

La luz más antigua que podemos observar

QTC-011 · 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: Conocimiento establecido

Licencia: All Rights Reserved

Resumen del artículo

El fondo cósmico de microondas es la luz electromagnética más antigua que podemos observar en todo el cielo, pero no es luz del comienzo. Sus fotones se dispersaron por última vez cuando el universo tenía unos 380.000 años, después de que el plasma enfriado se volviera transparente. Una predicción precedió a la célebre detección de 1965; la detección misma fue un exceso medido en una sola frecuencia, no todavía un espectro de cuerpo negro. COBE estableció después un espectro térmico extraordinariamente preciso, mientras que COBE, WMAP y Planck cartografiaron fluctuaciones y polarización que codifican física anterior. Esos mapas son reconstrucciones calibradas condicionadas por los haces, la eliminación de primeros planos y la inferencia estadística. La CMB es, por tanto, horizonte observacional y archivo: un campo real de fotones antiguos cuyo significado depende de un modelo físico sometido a pruebas cuidadosas.

En 60 segundos

La luz más antigua visible en todo el cielo no surgió en el instante cero. Antes de unos 380.000 años, los electrones libres dispersaban los fotones con tanta frecuencia que el universo era opaco para la observación electromagnética ordinaria. Al formarse los átomos, la dispersión se hizo rara y la mayoría de los fotones comenzó a propagarse libremente. La expansión estiró después sus longitudes de onda desde un campo de radiación de unos 3000 K hasta el actual fondo de microondas. Los cálculos de un universo caliente predijeron esa radiación relictal antes de que Penzias y Wilson comunicaran en 1965 un exceso inexplicado de temperatura de antena de $3,5 \pm 1,0$ K. Aquel resultado en una sola frecuencia necesitaba otras longitudes de onda y, finalmente, COBE/FIRAS para establecer un espectro de cuerpo negro casi perfecto. Diferencias diminutas en el cielo —aproximadamente una parte entre 100.000— contienen información sobre el fluido temprano de fotones y bariones. La polarización y la lente gravitatoria añaden más estructura. Sin embargo, un mapa publicado de la CMB no es una fotografía en bruto: intervienen instrumentos, calibración, máscaras y métodos de separación de componentes. La CMB permite inferir condiciones anteriores a la última dispersión, pero no retrata directamente el comienzo ni elimina la dependencia de modelos.

Por qué importa esta pregunta

Llamar a la CMB la luz más antigua puede provocar dos errores opuestos: tratarla como una fotografía del comienzo o descartar como especulación todo lo inferido sobre épocas anteriores. El logro real está entre ambos. Los físicos identificaron un límite observacional, midieron el espectro y la

estructura minúscula de la radiación, y aprendieron cómo unas señales indirectas pueden transportar información desde una era que ningún telescopio puede retratar directamente. Esa posición intermedia importa porque muestra cómo un límite puede convertirse en herramienta: la superficie de última dispersión impide una fotografía ordinaria de tiempos anteriores, pero su espectro, anisotropía y polarización conservan consecuencias comprobables del plasma que la precedió. Por tanto, el artículo trata de inferencia disciplinada, no de sustituir la observación por un relato.

1. Lo más antiguo no significa lo primero

La pregunta

Si estos son los fotones más antiguos que podemos ver en todo el cielo, ¿estamos observando el comienzo del universo? No: observamos la época en que un plasma opaco se volvió lo bastante transparente para que la luz viajara libremente.

El fondo cósmico de microondas, o CMB, es la luz electromagnética más antigua observable directamente en todo el cielo. La mayoría de sus fotones se dispersó por última vez cuando el universo tenía unos 380.000 años, cerca de un corrimiento al rojo de 1100.[8,27,31] Esas cifras son aproximadas y están ligadas al modelo, y la última dispersión ocurrió durante un intervalo finito, no en un instante matemático.

Ya existían fotones. El obstáculo no era la ausencia de luz, sino la abundancia de electrones libres en el plasma caliente. Las dispersiones repetidas redirigían continuamente la radiación e impedían que las observaciones electromagnéticas ordinarias produjeran una imagen directa a través de aquella era opaca.[7,8] La física anterior todavía puede dejar huellas posteriores, pero una huella no es una fotografía.

La expresión superficie de última dispersión solo es útil si superficie no se confunde con una envoltura material centrada en la Tierra. Es una capa probabilística de espesor finito: en cada dirección existe una distribución de lugares y momentos en que los fotones recibidos probablemente se dispersaron por última vez. Todo observador comóvil posee un límite observable análogo.[8]

La materia y la radiación estaban cerca de 3000 K cuando los fotones se desacoplaron. Por tanto, aquella radiación no fue emitida como microondas. La expansión cósmica estiró sus longitudes de onda y redujo su temperatura hasta llevar el campo relicto a la banda actual de microondas.[7,8,31] El color de la luz más antigua es una historia de expansión, no una etiqueta fijada durante la emisión.

