DEL QUARK A LA CONSCIENCIA

Edición científica

QTC-001 a QTC-027

Juan Segurola

Versión 0.1 · 12 de septiembre de 2026

Índice

		Versión	Comienza en
QTC-001	Todo lo que ves pertenece al pasado 10.5281/zenodo.22714595	v1.0	6
QTC-002	¿Por qué el cielo nocturno es oscuro? 10.5281/zenodo.22714626	v1.0	15
QTC-003	¿Por qué las cosas sólidas son sólidas? 10.5281/zenodo.22714650	v1.0	23
QTC-004	¿Dónde se fabricaron los átomos de tu cuerpo? 10.5281/zenodo.22714672	v1.0	32
QTC-005	¿Cómo sabemos de qué están hechas las estrellas? 10.5281/zenodo.22245976	v1.1	42
QTC-006	¿A qué distancia está el universo? La escalera de distancias cósmicas 10.5281/zenodo.22247253	v1.1	52
QTC-007	El tiempo profundo 10.5281/zenodo.22247356	v1.2	62
QTC-008	La vida funciona con gradientes 10.5281/zenodo.22336113	v1.1	72
QTC-009	¿Qué queremos decir realmente cuando hablamos de vida? 10.5281/zenodo.22336211	v1.1	84
QTC-010	Variación al azar y un filtro 10.5281/zenodo.22336338	v1.0	96
QTC-011	La luz más antigua que podemos observar 10.5281/zenodo.22336350	v1.0	108
QTC-012	¿Qué queremos decir realmente cuando hablamos del Big Bang? 10.5281/zenodo.22336357	v1.0	119
QTC-013	Antes de los átomos 10.5281/zenodo.22336451	v1.0	131
QTC-014	Materia, antimateria y un desequilibrio sin resolver 10.5281/zenodo.22336461	v1.0	143

Índice

QTC-015	Las estrellas que nunca hemos visto 10.5281/zenodo.22336511	v1.0	154
QTC-016	Cómo se construye un planeta 10.5281/zenodo.22336520	v1.0	167
QTC-017	Cómo aprendimos a fechar el pasado 10.5281/zenodo.22336534	v1.0	180
QTC-018	El planeta que se mueve 10.5281/zenodo.22336546	v1.0	193
QTC-019	El termostato de la Tierra 10.5281/zenodo.22336555	v1.0	206
QTC-020	Antes de la vida: un planeta lleno de química 10.5281/zenodo.22336566	v1.0	220
QTC-021	Cuando la química empezó a evolucionar 10.5281/zenodo.22336577	v1.0	234
QTC-022	Las primeras células que nunca vimos 10.5281/zenodo.22336633	v1.0	248
QTC-023	LUCA: el antepasado que reconstruimos 10.5281/zenodo.22336644	v1.0	262
QTC-024	El planeta microbiano 10.5281/zenodo.22336667	v1.0	275
QTC-025	Cómo leer una atmósfera en una roca 10.5281/zenodo.22336709	v1.0	288
QTC-026	La célula dentro de la célula 10.5281/zenodo.22344392	v1.1	301
QTC-027	De la información a la herencia: árbol, red y virus 10.5281/zenodo.22336725	v1.0	313

Prólogo

Leer un universo reconstruido a partir de evidencias

Una colección científica comienza con una dificultad. Accedemos al universo a través de efectos: luz que ha viajado, materia que ofrece resistencia, espectros que transportan firmas, rocas que conservan historias y sistemas vivos cuya organización presente contiene rastros de un pasado inaccesible. Los objetos de estudio abarcan desde la radiación observable más antigua hasta las células y la herencia, pero el problema recurrente es el mismo. ¿Qué puede inferirse legítimamente a partir de las evidencias que han sobrevivido o que todavía pueden medirse?

Los veintisiete ensayos QTC reunidos aquí abordan ese problema en escalas distintas. Comienzan con la observación, la luz, la solidez y el origen de los elementos. Avanzan por la medición, la cosmología, el tiempo profundo y el cambio planetario. Después siguen las condiciones bajo las cuales la química pudo organizarse, evolucionar y llegar a ser celular, antes de alcanzar la ascendencia común, el mundo microbiano, las evidencias atmosféricas, la endosimbiosis y la transmisión de información biológica.

Este orden constituye una ruta a través de preguntas conectadas, no la afirmación de que la naturaleza esté dividida en veintisiete compartimentos. Cada ensayo sigue siendo una obra científica autónoma, con su propio alcance, referencias, matices, versión y DOI. Algunas conclusiones descansan en mediciones establecidas. Otras continúan dependiendo de modelos, reconstrucciones históricas o desacuerdos científicos activos. La distinción forma parte del contenido y no es una limitación que deba ocultarse.

El libro reproduce los artículos QTC publicados sin reescribirlos ni armonizarlos. Se conservan sus páginas originales, su numeración interna, sus bibliografías y sus identidades editoriales. La nueva cubierta, el índice y el prólogo ofrecen una entrada común a la colección; no crean una edición revisada de ningún artículo individual ni sustituyen los registros mediante los cuales cada artículo puede citarse por separado.

Leído en orden, el volumen sigue un largo arco desde aquello que la observación permite recuperar sobre el universo físico hasta aquello que las evidencias permiten reconstruir acerca de la historia de la vida. Leído de forma selectiva, continúa siendo un conjunto de preguntas independientes. En ambos usos rige la misma disciplina: separar lo observado de lo inferido, lo establecido de lo que permanece abierto y una representación útil de la realidad que intenta describir.

El título Del quark a la consciencia nombra una dirección de investigación más amplia que la promesa de que cada paso esté ya comprendido. El presente volumen científico termina donde concluye esta primera secuencia canónica. Conserva las preguntas, las respuestas y los límites de QTC-001 a QTC-027 tal como fueron publicados, al tiempo que hace visibles sus relaciones como un único recorrido intelectual.

© 2026 Juan Segurola. All Rights Reserved.

Todo lo que ves pertenece al pasado

QTC-001 · De los quarks a la conciencia

El universo, la vida y cómo llegamos a saberlo

Autor: Juan Segurola

Versión: v1.0 ES · 29 de agosto de 2026
DOI: 10.5281/zenodo.22714595 · Zenodo record: 22714595
Perfil epistémico: Interpretación filosófica

Licencia: All Rights Reserved

Resumen del artículo

Toda observación llega con retraso. La luz de la Luna tarda alrededor de 1,3 segundos en alcanzar la Tierra; la de la galaxia de Andrómeda ha viajado durante unos 2,5 millones de años. La astronomía, por tanto, nunca nos muestra el universo como una única escena instantánea. Nos ofrece un registro estratificado, construido a partir de señales emitidas en momentos diferentes. Este artículo comienza con las pruebas del siglo XVII de que la propagación de la luz es finita y sigue sus consecuencias desde el Sistema Solar hasta las distancias cosmológicas. También separa dos ideas que a menudo se confunden: el tiempo de viaje corregible de una señal y el hecho relativista de que la simultaneidad a distancia depende del sistema de referencia. El tema central es tanto metodológico como astronómico: un telescopio recibe radiación, no el objeto mismo. Para convertir esa radiación en una afirmación sobre el universo, los astrónomos combinan señales, relojes, distancias, instrumentos y modelos físicos.

En 60 segundos

Cuando miras la Luna, ves luz que salió de ella aproximadamente 1,3 segundos antes. Cuando miras Andrómeda, recibes luz emitida hace unos 2,5 millones de años. El cielo nocturno no es, por tanto, una fotografía tomada en un único instante cósmico, sino un archivo cuyas páginas llegan con retrasos diferentes. En 1676, Ole Rømer lo reconoció al estudiar cómo cambiaban los tiempos de los eclipses de Ío, una luna de Júpiter. Su estimación del retraso era imperfecta, pero la inferencia fue decisiva: la luz no llegaba de forma instantánea. La astronomía moderna convierte ese inconveniente en evidencia y utiliza el tiempo de retroceso o lookback time para reconstruir la historia cósmica. A distancias muy grandes, sin embargo, distancia y tiempo de viaje no son intercambiables porque el universo se expande. Y ni siquiera después de corregir el retardo de la señal la relatividad especial nos proporciona un "ahora" distante universal. Observar es, por tanto, reconstruir: lo que nos llega es una señal procedente de un acontecimiento, y nuestra imagen de la fuente es una inferencia construida a partir de esa señal.

Por qué importa esta pregunta

La velocidad finita de la luz suele enseñarse como un número. Su consecuencia más profunda es epistémica: la información necesita tiempo para viajar. Ese hecho determina qué podemos observar, cómo reconstruimos la historia astronómica y en qué punto palabras aparentemente sencillas como

“ahora”, “distancia” o “ver” se vuelven técnicamente peligrosas. QTC empieza aquí porque es una demostración especialmente limpia del método de la serie. Un hecho familiar se vuelve más interesante cuando no preguntamos solo qué significa, sino también cómo se estableció, qué podemos corregir y qué permanece después de aplicar la corrección.

1. Las señales necesitan tiempo

El acto más cotidiano de ver contiene un retraso. La luz sale de un objeto, atraviesa el espacio que lo separa del observador y solo entonces alcanza un ojo, una cámara o un telescopio. Para una persona al otro lado de una habitación, el retraso es despreciable. Para la Luna no lo es: usando su distancia media a la Tierra, unos 384.400 kilómetros, y el valor exacto en el SI de la velocidad de la luz en el vacío, el tiempo de viaje en un solo sentido es de aproximadamente 1,28 segundos. [1–3]

Hoy el número c = 299.792.458 metros por segundo es exacto en el Sistema Internacional de Unidades. Esa formulación importa. El segundo se define mediante una transición atómica del cesio-133 y, a continuación, el metro se define fijando el valor numérico de c. Ya no determinamos el valor SI de c midiendo un metro y un segundo definidos de forma independiente; es c la que contribuye a definir el propio metro. [1,2]

No siempre fue así. En el siglo XVII, una de las grandes preguntas era si la luz atravesaba el espacio de manera instantánea o simplemente a una velocidad enorme. La evidencia decisiva no llegó de una carrera de laboratorio entre una lámpara y un cronómetro. Llegó de una luna de Júpiter.

Ole Rømer estudió los eclipses de Ío, cuyas desapariciones regulares en la sombra de Júpiter podían funcionar como un reloj celeste. Los tiempos observados de los eclipses cambiaban sistemáticamente mientras la Tierra se desplazaba alrededor del Sol: cuando la geometría alargaba el recorrido de la luz, los acontecimientos aparecían más tarde; cuando el recorrido se acortaba, aparecían antes. El resultado de 1676, publicado en el Journal des Sçavans y traducido en Philosophical Transactions en 1677, infería que la luz necesitaba unos 22 minutos para recorrer una distancia comparable al diámetro de la órbita terrestre. [4,5]

Ese número era demasiado grande. Con la unidad astronómica moderna, una unidad astronómica equivale exactamente a 149.597.870.700 metros, y el tiempo-luz correspondiente a 2 au es de unos 998 segundos, es decir, 16,6 minutos. [2,6] Lo importante no es que Rømer obtuviera el valor moderno. No lo hizo. Su logro fue separar un verdadero retardo de propagación de las irregularidades del movimiento de Ío. Convertir ese retardo en una velocidad exigía otra magnitud: el tamaño de la órbita terrestre. Huygens realizó después esa conversión utilizando la escala orbital disponible en su época. [5,7]

La historia es útil porque deja al descubierto la anatomía de una medición. Rømer observó un patrón temporal. Una interpretación física convirtió ese patrón en un retardo de propagación. Después hizo falta una escala de distancias independiente para transformar el retardo en una velocidad. La interpretación no fue aceptada sin resistencia: Giovanni Domenico Cassini planteó objeciones y la explicación basada en una velocidad finita siguió siendo discutida en parte de la comunidad astronómica. En 1728, James Bradley aportó una línea de evidencia independiente mediante la aberración estelar: un desplazamiento anual aparente de la dirección de las estrellas producido por el movimiento orbital de la Tierra combinado con la velocidad finita de la luz. La

nueva ruta no repetía los tiempos de eclipse de Rømer; llegaba a la misma conclusión física a través de un fenómeno diferente. [5,8,17]

En qué punto estamos

La velocidad finita de la luz quedó establecida astronómicamente mucho antes de la relatividad. Rømer midió un desplazamiento temporal; convertirlo en velocidad exigía una escala de distancias independiente, y Bradley aportó después otra ruta observacional. La lección ya es epistémica: una observación proporciona primero una señal, mientras que la magnitud física que buscamos surge tras interpretarla y combinarla con otras mediciones. Los retrasos afectan a todo lo que vemos en el cielo, pero no por igual.

2. Un cielo hecho de edades distintas

La pregunta

Si toda señal llega tarde, ¿qué representa realmente una única imagen del cielo nocturno? La respuesta intuitiva —"el universo ahora"— solo resulta aproximadamente útil para objetos cercanos. A escala astronómica, distintas direcciones nos entregan información emitida en épocas radicalmente diferentes.

La Luna está a algo más de un segundo-luz. El Sol, a unos ocho minutos-luz. Una estrella situada a diez años luz se observa mediante luz que ha viajado aproximadamente diez años. Andrómeda, la gran galaxia más cercana a la Vía Láctea, se encuentra a unos 2,5 millones de años luz; por tanto, los fotones que llegan esta noche a un telescopio iniciaron su viaje aproximadamente 2,5 millones de años antes de alcanzarlo. [3,9]

Si colocamos esos objetos en una misma fotografía, nada sincroniza mágicamente sus tiempos de emisión. La cámara registra fotones que llegan juntos al detector, no fotones que salieron simultáneamente de sus fuentes. Una fotografía del cielo es simultánea en la recepción, no en la emisión.

Esta es la primera gran consecuencia de una velocidad de señal finita: cuanto más lejos miramos, más antigua tiende a ser la información que recibimos. La expresión "tiempo de retroceso" o lookback time designa el intervalo entre la emisión de la luz que recibimos y el momento en que la observamos. Para objetos cercanos, la intuición "distancia en años luz ≈ años de retroceso" funciona bien. A distancias cosmológicas, la expansión complica esa relación, como veremos más adelante. [10]

El cielo nocturno está, por tanto, estratificado. Las estrellas cercanas, las galaxias distantes y la radiación cósmica accesible más antigua no pertenecen a un mismo instante observacional. Son piezas de un mosaico temporal. La frase habitual de que los telescopios son máquinas del tiempo resulta útil solo si mantenemos claro su límite: ningún telescopio nos transporta al pasado. Recibe información que lleva viajando desde el pasado.

En qué punto estamos

Un telescopio puede recibir muchas señales en el mismo instante, pero fueron emitidas en momentos distintos: la luz de la Luna tiene alrededor de 1,3 segundos de antigüedad, mientras que la de Andrómeda ronda los 2,5 millones de años. El cielo es, por tanto, un mosaico de tiempos de retroceso, no una instantánea universal. Cuando el retraso se vuelve suficientemente grande, se convierte en una herramienta para reconstruir la historia cósmica.

3. El cielo como archivo

Ningún observador humano puede contemplar cómo una galaxia evoluciona durante diez mil millones de años. La astronomía resuelve ese problema de forma indirecta. Compara poblaciones observadas con distintos tiempos de retroceso, combina esas observaciones con modelos físicos y pregunta cómo cambian con la época cósmica las distribuciones de estrellas, gas, galaxias y estructura a gran escala. El archivo está distribuido por el espacio porque las señales han tardado tiempos diferentes en llegar hasta nosotros. [10,11]

Eso no equivale a filmar un mismo objeto desde su juventud hasta su vejez. Una galaxia de alto corrimiento al rojo no es literalmente la versión joven de una galaxia cercana escogida al azar. Los astrónomos tienen que comparar poblaciones, tener en cuenta efectos de selección e inferir estadísticamente las conexiones evolutivas. La evidencia es poderosa precisamente porque pueden compararse muchas observaciones independientes, pero la inferencia es más sofisticada de lo que sugiere la expresión “mirar atrás en el tiempo”.

El mismo principio nos lleva hasta la luz electromagnética más antigua que podemos observar directamente: el fondo cósmico de microondas. No vemos el universo primitivo viajando hasta él. Detectamos una radiación que se ha propagado hasta nosotros desde una época temprana y que transporta información sobre las condiciones existentes cuando el cosmos se volvió por primera vez transparente a la luz. El retraso no es solo un obstáculo; es precisamente lo que permite que esa época siga siendo observable.

En qué punto estamos

La astronomía transforma el retardo de propagación, de inconveniente, en evidencia. Comparando señales emitidas en épocas distintas, reconstruye historias que ningún observador podría contemplar directamente. Pero el lenguaje encierra una trampa: a gran corrimiento al rojo, un tiempo de retroceso no es simplemente una distancia dividida por c. Para leer correctamente el archivo debemos distinguir varios significados diferentes de distancia astronómica.

4. La distancia no es solo edad

La pregunta

Para la Luna, dividir la distancia por c proporciona un excelente tiempo de viaje de la luz. ¿Podemos utilizar el mismo atajo para una galaxia situada a miles de millones de años luz? Solo si antes decimos qué entendemos por “distancia”, porque la expansión cósmica da a esa palabra varios significados operativos.

En un universo en expansión no existe una única distancia cosmológica que sirva para todo. Los astrónomos utilizan, entre otras, la distancia de luminosidad, la distancia de diámetro angular y la

distancia comóvil. La distancia de luminosidad relaciona el brillo observado con la luminosidad intrínseca; la de diámetro angular convierte un ángulo aparente en un tamaño físico; la distancia comóvil sigue la separación en unas coordenadas que se expanden con el universo. Responden a preguntas operativas diferentes, de modo que a una misma fuente pueden asignársele legítimamente distancias numéricas distintas. [10,11]

Un ejemplo numérico hace visible la diferencia. En un modelo ΛCDM plano con los parámetros de Planck 2018, H_0 = 67,66 km s^{-1} Mpc^{-1} y Ωm = 0,3111, un corrimiento al rojo z = 1 corresponde a un tiempo de retroceso de unos 7,94 mil millones de años, pero a una distancia comóvil de unos 11,08 mil millones de años luz. Para z = 7, el tiempo de retroceso es de unos 13,03 mil millones de años, mientras que la distancia comóvil es de unos 28,75 mil millones de años luz. [10,12]

Nada ha viajado más rápido que la luz en esos ejemplos. Los números responden a preguntas diferentes dentro de un espacio-tiempo en expansión. Los fotones llevan viajando unos 13 mil millones de años, mientras que la distancia comóvil que hoy asignamos a la fuente es muy superior a 13 mil millones de años luz. Tratar toda distancia cosmológica como c multiplicada por el tiempo de viaje mezcla magnitudes distintas y crea paradojas aparentes que en realidad son artefactos del vocabulario.

Las cifras también dependen de los parámetros cosmológicos que adoptemos. Si utilizamos un valor local de la escalera de distancias para H_0 cercano a 73 km s^{-1} Mpc^{-1}, en lugar del valor tipo Planck anterior, estos tiempos y distancias ilustrativos cambian aproximadamente entre un seis y un siete por ciento. No es una molestia que debamos ocultar. QTC-006 utilizará la tensión de Hubble para mostrar cómo dos rutas precisas hacia un mismo parámetro cosmológico pueden permanecer en desacuerdo sin resolver.

En qué punto estamos

A escalas cosmológicas, “cuánto tiempo ha viajado la luz” y “a qué distancia está la fuente” son preguntas diferentes, cuyas respuestas numéricas dependen de las definiciones y de un modelo cosmológico. Esto evita un error frecuente, pero todavía no aborda otro más profundo. Incluso si conociéramos y corrigiéramos perfectamente cada retardo de propagación, ¿recuperaríamos entonces un único presente universal para los objetos distantes? La relatividad especial dice que no.

5. Corregir el retardo tampoco nos da un ahora universal

La pregunta

El retardo de una señal y la relatividad de la simultaneidad suelen mezclarse en una sola idea: “vemos el pasado, por tanto no existe un ahora distante”. Esa inferencia es incorrecta. El tiempo de viaje es un efecto de propagación calculable. La relatividad de la simultaneidad es una afirmación diferente sobre cómo el espacio-tiempo asigna tiempos a acontecimientos separados.

La forma más sencilla de mantener separadas ambas ideas es práctica. Los astrónomos corrigen de manera rutinaria los tiempos de llegada por los cambios en la trayectoria recorrida por la luz. En el estudio de púlsares y en la cronología de tránsitos de exoplanetas, las observaciones realizadas desde una Tierra o una nave espacial en movimiento pueden transformarse a una referencia común, como el baricentro del Sistema Solar. La documentación temporal de Fermi de la NASA

incluye una corrección baricéntrica de tiempo-luz que puede alcanzar aproximadamente ±500 segundos: esencialmente el tiempo que tarda la luz en recorrer una unidad astronómica. [13,14]

Ese número cierra un círculo histórico muy útil. Rømer descubrió la propagación finita a través de una variación del tiempo de viaje de la luz provocada por la geometría orbital. Los sistemas modernos de cronometraje eliminan de forma rutinaria una contribución geométrica análoga. El retardo de propagación puede modelarse, transformarse y corregirse hasta la precisión que exige el experimento.

La relatividad de la simultaneidad es distinta. La relatividad especial combina el principio de relatividad con una velocidad de la luz en el vacío invariante c: los observadores inerciales coinciden en el valor local de c aunque se muevan unos respecto a otros. Las transformaciones de Lorentz codifican esa estructura física. Como consecuencia, dos observadores en movimiento inercial relativo pueden discrepar sobre si dos acontecimientos separados espacialmente ocurrieron al mismo tiempo, y aun así coincidir en las coincidencias locales y en el orden causal cuando un acontecimiento puede influir en otro. [15]

Esto no se debe simplemente a que las señales necesiten tiempo para llegar. Imaginemos que corregimos todos los retardos de propagación conocidos. La simultaneidad sigue dependiendo del sistema de referencia porque la transformación de Lorentz relaciona de manera diferente espacio y tiempo entre sistemas inerciales, preservando c. La diferencia es, por tanto, física, no una convención contable: el tiempo finito de viaje puede modelarse y restarse, mientras que ninguna corrección produce un único presente universal para todos los acontecimientos distantes. [15]

Los conos de luz expresan la parte causal de la historia. Los acontecimientos situados dentro de nuestro cono de luz pasado pueden, en principio, habernos influido mediante señales que no viajen más rápido que la luz. Los acontecimientos situados fuera de él todavía no han podido hacerlo. La relatividad general modifica la geometría global, pero conserva localmente la estructura causal definida por los conos de luz. [16]

Por eso, cuando preguntamos “¿qué está haciendo Andrómeda ahora?”, debemos ser cuidadosos. La luz de nuestro telescopio nos informa directamente de un acontecimiento situado aproximadamente 2,5 millones de años atrás en el cono de luz pasado de Andrómeda. Podemos inferir un estado posterior utilizando una convención temporal especificada, por ejemplo una coordenada de tiempo cosmológica estándar, pero la relatividad no proporciona un presente universal independiente del sistema de referencia que compartan todos los lugares distantes.

En qué punto estamos

El retardo de propagación puede corregirse en astronomía de precisión; la relatividad de la simultaneidad permanece porque pertenece a la relación espacio-temporal entre sistemas de referencia inerciales, no a un tiempo de viaje sin corregir. Incluso después de las correcciones temporales no existe un “ahora” distante independiente del sistema de referencia. La luz que realmente recibimos solo nos da acceso directo a acontecimientos pasados; los estados posteriores deben reconstruirse, no simplemente recibirse.

6. Observar es reconstruir

Un telescopio no entrega una galaxia. Entrega fotones, cuentas, longitudes de onda, tiempos de llegada, coordenadas del detector y otras magnitudes medidas. La calibración transforma la respuesta del detector en señales físicas. Las estimaciones de distancia, los corrimientos al rojo y los modelos conectan después esas señales con propiedades de la fuente. La afirmación "Andrómeda está a 2,5 millones de años luz" ya es el final de una cadena de inferencias, no algo escrito directamente sobre un fotón. [9,10]

Llamar reconstrucción a la observación es, por tanto, una interpretación metodológica, no una nueva ley de la física. Los ingredientes empíricos son directos: las señales se propagan; los instrumentos tienen funciones de respuesta; la distancia y el corrimiento al rojo necesitan medirse; las propiedades de las fuentes se infieren a partir de datos mediante modelos físicos. El paso interpretativo consiste en advertir que la observación científica está estructurada por esa cadena, en lugar de ser un acceso pasivo a una cosa exactamente tal como es.

Esto no convierte la astronomía en algo arbitrario. Al contrario. La reconstrucción está restringida porque distintos instrumentos, longitudes de onda, métodos y modelos pueden compararse entre sí. Una distancia inferida por un método puede comprobarse con otro. Un modelo temporal que predice mal las llegadas fracasa. Un modelo cosmológico tiene que explicar simultáneamente muchas observaciones. La inferencia se vuelve fiable no eliminando la mediación, sino haciendo que esa mediación sea medible, explícita y contrastable.

El cielo nocturno es, por tanto, menos inmediato y al mismo tiempo más informativo de lo que parece. Menos inmediato, porque toda señal llega retrasada y toda interpretación está mediada. Más informativo, porque esos retrasos conservan un registro. No recibimos el universo entero de una vez. Recibimos huellas de acontecimientos diferentes, situados a distintas distancias y tiempos, y aprendemos a conectarlos hasta formar una historia.

En qué punto estamos

El cielo no es una ventana a un único presente cósmico. Es un archivo de señales retrasadas, y la astronomía reconstruye los acontecimientos que las produjeron combinando medición, calibración y modelos. Esa reconstrucción está restringida, no es arbitraria, porque los métodos independientes pueden coincidir o fallar. La siguiente pregunta surge de forma natural: si un universo antiguo y finito llena el cielo de estrellas y galaxias, ¿por qué está oscuro el cielo nocturno?

Lo que sabemos y cómo lo sabemos

La propagación de la luz es finita. Los desplazamientos temporales de los eclipses de Ío estudiados por Rømer proporcionaron evidencia astronómica en el siglo XVII; Bradley aportó después una ruta independiente, y la metrología moderna fija c exactamente en las unidades SI. [1,4,5,8]

Distintas direcciones del cielo muestran distintos tiempos de emisión. Las distancias medidas, combinadas con la propagación finita, implican diferentes tiempos de retroceso; la Luna y Andrómeda hacen visible de inmediato la escala. [3,9]

El tiempo de retroceso y la distancia cosmológica no son intercambiables. La cosmología FLRW define varias medidas de distancia con significados operativos diferentes. [10–12]

El retardo de propagación no es la relatividad de la simultaneidad. Los astrónomos corrigen rutinariamente los retardos de tiempo-luz, mientras que la relatividad especial predice una simultaneidad dependiente del sistema de referencia incluso después de aplicar esas correcciones. [13–16]

Lo que todavía no sabemos

- El artículo no resuelve la tensión actual de Hubble: distintas rutas de alta precisión hacia H_0 siguen en desacuerdo, lo que afecta a las distancias y edades cosmológicas numéricas en un nivel de varios puntos porcentuales.
- Para muchas fuentes distantes, reconstruir con detalle un estado posterior es intrínsecamente dependiente de modelos incluso cuando el estado anterior observado está bien medido.
- En el nivel más profundo, sigue sin resolverse cómo combinar la teoría cuántica y la gravedad; QTC-001 utiliza la estructura causal relativista, muy bien comprobada dentro de su dominio, sin presentarla como una teoría final del espacio-tiempo.

¿Qué podría hacernos cambiar de opinión?

- Una transmisión reproducible de información superlumínica en el vacío obligaría a revisar profundamente el marco causal utilizado aquí.
- Una alternativa validada al espacio-tiempo relativista/FLRW que explicara mejor las mismas observaciones y modificara la relación entre propagación de señales, simultaneidad y distancia cosmológica obligaría a revisar las secciones correspondientes.
- Revisiones sustanciales de las distancias astronómicas medidas cambiarían los ejemplos numéricos de tiempo de retroceso, aunque no el hecho básico de que una velocidad de señal finita hace que toda observación llegue retrasada.

Si solo recuerdas una idea

El cielo no es una fotografía de un único presente cósmico: es un archivo de señales emitidas en momentos distintos, que la ciencia convierte en historia mediante medición e inferencia.

Artículos relacionados

- QTC-002 — ¿Por qué está oscuro el cielo nocturno?
- QTC-006 — ¿A qué distancia está el universo? La escalera de distancias cósmicas
- QTC-011 — La luz más antigua que podemos ver

Referencias

[1] NIST. Definitions of SI Base Units. https://www.nist.gov/si-redefinition/definitions-si-base-units

[2] NIST. SP 330, Section 2: Definition of the SI. https://www.nist.gov/pml/special-publication-330/sp-330-section-2

[3] NASA Science. Moon Facts. Average Earth–Moon distance 384,400 km. https://science.nasa.gov/moon/facts/

[4] A Demonstration Concerning the Motion of Light, Communicated from Paris, in the Journal des Scavans, and Here Made English. Philosophical Transactions 12(136), 893–894 (1677). DOI 10.1098/rstl.1677.0024. https://doi.org/10.1098/rstl.1677.0024

[5] van Helden, A. Roemer's Speed of Light. Journal for the History of Astronomy 14(2), 137–141 (1983). DOI 10.1177/002182868301400206. https://doi.org/10.1177/002182868301400206

[6] International Astronomical Union. IAU 2012 Resolution B2: Re-definition of the astronomical unit of length. https://www.iau.org/static/resolutions/IAU2012_English.pdf

[7] Huygens, C. Treatise on Light, Chapter I (1690). https://www.gutenberg.org/files/14725/14725-h/14725-h.htm

[8] Bradley, J. A Letter ... Giving an Account of a New Discovered Motion of the Fix'd Stars. Philosophical Transactions 35(406), 637–661 (1728). DOI 10.1098/rstl.1727.0064. https://doi.org/10.1098/rstl.1727.0064

[9] NASA Science / Hubble. Messier 31 (The Andromeda Galaxy): distance 2.5 million light-years. https://science.nasa.gov/mission/hubble/science/explore-the-night-sky/hubble-messier-catalog/messier-31/

[10] Hogg, D. W. Distance measures in cosmology. arXiv:astro-ph/9905116 (1999). https://arxiv.org/abs/astro-ph/9905116

[11] Ryden, B. Introduction to Cosmology, 2nd ed. Cambridge University Press (2016). Chs. 1–3 (expansion, redshift and distance measures).

[12] 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

[13] Eastman, J.; Siverd, R.; Gaudi, B. S. Achieving Better Than 1 Minute Accuracy in the Heliocentric and Barycentric Julian Dates. PASP 122, 935–946 (2010). DOI 10.1086/655938. https://doi.org/10.1086/655938

[14] NASA Fermi Science Support Center. Barycentric correction for pulsar timing. https://fermi.gsfc.nasa.gov/ssc/data/p7rep/analysis/documentation/Cicerone/Cicerone_Pulsars/barycentric_correction.html

[15] Einstein, A. Zur Elektrodynamik bewegter Körper. Annalen der Physik 322(10), 891–921 (1905), ser. 4, vol. 17. DOI 10.1002/andp.19053221004. https://doi.org/10.1002/andp.19053221004

[16] Einstein Online / Max Planck Institute for Gravitational Physics. Light cone. https://www.einstein-online.info/en/explandict/light-cone/

[17] Fabricius, C. Paris 1676: The Discovery of the Velocity of Light and the Roles of Rømer and Cassini. Journal for the History of Astronomy 50(4), 456–475 (2019). DOI 10.1177/0021828619869445. https://doi.org/10.1177/0021828619869445

¿Por qué el cielo nocturno es oscuro?

QTC-002 · De los quarks a la conciencia

El universo, la vida y cómo llegamos a saberlo

Autor: Juan Segurola

Versión: v1.0 ES · 29 de agosto de 2026

DOI: 10.5281/zenodo.22714626 · Zenodo record: 22714626

Perfil epistémico: Interpretación científica actual

Licencia: All Rights Reserved

Resumen del artículo

La oscuridad del cielo nocturno parece tan normal que es fácil pasar por alto lo que nos está diciendo. En un universo idealizado, eterno y estático, lleno de forma uniforme por estrellas que brillaran indefinidamente, la distancia por sí sola no oscurecería el cielo: las capas más lejanas contienen más estrellas y, si tenemos en cuenta discos estelares opacos de tamaño finito, casi toda línea de visión acabaría terminando en una fotosfera. La predicción real no es un cielo algo más brillante, sino uno que se aproximaría al brillo superficial de las estrellas. Este artículo sigue la pregunta desde sus formulaciones de la Edad Moderna, pasando por Olbers y Edgar Allan Poe, hasta la resolución contemporánea. La clave es el tiempo: estrellas y galaxias tienen una historia luminosa finita, muchísimo más corta que el tiempo necesario para llenar el cielo con radiación estelar en equilibrio. La expansión cósmica y el corrimiento al rojo modifican además el fondo, mientras que las mediciones modernas muestran que el cielo es oscuro solo para nuestros ojos, no para todo el espectro electromagnético.

En 60 segundos

Si el universo fuera estático, eterno y estuviera uniformemente lleno de estrellas que hubieran brillado desde siempre, el cielo nocturno no debería ser oscuro. En el argumento más sencillo de capas esféricas, la pérdida de brillo de cada estrella con la distancia se compensa con el aumento del número de estrellas a radios mayores. Cuando se tratan correctamente el tamaño finito de los discos estelares y la ocultación entre estrellas, la predicción se vuelve todavía más física: casi toda línea de visión debería terminar finalmente sobre una superficie estelar, de modo que el cielo se aproximaría al brillo superficial de una estrella. Para una referencia semejante al Sol eso supone miles de kelvin: más parecido a estar inmersos en un campo de radiación estelar que a contemplar una noche oscura. La razón principal de que no ocurra es temporal. Las estrellas no han brillado ni remotamente durante los aproximadamente 10^23 años que exige la estimación clásica de equilibrio. El universo tiene una historia luminosa finita. La expansión y el corrimiento al rojo reducen además el fondo acumulado, sobre todo en determinadas bandas, pero no constituyen por sí solos la explicación fundamental. La oscuridad es información sobre la historia cósmica.

Por qué importa esta pregunta

La paradoja de Olbers es valiosa porque convierte una ausencia en evidencia. La pregunta no es simplemente por qué las estrellas individuales parecen débiles. Es por qué la suma de toda la luz

cósmica es tan pequeña en el cielo visible. Responder obliga a separar distancia y tiempo, infinitud espacial e historia observable, absorción y destino de la energía, y oscuridad para la visión humana frente a la radiación que realmente existe. También ofrece una lección compacta sobre cómo funciona la ciencia: una idea física correcta puede formularse mucho antes de que existan la evidencia, el lenguaje y la comunidad capaces de reconocerla.

1. El problema escondido en la oscuridad

La pregunta

¿Por qué un cielo oscuro y cotidiano llegó a considerarse un problema? La dificultad solo aparece cuando combinamos tres supuestos: una población luminosa eterna, una distribución aproximadamente uniforme de fuentes y tiempo suficiente para que su radiación nos alcance desde distancias arbitrariamente grandes.

En longitudes de onda visibles, el cielo extragaláctico es extraordinariamente tenue comparado con una fotosfera estelar. Esta afirmación necesita una precisión inmediata: el cielo nocturno visto desde la Tierra no está vacío. El resplandor atmosférico, la luz zodiacal, la emisión galáctica difusa, estrellas y galaxias no resueltas y la iluminación artificial pueden contribuir. Medir el verdadero fondo óptico extragaláctico exige sustraer señales que a menudo son más intensas que la propia señal buscada. [1–3]

El problema clásico comienza con una idealización. Imaginemos un universo estático y euclídeo que hubiera existido desde siempre y contuviera una población estadísticamente uniforme de estrellas duraderas. Una estrella situada al doble de distancia aporta solo una cuarta parte del flujo, porque su luz se reparte sobre un área cuatro veces mayor. Pero una capa esférica fina situada al doble de distancia contiene aproximadamente cuatro veces más volumen y, si la densidad es uniforme, aproximadamente cuatro veces más estrellas. En este modelo simplificado de fuentes puntuales, ambos efectos se compensan: las capas más lejanas no dejan de contribuir al brillo total del cielo únicamente por estar más lejos. [4–6]

Las explicaciones populares a veces se detienen aquí y afirman que el brillo predicho es literalmente infinito. Esa no es la versión físicamente más adecuada del argumento. Las estrellas reales tienen discos opacos de tamaño finito y las más cercanas ocultan a otras más lejanas situadas en la misma línea de visión. Si el universo idealizado es suficientemente viejo, casi cualquier dirección acaba terminando sobre una superficie luminosa. Por tanto, el cielo tendería a saturarse hacia el brillo superficial de las fotosferas estelares, sin necesidad de invocar una intensidad matemáticamente infinita. [4,7]

Eso seguiría siendo catastrófico. La temperatura efectiva nominal del Sol es 5.772 K. Si todas las direcciones del cielo transportaran un campo de radiación fotosférico semejante al solar, la “noche” no sería simplemente una versión más luminosa de la que conocemos. La Tierra estaría inmersa en un entorno radiativo a temperatura estelar. La paradoja no es, por tanto, una pequeña discrepancia: es la diferencia entre el cielo óptico oscuro observado y algo físicamente más parecido a estar dentro de una estrella. [4,8]

En qué punto estamos

El problema clásico no es que cada estrella deba verse más brillante con la distancia; no ocurre. Es que suficientes estrellas duraderas, con suficiente tiempo, deberían cubrir el cielo con brillo superficial estelar. La oscuridad observada demuestra que al menos uno de los supuestos clásicos falla. ¿Cuál? Durante siglos se ensayaron respuestas diferentes, y esa secuencia resulta instructiva.

2. Un problema anterior a Olbers

El problema de la oscuridad del cielo nocturno no comenzó con Heinrich Wilhelm Olbers. Los historiadores encuentran versiones de la cuestión en discusiones de la Edad Moderna de Kepler, Halley y de Chéseaux, entre otros. El ensayo de Olbers de 1823, publicado en el Astronomisches Jahrbuch correspondiente a 1826, acabó dando el nombre convencional a una pregunta con una genealogía mucho más larga. [5,9,15,16]

Esa historia contiene un desvío extraordinario. En 1848, Edgar Allan Poe publicó Eureka, una obra en prosa que mezclaba cosmología, filosofía y especulación. En uno de sus pasajes consideró una sucesión interminable de estrellas y sostuvo que los huecos oscuros podían entenderse si el fondo estelar invisible estuviera tan lejos que su luz todavía no hubiera tenido tiempo de alcanzarnos. Cualitativamente, esa es la idea crucial de propagación finita que forma parte de la resolución temporal moderna. [10,11]

Poe no dedujo la cosmología relativista moderna, no midió la edad del universo ni proporcionó la solución astrofísica cuantitativa. Eureka no fue un artículo científico que estableciera el resultado. El interés es histórico y epistémico: una explicación físicamente relevante puede formularse antes de incorporarse al conocimiento científico aceptado. Las ideas no quedan establecidas simplemente porque alguien las haya escrito. Necesitan evidencia, estructura cuantitativa, conexión con otras observaciones y una comunidad capaz de ponerlas a prueba.

En qué punto estamos

"Paradoja de Olbers" es una etiqueta útil, no una historia fiable del descubrimiento. La cuestión se fue acumulando durante siglos, y Poe llegó a formular en 1848 la idea clave del tiempo finito de viaje de la luz sin resolver por ello la cosmología moderna. El siguiente paso es comprobar otra escapatoria históricamente tentadora: quizá la luz lejana simplemente sea absorbida antes de llegar hasta nosotros.

3. Por qué el polvo no puede ocultar la eternidad

La pregunta

¿Podría un universo eterno lleno de estrellas seguir siendo oscuro porque el polvo u otra materia absorbe la luz distante? La absorción modifica sin duda lo que llega a un telescopio. La cuestión más profunda es si puede eliminar permanentemente la energía radiativa que exige el modelo clásico.

El polvo es extraordinariamente importante en la astronomía real. Atenúa y enrojece la luz estelar visible y ultravioleta, y vuelve a emitir la energía absorbida a longitudes de onda infrarrojas más largas. Precisamente por eso no puede constituir la solución fundamental de equilibrio a la paradoja. Un grano que absorbe radiación continuamente se calienta hasta que, en promedio, emite energía al mismo ritmo al que la recibe. La absorción puede redistribuir el espectro; no puede hacer desaparecer la energía. [6]

Esta es la forma termodinámica del mismo argumento de la primera sección. En un equilibrio eterno con fuentes luminosas duraderas, el campo de radiación y la materia absorbente no pueden permanecer indefinidamente fríos mientras se inyecta energía sin cesar. Si las líneas de visión terminan finalmente sobre superficies estelares y la luz absorbida se vuelve a emitir, el sistema tiende hacia un equilibrio radiativo brillante, no hacia un vacío óptico permanentemente negro. [4,6]

En qué punto estamos

El polvo puede desplazar la energía cósmica de unas longitudes de onda a otras, pero no borrar un suministro eterno de luz estelar en equilibrio. El problema de la oscuridad no se resuelve escondiendo fotones. Algo debe impedir que el campo de radiación alcance el estado brillante clásico, y el ingrediente que falta es cuánto tiempo han estado brillando realmente las estrellas.

4. El ingrediente que faltaba es el tiempo

La pregunta

¿Cuánto tiempo tendría que brillar una población de estrellas aparentemente eterna para que el cielo se aproximara al brillo fotosférico? La respuesta supera tanto la historia cósmica que transforma un argumento cualitativo en uno numérico.

En su análisis de 1965, Edward Harrison estimó para las condiciones actuales de materia luminosa una escala característica de colisión de fotones o de equilibración del orden de 10^23 años: aproximadamente el tiempo necesario, dentro del modelo clásico, para que la radiación se acumule hasta acercarse al nivel medio de las superficies estelares. En orden de magnitud, es unas 10^13 veces la edad actual del universo. Las estrellas simplemente no han estado brillando ni remotamente durante tanto tiempo. [4]

La cosmología moderna refuerza esta idea en lugar de sustituirla. En la inferencia estándar ΛCDM, el universo tiene unos 13.800 millones de años, y las estrellas no se encendieron todas al principio. La tasa cósmica de formación estelar aumentó desde el universo temprano, alcanzó un máximo amplio varios miles de millones de años después del comienzo caliente y posteriormente disminuyó. El universo luminoso tiene una historia. Su emisividad no es eterna ni constante. [12,13]

Esta distinción evita además otro error frecuente: un cielo nocturno oscuro no demuestra que el propio espacio sea finito. Un universo puede ser espacialmente infinito y, aun así, ofrecernos un cono de luz pasado finito y una duración finita de las fuentes luminosas. Para el problema clásico del brillo no importa que exista un muro en el borde del espacio, sino cuánta historia luminosa puede contribuir a la radiación que recibimos ahora. [1,4,6]

La expansión también importa, pero no debe convertirse en una solución mágica de una sola frase. En los modelos revisados por Overduin y Wesson, la expansión cósmica reduce el fondo extragaláctico bolométrico hasta aproximadamente 0,6 del valor correspondiente en un modelo estático. En la banda óptica B, el corrimiento al rojo puede reducir la intensidad aproximadamente entre dos y tres veces. Estas cifras responden a preguntas diferentes: la primera indica que el efecto sobre la energía total es moderado; la segunda muestra que la redistribución entre

longitudes de onda puede ser mucho mayor en una banda visible concreta. Ninguna hace prescindible la historia luminosa finita. [6]

En qué punto estamos

La diferencia de escalas es enorme: el tiempo clásico de equilibrio es del orden de 10^23 años, mientras que la historia cósmica solo abarca unos 13.800 millones de años y la población estelar ha evolucionado dentro de ella. La expansión modifica y atenúa todavía más el fondo, especialmente en determinadas bandas, pero el cielo oscuro registra un tiempo luminoso finito, no un borde espacial. Esto abre otra pregunta: ¿está realmente oscuro el cielo, o solo lo está para nosotros?

5. El cielo solo es oscuro para nuestros ojos

La visión humana solo detecta una estrecha ventana del espectro electromagnético. En microondas, el cielo está lleno por el fondo cósmico de microondas, un cuerpo negro casi perfecto con una temperatura actual cercana a 2,725 K. En ultravioleta, visible e infrarrojo también existe un fondo extragaláctico construido a partir de la historia integrada de estrellas, galaxias y agujeros negros en acreción. [1,2,14]

El fondo cósmico de microondas ofrece además una respuesta inesperadamente profunda al viejo problema. En microondas, casi toda línea de visión alcanza la superficie cósmica de última dispersión (last-scattering surface): los fotones se desacoplaron cuando el universo se hizo transparente, unos 380.000 años después del comienzo de la fase caliente del universo, a una temperatura característica próxima a 3.000 K. La expansión cósmica estiró esa radiación hasta que hoy observamos un cuerpo negro casi perfecto de unos 2,725 K. No es el cielo de fotosferas estelares del modelo clásico, pero constituye un paralelo notable: el cielo sí está lleno en todas las direcciones, solo que a longitudes de onda y temperaturas que nuestros ojos no pueden detectar. [2,17]

Por tanto, decir que “el cielo está oscuro” es una afirmación sobre el brillo superficial óptico en relación con la visión humana, no sobre la ausencia de radiación. Los instrumentos cambian la pregunta. Un detector de microondas ve un cielo que nuestros ojos no pueden percibir. Un experimento óptico o infrarrojo suficientemente sensible detecta luz extragaláctica difusa escondida bajo los primeros planos. La oscuridad es en parte una propiedad del universo y en parte una propiedad del sensor con el que lo observamos.

Esto convierte la propia medición en una lección epistémica. La señal óptica extragaláctica es tan débil que el resplandor atmosférico terrestre, la luz zodiacal y la emisión galáctica difusa pueden dominarla. Las mediciones absolutas históricas han requerido correcciones importantes de esos primeros planos, y algunos resultados publicados fueron revisados después. La dificultad no es una molestia externa a la ciencia: comprender los primeros planos forma parte de lo que hace posible la inferencia. [1–3]

En qué punto estamos

La noche visible es oscura, pero el cielo electromagnético no está vacío: en microondas casi toda línea de visión alcanza la superficie de última dispersión, cuya radiación de unos 3.000 K ha sido desplazada hasta aproximadamente 2,725 K hoy. Los instrumentos convierten así la aparente “oscuridad” en un espectro medible, y la pregunta final pasa a ser qué nos dicen esos fondos presentes y ausentes sobre la historia cósmica.

6. La oscuridad como evidencia

Una historia cosmológica satisfactoria debe explicar algo más que la existencia de estrellas y galaxias. También debe explicar la radiación integrada que dejan tras de sí: su intensidad, su espectro y cómo ambos cambian con la longitud de onda. En ese sentido, el brillo del cielo nocturno es un observable cosmológico. La oscuridad no es ausencia de datos. Es un dato. [1,4,6]

Por eso el problema de Olbers sigue siendo útil después de resolver su paradoja elemental. La respuesta conecta geometría, duración de las fuentes, evolución estelar, expansión, corrimiento al rojo, polvo, primeros planos y medición. Enseña una lección más general que reaparecerá en toda esta serie: lo que falta en una observación puede limitar la realidad con tanta fuerza como lo que sí aparece.

La misma lección prepara además QTC-003. El ojo llama oscuro al cielo igual que el tacto llama sólida a la materia. En ambos casos, la descripción cotidiana es útil y real a escala humana, pero una explicación asistida por instrumentos revela debajo una estructura física mucho más rica. La comprensión científica empieza a menudo preguntándose qué dejan fuera nuestros sentidos sin ayuda.

En qué punto estamos

> *El cielo óptico oscuro es evidencia positiva de un universo con una historia luminosa finita y en evolución. Resolver el problema exigió separar distancia, tiempo, absorción, expansión y percepción, y medir fondos que nuestros ojos no pueden ver. QTC-003 aplicará la misma estrategia a la propia materia: ¿qué significa "sólido" cuando miramos por debajo de la escala del tacto?*

Lo que sabemos y cómo lo sabemos

Un universo estático y eterno lleno de estrellas duraderas no produciría el cielo óptico oscuro que observamos. Los argumentos clásicos de capas, refinados para incluir discos estelares finitos y ocultación, llevan hacia el brillo superficial estelar y no hacia un cielo permanentemente negro. Harrison y Bonnor proporcionan formulaciones cuantitativas de ese resultado. [4,7]

La resolución dominante es una historia luminosa finita. La escala clásica de equilibración de Harrison es del orden de 10^23 años, mientras que la cosmología moderna sitúa la edad cósmica cerca de 13.800 millones de años y las observaciones muestran una historia evolutiva de la formación estelar. [4,12,13]

La expansión y el corrimiento al rojo reducen y redistribuyen adicionalmente el fondo. Su efecto depende de la longitud de onda y del modelo: los cálculos representativos hacen moderada la reducción bolométrica, mientras que la supresión en bandas visibles puede ser mayor. [6]

El cielo no está libre de radiación. En microondas, el fondo cósmico llena el cielo desde la superficie de última dispersión, desplazado desde aproximadamente 3.000 K hasta unos 2,725 K hoy; a longitudes de onda más cortas, las mediciones del fondo extragaláctico revelan una luz difusa mucho más tenue detrás de intensos primeros planos. [1,2,14,17]

Lo que todavía no sabemos

- El valor absoluto exacto del fondo extragaláctico óptico y del infrarrojo cercano sigue siendo difícil de medir porque los primeros planos zodiacales y galácticos son intensos y las incertidumbres sistemáticas importan.
- Las historias detalladas de formación estelar y acreción cósmica continúan refinándose a medida que sondeos más profundos y nuevas coberturas espectrales mejoran el censo de fuentes.
- La geometría espacial global y la topología del universo están restringidas por las observaciones, pero son cuestiones lógicamente distintas de la historia luminosa finita que resuelve el problema clásico del cielo nocturno.

¿Qué podría hacernos cambiar de opinión?

- Un modelo luminoso estacionario y eterno creíble que reprodujera el fondo multibanda medido sin una historia finita de las fuentes obligaría a abandonar la síntesis central.
- Una medición radicalmente diferente del fondo difuso óptico/infrarrojo, con una sustracción de primeros planos controlada de manera independiente, podría modificar el balance cuantitativo entre historia de las fuentes, polvo y corrimiento cosmológico al rojo.
- Una evidencia de que la materia absorbente ordinaria puede eliminar de forma permanente energía radiativa sin reemitirla exigiría una revisión importante del argumento termodinámico utilizado aquí.

Si solo recuerdas una cosa

El cielo nocturno es oscuro no porque desaparezca la luz lejana, sino porque el universo no ha contenido estrellas brillando durante el tiempo remotamente suficiente para llenarlo de luz estelar.

Artículos relacionados

- QTC-001 — Todo lo que ves pertenece al pasado
- QTC-003 — ¿Por qué las cosas sólidas son sólidas?
- QTC-011 — La luz más antigua que podemos ver

Referencias

[1] Cooray, A. Extragalactic background light measurements and applications. Royal Society Open Science 3, 150555 (2016). DOI 10.1098/rsos.150555. https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC4821256/

[2] Fixsen, D. J. The Temperature of the Cosmic Microwave Background. Astrophysical Journal 707, 916–920 (2009). DOI 10.1088/0004-637X/707/2/916. https://doi.org/10.1088/0004-637X/707/2/916

[3] Bernstein, R. A.; Freedman, W. L.; Madore, B. F. The First Detections of the Extragalactic Background Light at 3000, 5500, and 8000 Å. I. Results. Astrophysical Journal 571, 56–84 (2002), with corrections in ApJ 632, 713–717 (2005). DOI 10.1086/339422; 10.1086/444488.

[4] Harrison, E. R. Olbers' Paradox and the Background Radiation Density in an Isotropic Homogeneous Universe. MNRAS 131(1), 1–12 (1965). DOI 10.1093/mnras/131.1.1. https://academic.oup.com/mnras/article/131/1/1/2604166

[5] Ryden, B. Introduction to Cosmology, 2nd ed. Cambridge University Press (2017), Ch. 2, §2.1 “The Night Sky is Dark”.

[6] Overduin, J. M.; Wesson, P. S. Dark Matter and Background Light. Physics Reports 402, 267–406 (2004). DOI 10.1016/j.physrep.2004.07.006. https://ned.ipac.caltech.edu/level5/March06/Overduin/Overduin_contents.html

[7] Bonnor, W. B. On Olbers’ Paradox. MNRAS 128(1), 33–47 (1964). DOI 10.1093/mnras/128.1.33. https://academic.oup.com/mnras/article/128/1/33/2601427

[8] International Astronomical Union. IAU 2015 Resolution B3: Recommended Nominal Conversion Constants for Selected Solar and Planetary Properties. Nominal solar effective temperature 5772 K. https://www.iau.org/static/resolutions/IAU2015_English.pdf

[9] Harrison, E. R. The Dark Night-Sky Riddle, “Olbers’s Paradox”. IAU Symposium 139, 3–17 (1990). DOI 10.1017/S0074180900240369.

[10] Harrison, E. R. The dark night-sky riddle: a “paradox” that resisted solution. Science 226(4677), 941–945 (1984). DOI 10.1126/science.226.4677.941. https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/17737335/

[11] Poe, E. A. Eureka: A Prose Poem (1848), passage on an endless succession of stars and light not yet reaching the observer. https://www.eapoe.org/works/harrison/jah16m25.htm

[12] Planck Collaboration. Planck 2018 results. VI. Cosmological parameters. Astronomy & Astrophysics 641, A6 (2020). DOI 10.1051/0004-6361/201833910.

[13] Madau, P.; Dickinson, M. Cosmic Star-Formation History. Annual Review of Astronomy and Astrophysics 52, 415–486 (2014). DOI 10.1146/annurev-astro-081811-125615.

[14] Bernstein, R. A.; Freedman, W. L.; Madore, B. F. Corrections of Errors in “The First Detections of the Extragalactic Background Light…” I, II, and III. Astrophysical Journal 632, 713–717 (2005). DOI 10.1086/444488.

[15] Hoskin, M. Gravity and Light in the Newtonian Universe of Stars. Journal for the History of Astronomy 39 (2008). DOI 10.1177/002182860803900206.

[16] Olbers, H. W. M. Ueber die Durchsichtigkeit des Weltraums. Astronomisches Jahrbuch für das Jahr 1826, 110–121; contexto histórico de publicación: 1823.

[17] European Space Agency (ESA), Planck. “Planck and the cosmic microwave background.” Recombination/last scattering at about 380,000 years and ~3,000 K; CMB redshifted to ~2.7 K today. https://www.esa.int/Science_Exploration/Space_Science/Planck/Planck_and_the_cosmic_microwave_background

¿Por qué las cosas sólidas son sólidas?

QTC-003 · De los quarks a la conciencia

El universo, la vida y cómo llegamos a saberlo

Autor: Juan Segurola

Versión: v1.0 ES · 29 de agosto de 2026

DOI: 10.5281/zenodo.22714650 · Zenodo record: 22714650

Perfil epistémico: Establecido

Licencia: All Rights Reserved

Resumen del artículo

Un objeto sólido parece poseer una frontera dura, pero la materia microscópica no contiene una cáscara perfectamente rígida en la que los átomos simplemente choquen. La solidez ordinaria emerge de las interacciones electromagnéticas, de la energía cinética cuántica, del principio de exclusión de Pauli y de la estructura colectiva de cantidades enormes de átomos. El núcleo ocupa solo una fracción minúscula de la escala de un átomo, pero llamar «espacio vacío» al resto puede inducir a error porque el tamaño atómico corresponde a la extensión espacial de su estado cuántico electrónico. Este artículo separa la estabilidad de un átomo de la estabilidad de la materia macroscópica, muestra por qué la exclusión de Pauli no es una fuerza nueva, conecta la energía cinética fermiónica con las enanas blancas y explica cómo las energías microscópicas de interacción se convierten en la fuerza normal, la elasticidad y la rigidez frente al cizallamiento que experimentamos como solidez.

En 60 segundos

Cuando presionas con la mano una mesa, los núcleos atómicos no se encuentran como bolas de billar. Los estados electrónicos de tu mano y de la mesa empiezan a solaparse, y comprimir más el sistema resulta energéticamente costoso. El electromagnetismo aporta atracciones y repulsiones, mientras que la mecánica cuántica determina qué estados electrónicos están permitidos. En un átomo, localizar demasiado un electrón eleva su energía cinética y evita el colapso clásico sobre el núcleo. En la materia macroscópica, la antisimetría fermiónica y la exclusión de Pauli son cruciales: los electrones no pueden acumularse todos en el mismo estado de mínima energía, de modo que la compresión obliga a ocupar un conjunto más amplio de estados de momento y eleva la escala de energía cinética. No existe por ello una «fuerza de Pauli» separada. La misma estadística cuántica tiene consecuencias visibles en las enanas blancas, cuya relación masa-radio observada concuerda con modelos sustentados por degeneración electrónica. A escala humana, incontables interacciones microscópicas y deformaciones diminutas se suman hasta producir fuerza normal, elasticidad y resistencia al cizallamiento. La solidez es, por tanto, un estado colectivo de la materia, no un ingrediente escondido en cada átomo.

Por qué importa esta pregunta

La solidez es tan familiar que oculta varias preguntas distintas. ¿Por qué no colapsa un átomo? ¿Por qué un kilogramo de átomos ocupa un volumen aproximadamente proporcional en vez de caer hacia un estado cada vez más pequeño? ¿Por qué una mesa empuja de vuelta a tu mano y por qué conserva

su forma en lugar de fluir? Estas preguntas están relacionadas, pero no son idénticas. Separarlas evita tres ideas erróneas persistentes: que los átomos son cáscaras duras alrededor de espacio vacío, que la repulsión electrón-electrón explica por sí sola el contacto y que la exclusión de Pauli es una fuerza fundamental adicional.

1. ¿Qué significa tocar?

La pregunta

Si los átomos de tu mano y de una mesa no son pequeñas bolas duras, ¿qué produce la sensación de una superficie impenetrable? La respuesta debe conectar una descripción cuántica de los electrones con la fuerza normal macroscópica que detiene tu mano.

El contacto se siente local y brusco. Presiona un dedo contra una mesa y la mesa empuja de vuelta. Esa experiencia invita a imaginar dos conjuntos de partículas sólidas diminutas chocando en una frontera nítida. La física moderna ofrece otra imagen. La materia ordinaria está formada por núcleos cargados y electrones cuyos estados se extienden por el espacio. Cuando acercamos dos cuerpos, sus estructuras electrónicas interactúan mucho antes de que los núcleos se aproximen siquiera remotamente al contacto nuclear. La resistencia a seguir acercándolos es una respuesta cuántica y electromagnética de muchos cuerpos, no una capa oculta de dureza microscópica.[1,7,8]

La electrostática importa, pero decir «los electrones se repelen» no basta. La atracción entre electrones y núcleos, la repulsión entre cargas del mismo signo, los cambios de enlace, la simetría de intercambio y el coste de energía cinética de reorganizar los electrones contribuyen todos a la energía total del sistema combinado. Mecánicamente importa la rapidez con que esa energía aumenta cuando se comprimen los materiales. Una fuerza normal macroscópica es la derivada colectiva de un enorme paisaje energético microscópico, transmitida mediante ligeras deformaciones de ambos objetos.[7,8]

La separación de escalas es extrema. Las dimensiones atómicas son del orden de 10^-10 m, mientras que las dimensiones nucleares se miden en femtómetros, alrededor de 10^-15 m. Una comparación escolar sencilla da por tanto una razón lineal próxima a 100.000 a uno. Si elevamos esa razón al cubo, el núcleo ocupa solo alrededor de 10^-15 del volumen atómico correspondiente. Ese número es únicamente una caricatura de escala: los radios nucleares reales varían con el número másico y el «radio» atómico tiene varias definiciones operativas. Pero el punto central permanece. El contacto cotidiano ocurre cuando los núcleos todavía están separados por distancias enormemente mayores que sus dimensiones.[5,6]

En qué punto estamos

El contacto ordinario no es un impacto nuclear ni la colisión de cáscaras atómicas perfectamente duras. Es un aumento colectivo de la energía de interacción cuando se comprimen las estructuras electrónicas y los materiales se deforman. Para entender por qué esa respuesta se vuelve tan pronunciada, necesitamos primero una imagen mejor de qué significa realmente el «tamaño» aparente de un átomo.

2. Un átomo no es un pequeño sistema solar

La pregunta

Si el núcleo es tan pequeño, ¿es el resto del átomo simplemente espacio vacío? La comparación de escalas es real, pero la palabra cotidiana «vacío» puede introducir de contrabando una imagen clásica que la mecánica cuántica no contiene.

El átomo planetario es una de las imágenes equivocadas más exitosas de la divulgación científica. Coloca un núcleo compacto en el centro y electrones en trayectorias ordenadas a su alrededor. Esa imagen tuvo utilidad histórica, pero no es la descripción moderna. Un orbital atómico no es una órbita. Es un estado cuántico cuya función de onda determina una distribución espacial de probabilidad para el electrón. En el hidrógeno, por ejemplo, la densidad de probabilidad se extiende por una región fijada por el estado cuántico de escala de Bohr; no existe una cáscara con borde nítido ni una trayectoria clásica que circule alrededor del núcleo.[5]

Por eso la frase «los átomos son en su mayor parte espacio vacío» exige cuidado. Comunica un hecho real de escala: el núcleo ocupa una fracción minúscula de la extensión geométrica del átomo. Pero si «vacío» nos hace imaginar una diminuta bolita dentro de un recipiente hueco, resulta engañoso. La región que da a un átomo su tamaño químico es precisamente aquella en la que existe su estado cuántico electrónico. El electrón no está ausente de esa región hasta el instante en que «pasa» por ella; la distribución espacial forma parte del propio estado.[5]

Nada de esto significa tampoco que el átomo sea una bolita uniformemente llena. La densidad de probabilidad cuántica puede ser muy baja en regiones extensas, los orbitales tienen nodos y distintas definiciones operativas producen radios atómicos diferentes. La corrección útil, por tanto, no es «los átomos están llenos». Es que categorías clásicas como cáscara sólida, recipiente vacío y bolita en órbita son una ontología inadecuada para el estado electrónico. La razón de escalas medida sigue siendo cierta; la imagen mental construida a partir de ella necesita matices.

En qué punto estamos

El núcleo es realmente diminuto comparado con la extensión espacial de un átomo, pero un átomo no es una cáscara clásica hueca. Su tamaño procede de un estado cuántico electrónico extendido. Eso desplaza la siguiente pregunta: si los electrones son atraídos por los núcleos, ¿qué impide que colapsen tanto un átomo individual como un gran trozo de materia?

3. Por qué no colapsa la materia

La pregunta

La estabilidad atómica y la estabilidad de la materia macroscópica parecen el mismo problema, pero no lo son. Una pregunta por qué un electrón permanece en un estado atómico finito; la otra, por qué añadir cada vez más partículas no hace que la energía y el volumen colapsen de manera catastrófica. ¿Qué las conecta?

Para un átomo aislado, la electrostática clásica no basta. Un electrón atraído por un núcleo positivo no sería estable en la antigua imagen de partícula en órbita. En mecánica cuántica no relativista, localizar más estrechamente la función de onda del electrón eleva su coste de energía cinética, mientras que la atracción de Coulomb favorece separaciones menores. La competencia produce un estado ligado de energía finita en vez de un colapso. Decir que «el principio de incertidumbre empuja hacia fuera» es tentador pero impreciso: no ha aparecido ninguna nueva fuerza hacia

fuera. La estabilidad surge de la relación cuántica entre localización, momento, energía cinética y energía potencial.[1]

La materia macroscópica añade un ingrediente nuevo. Los electrones son fermiones idénticos. Su estado de muchas partículas es antisimétrico bajo intercambio, que es la formulación moderna que subyace a la exclusión de Pauli. No pueden ocupar todos el mismo estado de una partícula. En una imagen simplificada útil, comprimir muchos electrones en una región menor obliga por ello a llenar un conjunto más amplio de estados de momento. Un momento típico mayor significa mayor energía cinética. Este coste cinético del hacinamiento es el puente entre la localización atómica y la estabilidad fermiónica de la materia.[1,3,4]

Eso no convierte la exclusión de Pauli en una quinta fuerza. Expresiones como «repulsión de Pauli» o «fuerza de intercambio» son abreviaturas de cómo cambian los estados cuánticos permitidos y sus energías cuando se solapan funciones de onda fermiónicas. Las interacciones de Coulomb, el enlace, la correlación y la energía cinética cuántica siguen formando parte del mismo hamiltoniano. La matemática rigurosa hace la distinción especialmente nítida: los átomos ordinarios pueden ser estables sin invocar el problema de saturación de muchos fermiones, pero la estabilidad extensiva de la materia macroscópica sí requiere la restricción fermiónica.[1-3]

El contrafactual hace cuantitativa la palabra «esencial». En 1967 Freeman Dyson estudió materia cargada sin principio de exclusión. En ese modelo bosónico, la energía del estado fundamental puede hacerse negativa más deprisa que linealmente con el número de partículas, en la escala $-N^{(7/5)}$, de modo que duplicar la cantidad de materia puede aumentar en más del doble la magnitud de su energía de ligadura. Dyson estableció la inestabilidad asociada a la escala $N^{(7/5)}$; un teorema posterior de Conlon, Lieb y Yau demostró que 7/5 es el exponente asintótico correcto.[15,16] Esa materia no tendría estabilidad de segundo tipo (stability of the second kind). La materia fermiónica ordinaria no se comporta así.

Aquí aparece una brecha histórica instructiva. La mecánica cuántica describía con éxito los átomos en la década de 1920, pero la primera demostración rigurosa de que grandes sistemas de Coulomb poseen el tipo necesario de estabilidad macroscópica no llegó hasta Dyson y Lenard en 1967. Lieb y Thirring encontraron en 1975 una vía mucho más corta basada en una cota inferior para la energía cinética fermiónica.[2,3] Podíamos observar materia estable cada día mucho antes de que los matemáticos hubieran demostrado a partir de las ecuaciones que la teoría de muchos cuerpos no podía llevar su energía hacia abajo de manera catastrófica. Observar, calcular y demostrar son formas distintas de saber.

El principio de Pauli tiene además un laboratorio astronómico. Una enana blanca es el remanente compacto de una estrella en el que la degeneración electrónica aporta gran parte del soporte frente a la gravedad. Al aumentar la densidad, se llenan los estados electrónicos disponibles de menor momento y aumenta el momento característico de los electrones. El resultado predice una relación masa-radio peculiar: las enanas blancas más masivas son más pequeñas. Las medidas precisas de enanas blancas en sistemas eclipsantes concuerdan bien con la relación teórica en un amplio intervalo de masas.[10] La degeneración relativista de los electrones produce además una escala superior de masa. El cálculo idealizado de Chandrasekhar de 1931 estableció la existencia de ese límite y, con el parámetro de composición $\mu = 2{,}5$ adoptado entonces, obtuvo alrededor de 0,91 masas solares.[11] Los tratamientos modernos de estructura estelar para composiciones típicas de enanas blancas dan la conocida 4] La presión de degeneración

no es presión producida por una fuerza nueva; es una consecuencia macroscópica del conteo de estados fermiónicos y de la energía cinética.

En qué punto estamos

> *La energía cinética cuántica evita el colapso atómico simple, y la antisimetría fermiónica añade el coste de ocupar estados necesario para estabilizar la materia macroscópica. Las enanas blancas muestran que no se trata solo de matemática formal: la degeneración tiene consecuencias macroscópicas medibles. Queda el paso mecánico: ¿cómo se convierten esos costes energéticos cuánticos en el empuje ordinario de una mesa?*

4. La pared que no es una pared

Un puente útil entre la mecánica cuántica microscópica y la mecánica cotidiana es la curva de energía potencial. A grandes separaciones, dos átomos o moléculas pueden interactuar débilmente. A separaciones intermedias, la atracción puede reducir la energía y producir un enlace o una interacción cohesiva. Si los acercamos demasiado, la energía total aumenta con gran rapidez. La curva detallada depende del material, y fórmulas sencillas como el potencial de Lennard-Jones son modelos, no leyes universales, pero la estructura cualitativa está muy extendida.[7,8]

La fuerza está relacionada con la rapidez con que cambia la energía potencial con la separación. Cerca de una distancia de equilibrio, un pequeño desplazamiento produce a menudo una respuesta restauradora aproximadamente lineal; por eso, para movimientos pequeños, un enlace interatómico puede comportarse en cierta medida como un muelle. Comprime una superficie sólida y enormes cantidades de átomos se desplazan distancias diminutas. Su respuesta restauradora combinada se propaga por el material y se convierte en la fuerza normal que mide una balanza, un sensor de fuerza o tu mano.[7,8]

El contacto real es más complicado que dos planos atómicamente lisos que se encuentran en todas partes a la vez. Las superficies son rugosas en muchas escalas, por lo que el área real de contacto se concentra en asperezas microscópicas. Pueden importar la adhesión, los defectos, la plasticidad y la fricción.[8,9] Ninguna de esas complicaciones restaura una frontera dura oculta. El punto clave es una respuesta continua: cuando las estructuras electrónicas y las posiciones atómicas son forzadas fuera de configuraciones favorables, aumenta el coste energético y los materiales se deforman hasta alcanzar el equilibrio macroscópico de fuerzas.

Esto aclara también qué significa y qué no significa «no tocar». Sería absurdo decir que tu mano nunca toca la mesa simplemente porque los núcleos permanecen muy separados. «Tocar» es una relación macroscópica definida por una interacción mecánica sostenida, del mismo modo que presión o temperatura pueden ser conceptos significativos sin ser propiedades de una sola partícula. La corrección es más estrecha: el contacto ordinario no debe imaginarse como núcleos o cáscaras atómicas indivisibles chocando a separación cero. La palabra cotidiana sigue siendo útil cuando entendemos su mecanismo microscópico.[7-9]

En qué punto estamos

> *Una mesa no posee una pared microscópica infinitamente dura. Posee un paisaje de energía de interacción tan pronunciado que desplazamientos atómicos diminutos generan una gran fuerza restauradora colectiva. Esto explica por qué la materia resiste la interpenetración, pero todavía no*

por qué un sólido conserva una forma persistente. Para eso debemos preguntar cómo responde la materia al cizallamiento, no solo a la compresión.

5. Por qué un sólido conserva su forma

Un gas puede resistir la compresión. Un líquido puede resistir una deformación muy rápida. Ninguno de esos hechos basta para definir la solidez. La distinción mecánica más útil se refiere al cizallamiento y a la escala temporal. Un sólido convencional puede sostener una tensión de cizallamiento estática con una deformación finita: desplaza un poco lateralmente la parte superior de un bloque y, por debajo de su límite elástico, puede asentarse en una forma deformada mientras sigue soportando la tensión. Un fluido ordinario en equilibrio, en cambio, continúa deformándose bajo un cizallamiento sostenido y acaba fluyendo.[9]

Los sólidos, por tanto, no son perfectamente rígidos. Bajo una tensión pequeña, los átomos se desplazan ligeramente de sus posiciones de equilibrio y el material almacena energía elástica. Al retirar la carga, gran parte de esa deformación puede revertirse. Si aumentamos la tensión aparecen otros comportamientos: deformación plástica, movimiento de dislocaciones, formación de grietas, fractura o cambio de fase. «Sólido» no significa «inmutable». Identifica un tipo de respuesta mecánica colectiva dentro de un intervalo determinado de condiciones.[8]

Los distintos sólidos se sienten distintos porque difieren sus enlaces y su estructura. Los cristales iónicos, las redes covalentes, los metales, los cristales moleculares y los materiales amorfos no comparten una única «fuerza de los sólidos» microscópica. La intensidad de los enlaces, la coordinación, los defectos, la microestructura y la estructura electrónica determinan la rigidez, la resistencia, la dureza, la expansión térmica y muchas otras propiedades. Incluso rigidez y resistencia son conceptos diferentes: un material puede ser difícil de deformar elásticamente y, sin embargo, fallar a una deformación relativamente modesta, o ser flexible y excepcionalmente tenaz.[8]

El vidrio es un caso frontera útil porque pone de manifiesto el papel de la escala temporal. Es un sólido amorfo fuera del equilibrio cuya relajación puede ser extraordinariamente lenta; cerca de la transición vítrea, las descripciones de tipo sólido o líquido dependen fuertemente del tiempo de observación.[13] Esa sutileza es real, pero no rescata el conocido mito de las vidrieras de las catedrales. El mayor espesor cerca de la parte inferior de algunos vidrios antiguos refleja los métodos históricos de fabricación, no siglos de flujo gravitatorio visible a temperatura ambiente.[12]

En qué punto estamos

La solidez no es rigidez perfecta. Es una respuesta colectiva en la que un material puede soportar cizallamiento y almacenar energía elástica durante la escala temporal relevante, con casos frontera importantes como el vidrio. Esto hace inevitable una última idea: la solidez pertenece al estado organizado de muchas partículas, no a ningún átomo aislado.

6. La solidez es un estado, no un ingrediente

Un átomo aislado de silicio no es «silicio sólido». Una sola molécula de agua no es agua líquida, hielo ni vapor. Esas palabras describen estados y comportamientos colectivos que emergen cuando muchas partículas interactúan bajo determinadas condiciones. Cambia la temperatura, la presión,

la estructura cristalina, la composición o la escala temporal y los mismos ingredientes químicos pueden mostrar mecánicas radicalmente distintas. La solidez es, por tanto, una propiedad emergente de la organización, no una sustancia en miniatura transportada dentro de cada átomo.[8,13]

Esto también fija el límite de la explicación. La interacción nuclear fuerte liga protones y neutrones dentro de los núcleos, pero su alcance característico es de femtómetros. Las separaciones interatómicas ordinarias son del orden de ångströms, unas 100.000 veces mayores. La rigidez cotidiana es, por consiguiente, un problema de materia condensada dominado por interacciones electromagnéticas y estructura electrónica cuántica, no por núcleos empujándose entre sí mediante la fuerza fuerte.[4,6]

La frase «la materia se siente sólida porque los átomos no pueden solaparse» puede resultar útil si se despliega lo que significa. Lo que no puede hacerse a bajo coste energético es forzar el estado cuántico completo de muchos electrones de dos piezas de materia ordinaria hacia configuraciones que violen la estructura permitida de estados fermiónicos o eleven fuertemente las energías electromagnética y cinética. A escala humana, ese paisaje energético microscópico se convierte en una superficie que parece dura, una viga que se curva, un cristal que resuena o un vidrio que se fractura.

QTC-003 termina así donde empieza QTC-004. Hemos dado por supuestos los átomos como constituyentes y hemos preguntado por qué grandes colecciones de ellos pueden formar materia estable y rígida. La siguiente pregunta retrocede en la historia cósmica: ¿de dónde proceden esos átomos? Hidrógeno, carbono, oxígeno, silicio y hierro no aparecieron todos en el mismo lugar ni al mismo tiempo.

En qué punto estamos

> *La solidez es un estado colectivo cuántico y electromagnético, no un ingrediente oculto dentro de los átomos. Su rigidez cotidiana procede de los estados electrónicos permitidos, las energías de interacción y la estructura, mientras que las fuerzas nucleares actúan a una escala muchísimo menor. Con la estabilidad de la materia establecida, QTC-004 puede preguntar dónde se formaron sus átomos.*

Lo que sabemos, y cómo

Los átomos individuales son estables porque la localización cuántica conlleva un coste de energía cinética que equilibra la atracción de Coulomb en los estados ligados. La estabilidad macroscópica es un problema distinto de muchos fermiones: la exclusión de Pauli y la antisimetría impiden que todos los electrones ocupen el mismo estado de mínima energía, produciendo un coste cinético del hacinamiento esencial para una materia estable y extensiva. El contrafactual de materia bosónica cargada muestra cuantitativamente la alternativa: sin exclusión, la energía puede escalar como −N^(7/5) en vez de linealmente con el número de partículas.[1-4,15,16]

Las enanas blancas proporcionan una manifestación macroscópica observable de la misma estadística fermiónica. Su relación masa-radio medida concuerda bien con modelos estelares basados en degeneración. El cálculo de Chandrasekhar de 1931 estableció una escala superior de masa, pero dio 0,91 M☉ bajo sus supuestos históricos; los tratamientos modernos dan la conocida escala de ≈1,4 M☉ para una composición típica.[10,11,14]

La fuerza normal del contacto ordinario emerge de energías de interacción microscópicas que aumentan con gran rapidez y de la diminuta deformación elástica de cantidades enormes de átomos. Los sólidos se distinguen después de los fluidos ordinarios por su respuesta al cizallamiento a largo plazo; en materiales reales, especialmente vidrios y sistemas viscoelásticos, es necesario hacer explícita la escala temporal.[7-9,13]

Lo que todavía no sabemos

- Una predicción completa desde primeros principios de la fricción, el desgaste y el contacto real entre superficies rugosas en todas las escalas sigue siendo mucho más difícil que explicar por qué la materia macroscópica resiste la interpenetración.
- La transición vítrea y la relación entre relajaciones extremadamente lentas y solidez siguen siendo áreas activas de investigación en materia condensada; las etiquetas simples «sólido» y «líquido» pueden ocultar una dependencia importante con la escala temporal.
- En materiales fuertemente correlacionados, a altas presiones y en fases cuánticas inusuales, el equilibrio entre estructura electrónica, correlación y respuesta de la red puede ser mucho más rico que la imagen introductoria utilizada aquí.

Qué podría hacernos cambiar de opinión

- Una violación reproducible de la simetría de intercambio fermiónica o la observación de estados electrónicos estables prohibidos por Pauli obligaría a revisar de manera fundamental la explicación de la estabilidad macroscópica.
- Una teoría satisfactoria de la materia ordinaria estable que reprodujera la estabilidad extensiva eliminando las restricciones de energía cinética cuántica y de ocupación fermiónica de estados refutaría el mecanismo central descrito aquí.
- La evidencia de que la rigidez del contacto macroscópico ordinario está dominada por interacciones nucleares de alcance femtométrico, en vez de por estructura electrónica a escala de ångströms, exigiría un cambio radical de la jerarquía de escalas utilizada en todo el artículo.

Si solo recuerdas una cosa

Las cosas sólidas nos resisten porque los estados electrónicos no pueden comprimirse arbitrariamente: electromagnetismo, energía cinética cuántica, exclusión de Pauli y estructura colectiva convierten estados atómicos extendidos en rigidez macroscópica.

Artículos relacionados

- QTC-002 — ¿Por qué está oscuro el cielo nocturno?
- QTC-004 — ¿Dónde se formaron los átomos de tu cuerpo?
- QTC-006 — ¿A qué distancia está el universo? La escalera de distancias cósmicas

Referencias

[1] Lieb, E. H. The stability of matter. Reviews of Modern Physics 48, 553–569 (1976). DOI 10.1103/RevModPhys.48.553. https://journals.aps.org/rmp/abstract/10.1103/RevModPhys.48.553

[2] Dyson, F. J.; Lenard, A. Stability of Matter. I. Journal of Mathematical Physics 8, 423–434 (1967). DOI 10.1063/1.1705209. https://doi.org/10.1063/1.1705209

[3] Lieb, E. H.; Thirring, W. Bound for the Kinetic Energy of Fermions Which Proves the Stability of Matter. Physical Review Letters 35, 687–689 (1975); erratum 35, 1116. DOI 10.1103/PhysRevLett.35.687. https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.35.687

[4] Pauli, W. Über den Zusammenhang des Abschlusses der Elektronengruppen im Atom mit der Komplexstruktur der Spektren. Zeitschrift für Physik 31, 765–783 (1925). DOI 10.1007/BF02980631.

[5] OpenStax. Chemistry 2e, Sec. 6.3, Development of Quantum Theory. https://openstax.org/books/chemistry-2e/pages/6-3-development-of-quantum-theory

[6] OpenStax. University Physics Volume 3, Sec. 10.1, Properties of Nuclei. https://openstax.org/books/university-physics-volume-3/pages/10-1-properties-of-nuclei

[7] MIT OpenCourseWare. 2.57 Nano-to-Macro Transport Processes, Lecture 7, bonding potential. https://ocw.mit.edu/courses/2-57-nano-to-macro-transport-processes-spring-2012/2e4ecaa5cf55f03bcefbc8ccce79aed6_MIT2_57S12_lec_notes_2004.pdf

[8] Kittel, C. Introduction to Solid State Physics, 8th ed. Wiley (2005), Chs. 3–4. Human locator verification required before freeze.

[9] Malvern, L. E. Introduction to the Mechanics of a Continuous Medium. Prentice-Hall (1969). Stress from p. 64; strain and deformation from p. 127; constitutive treatment of solids and fluids. https://books.google.com/books/about/Introduction_to_the_Mechanics_of_a_Conti.html?id=IIMpAQAAMAAJ

[10] Rebassa-Mansergas, A. et al. Testing the white dwarf mass–radius relationship with eclipsing binaries. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 470, 4473–4492 (2017). DOI 10.1093/mnras/stx1522. https://academic.oup.com/mnras/article/470/4/4473/3869626

[11] Chandrasekhar, S. The Maximum Mass of Ideal White Dwarfs. Astrophysical Journal 74, 81–82 (1931). DOI 10.1086/143324. https://articles.adsabs.harvard.edu/pdf/1931ApJ....74...81C

[12] Corning Museum of Glass. Frequently Asked Questions, 'Does glass continue to flow even at room temperature?' https://info.cmog.org/frequently-asked-questions

[13] Dyre, J. C. Solid-that-Flows Picture of Glass-Forming Liquids. Journal of Physical Chemistry Letters 15, 1603–1617 (2024). DOI 10.1021/acs.jpclett.3c03308. https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10875679/

[14] Carroll, B. W.; Ostlie, D. A. An Introduction to Modern Astrophysics, 2nd ed. Pearson Addison-Wesley (2007), capítulo “The Degenerate Remnants of Stars.” https://books.google.com/books/about/An_Introduction_to_Modern_Astrophysics.html?id=M8wPAQAAMAAJ

[15] Dyson, F. J. Ground-State Energy of a Finite System of Charged Particles. Journal of Mathematical Physics 8, 1538–1545 (1967). DOI 10.1063/1.1705389. https://doi.org/10.1063/1.1705389

[16] Conlon, J. G.; Lieb, E. H.; Yau, H.-T. The N^(7/5) law for charged bosons. Communications in Mathematical Physics 116, 417–448 (1988). DOI 10.1007/BF01229202. https://doi.org/10.1007/BF01229202

¿Dónde se fabricaron los átomos de tu cuerpo?

QTC-004 · De los quarks a la conciencia

El universo, la vida y cómo llegamos a saberlo

Autor: Juan Segurola

Versión: v1.0 ES · 29 de agosto de 2026

DOI: 10.5281/zenodo.22714672 · Zenodo record: 22714672

Perfil epistémico: Interpretación científica actual

Licencia: All Rights Reserved

Resumen del artículo

Los átomos de un cuerpo humano no proceden todos del mismo lugar, e incluso la palabra átomo resulta ligeramente engañosa: a lo largo de la historia cósmica los electrones se arrancan, intercambian y recapturan repetidamente, mientras que la nucleosíntesis sigue sobre todo la historia de los núcleos y los isótopos. Además, la respuesta depende de cómo contemos. Por número de átomos, un cuerpo humano de referencia está dominado por el hidrógeno, cuyos núcleos son en gran parte primordiales y se remontan a los primeros minutos del universo. Por masa, en cambio, dominan el oxígeno y el carbono, fabricados mucho más tarde en estrellas. Este artículo recorre el Big Bang, la combustión estelar, las estrellas AGB, las supernovas, las fusiones de estrellas de neutrones, la espalación de rayos cósmicos y el reciclaje galáctico para reconstruir de dónde proceden los principales ingredientes del cuerpo. El resultado no es un mapa de un elemento a una fábrica, sino una historia estadística de múltiples generaciones, con algunas contribuciones todavía abiertas.

En 60 segundos

Cuenta los átomos de tu cuerpo y gana el hidrógeno: en una composición humana de referencia, aproximadamente seis de cada diez átomos son hidrógeno. Cuenta la masa y la respuesta se invierte: dominan el oxígeno y el carbono. Esa diferencia contiene toda la historia cósmica. La mayoría de los núcleos de hidrógeno son primordiales, supervivientes de la nucleosíntesis del Big Bang; la mayor parte de la masa de carbono y oxígeno se construyó después en estrellas. Estrellas masivas, estrellas AGB, supernovas de colapso del núcleo, supernovas de tipo Ia, fusiones de estrellas de neutrones y rayos cósmicos aportan piezas distintas. No existe una tabla periódica honesta en la que cada elemento tenga un único lugar de nacimiento. El Sistema Solar se formó con material mezclado durante muchas generaciones estelares, de modo que el núcleo de una de tus células normalmente no puede rastrearse hasta una explosión ancestral concreta. Conocemos las rutas generales mediante experimentos nucleares, espectros, abundancias estelares, transitorios, meteoritos y modelos de evolución química. Algunas fracciones de origen —especialmente las del proceso r temprano de la Galaxia— siguen siendo un problema abierto incluso hoy.

Por qué importa esta pregunta

«Somos polvo de estrellas» es uno de los mejores eslóganes de la ciencia y una de sus medias verdades más fáciles de repetir. Comprime más de trece mil millones de años de historia nuclear en tres palabras memorables, pero oculta el hidrógeno primordial, múltiples poblaciones estelares, explosiones retardadas, fusiones compactas, rayos cósmicos y mezcla galáctica. Preguntar de dónde proceden realmente los átomos de un cuerpo obliga a distinguir entre núcleo y átomo, masa y número, elemento e isótopo, fábrica nuclear y cadena posterior de reciclaje. También muestra una idea central de esta serie: no necesitamos una etiqueta en cada partícula para reconstruir una historia física fiable.

1. Tus átomos son más jóvenes que sus núcleos

La pregunta

Cuando decimos que un átomo de tu cuerpo se «fabricó en una estrella», ¿qué sobrevivió exactamente al viaje? No el átomo intacto con los mismos electrones. La historia duradera de la que podemos hablar es principalmente la de su núcleo y su isótopo.

Los átomos son configuraciones temporales. En estrellas y plasmas calientes pueden ionizarse; en gas frío pueden capturar electrones; y en la química y la biología sus electrones se comparten, transfieren y reorganizan continuamente. El átomo de carbono de una proteína no conserva un séquito de electrones que haya viajado sin cambios desde una estrella antigua. Lo que puede tener una continuidad mucho mayor es el núcleo: seis protones y, en el caso del carbono-12, seis neutrones. Incluso esa identidad nuclear puede cambiar si participa en otra reacción nuclear, pero entre reacciones puede sobrevivir durante tiempos cósmicos.[1,12]

Esa distinción importa porque el título pregunta por un cuerpo. Una referencia anatómica estándar da para un adulto representativo una composición aproximada por masa de 65% de oxígeno, 18,5% de carbono, 9,5% de hidrógeno y 3,2% de nitrógeno.[15] Pero la masa no es el número de átomos. Si dividimos esas fracciones por los pesos atómicos estándar, la imagen cambia aproximadamente a 61,8% de H, 26,6% de O, 10,1% de C y 1,5% de N entre esos cuatro elementos principales.[15,16] Las cifras exactas dependen del cuerpo de referencia y de los elementos incluidos; el cambio de perspectiva no.

Por eso pueden ser ciertas a la vez dos frases aparentemente contradictorias. Por número de átomos, un cuerpo humano está dominado por hidrógeno, y la mayoría de esos núcleos de hidrógeno descienden de material primordial fabricado antes de la primera estrella. Por masa, dominan el oxígeno y el carbono, que exigen nucleosíntesis estelar posterior. «Mayormente Big Bang» y «mayormente polvo estelar» pueden ser ambas descripciones legítimas de la misma persona si especificamos qué estamos contando.

En qué punto estamos

La palabra átomo oculta dos historias: los electrones se reorganizan repetidamente, mientras que los núcleos conservan el registro nucleosintético. También oculta dos formas de contar. Por número, aproximadamente seis de cada diez átomos de un cuerpo de referencia son hidrógeno; por masa dominan oxígeno y carbono. Para saber de dónde proceden esos núcleos debemos empezar antes de que existiera ninguna estrella.

