

¿Qué queremos decir realmente cuando hablamos del Big Bang?

QTC-012 · 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

El Big Bang no afirma que la materia explotara desde un punto dentro de un recipiente vacío. En la cosmología moderna nombra una historia guiada por evidencias en la que el universo observable fue mucho más caliente, denso y estuvo en expansión. Este artículo separa esa afirmación sólida de varias capas que suelen confundirse con ella: expansión relativista, fondo cósmico de microondas, nucleosíntesis primordial, Lambda-CDM, inflación y propuestas sobre un comienzo cuántico o un rebote. También recupera la historia distribuida de la idea, desde Friedmann y Lemaître hasta Slipher, Hubble, Hoyle y las mediciones que desplazaron la cosmología estacionaria. Al retroceder las ecuaciones se alcanza una frontera donde la relatividad general clásica deja de ser fiable. Esa frontera importa científicamente, pero no es una fotografía de la creación ni una respuesta resuelta sobre si el tiempo tuvo un comienzo absoluto.

En 60 segundos

Un universo homogéneo en expansión no posee un centro espacial único. La cosmología describe las separaciones a gran escala mediante un factor de escala cambiante, mientras átomos, sistemas planetarios y galaxias siguen dominados por enlaces y dinámicas locales. Las pruebas de un pasado caliente convergen: corrimientos al rojo y relaciones de distancia medidos, el espectro casi perfectamente térmico y las anisotropías del fondo cósmico de microondas, las abundancias primordiales de elementos ligeros y la estructura a gran escala. Estas huellas sondan épocas y procesos físicos distintos. Los núcleos ligeros se formaron principalmente en los primeros minutos; el CMB se desacopló unos 380.000 años después. En Lambda-CDM base, la historia de expansión ajustada da una edad cercana a 13.800 millones de años, pero extrapolar las ecuaciones clásicas hacia factor de escala cero produce una frontera, no acceso directo a la creación. La gravedad cuántica debería importar cerca del régimen de Planck, y rebotes o fases previas siguen sin confirmar. La inflación es un marco principal para las perturbaciones primordiales, pero no se ha establecido un inflatón concreto. El Big Bang es ciencia sólida precisamente porque sus afirmaciones fiables son más estrechas que el relato total de origen asociado a su nombre.

Por qué importa esta pregunta

«Big Bang» es un nombre compacto que oculta demasiadas imágenes. Si significa bomba, se busca un centro; si significa tiempo cero, cada incertidumbre de la cosmología cuántica parece amenazar el

pasado caliente medido; si significa Lambda-CDM más inflación, una corrección en una capa parece derribarlas todas. Separar las capas vuelve auditable el razonamiento. Permite ver qué magnitudes se observaron, cuáles se infirieron mediante un modelo, qué procesos independientes se contrastan y dónde deja la física actual de ganarse nuestra confianza.

1. No fue una explosión

La pregunta

¿Dónde ocurrió el Big Bang? La pregunta supone una explosión con un exterior. La cosmología relativista cambia la geometría de la propia pregunta: el estado caliente y denso llenaba la región modelada, y las distancias a gran escala cambiaron sin elegir un centro privilegiado.

En la cosmología moderna, Big Bang caliente significa que el universo observable evolucionó desde un estado mucho más caliente, denso y en expansión. La expresión no especifica una bomba, un punto de ignición ni restos desplazándose hacia un vacío preexistente. Nombra una reconstrucción de condiciones físicas anteriores a partir de reliquias todavía medibles. [36,38]

Los modelos relativistas homogéneos e isótropos representan la expansión mediante un factor de escala. Al cambiar, cambian las distancias propias entre líneas de mundo comóviles, aunque cada observador permanezca localmente en reposo en coordenadas comóviles. La descripción matemática trata de relaciones espaciotemporales en el universo modelado, no de una nube creciente dentro de un escenario fijo. [1,2,36,38]

Una expansión homogénea no tiene un centro espacial único dentro del modelo. Cada observador comóvil ve alejarse sistemas suficientemente distantes según la misma relación global. La ausencia de centro no significa que cada punto sea secretamente uno; expresa la simetría geométrica, análoga a la falta de posición privilegiada sobre una superficie uniforme. [2,10,36]

La expansión cósmica tampoco hincha todos los objetos. El enlace electromagnético domina en los átomos, la gravedad y la dinámica orbital en sistemas planetarios, y las galaxias virializadas no escalan simplemente con el flujo de Hubble. El factor de escala describe la solución cosmológica global, no una fuerza de estiramiento aplicada por igual a todo sistema. [10,36]

