias ligeras; cálculos de retículo, transiciones térmicas fuertemente acopladas; abundancias primordiales y CMB prueban consecuencias posteriores. Ninguna hebra fotografía toda la historia y cada una se comprueba donde es más fuerte. [3,9,15,17,21,23,32]

Las colisiones de iones pesados exigen especial disciplina en esa trenza. Revelan materia QCD colectiva y pérdida de energía, pero difieren del cosmos en tamaño, duración, geometría, estado inicial y potencial químico bariónico. Una descripción de laboratorio satisfactoria respalda microfísica relevante; no certifica que el universo temprano repitiera la colisión suceso por suceso. [23–29]

La dependencia de modelos aumenta en general hacia afirmaciones más tempranas y calientes porque sobreviven menos reliquias independientes y crecen los saltos de energía extrapolados. No es ignorancia uniforme: QCD y cálculos electrodébiles tienen anclas de laboratorio, mientras otras etapas propuestas dependen más de extensiones no detectadas. La confianza debe variar por afirmación, no por etiqueta dramática. [3–5,38]

La reconstrucción es más fuerte cuando un proceso predice una magnitud posterior medida mediante otra física. El transporte de neutrinos cambia fases del CMB; las tasas nucleares predicen abundancias; la masa del Higgs modifica termodinámica electrodébil. Esas conexiones convierten una lista de temperaturas en secuencia causal con juntas que pueden fallar independientemente. [3,17,21,32]

Una cronología responsable marca frontera observacional, calibración inferencial e insumos teóricos cambiantes. No coloca un icono de fotografía junto a cada época, pero tampoco abandona el pasado como incognoscible. La escala de evidencia sigue siendo útil porque sus peldaños superiores se etiquetan como más dependientes de modelos. [3–5,38]

En qué punto estamos

La secuencia invisible es creíble porque métodos distintos se solapan sin volverse intercambiables. Las reliquias prueban consecuencias; experimentos y retículos restringen microfísica; la expansión conecta temperatura y tiempo. Al adelgazar el solapamiento deben cambiar las etiquetas epistémicas. El último paso es detener la reconstrucción establecida antes de promover posibilidades de gran unificación y gravedad cuántica a hechos históricos.

8. La frontera de la reconstrucción

Por encima de regímenes del Modelo Estándar probados, las cronologías introducen partículas de gran unificación, monopolos y rupturas de simetría. Son hipótesis motivadas, no etapas establecidas porque pueda asignárseles energía. La sobreproducción de monopolos ayudó a motivar la inflación, pero no se ha observado una población de monopolos ni una historia GUT única. [3,37–39]

Cerca del régimen de Planck, ninguna teoría empíricamente establecida de gravedad cuántica proporciona continuación verificada. Se espera que espaciotiempo clásico y teoría térmica ordinaria resulten inadecuados, pero nombrar la escala no selecciona cuerdas, bucles, rebotes ni

otra explicación concreta. La frontera correcta es explícita, no rellenada con certeza decorativa. [37,38]

Por debajo, la confianza es graduada, no binaria. CMB y abundancias anclan consecuencias tardías; transporte del Modelo Estándar, retículos QCD y colisionadores reconstruyen regímenes anteriores; la expansión cosmológica aporta el orden. La cadena impresiona porque declara qué enlaces se observan, calculan, contrastan o siguen hipotéticos. [3,17,21,32,38]

Las extensiones de gran unificación siguen siendo valiosas porque generan restricciones y reliquias posibles. Un monopolio detectado, un patrón de desintegración del protón u otra señal distintiva podría acercar una propuesta a la historia. Hasta entonces, el nombre de época organiza hipótesis; no certifica que la naturaleza siguiera ese modelo. [37–39]

El final es metodológico. Podemos razonar antes de los átomos sin fingir que miramos. Cuanto más retrocedemos, más debemos separar microfísica medida, extrapolación cosmológica y extensión no probada. QTC-014 toma ahora un hecho superviviente —el exceso bariónico— y pregunta qué mecanismo nuevo, si alguno, lo creó. [3,37,38]

En qué punto estamos

Antes de los átomos no significa antes de la evidencia. Abundancias nucleares, señales de neutrinos, QCD en retículo y colisionadores sostienen una reconstrucción térmica graduada, mientras gran unificación y gravedad cuántica siguen abiertas. La frontera no es fracaso de la ciencia; es el punto donde una cronología responsable cambia de historia establecida a hipótesis comprobable.