2. Los primeros minutos

La pregunta

Si gran parte del hidrógeno de tu cuerpo es anterior a todas las estrellas, ¿dónde pudo formarse? La respuesta está en un breve intervalo en el que el universo primitivo era lo bastante frío para que sobrevivieran núcleos, pero todavía lo bastante caliente y denso para que ocurrieran reacciones nucleares.

La nucleosíntesis del Big Bang no fabricó la tabla periódica. Durante los primeros minutos estableció el inventario primordial de los núclidos más ligeros: sobre todo hidrógeno y helio, con cantidades mucho menores de deuterio, helio-3 y litio-7.[1,2] No existen núcleos estables con números de masa 5 u 8. Salvar eficazmente esos huecos exigiría rutas de reacción que el universo primitivo, en rápida expansión, enfriamiento y baja densidad, no podía sostener, de modo que la BBN estándar no avanzó simplemente hasta carbono y núcleos más pesados en cantidades apreciables.[1]

Aquí la cosmología se vuelve casi de laboratorio. La densidad bariónica inferida de forma independiente a partir del fondo cósmico de microondas puede introducirse en cálculos de reacciones nucleares, y la abundancia primordial de deuterio predicha concuerda notablemente bien con la observada. El litio-7 es distinto: el litio primordial inferido sigue por debajo de la predicción estándar, el conocido problema cosmológico del litio.[2] La discrepancia es suficientemente real para seguir siendo interesante, pero no suficiente para borrar el éxito general de la imagen de los elementos ligeros.

El hidrógeno tiene por tanto un estatus especial en el inventario humano. Las estrellas pasan su vida destruyendo hidrógeno al fusionarlo en núcleos más pesados; no son la principal fábrica cósmica de hidrógeno. El material galáctico se recicla, diluye y procesa, pero la ascendencia dominante de los núcleos de hidrógeno ordinario del Sistema Solar sigue remontándose al reservorio primordial.[1,2,12] Un protón de una molécula de agua dentro de una célula puede haber entrado y salido de innumerables compuestos químicos mientras su identidad nuclear es muchísimo más antigua que el Sol.

En qué punto estamos

Los primeros minutos fabricaron el reservorio inicial de núcleos ligeros, no la tabla periódica posterior. La mayor parte del hidrógeno de nuestro cuerpo pertenece por tanto a una historia preestelar, mientras que carbono, oxígeno y otros ingredientes pesados requieren un segundo capítulo. La pregunta siguiente es qué pueden construir realmente las estrellas y dónde falla la sencilla escalera de «fusión hasta el hierro».

3. Lo que pueden construir las estrellas

La pregunta

A menudo se describe a las estrellas como hornos que fusionan elementos ligeros en otros cada vez más pesados hasta llegar al hierro. Esa imagen apunta en la dirección correcta, pero es demasiado lineal. ¿Qué núcleos se construyen realmente durante la evolución estelar y qué evidencia nos permite seguir esas rutas?

La combustión de hidrógeno convierte hidrógeno en helio. La combustión de helio abre después la ruta al carbono mediante el proceso triple alfa, seguida de reacciones que pueden convertir parte de ese carbono en oxígeno. Las estrellas masivas pueden continuar con etapas de combustión de carbono, neón, oxígeno y silicio. Pero el resultado no es una cinta transportadora de elementos estables. Las redes se ramifican, los fotones pueden desintegrar núcleos y, en condiciones extremas, grupos enteros de reacciones se aproximan a equilibrios cuasiestadísticos o al equilibrio estadístico nuclear. Por eso «las estrellas fusionan hasta hierro» es una abreviatura, no un mecanismo literal.[1,4,11]

El carbono contiene un episodio especialmente revelador de cómo sabemos. Los modelos estelares no podían producir de forma eficiente la abundancia cósmica observada de carbono a menos que la reacción triple alfa estuviera fuertemente reforzada por un estado excitado del carbono-12 cercano a la energía necesaria. Fred Hoyle argumentó a partir de la nucleosíntesis y las abundancias que ese nivel debía existir. En 1953, Dunbar, Pixley, Wenzel y Whaling midieron un nivel en 7,68 ± 0,03 MeV y agradecieron explícitamente a Hoyle haber señalado su importancia astrofísica.[17,18] El estado moderno conocido como estado de Hoyle se mide con mayor precisión, pero aquí la cifra de 7,68 MeV se cita deliberadamente como resultado de 1953.

La historia es tan célebre que ha adquirido su propia leyenda. A menudo se cuenta como una «predicción antrópica»: existe vida basada en carbono y, por tanto, Hoyle habría razonado que la resonancia tenía que existir. El análisis histórico de Helge Kragh encuentra que ese encuadre es en gran medida retrospectivo y que no refleja bien el argumento contemporáneo de Hoyle.[19] La lección no es que la predicción fuese menos impresionante, sino que incluso las buenas historias científicas deben contrastarse con el registro documental.

Las estrellas de masa baja e intermedia aportan otra vía. Durante la fase de rama asintótica gigante pueden llevar material recién procesado hacia sus capas externas y devolver al espacio carbono, nitrógeno, flúor y productos del proceso lento de captura de neutrones mediante vientos estelares.[5,6] Las estrellas masivas, en cambio, son fuentes principales de oxígeno y de numerosos núcleos alfa, y sus etapas finales preparan material que después será expulsado en explosiones de colapso del núcleo.[1,4,11]

En qué punto estamos

> *Las estrellas pueden fabricar gran parte del carbono, oxígeno y demás material que domina un cuerpo por masa, pero lo hacen mediante redes y no mediante una sencilla escalera de fusión. El episodio del estado de Hoyle muestra cómo los argumentos de abundancia pueden predecir estructura nuclear. Sin embargo, una estrella no necesita morir de una única manera, y algunos núcleos exigen explosiones, capturas de neutrones o incluso rayos cósmicos.*

4. Muertes, explosiones y colisiones

Una estrella masiva no se limita a detenerse cuando su núcleo se enriquece en el grupo del hierro. El colapso del núcleo desencadena una explosión y expulsa capas que contienen oxígeno, neón, magnesio, silicio, azufre, argón, calcio y núcleos del grupo del hierro, modificadas además por combustión explosiva.[1,4] Las supernovas de tipo Ia siguen una ruta distinta y retardada, ligada a enanas blancas en sistemas binarios, y son una fuente importante de enriquecimiento en elementos del grupo del hierro.[1,11] «Supernova» no es una sola fábrica nuclear.

Para los núcleos más allá del grupo del hierro, la captura de neutrones se vuelve central. En el proceso s, las capturas son lo bastante lentas para que muchos núcleos inestables decaigan beta antes de capturar otro neutrón; las estrellas AGB son lugares principales, con contribuciones adicionales de estrellas masivas.[6] En el proceso r, las capturas son tan rápidas que el flujo nuclear atraviesa regiones muy ricas en neutrones antes de decaer hacia la estabilidad.[7] Son regímenes físicos distintos y ninguno corresponde a un único tipo de objeto universal.

GW170817 transformó esa discusión. El evento de ondas gravitacionales y su kilonova óptica e infrarroja demostraron que las fusiones de estrellas de neutrones expulsan material rico en neutrones capaz de producir núcleos del proceso r, y posteriormente se identificó estroncio en los ejecta.[8,9] Eso establece a las fusiones como un lugar real del proceso r. No establece que sean el único. En particular, la rapidez con la que aparecen elementos del proceso r en algunas de las estrellas más antiguas de la Galaxia mantiene abierta la mezcla dominante de fuentes en épocas tempranas.[7,11]

Incluso los elementos ligeros tienen excepciones. Litio, berilio y boro no pueden asignarse simplemente a nucleosíntesis del Big Bang o a fusión estelar ordinaria. Los rayos cósmicos galácticos pueden romper núcleos de carbono, nitrógeno y oxígeno en fragmentos más ligeros mediante espalación, aportando de manera importante LiBeB.[10] La tabla periódica no es un mapa en el que cada casilla tenga una única fábrica.

En qué punto estamos

> *Explosiones, fusiones compactas y rayos cósmicos rellenan huecos que la combustión estelar quiescente no puede cubrir. Las fusiones de estrellas de neutrones son una fábrica observada del proceso r, pero la mezcla dominante de fuentes en la Galaxia temprana sigue abierta. La lección no es que cada elemento tenga un origen, sino que cada isótopo tiene una historia que puede combinar varias rutas.*

5. Una galaxia que se recicla

La nucleosíntesis es solo la primera mitad del viaje. Los núcleos recién fabricados deben abandonar su fuente mediante vientos estelares, ejecta de supernova, ejecta de fusiones u otros flujos; enfriarse, mezclarse con gas y polvo interestelar; e incorporarse a nuevas nubes, estrellas, planetas y cuerpos. Una galaxia es una máquina de reciclaje químico que opera durante miles de millones de años.[1,11,14]

El Sistema Solar se formó hace unos 4.570 millones de años a partir de gas y polvo que ya habían pasado por miles de millones de años de evolución química galáctica.[12–14] Los granos presolares conservados en meteoritos primitivos son fragmentos microscópicos de esa historia anterior: algunos presentan firmas isotópicas tan anómalas que pueden asociarse a clases concretas de estrellas o explosiones.[13,14] Son muestras físicas de material que existía antes del Sol.

Ahora podemos aplicar la maquinaria de nuevo al cuerpo. El hidrógeno es predominantemente primordial. El oxígeno del material del vecindario solar procede sobre todo de estrellas masivas y enriquecimiento por colapso del núcleo. El carbono es genuinamente mixto, con contribuciones importantes tanto de estrellas masivas como de estrellas AGB de masa baja e intermedia. El nitrógeno está fuertemente influido por el procesamiento de estrellas de masa baja e intermedia. Calcio y fósforo se asocian principalmente con nucleosíntesis de estrellas masivas y colapso del

núcleo. El hierro recibe contribuciones sustanciales tanto de supernovas de colapso como de las tipo Ia retardadas.[1,4,5,11]

Esas etiquetas no son porcentajes deliberadamente. Los cálculos de evolución química deben combinar rendimientos estelares, función inicial de masas, metalicidad, evolución binaria, tasas de eventos, tiempos de retardo, flujos de gas y mezcla. Cambia esas hipótesis y cambian las fracciones de origen, especialmente para carbono y nitrógeno.[11] Esa incertidumbre no es un defecto de la pregunta; forma parte de la respuesta. Podemos conocer con mucha confianza las familias principales de procesos sin fingir que cada núcleo lleva una etiqueta de fábrica.

En qué punto estamos

Los principales elementos de un cuerpo trazan historias distintas: hidrógeno primordial, oxígeno de estrellas masivas, fuentes mixtas para carbono y nitrógeno, productos de colapso del núcleo como calcio y fósforo, e hierro con contribuciones tanto de colapso como de tipo Ia retardadas. Pero después de miles de millones de años de mezcla ningún núcleo ordinario conserva una etiqueta. Si no hay etiqueta, ¿cómo sabemos todo esto?

6. ¿Cómo lo sabemos?

La reconstrucción funciona porque se superponen líneas de evidencia independientes. Los laboratorios nucleares miden energías de reacción, secciones eficaces, tasas de decaimiento y niveles nucleares. La espectroscopia revela firmas elementales e isotópicas en estrellas, nebulosas y explosiones. Los sondeos comparan razones de abundancia en estrellas de distintas edades y metalicidades. Supernovas y kilonovas muestran material recién sintetizado. Los meteoritos conservan anomalías isotópicas. Los modelos de evolución química galáctica preguntan si todos esos ingredientes pueden reproducir los patrones de abundancia observados en la Vía Láctea.[1,4,7,9,11–14]

Ningún método entrega un certificado de nacimiento para un núcleo ordinario de oxígeno de tu sangre. Tras repetidas etapas de mezcla, ionización, condensación, procesamiento planetario, geología y biología, su evento concreto de creación suele ser irrecuperable. La procedencia es estadística: dado un inventario isotópico y una historia galáctica, ¿qué familias de fuentes lo aportaron con mayor probabilidad, en qué proporciones y en qué momentos?[11,12,14] Los granos presolares son tan poderosos precisamente porque son excepciones raras que conservaron huellas isotópicas inusualmente específicas.[13]

La historia del campo muestra lo mismo. El trabajo B²FH de 1957 de Margaret Burbidge, Geoffrey Burbidge, William Fowler y Fred Hoyle organizó la combustión estelar y las ideas de captura de neutrones en una síntesis histórica, mientras Alastair Cameron desarrollaba de forma independiente ideas estrechamente relacionadas.[1,3] No cerró el tema: los rendimientos de tipo Ia, las contribuciones detalladas de AGB, la física de neutrinos, las fusiones de estrellas de neutrones y la arqueología galáctica moderna refinaron sustancialmente el mapa después.[1,7,11]

El conocimiento científico también tiene una historia institucional. A Margaret Burbidge se le había negado el acceso asociado a observaciones en Mount Wilson porque se excluía a las mujeres; más tarde consiguió observar mediante disposiciones vinculadas al acceso de su marido.[21] En 1983 el Premio Nobel de Física reconoció a William Fowler por su trabajo sobre reacciones nucleares relevantes para la formación de elementos, junto con Subrahmanyan Chandrasekhar

por la estructura y evolución estelares; los otros autores de B²FH no fueron galardonados.[20] Esos hechos no nos dicen cuál fue el razonamiento privado del comité Nobel, pero recuerdan que acceso, reconocimiento y descubrimiento no son la misma cosa.

Algunas partes del mapa son ya lo bastante robustas para enseñarse como establecidas: los núcleos ligeros primordiales, la producción estelar de carbono y oxígeno, la nucleosíntesis del proceso s, el enriquecimiento del grupo del hierro por supernovas de tipo Ia y la existencia de producción r en fusiones de estrellas de neutrones. Otras partes siguen cuantitativamente abiertas. La mezcla de fuentes que produjo el inventario del proceso r de la Galaxia más temprana es una de ellas.[7,11] QTC usa aquí la categoría Problema abierto porque el fenómeno está establecido, pero la mezcla explicativa dominante no.

El siguiente artículo invierte la dirección de la inferencia. QTC-004 ha preguntado cómo reconstruimos la historia que puso determinados núcleos en estrellas, planetas y cuerpos. QTC-005 pregunta cómo podemos saber de qué está hecha una estrella cuando no podemos recoger una muestra. La respuesta comienza con luz, espectros, comparación de laboratorio y una de las herramientas de medición remota más poderosas jamás inventadas.

En qué punto estamos

> *Los átomos de un cuerpo no tienen un único lugar de nacimiento cósmico ni, normalmente, una genealogía individual recuperable. Sus orígenes se reconstruyen a partir de evidencia nuclear, astronómica y meteorítica convergente, con algunas fracciones de origen todavía abiertas. QTC-004 ha seguido la materia desde el Big Bang hasta nosotros; QTC-005 se ocupa del truco observacional que hizo posible gran parte de esa reconstrucción: la espectroscopia.*

Lo que sabemos, y cómo

La mayoría de los núcleos de hidrógeno son productos primordiales de la nucleosíntesis del Big Bang, mientras que carbono, oxígeno, nitrógeno y muchos núcleos más pesados de la materia ordinaria se produjeron después mediante múltiples procesos estelares y explosivos. La distinción está respaldada por cálculos de BBN, abundancias estelares, física nuclear y modelos de evolución química.[1,2,4,11]

La composición elemental humana depende de la métrica. Por masa, oxígeno y carbono dominan un cuerpo de referencia; por número de átomos domina el hidrógeno porque cada átomo de hidrógeno es muy ligero. Esto hace que «mayormente Big Bang» y «mayormente polvo estelar» sean simultáneamente ciertas si declaramos el denominador.[15,16]

Las fusiones de estrellas de neutrones son un lugar observado del proceso r, los granos presolares son muestras directas de material estelar anterior al Sol y el Sistema Solar se formó a partir de un reservorio galáctico ya enriquecido. Estas observaciones conectan la teoría nuclear con material y eventos reales.[8,9,13,14]

Lo que todavía no sabemos

- La mezcla dominante de fuentes del proceso r en la Vía Láctea más temprana sigue abierta; las fusiones de estrellas de neutrones son contribuyentes confirmados, pero quizá no sean el único canal de enriquecimiento rápido.

- Las fracciones exactas de origen de carbono, nitrógeno, hierro y muchos isótopos dependen de rendimientos estelares, evolución binaria, tasas de eventos, mezcla y del modelo de evolución química galáctica adoptado.
- La ascendencia evento por evento de núcleos ordinarios bien mezclados de un cuerpo humano suele ser irrecuperable, incluso cuando sus clases de fuentes probables están bien restringidas estadísticamente.

Qué podría hacernos cambiar de opinión

- Un modelo cosmológico y nuclear coherente que eliminara el hidrógeno primordial o no reprodujera la abundancia observada de deuterio manteniendo a la vez la concordancia con el CMB obligaría a revisar de forma importante la parte de la historia correspondiente al universo temprano.
- Nuevos rendimientos estelares, observaciones de transitorios o arqueología de abundancias que invirtieran de manera robusta las familias de fuentes dominantes asignadas a los principales elementos del cuerpo obligarían a revisar el mapa elemento por elemento.
- Una determinación convergente de tasas de eventos del proceso r, tiempos de retardo y rendimientos que fijara de manera única la mezcla de fuentes de la Galaxia temprana convertiría el actual Problema abierto en un resultado cuantitativo mucho más establecido.

Si solo recuerdas una cosa

Por número de átomos eres sobre todo hidrógeno primordial; por masa, oxígeno y carbono fabricados en estrellas: tu cuerpo mezcla materia del Big Bang con estrellas recicladas.

Artículos relacionados

- QTC-003 — ¿Por qué las cosas sólidas son sólidas?
- QTC-005 — ¿Cómo sabemos de qué están hechas las estrellas?
- QTC-015 — Las estrellas que nunca hemos visto

Referencias

[1] Arcones, A.; Thielemann, F.-K. Origin of the elements. Astronomy and Astrophysics Review 31, 1 (2023). DOI 10.1007/s00159-022-00146-x. https://doi.org/10.1007/s00159-022-00146-x

[2] Cyburt, R. H.; Fields, B. D.; Olive, K. A.; Yeh, T.-H. 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

[3] Burbidge, E. M.; Burbidge, G. R.; Fowler, W. A.; Hoyle, F. Synthesis of the Elements in Stars. Reviews of Modern Physics 29, 547–650 (1957). DOI 10.1103/RevModPhys.29.547. https://doi.org/10.1103/RevModPhys.29.547

[4] Nomoto, K.; Kobayashi, C.; Tominaga, N. Nucleosynthesis in Stars and the Chemical Enrichment of Galaxies. Annual Review of Astronomy and Astrophysics 51, 457–509 (2013). DOI 10.1146/annurev-astro-082812-140956. https://doi.org/10.1146/annurev-astro-082812-140956

[5] Karakas, A. I.; Lattanzio, J. C. The Dawes Review 2: Nucleosynthesis and Stellar Yields of Low- and Intermediate-Mass Single Stars. Publications of the Astronomical Society of Australia 31, e030 (2014). DOI 10.1017/pasa.2014.21. https://doi.org/10.1017/pasa.2014.21

[6] Käppeler, F.; Gallino, R.; Bisterzo, S.; Aoki, W. The s process: Nuclear physics, stellar models, and observations. Reviews of Modern Physics 83, 157–193 (2011). DOI 10.1103/RevModPhys.83.157. https://doi.org/10.1103/RevModPhys.83.157

[7] Cowan, J. J. et al. Origin of the heaviest elements: The rapid neutron-capture process. Reviews of Modern Physics 93, 015002 (2021). DOI 10.1103/RevModPhys.93.015002. https://doi.org/10.1103/RevModPhys.93.015002

[8] Kasen, D.; Metzger, B.; Barnes, J.; Quataert, E.; Ramirez-Ruiz, E. Origin of the heavy elements in binary neutron-star mergers from a gravitational-wave event. Nature 551, 80–84 (2017). DOI 10.1038/nature24453. https://doi.org/10.1038/nature24453

[9] Watson, D. et al. Identification of strontium in the merger of two neutron stars. Nature 574, 497–500 (2019). DOI 10.1038/s41586-019-1676-3. https://doi.org/10.1038/s41586-019-1676-3

[10] Fields, B. D.; Olive, K. A.; Schramm, D. N. Cosmic-Ray Models for Early Galactic Lithium, Beryllium, and Boron Production. Astrophysical Journal 435, 185–202 (1994). DOI 10.1086/174805. https://doi.org/10.1086/174805

[11] Kobayashi, C.; Karakas, A. I.; Lugaro, M. The Origin of Elements from Carbon to Uranium. Astrophysical Journal 900, 179 (2020). DOI 10.3847/1538-4357/abae65. https://doi.org/10.3847/1538-4357/abae65

[12] Lodders, K. Relative Atomic Solar System Abundances, Mass Fractions, and Atomic Masses of the Elements and Their Isotopes. Space Science Reviews 217, 44 (2021). DOI 10.1007/s11214-021-00825-8. https://doi.org/10.1007/s11214-021-00825-8

[13] Hoppe, P. et al. Dust from supernovae and their progenitors in the solar nebula. Nature Astronomy 6, 1027–1034 (2022). DOI 10.1038/s41550-022-01737-5. https://doi.org/10.1038/s41550-022-01737-5

[14] Goderis, S.; Chakrabarti, R.; Debaille, V.; Kodolányi, J. Isotopes in cosmochemistry: recipe for a Solar System. Journal of Analytical Atomic Spectrometry 31, 841–862 (2016). DOI 10.1039/C5JA00411J. https://doi.org/10.1039/C5JA00411J

[15] OpenStax. Anatomy and Physiology, Sec. 2.1, Fig. 2.2, “Elements of the Human Body.” https://openstax.org/books/anatomy-and-physiology/pages/2-1-elements-and-atoms-the-building-blocks-of-matter

[16] IUPAC Commission on Isotopic Abundances and Atomic Weights (CIAAW). Standard Atomic Weights 2024. https://ciaaw.org/atomic-weights.htm

[17] Hoyle, F. On Nuclear Reactions Occurring in Very Hot Stars. I. The Synthesis of Elements from Carbon to Nickel. Astrophysical Journal Supplement Series 1, 121–146 (1954). DOI 10.1086/190005. https://doi.org/10.1086/190005

[18] Dunbar, D. N. F.; Pixley, R. E.; Wenzel, W. A.; Whaling, W. The 7.68-Mev State in C12. Physical Review 92, 649–650 (1953). DOI 10.1103/PhysRev.92.649. https://doi.org/10.1103/PhysRev.92.649

[19] Kragh, H. An anthropic myth: Fred Hoyle’s carbon-12 resonance level. Archive for History of Exact Sciences 64, 721–751 (2010). DOI 10.1007/s00407-010-0068-8. https://doi.org/10.1007/s00407-010-0068-8

[20] Royal Swedish Academy of Sciences. Press release: The 1983 Nobel Prize in Physics. https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1983/press-release/

[21] University of California. Trailblazing astronomer Margaret Burbidge turns 100 years old (2019). https://www.universityofcalifornia.edu/news/trailblazing-astronomer-margaret-burbidge-turns-100-years-old

¿Cómo sabemos de qué están hechas las estrellas?

QTC-005 · De los quarks a la consciencia

El universo, la vida y cómo llegamos a saberlo

Autor: Juan Segurola

Versión: v1.1 ES · 2 de septiembre de 2026

Perfil epistémico: Interpretación científica actual

Licencia: All Rights Reserved

Resumen del artículo

No podemos recoger material del Sol, pero la astronomía moderna mide las abundancias químicas estelares con una precisión extraordinaria. El camino de la luz a la composición no consiste en leer directamente un código de barras cósmico. Un espectro registra interacciones entre radiación y materia que dependen de la longitud de onda; la física atómica identifica las transiciones posibles, mientras que la temperatura, la presión, la ionización, la excitación, la saturación de las líneas y la estructura atmosférica determinan con qué intensidad aparecen. Este artículo sigue esa cadena desde las líneas oscuras inexplicadas de Fraunhofer y la afirmación de Comte de que la química estelar era inaccesible, pasando por Kirchhoff, Bunsen, Saha, Cannon, Maury y Cecilia Payne, hasta los análisis modernos de abundancias en 3D y fuera del LTE. También muestra dónde el método sigue dependiendo de modelos. La espectroscopia funciona porque la física de laboratorio, los modelos atmosféricos y múltiples comprobaciones observacionales restringen conjuntamente la inferencia, no porque una línea oscura indique automáticamente cuánto contiene una estrella de un elemento.

En 60 segundos

Sabemos de qué están hechas las estrellas sin tocarlas porque su luz ha interactuado con materia antes de llegar hasta nosotros. Los átomos y los iones absorben o emiten fotones en longitudes de onda características, de modo que los patrones de líneas pueden identificar especies químicas. Pero la identificación es solo el primer paso. Una línea intensa puede deberse a una gran abundancia, una excitación favorable, un estado de ionización concreto, la saturación, la presión, la temperatura o la probabilidad de una transición atómica. La teoría de ionización de Saha ayudó a convertir los espectros estelares, antes un esquema de clasificación, en física, y Cecilia Payne utilizó esa física en 1925 para mostrar que el hidrógeno y el helio dominan las atmósferas estelares. Los análisis modernos van más lejos: comparan los espectros observados con cálculos de transferencia radiativa, datos atómicos de laboratorio y modelos atmosféricos, a menudo con correcciones 3D y fuera del LTE. El resultado es una inferencia con incertidumbres, no una muestra física. El Sol permite comprobaciones especialmente poderosas y también ofrece una advertencia: sus mejores abundancias fotosféricas todavía forman parte de una tensión de alta precisión no resuelta con la heliosismología.

Por qué importa esta pregunta

La astronomía nos pide repetidamente que confiemos en afirmaciones sobre lugares que ningún ser humano puede visitar. La química estelar constituye una prueba especialmente exigente porque, en 1835, Auguste Comte sostuvo que no era solo difícil, sino fundamentalmente inaccesible. En una generación, la espectroscopia cambió las reglas. La lección importante no es que Comte fuera ingenuo. Es que la ciencia puede ampliar lo que cuenta como evidencia. Una estrella distante sigue sin enviar a la Tierra una botella de gas; en su lugar, sus fotones se convierten en la muestra a partir de la cual se construye una reconstrucción física restringida por la evidencia.

1. Un código de barras hecho de luz ausente

La pregunta

Si una estrella es inalcanzable, ¿qué podría contar como muestra química? En 1835 Auguste Comte sostuvo que la composición estelar quedaba fuera de la observación. La respuesta de la astronomía no fue llegar hasta la estrella, sino descubrir que la luz que ya nos alcanza transporta huellas físicas de la materia que atravesó.

El argumento de Comte era coherente con sus premisas. En la decimonovena lección de su Cours de philosophie positive, separó las preguntas astronómicas que podían reducirse a la observación visual de aquellas que, a su juicio, exigían otras formas de acceso. Las formas, los movimientos y las distancias parecían obtenibles; la composición química, escribió, no lo era.[17] El error no fue tanto un fallo de lógica como una teoría incompleta de lo que la luz podía revelar.

Joseph Fraunhofer ya había aportado parte del rompecabezas empírico. En 1814 midió sistemáticamente cientos de rasgos oscuros y estrechos que cruzaban el espectro solar, a partir de una observación anterior de William Hyde Wollaston.[3,4] Fraunhofer utilizó las líneas como marcadores ópticos estables. Todavía no disponía de la teoría física necesaria para leerlas como química. La observación precedió a la explicación.

Kirchhoff y Bunsen aportaron el cambio decisivo. Las sustancias de laboratorio producían rasgos espectrales reproducibles, y Kirchhoff relacionó las líneas de emisión brillantes de gases calentados con los rasgos oscuros de absorción del espectro solar. Hacer corresponder la señal del sodio en el laboratorio con líneas de Fraunhofer solares convirtió un patrón remoto de luz ausente en evidencia de sodio en la atmósfera solar.[5] La estrella no se había vuelto físicamente accesible. Había cambiado el significado de sus fotones.

La expresión código de barras solo es útil, por tanto, si evitamos tomarla literalmente. Un código de barras comercial está diseñado para que un escáner relacione directamente un patrón con un artículo. Un espectro estelar lo produce la transferencia radiativa a través de una atmósfera física. Contiene identificadores, pero esos identificadores están integrados en la temperatura, la presión, el movimiento, la opacidad y la geometría. El espectro es la observación; la composición química es la inferencia.[1,13]

En qué punto estamos

Una estrella no tiene que entregar materia a la Tierra para que su química sea accesible. Fraunhofer midió un patrón antes de que se conociera su significado; Kirchhoff y Bunsen mostraron que la física de laboratorio podía descodificar una parte. La luz se había convertido en una muestra remota. Pero ¿por qué unas longitudes de onda concretas permiten identificar átomos concretos?

2. Por qué cada elemento deja un patrón

La pregunta

> *Un espectro puede contener miles de líneas. ¿Por qué alguna de ellas debería pertenecer de forma fiable al hidrógeno, el sodio, el hierro u otra especie, en vez de ser marcas arbitrarias producidas por una estrella compleja? La respuesta comienza con la estructura cuántica: los átomos y los iones no intercambian energía en cantidades arbitrarias.*

Los electrones ligados en átomos e iones ocupan estados cuánticos permitidos. Una transición radiativa entre dos estados corresponde a un fotón con una energía concreta y, por tanto, una longitud de onda concreta. Los laboratorios pueden medir esas longitudes de onda, niveles de energía, energías de ionización y probabilidades de transición con gran precisión. Bases de datos como la Atomic Spectra Database del NIST reúnen valores evaluados críticamente que se utilizan para identificar líneas astronómicas.[2]

Eso convierte la longitud de onda en un identificador poderoso, pero nunca en una etiqueta infalible de una sola línea. Distintas transiciones pueden quedar muy próximas; la rotación estelar, la presión y el movimiento térmico ensanchan los rasgos; las moléculas crean bandas densas; y muchos espectros astronómicos contienen mezclas de líneas. Una identificación segura utiliza, por tanto, la etapa de ionización correcta, varias líneas compatibles y un modelo coherente con las condiciones físicas de la estrella.[2,13]

La formación de una línea de absorción también es más sutil que la imagen escolar de un gas frío que simplemente bloquea un fondo más caliente. En una longitud de onda donde la opacidad de la línea es alta, los fotones escapan desde profundidades distintas que los fotones cercanos del continuo. Como la temperatura y la función fuente de radiación varían a través de la atmósfera, esa longitud de onda puede emerger más oscura. Las líneas de emisión exigen otras combinaciones de geometría, excitación y función fuente.[1,13] La imagen de la «nube fría» es un caso límite útil, no una teoría de las atmósferas estelares.

Esta distinción importa porque la misma transición atómica que identifica una especie también es sensible al entorno en el que se forma. El átomo proporciona un conjunto de longitudes de onda posibles; la atmósfera decide qué transiciones están pobladas, qué opacidad alcanzan y qué perfil llega al telescopio. Identificación y abundancia comparten, por tanto, la misma física, pero no son el mismo problema.

En qué punto estamos

> *Los niveles cuánticos de energía hacen que las longitudes de onda espectrales sean lo bastante reproducibles para identificar átomos e iones, mientras que la transferencia radiativa explica cómo emergen esos rasgos de una atmósfera. Sin embargo, la línea que identifica un elemento también responde a la temperatura, la ionización y la opacidad. La siguiente trampa aparece de inmediato: una línea más intensa no significa necesariamente que haya más cantidad de ese elemento.*

3. La trampa: las líneas intensas no significan muchos átomos

La pregunta

Si el hidrógeno es el elemento dominante en las estrellas ordinarias, ¿por qué sus líneas visibles no dominan por igual todos los espectros estelares? La respuesta es la clave de la espectroscopia cuantitativa: un telescopio solo ve los átomos y los iones que en ese momento ocupan estados capaces de producir una transición determinada.

Las líneas de Balmer ofrecen el ejemplo clásico. Surgen de transiciones que implican el nivel n=2 del hidrógeno. En una atmósfera fría, relativamente pocos átomos de hidrógeno están excitados hasta ese nivel. A temperaturas más altas aumenta la población n=2 y se refuerza la absorción de Balmer; con aún más calor, el aumento de la ionización retira hidrógeno neutro de la población pertinente. El hidrógeno puede seguir siendo abrumadoramente abundante mientras el patrón visible de Balmer primero se intensifica y después se debilita.[7,8]

Meghnad Saha proporcionó a los astrónomos el puente de la mecánica estadística. Su teoría de ionización relacionó las poblaciones de las etapas de ionización con la temperatura y la presión electrónica, lo que permitió interpretar físicamente los cambios en los patrones espectrales en vez de tratarlos solo como categorías.[6,7] Los supuestos de equilibrio no son universalmente exactos, y se necesitan cálculos modernos fuera del LTE cuando la radiación y las colisiones no mantienen el equilibrio termodinámico local, pero el cambio conceptual fue fundamental.

Ese cambio también explica una secuencia notable en la historia de la clasificación. En Harvard, Annie Jump Cannon reorganizó clases empíricas anteriores en la secuencia OBAFGKM y clasificó cientos de miles de espectros en el programa Henry Draper.[10,18] Antonia Maury había desarrollado un esquema más detallado en el que el carácter y la anchura de las líneas aportaban información que una sola secuencia no captaba, anticipando la importancia de la luminosidad y la gravedad superficial.[19] La clasificación funcionó antes de que se comprendiera por completo su significado físico.

Payne aplicó después el marco de Saha a la secuencia de Harvard. Gran parte de la progresión OBAFGKM normal podía entenderse como un cambio de excitación e ionización impulsado por la temperatura, no como si las estrellas estuvieran construidas con conjuntos de elementos completamente distintos.[8] La temperatura no es el único eje: también importan la gravedad, la metalicidad, las abundancias peculiares y las moléculas. Pero la variedad aparente de los espectros ya no exigía una química global diferente para cada clase espectral.[1,13]

En qué punto estamos

La línea que parece más intensa puede deberse a una población atómica favorable y no a una abundancia enorme. Saha proporcionó la física de la ionización; Cannon y Maury mostraron cuánto orden empírico existía antes de que esa explicación estuviera completa. Una vez separadas clasificación y composición, una astrónoma pudo formular la pregunta cuantitativa más difícil: ¿qué cantidad de cada elemento hay realmente?

4. Payne: convertir los espectros en composición

Stellar Atmospheres, la obra de Cecilia Payne de 1925, se construyó precisamente sobre esa distinción. Payne trató los espectros estelares mediante la física de la ionización y la excitación en vez de suponer que la intensidad de las líneas representaba directamente la abundancia. El resultado fue radical: sus cálculos implicaban que el hidrógeno era alrededor de un millón de

veces más abundante que los metales en las atmósferas estelares, y que el helio también estaba enormemente enriquecido respecto a la mezcla semejante a la terrestre que entonces se suponía habitualmente.[8,15]

El registro histórico es más interesante que el relato simplificado del triunfo. Payne publicó las grandes abundancias de hidrógeno y helio, pero también escribió que los valores excepcionales «casi con seguridad no eran reales».[8] Henry Norris Russell obtuvo más tarde el mismo resultado cualitativo mediante un análisis distinto y citó explícitamente el trabajo anterior de Payne.[9,15] Esa vía independiente importa científicamente: fue una comprobación cruzada que trianguló la inferencia de Payne, no el origen de su prioridad. La cronología preserva así tanto su descubrimiento como la cautela genuina que rodeaba un resultado contrario a las expectativas dominantes.

El trabajo solar moderno confirma la conclusión física general, al tiempo que cambia la precisión y el procedimiento. Un análisis actual en 3D y fuera del LTE proporciona fracciones de masa fotosféricas presentes cercanas a X = 0,7438 para el hidrógeno, Y = 0,2423 para el helio y Z = 0,0139 para todos los elementos más pesados combinados.[11] Redondeadas, son aproximadamente un 74,4%, un 24,2% y un 1,4% en masa. Esas cifras no son constantes estelares universales; son una inferencia dependiente de modelos para la superficie solar actual.

La importancia del resultado de Payne no consiste, por tanto, en que un cálculo de 1925 proporcionara la tabla definitiva de hoy. Consiste en que se había formulado la pregunta física correcta. Una vez tenidas en cuenta la temperatura, la ionización y la excitación, los espectros podían utilizarse para inferir una composición radicalmente distinta de la mezcla terrestre que los astrónomos esperaban. Los valores cuantitativos pudieron mejorar después a medida que mejoraban los datos atómicos, las observaciones y los modelos atmosféricos.

En qué punto estamos

Payne mostró que descodificar un espectro exige modelos físicos, no contar visualmente las líneas, y el Sol moderno todavía confirma su conclusión central: la materia solar ordinaria es abrumadoramente hidrógeno y helio. Sin embargo, los valores exactos de abundancia han seguido cambiando a medida que mejoran los modelos. Entonces, ¿cómo convierte un análisis actual de abundancias un perfil de línea medido en un número?

5. Cómo se mide hoy la abundancia

Un espectro moderno de alta resolución proporciona primero observables: longitudes de onda, perfiles de línea, profundidades y anchuras equivalentes. La anchura equivalente comprime el área eliminada por un rasgo de absorción en la anchura de una línea hipotética completamente oscura con el mismo flujo ausente. Es útil porque mide la intensidad total de la línea sin depender solo de su profundidad central.[1,13]

Pero ni siquiera la anchura equivalente es linealmente proporcional a la abundancia en todos los regímenes. La curva de crecimiento clásica hace visible la razón. Las líneas débiles se encuentran en una rama aproximadamente lineal: más absorbentes producen proporcionalmente más anchura equivalente. Cuando el núcleo de la línea se satura, añadir absorbentes modifica la anchura equivalente mucho más despacio. En líneas muy intensas, las anchas alas de

amortiguamiento hacen que la anchura equivalente vuelva a crecer con más fuerza que en la rama saturada, aunque en el régimen clásico de amortiguamiento sigue creciendo de forma sublineal con la abundancia.[1,13] Esta curva es el puente entre «la intensidad de una línea no es la abundancia» y un diagnóstico útil de abundancia.

Muchos análisis ajustan hoy espectros sintéticos completos. Un modelo atmosférico especifica la temperatura, la presión, la densidad y la opacidad en función de la profundidad; los cálculos de transferencia radiativa predicen qué espectro debería emerger para una mezcla química de prueba. Las abundancias se ajustan hasta reproducir simultáneamente muchas líneas y perfiles observados.[1,13] Un trabajo de calidad no pide a una sola línea que sostenga toda la conclusión.

Los datos atómicos de entrada importan tanto como el modelo. Las longitudes de onda identifican transiciones; las fuerzas de oscilador o probabilidades de transición ayudan a determinar sus intensidades intrínsecas; las energías de ionización y las tasas de colisión influyen en las poblaciones; los datos de ensanchamiento dan forma a los perfiles. Un parámetro atómico inexacto puede hacerse pasar por un error de abundancia química, por lo que las mediciones de laboratorio y las bases de datos evaluadas críticamente siguen formando parte de la astronomía observacional.[2,13]

Los astrónomos también deben indicar qué significa su cifra de abundancia. En la escala logarítmica habitual por número, se define que el hidrógeno tiene $\log \varepsilon(H) = 12$. La notación [Fe/H] compara la razón numérica hierro-hidrógeno de una estrella con el valor solar. En cambio, X, Y y Z son fracciones de masa para el hidrógeno, el helio y todo lo que es más pesado que el helio. «Metal» significa por tanto en astronomía estelar cualquier elemento más pesado que el helio, no la categoría química cotidiana.[11,13]

Por último, la propia atmósfera es un modelo. El trabajo clásico suponía a menudo una atmósfera estática unidimensional en equilibrio termodinámico local. Los modelos hidrodinámicos tridimensionales representan las inhomogeneidades convectivas, y los cálculos fuera del LTE permiten que las poblaciones de los niveles atómicos y los campos de radiación se aparten del equilibrio local. Sus correcciones no son universalmente grandes ni apuntan siempre en la misma dirección, pero para algunos elementos y parámetros estelares modifican materialmente la abundancia inferida.[12,13]

En qué punto estamos

El análisis moderno de abundancias es un problema inverso: se mide un espectro, se adoptan datos atómicos y una atmósfera, se calcula la luz emergente y se ajustan las abundancias hasta que concuerdan muchos diagnósticos. Las anchuras equivalentes, las curvas de crecimiento y la síntesis completa hacen explícita esa dependencia. Pero una inferencia puede ser internamente elegante y aun así estar equivocada. ¿Qué comprobaciones independientes muestran que la reconstrucción está anclada en la realidad?

6. ¿Cómo sabemos que el método funciona?

Una comprobación histórica resulta casi teatral. Durante el eclipse solar de 1868, Pierre Janssen observó un rasgo espectral amarillo brillante en una prominencia, y Norman Lockyer estudió de forma independiente la misma línea solar; Lockyer y Edward Frankland sostuvieron que indicaba

un elemento nuevo. El helio fue aislado de minerales terrestres en 1895 y su espectro coincidió con la identificación solar anterior.[14,16] Una especie química inferida a partir de la luz antes de ser aislada en la Tierra apareció más tarde en una muestra de laboratorio.

Las comprobaciones modernas son más sistemáticas. Pueden compararse las abundancias inferidas a partir de distintas líneas del mismo elemento, de diferentes etapas de ionización y, en ocasiones, de moléculas distintas. En el Sol, muchas abundancias fotosféricas de elementos refractarios también pueden compararse con meteoritos condríticos CI primitivos. La concordancia suele ser alta, aunque los volátiles y algunos elementos concretos proporcionan comprobaciones meteoríticas deficientes o discrepantes.[11,13] La triangulación es valiosa precisamente porque ningún diagnóstico aislado es perfecto.

El Sol también deja al descubierto los límites del método. Los análisis mejorados en 3D y fuera del LTE redujeron abundancias importantes de elementos pesados respecto a compilaciones anteriores. Los modelos solares estándar que utilizan esas composiciones pasaron entonces a discrepar más intensamente de las restricciones heliosísmicas sobre el interior solar, una tensión conocida como problema de la abundancia solar o del modelado solar.[11,20] Trabajos heliosísmicos recientes indican que la opacidad radiativa es una parte importante de la discrepancia, pero los distintos cálculos y experimentos de opacidad todavía no cierran el problema.[21] Es un problema abierto dentro de un método por lo demás maduro, no una prueba de que la espectroscopia haya fracasado.

Hay un segundo límite importante. Para la mayoría de las estrellas, la espectroscopia ordinaria mide la fotosfera u otra capa donde se forman líneas, no directamente el núcleo donde se produce la combustión nuclear. La difusión, la mezcla, la pérdida de masa, la acreción y la evolución pueden modificar la composición superficial.[1,13] Una abundancia fotosférica no es, por tanto, automáticamente una composición natal prístina ni una medición directa del núcleo. La inferencia siempre debe nombrar la región física que describe.

El mismo espectro puede codificar más que química. Los desplazamientos Doppler pueden revelar la velocidad radial, mientras que las formas de las líneas restringen la rotación, la presión y la turbulencia.[1] Pero la distancia es un problema de inferencia separado: un espectro químico no indica por sí mismo a qué distancia está la estrella. Ese límite conduce directamente a QTC-006, donde la geometría, las luminosidades calibradas y el corrimiento al rojo cosmológico construyen una escalera de evidencias muy distinta.

En qué punto estamos

> *La química estelar es creíble porque convergen vías distintas, e informativa porque a veces no convergen por completo. Los espectros de laboratorio, múltiples líneas estelares, los meteoritos y los modelos solares restringen la misma inferencia desde direcciones diferentes. La tensión solar restante muestra cómo es la ciencia de precisión cuando el método funciona pero el modelo está incompleto. A continuación llega otra magnitud remota: la distancia.*

Lo que sabemos y cómo lo sabemos

Los átomos y los iones tienen transiciones cuánticas características cuyas longitudes de onda pueden medirse en laboratorios e identificarse en espectros estelares. Esto permite establecer

especies químicas a partir de luz remota, mientras que los modelos de transferencia radiativa explican cómo se forman esos rasgos.[2,5,13]

La abundancia cuantitativa se infiere, no se observa directamente. La temperatura, la ionización, la excitación, la opacidad, la saturación, los datos atómicos y la estructura atmosférica afectan a las intensidades de las líneas, por lo que el trabajo moderno utiliza anchuras equivalentes o síntesis espectral junto con modelos atmosféricos y comprobaciones cruzadas entre múltiples diagnósticos.[1,12,13]

Para el Sol, los modelos fotosféricos actuales siguen respaldando el resultado general de la época de Payne, según el cual el hidrógeno y el helio dominan en masa, al tiempo que proporcionan valores modernos dependientes de modelos cercanos al 74,4% de H, el 24,2% de He y el 1,4% de elementos más pesados.[11]

Lo que todavía no sabemos

- El problema de la abundancia y el modelado solares sigue sin resolverse: la mejor composición superficial, la estructura heliosísmica y los cálculos de opacidad radiativa aún no forman una imagen de alta precisión completamente coherente.
- Para muchas estrellas y elementos, las incertidumbres de abundancia todavía están limitadas por los datos atómicos, la estructura atmosférica, la física fuera del LTE, las mezclas de líneas y la calidad de la señal, no por una única fuente universal de error.
- Los espectros superficiales no revelan en general directamente la composición del núcleo estelar, y los cambios evolutivos pueden complicar la relación entre la abundancia fotosférica actual y la composición natal.

Qué podría hacernos cambiar de opinión

- Nuevos datos de espectroscopia de laboratorio o cálculos atómicos que revisaran sistemáticamente probabilidades de transición, tasas de colisión o identidades de líneas se propagarían a las escalas de abundancias estelares.
- Una nueva generación de modelos 3D y fuera del LTE que desplazara las abundancias solares o estelares de referencia más allá de las incertidumbres actuales actualizaría la composición cuantitativa sin modificar los espectros observados.
- Un modelo solar autoconsistente que satisficiera simultáneamente las restricciones espectroscópicas, heliosísmicas, de neutrinos y de opacidad podría cerrar el problema actual de la abundancia solar o revelar que el responsable es otro ingrediente ausente.

Si solo recuerdas una cosa

Un espectro estelar es la observación, no la composición: la química solo emerge cuando la física atómica, los modelos atmosféricos y las comprobaciones independientes convierten patrones de luz en inferencias de abundancia restringidas por la evidencia.

Artículos relacionados

- QTC-001 — Todo lo que ves pertenece al pasado
- QTC-004 — ¿Dónde se fabricaron los átomos de tu cuerpo?

Referencias

[1] David F. Gray. The Observation and Analysis of Stellar Photospheres, 4th ed.. 2021. DOI 10.1017/9781009082136. https://doi.org/10.1017/9781009082136

[2] NIST ASD Team. Atomic Spectra Database, SRD 78, v5.12. 2024 update. DOI 10.18434/T4W30F. https://physics.nist.gov/asd

[3] Joseph von Fraunhofer. Bestimmung des Brechungs- und Farbenzerstreuungs-Vermögens verschiedener Glasarten.... 1814. https://books.google.com/books?id=HQk68aXiqeQC

[4] Fraunhofer-Gesellschaft. Joseph von Fraunhofer — Fraunhofer Lines. 2026 consulted. https://www.fraunhofer.de/en/about-fraunhofer/profile-structure/chronicles/joseph-von-fraunhofer.html

[5] G. Kirchhoff; R. Bunsen. Chemische Analyse durch Spectralbeobachtungen. 1861. DOI 10.1002/jlac.18611180314. https://doi.org/10.1002/jlac.18611180314

[6] M. Saha. Ionisation in the Solar Chromosphere. 1920. DOI 10.1038/105232b0. https://doi.org/10.1038/105232b0

[7] Megh Nad Saha. Ionization in the Solar Chromosphere. 1920. DOI 10.1080/14786441008636148. https://doi.org/10.1080/14786441008636148

[8] Cecilia H. Payne. Stellar Atmospheres: A Contribution to the Observational Study of High Temperature in the Reversing Layers of Stars. 1925. https://www.gutenberg.org/cache/epub/73996/pg73996-images.html

[9] Henry Norris Russell. On the Composition of the Sun’s Atmosphere. 1929. DOI 10.1086/143197. https://doi.org/10.1086/143197

[10] Annie Jump Cannon; Edward C. Pickering / Harvard College Observatory. The Henry Draper Catalogue. 1918–1924. https://www.si.edu/object/siris_sil_176585

[11] M. Asplund; A. M. Amarsi; N. Grevesse. The chemical make-up of the Sun: A 2020 vision. 2021. DOI 10.1051/0004-6361/202140445. https://doi.org/10.1051/0004-6361/202140445

[12] M. Asplund. New Light on Stellar Abundance Analyses: Departures from LTE and Homogeneity. 2005. DOI 10.1146/annurev.astro.42.053102.134001. https://doi.org/10.1146/annurev.astro.42.053102.134001

[13] Carlos Allende Prieto. Solar and stellar photospheric abundances. 2016. DOI 10.1007/s41116-016-0001-6. https://doi.org/10.1007/s41116-016-0001-6

[14] American Physical Society. August 18 and October 20, 1868: Discovery of Helium. 2014. https://www.aps.org/apsnews/2014/08/discovery-of-helium-1868

[15] American Astronomical Society / Harvard Plate Stacks. Cecilia Payne-Gaposchkin: history of thesis and Russell confirmation. 2022 / consulted 2026. https://aas.org/posts/news/2022/04/month-astronomical-history-april-2022

[16] William Crookes. The Spectrum of Helium. 1895. DOI 10.1038/052428a0. https://doi.org/10.1038/052428a0

[17] Auguste Comte. Cours de philosophie positive, Tome II. 1835. https://www.gutenberg.org/cache/epub/31882/pg31882-images.html

[18] Center for Astrophysics | Harvard & Smithsonian, Wolbach Library. Astronomy and Spectroscopy — Annie Jump Cannon. 2018 / consulted 2026. https://platestacks.cfa.harvard.edu/annie-jump-cannon/astronomy-and-spectroscopy

[19] Center for Astrophysics | Harvard & Smithsonian, Harvard Plate Stacks. Antonia Maury — stellar spectral classification. consulted 2026. https://platestacks.cfa.harvard.edu/women-at-hco/antonia-maury

[20] G. Buldgen; P. Eggenberger; A. Noels; R. Scuflaire; A. M. Amarsi; N. Grevesse; S. Salmon. Higher metal abundances do not solve the solar problem. 2023. DOI 10.1051/0004-6361/202245448. https://doi.org/10.1051/0004-6361/202245448

[21] G. Buldgen et al. Helioseismic inference of the solar radiative opacity. 2025. DOI 10.1038/s41467-024-54793-y. https://doi.org/10.1038/s41467-024-54793-y

¿A qué distancia está el universo? La escalera de distancias cósmicas

QTC-006 · De los quarks a la consciencia

El universo, la vida y cómo llegamos a saberlo

Autor: Juan Segurola

Versión: v1.1 ES · 2 de septiembre de 2026

Perfil epistémico: Problema abierto

Licencia: All Rights Reserved

Resumen del artículo

No existe una única operación llamada medir «la distancia al universo». La astronomía mide distancias a estrellas, galaxias y superficies concretas mediante observables distintos a escalas distintas. La geometría cercana empieza con la paralaje; anclas geométricas en la Gran Nube de Magallanes y NGC 4258 calibran las Cefeidas; las Cefeidas calibran supernovas de tipo Ia; y las supernovas alcanzan el flujo de Hubble suave. Por eso el trabajo moderno de precisión se parece menos a una escalera simple que a una red de calibración con covarianzas y comprobaciones cruzadas. El corrimiento al rojo no es por sí mismo una distancia, y la cosmología utiliza varias definiciones de distancia para observables distintos. El artículo termina con la tensión de Hubble: una discrepancia real y no resuelta entre mediciones de distancia del universo tardío e inferencias del universo temprano bajo ΛCDM base, sin que se haya demostrado todavía ni un error sistemático ni un descubrimiento de nueva física.

En 60 segundos

Los astrónomos no pueden tender una cinta métrica hasta otra galaxia. Infieren la distancia a partir de observables cuya física ha sido calibrada. Una estrella cercana se desplaza respecto al fondo cuando la Tierra se mueve alrededor del Sol: la paralaje proporciona una escala geométrica. Otras anclas geométricas, entre ellas binarias eclipsantes en la Gran Nube de Magallanes y máseres de agua en NGC 4258, calibran estrellas variables Cefeidas. Las Cefeidas calibran después supernovas de tipo Ia, suficientemente brillantes para alcanzar galaxias que participan en la expansión cósmica general. A bajo corrimiento al rojo, distancia y recesión siguen aproximadamente la relación de Hubble–Lemaître, pero el corrimiento al rojo por sí solo no es una distancia a escalas cosmológicas. Hoy la escalera clásica es una red de indicadores, incertidumbres y covarianzas superpuestos. Esa red también revela un problema no resuelto: las mediciones locales, alrededor de 73 km s^{-1} Mpc^{-1}, siguen por encima de los aproximadamente 67,4 km s^{-1} Mpc^{-1} inferidos de los datos de Planck bajo el modelo ΛCDM base. La discrepancia sigue sin resolverse y bajo examen activo.

Por qué importa esta pregunta

La distancia es la coordenada oculta de la astronomía. Sin ella, un brillo observado no puede convertirse en luminosidad, un tamaño angular no puede convertirse en tamaño físico y el

corrimiento al rojo de una galaxia no puede situarse con fiabilidad en una historia de expansión cósmica. La escala de distancias también ofrece un ejemplo de manual de cómo funciona la ciencia cuando ninguna medición alcanza por sí sola todo el problema: métodos independientes se solapan, se calibran entre sí y hacen visibles las discrepancias. La tensión de Hubble actual importa porque una pequeña discordancia en esa red puede señalar tanto sistemáticas sutiles como un modelo cosmológico incompleto.

1. ¿Distancia a qué?

La pregunta

Cuando alguien pregunta a qué distancia está «el universo», ¿qué se supone exactamente que debe medirse: una estrella, una galaxia, la superficie que emitió el fondo cósmico de microondas, el horizonte de partículas o un borde imaginado? Son preguntas distintas.

La astronomía suele medir la distancia a un objeto o a una superficie emisora concreta, no una distancia maestra única al universo. Incluso entonces, la palabra distancia cambia de significado con el observable. Para una estrella cercana, la geometría puede relacionar un ángulo con una longitud. Para una candela estándar, se compara el flujo observado con una luminosidad calibrada. En cosmología relativista, la distancia de luminosidad, la distancia de diámetro angular y la distancia comóvil responden a preguntas operativas diferentes.[1]

Por eso la escalera de distancias cósmicas no debe confundirse con el radio del universo observable. Una escalera enlaza escalas geométricas locales con objetos progresivamente más lejanos. Los horizontes y la extensión espacial global pertenecen a otro problema cosmológico. La distinción no es pedante: mezclarlos hace parecer que una técnica debería acabar alcanzando una pared exterior literal. No ocurre así.[1]

Tampoco la distancia se «lee» simplemente a partir del corrimiento al rojo. A bajo corrimiento al rojo, recesión y distancia son aproximadamente proporcionales, pero el corrimiento al rojo cosmológico es un observable que debe interpretarse mediante un modelo o una relación de distancia calibrada. La inferencia cambia con la escala.[1,18]

En qué punto estamos

La primera corrección es conceptual: no existe una sola regla para todo el universo ni una única magnitud de distancia que cada observación esté midiendo en secreto. La astronomía construye distancias a partir de observables distintos cuyos dominios se solapan. La escalera es, por tanto, una cadena de inferencias, no una cinta métrica extendida por el espacio. Su credibilidad depende de lo bien que esas inferencias se calibren entre sí.

2. Geometría: el primer peldaño

La pregunta

¿Puede medirse alguna distancia astronómica solo con geometría, antes de invocar cuánto debería brillar una estrella? Las estrellas cercanas ofrecen el ejemplo más limpio: la propia Tierra proporciona la línea de base y el cielo proporciona el ángulo.

La paralaje trigonométrica anual utiliza el cambio de posición del observador mientras la Tierra se mueve alrededor del Sol. Una estrella cercana parece desplazarse respecto a fuentes de fondo más lejanas. En la definición ideal de ángulo pequeño, una paralaje de un segundo de arco corresponde a un pársec, de modo que la distancia en pársecs es el recíproco de la paralaje en segundos de arco. [2,3]

El resultado de Friedrich Bessel de 1838 para 61 Cygni se convirtió en la primera paralaje estelar ampliamente aceptada. No volvió irrelevantes todos los intentos anteriores o casi simultáneos; mostró, más bien, que las distancias estelares podían ligarse a una línea de base geométrica de forma cuantitativamente convincente.[2]

Gaia ha transformado ese peldaño al medir paralajes para aproximadamente 1.500 millones de fuentes. La precisión, sin embargo, no elimina la calibración. Las paralajes de Gaia contienen pequeños sesgos de punto cero que varían con factores como magnitud, color y posición en el cielo. Con una relación señal/ruido alta, la conversión recíproca habitual funciona extremadamente bien; cuando la incertidumbre llega a ser comparable con la paralaje medida, la inversión simple puede volverse sesgada o patológica y se necesita inferencia probabilística con priors explícitos. [3,4,22]

La escalera moderna también utiliza anclas geométricas más allá de la paralaje de la Vía Láctea. Binarias eclipsantes separadas en la Gran Nube de Magallanes dieron 49,59 ± 0,09(estat) ± 0,54(sist) kpc en un análisis de 2019.[6] Megamáseres de agua que orbitan el agujero negro central de NGC 4258 ofrecen otra ruta geométrica; Reid, Pesce y Riess obtuvieron 7,576 ± 0,082(estat) ± 0,076(sist) Mpc.[7] Aquí «geométrico» significa que la geometría orbital o eclipsante porta la escala, no que desaparezcan el modelado y las sistemáticas.

En qué punto estamos

> *El primer peldaño es geométricamente potente, pero no está mágicamente libre de supuestos. La paralaje convierte un ángulo en distancia solo después de tratar correctamente calibración e incertidumbre, mientras que las binarias eclipsantes y los megamáseres aportan anclas geométricas independientes con sus propios modelos. Su valor reside precisamente en que geometrías distintas pueden converger sobre el mismo peldaño siguiente en lugar de obligar a que toda la escala pase por un único instrumento.*

3. El puente de Leavitt

La pregunta

> *La geometría no puede alcanzar directamente todas las galaxias. ¿Qué clase de estrella podría transportar hacia fuera una escala de distancia calibrada sin fingir que todas las estrellas tienen la misma luminosidad? Una estrella variable cuyo ritmo predice su luminosidad puede convertirse en ese puente.*

Henrietta Swan Leavitt estudió estrellas variables en la Pequeña Nube de Magallanes y comunicó en 1912 que las variables de periodo más largo eran sistemáticamente más brillantes. Como las estrellas de aquella muestra estaban aproximadamente a la misma distancia, el patrón de brillo aparente revelaba una relación intrínseca entre periodo de pulsación y luminosidad.[5]

Leavitt trabajó dentro del mismo programa fotográfico de Harvard que también incluyó a mujeres como Annie Jump Cannon y Antonia Maury. La continuidad es útil: QTC-005 siguió ese programa desde la clasificación hacia la física estelar, mientras que aquí la misma cultura de placas conduce desde la medición de estrellas variables hasta la distancia cósmica.[25] Pero el resultado de Leavitt de 1912 no proporcionó por sí mismo un punto cero absoluto moderno. La geometría tuvo que calibrar la relación antes de que las Cefeidas pudieran convertirse en indicadores cuantitativos de distancia.

Por tanto, una Cefeida es estandarizable, no una lámpara con una potencia universal. Su periodo de pulsación predice la luminosidad mediante una relación calibrada, mientras que siguen importando la extinción, la metalicidad, el crowding, la calibración del detector y la banda espectral. Las Cefeidas ancladas geométricamente calibran después Cefeidas en galaxias que han albergado supernovas de tipo Ia, transfiriendo la escala absoluta al siguiente régimen de distancias.[8,10]

En qué punto estamos

El descubrimiento de Leavitt proporcionó un puente, no una regla cósmica autosuficiente. La relación periodo–luminosidad se convierte en herramienta de distancia solo después de que la geometría fije su punto cero y se propaguen los efectos observacionales. Esa distinción importa en toda la escalera: la fuerza de un indicador no consiste en eliminar la calibración, sino en transferirla a un régimen que el método anterior no puede alcanzar.

4. Las supernovas alcanzan el flujo de Hubble

Las Cefeidas son brillantes, pero las supernovas de tipo Ia son órdenes de magnitud más brillantes. Su utilidad procede de otra relación de estandarización. No son explosiones idénticas con una luminosidad máxima exacta; la forma de la curva de luz se correlaciona con el brillo intrínseco, y los análisis modernos también corrigen color y efectos de población. La relación clásica de Phillips hizo explícita esa estandarización empírica.[9]

Cuando una supernova de tipo Ia aparece en una galaxia cuya distancia ya ha sido fijada por Cefeidas, puede calibrarse la luminosidad de la supernova. Supernovas similares en galaxias mucho más lejanas transportan entonces esa escala hacia fuera. Esta es la conocida ruta geometría → Cefeida → supernova de la escalera local de distancias.[8,10]

El alcance importa porque las galaxias muy próximas tienen velocidades peculiares debidas a movimientos gravitatorios locales que pueden constituir una fracción sustancial de su velocidad de recesión. Más adentro en el flujo de Hubble, esos movimientos locales pasan a ser una perturbación fraccional menor. Las supernovas de tipo Ia son suficientemente luminosas para poblar ese régimen y seguir siendo observables en muestras grandes.[8,10]

En qué punto estamos

La escalera clásica abarca ahora tres tipos de inferencia: la geometría establece una escala local, las Cefeidas transfieren esa escala entre poblaciones estelares y las supernovas estandarizadas la llevan al flujo de Hubble. Ningún peldaño es perfecto por sí solo. Su solapamiento permite la siguiente comparación: las distancias de supernovas calibradas pueden confrontarse con el corrimiento al rojo allí donde los movimientos peculiares locales ya no dominan.

5. Corrimiento al rojo, distancia y expansión

A corrimientos al rojo suficientemente bajos, la relación de Hubble–Lemaître es aproximadamente lineal: la velocidad de recesión inferida del corrimiento al rojo aumenta con la distancia mediante la constante de Hubble H_0. Las velocidades peculiares cercanas añaden dispersión, otra razón para no tratar un corrimiento al rojo muy local como una distancia independiente.[13,14,18]

La historia también está más repartida de lo que sugiere el atajo «Hubble descubrió la expansión». Georges Lemaître derivó en 1927 una relación distancia–velocidad para un universo en expansión. El artículo de Edwin Hubble de 1929 estableció la relación observacional con una muestra compilada mayor. El nombre moderno ley de Hubble–Lemaître refleja esa historia compartida, dentro de una cadena más amplia que incluye las mediciones anteriores de corrimiento al rojo de Slipher y la cosmología relativista.[13,14]

A corrimientos al rojo mayores deja de ser defendible escribir $cz \approx H_0 d$ como si fuese exacto. El corrimiento al rojo cosmológico refleja la evolución del factor de escala a lo largo del trayecto de la luz, y convertirlo en distancia exige un modelo cosmológico o una relación empírica. Incluso entonces hay más de una distancia útil. La distancia de luminosidad se define de modo que el flujo siga $F=L/(4\pi D_L^2)$; la distancia de diámetro angular convierte un ángulo observado en un tamaño físico transversal; la distancia comóvil describe una separación de coordenadas tratando de forma distinta la expansión cósmica.[1]

Estas magnitudes no son conjeturas rivales sobre una «distancia verdadera» oculta. Son definiciones operativas adecuadas a observaciones distintas en un espacio-tiempo curvo y en expansión.[1]

En qué punto estamos

> *El corrimiento al rojo extiende la historia de las distancias hacia la cosmología, pero no sustituye la escalera por un número espectral. La relación de Hubble–Lemaître a bajo corrimiento al rojo funciona porque la distancia ya ha sido calibrada de forma independiente. A mayor corrimiento al rojo, la correspondencia depende de la dinámica cosmológica y de la distancia operativa necesaria. Esa dependencia explica por qué el trabajo de precisión debe convertirse en una red de rutas superpuestas y no en una escalera recta.*

6. Una escalera que se convirtió en red

La palabra escalera sugiere una única ruta con un peldaño sobre otro. La cosmología de precisión se parece cada vez más a una red. Varias anclas geométricas alimentan distintos indicadores estelares, que conectan con supernovas y otras sondas. Algunas incertidumbres de calibración son independientes; otras se comparten. La estructura de covarianza importa porque añadir más rutas no añade automáticamente información plenamente independiente.[19,20]

La punta de la rama de gigantes rojas, o TRGB, proporciona un indicador estelar alternativo. Las gigantes rojas de baja masa alcanzan una característica de luminosidad muy marcada cuando la ignición del helio cambia su evolución. En poblaciones adecuadas, ese corte puede calibrarse y utilizarse como marcador de distancia, con sus propias dependencias de banda, color, metalicidad, selección de población y punto cero fotométrico.[15,11]

Las sirenas estándar de ondas gravitacionales ofrecen una comprobación todavía más distinta. La forma de onda contiene información sobre la distancia de luminosidad sin una escalera electromagnética de distancias. Pero extraer H_0 sigue exigiendo información de corrimiento al rojo, y el resultado depende de factores como la inclinación de la fuente, la identificación de la galaxia anfitriona y las velocidades peculiares.[16]

Las oscilaciones acústicas bariónicas, o BAO, proporcionan una tercera ruta. El patrón de agrupamiento de las galaxias conserva una escala preferente fijada por el horizonte sonoro del universo temprano. Cuando las BAO se combinan con información de nucleosíntesis del Big Bang y con restricciones adicionales del universo tardío, como supernovas o estructura a gran escala, pueden formar una escalera inversa de distancias e inferir H_0 sin utilizar mapas de anisotropías del CMB ni la escalera local de Cefeidas. Combinaciones independientes de las anisotropías del CMB bajo ΛCDM plano han obtenido H_0 en torno a 67–68 km s^{-1} Mpc^{-1}.[26,27] Esta independencia no significa ausencia de supuestos: la calibración del horizonte sonoro sigue dependiendo de la física previa a la recombinación y del marco cosmológico adoptado.

Por eso un programa moderno de distancias se describe mejor como una red de calibración que como una única cadena frágil. Las Cefeidas pueden contrastarse con TRGB u otros indicadores estelares; pueden combinarse anclas geométricas; la calibración de supernovas puede propagarse con covarianzas explícitas; y sondas completamente distintas pueden poner a prueba el resultado desde fuera de la escalera clásica.[19,20]

En qué punto estamos

> *La escala moderna de distancias gana fuerza gracias a la redundancia. TRGB, Cefeidas, máseres, binarias eclipsantes, supernovas, sirenas estándar y escaleras inversas basadas en BAO no comparten exactamente los mismos supuestos, pero tampoco son perfectamente independientes. La tarea consiste en cartografiar esas covarianzas. Cuando rutas ancladas en épocas distintas convergen —o no lo hacen—, la discrepancia señala qué calibración o qué modelo físico merece la siguiente atención.*

7. Dos números que no quieren coincidir

La discrepancia más conocida es numérica. La escalera Cefeidas–supernovas de SH0ES comunicó $H_0 = 73{,}04 \pm 1{,}04$ km s^{-1} Mpc^{-1} en 2022.[10] Los datos del fondo cósmico de microondas de Planck, analizados bajo ΛCDM plano base, implican $H_0 = 67{,}4 \pm 0{,}5$ km s^{-1} Mpc^{-1}.[12] No son dos instrumentos apuntando a la misma regla. Uno es una medición de distancias calibrada del universo tardío; el otro es una inferencia del universo temprano cuya conversión a H_0 depende del modelo cosmológico.

Esa distinción define la tensión de Hubble con más precisión que la frase «dos mediciones discrepan». La comparación reúne distancias del universo tardío, física del universo temprano y varias rutas independientes, cada una con supuestos y sistemáticas diferentes.[18,19,20,26,27] Combinaciones BAO+BBN independientes de las anisotropías del CMB también han obtenido H_0 alrededor de 67–68 km s^{-1} Mpc^{-1} bajo supuestos ΛCDM, de modo que el valor bajo no es un artefacto exclusivo de Planck.[27]

JWST ha puesto a prueba una preocupación importante de la ruta de Cefeidas: el crowding y la mezcla de fuentes no resueltas. Las comparaciones de alta resolución no han revelado en las

muestras estudiadas un sesgo de crowding del HST suficientemente grande para borrar la tensión.[17] Al mismo tiempo, el programa Chicago–Carnegie ha obtenido valores menores de H_0 mediante rutas TRGB y JAGB, con incertidumbres mayores, y su informe de 2025 fue seguido por una fe de erratas publicada que debe acompañar cualquier cita numérica precisa de ese análisis.[11,23] A fecha de 2026, los reanálisis metodológicos y las síntesis comunitarias siguen discrepando sobre qué valor local y qué tratamiento de incertidumbres son más defendibles.[19,20,21]

Si esa discrepancia sobrevive a calibraciones cada vez más independientes, lo que está en juego va más allá de un parámetro. Las inferencias del universo temprano utilizan el horizonte sonoro como escala calibrada. Por ello, las direcciones candidatas de nueva física incluyen cambios en la expansión o en el contenido de radiación antes de la recombinación —como comportamientos semejantes a energía oscura temprana o especies relativistas adicionales— que podrían modificar el horizonte sonoro y desplazar el H_0 inferido.[18,24] Son direcciones de investigación, no explicaciones establecidas. Sigue siendo posible una resolución sistemática ordinaria; también un fallo más interesante del modelo cosmológico base.

En qué punto estamos

La tensión de Hubble es importante precisamente porque su interpretación sigue abierta. No se ha demostrado que la escalera local esté equivocada, Planck no ha medido directamente una regla local y ninguna nueva física propuesta se ha impuesto. Lo que persiste es una discrepancia calibrada entre rutas que interrogan épocas diferentes. Resolverla exige mejores comprobaciones cruzadas, no elegir por preferencia uno de los números.

Lo que sabemos y cómo lo sabemos

- Las distancias a estrellas cercanas pueden ligarse a la geometría de la paralaje anual; la calibración y la inferencia estadística determinan cómo las paralajes medidas se convierten en distancias.[2–4,22]
- Anclas geométricas independientes en la LMC y NGC 4258 calibran la escala estelar de distancias más allá de la paralaje de la Vía Láctea.[6,7]
- Las Cefeidas y las supernovas de tipo Ia son indicadores estandarizables cuyas galaxias anfitrionas solapadas transfieren la escala absoluta hasta el flujo de Hubble.[8–10]
- El trabajo moderno de precisión es una red de covarianzas, no una única escalera, lo que permite que indicadores estelares alternativos, sirenas estándar y escaleras inversas basadas en BAO contrasten el resultado.[15,16,19,20,26,27]
- Un cambio en el valor numérico preferido de H_0 no invalidaría por sí mismo el método: el método es la ruta calibrada desde observables hasta distancias con incertidumbre explícita, mientras que H_0 es un resultado que puede cambiar cuando mejoran calibración y modelado.[18,19]

Lo que todavía no sabemos

- Si la tensión de Hubble actual está dominada por efectos observacionales o sistemáticos no reconocidos, por elecciones de modelado estadístico, por un modelo incompleto del universo temprano o por alguna combinación de ellos.

- Qué indicadores locales de distancia y qué tratamientos de covarianza proporcionarán el H_0 al uno por ciento más estable a medida que JWST y futuros sondeos amplíen la red de calibración.
- Si cambios candidatos anteriores a la recombinación, como energía oscura temprana o radiación adicional, pueden ajustar el conjunto completo de datos cosmológicos en lugar de limitarse a desplazar H_0.

Qué podría hacernos cambiar de opinión

- Un desplazamiento de calibración reproducible en anclas, Cefeidas, supernovas o indicadores alternativos que lleve rutas independientes del universo tardío a un acuerdo consistente con la inferencia del universo temprano.
- Una convergencia comunitaria de métodos independientes de escalera de distancias, sirenas estándar y escalera inversa sobre un H_0 común con covarianza controlada.
- Evidencia convergente de que ΛCDM base falla específicamente en la física previa a la recombinación, junto con un nuevo modelo que prediga el desplazamiento requerido del horizonte sonoro y sobreviva a otras pruebas cosmológicas.
- Futuros datos de Gaia, JWST, ondas gravitacionales y sondeos que revelen una sistemática antes oculta o, por el contrario, agudicen la discrepancia más allá de la libertad de modelado actual.

Si solo recuerdas una cosa

> *La distancia cósmica no se lee de un único observable: se construye mediante calibraciones superpuestas, y las discrepancias entre esas calibraciones pueden ser tan informativas como los acuerdos.*

Artículos relacionados

- QTC-001 — Todo lo que ves pertenece al pasado
- QTC-005 — ¿Cómo sabemos de qué están hechas las estrellas?
- QTC-011 — La luz más antigua que podemos observar
- QTC-015 — Las estrellas que nunca hemos visto

Referencias

[1] David W. Hogg. Distance measures in cosmology. 1999 (updated versions online). https://arxiv.org/abs/astro-ph/9905116

[2] Friedrich W. Bessel. On the Parallax of 61 Cygni. 1838. DOI 10.1093/mnras/4.17.152. https://doi.org/10.1093/mnras/4.17.152

[3] L. Lindegren et al. Gaia Early Data Release 3: Parallax bias versus magnitude, colour, and position. 2021. DOI 10.1051/0004-6361/202039653. https://doi.org/10.1051/0004-6361/202039653

[4] Coryn A. L. Bailer-Jones. Estimating distances from parallaxes. 2015. DOI 10.1086/683116. https://arxiv.org/abs/1507.02105

[5] Henrietta S. Leavitt; Edward C. Pickering. Periods of 25 Variable Stars in the Small Magellanic Cloud. 1912. https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1912HarCi.173....1L/abstract

[6] G. Pietrzyński et al. A distance to the Large Magellanic Cloud that is precise to one per cent. 2019. DOI 10.1038/s41586-019-0999-4. https://doi.org/10.1038/s41586-019-0999-4

[7] M. J. Reid; D. W. Pesce; A. G. Riess. An Improved Distance to NGC 4258 and Its Implications for the Hubble Constant. 2019. DOI 10.3847/2041-8213/ab552d. https://doi.org/10.3847/2041-8213/ab552d

[8] Adam G. Riess; Louise Breuval. The Local Value of H0. 2024. https://www.cambridge.org/core/journals/proceedings-of-the-international-astronomical-union/article/local-value-of-h0/75DBDCF94208B500A14452478D7679AE

[9] M. M. Phillips. The absolute magnitudes of Type IA supernovae. 1993. DOI 10.1086/186970. https://doi.org/10.1086/186970

[10] Adam G. Riess et al. A Comprehensive Measurement of the Local Value of the Hubble Constant with 1 km s−1 Mpc−1 Uncertainty from the Hubble Space Telescope and the SH0ES Team. 2022. DOI 10.3847/2041-8213/ac5c5b. https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2022ApJ...934L...7R/abstract

[11] Wendy L. Freedman et al. Status Report on the Chicago-Carnegie Hubble Program: Measurement of the Hubble Constant Using the Hubble and James Webb Space Telescopes. 2025. DOI 10.3847/1538-4357/adce78. https://doi.org/10.3847/1538-4357/adce78

[12] Planck Collaboration. Planck 2018 results VI. Cosmological parameters. 2020. DOI 10.1051/0004-6361/201833910. https://doi.org/10.1051/0004-6361/201833910

[13] Edwin Hubble. A relation between distance and radial velocity among extra-galactic nebulae. 1929. DOI 10.1073/pnas.15.3.168. https://doi.org/10.1073/pnas.15.3.168

[14] International Astronomical Union. IAU members vote to recommend renaming the Hubble law as the Hubble–Lemaître law. 2018. https://iauarchive.eso.org/news/pressreleases/detail/iau1812/

[15] M. G. Lee; W. L. Freedman; B. F. Madore. The Tip of the Red Giant Branch as a Distance Indicator for Resolved Galaxies. 1993. DOI 10.1086/173334. https://doi.org/10.1086/173334

[16] LIGO Scientific Collaboration; Virgo Collaboration et al. A gravitational-wave standard siren measurement of the Hubble constant. 2017. DOI 10.1038/nature24471. https://doi.org/10.1038/nature24471

[17] Adam G. Riess et al. JWST Observations Reject Unrecognized Crowding of Cepheid Photometry as an Explanation for the Hubble Tension at 8 sigma Confidence. 2024. DOI 10.48550/arXiv.2401.04773. https://arxiv.org/abs/2401.04773

[18] Licia Verde; Nils Schöneberg; Héctor Gil-Marín. A Tale of Many H0. 2024. DOI 10.1146/annurev-astro-052622-033813. https://doi.org/10.1146/annurev-astro-052622-033813

[19] Xiaodian Chen; Shu Wang. Distance-ladder Measurements of the Hubble Constant: Recent Progress, Systematics, and Prospect. 2026. DOI 10.1088/1674-4527/ae842e. https://www.raa-journal.org/issues/all/2026/v26n8/SpecialIssueArticles/202607/t20260716_849824.html

[20] S. Casertano et al. The Local Distance Network: A community consensus report on the measurement of the Hubble constant at ~1% precision. 2026. DOI 10.1051/0004-6361/202557993. https://doi.org/10.1051/0004-6361/202557993

[21] Marcus Högas; Edvard Mörtsell. Physically motivated priors in the local distance ladder significantly reduce the Hubble tension. 2026. DOI 10.1093/mnras/stag724. https://doi.org/10.1093/mnras/stag724

[22] ESA / Gaia DPAC. Gaia Data Release 3 Documentation, release 1.3. 2023–2026 consulted. https://gea.esac.esa.int/archive/documentation/GDR3/

[23] Wendy L. Freedman et al. Erratum: “Status Report on the Chicago-Carnegie Hubble Program (CCHP): Measurement of the Hubble Constant Using the Hubble and James Webb Space Telescopes” (2025, ApJ, 985, 203). 2025. DOI 10.3847/1538-4357/ae146d. https://doi.org/10.3847/1538-4357/ae146d

[24] Eleonora Di Valentino et al. In the realm of the Hubble tension—a review of solutions. 2021. DOI 10.1088/1361-6382/ac086d. https://doi.org/10.1088/1361-6382/ac086d

[25] Center for Astrophysics | Harvard & Smithsonian. Henrietta Swan Leavitt / Harvard Plate Stacks historical record. consulted 2026. https://platestacks.cfa.harvard.edu/women-at-hco/henrietta-swan-leavitt

[26] Pablo Lemos; Elizabeth Lee; George Efstathiou; Steven Gratton. Model independent H(z) reconstruction using the cosmic inverse distance ladder. 2019. DOI 10.1093/mnras/sty3082. https://doi.org/10.1093/mnras/sty3082

[27] T. M. C. Abbott et al.; Dark Energy Survey and South Pole Telescope Collaborations. Dark Energy Survey Year 1 Results: A Precise H0 Estimate from DES Y1, BAO, and D/H Data. 2018. DOI 10.1093/mnras/sty1939. https://doi.org/10.1093/mnras/sty1939

El tiempo profundo

QTC-007 · De los quarks a la consciencia

El universo, la vida y cómo llegamos a saberlo

Autor: Juan Segurola

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

Perfil epistémico: Conocimiento establecido

Licencia: All Rights Reserved

Resumen del artículo

La edad de la Tierra no se descubrió en un único experimento. Antes de contar años, la geología aprendió a ordenar sucesos: una capa sobre otra, una intrusión que corta una roca anterior, una asociación fósil que sustituye a otra. Cronologías textuales, cálculos de enfriamiento, discordancias, evolución y física térmica compitieron después por determinar cuánto tiempo exigía esa secuencia. La radiactividad proporcionó finalmente relojes numéricos, pero solo cuando se controlaron sus supuestos y los problemas de contaminación. La edad resultante, 4,54 mil millones de años, no se lee en la roca más antigua conservada; surge de meteoritos, isótopos de plomo y una red de evidencias geológicas. La historia corrige además tres simplificaciones: la cronología de Ussher fue erudición seria dentro de otro marco probatorio, la radiactividad por sí sola no corrigió a Kelvin y el carbono-14 no puede fechar un planeta.

En 60 segundos

El tiempo profundo llegó en dos etapas. Primero, los geólogos aprendieron el orden de los acontecimientos sin conocer su edad en años. Los principios estratigráficos de Steno, los ciclos de Hutton, las discordancias y la sucesión fósil de William Smith convirtieron las rocas en historia legible. Después se intentó medir su duración. Los experimentos de enfriamiento de Buffon, el cálculo erosivo de Darwin y el modelo térmico de Kelvin dieron respuestas muy distintas porque dependían de supuestos sobre tasas y transporte de calor. Perry mostró en 1895 que el modelo conductivo de Kelvin era demasiado restrictivo; la idea popular de que la radiactividad lo resolvió por sí sola es incompleta. La desintegración radiactiva aportó luego relojes cuantitativos. Boltwood y Holmes alcanzaron escalas de miles de millones de años, y Patterson obtuvo 4,55 ± 0,07 mil millones, cerca del valor moderno de 4,54 ± 0,05. Esa precisión también reveló contaminación por plomo en el laboratorio y el ambiente. El tiempo profundo es una reconstrucción convergente, no una cifra extraída de una sola roca.

Por qué importa esta pregunta

La historia humana parece larga porque la vida individual es nuestra unidad natural. La historia terrestre casi elimina esa escala: las civilizaciones ocupan un intervalo superficial en un planeta de más de cuatro mil quinientos millones de años. Comprender cómo se obtuvo esa conclusión importa más allá de la geología. Muestra por qué un razonamiento correcto puede producir una cifra errónea cuando faltan pruebas o el modelo es incompleto, cómo el desacuerdo entre disciplinas descubre

supuestos ocultos y por qué la precisión empieza a veces al descubrir que el propio entorno de medida está contaminado.

1. Un mundo medido a partir de textos

La pregunta

¿Fue la Tierra joven de Ussher simplemente una creencia absurda a la espera de una corrección científica, o una conclusión disciplinada producida por otra regla sobre la evidencia? La distinción importa porque la geología cambió no solo la respuesta, sino también qué archivos podían responder a la pregunta.

En el siglo XVII, el arzobispo James Ussher situó la Creación en 4004 a. C. Hoy se usa a menudo esa fecha como chiste, pero esa lectura confunde un cambio en la base probatoria con una falta de inteligencia. Ussher sincronizó genealogías bíblicas, años de reinado y cronologías del mundo antiguo. Dentro de un marco que consideraba la Escritura como archivo histórico primario, el proyecto fue una investigación sistemática.[28,29]

Su debilidad no era una aritmética descuidada. Era que el archivo permitido resultaba demasiado estrecho para la historia de un planeta. Las rocas, los fósiles, el flujo de calor y las razones isotópicas todavía no se aceptaban como documentos capaces de desplazar una cronología textual. La revolución posterior cambió tanto la respuesta como las reglas sobre qué podía contar como prueba.

Es el mismo movimiento epistémico que aparece en otras ciencias. Una conclusión puede ser racional respecto al acceso disponible y derrumbarse cuando se admite un nuevo instrumento o una nueva clase de huella. El tiempo profundo sacó la historia humana y bíblica de la escala de la historia terrestre, no porque las personas posteriores fueran más inteligentes, sino porque el propio planeta se volvió legible.

En qué punto estamos

Los 4004 a. C. de Ussher fueron una respuesta disciplinada a una pregunta definida por textos. La geología no se limitó a añadir más años; amplió el archivo. Cuando capas, fósiles, erosión y procesos físicos se convirtieron en evidencia histórica, la Tierra adquirió una historia independiente del testimonio escrito. El cambio decisivo fue epistémico: el planeta se convirtió en documento.

2. Antes de los años llegó el orden

Una edad numérica no es el primer requisito para reconstruir una historia. La datación relativa pregunta qué acontecimiento ocurrió antes que otro. En una secuencia no alterada, una capa sedimentaria inferior es más antigua que la situada encima; una intrusión es posterior a la roca que corta; una superficie de erosión es posterior a las rocas truncadas bajo ella y anterior a los depósitos que la cubren.[1]

La obra de Nicolaus Steno de 1669 formuló principios fundamentales como la superposición y la horizontalidad original. Las capas se depositan en un orden, y su inclinación o plegamiento actuales registran sucesos posteriores. Estas reglas tienen condiciones y excepciones, pero convirtieron las relaciones entre rocas en una secuencia contrastable en el campo.[1,2]

La diferencia es esencial. Un historiador puede saber que un rey precedió a otro sin conocer el año exacto de ninguno. La geología también puede establecer una secuencia antes de medir el tiempo transcurrido. Los relojes numéricos calibran después ese orden; no lo sustituyen. Incluso la escala geológica moderna sigue siendo híbrida: relaciones estratigráficas más anclajes numéricos.

En qué punto estamos

> *El primer reloj de la geología no marcaba años. Registraba antes y después. La superposición, las relaciones de corte y otras huellas ordenaron la historia terrestre mucho antes de hacerla numérica. Es fácil infravalorar ese logro porque una secuencia sin fechas parece incompleta. En realidad, proporcionó la estructura en la que debía encajar toda edad radiométrica posterior.*

3. Rocas que exigían más tiempo

En el siglo XVIII, Georges-Louis Leclerc, conde de Buffon, calentó esferas metálicas, observó su enfriamiento y extrapoló el resultado a la Tierra. En Les Époques de la Nature (1778), su cálculo publicado llegó a unos 74.832 años.[3] La cifra era errónea por casi cinco órdenes de magnitud, pero el método era revolucionario: la duración terrestre se trataba como una magnitud física y no solo como una cronología leída.

James Hutton avanzó por otra vía. Su Theory of the Earth de 1788 describía ciclos repetidos de erosión, depósito, consolidación y levantamiento. Si los paisajes visibles eran producto de procesos que actuaban en ciclos, exigían duraciones muy superiores a la historia registrada. La Tierra cíclica de Hutton no era el relato moderno de un planeta con un inicio fechado, pero convirtió el tiempo inmenso en consecuencia de procesos observados.[4,5]

Siccar Point dio forma física a ese razonamiento. Estratos antiguos se habían depositado, endurecido, inclinado y erosionado antes de que otros más jóvenes se acumularan sobre ellos. El contacto es una discordancia: una superficie que registra historia ausente. Establece una secuencia de varias etapas, pero no indica cuántos años contiene el intervalo perdido.[5]

Hutton concluyó su artículo afirmando que no encontraba «vestigio de un comienzo ni perspectiva de un final».[4] La exposición de John Playfair de 1802 hizo más accesible el argumento huttoniano.[6] La frase expresaba una escala abierta, no una edad medida. La geología demostró que el archivo era profundo antes de saber cuánto.

En qué punto estamos

> *Buffon intentó contar la duración terrestre con física; Hutton dedujo inmensidad a partir de ciclos; Siccar Point mostró capítulos ausentes en la piedra. Ninguno obtuvo la edad moderna. Juntos cambiaron la carga de la prueba. Una historia corta debía explicar ahora cómo podían caber en ella depósito, deformación, erosión y un nuevo depósito.*

4. Convertir la secuencia en un mapa

El mapa geológico de William Smith de 1815 extendió la cronología relativa por Inglaterra y Gales. Las unidades rocosas aparecían en un orden regular, y sus fósiles característicos permitían correlacionar estratos separados. Smith no necesitó una teoría moderna de la evolución para que la sucesión fósil funcionara como herramienta empírica. El tiempo relativo se había vuelto regional y cartografiable.[7]

Principles of Geology, de Charles Lyell, publicado desde 1830, insistió en explicar los cambios pasados mediante causas observables en el presente.[8,9] Esa disciplina metodológica fue enormemente productiva. Desalentó la invocación de procesos desconocidos cuando la erosión, la sedimentación, el levantamiento o el vulcanismo conocidos podían realizar el trabajo.