La luz observable directamente más antigua tampoco equivale a la información recuperable más antigua. Procesos anteriores al desacoplamiento de los fotones pudieron alterar el espectro, las fases, la polarización o el patrón estadístico transportado después por la CMB.[8,33,34] Estas inferencias dependen de teorías y alternativas, pero penetran tras el horizonte electromagnético sin fingir que lo atraviesan con la vista.

En qué punto estamos

La CMB señala un horizonte observacional, no el nacimiento del universo. Sus fotones existían en un plasma dispersor, escaparon a través de una capa probabilística finita y el corrimiento al rojo los convirtió en microondas. Los sucesos anteriores solo pueden sobrevivir como huellas sobre esa luz

posterior. Para entender por qué alguien buscó semejante reliquia, la historia debe comenzar con una predicción anterior a la famosa detección.

2. Una predicción antes de una detección

Un universo caliente y en expansión predice que la radiación que estuvo en equilibrio térmico debe enfriarse al expandirse el espacio y conservar su forma de cuerpo negro, salvo que procesos posteriores la distorsionen.[1,2,19] La idea esencial es sencilla pero poderosa: la expansión cambia la escala de temperatura sin borrar la relación espectral característica entre frecuencias.

En 1948 Ralph Alpher y Robert Herman publicaron en Nature una carta que corregía explícitamente partes de un cálculo reciente de George Gamow. Dentro de aquel programa en desarrollo estimaron que la radiación relicta debía encontrarse entonces en torno a 5 K.[2] La cifra dependía de los supuestos cosmológicos y nucleares disponibles; era una predicción de escala, no el valor preciso actual.

La predicción no permaneció siempre en el centro de la cosmología. A comienzos de la década de 1960, un grupo de Princeton dirigido por Robert Dicke preparaba una búsqueda independiente en microondas, motivada por nuevos cálculos sobre un universo temprano caliente.[3,5]

Independiente no significa ajeno a toda la historia de la cosmología: significa que su programa no se construyó para explicar una señal ya comunicada por Bell Labs.

Las dos líneas se encontraron rápidamente en 1965. Arno Penzias y Robert Wilson comunicaron un exceso inexplicado de temperatura de antena; Dicke, Peebles, Roll y Wilkinson aportaron la interpretación cosmológica en un artículo compañero.[3,4] Los papeles eran complementarios pero distintos: uno describía un resultado instrumental y el otro sostenía que la radiación cósmica de cuerpo negro era su significado natural.

Esa secuencia se resiste tanto al relato del genio solitario como al del accidente puro. Importaron la predicción, la construcción del instrumento, la eliminación de causas mundanas, la interpretación independiente y la confirmación posterior.[2–4] La contingencia unió a los grupos, pero solo una cadena de razonamiento y medición convirtió una temperatura de ruido inexplicada en evidencia sobre el universo temprano.

En qué punto estamos

La radiación relicta se predijo antes de ser reconocida y luego fue redescubierta por dos programas independientes con funciones probatorias distintas. Princeton aportó una interpretación cosmológica; Bell Labs, el exceso inexplicado de antena. Ninguno estableció por sí solo la CMB moderna. La siguiente pregunta es más estrecha y reveladora: ¿qué midieron exactamente Penzias y Wilson y qué faltaba aún por demostrar?

3. El ruido que no desaparecía

La pregunta

¿Por qué un siseo inexplicado en una sola frecuencia de radio se tomó en serio como evidencia sobre el universo temprano? Porque una eliminación cuidadosa dificultó atribuirlo a algo local, mientras un cálculo cosmológico independiente predecía una radiación del orden correcto.

Penzias y Wilson comunicaron un exceso de temperatura de antena de $3,5 \pm 1,0$ K a 4080 MHz, correspondiente a una longitud de onda de unos 7,35 centímetros.[4] Dentro de sus incertidumbres parecía aproximadamente isótropo. Era una afirmación precisa sobre una banda de observación, no todavía una temperatura termodinámica precisa para todo el fondo.

Una medición en una sola frecuencia no puede establecer un espectro de cuerpo negro. Muchas formas espectrales diferentes pueden pasar por un punto.[4] La isotropía, la magnitud y el fracaso de las explicaciones ordinarias hicieron importante el exceso, pero la interpretación térmica requería medidas en otras frecuencias y un control mucho mejor de la calibración y los primeros planos.

Las célebres palomas pertenecen al trabajo de diagnóstico, no a su centro. Penzias y Wilson investigaron causas instrumentales y ambientales, incluida la retirada de material dieléctrico relacionado con palomas de la antena, pero el exceso persistió.[4] El episodio se recuerda porque se puso a prueba y rechazó una causa mundana; las aves ni produjeron la señal cósmica ni explican el descubrimiento.