Lo que sabemos y cómo lo sabemos

- La secuencia preatómica se reconstruye mediante expansión, microfísica medida, abundancias relictas, señales del CMB, retículos y colisionadores.
- Desacoplamiento de neutrinos, cruce QCD y cruce electrodébil del Modelo Estándar poseen descripciones térmicas cuantitativamente restringidas.
- Las colisiones de iones pesados prueban materia QCD relevante, pero no reproducen tamaño, duración, geometría ni condiciones iniciales del universo temprano.

Lo que todavía no sabemos

- El fondo cósmico de neutrinos no se ha detectado directamente como neutrinos relictos individuales.
- Los cruces del Modelo Estándar descritos aquí no aportan el mecanismo que produjo el exceso bariónico superviviente.
- Las etapas de gran unificación y la continuación verificada por el régimen de Planck siguen abiertas.

Qué podría hacernos cambiar de opinión

- La detección directa de neutrinos relictos añadiría un mensajero y probaría más directamente el cálculo estándar de desacoplamiento.
- Pruebas de nuevas partículas en colisionadores o reliquias podrían revisar las partes electrodébil, bariogénica o de gran unificación.

- Una teoría de gravedad cuántica con éxito empírico podría prolongar la reconstrucción más allá de su frontera actual de Planck.

Si solo recuerdas una cosa

Antes de los átomos reconstruimos en vez de fotografiar: la confianza nace de reliquias, experimentos y cálculos solapados, y disminuye explícitamente más allá del Modelo Estándar probado.

Artículos relacionados

- QTC-011 — La luz más antigua que podemos observar
- QTC-012 — ¿Qué queremos decir realmente cuando hablamos del Big Bang?
- QTC-014 — Materia, antimateria y un desequilibrio sin resolver

Referencias

- [1] Sara Seager; Dimitar D. Sasselov; Douglas Scott. How Exactly Did the Universe Become Neutral? Astrophysical Journal Supplement Series 128, 407-430 (2000). DOI 10.1086/313388. <https://arxiv.org/abs/astro-ph/9912182>
- [2] Steven Weinberg. The Quantum Theory of Fields, Volume I: Foundations. Cambridge University Press, chapters 2-5 (1995). <https://www.cambridge.org/core/books/quantum-theory-of-fields/0C60AE9B1A0193F08D0F730CAEABB5C4>
- [3] K. A. Olive; J. A. Peacock / Particle Data Group. Big-Bang Cosmology. Review of Particle Physics, section 22 (2024). DOI 10.1103/PhysRevD.110.030001. <https://pdg.lbl.gov/2024/reviews/rpp2024-rev-bbang-cosmology.pdf>
- [4] Edward W. Kolb; Michael S. Turner. The Early Universe. Frontiers in Physics 69 (1990). <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1990eaun.book.....K/abstract>
- [5] Steven Weinberg. Cosmology. Oxford University Press, chapters 2-3 (2008). DOI 10.1093/oso/9780198526827.001.0001. <https://doi.org/10.1093/oso/9780198526827.001.0001>
- [6] Mikko Laine; Aleksu Vuorinen. Basics of Thermal Field Theory. Lecture Notes in Physics 925; updated open version (2016). DOI 10.1007/978-3-319-31933-9. <https://arxiv.org/abs/1701.01554>
- [7] Paolo Gondolo; Graciela Gelmini. Cosmic abundances of stable particles: Improved analysis. Nuclear Physics B 360, 145-179 (1991). DOI 10.1016/0550-3213(91)90438-4. [https://doi.org/10.1016/0550-3213\(91\)90438-4](https://doi.org/10.1016/0550-3213(91)90438-4)
- [8] Robert V. Wagoner; William A. Fowler; F. Hoyle. On the Synthesis of Elements at Very High Temperatures. Astrophysical Journal 148, 3 (1967). DOI 10.1086/149126. <https://doi.org/10.1086/149126>
- [9] Richard H. Cyburt; Brian D. Fields; Keith A. Olive; Tsung-Han Yeh. Big bang nucleosynthesis: Present status. Reviews of Modern Physics 88, 015004 (2016). DOI 10.1103/RevModPhys.88.015004. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.88.015004>
- [10] B. D. Fields; P. Molaro; S. Sarkar / Particle Data Group. Big Bang Nucleosynthesis. Review of Particle Physics, section 24 (2024). DOI 10.1103/PhysRevD.110.030001. <https://pdg.lbl.gov/2024/reviews/rpp2024-rev-bbang-nucleosynthesis.pdf>