Incluso «espacio en expansión» es una descripción útil, no el único lenguaje posible. El corrimiento cosmológico puede descomponerse en desplazamientos Doppler locales acumulados a lo largo del trayecto de un fotón si se maneja correctamente la geometría. Puede cambiar el lenguaje de coordenadas; la observación invariante y la relación relativista no se convierten en movimiento dentro de un recipiente estático. [9–11]

En qué punto estamos

El Big Bang no ocurrió en una dirección concreta ni fuera del universo. Es una historia de escala cambiante y condiciones físicas en toda la región modelada, mientras los sistemas ligados obedecen dinámicas locales. Al retirar la imagen de explosión, se aclara la historia: teoría de expansión, evidencia observacional y propuestas sobre un comienzo llegaron en pasos distintos.

2. La expansión antes del nombre

Alexander Friedmann mostró en 1922 que las ecuaciones de Einstein admiten soluciones homogéneas no estáticas. Los universos relativistas podían expandirse o contraerse; las ecuaciones

de campo no imponían estatismo. Era una apertura matemática, todavía no una demostración observacional de la historia concreta seguida por nuestro universo. [1]

Georges Lemaître conectó independientemente en 1927 un radio cósmico cambiante con velocidades nebulares medidas. La traducción inglesa publicada en 1931 omitió parte de la discusión original, y las pruebas de archivo muestran que el propio Lemaître preparó la traducción y eligió las omisiones. Recuperar el artículo francés importa porque el texto ausente pertenecía a su argumento cuantitativo. [2,39,40]

La relación distancia–velocidad de Edwin Hubble de 1929 fue una prueba observacional crucial, pero sus datos tuvieron procedencia distribuida. Hubble aportó estimaciones de distancia y gran parte de las velocidades radiales procedían de Vesto Slipher y otros observadores; Hubble y Humason ampliaron después la relación. Ese logro no inventó por sí solo la expansión relativista ni el Big Bang caliente. [4,5,41]

La nota de Lemaître sobre el átomo primitivo de 1931 añadió una imagen física de origen con edad finita. La propuesta no era idéntica a su solución expansiva de 1927, cuyo comportamiento pasado difería. Por eso la historia resiste una fecha única: ecuaciones no estáticas, expansión vinculada a velocidades y comienzo físico fueron movimientos conceptuales distintos. [3,8]

Fred Hoyle introdujo la expresión «big bang» en una emisión de la BBC del 28 de marzo de 1949 mientras defendía la cosmología estacionaria. Ese modelo fue un rival científico serio con afirmaciones comprobables sobre un universo eternamente expansivo y de densidad global constante. Las pruebas no permiten reducir la expresión de Hoyle a una simple burla que nombró accidentalmente la teoría ganadora. [6–8]

En qué punto estamos

Ningún instante solitario entregó el Big Bang moderno. La matemática abrió la cosmología no estática; observadores reunieron distancias y velocidades; Lemaître las relacionó y después propuso un átomo primitivo; Hoyle nombró la imagen rival mientras defendía otra teoría. La decisión entre cosmologías dependió finalmente no de relatos de prioridad, sino de varias huellas físicas de un pasado caliente.

3. Más de una huella de un pasado caliente

La pregunta

Una observación puede reinterpretarse o absorberse en un modelo flexible. Una historia cósmica convincente debe sobrevivir mediciones, instrumentos, épocas y procesos físicos distintos. Expansión, radiación térmica, abundancias nucleares y estructura ganan fuerza cuando sus restricciones se cruzan en vez de limitarse a repetirse.

El corrimiento al rojo se mide directamente en espectros, pero traducirlo a velocidad de recesión o distancia depende del modelo cosmológico y del régimen considerado. Movimientos peculiares y desplazamientos gravitatorios pueden sumarse a la señal de expansión. La prueba reside en una relación ordenada entre muchos objetos, no en tratar cada corrimiento como una lectura sencilla de velocímetro. [9–11,38]

Las supernovas de tipo Ia revelaron a finales de la década de 1990 que la expansión reciente se acelera. Ese resultado modificó la historia cósmica parametrizada sin abolir el Big Bang caliente.