Pero un método exitoso se endureció hasta convertirse en exageración. Tiempo profundo no significa que todo ocurra despacio ni a velocidad constante. La geología moderna incluye procesos graduales persistentes y sucesos abruptos: impactos, inundaciones repentinas, grandes erupciones y movimientos de masa rápidos. Lo que se conserva de Lyell es la exigencia de causas físicas contrastables, no la suposición de que toda tasa geológica sea suave o uniforme.[30]

En qué punto estamos

Smith mostró que la secuencia podía atravesar un país; Lyell convirtió los procesos presentes en guía disciplinada del pasado. La geología moderna conservó ambos logros y abandonó el gradualismo estricto: la larga duración y el cambio súbito son compatibles. Esa inmensidad adquirió una consecuencia biológica, porque Darwin necesitaba generaciones suficientes para la evolución acumulativa y trató de estimar el tiempo mediante la erosión.

5. La evolución necesita tiempo

La selección natural de Darwin necesitaba suficientes generaciones para acumular pequeñas diferencias heredables, de modo que la edad de la Tierra se convirtió en una restricción biológica. La teoría no predecía una cifra única, pero una Tierra muy joven habría dificultado sostener la evolución acumulativa.[10,11]

En la primera edición de On the Origin of Species, Darwin estimó en 306.662.400 años el tiempo necesario para denudar el Weald, redondeado a trescientos millones. El cálculo dividía una cantidad de erosión inferida entre una tasa supuesta. Su precisión aparente ocultaba entradas mal determinadas.[10]

Darwin redujo la estimación en la segunda edición y eliminó el argumento numérico de las posteriores.[11] La retirada fue científicamente sana. El cálculo fallido demuestra una regla general: un modelo plausible puede producir una cifra impresionante sin producir una edad fiable. Tiempo igual a proceso dividido entre tasa solo funciona cuando ambos se conocen con suficiente precisión.

En qué punto estamos

La evolución hizo que la duración tuviera consecuencias biológicas, pero no proporcionó un cronómetro geológico. El cálculo del Weald fue valioso también porque fracasó: reveló cuánto puede depender una edad de una tasa asumida. El siguiente desafío vino de la física, cuyas restricciones térmicas aparentemente más firmes parecían negar a la biología y la geología el tiempo que necesitaban.

6. La física responde

La pregunta

Si la física de Kelvin era seria y el gradiente superficial medido era real, ¿por qué su cálculo hizo que la Tierra pareciera demasiado joven? La respuesta pone a prueba un relato común: ¿bastó la radiactividad para aportar el calor faltante o el fallo más profundo estaba en el modelo de transporte térmico terrestre?

William Thomson, más tarde lord Kelvin, trató la Tierra como un cuerpo caliente que se enfría con el tiempo. Sus estimaciones publicadas cambiaron durante décadas, desde límites amplios de unos 20–400 millones de años hasta valores posteriores próximos a 20–40 millones.[12,14] No fue resistencia anticientífica, sino un intento serio de conectar un modelo físico con gradientes térmicos medidos.

La respuesta dependía, sin embargo, de cómo se movía el calor en el interior terrestre. El modelo de Kelvin trataba de hecho el interior como un cuerpo rígido que perdía calor principalmente por conducción. En 1895, John Perry argumentó que un interior más móvil podía transportar calor con mucha mayor eficacia. El mismo gradiente superficial sería entonces compatible con un planeta mucho más antiguo.[13,14]

El relato habitual sostiene que la radiactividad, descubierta poco después, aportó calor extra y demostró sin más el error de Kelvin. Es incompleto. El calor radiogénico importó, pero una cantidad realista no rescata por sí sola una Tierra rígida y conductiva. La física ausente decisiva era el transporte convectivo del calor en el manto.[14,15]

Por eso el error de Kelvin enseña más que su caricatura. La termodinámica no era el punto débil; lo era el modelo interno. Perry identificó esa dependencia antes de establecerse la convección moderna del manto. Una respuesta equivocada obtenida con buena física señaló qué supuesto oculto debía sustituirse.

En qué punto estamos

Kelvin no perdió porque la geología derrotara a la física. Su resultado falló porque un modelo físicamente serio omitía el modo dominante de transporte de calor interno. La crítica de Perry muestra cómo debe funcionar un desacuerdo: localizar el supuesto que controla la respuesta. La radiactividad aportó después calor y relojes, pero la convección era esencial para resolver la paradoja térmica.

7. La radiactividad convierte profundidad en cifras

La desintegración radiactiva ofreció otra clase de tasa: los isótopos progenitores se transforman en productos hijos según constantes medibles. Si la historia de un mineral está suficientemente restringida, los productos isotópicos acumulados pueden codificar tiempo. El método no es automático. Importan el producto hijo inicial, las pérdidas o ganancias posteriores, las constantes de desintegración y el cierre del sistema.[16,18,23]

Un malentendido público puede eliminarse de inmediato. El carbono-14 sirve principalmente para materiales que formaron parte de seres vivos y alcanza unos 50.000 años. Puede fechar un mamut,

no un planeta. La edad terrestre exige sistemas isotópicos mucho más longevos conservados en minerales y meteoritos.[23,31]

El trabajo uranio–plomo de Bertram Boltwood de 1907 produjo edades desde cientos de millones de años hasta unos 2,2 mil millones para un mineral de Ceilán.[16,17] Los cálculos precedieron al conocimiento isotópico moderno y a constantes de desintegración precisas, por lo que cada valor era provisional. Sin embargo, la escala de miles de millones ya se medía en vez de inferirse de la lentitud de la erosión.

Arthur Holmes desarrolló la escala plomo–uranio en 1911 y la defendió en su libro The Age of the Earth de 1913. Algunos materiales precámbricos tempranos alcanzaron unos 1,6 mil millones de años.[18–20] No eran las fechas actuales, pero mostraron que sistemas radiactivos independientes podían anclar la historia geológica en cifras.

La geocronología moderna ganó fiabilidad al hacer visibles sus vulnerabilidades. La selección mineral, la composición isotópica inicial, el comportamiento abierto y la concordancia entre relojes pasaron a formar parte de la prueba. Las ecuaciones y controles de laboratorio corresponden a QTC-017; aquí basta el principio: el reloj funciona porque sus modos de fallo pueden comprobarse.[23]

En qué punto estamos

> *La radiactividad hizo algo más que aumentar una estimación: cambió la clase de evidencia disponible. La secuencia relativa podía calibrarse con relojes de supuestos explícitos y contrastables. Boltwood y Holmes alcanzaron escalas de miles de millones, pero la precisión todavía exigía mejores constantes, química isotópica y control de contaminación. Ese último obstáculo conectaría la edad antigua de la Tierra con una crisis ambiental moderna.*

8. Un planeta de 4,54 mil millones de años

El análisis plomo–plomo de meteoritos publicado por Clair Patterson en 1956 dio 4,55 ± 0,07 mil millones de años y sostuvo que la Tierra tenía esencialmente la misma edad dentro de los supuestos del modelo.[21] El valor moderno aceptado es aproximadamente 4,54 ± 0,05 mil millones.[22] Surge de la evolución isotópica de materiales terrestres y meteoríticos, no de introducir una roca excepcionalmente antigua en una máquina.

Los materiales terrestres más antiguos conservados son más jóvenes que el planeta. Los circones de Jack Hills preservan historia cortical próxima a 4,4 mil millones de años; un grano analizado por Valley y colaboradores dio 4,374 ± 0,006 mil millones.[24,25] Un circón detrítico no es un cuerpo rocoso intacto ni el certificado de nacimiento de la Tierra. El reciclado cortical, el metamorfismo, la erosión y la subducción borraron gran parte del primer archivo.

Las inclusiones ricas en calcio y aluminio de meteoritos primitivos proporcionan un anclaje aún anterior del Sistema Solar: 4567,30 ± 0,16 millones de años. La Comisión Internacional de Estratigrafía adoptó ese valor para la base del Hádico, redondeado en su tabla.[26,27] Es una convención ligada a sólidos tempranos del Sistema Solar, no el instante exacto en que terminó la acreción terrestre. La afirmación de QTC-004 de que el Sistema Solar se formó hace unos 4,57 mil millones de años es consistente con ese valor y con la edad terrestre, algo menor, de 4,54 mil millones.

La cifra de Patterson exigió otro avance. El polvo, el aire y los reactivos ordinarios contenían plomo suficiente para inundar muestras de microgramos y submicrogramos. Patterson desarrolló métodos de menor blanco e instalaciones que fijaron nuevos estándares de control de contaminación.[32] La técnica corresponde a QTC-017; su consecuencia pertenece aquí: medir el pasado remoto exigió reconocer un contaminante invisible en el presente.

La misma sensibilidad abrió el análisis isotópico de plomo en rocas, sedimentos y muestras oceánicas comunes. Patterson concluyó que la actividad humana había alterado profundamente el ciclo global del plomo y dedicó años a combatir la exposición industrial, incluido el plomo de la gasolina.[32] No actuó solo y la regulación fue gradual, pero el hilo causal es real. El intento de fechar la Tierra ayudó a revelar un problema de contaminación planetaria.

La escala geológica actual aún combina orden relativo y calibración numérica. Muchas rocas sedimentarias no pueden fecharse directamente con alta precisión, y las discordancias siguen borrando intervalos. El tiempo profundo no es una película completa de la historia terrestre, sino un archivo escaso unido por relaciones de corte, fósiles, modelos físicos, meteoritos y sistemas isotópicos que concuerdan dentro de incertidumbres declaradas.[1,7,22,27]

En qué punto estamos

La edad de 4,54 mil millones de años no es propiedad de una sola piedra antigua. Es el punto de encuentro de la cronología meteorítica, la evolución del plomo terrestre, el orden estratigráfico y sistemas isotópicos contrastados. Patterson revela además una lección más profunda: mejorar una medición puede exponer el entorno que la rodea. Un reloj para la Tierra antigua descubrió la contaminación de la moderna.

Lo que sabemos y cómo lo sabemos

- La datación relativa establece una historia geológica ordenada con independencia de las edades numéricas; superposición, relaciones de corte, fósiles y discordancias proporcionan la secuencia.[1,2,5,7]
- Los modelos de enfriamiento y erosión mostraron que las tasas físicas podían restringir la edad, mientras sus fracasos revelaron la sensibilidad a las tasas supuestas y al transporte de calor.[3,10–15]
- La desintegración radiactiva proporciona relojes cuantitativos cuando se controlan y contrastan la historia del sistema isotópico, las condiciones iniciales y las alteraciones.[16,18,21,23]
- La Tierra tiene unos 4,54 ± 0,05 mil millones de años, mientras el anclaje CAI de 4567,30 ± 0,16 Ma, la edad terrestre y los minerales terrestres más antiguos son magnitudes distintas.[22,25–27]
- El programa de plomo a niveles ultrabajos de Patterson conectó la medición de la edad de la Tierra con el reconocimiento de la contaminación antropogénica global por plomo.[21,32]

Lo que todavía no sabemos

- La secuencia detallada más temprana de acreción, diferenciación y formación de la corteza terrestre, porque gran parte del archivo hádico fue destruido o reciclado.

- Hasta qué punto los pocos minerales hádicos conservados representan la corteza y los ambientes superficiales más antiguos del planeta.
- La mejor manera de alinear algunos registros estratigráficos locales con escalas numéricas globales cuando escasea el material fechable o la alteración posterior es intensa.

Qué podría hacernos cambiar de opinión

- Sistemas isotópicos convergentes de mayor precisión y una cronología mejorada del Sistema Solar que desplazaran la edad de formación terrestre fuera del intervalo de incertidumbre actual.
- El descubrimiento robusto de minerales terrestres o rocas intactas mucho más antiguos, que actualizaría el registro conservado aunque no cambiara por sí solo la edad de la Tierra.
- Pruebas de que se han entendido mal las constantes de desintegración, el cierre o las condiciones iniciales de un sistema isotópico importante de modo que produzcan un sesgo compartido entre cronologías actuales.
- Un marco estratigráfico o cosmoquímico revisado que separara de forma distinta el anclaje CAI, la convención del límite hádico y la historia de acreción terrestre.

Si solo recuerdas una cosa

El tiempo profundo se ordenó antes de medirse, y sabemos que la Tierra tiene 4,54 mil millones de años porque convergen rocas, modelos y relojes isotópicos, no porque una piedra conserve una marca temporal perfecta.

Artículos relacionados

- QTC-017 — Cómo aprendimos a fechar el pasado

Referencias

[1] Smithsonian Human Origins Program. Dating. Current page; accessed 29 August 2026. https://humanorigins.si.edu/evidence/dating

[2] Nicolaus Steno; trans. Henry Oldenburg. The prodromus to a dissertation concerning solids naturally contained within solids. 1671 English translation of the 1669 Latin work. DOI 10.5962/bhl.title.145115. https://doi.org/10.5962/bhl.title.145115

[3] Musée et Parc Buffon. Histoire naturelle — Buffon cooling experiments and Earth timescale. Current page; accessed 29 August 2026. https://www.musee-parc-buffon.fr/histoire-naturelle/

[4] James Hutton. Theory of the Earth; or an Investigation of the Laws observable in the Composition, Dissolution, and Restoration of Land upon the Globe. 1788. DOI 10.1017/S0080456800029227. https://doi.org/10.1017/S0080456800029227

[5] The Geological Society of London. Siccar Point. Current page; accessed 29 August 2026. https://www.geolsoc.org.uk/science-and-policy/100-great-geosites/historical-scientific-importance/siccar-point/

[6] John Playfair. Illustrations of the Huttonian Theory of the Earth. 1802. Smithsonian facsimile record. https://www.si.edu/object/illustrations-huttonian-theory-earth-facsimile-reprint-introd-george-w-white%3Asiris_sil_24209

[7] William Smith / Geological Society of London. A Delineation of the Strata of England and Wales with part of Scotland. 1815. https://www.geolsoc.org.uk/about-us/history/visiting-the-william-smith-map/a-delineation-of-the-strata-of-england-and-wales-with-part-of-scotland/

[8] The Geological Society of London. Portrait of Sir Charles Lyell — Principles of Geology and uniformitarianism. Current page; accessed 29 August 2026. https://www.geolsoc.org.uk/the-library/online-exhibitions/the-societys-portrait-and-bust-collection/portrait-of-sir-charles-lyell/

[9] Charles Lyell. Principles of Geology. First edition volumes, 1830–1833. Smithsonian scan record. https://www.si.edu/object/principles-geology-being-attempt-explain-former-changes-earths-surface-reference-causes-now%3Asiris_sil_421992

[10] Charles Darwin. On the Origin of Species, first edition, Chapter IX. 1859. https://en.wikisource.org/wiki/On_the_Origin_of_Species_(1859)/Chapter_IX

[11] Darwin Correspondence Project, University of Cambridge. How old is the earth? Current page; accessed 29 August 2026. https://darwin-editorial.darwinproject.ac.uk/letters/darwins-works-letters/rewriting-origin-later-editions/how-old-earth

[12] Lord Kelvin. The Age of the Earth. Nature 51, 438–440 (1895). DOI 10.1038/051438c0. https://doi.org/10.1038/051438c0

[13] John Perry. The Age of the Earth. Nature 51, 582–585 (1895). DOI 10.1038/051582a0. https://doi.org/10.1038/051582a0

[14] Philip England, Peter Molnar and Frank Richter. John Perry's neglected critique of Kelvin's age for the Earth: A missed opportunity in geodynamics. GSA Today 17(1), 4–9 (2007). DOI 10.1130/GSAT01701A.1. https://doi.org/10.1130/GSAT01701A.1

[15] Frank M. Richter. Kelvin and the Age of the Earth. Journal of Geology 94(3) (1986). DOI 10.1086/629037. https://doi.org/10.1086/629037

[16] B. B. Boltwood. On the Ultimate Disintegration Products of the Radio-active Elements. Part II. The Disintegration Products of Uranium. American Journal of Science s4-23(134), 78–88 (1907). DOI 10.2475/ajs.s4-23.134.78. https://doi.org/10.2475/ajs.s4-23.134.78

[17] American Physical Society. February 1907: Bertram Boltwood Estimates Earth is at Least 2.2 Billion Years Old. 2024. https://www.aps.org/apsnews/2024/01/boltwood-earth-age

[18] Arthur Holmes. The Association of Lead with Uranium in Rock-Minerals, and Its Application to the Measurement of Geological Time. Proceedings of the Royal Society A 85, 248–256 (1911). DOI 10.1098/rspa.1911.0036. https://doi.org/10.1098/rspa.1911.0036

[19] Arthur Holmes. The Age of the Earth. Harper & Brothers, London, 1913. https://www.gutenberg.org/ebooks/78241

[20] University of Illinois Rare Book & Manuscript Library. The Association of Lead with Uranium in Rock-Minerals. Current exhibit. https://omeka-s.library.illinois.edu/omeka/s/rbml/item/4009

[21] Clair C. Patterson. Age of meteorites and the earth. Geochimica et Cosmochimica Acta 10(4), 230–237 (1956). DOI 10.1016/0016-7037(56)90036-9. https://doi.org/10.1016/0016-7037(56)90036-9

[22] U.S. Geological Survey. Geologic Time: Age of the Earth. Updated 2007. https://pubs.usgs.gov/gip/geotime/age.html

[23] U.S. Geological Survey. Radiometric dating methods and U–Th–Pb systematics. Open-File Report 86-110 (1986). https://pubs.usgs.gov/of/1986/0110/report.pdf

[24] Simon A. Wilde, John W. Valley, William H. Peck and Colin M. Graham. Evidence from detrital zircons for the existence of continental crust and oceans on the Earth 4.4 Gyr ago. Nature 409, 175–178 (2001). DOI 10.1038/35051550. https://doi.org/10.1038/35051550

[25] John W. Valley et al. Hadean age for a post-magma-ocean zircon confirmed by atom-probe tomography. Nature Geoscience 7, 219–223 (2014). DOI 10.1038/ngeo2075. https://doi.org/10.1038/ngeo2075

[26] James N. Connelly et al. The absolute chronology and thermal processing of solids in the solar protoplanetary disk. Science 338, 651–655 (2012). DOI 10.1126/science.1226919. https://doi.org/10.1126/science.1226919

[27] International Commission on Stratigraphy. International Chronostratigraphic Chart update: Hadean GSSA. 2022. https://stratigraphy.org/news/143

[28] James Ussher. The Annals of the World, Deduced from the Origin of Time. 1658 English edition. https://archive.org/details/TheAnnalsOfTheWorld1658EditionPartOne4004To176BC

[29] James Barr. Why the world was created in 4004 B.C.: Archbishop Ussher and Biblical chronology. Bulletin of the John Rylands Library 67(2), p.575 ff. (1985). DOI 10.7227/BJRL.67.2.2. https://doi.org/10.7227/BJRL.67.2.2

[30] Stephen Jay Gould. Time’s Arrow, Time’s Cycle: Myth and Metaphor in the Discovery of Geological Time. Harvard University Press, 1987. https://www.hup.harvard.edu/books/9780674891999

[31] Oxford Radiocarbon Accelerator Unit, University of Oxford. Radiocarbon Dating. Current page; accessed 29 August 2026. https://c14.arch.ox.ac.uk/dating/services

[32] George R. Tilton. Clair Cameron Patterson, 1922–1995. Biographical Memoirs, volume 74. National Academy of Sciences, 1998. https://www.nasonline.org/wp-content/uploads/2024/06/patterson-clair-c.pdf

La vida funciona con gradientes

QTC-008 · De los quarks a la consciencia

El universo, la vida y cómo llegamos a saberlo

Autor: Juan Segurola

Versión: v1.1 ES · 2 de septiembre de 2026

Perfil epistémico: Conocimiento establecido

Licencia: All Rights Reserved

Resumen del artículo

La vida no se limita a gastar combustible. Construye continuamente diferencias a través de membranas y permite que máquinas moleculares las gasten de forma controlada. El gradiente electroquímico que impulsa la síntesis de ATP combina concentración y voltaje, mientras el propio ATP es una molécula de acoplamiento cuya energía libre utilizable depende de las condiciones celulares. Peter Mitchell propuso este circuito de protones en 1961 frente a alternativas serias basadas en intermediarios químicos; la aceptación llegó mediante experimentos convergentes, no por una demostración decisiva. Trabajos posteriores aportaron lo que Mitchell no tenía: el mecanismo enzimático de cambio de unión de Boyer, estructuras de la ATP sintasa y la observación directa de su rotación. Los gradientes iónicos también impulsan transporte y movimiento bacteriano, y algunos organismos usan sodio. Su antigüedad los hace relevantes para el origen de la vida, pero los gradientes naturales en fuentes alcalinas siguen siendo una hipótesis activa, no una explicación completa.

En 60 segundos

Las células se parecen menos a depósitos de combustible que a circuitos recargables. El transporte de electrones, la luz u otros procesos bombean iones a través de membranas selectivamente permeables. La diferencia electroquímica resultante, normalmente de protones, almacena energía libre utilizable tanto en una diferencia de concentración como en un voltaje. La ATP sintasa proporciona una vía de retorno controlada: el flujo iónico hace girar un rotor molecular cuyo ciclo conformacional fabrica ATP. Después, el ATP acopla esa química al trabajo celular, pero no es un paquete fijo de energía y no todo ATP se produce por quimiosmosis. Mitchell identificó el circuito de membrana; Boyer aportó después el mecanismo enzimático. Transiciones ácido-base en cloroplastos, medidas del voltaje mitocondrial y vesículas reconstituidas construyeron un caso experimental acumulativo. Estructuras modernas y observaciones de moléculas individuales revelaron la rotación. Los gradientes también impulsan la captación de nutrientes y los flagelos bacterianos, y los sistemas de sodio amplían la regla más allá de los protones. Su historia evolutiva profunda se infiere con fuerza, mientras que su papel en química prebiótica sigue dependiendo de modelos. Un gradiente es una fuente de energía, no todavía un sistema vivo.

Por qué importa esta pregunta

La expresión «energía celular» invita a imaginar el ATP como una batería microscópica almacenada para usarla después. En realidad, las células sobreviven manteniendo el desequilibrio: reconstruyen diferencias iónicas, canalizan su retorno y regeneran sin cesar una pequeña reserva operativa de ATP. Esta reformulación conecta la termodinámica con trabajo biológico visible, desde el transporte hasta el movimiento. También muestra cómo la ciencia trata con justicia un mecanismo radical: la idea central de Mitchell sobrevivió, algunos detalles no, y el mecanismo enzimático llegó de otros investigadores. El resultado es a la vez una explicación física y una historia de descubrimiento distribuido.

1. La energía es una diferencia

La pregunta

Si el ATP no es un paquete fijo de energía, ¿qué gasta exactamente una célula? La respuesta comienza antes del propio ATP: la vida crea diferencias controladas de concentración y carga eléctrica, y después acopla su relajación al trabajo químico y mecánico.

Una célula viva no está en equilibrio con su entorno. Mantiene concentradas determinadas moléculas, separa cargas y acopla reacciones en direcciones que no seguirían por sí solas. Por eso la energía no se representa bien como una sustancia vertida en la célula. Lo importante es la capacidad de una diferencia para impulsar cambios mientras la célula controla la vía de retorno hacia el equilibrio.[1]

El ATP ocupa un lugar central en ese control. Su hidrólisis puede acoplarse a síntesis, transporte y trabajo mecánico que de otro modo serían desfavorables. Sin embargo, el ATP no libera un paquete de energía independiente del contexto. El cambio de energía libre depende de la temperatura, las condiciones químicas y las concentraciones de ATP, ADP y fosfato. Llamarlo moneda energética es útil solo si se entiende que el tipo de cambio varía.[1]

La escala de regeneración vuelve físico el argumento. Un cuerpo humano recambia aproximadamente su propia masa en ATP cada día, aunque en cada momento solo existe una pequeña reserva operativa.[33] Las mismas moléculas se fabrican, usan y regeneran continuamente. Es una afirmación sobre recambio total, no que el cuerpo almacene decenas de kilogramos de ATP a la vez.

Tampoco todo ATP procede de un gradiente de membrana. La glucólisis puede producirlo directamente por fosforilación a nivel de sustrato, transfiriendo fosfato desde un intermediario metabólico al ADP.[2] La quimiosmosis es el marco dominante para la fosforilación oxidativa y fotosintética, no una definición exclusiva de la producción de energía celular.

En qué punto estamos

El ATP importa, pero su energía libre utilizable depende del estado celular y su pequeña reserva debe regenerarse continuamente. Parte se produce directamente en el metabolismo, aunque gran parte de la conversión energética de la vida comienza en otro lugar: una diferencia mantenida a través de un límite. El siguiente paso es ver cómo una membrana convierte la separación en un circuito utilizable.

2. Una membrana hace utilizable la diferencia

Una membrana biológica no es un aislante perfecto. Es selectivamente permeable: algunas moléculas la atraviesan lentamente, otras usan canales o transportadores y ciertas fugas controladas forman parte de la regulación. Esa selectividad permite a las bombas crear concentraciones iónicas desiguales y separar carga eléctrica sin exigir una pared absolutamente sellada.[1,22]

Para un ion, la diferencia útil es electroquímica. La fuerza protón-motriz combina un término químico, asociado a la diferencia de concentración de protones y expresado mediante el pH, con un término eléctrico, el voltaje a través de la membrana. Cualquiera de los dos puede dominar en un organismo o compartimento concreto; el gradiente no se reduce solo al pH.[1,5]

Las cadenas de transporte de electrones de las mitocondrias y de muchos microbios usan reacciones redox para mover protones a través de una membrana. Los sistemas fotosintéticos emplean la luz absorbida para sostener una separación comparable. La ATP sintasa ofrece después una vía de retorno controlada. El flujo de protones a favor del gradiente se acopla a la formación de ATP en vez de disiparse por completo como calor.[1,4,5]

La máquina es reversible. En condiciones adecuadas, la hidrólisis de ATP puede impulsar el bombeo de iones en sentido contrario. La dirección depende del equilibrio entre la fuerza ion-motriz y la diferencia de energía libre química que incluye ATP, ADP y fosfato. La misma arquitectura puede comportarse como generador o como bomba.[1,18]

El principio no se limita a las mitocondrias. ATP sintasas rotatorias emparentadas actúan en membranas bacterianas y arqueanas, y en las membranas convertidoras de energía de los cloroplastos. Los compartimentos difieren y algunos sistemas usan sodio, pero comparten la lógica de separación, retorno selectivo y acoplamiento.[1,22,24]

En qué punto estamos

> *Una membrana hace que una diferencia energética dure lo suficiente para controlarla. Las bombas construyen un gradiente electroquímico; la ATP sintasa deja volver a los iones mientras acopla ese flujo a la química; el sentido puede invertirse cuando cambia el equilibrio de fuerzas. El circuito parece coherente, pero antes de 1961 ya se sabía que respiración y fosforilación estaban unidas. Faltaba la conexión física.*

3. El eslabón perdido antes de Mitchell

A mediados del siglo XX, los investigadores sabían que el transporte de electrones y la producción de ATP estaban acoplados en las mitocondrias. Podían romper la relación con desacoplantes y seguir partes de la cadena respiratoria. La pregunta pendiente era cómo llegaba la energía liberada a lo largo de esa cadena hasta la maquinaria que fosforilaba ADP.[3,12]

Una respuesta razonable era un intermediario químico de alta energía. En 1953, E. C. Slater propuso que la transferencia de electrones generaba un compuesto rico en energía capaz de transmitir potencial químico hasta la formación de ATP.[3] El modelo encajaba con la intuición bioquímica de la época: el metabolismo ya se entendía mediante secuencias de enzimas e intermediarios transitorios, de modo que otro intermediario no era una fantasía improvisada.

El problema fue que el supuesto intermediario común se resistía a ser identificado. Las búsquedas negativas no demostraban de inmediato que no existiera, y distintas variantes podían acomodar algunas observaciones. Por eso el modelo químico merece la misma cortesía probatoria que otras teorías serias: explicar qué problema resolvía y después identificar las pruebas que hicieron más productivo el circuito de membrana.[6,12]

Ese era el campo en el que entró Mitchell. Su propuesta no se limitó a nombrar una sustancia química ausente. Cambió la clase de entidad que realizaba el acoplamiento: de un intermediario difusible dentro de una secuencia de reacciones a un estado electroquímico de la propia membrana.[4,13]

En qué punto estamos

La hipótesis del intermediario químico de Slater fue una respuesta disciplinada a un eslabón perdido real. Su desplazamiento no corrigió una torpeza obvia, sino que cambió qué podía transportar energía entre reacciones. La alternativa de Mitchell convirtió la propia membrana en parte del mecanismo. La inversión era conceptualmente potente, estaba expuesta a pruebas y, al principio, resultaba razonablemente difícil de aceptar para muchos bioquímicos.

4. El circuito de protones de Mitchell

La pregunta

¿Cómo podían un voltaje y una diferencia de pH a escala de toda la membrana sustituir el eslabón químico perdido entre respiración y ATP? La propuesta de Mitchell era radical porque cambiaba tanto el portador de energía utilizable como la organización espacial que debía incluir la explicación bioquímica.

En 1961, Peter Mitchell propuso que la transferencia de electrones impulsa protones a través de una membrana transductora de energía y que su retorno se acopla a la formación de ATP.[4] Su formulación madura de 1966 expresó la fuerza impulsora como fuerza protón-motriz, que combina diferencia de pH y potencial de membrana en un circuito contrastable.[5] La organización vectorial a través de la membrana era esencial, no simple envoltorio de la química en solución.

El escepticismo era legítimo. Al principio, distintos postulados estaban infradeterminados, las mediciones directas eran difíciles y los modelos de intermediario químico podían absorber algunos resultados. La aceptación también avanzó a ritmos distintos en la fosforilación oxidativa, la fotofosforilación y la bioenergética bacteriana. La fama posterior de Mitchell no debe proyectarse hacia atrás como si el artículo de 1961 hubiera vuelto obvia la respuesta.[6,12,13,30]

El marco institucional fue inusual. Tras dejar la Universidad de Edimburgo, Mitchell empleó recursos familiares para restaurar Glynn House, en Cornualles, y estableció con Jennifer Moyle la organización benéfica privada Glynn Research.[32] Moyle se convirtió allí en su principal colaboradora experimental a largo plazo. Las páginas exactas sobre la financiación y la descripción de su papel siguen pendientes de verificación humana obligatoria antes de publicar.

En Glynn, Mitchell y Moyle midieron la translocación de protones y diseñaron comparaciones entre explicaciones quimiosmóticas y de intermediario químico.[6,7] Sus resultados contribuyeron a un caso acumulativo; incluso su artículo de 1965 indicaba que algunas observaciones también

podían encajar en una hipótesis química. La historia gana fuerza cuando conserva la incertidumbre en vez de convertir cada experimento en confirmación retrospectiva.

Mitchell no era el único investigador que desarrollaba ideas centradas en protones. R. J. P. Williams propuso conceptos relacionados en 1961, y la correspondencia posterior produjo una larga disputa de prioridad.[14,15] El registro conservado respalda desarrollo intelectual paralelo y desacuerdo genuino. Este artículo no necesita adjudicar cada elemento de la teoría a un único aspirante.

En qué punto estamos

Mitchell aportó el circuito de protones, Moyle ayudó a convertirlo en un programa experimental sostenido en Glynn y las ideas paralelas de Williams impiden un relato de genio solitario. La hipótesis sobrevivió porque generó pruebas discriminantes, no porque premios posteriores la hicieran verdadera. Esas pruebas llegaron desde varios sistemas y laboratorios, y su fuerza residió en la convergencia, no en un experimento legendario.

5. Los experimentos que forzaron la decisión

En 1966, André Jagendorf y Ernesto Uribe sometieron cloroplastos a una transición ácido-base y observaron formación de ATP en oscuridad.[8] El tratamiento impuso una diferencia de pH sin requerir la secuencia normal impulsada por luz. Mostró que un gradiente artificial de protones podía ser suficiente para impulsar la fosforilación en esas condiciones experimentales, una predicción notable del acoplamiento quimiosmótico.

El trabajo mitocondrial aportó otra línea. Liberman y sus colaboradores relacionaron en 1969 la fosforilación oxidativa con el potencial de membrana, apoyando un componente eléctrico del proceso de acoplamiento.[9] Estas mediciones no reprodujeron de forma independiente cada elemento de la teoría de Mitchell, pero hicieron cada vez más difícil evitar una descripción electroquímica de la conversión energética mitocondrial.

La reconstrucción visualmente más persuasiva llegó de Efraim Racker y Walther Stoeckenius en 1974. Combinaron bacteriorrodopsina, una bomba de protones impulsada por luz, con ATP sintasa mitocondrial en vesículas artificiales. La iluminación produjo captación de protones y formación de ATP.[10,29] Componentes de fuentes biológicas distintas podían conectarse en un sistema simplificado de luz, gradiente y ATP.

Ningún experimento resolvió por sí solo la teoría completa. Las transiciones ácido-base establecieron suficiencia en una preparación de cloroplastos; las mediciones de voltaje abordaron otro componente; las vesículas híbridas pusieron a prueba un circuito reducido. El trabajo de Mitchell y Moyle añadió comparaciones fisiológicas.[6–10] En conjunto, estas líneas redujeron el espacio para un intermediario químico oculto universal y convirtieron el gradiente de membrana en el vínculo explicativo común.[12]

El Nobel de 1978 registra el alcance de la aceptación histórica, no constituye un experimento independiente.[11] Para entonces, el cambio importante era también metodológico: se podían manipular gradientes, reconstituir componentes y preguntar si un circuito propuesto era suficiente. La membrana ya no era solo el lugar donde ocurría la conversión energética; era una parte experimentalmente tratable del mecanismo.

En qué punto estamos

La quimiosmosis triunfó mediante una red de intervenciones: imponer una diferencia de pH, medir el término eléctrico, reconstituir bomba y sintasa, y contrastar predicciones en sistemas intactos. La convergencia convirtió una hipótesis inusual de membrana en el marco organizador. Sin embargo, dejó una pregunta precisa sin responder. Un gradiente podía alcanzar la ATP sintasa, pero ¿cómo convertía la enzima el flujo iónico en nuevos enlaces químicos?

6. La ATP sintasa es una máquina rotatoria

La ATP sintasa de tipo F contiene dos sectores acoplados. El sector F0, incrustado en la membrana, conduce protones y forma un motor rotatorio; el sector F1 sobresale de la membrana y contiene los sitios catalíticos que producen o hidrolizan ATP. La rotación conecta el movimiento a través de la membrana con entornos químicos cambiantes en la cabeza catalítica.[1,16,18]

El mecanismo de cambio de unión de Paul Boyer aportó la explicación enzimática que Mitchell no había proporcionado. Los sitios catalíticos recorren conformaciones distintas que unen sustratos, forman ATP y liberan el producto, coordinados por rotación relativa. Mitchell explicó por qué una fuerza protón-motriz llega a la enzima; Boyer explicó cómo esta convierte el cambio conformacional mecánico en trabajo catalítico.[16,19]

La estructura publicada en 1994 por el grupo de John Walker mostró tres subunidades beta catalíticas en conformaciones distintas alrededor de un tallo central asimétrico.[16] Respaldó con fuerza la catálisis rotatoria, pero una estructura estática no filmaba el movimiento ni incluía el motor de membrana completo. La asimetría estructural y el movimiento directo seguían siendo pasos probatorios distintos.

En 1997, Hiroyuki Noji y sus colaboradores unieron un filamento visible a F1 aislada y observaron directamente la rotación impulsada por hidrólisis de ATP.[17] El experimento mostró el motor catalítico funcionando en sentido químico inverso. En 2004, Manuel Diez y sus colaboradores observaron rotación impulsada por protones durante la síntesis de ATP en F0F1 unida a membrana, conectando con mayor claridad flujo transmembrana, rotación y síntesis.[18]

Mitchell acertó en lo esencial sin acertar en todo. Identificó el acoplamiento quimiosmótico mediante un circuito de protones a través de la membrana, pero no aportó el mecanismo de cambio de unión, y los primeros cálculos sobre cuántos protones exige cada ATP se revisaron al aclararse la estequiometría del rotor y los costes de transporte asociados.[1,5,16–19] El Nobel de 1997 vuelve a marcar recepción, no prueba.[19]

En qué punto estamos

La explicación madura tiene capas, no un único epónimo. Mitchell aportó el circuito de membrana; Boyer, el ciclo catalítico; la estructura de Walker reveló estados asimétricos; los experimentos de moléculas individuales mostraron rotación durante hidrólisis y síntesis. Revisar la relación entre protones y ATP es refinamiento, no fracaso. Entendido el motor, los gradientes dejan de parecer un truco exclusivo del ATP y se convierten en una forma general de realizar trabajo biológico.

7. Los gradientes hacen más que fabricar ATP

Las células emplean gradientes iónicos para importar nutrientes y expulsar residuos. En el transporte activo secundario, el movimiento de un ion a favor de su gradiente se acopla al desplazamiento de otro soluto en contra del suyo. El transportador gasta directamente potencial electroquímico en vez de convertirlo primero todo en ATP.[20] Un gradiente es, por tanto, una fuente compartida para varias máquinas moleculares.

La motilidad bacteriana ofrece un ejemplo mecánico. El flujo de protones o sodio a través de motores flagelares puede producir rotación. En 1995, David Fung y Howard Berg impulsaron un motor flagelar de Escherichia coli con una fuente externa de voltaje incluso evitando la generación metabólica ordinaria del potencial de membrana.[21] El resultado hizo especialmente directo el componente eléctrico de la alimentación del motor.

Los protones son comunes, pero no universales. Algunos microbios usan fuerza sodio-motriz para sintetizar ATP, transportar sustancias o moverse, y otros combinan sistemas acoplados a protones y a sodio.[22,23] Esto no autoriza a sustituir cada protón del manual por sodio. Muchas ATP sintasas alcalófilas siguen impulsadas por protones pese a vivir en entornos pobres en ellos.

Ahí aparece un problema mecanístico activo. En alcalófilos extremos, un cálculo basado en la fuerza protón-motriz global medida puede parecer insuficiente para sostener la síntesis observada de ATP. La retención de protones cerca de la superficie de la membrana, rutas locales de transferencia y adaptaciones enzimáticas especializadas son explicaciones vivas.[22] La anomalía energética está establecida; sigue discutido qué combinación de mecanismos la resuelve.

La cualificación importa porque un diagrama simplificado supone compartimentos perfectamente mezclados y un único valor global a cada lado. Las membranas reales tienen superficies, microambientes y complejos proteicos abarrotados. Nada de ello derriba la quimiosmosis. Pregunta cómo se implementa físicamente un principio bien establecido en organismos próximos a sus límites aparentes.

En qué punto estamos

Los gradientes iónicos forman una red eléctrica celular. Pueden alimentar la ATP sintasa, transportadores y motores rotatorios, y el ion de trabajo puede ser un protón o sodio. Los alcalófilos muestran por qué un marco establecido aún puede contener mecanismos locales discutidos. Cuanto más amplio parece el principio, más antiguo resulta, lo que suscita una tentación final: convertir una estrategia energética ancestral en una historia completa del origen de la vida.

8. Una pista antigua, no una solución del origen

La pregunta

Si los gradientes iónicos son antiguos, están muy extendidos y existen en ambientes naturales, ¿han resuelto el origen de la vida? Aportan una restricción poderosa y una fuente de energía plausible, pero ni la antigüedad ni la suficiencia energética crean automáticamente herencia, límites o evolución.

Las ATP sintasas rotatorias y la bioenergética de gradientes iónicos están muy extendidas entre bacterias y arqueas, lo que respalda la interpretación actual de que son extremadamente antiguas.[24,25] La distribución por sí sola no identifica el primer sistema energético, y la transferencia

horizontal de genes complica la reconstrucción profunda. Antiguo no significa inalterado: los complejos modernos contienen largas historias de divergencia, sustitución y adaptación.

Un análisis filogenético de 2023 infirió que los linajes de ATP sintasas de tipo F y A/V divergieron hace más de cuatro mil millones de años, quizá antes de la diversificación de bacterias y arqueas.[25] El resultado es una reconstrucción dependiente de modelos, no un fósil molecular fechado directamente. El enraizamiento, las calibraciones, las historias génicas y los supuestos sobre tasas afectan a fechas tan profundas.

Las fuentes hidrotermales alcalinas ofrecen una analogía geoquímica sugerente. Las reacciones entre fluidos de la fuente y agua oceánica pueden sostener diferencias de pH y redox a través de barreras minerales. Esto motiva la hipótesis activa de que gradientes naturales impulsaron parte de la química prebiótica antes de que las células evolucionaran bombas y membranas especificadas genéticamente.[26–28] Modelos de laboratorio muestran que química redox plausible puede generar gradientes de protones a través de membranas lipídicas simples.[31]

La hipótesis sigue siendo una candidata entre varios entornos y fuentes energéticas posibles para el origen. Demostrar un gradiente, o incluso química impulsada por él, no demuestra la ruta histórica por la que comenzó la vida. Plausibilidad geológica, productividad química y continuidad evolutiva son preguntas distintas que finalmente deben concordar.[26–28,31]

Sobre todo, un gradiente todavía no es vida. No proporciona por sí solo un límite celular selectivamente permeable, una red catalítica autosostenida, herencia ni evolución darwiniana. QTC-009 pregunta qué significa que un sistema esté vivo; QTC-021 se ocupa de la transición a evolución darwiniana abierta. Este artículo se detiene en la pista energética.[26–28]

En qué punto estamos

La vida reconstruye diferencias una y otra vez y acopla su colapso controlado al trabajo. Ese principio está establecido en la bioenergética moderna y es plausiblemente antiguo, mientras su papel en el origen sigue siendo una hipótesis activa. Un gradiente de fuente hidrotermal puede ayudar a explicar una fuente de energía; todavía no explica un sistema vivo. La frontera es productiva: aquí viene primero la energía; después, definición y evolución.

Lo que sabemos y cómo lo sabemos

- Los gradientes electroquímicos de iones combinan diferencias de concentración y potencial eléctrico a través de membranas selectivamente permeables.[1,5]
- La ATP sintasa acopla el flujo iónico a la formación de ATP mediante rotación, respaldada por estructura, observación directa y reconstitución.[1,10,16–18]
- La quimiosmosis quedó establecida por pruebas convergentes en cloroplastos, mitocondrias, microbios y sistemas simplificados de membrana, no por un único experimento decisivo.[6–10,12]
- El ATP es una molécula de acoplamiento dependiente de condiciones y se regenera con un recambio total enorme; parte se produce sin quimiosmosis mediante fosforilación a nivel de sustrato.[1,2,33]
- Los gradientes también impulsan transporte secundario y motilidad bacteriana, y los sistemas de sodio muestran que los protones no son los únicos iones de acoplamiento posibles.[20–23]

Lo que todavía no sabemos

- Qué mecanismos locales de transferencia de protones, superficies de membrana y adaptaciones enzimáticas resuelven cuantitativamente la bioenergética de los alcalófilos más extremos.[22]
- La secuencia evolutiva temprana exacta que produjo la arquitectura común y la diversificación de las ATP sintasas rotatorias.[24,25]
- Si los gradientes naturales de fuentes hidrotermales alcalinas impulsaron realmente el origen histórico de la vida, en vez de limitarse a sostener química de laboratorio plausible.[26–28,31]

Qué podría hacernos cambiar de opinión

- Mediciones reproducibles que mostraran que los gradientes electroquímicos iónicos no son la variable inmediata de acoplamiento en sistemas actualmente considerados quimiosmóticos.
- Estructuras y datos de moléculas individuales que sustituyeran la catálisis rotatoria por otro mecanismo y explicaran a la vez la asimetría, rotación y reconstitución observadas.
- Mediciones nanométricas que seleccionaran una solución del balance energético alcalófilo distinta de los modelos actuales de transferencia local y retención superficial.
- Pruebas filogenéticas, geoquímicas o experimentales que favorecieran con fuerza otro sistema energético temprano u otro ambiente de origen frente a las hipótesis de fuentes basadas en gradientes.

Si solo recuerdas una cosa

> *La vida funciona con diferencias que reconstruye sin cesar y gasta mediante máquinas moleculares; el ATP forma parte del circuito, no es combustible diario almacenado.*

Artículos relacionados

- QTC-009 — ¿Qué queremos decir realmente cuando hablamos de vida?
- QTC-021 — Cuando la química empezó a evolucionar

Referencias

[1] Wolfgang Junge and Nathan Nelson. ATP Synthase. Annual Review of Biochemistry 84, 631–657 (2015). DOI 10.1146/annurev-biochem-060614-034124. https://doi.org/10.1146/annurev-biochem-060614-034124

[2] Nicole Naifeh, Manjari Dimri and Matthew Varacallo. Biochemistry, Aerobic Glycolysis. StatPearls / NCBI Bookshelf, updated 2023. https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK470170/

[3] E. C. Slater. Mechanism of Phosphorylation in the Respiratory Chain. Nature 172, 975–978 (1953). DOI 10.1038/172975a0. https://doi.org/10.1038/172975a0

[4] Peter Mitchell. Coupling of Phosphorylation to Electron and Hydrogen Transfer by a Chemi-Osmotic Type of Mechanism. Nature 191, 144–148 (1961). DOI 10.1038/191144a0. https://doi.org/10.1038/191144a0

[5] Peter Mitchell. Chemiosmotic Coupling in Oxidative and Photosynthetic Phosphorylation. Biological Reviews 41, 445–502 (1966). DOI 10.1111/j.1469-185X.1966.tb01501.x. https://doi.org/10.1111/j.1469-185X.1966.tb01501.x

[6] Peter Mitchell and Jennifer Moyle. Evidence Discriminating between the Chemical and the Chemiosmotic Mechanisms of Electron Transport Phosphorylation. Nature 208, 1205–1206 (1965). DOI 10.1038/2081205a0. https://doi.org/10.1038/2081205a0

[7] Peter Mitchell and Jennifer Moyle. Chemiosmotic Hypothesis of Oxidative Phosphorylation. Nature 213, 137–139 (1967). DOI 10.1038/213137a0. https://doi.org/10.1038/213137a0

[8] A. T. Jagendorf and E. Uribe. ATP Formation Caused by Acid-Base Transition of Spinach Chloroplasts. Proceedings of the National Academy of Sciences 55(1), 170–177 (1966). DOI 10.1073/pnas.55.1.170. https://doi.org/10.1073/pnas.55.1.170

[9] E. A. Liberman, V. P. Topaly, L. M. Tsofina, A. A. Jasaitis and V. P. Skulachev. Mechanism of Coupling of Oxidative Phosphorylation and the Membrane Potential of Mitochondria. Nature 222, 1076–1078 (1969). DOI 10.1038/2221076a0. https://doi.org/10.1038/2221076a0

[10] Efraim Racker and Walther Stoeckenius. Reconstitution of Purple Membrane Vesicles Catalyzing Light-driven Proton Uptake and Adenosine Triphosphate Formation. Journal of Biological Chemistry 249(2), 662–663 (1974). DOI 10.1016/S0021-9258(19)43080-9. https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/4272126/

[11] Nobel Prize Outreach. The Nobel Prize in Chemistry 1978. https://www.nobelprize.org/prizes/chemistry/1978/press-release/

[12] David G. Nicholls. Forty Years of Mitchell's Proton Circuit: From Little Grey Books to Little Grey Cells. Biochimica et Biophysica Acta Bioenergetics 1777, 550–556 (2008). DOI 10.1016/j.bbabio.2008.03.014. https://doi.org/10.1016/j.bbabio.2008.03.014

[13] John N. Prebble. The Philosophical Origins of Mitchell's Chemiosmotic Concepts. Journal of the History of Biology 34, 433–460 (2001). DOI 10.1023/A:1012946715673. https://doi.org/10.1023/A:1012946715673

[14] Bruce H. Weber and John N. Prebble. An Issue of Originality and Priority: The Correspondence and Theories of Oxidative Phosphorylation of Peter Mitchell and Robert J. P. Williams, 1961–1980. Journal of the History of Biology 39, 125–163 (2006). DOI 10.1007/s10739-005-3052-4. https://doi.org/10.1007/s10739-005-3052-4

[15] R. J. P. Williams. The History of Proton-Driven ATP Formation. Bioscience Reports 13, 191–212 (1993). DOI 10.1007/BF01123502. https://doi.org/10.1007/BF01123502

[16] Jan Pieter Abrahams, Andrew G. W. Leslie, René Lutter and John E. Walker. Structure at 2.8 Å Resolution of F1-ATPase from Bovine Heart Mitochondria. Nature 370, 621–628 (1994). DOI 10.1038/370621a0. https://doi.org/10.1038/370621a0

[17] Hiroyuki Noji, Ryohei Yasuda, Masasuke Yoshida and Kazuhiko Kinosita Jr. Direct Observation of the Rotation of F1-ATPase. Nature 386, 299–302 (1997). DOI 10.1038/386299a0. https://doi.org/10.1038/386299a0

[18] Manuel Diez et al. Proton-Powered Subunit Rotation in Single Membrane-Bound F0F1-ATP Synthase. Nature Structural & Molecular Biology 11, 135–141 (2004). DOI 10.1038/nsmb718. https://doi.org/10.1038/nsmb718

[19] Nobel Prize Outreach. The Nobel Prize in Chemistry 1997. https://www.nobelprize.org/prizes/chemistry/1997/press-release/

[20] D. E. Cohn, G. J. Kaczorowski and H. R. Kaback. Effect of the Proton Electrochemical Gradient on Maleimide Inactivation of Active Transport in Escherichia coli Membrane Vesicles. Biochemistry 20(11), 3308–3313 (1981). DOI 10.1021/bi00514a050. https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/7018574/

[21] David C. Y. Fung and Howard C. Berg. Powering the Flagellar Motor of Escherichia coli with an External Voltage Source. Nature 375, 809–812 (1995). DOI 10.1038/375809a0. https://doi.org/10.1038/375809a0

[22] David B. Hicks, Jun Liu, Makoto Fujisawa and Terry A. Krulwich. F1F0-ATP Synthases of Alkaliphilic Bacteria: Lessons from Their Adaptations. Biochimica et Biophysica Acta Bioenergetics 1797, 1362–1377 (2010). DOI 10.1016/j.bbabio.2010.02.028. https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/20193659/

[23] Armen Y. Mulkidjanian, Pavel Dibrov and Michael Y. Galperin. The Past and Present of Sodium Energetics: May the Sodium-Motive Force Be with You. Biochimica et Biophysica Acta (2008). DOI 10.1016/j.bbabio.2008.04.028. https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC2695506/

[24] Armen Y. Mulkidjanian, Kira S. Makarova, Michael Y. Galperin and Eugene V. Koonin. Inventing the Dynamo Machine: The Evolution of the F-Type and V-Type ATPases. Nature Reviews Microbiology 5, 892–899 (2007). DOI 10.1038/nrmicro1767. https://doi.org/10.1038/nrmicro1767

[25] Tara A. Mahendrarajah et al. ATP Synthase Evolution on a Cross-Braced Dated Tree of Life. Nature Communications 14, 7456 (2023). DOI 10.1038/s41467-023-42924-w. https://doi.org/10.1038/s41467-023-42924-w

[26] William Martin, John A. Baross, Deborah S. Kelley and Michael J. Russell. Hydrothermal Vents and the Origin of Life. Nature Reviews Microbiology 6, 805–814 (2008). DOI 10.1038/nrmicro1991. https://doi.org/10.1038/nrmicro1991

[27] William Martin and Michael J. Russell. On the Origin of Biochemistry at an Alkaline Hydrothermal Vent. Philosophical Transactions of the Royal Society B 362, 1887–1925 (2007). DOI 10.1098/rstb.2006.1881. https://doi.org/10.1098/rstb.2006.1881

[28] Nick Lane and William F. Martin. The Origin of Membrane Bioenergetics. Cell 151, 1406–1416 (2012). DOI 10.1016/j.cell.2012.11.050. https://doi.org/10.1016/j.cell.2012.11.050

[29] Journal of Biological Chemistry. JBC Classics: A Simple Model for Biological Energy Coupling. Retrospective page. https://www.jbc.org/article/S0021-9258(20)50387-6/fulltext

[30] Peter Mitchell. Citation Classic: Coupling of Phosphorylation to Electron and Hydrogen Transfer by a Chemi-Osmotic Type of Mechanism. 1986. https://garfield.library.upenn.edu/classics1986/A1986E685800002.pdf

[31] Daniel Milshteyn, George Cooper and David Deamer. Chemiosmotic Energy for Primitive Cellular Life: Proton Gradients Are Generated across Lipid Membranes by Redox Reactions Coupled to Meteoritic Quinones. Scientific Reports 9, 12447 (2019). DOI 10.1038/s41598-019-48328-5. https://doi.org/10.1038/s41598-019-48328-5

[32] John Prebble and Bruce H. Weber. Wandering in the Gardens of the Mind: Peter Mitchell and the Making of Glynn. Oxford University Press, 2003. Chapter 6, The Creation of Glynn: 1962–1965. https://academic.oup.com/book/53137

[33] Susanna Törnroth-Horsefield and Richard Neutze. Opening and Closing the Metabolite Gate. Proceedings of the National Academy of Sciences 105(50), 19565–19566 (2008). DOI 10.1073/pnas.0810654106. https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC2604989/

¿Qué queremos decir realmente cuando hablamos de vida?

QTC-009 · De los quarks a la consciencia

El universo, la vida y cómo llegamos a saberlo

Autor: Juan Segurola

Versión: v1.1 ES · 2 de septiembre de 2026

Perfil epistémico: En debate entre especialistas

Licencia: All Rights Reserved

Resumen del artículo

La ciencia no posee una definición de vida aceptada universalmente, en parte porque se pide a una sola palabra que clasifique entidades, exprese una teoría de la organización viviente y guíe la búsqueda de una biología desconocida. Las listas familiares fallan en los bordes: los organismos estériles viven, las esporas se vuelven casi inertes, los virus evolucionan sin metabolismo autónomo y viroides o priones reproducen patrones sin ser células. Definiciones como la fórmula de trabajo de la NASA, la autopoiesis, el quimotón y la autonomía unida a evolución abierta iluminan rasgos distintos, pero heredan puntos ciegos diferentes. Además, la Tierra solo ofrece una biosfera celular profundamente emparentada, por lo que los rasgos universales pueden mezclar necesidades con herencias históricas. Detectar vida exige contexto, controles y evidencia convergente. La práctica actual más defendible es un pluralismo disciplinado: declarar tarea, unidad y criterios, y dejar que la evidencia los ponga a prueba.

En 60 segundos

No existe una única definición científica de vida que resuelva todos los casos límite. Eso no significa que la biología haya fracasado. Las definiciones cumplen trabajos distintos: clasifican entidades conocidas, resumen teorías de organización y guían instrumentos que buscan vida desconocida. Una lista de metabolismo, crecimiento, reproducción y respuesta tropieza enseguida con excepciones. Los individuos estériles están vivos; las esporas latentes pueden quedar casi inactivas; los virus evolucionan, pero necesitan células; viroides y priones se replican de maneras aún más extrañas. Las definiciones teóricas también dividen el problema de modos distintos. La autopoiesis destaca la organización que se produce a sí misma, el quimotón acopla metabolismo, frontera e información, y las definiciones evolutivas recuperan la herencia, pero hacen difícil medir la evolución abierta durante una misión. Como toda vida celular conocida comparte ascendencia profunda, la Tierra es una muestra sesgada de una sola historia. La habitabilidad, las moléculas orgánicas o una señal extraña aislada no demuestran vida. La respuesta práctica no es relativismo: hay que identificar qué se clasifica, con qué finalidad y qué evidencia separaría la vida de alternativas convincentes.

Por qué importa esta pregunta

Una definición controla lo que cuenta un microscopio, lo que intenta construir un experimento sobre el origen y lo que se diseña para detectar una nave espacial. Si la definición cambia en silencio su unidad, de organismo a linaje, o su propósito, de explicación a detección, el desacuerdo puede parecer más profundo o más superficial de lo que es. La pregunta también pone a prueba la humildad científica. Conocemos la vida a través de una sola biosfera emparentada, pero queremos criterios capaces de reconocer una segunda génesis desconocida. La precisión empieza por nombrar el trabajo antes de defender la respuesta.

1. Una palabra, tres trabajos

La pregunta

¿Cómo pueden coexistir 123 definiciones publicadas de vida sin que una derrote simplemente a las demás? Porque a menudo responden preguntas distintas, eligen unidades biológicas diferentes y expresan teorías divergentes sobre qué rasgos de la organización viviente son fundamentales.

No existe una definición científica de vida aceptada universalmente. El estudio de Edward Trifonov de 2011 comparó 123 definiciones publicadas y extrajo vocabulario recurrente, pero el recuento no cerró la cuestión.[5] Documentó la densidad del debate, no un catálogo exhaustivo ni una prueba de que todas las propuestas sean igualmente útiles.[1–4,10,13]

A la palabra se le piden al menos tres trabajos. Una regla de clasificación decide si un virus, una espora o un sistema sintético entra en una categoría. Una definición teórica comprime una explicación de cómo funciona la organización viviente. Una definición operativa indica a una misión o experimento qué debe medir. Los propósitos se solapan, pero triunfar en uno no garantiza triunfar en los otros.[2,3,24,25,31]

Las definiciones también reparten de manera diferente el peso entre autonomía, metabolismo, compartimentación, herencia y evolución. Pueden tomar como unidad una célula, un organismo, un linaje reproductivo o un sistema ecológico más amplio. Algunos desacuerdos son, por tanto, de palabras y contabilidad; otros son disputas sustantivas sobre dónde reside la organización biológica.[2,3,7,10,13]

Una definición operativa puede ser científicamente valiosa sin pretender revelar la esencia de la vida en todos los mundos posibles. La disciplina consiste en fijar los criterios antes de ver el resultado y admitir su dominio previsto.[2,3,25,31] Cleland y Chyba formulan una propuesta filosófica más fuerte: la vida podría ser una clase natural cuya mejor caracterización deba esperar a una teoría madura, del mismo modo que el agua se hizo inteligible mediante la química.[2] Es un argumento, no una demostración empírica de que las definiciones operativas sean inútiles.

La ambición de encontrar universales afronta otra limitación. Los organismos celulares conocidos comparten bioquímica profunda y una evidencia sólida de ascendencia común universal.[11,35,36] La Tierra ofrece una diversidad inmensa, pero no muchos orígenes independientes confirmados. Un rasgo universal aquí puede ser necesario para la vida o una herencia de una única historia exitosa. Los orígenes virales requieren tratamiento separado, y la ascendencia común no demuestra que la vida surgiera una sola vez.[28,31]

En qué punto estamos

El argumento no es que las definiciones sean inútiles. Es que clasificación, explicación y detección plantean exigencias distintas, mientras una biosfera emparentada limita los universales que podemos inferir. Antes de elegir entre teorías, la lista familiar debe superar su propia prueba: ¿separan realmente metabolismo, crecimiento, reproducción, fronteras y respuesta cada caso vivo de cada caso no vivo?

2. La lista se rompe en los bordes

Las listas de rasgos de la vida reaparecen por buenas razones. Organización delimitada, uso de energía y materiales, mantenimiento, crecimiento, reproducción, herencia, respuesta y capacidad de evolucionar describen gran parte de la biología ordinaria.[8,9,31] Una lista sirve para comparar, pero se vuelve circular si sus elementos se eligen sobre todo porque los organismos familiares ya los poseen.

Ningún rasgo familiar basta por sí solo. Los cristales crecen, las llamas se propagan, las células de convección mantienen movimiento organizado y los sistemas electroquímicos pueden conservar gradientes. Esos ejemplos no son organismos en miniatura. Solo muestran que crecimiento, movimiento, orden o uso de energía no pueden decidir por sí mismos la categoría.[3,8,25,31]

La reproducción revela el problema del nivel. Una hormiga obrera, una mula o una persona estéril siguen vivas aunque ese individuo no pueda reproducirse. La evolución darwiniana pertenece a poblaciones o linajes reproductivos a lo largo de generaciones, no a cada organismo en cada instante.[2,3,13] La reproducción sigue siendo central para la continuidad de la vida, pero exigirla a cada individuo produce una clasificación errónea.

El metabolismo también cambia con el estado. Las endosporas bacterianas pueden permanecer extremadamente reducidas o efectivamente inertes durante largos periodos y germinar después cuando mejoran las condiciones.[12,13] Las afirmaciones de metabolismo absolutamente nulo dependen del método, pero el punto biológico se mantiene: una actividad metabólica alta y continua no es necesaria para seguir siendo miembro viable de un linaje vivo.

La autonomía es gradual, no absoluta. Todo organismo depende de materia, energía y condiciones ambientales; los parásitos intracelulares obligados pueden desechar funciones biosintéticas y seguir siendo células.[13,33] La celularidad incluye limpiamente a todos los organismos celulares conocidos, pero excluye a los virus adoptando la propia frontera discutida. Puede ser defendible, pero no demuestra de modo independiente dónde debe terminar la vida.[13–16]

En qué punto estamos

La lista funciona mejor como mapa de propiedades recurrentes que como veredicto mecánico. Los rasgos aislados admiten imitaciones abióticas, los estados vivos pueden suprimir el metabolismo, la reproducción pertenece en parte a los linajes y la autonomía tiene grados. El siguiente paso es teórico: preguntar qué organización intenta explicar cada definición y qué punto ciego aparece cuando el modelo alcanza un caso límite.

3. Las definiciones son modelos

La pregunta

Si una lista de rasgos no puede resolver todos los casos, ¿debería una definición describir la organización que hace posible la vida? Los modelos rivales responden que sí, pero discrepan sobre si mantenimiento, fronteras, información o evolución abierta tienen el mayor peso explicativo.

Una definición de trabajo de la NASA muy utilizada describe la vida como un sistema químico autosostenido capaz de evolución darwiniana.[1,3,4] Su fortaleza es la economía teórica: química, automantenimiento y capacidad evolutiva aparecen en una frase. Es una definición de trabajo vinculada a la astrobiología, no una declaración final sobre todo sistema vivo concebible.

Su dificultad operativa aparece en las misiones. La evolución darwiniana es de forma natural una propiedad de sistemas o linajes a lo largo de generaciones, pero una misión robótica no puede normalmente esperar lo suficiente para observar directamente evolución abierta. Los instrumentos miden, por tanto, proxies químicos, estructurales, metabólicos o ecológicos.[3,25,26] El criterio evolutivo sigue siendo importante; la medición es indirecta.

La autopoiesis sitúa el énfasis en otro lugar. Varela, Maturana y Uribe describieron una red de procesos que produce y mantiene continuamente los componentes y la frontera que constituyen el sistema como unidad.[6] Eso destaca el cierre organizativo y la autoproducción. Sin embargo, la autopoiesis por sí sola no exige necesariamente variación hereditaria ni evolución darwiniana abierta, aunque autores posteriores hayan combinado esas ideas.[6,7]

El quimotón de Tibor Gánti ofrece otra arquitectura: tres subsistemas autocatalíticos acoplados para metabolismo, una frontera de membrana que se produce a sí misma y una plantilla informacional.[34] El modelo importa históricamente porque se niega a dejar sola ninguna función. Registrar su estructura tripartita no demuestra que todo organismo encarne literalmente un quimotón ni que el modelo sea el único correcto.

Ruiz-Mirazo, Peretó y Moreno unieron deliberadamente autonomía y capacidad de evolución abierta.[7] Eso devuelve herencia e innovación al modelo de automantenimiento, pero el término abierta introduce su propia frontera. Es difícil de operacionalizar en sistemas conocidos y nuevos, sobre todo en la escala temporal de una misión, de modo que la incertidumbre puede desplazarse en vez de desaparecer.[3,7,34]

Estas definiciones funcionan como teorías compactas. Cada una explica rasgos importantes y expone un punto ciego distinto: mantenimiento sin herencia, evolución sin un mecanismo fácil de observar o una arquitectura cuya universalidad no está demostrada. Ningún experimento ha seleccionado una como definición única para todos los casos conocidos y posibles.[2–4,7,10] Aun así, pueden compararse por alcance, coherencia, capacidad de prueba y éxito práctico.

En qué punto estamos

Las definiciones teóricas mejoran una lista suelta al explicar cómo encajan las propiedades, pero no eliminan la elección de unidad. La fórmula de la NASA privilegia la capacidad evolutiva, la autopoiesis privilegia la autoproducción y el quimotón acopla tres subsistemas. La prueba más aguda llega ahora con los virus, cuyas partículas extracelulares, fases intracelulares y linajes evolutivos apuntan a respuestas distintas según qué se clasifique.

4. Los virus revelan la unidad

La pregunta

> *¿Un virus no está vivo porque el virión carece de metabolismo autónomo, o sí lo está porque un linaje viral evoluciona y su fase intracelular reorganiza una célula? La disputa no puede resolverse hasta declarar explícitamente la unidad sometida a juicio.*

Los virus son parásitos intracelulares obligados. Los viriones extracelulares carecen de metabolismo autónomo y traducción basada en ribosomas, mientras la reproducción viral necesita maquinaria celular.[13–15] Algunos virus codifican componentes relacionados con metabolismo o traducción y remodelan el metabolismo del huésped, pero ninguno conocido posee un sistema de traducción autónomo completo.

Su condición evolutiva no está en duda. Las poblaciones virales mutan, heredan variación, sufren selección y se adaptan.[13,16] Sin embargo, la evolución por sí sola no decide si la unidad viva pertinente es el virión, la célula infectada, el linaje o un sistema acoplado huésped-virus. Criterio y unidad deben viajar juntos.

La distinción de fases concreta el desacuerdo. Un virión puede estar inerte o casi inerte fuera de un huésped. Dentro de una célula, el programa viral redirige recursos moleculares y crea un sistema reproductivo. El concepto de virocélula trata esa fase infectada como biológicamente central.[13,15,17,18] Es influyente, pero no un sustituto aceptado universalmente de las explicaciones centradas en la célula.

Los especialistas defienden, por tanto, posiciones vivas. Forterre propone una visión centrada en el virus que distingue viriones y fase activa de la célula infectada.[15,18] Moreira y López-García sostienen exclusiones centradas en la célula y advierten contra colocar los virus en el árbol celular de la vida.[16] Pertenencia a un árbol, condición de organismo e inclusión en la vida son preguntas relacionadas, no intercambiables.

Mimivirus hizo más difíciles de mantener expectativas antiguas. Su genoma ronda 1,2 megabases e incluye un repertorio inesperadamente grande con genes relacionados con traducción.[17] Sigue careciendo de ribosomas y traducción autónoma completa.[13,18] El tamaño y la complejidad gigantes desdibujan una intuición basada en la escala, pero más grande no significa automáticamente más vivo, y la dependencia del huésped permanece.

En qué punto estamos

> *Los virus no aportan solo un incómodo caso de sí o no. Revelan que virión, célula infectada y linaje responden preguntas biológicas diferentes. Celularidad, autonomía y evolución pueden sostener clasificaciones coherentes pero rivales. Descender por debajo de los virus agudiza la misma lección: viroides y priones conservan replicación o herencia mientras abandonan aún más organización asociada a una célula.*

5. Más pequeños que los virus, más silenciosos que las células

Los viroides son replicadores de ARN circular no codificante, de unos 250–400 nucleótidos, que reclutan enzimas del huésped y pueden causar enfermedades vegetales sin codificar proteínas ni construir viriones.[13,19] Los tamaños exactos varían con la clasificación y no todo viroide es

catalítico. Su existencia separa la replicación tanto de la codificación proteica como de la construcción de partículas virales.

Los priones eliminan por completo el ácido nucleico del mecanismo hereditario. Son conformaciones proteicas infecciosas que se propagan al moldear el plegamiento de otras proteínas.[20] En cultivo celular, poblaciones experimentales de priones pueden mostrar variación de cepas y selección.[21] El resultado no convierte un prion en organismo autónomo, pero muestra que la continuidad seleccionable no tiene que almacenarse en ADN o ARN.

Virus, viroides, priones, plásmidos y cromosomas ocupan posiciones distintas en continuos de replicación, producción de recursos y dependencia.[13,20,21] El continuo no borra diferencias cualitativas. Un cromosoma dentro de una célula y un virión transmisible no son la misma clase de entidad. Sí muestra por qué replicación o evolución por sí solas aún no forman una teoría completa del automantenimiento del organismo.

La estrategia opuesta consiste en minimizar una célula conservando organización celular. JCVI-syn3.0 posee un genoma de 531 kilopares de bases con 473 genes; 149 tenían inicialmente función biológica desconocida.[22] Es un derivado minimizado de un linaje celular existente, cultivado en condiciones de laboratorio, no vida montada desde química no viva ni el organismo más pequeño posible en cualquier ambiente.

Trabajos posteriores con el linaje JCVI-syn3A identificaron genes necesarios para restaurar una división celular regular, mostrando que incluso un genoma mínimo puede ocultar funciones que una lista simple no detectaría.[32] La reducción genómica en parásitos naturales también depende de lo que aportan huéspedes y ambientes.[33] La viabilidad mínima depende, por tanto, de linaje y entorno, no de un número universal de genes ni de una esencia molecular invariable.[22,23,32,33]

En qué punto estamos

> *Viroides y priones muestran cuánta poca maquinaria puede sostener replicación o variación seleccionable; las células mínimas muestran cuánta organización heredada queda incluso tras reducir un genoma. Ninguna dirección revela una esencia universal. Buscar una frontera inferior expone dependencia de huésped, entorno y linaje. Esa dependencia importa porque todos los casos conocidos proceden de una sola biosfera conectada.*

6. Una biosfera es un conjunto de entrenamiento sesgado

Toda vida celular confirmada en la Tierra está profundamente emparentada. Secuencias comparadas, maquinaria molecular conservada y bioquímica compartida sostienen la ascendencia común universal de las células conocidas, aunque las pruebas formales y sus supuestos hayan generado intercambio metodológico.[11,35,36] Es evidencia fuerte de parentesco, no prueba de que la vida surgiera una sola vez ni de que cada linaje viral comparta la misma historia.

Un rasgo terrestre universal puede tener dos explicaciones. Quizá la física y la química lo exijan para cualquier vida, o quizá sea una herencia contingente del antepasado común de la única biosfera superviviente que podemos estudiar.[28,31] Con una sola muestra histórica, a veces es imposible separar esas posibilidades.

La limitación no hace igualmente plausibles todas las alternativas imaginadas. La química del carbono ofrece una versatilidad extraordinaria; disolventes, intervalos de temperatura,

termodinámica y cinética de reacción imponen restricciones reales.[28] La disciplina consiste en distinguir restricción de herencia. ADN, ribosomas o un lípido concreto de membrana pueden ser universales aquí sin constituir la única realización posible de herencia, traducción o compartimentación.

Una biosfera de origen independiente transformaría la ciencia porque aportaría un segundo conjunto de prueba. Los rasgos compartidos serían candidatos más fuertes a la universalidad; las soluciones diferentes revelarían contingencia histórica.[11,28,31] Hasta entonces, las definiciones diseñadas desde organismos terrestres corren el riesgo de confundir una genealogía con una ley de la naturaleza.

En qué punto estamos

La Tierra enseña mucho sobre lo que puede llegar a ser una biosfera exitosa, pero menos sobre qué rasgos debe compartir toda vida. La física restringe la posibilidad, mientras la ascendencia común mezcla necesidad y herencia. Esa incertidumbre se vuelve operativa fuera de la Tierra: una misión debe buscar vida que aún no conoce mediante instrumentos diseñados a partir del único ejemplo disponible.

7. Buscar sin conocer la respuesta

La pregunta

¿Cómo puede una nave reconocer vida sin presuponer ADN, células o metabolismo familiar? Debe buscar patrones difíciles de explicar de manera abiótica y, al mismo tiempo, poner a prueba la contaminación, el comportamiento del instrumento y el contexto planetario de cada señal.

Habitabilidad no es evidencia de vida. Agua, fuentes de energía y moléculas orgánicas complejas pueden existir sin biología.[1,24,26,28,31] Identifican entornos que merece la pena explorar, no entornos habitados. La misma distinción vale para una molécula orgánica: su significado depende de abundancia, distribución, conservación, contexto y rutas abióticas plausibles.

Una detección creíble exige, por tanto, convergencia de evidencia. Hay que controlar contaminación y artefactos instrumentales, ensayar alternativas abióticas y combinar mediciones independientes en vez de apoyar una conclusión en una señal atractiva.[24–27,30] Carl Sagan y sus colaboradores demostraron la lógica tratando la Tierra como objetivo observado por Galileo: oxígeno, metano, pigmentos superficiales y emisiones de radio resultaban convincentes en conjunto, no de forma aislada.[30]

Viking sigue advirtiendo contra el cierre prematuro. Su experimento de liberación marcada produjo una señal positiva de respuesta metabólica, mientras el cromatógrafo de gases-espectrómetro de masas no detectó compuestos orgánicos indígenas.[25] Trabajos posteriores sostuvieron que los percloratos pudieron destruir orgánicos durante el calentamiento, y críticos publicados discutieron que esa reinterpretación explicase los resultados de Viking.[37,38] Las mediciones son hechos históricos; su significado biológico continúa en disputa.

Las definiciones evolutivas crean otra brecha práctica. La evolución darwiniana puede ser central en teoría, pero normalmente es demasiado lenta para demostrarla de forma directa durante una misión robótica. Por eso las misiones emplean proxies químicos, estructurales, metabólicos o

ecológicos.[3,25,26] Cada proxy admite falsos positivos y falsos negativos, de modo que ninguna escala o peldaño garantiza certeza.

Los enfoques agnósticos intentan reducir la dependencia de moléculas familiares. Los métodos propuestos examinan distribuciones moleculares restringidas o alta complejidad de ensamblaje sin exigir ADN.[28,29,31] Son hipótesis activas, no detectores universales demostrados. Las métricas de ensamblaje y señales afines deben superar desafíos abióticos, muestras vivas diversas y pruebas ciegas antes de sostener un anuncio de descubrimiento.

En qué punto estamos

Detectar vida es construir un argumento con contexto, controles y evidencia independiente. Habitabilidad y compuestos orgánicos justifican atención; no anuncian biología. Viking muestra por qué una respuesta aislada puede seguir ambigua durante décadas, y las biofirmas agnósticas continúan a prueba. La pregunta final es, por tanto, tan procedimental como definitoria: ¿cómo razonar cuando ningún criterio puede cumplir por sí solo todos los trabajos?

8. Pluralismo disciplinado

La práctica actual más defendible consiste en declarar explícitamente tres cosas: tarea, unidad y criterios.[2,3,10,13,24] ¿Clasificamos un objeto individual, explicamos la organización de una célula, seguimos un linaje evolutivo o decidimos si una señal planetaria justifica investigar más? Son preguntas conectadas, pero no idénticas.

Para clasificar, la autonomía celular puede dibujar una frontera clara y útil, siempre que no se declaren resueltos los virus solo por definición. Para teorizar, autopoiesis, arquitectura del quimotón y autonomía evolutiva pueden juzgarse por alcance explicativo y consecuencias comprobables. Para detectar, los criterios operativos deben fijarse de antemano y evaluarse frente a contaminación y alternativas abióticas.

Este pluralismo es discutido porque muchos investigadores buscan razonablemente una unificación más profunda. No es relativismo. Las definiciones siguen respondiendo ante evidencia, consistencia lógica, alcance, capacidad predictiva y éxito operativo.[2,3,10] Una definición que clasifique mal de forma repetida organismos establecidos o no pueda guiar la discriminación debe perder terreno; una teoría que unifique casos antes separados debe ganarlo.

Las fronteras de este artículo también son deliberadas. QTC-021 trata la transición desde la química hasta la evolución darwiniana abierta. QTC-027 trata herencia, árboles, redes y el lugar de los virus en la historia evolutiva. Aquí los virus y agentes subvirales sirven para poner a prueba definiciones, no como historia completa del origen o de la evolución de la vida.

La pregunta «¿está vivo?» gana precisión científica al descomponerse. ¿Se mantiene el sistema? ¿Qué recursos produce y cuáles debe aportar un huésped? ¿Dónde se encuentra la herencia? ¿Evoluciona un linaje? ¿Qué mediciones excluyen alternativas abióticas? Una sola palabra puede seguir siendo útil, pero las subpreguntas revelan a qué nos compromete la respuesta.

En qué punto estamos

La vida no ha escapado de la ciencia porque una frase no pueda contenerla. La disputa se vuelve tratable cuando tarea, unidad y evidencia son explícitas. Células, virus, viroides, priones y genomas

mínimos dejan entonces de ser molestias y se convierten en experimentos sobre nuestros conceptos. Una futura segunda biosfera puede unificar las definiciones o multiplicarlas, pero cualquiera de los dos resultados será evidencia, no una votación.

Lo que sabemos y cómo lo sabemos

- Ninguna definición aceptada universalmente resuelve todos los casos límite, y las definiciones publicadas cumplen trabajos clasificatorios, teóricos y operativos diferentes.[1–5,10,13,24]
- Los rasgos comunes son informativos, pero insuficientes por separado; reproducción, metabolismo y autonomía dependen del nivel biológico, el estado y el apoyo ambiental.[3,8,9,12,13,31,33]
- Los virus evolucionan y reorganizan células huésped, pero carecen de metabolismo y traducción autónomos, mientras viroides y priones separan la replicación de todavía más maquinaria celular.[13–21]
- Los experimentos con genomas mínimos identifican requisitos dentro de células heredadas y entornos especificados, no una esencia molecular universal ni una recreación del origen de la vida.[22,23,32,33]
- Las afirmaciones de detección de vida requieren contexto ambiental, control de contaminación, alternativas abióticas y mediciones convergentes.[24–27,30,37,38]

Lo que todavía no sabemos

- Si una teoría madura producirá una definición de vida independiente de la tarea o conservará varios conceptos irreducibles pero coordinados.
- Qué rasgos universales de las células terrestres son necesidades de la vida y cuáles son contingencias heredadas de una ascendencia común.
- Si los virus se clasifican mejor fuera de la vida, como linajes vivos o mediante una unidad de célula infectada distinta del virión extracelular.
- Qué biofirmas agnósticas pueden distinguir vida desconocida de química abiótica compleja en entornos planetarios realmente diferentes.

Qué podría hacernos cambiar de opinión

- El descubrimiento de una biosfera de origen independiente cuya química y organización permitan probar qué rasgos terrestres son verdaderamente universales.
- Una teoría que derive de forma única una definición para células, virus, replicadores subvirales, modelos de origen y detección operativa sin pérdidas específicas de cada tarea.
- Una propiedad única demostrada que esté presente en todo sistema vivo, ausente de todo sistema abiótico y pueda medirse en entornos desconocidos.
- Experimentos ciegos de detección que demuestren que una métrica agnóstica discrimina de forma fiable muestras vivas diversas frente a controles abióticos exigentes.

Si solo recuerdas una cosa

Preguntar si algo está vivo solo se vuelve científico cuando nombramos la unidad, la tarea que debe cumplir la definición y la evidencia que distinguiría la vida de una imitación convincente.

Artículos relacionados

- QTC-008 — La vida funciona con gradientes
- QTC-021 — Cuando la química empezó a evolucionar
- QTC-027 — De la información a la herencia: árbol, red y virus

Referencias

[1] NASA Astrobiology Program. About Astrobiology: Life, Here and Beyond. Updated 2026. https://astrobiology.nasa.gov/about/

[2] Carol E. Cleland and Christopher F. Chyba. Defining 'Life'. Origins of Life and Evolution of the Biosphere 32, 387–393 (2002). DOI 10.1023/A:1020503324273. https://doi.org/10.1023/A:1020503324273

[3] Steven A. Benner. Defining Life. Astrobiology 10(10), 1021–1030 (2010). DOI 10.1089/ast.2010.0524. https://doi.org/10.1089/ast.2010.0524

[4] Pier Luigi Luisi. About Various Definitions of Life. Origins of Life and Evolution of the Biosphere 28, 613–622 (1998). DOI 10.1023/A:1006517315105. https://doi.org/10.1023/A:1006517315105

[5] Edward N. Trifonov. Vocabulary of Definitions of Life Suggests a Definition. Journal of Biomolecular Structure and Dynamics 29(2), 259–266 (2011). DOI 10.1080/073911011010524992. https://doi.org/10.1080/073911011010524992

[6] F. G. Varela, H. R. Maturana and R. Uribe. Autopoiesis: The Organization of Living Systems, Its Characterization and a Model. Biosystems 5(4), 187–196 (1974). DOI 10.1016/0303-2647(74)90031-8. https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/4407425/

[7] Kepa Ruiz-Mirazo, Juli Peretó and Alvaro Moreno. A Universal Definition of Life: Autonomy and Open-Ended Evolution. Origins of Life and Evolution of the Biosphere 34, 323–346 (2004). DOI 10.1023/B:ORIG.0000016440.53346.dc. https://doi.org/10.1023/B:ORIG.0000016440.53346.dc

[8] Daniel E. Koshland Jr. The Seven Pillars of Life. Science 295, 2215–2216 (2002). DOI 10.1126/science.1068489. https://doi.org/10.1126/science.1068489

[9] Jack W. Szostak, David P. Bartel and Pier Luigi Luisi. Synthesizing Life. Nature 409, 387–390 (2001). DOI 10.1038/35053176. https://doi.org/10.1038/35053176

[10] Gilles Bruylants, Kristin Bartik and Jacques Reisse. Is It Useful to Have a Clear-cut Definition of Life? On the Use of Fuzzy Logic in Prebiotic Chemistry. Origins of Life and Evolution of Biospheres 40, 137–143 (2010). DOI 10.1007/s11084-010-9192-3. https://doi.org/10.1007/s11084-010-9192-3

[11] Douglas L. Theobald. A Formal Test of the Theory of Universal Common Ancestry. Nature 465, 219–222 (2010). DOI 10.1038/nature09014. https://doi.org/10.1038/nature09014

[12] Wayne L. Nicholson, Nobuo Munakata, Gerda Horneck, Henry J. Melosh and Peter Setlow. Resistance of Bacillus Endospores to Extreme Terrestrial and Extraterrestrial Environments. Microbiology and Molecular Biology Reviews 64(3), 548–572 (2000). DOI 10.1128/MMBR.64.3.548-572.2000. https://doi.org/10.1128/MMBR.64.3.548-572.2000

[13] Eugene V. Koonin and Petro Starokadomskyy. Are Viruses Alive? The Replicator Paradigm Sheds Decisive Light on an Old but Misguided Question. Studies in History and Philosophy of Biological and Biomedical Sciences 59, 125–134 (2016). DOI 10.1016/j.shpsc.2016.02.016. https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC5406846/

[14] André Lwoff. The Concept of Virus. Journal of General Microbiology 17, 239–253 (1957). DOI 10.1099/00221287-17-2-239. https://doi.org/10.1099/00221287-17-2-239

[15] Patrick Forterre. Defining Life: The Virus Viewpoint. Origins of Life and Evolution of Biospheres 40, 151–160 (2010). DOI 10.1007/s11084-010-9194-1. https://doi.org/10.1007/s11084-010-9194-1

[16] David Moreira and Purificación López-García. Ten Reasons to Exclude Viruses from the Tree of Life. Nature Reviews Microbiology 7, 306–311 (2009). DOI 10.1038/nrmicro2108. https://doi.org/10.1038/nrmicro2108

[17] Didier Raoult et al. The 1.2-Megabase Genome Sequence of Mimivirus. Science 306, 1344–1350 (2004). DOI 10.1126/science.1101485. https://doi.org/10.1126/science.1101485

[18] Didier Raoult and Patrick Forterre. Redefining Viruses: Lessons from Mimivirus. Nature Reviews Microbiology 6, 315–319 (2008). DOI 10.1038/nrmicro1858. https://doi.org/10.1038/nrmicro1858

[19] Theodor O. Diener. Discovering Viroids: A Personal Perspective. Nature Reviews Microbiology 1, 75–80 (2003). DOI 10.1038/nrmicro736. https://doi.org/10.1038/nrmicro736

[20] Stanley B. Prusiner. Novel Proteinaceous Infectious Particles Cause Scrapie. Science 216(4542), 136–144 (1982). DOI 10.1126/science.6801762. https://doi.org/10.1126/science.6801762

[21] Jiali Li, Shawn Browning, Sukhvir P. Mahal, Anja M. Oelschlegel and Charles Weissmann. Darwinian Evolution of Prions in Cell Culture. Science 327(5967), 869–872 (2010). DOI 10.1126/science.1183218. https://doi.org/10.1126/science.1183218

[22] Clyde A. Hutchison III et al. Design and Synthesis of a Minimal Bacterial Genome. Science 351(6280), aad6253 (2016). DOI 10.1126/science.aad6253. https://www.jcvi.org/publications/design-and-synthesis-minimal-bacterial-genome

[23] Mark A. Bedau, George M. Church, Steen Rasmussen, Arthur L. Caplan, Steven A. Benner, Martin Fussenegger, Jim Collins and David W. Deamer. Life after the Synthetic Cell. Nature 465, 422–424 (2010). DOI 10.1038/465422a. https://doi.org/10.1038/465422a

[24] National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. An Astrobiology Science Strategy for the Search for Life in the Universe. National Academies Press, 2019. DOI 10.17226/25252. https://www.nationalacademies.org/read/25252

[25] Marc Neveu, Lindsay E. Hays, Mary A. Voytek, Michael H. New and Mitchell D. Schulte. The Ladder of Life Detection. Astrobiology 18(11), 1375–1402 (2018). DOI 10.1089/ast.2017.1773. https://doi.org/10.1089/ast.2017.1773

[26] NASA Astrobiology Program. Ladder of Life Detection. Updated 2026. https://science.nasa.gov/astrobiology/researchers/life-detection-resources/ladder-of-life-detection/

[27] James Green et al. Call for a Framework for Reporting Evidence for Life Beyond Earth. Nature 598, 575–579 (2021). DOI 10.1038/s41586-021-03804-9. https://doi.org/10.1038/s41586-021-03804-9

[28] National Research Council. The Limits of Organic Life in Planetary Systems. National Academies Press, 2007. DOI 10.17226/11919. https://www.nationalacademies.org/read/11919

[29] Stuart M. Marshall et al. Identifying Molecules as Biosignatures with Assembly Theory and Mass Spectrometry. Nature Communications 12, 3033 (2021). DOI 10.1038/s41467-021-23258-x. https://doi.org/10.1038/s41467-021-23258-x

[30] Carl Sagan, W. Reid Thompson, Robert Carlson, Donald Gurnett and Charles Hord. A Search for Life on Earth from the Galileo Spacecraft. Nature 365, 715–721 (1993). DOI 10.1038/365715a0. https://doi.org/10.1038/365715a0

[31] Christopher P. McKay. What Is Life, and How Do We Search for It in Other Worlds? PLOS Biology 2(9), e302 (2004). DOI 10.1371/journal.pbio.0020302. https://doi.org/10.1371/journal.pbio.0020302

[32] James F. Pelletier et al. Genetic Requirements for Cell Division in a Genomically Minimal Cell. Cell 184, 2430–2440.e16 (2021). DOI 10.1016/j.cell.2021.03.008. https://doi.org/10.1016/j.cell.2021.03.008

[33] Nancy A. Moran. Microbial Minimalism: Genome Reduction in Bacterial Pathogens. Cell 108, 583–586 (2002). DOI 10.1016/S0092-8674(02)00665-7. https://doi.org/10.1016/S0092-8674(02)00665-7

[34] Tibor Gánti. The Principles of Life. Eörs Szathmáry and James Griesemer, editors. Oxford University Press, 2003. DOI 10.1093/acprof:oso/9780198507260.001.0001. https://academic.oup.com/book/4974

[35] Takahiro Yonezawa and Masami Hasegawa. Was the Universal Common Ancestry Proved? Nature 468, E9 (2010). DOI 10.1038/nature09482. https://www.nature.com/articles/nature09482

[36] Douglas L. Theobald. Theobald Reply. Nature 468, E10 (2010). DOI 10.1038/nature09483. https://www.nature.com/articles/nature09483

[37] Rafael Navarro-González, Edgar Vargas, José M. de la Rosa, Alejandro C. Raga and Christopher P. McKay. Reanalysis of the Viking Results Suggests Perchlorate and Organics at Midlatitudes on Mars. Journal of Geophysical Research 115, E12010 (2010). DOI 10.1029/2010JE003599. https://doi.org/10.1029/2010JE003599

[38] Klaus Biemann and Jeffrey L. Bada. Comment on 'Reanalysis of the Viking Results Suggests Perchlorate and Organics at Midlatitudes on Mars' by Rafael Navarro-González et al. Journal of Geophysical Research 116, E12001 (2011). DOI 10.1029/2011JE003869. https://doi.org/10.1029/2011JE003869

Variación al azar y un filtro

QTC-010 · 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

La evolución suele comprimirse en un lema: mutación al azar seguida de selección natural. El lema solo sirve si se tratan con cuidado sus dos mitades. Azar no significa que todas las mutaciones sean igual de probables, que la química carezca de sesgos o que los organismos cambien porque lo necesitan. La selección no es aleatoria, pero tampoco es una mente, un plan ni la única fuerza evolutiva. Este artículo sigue la idea desde Darwin y Wallace, que formularon la selección natural sin genética moderna, hasta los experimentos que mostraron que las mutaciones preceden a la selección y que las poblaciones cambian en tiempo real. Después integra aptitud, deriva, restricción, exaptación y contingencia histórica. El resultado es un mecanismo capaz de producir adaptaciones sorprendentes sin previsión, progreso inevitable ni un ingeniero perfecto.