El artículo compañero de Princeton interpretó el exceso como radiación cósmica de cuerpo negro esperada en un universo evolutivo.[3,5] Esa interpretación tenía alcance explicativo, pero no convirtió retroactivamente el receptor de Bell Labs en un espectrómetro. La evidencia adquirió fuerza al unir una medición acotada con una teoría que permitía nuevas pruebas.

Las observaciones en otras longitudes de onda reforzaron el caso cósmico, incluida una medición de Roll y Wilkinson a 3,2 centímetros.[6] Décadas después, COBE/FIRAS midió el espectro en un intervalo amplio, primero de manera preliminar y luego con el conjunto completo de datos.[11,12] La confirmación fue acumulativa: la anomalía de 1965 abrió la puerta, pero el espectro de cuerpo negro hizo extraordinariamente difícil imitar la interpretación térmica.

En qué punto estamos

El resultado de 1965 convenció porque el exceso sobrevivió a un diagnóstico sostenido y coincidió con una predicción independiente, no porque una frecuencia revelara todo un espectro. Las medidas multifrecuencia y FIRAS completaron después el caso térmico. Pero el fondo solo pudo llegarnos tras cambiar el comportamiento óptico del universo. La historia pasa, por tanto, de receptores terrestres a la física que liberó los fotones.

4. Cuando el universo se volvió transparente

Cerca de un corrimiento al rojo de 1100, unos 380.000 años después de la fase temprana caliente, el plasma se enfrió hasta unos 3000 K. Los electrones se unieron a los núcleos y el hidrógeno se volvió predominantemente neutro, reduciendo de forma abrupta la cantidad de electrones libres que dispersaban la radiación.[7,8,31] La palabra tradicional recombinación persiste aunque esos electrones y núcleos no hubieran formado antes átomos estables.

Al disminuir la abundancia de electrones libres, la dispersión de Thomson se hizo mucho menos frecuente y la mayoría de los fotones de la CMB comenzó a propagarse libremente por el universo en expansión.[7,8] La recombinación describe el cambio del estado de ionización; el desacoplamiento de fotones, la transición de transporte. Están estrechamente relacionados, pero tratarlos como sinónimos exactos oculta física útil.

Ninguno de los dos procesos fue un interruptor instantáneo. Los cálculos de precisión describen una cinética atómica fuera del equilibrio y una función de visibilidad de anchura finita: la probabilidad de que un fotón observado se dispersara por última vez en un momento o corrimiento al rojo determinado.[8] La superficie aparente de un mapa de la CMB es, por tanto, una capa estadística difuminada por la propia física, no solo por la imperfección de nuestros telescopios.

Mucho después, las primeras fuentes luminosas reionizaron el gas intergaláctico e hicieron que una fracción de los fotones de la CMB volviera a dispersarse. En el análisis base de Planck 2018, la profundidad óptica integrada fue $\tau = 0,054 \pm 0,007$. [21,31,37] El valor depende del modelo y de la combinación de datos, mientras el momento y la distribución irregular de la reionización siguen siendo menos seguros que la existencia de la redispersión.

Antes del desacoplamiento, los fotones también se difundieron fuera de regiones calientes y frías de pequeña escala, borrando parte de la estructura angular fina. Esta supresión a multipolos altos se denomina amortiguamiento de Silk.[9,19] Su forma observada depende no solo de la difusión, sino también de la historia de recombinación, la geometría y otros parámetros; es un efecto físico inserto en una inferencia más amplia, no una regla que se lea de manera aislada.

En qué punto estamos

La transparencia surgió gradualmente al desplomarse la población de electrones libres y dejó una capa finita de última dispersión, no una pared nítida. La reionización volvió a dispersar algunos fotones y la difusión anterior borró estructura fina. La CMB recibida ha sido filtrada por una secuencia de procesos físicos. Su credencial histórica más fuerte no es solo que exista, sino la forma exacta de su espectro.

5. Un cuerpo negro casi imposible de imitar

La pregunta

La radiación difusa de microondas podría tener muchos orígenes. Lo que convirtió la CMB en una reliquia decisiva de un universo temprano caliente no fue una lectura de temperatura, sino un espectro cuya dependencia completa con la frecuencia sigue un cuerpo negro con precisión extraordinaria.

El Espectrofotómetro Absoluto del Infrarrojo Lejano de COBE comparó el cielo con un cuerpo negro interno preciso. El análisis de todos los datos FIRAS halló desviaciones cuadráticas medias inferiores a 50 partes por millón del brillo máximo del espectro.[11,12,35] El límite corresponde al instrumento y a su intervalo de frecuencias; no declara una negrura matemáticamente perfecta en toda frecuencia posible.