La expansión no tiene que avanzar a ritmo constante, y un universo temprano desacelerado puede coexistir con aceleración tardía bajo el inventario energético ajustado. [12,13,16]

El fondo cósmico de microondas aporta otra reliquia. Su espectro es extraordinariamente próximo al de un cuerpo negro, mientras pequeñas anisotropías codifican estructura acústica y gravitatoria. Es radiación liberada al volverse transparente el universo, no luz que viaja desde el centro de una explosión. QTC-011 conserva los detalles de detección, cartografiado y primeros planos. [14–16,32]

La nucleosíntesis del Big Bang emplea otro proceso físico. Las tasas de reacción nuclear de los primeros minutos predicen abundancias de elementos ligeros, mucho antes de que los átomos neutros liberaran el CMB. La dependencia de la red respecto a temperatura, expansión y densidad bariónica convierte helio y deuterio en una prueba independiente, no en repetición del cielo de microondas. [17–21]

La estructura a gran escala y la geometría de oscilaciones acústicas bariónicas añaden pruebas posteriores para la misma historia de expansión y perturbaciones primordiales. Ninguna observación soporta toda la teoría. El caso más fuerte es la convergencia entre distancias y corrimientos, radiación térmica, núcleos ligeros y estructura, cada cual con sus sistemáticas y conexiones de modelo. [16,25,32,38]

En qué punto estamos

El pasado caliente no se infiere de una imagen icónica. Se triangula entre corrimiento, aceleración, radiación térmica, química nuclear y estructura. Esas sondas no observan el mismo momento, y por eso importa su acuerdo. Para entender qué restringen, el siguiente paso es conectar expansión con cambios de temperatura, densidad y tiempo cósmico.

4. Calor, densidad y reloj

En el escenario térmico estándar de expansión libre, la radiación se enfría aproximadamente como el inverso del factor de escala. Su densidad energética cae a la cuarta potencia: tres por el aumento de volumen y una por la pérdida de energía de los fotones. La densidad de materia no relativista cae sobre todo a la tercera porque su masa en reposo no se desplaza igual. [35,36,38]

Al invertir la expansión, temperatura y densidad medias aumentan en toda la región homogénea modelada. El universo temprano estaba caliente porque el inventario de radiación y materia ocupaba menor escala con mayor densidad energética, no porque los fragmentos próximos a una ignición fueran más calientes que restos lejanos. La evolución hacia atrás convierte geometría en historia térmica física. [36,38]

El CMB se dispersó por última vez unos 380.000 años después del inicio de la expansión caliente modelada, cuando electrones y núcleos se combinaron con suficiente eficacia para que los fotones viajaran libremente. Esa superficie es la imagen electromagnética más antigua disponible, pero no es el Big Bang ni visión directa de una singularidad inicial. [14–16]

Los núcleos ligeros pertenecen a un reloj mucho anterior. La nucleosíntesis primordial quedó determinada en gran medida durante los primeros minutos, mientras el desacoplamiento fotónico llegó cientos de miles de años después. Confundir ambas épocas destruye la independencia que convierte abundancias nucleares y anisotropías de microondas en un contraste tan fuerte. [15,21]

La temperatura proporciona cronología mediante procesos físicos comprobados: se congelan reacciones débiles, se abren y cierran redes nucleares, el plasma se recombina después y los fotones se desacoplan. Cada suceso tiene tasas y supuestos propios. Su secuencia ordenada conecta las reliquias medidas sin fingir que ninguna alcanza el tiempo cero. [14–16,21]

En qué punto estamos

La expansión predice una secuencia de umbrales térmicos y de densidad, no solo una película invertida. El CMB marca transparencia; la nucleosíntesis, una ventana nuclear anterior. Mantener separados los relojes vuelve informativo su acuerdo y conduce a la prueba temprana más cuantitativa: calcular los elementos ligeros de los primeros minutos y compararlos con materia antigua.

5. Evidencia nuclear de los primeros minutos

La pregunta

Una teoría del universo temprano no debe limitarse a decir que estaba caliente. Debe calcular qué hizo ese calor. Tasas de reacción nuclear, desintegración de neutrones y expansión cósmica predicen juntas un patrón de elementos ligeros que las estrellas posteriores pueden alterar, pero no inventar libremente.