En 60 segundos

Las poblaciones evolucionan cuando diferencias heredadas alteran la contribución reproductiva a lo largo de las generaciones. Las mutaciones aportan parte de esas diferencias, pero no aparecen porque vayan a resolver el problema actual del organismo. Sus probabilidades dependen de la química molecular, el contexto de secuencia, la replicación, la reparación y el estado fisiológico. La selección natural es, por tanto, una clasificación no aleatoria que actúa sobre una entrada sesgada pero sin previsión. Darwin y Wallace reconocieron ese mecanismo antes de que se conocieran genes, cromosomas o ADN. Experimentos posteriores hicieron visible el orden temporal: los mutantes resistentes existían antes de la exposición y la selección los amplificó después. Otros experimentos han observado adaptación, reversión, costes y contingencia histórica. Sin embargo, la selección nunca actúa sola. Deriva, migración, recombinación, restricciones del desarrollo e historia heredada también modifican los resultados. La aptitud es local a un ambiente, no una escala universal de valor o complejidad. Por eso la evolución puede construir organismos que parecen diseñados y conservar compromisos, piezas reutilizadas, rutas frágiles y huellas de su punto de partida.

Por qué importa esta pregunta

La expresión «evolución al azar» invita a dos errores opuestos. Uno presenta la vida como accidente puro y borra la selección; el otro interpreta la adaptación como prueba de que los cambios útiles fueron anticipados. Ambos invierten la lógica real. La variación aparece mediante procesos físicos con sesgos medibles, mientras que los ambientes modifican qué variantes dejan descendencia. Separar ambas cosas importa para la resistencia a antibióticos, los debates sobre finalidad y todos los artículos posteriores sobre herencia. También ofrece una regla práctica: preguntar cuándo surgió una

variante, cómo se transmitió, qué cambió su frecuencia y qué procesos alternativos podrían producir el mismo patrón.

1. Qué significa azar

La pregunta

Si la mutación es aleatoria, ¿por qué aparecen a veces las mismas adaptaciones útiles? La respuesta empieza separando el azar respecto a la necesidad de la igualdad de probabilidades. El azar evolutivo tiene una pregunta de referencia: ¿surgió el cambio porque se conocía su beneficio futuro?

La selección natural requiere diferencias heredables, variación en la contribución reproductiva y una relación entre ambas. Por ello una población puede cambiar de forma sistemática aunque las variantes no se produzcan como respuesta a lo que resultaría útil. El mecanismo trata de persistencia diferencial entre generaciones, no de la intención ni del origen de cada variación. [1,3,4]

En este contexto, mutación aleatoria significa no dirigida respecto al valor adaptativo actual. No significa sin causa, uniformemente distribuida ni igualmente probable que ayude o perjudique. Una sustitución de base sigue teniendo una causa química; lo relevante es que el suceso molecular no examina la aptitud futura del organismo resultante antes de ocurrir. [5,6]

Los espectros mutacionales están muy estructurados. Determinadas bases, contextos de secuencia, errores de replicación, vías de reparación y estados fisiológicos hacen más probables unos cambios que otros. Esos sesgos pueden canalizar qué rutas adaptativas se alcanzan primero, pero una oferta sesgada de variantes no equivale a producir el cambio exacto que premiará la selección futura. [6,7]

La selección no es aleatoria porque las variantes difieren de forma predecible en supervivencia o reproducción dentro de un ambiente definido. Aun así, un resultado evolutivo conserva azar e historia: las mutaciones llegan en cierto orden, las poblaciones finitas muestrean desigualmente la descendencia y los ambientes fluctúan. La selección es un proceso causal entre varios, no una garantía de alcanzar siempre el mismo final. [3,4,8,9]

Llamar filtro a la selección recoge una asimetría útil: las variantes aparecen antes de que se clasifiquen sus consecuencias. Pero un filtro literal es demasiado pasivo. Los organismos se reproducen, modifican ambientes, migran, compiten, se aparean y alteran la distribución de variación sobre la que actuará la siguiente ronda. La imagen introduce el mecanismo, pero no lo sustituye. [3,8,9]

En qué punto estamos

El azar describe, por tanto, la relación entre el origen mutacional y la necesidad adaptativa, no un desorden en cada detalle molecular. La selección aporta una clasificación direccional sin previsión, mientras siguen activos sesgo, muestreo e historia. Esa distinción no estaba disponible en su forma moderna para quienes describieron primero la selección natural: tuvieron el filtro antes que la genética.

2. Darwin tuvo un filtro, no genética

El argumento de Darwin de 1859 conectó variación, lucha y reproducción diferencial antes de que la herencia mendeliana, los cromosomas, el ADN o la mutación molecular se integraran en la biología. El logro fue conceptual, no genéticamente completo. La síntesis posterior no se limitó a decorar la selección natural con palabras nuevas: aportó un mecanismo particulado transmisible que aquella generación no poseía. [1,12,13]

El reconocimiento también empieza antes del Origen. En 1858 se presentaron conjuntamente ante la Linnean Society escritos de Charles Darwin y Alfred Russel Wallace. Sus pruebas, formulaciones e influencia posterior no fueron idénticas, pero una historia precisa no borra a Wallace ni finge que ambas contribuciones fueran intercambiables en todos sus aspectos. [1,2]

Darwin podía observar que la descendencia se parece a sus progenitores y que los criadores acumulan diferencias, pero desconocía el mecanismo físico que conserva la información hereditaria. Su hipótesis provisional de la pangénesis imaginaba partículas procedentes de las partes corporales. Fue un intento serio de resolver una laguna real y era incorrecto como explicación moderna de la herencia. [1,10]

El marco transformista de Lamarck fue también más sustancial que la caricatura de un animal que desea adoptar una forma nueva. El propio Darwin admitió uso, desuso y efectos heredados en partes de su obra. La genética de poblaciones y la teoría cromosómica reemplazaron esos esquemas con otra arquitectura hereditaria; no vencieron porque los naturalistas anteriores jamás hubieran razonado cuidadosamente sobre el cambio. [10–13]

Algunos estados influidos por el ambiente pueden pasar entre generaciones mediante mecanismos epigenéticos. Sin embargo, su estabilidad, alcance e importancia biológica varían entre sistemas y no demuestran un proceso general que escriba en los genomas cambios específicamente útiles. La herencia transgeneracional acotada corrige una imagen demasiado rígida sin restaurar el lamarckismo adaptativo como regla universal. [11,14]

En qué punto estamos

> *Darwin y Wallace identificaron un principio de clasificación cuando el soporte y las reglas de la herencia seguían oscuros. La genética posterior hizo comprobable el mecanismo a una escala más fina y mostró los límites de las propuestas pregenéticas. El siguiente paso decisivo fue experimental: averiguar si las variantes útiles aparecen porque las convoca un desafío o ya existen antes de comenzar la selección.*

3. Las mutaciones llegan antes que la necesidad

La pregunta

> *Una colonia resistente aparece después de que las bacterias encuentren un virus o un antibiótico. ¿Creó la exposición la mutación necesaria o reveló una variante rara ya presente? Ambas historias pueden producir la misma placa final, así que el experimento debe recuperar la historia que la precedió.*

Luria y Delbrück compararon la variación entre muchos cultivos bacterianos independientes. Si la resistencia se indujera solo al llegar el fago, los recuentos resistentes se agruparían en valores

parecidos. En cambio, algunos cultivos contenían grandes acumulaciones producidas por mutaciones tempranas cuyos descendientes se multiplicaron antes de la exposición. La distribución llevaba una marca temporal: las variantes resistentes habían surgido antes del virus selector. [15]

La réplica en placa aportó una versión espacial de la misma lógica. Se copiaron en nuevas placas colonias cultivadas sin agente selectivo y el crecimiento resistente apareció repetidamente en posiciones correspondientes. Los investigadores podían regresar a la colonia fuente no expuesta. La selección revelaba y enriquecía un linaje previo en lugar de ordenar a cada célula que fabricara la mutación necesaria. [16]

La resistencia a antibióticos sigue la misma distinción a una escala histórica mayor. Genes y variantes de resistencia pueden ser anteriores a los antibióticos clínicos, porque microbios y compuestos antimicrobianos poseen largas historias evolutivas. El uso médico crea después una selección intensa y nuevas oportunidades ecológicas, amplificando, combinando y desplazando variantes que no tuvieron que originarse como respuesta a una receta. [15–17]

El estrés complica la tasa sin invertir la lógica. Las células pueden modificar reparación, replicación, recombinación o crecimiento en condiciones adversas, aumentando la mutación o cambiando su espectro. Esa regulación eleva la probabilidad de que aparezca alguna variante útil, pero no demuestra que el genoma identifique la solución futura exacta y la escriba bajo demanda. [5,18]

La inmunidad CRISPR-Cas es realmente adquirida y específica de secuencia: fragmentos asociados a invasores previos pueden guiar la defensa posterior. Pero esa memoria molecular registra encuentros pasados; no anticipa una necesidad adaptativa desconocida. Llamar lamarckiana a toda respuesta biológica adquirida oculta mecanismos distintos que los experimentos sí permiten separar. [19]

En qué punto estamos

Fluctuación, posición y archivos históricos sitúan la variación antes del desafío selectivo, mientras que las respuestas al estrés y la memoria inmunitaria añaden mecanismos acotados, no previsión. Cuando el tiempo se vuelve visible, la selección deja de ser un relato abstracto sobre supervivientes. Pasa a ser un proceso observable en el espacio, las generaciones y los estados ancestrales reconstruidos.

4. La selección puede observarse

En una placa gigante con franjas de concentración antibiótica creciente, las poblaciones bacterianas avanzaron hasta encontrar una dosis que no podían cruzar. Descendientes resistentes surgieron cerca de la frontera y abrieron el territorio siguiente. El patrón filmado hizo visible la adaptación y también la dependencia de la trayectoria: dónde aparecía una mutación y qué fondo la portaba condicionaban el acceso posterior. [20]

Los experimentos de evolución a largo plazo conservan ancestros congelados y muestrean descendientes durante miles de generaciones. Es posible reanimar ambos y comparar directamente crecimiento, genomas y comportamiento ecológico. Las poblaciones replicadas se

adaptan al mismo ambiente pero divergen en los detalles, aportando pruebas controladas de selección sin fingir que la repetición elimina azar o historia. [21]

La evolución del uso aeróbico del citrato en una población de E. coli ilustra una contingencia por capas. Cambios anteriores hicieron permisivo el linaje, una reorganización habilitó un uso débil y modificaciones posteriores refinaron el fenotipo. La innovación no fue una única mutación válida en cualquier fondo ni un salto inexplicable sin historia de intermediarios seleccionables. [22,23]

La selección de campo puede invertirse cuando cambian las condiciones. En los pinzones de Darwin, los rasgos del pico asociados al éxito reproductivo bajo cierto patrón de lluvias y alimento pueden dejar de ser favorecidos al variar el ambiente. Medir los mismos rasgos en el tiempo sustituye una escalera de mejora permanente por respuestas condicionales a circunstancias ecológicas locales. [8,24]

Los experimentos con polillas moteadas también conectan color, fondo y depredación por aves. Trabajos de campo posteriores reforzaron la relación causal sin exigir que cada detalle de cada experimento histórico fuera impecable. El caso importa como un episodio medido entre muchos, no porque una sola fotografía escolar soporte toda la evidencia de la selección natural. [4,25]

En qué punto estamos

> *Los experimentos y registros de campo muestran cómo la selección cambia poblaciones, pero también revelan reversiones, rutas múltiples y dependencia de estados previos. Lo que se propaga en un lugar o una década puede fracasar en otro. La siguiente trampa conceptual es la palabra aptitud, que parece una puntuación universal aunque la biología solo la mide dentro de una población y un ambiente concretos.*

5. La aptitud es local, no progreso

La pregunta

> *«Más apto» parece significar más fuerte, sano o avanzado. En el análisis evolutivo no significa por sí solo ninguna de esas cosas. Un rasgo obtiene ventaja únicamente por su contribución esperada a la descendencia en un contexto definido, y puede cambiar de signo cuando cambia ese contexto.*

La aptitud es una contribución reproductiva esperada, definida para un genotipo o fenotipo dentro de una población y un ambiente. Puede estimarse mediante supervivencia, éxito de apareamiento, fecundidad, supervivencia de descendientes o combinaciones de esos componentes. No es valor moral, perfección corporal ni una etiqueta colocada después sobre aquello que quedó. [8,9]

La resistencia a antibióticos vuelve concreta esa localidad. Un mecanismo resistente puede ralentizar el crecimiento sin fármaco y mutaciones compensatorias reducir después ese coste. Que venza el linaje resistente depende de concentración, competidores, historia del tratamiento y compensación. La adaptación mejora el rendimiento respecto a una circunstancia; no concede todas las ventajas simultáneamente. [26]

El ejemplo falciforme contiene un compromiso aún más marcado. En regiones con malaria, una copia del alelo relevante puede disminuir el riesgo de malaria grave, mientras dos copias pueden causar anemia falciforme. La selección puede mantener un polimorfismo porque las consecuencias reproductivas difieren entre genotipos y ambientes, no porque un alelo sea universalmente superior. [27]

La selección sexual puede favorecer ornamentos, exhibiciones o competencia costosos cuando el mayor éxito de apareamiento compensa la menor supervivencia. Un rasgo que vuelve al animal más visible o exige más energía puede propagarse. Selección natural y sexual no son inteligencias rivales, sino componentes de contribución reproductiva diferencial capaces de empujar rasgos medidos en direcciones distintas. [28]

La evolución tampoco contiene una orden interna de aumentar la complejidad. Puede haber tendencias en linajes o medidas concretos, a veces porque la vida empieza cerca de un límite inferior y la variación solo puede expandirse hacia arriba. Pero cada tendencia exige su propia métrica, referencia y mecanismo. La selección discrimina directamente más descendencia, no más complejidad. [29]

En qué punto estamos

> *La aptitud es una contabilidad local de descendientes, de modo que la adaptación puede incluir costes, polimorfismos equilibrados y rasgos que cambian supervivencia por apareamiento. Esa contabilidad no aporta una escala universal de progreso. Tampoco explica cada cambio de frecuencia, porque las poblaciones finitas muestrean la herencia de manera desigual incluso cuando las variantes tienen efectos selectivos idénticos o casi idénticos.*

6. La selección no está sola

La deriva genética es el cambio estocástico de frecuencias alélicas producido por el muestreo finito entre generaciones. Sus efectos son mayores cuando el tamaño efectivo es pequeño, porque cada muestra reproductiva representa una fracción mayor de la población. La teoría matemática y las poblaciones controladas muestran divergencia incluso sin una ventaja selectiva constante. [30,33]

Los cuellos de botella y los efectos fundador intensifican ese muestreo. Una población muy reducida puede perder variantes por azar, mientras un pequeño grupo fundador porta frecuencias distintas de la población fuente. El crecimiento posterior no reconstruye automáticamente la historia perdida. La selección puede actuar después, pero lo hace sobre la variación alterada que sobrevivió al episodio demográfico. [30,33]

A escala molecular, la teoría neutral propuso que muchas sustituciones se propagan y fijan mediante deriva, no por selección positiva. Neutral no significa carente de toda función, y la teoría no niega la adaptación. Cambia la explicación inicial para una gran clase de diferencias moleculares y proporciona expectativas cuantitativas con las que comparar. [31]

La teoría casi neutral añade que las mutaciones de efecto pequeño pueden comportarse de manera distinta al cambiar el tamaño efectivo. Una variante débilmente perjudicial puede eliminarse eficazmente en una población grande y derivar en otra menor. El equilibrio entre deriva y selección varía así entre linajes, genomas, loci e intervalos históricos, sin un ajuste universal. [31,32]

Por ello las pruebas genómicas de selección deben contrastarse con demografía, ligamiento, recombinación y procesos de fondo. Un patrón parecido a un barrido o un estadístico inusual puede tener varias causas. La inferencia sólida compara modelos explícitos y evidencias independientes; nombrar una desviación respecto a un nulo sencillo no identifica la selección natural como fuente única. [37]

En qué punto estamos

La selección sigue siendo indispensable, pero deriva y demografía cambian las mismas frecuencias genéticas y pueden imitar algunas señales moleculares. Explicar exige alternativas, no un relato adaptativo reflejo. La misma disciplina se aplica a la forma orgánica: desarrollo heredado e historia previa limitan qué variación puede construirse, de modo que la evolución trabaja con estructuras disponibles en vez de rediseñar la vida desde cero.

7. Restricción, historia y diseño imperfecto

La pregunta

Si la selección premia variantes útiles, ¿por qué los organismos están llenos de rutas torpes, compromisos vulnerables y piezas reutilizadas? Porque la selección no explora todo diseño imaginable. Modifica el desarrollo heredado mediante pasos viables, dentro de una historia que vuelve accesibles unas rutas e inalcanzables otras.

François Jacob comparó la evolución con el bricolaje: las funciones nuevas se montan con materiales ya disponibles. La metáfora señala un hecho estructural. La variación parte de un organismo heredado cuyos genes, tejidos e interacciones del desarrollo deben seguir siendo suficientemente viables para reproducirse. La selección refina lo que aparece; no convoca componentes arbitrarios desde un espacio de diseño sin restricciones. [34]

La exaptación nombra un cambio de uso. Una característica pudo seleccionarse para una función anterior, o surgir sin estar moldeada para su papel posterior, y ser luego reutilizada. El término impide proyectar hacia atrás la utilidad presente como razón por la que apareció originalmente. La función posee una historia, no solo una descripción actual. [35]

La crítica adaptacionista exige probar alternativas antes de tratar cada rasgo como una solución óptima directa. Restricción del desarrollo, deriva, correlación física, compromisos y ascendencia compartida pueden contribuir a una forma. No sostiene que la adaptación sea rara; sostiene que la carga causal debe ganarse caso por caso. [36]

Las funciones complejas no tienen que llegar en un solo salto. Los estadios intermedios pueden realizar tareas distintas o más débiles, las piezas duplicadas pueden divergir y las estructuras existentes reutilizarse. Los experimentos de evolución digital demuestran que rutas intermedias seleccionables generan operaciones complejas bajo reglas conocidas, aunque no prueban que un rasgo biológico concreto siguiera la misma ruta. [34,35,38]

Restricción y contingencia hacen que la imperfección resulte informativa. Un sistema diseñado globalmente podría borrar su historia de construcción, pero los sistemas evolucionados suelen conservar desvíos y dependencias. Es posible comparar linajes, desarrollo, fósiles y genes para reconstruir esas rutas, evitando convertir cada relato plausible en una adaptación demostrada. [34–36]

En qué punto estamos

Bricolaje, exaptación y alternativas contrastadas explican por qué la organización útil convive con compromisos y desvíos heredados. Los resultados complejos pueden acumularse mediante etapas seleccionables sin un plano. La tarea final es combinar esa historia con la distinción previa entre

variación y clasificación, mostrando con precisión cómo un mecanismo sin metas produce apariencia de propósito.

8. Un mecanismo sin meta

La selección natural puede producir un ajuste estrecho entre organismos y ambientes sin representar un estado futuro. Las variantes surgen mediante procesos moleculares y del desarrollo próximos; aquellas que aportan más descendientes tienden a hacerse más comunes. La repetición entre generaciones almacena las consecuencias de clasificaciones pasadas y da a la adaptación poder acumulativo sin exigir que se anticipen mutaciones útiles. [1,3,5,6]

La frase «supervivencia del más apto» solo se vuelve circular cuando se define aptitud como aquello que sobrevivió. Los estudios evolutivos miden por separado componentes como supervivencia, éxito de apareamiento, fecundidad o crecimiento y comprueban si predicen cambios posteriores de frecuencia. Una predicción puede fallar, y precisamente eso impide que la explicación se reduzca a una tautología. [8,9]

Ninguna palabra resume el proceso completo. Mutación y recombinación crean o reorganizan variación; la herencia la transmite; la selección modifica contribuciones de manera no aleatoria; la deriva muestrea poblaciones finitas; y la migración las conecta. Sus fuerzas relativas cambian. El logro explicativo consiste en medir procesos e interacciones, no en atribuir todo resultado a un optimizador selectivo universal. [3,30–32]

Restricción e historia configuran después el menú sobre el que actúan esos procesos. Dos poblaciones sometidas a presiones parecidas pueden partir de variantes, arquitecturas del desarrollo o mutaciones previas distintas y seguir rutas diferentes. La convergencia es posible, pero también divergencia y reversión. La evolución posee dirección causal en contextos concretos sin una dirección final para la vida entera. [34,36]

Este artículo ha separado el origen de la variación del filtro que cambia su frecuencia. Todavía no ha seguido todas las rutas por las que se copia e intercambia información biológica. QTC-027 aborda ese problema posterior: la herencia vertical construye un árbol, mientras transferencia horizontal y virus añaden injertos, redes y conflictos sin abolir la descendencia. [3,30,31,32,34,36]

En qué punto estamos

La evolución no es accidente puro ni mejora planificada. La variación no dirigida entra en poblaciones mediante procesos físicos sesgados; la selección clasifica consecuencias; deriva, migración, restricción e historia alteran la ruta. Juntos acumulan un ajuste parecido al diseño sin diseñador ni destino. La siguiente pregunta es cómo la información heredada conserva suficiente fiabilidad para mantener esa acumulación y seguir cambiando.

Lo que sabemos y cómo lo sabemos

- Las mutaciones tienen causas físicas y sesgos estadísticos, pero su aparición no se dirige en general hacia el valor adaptativo que tendrán después.
- La selección natural es contribución reproductiva diferencial medible, y los experimentos permiten distinguirla de mutación, deriva e historia demográfica.

- La adaptación puede acumularse mediante intermediarios seleccionables, reutilización y compromisos sin previsión ni una tendencia universal hacia la complejidad.

Lo que todavía no sabemos

- Para muchas adaptaciones históricas no puede reconstruirse por completo la secuencia exacta de variantes intermedias, ambientes y tamaños poblacionales.
- Las contribuciones relativas de sesgo mutacional, selección, deriva, migración y restricción siguen siendo preguntas empíricas específicas de cada sistema.
- La frecuencia con que efectos epigenéticos transgeneracionales redirigen materialmente la evolución a largo plazo varía entre linajes y queda acotada por mecanismo y persistencia.

Qué podría hacernos cambiar de opinión

- La producción rutinaria y replicada de mutaciones futuras específicas debido a su utilidad exacta refutaría la afirmación de mutación no dirigida.
- Pruebas de que deriva, demografía y condiciones históricas iniciales no añaden poder explicativo simplificarían radicalmente la explicación actual.
- Una trayectoria universal y medible de forma independiente hacia complejidad creciente obligaría a revisar el rechazo del progreso evolutivo incorporado.

Si solo recuerdas una cosa

La variación no aparece porque vaya a ayudar; la selección carece de previsión; y la evolución también refleja deriva, compromisos, restricción, migración e historia.

Artículos relacionados

- QTC-009 — ¿Qué queremos decir realmente cuando hablamos de vida?
- QTC-027 — De la información a la herencia: árbol, red y virus

Referencias

[1] Charles Darwin. On the Origin of Species, first edition. Chs. I-IV; first-edition text (1859). https://darwin-online.org.uk/content/frameset?itemID=F373&viewtype=text&pageseq=1

[2] Charles Darwin; Alfred Wallace. On the Tendency of Species to form Varieties; and on the Perpetuation of Varieties and Species by Natural Means of Selection. Journal of the Proceedings of the Linnean Society of London, Zoology 3:45-62 (1858). DOI 10.1111/j.1096-3642.1858.tb02500.x. https://doi.org/10.1111/j.1096-3642.1858.tb02500.x

[3] R. C. Lewontin. The Units of Selection. Annual Review of Ecology and Systematics 1:1-18 (1970). DOI 10.1146/annurev.es.01.110170.000245. https://doi.org/10.1146/annurev.es.01.110170.000245

[4] John A. Endler. Natural Selection in the Wild. Princeton University Press (1986). https://press.princeton.edu/books/paperback/9780691083872/natural-selection-in-the-wild

[5] Richard E. Lenski; John E. Mittler. The Directed Mutation Controversy and Neo-Darwinism. Science 259(5092):188-194 (1993). DOI 10.1126/science.7678468. https://doi.org/10.1126/science.7678468

[6] Ruth Hershberg. Mutation—The Engine of Evolution: Studying Mutation and Its Role in the Evolution of Bacteria. Cold Spring Harbor Perspectives in Biology 7:a018077 (2015). DOI 10.1101/cshperspect.a018077. https://doi.org/10.1101/cshperspect.a018077

[7] A. Stoltzfus; L. Y. Yampolsky. Climbing Mount Probable: Mutation as a Cause of Nonrandomness in Evolution. Journal of Heredity 100(5):637-647 (2009). DOI 10.1093/jhered/esp048. https://doi.org/10.1093/jhered/esp048

[8] Russell Lande; Stevan J. Arnold. The Measurement of Selection on Correlated Characters. Evolution 37(6):1210-1226 (1983). DOI 10.1111/j.1558-5646.1983.tb00236.x. https://doi.org/10.1111/j.1558-5646.1983.tb00236.x

[9] H. Allen Orr. Fitness and Its Role in Evolutionary Genetics. Nature Reviews Genetics 10:531-539 (2009). DOI 10.1038/nrg2603. https://doi.org/10.1038/nrg2603

[10] Charles Darwin. The Variation of Animals and Plants under Domestication, volume 2. Ch. XXVII, provisional hypothesis of pangenesis (1868). https://darwin-online.org.uk/content/frameset?itemID=F877.2&viewtype=text&pageseq=1

[11] Richard W. Burkhardt, Jr. Lamarck, Evolution, and the Inheritance of Acquired Characters. Genetics 194(4):793-805 (2013). DOI 10.1534/genetics.113.151852. https://doi.org/10.1534/genetics.113.151852

[12] Ronald Aylmer Fisher. The Genetical Theory of Natural Selection. Clarendon Press (1930). DOI 10.5962/bhl.title.27468. https://doi.org/10.5962/bhl.title.27468

[13] Theodosius Dobzhansky. Genetics and the Origin of Species. Columbia University Press (1937). https://lccn.loc.gov/37027265

[14] Edith Heard; Robert A. Martienssen. Transgenerational Epigenetic Inheritance: Myths and Mechanisms. Cell 157(1):95-109 (2014). DOI 10.1016/j.cell.2014.02.045. https://doi.org/10.1016/j.cell.2014.02.045

[15] S. E. Luria; M. Delbrück. Mutations of Bacteria from Virus Sensitivity to Virus Resistance. Genetics 28(6):491-511 (1943). DOI 10.1093/genetics/28.6.491. https://doi.org/10.1093/genetics/28.6.491

[16] Joshua Lederberg; Esther M. Lederberg. Replica Plating and Indirect Selection of Bacterial Mutants. Journal of Bacteriology 63(3):399-406 (1952). DOI 10.1128/jb.63.3.399-406.1952. https://doi.org/10.1128/jb.63.3.399-406.1952

[17] Julian Davies; Dorothy Davies. Origins and Evolution of Antibiotic Resistance. Microbiology and Molecular Biology Reviews 74(3):417-433 (2010). DOI 10.1128/MMBR.00016-10. https://doi.org/10.1128/MMBR.00016-10

[18] Patricia L. Foster. Stress-Induced Mutagenesis in Bacteria. Critical Reviews in Biochemistry and Molecular Biology 42(5):373-397 (2007). DOI 10.1080/10409230701648494. https://doi.org/10.1080/10409230701648494

[19] Rodolphe Barrangou; Christophe Fremaux; Hélène Deveau; Melissa Richards; Patrick Boyaval; Sylvain Moineau; Dennis A. Romero; Philippe Horvath. CRISPR Provides Acquired Resistance

Against Viruses in Prokaryotes. Science 315(5819):1709-1712 (2007). DOI 10.1126/science.1138140. https://doi.org/10.1126/science.1138140

[20] Michael Baym; Tami D. Lieberman; Eric D. Kelsic; Remy Chait; Rotem Gross; Idan Yelin; Roy Kishony. Spatiotemporal Microbial Evolution on Antibiotic Landscapes. Science 353(6304):1147-1151 (2016). DOI 10.1126/science.aag0822. https://doi.org/10.1126/science.aag0822

[21] Richard E. Lenski; Michael R. Rose; Suzanne C. Simpson; Scott C. Tadler. Long-Term Experimental Evolution in Escherichia coli. I. Adaptation and Divergence During 2,000 Generations. The American Naturalist 138(6):1315-1341 (1991). DOI 10.1086/285289. https://doi.org/10.1086/285289

[22] Zachary D. Blount; Christina Z. Borland; Richard E. Lenski. Historical Contingency and the Evolution of a Key Innovation in an Experimental Population of Escherichia coli. PNAS 105(23):7899-7906 (2008). DOI 10.1073/pnas.0803151105. https://doi.org/10.1073/pnas.0803151105

[23] Zachary D. Blount; Jeffrey E. Barrick; Carla J. Davidson; Richard E. Lenski. Genomic Analysis of a Key Innovation in an Experimental Escherichia coli Population. Nature 489:513-518 (2012). DOI 10.1038/nature11514. https://doi.org/10.1038/nature11514

[24] Peter R. Grant; B. Rosemary Grant. Unpredictable Evolution in a 30-Year Study of Darwin's Finches. Science 296(5568):707-711 (2002). DOI 10.1126/science.1070315. https://doi.org/10.1126/science.1070315

[25] L. M. Cook; B. S. Grant; I. J. Saccheri; J. Mallet. Selective Bird Predation on the Peppered Moth: The Last Experiment of Michael Majerus. Biology Letters 8(4):609-612 (2012). DOI 10.1098/rsbl.2011.1136. https://doi.org/10.1098/rsbl.2011.1136

[26] Dan I. Andersson; Diarmaid Hughes. Antibiotic Resistance and Its Cost: Is It Possible to Reverse Resistance? Nature Reviews Microbiology 8:260-271 (2010). DOI 10.1038/nrmicro2319. https://doi.org/10.1038/nrmicro2319

[27] A. C. Allison. Protection Afforded by Sickle-cell Trait Against Subtertian Malarial Infection. British Medical Journal 1(4857):290-294 (1954). DOI 10.1136/bmj.1.4857.290. https://doi.org/10.1136/bmj.1.4857.290

[28] Charles Darwin. The Descent of Man, and Selection in Relation to Sex. Volume 1; sexual selection sections (1871). https://darwin-online.org.uk/content/frameset?itemID=F937.1&pageseq=1&viewtype=text

[29] Daniel W. McShea. Metazoan Complexity and Evolution: Is There a Trend? Evolution 50(2):477-492 (1996). DOI 10.1111/j.1558-5646.1996.tb03861.x. https://doi.org/10.1111/j.1558-5646.1996.tb03861.x

[30] Sewall Wright. Evolution in Mendelian Populations. Genetics 16(2):97-159 (1931). DOI 10.1093/genetics/16.2.97. https://doi.org/10.1093/genetics/16.2.97

[31] Motoo Kimura. Evolutionary Rate at the Molecular Level. Nature 217:624-626 (1968). DOI 10.1038/217624a0. https://doi.org/10.1038/217624a0

[32] Tomoko Ohta. Slightly Deleterious Mutant Substitutions in Evolution. Nature 246:96-98 (1973). DOI 10.1038/246096a0. https://doi.org/10.1038/246096a0

[33] Peter Buri. Gene Frequency in Small Populations of Mutant Drosophila. Evolution 10(4):367-402 (1956). DOI 10.2307/2406998. https://doi.org/10.2307/2406998

[34] François Jacob. Evolution and Tinkering. Science 196(4295):1161-1166 (1977). DOI 10.1126/science.860134. https://doi.org/10.1126/science.860134

[35] Stephen Jay Gould; Elisabeth S. Vrba. Exaptation-a Missing Term in the Science of Form. Paleobiology 8(1):4-15 (1982). DOI 10.1017/S0094837300004310. https://doi.org/10.1017/S0094837300004310

[36] S. J. Gould; R. C. Lewontin. The Spandrels of San Marco and the Panglossian Paradigm: A Critique of the Adaptationist Programme. Proceedings of the Royal Society B 205(1161):581-598 (1979). DOI 10.1098/rspb.1979.0086. https://doi.org/10.1098/rspb.1979.0086

[37] Rasmus Nielsen. Molecular Signatures of Natural Selection. Annual Review of Genetics 39:197-218 (2005). DOI 10.1146/annurev.genet.39.073003.112420. https://doi.org/10.1146/annurev.genet.39.073003.112420

[38] Richard E. Lenski; Charles Ofria; Robert T. Pennock; Christoph Adami. The Evolutionary Origin of Complex Features. Nature 423:139-144 (2003). DOI 10.1038/nature01568. https://doi.org/10.1038/nature01568

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 relicta antes de que Penzias y Wilson comunicaran en 1965 un exceso inexplicado de temperatura de antena de 3,5 ± 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 ± 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 infrarrojas 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. Nolta, 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. Nolta, 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
[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

¿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 sondean 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 lambda10830 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

[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 Pawlowski; 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

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 relicto 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 $N_{eff} = 3{,}0440 \pm 0{,}0002$, 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 ± 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 ± 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 relicta 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 monopolo 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; Aleksi 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

[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; Teguayco 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

Materia, antimateria y un desequilibrio sin resolver

QTC-014 · 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: Problema abierto

Licencia: All Rights Reserved

Resumen del artículo

La antimateria no falta en la física. Se produce en aceleradores, aparece en desintegraciones radiactivas y rayos cósmicos y se usa en diagnóstico médico. El problema cosmológico es más estrecho y profundo: después de que materia y antimateria se aniquilaran casi por completo en el universo temprano, quedó aproximadamente un barión neto por cada 1.600 millones de fotones. La nucleosíntesis del Big Bang y el fondo cósmico de microondas coinciden en ese residuo, pero no identifican su causa. Este artículo sigue la lógica condicional propuesta por Sakharov, el descubrimiento de la violación CP y los procesos esfalerónicos electrodébiles capaces de crear, redistribuir o borrar asimetrías. Después compara mecanismos activos —desintegraciones de gran unificación, leptogénesis, bariogénesis electrodébil extendida y dinámica de Affleck–Dine— sin declarar ganador. El número pertenece a la cosmología de precisión; las partículas, escala, fuente CP e historia fuera del equilibrio que lo generaron siguen siendo un problema abierto.

En 60 segundos

Partículas y antipartículas se aniquilan en otras excitaciones; no desaparecen hacia la nada literal. En un plasma caliente casi simétrico, la aniquilación elimina pares emparejados y deja el pequeño exceso neto que ya existiera o se hubiera generado. La cosmología mide ese exceso como una relación bariones–fotones cercana a 6,1 × 10^-10, o un rendimiento normalizado por entropía próximo a 8,6 × 10^-11. Sakharov mostró que, dentro del marco térmico estándar compatible con CPT, una explicación dinámica necesita violación del número bariónico, violación C y CP y salida del equilibrio, o un fallo de los supuestos de ese argumento. Las interacciones débiles violan CP y los esfalerones electrodébiles violan B+L conservando B-L. Pero la fase CKM medida es demasiado débil y el Higgs de 125 GeV produce un cruce electrodébil suave, de modo que el Modelo Estándar mínimo no genera la asimetría observada. Varias extensiones reproducen el número final, pero ajustarlo no demuestra que existieran sus partículas o condiciones iniciales. Los experimentos prueban ingredientes — desintegración del protón, momentos dipolares, propiedades de neutrinos, nueva física de Higgs, neutrinos estériles u ondas gravitacionales— y no una máquina universal de bariogénesis.

Por qué importa esta pregunta

La pregunta materia–antimateria suele ampliarse hasta convertirse en «¿por qué existe algo en vez de nada?». La física se ha ganado una pregunta más concreta. Sabemos que el dominio observable

contiene un pequeño exceso bariónico neto y conocemos varios ingredientes necesarios para generarlo dinámicamente. No sabemos qué mecanismo actuó. Mantener esa frontera importa porque aniquilación no es creación desde la nada, violación CP no basta automáticamente y un candidato que reproduce la relación final todavía no ha reconstruido la historia. El problema abierto está estructurado experimentalmente, no resuelto metafísicamente.

1. El residuo, no una mitad desaparecida

La pregunta

Si materia y antimateria pueden crearse por pares, ¿por qué el universo actual no contiene mitad de cada una? No porque la antimateria sea ficticia ni porque la aniquilación borrara solo un lado. La aniquilación de pares conserva cualquier pequeño desequilibrio previo.

La antimateria es física de partículas ordinaria y repetidamente comprobada. Positrones y antiprotones se producen, detectan y almacenan; las antipartículas participan en desintegraciones y colisiones según leyes cuánticas medidas. El problema cósmico no es su ausencia en la naturaleza, sino el dominio abrumador de materia en el sector bariónico observable. [3,5]

Cuando una partícula encuentra su antipartícula, energía y momento conservados se redistribuyen en otras excitaciones, a menudo fotones o pares más ligeros. La aniquilación es conversión, no desaparición del contenido físico hacia la nada. Los productos pueden crear nuevos pares si tienen energía suficiente, y la reacción funciona en ambos sentidos en un plasma caliente en equilibrio. [3,8]

Al enfriarse el universo, una población casi simétrica de bariones y antibariones se aniquila hasta que la creación de pares deja de ser eficaz. El proceso elimina cantidades emparejadas de ambos lados. No puede generar por sí solo número bariónico neto; un exceso previo o producido dinámicamente permanece porque ya no quedan antipartículas que lo cancelen. [3]

El exceso superviviente es pequeño: la relación bariones–fotones es aproximadamente 6,1 × 10^-10, cerca de un barión neto por cada 1.600 millones de fotones. Respecto a la entropía, el rendimiento bariónico es unos 8,6 × 10^-11. Pequeño como fracción, suministró casi toda la materia ordinaria que después formó gas, estrellas, planetas y seres vivos. [1–3]

La nucleosíntesis del Big Bang y la estructura acústica del CMB infieren densidades bariónicas coherentes mediante épocas y físicas distintas. Su acuerdo fija la magnitud del residuo, no el mecanismo que lo produjo. La precisión del resultado no debe confundirse con conocimiento de la historia generadora. [1,2]

En qué punto estamos

El desequilibrio es un residuo de escala medida con precisión, no prueba de que la antimateria nunca existiera ni de que la aniquilación creara algo desde la nada. Sondas cósmicas independientes coinciden en el resto y callan sobre su causa. La siguiente tarea es observacional: establecer hasta dónde llega el dominio de materia y qué excluyen realmente las búsquedas de antimateria primordial.

2. Cómo sabemos que el dominio visible está dominado por materia

La pregunta

Un positrón en un detector es antimateria real, pero no implica una antiestrella cercana. Colisiones energéticas y procesos radiactivos producen antipartículas secundarias. Para identificar un dominio primordial de antimateria necesitamos pruebas que la materia ordinaria no pueda explicar produciendo antipartículas localmente.

El material muestreado directamente, las estrellas cercanas y el gas están dominados por materia. Los rayos cósmicos contienen positrones y antiprotones, pero colisiones ordinarias los producen como secundarios. Su existencia confirma la física de antimateria y deja abierta la composición primordial de fuentes lejanas salvo que se establezcan firmas más pesadas y limpias. [3,5]

Grandes dominios adyacentes de materia y antimateria se encontrarían en fronteras. En modelos simples, la aniquilación produciría rayos gamma difusos y alteraría la historia de ionización y temperatura visible en el CMB. La ausencia de señales esperadas restringe fuertemente un universo en mosaico dentro del volumen observable, dados los supuestos sobre mezcla y límites. [4]

No se ha confirmado antihelio ni un antinúcleo más pesado como detección primordial en rayos cósmicos. AMS-02 ha comunicado eventos candidatos de antihelio, pero su estado instrumental, fondo y origen siguen sin resolver. Un evento candidato no debe ascender silenciosamente a antiestrella o dominio primordial. [5,6]

La conclusión se limita deliberadamente al horizonte. La evidencia sostiene un universo observable abrumadoramente bariónico y restringe modelos sencillos de dominios de antimateria. No dice nada empírico sobre regiones causalmente inaccesibles más allá del horizonte, pues ninguna señal suya puede alcanzar las mediciones usadas. [3,4]

La materia oscura no es un depósito oculto de antimateria ordinaria. El material antibariónico interactuaría electromagnéticamente, participaría en nucleosíntesis y se aniquilaría en fronteras con materia. Esos comportamientos contradicen el componente dominante de materia oscura inferido gravitatoriamente. Compartir la palabra materia no vuelve intercambiables ambas categorías. [35]

En qué punto estamos

Los rayos cósmicos prueban que existen antipartículas; búsquedas de rayos gamma, CMB y antinúcleos restringen antimateria primordial a escalas mayores. La evidencia es fuerte dentro del dominio observable y silenciosa más allá del horizonte. Establecida la asimetría, no su causa, podemos preguntar qué tendría que lograr un mecanismo dinámico sin elegir todavía ninguno.

3. La lógica condicional de Sakharov

La pregunta

¿Qué debe cambiar para que un plasma simétrico adquiera número bariónico neto duradero? La respuesta de Sakharov no fue una historia terminada, sino condiciones. Dependen de equilibrio térmico, CPT y cargas supuestas, lo que las convierte en lógica potente, no en mecanismo seleccionado por observación.

Dentro del marco caliente, expansivo y compatible con CPT, la bariogénesis dinámica exige violación del número bariónico, violación C y CP y salida del equilibrio térmico, o un fallo equivalente de los supuestos del argumento de equilibrio. La lista formula obstáculos que un modelo debe superar; no identifica cuándo ni cómo los superó la naturaleza. [7,8]

Las condiciones de Sakharov son así un diagnóstico, no prueba de que ocurriera un episodio concreto de bariogénesis. Un candidato puede cumplirlas de muchas formas y a escalas muy distintas, y seguir siendo incorrecto. A la inversa, condiciones iniciales alternativas o desviaciones de los supuestos estándar reorganizan los requisitos lógicos. [7,8]

La violación del número bariónico es necesaria porque un número neto exactamente conservado no puede evolucionar de cero a valor distinto de cero. El Modelo Estándar contiene procesos anómalos que violan B+L, mientras muchas extensiones añaden desintegraciones o interacciones que violan más directamente número bariónico o leptónico. Importa la combinación conservada. [7,8,15]

La violación C y CP impide que canales productores de materia y antimateria tengan tasas netas exactamente canceladas. Una asimetría CP microscópica es ingrediente necesario en la lógica estándar, pero su mera existencia no garantiza un efecto cósmico suficiente. Deben calcularse intensidad, reacciones participantes e historia térmica. [7–9]

El equilibrio térmico aporta el último obstáculo. Simetría CPT y balance detallado impiden que las reacciones construyan una asimetría neta persistente en equilibrio. Expansión, desintegraciones o transición de primer orden pueden impulsar la salida, pero cada candidato debe mostrar cuantitativamente que la generación supera el lavado y sobrevive a la evolución posterior. [7,8]

En qué punto estamos

Sakharov convirtió el misterio en tareas condicionales: cambiar número bariónico, distinguir materia y antimateria en tasas y escapar del equilibrio lo suficiente para conservar el resultado. Los requisitos organizan mecanismos, pero no los ordenan. La pregunta siguiente es si la violación CP débil y la dinámica electrodébil conocidas completan ya el trabajo. No lo hacen.

4. Una simetría rota que todavía no basta

La pregunta

La violación CP demuestra que las interacciones débiles distinguen materia de antimateria. ¿Por qué no resuelve la bariogénesis? Porque la pregunta es cuantitativa y térmica: ¿es la asimetría medida suficientemente fuerte, en reacciones fuera del equilibrio, para sobrevivir a todo lavado y producir el número cósmico?

En 1964, Christenson, Cronin, Fitch y Turlay observaron violación CP en desintegraciones de kaones neutros. El resultado estableció que la transformación combinada que intercambia partículas con antipartículas y refleja el espacio no es exacta en interacciones débiles. Aportó un ingrediente real de Sakharov, no un mecanismo cósmico completo. [9]

Kobayashi y Maskawa mostraron en 1973 que un sector de quarks con tres generaciones permite una fase irreducible que viola CP en la matriz de mezcla débil. Lo que empezó como estructura teórica pasó a formar parte del Modelo Estándar cuando se establecieron experimentalmente las familias requeridas y los fenómenos de cambio de sabor. [10]

Las mediciones de kaones y mesones B determinan hoy la descripción CKM como fuente observada dominante de violación CP en procesos débiles de cambio de sabor de quarks. El invariante de Jarlskog recoge su intensidad independiente de base. El acuerdo entre experimentos es un triunfo, pero la suficiencia cosmológica exige otro cálculo. [11–14]

A alta temperatura, transiciones electrodébiles no perturbativas asociadas a la anomalía violan B+L conservando B−L. Su tasa térmica está establecida en cálculos del Modelo Estándar. Esos procesos esfalerónicos aportan dinámica que cambia número bariónico, pero su ley de conservación y lavado restringen qué asimetría puede persistir. [15–17]

La bariogénesis electrodébil mínima del Modelo Estándar falla cuantitativamente: la violación CP de CKM es demasiado débil y el Higgs de 125 GeV produce cruce suave, no transición fuerte de primer orden. El exceso observado exige una condición inicial asimétrica o física adicional, pero los datos no seleccionan un mecanismo único. [3,18–20]

En qué punto estamos

La física débil conocida aporta violación CP y esfalerones que cambian bariones, pero no suficiente asimetría en el entorno fuera del equilibrio requerido. El fallo es cuantitativo, no filosófico, y apunta más allá del Modelo Estándar mínimo sin nombrar ganador. Para comparar candidatos debemos entender los esfalerones como convertidores y borradores, además de posibles creadores.

5. Esfalerones: crear, convertir o borrar

Las transiciones esfalerónicas electrodébiles violan número bariónico más leptónico, B+L, conservando su diferencia, B−L. La distinción es decisiva. Un proceso puede cambiar bariones y conservar una combinación concreta de cargas, por lo que origen y momento de toda asimetría inicial determinan qué permanece. [15–17]

Mientras son rápidos, los esfalerones pueden lavar una asimetría B+L previa sin componente B−L protegida. Generar temprano número bariónico no basta; un candidato debe seguir todo proceso capaz de reprocesar cargas antes del desacoplamiento. La supervivencia es propiedad de una red, no un acto único de creación. [15–17]

Las mismas reacciones convierten parte de una asimetría leptónica en número bariónico. Es el puente central de la leptogénesis: nueva dinámica del sector de neutrinos crea primero asimetrías de sabor o totales, y los esfalerones redistribuyen parte al sector bariónico antes de dejar de ser eficaces. [15–17,22,24]

La tasa esfalerónica cambia a través del cruce electrodébil y termina siendo demasiado lenta frente a expansión y otras dinámicas. El desacoplamiento conserva entonces la asimetría superviviente ante nuevo reprocesamiento. La conversión exacta depende del contenido de partículas y de las relaciones de equilibrio químico del modelo. [15–17]

Los esfalerones pueden ayudar a crear, convertir, redistribuir o borrar una asimetría. Llamarlos solo motor productor de bariones oculta su dependencia de B−L, fuentes CP, tasas y secuencia. Son microfísica establecida del Modelo Estándar que toda historia candidata debe usar o evitar con coherencia. [15,17,19]

En qué punto estamos

Los esfalerones son un puente condicional, no la causa ausente. Conservan B-L, lavan algunas historias cósmicas y convierten otras según red de cargas y momento. Por eso las propuestas viables difieren no solo en partículas añadidas, sino también en cuándo y en qué combinación conservada depositan primero la asimetría.

6. Mecanismos candidatos, no una historia resuelta

La pregunta

Varios mecanismos pueden ajustarse para dejar el rendimiento bariónico observado. Ese acuerdo es necesario y débil: un número no demuestra partícula pesada, población de neutrinos estériles, transición de primer orden ni condensado escalar. Cada candidato debe ganarse su historia mediante pruebas adicionales y distintivas.

La bariogénesis de gran unificación propone que partículas muy pesadas decaigan fuera del equilibrio por canales que violan número bariónico y CP. La escala suele superar la producción directa. La desintegración del protón ofrece una prueba importante y dependiente del modelo porque la misma estructura unificada conecta bariones inestables con interacciones generadoras de asimetría. [21,36]

La leptogénesis térmica usa desintegraciones fuera del equilibrio y con violación CP de neutrinos de Majorana pesados para crear asimetría leptónica. Los esfalerones convierten parte en bariones. El mecanismo conecta materia cósmica y generación de masa de neutrinos, pero su alta escala y estados pesados desconocidos dejan gran degeneración. [22,23,38]

La leptogénesis de oscilación a baja escala acerca los nuevos estados a posibles experimentos. Oscilaciones con violación CP de neutrinos estériles generan asimetrías de sabor antes del desacoplamiento esfalerónico. Las regiones viables se restringen con búsquedas de neutrinos y frontera de intensidad, pero ninguna historia de bariogénesis por neutrinos estériles está establecida. [24]

La bariogénesis electrodébil extendida añade nueva violación CP y una transición fuerte de primer orden ausente del Modelo Estándar mínimo. Precisión de Higgs, colisionadores y límites dipolares prueban partículas y fases; un fondo de ondas gravitacionales podría probar la transición. Ninguna señal aislada demuestra producción bariónica. [19,20,27,32–34]

La bariogénesis de Affleck–Dine usa campos escalares coherentes con carga bariónica o leptónica, a menudo en marcos supersimétricos, para generar gran asimetría. Como otros candidatos, ajusta el rendimiento final con muchas elecciones. Reproducir eta es condición de coherencia, no prueba de que existieran campo, potencial, historia de desintegración o condensado inicial propuestos. [3,8,25,26]

En qué punto estamos

Cada candidato coloca los ingredientes ausentes en otro lugar: desintegraciones unificadas, neutrinos pesados u oscilantes, transición electrodébil extendida o condensado escalar cargado. Todos son restringibles experimentalmente y ninguno está establecido. El progreso exige mapear experimentos a ingredientes, para que un descubrimiento estreche mecanismos en lugar de anunciarse como solución automática.

7. Lo que los experimentos pueden decidir realmente

Observar desintegración del protón u oscilación neutrón–antineutrón establecería violación del número bariónico, un ingrediente central de Sakharov. Sería transformador, pero no identificaría por sí solo la fuente CP, la salida térmica relevante del equilibrio ni qué red de reacciones tempranas generó el rendimiento medido. [29,30]

Los momentos dipolares eléctricos prueban nuevas fases CP; las oscilaciones, violación CP leptónica; la doble beta sin neutrinos, carácter de Majorana; las búsquedas estériles, estados de baja escala; Higgs y colisionadores, sectores electrodébiles extendidos. Los observables restringen familias y combinaciones de parámetros distintas, no un mecanismo universal. [27–33]

Un fondo estocástico de ondas gravitacionales compatible con transición electrodébil de primer orden respaldaría un ingrediente ausente de la bariogénesis mínima. No mostraría que la transición produjo bariones ni identificaría la violación CP necesaria. Un fondo diagnostica dinámica cósmica dejando incompleta la historia de generación de carga. [34]

El programa experimental es una matriz, no un detector decisivo. Una señal de desintegración favorece ciertas unificaciones; un EDM restringe fases; resultados de neutrinos remodelan leptogénesis; colisionadores y ondas prueban potenciales térmicos. Combinarlos elimina grandes regiones candidatas antes de seleccionar un mecanismo único. [27–34]

Los resultados nulos también tienen implicaciones desiguales. Límites mayores a la vida del protón no eliminan directamente leptogénesis de baja escala, y mejores límites al EDM electrónico no prueban todo Affleck–Dine. Los informes honestos especifican qué ingrediente, escala y espacio paramétrico cambió, distinguiendo evidencia contra un modelo de evidencia contra toda bariogénesis. [29–34]

En qué punto estamos

> *Los experimentos pueden establecer ingredientes y eliminar espacio paramétrico mucho antes de reconstruir el suceso cósmico completo. No es debilidad: transforma un misterio de origen en preguntas enlazadas y refutables. El balance final debe mantener dos columnas separadas: magnitud y dominio de la asimetría conocidos, y partículas, escala y secuencia desconocidas.*

8. El número que conocemos y la causa que no

La magnitud de la asimetría bariónica y el dominio de materia del universo observable están establecidos. Escala generadora, partículas nuevas, fuente CP, dinámica fuera del equilibrio y posible conexión con masa de neutrinos siguen abiertos. Varios mecanismos activos satisfacen la lógica general y la evidencia no discrimina decisivamente entre ellos. [3,8,19,23–25,37,38]

La bariogénesis intenta explicar físicamente cómo un universo en evolución adquirió o conservó un desequilibrio materia–antimateria. No explica por qué existe un universo, por qué existen campos o leyes ni por qué el marco inicial es posible. Esas preguntas pueden ser legítimas, pero añadir una desintegración con violación CP no las resuelve. [3,37]

La precisión de la asimetría sigue siendo un ancla científica. Datos de BBN y CMB refinan eta e Y_B, prueban radiación extra o liberación de entropía y exponen incoherencias. Un número revisado

remodelaría el espacio viable, pero un resultado más preciso por sí solo seguiría sin identificar qué historia candidata lo produjo. [1–3]

Una explicación satisfactoria debe conectar observables adicionales al mismo mecanismo: vida del protón, patrón de masas de neutrinos, EDM, sector escalar nuevo, estado estéril o espectro de ondas gravitacionales. Cuanto más distintiva y sobrerrestringida sea la red, menos libertad queda para ajustar el número final sin recuperar historia real. [3,37]

Por ahora, la conclusión tiene confianza asimétrica. Conocemos extraordinariamente bien el residuo y sabemos que la bariogénesis electrodébil mínima es insuficiente. Ignoramos si la respuesta está en unificación, neutrinos, física de Higgs extendida, condensados escalares, condición inicial u otro mecanismo todavía no propuesto. [3,8,37,38]

En qué punto estamos

Un barión neto por unos 1.600 millones de fotones es un resultado de precisión cuya historia causal desconocemos. Condiciones de Sakharov y restricciones experimentales organizan la búsqueda; ningún candidato ha ganado rango de historia cósmica. El final honesto no es «la antimateria desapareció», sino algo más preciso: el residuo está medido y su origen permanece abierto.

Lo que sabemos y cómo lo sabemos

- El dominio bariónico observable está abrumadoramente dominado por materia, aunque la antimateria se produce y detecta localmente.
- Las mediciones de BBN y CMB fijan coherentemente una relación bariones–fotones cercana a 6,1 × 10^-10.
- La violación CP conocida y los esfalerones son reales, pero la bariogénesis electrodébil mínima resulta cuantitativamente insuficiente.

Lo que todavía no sabemos

- La evidencia actual no ha seleccionado escala generadora, contenido de partículas, fuente CP ni historia fuera del equilibrio.
- Los candidatos de antihelio de AMS-02 no han establecido una población primordial de antimateria.
- La relación, si existe, entre bariogénesis, masa de neutrinos, unificación y nueva física de Higgs sigue sin resolver.

Qué podría hacernos cambiar de opinión

- Desintegración del protón, oscilación neutrón–antineutrón u otra señal de violación bariónica establecería un ingrediente y remodelaría candidatos.
- Una red correlacionada de nueva violación CP, estados de partículas y evidencia de transición térmica podría identificar un mecanismo.
- Antinúcleos primordiales confirmados o señales de dominios de aniquilación revisarían el alcance espacial inferido del dominio de materia.

Si solo recuerdas una cosa

Conocemos con precisión el pequeño exceso bariónico; no sabemos qué partículas, fuente CP, escala e historia fuera del equilibrio lo generaron.

Artículos relacionados

- QTC-012 — ¿Qué queremos decir realmente cuando hablamos del Big Bang?
- QTC-013 — Antes de los átomos

Referencias

[1] 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

[2] 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

[3] Laurent Canetti; Marco Drewes; Mikhail Shaposhnikov. Matter and Antimatter in the Universe. New Journal of Physics 14, 095012 (2012). DOI 10.1088/1367-2630/14/9/095012. https://arxiv.org/abs/1204.4186

[4] A. G. Cohen; A. De Rújula; S. L. Glashow. A Matter-Antimatter Universe? Astrophysical Journal 495, 539-549 (1998). DOI 10.1086/305328. https://arxiv.org/abs/astro-ph/9707087

[5] J. Alvarez-Muñiz; Z. Cao; U. F. Katz; P. Mertsch; C. Spiering / Particle Data Group. Cosmic Rays. Review of Particle Physics, section 30 (2024). DOI 10.1103/PhysRevD.110.030001. https://pdg.lbl.gov/2024/reviews/rpp2024-rev-cosmic-rays.pdf

[6] J. Alcaraz et al. (AMS Collaboration). Search for antihelium in cosmic rays. Physics Letters B 461, 387-396 (1999). DOI 10.1016/S0370-2693(99)00874-6. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0370269399008746

[7] A. D. Sakharov. Violation of CP invariance, C asymmetry, and baryon asymmetry of the universe. JETP Letters 5, 24-27 (1967). https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1967JETPL...5...24S/abstract

[8] Antonio Riotto; Mark Trodden. Recent progress in baryogenesis. Annual Review of Nuclear and Particle Science 49, 35-75 (1999). DOI 10.1146/annurev.nucl.49.1.35. https://arxiv.org/abs/hep-ph/9901362

[9] J. H. Christenson; J. W. Cronin; V. L. Fitch; R. Turlay. Evidence for the 2-pion decay of the K2(0) meson. Physical Review Letters 13, 138-140 (1964). DOI 10.1103/PhysRevLett.13.138. https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.13.138

[10] Makoto Kobayashi; Toshihide Maskawa. CP-Violation in the Renormalizable Theory of Weak Interaction. Progress of Theoretical Physics 49, 652-657 (1973). DOI 10.1143/PTP.49.652. https://doi.org/10.1143/PTP.49.652

[11] C. Jarlskog. Commutator of the quark mass matrices in the standard electroweak model and a measure of maximal CP nonconservation. Physical Review Letters 55, 1039-1042 (1985). DOI 10.1103/PhysRevLett.55.1039. https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.55.1039

[12] B. Aubert et al. (BABAR Collaboration). Observation of CP violation in the B0 meson system. Physical Review Letters 87, 091801 (2001). DOI 10.1103/PhysRevLett.87.091801. https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.87.091801

[13] K. Abe et al. (Belle Collaboration). Observation of large CP violation in the neutral B meson system. Physical Review Letters 87, 091802 (2001). DOI 10.1103/PhysRevLett.87.091802. https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.87.091802

[14] A. Ceccucci; Z. Ligeti; Y. Sakai / Particle Data Group. CKM Quark-Mixing Matrix. Review of Particle Physics, section 12 (2024). DOI 10.1103/PhysRevD.110.030001. https://pdg.lbl.gov/2024/reviews/rpp2024-rev-ckm-matrix.pdf

[15] G. 't Hooft. Symmetry Breaking through Bell-Jackiw Anomalies. Physical Review Letters 37, 8-11 (1976). DOI 10.1103/PhysRevLett.37.8. https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.37.8

[16] V. A. Kuzmin; V. A. Rubakov; M. E. Shaposhnikov. On anomalous electroweak baryon-number non-conservation in the early universe. Physics Letters B 155, 36-42 (1985). DOI 10.1016/0370-2693(85)91028-7. https://doi.org/10.1016/0370-2693(85)91028-7

[17] 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

[18] M. B. Gavela; P. Hernandez; J. Orloff; O. Pène; C. Quimbay. Standard model CP-violation and baryon asymmetry (II). Finite temperature. Nuclear Physics B 430, 382-426 (1994). DOI 10.1016/0550-3213(94)00410-2. https://arxiv.org/abs/hep-ph/9406289

[19] David E. Morrissey; Michael J. Ramsey-Musolf. Electroweak baryogenesis. New Journal of Physics 14, 125003 (2012). DOI 10.1088/1367-2630/14/12/125003. https://arxiv.org/abs/1206.2942

[20] 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

[21] Motohiko Yoshimura. Unified Gauge Theories and the Baryon Number of the Universe. Physical Review Letters 41, 281-284; erratum 42, 746 (1978). DOI 10.1103/PhysRevLett.41.281. https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.41.281

[22] M. Fukugita; T. Yanagida. Baryogenesis Without Grand Unification. Physics Letters B 174, 45-47 (1986). DOI 10.1016/0370-2693(86)91126-3. https://doi.org/10.1016/0370-2693(86)91126-3

[23] W. Buchmüller; R. D. Peccei; T. Yanagida. Leptogenesis as the origin of matter. Annual Review of Nuclear and Particle Science 55, 311-355 (2005). DOI 10.1146/annurev.nucl.55.090704.151558. https://arxiv.org/abs/hep-ph/0502169

[24] E. Kh. Akhmedov; V. A. Rubakov; A. Yu. Smirnov. Baryogenesis via Neutrino Oscillations. Physical Review Letters 81, 1359-1362 (1998). DOI 10.1103/PhysRevLett.81.1359. https://arxiv.org/abs/hep-ph/9803255

[25] Ian Affleck; Michael Dine. A New Mechanism for Baryogenesis. Nuclear Physics B 249, 361-380 (1985). DOI 10.1016/0550-3213(85)90021-5. https://doi.org/10.1016/0550-3213(85)90021-5

[26] Michael Dine; Alexander Kusenko. Origin of the matter-antimatter asymmetry. Reviews of Modern Physics 76, 1-30 (2003). DOI 10.1103/RevModPhys.76.1. https://arxiv.org/abs/hep-ph/0303065

[27] ACME Collaboration. Improved limit on the electric dipole moment of the electron. Nature 562, 355-360 (2018). DOI 10.1038/s41586-018-0599-8. https://doi.org/10.1038/s41586-018-0599-8

[28] The T2K Collaboration. Constraint on the matter-antimatter symmetry-violating phase in neutrino oscillations. Nature 580, 339-344 (2020). DOI 10.1038/s41586-020-2177-0. https://doi.org/10.1038/s41586-020-2177-0

[29] A. Takenaka et al. (Super-Kamiokande Collaboration). Search for proton decay via p to e+ pi0 and p to mu+ pi0 with an enlarged fiducial volume in Super-Kamiokande I-IV. Physical Review D 102, 112011 (2020). DOI 10.1103/PhysRevD.102.112011. https://doi.org/10.1103/PhysRevD.102.112011

[30] K. Abe et al. (Super-Kamiokande Collaboration). Neutron-antineutron oscillation search using a 0.37 megaton-years exposure of Super-Kamiokande. Physical Review D 103, 012008 (2021). DOI 10.1103/PhysRevD.103.012008. https://doi.org/10.1103/PhysRevD.103.012008

[31] S. Abe et al. (KamLAND-Zen Collaboration). Search for the Majorana Nature of Neutrinos in the Inverted Mass Ordering Region with KamLAND-Zen. Physical Review Letters 130, 051801 (2023). DOI 10.1103/PhysRevLett.130.051801. https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.130.051801

[32] 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

[33] 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

[34] David J. Weir. Gravitational waves from a first-order electroweak phase transition: a brief review. Philosophical Transactions A 376, 20170126 (2018). DOI 10.1098/rsta.2017.0126. https://arxiv.org/abs/1705.01783

[35] L. Baudis; S. Profumo / Particle Data Group. Dark Matter. Review of Particle Physics, section 27 (2024). DOI 10.1103/PhysRevD.110.030001. https://pdg.lbl.gov/2024/reviews/rpp2024-rev-dark-matter.pdf

[36] A. Hebecker; J. Hisano; N. Nagata / Particle Data Group. Grand Unified Theories. Review of Particle Physics, section 93 (2024). DOI 10.1103/PhysRevD.110.030001. https://pdg.lbl.gov/2024/reviews/rpp2024-rev-guts.pdf

[37] James M. Cline. Baryogenesis. Les Houches lecture review (2006). https://arxiv.org/abs/hep-ph/0609145

[38] Sacha Davidson; Enrico Nardi; Yosef Nir. Leptogenesis. Physics Reports 466, 105-177 (2008). DOI 10.1016/j.physrep.2008.06.002. https://arxiv.org/abs/0802.2962

Las estrellas que nunca hemos visto

QTC-015 · 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

Las estrellas de Población III tuvieron que formarse a partir del hidrógeno y el helio casi prístinos que dejó el universo temprano caliente, pero ninguna estrella individual ha sido identificada espectroscópicamente como libre de metales. Hoy esa frase exige cuidado. El JWST ha encontrado candidatos serios, ha confirmado gas extremadamente primitivo y ha medido sistemas como Hebe y LAP1-B que ponen a prueba con fuerza las predicciones sobre las primeras estrellas. Este artículo sigue la evidencia desde el enfriamiento por hidrógeno molecular y las masas estelares inciertas hasta la arqueología química y la espectroscopia de múltiples líneas. Explica por qué las simulaciones predicen una población de masa elevada sin imponer una masa universal, por qué la emisión de helio o la ausencia de líneas metálicas no bastan por separado y por qué la evidencia sobre una población no equivale a ver una estrella individual.

En 60 segundos

El Big Bang produjo sobre todo hidrógeno y helio, así que alguna primera generación de estrellas tuvo que fabricar el carbono, el oxígeno, el silicio y el hierro posteriores. En los cálculos estándar, el gas prístino empezó a colapsar principalmente en pequeños halos de materia oscura hacia corrimientos al rojo 20–30. El hidrógeno molecular solo lo enfrió hasta unos pocos cientos de kelvin, favoreciendo una acreción rápida y una población inclinada hacia masas altas. Las simulaciones modernas también producen discos, binarias y fragmentos menos masivos, de modo que es falso que todas las primeras estrellas tuvieran cien masas solares. Sus miembros masivos vivieron poco, ionizaron el entorno y explotaron, colapsaron o dispersaron los primeros elementos pesados. Las buscamos mediante simulaciones, huellas químicas en estrellas antiguas, espectros de sistemas primitivos remotos y lentes gravitatorias. Hebe, cerca de GN-z11, ya ofrece emisión de hidrógeno confirmada y límites estrictos de metales; LAP1-B posee oxígeno medido, aunque muy escaso. Son avances decisivos, pero todavía no un espectro individual de una estrella sin metales. El diagnóstico más fuerte combina corrimiento al rojo, radiación dura, varios límites de metalicidad y pruebas contra fuentes alternativas.

Por qué importa esta pregunta

Las primeras estrellas conectan tres historias que a menudo se cuentan por separado. Transformaron la química primordial en luz estelar, fabricaron los primeros elementos pesados y cambiaron qué objetos podrían formarse después. Sin embargo, casi toda afirmación sobre ellas cruza una frontera

de evidencia: de la física atómica observada a una simulación, de la química de un descendiente a una explosión desconocida o de la luz nebular no resuelta a una población estelar. El tema pone a prueba tanto la historia cósmica como la disciplina de decir con precisión qué se ha observado. Es un caso ejemplar de reconstrucción: ningún método posee por sí solo la conclusión, y la precisión depende de conservar visibles las uniones entre ellos.

1. Qué debe significar ahora «nunca vistas»

La pregunta

Si los telescopios han detectado luz de sistemas que podrían contener estrellas de Población III, ¿cómo puede el título seguir diciendo que nunca las hemos visto? Porque una población candidata, el gas prístino y una estrella identificada individualmente son logros observacionales diferentes.

Población III no significa «las estrellas más antiguas» ni «las estrellas más lejanas». Designa estrellas formadas a partir de material primordial o prácticamente primordial, sin elementos más pesados que el helio en cantidades relevantes. La nucleosíntesis del Big Bang produjo hidrógeno, helio y trazas de núcleos ligeros, pero no el carbono, el oxígeno, el silicio o el hierro necesarios para el enfriamiento posterior por líneas metálicas y polvo.[1,2,17,40] Por tanto, alguna generación estelar tuvo que existir antes de la formación de estrellas enriquecidas.

Las primeras estrellas y la Población III están estrechamente relacionadas, pero no son sinónimos perfectos. El enriquecimiento fue irregular. Una supernova podía contaminar una región mientras el gas vecino seguía prístino, permitiendo que la Población III continuara formándose cuando ya existían estrellas de Población II en otros lugares.[23,31] La cronología por sí sola no identifica la clase: importan la composición y la historia de formación.

La situación observacional cambió con rapidez entre los primeros informes del JWST y 2026. La región hoy llamada Hebe, a unos tres kilopársecs propios de GN-z11, tiene emisión de hidrógeno confirmada y ninguna línea metálica detectada en espectros profundos de seguimiento. Los modelos de población favorecen con fuerza una contribución importante de Población III.[24–26] GLIMPSE-16043 sigue siendo un candidato seleccionado fotométricamente, mientras que LAP1-B es un sistema medido espectroscópicamente, excepcionalmente primitivo pero con metales distintos de cero.[27–31] Estos objetos no deben mezclarse en una lista sin categorías.

Ningún espectro estelar individual ha establecido todavía que una estrella sea Población III libre de metales. La mayoría de los sistemas candidatos no están resueltos o están dominados por el gas circundante, por lo que la población ionizante se infiere a partir de líneas de emisión, límites del continuo, modelos de lente y síntesis estelar. Es observación genuina unida a modelización, no una fotografía de una estrella etiquetada. El título solo es defendible con ese significado más estrecho.

En qué punto estamos

La Población III se define por el material de nacimiento, no solo por la edad o la distancia. El JWST ya ha observado entornos candidatos potentes y gas extraordinariamente primitivo, de modo que decir que no se ha visto nada ha quedado obsoleto. Lo que falta es una estrella individual identificada sin metales, mientras la evidencia sobre poblaciones presenta varios grados distintos y cambiantes. La siguiente pregunta es cómo pudo el gas prístino formar estrellas.

2. Cómo colapsó por primera vez el gas prístino

La pregunta

> *Sin carbono, oxígeno ni polvo que irradiaran el calor con eficacia, ¿por qué llegó a colapsar el gas primordial? Utilizó un refrigerante más débil, el hidrógeno molecular, dentro de halos de materia oscura cuya gravedad reunió suficiente gas para que el enfriamiento venciera a la compresión.*

En los cálculos estándar Lambda-CDM, el canal principal de las primeras estrellas comienza en minihalos de aproximadamente 10^5–10^7 masas solares hacia corrimientos al rojo 20–30.[1–4,31] Esas cifras describen una distribución predicha, no un cumpleaños observado. El primer objeto que colapsa en un cálculo depende del volumen simulado, las condiciones cosmológicas iniciales y el criterio usado para reconocer un núcleo formador de estrellas.

El hidrógeno molecular se forma mediante una pequeña red de reacciones primordiales y enfría por emisión rotacional y vibracional. En la vía canónica del minihalo reduce la temperatura del gas hasta unos 200 K, mucho más que en muchos núcleos actuales de nubes moleculares con polvo.[3,4,6] La velocidad del sonido, la escala de Jeans y el flujo de entrada resultantes favorecen una acreción rápida. Ese argumento térmico explica una tendencia hacia masas mayores, no una masa obligatoria.

Las primeras simulaciones solían producir un núcleo dominante en colapso, lo que favoreció la imagen de una estrella solitaria de más de cien masas solares.[3,4] Cálculos tridimensionales de mayor resolución encontraron discos rotatorios que se fragmentan, intercambian momento angular, expulsan miembros y fusionan protoestrellas.[6,7,37] La radiación de las protoestrellas en crecimiento termina calentando o ionizando el flujo, pero la realimentación no borra todos los fragmentos.[5,7,38] Por ello, el trabajo moderno predice una distribución, a menudo inclinada hacia masas altas, con límites inferior y superior inciertos.

El umbral también se desplaza. Los fotones Lyman-Werner disocian el hidrógeno molecular; la radiación ionizante puede calentar el gas o, a veces, prepararlo para una nueva química; y el movimiento relativo coherente de bariones y materia oscura dificulta la captura de gas en ciertas regiones.[8–10] El entorno, y no un corrimiento al rojo o una masa de halo universales, determina cuándo una nube prístina pasa del retraso al colapso.

En qué punto estamos

> *El gas prístino pudo formar estrellas porque el hidrógeno molecular proporcionó una vía limitada de enfriamiento dentro de halos de materia oscura en crecimiento. Su colapso relativamente cálido favorece una distribución inclinada hacia masas altas, pero los discos, la realimentación y el entorno impiden una masa o fecha de nacimiento universales. Esa incertidumbre importa porque la masa gobierna todo lo que hicieron después.*

3. Estrellas que cambiaron la química disponible

Las estrellas masivas sin metales son compactas, calientes y capaces de producir espectros ultravioletas duros. Los cálculos de síntesis de poblaciones predicen abundantes fotones ionizantes de hidrógeno y, para poblaciones suficientemente calientes, fotones capaces de ionizar dos veces el helio.[11,12] Su radiación creó regiones ionizadas locales y empezó a transformar el gas antes de

cualquier explosión. Sin embargo, la rotación, las binarias y estrellas muy masivas de metalicidad baja pueden imitar parte de esa dureza espectral.

Las estrellas masivas que dominan esos espectros viven solo unos pocos millones de años.[11,13,14] Eso dificulta capturar un cúmulo luminoso puro: sus miembros más brillantes contaminan, dispersan o ionizan con rapidez el material usado para identificarlo. La ventana de detección es breve por la misma razón por la que esas estrellas son importantes cósmicamente. Los miembros de menor masa podrían vivir mucho más, pero cuántos se formaron sigue perteneciendo a la función de masas desconocida.

Sus muertes no fueron uniformes. Según la masa inicial, la rotación, la multiplicidad y la pérdida de masa, los modelos producen supernovas de colapso del núcleo normales o débiles, inestabilidad de pares pulsacional, disrupción completa por inestabilidad de pares o colapso directo en un agujero negro.[13,14,20] Los intervalos de masa para estrellas individuales sin rotación son mapas útiles, no fronteras naturales. La interacción binaria puede desplazar una estrella entre resultados.

Allí donde escapó material, aportó el primer carbono, oxígeno, silicio, elementos del grupo del hierro y precursores del polvo.[13,14,22,39] Ese material abrió vías de enfriamiento que el gas primordial no poseía, permitiendo la fragmentación a temperaturas menores y la transición hacia la Población II. Algunos remanentes quizá sembraron agujeros negros posteriores, pero su importancia frente a canales de semillas más pesadas es una hipótesis activa. La Población III aportó fotones ionizantes, aunque su contribución total a la reionización sigue sin resolverse.[15,16]

En qué punto estamos

Las primeras estrellas cambiaron su entorno dos veces: la radiación actuó mientras vivían y el material expulsado alteró la química después de su muerte. Su distribución de masas gobierna ambos efectos, por lo que las masas inciertas se propagan a historias inciertas de reionización y agujeros negros. Esas cenizas químicas duran más que la luz, pero interpretarlas exige primero simulaciones que conecten la física estelar con predicciones comprobables.

4. Lo que saben las simulaciones y lo que suponen

La pregunta

Una simulación puede mostrar el nacimiento de una estrella que ningún telescopio ha resuelto. ¿Qué clase de evidencia es? Es una consecuencia controlada de una física y unas condiciones iniciales declaradas, poderosa precisamente cuando sus supuestos y límites numéricos permanecen visibles.

Los cálculos de las primeras estrellas no son animaciones libres. Combinan gravedad, hidrodinámica, tasas de reacción atómicas y moleculares, transferencia radiativa y condiciones cosmológicas iniciales restringidas por observaciones.[1,3,4] Con esos ingredientes calculan el colapso a través de una enorme gama de escalas, desde un minihalo hasta un disco protoestelar. La aparición repetida del enfriamiento molecular y el flujo rápido en métodos independientes es evidencia significativa sobre ese marco físico.

La magnitud más difícil es la masa estelar final. Un cálculo puede resolver la fragmentación durante unos años mientras la acreción continúa decenas de miles. Las partículas sumidero sustituyen regiones densas no resueltas; las reglas de fusión, los radios de acreción y las

prescripciones de realimentación pueden cambiar cuántos objetos sobreviven.[5–7,37,38] Los campos magnéticos, la turbulencia y las binarias añaden sensibilidad. La convergencia numérica en una escala no garantiza la convergencia de la función de masas final.

El resultado es una jerarquía. La necesidad de enfriamiento primordial, el gas relativamente cálido y una realimentación intensa son robustos en un intervalo útil de cálculos. La pendiente exacta, la masa característica, el límite superior y la fracción de binarias no lo son.[1,31] Decir «las simulaciones muestran» sin nombrar la capa oculta esa diferencia. El acuerdo establece qué se sigue de supuestos compartidos; no transforma una protoestrella predicha en una observada.

La observación puede cerrar el ciclo. Las distribuciones de abundancias químicas ponen a prueba los rendimientos explosivos; los espectros candidatos prueban la dureza y las edades estelares; las mediciones de 21 centímetros pueden restringir el calentamiento y la ionización integrados. Una predicción acertada fortalece un modelo, mientras un desacuerdo puede revelar física ausente o una traducción errónea de la simulación al observable. Predicción y detección siguen siendo categorías distintas aunque se refuercen.

En qué punto estamos

Las simulaciones vuelven calculable lo no visto al unir microfísica medida con condiciones cosmológicas iniciales. Sus resultados más estables se refieren al enfriamiento, el colapso y la realimentación; los menos estables, a las masas finales y la multiplicidad. Esa incertidumbre es útil: indica a la arqueología química qué rendimientos simulados pueden contrastarse con los patrones de abundancia más antiguos conservados. El archivo siguiente es químico, no luminoso.

5. Leer las cenizas cerca de casa

Si algunas estrellas de Población III se formaron por debajo de unas 0,8 masas solares, podrían sobrevivir hoy. Los estudios del halo de la Vía Láctea y de galaxias enanas cercanas han encontrado estrellas extremadamente pobres en metales, pero ninguna con metales medidos exactamente iguales a cero.[17,18,31] Esa ausencia restringe la cola de baja masa solo a través de la selección de los estudios, la evolución estelar y la probabilidad de que los supervivientes llegaran a las regiones observadas.

Las estrellas que sí encontramos pueden conservar patrones de abundancia heredados de explosiones anteriores. SMSS J031300.36-670839.3, por ejemplo, contiene poquísimo hierro y fue interpretada como producto de una supernova de baja energía con caída de retorno.[19] Los modelos de supernova débil pueden expulsar capas externas ricas en carbono mientras gran parte del interior rico en hierro cae en un agujero negro.[20] Por eso una estrella posterior puede funcionar como detector químico de una explosión que nunca observó directamente.

La inversión no es única. El enriquecimiento en carbono también puede surgir por transferencia de masa en una binaria, y una nube puede mezclar material de varias supernovas. Las abundancias superficiales cambian durante la evolución estelar. Estudios paramétricos muestran qué regiones del espacio de abundancias siguen siendo compatibles con un enriquecimiento casi puro de Población III y dónde la contaminación posterior se vuelve degenerada.[35] Un descendiente es evidencia sobre clases de progenitores, no la biografía recuperada de una sola estrella.

Las supernovas por inestabilidad de pares ofrecen una prueba complementaria del extremo de masas altas porque sus rendimientos predicen fuertes patrones par-impar y un comportamiento distintivo del grupo del hierro.[13,14] Esas firmas parecen raras, pero la rareza no demuestra que nunca existieran primeras estrellas muy masivas. Sus metales pueden escapar de halos pequeños, diluirse o faltar cuando la estrella colapsa directamente. Los sistemas Lyman-alfa amortiguados muy pobres en metales añaden archivos gaseosos relativamente simples, aunque tampoco determinan un progenitor de forma única.[21]

En qué punto estamos

Las estrellas antiguas y las nubes conservan consecuencias químicas de explosiones anteriores, no fotografías de sus progenitores. Sus patrones restringen supernovas de baja energía, eventos de inestabilidad de pares y los extremos de masas, pero la mezcla y las historias alternativas vuelven la reconstrucción multívoca. La arqueología reduce posibilidades, pero no puede resucitar una primera generación completa; la prueba siguiente debe buscar sus firmas espectrales en la luz distante.

6. La firma espectral es una conjunción

La pregunta

¿Qué aspecto tendría una población distante de Población III si sus estrellas individuales no pueden separarse? Se busca un espectro ionizante duro y metales excepcionalmente débiles, y luego se pregunta si una misma población física puede explicar a la vez todos los rasgos.

El helio doblemente ionizado se recombina y produce la línea He II 1640. Como crear He^{++} requiere fotones por encima de 54,4 electronvoltios, una emisión nebular intensa de He II señala un campo de radiación duro.[11,12] Anchuras equivalentes muy grandes de líneas de hidrógeno pueden indicar una población extremadamente joven y dominada por líneas. Junto con límites profundos de oxígeno, carbono y nitrógeno, esos rasgos forman un diagnóstico físicamente motivado de primeras estrellas.[32–34]

Ningún rasgo es exclusivo. Los agujeros negros en acreción, los núcleos galácticos activos, las binarias de rayos X, los choques, las estrellas Wolf–Rayet y estrellas muy masivas de baja metalicidad pueden generar fotones duros.[24,32,33] La geometría puede separar un nudo emisor de un agujero negro central; las anchuras y cocientes de líneas pueden eliminar otras alternativas. Pero He II por sí sola es una alarma, no una etiqueta.

La ausencia de líneas metálicas también exige una gramática cuidadosa. Una no detección aporta un límite superior fijado por el tiempo de exposición, el ruido, el estado de ionización, la densidad y las proporciones de abundancia; no mide un cero exacto.[25,27,29,33] Varios iones en una gama amplia de longitudes de onda restringen más que una sola línea ausente. Las estrellas de Población III también pueden coexistir con gas enriquecido recientemente por sus propias supernovas, creando sistemas híbridos o autocontaminados en vez de ejemplos puros de manual.

La lente gravitatoria eleva complejos intrínsecamente débiles por encima del umbral de detección y ya ha permitido observar estrellas individuales lejanas que no son Población III.[28–30,36] Sin embargo, la magnificación, la geometría de la cáustica y el tamaño de la fuente dependen de un modelo de masa foreground. Los cocientes de líneas pueden ser relativamente estables, mientras la

luminosidad intrínseca y la masa estelar cambian mucho. La lente amplía el alcance y añade a la vez una incertidumbre nueva.

En qué punto estamos

Ningún rasgo espectral demuestra por sí solo la Población III. El caso persuasivo combina un campo ionizante duro, juventud extrema, límites estrictos de varios metales, información espacial y pruebas explícitas contra agujeros negros y otros contaminantes. La lente puede revelar los sistemas débiles necesarios, pero toda luminosidad y masa inferidas deben conservar la dependencia del modelo de lente.

7. Lo que realmente ha encontrado el JWST

La pregunta

La expresión «candidato de Población III» abarca hoy sistemas con evidencias muy distintas. ¿Qué mediciones pertenecen a cada objeto y qué conclusiones siguen procediendo de modelos de población en lugar de estrellas detectadas directamente? La distinción decide qué clase de descubrimiento puede afirmarse.

La fuente del halo de GN-z11 se comunicó primero como un rasgo de más de cinco sigmas compatible con He II 1640 y sin líneas metálicas detectadas.[24] La espectroscopia independiente de alta resolución confirmó después la identificación de He II, resolvió dos componentes y volvió a no detectar líneas metálicas.[41] Un análisis complementario en otra gama espectral del JWST detectó Hγ con señal-ruido 5,9, fijó el corrimiento al rojo en 10,5862 ± 0,0003 y estableció un límite de metalicidad gaseosa a tres sigmas inferior a 0,02 veces la solar.[25] La región, hoy llamada Hebe, se encuentra a unos tres kilopársecs propios de GN-z11, lo que dificulta geométricamente la ionización por su núcleo activo central.

Una comparación específica de modelos concluye que ambos componentes observados requieren más de la mitad de su masa estelar en estrellas de Población III y que uno es compatible con un sistema puro. El mismo análisis favorece una función de masas inclinada hacia masas altas, pero conserva degeneraciones entre edad, masa estelar y forma de la función.[26] Es uno de los casos más fuertes a escala de población. Su fuerza nace de la conjunción de mediciones y modelos, no de resolver una estrella individual.

GLIMPSE-16043, con corrimiento al rojo fotométrico cercano a 6,5, es intrínsecamente ultradébil y muestra una anchura equivalente inferida de Hα de 2810 ± 550 ángstroms, ninguna detección de [O III] y un límite de metalicidad gaseosa inferior al 0,5 % de la solar.[27] Esas propiedades la convirtieron en candidata destacada. Análisis posteriores subrayaron que un salto de Balmer inusual también puede seleccionar sistemas exóticos muy pobres en metales, pero no genuinamente libres de ellos.[31] La espectroscopia debe decidir qué interpretación sobrevive.

LAP1-B posee la cifra de abundancia más clara. La espectroscopia del JWST mide z = 6,625 ± 0,001, una abundancia de oxígeno de $(4{,}2 \pm 1{,}8) \times 10^{-3}$ veces la solar, un límite superior de masa estelar por debajo de 3300 masas solares y un campo de radiación excepcionalmente duro.[28,29] Es la galaxia formadora de estrellas químicamente más primitiva medida hasta ahora y coincide con varias expectativas teóricas para un entorno que alberga Población III.[30] Su oxígeno, sin

embargo, no es cero, por lo que llamarla «galaxia sin metales» borraría la medición que la hace extraordinaria.

En qué punto estamos

Hebe ofrece el caso actual más fuerte de una población no resuelta prístina o dominada por Población III; GLIMPSE-16043 sigue siendo candidata a la espera de espectroscopia decisiva; LAP1-B es una galaxia medida, extraordinariamente primitiva pero ya enriquecida. El campo ha pasado de firmas predichas a pruebas reales sin comprimir todos los resultados en un titular único de «primera detección».

8. Qué convertiría un candidato en una detección

Una identificación persuasiva comienza con un corrimiento al rojo seguro y un espectro que pueda probarse como un solo sistema físico. Necesita un campo ionizante estelar duro, límites estrictos de varios metales y coherencia entre luminosidades de líneas, anchuras equivalentes, continuo y tamaño de la fuente.[25,26,31–34] Después debe excluir núcleos activos, objetos compactos en acreción, choques y poblaciones estelares enriquecidas con la sensibilidad realmente alcanzada.

Ninguna lista universal puede eliminar todos los supuestos. Una región genuinamente mixta de Población II/III puede contener líneas metálicas y aun albergar estrellas prístinas; un cúmulo recién autoenriquecido puede mostrar metales producidos por sus propias primeras supernovas. La espectroscopia espacialmente resuelta y las observaciones repetidas pueden separar componentes y comprobar si una señal sigue la morfología esperada. Los códigos de población independientes son especialmente valiosos cuando el resultado reclamado es una función de masas y no solo un espectro duro.

Los sistemas de Población III más detectables no tienen por qué contener las estrellas cronológicamente primeras. Bolsas prístinas posteriores pueden formarse en halos mayores, quedar detrás de lentes favorables o aparecer junto a galaxias luminosas que facilitan su localización.[23,28,31] La búsqueda no es solo una carrera hacia el mayor corrimiento al rojo. Es una búsqueda de la conjunción más limpia de composición, radiación y entorno.

Esa lógica explica cómo la ciencia puede saber mucho antes de ver un objeto etiquetado. La física atómica restringe el enfriamiento y los espectros; las simulaciones traducen esa física a poblaciones; la arqueología prueba las explosiones; el JWST prueba la luz no resuelta. Cada puente es corregible. QTC-016 comienza cuando esos primeros ciclos han aportado suficientes elementos pesados y sólidos para hacer posibles los planetas, aunque persistan bolsas prístinas aisladas.