Las estimaciones de temperatura también tienen una procedencia que las cifras por sí solas pueden ocultar. En 2009 Dale Fixsen recalibró FIRAS de forma independiente frente a WMAP y obtuvo $2,7260 \pm 0,0013$ K. Después combinó ese resultado con otras mediciones de la literatura para obtener $2,72548 \pm 0,00057$ K.[13] La recalibración es una entrada del valor combinado, no una confirmación independiente de él.

Un cuerpo negro es la firma espectral de una radiación llevada hacia el equilibrio térmico. La expansión cósmica puede enfriar ese campo y conservar la forma del espectro.[12,35] Por eso la

forma es un fósil de la historia térmica y una evidencia más fuerte de una fase temprana caliente que la mera presencia de microondas difusas, aunque la inferencia siga utilizando teoría de transferencia radiativa.

FIRAS también convirtió las no detecciones en restricciones. Las desviaciones descritas por parámetros como y de Compton o el potencial químico μ revelarían determinados tipos y épocas de liberación de energía.[10,12,35,38] Que FIRAS no detectara distorsiones a su sensibilidad no significa que no existan. Futuros instrumentos podrían medir señales bajo sus límites y convertir una cota superior en una historia nueva.

La intensidad media es abrumadoramente uniforme, pero la mayor parte de la información cosmológica de la CMB aparece en diminutas diferencias angulares, espectrales y de polarización después de controlar primeros planos y sistemáticos.[12,15] El espectro medio establece la reliquia térmica. Las variaciones convierten esa reliquia en un mapa de dinámica.

En qué punto estamos

FIRAS convirtió un fondo plausible en un fósil térmico de precisión extraordinaria: no un cuerpo negro exactamente perfecto por decreto, sino un espectro medido con desviaciones acotadas en decenas de partes por millón. Sus estimaciones de temperatura comparten ascendencia de calibración y deben describirse así. Una vez asegurado el espectro medio, la atención pasó a las diminutas desviaciones de uniformidad que transportan casi toda la información estructural.

6. Las arrugas transportan el mensaje

Los radiómetros diferenciales de microondas de COBE detectaron anisotropías intrínsecas de temperatura del orden de una parte entre 100.000.[14,16,19,36] La abreviatura 10^{-5} describe un orden de magnitud, no un valor universal por píxel. La amplitud depende de la escala angular, el estadístico, la máscara y el tratamiento de los primeros planos.

El patrón mayor es el dipolo, producido principalmente por nuestro movimiento respecto al marco de reposo local de la CMB: el marco en que ese dipolo desaparece.[16,28,36] Definirlo no viola la relatividad ni hace que las leyes físicas lo prefieran. El dipolo cinemático se modela o elimina antes de interpretar las anisotropías primordiales, mucho menores.

En escalas angulares menores, los picos acústicos registran oscilaciones del fluido acoplado de fotones y bariones antes del desacoplamiento.[17–19,25] Son auténticas ondas semejantes al sonido en aquel plasma temprano, no ondas de presión que viajen por el universo actual. La gravedad, la carga bariónica, la difusión y la proyección contribuyen a dar forma a la secuencia observada.

Las posiciones, separaciones y alturas relativas de esos picos restringen la geometría y las densidades y dinámicas de la materia y la radiación dentro de un modelo cosmológico explícito.[17–20,30,31] Ningún pico mide directamente una sola cantidad de forma aislada. Los parámetros están correlacionados y su precisión publicada depende del modelo, la verosimilitud y la combinación de datos.

WMAP y Planck convirtieron mediciones cronológicas calibradas en mapas del cielo y espectros angulares de potencia.[20,22,27,31] Estos productos representan observaciones reales, pero son reconstrucciones estadísticas, no fotografías en color sin procesar. Los haces, la estrategia de

barrido, los modelos de ruido, las máscaras, la calibración y la separación de componentes se interponen entre la salida del detector y la conocida imagen moteada.

En qué punto estamos

Las tenues arrugas de la CMB transformaron una reliquia térmica en una sonda cuantitativa de la geometría y el contenido cósmico. Interpretarlas exige eliminar el dipolo causado por el movimiento y ajustar un patrón correlacionado, no leer cantidades físicas directamente de manchas coloreadas. Como la señal es tan pequeña, la conclusión depende de cómo se reconstruyen los mapas, se separan los primeros planos y concuerdan canales independientes.

7. Un mapa debe reconstruirse

La pregunta

Cuando un satélite publica una imagen de la CMB de todo el cielo, ¿qué partes proceden directamente del cielo y cuáles fueron producidas por el análisis? La respuesta es ambas: las mediciones reales solo se vuelven utilizables mediante calibración, modelado de primeros planos y reconstrucción estadística.

La dispersión de Thomson genera polarización lineal cuando los electrones ven un cuadrupolo local en la radiación incidente. En 2002 DASI comunicó la primera detección de polarización de la CMB.[21,23–26] El hito no detectó todas las señales de polarización posteriores; estableció que el fondo transportaba un registro adicional dependiente de la orientación, más allá de la anisotropía de temperatura.