- [11] Cyril Pitrou; Alain Coc; Jean-Philippe Uzan; Elisabeth Vangioni. Precision big bang nucleosynthesis with improved Helium-4 predictions. *Physics Reports* 754, 1-66 (2018). DOI 10.1016/j.physrep.2018.04.005. <https://doi.org/10.1016/j.physrep.2018.04.005>
- [12] Ryan J. Cooke; Max Pettini; Charles C. Steidel. One Percent Determination of the Primordial Deuterium Abundance. *Astrophysical Journal* 855, 102 (2018). DOI 10.3847/1538-4357/aaab53. <https://doi.org/10.3847/1538-4357/aaab53>
- [13] Ralph A. Alpher; James W. Follin, Jr.; Robert C. Herman. Physical Conditions in the Initial Stages of the Expanding Universe. *Physical Review* 92, 1347-1361 (1953). DOI 10.1103/PhysRev.92.1347. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.92.1347>
- [14] Gianpiero Mangano; Gennaro Miele; Sergio Pastor; Teguhayco Pinto; Ofelia Pisanti; Pasquale D. Serpico. Relic neutrino decoupling including flavour oscillations. *Nuclear Physics B* 729, 221-234 (2005). DOI 10.1016/j.nuclphysb.2005.09.041. <https://arxiv.org/abs/hep-ph/0506164>
- [15] Jack J. Bennett; Gilles Buldgen; Pablo F. de Salas; Marco Drewes; Stefano Gariazzo; Sergio Pastor; Yvonne Y.Y. Wong. Towards a precision calculation of N_{eff} in the Standard Model II: Neutrino decoupling in the presence of flavour oscillations and finite-temperature QED. *JCAP* 04 (2021) 073 (2021). DOI 10.1088/1475-7516/2021/04/073. <https://arxiv.org/abs/2012.02726>
- [16] J. Lesgourgues; S. Pastor. Massive neutrinos and cosmology. *Physics Reports* 429, 307-379 (2006). DOI 10.1016/j.physrep.2006.04.001. <https://arxiv.org/abs/astro-ph/0603494>
- [17] Planck Collaboration. Planck 2018 results. VI. Cosmological parameters. *Astronomy & Astrophysics* 641, A6 (2020). DOI 10.1051/0004-6361/201833910. <https://arxiv.org/abs/1807.06209>
- [18] Brent Follin; Lloyd Knox; Marius Millea; Zhen Pan. First Detection of the Acoustic Oscillation Phase Shift Expected from the Cosmic Neutrino Background. *Physical Review Letters* 115, 091301 (2015). DOI 10.1103/PhysRevLett.115.091301. <https://arxiv.org/abs/1503.07863>
- [19] M. G. Betti et al. (PTOLEMY Collaboration). Neutrino physics with the PTOLEMY project: active neutrino properties and the light sterile case. *JCAP* 07 (2019) 047 (2019). DOI 10.1088/1475-7516/2019/07/047. <https://arxiv.org/abs/1902.05508>
- [20] Y. Aoki; G. Endrődi; Z. Fodor; S. D. Katz; K. K. Szabó. The order of the quantum chromodynamics transition predicted by the standard model of particle physics. *Nature* 443, 675-678 (2006). DOI 10.1038/nature05120. <https://arxiv.org/abs/hep-lat/0611014>
- [21] A. Bazavov et al. (HotQCD Collaboration). Chiral crossover in QCD at zero and non-zero chemical potentials. *Physics Letters B* 795, 15-21 (2019). DOI 10.1016/j.physletb.2019.05.013. <https://arxiv.org/abs/1812.08235>
- [22] A. Bazavov et al. (HotQCD Collaboration). Equation of state in (2+1)-flavor QCD. *Physical Review D* 90, 094503 (2014). DOI 10.1103/PhysRevD.90.094503. <https://arxiv.org/abs/1407.6387>
- [23] Wit Busza; Krishna Rajagopal; Wilke van der Schee. Heavy Ion Collisions: The Big Picture, and the Big Questions. *Annual Review of Nuclear and Particle Science* 68, 339-376 (2018). DOI 10.1146/annurev-nucl-101917-020852. <https://arxiv.org/abs/1802.04801>