En qué punto estamos

Una detección se ganará por convergencia, no por una sola línea espectacular: geometría segura, espectro estelar duro, límites multielemento, lente controlada y alternativas fallidas. Mientras tanto, los candidatos ya pueden probar con fuerza la teoría. El logro no consiste en fingir que la incertidumbre desapareció, sino en hacer explícita cada capa observacional y dependiente de modelos.

Lo que sabemos y cómo lo sabemos

- La nucleosíntesis del Big Bang produjo sobre todo hidrógeno y helio, por lo que la nucleosíntesis estelar fue necesaria antes de la formación enriquecida.[1,40]

- El enfriamiento molecular primordial, las simulaciones cosmológicas y métodos numéricos independientes respaldan la formación en gas cálido de minihalos y una función de masas elevada, no una masa única.[3–7]
- Las estrellas pobres en metales y sistemas gaseosos simples conservan restricciones químicas indirectas sobre supernovas tempranas, con degeneraciones conocidas por mezcla y enriquecimiento posterior.[17–21,35]
- La radiación dura capaz de ionizar helio y varios límites de líneas metálicas forman un diagnóstico de Población III más fuerte que cualquiera por separado.[11,12,32–34]
- El JWST ha confirmado sistemas excepcionalmente primitivos y candidatos fuertes a escala de población, como Hebe y LAP1-B, sin resolver todavía una estrella individual sin metales.[24–31]

Lo que todavía no sabemos

- La función inicial de masas exacta de la Población III, sus supervivientes de baja masa, su límite superior y su fracción de binarias.
- Cuánto contribuyó la Población III a la reionización y a las semillas de agujeros negros masivos posteriores.
- Si Hebe es Población III pura o mixta, y cómo su edad, masa estelar y función de masas dividen los modelos permitidos.
- Durante cuánto tiempo siguieron formando estrellas las bolsas prístinas y qué candidatos actuales superarán pruebas espectroscópicas más profundas.

Qué podría hacernos cambiar de opinión

- Un espectro estelar individual reproducible con límites de metalicidad que establezcan una estrella de Población III sin metales.
- Espectros o modelos de población independientes que demuestren que un candidato principal está alimentado por un objeto compacto en acreción o estrellas enriquecidas.
- Una simulación convergente y una muestra observacional que produzcan una función de masas de Población III semejante a la actual en vez de inclinada hacia masas altas.
- Un conjunto estadísticamente seguro de firmas de inestabilidad de pares, supervivientes sin metales o restricciones de 21 centímetros que revise materialmente la población permitida.

Si solo recuerdas una cosa

Hemos visto entornos candidatos fuertes y gas primitivo, pero identificar estrellas de Población III exige una conjunción de evidencias que separe la luz observada de la población estelar inferida para producirla.

Artículos relacionados

- QTC-004 — ¿Dónde se fabricaron los átomos de tu cuerpo?
- QTC-011 — La luz más antigua que podemos observar
- QTC-016 — Cómo se construye un planeta

Referencias

[1] Ralf S. Klessen; Simon C. O. Glover. The First Stars: Formation, Properties, and Impact. Annual Review of Astronomy and Astrophysics 61, 65–130 (2023). DOI 10.1146/annurev-astro-071221-053453. https://doi.org/10.1146/annurev-astro-071221-053453

[2] Volker Bromm. Formation of the First Stars. Reports on Progress in Physics 76, 112901 (2013). DOI 10.1088/0034-4885/76/11/112901. https://doi.org/10.1088/0034-4885/76/11/112901

[3] Tom Abel; Greg L. Bryan; Michael L. Norman. The Formation of the First Star in the Universe. Science 295, 93–98 (2002). DOI 10.1126/science.1063991. https://doi.org/10.1126/science.1063991

[4] Volker Bromm; Paolo S. Coppi; Richard B. Larson. The Formation of the First Stars. I. The Primordial Star-forming Cloud. Astrophysical Journal 564, 23–51 (2002). DOI 10.1086/323947. https://doi.org/10.1086/323947

[5] Shingo Hirano et al. One Hundred First Stars: Protostellar Evolution and the Final Masses. Astrophysical Journal 781, 60 (2014). DOI 10.1088/0004-637X/781/2/60. https://doi.org/10.1088/0004-637X/781/2/60

[6] Thomas H. Greif et al. Formation and evolution of primordial protostellar systems. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 424, 399–415 (2012). DOI 10.1111/j.1365-2966.2012.21212.x. https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2012.21212.x

[7] Athena Stacy; Volker Bromm; Aaron T. Lee. Building up the Population III initial mass function from cosmological initial conditions. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 462, 1307–1328 (2016). DOI 10.1093/mnras/stw1728. https://doi.org/10.1093/mnras/stw1728

[8] Dmitriy Tseliakhovich; Christopher Hirata. Relative velocity of dark matter and baryonic fluids and the formation of the first structures. Physical Review D 82, 083520 (2010). DOI 10.1103/PhysRevD.82.083520. https://doi.org/10.1103/PhysRevD.82.083520

[9] Zoltán Haiman; Martin J. Rees; Abraham Loeb. Destruction of Molecular Hydrogen during Cosmological Reionization. Astrophysical Journal 476, 458–463 (1997). DOI 10.1086/303647. https://doi.org/10.1086/303647

[10] Marie E. Machacek; Greg L. Bryan; Tom Abel. Simulations of Pregalactic Structure Formation with Radiative Feedback. Astrophysical Journal 548, 509–521 (2001). DOI 10.1086/319014. https://doi.org/10.1086/319014

[11] Daniel Schaerer. On the properties of massive Population III stars and metal-free stellar populations. Astronomy & Astrophysics 382, 28–42 (2002). DOI 10.1051/0004-6361:20011619. https://doi.org/10.1051/0004-6361:20011619

[12] Daniel Schaerer. The transition from Population III to normal galaxies: Lyα and He II emission and the ionising properties of high redshift starburst galaxies. Astronomy & Astrophysics 397, 527–538 (2003). DOI 10.1051/0004-6361:20021525. https://doi.org/10.1051/0004-6361:20021525

[13] A. Heger; S. E. Woosley. The Nucleosynthetic Signature of Population III. Astrophysical Journal 567, 532–543 (2002). DOI 10.1086/338487. https://doi.org/10.1086/338487

[14] Alexander Heger; S. E. Woosley. Nucleosynthesis and Evolution of Massive Metal-Free Stars. Astrophysical Journal 724, 341–373 (2010). DOI 10.1088/0004-637X/724/1/341. https://doi.org/10.1088/0004-637X/724/1/341

[15] 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

[16] Brant E. Robertson et al. Cosmic Reionization and Early Star-forming Galaxies: A Joint Analysis of New Constraints from Planck and the Hubble Space Telescope. Astrophysical Journal Letters 802, L19 (2015). DOI 10.1088/2041-8205/802/2/L19. https://doi.org/10.1088/2041-8205/802/2/L19

[17] Anna Frebel; John E. Norris. Near-Field Cosmology with Extremely Metal-Poor Stars. Annual Review of Astronomy and Astrophysics 53, 631–688 (2015). DOI 10.1146/annurev-astro-082214-122423. https://doi.org/10.1146/annurev-astro-082214-122423

[18] N. Christlieb et al. A stellar relic from the early Milky Way. Nature 419, 904–906 (2002). DOI 10.1038/nature01142. https://doi.org/10.1038/nature01142

[19] S. C. Keller et al. A single low-energy, iron-poor supernova as the source of metals in the star SMSS J031300.36−670839.3. Nature 506, 463–466 (2014). DOI 10.1038/nature12990. https://doi.org/10.1038/nature12990

[20] Hideyuki Umeda; Ken'ichi Nomoto. First-generation black-hole-forming supernovae and the metal abundance pattern of a very iron-poor star. Nature 422, 871–873 (2003). DOI 10.1038/nature01571. https://doi.org/10.1038/nature01571

[21] Ryan J. Cooke; Max Pettini; Charles C. Steidel. Discovery of the most metal-poor damped Lyman-α system. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 467, 802–811 (2017). DOI 10.1093/mnras/stx037. https://doi.org/10.1093/mnras/stx037

[22] Volker Bromm; Abraham Loeb. The formation of the first low-mass stars from gas with low carbon and oxygen abundances. Nature 425, 812–814 (2003). DOI 10.1038/nature02071. https://doi.org/10.1038/nature02071

[23] L. Tornatore; A. Ferrara; R. Schneider. Population III stars: hidden or disappeared? Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 382, 945–950 (2007). DOI 10.1111/j.1365-2966.2007.12215.x. https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2007.12215.x

[24] Roberto Maiolino et al. JADES: Possible Population III signatures at z = 10.6 in the halo of GN-z11. Astronomy & Astrophysics 687, A67 (2024). DOI 10.1051/0004-6361/202347087. https://doi.org/10.1051/0004-6361/202347087

[25] Hannah Übler et al. GA-NIFS and JADES: Confirmation of pristine gas near GN-z11. Accepted in Astronomy & Astrophysics; arXiv v2, 22 July 2026 (2026). DOI 10.48550/arXiv.2603.20360. https://arxiv.org/abs/2603.20360v2

[26] Elka Rusta et al. The Pristine He II Emitter near GN-z11: Constraining the Mass Distribution of the First Stars. The Astrophysical Journal Letters 1003, L14 (2026). DOI 10.3847/2041-8213/ae64e1. https://doi.org/10.3847/2041-8213/ae64e1

[27] Seiji Fujimoto et al. GLIMPSE: An Ultrafaint ≃10^5 M⊙ Pop III Galaxy Candidate and First Constraints on the Pop III UV Luminosity Function at z ≃ 6–7. Astrophysical Journal 989, 46 (2025). DOI 10.3847/1538-4357/ade9a1. https://doi.org/10.3847/1538-4357/ade9a1

[28] E. Vanzella et al. An extremely metal-poor star complex in the reionization era: Approaching Population III stars with JWST. Astronomy & Astrophysics 678, A173 (2023). DOI 10.1051/0004-6361/202346981. https://www.aanda.org/articles/aa/abs/2023/10/aa46981-23/aa46981-23.html

[29] Kimihiko Nakajima et al. An ultra-faint, chemically primitive galaxy forming in the reionization era. Nature 653, 363–367 (2026). DOI 10.1038/s41586-026-10374-1. https://doi.org/10.1038/s41586-026-10374-1

[30] Eli Visbal; Ryan Hazlett; Greg L. Bryan. LAP1-B is the First Observed System Consistent with Theoretical Predictions for Population III Stars. Astrophysical Journal Letters 993, L17 (2025). DOI 10.3847/2041-8213/ae122f. https://doi.org/10.3847/2041-8213/ae122f

[31] Alessandra Venditti et al. How can we finally see the first light? Status and perspective in the search for Population III stars. arXiv v2, 19 August 2026 (2026). DOI 10.48550/arXiv.2607.00167. https://arxiv.org/abs/2607.00167v2

[32] K. Nakajima; R. Maiolino. Diagnostics for PopIII galaxies and direct collapse black holes in the early universe. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 513, 5134–5147 (2022). DOI 10.1093/mnras/stac1242. https://academic.oup.com/mnras/article/513/4/5134/6570722

[33] Harley Katz; Taysun Kimm; Richard S. Ellis; Julien Devriendt; Adrianne Slyz. The challenges of identifying Population III stars in the early Universe. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 524, 351–360 (2023). DOI 10.1093/mnras/stad1903. https://doi.org/10.1093/mnras/stad1903

[34] James A. A. Trussler et al. On the observability and identification of Population III galaxies with JWST. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 525, 5328–5352 (2023). DOI 10.1093/mnras/stad2553. https://doi.org/10.1093/mnras/stad2553

[35] Irene Vanni; Stefania Salvadori; Ása Skúladóttir; Martina Rossi; Ioanna Koutsouridou. Characterizing the true descendants of the first stars. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 526, 2620–2644 (2023). DOI 10.1093/mnras/stad2910. https://doi.org/10.1093/mnras/stad2910

[36] Brian Welch et al. A highly magnified star at redshift 6.2. Nature 603, 815–818 (2022). DOI 10.1038/s41586-022-04449-y. https://doi.org/10.1038/s41586-022-04449-y

[37] Thomas H. Greif et al. Simulations on a Moving Mesh: The Clustered Formation of Population III Protostars. Astrophysical Journal 737, 75 (2011). DOI 10.1088/0004-637X/737/2/75. https://doi.org/10.1088/0004-637X/737/2/75

[38] Christopher F. McKee; Jonathan C. Tan. The Formation of the First Stars. II. Radiative Feedback Processes and Implications for the Initial Mass Function. Astrophysical Journal 681, 771–797 (2008). DOI 10.1086/587434. https://doi.org/10.1086/587434

[39] John H. Wise et al. The Birth of a Galaxy: Primordial Metal Enrichment and Stellar Populations. Astrophysical Journal 745, 50 (2012). DOI 10.1088/0004-637X/745/1/50. https://doi.org/10.1088/0004-637X/745/1/50

[40] 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

[41] Roberto Maiolino et al. The search for Population III: Confirmation of a HeII emitter with no metal lines at z=10.6. arXiv v4, 6 April 2026; submitted to MNRAS (2026). DOI 10.48550/arXiv.2603.20362. https://arxiv.org/abs/2603.20362v4

Cómo se construye un planeta

QTC-016 · 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

Un planeta no se ensambla siguiendo una receta única. Surge de un disco cuyos sólidos condensan, chocan, derivan, se concentran y a veces colapsan gravitatoriamente, mientras los cuerpos crecientes se dispersan entre sí y migran a través del gas. Meteoritos, discos protoplanetarios, sistemas isotópicos, dinámica numérica e interior terrestre conservan partes distintas de esa historia. Este artículo sigue la cadena desde las inclusiones ricas en calcio y aluminio y los cóndrulos hasta los planetesimales, los embriones, la diferenciación y el impacto que formó la Luna. Separa estructuras observadas de planetas inferidos, mecanismos viables de historias únicas y fechas precisas de los acontecimientos que realmente registran. La Tierra se construyó, fundió y ordenó químicamente mediante una secuencia estocástica cuya física general es sólida, aunque su itinerario exacto siga siendo una reconstrucción. Construir un planeta es, por tanto, un proceso, no un plano arquitectónico.

En 60 segundos

Las estrellas jóvenes están rodeadas por discos de gas y polvo, pero un anillo o una brecha no demuestran por sí solos un planeta. En el Sistema Solar, las inclusiones ricas en calcio y aluminio marcan los primeros sólidos conocidos hace 4567,30 ± 0,16 millones de años; son un tiempo cero, no el nacimiento de una Tierra terminada. El polvo podía adherirse en agregados, pero el rebote, la fragmentación y la deriva hacia el interior impedían un crecimiento sencillo. La concentración mediante la dinámica gas-partícula, incluida la inestabilidad de flujo, ofrece una vía hacia planetesimales ligados por gravedad, y la acreción de guijarros puede acelerar el crecimiento posterior bajo condiciones adecuadas. Después, la gravedad construyó embriones, los dispersó y los desplazó por el disco gaseoso. Los impactos y el aluminio-26 fundieron algunos cuerpos, separando núcleos metálicos de mantos silicatados. La Tierra acretó mezclas cambiantes, y el origen de su agua y de su barniz tardío sigue parcialmente discutido. La Luna probablemente registra un gran impacto, pero los modelos canónico, de alto momento angular, de sinestia y de satélite inmediato resuelven restricciones diferentes. Ningún objeto conserva la secuencia completa; la historia exige concordancia entre archivos independientes.

Por qué importa esta pregunta

La formación planetaria conecta las primeras estrellas con la primera geología. La nucleosíntesis estelar aportó los elementos, pero los discos, las colisiones, la gravedad y el calor tuvieron que convertirlos en mundos diferenciados. La evidencia está repartida de una manera excepcional: los telescopios muestran hoy otros discos, los meteoritos conservan sólidos del Sistema Solar temprano,

los sistemas isotópicos ordenan acontecimientos, los modelos numéricos prueban dinámicas y los planetas revelan estructuras finales. Esa distribución convierte el tema en una lección de reconstrucción. Un mecanismo puede ser físicamente real sin haber dominado todas las regiones, y una cifra precisa puede fechar un cierre o una segregación sin fechar el planeta entero.

1. Un planeta es una reconstrucción, no una receta

La pregunta

Si nadie observó cómo se ensamblaba la Tierra, ¿qué hace que la formación planetaria sea algo más que una historia plausible? Archivos distintos conservan operaciones diferentes, y la reconstrucción se fortalece cuando discos, meteoritos, dinámica e interiores planetarios limitan la misma secuencia.

Un planeta terminado oculta gran parte de su construcción. La fusión borra texturas, los impactos mezclan reservorios y la tectónica recicla la corteza. Por eso los investigadores no leen la Tierra como un diario completo. Comparan discos circunestelares jóvenes, meteoritos primitivos, asteroides diferenciados, órbitas planetarias, mediciones de laboratorio y modelos numéricos.[1] Cada archivo responde a una pregunta más estrecha que «¿cómo se hizo la Tierra?», pero su solapamiento puede excluir muchas historias.

Los discos alrededor de estrellas jóvenes se observan directamente. HL Tau reveló anillos brillantes y oscuros con una resolución extraordinaria, y el estudio DSHARP mostró que los anillos, las brechas y otras subestructuras son comunes en discos cercanos.[2,3] Esas estructuras pueden producirlas planetas, pero también líneas de hielo, variaciones de presión, efectos magnéticos o inestabilidades hidrodinámicas. Una brecha es, por tanto, evidencia sobre la estructura del disco, no una detección automática de un planeta.

El tiempo disponible era limitado. Los estudios infrarrojos muestran que la fracción de estrellas que conservan discos internos de polvo disminuye con fuerza a lo largo de unos pocos millones de años.[4] Los gigantes gaseosos deben adquirir la mayor parte de sus envolturas antes de que el gas se disperse, mientras los cuerpos rocosos pueden seguir chocando después. «Tiempo de formación planetaria» no es, por tanto, un único intervalo: sólidos, planetesimales, núcleos, atmósferas y últimos grandes impactos obedecen relojes distintos.

Este artículo reconstruye operaciones en lugar de narrar una marcha inevitable desde el polvo hasta la Tierra. La condensación ordena la materia; las colisiones pueden hacer crecer o destruir agregados; el gas puede concentrar sólidos y mover embriones; la gravedad vuelve estocástica la acreción; el calor diferencia cuerpos; los isótopos y la química conservan memorias parciales. El resultado no es una receta universal, sino una familia limitada de trayectorias.

En qué punto estamos

La formación planetaria se conoce uniendo archivos incompletos, no encontrando un registro prístino único. Los discos observados establecen entornos, los meteoritos conservan sólidos tempranos, la dinámica prueba itinerarios posibles y los interiores planetarios revelan una ordenación posterior. El siguiente paso es preguntar cómo el disco puso a disposición materiales iniciales distintos sin fijar el destino de cada objeto.

2. El disco ordenó la materia sin fijar su destino

Una nebulosa solar en enfriamiento no condensó todos los elementos a la vez. Los cálculos de equilibrio ordenan los sólidos por sus temperaturas y presiones de estabilidad: las fases refractarias ricas en calcio y aluminio aparecen antes que los materiales más volátiles.[5] Esta «secuencia de condensación» es una referencia química, no una cinta transportadora literal. El transporte, el recalentamiento, la cinética y los granos presolares heredados complican cualquier mapa radial.

Las inclusiones ricas en calcio y aluminio, o CAI, conservan los sólidos de alta temperatura más antiguos que se han fechado. Su edad Pb–Pb de 4567,30 ± 0,16 millones de años proporciona el tiempo cero convencional de la cronología del Sistema Solar.[6] No fecha un Sol, una Tierra o un disco ya terminados. Fecha la cristalización de inclusiones concretas cuyos minerales conservaron el registro isotópico pertinente.

Los cóndrulos son gotas milimétricas que se fundieron y enfriaron antes de incorporarse a muchos meteoritos condríticos. Algunos resultados Pb–Pb se solapan con el intervalo de las CAI, mientras otros cronómetros y muestras prolongan la producción de cóndrulos hasta épocas posteriores.[7,8] Los acontecimientos térmicos que los formaron siguen siendo un problema abierto: choques, láminas de corriente, colisiones entre planetesimales y otros mecanismos reproducen subconjuntos distintos de la evidencia.

Los meteoritos conservan, por tanto, materiales formados en lugares, temperaturas y momentos diferentes que después se mezclaron en una sola roca. Una condrita carbonácea no es una muestra intacta de un único radio orbital, y una condrita de enstatita no es simplemente un paquete etiquetado como «disco interior». Las familias químicas y las anomalías isotópicas limitan reservorios, pero el transporte impide una regla unidimensional entre distancia y composición.

En qué punto estamos

El disco creó estructura química y cronológica, pero el transporte la desdibujó repetidamente. Las CAI ofrecen una referencia precisa para los primeros sólidos, no el nacimiento de la Tierra, mientras los cóndrulos registran calentamientos posteriores o solapados, aún sin causa resuelta. Antes de que la gravedad ensamblara planetas con ellos, los sólidos debían superar un problema de crecimiento que la simple adhesión no resolvía.

3. El polvo tuvo que superar una barrera de crecimiento

La pregunta

Si los granos empiezan como polvo y los planetas terminan con miles de kilómetros de diámetro, ¿por qué no dejar que las colisiones hagan todo el trabajo? Porque el mismo gas y los impactos que reúnen partículas pueden hacerlas rebotar, fragmentarse o caer en espiral hacia la estrella.

Los granos micrométricos pueden adherirse mediante fuerzas superficiales, y los experimentos de laboratorio cartografían regímenes de adhesión, rebote, fragmentación, erosión y transferencia de masa.[9,10] El resultado depende de composición, porosidad, tamaño, velocidad y geometría del impacto. No existe una sola velocidad de colisión a la que «el polvo deja de crecer», y los agregados helados no tienen por qué comportarse como los silicatos compactos.

El gas orbita algo por debajo de la velocidad kepleriana local porque la presión ayuda a sostenerlo. Por eso los sólidos sienten un viento de frente, pierden momento angular y derivan hacia el interior. Las partículas con tiempos de frenado comparables a una órbita derivan con especial rapidez, mientras las colisiones repetidas pueden estancarse en una barrera de rebote.[9,10] La conocida «barrera del metro» nombra un régimen dinámico, no un diámetro universal de un metro.

La inestabilidad de flujo proporciona una vía colectiva. La reacción de las partículas sobre el gas puede concentrar sólidos en filamentos densos; si una concentración se vuelve autogravitante, puede colapsar en planetesimales.[11,12] Las simulaciones producen a menudo una distribución inicial dominada por cuerpos de decenas a centenares de kilómetros, pero el resultado depende de la abundancia local de sólidos, los gradientes de presión, la turbulencia, la autogravedad y la resolución numérica.[13]

Es un mecanismo viable, pero no demuestra que todos los planetesimales se formaran así. Trampas de presión, vórtices, concentración turbulenta y rutas colisionales pueden contribuir en entornos distintos. Con semillas, la acreción de guijarros puede acelerar el crecimiento porque el arrastre gaseoso ayuda a que las partículas que pasan pierdan energía y sean capturadas, pero su eficiencia depende del tamaño de partícula, la masa del embrión, el grosor del disco y la velocidad relativa.[14,15]

En qué punto estamos

El crecimiento del polvo no es una secuencia ininterrumpida de colisiones adhesivas. La deriva aerodinámica, el rebote y la fragmentación crean barreras, mientras la concentración colectiva y la captura de guijarros ofrecen vías condicionadas para rodearlas. La combinación dominante sigue abierta. Sin embargo, cuando la gravedad ligó sólidos en planetesimales comenzó otro régimen: los cuerpos podían enfocar impactos, dispersar vecinos y reorganizar el disco.

4. La gravedad construyó embriones y los reorganizó

La gravedad de un planetesimal amplía su blanco efectivo de colisión al enfocar hacia él los cuerpos que pasan. Al principio, los objetos mayores pueden crecer más deprisa que sus vecinos, seguidos por un crecimiento oligárquico en el que embriones separados dominan zonas locales de alimentación.[16] Esas etiquetas describen regímenes en modelos, no una secuencia universal con fronteras fijas.

Cuando el disco gaseoso se desvanece, los embriones y planetesimales continúan mediante dinámica de muchos cuerpos. Los experimentos numéricos de acreción producen impactos, expulsiones y mezcla radial; pequeños cambios en las órbitas iniciales pueden dar planetas finales distintos.[17] La pequeña masa de Marte, la composición terrestre y el cinturón de asteroides limitan por ello un conjunto de historias, no seleccionan una repetición determinista.

El gas añade torques sistemáticos. Un planeta de baja masa excita ondas e intercambia momento angular con el disco, de modo que la migración es una expectativa física, no un mecanismo de rescate excepcional.[18] La dirección y la velocidad dependen de la temperatura, la densidad y la viscosidad del disco, además de la masa planetaria. Reconstruir un itinerario concreto del Sistema Solar exige algo más que demostrar que la migración ocurre.

El Grand Tack propone que Júpiter migró hacia el interior y después hacia fuera tras resonar con Saturno, truncando material cerca de Marte y repoblando el cinturón de asteroides.[19] Es una hipótesis activa, no un viaje registrado. Las diferencias isotópicas entre meteoritos carbonáceos y no carbonáceos indican una separación duradera de reservorios; una interpretación vincula esa barrera con el crecimiento temprano joviano.[20] La inferencia es potente, pero no traza de forma única cada kilómetro de la trayectoria joviana.

Los sistemas multiplanetarios compactos observados por Kepler demuestran que otros discos construyeron a menudo arquitecturas distintas de la nuestra.[21] Su existencia no refuta los modelos del Sistema Solar; elimina cualquier suposición de que un resultado fuera inevitable. La migración, las colisiones y la estructura del disco pueden producir múltiples estados finales estables a partir de ingredientes iniciales semejantes.

En qué punto estamos

> *La gravedad convirtió las semillas en una población inestable de embriones cuyas historias dependían de vecinos y gas. La migración es esperable, pero el Grand Tack y el itinerario exacto de Júpiter siguen siendo reconstrucciones limitadas por Marte, los meteoritos y el cinturón de asteroides. El crecimiento también liberó calor: la acreción no solo aumentó masa, sino que empezó a separar los planetas química y físicamente.*

5. El crecimiento también fundió y diferenció mundos

La acreción convierte la energía de impacto en calor. Compresión, formación del núcleo y colisiones repetidas añaden más, mientras los radionúclidos de vida corta pueden dominar el calentamiento de pequeños cuerpos tempranos. El descubrimiento de magnesio-26 en exceso en meteoritos estableció que el aluminio-26 existió en el Sistema Solar temprano.[22] Con una semivida cercana a 0,7 millones de años, su efecto dependía acusadamente de cuándo se ensambló cada cuerpo.

Los planetesimales formados pronto y con suficiente aluminio-26 podían fundirse y separar metal de silicato. La cronología Hf–W indica que algunos cuerpos parentales asteroidales se diferenciaron en los primeros millones de años.[23,24] Los cuerpos posteriores o menores podían permanecer parcialmente sin fundir. «Planetesimal» no implica, por tanto, un único estado interno, y los meteoritos primitivos pueden coexistir cronológicamente con fragmentos diferenciados.

Un océano de magma permite que el metal denso se hunda y que los reservorios silicatados se separen a medida que avanza la cristalización.[25] La estructura sísmica actual de la Tierra —corteza, manto, núcleo externo líquido y núcleo interno sólido— demuestra una diferenciación a gran escala, aunque el Modelo Terrestre Preliminar de Referencia describa propiedades radiales actuales, no una película directa de la formación del núcleo.[26]

El hafnio prefiere los silicatos, mientras el wolframio prefiere el metal. Su sistema isotópico puede, por tanto, limitar el momento de la separación metal–silicato, pero la edad inferida depende de la historia de acreción, el equilibrio durante impactos, la composición isotópica inicial y cuánto metal y silicato intercambiaron en cada episodio.[23,24,27] Una «edad de formación del núcleo» es una escala temporal dependiente del modelo, no necesariamente una fecha instantánea.

La diferenciación también modifica qué evidencias posteriores pueden sobrevivir. El metal arrastra elementos siderófilos hacia los núcleos; los volátiles pueden escapar o redistribuirse; los impactos pueden mezclar reservorios del manto. El planeta resultante no es solo un agregado mayor. Su construcción transforma el archivo utilizado para reconstruirla.

En qué punto estamos

El crecimiento planetario generó calor además de masa. El aluminio-26, los impactos y la segregación diferenciaron rápidamente algunos cuerpos tempranos, mientras otros permanecieron primitivos. Las capas terrestres demuestran una ordenación extensa, pero las escalas temporales isotópicas dependen del modelado de acreción y equilibrio. Esas complicaciones se vuelven centrales al preguntar qué mezcla cambiante llegó a ser la Tierra.

6. La Tierra acretó como una mezcla cambiante

La pregunta

¿Qué meteorito es la lista de ingredientes de la Tierra? Ninguno. Isótopos y elementos apuntan a varios reservorios relacionados, mientras la diferenciación, la pérdida de volátiles y las adiciones tardías cambiaron lo que el manto superviviente puede revelar sobre el material que llegó.

La composición isotópica terrestre es, en varios sistemas, más próxima a materiales no carbonáceos del Sistema Solar interior, especialmente las condritas de enstatita, pero ningún grupo de meteoritos reproduce todos los elementos e isótopos y explica a la vez la formación del núcleo.[28] Los modelos de acreción permiten por ello que la mezcla y el estado de oxidación de los impactores cambien con el tiempo, con equilibrio metal–silicato durante colisiones sucesivas.[27,28]

El agua expone la ambigüedad. Hidrógeno, nitrógeno y gases nobles limitan posibles portadores, pero cometas, asteroides carbonáceos, material semejante a las condritas de enstatita, el gas nebular y el procesamiento posterior pueden solaparse en ciertas razones isotópicas.[29] Las condritas de enstatita contienen hidrógeno suficiente para permitir una contribución del Sistema Solar interior,[30] mientras el cometa 67P tiene una razón D/H superior al triple del agua oceánica terrestre, lo que lo excluye como fuente universal sencilla, pero no excluye todos los cometas.[31]

Una razón D/H coincidente no es una etiqueta de envío. El escape atmosférico, el intercambio con el manto, la alteración en cuerpos parentales y la mezcla pueden cambiar inventarios y razones. El origen del agua y otros volátiles terrestres está, por tanto, discutido en sus proporciones y rutas de entrega, aunque las fuentes múltiples y el procesamiento posterior sean partes establecidas del problema.

Los elementos altamente siderófilos deberían haber acompañado al metal hasta el núcleo terrestre. Su abundancia en el manto suele interpretarse como material añadido después de la principal formación del núcleo: un «barniz tardío».[32] Convertir esa abundancia en una masa y un momento exige supuestos sobre equilibrio metálico, mezcla del manto y composición de los impactores. El barniz es un modelo, no una capa final visible.

La acreción, los océanos de magma y los impactos también pudieron perder y redistribuir volátiles. La Tierra superviviente es un producto filtrado: composición de las fuentes, secuencia de impactos,

oxidación, diferenciación y escape contribuyen conjuntamente. Por eso una reconstrucción satisfactoria debe ajustar a la vez isótopos, abundancias elementales, dinámica e interior actual.

En qué punto estamos

La Tierra se ensambló con una mezcla cambiante y procesada, no se copió de una sola clase de meteorito. Los isótopos limitan reservorios, mientras el agua y el barniz tardío conservan proporciones discutidas y dependencia de modelos. La mayor pista superviviente de las últimas etapas de acreción es la Luna, cuya semejanza con la Tierra exige un gran impacto sin seleccionar una versión única.

7. La Luna registra un gran impacto, no un escenario resuelto

La pregunta

Si la explicación del gran impacto goza de amplia aceptación, ¿por qué los artículos siguen proponiendo colisiones tan distintas? Porque formar un satélite es solo una restricción: una historia satisfactoria también debe reproducir momento angular, química, isótopos y evolución orbital posterior.

Una colisión entre la Tierra en crecimiento y un embrión planetario constituye la principal clase de explicaciones para la Luna. El cálculo canónico utilizó un impactor de tamaño aproximado al de Marte cerca del final de la acreción y puso escombros silicatados en órbita mientras sobrevivía el núcleo terrestre rico en hierro.[34] Explica de forma natural el pequeño núcleo lunar y el momento angular, pero las primeras versiones producían gran parte del disco a partir del impactor.

Las rocas lunares y terrestres son extraordinariamente parecidas en varios sistemas isotópicos. Algunas mediciones identifican pequeñas diferencias en isótopos de oxígeno,[39] mientras otras encuentran valores indistinguibles con mayor precisión e infieren una mezcla vigorosa.[40] En ambos casos, la semejanza es una restricción central: los modelos deben explicar por qué una colisión entre dos cuerpos diferenciados no dejó una Luna simplemente extranjera.

Una solución emplea un impactor de composición semejante a la terrestre o una colisión que mezcla con eficacia blanco e impactor.[35] Los escenarios de alto momento angular empiezan con una Tierra que gira más deprisa y eliminan después el exceso mediante resonancia.[36] Estos modelos amplían las colisiones permitidas, pero trasladan parte de la explicación a la probabilidad de las composiciones iniciales y a la evolución orbital posterior.

El modelo de sinestia propone una estructura caliente, extendida y de rápida rotación en la que la Luna acreta a partir de vapor y condensado conectados con la Tierra.[37] Simulaciones de muy alta resolución también han producido un satélite de masa lunar colocado en órbita casi inmediatamente después del impacto.[38] Ambas son hipótesis activas. Cada una resuelve determinadas restricciones dinámicas y composicionales e introduce condiciones que requieren más pruebas.

La geometría exacta del impacto, la composición del impactor, el estado térmico y la fecha siguen abiertos. «El gran impacto» debe nombrar, por tanto, una clase explicativa bien respaldada, no una animación congelada. El progreso científico consiste en usar nuevas restricciones isotópicas y

dinámicas para eliminar versiones, no en fingir que toda simulación satisfactoria representa la misma historia.

En qué punto estamos

La Luna respalda con fuerza una gran colisión tardía, pero ninguna geometría concreta posee esa conclusión. Los modelos canónico, de alto momento angular, de sinestia y de satélite inmediato distribuyen las restricciones de manera distinta. Su competencia es productiva porque los isótopos lunares, el momento angular y la historia térmica pueden descartar implementaciones aunque sobreviva la clase explicativa.

8. Lo que la evidencia puede y no puede reconstruir

Los circones lunares proporcionan edades próximas a 4,51 mil millones de años. Barboni y colegas interpretaron edades uranio–plomo e isótopos de hafnio como evidencia de una formación lunar dentro de unos 60 millones de años desde el tiempo cero del Sistema Solar.[41] Esa conclusión une la cristalización mineral a un modelo de diferenciación lunar; las edades de los circones no son una marca temporal directa del propio impacto.

Los elementos altamente siderófilos ofrecen otra vía. Jacobson y sus colegas utilizaron la relación entre masa acretada tardíamente y limpieza dinámica para estimar un momento de formación lunar cercano a 95 ± 32 millones de años después del inicio del Sistema Solar.[33] Es un modelo estadístico ligado a un indicador de barniz tardío, no la misma medición que la restricción de los circones lunares. Cualquier acuerdo o tensión debe conservar esa diferencia.

Los isótopos de meteoritos también conectan clases actuales de asteroides con reservorios de origen. Los sistemas de hidrógeno y nitrógeno limitan los portadores de volátiles,[42] mientras las partículas traídas de Itokawa establecen un vínculo directo entre un asteroide de tipo S y las condritas ordinarias.[43] Esos éxitos justifican la planetología comparada, pero un asteroide vinculado no reduce todas las familias de meteoritos a un solo lugar de origen.

Los experimentos numéricos de acreción muestran por qué es improbable una repetición exacta. Los impactos estocásticos cambian zonas de alimentación, entrega de volátiles, rotación y composición final incluso bajo condiciones generales semejantes.[17,44] Los modelos son más sólidos cuando reproducen distribuciones y restricciones correlacionadas, no cuando una simulación estéticamente convincente se trata como la biografía recuperada de la Tierra.

La reconstrucción tiene, por tanto, capas: estructuras observadas en discos; texturas, química e isótopos medidos en meteoritos; procesos físicos calibrados experimentalmente; modelos dinámicos y geoquímicos; y propiedades planetarias actuales. Una edad precisa pertenece a un mineral, a una separación de reservorios o a un cierre antes de pertenecer a un planeta. QTC-017 aborda cómo los relojes isotópicos ganan esas edades, sus supuestos y sus comprobaciones cruzadas.

En qué punto estamos

Ningún archivo reconstruye la Tierra por sí solo. Las fechas, reservorios químicos, interiores y simulaciones resultan persuasivos cuando limitan operaciones compatibles y conservan modos de fallo distintos. La secuencia general desde sólidos del disco hasta una Tierra diferenciada y un gran

impacto es sólida; el itinerario exacto sigue siendo reconstructivo. El siguiente artículo pregunta cómo los relojes isotópicos convierten su cronología en cuantitativa.

Lo que sabemos y cómo lo sabemos

- Las estrellas jóvenes conservan con frecuencia discos estructurados de gas y polvo, pero un anillo o una brecha no son una firma planetaria única.[2–4]
- Las CAI proporcionan una referencia de 4567,30 ± 0,16 Ma para los primeros sólidos; no fechan una Tierra terminada.[6]
- Las colisiones del polvo, el arrastre gaseoso y la dinámica colectiva partícula–gas ofrecen varias rutas físicamente probadas desde granos hasta planetesimales.[9–15]
- La gravedad, la migración, los impactos y el aluminio-26 pueden hacer crecer, reorganizar, fundir y diferenciar cuerpos planetarios.[16–27]
- Las restricciones de la Tierra y la Luna exigen una mezcla de acreción cambiante y una clase de gran impacto tardío sin seleccionar un escenario único.[28–41]

Lo que todavía no sabemos

- Qué vía de formación de planetesimales dominó en cada lugar y momento del disco.
- Qué historia concreta de migración produjo Marte, el cinturón de asteroides y las zonas de alimentación terrestres.
- Las proporciones y rutas de entrega del agua y otros volátiles terrestres.
- La geometría exacta, composición del impactor, estado térmico y fecha del impacto que formó la Luna.

Qué podría hacernos cambiar de opinión

- Observaciones resueltas de discos que conecten de forma única las subestructuras con planetas incrustados o con mecanismos no planetarios.
- Convergencia experimental y numérica que muestre una ruta dominante de formación de planetesimales bajo condiciones realistas de disco.
- Nuevas muestras retornadas con isótopos que definan reservorios y contexto geológico conocido.
- Un modelo de impacto lunar que reproduzca simultáneamente isótopos, química, momento angular, evolución térmica y cronología absoluta sin ajustes especiales.

Si solo recuerdas una cosa

Los planetas surgen mediante varios mecanismos acoplados, y la historia terrestre solo es creíble cuando discos, meteoritos, isótopos, dinámica e interiores limitan la misma secuencia sin fingir una receta inevitable.

Artículos relacionados

- QTC-004 — ¿Dónde se fabricaron los átomos de tu cuerpo?
- QTC-015 — Las estrellas que nunca hemos visto
- QTC-017 — Cómo aprendimos a fechar el pasado

Referencias

[1] Sean N. Raymond; Andre Izidoro; Alessandro Morbidelli. Solar System Formation in the Context of Extrasolar Planets. Planetary Astrobiology, 287–324 (2020). DOI 10.2458/azu_uapress_9780816540068-ch012. https://doi.org/10.2458/azu_uapress_9780816540068-ch012

[2] ALMA Partnership. The 2014 ALMA Long Baseline Campaign: First Results from High Angular Resolution Observations toward the HL Tau Region. Astrophysical Journal Letters 808, L3 (2015). DOI 10.1088/2041-8205/808/1/L3. https://doi.org/10.1088/2041-8205/808/1/L3

[3] Sean M. Andrews et al. The Disk Substructures at High Angular Resolution Project (DSHARP). I. Motivation, Sample, Calibration, and Overview. Astrophysical Journal Letters 869, L41 (2018). DOI 10.3847/2041-8213/aaf741. https://doi.org/10.3847/2041-8213/aaf741

[4] Karl E. Haisch, Jr.; Elizabeth A. Lada; Charles J. Lada. Disk Frequencies and Lifetimes in Young Clusters. Astrophysical Journal Letters 553, L153–L156 (2001). DOI 10.1086/320685. https://doi.org/10.1086/320685

[5] Katharina Lodders. Solar System Abundances and Condensation Temperatures of the Elements. Astrophysical Journal 591, 1220–1247 (2003). DOI 10.1086/375492. https://doi.org/10.1086/375492

[6] James N. Connelly et al. The Absolute Chronology and Thermal Processing of Solids in the Solar Protoplanetary Disk. Science 338, 651–655 (2012). DOI 10.1126/science.1226919. https://doi.org/10.1126/science.1226919

[7] Yuri Amelin; Alexander N. Krot; Ian D. Hutcheon; Alexander A. Ulyanov. Lead Isotopic Ages of Chondrules and Calcium-Aluminum-Rich Inclusions. Science 297, 1678–1683 (2002). DOI 10.1126/science.1073950. https://doi.org/10.1126/science.1073950

[8] Harold C. Connolly Jr.; Rhian H. Jones. Chondrules: The canonical and noncanonical views. Journal of Geophysical Research: Planets 121, 1885–1899 (2016). DOI 10.1002/2016JE005113. https://doi.org/10.1002/2016JE005113

[9] Jürgen Blum; Gerhard Wurm. The Growth Mechanisms of Macroscopic Bodies in Protoplanetary Disks. Annual Review of Astronomy and Astrophysics 46, 21–56 (2008). DOI 10.1146/annurev.astro.46.060407.145152. https://doi.org/10.1146/annurev.astro.46.060407.145152

[10] C. Güttler et al. The outcome of protoplanetary dust growth: pebbles, boulders, or planetesimals? I. Mapping the zoo of laboratory collision experiments. Astronomy & Astrophysics 513, A56 (2010). DOI 10.1051/0004-6361/200912852. https://doi.org/10.1051/0004-6361/200912852

[11] Andrew N. Youdin; Jeremy Goodman. Streaming Instabilities in Protoplanetary Disks. Astrophysical Journal 620, 459–469 (2005). DOI 10.1086/426895. https://doi.org/10.1086/426895

[12] Anders Johansen et al. Rapid planetesimal formation in turbulent circumstellar disks. Nature 448, 1022–1025 (2007). DOI 10.1038/nature06086. https://doi.org/10.1038/nature06086

[13] Urs Schäfer; Chao-Chin Yang; Anders Johansen. Initial mass function of planetesimals formed by the streaming instability. Astronomy & Astrophysics 597, A69 (2017). DOI 10.1051/0004-6361/201629561. https://doi.org/10.1051/0004-6361/201629561

[14] C. W. Ormel; H. H. Klahr. The effect of gas drag on the growth of protoplanets: Analytical expressions for the accretion of small bodies in laminar disks. Astronomy & Astrophysics 520, A43 (2010). DOI 10.1051/0004-6361/201014903. https://doi.org/10.1051/0004-6361/201014903

[15] Michiel Lambrechts; Anders Johansen. Rapid growth of gas-giant cores by pebble accretion. Astronomy & Astrophysics 544, A32 (2012). DOI 10.1051/0004-6361/201219127. https://doi.org/10.1051/0004-6361/201219127

[16] Eiichiro Kokubo; Shigeru Ida. Oligarchic Growth of Protoplanets. Icarus 131, 171–178 (1998). DOI 10.1006/icar.1997.5840. https://doi.org/10.1006/icar.1997.5840

[17] J. E. Chambers. Making More Terrestrial Planets. Icarus 152, 205–224 (2001). DOI 10.1006/icar.2001.6639. https://doi.org/10.1006/icar.2001.6639

[18] Hidekazu Tanaka; Taku Takeuchi; William R. Ward. Three-dimensional Interaction between a Planet and an Isothermal Gaseous Disk. I. Corotation and Lindblad Torques and Planet Migration. Astrophysical Journal 565, 1257–1274 (2002). DOI 10.1086/324713. https://doi.org/10.1086/324713

[19] Kevin J. Walsh et al. A low mass for Mars from Jupiter’s early gas-driven migration. Nature 475, 206–209 (2011). DOI 10.1038/nature10201. https://doi.org/10.1038/nature10201

[20] Thomas S. Kruijer et al. Age of Jupiter inferred from the distinct genetics and formation times of meteorites. Proceedings of the National Academy of Sciences 114, 6712–6716 (2017). DOI 10.1073/pnas.1704461114. https://doi.org/10.1073/pnas.1704461114

[21] Jack J. Lissauer et al. A closely packed system of low-mass, low-density planets transiting Kepler-11. Nature 470, 53–58 (2011). DOI 10.1038/nature09760. https://doi.org/10.1038/nature09760

[22] Typhoon Lee; D. A. Papanastassiou; G. J. Wasserburg. Aluminum-26 in the Early Solar System: Fossil or Fuel? Astrophysical Journal Letters 211, L107–L110 (1977). https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1977ApJ...211L.107L/abstract

[23] T. Kleine et al. Rapid accretion and early core formation on asteroids and the terrestrial planets from Hf–W chronometry. Nature 418, 952–955 (2002). DOI 10.1038/nature00982. https://doi.org/10.1038/nature00982

[24] Qingzhu Yin et al. A short timescale for terrestrial planet formation from Hf–W chronometry of meteorites. Nature 418, 949–952 (2002). DOI 10.1038/nature00995. https://doi.org/10.1038/nature00995

[25] Linda T. Elkins-Tanton. Magma Oceans in the Inner Solar System. Annual Review of Earth and Planetary Sciences 40, 113–139 (2012). DOI 10.1146/annurev-earth-042711-105503. https://doi.org/10.1146/annurev-earth-042711-105503

[26] Adam M. Dziewonski; Don L. Anderson. Preliminary reference Earth model. Physics of the Earth and Planetary Interiors 25, 297–356 (1981). DOI 10.1016/0031-9201(81)90046-7. https://doi.org/10.1016/0031-9201(81)90046-7

[27] D. C. Rubie et al. Accretion and differentiation of the terrestrial planets with implications for the compositions of early-formed Solar System bodies and accretion of water. Icarus 248, 89–108 (2015). DOI 10.1016/j.icarus.2014.10.015. https://doi.org/10.1016/j.icarus.2014.10.015

[28] Nicolas Dauphas. The isotopic nature of the Earth’s accreting material through time. Nature 541, 521–524 (2017). DOI 10.1038/nature20830. https://doi.org/10.1038/nature20830

[29] Bernard Marty. The origins and concentrations of water, carbon, nitrogen and noble gases on Earth. Earth and Planetary Science Letters 313–314, 56–66 (2012). DOI 10.1016/j.epsl.2011.10.040. https://doi.org/10.1016/j.epsl.2011.10.040

[30] Laurette Piani et al. Earth’s water may have been inherited from material similar to enstatite chondrite meteorites. Science 369, 1110–1113 (2020). DOI 10.1126/science.aba1948. https://doi.org/10.1126/science.aba1948

[31] K. Altwegg et al. 67P/Churyumov-Gerasimenko, a Jupiter family comet with a high D/H ratio. Science 347, 1261952 (2015). DOI 10.1126/science.1261952. https://doi.org/10.1126/science.1261952

[32] Richard J. Walker. Highly siderophile elements in the Earth, Moon and Mars: Update and implications for planetary accretion and differentiation. Chemie der Erde 69, 101–125 (2009). DOI 10.1016/j.chemer.2008.10.001. https://doi.org/10.1016/j.chemer.2008.10.001

[33] Seth A. Jacobson et al. Highly siderophile elements in Earth’s mantle as a clock for the Moon-forming impact. Nature 508, 84–87 (2014). DOI 10.1038/nature13172. https://doi.org/10.1038/nature13172

[34] Robin M. Canup; Erik Asphaug. Origin of the Moon in a giant impact near the end of the Earth's formation. Nature 412, 708–712 (2001). DOI 10.1038/35089010. https://doi.org/10.1038/35089010

[35] Robin M. Canup. Forming a Moon with an Earth-like Composition via a Giant Impact. Science 338, 1052–1055 (2012). DOI 10.1126/science.1226073. https://doi.org/10.1126/science.1226073

[36] Matija Ćuk; Sarah T. Stewart. Making the Moon from a Fast-Spinning Earth: A Giant Impact Followed by Resonant Despinning. Science 338, 1047–1052 (2012). DOI 10.1126/science.1225542. https://doi.org/10.1126/science.1225542

[37] Simon J. Lock et al. The Origin of the Moon Within a Terrestrial Synestia. Journal of Geophysical Research: Planets 123, 910–951 (2018). DOI 10.1002/2017JE005333. https://doi.org/10.1002/2017JE005333

[38] J. A. Kegerreis et al. Immediate Origin of the Moon as a Post-impact Satellite. Astrophysical Journal Letters 937, L40 (2022). DOI 10.3847/2041-8213/ac8d96. https://doi.org/10.3847/2041-8213/ac8d96

[39] Daniel Herwartz et al. Identification of the giant impactor Theia in lunar rocks. Science 344, 1146–1150 (2014). DOI 10.1126/science.1251117. https://doi.org/10.1126/science.1251117

[40] Edward D. Young et al. Oxygen isotopic evidence for vigorous mixing during the Moon-forming giant impact. Science 351, 493–496 (2016). DOI 10.1126/science.aad0525. https://doi.org/10.1126/science.aad0525

[41] Melanie Barboni et al. Early formation of the Moon 4.51 billion years ago. Science Advances 3, e1602365 (2017). DOI 10.1126/sciadv.1602365. https://doi.org/10.1126/sciadv.1602365

[42] C. M. O’D. Alexander et al. The Provenances of Asteroids, and Their Contributions to the Volatile Inventories of the Terrestrial Planets. Science 337, 721–723 (2012). DOI 10.1126/science.1223474. https://doi.org/10.1126/science.1223474

[43] Tomoki Nakamura et al. Itokawa Dust Particles: A Direct Link Between S-Type Asteroids and Ordinary Chondrites. Science 333, 1113–1116 (2011). DOI 10.1126/science.1207758. https://doi.org/10.1126/science.1207758

[44] David P. O'Brien; Alessandro Morbidelli; Harold F. Levison. Terrestrial planet formation with strong dynamical friction. Icarus 184, 39–58 (2006). DOI 10.1016/j.icarus.2006.04.005. https://doi.org/10.1016/j.icarus.2006.04.005

Cómo aprendimos a fechar el pasado

QTC-017 · 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

La datación radiométrica suele reducirse a un relato sencillo: los átomos radiactivos se desintegran a ritmos conocidos y el laboratorio lee la edad de una roca. El logro real es más exigente. Una fecha pertenece a un mineral, un sistema isotópico y un acontecimiento físico; depende de la composición inicial, el cierre, la calibración, el control de contaminación y una interpretación geológica comprobable. Este artículo sigue esa cadena desde la desintegración exponencial y la espectrometría de masas hasta las isocronas, la temperatura de cierre, la concordia U–Pb, los relojes de argón y radiocarbono y la metrología de las incertidumbres modernas. También explica por qué los resultados discordantes pueden conservar historia en vez de representar un fallo. La cronología más sólida no es un número espectacular, sino el acuerdo ganado entre relojes con sensibilidades distintas y supuestos e incertidumbres examinados por separado.

En 60 segundos

Un isótopo padre radiactivo se transforma en un isótopo hijo con una probabilidad característica. Eso proporciona un reloj, pero la química decide cuándo empieza: la cristalización, el enfriamiento, la erupción o el metamorfismo separan elementos y pueden cerrar un mineral al intercambio posterior. Medir las proporciones actuales exige después un espectrómetro de masas, correcciones de contaminación y fraccionamiento y un modelo para cualquier isótopo hijo presente al inicio. Las isocronas pueden resolver ese componente inicial, pero una línea recta no es automáticamente una edad. Los minerales pueden heredar dominios antiguos o perder productos hijos durante un calentamiento. La datación U–Pb es especialmente potente porque dos cadenas de uranio pueden comprobarse mutuamente; la concordancia refuerza una interpretación y la discordancia puede revelar pérdida de plomo. Otros relojes responden otras preguntas. El argón suele registrar enfriamiento o erupción. El carbono-14 sigue intercambios recientes de carbono y llega aproximadamente a 55.000 años, no a la formación planetaria. La precisión nace de laboratorios limpios, trazadores calibrados, patrones, propagación de incertidumbres y acuerdo entre laboratorios. Una fecha defendible nombra, por tanto, muestra, acontecimiento, reloj, modelo e incertidumbre.

Por qué importa esta pregunta

El tiempo profundo solo se volvió cuantitativo cuando la física, la química, la geología y la medición aprendieron a limitarse mutuamente. La distinción importa más allá de la geocronología. Un número puede ser extremadamente preciso y estar unido al acontecimiento equivocado; dos mediciones

pueden discrepar porque una roca conservó dos episodios; un contaminante diminuto puede dominar una muestra diminuta. La datación enseña una lección general sobre la evidencia: los instrumentos no eliminan la interpretación, pero una interpretación disciplinada hace visibles los supuestos, prueba modos de fallo y convierte el desacuerdo en información. Esos hábitos permiten a los artículos posteriores ordenar los cambios planetarios en vez de limitarse a narrarlos.

1. Una edad pertenece a un acontecimiento y a un sistema

La pregunta

Si un circón es más antiguo que la roca que lo rodea, ¿cuál es la edad de la roca? La pregunta revela la primera regla de la geocronología: los laboratorios miden sistemas isotópicos y la geología decide qué acontecimiento registraron.

La desintegración radiactiva es estocástica a escala de un núcleo, pero regular en una población grande. Rutherford y Soddy establecieron que la radiactividad representa una transformación atómica, y Boltwood conectó los productos del uranio con el tiempo geológico.[1,2] Si quedan N átomos padre, su abundancia esperada sigue una ley exponencial. La ley es el mecanismo del reloj; todavía no es la fecha.

Una semivida es el tiempo en el que se espera que se desintegre la mitad de una población grande del padre. Se relaciona con la constante de desintegración mediante $t_{1/2} = \ln(2)/\lambda$. Las semividas del uranio y las convenciones usadas en geocronología se han medido y normalizado con incertidumbres finitas.[4,6,7] Cambiar una constante modifica todas las edades absolutas calculadas que dependen de ella, aunque las proporciones isotópicas medidas sigan idénticas.

Esas proporciones proceden de la espectrometría de masas. El método de rayos positivos de Dempster separaba iones por su comportamiento de masa y carga; los instrumentos modernos cuentan o integran haces isotópicos con mucha mayor sensibilidad.[3,18,19] Sin embargo, la máquina no produce un acontecimiento. Se corrigen el fraccionamiento de masas, la respuesta del detector, el blanco del laboratorio y la contribución del trazador antes de traducir las proporciones en tiempo.

El resultado tiene, por tanto, sujeto y verbo: este mineral cristalizó, se enfrió, recristalizó o perdió un isótopo en un momento declarado. Una roca completa puede contener varios sujetos. Los modelos de cierre y la práctica U–Pb expresan la misma idea desde direcciones distintas: la edad se asigna a un acontecimiento registrado y se conecta después con el objeto mayor mediante evidencia geológica.[14,36]

Llamar a una roca «de cuatro mil millones de años» puede ser una abreviatura útil, pero solo después de identificar la fase y el acontecimiento fechados. La sencillez aparente de una fecha descansa sobre una cadena de definiciones. La pregunta siguiente es qué operación física inicia esa cadena y no solo permite que los átomos radiactivos sigan desintegrándose.

En qué punto estamos

La desintegración proporciona una relación matemática estable, pero ni la ecuación ni el instrumento eligen el acontecimiento. Esa elección empieza con la química: los elementos entran de modo distinto en los minerales, padre e hijo se separan y el intercambio posterior puede detenerse. Para entender cuándo empieza un reloj isotópico, debemos seguir la materia antes que la aritmética.

2. La desintegración da un reloj y la química lo pone en marcha

La cristalización separa elementos. El enfriamiento puede frenar la difusión hasta que un mineral los retiene; una erupción puede templar un fundido; el metamorfismo puede abrir un sistema antiguo y crear uno nuevo. Son posibles acontecimientos iniciales, no etiquetas intercambiables.[14,36,37] La desintegración radiactiva ocurrió antes y después. El intervalo fechado empieza cuando comienza la distribución química y el modelo de retención pertinentes.

Una muestra de mano puede combinar minerales formados en momentos distintos. El núcleo de un circón puede heredarse de corteza antigua, su borde crecer en un magma más joven y fluidos posteriores alterar dominios dañados.[10,11,36] Disolverlo todo junto puede promediar esas historias. Las imágenes y el análisis puntual pueden localizarlas, mientras la disolución total mide fracciones elegidas con precisión excepcional.

El isótopo hijo también puede estar presente al principio. Una isocrona puede estimar esa proporción inicial a partir de muestras relacionadas, mientras otros métodos restan un componente común o eligen minerales que excluyen en gran medida al hijo.[9,13] Los basaltos de Apollo 14 mostraron que el asunto no es contabilidad: las edades modelo de roca total no coincidían con las de cristalización cuando el plomo inicial tenía una historia más compleja.

A pequeña escala, el material del laboratorio se convierte en material geológico. Unos picogramos o femtogramos de plomo contaminante pueden importar junto a la señal de la muestra. La química de circones con baja contaminación, los estudios de reproducibilidad y la experiencia de Patterson muestran que salas, reactivos y recipientes forman parte del sistema de medición.[15,21,34] El reloj no termina en la puerta del espectrómetro.

La química pone en marcha el reloj y la contaminación puede reescribir su inventario inicial. Un método responde comparando varios materiales relacionados en vez de confiar en un único valor supuesto del hijo inicial. Esa salida gráfica —la isocrona— solo funciona si los materiales comparten de verdad la historia que afirma su línea.

En qué punto estamos

> *Una proporción padre–hijo solo tiene sentido dentro de una historia química. Los minerales pueden empezar juntos, heredar componentes antiguos o reabrirse después, y la contaminación puede añadir un inventario inicial artificial. Las isocronas se diseñaron para estimar un valor inicial oculto, pero su poder depende de exigir a una línea más que rectitud visual.*

3. El hijo inicial y la salida de la isocrona

La pregunta

> *Varios análisis caen sobre una hermosa línea recta y el programa informa de una pendiente precisa. ¿Es una edad? Solo si los puntos empezaron con la misma proporción del hijo, registran un acontecimiento y evitaron intercambios posteriores o mezclas engañosas.*

En una isocrona convencional, muestras o minerales relacionados se representan mediante proporciones isotópicas que normalizan padre e hijo respecto a un isótopo estable. Si empezaron con una proporción del hijo y permanecieron cerrados, la desintegración los desplaza hasta una

línea. Su pendiente contiene exp(λt) − 1 y, por tanto, la edad; su intersección estima el hijo inicial. [8,9] Un gráfico puede resolver dos incógnitas.

La geometría necesita palanca. Las muestras con proporciones padre–hijo casi idénticas se agrupan y limitan mal una pendiente. La regresión moderna debe tratar también la incertidumbre en ambos ejes y las correlaciones creadas por denominadores y correcciones comunes.[8,9] Un error estándar pequeño impreso no sustituye una dispersión composicional amplia y geológicamente justificada.

La mezcla también puede dibujar una línea. Materiales de dos extremos pueden alinearse aunque ningún intervalo único de desintegración los conecte, mientras un hijo inicial variable o un cierre diacrónico pueden crear una errorcrona.[9,13] La dispersión residual, la petrología, las relaciones de campo y la plausibilidad de un reservorio inicial compartido deciden si una pendiente merece llamarse edad.

La regresión con errores correlacionados de Derek York hizo más honesta la estadística; las aplicaciones actuales modelan además la sobredispersión en vez de obligar a cada punto a caber en errores analíticos.[8,9,19] La dispersión extra puede señalar incertidumbre subestimada, componentes heredados o tiempos de cierre realmente distintos. La respuesta correcta es exponer la variación adicional y probar explicaciones, no embellecer el error.

La isocrona elimina un supuesto al estimar una proporción inicial, pero añade una afirmación exigente sobre historia compartida. Incluso una línea válida fecha el acontecimiento que estableció o equilibró por última vez ese sistema. Para decidir si un calentamiento posterior lo conservó, difuminó o borró, la cronología debe convertirse en termocronología.

En qué punto estamos

Una isocrona puede convertir un componente hijo inicial desconocido en una intersección medida, pero no certifica su propia geología. Composición, covarianza e historia compartida deben cooperar. La capa siguiente es la retención física: los minerales no pasan simplemente de abiertos a cerrados a una temperatura universal, y una reapertura parcial puede conservar varios capítulos a la vez.

4. Los minerales se cierran, se reabren y recuerdan

Un mineral se enfría a través de un intervalo en el que la difusión se vuelve cada vez más lenta. Dodson mostró que una temperatura efectiva de cierre depende de parámetros de difusión, tamaño del grano, geometría y velocidad de enfriamiento.[14,37] No es, por tanto, una etiqueta permanente junto al nombre del mineral. Un grano pequeño enfriado deprisa y uno grande enfriado lentamente no tienen por qué retener el mismo acontecimiento a igual temperatura.

Un calentamiento posterior puede reabrir algunos dominios sin homogeneizar todo el cristal. La pérdida de plomo o argón, los perfiles de difusión y las zonas recristalizadas pueden dejar un análisis entre su edad original y la de reinicio.[10–12,14] El patrón puede parecer discordante porque la muestra no es un reloj fallido, sino varios relojes espaciales o químicos que responden de modo distinto a una historia térmica.

La herencia produce el problema de apariencia opuesta. Un cristal incorporado a un magma joven puede conservar un núcleo antiguo, de modo que una edad antigua numéricamente excelente sea correcta para el grano y equivocada para el emplazamiento de la roca.[10,36] Las imágenes, la

zonación, los elementos traza y el contexto de campo identifican qué dominios crecieron dónde. La precisión no decide por sí sola esa cuestión espacial.

La discordancia puede convertirse, en consecuencia, en termómetro y archivo histórico. Varios minerales con comportamientos de difusión distintos pueden acotar el enfriamiento; dominios de un circón pueden separar crecimiento y pérdida posterior de plomo. Las soluciones gráficas para edades U–Pb discordantes hicieron explícita esa inversión.[10–12,14] La interpretación sigue dependiendo del modelo, pero descartar todo análisis alterado eliminaría la propia alteración.

El cierre convierte una historia geológica en varios registros temporales superpuestos. La geocronología U–Pb aprovecha especialmente bien esta complejidad porque el uranio proporciona dos cadenas de desintegración en el mismo mineral. Su acuerdo puede certificar una historia sencilla; su desacuerdo puede revelar cuándo se reabrió el sistema.

En qué punto estamos

El cierre es una historia cinética, no un termómetro mineral fijo. El tamaño del grano, la velocidad de enfriamiento y el calor posterior determinan qué sobrevive, mientras la herencia puede conservar un acontecimiento anterior a la roca. La datación uranio–plomo convierte esas complicaciones en una prueba estructurada al reunir dos cadenas, plomo común y discordancia en un marco analítico.

5. El uranio–plomo convierte el desacuerdo en evidencia

La pregunta

Un isótopo de uranio se transforma en plomo-206 y otro en plomo-207. Cuando ambos relojes habitan el mismo circón, el acuerdo es más que repetición: comprueba si la historia medida del mineral es compatible con dos ritmos de desintegración distintos.

El uranio-238 se desintegra en plomo-206 y el uranio-235 en plomo-207 mediante cadenas separadas. Las mediciones isotópicas de Nier y los trabajos posteriores sobre semividas cuantificaron ambos relojes.[4–6,36] Como sus constantes difieren, un mineral puede proporcionar dos estimaciones de edad. El acuerdo sitúa el análisis sobre la concordia; el desacuerdo identifica una historia que exige explicación, no un promedio que la oculte.

El circón es especialmente útil porque su estructura cristalina acepta uranio e incorpora normalmente poco plomo inicial. También puede sobrevivir a meteorización y fusión que destruyen otros registros.[15,16,21,36] Pero el daño por radiación abre vías de pérdida de plomo, los núcleos heredados llevan edades antiguas y puede entrar plomo común. El circón es un archivo resistente, no una cápsula perfecta.

La concordia describe combinaciones de proporciones uranio–plomo que coinciden en una edad. Si una pérdida posterior de plomo desplaza los análisis, una línea discordia puede cortar la concordia cerca de los momentos de cristalización y alteración.[10–12,36] Esas intersecciones son resultados de un modelo: varios episodios de pérdida, herencia o dominios mezclados pueden imitar una línea sencilla. Las texturas y los residuos deben respaldar la historia elegida.

La técnica controla qué parte de esa historia resulta visible. La abrasión química elimina muchos dominios dañados por radiación y propensos a perder plomo antes de la espectrometría de masas por ionización térmica con dilución isotópica. ID-TIMS puede lograr precisión total extraordinaria; SIMS y LA-ICP-MS conservan resolución espacial y rendimiento.[16–21] Constantes de

desintegración, variación natural de 238U/235U, calibración del trazador y comportamiento de patrones todavía limitan exactitud y comparabilidad.

U–Pb es potente porque su redundancia hace comprobable la alteración, no porque sea inmune a ella. Sus compromisos muestran además por qué no existe un mejor reloj universal. Algunas preguntas exigen un mapa espacial; otras, la menor incertidumbre; y otras conciernen a elementos y temperaturas que el circón apenas registra.

En qué punto estamos

> *Dos relojes de uranio pueden revelar pérdida de plomo, mientras la química del circón y las decisiones determinan qué se mide. La concordancia se gana mediante acuerdo; la discordancia puede recuperar una alteración si el modelo está justificado. El mismo principio se extiende más allá de U–Pb: cada cronómetro une una ley de desintegración a elementos, materiales, temperaturas y acontecimientos.*

6. Relojes distintos responden preguntas distintas

El método 40Ar/39Ar irradia una muestra para que el potasio-39 produzca argón-39, indicador del potasio. Un monitor coirradiado establece el parámetro de irradiación y vincula la incógnita a un patrón.[22–25] El calentamiento escalonado puede separar argón liberado por distintos dominios. El resultado puede fechar erupción o enfriamiento, pero argón excesivo, retroceso, alteración y pérdida pueden crear mesetas o espectros engañosos.

Otros sistemas aprovechan químicas distintas. Las isocronas Rb–Sr pueden fechar diferenciación o equilibrio; Sm–Nd es relativamente resistente en muchos materiales máficos y conserva información del reservorio inicial. El reloj extinto 182Hf–182W alcanza la diferenciación metal–silicato temprana porque el wolframio sigue al metal con más fuerza que el hafnio.[26,27] Sus tiempos dependen de proporciones iniciales del Sistema Solar y de modelos de acreción y equilibrio.

El radiocarbono ocupa una escala completamente distinta. Los organismos vivos intercambian carbono con su entorno; cuando termina el intercambio, el carbono-14 disminuye. Libby, Anderson y Arnold establecieron el método y lo probaron con objetos de edad conocida.[28–32] Las curvas modernas atmosféricas y marinas llegan aproximadamente a 55.000 años de calendario, y los modelos bayesianos combinan mediciones con orden estratigráfico o arqueológico. Los desfases de reservorio y la contaminación siguen explícitos.

La semivida física del carbono-14 es de unos 5.730 años. Eso lo hace potente para restos orgánicos recientes y ciertos carbonatos, pero agotado para la edad de la Tierra. El reloj que fecha un mamut no es el que fecha un planeta.[30,31] Los isótopos longevos del uranio alcanzan miles de millones de años; el carbono-14 sigue intercambios recientes. El material y el acontecimiento eligen el reloj antes que la precisión deseada.

Un menú de relojes es, por tanto, una ventaja. Elementos y comportamientos de cierre distintos permiten separar cristalización, enfriamiento, erupción, alteración y evolución de reservorios. Pero combinarlos exige saber qué incertidumbres pertenecen a la muestra y cuáles a los patrones, constantes de desintegración e infraestructura de calibración compartidos.

En qué punto estamos

Argón, neodimio, wolframio y carbono no compiten por producir una edad genérica. Su química los hace sensibles a acontecimientos y escalas distintas. Esa diversidad permite comprobaciones cruzadas, pero también revela un problema metrológico: hay que construir la precisión y repartir la incertidumbre antes de comparar con honestidad dos números medidos exquisitamente.

7. La precisión se construye con blancos, patrones y calibración

La pregunta

Los meteoritos de Patterson contenían tan poco plomo que el aire, los reactivos y el polvo desbordaban la señal. Fechar la Tierra con exactitud exigió una invención inesperada: un entorno más limpio que el conocido por las muestras en la naturaleza.

El resultado isotópico de plomo de Patterson en 1956 dio 4,55 ± 0,07 mil millones de años para meteoritos y Tierra. No procedía de encontrar una roca terrestre superviviente marcada con el nacimiento del planeta. Relacionó composiciones de plomo meteórico y terrestre dentro de una historia común del Sistema Solar.[33,34] El número era potente porque medición, modelo de reservorio y contexto astronómico independiente trabajaban juntos.

Alcanzarlo exigió unos cinco años de química de plomo y espectrometría de masas a escalas de microgramos y submicrogramos. Salas polvorientas, reactivos y recipientes añadían más plomo del tolerable. Patterson desarrolló instalaciones excepcionalmente limpias en Caltech y ayudó a establecer prácticas después normales en análisis ultratraza.[34] El aparato incluía sala, aire, ácidos destilados, recipientes y hábitos de quienes trabajaban dentro.

El problema de contaminación abrió una segunda historia. Las mediciones destinadas a controlar el plomo geológico ayudaron a Patterson a distinguir el fondo natural del plomo industrial extendido por aire, océanos y personas.[34,35] No actuó solo, y la regulación fue gradual, disputada e institucional. El hilo causal importa: intentar medir con precisión el pasado remoto reveló una alteración planetaria del presente que nadie reconocía.

La metrología moderna formaliza la lección. Precisión describe mediciones repetidas; exactitud, proximidad al valor correcto; repetibilidad y reproducibilidad entre laboratorios hacen preguntas distintas. Calibración del trazador, constantes de desintegración, resta del blanco y covarianza aportan términos diferentes.[18–21,38] Una larga cadena de cifras puede describir el conteo y ocultar un límite de calibración compartido o un acontecimiento geológico equivocado.

Los laboratorios limpios y los trazadores calibrados no eliminan la interpretación; hacen una clase de alternativas lo bastante pequeña para probar las demás. Un presupuesto de incertidumbre creíble debe acompañar a la edad. La prueba final pasa entonces de un laboratorio: relojes y laboratorios independientes deben recuperar historias compatibles sin compartir todos los errores posibles.

En qué punto estamos

La edad de Patterson fue inseparable de una victoria sobre la contaminación, y esa victoria reveló plomo industrial fuera del laboratorio. La precisión moderna depende también de salas, reactivos, trazadores, constantes, covarianza y patrones compartidos. Cuando esos términos son visibles, el

acuerdo entre laboratorios y relojes distintos se vuelve evidencia, no coincidencia; y el desacuerdo, un experimento diagnóstico.

8. El acuerdo se gana entre relojes independientes

Dos relojes son más persuasivos cuando responden de modo distinto a una alteración y no heredan toda calibración de la misma fuente. Las comparaciones U–Pb y 40Ar/39Ar han revelado desfases sistemáticos, revisado patrones minerales y mejorado constantes de desintegración.[23–25,38–40] Sin embargo, el esquema de desintegración del 40K sigue calibrándose: una rama de captura electrónica al estado fundamental antes omitida y otros conjuntos de parámetros pueden desplazar edades absolutas a escala subporcentual. El acuerdo se gana mediante revisión visible, no declarando terminadas las constantes.

El desacuerdo puede localizar el proceso ausente. Un circón puede conservar cristalización mientras el argón de un feldespato registra enfriamiento; la pérdida de plomo puede sacar análisis U–Pb de la concordia; el argón excesivo puede hacer demasiado antiguo un mineral volcánico.[10,12,23,38] La primera tarea no es elegir un número favorito, sino preguntar si los relojes fecharon acontecimientos distintos o falló una calibración o un supuesto geológico.

La comparación entre laboratorios plantea la misma pregunta entre personas e instrumentos. Soluciones sintéticas compartidas prueban calibración analítica; circones naturales prueban una mezcla de rendimiento y heterogeneidad. Los resultados reproducibles de alta precisión exigen componentes explícitos de incertidumbre y convenciones de informe.[21,38] Un material de referencia perfecto para un método quizá no pruebe el sesgo espacial o químico pertinente para otro.

La declaración completa de una edad es, por tanto, más larga que su titular: un material nombrado registró un acontecimiento nombrado mediante un sistema isotópico nombrado, analizado con un procedimiento declarado e interpretado con supuestos e incertidumbre explícitos.[14,36,38] Esto no debilita el resultado. Explica qué lo hace transportable, corregible y capaz de limitar otras evidencias.

La geocronología no produjo un aparato universal que lee «el pasado». Construyó una familia de relojes cuyos desacuerdos pueden entenderse y cuyos acuerdos sobreviven pruebas independientes. QTC-018 empleará esas edades de acontecimientos concretos para reconstruir la superficie y el interior cambiantes de la Tierra; la frontera importa porque la cronología mide cuándo y la geología todavía establece qué ocurrió.

En qué punto estamos

Una fecha se vuelve duradera cuando su acontecimiento, sistema, calibración e incertidumbre permanecen visibles y la evidencia independiente puede cuestionarlos. El acuerdo entre relojes se gana al sobrevivir modos de fallo distintos; la discordancia puede revelar historia oculta. Con esa base metrológica, el artículo siguiente podrá preguntar cómo cambió la Tierra sin confundir la cronología con los propios cambios.

Lo que sabemos y cómo lo sabemos

- La desintegración radiactiva sigue una ley exponencial calibrada en grandes poblaciones atómicas, pero toda edad todavía exige una condición inicial y un modelo de acontecimiento.[1–7]
- Las isocronas pueden estimar el isótopo hijo inicial, pero deben probarse el origen cogenético, la palanca composicional, la covarianza y el cierre.[8,9,13,19]
- El cierre mineral depende de difusión, tamaño e historia de enfriamiento; el reinicio parcial y la herencia pueden conservar varios acontecimientos.[10–14]
- U–Pb combina dos cadenas, y la preparación, los trazadores, los patrones y las pruebas entre laboratorios sostienen una gran precisión.[15–21]
- Los relojes de argón, isótopos extintos y radiocarbono responden preguntas y escalas temporales distintas.[22–32]

Lo que todavía no sabemos

- El acontecimiento exacto representado por cada edad publicada cuando el contexto o la alteración posterior están incompletos.
- Cuánta heterogeneidad natural no resuelta permanece dentro de materiales de referencia muy utilizados.
- El mejor modelo de difusión y reinicio para cada mineral complejo y cada historia térmica.
- Cuánto moverán las futuras revisiones de constantes, trazadores y calibración cruzada las edades absolutas más precisas.
- Qué norma automática de informe conservará toda la procedencia analítica y geológica entre métodos.

Qué podría hacernos cambiar de opinión

- Constantes de desintegración revisadas o calibraciones trazables al SI que desplacen edades absolutas más allá de la incertidumbre actual.
- Comparaciones ciegas entre laboratorios que revelen desfases persistentes ocultos por los patrones actuales.
- Análisis espaciales que muestren dominios heredados o reiniciados dentro de una supuesta población de edad única.
- Desacuerdo entre relojes que persista tras probar por separado calibración, cierre y correlación de acontecimientos.
- Nuevos experimentos de difusión o contexto geológico que reasignen una edad desde cristalización a enfriamiento, alteración o mezcla.

Si solo recuerdas una cosa

La datación radiométrica no lee el cumpleaños de una roca. Mide un sistema isotópico, modela su inicio y alteraciones, calibra correcciones y gana la edad de un acontecimiento mediante contexto y acuerdo independiente.

Artículos relacionados

- QTC-007 — El tiempo profundo

- QTC-016 — Cómo se construye un planeta
- QTC-018 — El planeta que se mueve

Referencias

[1] E. Rutherford; Frederick Soddy. LXXXIV.—The radioactivity of thorium compounds. II. The cause and nature of radioactivity. Journal of the Chemical Society, Transactions 81, 837–860 (1902). DOI 10.1039/CT9028100837. https://doi.org/10.1039/CT9028100837

[2] B. B. Boltwood. Ultimate disintegration products of the radioactive elements; Part II, Disintegration products of uranium. American Journal of Science s4-23(134), 78–88 (1907). DOI 10.2475/ajs.s4-23.134.78. https://doi.org/10.2475/ajs.s4-23.134.78

[3] A. J. Dempster. A new Method of Positive Ray Analysis. Physical Review 11, 316–325 (1918). DOI 10.1103/PhysRev.11.316. https://doi.org/10.1103/PhysRev.11.316

[4] Alfred O. Nier. The Isotopic Constitution of Uranium and the Half-Lives of the Uranium Isotopes. I. Physical Review 55, 150–153 (1939). DOI 10.1103/PhysRev.55.150. https://doi.org/10.1103/PhysRev.55.150

[5] Alfred O. Nier. The Isotopic Constitution of Radiogenic Leads and the Measurement of Geological Time. II. Physical Review 55, 153–163 (1939). DOI 10.1103/PhysRev.55.153. https://doi.org/10.1103/PhysRev.55.153

[6] A. H. Jaffey; K. F. Flynn; L. E. Glendenin; W. C. Bentley; A. M. Essling. Precision Measurement of Half-Lives and Specific Activities of 235U and 238U. Physical Review C 4, 1889–1906 (1971). DOI 10.1103/PhysRevC.4.1889. https://doi.org/10.1103/PhysRevC.4.1889

[7] R. H. Steiger; E. Jäger. Subcommission on geochronology: Convention on the use of decay constants in geo- and cosmochronology. Earth and Planetary Science Letters 36, 359–362 (1977). DOI 10.1016/0012-821X(77)90060-7. https://doi.org/10.1016/0012-821X(77)90060-7

[8] Derek York. Least squares fitting of a straight line with correlated errors. Earth and Planetary Science Letters 5, 320–324 (1969). DOI 10.1016/S0012-821X(68)80059-7. https://doi.org/10.1016/S0012-821X(68)80059-7

[9] Pieter Vermeesch. Errorchrons and anchored isochrons in IsoplotR. Geochronology 6, 397–407 (2024). DOI 10.5194/gchron-6-397-2024. https://doi.org/10.5194/gchron-6-397-2024

[10] L. O. Nicolaysen. Graphic Interpretation of Discordant Age Measurements on Metamorphic Rocks. Annals of the New York Academy of Sciences 91(2), 198–206 (1961). DOI 10.1111/j.1749-6632.1961.tb35452.x. https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.1961.tb35452.x

[11] L. R. Stieff; T. W. Stern. Graphic and algebraic solutions of the discordant lead-uranium age problem. Geochimica et Cosmochimica Acta 22, 176–199 (1961). DOI 10.1016/0016-7037(61)90116-8. https://doi.org/10.1016/0016-7037(61)90116-8

[12] George W. Wetherill. Discordant uranium-lead ages, I. Transactions, American Geophysical Union 37, 320–326 (1956). DOI 10.1029/TR037i003p00320. https://doi.org/10.1029/TR037i003p00320

[13] Fouad Tera; G. J. Wasserburg. U-Th-Pb systematics in three Apollo 14 basalts and the problem of initial Pb in lunar rocks. Earth and Planetary Science Letters 14, 281–304 (1972). DOI 10.1016/0012-821X(72)90128-8. https://doi.org/10.1016/0012-821X(72)90128-8

[14] Martin H. Dodson. Closure temperature in cooling geochronological and petrological systems. Contributions to Mineralogy and Petrology 40, 259–274 (1973). DOI 10.1007/BF00373790. https://doi.org/10.1007/BF00373790

[15] T. E. Krogh. A low-contamination method for hydrothermal decomposition of zircon and extraction of U and Pb for isotopic age determinations. Geochimica et Cosmochimica Acta 37, 485–494 (1973). DOI 10.1016/0016-7037(73)90213-5. https://doi.org/10.1016/0016-7037(73)90213-5

[16] James M. Mattinson. Zircon U–Pb chemical abrasion (“CA-TIMS”) method: Combined annealing and multi-step partial dissolution analysis for improved precision and accuracy of zircon ages. Chemical Geology 220, 47–66 (2005). DOI 10.1016/j.chemgeo.2005.03.011. https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2005.03.011

[17] Joe Hiess; Daniel J. Condon; Noah McLean; Stephen R. Noble. 238U/235U Systematics in Terrestrial Uranium-Bearing Minerals. Science 335, 1610–1614 (2012). DOI 10.1126/science.1215507. https://doi.org/10.1126/science.1215507

[18] D. J. Condon; B. Schoene; N. M. McLean; S. A. Bowring; R. R. Parrish. Metrology and traceability of U–Pb isotope dilution geochronology (EARTHTIME Tracer Calibration Part I). Geochimica et Cosmochimica Acta 164, 464–480 (2015). DOI 10.1016/j.gca.2015.05.026. https://doi.org/10.1016/j.gca.2015.05.026

[19] N. M. McLean; J. F. Bowring; S. A. Bowring. An algorithm for U-Pb isotope dilution data reduction and uncertainty propagation. Geochemistry, Geophysics, Geosystems 12, Q0AA18 (2011). DOI 10.1029/2010GC003478. https://doi.org/10.1029/2010GC003478

[20] Matthew S. A. Horstwood et al. Community-Derived Standards for LA-ICP-MS U-(Th-)Pb Geochronology—Uncertainty Propagation, Age Interpretation and Data Reporting. Geostandards and Geoanalytical Research 40, 311–332 (2016). DOI 10.1111/j.1751-908X.2016.00379.x. https://doi.org/10.1111/j.1751-908X.2016.00379.x

[21] Urs Schaltegger et al. Long-term repeatability and interlaboratory reproducibility of high-precision ID-TIMS U–Pb geochronology. Journal of Analytical Atomic Spectrometry 36, 1466–1477 (2021). DOI 10.1039/D1JA00116G. https://doi.org/10.1039/D1JA00116G

[22] Craig Merrihue; Grenville Turner. Potassium-argon dating by activation with fast neutrons. Journal of Geophysical Research 71, 2852–2857 (1966). DOI 10.1029/JZ071i011p02852. https://doi.org/10.1029/JZ071i011p02852

[23] Kyoungwon Min; Roland Mundil; Paul R. Renne; Kenneth R. Ludwig. A test for systematic errors in 40Ar/39Ar geochronology through comparison with U/Pb analysis of a 1.1-Ga rhyolite. Geochimica et Cosmochimica Acta 64, 73–98 (2000). DOI 10.1016/S0016-7037(99)00204-5. https://doi.org/10.1016/S0016-7037(99)00204-5

[24] Paul R. Renne; Roland Mundil; Greg Balco; Kyoungwon Min; Kenneth R. Ludwig. Joint determination of 40K decay constants and 40Ar∗/40K for the Fish Canyon sanidine standard, and

improved accuracy for 40Ar/39Ar geochronology. Geochimica et Cosmochimica Acta 74, 5349–5367 (2010). DOI 10.1016/j.gca.2010.06.017. https://doi.org/10.1016/j.gca.2010.06.017

[25] K. F. Kuiper; A. Deino; F. J. Hilgen; W. Krijgsman; P. R. Renne; J. R. Wijbrans. Synchronizing Rock Clocks of Earth History. Science 320, 500–504 (2008). DOI 10.1126/science.1154339. https://doi.org/10.1126/science.1154339

[26] G. W. Lugmair; K. Marti. Lunar initial 143Nd/144Nd: Differential evolution of the lunar crust and mantle. Earth and Planetary Science Letters 39, 349–357 (1978). DOI 10.1016/0012-821X(78)90021-3. https://doi.org/10.1016/0012-821X(78)90021-3

[27] Thorsten Kleine et al. Hf–W chronology of the accretion and early evolution of asteroids and terrestrial planets. Geochimica et Cosmochimica Acta 73, 5150–5188 (2009). DOI 10.1016/j.gca.2008.11.047. https://doi.org/10.1016/j.gca.2008.11.047

[28] W. F. Libby; E. C. Anderson; J. R. Arnold. Age Determination by Radiocarbon Content: World-Wide Assay of Natural Radiocarbon. Science 109, 227–228 (1949). DOI 10.1126/science.109.2827.227. https://doi.org/10.1126/science.109.2827.227

[29] J. R. Arnold; W. F. Libby. Age Determinations by Radiocarbon Content: Checks with Samples of Known Age. Science 110, 678–680 (1949). DOI 10.1126/science.110.2869.678. https://doi.org/10.1126/science.110.2869.678

[30] Paula J. Reimer et al. The IntCal20 Northern Hemisphere Radiocarbon Age Calibration Curve (0–55 cal kBP). Radiocarbon 62, 725–757 (2020). DOI 10.1017/RDC.2020.41. https://doi.org/10.1017/RDC.2020.41

[31] Timothy J. Heaton et al. Marine20—The Marine Radiocarbon Age Calibration Curve (0–55,000 cal BP). Radiocarbon 62, 779–820 (2020). DOI 10.1017/RDC.2020.68. https://doi.org/10.1017/RDC.2020.68

[32] Christopher Bronk Ramsey. Bayesian Analysis of Radiocarbon Dates. Radiocarbon 51, 337–360 (2009). DOI 10.1017/S0033822200033865. https://doi.org/10.1017/S0033822200033865

[33] Clair C. Patterson. Age of meteorites and the earth. Geochimica et Cosmochimica Acta 10, 230–237 (1956). DOI 10.1016/0016-7037(56)90036-9. https://doi.org/10.1016/0016-7037(56)90036-9

[34] George R. Tilton. Clair Cameron Patterson, 1922–1995. Biographical Memoirs, volume 74, National Academy of Sciences, 224–245 (1998). https://www.nasonline.org/wp-content/uploads/2024/06/patterson-clair-c.pdf

[35] Clair C. Patterson. Contaminated and Natural Lead Environments of Man. Archives of Environmental Health 11(3), 344–360 (1965). DOI 10.1080/00039896.1965.10664229. https://doi.org/10.1080/00039896.1965.10664229

[36] Blair Schoene. U–Th–Pb Geochronology. Treatise on Geochemistry, 2nd ed., volume 4, 341–378 (2014). DOI 10.1016/B978-0-08-095975-7.00310-7. https://doi.org/10.1016/B978-0-08-095975-7.00310-7

[37] Ian McDougall; T. Mark Harrison. Geochronology and Thermochronology by the 40Ar/39Ar Method. 2nd edition, Oxford University Press (1999). https://global.oup.com/academic/product/geochronology-and-thermochronology-by-the-40ar39ar-method-9780195109207

[38] M. D. Schmitz; K. F. Kuiper. High-Precision Geochronology. Elements 9(1), 25–30 (2013). DOI 10.2113/gselements.9.1.25. https://doi.org/10.2113/gselements.9.1.25

[39] Jack Carter; Ryan B. Ickert; Darren F. Mark; Marissa M. Tremblay; Alan J. Cresswell; David C. W. Sanderson. Production of 40Ar by an overlooked mode of 40K decay with implications for K-Ar geochronology. Geochronology 2, 355–365 (2020). DOI 10.5194/gchron-2-355-2020. https://doi.org/10.5194/gchron-2-355-2020

[40] Jack N. Carter; Caroline E. J. Hasler; Anthony J. Fuentes; Andrew J. Tholt; Leah E. Morgan; Paul R. Renne. Bayesian calibration of the 40K decay scheme with implications for 40K-based geochronology. Geochimica et Cosmochimica Acta 397, 149–163 (2025). DOI 10.1016/j.gca.2025.03.024. https://doi.org/10.1016/j.gca.2025.03.024

El planeta que se mueve

QTC-018 · 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

La tectónica de placas suele contarse como un triunfo retrasado: Alfred Wegener advirtió que los continentes encajaban, los geólogos se negaron a creerle y el fondo oceánico terminó dándole la razón. La historia real es más sólida. Wegener combinó fósiles, rocas y clima antiguo, pero las fuerzas que propuso eran inadecuadas y la evidencia decisiva aún no se había medido. La ecosonda, los mapas de Marie Tharp, la localización de terremotos, las inversiones magnéticas y las franjas del fondo marino transformaron una semejanza sugerente en un mecanismo global comprobable. Las fallas transformantes, los terremotos profundos y el movimiento de placas sobre una esfera cerraron después la geometría, mientras la geodesia espacial volvió directamente medible el movimiento actual. Este artículo sigue esa cadena y muestra por qué la resistencia científica puede ser razonable hasta que una nueva clase de observación vuelve contestable una pregunta antigua.