La estructura interpuesta produce después lente gravitatoria sobre la CMB, remapea ligeramente las direcciones y mezcla patrones de polarización. Planck comunicó detecciones de lente de unas 9 sigmas solo con polarización y 40 sigmas en su reconstrucción combinada.[32] Son detecciones estadísticas cuya significación depende de estimadores y combinaciones de datos, no fotografías directas de una pantalla de masa.

La señal cosmológica comparte el cielo con polvo galáctico, emisión sincrotrón, libre-libre y de líneas, fuentes de radio e infrarrojos no resueltas y sistemáticos instrumentales.[15,27–29] La dependencia con la frecuencia, la morfología espacial, las pruebas de detectores y las máscaras ayudan a separarlos. Ninguna limpieza de primeros planos está libre de supuestos y los residuos varían con la escala, la frecuencia y la señal buscada.

Planck produjo por ello soluciones de la CMB con cuatro grandes métodos de separación de componentes: Commander, NILC, SEVEM y SMICA.[27,29] La concordancia entre canales es valiosa porque difieren sus supuestos y operaciones. No demuestra que todo píxel o multipolo esté libre de contaminación; las simulaciones aún revelan residuos, propiedades de ruido y sesgos diferentes.

En qué punto estamos

Un mapa de la CMB es una reconstrucción disciplinada: datos genuinos del cielo filtrados mediante calibración, modelado de haces, enmascaramiento y varias estrategias de separación de primeros planos. La polarización y la lente aportan información, mientras la concordancia entre canales prueba robustez sin garantizar perfección. El último paso interpretativo es inevitable: debemos

preguntar qué conclusiones se acercan a observaciones directas, cuáles dependen de un modelo y qué límites ningún instrumento mejor puede eliminar.

8. Lo que esta luz puede y no puede decirnos

Dentro de Lambda-CDM base y de extensiones especificadas, la CMB restringe la densidad bariónica, la densidad de materia oscura, la escala acústica, parámetros espectrales y la profundidad óptica.[20,22,30,31] Son inferencias mediadas por modelos, no lecturas de un medidor sin modelo. Ampliar el espacio de parámetros, cambiar verosimilitudes o añadir datos externos puede ensanchar o desplazar los resultados aunque las mediciones del cielo no cambien.

El alcance tras la última dispersión puede ser notable. Las partículas de propagación libre, como los neutrinos, alteran la fase de las oscilaciones acústicas, y en los datos de la CMB se ha detectado un desplazamiento de fase característico.[33,34] Es evidencia indirecta de física anterior a la recombinación: un patrón posterior transporta el efecto. No es una fotografía de neutrinos, y los mecanismos alternativos deben juzgarse frente a toda la estructura.

Un límite es irreducible. Solo observamos un cielo, de modo que los modos de mayor escala ofrecen una muestra finita del proceso estadístico subyacente. La varianza cósmica persiste incluso con un detector perfecto.[19,22,31] Las correlaciones cruzadas y nuevos trazadores pueden añadir información, pero no crear otra realización independiente del mismo cielo primordial.

La frontera del artículo sigue a la evidencia. QTC-011 posee el ancla observacional: qué es la luz más antigua, cómo se midió y cómo los mapas se convierten en afirmaciones. QTC-012 pregunta qué entienden los científicos por Big Bang y QTC-013 reconstruye el universo preatómico anterior. Aquí la observación va primero porque aquellos argumentos heredan sus calibraciones, límites y distinciones.

En qué punto estamos

La luz visible más antigua no es una vista directa del comienzo ni una pared muda. Su espectro, anisotropía y polarización sostienen inferencias poderosas, pero mediadas por modelos, sobre física anterior. Algunos límites ceden ante mejores instrumentos; la varianza cósmica no. El logro científico es la propia cadena: predicción, detección, calibración, reconstrucción y fronteras explícitas sobre lo que la evidencia puede transportar.

Lo que sabemos y cómo lo sabemos

- La CMB es la luz electromagnética más antigua observable directamente en todo el cielo, liberada durante un intervalo finito de última dispersión unos 380.000 años después de la fase temprana caliente.[7,8,27,31]
- La predicción precedió a la detección: Alpher y Herman estimaron una temperatura relicta cercana a 5 K, mientras los dos artículos de 1965 separaron la medición de Bell Labs de la interpretación de Princeton.[2–4]
- COBE/FIRAS midió un espectro de cuerpo negro excepcionalmente preciso, con desviaciones cuadráticas medias inferiores a 50 partes por millón del brillo máximo en todos sus datos. [11,12,35]