- [24] I. Arsene et al. (BRAHMS Collaboration). Quark-gluon plasma and color glass condensate at RHIC? The perspective from the BRAHMS experiment. *Nuclear Physics A* 757, 1-27 (2005). DOI 10.1016/j.nuclphysa.2005.02.130. <https://doi.org/10.1016/j.nuclphysa.2005.02.130>
- [25] K. Adcox et al. (PHENIX Collaboration). Formation of dense partonic matter in relativistic nucleus-nucleus collisions at RHIC: Experimental evaluation by the PHENIX Collaboration. *Nuclear Physics A* 757, 184-283 (2005). DOI 10.1016/j.nuclphysa.2005.03.086. <https://doi.org/10.1016/j.nuclphysa.2005.03.086>
- [26] J. Adams et al. (STAR Collaboration). Experimental and theoretical challenges in the search for the quark-gluon plasma: The STAR Collaboration's critical assessment of the evidence from RHIC collisions. *Nuclear Physics A* 757, 102-183 (2005). DOI 10.1016/j.nuclphysa.2005.03.085. <https://doi.org/10.1016/j.nuclphysa.2005.03.085>
- [27] B. B. Back et al. (PHOBOS Collaboration). The PHOBOS perspective on discoveries at RHIC. *Nuclear Physics A* 757, 28-101 (2005). DOI 10.1016/j.nuclphysa.2005.03.084. <https://doi.org/10.1016/j.nuclphysa.2005.03.084>
- [28] K. Aamodt et al. (ALICE Collaboration). Suppression of charged particle production at large transverse momentum in central Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV. *Physics Letters B* 696, 30-39 (2011). DOI 10.1016/j.physletb.2010.12.020. <https://doi.org/10.1016/j.physletb.2010.12.020>
- [29] K. Aamodt et al. (ALICE Collaboration). Elliptic Flow of Charged Particles in Pb-Pb Collisions at 2.76 TeV. *Physical Review Letters* 105, 252302 (2010). DOI 10.1103/PhysRevLett.105.252302. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.105.252302>
- [30] Edward Shuryak. What RHIC experiments and theory tell us about properties of quark-gluon plasma? *Nuclear Physics A* 750, 64-83 (2005). DOI 10.1016/j.nuclphysa.2004.10.022. <https://doi.org/10.1016/j.nuclphysa.2004.10.022>
- [31] K. Kajantie; M. Laine; K. Rummukainen; M. Shaposhnikov. Is There a Hot Electroweak Phase Transition at m_H greater than or approximately m_W ? *Physical Review Letters* 77, 2887-2890 (1996). DOI 10.1103/PhysRevLett.77.2887. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.77.2887>
- [32] Michela D'Onofrio; Kari Rummukainen. Standard model cross-over on the lattice. *Physical Review D* 93, 025003 (2016). DOI 10.1103/PhysRevD.93.025003. <https://arxiv.org/abs/1508.07161>
- [33] Michela D'Onofrio; Kari Rummukainen; Anders Tranberg. Sphaleron Rate in the Minimal Standard Model. *Physical Review Letters* 113, 141602 (2014). DOI 10.1103/PhysRevLett.113.141602. <https://arxiv.org/abs/1404.3565>
- [34] G. Aad et al. (ATLAS Collaboration). Observation of a new particle in the search for the Standard Model Higgs boson with the ATLAS detector at the LHC. *Physics Letters B* 716, 1-29 (2012). DOI 10.1016/j.physletb.2012.08.020. <https://arxiv.org/abs/1207.7214>
- [35] S. Chatrchyan et al. (CMS Collaboration). Observation of a new boson at a mass of 125 GeV with the CMS experiment at the LHC. *Physics Letters B* 716, 30-61 (2012). DOI 10.1016/j.physletb.2012.08.021. <https://arxiv.org/abs/1207.7235>
- [36] M. Carena; C. Grojean; M. Kado; V. Sharma / Particle Data Group. Status of Higgs Boson Physics. *Review of Particle Physics, Higgs review* (2024). DOI 10.1103/PhysRevD.110.030001. <https://pdg.lbl.gov/2024/reviews/rpp2024-rev-higgs-boson.pdf>

[37] Claus Kiefer. Quantum Gravity, Third Edition. Oxford University Press (2012). DOI 10.1093/acprof:oso/9780199585205.001.0001.
<https://doi.org/10.1093/acprof:oso/9780199585205.001.0001>

[38] Dmitry S. Gorbunov; Valery A. Rubakov. Introduction to the Theory of the Early Universe: Hot Big Bang Theory, Second Edition. World Scientific (2017). DOI 10.1142/10447.
<https://doi.org/10.1142/10447>

[39] John P. Preskill. Cosmological Production of Superheavy Magnetic Monopoles. Physical Review Letters 43, 1365-1368 (1979). DOI 10.1103/PhysRevLett.43.1365.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.43.1365>