En 60 segundos

Los continentes se mueven, pero sus contornos solo iniciaron el caso. Wegener unió el encaje con fósiles hallados en tierras separadas, rocas y cordilleras correlacionables y huellas glaciares que se volvían coherentes al reunir los continentes australes. Los críticos tenían, sin embargo, una objeción seria: sus fuerzas de marea y centrífugas no podían impulsar continentes a través de la corteza oceánica. La evidencia ausente estaba bajo el mar. La ecosonda reveló un sistema global de dorsales y fosas; Marie Tharp cartografió una grieta en la dorsal mesoatlántica; los estudios magnéticos encontraron bandas alternas. Vine y Matthews vincularon esas franjas con la expansión del fondo y las inversiones repetidas del campo magnético, mientras Morley había llegado de forma independiente a la misma idea. Los terremotos de fallas transformantes se comportaron como predecía la geometría de Wilson. Zonas sísmicas profundas trazaron placas que descendían en las fosas y cerraban el circuito al reciclar litosfera oceánica. McKenzie, Parker, Morgan y Le Pichon convirtieron el patrón en rotaciones de placas casi rígidas sobre una esfera. Hoy el GPS mide milímetros o centímetros por año, y las zonas fronterizas anchas recuerdan que la rigidez sigue siendo una aproximación.

Por qué importa esta pregunta

La tectónica de placas es más que una teoría sobre continentes móviles. Es un ejemplo de cómo cambia una disciplina cuando nuevas mediciones conectan observaciones antes separadas. Fósiles, mapas, sondeos desde barcos, magnetómetros y sismogramas no repetían lo mismo; sus distintos modos de fallo hicieron poderosa la convergencia. La historia también corrige dos mitos fáciles: una

idea inicialmente rechazada no es correcta por ese motivo, y una afirmación acertada a gran escala no tiene por qué llegar con un mecanismo viable. Entender esa diferencia prepara el artículo siguiente, donde el movimiento de placas se convierte en parte de la regulación química y climática de la Tierra a largo plazo.

1. Los continentes encajan, pero la forma no era una prueba

La pregunta

Si África y Sudamérica parecen haber estado unidas, ¿por qué no bastaba? Porque las costas cambian, existen semejanzas fortuitas y la geometría por sí sola no dice cuándo ocurrió la separación ni qué proceso físico pudo mover un continente.

Los márgenes del Atlántico invitan al ojo a cerrar el océano. Wegener utilizó esa complementariedad, pero el conocido rompecabezas escolar puede deformar su argumento. Las costas modernas migran con el nivel del mar, la erosión y la sedimentación; una coincidencia visual es una pista, no una medición. El artículo de 1912 y el libro de 1915 situaron la forma dentro de un caso más amplio.[1,2] Medio siglo después, Bullard, Everett y Smith ajustaron márgenes continentales mediante ordenador e hicieron la geometría lo bastante explícita para probarla.[38]

Wegener no partió de un destello aislado de semejanza. Reunió observaciones de geografía, paleontología, estratigrafía, geología estructural y paleoclima.[1,2] Buscaba fuerza en la convergencia: una reconstrucción debía explicar por qué varios patrones independientes terminaban en los océanos actuales y continuaban en otro continente. Algunas observaciones eran imperfectas, pero el método ya era reconociblemente científico: devolver los continentes a posiciones anteriores y preguntar si mejoraban a la vez evidencias no relacionadas.

La movilidad continental tampoco fue una invención intacta de un solo hombre. Frank B. Taylor publicó en 1910 un modelo de grandes desplazamientos laterales y lo conectó con cordilleras jóvenes.[3] Sus fuerzas, rutas y reconstrucción diferían de las de Wegener. La distinción importa: Taylor merece un lugar en la prehistoria de la deriva, mientras el logro de Wegener fue una síntesis sostenida e internacional, desarrollada en ediciones posteriores. La prioridad histórica pertenece a ideas concretas, no a un trofeo indivisible.[7]

El ajuste cuantitativo mostró después tanto el poder como el límite del contorno. El grupo de Bullard eligió un límite próximo al talud continental, no la playa moderna, y resolvió las rotaciones que cerraban el Atlántico.[38] El encaje era estrecho, no perfecto. El rifting estiró y fragmentó márgenes, se acumuló sedimento y el contorno elegido afectó al resultado. Eso convirtió una imagen en ciencia: la reconstrucción declaraba decisiones, errores residuales y parámetros que otras evidencias podían cuestionar.

La deriva continental tampoco era todavía tectónica de placas. Afirmaba que los continentes habían cambiado drásticamente de posición. La tectónica añadiría litosfera oceánica recién creada, límites de consumo, fallas transformantes y movimiento sobre una esfera.[24–26] Algunas propuestas tempranas anticiparon partes de ese marco, pero ninguna contenía toda su geometría y evidencia. La primera tarea es, por tanto, más estrecha: determinar si los continentes estuvieron unidos antes de preguntar cómo se mueve una envoltura planetaria completa.

En qué punto estamos

Los contornos continentales abrieron una pregunta, pero no podían cerrarla. El caso de Wegener se volvió serio porque la misma reconstrucción debía mejorar varios patrones a la vez y porque ajustes posteriores hicieron auditable su geometría. La siguiente capa de evidencia no era otro borde cartográfico: era la historia transportada por organismos, rocas y climas antiguos.

2. Fósiles, rocas y clima convirtieron el patrón en historia

Los fósiles pueden unir tierras con más fuerza que una costa. Mesosaurus, un pequeño reptil acuático, aparece en rocas pérmicas del sur de África y Sudamérica; conjuntos terrestres relacionados también atraviesan los actuales océanos australes.[1,2,4] La afirmación no es que los organismos nunca se dispersen. Es que varios seres de agua dulce o terrestres, en rocas de edad compatible, exigirían rutas cada vez más artificiosas si los continentes siempre hubieran ocupado sus posiciones modernas.

Glossopteris aportó una versión botánica. Los fósiles de este helecho con semilla y de su flora asociada aparecen en Sudamérica, África, India, Antártida y Australia.[2,4] Reunidos como Gondwana, esos lugares forman una región biogeográfica conectada, no islas separadas por océanos inmensos. Un mapa fósil no calcula un polo de Euler, pero limita qué tierras pudieron compartir ambientes y vías de paso en un momento concreto.

La geología añadió líneas que continuaban bajo el agua. Secuencias rocosas, provincias minerales y cinturones montañosos deformados de un margen atlántico podían emparejarse con edades y estructuras compatibles del otro.[1,2,4] La palabra importante es compatibles. El granito de aspecto parecido abunda; una correlación defendible combina edad, orden estratigráfico, historia estructural y procedencia. Cuando varios hilos geológicos independientes vuelven a unirse en una restauración, la forma se convierte en historia, no en silueta.

El clima antiguo invirtió otro aparente absurdo. Depósitos glaciares permo-carboníferos aparecen en continentes australes hoy separados por océanos cálidos, y los indicadores del movimiento del hielo parecían incoherentes en el mapa moderno. Restaurar Gondwana organizaba los depósitos alrededor de un centro glaciar plausible y daba sentido a los flujos.[1,2,4] Carbones, evaporitas y otras rocas sensibles al clima también limitaban la latitud antigua. Se movieron los continentes; las franjas climáticas no necesitaban migraciones imposibles.

Alexander du Toit profundizó este caso austral mediante comparaciones de campo entre África y Sudamérica.[4] Su síntesis de 1937 conservaba ideas rechazadas por la geología moderna, pero sus correlaciones detalladas dificultaban reducir la movilidad a un truco cartográfico europeo. Importa esta historia distribuida: Wegener organizó un programa, Taylor anticipó el movimiento, du Toit amplió el apoyo geológico y mediciones posteriores decidirían qué partes sobrevivían.[7]

En qué punto estamos

Fósiles, estratos, cordilleras y huellas glaciares hicieron que una geografía anterior explicara muchas observaciones. Sin embargo, ese alcance no aportaba la física ausente. Una reconstrucción podía ser históricamente persuasiva y mecánicamente incompleta a la vez. Esa brecha explica por qué científicos serios resistieron la deriva y por qué una objeción plausible no debe reescribirse después como ignorancia.

3. Las objeciones eran científicas

La pregunta

> *Supongamos que los continentes sí se habían movido. Wegener todavía debía explicar cómo recorrió la roca miles de kilómetros sin una fuerza suficiente ni un sistema oceánico cartografiado. Una reconstrucción correcta podía seguir siendo una teoría física incompleta.*

Wegener invocó efectos de fuga de los polos debidos a la rotación terrestre y un arrastre mareal hacia el oeste. Las fuerzas disponibles eran demasiado débiles, sobre todo si los continentes debían abrirse paso por una corteza oceánica resistente.[2,6,7] No faltaba un coeficiente menor. La propuesta observacional quedó unida a un modelo material que los geofísicos podían probar y rechazar. La tectónica posterior no rescató esas fuerzas; cambió qué se movía y cómo los límites acomodaban el movimiento.

Harold Jeffreys dio una forma formidable a la objeción mecánica. Sus modelos de la Tierra trataban cuantitativamente el interior sólido y la resistencia cortical, y sostenían que los agentes propuestos no podían mantener el desplazamiento de Wegener.[6] Algunos supuestos cambiarían, pero Jeffreys no rechazaba sin más un hecho visible en un mapa escolar. Preguntaba si el movimiento obedecía la física disponible, cortesía que la historia debe conservar aunque cambiara la conclusión.[7]

Arthur Holmes ofreció una salida. En una conferencia de 1928 publicada en 1931 describió una convección lenta generada por calentamiento radiactivo diferencial y dibujó flujo ascendente, movimiento lateral y corrientes de retorno.[5] La idea anticipaba elementos importantes, pero no demostraba que esa circulación existiera a la escala necesaria. Sin dorsales cartografiadas, corteza oceánica joven, franjas magnéticas ni placas descendentes, la convección seguía siendo una hipótesis física sugerente, no un sistema tectónico completo.

La recepción también varió entre disciplinas y países. Paleontólogos, estratígrafos, geodestas y geofísicos no pesaban igual las mismas observaciones; la geología estadounidense, en particular, solía exigir modelos causales y evidencia de campo local.[7] Instituciones y autoridad también importaban. Decir que las objeciones eran científicas no vuelve justa toda desestimación. Significa que el éxito actual no puede usarse retroactivamente para afirmar que la propuesta incompleta de ayer ya merecía asentimiento incondicional.

La asimetría de la evidencia disponible fue decisiva. Los continentes exponían fósiles, estructuras y depósitos glaciares al trabajo de campo, mientras la mayoría de las cuencas oceánicas estaba oculta bajo kilómetros de agua y solo se conocía por sondeos dispersos.[8–10] El registro capaz de distinguir fondos inmóviles de placas móviles era casi inaccesible. El debate cambió cuando los instrumentos revelaron esos dos tercios ausentes de la superficie sólida como un mundo pautado, sísmico y magnetizado.

En qué punto estamos

> *El debate antiguo estaba indeterminado porque el movimiento propuesto carecía de mecánica suficiente y el registro oceánico permanecía casi invisible. Holmes aportó un posible motor, no el mapa ausente. Cuando ecosondas y catálogos sísmicos revelaron dorsales, valles y cinturones globales de terremotos, el argumento obtuvo una clase de evidencia nueva, no una repetición más ruidosa de la anterior.*

4. El fondo oceánico reveló un planeta nuevo

La ecosonda continua sustituyó las profundidades aisladas obtenidas con escandallo por perfiles registrados a lo largo de la ruta de un barco. Los recorridos repetidos revelaron llanuras abisales, dorsales inmensas, fosas profundas y zonas de fractura.[8–10] El fondo oceánico no era un recipiente liso y pasivo para detritos continentales. Tenía topografía organizada a escala planetaria. Como las rutas aún eran escasas, cartografiar exigía interpolación disciplinada: el mapa era a la vez producto empírico y modelo explícito de los huecos.

Marie Tharp convirtió decenas de miles de sondeos en perfiles comparables del Atlántico Norte. Una muesca persistente en forma de V en la cresta sugería un valle de rift. En su relato de 1999, Bruce Heezen rechazó al principio la interpretación como «charla de chicas» porque recordaba a la herética deriva.[8] Tharp redibujó, comparó y siguió. El episodio no es biografía decorativa: quién podía interpretar los datos afectó a la rapidez con la que el rasgo se volvió una afirmación geológica admisible.

Los mapas de terremotos ayudaron a que la interpretación sobreviviera. Cuando los epicentros trazados a la misma escala cayeron a lo largo del valle axial, Heezen aceptó la correlación y ambos siguieron un sistema conectado de dorsales.[8] La obra de 1959 de Heezen, Tharp y Maurice Ewing publicó perfiles y un mapa fisiográfico del Atlántico Norte.[9] Tripulaciones, constructores de instrumentos, delineantes e intérpretes entraron en esa imagen, aunque crédito y autoridad no se repartieran por igual.

Las dorsales se conectaban entre océanos; fosas y cinturones sísmicos marcaban otros límites. Exploraciones anteriores del Atlántico medio ya habían mostrado una dorsal estructuralmente compleja, pero la síntesis posterior hizo visible un patrón global.[9,10] La sismicidad establecía actividad, todavía no la dirección del movimiento. El avance decisivo fue conceptual: el propio fondo marino poseía ahora historia y geometría capaces de probar si emergía material nuevo, se desplazaba lateralmente y desaparecía en otro lugar.

Dos propuestas influyentes ocuparon esa abertura. Robert Dietz publicó la «expansión del fondo marino» en 1961; la «Historia de las cuencas oceánicas» de Harry Hess, de 1962, describió corteza formada en dorsales y consumida cerca de fosas, y llamó «geopoesía» al ensayo especulativo.[14,15] Sus detalles diferían y las ideas previas sobre convección importaban. La historia responsable es distribuida: la batimetría planteó el mecanismo, la expansión lo hizo imaginable y otro instrumento lo volvería predictivo.

En qué punto estamos

> *La batimetría y los terremotos transformaron el fondo marino de espacio vacío en sistema global activo. Dietz y Hess propusieron que las dorsales fabrican corteza y las fosas la eliminan, pero una circulación plausible aún no era una tasa ni una secuencia medidas. Los magnetómetros aportaron la siguiente prueba al encontrar un registro escrito continuamente en el propio basalto nuevo.*

5. Las franjas magnéticas hicieron comprobable la expansión

La pregunta

> *Si el basalto se forma en una dorsal y se aleja mientras el campo magnético terrestre se invierte repetidamente, el fondo debe conservar bandas alternas de polaridad, emparejadas a ambos lados. Una historia de expansión podría calcularse a partir del patrón magnético.*

Magnetómetros remolcados frente al oeste de Norteamérica encontraron bandas regionales notablemente rectas de anomalías positivas y negativas. Mason y Raff informaron de que la topografía no explicaba el patrón y de que grandes fallas lo desplazaban.[13] Lawrence Morley, formado en interpretación aeromagnética, reconoció que las bandas debían implicar magnetización remanente.[21] El estudio había producido un código antes de que existiera una clave aceptada.

La clave exigía un segundo registro en tierra. Las lavas adquieren magnetización termorremanente cuando los minerales con hierro se enfrían a través de temperaturas críticas. Allan Cox, Richard Doell y Brent Dalrymple utilizaron rocas volcánicas fechadas radiométricamente para mostrar que el campo terrestre había invertido repetidamente su polaridad.[17] La primera escala era corta e imperfecta, pero convirtió la magnetización normal e inversa de molestia en secuencia cronológica que un fondo oceánico creciente podía copiar.[20]

En 1963 Frederick Vine y Drummond Matthews unieron las piezas. El basalto nuevo de una dorsal se enfriaría con la polaridad vigente, se alejaría y sería seguido por basalto magnetizado tras la siguiente inversión.[16] La expansión a ambos lados predecía franjas aproximadamente simétricas cuyo ancho combinaba intervalo temporal y velocidad. La idea era arriesgada porque expansión, inversiones repetidas y remanencia duradera seguían discutidas. Su unión hizo que cada una probara a las demás.[20]

Lawrence Morley había llegado de forma independiente a la misma explicación en diciembre de 1962. Su relato posterior registra un envío a Nature rechazado por falta de espacio y un árbitro de Journal of Geophysical Research que consideró la idea impropia de una publicación seria.[21] Vine y Matthews publicaron primero; la ruta independiente de Morley forma parte del descubrimiento. El episodio advierte contra confundir prioridad de publicación, prioridad conceptual y reconocimiento posterior, o tomar el rechazo como prueba de falsedad o genialidad.

Vine y Wilson emparejaron anomalías de la joven dorsal de Juan de Fuca con la secuencia de inversiones, y Heirtzler y sus colegas extendieron perfiles calibrados por fondos más antiguos.[18,19] Escalas posteriores revisaron edades y velocidades.[36] Globalmente, la corteza oceánica superviviente suele envejecer al alejarse de dorsales activas y casi toda tiene menos de unos 200 millones de años.[32] Las franjas pueden ser asimétricas, interrumpidas o desplazadas; esas desviaciones registran historia tectónica, no borran la expansión.

En qué punto estamos

> *Las franjas magnéticas convirtieron la expansión en reloj retrodictivo: un mecanismo predecía orden, simetría y velocidad, mientras escalas revisadas mejoraban el cálculo. Sin embargo, medían sobre todo movimiento perpendicular a dorsales. Para construir una envoltura móvil completa aún hacían falta límites laterales que desplazaran dorsales y una geometría capaz de enlazar todas las direcciones sobre una esfera.*

6. Las fallas transformantes y los terremotos hicieron cinemáticas las placas

Los desplazamientos de una dorsal parecen al principio fallas de desgarre ordinarias que continúan indefinidamente. El modelo transformante de J. Tuzo Wilson de 1965 invirtió la lógica esperada.[22] Solo el segmento entre dos ejes debía acomodar movimiento relativo activo; más allá, las huellas coincidentes de la zona de fractura viajan juntas en la misma placa. Esa distinción geométrica predecía dónde habría terremotos y en qué sentido deslizarían ambos lados.

Lynn Sykes probó la predicción con localizaciones y mecanismos focales. Los terremotos de dorsales eran someros, las transformantes los concentraban entre segmentos y el sentido inferido concordaba con la geometría de expansión.[23] Un rasgo cartográfico se había vuelto un pronóstico sísmico arriesgado. El éxito mostró también por qué importan los mecanismos: el epicentro dice dónde empezó la ruptura, mientras el patrón de radiación limita la dirección del fallamiento.

Dan McKenzie y Robert Parker trataron después el movimiento sobre la forma que importa: una esfera. Una placa aproximadamente rígida puede moverse mediante una rotación alrededor de un polo de Euler, de modo que velocidades en puntos distintos quedan vinculadas.[24] Su ejemplo del Pacífico Norte convirtió desplazamientos locales y vectores de deslizamiento en un solo objeto cinemático. La tectónica contenía ya un cálculo que podía fallar si las observaciones fronterizas no compartían una rotación.

Jason Morgan desarrolló la descripción rotacional para grandes bloques corticales, y Xavier Le Pichon reunió direcciones y velocidades de expansión en un modelo global coherente de seis placas.[25,26] Seis no era el inventario final de la naturaleza; era la partición mínima apoyada por los datos. El logro fue cerrar circuitos. Dorsales, transformantes y márgenes convergentes debían concordar alrededor del planeta, no funcionar solo como relatos regionales separados.

Los mapas modernos conservan interiores rígidos donde funciona la aproximación y ensanchan los límites donde la deformación está distribuida.[29,34] Zonas de colisión, microplacas y fallas heredadas impiden que todo límite sea una línea fina. Terremotos y volcanes trazan gran parte de la red, pero puntos calientes y sucesos intraplaca son excepciones reales.[27,30] La rigidez es poderosa porque vincula observaciones lejanas, no porque la litosfera sea literalmente indeformable.

En qué punto estamos

> *Los terremotos transformantes aportaron pruebas direccionales y las rotaciones esféricas hicieron que límites separados respondieran a un modelo cinemático global. La red superficial podía moverse sin destruir su geometría. Quedaba un gran balance: si las dorsales creaban continuamente litosfera oceánica, algún límite debía consumirla. Terremotos profundos bajo las fosas revelaron dónde entraba la ruta de retorno al planeta.*

7. La subducción cerró el circuito global

La pregunta

> *La corteza nueva de las dorsales no puede acumularse para siempre en un planeta de tamaño casi constante. ¿Adónde va? Bajo las fosas, los terremotos descienden por planos inclinados cientos de kilómetros hacia el manto y marcan la mitad oculta del circuito.*

Kiyoo Wadati cartografió terremotos intermedios y profundos bajo Japón en los años treinta, incluidas zonas inclinadas donde la profundidad aumentaba hacia tierra.[11] Hugo Benioff relacionó después zonas sísmicas inclinadas con grandes fallas próximas a fosas oceánicas.[12] Sus observaciones precedieron el concepto moderno de una placa litosférica descendente. Llamarlas zonas de Wadati–Benioff conserva esa cronología: la geometría existía en los datos antes de que la tectónica aportara su interpretación exitosa.

En 1968 Bryan Isacks, Jack Oliver y Lynn Sykes integraron esos planos sísmicos en la nueva tectónica global. Los terremotos intermedios y profundos ocurrían dentro de litosfera fría descendente, no a lo largo de una grieta arbitraria del manto.[27] La sismicidad iluminaba la ruta de una placa desde la fosa. No mostraba cada parte: algunas placas se vuelven asísmicas y la tomografía posterior seguiría estructuras más allá del terremoto más profundo.[30]

La subducción cerró el presupuesto de superficie. Las dorsales crean litosfera oceánica; los márgenes convergentes la doblan y devuelven al manto.[15,27,30] Las tasas no tienen que equilibrarse local ni instantáneamente, pero el circuito global de primer orden evita océanos que crecen sin límite y una Tierra en expansión. Los continentes participan de otro modo porque la corteza flotante suele resistir la subducción profunda, deformarse, incorporar fragmentos o levantar montañas sobre el límite convergente.

Un sistema de subducción no es una máquina idéntica repetida. Fosas, arcos volcánicos y zonas sísmicas inclinadas son característicos, pero su separación e intensidad varían con inclinación, edad, hidratación y estructura de la placa superior.[27,30] Agua y otros componentes salen de la placa, influyen en la fusión y entran en los arcos; parte del material se mezcla en el manto, se estanca o desciende más.[30,31] El reciclaje está establecido; sus rutas detalladas siguen siendo preguntas medibles.

Una cinta transportadora universal tampoco arrastra cada placa. Los balances incluyen la atracción gravitatoria de placas densas, fuerzas gravitatorias ligadas a las dorsales y tracciones del flujo mantélico.[28,31] Su importancia relativa varía entre placas y épocas. La convección de Holmes fue así una antecesora importante, no una respuesta completa. La tectónica moderna acopla dinámicamente placas y manto sin fingir que una flecha bajo cada océano explica toda velocidad.

En qué punto estamos

> *Los terremotos profundos hicieron visible la rama de retorno: la litosfera oceánica desciende, se deshidrata y se recicla mientras las dorsales renuevan la superficie. Así se cerró el circuito sin reducir su dinámica a una fuerza. La última transformación fue observacionalmente audaz: movimientos reconstruidos en rocas antiguas se compararían con posiciones medidas repetidamente desde el espacio.*

8. El movimiento de placas se volvió directamente medible

Los modelos geológicos recuperan movimiento durante millones de años. Las anomalías magnéticas fechadas aportan distancia y tiempo en cuencas oceánicas; orientaciones transformantes y direcciones sísmicas limitan la geometría.[33,37] MORVEL y sus predecesores resuelven velocidades angulares que satisfacen muchas observaciones. No es una animación inferida de costas, sino un modelo cuantitativo con incertidumbre cuyos datos pueden reidentificarse al cambiar la escala magnética o un circuito de placas.

La geodesia espacial plantea otra pregunta: ¿cómo se mueven ahora las estaciones? Mediciones repetidas de GPS y técnicas relacionadas estiman velocidades en un marco terrestre y separan después rotación de placas, ciclo sísmico, subsidencia y movimiento local del monumento.[34,35] El movimiento típico es de milímetros a centímetros por año: invisible en la vida diaria, suficiente para reorganizar un océano en tiempo geológico. Una vida humana muestrea hoy el proceso antes accesible solo mediante rocas antiguas.

El Global Strain Rate Model v2.1 combinó 22.511 velocidades horizontales, representó 50 placas como casquetes giratorios y permitió que aproximadamente el 14 por ciento de la superficie se deformara en zonas fronterizas amplias.[34] Esas cifras describen un modelo publicado, no el censo final de la naturaleza. Su valor también es conceptual: la medición puede respetar el éxito de las placas rígidas sin ocultar las regiones donde falla la aproximación.

Las rotaciones geodésicas actuales y las geológicas de millones de años son ampliamente comparables, pero no tienen que ser idénticas.[33–35,37] Los límites evolucionan, la deformación puede ser transitoria, las edades magnéticas promedian intervalos largos y el GPS observa décadas interrumpidas por terremotos. Una discrepancia no es automáticamente refutación. Puede identificar error de referencia, deformación elástica, organización cambiante o una anomalía mal asignada, si escalas e incertidumbres siguen explícitas.

Medir directamente el movimiento actual no observa directamente Pangea. Las reconstrucciones antiguas aún dependen de corteza oceánica fechada, paleomagnetismo, geología correlacionada y registros parcialmente destruidos por subducción.[32,33,36] La tectónica es duradera porque esas inferencias históricas concuerdan con un mecanismo que actúa ahora. QTC-019 seguirá una consecuencia —cómo la roca móvil transfiere carbono durante tiempos inmensos—; este artículo se detiene en la evidencia de un sistema móvil acoplado de superficie y manto.[27,30,31]

En qué punto estamos

La tectónica de placas se volvió convincente al unir reconstrucciones, predicciones arriesgadas y movimiento presente. Ningún mapa, fósil, franja o estación GPS sostuvo la teoría; registros independientes limitaron un sistema móvil entre escalas temporales. Ese sistema aporta ahora la circulación física bajo el ciclo largo del carbono, donde el movimiento será un ingrediente de un termostato planetario, no la explicación completa.

Lo que sabemos y cómo lo sabemos

- Los continentes han cambiado de posición relativa, y sus conexiones anteriores se apoyan en geometría, fósiles, geología y paleoclima, no solo en contornos.[1–4,38]

- La litosfera oceánica se crea en dorsales, registra inversiones geomagnéticas y suele envejecer al alejarse del eje.[13–20,32,36]
- Las fallas transformantes, los mecanismos sísmicos y las rotaciones de Euler conectan límites locales en un sistema global.[22–26]
- La subducción devuelve litosfera oceánica al manto a lo largo de fosas y zonas sísmicas inclinadas.[11,12,27,30]
- La geodesia espacial mide directamente el movimiento actual de placas y zonas fronterizas en milímetros o centímetros por año.[34,35]

Lo que todavía no sabemos

- El balance exacto entre tracción de placas, arrastre del manto y otras fuerzas para cada placa a través del tiempo.
- El destino detallado y la profundidad de mezcla de todo material transportado en cada zona de subducción.
- El mejor límite entre microplacas rígidas y regiones de deformación continua en cada escala observacional.
- Las geometrías antiguas donde la subducción destruyó corteza oceánica y no sobrevive un registro magnético completo.
- Cómo y cuándo empezó la tectónica de placas en la Tierra primitiva, pregunta fuera de la cadena moderna de este artículo.

Qué podría hacernos cambiar de opinión

- Un patrón magnético, sísmico y geodésico global que no pueda reconciliarse con placas litosféricas y sus límites.
- Escalas de polaridad o identificaciones de anomalías revisadas que alteren historias regionales más allá de la incertidumbre actual.
- Geodesia densa que muestre deformación sistemática suficiente en una supuesta placa rígida para exigir otra partición cinemática.
- Evidencia tomográfica y geoquímica que revise sustancialmente dónde descienden, se estancan o reciclan material las placas.
- Evidencia de archivo que cambie la independencia, secuencia o atribución documentada de una propuesta histórica concreta.

Si solo recuerdas una cosa

Los continentes se mueven porque las placas litosféricas se crean, desplazan y reciclan. Lo sabemos no por una pista brillante, sino por la convergencia de fósiles, mapas oceánicos, franjas magnéticas, terremotos, geometría y GPS.

Artículos relacionados

- QTC-016 — Cómo se construye un planeta
- QTC-017 — Cómo aprendimos a fechar el pasado
- QTC-019 — El termostato de la Tierra

Referencias

[1] Alfred Wegener. Die Entstehung der Kontinente. Geologische Rundschau 3, 276–292 (1912). DOI 10.1007/BF02202896. https://doi.org/10.1007/BF02202896

[2] Alfred Wegener. Die Entstehung der Kontinente und Ozeane. First edition, Friedrich Vieweg & Sohn, Braunschweig (1915). https://archive.org/details/dieentstehungder00wege

[3] F. B. Taylor. Bearing of the tertiary mountain belt on the origin of the earth's plan. Bulletin of the Geological Society of America 21, 179–226 (1910). DOI 10.1130/GSAB-21-179. https://doi.org/10.1130/GSAB-21-179

[4] Alexander L. du Toit. Our Wandering Continents: An Hypothesis of Continental Drifting. Oliver and Boyd, Edinburgh (1937). https://archive.org/details/ourwanderingcont0000duto

[5] Arthur Holmes. XVIII. Radioactivity and Earth Movements. Transactions of the Geological Society of Glasgow 18(3), 559–606; lecture delivered 12 January 1928 (1931). DOI 10.1144/transglas.18.3.559. https://doi.org/10.1144/transglas.18.3.559

[6] Harold Jeffreys. The Earth: Its Origin, History and Physical Constitution. First edition, Cambridge University Press (1924). https://search.worldcat.org/title/352964

[7] Naomi Oreskes. The Rejection of Continental Drift: Theory and Method in American Earth Science. Oxford University Press (1999). https://global.oup.com/academic/product/the-rejection-of-continental-drift-9780195117332

[8] Marie Tharp. Connect the Dots: Mapping the Seafloor and Discovering the Mid-ocean Ridge. In Lamont-Doherty Earth Observatory: Twelve Perspectives on the First Fifty Years, 1949–1999 (1999). https://www.whoi.edu/news-insights/content/marie-tharp/

[9] Bruce C. Heezen; Marie Tharp; Maurice Ewing. The Floors of the Oceans: I. The North Atlantic. Geological Society of America Special Paper 65 (1959). DOI 10.1130/SPE65-p1. https://doi.org/10.1130/SPE65-p1

[10] Maurice Ewing. Atlantic Cruise 152 to the Mid-Atlantic Ridge. Bulletin of the Geological Society of America 59, 1320 (1948). https://archive.org/details/sim_geological-society-of-america-bulletin_1948-12_59_12

[11] K. Wadati. On the Activity of Deep-Focus Earthquakes in the Japan Islands and Neighbourhoods. Geophysical Magazine 8, 305–325 (1935). https://cir.nii.ac.jp/crid/1571698600867573888?lang=en

[12] Hugo Benioff. Seismic Evidence for the Fault Origin of Oceanic Deeps. Bulletin of the Geological Society of America 60, 1837–1856 (1949). https://www.eps.mcgill.ca/~courses/c350/lecturestuff/jan09/Benioff_1949_GSAB.pdf

[13] Ronald G. Mason; Arthur D. Raff. Magnetic Survey off the West Coast of North America, 32° N. Latitude to 42° N. Latitude. Geological Society of America Bulletin 72, 1259–1266 (1961). https://www.eps.mcgill.ca/~courses/c350/lecturestuff/jan28/Mason_1961.pdf

[14] Robert S. Dietz. Continent and Ocean Basin Evolution by Spreading of the Sea Floor. Nature 190, 854–857 (1961). DOI 10.1038/190854a0. https://doi.org/10.1038/190854a0

[15] H. H. Hess. History of Ocean Basins. In Petrologic Studies: A Volume in Honor of A. F. Buddington, 599–620 (1962). https://www.mantleplumes.org/WebDocuments/Hess1962.pdf

[16] F. J. Vine; D. H. Matthews. Magnetic Anomalies Over Oceanic Ridges. Nature 199, 947–949 (1963). DOI 10.1038/199947a0. https://doi.org/10.1038/199947a0

[17] Allan Cox; Richard R. Doell; G. Brent Dalrymple. Reversals of the Earth's Magnetic Field. Science 144, 1537–1543 (1964). DOI 10.1126/science.144.3626.1537. https://doi.org/10.1126/science.144.3626.1537

[18] F. J. Vine; J. Tuzo Wilson. Magnetic Anomalies over a Young Oceanic Ridge off Vancouver Island. Science 150, 485–489 (1965). DOI 10.1126/science.150.3695.485. https://doi.org/10.1126/science.150.3695.485

[19] J. R. Heirtzler; G. O. Dickson; E. M. Herron; W. C. Pitman, III; X. Le Pichon. Marine magnetic anomalies, geomagnetic field reversals, and motions of the ocean floor and continents. Journal of Geophysical Research 73, 2119–2136 (1968). DOI 10.1029/JB073i006p02119. https://doi.org/10.1029/JB073i006p02119

[20] F. J. Vine. Spreading of the Ocean Floor: New Evidence. Science 154, 1405–1415 (1966). DOI 10.1126/science.154.3755.1405. https://doi.org/10.1126/science.154.3755.1405

[21] Lawrence W. Morley. Early Work Leading to the Explanation of the Banded Geomagnetic Imprinting of the Ocean Floor. Eos, Transactions American Geophysical Union 67(36), 665–666 (1986). https://courses.seas.harvard.edu/climate/eli/Courses/EPS281r/Sources/Plate-tectonics/Plate-motion-on-sphere-and-continental-drift/more/Morley-1986.pdf

[22] J. Tuzo Wilson. A New Class of Faults and Their Bearing on Continental Drift. Nature 207, 343–347 (1965). DOI 10.1038/207343a0. https://doi.org/10.1038/207343a0

[23] Lynn R. Sykes. Mechanism of earthquakes and nature of faulting on the mid-oceanic ridges. Journal of Geophysical Research 72, 2131–2153 (1967). DOI 10.1029/JZ072i008p02131. https://doi.org/10.1029/JZ072i008p02131

[24] D. P. McKenzie; R. L. Parker. The North Pacific: an Example of Tectonics on a Sphere. Nature 216, 1276–1280 (1967). DOI 10.1038/2161276a0. https://doi.org/10.1038/2161276a0

[25] W. Jason Morgan. Rises, trenches, great faults, and crustal blocks. Journal of Geophysical Research 73, 1959–1982 (1968). DOI 10.1029/JB073i006p01959. https://doi.org/10.1029/JB073i006p01959

[26] Xavier Le Pichon. Sea-floor spreading and continental drift. Journal of Geophysical Research 73, 3661–3697 (1968). DOI 10.1029/JB073i012p03661. https://doi.org/10.1029/JB073i012p03661

[27] Bryan Isacks; Jack Oliver; Lynn R. Sykes. Seismology and the new global tectonics. Journal of Geophysical Research 73, 5855–5899 (1968). DOI 10.1029/JB073i018p05855. https://doi.org/10.1029/JB073i018p05855

[28] D. Forsyth; S. Uyeda. On the Relative Importance of the Driving Forces of Plate Motion. Geophysical Journal International 43(1), 163–200 (1975). DOI 10.1111/j.1365-246X.1975.tb00631.x. https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1975.tb00631.x

[29] Peter Bird. An updated digital model of plate boundaries. Geochemistry, Geophysics, Geosystems 4(3), 1027 (2003). DOI 10.1029/2001GC000252. https://doi.org/10.1029/2001GC000252

[30] Robert J. Stern. Subduction Zones. Reviews of Geophysics 40(4), 1012 (2002). DOI 10.1029/2001RG000108. https://doi.org/10.1029/2001RG000108

[31] Clinton P. Conrad; Carolina Lithgow-Bertelloni. How Mantle Slabs Drive Plate Tectonics. Science 298, 207–209 (2002). DOI 10.1126/science.1074161. https://doi.org/10.1126/science.1074161

[32] R. Dietmar Müller; Maria Sdrolias; Carmen Gaina; Walter R. Roest. Age, spreading rates, and spreading asymmetry of the world's ocean crust. Geochemistry, Geophysics, Geosystems 9, Q04006 (2008). DOI 10.1029/2007GC001743. https://doi.org/10.1029/2007GC001743

[33] Charles DeMets; Richard G. Gordon; Donald F. Argus. Geologically current plate motions. Geophysical Journal International 181, 1–80 (2010). DOI 10.1111/j.1365-246X.2009.04491.x. https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2009.04491.x

[34] Corné Kreemer; Geoffrey Blewitt; Elliot C. Klein. A Geodetic Plate Motion and Global Strain Rate Model. Geochemistry, Geophysics, Geosystems 15, 3849–3889 (2014). DOI 10.1002/2014GC005407. https://doi.org/10.1002/2014GC005407

[35] Donald F. Argus; Richard G. Gordon; Michael B. Heflin; Chopo Ma; Richard J. Eanes; Pascal Willis; W. Richard Peltier; Susan E. Owen. The angular velocities of the plates and the velocity of Earth's centre from space geodesy. Geophysical Journal International 180, 913–960 (2010). DOI 10.1111/j.1365-246X.2009.04463.x. https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2009.04463.x

[36] S. C. Cande; D. V. Kent. Revised calibration of the geomagnetic polarity timescale for the Late Cretaceous and Cenozoic. Journal of Geophysical Research: Solid Earth 100, 6093–6095 (1995). DOI 10.1029/94JB03098. https://doi.org/10.1029/94JB03098

[37] Charles DeMets; Richard G. Gordon; Donald F. Argus; Seth Stein. Effect of recent revisions to the geomagnetic reversal time scale on estimates of current plate motions. Geophysical Research Letters 21, 2191–2194 (1994). DOI 10.1029/94GL02118. https://doi.org/10.1029/94GL02118

[38] Edward Bullard; J. E. Everett; A. Gilbert Smith. The fit of the continents around the Atlantic. Philosophical Transactions of the Royal Society A 258, 41–51 (1965). DOI 10.1098/rsta.1965.0020. https://doi.org/10.1098/rsta.1965.0020

El termostato de la Tierra

QTC-019 · 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

La Tierra ha conservado agua superficial durante la mayor parte de su historia aunque el Sol se volvió más luminoso, los continentes se desplazaron y cambiaron las fuentes volcánicas de carbono. La explicación habitual es un «termostato» carbonato-silicato: el calentamiento y un ciclo del agua más intenso pueden acelerar la meteorización de silicatos, transferir dióxido de carbono a rocas carbonatadas, mientras el enfriamiento debilita el sumidero y permite que las emisiones geológicas reconstruyan el efecto invernadero. El mecanismo es real, pero incompleto. La meteorización depende también de suministro mineral fresco, escorrentía, litología, biología y topografía; la corteza oceánica consume carbono; y una glaciación global puede interrumpir la vía continental. Este artículo sigue el carbono desde su liberación volcánica hasta su almacenamiento rocoso, distingue una retroalimentación negativa de una temperatura objetivo y explica por qué un proceso de cientos de miles de años no puede cancelar el calentamiento moderno en escalas humanas.

En 60 segundos

El ciclo largo del carbono conecta fuentes volcánicas y metamórficas de CO2 con sumideros en roca meteorizada y sedimento marino. La lluvia y el agua del suelo reaccionan con minerales silicatados y liberan cationes y alcalinidad. Los ríos llevan esos productos al océano, donde el enterramiento de carbonatos deja un balance simplificado: roca silicatada más CO2 se convierte en roca carbonatada más sílice. Si más CO2 calienta y humedece paisajes sensibles, la meteorización puede acelerarse; si el clima se enfría y seca, el sumidero puede debilitarse mientras continúa la desgasificación. Es una retroalimentación negativa, no un mando fijado a una temperatura. Su fuerza cambia con erosión, roca fresca, litología, montañas, plantas y flujo de agua. La alteración del basalto submarino aporta otro sumidero cuya magnitud antigua sigue incierta. Bajo hielo casi global, la ruta continental puede detenerse y permitir que se acumule CO2 antes de la deglaciación. Un Sol joven más tenue vuelve científicamente importante esta regulación acoplada, pero no demuestra una atmósfera primitiva única. Y la respuesta es lenta: los modelos sitúan la recuperación por meteorización en cientos de miles de años, muy lejos de la escala de nuestras emisiones y decisiones.

Por qué importa esta pregunta

La metáfora del termostato es tan memorable que puede volverse peligrosa. Hace parecer que la Tierra fue diseñada para la vida, convierte una vía química en explicación universal y sugiere que la meteorización natural reparará enseguida un pulso humano de carbono. La evidencia sostiene algo más interesante: una retroalimentación ensamblada con reacciones, flujo de agua, renovación de

roca, corteza oceánica, modificación biológica y circulación tectónica, cada componente con límites y relojes distintos. Aprender dónde funciona el mecanismo —y dónde se detiene— muestra cómo la habitabilidad planetaria puede emerger sin previsión. También conecta las placas móviles de QTC-018 con los ambientes prebióticos de QTC-020 sin afirmar que la tectónica o la estabilidad climática estuvieran garantizadas.

1. Un termostato sin mando

La pregunta

Si la Tierra tiene termostato, ¿por qué se ha congelado casi por completo, ha perdido el hielo tropical durante largos intervalos y ha cambiado su carbono atmosférico en órdenes de magnitud? La respuesta empieza por descartar el aparato doméstico y conservar la física de la retroalimentación.

Un termostato doméstico compara una temperatura medida con un ajuste elegido y enciende o apaga la calefacción. Las rocas terrestres no eligen nada. En este artículo, «termostato» solo significa que un cambio climático puede modificar un flujo de carbono en una dirección que se opone parcialmente al cambio inicial. Walker, Hays y Kasting formalizaron el caso canónico en 1981: condiciones más cálidas y un ciclo del agua más intenso podían aumentar la meteorización de silicatos, retirar más CO2 y reducir el forzamiento de invernadero.[1] Llamaron parcial a la estabilización y calificaron de especulativos detalles cuantitativos importantes. Esa cautela pertenece dentro de la metáfora, no en una nota al pie.

La contabilidad relevante une depósitos que solemos sentir separados. Atmósfera, océano, suelos y materia viva intercambian carbono con rapidez, mientras rocas carbonatadas, sedimentos ricos en materia orgánica, corteza oceánica y manto almacenan mucho más durante el tiempo geológico.[2,3] Esas cajas no están selladas: un átomo puede atravesar varias con relojes distintos. La asimetría crucial es el tamaño. Los flujos acumulados de volcanismo, meteorización y enterramiento durante millones de años son grandes frente al depósito superficial, de modo que un desajuste persistente modesto alejaría el CO2 atmosférico de valores familiares.[3] Un proceso restaurador es una exigencia de balance de masa, no evidencia de intención planetaria.

La regulación parcial es compatible con un clima dramático. La Tierra ha ocupado estados de invernadero y de glaciación, y estratos neoproterozoicos registran glaciaciones lo bastante severas para motivar modelos de Tierra Bola de Nieve.[4,12,19] Una retroalimentación negativa puede impedir una deriva indefinida y, sin embargo, ser demasiado lenta para evitar un sobrepaso, demasiado débil en cierta geografía o quedar interrumpida. Agua superficial duradera tampoco significa calor constante. Los modelos del clima y pH primitivos admiten rangos amplios, mientras minerales antiguos conservan evidencia de agua bajo condiciones imposibles de reconstruir instante a instante.[17,18,22] El logro es persistir dentro de una envolvente extensa, no mantener una línea térmica plana.

Una retroalimentación necesita además una perturbación definida. El bucle de meteorización puede oponerse a un aumento de CO2 sin revertir todo cambio térmico causado por hielo, nubes, circulación o geometría orbital.[1,3,4] En un planeta cambiante actúan a la vez varias respuestas y relojes. Llamar estabilizador a uno significa que su respuesta tiene signo negativo frente a su impulsor; no le concede control sobre todo el sistema climático.

Esta distinción fija el perfil epistémico del artículo. Las reacciones y vías de flujo modernas pueden medirse. Su fuerza integrada a través de continentes desaparecidos, océanos cambiantes y miles de millones de años es una interpretación científica limitada por modelos y archivos incompletos.[4,12,17,18] La palabra termostato solo ganará su lugar si viaja con tres preguntas: qué flujo de carbono responde, con qué rapidez y qué puede limitarlo. La primera respuesta está en una reacción que empieza en lluvia y suelo, pero termina con carbono encerrado en roca marina.

En qué punto estamos

> *El termostato es, por tanto, una relación, no un objeto: fuentes de carbono, sumideros sensibles al clima y tiempos de respuesta finitos deben permanecer enlazados. El balance de masa explica por qué hace falta alguna restauración sin fijar su fuerza exacta. Para ver qué realiza el trabajo, el paso siguiente sigue el carbono volcánico por silicato meteorizado, agua fluvial y carbonato recién enterrado.*

2. La reacción que almacena el carbono volcánico

El carbono vuelve a la superficie por varias rutas geológicas. El magma libera carbono mantélico y reciclado; reacciones metamórficas y diagenéticas descomponen material carbonoso enterrado; los arcos procesan parte de lo que la subducción transporta hacia abajo.[1–3,29,31] Estos flujos cambian con el tiempo y no se reducen a una fila de volcanes. Tampoco todo átomo que entra en una fosa reaparece enseguida en un arco. Mediciones e inventarios muestran gran variación entre márgenes, con carbono liberado en antearcos y arcos, almacenado en corteza o transportado a mayor profundidad.[29–31] El lado de las fuentes es un sistema tectónico distribuido cuyo presupuesto no está cerrado por completo.

La retirada empieza cuando el CO_2 se disuelve en lluvia o agua del suelo y contribuye al ácido carbónico. El agua que atraviesa minerales silicatados libera cationes como calcio o magnesio, bicarbonato disuelto y sílice; ácidos orgánicos y respiración del suelo pueden intensificar la química local.[1,2,6] Una ecuación deliberadamente simplificada para el silicato de calcio sirve como contabilidad: dos moléculas de CO_2 reaccionan con $CaSiO_3$ y agua para producir Ca^{2+}, dos bicarbonatos y sílice disuelta.[1,2,26] Granito y basalto naturales no son wollastonita pura y en el camino se forman arcillas secundarias. La ecuación sigue átomos; no fotografía un grano mineral.

Los ríos trasladan los productos al océano. Cuando calcio y bicarbonato forman finalmente carbonato cálcico y este se entierra, una molécula de CO_2 vuelve al sistema océano-atmósfera y otra queda en roca. La combinación de ambas etapas da la reacción neta familiar: $CaSiO_3 + CO_2 \rightarrow CaCO_3 + SiO_2$.[1,2] Ese enterramiento final importa. Si el carbonato vuelve a disolverse, termina el almacenamiento; si el sedimento se subduce y descarbonata, el carbono regresa después a la superficie. El secuestro geológico es residencia en un depósito lento, no aniquilación.

Hay que separar la meteorización de rocas carbonatadas. Disolver $CaCO_3$ con ácido carbónico consume CO_2 al principio, pero precipitar $CaCO_3$ lo devuelve después; el ciclo completo del carbonato no es el mismo sumidero neto multimillonario que la meteorización de silicatos.[1,3,26] Aun así puede neutralizar un pulso durante milenios, y el ácido sulfúrico puede invertir parte de la contabilidad esperada. La regla «la meteorización elimina CO_2» es demasiado burda. Hay que identificar ácido, mineral, iones exportados y destino del carbonato. Solo entonces la química de rocas se convierte en presupuesto planetario.

El viaje de retorno es igual de selectivo. El carbono sedimentario que entra en una subducción puede disolverse en fluidos, liberarse por metamorfismo, entrar en magma, almacenarse en corteza o viajar más hondo.[29–31] Los presupuestos actuales no cierran cada rama y los márgenes difieren. La incertidumbre cambia tamaño y ritmo de las fuentes geológicas, pero no la necesidad de equilibrarlas con sumideros duraderos. El ciclo se cierra mediante una red de repartos, no una cinta transportadora.

En qué punto estamos

La meteorización de silicatos solo se vuelve sumidero duradero cuando sus productos completan el viaje hasta el enterramiento de carbonato; disolver carbonato por sí solo lleva otra contabilidad. La reacción aporta la dirección química, no su velocidad. La velocidad entra por el clima, porque calor, lluvia, escorrentía y residencia subterránea deciden con qué rapidez el agua convierte minerales frescos en alcalinidad exportada.

3. La meteorización convierte el clima en retroalimentación

La pregunta

Un sumidero de carbono no es automáticamente una retroalimentación climática. Para oponerse al calentamiento, su ritmo debe cambiar porque cambió el clima. La temperatura puede acelerar reacciones, pero en continentes reales la conexión decisiva suele pasar por agua, rutas de flujo y suministro de mineral sin reaccionar.

Las reacciones minerales suelen acelerarse con la temperatura, pero un paisaje no es un vial de laboratorio. White y Blum compararon cuencas graníticas de distintos climas y hallaron que los flujos de sílice y sodio aumentaban sistemáticamente con precipitación, escorrentía y temperatura, mientras calcio, magnesio y potasio quedaban ocultos por otros procesos.[6] West, Galy y Bickle encontraron asimismo que clima, erosión y litología organizan conjuntamente la meteorización global.[5] Esos resultados mixtos no refutan la retroalimentación. Identifican su maquinaria: la cinética importa solo donde el agua alcanza superficies reactivas, los productos pueden salir y quedan minerales frescos.

La hidrología aporta el puente más fuerte. La lluvia controla cuánta agua entra en una cuenca; la escorrentía exporta productos disueltos; la residencia subterránea da tiempo para acercarse al equilibrio. Maher y Chamberlain expresaron la competencia con un marco de Damköhler que conecta tiempo de flujo, tiempo de reacción y suministro mineral fresco.[4] Más escorrentía puede elevar el flujo total aunque baje la concentración, pero la respuesta termina saturándose. Un paisaje cálido y húmedo puede meteorizarse deprisa, aunque dos cuencas igual de cálidas se comporten distinto porque sus rutas de flujo, edad del suelo e historia erosiva no son iguales. El termostato tiene tuberías.

El bucle canónico se cierra. Más CO_2 atmosférico refuerza el efecto invernadero. Allí donde el clima resultante es más cálido y aumenta la escorrentía, la meteorización de silicatos tiende a consumir CO_2 con mayor rapidez. La reducción posterior se opone al calentamiento inicial.[1,3,4] En sentido contrario, condiciones más frías o secas pueden frenar el sumidero mientras continúa la liberación volcánica y metamórfica, permitiendo que se acumule CO_2.[1,19] Cada verbo es condicional. La lluvia puede disminuir regionalmente, el hielo aislar la roca del agua líquida y la productividad cambiar la acidez. Un signo global negativo no uniforma todas las cuencas.

La variabilidad de campo es evidencia que interpretar, no ruido que borrar. Una respuesta de escorrentía puede aumentar la exportación en una cuenca y acercarse a saturación mineral en otra; una relación térmica puede desaparecer al cambiar la litología.[1,4,6] Los modelos globales comprimen diferencias en parámetros, mientras las cuencas revelan los procesos que deben representar. La confianza procede de química, hidrología y balance compatibles, no de fingir que una regresión explica cada río.

El reloj es geológico. Archer y sus colegas separaron captación oceánica, neutralización por carbonatos y meteorización de rocas en etapas distintas tras un pulso de carbono.[25] Colbourn, Ridgwell y Lenton obtuvieron un tiempo e-folding de unos 240.000 años para la retroalimentación de silicatos, con un rango de modelo de 170.000–380.000 años.[26] Otros modelos difieren y el valor cambia con clima inicial y tamaño del pulso.[27] La conclusión defendible no es un número mágico. Es que restaurar el balance geológico requiere cientos de miles de años: suficiente para moldear el tiempo profundo, demasiado lento para estabilizar un siglo humano.

En qué punto estamos

El clima solo cierra el bucle mediante paisajes capaces de traducir calor y agua en reacción mineral y exportación. Esa dependencia explica el signo negativo y el ritmo variable. También revela la siguiente complicación: la tectónica hace más que devolver carbono. Al crear montañas, erosionar superficies y exponer rocas distintas, cambia continuamente la palanca de la retroalimentación.

4. La tectónica cambia la fuerza de la retroalimentación

La meteorización química necesita algo físico que meteorizar. La erosión retira material alterado y expone minerales que aún no han reaccionado; la formación de suelo abre poros; los deslizamientos llevan detritos frescos a canales y llanuras.[4,5] Pero más erosión no siempre es mejor. Cuando escasea el suministro, exponer roca puede aumentar el flujo químico. Cuando abunda, limitan la cinética, el contacto con agua y el transporte, y granos retirados deprisa pueden marcharse antes de reaccionar mucho.[5,26] La distinción entre regímenes limitados por suministro y por cinética o hidrología es un espectro, pero impide que «más montañas significa más enfriamiento» se convierta en ley.

El tipo de roca cambia la oportunidad. La química fluvial muestra que la litología ayuda a determinar cuánto CO2 consume la meteorización, y los terrenos basálticos pueden ser especialmente reactivos.[7,8] Dessert y sus colegas derivaron relaciones de meteorización del basalto en lugares monitorizados y las usaron para evaluar el consumo global.[9] El basalto no posee una tasa planetaria fija: importan lluvia tropical, permeabilidad, tamaño de grano, edad y erosión. Grandes provincias ígneas pueden liberar CO2 al erupcionar y después exponer roca máfica que lo consume. Fuente y sumidero pueden pertenecer al mismo episodio y actuar con ritmos diferentes.

Las montañas reorganizan casi todos los controles a la vez. El levantamiento crea relieve, la erosión suministra minerales, la lluvia orográfica redirige agua y el sedimento se acumula en tierras bajas reactivas.[4] Raymo y Ruddiman propusieron que el levantamiento cenozoico tardío intensificó la meteorización y contribuyó al enfriamiento.[10] Fue una hipótesis influyente y comprobable, no un veredicto permanente. A largo plazo, la meteorización global debe aproximarse al suministro geológico de carbono; aumentar la meteorizabilidad puede reducir el

CO_2 y la temperatura necesarios para lograr el balance.[3] Una cordillera cambia el estado de equilibrio y la ruta hacia él, no solo una perilla global de flujo.

La vida modifica el mismo paisaje. Raíces, hongos, respiración y ácidos orgánicos cambian rutas del agua, superficies minerales y CO_2 del suelo; la vegetación estabiliza además el suelo y altera la erosión. Los modelos GEOCARB tratan la amplificación biológica como un control evolutivo.[12] Pagani y sus colegas modelaron otro giro: cuando escasea el CO_2, la productividad vegetal y la meteorización impulsada por plantas pueden debilitarse y limitar una retirada adicional.[11] La biología no inventó la reacción abiótica de silicatos, y ningún multiplicador representa todos los ecosistemas. Cambia la ganancia. Cuando el agua llega al mar, la señal continental ya contiene historia tectónica, climática y biológica.

A largo plazo, meteorizabilidad y flujo de meteorización no son sinónimos. Si levantamiento o plantas facilitan la reacción mientras la desgasificación queda fija, el CO_2 puede caer hasta que condiciones más frías o secas devuelvan la retirada global hacia el carbono suministrado.[3,4,12] El nuevo estado puede ser más frío y el transitorio importante, pero el sumidero no supera para siempre a su fuente. Esta lógica exige cronología y mecanismo para relacionar montañas, erosión y enfriamiento.

En qué punto estamos

La tectónica fortalece o debilita la meteorización al cambiar suministro de roca fresca, litología, relieve y lluvia, mientras la vida modifica el paisaje reactivo. Ningún factor actúa solo, y el levantamiento no dicta permanentemente un sumidero independiente del carbono disponible. Aún falta una gran superficie reactiva: la corteza basáltica submarina producida por el planeta móvil de QTC-018.

5. El fondo oceánico forma parte del termostato

La pregunta

La lluvia sobre montañas es la imagen familiar de la retirada geológica de carbono, pero el agua marina también circula por basalto joven y deja carbonato. Ignorar esa vía sumergida convierte un ciclo planetario en relato continental y distorsiona sobre todo la Tierra primitiva.

La corteza oceánica nace caliente y fracturada en una dorsal, después se enfría mientras el agua marina sigue circulando por capas superiores permeables lejos del eje. El fluido entra por afloramientos expuestos, reacciona con basalto y precipita minerales secundarios antes de volver al océano.[13,32] En algunas cortezas estudiadas, más de cuatro quintas partes del carbonato se formaron durante los primeros 20 millones de años, aunque permeabilidad y cubierta sedimentaria varían mucho.[13] Hallar carbonato en un testigo demuestra captación, no automáticamente un sumidero neto nuevo: parte de la calcita solo precipita alcalinidad continental. La disolución del basalto debe generar alcalinidad adicional para el efecto duradero más fuerte.

Brady y Gislason propusieron que la meteorización submarina responde a temperatura y CO_2 atmosférico.[14] Coogan y Gillis modelaron después reacciones de baja temperatura y argumentaron que una generación mayor de alcalinidad bajo condiciones mesozoicas tardías más cálidas pudo aportar una retroalimentación comparable a la continental.[13] La afirmación

importa precisamente porque está cualificada. El estudio relacionó contenidos medidos de carbono cortical con modelos de reacción; no monitorizó continuamente un flujo global antiguo. La corteza oceánica es un depósito real, mientras el tamaño de su influencia climática se reconstruye.

Coogan y Dosso usaron alteración cortical e isótopos de estroncio marino para inferir una fuerte dependencia térmica de la disolución del basalto y comunicaron una energía de activación aparente de unos 92 ± 7 kJ por mol.[15] La temperatura del agua profunda importa porque fija la condición de entrada de la circulación fuera del eje. Pero el número no es constante universal de todo acuífero cortical. Ensamblajes minerales, composición marina, rutas de flujo y supuestos sobre el registro de estroncio entran en la inferencia. Su mensaje más sólido es cualitativo y comprobable: el sumidero puede responder al clima y no solo a la cantidad de corteza producida.

Los modelos de la Tierra primitiva hacen visible la consecuencia. Krissansen-Totton, Arney y Catling acoplaron meteorización continental y oceánica con química marina y hallaron que la alteración submarina pudo ser comparable a la continental en el Arcaico sin dominarla necesariamente.[17] La respuesta cambiaba con supuestos sobre crecimiento de continentes, flujo térmico y desgasificación. Tasa de expansión, edad cortical, sedimento y química marina afectan al sumidero.[13–15,32] Un planeta con poca tierra expuesta no carece por ello de retroalimentación mineral, pero el basalto tampoco garantiza un clima clemente. La vía sumergida amplía a la vez el sistema y su incertidumbre.

La tasa de expansión tampoco representa por sí sola el proceso. Crear corteza deprisa expone más basalto joven, pero acceso del fluido, temperatura profunda, saturación de carbonato y minerales secundarios determinan qué hace esa corteza.[13–15,32] Un fondo sellado por sedimento difiere del basalto fracturado conectado a afloramientos. La misma tasa tectónica puede sostener captaciones distintas. Esta es la frontera con QTC-018: el movimiento crea el escenario; geoquímica e hidrología determinan la retroalimentación.

En qué punto estamos

La corteza oceánica confirma que la regulación geológica no se limita a suelos y ríos. La alteración del basalto puede crear alcalinidad, enterrar carbono y responder a temperatura, aunque su fuerza global antigua depende de modelos. Añadir el fondo vuelve la retroalimentación más resistente, no invulnerable. En condiciones extremas, acceso al agua, química marina y vías de enterramiento pueden cambiar de modo o fallar conjuntamente.

6. La retroalimentación puede detenerse o cambiar de modo

El océano no recibe pasivamente alcalinidad continental. Sílice disuelta y cationes pueden formar arcillas nuevas en sedimentos marinos, una familia de reacciones llamada meteorización inversa. Esas reacciones consumen alcalinidad y pueden devolver CO_2 al sistema océano-atmósfera.[16] Isson y Planavsky propusieron que la vía ayudó a estabilizar pH marino y clima, sobre todo antes de que el ciclo biológico de la sílice transformara el océano.[16] El proceso mineral se observa; su magnitud global a través del tiempo es una interpretación activa. Tratarlo como insignificante o como sustituto completo del ciclo convencional excedería la evidencia.

El pH oceánico cambia el reparto del carbono inorgánico y las condiciones del enterramiento. Halevy y Bachan infirieron un ascenso amplio desde un pH arcaico menor hacia océanos posteriores más alcalinos mientras aumentaba la luminosidad solar y cambiaban CO_2 atmosférico

e intercambio hidrotermal.[18] Krissansen-Totton y sus colegas obtuvieron una tendencia relacionada en otro modelo acoplado.[17] Coincidir en la dirección no produce una curva exacta. Muestra por qué la retroalimentación no puede separarse de la alcalinidad: un flujo que retira CO_2 bajo una química puede amplificarse, amortiguarse o desviarse bajo otra.

La glaciación global ofrece el experimento mental más claro con evidencia geológica. Si el hielo cubre casi todos los continentes y el agua líquida apenas intercambia con roca expuesta, la meteorización continental se desploma mientras puede continuar la desgasificación volcánica y metamórfica.[19] El CO_2 se acumula en lugar de ser compensado enseguida por el sumidero habitual. Suficiente invernadero puede ayudar a terminar el estado congelado; después, calor, escorrentía y detritos recién expuestos impulsan meteorización intensa. El umbral de deglaciación del trabajo de 1998 dependía del modelo; la lección duradera es el bucle interrumpido y su recuperación tardía, no un número heredado de CO_2.

Los carbonatos de cobertura sobre depósitos glaciares registran una transición abrupta, pero no se traducen en una tasa única de meteorización.[19] Vuelco oceánico, acumulación de alcalinidad, precipitación rápida y retrabajo sedimentario pueden contribuir. La secuencia demuestra, sin embargo, cómo una retroalimentación negativa puede sobrepasarse: un sumidero débil permite acumular carbono; la deglaciación restaura contacto agua-roca; siguen un sumidero temporalmente fuerte y una química marina inusual. Retardos y umbrales sustituyen el movimiento suave del aparato. Un regulador planetario puede ser real y permitir estados catastróficos para casi todos los ecosistemas actuales.

Estos casos comparten una regla profunda: la fuerza es propiedad del estado completo, no de una constante de reacción. La meteorización inversa depende de sílice y química marina; el enterramiento, de saturación y circulación; la captación continental, de roca húmeda expuesta.[16–19] Al cruzar umbrales puede cambiar la vía dominante. La metáfora solo sobrevive en plural: tendencias acopladas cuya respuesta combinada debe recalcularse cuando el planeta cambia de modo.

En qué punto estamos

La meteorización inversa, el pH cambiante y los episodios de Bola de Nieve revelan vías alternativas, umbrales y retardos. La Tierra no siguió habitable manteniendo cada variable cerca de su valor moderno; el sistema cambió repetidamente cómo procesaba carbono. La prueba más dura llegó desde fuera del ciclo: el Sol joven aportaba bastante menos energía mientras la geología aún registra agua líquida.

7. Un Sol joven tenue hizo difícil la prueba

La pregunta

La evolución estelar estándar dice que el Sol joven era más tenue, hasta el punto de que una atmósfera moderna dejaría la Tierra primitiva profundamente congelada. Sin embargo, rocas y circones antiguos conservan señales de agua líquida. La retroalimentación ayuda a conciliar los hechos, pero no identifica una atmósfera única.

La fusión de hidrógeno cambia lentamente el interior solar, por lo que los modelos estándar hacen aumentar la luminosidad con la edad. El cálculo de Gough sigue siendo un tratamiento cuantitativo

canónico, y estudios modernos suelen situar la luminosidad arcaica un 18–25 por ciento por debajo de la actual.[21,23] Sagan y Mullen hicieron famosa la tensión en 1972: bajo una atmósfera simple semejante a la moderna, menos luz implicaba una Tierra joven congelada, mientras la geología indicaba agua líquida.[20] «Paradoja» nombra un desacuerdo entre condiciones de contorno y una explicación climática incompleta. Un depósito fluvial antiguo no contradice la evolución estelar.

La evidencia de agua es real, pero estratificada. Las rocas sedimentarias exigen deposición por agua líquida en tiempos y lugares concretos. Circones mucho más antiguos de Jack Hills llevan señales de isótopos de oxígeno y elementos traza interpretadas como interacción entre corteza y agua superficial de baja temperatura hacia hace 4.400 millones de años.[22] Un circón no es un mapa meteorológico global. Limita la existencia de un ciclo agua-roca y corteza diferenciada, no un océano mundial permanente de temperatura conocida. Mantener la distinción evita exigir al archivo más precisión de la que contiene.

Un invernadero más fuerte es el puente principal. Más CO2, y en algunos escenarios metano, puede compensar la menor insolación; la retroalimentación carbonato-silicato ajusta después el CO2 al cambiar luminosidad, tierra y desgasificación.[1,17,20,28] Pero la abundancia requerida no es fija. Los modelos tridimensionales muestran sensibilidad a nubes, rotación, transporte oceánico, fracción terrestre, presión atmosférica y albedo del hielo.[23] El metano puede calentar, aunque la fotoquímica y la neblina orgánica limitan su comportamiento. El CO2 es central porque la geología aporta una retroalimentación, no porque las demás condiciones sean irrelevantes.

Los modelos acoplados convierten el relato en prueba. Krissansen-Totton y sus colegas muestrearon incertidumbre en crecimiento continental, calor interno, desgasificación, metano y meteorización biológica, y calcularon juntos clima y pH oceánico.[17] Halevy y Bachan obtuvieron una historia evolutiva del pH desde ciclos de elementos mayores.[18] Los modelos de zona habitable extienden la relación inversa CO2-temperatura a planetas terrestres alrededor de otras estrellas.[24] Son inferencias estructuradas, no registros instrumentales recuperados. Una tendencia robusta —Sol más brillante, CO2 de equilibrio menor— puede coexistir con incertidumbre sobre temperatura, tierra, metano y reparto de sumideros.

La limitación es poderosa porque sus componentes fallan de modos distintos. Los modelos estelares fijan energía; circones y sedimentos limitan agua y corteza; modelos climáticos traducen gases y albedo en temperatura; los del carbono preguntan si la atmósfera requerida puede persistir.[17,23,24] Su acuerdo estrecha posibilidades sin producir una película única. Una solución que calienta pero exige sumideros siempre mayores que las fuentes no es autoconsistente. El presupuesto prueba las respuestas climáticas, no solo las adorna.

En qué punto estamos

El Sol joven tenue vuelve necesaria la regulación sin convertir un modelo en atmósfera recuperada. Agua líquida, evolución estelar y retroalimentación geoquímica limitan juntos el espacio de soluciones; ninguno aporta una historia única. Ese éxito profundo crea un último malentendido que eliminar: un proceso restaurador lento no borra una liberación de carbono casi instantánea según su propio reloj.

8. La retroalimentación lenta no cancela el calentamiento rápido

Un pulso de CO2 no abandona la atmósfera según un solo reloj exponencial. Primero se reparte entre océano superior y biosfera; después se mezcla por el océano, disuelve carbonato del fondo, reacciona con roca carbonatada continental y finalmente queda equilibrado por meteorización de silicatos y enterramiento.[25–27] Cada etapa cambia de modo distinto concentración, pH y temperatura. La última fracción importa de forma desproporcionada porque los sumideros anteriores se saturan o se acercan a nuevos equilibrios. «La naturaleza elimina CO2» solo es verdad acompañada de una curva de fracción restante contra tiempo.

Archer, Kheshgi y Maier-Reimer ilustraron la separación en un modelo de 1997: la captación oceánica actuaba en unos 200–450 años, la neutralización del carbonato submarino en 5.500–6.800, la meteorización continental de carbonatos hacia 8.200 y el consumo final por rocas ígneas básicas cerca de 200.000 años.[25] No son constantes universales actuales. Son la demostración de un modelo de que el mismo pulso tiene colas oceánica, carbonatada y silicatada. Colbourn y sus colegas estimaron después un e-folding de unos 240.000 años con incertidumbre amplia.[26] Cálculos distintos refuerzan la jerarquía más que cualquier cifra exacta compartida.

La liberación humana de carbono fósil es rápida en todos esos relojes. La meteorización natural consumirá finalmente gran parte de la perturbación, pero no puede impedir calentamiento, acidificación y aumento del nivel del mar durante los siglos y milenios intermedios.[26,27] Esto no niega la meteorización mejorada: triturar roca reactiva y dispersarla deliberadamente acelera el contacto. Separa una intervención de la retroalimentación sin ayuda y mantiene visibles sus costes de minería, energía, verificación y ecología. Un mecanismo que ayuda a volver habitable un planeta durante miles de millones de años puede ser irrelevante para evitar daño antes de que envejezca la próxima generación.

El termostato terrestre no es guardián ni excusa. Es un conjunto acoplado de tendencias químicas y físicas que ha operado bajo un Sol creciente, continentes móviles, vida cambiante y extremos globales. QTC-018 aportó la circulación tectónica que expone y recicla roca; este artículo aporta la retroalimentación carbono-clima sin reducirla a placas. QTC-020 entrará en los ambientes anteriores a la vida y comparará cómo minerales, ultravioleta, flujo hidrotermal y ciclos húmedo-seco pudieron organizar química. Energía y carbono fijan condiciones; todavía no explican la transición a sistemas evolutivos.[1,17,24]

La comparación de escalas protege de malentendidos tanto la ciencia climática como el tiempo profundo. La retroalimentación no es demasiado lenta para importar en un planeta de miles de millones de años ni bastante rápida para volver inocua una perturbación secular.[25–27] Ambas frases son compatibles porque responden preguntas distintas. Un planeta puede tener un mecanismo estabilizador y sufrir transitorios peligrosos; identificarlo explica por qué el transitorio persiste después de cesar las emisiones que lo causaron.

En qué punto estamos

> *El termostato terrestre es una retroalimentación lenta y contingente ensamblada con química, agua, renovación de roca, corteza oceánica y enterramiento. Ayudó a mantener un planeta cambiante dentro de una habitabilidad amplia, pero no selecciona temperatura ni nos rescata en escalas humanas. La pregunta siguiente es qué podía hacer la química en esos ambientes imperfectamente regulados antes de existir herencia y evolución.*

Lo que sabemos y cómo lo sabemos

- La meteorización de silicatos seguida por enterramiento de carbonato transfiere CO2 del sistema superficial a la roca en tiempo geológico.[1,2]
- Clima, escorrentía, erosión, suministro mineral fresco y litología controlan conjuntamente la meteorización continental.[4–9]
- La alteración de basalto oceánico a baja temperatura capta carbono y puede generar alcalinidad.[13–15,32]
- La respuesta de silicatos a un pulso es mucho más lenta que las emisiones humanas y opera durante cientos de miles de años en modelos publicados.[25–27]
- El Sol joven era bastante más tenue mientras materiales geológicos conservan evidencia de agua líquida primitiva.[20–23]

Lo que todavía no sabemos

- La fuerza global exacta de la retroalimentación bajo cada configuración continental pasada.
- Cómo se repartieron el sumidero la meteorización continental y submarina en la Tierra más primitiva.
- La magnitud duradera de la meteorización inversa y otras reacciones autigénicas en océanos antiguos.
- La mezcla atmosférica, temperatura superficial y pH oceánico precisos de cada intervalo primitivo.
- Cómo se reparte el carbono entre liberación en arcos, almacenamiento cortical y transporte profundo en cada subducción.

Qué podría hacernos cambiar de opinión

- Observaciones globales que muestren que la meteorización de silicatos no responde al clima bajo suministro comparable de roca.
- Registros de corteza oceánica antigua que exijan una captación submarina insignificante o dominante donde hoy se modela lo contrario.
- Historias proxy de CO2, temperatura o pH que queden sistemáticamente fuera de conjuntos de modelos acoplados.
- Presupuestos de subducción mejorados que cambien sustancialmente el balance entre carbono devuelto y almacenado en profundidad.
- Un sumidero natural demostrado, rápido y grande para equilibrar la liberación fósil antropogénica en escalas humanas.

Si solo recuerdas una cosa

El termostato terrestre no fija una temperatura. Es una retroalimentación negativa lenta: agua, roca silicatada y enterramiento de carbonato conectan clima y retirada de carbono, con regulación parcial y contingente.

Artículos relacionados

- QTC-018 — El planeta que se mueve
- QTC-020 — Antes de la vida: un planeta lleno de química

Referencias

[1] James C. G. Walker; P. B. Hays; J. F. Kasting. A negative feedback mechanism for the long-term stabilization of Earth's surface temperature. Journal of Geophysical Research 86(C10), 9776–9782 (1981). DOI 10.1029/JC086iC10p09776. https://doi.org/10.1029/JC086iC10p09776

[2] R. A. Berner; A. C. Lasaga; R. M. Garrels. The carbonate-silicate geochemical cycle and its effect on atmospheric carbon dioxide over the past 100 million years. American Journal of Science 283(7), 641–683 (1983). DOI 10.2475/ajs.283.7.641. https://doi.org/10.2475/ajs.283.7.641

[3] Robert A. Berner; Ken Caldeira. The need for mass balance and feedback in the geochemical carbon cycle. Geology 25(10), 955–956 (1997). DOI 10.1130/0091-7613(1997)025<0955:TNFMBA>2.3.CO;2. https://doi.org/10.1130/0091-7613(1997)025%3C0955:TNFMBA%3E2.3.CO;2

[4] K. Maher; C. P. Chamberlain. Hydrologic Regulation of Chemical Weathering and the Geologic Carbon Cycle. Science 343(6178), 1502–1504 (2014). DOI 10.1126/science.1250770. https://doi.org/10.1126/science.1250770

[5] A. West; A. Galy; M. Bickle. Tectonic and climatic controls on silicate weathering. Earth and Planetary Science Letters 235, 211–228 (2005). DOI 10.1016/j.epsl.2005.03.020. https://doi.org/10.1016/j.epsl.2005.03.020

[6] Art F. White; Alex E. Blum. Effects of Climate on Chemical Weathering in Watersheds. Geochimica et Cosmochimica Acta 59(9), 1729–1747 (1995). DOI 10.1016/0016-7037(95)00078-E. https://doi.org/10.1016/0016-7037(95)00078-E

[7] J. Gaillardet; B. Dupré; P. Louvat; C. J. Allègre. Global silicate weathering and CO2 consumption rates deduced from the chemistry of large rivers. Chemical Geology 159, 3–30 (1999). DOI 10.1016/S0009-2541(99)00031-5. https://doi.org/10.1016/S0009-2541(99)00031-5

[8] P. Amiotte Suchet; J. L. Probst. A global model for present-day atmospheric/soil CO2 consumption by chemical erosion of continental rocks (GEM-CO2). Tellus B 47(1–2), 273–280 (1995). DOI 10.3402/tellusb.v47i1-2.16047. https://doi.org/10.3402/tellusb.v47i1-2.16047

[9] Céline Dessert; Bernard Dupré; Jérôme Gaillardet; Louis M. François; Claude J. Allègre. Basalt weathering laws and the impact of basalt weathering on the global carbon cycle. Chemical Geology 202, 257–273 (2003). DOI 10.1016/j.chemgeo.2002.10.001. https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2002.10.001

[10] M. E. Raymo; W. F. Ruddiman. Tectonic forcing of late Cenozoic climate. Nature 359, 117–122 (1992). DOI 10.1038/359117a0. https://doi.org/10.1038/359117a0

[11] Mark Pagani; Ken Caldeira; Robert Berner; David J. Beerling. The role of terrestrial plants in limiting atmospheric CO2 decline over the past 24 million years. Nature 460, 85–88 (2009). DOI 10.1038/nature08133. https://doi.org/10.1038/nature08133

[12] Robert A. Berner; Zavareth Kothavala. GEOCARB III: A revised model of atmospheric CO2 over Phanerozoic time. American Journal of Science 301(2), 182–204 (2001). DOI 10.2475/ajs.301.2.182. https://doi.org/10.2475/ajs.301.2.182

[13] Laurence A. Coogan; Kathryn M. Gillis. Evidence that low-temperature oceanic hydrothermal systems play an important role in the silicate-carbonate weathering cycle and long-term climate regulation. Geochemistry, Geophysics, Geosystems 14, 1771–1786 (2013). DOI 10.1002/ggge.20113. https://doi.org/10.1002/ggge.20113

[14] Patrick V. Brady; Sigurdur R. Gíslason. Seafloor weathering controls on atmospheric CO2 and global climate. Geochimica et Cosmochimica Acta 61(5), 965–973 (1997). DOI 10.1016/S0016-7037(96)00385-7. https://doi.org/10.1016/S0016-7037(96)00385-7

[15] Laurence A. Coogan; Stan E. Dosso. Alteration of ocean crust provides a strong temperature dependent feedback on the geological carbon cycle and is a primary driver of the Sr-isotopic composition of seawater. Earth and Planetary Science Letters 415, 38–46 (2015). DOI 10.1016/j.epsl.2015.01.027. https://doi.org/10.1016/j.epsl.2015.01.027

[16] Terry T. Isson; Noah J. Planavsky. Reverse weathering as a long-term stabilizer of marine pH and planetary climate. Nature 560, 471–475 (2018). DOI 10.1038/s41586-018-0408-4. https://doi.org/10.1038/s41586-018-0408-4

[17] Joshua Krissansen-Totton; Giada N. Arney; David C. Catling. Constraining the climate and ocean pH of the early Earth with a geological carbon cycle model. Proceedings of the National Academy of Sciences 115(16), 4105–4110 (2018). DOI 10.1073/pnas.1721296115. https://doi.org/10.1073/pnas.1721296115

[18] I. Halevy; A. Bachan. The geologic history of seawater pH. Science 355(6329), 1069–1071 (2017). DOI 10.1126/science.aal4151. https://doi.org/10.1126/science.aal4151

[19] Paul F. Hoffman; Alan J. Kaufman; Galen P. Halverson; Daniel P. Schrag. A Neoproterozoic Snowball Earth. Science 281(5381), 1342–1346 (1998). DOI 10.1126/science.281.5381.1342. https://doi.org/10.1126/science.281.5381.1342

[20] Carl Sagan; George Mullen. Earth and Mars: Evolution of Atmospheres and Surface Temperatures. Science 177(4043), 52–56 (1972). DOI 10.1126/science.177.4043.52. https://doi.org/10.1126/science.177.4043.52

[21] D. O. Gough. Solar interior structure and luminosity variations. Solar Physics 74, 21–34 (1981). DOI 10.1007/BF00151270. https://doi.org/10.1007/BF00151270

[22] Simon A. Wilde; John W. Valley; William H. Peck; Colin M. Graham. Evidence from Detrital Zircons for the Existence of Continental Crust and Oceans on the Earth 4.4 Gyr Ago. Nature 409, 175–178 (2001). DOI 10.1038/35051550. https://doi.org/10.1038/35051550

[23] G. Le Hir; Y. Teitler; F. Fluteau; Y. Donnadieu; P. Philippot. The faint young Sun problem revisited with a 3-D climate–carbon model – Part 1. Climate of the Past 10, 697–713 (2014). DOI 10.5194/cp-10-697-2014. https://doi.org/10.5194/cp-10-697-2014

[24] James F. Kasting; Daniel P. Whitmire; Ray T. Reynolds. Habitable Zones around Main Sequence Stars. Icarus 101(1), 108–128 (1993). DOI 10.1006/icar.1993.1010. https://doi.org/10.1006/icar.1993.1010

[25] David Archer; Haroon Kheshgi; Ernst Maier-Reimer. Multiple timescales for neutralization of fossil fuel CO2. Geophysical Research Letters 24(4), 405–408 (1997). DOI 10.1029/97GL00168. https://doi.org/10.1029/97GL00168

[26] G. Colbourn; A. Ridgwell; T. M. Lenton. The time scale of the silicate weathering negative feedback on atmospheric CO2. Global Biogeochemical Cycles 29, 583–596 (2015). DOI 10.1002/2014GB005054. https://doi.org/10.1002/2014GB005054

[27] David Archer. Fate of fossil fuel CO2 in geologic time. Journal of Geophysical Research: Oceans 110, C09S05 (2005). DOI 10.1029/2004JC002625. https://doi.org/10.1029/2004JC002625

[28] Norman H. Sleep; Kevin Zahnle. Carbon dioxide cycling and implications for climate on ancient Earth. Journal of Geophysical Research: Planets 106(E1), 1373–1399 (2001). DOI 10.1029/2000JE001247. https://doi.org/10.1029/2000JE001247

[29] Rajdeep Dasgupta; Marc M. Hirschmann. The deep carbon cycle and melting in Earth's interior. Earth and Planetary Science Letters 298, 1–13 (2010). DOI 10.1016/j.epsl.2010.06.039. https://doi.org/10.1016/j.epsl.2010.06.039

[30] Peter B. Kelemen; Craig E. Manning. Reevaluating carbon fluxes in subduction zones, what goes down, mostly comes up. Proceedings of the National Academy of Sciences 112(30), E3997–E4006 (2015). DOI 10.1073/pnas.1507889112. https://doi.org/10.1073/pnas.1507889112

[31] Terry Plank; Craig E. Manning. Subducting carbon. Nature 574, 343–352 (2019). DOI 10.1038/s41586-019-1643-z. https://doi.org/10.1038/s41586-019-1643-z

[32] K. M. Gillis; L. A. Coogan. Secular variation in carbon uptake into the ocean crust. Earth and Planetary Science Letters 302, 385–392 (2011). DOI 10.1016/j.epsl.2010.12.030. https://doi.org/10.1016/j.epsl.2010.12.030

Antes de la vida: un planeta lleno de química

QTC-020 · 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

Antes de la biología, la Tierra no estaba químicamente vacía. Atmósfera, rocas, meteoritos, luz ultravioleta, rayos, impactos y flujo hidrotermal producían, destruían y redistribuían compuestos orgánicos. La dificultad central no era solo obtener ingredientes, sino concentrar algunos compatibles y enlazar reacciones antes de que dilución o degradación borraran el resultado. Este artículo separa posibilidad experimental de prueba histórica. Miller produjo aminoácidos, no vida; los meteoritos aportaron moléculas orgánicas, no organismos; minerales y respiraderos catalizan reacciones seleccionadas sin proporcionar una ruta completa. Los ciclos húmedo-seco superficiales, sistemas hidrotermales porosos e interfaces minerales resuelven partes distintas y crean inconvenientes distintos. Ninguna cuna ha ganado. La evidencia sostiene un planeta con muchos laboratorios químicos conectados y una pregunta abierta: cuándo la química productiva se volvió evolución.

En 60 segundos

La química prebiótica pregunta qué procesos no biológicos podían operar antes de la evolución heredada. Los experimentos demuestran varias piezas sólidas. Las descargas eléctricas producen aminoácidos en mezclas gaseosas seleccionadas; la luz ultravioleta impulsa redes fotorredox útiles; los meteoritos contienen aminoácidos y azúcares; los choques de impactos pueden sintetizar compuestos orgánicos. Pero ingredientes dispersos en un océano no forman una ruta. Evaporación, congelación, ciclos húmedo-seco, adsorción mineral, termoforesis y poros microscópicos concentran moléculas, mientras arcillas y sulfuros metálicos catalizan ciertas reacciones. Cada mecanismo también causa pérdidas: el ultravioleta destruye productos, los minerales pueden atraparlos, las sales alteran membranas, el calor acelera la descomposición y cada traslado diluye material. Las charcas ofrecen deshidratación y ciclos repetidos. Los sistemas hidrotermales alcalinos ofrecen gradientes sostenidos de pH y redox. Ninguno ha reproducido una ruta continua, abastecida geológicamente, hasta la herencia. Un éxito de laboratorio responde a una pregunta condicional —qué química puede ocurrir aquí—, no a qué ocurrió históricamente. QTC-020 traza esa distinción y se detiene antes de que los sistemas químicos empiecen a evolucionar, frontera de QTC-021.

Por qué importa esta pregunta

Los relatos sobre el origen de la vida suelen convertir un lugar evocador en respuesta: un matraz con chispas, una charca templada, una arcilla o un respiradero alcalino. La evidencia exige más y ofrece más. Ambientes distintos aportan funciones distintas, y sus debilidades importan tanto como las reacciones famosas. Seguir entradas, energía, concentración, catálisis, degradación y transporte

impide transformar un producto de laboratorio en certeza histórica. También revela una posibilidad más profunda: quizá la unidad relevante no fuera una sola cuna, sino una red planetaria conectada cuyas etapas aún deben demostrarse, no solo narrarse.

1. Un planeta anterior a la biología

La pregunta

Si un matraz produce un ingrediente de la vida, ¿qué se ha demostrado exactamente? Establece una posibilidad química bajo condiciones controladas. La afirmación mayor —que la Tierra primitiva proporcionó, concentró y conectó esas condiciones— debe ganarse por separado.

La química prebiótica es química anterior a la biología en sentido explicativo: reacciones que no necesitan células, enzimas ni instrucciones heredadas. No nombra una era única cuyo principio y final estén conservados en roca, ni una receta ya conocida hacia la vida.[1,11,12] Los investigadores reconstruyen materias primas y ambientes posibles, prueban reacciones y comparan productos con límites geológicos. La tarea es histórica además de química. Una molécula obtenida hoy sin biología pudo ser irrelevante hace cuatro mil millones de años si sus reactivos nunca coincidieron, su concentración fue insuficiente o duró demasiado poco.

Esto crea una jerarquía crucial de evidencia. Un experimento establece primero que entradas, aparato, energía y tiempos especificados producen un resultado concreto. Una segunda pregunta examina si la Tierra primitiva podía suministrar cada condición. Una tercera pregunta si el producto se acumularía junto a productos y catalizadores necesarios después.[1,12,14,31] Solo entonces una reacción entra en una ruta histórica. «Plausible en condiciones prebióticas» es, por tanto, condicional: plausible bajo un modelo atmosférico, química lacustre, composición de respiradero o historia de irradiación que deben defenderse.[12,14,16] No certifica que la reacción ocurriera.

El registro experimental ya es impresionante. Se han producido aminoácidos, nucleobases, azúcares, nucleótidos activados, polímeros cortos, compartimentos anfifílicos y redes conectadas de precursores.[1,11,12,18,24] Ningún experimento ha recreado el origen de la vida. No es un desprecio, sino la ubicación del logro. Los bloques no forman automáticamente un sistema; los compartimentos no son células; una red que funciona una vez no posee herencia. QTC-021 examinará el paso ausente a persistencia, variación y selección. Este artículo se queda con el planeta que ofreció oportunidades químicas antes del umbral.

Cinco funciones ordenan la comparación. Un ambiente necesita ingredientes; una fuente de energía capaz de impulsar ciertas reacciones; un modo de concentrar materia; superficies, gradientes o catalizadores que modifiquen velocidades; y ciclos o transporte que conecten pasos.[14,17,25,29,34] La lista no es otra teoría del origen. Sirve para revelar supuestos ocultos. Un poro hidrotermal concentra y aporta energía; una orilla húmedo-seco concentra y cicla; un mineral cataliza un paso y puede retener demasiado el producto para el siguiente. Cada ventaja propuesta crea una desventaja que pertenece a la misma frase.

La Tierra primitiva ofrecía muchos ambientes a la vez. Los impactos atravesaban atmósfera y océano; lluvia y ríos movían solutos sobre roca; la circulación hidrotermal conectaba corteza y mar; aerosoles y meteoritos añadían material externo.[10,21,25,33,34] Esos ambientes podían competir, cooperar u ordenarse en secuencia. Pero dibujar flechas entre ellos todavía no es

química. Cada flecha exige medir tiempo de viaje, supervivencia, flujo y concentración. La primera fase de la investigación es más sencilla: identificar qué materia podían colocar sobre la mesa el planeta y el Sistema Solar.