La nucleosíntesis estándar empieza cuando las interacciones débiles dejan de mantener el equilibrio neutrón–protón cerca de un segundo. Al enfriarse el plasma por expansión, el deuterio sobrevive a la fotodisociación y una breve red nuclear ensambla rápidamente los principales núcleos ligeros. Las abundancias centrales quedan fijadas en gran medida durante los primeros minutos. [17–21]

La red predice que aproximadamente una cuarta parte de la masa bariónica primordial termina en helio-4, con un valor exacto dependiente de tasas de reacción, vida del neutrón y densidad bariónica. Las observaciones de entornos poco metálicos concuerdan ampliamente. Las estrellas producen helio adicional, pero no son la única fuente de su abundancia cósmica. [21,23]

El deuterio es especialmente útil porque el procesamiento estelar lo destruye en lugar de crear un gran reservorio tardío. Sistemas de absorción de alto corrimiento y baja metalicidad conservan un bariómetro sensible. La densidad bariónica inferida coincide con el valor independiente extraído de la estructura acústica del CMB dentro de la cosmología estándar. [20–22]

El litio se resiste a la concordancia completa. Los cálculos estándar predicen varias veces más litio-7 primordial del que parecen contener atmósferas estelares antiguas pobres en metales. Agotamiento estelar o nueva física podrían contribuir, pero no hay solución establecida. La discrepancia es real sin borrar el patrón satisfactorio de helio y deuterio. [21,24]

La red también explica sus límites. La expansión rápida reduce la densidad, mientras la ausencia de núcleos estables con números de masa cinco y ocho bloquea la construcción eficiente de elementos más pesados. Las estrellas fabrican después la mayor parte de carbono, oxígeno y superiores. La coincidencia entre densidades bariónicas de BBN y CMB es una prueba entre épocas, no una afirmación de que los primeros minutos lo hicieran todo. [16,21]

En qué punto estamos

La física nuclear convierte «caliente» en abundancias predichas y expone concordancia junto a una discrepancia viva del litio. Helio, deuterio y CMB convergen en un inventario bariónico mediante procesos distintos, mientras los elementos pesados pertenecen sobre todo a estrellas. El siguiente límite aparece más atrás: qué ocurre al extrapolar la expansión clásica más allá de todo hito térmico comprobado.

6. Retroceder las ecuaciones

Dentro de Lambda-CDM base, las mediciones de precisión ajustan una edad cósmica actual cercana a 13.800 millones de años. Es una edad de modelo derivada de parámetros de expansión y sus relaciones, no un reloj colocado en la creación. Su precisión depende del modelo y la combinación de datos, aunque múltiples observaciones la restringen estrechamente. [16,38]

Las soluciones clásicas de Friedmann con componentes ordinarios llevan densidad, temperatura y curvatura hacia divergencias cuando el factor de escala se aproxima a cero. Una divergencia marca fallo o incompletitud de la descripción clásica en su frontera. No es un objeto fotografiado por un telescopio ni explica por qué existe algo. [26,35,36]

Los teoremas de singularidad precisan esa afirmación mediante incompletitud geodésica bajo condiciones energéticas y causales definidas. Trayectorias incompletas significan que el espaciotiempo no puede prolongarse indefinidamente dentro de los supuestos. No describen materia explotando desde un punto espacial, no prueban creación desde la nada ni eliminan la necesidad de examinar dónde fallan los supuestos. [26,27]

Cerca del régimen convencional de Planck, alrededor de 10^{-43} segundos en extrapolaciones sencillas, los efectos cuánticos de la gravedad ya no deberían ser despreciables. Relatividad general y teoría cuántica de campos han tenido éxito extraordinario en sus dominios, pero ninguna gravedad cuántica establecida experimentalmente lleva todavía el cálculo a través de esa frontera. [28,35]

El resultado de Borde–Guth–Vilenkin demuestra incompletitud pasada para geodésicas con expansión media positiva. Restringe la prolongación pasada de la inflación; no prueba que toda cosmología concebible tenga comienzo absoluto. Las propuestas cíclicas o cuánticas deben aportar dinámica completa y evidencia, no quedar exentas mediante un lema. [27,33,34]

En qué punto estamos

La extrapolación hacia atrás gana confianza en épocas donde la física comprobada conecta reliquias y alcanza después una frontera clásica que exige gravedad cuántica. Edad, divergencia e incompletitud geodésica son afirmaciones precisas con alcances distintos; ninguna equivale a «creación observada». Esa frontera muestra además que Big Bang caliente, Lambda-CDM e inflación son capas relacionadas, no un modelo indivisible.

7. El marco no es un solo modelo

La pregunta

Si falla un inflatón propuesto, ¿falla el Big Bang? Solo si se han fusionado capas teóricas distintas. Una historia térmica expansiva, un inventario ajustado de componentes cósmicos y un mecanismo

propuesto para una fase acelerada anterior responden preguntas diferentes y soportan cargas de prueba distintas.