- La anisotropía de temperatura y la estructura acústica se extraen mediante mapas calibrados, control de primeros planos y reconstrucción de espectros de potencia basada en verosimilitudes.[16,18,19,27,30]
- La polarización y la lente gravitatoria añaden observables distintos cuyos mapas también son reconstrucciones, no fotografías en bruto.[21,23,27,32]
- Los parámetros cosmológicos derivados de la CMB son precisos dentro de modelos y verosimilitudes declarados, mientras la varianza cósmica limita de manera irreducible los modos de mayor escala.[19,20,22,30,31]

Lo que todavía no sabemos

- Si existen distorsiones espectrales primordiales bajo los límites de FIRAS y qué historias de liberación de energía podrán recuperar futuras mediciones.
- El momento, la duración y la distribución irregular detallados de la reionización, más allá de su efecto integrado establecido sobre los fotones de la CMB.
- Hasta qué punto extensiones o alternativas a Lambda-CDM base pueden cambiar el significado de los parámetros y seguir ajustando todos los datos de temperatura, polarización y lente.
- Qué señales anteriores a la recombinación son diagnósticos únicos y cuáles podrían ser imitadas por mecanismos físicos diferentes.

Qué podría hacernos cambiar de opinión

- Una calibración reproducible o una corrección de primeros planos que revele una contribución no cósmica significativa en señales hoy tratadas como primordiales.
- Una distorsión espectral confirmada que sustituya las cotas superiores de la era FIRAS por una desviación medida y una historia térmica específica.
- Un marco cosmológico que ajuste mejor el conjunto completo de datos de la CMB y asigne significados materialmente distintos a los parámetros inferidos.
- Evidencia de que el dipolo dominante o la secuencia de picos acústicos tiene un origen físico diferente de las interpretaciones cinemática y fotón-barión hoy respaldadas.

Si solo recuerdas una cosa

La CMB no es una fotografía del comienzo: es luz antigua liberada cuando el universo se volvió transparente, después calibrada y reconstruida como evidencia de una física aún anterior.

Artículos relacionados

- QTC-001 — Todo lo que ves pertenece al pasado
- QTC-002 — ¿Por qué el cielo nocturno es oscuro?
- QTC-012 — ¿Qué queremos decir realmente cuando hablamos del Big Bang?
- QTC-013 — Antes de los átomos

Referencias

- [1] G. Gamow. The Evolution of the Universe. Nature 162, 680–682 (1948). DOI 10.1038/162680a0. <https://doi.org/10.1038/162680a0>
- [2] Ralph A. Alpher and Robert Herman. Evolution of the Universe. Nature 162, 774–775 (1948). DOI 10.1038/162774b0. <https://doi.org/10.1038/162774b0>
- [3] R. H. Dicke, P. J. E. Peebles, P. G. Roll and D. T. Wilkinson. Cosmic Black-Body Radiation. The Astrophysical Journal 142, 414–419 (1965). DOI 10.1086/148306. <https://doi.org/10.1086/148306>