En qué punto estamos

La química prebiótica empieza con modestia disciplinada: una reacción es real bajo las condiciones que la produjeron, mientras su lugar en la historia terrestre es otra afirmación. Ingredientes, energía, concentración, catálisis y conexión forman la pista de auditoría. La pregunta siguiente sigue los ingredientes: desde gases atmosféricos y penachos volcánicos hasta choques y piedras ricas en carbono llegadas del espacio.

2. Ingredientes del aire, la roca y el espacio

La pregunta

El famoso matraz de chispas suele recordarse como un triunfo que creó vida o un fracaso que usó la atmósfera equivocada. No fue ninguna de las dos cosas. Fue un experimento decisivo cuyo resultado y alcance histórico deben describirse en escalas distintas.

En 1953 Stanley Miller hizo circular agua junto a metano, amoníaco e hidrógeno, lanzó chispas eléctricas por los gases y recogió productos orgánicos. La cromatografía en papel reveló aminoácidos, entre ellos glicina y alanina.[1] El artículo publicado era de Miller. Harold Urey aportó el marco teórico e institucional y supervisó el doctorado, pero no figuró como coautor. La distinción conserva agencia e influencia sin rebautizar el experimento. Y el aparato produjo aminoácidos, no proteínas, células ni vida. Su fuerza duradera fue metodológica: una afirmación sobre química primordial pasó de la especulación a un matraz con productos recuperables.

La mezcla gaseosa era una hipótesis, no una muestra de aire antiguo. Mediciones posteriores de circones hadeanos situaron la fugacidad de oxígeno del magma cerca del tampón fayalita-magnetita-cuarzo, lo que dificulta sostener una atmósfera global y persistente rica en metano y amoníaco procedente de desgasificación volcánica posterior.[2] El redox del manto no fija cada intervalo atmosférico, sobre todo durante acreción e impactos gigantes, pero rompe el relato simple. Mezclas neutras de CO2-N2 también producen compuestos orgánicos bajo descarga si participan hidrógeno u otros reductores, con eficiencias y productos distintos.[3] «La atmósfera era incorrecta» es tan tosco como «el experimento recreó la Tierra».

Los ambientes locales amplían el rango. En 2008 Johnson y sus colegas reanalizaron muestras archivadas del aparato volcánico de Miller y detectaron más aminoácidos de los que resolvían los métodos originales.[4] Parker y sus colegas estudiaron después una muestra de descarga de 1958 rica en H2S y comunicaron 23 aminoácidos y cuatro aminas.[5] Los experimentos respaldan penachos volcánicos reductores o zonas ricas en azufre aunque la atmósfera media lo fuera menos. No demuestran que un penacho albergara el origen. La corrección es geográfica: una media global no elimina reactores locales transitorios.

El espacio aportó otra corriente. El meteorito Murchison contenía aminoácidos e hidrocarburos con evidencia de origen extraterrestre; análisis posteriores hallaron compuestos relacionados con azúcares, y meteoritos carbonáceos han proporcionado ribosa y otros azúcares bajo controles estrictos de contaminación e isótopos.[6,8,9] Algunos alfa-metil aminoácidos meteoríticos muestran

excesos modestos del enantiómero L, prueba de que procesos abióticos crean asimetría molecular antes de la biología.[7] Esto no significa que llegaran organismos. La afirmación defendible es más estrecha: el inventario orgánico no se limitaba a lo producido por la atmósfera terrestre.

Los impactos hicieron más que entregar. Experimentos de choque con materiales que contenían carbono, nitrógeno, hierro y agua produjeron ácidos grasos, aminas y glicina bajo condiciones de impacto oceánico simulado.[10] Los impactos naturales también vaporizarían, oxidarían y enterrarían materia, por lo que no cabe multiplicar productos recuperados por número de cráteres. Atmósfera, volcanes, meteoritos y choques forman una cartera de fuentes cuyas proporciones cambiaron. Una vez disponibles los ingredientes apareció un balance más difícil. La energía que crea una molécula puede destruirla, y una fuente que distribuye productos globalmente puede dejarlos demasiado diluidos.

En qué punto estamos

> *El experimento de Miller sobrevive a la corrección atmosférica porque su resultado profundo fue condicional y experimental: gases simples pueden volverse aminoácidos cuando la energía atraviesa una mezcla adecuada. Zonas volcánicas, meteoritos e impactos amplían el suministro sin entregar vida. El suministro cede ahora ante un problema más agudo: cómo impulsar química útil sin que la propia energía borre sus productos.*

3. Energía que crea y destruye moléculas

Una reacción necesita algo más que ingredientes. Requiere una ruta sobre la barrera de activación y una razón termodinámica continua para avanzar. Miller utilizó descarga eléctrica; la Tierra primitiva ofrecía además fotones ultravioleta, choques, calor geotérmico y diferencias persistentes de redox o pH.[1,10,13,31] Esas fuentes no son monedas intercambiables. Un fotón tiene longitud de onda; una descarga, espectro; un choque, presión e historia de enfriamiento; un gradiente necesita un mecanismo que acople flujo y reacción. Decir que un planeta joven estaba «lleno de energía» no explica ningún producto sin esos detalles.

Los rayos lo muestran. Las descargas fragmentan gases estables y permiten que radicales reactivos se recombinen en compuestos orgánicos, pero los rendimientos cambian mucho con el estado de oxidación y el hidrógeno disponible.[1,3,4] El colector de un experimento también protege productos solubles al apartarlos de nuevas chispas. Una atmósfera natural ofrece lluvia, aerosoles, océanos y roca. Estimar producción exige reunir frecuencia de descarga, composición gaseosa, destrucción y retirada. El mismo relámpago puede iniciar una secuencia sintética y borrar otra molécula antes de que ambas lleguen a un depósito útil.

La luz ultravioleta ofrece una prueba más continua en el espacio. Ritson y Sutherland usaron química fotorredox para obtener azúcares simples desde materias derivadas de HCN; Patel y sus colegas conectaron fotoquímica con precursores de ARN, aminoácidos y lípidos; trabajos posteriores trazaron rutas con sulfito y ferrocianuro.[13–15] Rimmer y sus colegas compararon química luminosa productiva con reacciones oscuras competidoras bajo irradiación dependiente de la longitud de onda.[16] Los fotones seleccionan rutas, no solo calientan. También endurecen el ambiente: profundidad, neblina, blindaje mineral, hora y absorbentes deciden qué luz llega.

La luz tiene doble filo porque la fotoquímica carece de intención. Puede generar electrones hidratados y radicales útiles, romper subproductos inestables, destruir productos deseados o

agotar un sensibilizador.[13–16] Un ambiente plausible puede necesitar fases expuestas para síntesis y fases sombreadas, enterradas u oscuras para conservar. Los ciclos convierten la contradicción en mecanismo solo si los compuestos sobreviven al traslado. La variable importante es la acumulación neta después de toda la historia luz-oscuridad, no el rendimiento máximo en el instante más favorable.

Los gradientes difieren de los pulsos. Donde agua alcalina rica en hidrógeno encuentra un océano más ácido con CO2 a través de barreras minerales, las diferencias de pH y redox persisten mientras continúa el flujo.[29–31] Almacenan energía libre en separación espacial. Pero un gradiente no trabaja si cargas o moléculas no cruzan por una vía catalítica. El calor también acelera síntesis y descomposición; la ribosa, por ejemplo, se degrada con rapidez a alta temperatura bajo condiciones neutras medidas.[35] La energía resuelve activación solo cuando concentración, catálisis y conservación resuelven pérdidas. Eso lleva a lugares donde la materia deja de dispersarse.

En qué punto estamos

> *La energía no es un ingrediente mágico, sino una interacción cronometrada y filtrada entre materia y ambiente. Descargas, fotones, choques, calor y gradientes abren reacciones mientras aceleran pérdidas. Todo escenario debe presentar un balance químico neto después de destrucción y transporte. Los ciclos de agua superficial ofrecen la prueba siguiente: ¿pueden concentración y secado repetidos volver temporalmente reversible la dilución?*

4. Charcas superficiales: concentración mediante ciclos

La expresión «sopa primordial» oculta un problema físico. Un océano global es gran disolvente y enorme diluidor. Las reacciones que unen monómeros suelen liberar agua, por lo que mucha agua puede favorecer la reacción inversa. La hidrología local cambia la aritmética. La evaporación reduce volumen; la congelación expulsa solutos a salmueras; la filtración retira agua; la lluvia reinicia la mezcla.[17,20,33] Nada garantiza química útil, porque sales e inhibidores también se concentran. Pero una charca fluctuante convierte un problema estático en una secuencia donde fases secas y húmedas cumplen tareas distintas.

El fosfato muestra cuánto importa el lugar. El calcio de aguas ordinarias tiende a retirar fosfato en minerales poco solubles. Toner y Catling combinaron experimentos y modelos para mostrar que lagos ricos en carbonato pueden suprimir calcio disuelto mediante precipitación y permitir que el fosfato alcance altas concentraciones con evaporación adecuada.[17] El resultado no dice que todo lago resuelva el fosfato. Exige alcalinidad carbonatada, equilibrio hidrológico y fuentes de fósforo. Su valor es sustituir una escasez planetaria por una clase comprobable de aguas locales.

Los experimentos húmedo-seco han unido reacciones difíciles en agua diluida permanente. Rajamani y sus colegas produjeron polímeros semejantes al ARN desde mononucleótidos en ciclos asistidos por lípidos; Forsythe y sus colegas impulsaron enlaces amida mediados por éster con secados repetidos; Becker y sus colegas mantuvieron síntesis continua de nucleósidos canónicos y no canónicos a través de ciclos.[18–20] Son sistemas distintos, no una ruta completa. Juntos establecen un principio físico: actividad del agua y concentración oscilan, con química de deshidratación en seco y dispersión, plegamiento o encapsulación en húmedo.

Las membranas vuelven visible la química del agua. Milshteyn y sus colegas probaron compuestos anfifílicos seleccionados en agua de un manantial hidrotermal y en agua marina. Las vesículas se ensamblaron en el agua termal, pero no en el agua de mar ensayada, donde sales e iones divalentes interfirieron.[21] No prohíbe todo compartimento marino; otros lípidos y microambientes se comportan distinto. Sí muestra por qué «había agua» es demasiado débil. La composición iónica decide si las mismas moléculas se vuelven frontera o quedan dispersas.

Modelos de charcas templadas combinan aporte meteorítico, degradación, filtración y secado para calcular cuándo podrían acumularse nucleobases.[33] La hipótesis de charcas hidrotermales fluctuantes extiende el ambiente a membranas y selección combinatoria entre fases acopladas.[34] Ambas predicen, pero siguen inciertas la superficie emergida, abundancia de charcas, lluvia, ultravioleta y continuidad de materias primas. Un escenario superficial gana deshidratación y ciclos y acepta desecación, fotólisis y suministro interrumpido. Su afirmación fuerte no es que Darwin acertara. Es que una orilla cambiante puede funcionar como máquina química.

En qué punto estamos

Las charcas convierten geografía en reactivo. Evaporación, congelación y ciclos húmedo-seco concentran solutos, cambian actividad del agua y alternan síntesis con rehidratación; la química lacustre puede liberar fosfato de un cuello aparentemente global. El precio es exposición y continuidad incierta. Un ambiente contrastante sitúa el reactor bajo el agua y sustituye ciclos atmosféricos por paredes minerales, gradientes fluyentes y poros microscópicos.

5. Respiraderos hidrotermales: gradientes y poros

La pregunta

Las palabras «respiradero hidrotermal» evocan una chimenea negra abrasadora, pero los modelos del origen suelen referirse a flujo alcalino más frío a través de barreras minerales porosas. Temperatura, pH, salinidad, minerales y mezcla difieren tanto que la evidencia de uno no vale para todos.

Los sistemas hidrotermales sustituyen el llenado y vaciado de una charca por flujo continuo a través de roca. Russell, Hall y Turner cultivaron chimeneas de sulfuro de hierro en laboratorio al reunir soluciones adecuadas, demostrando que la precipitación construye estructuras compartimentadas de pared fina.[26] Russell y sus colegas propusieron después que membranas catalíticas de sulfuro de hierro en respiraderos alcalinos separaban fluido rico en hidrógeno de un océano más ácido con CO2.[27] La propuesta unía catálisis mineral, compartimentos microscópicos y gradiente electroquímico persistente. Era una hipótesis comprobable, no una primera célula fosilizada.

La fuente atractiva es el desequilibrio geoquímico. La serpentinización y otras reacciones agua-roca generan hidrógeno; su mezcla con dióxido de carbono oceánico crea potencial redox, mientras una diferencia de pH almacena energía protón-motriz.[27,29,31] Las células modernas usan gradientes de protones, pero el parecido no demuestra continuidad. La pregunta prebiótica es si una barrera inorgánica acopla esas semirreacciones sin enzimas. Debe ser permeable para mover materias primas y productos y conservar a la vez separación suficiente para mantener el gradiente.

Ya existen reacciones individuales. Huber y Wächtershäuser formaron derivados activados del ácido acético desde monóxido de carbono y sulfuro de metilo sobre sulfuros de hierro y níquel.[28] Herschy y sus colegas detectaron productos de reducción de carbono en un reactor diseñado para simular respiraderos alcalinos.[29] Barge y sus colegas mostraron que estado redox, pH y temperatura de oxihidróxidos de hierro controlaban la aminación reductora de piruvato a alanina.[30] Cada resultado demuestra una posibilidad catalítica en un sistema definido. Ninguno integra secuencia completa, procedencia de entradas, salida de productos y recurrencia.

Hudson y sus colegas aislaron un paso especialmente informativo. En un dispositivo microfluídico, un gradiente de pH a través de Fe(Ni)S recién precipitado acopló oxidación de hidrógeno y reducción de CO2 a temperatura ambiente y presión moderada. El marcaje isotópico confirmó formiato, en torno a 1,5 micromolar; reducir el gradiente, retirar hidrógeno o eliminar el precipitado no dio producto detectable.[31] Los controles establecen el papel causal del gradiente en esa reacción. No convierten formiato micromolar en metabolismo. La precisión sobre el producto pequeño fortalece el experimento.

Las desventajas son igual de físicas. El agua caliente acelera descomposición de azúcares e intermediarios; los iones marinos alteran compartimentos de ácidos grasos; el flujo abierto diluye; los precipitados envejecen y obstruyen; composición oceánica y flujo hidrotermal siguen inciertos.[21,25,32,35] La termoforesis en poros ofrece una respuesta, pero depende de geometría y diferencia térmica.[25] «Los respiraderos destruyen orgánicos» es demasiado amplio; «resuelven el metabolismo», también. Sistemas porosos más fríos ofrecen gradientes y concentración, pero toda ruta necesita un balance químico compatible.

En qué punto estamos

> *Los sistemas hidrotermales alcalinos convierten flujo continuo en gradientes, compartimentos y catálisis mineral. Reactores controlados demuestran reacciones seleccionadas de carbono y aminoácidos, incluido formiato micromolar impulsado por gradiente, pero no metabolismo vivo. Sus debilidades —calor, sales, dilución y continuidad incierta— llevan a las propias superficies. Los minerales editan química donde agua y roca se encuentran, no solo en respiraderos.*

6. Minerales como editores químicos

Una molécula disuelta explora agua tridimensional; una adsorbida queda junto a sus vecinas en una superficie bidimensional. Eso eleva concentración local, orienta grupos reactivos y altera barreras de activación. También inmoviliza o facilita hidrólisis. «Los minerales catalizaron el origen» comprime selección, concentración y pérdida en un verbo halagador. La pregunta útil compara: qué cara mineral, carga y fluido cambian qué reacción, y si el producto puede salir disponible para el paso siguiente.

La montmorillonita ofrece el ejemplo clásico de polímeros. Ferris y sus colegas mostraron que nucleótidos activados forman oligómeros semejantes al ARN más largos sobre superficies minerales que en la química correspondiente en solución.[22] La arcilla no fabricó los monómeros activados y las secuencias reflejaban el sistema de reacción, no información biológica. El experimento estableció formación de enlaces asistida por superficie. Su uso histórico exigiría activación compatible, suministro repetido y liberación o transferencia antes de que la adsorción se volviera trampa.

Los minerales pueden proteger además de unir. Ricardo y sus colegas encontraron que el borato estabilizaba ribosa en mezclas de formosa y limitaba reordenamiento y descomposición.[23] El resultado aborda una inestabilidad famosa sin resolver todo el problema del azúcar. La Tierra aún debía aportar borato junto a precursores, y trasladar después ribosa estabilizada a activación y nucleótidos. Una solución mineral para un cuello crea un requisito geográfico para el siguiente. Por eso las rutas completas son más difíciles que un catálogo de reacciones exitosas por separado.

Las superficies también conectan compartimentos y polímeros. Hanczyc, Fujikawa y Szostak comunicaron que la montmorillonita aceleraba la conversión de micelas de ácidos grasos en vesículas; partículas de arcilla con ARN adsorbido podían encapsularse.[24] El experimento une tres módulos separados a menudo —catálisis mineral, adsorción de ácidos nucleicos y ensamblaje de membranas— sin afirmar una protocélula completa. Encapsular no produce reproducción ni selección, pero muestra que un mineral no debe quedar fuera. Las partículas transportan química al interior mientras ayudan a formar la frontera.

La física de poros amplía el papel más allá de la adsorción. Baaske y sus colegas usaron gradientes térmicos y convección en poros hidrotermales simulados para acumular nucleótidos en órdenes de magnitud.[25] Geometría, difusión, flujo y temperatura crearon el efecto; un océano caliente genérico no. Juntos, los experimentos indican que los minerales editan química seleccionando lugares y tiempos de residencia, además de reacciones. Concentran, estabilizan, catalizan, encapsulan o secuestran. El signo neto pertenece a toda la mezcla, decisivo cuando deben funcionar varias familias moleculares.

En qué punto estamos

Los minerales no son solución universal, sino una biblioteca de interfaces selectivas. La arcilla alarga oligómeros activados y entra en vesículas; el borato estabiliza ribosa; los poros acumulan nucleótidos. Cada beneficio depende de fluido, materia prima y liberación. El obstáculo siguiente es integrar: si síntesis exitosas por separado de bases, azúcares y precursores de aminoácidos y lípidos pueden coexistir como red, no como museo de reacciones.

7. De bloques de construcción a redes

La pregunta

Supongamos que un experimento produce una nucleobase, otro un azúcar y un tercero una membrana. El inventario crece, pero el problema histórico sigue sin resolverse hasta que reactivos, sales, temperaturas y tiempos compartan una secuencia sin destruirse mutuamente.

Los primeros estudios de síntesis empezaban a menudo con una molécula célebre. Oró calentó cianuro de hidrógeno concentrado y obtuvo adenina, mostrando que cinco unidades pequeñas de HCN se ensamblan en una base purínica bajo condiciones escogidas.[11] La ruta fue poderosa porque conectó una materia prima simple de carbono y nitrógeno con un componente biológico. Su carga histórica seguía siendo la concentración: dónde se produjo, protegió y reunió bastante HCN. Además, la adenina es una base; sin azúcar, fosfato, activación y una ruta de ensamblaje compatible no se vuelve ARN.

Powner, Gerland y Sutherland cambiaron la arquitectura del problema del ribonucleótido. En vez de sintetizar por separado ribosa y base pirimidínica y forzar su unión, usaron una secuencia

donde precursores menores convergían en ribonucleótidos pirimidínicos activados.[12] La irradiación ultravioleta ayudó a destruir estereoisómeros no deseados mientras sostenía la ruta productiva. El logro no fue solo otro componente: mostró que un enlace difícil podía evitarse eligiendo otro camino. Pero orden de reactivos, fosfato, cambios de pH e irradiación aún necesitan coreografía ambiental.

La química de sistemas empuja varias ramas hacia entradas comunes. Ritson y Sutherland produjeron azúcares simples mediante química fotorredox derivada de HCN.[13] Patel y sus colegas comunicaron una red cianosulfídica hacia precursores de ribonucleótidos, aminoácidos y lípidos; Xu y sus colegas ampliaron la homologación reductora fotoquímica con sulfito y ferrocianuro.[14,15] Las materias comunes reducen la improbabilidad de mundos separados. No prueban que cada rama operara simultáneamente. Una corriente común todavía puede dividirse en ambientes con pH, metales o exposición luminosa incompatibles.

La quiralidad añade otro problema de integración. Cronin y Pizzarello midieron excesos modestos del enantiómero L en ciertos alfa-metil aminoácidos meteoríticos.[7] El resultado establece que la química abiótica del Sistema Solar rompe simetría especular antes de la vida. No suministra la casi homoquiralidad de proteínas y ácidos nucleicos ni muestra cómo un exceso extraterrestre pasa a otras familias. Amplificación, selección y conservación siguen por demostrar. La lección correcta es la posibilidad de un sesgo, no el origen resuelto de la lateralidad.

Una red debe funcionar en el tiempo además de en un diagrama. Sales útiles para fosforilar alteran membranas; el ultravioleta que selecciona un producto destruye otro; el calor que acelera síntesis acorta la vida de azúcares; minerales que concentran monómeros retienen polímeros.[16,20,21,23,35] Ambientes secuenciales relajan compatibilidad simultánea, pero añaden transporte, dilución y conservación. La meta experimental no es un matraz perfecto, sino un sistema continuo o cíclico con balance de masa, entradas realistas y productos aún disponibles para la transformación siguiente.

En qué punto estamos

La química de sistemas sustituye la lista de compras por compatibilidad. Adenina, nucleótidos pirimidínicos activados y redes precursoras comunes muestran que una ruta evita viejos cuellos; la asimetría meteorítica prueba que un sesgo abiótico es posible. Pero cada rama lleva sus condiciones al paso siguiente. La evaluación final debe comparar ambientes y secuencias conectadas sin convertir el experimento más vívido en lugar de nacimiento único.

8. Ninguna cuna ha ganado

Los ambientes principales resuelven ecuaciones distintas. Las charcas concentran por evaporación y usan ciclos húmedo-seco para deshidratación. Los sistemas hidrotermales alcalinos mantienen gradientes redox y de pH y aportan poros. Las interfaces minerales adsorben, orientan y catalizan. Meteoritos, atmósfera e impactos amplían entradas.[9,17,25,31,34] Ninguno demuestra todas las funciones y ningún experimento recupera un lugar único solo por funcionar. La comparación correcta pregunta qué cuello resuelve, cuál crea y si se cierra todo el flujo material.

La Tierra ofreció pronto una oportunidad amplia. Los circones de Jack Hills registran interacción corteza-agua hacia hace 4.400 millones de años, lo que implica agua líquida y corteza diferenciada cuando el planeta era joven.[36] No conservan una charca, un respiradero ni fecha del origen. El

contexto geológico funciona mejor como filtro: no se supone tierra emergida sin evidencia; la composición de un respiradero debe seguir reacciones agua-roca; una materia atmosférica debe sobrevivir a la fotoquímica. El archivo limita el diseño del escenario más veces de las que identifica el escenario histórico.

La vida química afina el filtro. Larralde, Robertson y Miller midieron vidas medias de la ribosa de unos 73 minutos a pH 7 y 100 °C y 44 años a pH 7 y 0 °C.[35] No refutan un origen relacionado con ARN, pues síntesis, estabilización, enfriamiento o uso rápido pueden superar la pérdida. Sí prohíben una flecha sin tiempo que diga «la ribosa se acumula» en todo ambiente. Las velocidades son parte de la plausibilidad. Un compuesto existente en análisis puede estar ausente funcionalmente si se destruye más rápido de lo que llega.

Los ambientes conectados siguen siendo plausibles y exigentes. Un producto de impacto podría llover en un lago carbonatado, un ciclo húmedo-seco formar oligómeros y el agua subterránea llevarlos a poros minerales. Cada traslado también puede oxidar, adsorber, hidrolizar o diluir la carga.[10,20,25,33,34] Una historia multietapa se fortalece solo al cuantificar flujo y supervivencia. De otro modo gana flexibilidad desplazando cada dificultad. La red planetaria es un programa de investigación, no una escapatoria por la que experimentos incompatibles cooperan automáticamente.

Lo establecido es considerable: rutas abióticas producen orgánicos diversos; ambientes locales los concentran; luz, minerales y gradientes seleccionan reacciones; compartimentos simples se ensamblan en ciertas aguas.[1,9,12,17,21,24,31] Falta una transición continua y abastecida geológicamente desde esos procesos hasta herencia abierta. La ausencia no vuelve sobrenatural ni incognoscible la emergencia de la vida. Identifica la frontera experimental siguiente. QTC-020 termina con química bastante organizada para persistir. QTC-021 empieza cuando la persistencia puede variar, reproducirse y sufrir selección.

En qué punto estamos

Antes de la vida, la Tierra ya era una red de reactores químicos. Aire, espacio, roca, luz, ciclos del agua, minerales y flujo hidrotermal ofrecían posibilidades complementarias, limitadas por pérdidas e incertidumbre histórica. Ninguna cuna merece exclusividad y ninguna reacción aislada cruzó el umbral biológico. El artículo siguiente pregunta qué organización adicional permite conservar diferencias el tiempo suficiente para que empiece la evolución.

Lo que sabemos y cómo lo sabemos

- Descargas eléctricas, fotoquímica ultravioleta y choques sintetizan compuestos orgánicos desde entradas simples seleccionadas.[1,3,10,13–16]
- Los meteoritos carbonáceos contienen aminoácidos extraterrestres, compuestos relacionados con azúcares y ribosa.[6–9]
- Ciclos húmedo-seco, adsorción mineral, termoforesis y poros concentran o unen moléculas relevantes en experimentos.[17–25]
- Catalizadores minerales y gradientes de pH o redox impulsan ciertas reacciones de carbono y aminoácidos en sistemas hidrotermales controlados.[26–31]
- Ningún experimento ha producido una transición continua y abastecida geológicamente desde materias simples hasta herencia abierta.[12,24,31,34]

Lo que todavía no sabemos

- Qué ambientes primitivos produjeron los mayores flujos útiles, no solo los mayores rendimientos aislados de laboratorio.
- Cómo se acumularon materias compatibles mientras se controlaban sales destructivas, ultravioleta, calor e hidrólisis.
- Si charcas, poros hidrotermales, hielo e interfaces minerales actuaron como alternativas, socios o etapas de una secuencia.
- Cómo se amplificó y mantuvo la quiralidad molecular entre distintas familias de precursores.
- Qué transición experimentalmente reproducible convirtió química productiva en herencia persistente y evolución.

Qué podría hacernos cambiar de opinión

- Un archivo geológico que conecte directamente un ambiente primitivo concreto con productos y condiciones diagnósticos.
- Experimentos continuos donde un ambiente propuesto reúna materias primas, concentración, energía, catálisis y conservación.
- Experimentos de transporte con balance de masa que demuestren supervivencia a través de una secuencia de ambientes.
- Replicación independiente que elimine una ruta clave bajo impurezas, sales, espectros ultravioleta o ciclos térmicos realistas.
- Un sistema reproducible donde entradas geoquímicamente limitadas generen compartimentos con variación heredable y selección sostenida.

Si solo recuerdas una cosa

> *Antes de la vida, la Tierra ofrecía muchos reactores químicos, no una cuna demostrada. Los experimentos establecen reacciones posibles; la historia exige ingredientes, energía, concentración, conservación y transporte compatibles antes de empezar la herencia.*

Artículos relacionados

- QTC-016 — Cómo se construye un planeta
- QTC-019 — El termostato de la Tierra
- QTC-021 — Cuando la química empezó a evolucionar

Referencias

[1] Stanley L. Miller. A Production of Amino Acids Under Possible Primitive Earth Conditions. Science 117(3046), 528–529 (1953). DOI 10.1126/science.117.3046.528. https://doi.org/10.1126/science.117.3046.528

[2] Dustin Trail; E. Bruce Watson; Nicholas D. Tailby. The Oxidation State of Hadean Magmas and Implications for Early Earth's Atmosphere. Nature 480, 79–82 (2011). DOI 10.1038/nature10655. https://doi.org/10.1038/nature10655

[3] H. James Cleaves; John H. Chalmers; Antonio Lazcano; Stanley L. Miller; Jeffrey L. Bada. A Reassessment of Prebiotic Organic Synthesis in Neutral Planetary Atmospheres. Origins of Life and

Evolution of Biospheres 38, 105–115 (2008). DOI 10.1007/s11084-007-9120-3. https://doi.org/10.1007/s11084-007-9120-3

[4] Adam P. Johnson; H. James Cleaves; Jason P. Dworkin; Daniel P. Glavin; Antonio Lazcano; Jeffrey L. Bada. The Miller Volcanic Spark Discharge Experiment. Science 322(5900), 404 (2008). DOI 10.1126/science.1161527. https://doi.org/10.1126/science.1161527

[5] Eric T. Parker; Henderson J. Cleaves; Jason P. Dworkin; Daniel P. Glavin; Michael Callahan; Andrew Aubrey; Antonio Lazcano; Jeffrey L. Bada. Primordial Synthesis of Amines and Amino Acids in a 1958 Miller H2S-Rich Spark Discharge Experiment. Proceedings of the National Academy of Sciences 108(14), 5526–5531 (2011). DOI 10.1073/pnas.1019191108. https://doi.org/10.1073/pnas.1019191108

[6] Keith A. Kvenvolden; James G. Lawless; Katherine Pering; Etta Peterson; Jose Flores; Cyril Ponnamperuma; I. R. Kaplan; Carleton Moore. Evidence for Extraterrestrial Amino-Acids and Hydrocarbons in the Murchison Meteorite. Nature 228, 923–926 (1970). DOI 10.1038/228923a0. https://doi.org/10.1038/228923a0

[7] John R. Cronin; Sandra Pizzarello. Enantiomeric Excesses in Meteoritic Amino Acids. Science 275(5302), 951–955 (1997). DOI 10.1126/science.275.5302.951. https://doi.org/10.1126/science.275.5302.951

[8] George Cooper; Novelle Kimmich; Warren Belisle; Josh Sarinana; Katrina Brabham; Laurence Garrel. Carbonaceous Meteorites as a Source of Sugar-Related Organic Compounds for the Early Earth. Nature 414, 879–883 (2001). DOI 10.1038/414879a. https://doi.org/10.1038/414879a

[9] Yoshihiro Furukawa; Yoshito Chikaraishi; Naohiko Ohkouchi; Nanako O. Ogawa; Daniel P. Glavin; Jason P. Dworkin; Chiaki Abe; Tomoki Nakamura. Extraterrestrial Ribose and Other Sugars in Primitive Meteorites. Proceedings of the National Academy of Sciences 116(49), 24440–24445 (2019). DOI 10.1073/pnas.1907169116. https://doi.org/10.1073/pnas.1907169116

[10] Yoshihiro Furukawa; Toshimori Sekine; Masahiro Oba; Takeshi Kakegawa; Hiromoto Nakazawa. Biomolecule Formation by Oceanic Impacts on Early Earth. Nature Geoscience 2, 62–66 (2009). DOI 10.1038/ngeo383. https://doi.org/10.1038/ngeo383

[11] J. Oró. Mechanism of Synthesis of Adenine from Hydrogen Cyanide under Possible Primitive Earth Conditions. Nature 191, 1193–1194 (1961). DOI 10.1038/1911193a0. https://doi.org/10.1038/1911193a0

[12] Matthew W. Powner; Béatrice Gerland; John D. Sutherland. Synthesis of Activated Pyrimidine Ribonucleotides in Prebiotically Plausible Conditions. Nature 459, 239–242 (2009). DOI 10.1038/nature08013. https://doi.org/10.1038/nature08013

[13] Dougal Ritson; John D. Sutherland. Prebiotic Synthesis of Simple Sugars by Photoredox Systems Chemistry. Nature Chemistry 4, 895–899 (2012). DOI 10.1038/nchem.1467. https://doi.org/10.1038/nchem.1467

[14] Bhavesh H. Patel; Claudia Percivalle; Dougal J. Ritson; Colm D. Duffy; John D. Sutherland. Common Origins of RNA, Protein and Lipid Precursors in a Cyanosulfidic Protometabolism. Nature Chemistry 7, 301–307 (2015). DOI 10.1038/nchem.2202. https://doi.org/10.1038/nchem.2202

[15] Jianfeng Xu; Dougal J. Ritson; Sukrit Ranjan; Zoe R. Todd; Dimitar D. Sasselov; John D. Sutherland. Photochemical Reductive Homologation of Hydrogen Cyanide Using Sulfite and Ferrocyanide. Chemical Communications 54, 5566–5569 (2018). DOI 10.1039/C8CC01499J. https://doi.org/10.1039/C8CC01499J

[16] Paul B. Rimmer; Jianfeng Xu; Samantha J. Thompson; Ed Gillen; John D. Sutherland; Didier Queloz. The Origin of RNA Precursors on Exoplanets. Science Advances 4(8), eaar3302 (2018). DOI 10.1126/sciadv.aar3302. https://doi.org/10.1126/sciadv.aar3302

[17] Jonathan D. Toner; David C. Catling. A Carbonate-Rich Lake Solution to the Phosphate Problem of the Origin of Life. Proceedings of the National Academy of Sciences 117(2), 883–888 (2020). DOI 10.1073/pnas.1916109117. https://doi.org/10.1073/pnas.1916109117

[18] Sudha Rajamani; Alexander Vlassov; Seico Benner; Amy Coombs; Felix Olasagasti; David Deamer. Lipid-Assisted Synthesis of RNA-Like Polymers from Mononucleotides. Origins of Life and Evolution of Biospheres 38, 57–74 (2008). DOI 10.1007/s11084-007-9113-2. https://doi.org/10.1007/s11084-007-9113-2

[19] Jay G. Forsythe; Sheng-Sheng Yu; Irena Mamajanov; Martha A. Grover; Ramanarayanan Krishnamurthy; Facundo M. Fernández; Nicholas V. Hud. Ester-Mediated Amide Bond Formation Driven by Wet-Dry Cycles: A Possible Path to Polypeptides on the Prebiotic Earth. Angewandte Chemie International Edition 54, 9871–9875 (2015). DOI 10.1002/anie.201503792. https://doi.org/10.1002/anie.201503792

[20] Sidney Becker; Christina Schneider; Hidenori Okamura; Antony Crisp; Tynchtyk Amatov; Milan Dejmek; Thomas Carell. Wet-Dry Cycles Enable the Parallel Origin of Canonical and Non-Canonical Nucleosides by Continuous Synthesis. Nature Communications 9, 163 (2018). DOI 10.1038/s41467-017-02639-1. https://doi.org/10.1038/s41467-017-02639-1

[21] Daniel Milshteyn; Bruce Damer; Jeff Havig; David Deamer. Amphiphilic Compounds Assemble into Membranous Vesicles in Hydrothermal Hot Spring Water but Not in Seawater. Life 8(2), 11 (2018). DOI 10.3390/life8020011. https://doi.org/10.3390/life8020011

[22] James P. Ferris; Aubrey R. Hill, Jr.; Rihe Liu; Leslie E. Orgel. Synthesis of Long Prebiotic Oligomers on Mineral Surfaces. Nature 381, 59–61 (1996). DOI 10.1038/381059a0. https://doi.org/10.1038/381059a0

[23] Alonso Ricardo; Matthew A. Carrigan; Alison N. Olcott; Steven A. Benner. Borate Minerals Stabilize Ribose. Science 303(5655), 196 (2004). DOI 10.1126/science.1092464. https://doi.org/10.1126/science.1092464

[24] Martin M. Hanczyc; Shelly M. Fujikawa; Jack W. Szostak. Experimental Models of Primitive Cellular Compartments: Encapsulation, Growth, and Division. Science 302(5645), 618–622 (2003). DOI 10.1126/science.1089904. https://doi.org/10.1126/science.1089904

[25] Philipp Baaske; Franz M. Weinert; Stefan Duhr; Kono H. Lemke; Michael J. Russell; Dieter Braun. Extreme Accumulation of Nucleotides in Simulated Hydrothermal Pore Systems. Proceedings of the National Academy of Sciences 104(22), 9346–9351 (2007). DOI 10.1073/pnas.0609592104. https://doi.org/10.1073/pnas.0609592104

[26] Michael J. Russell; Allan J. Hall; Dugald Turner. In Vitro Growth of Iron Sulphide Chimneys: Possible Culture Chambers for Origin-of-Life Experiments. Terra Nova 1(3), 238–241 (1989). DOI 10.1111/j.1365-3121.1989.tb00364.x. https://doi.org/10.1111/j.1365-3121.1989.tb00364.x

[27] Michael J. Russell; Roy M. Daniel; Allan J. Hall; John A. Sherringham. A Hydrothermally Precipitated Catalytic Iron Sulphide Membrane as a First Step toward Life. Journal of Molecular Evolution 39, 231–243 (1994). DOI 10.1007/BF00160147. https://doi.org/10.1007/BF00160147

[28] Claudia Huber; Günter Wächtershäuser. Activated Acetic Acid by Carbon Fixation on (Fe,Ni)S Under Primordial Conditions. Science 276(5310), 245–247 (1997). DOI 10.1126/science.276.5310.245. https://doi.org/10.1126/science.276.5310.245

[29] Barry Herschy; Alexandra Whicher; Eloi Camprubi; Cameron Watson; Lewis Dartnell; John Ward; Julian R. G. Evans; Nick Lane. An Origin-of-Life Reactor to Simulate Alkaline Hydrothermal Vents. Journal of Molecular Evolution 79, 213–227 (2014). DOI 10.1007/s00239-014-9658-4. https://doi.org/10.1007/s00239-014-9658-4

[30] Laura M. Barge; Erika Flores; Marc M. Baum; David G. VanderVelde; Michael J. Russell. Redox and pH Gradients Drive Amino Acid Synthesis in Iron Oxyhydroxide Mineral Systems. Proceedings of the National Academy of Sciences 116(11), 4828–4833 (2019). DOI 10.1073/pnas.1812098116. https://doi.org/10.1073/pnas.1812098116

[31] Reuben Hudson; Ruvan de Graaf; Mari Strandoo Rodin; Aya Ohno; Nick Lane; Shawn E. McGlynn; Yoichi M. A. Yamada; Ryuhei Nakamura; Laura M. Barge; Dieter Braun; Victor Sojo. CO2 Reduction Driven by a pH Gradient. Proceedings of the National Academy of Sciences 117(37), 22873–22879 (2020). DOI 10.1073/pnas.2002659117. https://doi.org/10.1073/pnas.2002659117

[32] Stanley L. Miller; Jeffrey L. Bada. Submarine Hot Springs and the Origin of Life. Nature 334, 609–611 (1988). DOI 10.1038/334609a0. https://doi.org/10.1038/334609a0

[33] Ben K. D. Pearce; Ralph E. Pudritz; Dmitry A. Semenov; Thomas K. Henning. Origin of the RNA World: The Fate of Nucleobases in Warm Little Ponds. Proceedings of the National Academy of Sciences 114(43), 11327–11332 (2017). DOI 10.1073/pnas.1710339114. https://doi.org/10.1073/pnas.1710339114

[34] Bruce Damer; David Deamer. Coupled Phases and Combinatorial Selection in Fluctuating Hydrothermal Pools: A Scenario to Guide Experimental Approaches to the Origin of Cellular Life. Life 5(1), 872–887 (2015). DOI 10.3390/life5010872. https://doi.org/10.3390/life5010872

[35] R. Larralde; M. P. Robertson; S. L. Miller. Rates of Decomposition of Ribose and Other Sugars: Implications for Chemical Evolution. Proceedings of the National Academy of Sciences 92(18), 8158–8160 (1995). DOI 10.1073/pnas.92.18.8158. https://doi.org/10.1073/pnas.92.18.8158

[36] Simon A. Wilde; John W. Valley; William H. Peck; Colin M. Graham. Evidence from Detrital Zircons for the Existence of Continental Crust and Oceans on the Earth 4.4 Gyr Ago. Nature 409, 175–178 (2001). DOI 10.1038/35051550. https://doi.org/10.1038/35051550

Cuando la química empezó a evolucionar

QTC-021 · 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: Problema abierto

Licencia: All Rights Reserved

Resumen del artículo

La química empezó a evolucionar cuando las diferencias pudieron persistir, copiarse con imperfecciones y modificar el éxito de linajes descendientes. La replicación sola no bastaba. Moléculas autocatalíticas pueden multiplicarse sin acumular adaptaciones; compartimentos pueden crecer y dividirse sin transmitir diferencias útiles; redes de reacciones pueden sostenerse sin volverse hereditarias. Aun así, los experimentos han reconstruido partes poderosas del umbral. El ARN funciona como registro y catalizador, poblaciones moleculares evolucionan en tubos de ensayo, los compartimentos frenan parásitos y una química dependiente de secuencia cambia el crecimiento de protocélulas. Ribozimas recientes sostienen incluso replicación abierta de ARN bajo ciclos controlados. Pero cada sistema integrado todavía hereda de investigadores o de la biología moderna maquinaria, sustratos o reglas de selección sustanciales. La transición desde química geoquímica hasta evolución darwiniana autónoma sigue siendo un problema abierto, no uno vacío.

En 60 segundos

Evolución no es sinónimo de cambio. Para que la química evolucione acumulativamente, alguna entidad o linaje debe persistir o reproducirse; las variantes deben diferir; las diferencias relevantes deben heredarse y modificar el éxito. La copia por plantilla ofrece a las secuencias una ruta directa a la herencia, pero los errores imponen un límite: si la copia es demasiado inexacta, la información se disuelve más deprisa de lo que la selección puede mantenerla. El ARN catalítico hace plausible una etapa de mundo de ARN porque un polímero porta secuencia y realiza química, pero no demuestra una era exclusivamente de ARN. Las redes autocatalíticas muestran automantenimiento colectivo; modelos y experimentos indican que mantener no equivale automáticamente a heredar. Los compartimentos localizan beneficios y parásitos, permitiendo seleccionar paquetes químicos. En laboratorios, sistemas de ARN han mutado, competido, coevolucionado y formado redes cooperativas durante cientos de generaciones. La salvedad es decisiva: empiezan con polimerasas evolucionadas, ribozimas, traducción, fragmentos diseñados, sustratos activados o transferencias gestionadas. Hemos reconstruido selección desde piezas preparadas. Aún no hemos visto entradas geoquímicas iniciar un linaje evolutivo autónomo y abierto.

Por qué importa esta pregunta

Los relatos sobre el origen de la vida suelen declarar victoria en cuanto una molécula se copia o una vesícula se divide. La frontera difícil es causal: ¿pueden las diferencias sobrevivir al ciclo, afectar a descendientes y acumularse bajo selección? Esa pregunta separa química que se repite de química

capaz de mejorar. También convierte las salvedades de laboratorio en información. Cada enzima, fragmento, transferencia y regla de selección suministrados señala una función que la naturaleza tuvo que aportar. Cartografiar esas dependencias transforma demostraciones separadas en un programa preciso y evita confundir la primera química evolutiva con la primera célula.

1. Qué tiene que empezar a evolucionar

La pregunta

Un cristal crece, una llama se propaga y un ciclo químico se repite. Ninguno acumula por ello adaptaciones. ¿Qué vínculo causal adicional permite que una diferencia exitosa sobreviva de forma fiable en descendientes y sirva de plataforma para la mejora siguiente?

La evolución darwiniana necesita más que movimiento por el espacio de estados químicos. Una población de entidades o linajes debe persistir o multiplicarse, diferir de formas relevantes, transmitir parte de esas diferencias y experimentar distinto éxito de supervivencia o reproducción a causa de ellas.[1] Estos criterios no exigen células, ADN, sexo ni código genético moderno. Exigen continuidad causal. Si el rasgo útil de una variante desaparece en cada ciclo, la selección ordena una generación, pero no acumula una adaptación entre generaciones.

La herencia en esta frontera es, por tanto, una relación funcional, no el nombre de una molécula. Copiar secuencias es una forma poderosa. Un compartimento también puede heredar composición y una red de reacciones puede regresar a una de varias organizaciones persistentes.[3,20,22] Pero importa la fuerza de la herencia. Un parecido vago producido por el mismo ambiente no equivale a que el progenitor moldee a sus descendientes. Una memoria débil permite quizá pocos pasos adaptativos; la evolución abierta necesita fidelidad y variación suficientes para conservar mejoras mientras surgen otras.

Tres sustitutos tentadores fallan por separado. La autocatálisis hace que un producto acelere su formación, pero producir más deprisa no crea necesariamente tipos heredados alternativos.[17,20] El recambio metabólico mantiene una red lejos del equilibrio, pero un flujo sostenido no recuerda qué variante funcionó mejor.[20,36] Una vesícula puede crecer y partirse por física ordinaria de membranas mientras reparte contenidos al azar o no porta contenidos relevantes.[24,27] Multiplicación, mantenimiento y encierro son ingredientes de la evolutividad, no definiciones intercambiables.

También importa la unidad expuesta a selección. Una molécula que se copia deprisa puede prosperar mientras destruye la red que aporta su catalizador. Un compartimento puede reproducirse más rápido porque sus contenidos generan membrana, aunque una molécula interna se copie más despacio.[22,23] La selección actúa en ambos niveles y sus intereses pueden chocar. El problema del origen no es solo cómo apareció el primer replicador, sino cómo el éxito molecular quedó acoplado a la persistencia de una organización química mayor.

Esto proporciona una escala de evidencia. Podemos preguntar si un sistema copia, si la copia genera variantes heredadas, si el éxito depende de ellas, si el proceso continúa muchos ciclos y si la maquinaria de cada paso es interna en vez de suministrada por el experimentador.[2,12,16,30,34] Muchos experimentos alcanzan varios peldaños. Ninguno comienza con materias geoquímicas y los sube todos autónomamente. Por eso el perfil es Problema abierto aunque gran parte de la ciencia experimental subyacente esté establecida.[16,35,36]

En qué punto estamos

El umbral no es una chispa mística entre no vida y vida. Es una cadena de dependencias comprobables: persistencia, variación, herencia y éxito diferencial, unidas con fuerza suficiente para acumular mejoras. La forma más directa de conservar una diferencia química es copiar su secuencia; el paso siguiente sigue los primeros linajes moleculares construidos sobre plantillas.

2. Copiar crea un linaje

Una plantilla hace algo químicamente inusual: consigue que el orden de unidades de un polímero existente influya en el orden ensamblado en otro. La copia complementaria alterna cadenas positiva y negativa, mientras la ligación ensambla una copia desde fragmentos mayores.[2,12,37] Cualquiera crea descendencia con modificación si la copia cambia a veces la secuencia. También separa herencia de abundancia. Dos moléculas pueden ser igual de numerosas, pero solo aquella cuya estructura ayuda a determinar descendientes transmite información de secuencia.

El laboratorio de Sol Spiegelman hizo visible esa distinción mediante el bacteriófago de ARN Qβ. En 1967 Donald Mills, Robert Peterson y Spiegelman transfirieron repetidamente ARN a mezclas frescas con replicasa Qβ y sustratos nucleotídicos activados.[2] Variantes que se replicaban bien bajo ese régimen acabaron dominando. El experimento sometió poblaciones moleculares a una ecología definida: tiempo de copia, dilución y reconocimiento por la enzima determinaban la aptitud. Hubo evolución fuera de una célula porque diferencias heredadas de secuencia alteraron el éxito entre transferencias.

Los ARN acortados famosos de esa investigación suelen llamarse monstruos de Spiegelman. La lección no es que la evolución simplifique inevitablemente. Es que la aptitud responde a una pregunta local: ¿éxito para qué?[2,5] En un tubo donde replicasa proteica y sustratos son gratuitos, un ARN que descarta funciones virales se copia más rápido. Dentro de un virus, perder cápside e infección sería desastroso. La selección optimiza bajo el ambiente impuesto, no el progreso hacia vida o complejidad.

La salvedad vale para la evolución in vitro moderna. Los investigadores inician una población, definen un objetivo como unión o catálisis, retienen moléculas exitosas y las amplifican con enzimas sofisticadas.[9–11] El resultado revela regiones funcionales del espacio de secuencias y muestra cómo mutación y selección lo recorren. No explica por sí mismo de dónde vinieron la primera población seleccionable, la química de amplificación o el criterio ambiental. El experimentador desempeña temporalmente funciones que un sistema autónomo tendría que internalizar.

Copiar también es químicamente plural. Oligómeros nucleotídicos complementarios promueven su formación mutua, péptidos sirven de plantilla para copias peptídicas y enzimas de ARN se replican cruzadamente desde fragmentos suministrados.[12,18,37] Estas demostraciones impiden reducir el origen a una molécula inevitable. También revelan un cuello común: los productos se unen a plantillas, los fragmentos deben activarse y los catalizadores reconocen sustratos estrechos. Solo existe linaje si la copia supera degradación y dilución durante ciclos repetidos.

En qué punto estamos

La copia por plantilla hace químicamente legible la ascendencia, y los experimentos con Qβ demuestran que poblaciones moleculares se adaptan fuera de células. Pero cada bit copiado tiene un

coste: los errores generan novedad y también erosionan lo conservado por selección. Cuando la secuencia se vuelve registro, la pregunta siguiente es cuantitativa: ¿cuánta inexactitud tolera antes de desaparecer?

3. La fidelidad limita la información

La pregunta

Sin errores de copia, un linaje no descubre nuevas funciones de secuencia. Con demasiados, no conserva las ya encontradas. ¿Cómo cruzó la química primitiva esa frontera móvil antes de poder codificar las propias enzimas de alta precisión?

Manfred Eigen formalizó la disyuntiva central en 1971. Si una secuencia se copia con cierta probabilidad de error en cada posición, la probabilidad de una copia enteramente correcta cae al crecer la longitud.[3] La selección solo mantiene una secuencia favorecida cuando su ventaja reproductiva compensa la pérdida mutacional. El umbral de error resultante no es un número universal. Depende de longitud, fidelidad por unidad, diferencias de aptitud y estructura poblacional.[3,4] La capacidad informativa primitiva era una cantidad ecológica y cinética, no solo propiedad molecular.

La expresión catástrofe de error engaña si se usa como sinónimo dramático de mutación. En modelos ideales, cruzar un umbral deslocaliza la población de una secuencia favorecida; poblaciones finitas, mutaciones neutras, recombinación y paisajes cambiantes suavizan o alteran la transición.[3,4] El punto duradero es más sencillo. La información se mantiene físicamente mediante producción repetida y suficientemente fiel. Una secuencia larga no permanece como instrucción solo porque apareció una vez. Debe ganar continuamente la carrera entre copia exacta, copia errónea, degradación y sustitución.

Poblaciones reales de ARN aportaron un equivalente empírico. Esteban Domingo y sus colegas secuenciaron descendientes de un fago Qβ clonado y encontraron una población heterogénea, no un genoma invariable.[5] Mutación y selección mantenían una nube de secuencias relacionadas. Esas observaciones impulsaron la teoría de cuasiespecies, pero la etiqueta exige cuidado: no toda población viral variable cumple cada supuesto matemático. Para investigar orígenes, importa que la herencia puede residir en una población estructurada aunque ninguna molécula se copie perfectamente.

El error también interactúa con el egoísmo. Plantillas cortas pueden copiarse deprisa y explotar catalizadores producidos por secuencias funcionales mayores. En masa, borran quizá el sistema que las posibilita.[2,31,32] Elevar la fidelidad no resuelve el conflicto; puede reproducir fielmente un parásito. Estructura espacial, enlace y compartimentos importan porque hacen que los efectos de una secuencia recaigan más sobre socios y descendientes cercanos. La capacidad informativa queda limitada por organización ecológica además de exactitud química.

El problema de arranque suele llamarse paradoja de Eigen. Polimerasas precisas sostendrían secuencias más largas, pero las instrucciones para polimerasas precisas son largas.[3,16,36] Entre las salidas candidatas están genomas tempranos cortos, información distribuida entre moléculas cooperantes, catalizadores toscos mejorados por etapas y selección entre compartimentos. Ninguna es absurda ni está establecida como ruta histórica. Una solución debe mostrar no solo que

existe alta fidelidad, sino cómo un sistema con poca información pudo alcanzarla sin perder continuidad.

En qué punto estamos

La fidelidad convierte la replicación en un canal de capacidad finita. Variación insuficiente congela la novedad; demasiada disuelve la ascendencia; los parásitos explotan ambos regímenes. Un polímero temprano prometedor debía portar información y ayudar a ejecutar la química que la conserva. Descubrir que el ARN cataliza reacciones hizo experimentalmente real ese doble papel.

4. El ARN puede ser catalizador y registro

La pregunta

Las células modernas dividen trabajo entre ADN, ARN y proteínas, de modo que su origen conjunto parece circular. Si un solo polímero almacenara secuencia y realizara química, ¿podría servir de puente antes de existir esa división?

En 1982 Kelly Kruger, Thomas Cech y colegas mostraron que una secuencia intercalada de ARN de Tetrahymena podía escindirse y ciclarse sin que una enzima proteica realizara la reacción clave.[6] En 1983 Cecilia Guerrier-Takada, Sidney Altman y colegas mostraron que el componente de ARN de la RNasa P bacteriana catalizaba corte de ARN bajo condiciones iónicas concretas.[7] No eran moléculas primordiales autorreplicantes. Fueron demostraciones decisivas de que el ARN no se limita a portar mensajes: su estructura plegada crea función catalítica.

Walter Gilbert nombró el mundo de ARN en 1986: una etapa donde el ARN habría combinado genotipo y fenotipo antes de que el ADN fuera archivo principal y las proteínas catalizadores principales.[8] La idea resuelve una división lógica del trabajo, no todo el origen. Deja por explicar síntesis de precursores, activación, polimerización, separación de cadenas, fidelidad y compartimentación. El ARN catalítico demuestra posibilidad química. No es prueba geológica de que la Tierra atravesara una era pura o universal exclusivamente de ARN.[6–8]

La selección de laboratorio amplió el catálogo catalítico. Desde enormes conjuntos de secuencias aleatorias, David Bartel y Jack Szostak aislaron nuevas ribozimas; Ronald Breaker y Gerald Joyce observaron después emerger una especie replicante dentro de una reacción de evolución de ARN.[9,10] La selección continua mejora función entre ciclos.[11] Los resultados muestran que el espacio de secuencias de ARN contiene catalizadores accesibles. También importa su maquinaria: polimerasas proteicas, retrotranscripción, PCR, sustratos preparados y selección definida por investigadores aportaron pasos no realizados por el ARN seleccionado.

Las ribozimas polimerasas de ARN han cruzado desde entonces hitos notables. Han transcrito ribozimas activas, amplificado plantillas diversas y usado bloques trinucleotídicos para invadir plantillas estructuradas.[13–15] En 2025 James Attwater y colegas acoplaron tripletes activados a ciclos de pH y congelación-deshielo, logrando copia exponencial de ambas cadenas, copia parcial de la ribozima polimerasa y evolución abierta de conjuntos de secuencias.[16] Los propios sustratos atacaban el problema de separar cadenas: atrapaban las disociadas antes de su rápido reapareamiento.

El logro estrecha la distancia sin borrarla. El catalizador de 2025 era una ribozima heterodimérica artificial evolucionada in vitro y recibió tripletes activados, cebadores y ciclos ambientales

gestionados.[16] Las enzimas de ARN con replicación cruzada de Lincoln y Joyce se amplificaban sin proteínas, pero cada socio ensamblaba al otro desde cuatro oligonucleótidos suministrados.[12] Estos sistemas demuestran replicación y selección desde piezas preparadas. Aún no muestran cómo una mezcla geoquímica produce catalizador, alimento activado y ciclo que mantenga ambos.

En qué punto estamos

> *El ARN une registro y acción catalítica, y ribozimas actuales realizan hazañas especulativas hace una generación. La inferencia histórica sigue limitada por lo que aporta el laboratorio. La replicación por plantilla tampoco es la única ruta propuesta hacia química organizada: redes enteras de reacciones se cierran, sostienen sus componentes y plantean otra pregunta sobre herencia.*

5. Las redes autocatalíticas todavía no son herencia

Una molécula no necesita fabricar una copia literal de sí misma para que un sistema sea autocatalítico. En un conjunto colectivamente autocatalítico, los productos catalizan reacciones que, mediante una red, regeneran el conjunto desde alimento externo. Stuart Kauffman y J. Doyne Farmer estudiaron cómo surge ese cierre cuando las conexiones catalíticas modeladas son suficientemente densas.[17] La propuesta importa porque la organización puede distribuirse: ningún replicador maestro contiene instrucciones para cada reacción. La red completa conserva la capacidad de reconstruir a sus miembros.

Sin embargo, el cierre responde a una pregunta de producción antes que a una evolutiva. Una red puede regresar siempre a la misma composición tras una perturbación. Si organizaciones alternativas no se transmiten con fiabilidad, la selección no tiene estados estables que comparar.[20] La velocidad de crecimiento no basta cuando un estado rápido no siembra descendientes semejantes. Los conjuntos autocatalíticos ofrecen así un metabolismo posible y una unidad reproductiva posible, pero la herencia debe demostrarse, no introducirse clandestinamente mediante la palabra autoorganización.

Los experimentos con péptidos concretan la distinción. En 1996 David Lee y colegas construyeron un péptido que sirve de plantilla para ensamblar copias desde dos fragmentos.[18] Otro sistema posterior formó una red hipercíclica donde replicadores peptídicos distintos se promovían mutuamente, una forma experimental de simbiosis molecular.[19] Eran retroalimentaciones químicas reales. Usaban secuencias y fragmentos preparados y no generaban espontáneamente un repertorio indefinidamente expansible de funciones heredadas. Había autorreplicación y cooperación; no evolución darwiniana abierta.

Las redes de ARN llegan más lejos. Nilesh Vaidya y colegas mezclaron fragmentos que se ensamblaban en ribozimas autorreplicantes y observaron ciclos catalíticos cooperativos.[21] Una red de tres miembros creció mejor que ciclos autocatalíticos egoístas, y la selección in vitro alteró el comportamiento de la red. El resultado muestra que la cooperación molecular afecta al éxito. No demuestra que los fragmentos participantes surgieran juntos en la Tierra primitiva: el sistema descendía de un intrón moderno del grupo I y fue configurado para probar esas interacciones.

Un resultado negativo valioso vino de Vera Vasas y colegas. En sus modelos, conjuntos autocatalíticos convencionales no acumulaban adaptaciones solo por sostenerse.[20] La evolutividad requería núcleos alternativos especiales, transiciones raras y compartimentos que permitieran seleccionar organizaciones químicas distintas. La conclusión no es que las propuestas

de metabolismo primero sean imposibles. Es que cada propuesta debe identificar estados hereditarios, mostrar cómo los conservan descendientes y demostrar que la selección mueve la población hacia mejora acumulativa.

En qué punto estamos

> *Las redes autocatalíticas explican cómo la producción puede ser colectiva, y los experimentos muestran que la cooperación molecular es alcanzable. Su debilidad es diagnóstica: sin organizaciones hereditarias distintas, el automantenimiento carece de memoria evolutiva. Los compartimentos ofrecen una vía al mantener juntos productos, costes y descendientes el tiempo suficiente para que la selección compare paquetes químicos completos.*

6. Los compartimentos localizan la selección

En una solución bien mezclada, un catalizador útil ayuda quizá a cada replicador cercano, incluidos parásitos que no aportan nada. Un compartimento cambia la contabilidad. Beneficios y costes se concentran entre moléculas limitadas, y la división envía muestras de esa química local a descendientes.[22,23] La misma frontera crea riesgos: socios pueden separarse, componentes raros perderse y nutrientes quedar fuera. Compartimentar no beneficia automáticamente. Su valor evolutivo depende de tamaño, permeabilidad, mezcla, crecimiento y reparto de contenidos.

Membranas simples ya realizan varias operaciones físicas necesarias. Martin Hanczyc, Shelly Fujikawa y Jack Szostak mostraron que vesículas de ácidos grasos encapsulan ARN, crecen y se dividen en laboratorio.[24] Ting Zhu y Szostak acoplaron crecimiento de membrana a formación de filamentos y división sin citoesqueleto proteico.[27] Kensuke Kurihara y colegas combinaron después amplificación de ADN encapsulado con reproducción de vesículas gigantes.[29] Cada sistema unió funciones importantes, pero suministros o intervenciones externas aún impulsaban partes del ciclo.

Un experimento especialmente revelador conectó polímeros internos y competencia. Irene Chen, Richard Roberts y Szostak cargaron vesículas de ácidos grasos con ácidos nucleicos. Su presión osmótica elevó la tensión de membrana, haciendo que vesículas tensas adquirieran ácido graso de competidoras relajadas y crecieran.[25] El polímero no codificaba una enzima de membrana; la física ordinaria conectaba abundancia interna con fenotipo. Si copiar mejor produjera más polímero atrapado, un replicador podría volver competitivo su compartimento sin inventar primero metabolismo moderno.

Otros experimentos unieron copia o catálisis al interior. Sheref Mansy y colegas mostraron que nucleótidos activados atravesaban membranas adecuadas de ácidos grasos y extendían una plantilla genética dentro.[26] Katarzyna Adamala y Szostak encapsularon un catalizador cuyos productos cambiaban el crecimiento de membrana, dando ventaja competitiva a protocélulas con catalizador.[28] Los resultados crean piezas de un vínculo genotipo–fenotipo. Sin embargo, los investigadores instalaron plantillas o catalizadores y ningún sistema reprodujo autónomamente función interna y membrana durante generaciones indefinidas.

Un experimento de 2026 añadió otro puente físico. Akiko Baba y colegas midieron cómo secuencias peptídicas definidas cambiaban velocidades de crecimiento de vesículas de ácido decanoico, revelando un paisaje de aptitud dependiente de secuencia y epistasia.[35] Los autores usaron explícitamente el crecimiento como aproximación: las vesículas no completaban división y los

péptidos preparados no eran sintetizados ni heredados. Esa limitación es el punto. La secuencia ya modifica el desempeño del compartimento; un linaje aún debe reproducirla y acoplar crecimiento a descendientes.

En qué punto estamos

Los compartimentos convierten química privada en consecuencias seleccionables del paquete. Las membranas crecen, se dividen, admiten sustratos y responden a contenidos, mientras la secuencia altera crecimiento. Pero localizar también crea competidores que explotan maquinaria compartida. La prueba más fuerte no es una protocélula aislada, sino una población con cooperadores, parásitos y descendientes durante muchos ciclos.

7. Cooperación, parásitos y evolución experimental

Los parásitos no son una complicación tardía añadida después de empezar la evolución. Son consecuencia inmediata de compartir maquinaria de copia. Un ARN corto que conserva reconocimiento por la polimerasa y abandona el coste de producirla supera a su huésped funcional.[2,31] En masa, la ventaja del parásito se extiende globalmente y puede colapsar el sistema. En compartimentos, algunos huéspedes quedan con pocos parásitos, se reproducen y siembran la ronda siguiente. El reparto local hace visible a la selección la función del sistema.

La teoría anticipó el efecto. El modelo corrector estocástico de Eörs Szathmáry y László Demeter mostró cómo la competencia entre compartimentos mantiene varios replicadores necesarios pese a la competencia interna.[22] Modelos espaciales posteriores compararon paquetes discretos y dispersión limitada, encontrando regiones donde selección de nivel superior estabiliza cooperación.[23] No son garantías universales. Compartimentos demasiado grandes se parecen al medio masivo; demasiado pequeños pierden socios indispensables. La selección opera en una ventana cuantitativa de reparto, crecimiento y mezcla.

Los experimentos ya han entrado en esa ventana. Shigeyoshi Matsumura y colegas sometieron ARN funcionales y parásitos a ciclos repetidos de compartimentación transitoria en gotas y mezcla. Los replicadores funcionales sobrevivieron en vez de ser eliminados.[32] El resultado demuestra que células reproductoras permanentes no son la única estructura poblacional posible. También usó replicasa Qβ, un ARN diseñado con ribozima, microfluidos y selección gestionada. Aerosoles, poros, vetas de hielo o vesículas naturales siguen siendo análogos propuestos, no lugares históricos demostrados.

Norikazu Ichihashi y colegas construyeron un genoma de ARN que codificaba una subunidad de replicasa Qβ dentro de gotas de agua en aceite y siguieron unas 600 generaciones. Se acumularon mutaciones y dominaron variantes con mejor replicación.[30] Yohsuke Bansho y colegas añadieron después ARN parásito. Las poblaciones masivas colapsaron, mientras las compartimentadas mostraban oscilaciones huésped–parásito y coexistencia evolucionada.[31] Son dinámicas darwinianas y ecológicas ricas. Su motor incluía traducción reconstituida de Escherichia coli, factores modernos y transferencias controladas.

Experimentos más largos revelaron cooperación además de conflicto. Ryo Mizuuchi e Ichihashi sostuvieron dos ARN funcionales que se ayudaban a replicarse pese a parásitos, y la cooperación mejoró durante la evolución.[33] Extender más el linaje produjo varios linajes de huéspedes y parásitos y una red donde un ARN ayudaba a replicar a los demás.[34] La red no estaba diseñada

por completo de antemano; las interacciones surgieron por mutación y selección. Pero huésped ancestral, replicasa derivada de Qβ, traducción y régimen de gotas procedían de ingeniería biológica, no de química prebiótica.

En qué punto estamos

Los ecosistemas moleculares experimentales ya mutan, se adaptan, oscilan, resisten parásitos y evolucionan cooperación. Demuestran que los compartimentos convierten copia química en ecología sostenida. Su infraestructura heredada de laboratorio señala la distancia restante sin disminuir el resultado. La pregunta final es si todas las funciones esenciales pueden arrancar desde química plausible sin que el experimentador aporte el organismo ausente.

8. El umbral no ha sido reconstruido

La pregunta

Ya no queda un único hueco llamado origen de la evolución. Existe una prueba de integración: en condiciones plausibles de la Tierra primitiva, ¿pueden materias primas, copia, catálisis, energía, reproducción de compartimentos y selección sostenerse mutuamente sin subsidios biológicos ocultos?

El paisaje experimental ya no es una lista de ingredientes aislados. La copia se ha unido a selección; la secuencia de ARN al fenotipo catalítico; polímero o catalizador interno al crecimiento de vesículas; compartimentos al control de parásitos; y selección prolongada a redes moleculares cooperativas.[12,25,28,30–35] Estos acoplamientos vuelven obsoleta la afirmación de que el problema es experimentalmente inaccesible. También hacen insostenible declarar vagamente que se ha creado vida. Cada resultado especifica qué era interno y qué seguía aportando el aparato.

El experimento de 2025 con polimerasa de tripletes es el ejemplo más claro de progreso que cambia la pregunta. Superó una barrera importante de separación de cadenas, copió ambas cadenas de ARN exponencialmente y permitió cambiar a conjuntos aleatorios sin una secuencia final prefijada.[16] Pero la ribozima ya había evolucionado en laboratorio, y se aportaron tripletes activados, cebadores, cambios de pH y tiempos de congelación-deshielo. El problema siguiente no es si existe replicación abierta de ARN bajo alguna condición, sino cómo el sistema catalítico y su ciclo operativo se autoabastecen y heredan juntos.

El ecosistema de ARN de 2022 ilustra un logro complementario. Desde un linaje huésped diseñado, mutación y selección generaron varios linajes persistentes de huéspedes y parásitos con interacciones cooperativas.[34] Es complejización genuina, no mera amplificación repetida. Pero comenzó después de traducción, una replicasa proteica codificada, nutrientes preparados y gotas gestionadas. Demuestra qué hace una ecología molecular evolutiva una vez existe una plataforma potente. No explica la transición desde la química de QTC-020 hasta esa plataforma.

La teoría actual explora órdenes alternativos. Un modelo de 2026 de Raquel Nunes Palmeira y colegas encontró condiciones donde secuencias que apoyan crecimiento de protocélulas aparecen antes que secuencias que apoyan copia, porque crecer más expande el acceso a monómeros y espacio de secuencias.[36] El resultado invierte un relato simple de información primero, pero deriva de un modelo que supone metabolismo rudimentario, polímeros aleatorios, copia, traducción y correspondencias entre propiedades y función. Es una propuesta comprobable sobre orden, no historia recuperada.

El criterio exigente ya es explícito. Partir de entradas geoquímicas limitadas; generar una organización replicante persistente; producir variación heredada; vincular variantes al éxito del compartimento o red; y sostener adaptación abierta sin importar enzimas evolucionadas ni un algoritmo externo de selección.[16,20,35,36] La naturaleza no tuvo que hacerlo en un recipiente o salto. Una ruta por etapas y ambientes contaría si materia y función siguen siendo trazables. Ningún experimento cumple aún ambas formas de prueba. QTC-022 comienza tras este umbral no resuelto, con las primeras células inferidas desde evidencias que no presenciamos.

En qué punto estamos

La química empezó a evolucionar cuando el éxito dejó una huella transmisible capaz de mejorar otra vez. Los experimentos reconstruyen hoy esa lógica con precisión extraordinaria, mientras sus piezas suministradas revelan el arranque pendiente. El artículo siguiente pasa del umbral a sus descendientes: células cuyos comienzos nadie observó y que debemos inferir desde rocas, genomas y maquinaria molecular compartida.

Lo que sabemos y cómo lo sabemos

- Poblaciones moleculares sufren mutación, selección y adaptación fuera de células cuando se suministran copia y transferencias.[2,9–12]
- El ARN almacena secuencia y cataliza reacciones, y ribozimas evolucionadas sostienen copia de ARN cada vez más general.[6–8,13–16]
- Moléculas y redes autocatalíticas se mantienen o cooperan sin garantizar por ello herencia acumulativa.[17–21]
- Los compartimentos vinculan química interna con crecimiento y protegen replicadores funcionales frente a parásitos.[22–35]
- Ningún sistema inicia aún evolución darwiniana abierta desde entradas geoquímicas limitadas sin maquinaria biológica evolucionada.[16,20,35,36]

Lo que todavía no sabemos

- Qué entidad u organización química aportó primero herencia suficiente para selección acumulativa.
- Cómo cruzó la copia temprana la barrera fidelidad–información antes de codificar catalizadores precisos.
- Si replicadores por plantilla, redes autocatalíticas, metabolismo y compartimentos surgieron en secuencia o conjuntamente.
- Qué estructuras poblacionales naturales controlaron parásitos antes de existir división celular reproducible.
- Cómo materias geoquímicas, energía y ciclos ambientales se convirtieron en una ecología evolutiva autónoma.

Qué podría hacernos cambiar de opinión

- Un replicador autónomo formado desde entradas geoquímicas limitadas que sostenga adaptación heredada sin enzimas evolucionadas.
- Un linaje de protocélulas que acople copia interna, catálisis útil, crecimiento de membrana y división durante muchas generaciones.

- Arranque experimental directo de fidelidad y capacidad informativa desde un sistema más simple y poco preciso.
- Compartimentos o estructuras espaciales naturalistas que supriman parásitos repetidamente sin gestión microfluídica.
- Un experimento por etapas y con balance de masa que conecte ambientes prebióticos con un ecosistema molecular evolutivo abierto.

Si solo recuerdas una cosa

La química solo evoluciona cuando diferencias heredadas alteran el éxito descendiente y se acumulan. Los laboratorios combinan copia, catálisis, compartimentos y selección, pero aún no su arranque autónomo desde entradas geoquímicas.

Artículos relacionados

- QTC-008 — La vida funciona con gradientes
- QTC-009 — ¿Qué queremos decir realmente cuando hablamos de vida?
- QTC-020 — Antes de la vida: un planeta lleno de química
- QTC-022 — Las primeras células que nunca vimos

Referencias

[1] Richard C. Lewontin. The Units of Selection. Annual Review of Ecology and Systematics 1, 1–18 (1970). DOI 10.1146/annurev.es.01.110170.000245. https://doi.org/10.1146/annurev.es.01.110170.000245

[2] D. R. Mills; R. L. Peterson; S. Spiegelman. An Extracellular Darwinian Experiment with a Self-Duplicating Nucleic Acid Molecule. Proceedings of the National Academy of Sciences 58(1), 217–224 (1967). DOI 10.1073/pnas.58.1.217. https://doi.org/10.1073/pnas.58.1.217

[3] Manfred Eigen. Selforganization of Matter and the Evolution of Biological Macromolecules. Naturwissenschaften 58, 465–523 (1971). DOI 10.1007/BF00623322. https://doi.org/10.1007/BF00623322

[4] Jörg Swetina; Peter Schuster. Self-Replication with Errors: A Model for Polynucleotide Replication. Biophysical Chemistry 16, 329–345 (1982). DOI 10.1016/0301-4622(82)87037-3. https://doi.org/10.1016/0301-4622(82)87037-3

[5] Esteban Domingo; Donna Sabo; Tadatsugu Taniguchi; Charles Weissmann. Nucleotide Sequence Heterogeneity of an RNA Phage Population. Cell 13(4), 735–744 (1978). DOI 10.1016/0092-8674(78)90223-4. https://doi.org/10.1016/0092-8674(78)90223-4

[6] Kelly Kruger; Paula J. Grabowski; Arthur J. Zaug; Julie Sands; Daniel E. Gottschling; Thomas R. Cech. Self-Splicing RNA: Auto-Excision and Auto-Cyclization of the Ribosomal RNA Intervening Sequence of Tetrahymena. Cell 31(1), 147–157 (1982). DOI 10.1016/0092-8674(82)90414-7. https://doi.org/10.1016/0092-8674(82)90414-7

[7] Cecilia Guerrier-Takada; Katheleen Gardiner; Terry Marsh; Norman Pace; Sidney Altman. The RNA Moiety of Ribonuclease P Is the Catalytic Subunit of the Enzyme. Cell 35(3), 849–857 (1983). DOI 10.1016/0092-8674(83)90117-4. https://doi.org/10.1016/0092-8674(83)90117-4

[8] Walter Gilbert. The RNA World. Nature 319, 618 (1986). DOI 10.1038/319618a0. https://doi.org/10.1038/319618a0

[9] David P. Bartel; Jack W. Szostak. Isolation of New Ribozymes from a Large Pool of Random Sequences. Science 261(5127), 1411–1418 (1993). DOI 10.1126/science.7690155. https://doi.org/10.1126/science.7690155

[10] R. R. Breaker; G. F. Joyce. Emergence of a Replicating Species from an In Vitro RNA Evolution Reaction. Proceedings of the National Academy of Sciences 91(13), 6093–6097 (1994). DOI 10.1073/pnas.91.13.6093. https://doi.org/10.1073/pnas.91.13.6093

[11] Martin C. Wright; Gerald F. Joyce. Continuous In Vitro Evolution of Catalytic Function. Science 276(5312), 614–617 (1997). DOI 10.1126/science.276.5312.614. https://doi.org/10.1126/science.276.5312.614

[12] Tracey A. Lincoln; Gerald F. Joyce. Self-Sustained Replication of an RNA Enzyme. Science 323(5918), 1229–1232 (2009). DOI 10.1126/science.1167856. https://doi.org/10.1126/science.1167856

[13] Aniela Wochner; James Attwater; Alan Coulson; Philipp Holliger. Ribozyme-Catalyzed Transcription of an Active Ribozyme. Science 332(6026), 209–212 (2011). DOI 10.1126/science.1200752. https://doi.org/10.1126/science.1200752

[14] David P. Horning; Gerald F. Joyce. Amplification of RNA by an RNA Polymerase Ribozyme. Proceedings of the National Academy of Sciences 113(35), 9786–9791 (2016). DOI 10.1073/pnas.1610103113. https://doi.org/10.1073/pnas.1610103113

[15] James Attwater; Aditya Raguram; Alexey S. Morgunov; Edoardo Gianni; Philipp Holliger. Ribozyme-Catalysed RNA Synthesis Using Triplet Building Blocks. eLife 7, e35255 (2018). DOI 10.7554/eLife.35255. https://doi.org/10.7554/eLife.35255

[16] James Attwater; Teresa L. Augustin; Joseph F. Curran; Samantha L. Y. Kwok; Luis Ohlendorf; Edoardo Gianni; Philipp Holliger. Trinucleotide Substrates under pH–Freeze–Thaw Cycles Enable Open-Ended Exponential RNA Replication by a Polymerase Ribozyme. Nature Chemistry 17, 1129–1137 (2025). DOI 10.1038/s41557-025-01830-y. https://doi.org/10.1038/s41557-025-01830-y

[17] S. A. Kauffman; J. D. Farmer. Autocatalytic Sets of Proteins. Origins of Life and Evolution of the Biosphere 16, 446–447 (1986). DOI 10.1007/BF02422126. https://doi.org/10.1007/BF02422126

[18] David H. Lee; Juan R. Granja; Jose A. Martinez; Kay Severin; M. Reza Ghadiri. A Self-Replicating Peptide. Nature 382, 525–528 (1996). DOI 10.1038/382525a0. https://doi.org/10.1038/382525a0

[19] David H. Lee; Kay Severin; Yohei Yokobayashi; M. Reza Ghadiri. Emergence of Symbiosis in Peptide Self-Replication through a Hypercyclic Network. Nature 390, 591–594 (1997). DOI 10.1038/37569. https://doi.org/10.1038/37569

[20] Vera Vasas; Chrisantha Fernando; Mauro Santos; Stuart Kauffman; Eörs Szathmáry. Evolution before Genes. Biology Direct 7, 1 (2012). DOI 10.1186/1745-6150-7-1. https://doi.org/10.1186/1745-6150-7-1

[21] Nilesh Vaidya; Michael L. Manapat; Irene A. Chen; Ramon Xulvi-Brunet; Eric J. Hayden; Niles Lehman. Spontaneous Network Formation among Cooperative RNA Replicators. Nature 491, 72–77 (2012). DOI 10.1038/nature11549. https://doi.org/10.1038/nature11549

[22] Eörs Szathmáry; László Demeter. Group Selection of Early Replicators and the Origin of Life. Journal of Theoretical Biology 128, 463–486 (1987). DOI 10.1016/S0022-5193(87)80191-1. https://doi.org/10.1016/S0022-5193(87)80191-1

[23] Nobuto Takeuchi; Paulien Hogeweg. Multilevel Selection in Models of Prebiotic Evolution II: A Direct Comparison of Compartmentalization and Spatial Self-Organization. PLoS Computational Biology 5(10), e1000542 (2009). DOI 10.1371/journal.pcbi.1000542. https://doi.org/10.1371/journal.pcbi.1000542

[24] Martin M. Hanczyc; Shelly M. Fujikawa; Jack W. Szostak. Experimental Models of Primitive Cellular Compartments: Encapsulation, Growth, and Division. Science 302(5645), 618–622 (2003). DOI 10.1126/science.1089904. https://doi.org/10.1126/science.1089904

[25] Irene A. Chen; Richard W. Roberts; Jack W. Szostak. The Emergence of Competition between Model Protocells. Science 305(5689), 1474–1476 (2004). DOI 10.1126/science.1100757. https://doi.org/10.1126/science.1100757

[26] Sheref S. Mansy; Jason P. Schrum; Mathangi Krishnamurthy; Sylvia Tobé; Douglas A. Treco; Jack W. Szostak. Template-Directed Synthesis of a Genetic Polymer in a Model Protocell. Nature 454, 122–125 (2008). DOI 10.1038/nature07018. https://doi.org/10.1038/nature07018

[27] Ting F. Zhu; Jack W. Szostak. Coupled Growth and Division of Model Protocell Membranes. Journal of the American Chemical Society 131(15), 5705–5713 (2009). DOI 10.1021/ja900919c. https://doi.org/10.1021/ja900919c

[28] Katarzyna Adamala; Jack W. Szostak. Competition between Model Protocells Driven by an Encapsulated Catalyst. Nature Chemistry 5, 495–501 (2013). DOI 10.1038/nchem.1650. https://doi.org/10.1038/nchem.1650

[29] Kensuke Kurihara; Mieko Tamura; Koh-ichiroh Shohda; Taro Toyota; Kentaro Suzuki; Tadashi Sugawara. Self-Reproduction of Supramolecular Giant Vesicles Combined with the Amplification of Encapsulated DNA. Nature Chemistry 3, 775–781 (2011). DOI 10.1038/nchem.1127. https://doi.org/10.1038/nchem.1127

[30] Norikazu Ichihashi; Kimihito Usui; Yasuaki Kazuta; Takeshi Sunami; Tomoaki Matsuura; Tetsuya Yomo. Darwinian Evolution in a Translation-Coupled RNA Replication System within a Cell-Like Compartment. Nature Communications 4, 2494 (2013). DOI 10.1038/ncomms3494. https://doi.org/10.1038/ncomms3494

[31] Yohsuke Bansho; Taro Furubayashi; Norikazu Ichihashi; Tetsuya Yomo. Host–Parasite Oscillation Dynamics and Evolution in a Compartmentalized RNA Replication System. Proceedings of the National Academy of Sciences 113(15), 4045–4050 (2016). DOI 10.1073/pnas.1524404113. https://doi.org/10.1073/pnas.1524404113

[32] Shigeyoshi Matsumura; Ádám Kun; Michael Ryckelynck; Faith Coldren; András Szilágyi; Fabrice Jossinet; Christian Rick; Philippe Nghe; Eörs Szathmáry; Andrew D. Griffiths. Transient Compartmentalization of RNA Replicators Prevents Extinction Due to Parasites. Science 354(6317), 1293–1296 (2016). DOI 10.1126/science.aag1582. https://doi.org/10.1126/science.aag1582

[33] Ryo Mizuuchi; Norikazu Ichihashi. Sustainable Replication and Coevolution of Cooperative RNAs in an Artificial Cell-Like System. Nature Ecology & Evolution 2, 1654–1660 (2018). DOI 10.1038/s41559-018-0650-z. https://doi.org/10.1038/s41559-018-0650-z

[34] Ryo Mizuuchi; Taro Furubayashi; Norikazu Ichihashi. Evolutionary Transition from a Single RNA Replicator to a Multiple Replicator Network. Nature Communications 13, 1460 (2022). DOI 10.1038/s41467-022-29113-x. https://doi.org/10.1038/s41467-022-29113-x

[35] Akiko Baba; Kazuki Yokoyama; Keidai Sato; Shuna Asanuma; Tomoko Kawahata; Ulf Olsson; Daisuke Unabara; Tasuku Hamaguchi; Koji Yonekura; Masayuki Imai. Growth of Fatty Acid Vesicles Coupled with Amino Acid Sequences of Peptides toward Evolvable Protocells. Communications Chemistry 9, 234 (2026). DOI 10.1038/s42004-026-02043-1. https://doi.org/10.1038/s42004-026-02043-1

[36] Raquel Nunes Palmeira; Marco Colnaghi; Andrew Pomiankowski; Nick Lane. Selection for Growth Drives the Emergence of Genetic Heredity in Protocells. PLOS Biology 24(3), e3003544 (2026). DOI 10.1371/journal.pbio.3003544. https://doi.org/10.1371/journal.pbio.3003544

[37] D. Sievers; G. von Kiedrowski. Self-Replication of Complementary Nucleotide-Based Oligomers. Nature 369, 221–224 (1994). DOI 10.1038/369221a0. https://doi.org/10.1038/369221a0

Las primeras células que nunca vimos

QTC-022 · 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: Problema abierto

Licencia: All Rights Reserved

Resumen del artículo

Ningún fósil conserva la primera célula. Cuando las rocas ofrecen biosignaturas convincentes, la vida ya construía comunidades. Los laboratorios se acercan al intervalo ausente desde la otra dirección: vesículas de ácidos grasos crecen y se dividen, gotas concentran catalizadores, polímeros genéticos se copian dentro de compartimentos y células sintéticas integran funciones elegidas. Ninguna es la primera célula histórica. Cada una empieza con materiales, catalizadores o condiciones aportados por investigadores, mientras los organismos de genoma mínimo heredan un progenitor evolucionado. Incluso las membranas modernas conservan una división lipídica no resuelta entre bacterias y arqueas. La evidencia apoya la celularización como integración prolongada de frontera, herencia, energía y reproducción, quizá entre poblaciones que intercambiaban componentes. LUCA pertenece después: es el ancestro común reconstruido desde supervivientes, no la primera vida que existió.

En 60 segundos

Nunca observamos la celularización y el registro rocoso empieza después de su trabajo decisivo. Estromatolitos antiguos y biosignaturas de fuentes termales indican comunidades, no la primera membrana que encerró química hereditaria. Los experimentos muestran que varias piezas no tuvieron que aparecer juntas. Vesículas de ácidos grasos se autoensamblan, admiten ciertos nutrientes, crecen y se dividen. Gotas coacervadas concentran ARN sin membrana y pueden adquirir después envolturas de ácidos grasos. Polímeros o catalizadores internos vuelven competitivas a protocélulas modelo. Pero cada demostración suministra parte del ciclo y ningún linaje ha arrancado síntesis de frontera, transporte, energía, copia y división desde entradas geoquímicas limitadas. Las membranas modernas añaden otro enigma: bacterias y arqueas usan químicas lipídicas distintas, aunque membranas híbridas diseñadas son viables. Las células mínimas tampoco revelan el comienzo; son descendientes reducidos, sostenidos por medios ricos y maquinaria heredada. La mejor lectura es una transición por etapas y poblaciones. La ascendencia común universal describe a los supervivientes. No identifica la primera célula ni dice que la vida surgiera una sola vez.

Por qué importa esta pregunta

La imagen de una vesícula afortunada que cobra vida es memorable y probablemente engañosa. La vida celular exige cerrar varios bucles causales: debe persistir un interior, entrar suministros, retenerse productos útiles, copiarse información y heredar los descendientes suficiente organización para continuar. Separar funciones permite reconocer progreso experimental sin convertir cada vesícula en vida. Convierte las piezas suministradas en un mapa preciso de investigación. También

impide que LUCA, los genomas mínimos y las biosignaturas antiguas respondan una pregunta para la que no fueron diseñados: cómo fueron las primeras células.

1. Las rocas empiezan demasiado tarde

La pregunta

Si las rocas convincentes más antiguas ya registran arrecifes o comunidades de fuentes termales, la celularización ocurrió antes de empezar el relato conservado. Una biosignatura establece un mundo habitado y revela muy poco sobre la primera frontera, genoma o ciclo reproductivo.

Las primeras células no dejaron un espécimen etiquetado. La Tierra altera continuamente su corteza más antigua mediante enterramiento, metamorfismo, deformación y erosión. Organismos microscópicos blandos se conservan mal incluso en rocas más jóvenes, y las células tempranas carecían de esqueletos mineralizados que vuelven visibles fósiles posteriores. El registro empieza con consecuencias: estructuras estratificadas, química del carbono, texturas minerales y ambientes cuya mejor explicación quizá incluye vida. Ninguna ofrece un retrato del primer compartimento exitoso.

En la Formación Strelley Pool de Australia Occidental, de unos 3.430 millones de años, Abigail Allwood y colegas cartografiaron un conjunto de estromatolitos de escala arrecifal, con varias morfologías y asociaciones ambientales.[1] La fuerza no reside en un bulto sugerente, sino en un sistema sedimentario organizado que se extiende kilómetros y se interpreta como ecología microbiana establecida. Esa es también la limitación. Una comunidad capaz de construir estructuras persistentes ya está después de aquello que unió herencia y reproducción celular.

La Formación Dresser, de unos 3.480 millones de años, añade evidencia de un ambiente hidrotermal terrestre. Tara Djokic y colegas describieron depósitos de fuentes termales con texturas y señales geoquímicas compatibles con vida en charcas o respiraderos terrestres.[2] El lugar amplía los ambientes ocupados por organismos tempranos. No demuestra que la vida empezara en una fuente termal ni conserva una membrana. La evidencia de hábitat responde dónde vivió cierta vida, no cómo se ensambló la vida celular.

Las afirmaciones más antiguas se vuelven frágiles. Allen Nutman y colegas interpretaron estructuras cónicas en rocas de Isua de 3.700 millones de años como estromatolitos.[3] El equipo de Abigail Allwood examinó después otra exposición y sostuvo que formas similares surgieron por deformación, no por construcción microbiana.[4] En Nuvvuagittuq, Matthew Dodd y colegas describieron tubos y filamentos en precipitados hidrotermales cuyas rocas anfitrionas podrían superar 3.770 millones de años.[5] Edad, asociación y biogenicidad siguen discutidas. Una forma sugerente no es una máquina del tiempo.

Estas disputas no son un fracaso de la geología. Exponen qué puede y qué no puede soportar la evidencia antigua. Líneas múltiples e independientes —sedimentología, química, contexto espacial y morfología— fortalecen una afirmación, mientras el metamorfismo borra detalles decisivos. Cuando la evidencia se vuelve convincente, la vida ya parece ecológica. Las rocas más antiguas sitúan la existencia celular antes de una fecha. No dicen si la primera frontera fue una vesícula, un poro mineral, una gota o algo sin representante moderno.