El Big Bang caliente es la historia térmica expansiva sostenida por reliquias. Lambda-CDM es un modelo parametrizado que combina esa historia con materia oscura fría, constante cosmológica y condiciones primordiales especificadas. La inflación es una fase acelerada pre-caliente propuesta para explicar rasgos de esas condiciones. Evidencia y revisión se propagan entre capas, pero los términos no son sinónimos. [16,29,31,32]

La inflación sigue siendo el marco principal para explicar la casi planitud y el origen de perturbaciones primordiales casi invariantes de escala. Las observaciones del CMB restringen amplias clases de comportamiento inflacionario. Pero no se ha establecido empíricamente un campo inflatón, potencial o realización concretos, y muchos modelos reproducen los observables actuales. El éxito del marco no identifica un mecanismo microscópico único. [29–31]

Materia y energía oscuras pertenecen igualmente al inventario actual usado para ajustar estructura y expansión. Sus efectos gravitatorios están fuertemente respaldados, pero sus naturalezas microscópicas siguen incompletas. Cambiar el modelo de energía oscura o identificar una partícula de materia oscura revisaría componentes de Lambda-CDM sin redefinir el Big Bang caliente como explosión. [12,13,16,37]

Las propuestas de rebote, cíclicas y de cosmología cuántica intentan continuar la historia más allá de la frontera clásica. Demuestran que existen alternativas lógica y matemáticamente serias, no que una haya vencido. Las observaciones actuales no seleccionan una historia pre-caliente única, y toda propuesta debe superar coherencia interna y acceso empírico. [28,33,34]

La arquitectura por capas es una fortaleza porque permite localizar el fallo. Una tasa nuclear modifica BBN, un modelo de primer plano cambia una inferencia del CMB y un parámetro de energía oscura altera la expansión tardía sin derribar todos los resultados. La confianza científica pertenece a enlaces concretos, no a un relato cosmológico indivisible. [16,31,37]

En qué punto estamos

Big Bang caliente, Lambda-CDM, inflación y propuestas de origen cuántico ocupan niveles epistémicos distintos. Separarlos permite que las observaciones corrijan una capa sin fabricar una falsa crisis total ni una falsa certeza total. La pregunta final no es si el Big Bang lo explica todo, sino qué resuelve realmente su evidencia convergente y qué permanece fuera de su alcance.

8. Lo que el Big Bang no resuelve

La evidencia actual no decide si la expansión observable surgió de un comienzo absoluto, una frontera cuántica, un rebote o una fase precedente. La incompletitud clásica establece un límite bajo supuestos; las continuaciones cuánticas candidatas siguen siendo hipótesis. La historia caliente fiable no obliga a fingir que la pregunta ontológica más remota está cerrada. [26–28,34]

El marco es revisable porque sus partes se calculan y comprueban por separado. Tasas nucleares determinan abundancias; física de recombinación modela la última dispersión; parámetros de expansión ajustan distancias y edades; perturbaciones primordiales siembran estructura. Un desacuerdo puede señalar parámetro, conjunto de datos, capa de modelo o mecanismo ausente sin imponer una elección entre creencia total y rechazo total. [16,19,20,31]

Los artículos de esta serie conservan esas fronteras. QTC-011 explica cómo se detectó y cartografió la luz observable más antigua. QTC-013 reconstruye plasma preatómico y épocas de partículas. QTC-014 aborda el desequilibrio materia–antimateria. QTC-012 conserva la corrección más estrecha: Big Bang nombra expansión caliente guiada por evidencia, no tiempo cero observado. [15,16,21,32]

Esa división impide también que la incertidumbre viaje en dirección equivocada. Un potencial inflacionario abierto no borra el espectro del CMB; el problema del litio no elimina la concordancia del deuterio; una fase pre-caliente desconocida no hace desaparecer la expansión medida. Cada afirmación hereda únicamente la incertidumbre de las pruebas y supuestos que realmente la sostienen. [15,16,21,32]

Lo que queda es sustancial y limitado. Podemos reconstruir un universo caliente y denso mediante reliquias independientes y asignar relojes cuantitativos a su evolución posterior. Todavía no cruzamos la frontera clásica con una teoría cuántica establecida ni sabemos si «antes» tiene significado físico. El nombre Big Bang debe cargar la reconstrucción ganada, no una respuesta introducida más allá. [26–28,34]

En qué punto estamos

El Big Bang es una historia comprobada, no una explosión observada ni una metafísica completa. Expansión, radiación térmica, núcleos ligeros y estructura nos llevan muy atrás; las singularidades clásicas marcan después dónde debe cambiar el método. QTC-013 continúa por estados preatómicos todavía reconstruibles, mientras el origen absoluto permanece como problema abierto.