- [4] A. A. Penzias and 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>
- [5] P. J. E. Peebles. The Black-Body Radiation Content of the Universe and the Formation of Galaxies. *The Astrophysical Journal* 142, 1317–1326 (1965). DOI 10.1086/148417. <https://doi.org/10.1086/148417>
- [6] P. G. Roll and David T. Wilkinson. Cosmic Background Radiation at 3.2 cm—Support for Cosmic Black-Body Radiation. *Physical Review Letters* 16, 405–407 (1966). DOI 10.1103/PhysRevLett.16.405. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.16.405>
- [7] P. J. E. Peebles. Recombination of the Primeval Plasma. *The Astrophysical Journal* 153, 1–11 (1968). DOI 10.1086/149628. <https://doi.org/10.1086/149628>
- [8] Sara Seager, Dimitar D. Sasselov and Douglas Scott. How Exactly Did the Universe Become Neutral? *The Astrophysical Journal Supplement Series* 128, 407–430 (2000). DOI 10.1086/313388. <https://doi.org/10.1086/313388>
- [9] Joseph Silk. Cosmic Black-Body Radiation and Galaxy Formation. *The Astrophysical Journal* 151, 459–471 (1968). DOI 10.1086/149449. <https://doi.org/10.1086/149449>
- [10] R. A. Sunyaev and Ya. B. Zeldovich. The interaction of matter and radiation in the hot model of the Universe, II. *Astrophysics and Space Science* 7, 20–30 (1970). DOI 10.1007/BF00653472. <https://doi.org/10.1007/BF00653472>
- [11] J. C. Mather, E. S. Cheng, R. E. Eplee, Jr., R. B. Isaacman, S. S. Meyer, R. A. Shafer, R. Weiss, E. L. Wright, C. L. Bennett, N. W. Boggess, E. Dwek, S. Gulkis, M. G. Hauser, M. Janssen, T. Kelsall, P. M. Lubin, S. H. Moseley, Jr., T. L. Murdock, R. F. Silverberg, G. F. Smoot and D. T. Wilkinson. A Preliminary Measurement of the Cosmic Microwave Background Spectrum by the Cosmic Background Explorer (COBE) Satellite. *The Astrophysical Journal Letters* 354, L37–L40 (1990). DOI 10.1086/185717. <https://doi.org/10.1086/185717>
- [12] D. J. Fixsen, E. S. Cheng, J. M. Gales, J. C. Mather, R. A. Shafer and 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>
- [13] D. J. Fixsen. The Temperature of the Cosmic Microwave Background. *The Astrophysical Journal* 707, 916–920 (2009). DOI 10.1088/0004-637X/707/2/916. <https://doi.org/10.1088/0004-637X/707/2/916>
- [14] G. F. Smoot, C. L. Bennett, A. Kogut, E. L. Wright, J. Aymon, N. W. Boggess, E. S. Cheng, G. de Amici, S. Gulkis, M. G. Hauser, G. Hinshaw, P. D. Jackson, M. Janssen, E. Kaita, T. Kelsall, P. Keegstra, C. Lineweaver, K. Loewenstein, P. Lubin, J. Mather, S. S. Meyer, S. H. Moseley, T. Murdock, L. Rokke, R. F. Silverberg, L. Tenorio, R. Weiss and D. T. Wilkinson. Structure in the COBE Differential Microwave Radiometer First-Year Maps. *The Astrophysical Journal Letters* 396, L1–L5 (1992). DOI 10.1086/186504. <https://doi.org/10.1086/186504>
- [15] C. L. Bennett, G. F. Smoot, G. Hinshaw, E. L. Wright, A. Kogut, G. de Amici, S. S. Meyer, R. Weiss, D. T. Wilkinson, S. Gulkis, M. Janssen, N. W. Boggess, E. S. Cheng, M. G. Hauser, T. Kelsall, J. C. Mather, S. H. Moseley, Jr., T. L. Murdock and R. F. Silverberg. Preliminary Separation of Galactic and Cosmic Microwave Emission for the COBE Differential Microwave Radiometer. *The Astrophysical Journal Letters* 396, L7–L12 (1992). DOI 10.1086/186505. <https://doi.org/10.1086/186505>
- [16] C. L. Bennett, A. J. Banday, K. M. Górski, G. Hinshaw, P. Jackson, P. Keegstra, A. Kogut, G. F. Smoot, D. T. Wilkinson and E. L. Wright. Four-Year COBE DMR Cosmic Microwave Background Observations: Maps and Basic Results. *The Astrophysical Journal Letters* 464, L1–L4 (1996). DOI 10.1086/310075. <https://doi.org/10.1086/310075>
- [17] P. de Bernardis, P. A. R. Ade, J. J. Bock, J. R. Bond, J. Borrill, A. Boscaleri, K. Coble, B. P. Crill, G. De Gasperis, P. C. Farese, P. G. Ferreira, K. Ganga, M. Giacometti, E. Hivon, V. V. Hristov, A. Iacoangeli, A. H. Jaffe, A. E. Lange, L. Martinis, S. Masi, P. V. Mason, P. D. Mauskopf, A. Melchiorri, L. Miglio, T. Montroy, C. B. Netterfield, E. Pascale, F. Piacentini, D. Pogosyan, S. Prunet, S. Rao, G. Romeo, J. E. Ruhl, F. Scaramuzzi, D. Sforna and N. Vittorio. A Flat Universe from High-Resolution Maps of the Cosmic Microwave Background Radiation. *Nature* 404, 955–959 (2000). DOI 10.1038/35010035. <https://doi.org/10.1038/35010035>
- [18] C. B. Netterfield, P. A. R. Ade, J. J. Bock, J. R. Bond, J. Borrill, A. Boscaleri, K. Coble, C. R. Contaldi, B. P. Crill, P. de Bernardis, P. Farese, K. Ganga, M. Giacometti, E. Hivon, V. V. Hristov, A. Iacoangeli, A. H. Jaffe, W. C. Jones, A. E. Lange, L. Martinis, S. Masi, P. Mason, P. D. Mauskopf, A. Melchiorri, T. Montroy, E. Pascale, F. Piacentini, D. Pogosyan, F. Pongetti, S. Prunet, G. Romeo, J. E. Ruhl and F. Scaramuzzi. A Measurement by BOOMERANG of Multiple Peaks in the Angular Power Spectrum of the Cosmic Microwave Background. *The Astrophysical Journal* 571, 604–614 (2002). DOI 10.1086/340118. <https://doi.org/10.1086/340118>
- [19] Wayne Hu and Scott Dodelson. Cosmic Microwave Background Anisotropies. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics* 40, 171–216 (2002). DOI 10.1146/annurev.astro.40.060401.093926. <https://doi.org/10.1146/annurev.astro.40.060401.093926>
- [20] D. N. Spergel, L. Verde, H. V. Peiris, E. Komatsu, M. R. Nolte, C. L. Bennett, M. Halpern, G. Hinshaw, N. Jarosik, A. Kogut, M. Limon, S. S. Meyer, L. Page, G. S. Tucker, J. L. Weiland, E. Wollack and E. L. Wright. First-Year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) Observations: Determination of Cosmological Parameters. *The Astrophysical Journal Supplement Series* 148, 175–194 (2003). DOI 10.1086/377226. <https://doi.org/10.1086/377226>
- [21] A. Kogut, D. N. Spergel, C. Barnes, C. L. Bennett, M. Halpern, G. Hinshaw, N. Jarosik, M. Limon, S. S. Meyer, L. Page, G. S. Tucker, E. Wollack and E. L. Wright. First-Year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) Observations: Temperature-Polarization Correlation. *The Astrophysical Journal Supplement Series* 148, 161–173 (2003). DOI 10.1086/377219. <https://doi.org/10.1086/377219>
- [22] G. Hinshaw, D. Larson, E. Komatsu, D. N. Spergel, C. L. Bennett, J. Dunkley, M. R. Nolte, M. Halpern, R. S. Hill, N. Odegard, L. Page, K. M. Smith, J. L. Weiland, B. Gold, N. Jarosik, A. Kogut, M. Limon, S. S. Meyer, G. S. Tucker, E. Wollack and E. L. Wright. Nine-Year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) Observations: Cosmological Parameter Results. *The Astrophysical Journal Supplement Series* 208, article 19 (2013). DOI 10.1088/0067-0049/208/2/19. <https://doi.org/10.1088/0067-0049/208/2/19>
- [23] J. M. Kovac, E. M. Leitch, C. Pryke, J. E. Carlstrom, N. W. Halverson and W. L. Holzapfel. Detection of Polarization in the Cosmic Microwave Background Using DASI. *Nature* 420, 772–787 (2002). DOI 10.1038/nature01269. <https://doi.org/10.1038/nature01269>
- [24] Arthur Kosowsky. Cosmic Microwave Background Polarization. *Annals of Physics* 246, 49–85 (1996). DOI 10.1006/aphy.1996.0020. <https://doi.org/10.1006/aphy.1996.0020>
- [25] Wayne Hu and Martin White. A CMB Polarization Primer. *New Astronomy* 2, 323–344 (1997). DOI 10.1016/S1384-1076(97)00022-5. [https://doi.org/10.1016/S1384-1076\(97\)00022-5](https://doi.org/10.1016/S1384-1076(97)00022-5)
- [26] Matias Zaldarriaga and Uroš Seljak. All-Sky Analysis of Polarization in the Microwave Background. *Physical Review D* 55, 1830–1840 (1997). DOI 10.1103/PhysRevD.55.1830. <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.55.1830>
- [27] 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>
- [28] Planck Collaboration. Planck 2018 Results. III. High Frequency Instrument Data Processing and Frequency Maps. *Astronomy & Astrophysics* 641, A3 (2020). DOI 10.1051/0004-6361/201832909. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201832909>
- [29] Planck Collaboration. Planck 2018 Results. IV. Diffuse Component Separation. *Astronomy & Astrophysics* 641, A4 (2020). DOI 10.1051/0004-6361/201833881. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201833881>
- [30] Planck Collaboration. Planck 2018 Results. V. CMB Power Spectra and Likelihoods. *Astronomy & Astrophysics* 641, A5 (2020). DOI 10.1051/0004-6361/201936386. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201936386>