Lo que sabemos y cómo lo sabemos

- El universo observable evolucionó desde un estado expansivo más caliente y denso, y una expansión homogénea no posee centro espacial único.
- Historia de expansión, CMB, elementos ligeros primordiales y estructura a gran escala aportan pruebas convergentes pero físicamente distintas.
- La extrapolación clásica hacia atrás alcanza una frontera que exige gravedad cuántica; esa frontera no es observación directa de la creación.

Lo que todavía no sabemos

- No se ha establecido un campo o potencial inflatón concreto, aunque la inflación sigue siendo el marco principal para las perturbaciones.
- La discrepancia del litio primordial sigue sin resolverse dentro de la concordancia general de elementos ligeros.
- No está resuelto si la expansión caliente posee comienzo absoluto, rebote, frontera cuántica o fase precedente.

Qué podría hacernos cambiar de opinión

- Una alternativa coherente tendría que reproducir al menos igual de bien expansión, CMB, elementos ligeros y estructura medidos.
- Una señal de cosmología cuántica confirmada empíricamente podría reemplazar el agnosticismo actual sobre la frontera pre-caliente.

- Contradicciones persistentes entre sondas que superaran controles sistemáticos y de modelo obligarían a revisar la síntesis por capas.

Si solo recuerdas una cosa

El Big Bang es la historia caliente y expansiva del universo observable respaldada por pruebas; no es una bomba espacial ni una creación absoluta resuelta.

Artículos relacionados

- QTC-011 — La luz más antigua que podemos observar
- QTC-013 — Antes de los átomos
- QTC-014 — Materia, antimateria y un desequilibrio sin resolver

Referencias

- [1] A. Friedman. Über die Krümmung des Raumes. Zeitschrift für Physik 10, 377-386 (1922). DOI 10.1007/BF01332580. <https://doi.org/10.1007/BF01332580>
- [2] G. Lemaître. A Homogeneous Universe of Constant Mass and Increasing Radius Accounting for the Radial Velocity of Extra-galactic Nebulae. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 91, 483-490 (1931). DOI 10.1093/mnras/91.5.483. <https://doi.org/10.1093/mnras/91.5.483>
- [3] G. Lemaître. The Beginning of the World from the Point of View of Quantum Theory. Nature 127, 706 (1931). DOI 10.1038/127706b0. <https://doi.org/10.1038/127706b0>
- [4] Edwin Hubble. A Relation between Distance and Radial Velocity among Extra-Galactic Nebulae. Proceedings of the National Academy of Sciences 15, 168-173 (1929). DOI 10.1073/pnas.15.3.168. <https://doi.org/10.1073/pnas.15.3.168>
- [5] Edwin Hubble; Milton L. Humason. The Velocity-Distance Relation among Extra-Galactic Nebulae. The Astrophysical Journal 74, 43-80 (1931). DOI 10.1086/143323. <https://doi.org/10.1086/143323>
- [6] F. Hoyle. A New Model for the Expanding Universe. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 108, 372-382 (1948). DOI 10.1093/mnras/108.5.372. <https://doi.org/10.1093/mnras/108.5.372>
- [7] H. Bondi; T. Gold. The Steady-State Theory of the Expanding Universe. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 108, 252-270 (1948). DOI 10.1093/mnras/108.3.252. <https://doi.org/10.1093/mnras/108.3.252>
- [8] H. Kragh. Big Bang: The Etymology of a Name. Astronomy & Geophysics 54(2), 2.28-2.30 (2013). DOI 10.1093/astrogeo/att035. <https://doi.org/10.1093/astrogeo/att035>
- [9] Emory F. Bunn; David W. Hogg. The Kinematic Origin of the Cosmological Redshift. American Journal of Physics 77, 688-694 (2009). DOI 10.1119/1.3129103. <https://doi.org/10.1119/1.3129103>
- [10] Tamara M. Davis; Charles H. Lineweaver. Expanding Confusion: Common Misconceptions of Cosmological Horizons and the Superluminal Expansion of the Universe. Publications of the Astronomical Society of Australia 21, 97-109 (2004). DOI 10.1071/AS03040. <https://doi.org/10.1071/AS03040>

- [11] David W. Hogg. Distance Measures in Cosmology. arXiv:astro-ph/9905116 (1999). <https://arxiv.org/abs/astro-ph/9905116>
- [12] Adam G. Riess; Alexei V. Filippenko; Peter Challis; Alejandro Clocchiatti; Alan Diercks; Peter M. Garnavich; Ron L. Gilliland; Craig J. Hogan; Saurabh Jha; Robert P. Kirshner; B. Leibundgut; M. M. Phillips; David Reiss; Brian P. Schmidt; Robert A. Schommer; R. Chris Smith; J. Spyromilio; Christopher Stubbs; Nicholas B. Suntzeff; John Tonry. Observational Evidence from Supernovae for an Accelerating Universe and a Cosmological Constant. *The Astronomical Journal* 116, 1009-1038 (1998). DOI 10.1086/300499. <https://doi.org/10.1086/300499>
- [13] S. Perlmutter; G. Aldering; G. Goldhaber; R. A. Knop; P. Nugent; P. G. Castro; S. Deustua; S. Fabbro; A. Goobar; D. E. Groom; I. M. Hook; A. G. Kim; M. Y. Kim; J. C. Lee; N. J. Nunes; R. Pain; C. R. Pennypacker; R. Quimby; C. Lidman; R. S. Ellis; M. Irwin; R. G. McMahon; P. Ruiz-Lapuente; N. Walton; B. Schaefer; B. J. Boyle; A. V. Filippenko; T. Matheson; A. S. Fruchter; N. Panagia; H. J. M. Newberg; W. J. Couch; The Supernova Cosmology Project. Measurements of Omega and Lambda from 42 High-Redshift Supernovae. *The Astrophysical Journal* 517, 565-586 (1999). DOI 10.1086/307221. <https://doi.org/10.1086/307221>
- [14] A. A. Penzias; R. W. Wilson. A Measurement of Excess Antenna Temperature at 4080 Mc/s. *The Astrophysical Journal* 142, 419-421 (1965). DOI 10.1086/148307. <https://doi.org/10.1086/148307>
- [15] D. J. Fixsen; E. S. Cheng; J. M. Gales; J. C. Mather; R. A. Shafer; E. L. Wright. The Cosmic Microwave Background Spectrum from the Full COBE FIRAS Data Set. *The Astrophysical Journal* 473, 576-587 (1996). DOI 10.1086/178173. <https://doi.org/10.1086/178173>
- [16] Planck Collaboration. Planck 2018 Results. VI. Cosmological Parameters. *Astronomy & Astrophysics* 641, A6 (2020). DOI 10.1051/0004-6361/201833910. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201833910>
- [17] R. A. Alpher; H. Bethe; G. Gamow. The Origin of Chemical Elements. *Physical Review* 73, 803-804 (1948). DOI 10.1103/PhysRev.73.803. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.73.803>
- [18] 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>
- [19] 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>
- [20] 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>
- [21] 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>
- [22] Ryan J. Cooke; Max Pettini; Charles C. Steidel. One Percent Determination of the Primordial Deuterium Abundance. *The Astrophysical Journal* 855, article 102 (2018). DOI 10.3847/1538-4357/aaab53. <https://doi.org/10.3847/1538-4357/aaab53>