- [31] 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>
- [32] Planck Collaboration. Planck 2018 Results. VIII. Gravitational Lensing. *Astronomy & Astrophysics* 641, A8 (2020). DOI 10.1051/0004-6361/201833886. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201833886>
- [33] Brent Follin, Lloyd Knox, Marius Millea and 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://doi.org/10.1103/PhysRevLett.115.091301>
- [34] Sergei Bashinsky and Uroš Seljak. Signatures of relativistic neutrinos in CMB anisotropy and matter clustering. *Physical Review D* 69, 083002 (2004). DOI 10.1103/PhysRevD.69.083002. <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.69.083002>
- [35] NASA Legacy Archive for Microwave Background Data Analysis. COBE FIRAS Overview. Current. https://lambda.gsfc.nasa.gov/product/cobe/firas_overview.html
- [36] NASA Legacy Archive for Microwave Background Data Analysis. COBE DMR Overview. Current. https://lambda.gsfc.nasa.gov/product/cobe/dmr_overview.html
- [37] Planck Collaboration. Planck Intermediate Results. XLVII. Planck Constraints on Reionization History. *Astronomy & Astrophysics* 596, A108 (2016). DOI 10.1051/0004-6361/201628897. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201628897>
- [38] J. Chluba and R. A. Sunyaev. The Evolution of CMB Spectral Distortions in the Early Universe. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 419, 1294–1314 (2012). DOI 10.1111/j.1365-2966.2011.19786.x. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2011.19786.x>