- [23] Erik Aver; Keith A. Olive; Evan D. Skillman. The Effects of He I λ 10830 on Helium Abundance Determinations. *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics* 2015(07), 011 (2015). DOI 10.1088/1475-7516/2015/07/011. <https://doi.org/10.1088/1475-7516/2015/07/011>
- [24] Brian D. Fields. The Primordial Lithium Problem. *Annual Review of Nuclear and Particle Science* 61, 47-68 (2011). DOI 10.1146/annurev-nucl-102010-130445. <https://doi.org/10.1146/annurev-nucl-102010-130445>
- [25] Daniel J. Eisenstein; Idit Zehavi; David W. Hogg; Roman Scoccimarro; Michael R. Blanton; Robert C. Nichol; Ryan Scranton; Hee-Jong Seo; Max Tegmark; Zheng Zheng; Scott F. Anderson; Jim Annis; Neta Bahcall; Jon Brinkmann; Scott Burles; Francisco J. Castander; Andrew Connolly; Istvan Csabai; Mamoru Doi; Masataka Fukugita; Joshua A. Frieman; Karl Glazebrook; James E. Gunn; John S. Hendry; Gregory Hennessy; Zeljko Ivezić; Stephen Kent; Gillian R. Knapp; Huan Lin; Yeong-Shang Loh; Robert H. Lupton; Bruce Margon; Timothy A. McKay; Avery Meiksin; Jeffery A. Munn; Adrian Pope; Michael W. Richmond; David Schlegel; Donald P. Schneider; Kazuhiro Shimasaku; Christopher Stoughton; Michael A. Strauss; Mark SubbaRao; Alexander S. Szalay; Istvan Szapudi; Douglas L. Tucker; Brian Yanny; Donald G. York. Detection of the Baryon Acoustic Peak in the Large-Scale Correlation Function of SDSS Luminous Red Galaxies. *The Astrophysical Journal* 633, 560-574 (2005). DOI 10.1086/466512. <https://doi.org/10.1086/466512>
- [26] Stephen William Hawking; Roger Penrose. The Singularities of Gravitational Collapse and Cosmology. *Proceedings of the Royal Society A* 314, 529-548 (1970). DOI 10.1098/rspa.1970.0021. <https://doi.org/10.1098/rspa.1970.0021>
- [27] Arvind Borde; Alan H. Guth; Alexander Vilenkin. Inflationary Spacetimes Are Incomplete in Past Directions. *Physical Review Letters* 90, 151301 (2003). DOI 10.1103/PhysRevLett.90.151301. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.90.151301>
- [28] Claus Kiefer. *Quantum Gravity, Third Edition*. Oxford University Press; ISBN 9780199585205 (2012). DOI 10.1093/acprof:oso/9780199585205.001.0001. <https://doi.org/10.1093/acprof:oso/9780199585205.001.0001>
- [29] Alan H. Guth. Inflationary Universe: A Possible Solution to the Horizon and Flatness Problems. *Physical Review D* 23, 347-356 (1981). DOI 10.1103/PhysRevD.23.347. <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.23.347>
- [30] A. D. Linde. A New Inflationary Universe Scenario. *Physics Letters B* 108, 389-393 (1982). DOI 10.1016/0370-2693(82)91219-9. [https://doi.org/10.1016/0370-2693\(82\)91219-9](https://doi.org/10.1016/0370-2693(82)91219-9)
- [31] Planck Collaboration. Planck 2018 Results. X. Constraints on Inflation. *Astronomy & Astrophysics* 641, A10 (2020). DOI 10.1051/0004-6361/201833887. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201833887>
- [32] Planck Collaboration. Planck 2018 Results. I. Overview and the Cosmological Legacy of Planck. *Astronomy & Astrophysics* 641, A1 (2020). DOI 10.1051/0004-6361/201833880. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201833880>
- [33] Paul J. Steinhardt; Neil Turok. A Cyclic Model of the Universe. *Science* 296, 1436-1439 (2002). DOI 10.1126/science.1070462. <https://doi.org/10.1126/science.1070462>

- [34] Abhay Ashtekar; Tomasz Pawłowski; Parampreet Singh. Quantum Nature of the Big Bang. *Physical Review Letters* 96, 141301 (2006). DOI 10.1103/PhysRevLett.96.141301. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.96.141301>
- [35] Steven Weinberg. *Cosmology*. Oxford University Press; ISBN 9780198526827 (2008). DOI 10.1093/oso/9780198526827.001.0001. <https://doi.org/10.1093/oso/9780198526827.001.0001>
- [36] P. J. E. Peebles. *Principles of Physical Cosmology*. Princeton University Press; ISBN 9780691087497 (1993). <https://press.princeton.edu/books/hardcover/9780691087497/principles-of-physical-cosmology>
- [37] Sean M. Carroll. The Cosmological Constant. *Living Reviews in Relativity* 4, article 1 (2001). DOI 10.12942/lrr-2001-1. <https://doi.org/10.12942/lrr-2001-1>
- [38] 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>
- [39] G. Lemaître. Un univers homogène de masse constante et de rayon croissant, rendant compte de la vitesse radiale des nébuleuses extra-galactiques. *Annales de la Société Scientifique de Bruxelles* 47A, 49-59 (1927). <https://articles.adsabs.harvard.edu/pdf/1927ASSB...47...49L>
- [40] Mario Livio. Mystery of the missing text solved. *Nature* 479, 171-173 (2011). DOI 10.1038/479171a. <https://doi.org/10.1038/479171a>
- [41] V. M. Slipher. Nebulae. *Proceedings of the American Philosophical Society* 56, 403-409 (1917). <https://articles.adsabs.harvard.edu/pdf/1917PAPhS..56..403S>