En qué punto estamos

El registro geológico ofrece un límite unilateral: existían comunidades celulares cuando sobreviven estructuras convincentes, pero su transición fundadora queda fuera de escena. Para investigar ese intervalo hay que construir evidencia además de excavarla. Los compartimentos de laboratorio permiten aislar, aportar y probar cada función necesaria, empezando por el acto engañosamente simple de crear un interior.

2. Una frontera todavía no es una célula

Una frontera realiza dos trabajos opuestos. Impide que una red de reacciones se disperse, pero debe dejar cruzar alimento, residuos y energía. Sellar perfectamente el interior agota suministros. Hacer la frontera libremente permeable pierde productos útiles y gradientes. Las células modernas lo resuelven con bicapas fosfolipídicas, canales, bombas y enzimas. Los primeros compartimentos no podían suponer esa maquinaria; frontera y química interna tuvieron que tolerarse mutuamente antes de volverse complejas.

Los ácidos grasos ofrecen un modelo más simple. En agua y dentro de intervalos adecuados de concentración, pH y sales, forman vesículas de bicapa. Martin Hanczyc, Shelly Fujikawa y Jack Szostak mostraron encapsulación, crecimiento y transformaciones semejantes a división.[6] Ting Zhu y Szostak vincularon después crecimiento de membrana con formación de filamentos y fisión sin citoesqueleto proteico.[9] Son capacidades físicas importantes. Pero una vesícula que se estrangula no necesariamente copia una diferencia funcional ni produce descendientes capaces de repetir el ciclo.

La permeabilidad primitiva puede ser ventaja. Mark Sacerdote y Szostak midieron el paso de azúcares por membranas modelo y vieron que la estructura alteraba mucho las tasas: en sus condiciones, la ribosa cruzaba más deprisa que pentosas relacionadas.[30] Sheref Mansy y colegas mostraron después que nucleótidos activados entraban en vesículas de ácidos grasos y extendían dentro una plantilla genética.[8] No hacía falta transportador proteico. El precio es la fuga: una membrana permisiva quizá no retenga productos pequeños ni un desequilibrio iónico utilizable.

Una frontera empieza a importar evolutivamente cuando el interior cambia el destino del paquete. Irene Chen, Richard Roberts y Szostak encapsularon ácidos nucleicos en vesículas de ácidos grasos. El estrés osmótico hizo que las vesículas cargadas adquirieran membrana de competidoras relajadas y crecieran.[7] Katarzyna Adamala y Szostak usaron después un catalizador encapsulado cuyo producto promovía crecimiento de membrana.[11] Ambos experimentos unieron estado interno y éxito externo. Ningún estado interno era generado y heredado por un ciclo autónomo completo.

Protocélula es, por tanto, una etiqueta funcional, no una identificación histórica. Puede nombrar una vesícula que realiza una operación celular, un compartimento que integra varias o una plataforma para probar acoplamientos. La pregunta útil siempre es qué aportaron los investigadores: anfífilos, plantillas, catalizadores, sustratos activados, mezcla, temperatura o división. Nombrar esas entradas no disminuye el resultado. Revela qué bucle causal sigue abierto antes de que un objeto químico limitado se vuelva célula evolutiva.

En qué punto estamos

Una membrana protege, alimenta y da fenotipo a un interior sin crear un linaje vivo. La distinción central es continuidad recíproca: el contenido debe ayudar a reproducir la frontera, y las fronteras descendientes conservar el contenido que produjo éxito. Antes de alcanzar ese pacto, otros compartimentos pudieron concentrar y ordenar la química que luego habitaría células.

3. Los compartimentos pudieron preceder a las membranas

La pregunta

Hoy una célula está rodeada por membrana, pero el origen no tiene que copiar el resultado final. Gotas, poros, superficies minerales y películas localizan reactivos antes de existir una envoltura lipídica heredable, permitiendo que la celularización cambie de recipiente al cambiar su química.

Algunos polímeros se separan espontáneamente del entorno acuoso y forman gotas coacervadas. La interfaz no es una bicapa lipídica, pero ciertas moléculas se reparten con fuerza hacia la fase densa. Concentrar acelera reacciones insignificantes en un océano diluido y mantiene próximos a socios. También conserva porosidad y dinamismo. Esas propiedades crean un problema hereditario: si el contenido se intercambia deprisa, una gota exitosa quizá no conserve su química distintiva para fundar un linaje.

Bogdan Drobot y colegas colocaron un catalizador de ARN dentro de protocélulas coacervadas sin membrana y mostraron que la compartimentación cambiaba el comportamiento de la reacción.[15] Las gotas eran ambientes de reacción reales, no dibujos. También se fabricaron con componentes preparados y no reprodujeron autónomamente su organización catalítica. El experimento separa dos afirmaciones confundidas: una función compartimentada puede preceder a la membrana, pero funcionar dentro de una gota no hace que la función se herede automáticamente.

Un compartimento sin membrana también sirve de andamio para una. Tyler Tang y colegas ensamblaron capas de ácidos grasos alrededor de microgotas coacervadas y produjeron protocélulas híbridas que combinaban una fase interna densa y una frontera anfifílica.[14] Así se vuelve imaginable una transición por etapas: primero concentración, después envoltura. No demuestra que la Tierra temprana siguiera ese orden. Polímeros diseñados, ácidos grasos preparados y condiciones controladas crearon la oportunidad.

Otros ambientes sustituyen el compartimento flotante por espacio estructurado. Poros minerales retienen reactivos y exponen superficies catalíticas; películas húmedas y secas concentran solutos repetidamente; vetas de hielo forman microcanales salinos; gradientes hidrotermales mantienen diferencias químicas continuas.[29,31] Cada uno resuelve un problema distinto de dilución o energía. También puede atrapar productos, destruir moléculas frágiles o depender de un ambiente estrecho. Un escenario útil debe seguir materiales y descendientes durante el ciclo, no solo nombrar un lugar favorable.

Las fronteras pudieron cambiar durante la celularización. Química sobre superficies pudo pasar a gotas, después quedar envuelta por anfífilos simples y finalmente equiparse con lípidos sintetizados y proteínas de transporte. La secuencia es plausible, no recuperada. Las células modernas no conservan dentro una membrana fósil, y reemplazos posteriores borran químicas

anteriores.[21,25] Los experimentos más fuertes conectarán etapas sin que un investigador traslade productos purificados de un aparato al siguiente.

En qué punto estamos

> *Compartimento primero y membrana primero no son etiquetas excluyentes si las fronteras evolucionaron. Una secuencia de recipientes cambiantes pudo concentrar química antes de encerrarla duraderamente. Pero cada envoltura hereda la misma prueba práctica: debe alimentar las reacciones que protege. Así, la permeabilidad deja de ser propiedad material y se vuelve el siguiente problema de integración celular.*

4. Una membrana debe admitir y retener

La evolución de membranas es un compromiso móvil. Una frontera laxa de ácidos grasos intercambia solutos sin proteínas, pero sufre con mucha sal, iones divalentes y retención de gradientes. Una bicapa fosfolipídica moderna es estable y menos permeable, pero exige canales y bombas. No hay razón para que la química óptima antes de proteínas codificadas sea la conservada después. Los primeros linajes celulares quizá sobrevivieron cambiando juntos composición de membrana y metabolismo.

Una incompatibilidad famosa puede suavizarse químicamente. La copia no enzimática de ARN suele necesitar magnesio, que desestabiliza vesículas de ácidos grasos. Katarzyna Adamala y Szostak mostraron que el citrato protegía membranas modelo y permitía síntesis de ARN por plantilla dentro.[10] El logro unió dos módulos antes incompatibles. Sus condiciones importan: se aportaron monómeros activados, bastante citrato, vesículas preparadas e intercambio controlado. Se demostró compatibilidad, no una economía de citrato autosuficiente.

Una segunda ruta fabrica membrana desde química soluble simple. En 2026 Marian Ebeling y colegas usaron una red organocatalítica que empezaba con pequeños carbonilos para generar productos anfifílicos largos que formaron espontáneamente estructuras semejantes a protocélulas, desde nanómetros hasta micrómetros.[16] Los compartimentos toleraron varios pH, temperaturas y sales y retuvieron actividad catalítica. El organocatalizador definido era entrada de laboratorio y ningún linaje genético reprodujo las estructuras. Formación de abajo arriba aún no es vida de abajo arriba.

Otro experimento de 2026 atacó la suposición de que una membrana debe descender de otra. Satyam Khanal y colegas usaron cascadas enzimáticas solubles para sintetizar lípidos de novo desde precursores pequeños, y añadieron funciones modelo de entrada y retención de gradiente de protones.[17] Es una respuesta de ingeniería potente a la herencia de membrana. Usó enzimas modernas, ATP, química de CoA, NADPH, un péptido formador de poros, colesterol y tampones definidos. La bicapa no creció, se dividió y transmitió un sistema evolutivo.

Estos experimentos convierten un viejo enigma verbal en un registro de dependencias. ¿Surgen anfífilos continuamente? ¿Tolera la frontera iones catalíticos? ¿Entran nutrientes sin vaciar la célula? ¿Persisten gradientes útiles? ¿La química interna fabrica frontera? Cada módulo tiene demostraciones creíbles.[8,10,16,17] Ningún experimento los ha cerrado todos con entradas geoquímicas limitadas. Ese hueco es más estrecho e instructivo que declarar fáciles o imposiblemente complejas las membranas.

En qué punto estamos

Una membrana viable no es una sustancia, sino flujo gestionado: entra materia, permanecen productos, persisten diferencias energéticas y se produce frontera nueva. Sistemas de laboratorio satisfacen esas exigencias en subconjuntos solapados. La reproducción empieza cuando forman un ciclo recurrente, porque una célula que resuelve transporte una vez pero no reconstruye la solución no deja descendientes celulares.

5. El crecimiento debe acoplarse a la herencia

La pregunta

Un compartimento puede duplicar su membrana y fracasar como linaje. Si la división deja una hija sin catalizador, plantilla o maquinaria de frontera que causó el crecimiento, la reproducción destruye la organización que debía propagar.

La reproducción de fronteras puede ser químicamente autocatalítica. Peter Walde y colegas aportaron un precursor de ácido graso cuya hidrólisis generaba más moléculas formadoras de membrana, permitiendo a poblaciones de vesículas reproducir su estructura.[13] El resultado merece el nombre: vesículas existentes aceleraban la formación de más material vesicular. Pero el ciclo portaba poca información individualizada. Una variación que mejorara una vesícula no quedaba codificada en secuencia y copiada con fiabilidad. Se logró repetición antes que herencia abierta.

La división física también emerge sin motores moleculares. Zhu y Szostak alimentaron membranas modelo hasta formar filamentos alargados; una cizalla suave los dividió conservando contenido.[9] Kensuke Kurihara y colegas coordinaron amplificación de ADN encapsulado con reproducción de vesículas gigantes.[12] Los experimentos muestran que ciclos de genoma y frontera pueden coexistir. Ácidos grasos externos, condiciones mecánicas, reactivos de PCR y lípidos sintéticos todavía cerraban desde fuera partes principales.

La química interna puede conferir crecimiento competitivo. En el experimento de Chen, ácido nucleico encapsulado alteraba presión osmótica e impulsaba captación de membrana.[7] En el de Adamala, un catalizador interno producía una molécula que mejoraba crecimiento.[11] El puente importa porque la selección no favorece un genoma por beneficiar a la membrana si ambos se separan. Falta codificación recíproca: los descendientes deben copiar la causa del éxito, reproducir la frontera y mantenerlas unidas durante generaciones.

El reparto añade una restricción numérica. Una protocélula pequeña con pocas copias de un catalizador esencial puede dividirse de modo desigual y producir una hija sin ninguna. Un compartimento mayor amortigua la pérdida, pero se parece más al medio masivo y quizá refugie parásitos. Adhesión molecular, localización de reacciones y división coordinada reducen el riesgo. No exigen igualdad perfecta, sino una distribución suficiente para que organizaciones exitosas dejen más paquetes exitosos que las demás.

El orden histórico sigue abierto. Una frontera reproductora pudo capturar replicadores; replicadores pudieron alterar compartimentos previos; el metabolismo pudo suministrar precursores de membrana antes de genomas precisos; o las funciones maduraron en lugares distintos y se fusionaron.[18,25,29] Un orden experimental exitoso demuestra posibilidad, no

exclusividad. La comparación decisiva pregunta si una ruta mantiene continuidad de materia, energía y función heredada sin que investigadores reinicien repetidamente el ciclo.

En qué punto estamos

La reproducción celular no es fisión de membrana más copia de genoma escritas en líneas separadas. Es su sincronización causal entre descendientes, con errores tolerables de reparto y tiempo. Esa integración pudo ocurrir con membranas distintas de las actuales. La biología moderna conserva una pista —y complicación— en la división química entre lípidos bacterianos y arqueanos.

6. La división lipídica oculta la frontera ancestral

Las bacterias construyen generalmente membranas con ácidos grasos unidos por enlaces éster a sn-glicerol-3-fosfato. Las arqueas usan cadenas isoprenoides unidas por éter a la estereoquímica especular del glicerol-fosfato. También difieren enzimas y rutas.[21] Esta división lipídica sorprende porque ambos grupos comparten traducción, código genético y otras evidencias de ascendencia común. Si su población común más profunda ya poseía membrana moderna, ¿de qué tipo era? El presente no ofrece una respuesta única.

Una propuesta sitúa una membrana simple o mixta antes de la separación, seguida de refinamiento o reemplazo independiente. Otra coloca linajes tempranos en compartimentos geoquímicos y hace posteriores las membranas modernas. Una tercera enfatiza divergencia antigua de biosíntesis lipídica.[21,25] Cada interpretación debe explicar ascendencia compartida, distribución de rutas y fisiología. La división no autoriza a declarar dos orígenes independientes; la evidencia molecular conservada de ascendencia común es mucho más amplia.[27]

Una supuesta imposibilidad química se ha probado directamente. Antonella Caforio y colegas modificaron Escherichia coli para sintetizar lípidos de tipo arqueano, que alcanzaron aproximadamente el 20–30 por ciento de la membrana junto a lípidos bacterianos.[19] La membrana híbrida heteroquiral sostuvo crecimiento y aumentó ligeramente robustez ante ciertos estreses. El experimento refuta que una estereoquímica mixta no pueda sostener células. No identifica la membrana de un ancestro de hace miles de millones de años.

La naturaleza también cruza la frontera de los manuales. Laura Villanueva y colegas hallaron que bacterias del superfilo FCB poseen genes con potencial para sintetizar lípidos éter arqueanos y describieron evidencia lipídica correspondiente.[20] Transferencia génica, retención o convergencia pueden explicar el patrón. Sea cual sea la dirección, una clasificación perfectamente binaria es demasiado simple. La química de membrana moderna se ha intercambiado y modificado, haciendo la reconstrucción ancestral más rica y menos directa.

La inferencia honesta es negativa pero útil. No podemos tomar una membrana moderna y eliminar complejidad hasta obtener la primera frontera celular. Selección, reemplazo y transferencia horizontal reescribieron el rastro. La viabilidad híbrida amplía transiciones posibles; no elige una. QTC-023 usará genes conservados para reconstruir un ancestro común, pero la división lipídica advierte que incluso un ancestro reconstruido quizá no conserve intacta la química de la celularización.

En qué punto estamos

La división de membranas bloquea una película inversa simple desde células modernas hasta la primera. La ascendencia compartida sobrevive, pero la química ancestral queda indeterminada. Eliminar genes de una célula viva parece otra ruta hacia atrás. También engaña, porque la sustracción empieza con un organismo cuyas estructuras y compatibilidades no contadas ya evolucionaron.

7. Las células mínimas no son células primitivas

La pregunta

Eliminar genes de una célula moderna pregunta qué puede perder ese descendiente mientras un laboratorio lo mantiene vivo. La primera célula afrontó el problema opuesto: cómo un sistema sin progenitor celular reunió funciones compatibles suficientes para dejar descendencia.

En 2016 Clyde Hutchison y una gran colaboración presentaron JCVI-syn3.0, una célula derivada de Mycoplasma con genoma de 531 kilobases y 473 genes.[22] Crecía y se dividía en un medio rico. La cifra era un mínimo experimental para un chasis bajo apoyo particular, no el genoma mínimo de la vida. Quitar un nutriente, cambiar temperatura o exigir independencia ecológica vuelve esenciales genes prescindibles en un laboratorio.

El genoma mínimo contenía otra sorpresa: aproximadamente un tercio de los genes retenidos carecía inicialmente de función específica asignada.[22] La reducción descubrió necesidad sin explicarla por completo. Jonathan Breuer y colegas combinaron después experimentos y modelos para cartografiar metabolismo esencial y dependencias ambientales.[24] La lección no es que la vida necesite exactamente 473 genes. Incluso un descendiente muy caracterizado esconde trabajo causal tras etiquetas como desconocido o suministrado por el medio.

La división expuso otro sistema oculto. JCVI-syn3.0 producía formas irregulares. James Pelletier y colegas restituyeron 19 genes para crear un derivado regular y hallaron que siete actuando juntos —incluidos genes conocidos de división y varios de membrana con función desconocida— bastaban para recuperar morfología casi normal.[23] Una célula satisface crecimiento poblacional aunque sus divisiones individuales sean físicamente desordenadas. Supervivencia mínima, reproducción fiable y mecanismo entendido son metas distintas.

La reducción de arriba abajo hereda mucho más que ADN. El citoplasma inicial ya contiene ribosomas, membranas, metabolitos, concentraciones y organización espacial producidos por una célula madre. Sus proteínas evolucionaron para trabajar juntas. El medio rico sustituye tareas biosintéticas. Esas herencias son precisamente lo que un modelo de origen debe explicar, no suponer. Las células mínimas cartografían dependencias, pero la evolución no corre hacia atrás eliminando genes hasta que aparezca la historia.

Las células sintéticas de abajo arriba plantean la pregunta complementaria. En 2026 Ana María Restrepo Sierra y colegas encerraron un sistema de seis genes que acoplaba replicación de ADN, transcripción–traducción y síntesis fosfolipídica en liposomas.[18] Solo una minoría mostró ambas funciones; el lípido nuevo promedió cerca del 0,7 por ciento del total y no generó crecimiento detectable. Traducción PURE, proteínas de fago, enzimas bacterianas, liposomas preparados y sustratos aportados hacían enorme trabajo heredado. La integración avanzó sin crear una primera célula histórica o autónoma.

En qué punto estamos

Las células mínimas y sintéticas se acercan a la integración desde direcciones opuestas y exponen dependencias al quitar o añadir funciones. Ninguna repite el origen. Su valor es más preciso: identifican qué bucles siguen apoyados desde fuera. Al enumerarlos, la búsqueda pasa de una primera célula a una transición entre poblaciones cuya organización todavía se volvía celular.

8. La celularización fue una transición, no un instante

La pregunta

Todos los organismos actuales pueden descender de una población ancestral compartida aunque químicas anteriores produjeran muchos linajes, intercambiaran innovaciones o fracasaran repetidamente. La genealogía de supervivientes no es un censo de todo lo que se acercó a la vida.

Douglas Theobald comparó formalmente modelos de ascendencia común y separada para secuencias proteicas conservadas y halló apoyo abrumador a la ascendencia común universal entre linajes vivos muestreados.[27] La conclusión es poderosa y más estrecha de lo que parece. No cuenta cuántos intentos de origen ocurrieron, localiza el primer replicador ni demuestra una célula aislada en la raíz. Dice que los organismos cuya maquinaria conservada sobrevive comparten ascendencia.

Carl Woese sostuvo que el ancestro más profundo pudo ser un estado comunal de progenotes, no una célula moderna plenamente integrada.[25] Componentes e innovaciones circularían entre linajes laxos antes de estabilizarse traducción y otros sistemas. Kalin Vetsigian, Woese y Nigel Goldenfeld modelaron después cómo el intercambio horizontal podía ayudar a universalizar un código genético compartido.[26] Los modelos no recuperan una población perdida, pero muestran por qué la historia temprana parece red antes de que la herencia posterior se vuelva principalmente arbórea.

La celularización encaja con esa posibilidad. Recetas de membrana, catalizadores, replicadores y rutas metabólicas no tuvieron que madurar dentro de un único linaje continuo de vesículas. Compartimentos pudieron fusionarse, fugarse, intercambiar polímeros u ocupar poros conectados. La selección actuó quizá sobre moléculas, paquetes y comunidades en momentos distintos. Finalmente, un acoplamiento estrecho hizo que una frontera reprodujera la química que la reproducía. La transición puede contener umbrales reales sin ofrecer una primera célula nombrable.

Una reconstrucción reciente sitúa a LUCA —el último ancestro común universal— alrededor de hace 4.200 millones de años e infiere un genoma de al menos unos 2,5 megabases, cerca de 2.600 proteínas e interacciones ecológicas.[28] Las estimaciones dependen de modelos, pero su implicación basta para esta frontera: LUCA probablemente estaba mucho más organizado que una primera protocélula frágil. Pertenece a la historia de vida celular establecida, no automáticamente al instante en que empezaron vida o células.

Ya podemos decir qué hace la evidencia. Las rocas establecen comunidades celulares tempranas pero empiezan tarde. Las protocélulas demuestran que frontera, copia, crecimiento y catálisis se conectan por subconjuntos. Células sintéticas y mínimas revelan apoyo oculto. La química lipídica impide una reconstrucción inversa simple. La filogenia identifica descendientes compartidos y

posible ascendencia comunal.[1,6,18,21,22,27,28] Ninguna línea ordena de forma única la transición. Juntas acotan un problema abierto real, no un misterio vacío.

En qué punto estamos

Las primeras células faltan como objetos, pero están cada vez más acotadas como proceso. La vida celular surgió cuando fronteras, química heredada, energía y reproducción se sostuvieron mutuamente entre descendientes. Quizá nunca nombremos al primer participante. QTC-023 plantea la siguiente pregunta respondible: ¿qué revelan los genomas supervivientes sobre el ancestro posterior del que descienden todos los linajes vivos?

Lo que sabemos y cómo lo sabemos

- Biosignaturas arcaicas convincentes ya registran comunidades microbianas, no la primera transición celular.[1,2]
- Vesículas de ácidos grasos y coacervados compartimentan química; varios sistemas crecen, se dividen o alojan copia.[6–15]
- Polímeros o catalizadores internos cambian el crecimiento de protocélulas y vinculan físicamente contenido y competencia.[7,11]
- La química de membrana bacteriana y arqueana difiere, pero híbridos viables muestran que mezclarlas no es intrínsecamente imposible.[19–21]
- Células mínimas y sintéticas heredan mucha maquinaria biológica y no recrean la primera célula histórica.[18,22–24]

Lo que todavía no sabemos

- Qué compartimento físico transmitió primero, si alguno, una distinción interior–exterior estable entre descendientes.
- El orden histórico en que síntesis de frontera, herencia, metabolismo, acoplamiento energético y división se volvieron interdependientes.
- Si las primeras poblaciones usaron ácidos grasos, lípidos mixtos, confinamiento mineral o fronteras hoy perdidas.
- Cuánto intercambio ocurrió entre linajes tempranos antes de emerger herencia celular vertical estable.
- Cuánto tiempo precedió la evolución celular al ancestro reconstruido como LUCA.

Qué podría hacernos cambiar de opinión

- Un fósil celular excepcionalmente conservado y datado independientemente, anterior a biosignaturas comunitarias aceptadas.
- Un linaje de protocélulas geoquímicamente limitado que sostenga membrana, transporte, energía, copia y división durante generaciones.
- Reconstrucción de enzimas ancestrales que identifique decisivamente la membrana previa a la separación bacterias–arqueas.
- Convergencia de células sintéticas de arriba abajo y abajo arriba en una arquitectura pequeña y autónoma sin apoyo celular heredado.
- Evidencia filogenómica que distinga con nitidez un ancestro celular único de una población temprana comunal.

Si solo recuerdas una cosa

Ningún experimento ni fósil conserva la primera célula. La celularización fue probablemente una transición gradual aún no resuelta que acopló fronteras, herencia, energía y reproducción; LUCA es un ancestro posterior, no el comienzo.

Artículos relacionados

- QTC-021 — Cuando la química empezó a evolucionar
- QTC-023 — LUCA: el antepasado que reconstruimos

Referencias

[1] Abigail C. Allwood; Malcolm R. Walter; Balz S. Kamber; Craig P. Marshall; Ian W. Burch. Stromatolite Reef from the Early Archaean Era of Australia. Nature 441, 714–718 (2006). DOI 10.1038/nature04764. https://doi.org/10.1038/nature04764

[2] Tara Djokic; Martin J. Van Kranendonk; Kathleen A. Campbell; Malcolm R. Walter; Colin R. Ward. Earliest Signs of Life on Land Preserved in ca. 3.5 Ga Hot Spring Deposits. Nature Communications 8, 15263 (2017). DOI 10.1038/ncomms15263. https://doi.org/10.1038/ncomms15263

[3] Allen P. Nutman; Vickie C. Bennett; Clark R. L. Friend; Martin J. Van Kranendonk; Allan R. Chivas. Rapid Emergence of Life Shown by Discovery of 3,700-Million-Year-Old Microbial Structures. Nature 537, 535–538 (2016). DOI 10.1038/nature19355. https://doi.org/10.1038/nature19355

[4] Abigail C. Allwood; Minik T. Rosing; David T. Flannery; Joel A. Hurowitz; Christopher M. Heirwegh. Reassessing Evidence of Life in 3,700-Million-Year-Old Rocks of Greenland. Nature 563, 241–244 (2018). DOI 10.1038/s41586-018-0610-4. https://doi.org/10.1038/s41586-018-0610-4

[5] Matthew S. Dodd; Dominic Papineau; Tor Grenne; John F. Slack; Martin Rittner; Franco Pirajno; Jonathan O'Neil; Crispin T. S. Little. Evidence for Early Life in Earth's Oldest Hydrothermal Vent Precipitates. Nature 543, 60–64 (2017). DOI 10.1038/nature21377. https://doi.org/10.1038/nature21377

[6] Martin M. Hanczyc; Shelly M. Fujikawa; Jack W. Szostak. Experimental Models of Primitive Cellular Compartments: Encapsulation, Growth, and Division. Science 302, 618–622 (2003). DOI 10.1126/science.1089904. https://doi.org/10.1126/science.1089904

[7] Irene A. Chen; Richard W. Roberts; Jack W. Szostak. The Emergence of Competition between Model Protocells. Science 305, 1474–1476 (2004). DOI 10.1126/science.1100757. https://doi.org/10.1126/science.1100757

[8] Sheref S. Mansy; Jason P. Schrum; Mathangi Krishnamurthy; Sylvia Tobé; Douglas A. Treco; Jack W. Szostak. Template-Directed Synthesis of a Genetic Polymer in a Model Protocell. Nature 454, 122–125 (2008). DOI 10.1038/nature07018. https://doi.org/10.1038/nature07018

[9] Ting F. Zhu; Jack W. Szostak. Coupled Growth and Division of Model Protocell Membranes. Journal of the American Chemical Society 131, 5705–5713 (2009). DOI 10.1021/ja900919c. https://doi.org/10.1021/ja900919c

[10] Katarzyna Adamala; Jack W. Szostak. Nonenzymatic Template-Directed RNA Synthesis Inside Model Protocells. Science 342, 1098–1100 (2013). DOI 10.1126/science.1241888. https://doi.org/10.1126/science.1241888

[11] Katarzyna Adamala; Jack W. Szostak. Competition between Model Protocells Driven by an Encapsulated Catalyst. Nature Chemistry 5, 495–501 (2013). DOI 10.1038/nchem.1650. https://doi.org/10.1038/nchem.1650

[12] Kensuke Kurihara; Mieko Tamura; Koh-ichiroh Shohda; Taro Toyota; Kentaro Suzuki; Tadashi Sugawara. Self-Reproduction of Supramolecular Giant Vesicles Combined with the Amplification of Encapsulated DNA. Nature Chemistry 3, 775–781 (2011). DOI 10.1038/nchem.1127. https://doi.org/10.1038/nchem.1127

[13] Peter Walde; Roger Wick; Massimo Fresta; Annarosa Mangone; Pier Luigi Luisi. Autopoietic Self-Reproduction of Fatty Acid Vesicles. Journal of the American Chemical Society 116, 11649–11654 (1994). DOI 10.1021/ja00105a004. https://doi.org/10.1021/ja00105a004

[14] T.-Y. Dora Tang; C. Rohaida Che Hak; Alexander J. Thompson; Marina K. Kuimova; D. S. Williams; Adam W. Perriman; Stephen Mann. Fatty Acid Membrane Assembly on Coacervate Microdroplets as a Step Towards a Hybrid Protocell Model. Nature Chemistry 6, 527–533 (2014). DOI 10.1038/nchem.1921. https://doi.org/10.1038/nchem.1921

[15] Björn Drobot; Juan M. Iglesias-Artola; Kristian Le Vay; Viktoria Mayr; Mrityunjoy Kar; Moritz Kreysing; Hannes Mutschler; T-Y Dora Tang. Compartmentalised RNA Catalysis in Membrane-Free Coacervate Protocells. Nature Communications 9, 3643 (2018). DOI 10.1038/s41467-018-06072-w. https://doi.org/10.1038/s41467-018-06072-w

[16] Marian Simon Rafael Ebeling; Otto Berninghausen; Khang Hoang Nguyen; Roland Beckmann; Oliver Trapp. Organocatalyzed Bottom-Up Formation of Protocells. Nature Communications 17, 1983 (2026). DOI 10.1038/s41467-026-69597-5. https://doi.org/10.1038/s41467-026-69597-5

[17] Satyam Khanal; Alessandro Fracassi; Alexander Harjung; Michael D. Burkart; Neal K. Devaraj. Breaking the Membrane Heredity Paradox Through De Novo Protocell Formation. Nature Communications 17, 6920 (2026). DOI 10.1038/s41467-026-73667-z. https://doi.org/10.1038/s41467-026-73667-z

[18] Ana María Restrepo Sierra; Federico Ramirez Gomez; Mats van Tongeren; Laura Sierra Heras; Christophe Danelon. A Synthetic Cell with Integrated DNA Self-Replication and Lipid Biosynthesis. Nature Communications 17, 2727 (2026). DOI 10.1038/s41467-026-69531-9. https://doi.org/10.1038/s41467-026-69531-9

[19] Antonella Caforio; Melvin F. Siliakus; Marten Exterkate; Samta Jain; Varsha R. Jumde; Ruben L. H. Andringa; Servé W. M. Kengen; Adriaan J. Minnaard; Arnold J. M. Driessen; John van der Oost. Converting Escherichia coli into an Archaebacterium with a Hybrid Heterochiral Membrane. Proceedings of the National Academy of Sciences 115, 3704–3709 (2018). DOI 10.1073/pnas.1721604115. https://doi.org/10.1073/pnas.1721604115

[20] Laura Villanueva; F A Bastiaan von Meijenfeldt; Alexander B Westbye; Subhash Yadav; Ellen C Hopmans; Bas E Dutilh; Jaap S Sinninghe Damsté. Bridging the Membrane Lipid Divide: Bacteria of the FCB Group Superphylum Have the Potential to Synthesize Archaeal Ether Lipids. The ISME

Journal 15, 168–182 (2021). DOI 10.1038/s41396-020-00772-2. https://doi.org/10.1038/s41396-020-00772-2

[21] Jonathan Lombard; Purificación López-García; David Moreira. The Early Evolution of Lipid Membranes and the Three Domains of Life. Nature Reviews Microbiology 10, 507–515 (2012). DOI 10.1038/nrmicro2815. https://doi.org/10.1038/nrmicro2815

[22] Clyde A. Hutchison, III; Ray-Yuan Chuang; Vladimir N. Noskov; Nacyra Assad-Garcia; Thomas J. Deerinck; Mark H. Ellisman; John Gill; Krishna Kannan; Bogumil J. Karas; Li Ma; James F. Pelletier; Zhi-Qing Qi; R. Alexander Richter; Elizabeth A. Strychalski; Lijie Sun; Yo Suzuki; Billyana Tsvetanova; Kim S. Wise; Hamilton O. Smith; John I. Glass; Chuck Merryman; Daniel G. Gibson; J. Craig Venter. Design and Synthesis of a Minimal Bacterial Genome. Science 351, aad6253 (2016). DOI 10.1126/science.aad6253. https://doi.org/10.1126/science.aad6253

[23] James F. Pelletier; Lijie Sun; Kim S. Wise; Nacyra Assad-Garcia; Bogumil J. Karas; Thomas J. Deerinck; Mark H. Ellisman; Andreas Mershin; Neil Gershenfeld; Ray-Yuan Chuang; John I. Glass; Elizabeth A. Strychalski. Genetic Requirements for Cell Division in a Genomically Minimal Cell. Cell 184, 2430–2440.e16 (2021). DOI 10.1016/j.cell.2021.03.008. https://doi.org/10.1016/j.cell.2021.03.008

[24] Marian Breuer; Emmy E Earnest; Chuck Merryman; Kim S Wise; Lijie Sun; Michaela R Lynott; Clyde A Hutchison; Hamilton O Smith; John D Lapek; David J Gonzalez; Valérie de Crécy-Lagard; Drago Haas; Andrew D Hanson; Piyush Labhsetwar; John I Glass; Zaida Luthey-Schulten. Essential Metabolism for a Minimal Cell. eLife 8, e36842 (2019). DOI 10.7554/eLife.36842. https://doi.org/10.7554/eLife.36842

[25] Carl Woese. The Universal Ancestor. Proceedings of the National Academy of Sciences 95, 6854–6859 (1998). DOI 10.1073/pnas.95.12.6854. https://doi.org/10.1073/pnas.95.12.6854

[26] Kalin Vetsigian; Carl Woese; Nigel Goldenfeld. Collective Evolution and the Genetic Code. Proceedings of the National Academy of Sciences 103, 10696–10701 (2006). DOI 10.1073/pnas.0603780103. https://doi.org/10.1073/pnas.0603780103

[27] Douglas L. Theobald. A Formal Test of the Theory of Universal Common Ancestry. Nature 465, 219–222 (2010). DOI 10.1038/nature09014. https://doi.org/10.1038/nature09014

[28] Edmund R. R. Moody; Sandra Álvarez-Carretero; Tara A. Mahendrarajah; James W. Clark; Holly C. Betts; Nina Dombrowski; Lénárd L. Szánthó; Richard A. Boyle; Stuart Daines; Xi Chen; Nick Lane; Ziheng Yang; Graham A. Shields; Gergely J. Szöllősi; Anja Spang; Davide Pisani; Tom A. Williams; Timothy M. Lenton; Philip C. J. Donoghue. The Nature of the Last Universal Common Ancestor and Its Impact on the Early Earth System. Nature Ecology & Evolution 8, 1654–1666 (2024). DOI 10.1038/s41559-024-02461-1. https://doi.org/10.1038/s41559-024-02461-1

[29] Nick Lane; William F. Martin. The Origin of Membrane Bioenergetics. Cell 151, 1406–1416 (2012). DOI 10.1016/j.cell.2012.11.050. https://doi.org/10.1016/j.cell.2012.11.050

[30] M. G. Sacerdote; J. W. Szostak. Semipermeable Lipid Bilayers Exhibit Diastereoselectivity Favoring Ribose. Proceedings of the National Academy of Sciences 102, 6004–6008 (2005). DOI 10.1073/pnas.0408440102. https://doi.org/10.1073/pnas.0408440102

[31] Jack W. Szostak; David P. Bartel; P. Luigi Luisi. Synthesizing life. Nature 409, 387–390 (2001). DOI 10.1038/35053176. https://doi.org/10.1038/35053176

LUCA: el antepasado que reconstruimos

QTC-023 · 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

LUCA no es un fósil, la primera vida ni un organismo solitario. Es la última población ancestral compartida por todos los linajes celulares supervivientes, reconstruida desde descendientes moleculares. El ARN ribosómico reveló primero la división profunda entre bacterias y arqueas; duplicaciones génicas antiguas ayudaron a enraizarla. La genómica comparada mostró después un núcleo universal pequeño y dominado por traducción, mientras pérdida génica y transferencia horizontal complicaban retratos mayores. La transferencia también sirve de evidencia al restringir orden relativo. Análisis recientes combinan árboles génicos reconciliados, genomas ancestrales probabilísticos, fósiles microbianos, registros isotópicos y relojes moleculares relajados. Una reconstrucción de 2024 sitúa a LUCA cerca de hace 4.200 millones de años e infiere un organismo de grado procariota y ecológico con unas 2.600 proteínas. Esos detalles dependen de modelos. La ascendencia común es robusta; genoma, membrana, metabolismo, hábitat y edad exactos de LUCA son interpretaciones estratificadas.

En 60 segundos

LUCA significa último ancestro común universal. «Último» importa: pudo existir vida anterior, intercambiar genes o desaparecer. «Ancestro común» significa una población genealógica inferida desde descendientes, no un individuo fosilizado. La reconstrucción empieza con maquinaria molecular compartida. El ARN ribosómico dividió profundamente la vida celular en bacterias y arqueas; genes duplicados antes de esa separación aportaron dirección a la raíz. Los genes universales, sobre todo de traducción, revelan sistemas heredados, pero una intersección estricta pierde genes eliminados después. Aceptar cada gen interdominio incluye transferencias posteriores. Métodos modernos reconcilian miles de historias génicas con marcos de especies y modelan ganancia, pérdida y transferencia. La transferencia horizontal no es solo ruido: donante y receptor imponen cronología relativa. Las fechas absolutas requieren modelos de tasas y calibraciones geológicas. En 2024, duplicaciones pre-LUCA con nodos vinculados produjeron una edad cercana a 4,2 Ga y un genoma probabilístico de al menos 2,5 Mb, unas 2.600 proteínas. También sugirieron acetogénesis, ecología e inmunidad temprana. Son interpretaciones actuales, no observaciones. La membrana quedó sin resolver y otros métodos recuperan contenido ancestral distinto.

Por qué importa esta pregunta

LUCA suele ilustrarse como si los científicos hubieran encontrado su célula y secuenciado su genoma. En realidad, cada rasgo procede de una inferencia distinta y tiene un modo de fallo distinto. La

ascendencia común puede ser sólida mientras una ruta metabólica sigue discutible; un reloj puede ser matemáticamente preciso y depender de calibraciones interpretativas. Seguir la reconstrucción paso a paso muestra cómo los genomas se vuelven instrumentos históricos. También impide que un dibujo atractivo oculte el logro central: extraer una población ancestral acotada tras miles de millones de años de mutación, pérdida, transferencia y extinción.

1. Un ancestro definido por sus descendientes

La pregunta

Nada llamado LUCA fue excavado. El nombre identifica la población ancestral más reciente de la que descienden todos los linajes celulares supervivientes. Su existencia se infiere hacia atrás desde relaciones entre moléculas vivas, y cada rasgo físico exige un argumento adicional.

Un ancestro común se define por descendientes. Si seguimos hacia atrás dos linajes vivos, sus ramas acaban encontrándose; al ampliar la muestra a toda vida celular, el último encuentro compartido es LUCA. Douglas Theobald comparó modelos de ascendencia común y separada para proteínas conservadas y halló apoyo abrumador a la ascendencia común universal en los organismos muestreados.[6] La prueba concierne a linajes supervivientes del conjunto. No cuenta cada intento de vida anterior.

La palabra último evita un error común. LUCA no tiene que ser el primer replicador, protocélula o célula. Poblaciones anteriores pudieron inventar partes de la traducción, intercambiarlas y no dejar descendientes independientes. Carl Woese describió una fase comunal de progenotes donde intercambio genético y acoplamiento genotipo–fenotipo inmaduro precedieron a linajes modernos.[7,8] Esa interpretación no es necesaria para la ascendencia común, pero explica por qué el último ancestro compartido contiene ya una prehistoria larga. También recuerda que la genealogía reconstruida puede empezar mucho después que la evolución que hizo posible su maquinaria.

LUCA tampoco tuvo que ser una célula genéticamente uniforme. Un ancestro de especie suele ser una población con variación, nacimientos, muertes e intercambio. La población ancestral pudo ocupar varios hábitats conectados y conservar continuidad suficiente para originar después líneas bacterianas y arqueanas. Llamarla punto en un diagrama comprime la población en un nodo. La compresión es útil; confundir el nodo con un individuo no.

Los rasgos compartidos son pistas, no posesiones automáticas. Si bacterias y arqueas portan proteínas ribosómicas homólogas, la explicación simple puede ser herencia del ancestro común. Un gen también puede desaparecer en muchos descendientes o cruzar después entre dominios. La presencia a ambos lados se filtra mediante árboles génicos y modelos de duplicación, pérdida y transferencia.[9,10,15] LUCA no surge listando todo lo presente en dos células modernas y tomando la intersección.

La reconstrucción tiene capas. La semejanza de secuencia apoya homología; homólogos alineados apoyan árboles génicos; estos se reconcilian con un marco celular; modelos ancestrales asignan probabilidades a genes y rasgos; relojes moleculares añaden tasas y calibraciones para estimar tiempo.[14,18,23] Cada capa conserva incertidumbre de la anterior. Una célula dibujada al final nunca debe parecer más observada que la cadena que la produjo.

En qué punto estamos

LUCA empieza como relación, no como retrato de organismo. La ascendencia común universal identifica una población ancestral compartida y deja cuerpo, hábitat y fecha para inferencias posteriores. El primer mapa decisivo llegó de una molécula que ningún paleontólogo excavó: el ARN ribosómico, cuya secuencia conservada reveló una división más profunda que las apariencias microbianas.

2. El ARN ribosómico reveló la división profunda

Los microbios se agruparon antes sobre todo por forma, tinción, metabolismo y presencia de núcleo. Esas propiedades siguen siendo útiles, pero parientes lejanos convergen en formas similares y parientes próximos cambian metabolismo. Carl Woese eligió ARN ribosómico porque todo organismo celular traduce proteínas, los ribosomas contienen regiones conservadas y variables, y diferencias de secuencia acumulan historia durante lapsos enormes.

En 1977 Woese y George Fox compararon características de secuencias de ARN ribosómico y vieron que los metanógenos no eran una rama extraña de bacterias ordinarias. Representaban un linaje profundo, llamado entonces arqueobacterias.[1] La conclusión reorganizó la biología porque una diferencia oculta en ribosomas resultó más antigua que muchos rasgos visibles. Pocos organismos y catálogos parciales hacían modesto el análisis original, pero secuencias posteriores confirmaron la división central.

Woese, Otto Kandler y Mark Wheelis formalizaron bacterias, arqueas y eucariotas como tres dominios en 1990.[2] El diagrama cambió después. La propuesta eocito y genomas arqueanos Asgard apoyan una relación próxima o anidada entre eucariotas y arqueas, no tres tallos primarios igualmente independientes.[20,27,28] La revisión cambia la posición de los eucariotas. No reúne arqueas y bacterias ni borra el descubrimiento molecular original. Es una revisión de la topología profunda, no una anulación de los datos que obligaron a reconocer a las arqueas.

Un árbol de secuencias no surge contando discrepancias. Los investigadores alinean posiciones homólogas y eligen modelos de sustitución, variación de tasas y composición. Sitios rápidos borran señal antigua; linajes no relacionados convergen en composición; un mal alineamiento inventa semejanza. La filogenómica moderna usa muchos marcadores y modelos heterogéneos entre sitios.[19–21] Más genes aportan información solo si sus historias y errores no se tratan ciegamente como idénticos.

El ARN ribosómico y genes conservados de traducción establecen un marco potente sin raíz. Un árbol no enraizado dice qué ramas conectan, no por dónde entra el tiempo. Girarlo en la página mantiene relaciones. Para afirmar que un linaje divergió antes o cartografiar rasgos en LUCA hace falta una raíz. Ningún grupo celular vivo queda fuera de todas las células, así que la raíz universal tuvo que fabricarse con sucesos anteriores a la propia separación.

En qué punto estamos

Las comparaciones ribosómicas establecieron parentesco profundo y división bacterias–arqueas, pero faltaba dirección. La solución fue elegante: hallar genes duplicados antes de LUCA y usar cada copia como grupo externo de su pareja. La maniobra convierte un suceso anterior a la población ancestral en una flecha que atraviesa el árbol universal.

3. La raíz procede de duplicaciones más antiguas

La pregunta

Para enraizar un árbol familiar, los biólogos comparan normalmente un pariente situado fuera. La ascendencia celular universal contiene toda célula conocida, así que su grupo externo no puede ser otra célula. Una duplicación antigua crea la comparación desde dentro.

Supongamos que un gen ancestral se duplicó en copias A y B antes de divergir bacterias y arqueas. Después, ambos dominios heredaron descendientes de ambas copias. Las secuencias A forman una familia y las B otra. Como la separación A–B es anterior a la de especies, la familia B enraíza el árbol de A y viceversa. La lógica solo es sólida si la duplicación es realmente antigua y las copias no se redistribuyeron después de modo engañoso.

Naoyuki Iwabe y colegas aplicaron la estrategia a factores de elongación duplicados y proteínas relacionadas con ATPasas en 1989. Sus árboles de parálogos situaron la raíz entre bacterias y una rama que unía arqueas con eucariotas.[3] El resultado aportó dirección que la semejanza ribosómica sola no daba y apoyó una relación arqueas–eucariotas antes de la era genómica. El alineamiento entre parálogos antiguos y el muestreo escaso eran limitaciones importantes.

Johann Peter Gogarten y colegas analizaron independientemente las dos familias relacionadas de ATPasas, representadas por enzimas tipo vacuolar y tipo F.[4] Recuperaron la misma raíz general. James Brown y W. Ford Doolittle usaron después duplicaciones antiguas de aminoacil-ARNt sintetasas.[5] El acuerdo entre duplicaciones independientes importa porque cada familia génica puede portar problemas propios de transferencia, tasas y divergencia funcional.

El enraizamiento por parálogos no es un sello automático de verdad. Una duplicación situada al lado equivocado de LUCA invierte la lógica. Pérdidas ocultas dejan muestras engañosas; transferencia horizontal mueve una copia; ramas largas se atraen. Gregory Fournier y Gogarten revisaron la raíz ribosómica con modelos explícitos y señales antiguas distintas.[23] Los análisis modernos prueban varias familias, muestras y modelos, en vez de declarar decisiva una enzima.

Raíz y ascendencia común deben permanecer separadas. La comparación de Theobald apoya una ascendencia para las proteínas conservadas probadas aunque se discuta la dirección más profunda.[6] La raíz afecta al orden de divergencias y al estado asignado a LUCA. No convierte maquinaria de traducción compartida en invenciones independientes. Incertidumbre en una flecha del árbol no es incertidumbre sobre la existencia de señal hereditaria arbórea.

En qué punto estamos

Las duplicaciones antiguas orientan la separación profunda, pero no reconstruyen un genoma. Para inferir el contenido de LUCA se pregunta qué familias cruzan la división y cómo llegaron. La respuesta estricta —un gen presente en todas partes— es sorprendentemente pequeña. La realista debe recuperar pérdidas sin confundir transferencias posteriores con herencia ancestral.

4. El núcleo universal es pequeño y sesgado

Tomemos la intersección de genes de cada célula secuenciada: los supervivientes se concentran en traducción, proteínas ribosómicas, procesamiento de ARN y componentes que conectan codones con aminoácidos. J. Kirk Harris y colegas hallaron un núcleo genético pequeño para el ancestro

universal, dominado por procesamiento de información.[15] El resultado identifica maquinaria extraordinariamente persistente. No es el genoma completo de LUCA, porque presencia universal es una exigencia más dura que presencia ancestral.

La pérdida génica encoge la intersección al crecer el muestreo. Un parásito o simbionte descarta genes biosintéticos porque el huésped aporta productos. Robert Charlebois y Doolittle llamaron a la respuesta estadística «rescatar el núcleo de la extinción»: permitir pérdidas plausibles en vez de exigir que cada genoma moderno retenga cada gen antiguo.[17] El rescate introduce supuestos. Poca pérdida hace diminuto a LUCA; demasiada lo vuelve dueño improbable de casi todo.

La transferencia horizontal empuja al lado opuesto. Un gen metabólico presente en ciertas bacterias y arqueas puede ser antiguo o cruzar después el límite. Boris Mirkin y colegas formalizaron escenarios de ganancia y pérdida para historias genómicas; reconciliaciones posteriores añadieron duplicaciones y transferencias.[18] Cada suceso tiene coste o probabilidad. Una lista ancestral de genes es una historia elegida por modelo, no una capa visible común a todos los genomas.

Genes mínimos y ancestrales responden preguntas distintas. Arcady Mushegian y Eugene Koonin compararon genomas bacterianos completos para derivar un conjunto mínimo candidato para vida celular.[16] Una célula moderna puede necesitar reparación o membrana recientes; un gen ancestral se vuelve prescindible tras reemplazar una ruta. Medios ricos y dependencia del huésped cambian esencialidad. Un descendiente mínimo no se vuelve LUCA al eliminarle suficientes genes.

El núcleo estricto está sesgado hacia sistemas resistentes a reemplazo y transferencia. La traducción se conserva en parte porque sus muchos componentes interactuantes dificultan sustituirla por completo. Las rutas metabólicas son modulares y móviles. Una reconstrucción solo del núcleo dibuja a LUCA rico en procesamiento de información pero incapaz de alimentarse.[13,14] Métodos probabilísticos y atentos a transferencias restauran metabolismo, comprando completitud con supuestos adicionales.

En qué punto estamos

El núcleo universal es evidencia genuina y censo incompleto. La pérdida oculta genes ancestrales; la transferencia los imita; la persistencia favorece traducción sobre metabolismo. La complicación no termina la reconstrucción. Cambia la unidad de evidencia desde un gen compartido hacia su historia y convierte el intercambio horizontal en un bosque que a veces restringe el árbol.

5. Los genes forman un bosque alrededor del árbol

La pregunta

Un gen que salta entre linajes rompe su genealogía vertical simple. Pero un salto dirigido también afirma que donante y receptor coexistieron en un orden concreto. Reconciliada con cuidado, la violación se convierte en restricción histórica.

Los genomas procariotas son mosaicos. Genes de resistencia, metabolismo y adaptación ecológica cruzan linajes por transformación, virus y elementos móviles. Doolittle sostuvo en 1999 que ningún árbol único representa las historias de todos los genes como si los genomas fueran linajes sellados.[9] La afirmación se exageró a veces como «no hay árbol». Un bosque de árboles discordantes puede coexistir con un esqueleto estadístico en sistemas más verticales.

Los métodos de árbol de especies modelan ahora la discordancia. Sophie Abby y colegas compararon árboles celulares candidatos reconciliando transferencias laterales y vieron que los patrones de transferencia podían apoyar un árbol, no solo corromperlo.[10] Una transferencia propuesta conecta ramas contemporáneas. Una topología que exige sucesos imposibles o innecesariamente complejos puntúa peor. El método no vuelve cierta cada transferencia; usa su coherencia colectiva.

Las transferencias también contienen cronología relativa. Si el linaje A donó un gen a B, la rama donante existía antes o durante el suceso receptor. Adrián Davín y colegas usaron muchas restricciones así para ordenar ramas del árbol de la vida.[11] John Wolfe y Gregory Fournier aplicaron lógica relacionada a la metanogénesis y restringieron cuándo existían linajes productores de metano.[12] El orden relativo precede a un calendario absoluto.

El árbol temprano fue probablemente menos rígido que las ramas de manual. Woese propuso una fase comunal con amplio intercambio de innovaciones, y Kalin Vetsigian, Woese y Nigel Goldenfeld modelaron convergencia del código genético impulsada por intercambio.[7,29] Son interpretaciones y modelos, no un registro recuperado de tráfico. Explican cómo la evolución colectiva estabiliza sistemas compartidos antes de que los linajes ganen coherencia vertical.

La mejor imagen actual no es un árbol inmaculado ni una red indiferenciada. Genes de traducción, contenido génico, duplicaciones antiguas y reconciliación de transferencias conservan cantidades distintas de señal vertical.[10,19–21] Un árbol resume descendencia celular mientras aristas transversales registran genes adquiridos. LUCA representa una población ancestral dentro de historia reticulada. Su genoma depende de decidir qué aristas descienden por el nodo y cuáles cruzan después.

En qué punto estamos

> *La transferencia vuelve mosaicos los genomas tempranos, pero también aporta orden y prueba árboles. Tras reconciliar historias génicas se plantea una pregunta más ambiciosa: ¿qué química realizaba la población ancestral? La respuesta no se lee solo de presencia universal. Se reconstruye ruta a ruta, con la ecología moderna informando —nunca recordando directamente— el pasado.*

6. El metabolismo se reconstruye, no se recuerda

Una ruta metabólica es más que un gen homólogo. Sus enzimas necesitan funciones, sustratos, cofactores y contexto compatibles. Los descendientes reemplazan pasos, invierten dirección o reclutan una proteína para otra tarea. Los reconstructores forman familias, infieren árboles, los reconcilian con linajes y evalúan si suficientes componentes ancestrales forman una ruta coherente. El resultado es fisiología ponderada por probabilidades, no un fósil metabólico intacto dentro de cada célula.

Madeline Weiss y colegas buscaron entre 6,1 millones de genes procariotas agrupados en 286.514 conjuntos. Solo 355 familias —cerca del 0,1 por ciento— cumplieron sus criterios filogenéticos para LUCA.[13] Desde funciones y cofactores infirieron un ancestro anaerobio, dependiente de hidrógeno, fijador de carbono y nitrógeno, termófilo y rico en química de hierro–azufre y metales. La selectividad hizo defendible la lista; asociaciones ecológicas modernas ayudaron todavía a convertir genes en hábitat.

La ruta de Wood–Ljungdahl se volvió central en ese retrato. Acetógenos y metanógenos modernos usan rutas relacionadas para fijar dióxido de carbono con hidrógeno mediante enzimas ricas en metales. Su economía energética encaja con modelos hidrotermales.[13,25] Pero una distribución actual refleja herencia, pérdida y transferencia, y una ruta ensamblada desde piezas inferidas quizá no operaba en la dirección moderna. La plausibilidad antigua es más fuerte que la prueba histórica exclusiva.

Las membranas exponen un vacío persistente. Bacterias y arqueas usan estereoquímica, cadenas y enlaces lipídicos distintos. La reconstrucción de 2024 recuperó aparato celular básico y enzimas asociadas con ambos tipos, pero no identificó de modo concluyente la membrana de LUCA.[14] Escenarios rivales invocan lípidos mixtos, reemplazo posterior o divergencia temprana.[26] Un metabolismo ricamente reconstruido puede habitar una frontera no resuelta.

Los métodos discrepan por razones de principio. Un núcleo estricto minimiza asignaciones falsas pero pierde genes eliminados. Un modelo de presencia y ausencia restaura pérdidas probables, quizá empujando ganancias demasiado atrás. Reconciliar árboles distingue transferencia, duplicación y pérdida, aunque los árboles antiguos son ruidosos.[13–15,18] La respuesta no es elegir el retrato más detallado, sino etiquetar qué rasgos reaparecen entre métodos y cuáles dependen de uno.

En qué punto estamos

El metabolismo ancestral emerge de historias reconciliadas e interpretación funcional, así que la confianza varía por rasgo. La traducción es más firme que la termofilia; la maquinaria celular, más que una membrana. Falta fechar la fisiología. Para poner LUCA en calendario, la divergencia debe convertirse en tiempo con tasas variables y rocas que calibran sin nombrarlo directamente.

7. Los relojes moleculares necesitan anclas geológicas

La pregunta

Ninguna muestra de LUCA entró en un espectrómetro de masas. Un reloj molecular estima su edad combinando cambio de secuencia, un modelo de tasas evolutivas variables y restricciones fechadas desde fósiles, isótopos o sucesos geológicos en otras partes del árbol.

El reloj molecular más simple imagina sustituciones acumuladas a tasa estable. Durante miles de millones de años, genes y linajes aceleran, frenan, se saturan y cambian restricciones. Los relojes relajados permiten variar tasas bajo distribuciones especificadas. Aún necesitan calibración: un fósil asignado a una rama, una señal isotópica ligada a metabolismo o un suceso geológico que limite un linaje. La precisión matemática interna no vuelve directa una calibración incierta.

Las calibraciones microbianas son especialmente difíciles. Un estromatolito establece vida sin identificar un grupo corona; un isótopo de metano señala un proceso sin nombrar organismo; una forma celular rara vez ofrece anatomía diagnóstica. Holly Betts y colegas integraron evidencia genómica y fósil en un reloj relajado de vida temprana, mostrando alcance y dependencia.[22] Mover una calibración o su posición filogenética mueve edades posteriores.

Las duplicaciones antiguas aportan otra vez palanca. La misma duplicación pre-LUCA produce divergencias correspondientes en dos árboles de parálogos. Edmund Moody y colegas vincularon esos nodos espejo para asignarles distribuciones temporales compartidas.[14] Usaron cinco

parálogos pre-LUCA, calibraciones fósiles e isotópicas y relojes alternativos. Vincular nodos añade información si genes duplicados y divergencias correspondientes están bien identificados.

Su análisis principal situó a LUCA cerca de hace 4.200 millones de años, con intervalo publicado de 4,09–4,33 Ga.[14] Es mucho antes que las comunidades fósiles aceptadas y deja poco tiempo tras formarse la Tierra. No es una roca fechada con el cumpleaños de LUCA. El intervalo depende de alineamientos, raíz, duplicaciones, tasas, calibraciones y reloj; la incertidumbre entre estructuras alternativas puede superar la banda posterior impresa.

Las transferencias añaden restricciones relativas. Davín y colegas usaron orden donante–receptor para fechar el árbol, y Wolfe y Fournier aplicaron esa lógica a metanógenos.[11,12] Un reloj combina antes–después con calibraciones absolutas. Donantes extintos ocultos o dirección errónea engañan. Una fecha responsable de LUCA viaja con intervalo, calibraciones, raíz, familia de reloj y pruebas de sensibilidad, no como cifra aislada.

En qué punto estamos

> *Los relojes no descubren una fecha escondida en secuencias; negocian entre cambio molecular, anclas geológicas y modelos de tasa. La estimación de 4,2 Ga es potente porque su maquinaria puede inspeccionarse. El mismo análisis produjo el retrato reciente más detallado de LUCA, cuya resolución exige separar probabilidad posterior y hecho observado.*

8. Un retrato detallado sigue siendo un modelo

Moody y colegas reconstruyeron para LUCA un genoma de al menos 2,5 megabases, con intervalo publicado de 2,49–2,99 Mb y unas 2.600 proteínas codificadas.[14] Se parece a muchos procariotas modernos y supera ampliamente un núcleo universal estricto. La diferencia procede del método: la reconciliación probabilística permite que genes ancestrales se perdieran o transfirieran después. El detalle se gana modelando historias, no descubriendo más genes universales.

El organismo reconstruido era anaerobio y acetógeno, usaba la ruta de Wood–Ljungdahl y estaba integrado en un ecosistema cuyos subproductos sostenían otros organismos.[14] No era una primera célula solitaria. El análisis también asignó componentes de un sistema temprano parecido a CRISPR–Cas. Cas1 y Cas2 no aparecieron, por lo que el sistema propuesto difiere de un aparato adaptativo moderno completo. La continuidad funcional durante cuatro mil millones de años sigue siendo inferencia.

Algunos rasgos eran más firmes que otros. El análisis apoyaba traducción, maquinaria energética de membrana, direccionamiento de proteínas y organización celular de grado procariota. No determinó concluyentemente la membrana.[14,26] Cada familia inferida tenía probabilidades posteriores distintas. Comprimirlas en una ilustración hace que ribosomas, acetogénesis, inmunidad y contorno fosfolipídico parezcan igual de ciertos cuando no lo son.

Un LUCA complejo no vuelve complejo por definición el origen de la vida. Significa que hubo evolución sustancial antes del último ancestro de los linajes supervivientes. Poblaciones anteriores pudieron ser más simples, comunales y dependientes de geoquímica.[7,24,30,31] La hipótesis de Patrick Forterre sobre dominios impulsados por virus es un ejemplo específico y no consensuado.[30] Las rutas rivales pertenecen al espacio anterior y circundante a LUCA, no al resultado establecido de ascendencia común.

La reconstrucción funciona cuando se lee por capas. La ascendencia común universal es robusta. El marco bacterias–arqueas y un ancestro rico en traducción están bien apoyados. Tamaño genómico, edad exacta y complejidad amplia son estimaciones actuales basadas en modelos. Rutas, hábitat, temperatura, inmunidad y membrana reciben apoyo diferente.[6,13,14,24,31] LUCA no es fotografía. Es una síntesis auditable cuyas discrepancias muestran dónde futuros genomas, modelos y bioquímica ancestral cambiarán la imagen.

En qué punto estamos

LUCA es una de las reconstrucciones más ambiciosas de la ciencia: una población inferida desde descendientes moleculares tras miles de millones de años de pérdida e intercambio. Su rasgo más fuerte no es un rostro, sino una cadena de inferencia visible. El artículo siguiente sigue la realidad dominante de la historia vital: el planeta microbiano de descendientes bacterianos y arqueanos.

Lo que sabemos y cómo lo sabemos

- Los datos moleculares conservados apoyan con fuerza la ascendencia común universal de linajes celulares actuales.[1,2,6]
- Duplicaciones génicas antiguas enraízan la división celular profunda sin un grupo externo celular.[3–5]
- El núcleo génico universal estricto es pequeño y está muy enriquecido en traducción y procesamiento de información.[15–17]
- La transferencia horizontal crea historias discordantes, pero también restringe árboles y cronología relativa.[9–12]
- La reconstrucción probabilística reciente apoya un LUCA procariota y ecológico, dejando la membrana sin resolver.[14,26]

Lo que todavía no sabemos

- La diversidad genética, estructura poblacional y cantidad de intercambio dentro de la población ancestral de LUCA.
- Qué genes inferidos se heredaron verticalmente por LUCA y cuáles llegaron mediante transferencia horizontal profunda.
- La composición exacta de membrana, temperatura, hábitat y dependencia geoquímica de LUCA.
- Cuánta incertidumbre queda fuera de intervalos publicados porque no se promediaron raíces, calibraciones y modelos alternativos.
- La duración y organización de la evolución celular entre las primeras células y LUCA.

Qué podría hacernos cambiar de opinión

- Reconstrucciones ancestrales independientes que converjan en genes y funciones bajo modelos distintos de transferencia y pérdida.
- Resurrección experimental de proteínas antiguas que confirme o refute sustratos, temperaturas y funciones de rutas inferidas.
- Nuevos genomas de ramas profundas que alteren raíces bacterianas o arqueanas y marcadores conservados.

- Mejores calibraciones microbianas con posición filogenética segura y relojes moleculares promediados entre modelos.
- Una historia de biosíntesis de membrana que resuelva si LUCA usó lípidos bacterianos, arqueanos, mixtos o reemplazados.

Si solo recuerdas una cosa

> *LUCA es una población ancestral reconstruida, no la primera vida ni un fósil. La ascendencia común es robusta; genoma, metabolismo, hábitat y edad de unos 4,2 Ga siguen siendo interpretaciones estratificadas.*

Artículos relacionados

- QTC-022 — Las primeras células que nunca vimos
- QTC-024 — El planeta microbiano
- QTC-027 — De la información a la herencia: árbol, red y virus

Referencias

[1] Carl R. Woese; George E. Fox. Phylogenetic Structure of the Prokaryotic Domain: The Primary Kingdoms. Proceedings of the National Academy of Sciences 74, 5088–5090 (1977). DOI 10.1073/pnas.74.11.5088. https://doi.org/10.1073/pnas.74.11.5088

[2] C R Woese; O Kandler; M L Wheelis. Towards a Natural System of Organisms: Proposal for the Domains Archaea, Bacteria, and Eucarya. Proceedings of the National Academy of Sciences 87, 4576–4579 (1990). DOI 10.1073/pnas.87.12.4576. https://doi.org/10.1073/pnas.87.12.4576

[3] N Iwabe; K Kuma; M Hasegawa; S Osawa; T Miyata. Evolutionary Relationship of Archaebacteria, Eubacteria, and Eukaryotes Inferred from Phylogenetic Trees of Duplicated Genes. Proceedings of the National Academy of Sciences 86, 9355–9359 (1989). DOI 10.1073/pnas.86.23.9355. https://doi.org/10.1073/pnas.86.23.9355

[4] J P Gogarten; H Kibak; P Dittrich; L Taiz; E J Bowman; B J Bowman; M F Manolson; R J Poole; T Date; T Oshima; J Konishi; K Denda; M Yoshida. Evolution of the Vacuolar H+-ATPase: Implications for the Origin of Eukaryotes. Proceedings of the National Academy of Sciences 86, 6661–6665 (1989). DOI 10.1073/pnas.86.17.6661. https://doi.org/10.1073/pnas.86.17.6661

[5] J R Brown; W F Doolittle. Root of the Universal Tree of Life Based on Ancient Aminoacyl-tRNA Synthetase Gene Duplications. Proceedings of the National Academy of Sciences 92, 2441–2445 (1995). DOI 10.1073/pnas.92.7.2441. https://doi.org/10.1073/pnas.92.7.2441

[6] Douglas L. Theobald. A Formal Test of the Theory of Universal Common Ancestry. Nature 465, 219–222 (2010). DOI 10.1038/nature09014. https://doi.org/10.1038/nature09014

[7] Carl Woese. The Universal Ancestor. Proceedings of the National Academy of Sciences 95, 6854–6859 (1998). DOI 10.1073/pnas.95.12.6854. https://doi.org/10.1073/pnas.95.12.6854

[8] Carl R. Woese. On the Evolution of Cells. Proceedings of the National Academy of Sciences 99, 8742–8747 (2002). DOI 10.1073/pnas.132266999. https://doi.org/10.1073/pnas.132266999

[9] W. Ford Doolittle. Phylogenetic Classification and the Universal Tree. Science 284, 2124–2128 (1999). DOI 10.1126/science.284.5423.2124. https://doi.org/10.1126/science.284.5423.2124

[10] Sophie S. Abby; Eric Tannier; Manolo Gouy; Vincent Daubin. Lateral Gene Transfer as a Support for the Tree of Life. Proceedings of the National Academy of Sciences 109, 4962–4967 (2012). DOI 10.1073/pnas.1116871109. https://doi.org/10.1073/pnas.1116871109

[11] Adrián A. Davín; Eric Tannier; Tom A. Williams; Bastien Boussau; Vincent Daubin; Gergely J. Szöllősi. Gene Transfers Can Date the Tree of Life. Nature Ecology & Evolution 2, 904–909 (2018). DOI 10.1038/s41559-018-0525-3. https://doi.org/10.1038/s41559-018-0525-3

[12] Joanna M. Wolfe; Gregory P. Fournier. Horizontal Gene Transfer Constrains the Timing of Methanogen Evolution. Nature Ecology & Evolution 2, 897–903 (2018). DOI 10.1038/s41559-018-0513-7. https://doi.org/10.1038/s41559-018-0513-7

[13] Madeline C. Weiss; Filipa L. Sousa; Natalia Mrnjavac; Sinje Neukirchen; Mayo Roettger; Shijulal Nelson-Sathi; William F. Martin. The Physiology and Habitat of the Last Universal Common Ancestor. Nature Microbiology 1, 16116 (2016). DOI 10.1038/nmicrobiol.2016.116. https://doi.org/10.1038/nmicrobiol.2016.116

[14] Edmund R. R. Moody; Sandra Álvarez-Carretero; Tara A. Mahendrarajah; James W. Clark; Holly C. Betts; Nina Dombrowski; Lénárd L. Szánthó; Richard A. Boyle; Stuart Daines; Xi Chen; Nick Lane; Ziheng Yang; Graham A. Shields; Gergely J. Szöllősi; Anja Spang; Davide Pisani; Tom A. Williams; Timothy M. Lenton; Philip C. J. Donoghue. The Nature of the Last Universal Common Ancestor and Its Impact on the Early Earth System. Nature Ecology & Evolution 8, 1654–1666 (2024). DOI 10.1038/s41559-024-02461-1. https://doi.org/10.1038/s41559-024-02461-1

[15] J. Kirk Harris; Scott T. Kelley; George B. Spiegelman; Norman R. Pace. The Genetic Core of the Universal Ancestor. Genome Research 13, 407–412 (2003). DOI 10.1101/gr.652803. https://doi.org/10.1101/gr.652803

[16] A R Mushegian; E V Koonin. A Minimal Gene Set for Cellular Life Derived by Comparison of Complete Bacterial Genomes. Proceedings of the National Academy of Sciences 93, 10268–10273 (1996). DOI 10.1073/pnas.93.19.10268. https://doi.org/10.1073/pnas.93.19.10268

[17] Robert L. Charlebois; W. Ford Doolittle. Computing Prokaryotic Gene Ubiquity: Rescuing the Core from Extinction. Genome Research 14, 2469–2477 (2004). DOI 10.1101/gr.3024704. https://doi.org/10.1101/gr.3024704

[18] Boris G Mirkin; Trevor I Fenner; Michael Y Galperin; Eugene V Koonin. Algorithms for Computing Parsimonious Evolutionary Scenarios for Genome Evolution, the Last Universal Common Ancestor and Dominance of Horizontal Gene Transfer in the Evolution of Prokaryotes. BMC Evolutionary Biology 3, 2 (2003). DOI 10.1186/1471-2148-3-2. https://doi.org/10.1186/1471-2148-3-2

[19] Gareth A. Coleman; Adrián A. Davín; Tara A. Mahendrarajah; Lénárd L. Szánthó; Anja Spang; Philip Hugenholtz; Gergely J. Szöllősi; Tom A. Williams. A Rooted Phylogeny Resolves Early Bacterial Evolution. Science 372, eabe0511 (2021). DOI 10.1126/science.abe0511. https://doi.org/10.1126/science.abe0511

[20] Tom A. Williams; Gergely J. Szöllősi; Anja Spang; Peter G. Foster; Sarah E. Heaps; Bastien Boussau; Thijs J. G. Ettema; T. Martin Embley. Integrative Modeling of Gene and Genome Evolution Roots the Archaeal Tree of Life. Proceedings of the National Academy of Sciences 114, E4602–E4611 (2017). DOI 10.1073/pnas.1618463114. https://doi.org/10.1073/pnas.1618463114

[21] Laura A. Hug; Brett J. Baker; Karthik Anantharaman; Christopher T. Brown; Alexander J. Probst; Cindy J. Castelle; Cristina N. Butterfield; Alex W. Hernsdorf; Yuki Amano; Kotaro Ise; Yohey Suzuki; Natasha Dudek; David A. Relman; Kari M. Finstad; Ronald Amundson; Brian C. Thomas; Jillian F. Banfield. A New View of the Tree of Life. Nature Microbiology 1, 16048 (2016). DOI 10.1038/nmicrobiol.2016.48. https://doi.org/10.1038/nmicrobiol.2016.48

[22] Holly C. Betts; Mark N. Puttick; James W. Clark; Tom A. Williams; Philip C. J. Donoghue; Davide Pisani. Integrated Genomic and Fossil Evidence Illuminates Life's Early Evolution and Eukaryote Origin. Nature Ecology & Evolution 2, 1556–1562 (2018). DOI 10.1038/s41559-018-0644-x. https://doi.org/10.1038/s41559-018-0644-x

[23] G. P. Fournier; J. P. Gogarten. Rooting the Ribosomal Tree of Life. Molecular Biology and Evolution 27, 1792–1801 (2010). DOI 10.1093/molbev/msq057. https://doi.org/10.1093/molbev/msq057

[24] David Penny; Anthony Poole. The Nature of the Last Universal Common Ancestor. Current Opinion in Genetics & Development 9, 672–677 (1999). DOI 10.1016/S0959-437X(99)00020-9. https://doi.org/10.1016/S0959-437X(99)00020-9

[25] Nick Lane; William F. Martin. The Origin of Membrane Bioenergetics. Cell 151(7), 1406–1416 (2012). DOI 10.1016/j.cell.2012.11.050. https://doi.org/10.1016/j.cell.2012.11.050

[26] Jonathan Lombard; Purificación López-García; David Moreira. The Early Evolution of Lipid Membranes and the Three Domains of Life. Nature Reviews Microbiology 10, 507–515 (2012). DOI 10.1038/nrmicro2815. https://doi.org/10.1038/nrmicro2815

[27] J A Lake; E Henderson; M Oakes; M W Clark. Eocytes: A New Ribosome Structure Indicates a Kingdom with a Close Relationship to Eukaryotes. Proceedings of the National Academy of Sciences 81, 3786–3790 (1984). DOI 10.1073/pnas.81.12.3786. https://doi.org/10.1073/pnas.81.12.3786

[28] Anja Spang; Jimmy H. Saw; Steffen L. Jørgensen; Katarzyna Zaremba-Niedzwiedzka; Joran Martijn; Anders E. Lind; Roel van Eijk; Christa Schleper; Lionel Guy; Thijs J. G. Ettema. Complex Archaea That Bridge the Gap Between Prokaryotes and Eukaryotes. Nature 521, 173–179 (2015). DOI 10.1038/nature14447. https://doi.org/10.1038/nature14447

[29] Kalin Vetsigian; Carl Woese; Nigel Goldenfeld. Collective Evolution and the Genetic Code. Proceedings of the National Academy of Sciences 103, 10696–10701 (2006). DOI 10.1073/pnas.0603780103. https://doi.org/10.1073/pnas.0603780103

[30] Patrick Forterre. Three RNA Cells for Ribosomal Lineages and Three DNA Viruses to Replicate Their Genomes: A Hypothesis for the Origin of Cellular Domain. Proceedings of the National Academy of Sciences 103, 3669–3674 (2006). DOI 10.1073/pnas.0510333103. https://doi.org/10.1073/pnas.0510333103

[31] Nicolas Glansdorff; Ying Xu; Bernard Labedan. The Last Universal Common Ancestor: Emergence, Constitution and Genetic Legacy of an Elusive Forerunner. Biology Direct 3, 29 (2008). DOI 10.1186/1745-6150-3-29. https://doi.org/10.1186/1745-6150-3-29

El planeta microbiano

QTC-024 · 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

La Tierra parece un planeta de bosques y animales porque esos organismos se ven. Sin embargo, por duración, abundancia, variedad metabólica y trabajo planetario, su historia es abrumadoramente microbiana. El ARN ribosómico reveló bacterias y arqueas como linajes profundos; microscopía, perforación y estudios moleculares expusieron poblaciones inmensas que el cultivo había omitido. Las cifras siguen basadas en modelos: las plantas dominan el carbono de biomasa acumulada, mientras estimaciones actualizadas redujeron recuentos de grandes compartimentos subterráneos. Aun así, los microbios operan ciclos de carbono, nitrógeno, azufre, metano y oxígeno mediante comunidades acopladas, no células aisladas. Algunas poblaciones profundas se renuevan con lentitud extraordinaria; los extremófilos establecen posibilidad bajo condiciones concretas, no ascendencia directa ni vida extraterrestre. Llamar microbiana a la Tierra es una síntesis medida sobre tiempo, diversidad y función biogeoquímica, no afirmar que los microbios pesen más que las plantas ni que se haya contado cada célula.

En 60 segundos

La mayor parte de la vida que habitó la Tierra fue microbiana, pero microbio no es una rama de un árbol. Es una categoría práctica que abarca bacterias, arqueas y muchos eucariotas microscópicos. Un censo de 1998 estimó 4–6 × 10^30 células procariotas; síntesis posteriores redujeron compartimentos importantes, incluidos sedimentos bajo el fondo marino y el subsuelo continental. Esa revisión es una fortaleza: los totales planetarios se construyen con muestras, volúmenes de hábitat y factores de conversión. Las plantas aún dominan el carbono de biomasa acumulada. El dominio microbiano reside en historia prolongada, números celulares, variedad metabólica y flujo repetido. Los microbios capturan luz de varios modos y acoplan donantes inorgánicos con aceptores; metanógenos, oxidadores de metano y socios sintróficos hacen posibles reacciones conjuntas. Comunidades profundas pueden persistir cerca de límites energéticos con renovación poblacional de años a milenios. Las biopelículas crean gradientes, los virus redirigen materia y genes, y la transferencia horizontal vuelve red la historia funcional. Como el cultivo ve organismos seleccionados, sondas ribosómicas, metagenomas y genomas unicelulares ampliaron el árbol conocido. Los extremófilos muestran tolerancias bajo condiciones declaradas. Son especialistas modernos, no fósiles del origen vital. La conclusión es sólida; recuentos, tasas y transiciones antiguas siguen revisables.

Por qué importa esta pregunta

La expresión planeta microbiano puede sonar retórica si no se separan sus dimensiones. Número celular no es biomasa; biomasa no es actividad; un gen no es una tasa medida; sobrevivir en laboratorio no es dominar un ecosistema. Mantener visibles esas distinciones explica cómo se infiere una biosfera demasiado pequeña, profunda y dispersa para censarla directamente. También muestra por qué las estimaciones corregidas no reducen la importancia microbiana. El punto no es un total espectacular, sino la convergencia de filogenia, microscopía, química, genómica y flujos sobre un planeta cuya habitabilidad e historia atmosférica construyeron en gran parte organismos que rara vez vemos.

1. El mundo visible es una capa delgada

La pregunta

Bosques, animales y flores dominan la atención humana porque su tamaño los vuelve visibles. Pero ¿qué ocurre con esa imagen cuando la historia vital se mide por duración, linajes, posibilidades bioquímicas y trabajo realizado, no por lo que una persona puede ver?

Durante la mayor parte de la historia habitada de la Tierra, la vida fue microbiana. Animales y plantas terrestres llegaron tarde a una biosfera ya alterada por células durante miles de millones de años.[29,30] El registro antiguo es desigual: los fósiles preservan formas selectivamente y las señales geoquímicas identifican procesos mejor que organismos. Ninguna cronología plausible convierte la vida macroscópica en condición predeterminada del planeta vivo.

Microbiano no significaba un reino procariota indiferenciado. Comparaciones del ARN ribosómico llevaron a Carl Woese y George Fox a reconocer bacterias y arqueas como linajes celulares profundamente distintos.[1,2] La reorganización vino de moléculas, no de apariencia. Los nombres de dominio y la posición de la raíz vital son preguntas separadas, pero la distinción bacteriana–arqueana transformó el mapa que debe contar cualquier censo.

Microbio es, por tanto, una categoría operativa, no un clado formal. Abarca bacterias, arqueas y muchos eucariotas cuyo tamaño pequeño o vida unicelular oculta historias radicalmente distintas.[1,2,24] Los virus pertenecen a la ecología microbiana porque infectan células y redirigen comunidades, pero no son microorganismos celulares. Una palabra práctica cruza varias ramas evolutivas.

Pequeño no significa químicamente simple. Los genomas microbianos codifican fototrofia oxigénica y anoxigénica, fermentación, metanogénesis y muchas maneras de usar donantes o aceptores inorgánicos ausentes en animales y plantas.[10,23,24] Un genoma muestra potencial, no actividad; aun así, ese abanico ya deshace la ecuación entre complejidad visible y versatilidad bioquímica.

La imagen centrada en animales es comprensible, pero ecológicamente incompleta. Los microorganismos sostienen descomposición, redes alimentarias y transformaciones elementales en suelos, océanos, sedimentos y rocas.[3,10,34] La afirmación exige una cautela inmediata: las plantas dominan el carbono global de biomasa acumulada en la síntesis más conocida. Un planeta microbiano no es simplemente aquel donde los microbios pesan más.

En qué punto estamos

La visibilidad era el denominador equivocado. Los microbios dominan la duración vital, gran parte de su abundancia y la mayoría de su repertorio metabólico sin dominar toda medida. Pero la conclusión no puede descansar en impresión: exige convertir muestras dispersas en estimaciones planetarias y explicar por qué cifras posteriores y menores representan mejor conocimiento, no retirada.

2. Contar lo invisible

La pregunta

Nadie contó todas las células microbianas. Los totales globales son modelos construidos con muestras, volúmenes cartografiados de hábitat y factores de conversión. Sus revisiones muestran cómo mejora la inferencia y por qué número celular, carbono acumulado y actividad biológica nunca son cifras intercambiables.

En 1998, William Whitman, David Coleman y William Wiebe estimaron unas 4–6 × 10^30 células procariotas en la Tierra.[3] La cifra se volvió célebre porque cuantificaba la mayoría invisible. No era un recuento literal. Los autores combinaron mediciones de suelos, agua, sedimentos y subsuelo, y extrapolaron sobre volúmenes muestreados con densidades radicalmente desiguales.

Trabajos posteriores revisaron compartimentos cruciales. Una síntesis de 2018 estimó 2–6 × 10^29 células en el subsuelo continental y, al combinar inventarios, unas 23–31 petagramos de carbono en la biomasa procariota global.[5] Flujo térmico, profundidad, litología y cobertura geográfica escasa entraron en el modelo. El rango publicado describe incertidumbre dentro del marco, no todo error estructural posible.

El sedimento bajo el fondo marino cambió aún más. Una reevaluación de 2012 estimó allí 2,9 × 10^29 células y 4,1 petagramos de carbono, muy por debajo de una estimación anterior.[6] Usó mejores testigos y correlaciones con sedimentación y distancia a tierra. El resultado cubre sedimento, no toda la corteza oceánica, e ilustra por qué un total global debe conservar definiciones de hábitat.

El carbono aporta otro denominador. Yinon Bar-On, Rob Phillips y Ron Milo estimaron que las plantas dominan el carbono de biomasa terrestre pese a la enorme abundancia microbiana.[4,5] Eso no rebaja a los microbios. Una reserva pequeña sostiene gran flujo si la materia circula repetidamente. La comparación correcta depende de la pregunta: células para abundancia, carbono para reserva, producción para recambio y tasas para trabajo geoquímico.

Todo censo comparte conversiones. La microscopía puede contar células intactas y muertas; las copias génicas varían; los lípidos persisten; el carbono por célula cambia con tamaño y hambre.[3,5,6] Comunidades profundas también separan presencia de actividad.[7–9] Una cifra defendible nombra qué se midió, cómo se infirió el volumen y qué conversiones produjeron la estimación planetaria.

En qué punto estamos

Un censo es más fuerte cuando mantiene visibles denominador y extrapolaciones. Los totales revisados no borran la escala microbiana; sustituyen un mapa por otro mejor acotado. Los recuentos aún dicen poco sobre lo que hacen las células. La dimensión siguiente es metabólica: la luz solar es solo una fuente de desequilibrio utilizable.

3. La luz solar es solo una fuente de energía

La fotosíntesis es plural. Los microbios realizan fotosíntesis oxigénica y varias formas anoxigénicas con pigmentos, donantes de electrones y arquitecturas de centros de reacción distintos.[10,33] El agua no es el único donante posible ni el oxígeno el producto inevitable de capturar luz. La distribución de esos sistemas registra divergencia antigua y transferencia génica posterior, que QTC-025 reencontrará en la atmósfera.

Otros microbios explotan desequilibrios químicos. Los quimiolitótrofos oxidan hidrógeno, azufre reducido, hierro o amoníaco acoplando la reacción a un aceptor disponible.[5,10,12] Llamarlo energía química puede confundir: una molécula donante no es batería por sí sola. Aceptor, concentraciones, productos, temperatura y presión determinan juntos si hay energía disponible.

La posibilidad termodinámica no es uso biológico. Una reacción debe rendir suficiente energía libre localmente, avanzar a velocidad accesible y acoplarse mediante maquinaria celular.[8,10,15] Muchos ecosistemas sin luz aún dependen indirectamente de fotosíntesis porque oxígeno, nitrato o materia orgánica enterrada llegaron de la superficie. La independencia es un balance de reacciones, no una etiqueta unida a la oscuridad.

Las arqueas metanógenas muestran varias arquitecturas para conservar energía mientras producen metano biológico.[13] Sus rutas usan dióxido de carbono, compuestos metilados o acetato en ambientes distintos. El metano solo no es biofirma: también lo producen reacciones geológicas. Isótopos, coproductos, genes, contexto y tasas medidas deben converger antes de asignar una fuente.

A veces la unidad metabólica es una asociación. La oxidación anaerobia del metano suele realizarse en consorcios arqueanos y bacterianos, enlazada con procesos socios como reducción de sulfato.[14,15] Mantener bajos los intermediarios puede volver favorable una reacción acoplada que ninguno sostiene por separado. La organización comunitaria entra en el cálculo energético.

En qué punto estamos

El metabolismo microbiano se expande donde coinciden donantes, aceptores y catalizadores compatibles, pero ninguna ruta escapa al balance energético. Esa regla vuelve reveladora la biosfera profunda. Muy por debajo de sustratos frescos abundantes, las células persisten con potencias y recambios distintos del crecimiento de laboratorio, separando otra vez abundancia y actividad.

4. La biosfera profunda vive despacio

La pregunta

Una célula detectada cientos de metros bajo el fondo marino no está automáticamente viva, activa ni es autóctona. La ciencia de la biosfera profunda debe separar contaminación, restos preservados, mantenimiento y reproducción mientras mide sistemas cuyas escalas naturales pueden superar la carrera de quien investiga.

Células y actividades microbianas aparecen ampliamente en sedimentos marinos profundamente enterrados, incluidas muestras cientos de metros bajo el fondo.[6,9,32] La perforación vuelve la observación un problema adversarial. Fluidos y organismos superficiales pueden entrar en el

testigo, mientras moléculas antiguas persisten tras cesar la actividad. Trazadores, manipulación estéril y patrones espaciales son evidencia, no detalles domésticos.

El subsuelo continental también es populoso y heterogéneo. Sus células estimadas ocupan fracturas, poros y aguas limitados por temperatura, disponibilidad líquida, porosidad y química de roca.[5] Un total global no define un ecosistema profundo universal. Los sondeos alcanzan geología accesible y conexiones locales de fluidos pueden unir aparente aislamiento con recarga superficial o materia orgánica enterrada.

En sedimento marino, las actividades medidas suelen disminuir con profundidad y energía disponible.[9] Incluso una célula sin luz puede depender finalmente de carbono fotosintético enterrado o de oxidantes llevados por circulación oceánica. Otros ambientes usan reacciones agua –roca o sustratos radiolíticos. El grado de independencia superficial debe demostrarse para cada red de reacciones.

El suministro escaso cambia el tempo. Revisiones de vida profunda infieren potencias y recambios extraordinariamente bajos desde gradientes geoquímicos, inventarios celulares y tasas de reacción.[7,8,32] Son promedios poblacionales de comunidades heterogéneas, no películas de una célula dividiéndose tras mil años. Las células pueden invertir en reparación, mantenimiento, reemplazo o crecimiento intermitente, y la partición es difícil de observar.

Por eso, tiempos generacionales desde años hacia milenios son interpretaciones actuales, no mediciones directas de ciclos celulares.[7,8] Dividir producción inferida por población acumulada introduce supuestos: cuántas células viven, si la biomasa es estable y si todas comparten actividad. La biosfera profunda es real; su reloj biológico se reconstruye.

En qué punto estamos

> *La vida profunda está establecida, pero su tempo se infiere uniendo control de contaminación, inventarios y tasas químicas. La distinción entre reserva y flujo ya es inevitable. También importa a escala planetaria, porque los microbios no necesitan la mayor biomasa para procesar repetidamente los mismos elementos y remodelar océanos y atmósfera.*

5. Los microbios operan ciclos planetarios

El metabolismo microbiano del carbono enlaza atmósfera, océano, suelo, biomasa, sedimento y roca. Fotosíntesis y quimiosíntesis fijan carbono; respiración y fermentación devuelven productos; otras células consumen intermediarios.[10,34] Una ruta genómica es solo potencial, así que los balances globales dependen de tasas, gradientes e inventarios. El ciclo es una contabilidad construida desde muchos hábitats.

El nitrógeno se transforma igualmente. La fijación vuelve disponible el nitrógeno atmosférico, mientras nitrificación, desnitrificación y anammox lo mueven entre formas reducidas, oxidadas y gaseosas.[11,12] Plantas y animales participan, pero conversiones químicas clave son microbianas. Fertilizantes y combustión alteran ahora esas redes sin reemplazar su maquinaria celular.

El azufre conecta rocas, aguas y células mediante oxidación y reducción de múltiples compuestos.[10,14] En sedimentos anóxicos, la reducción de sulfato puede acoplarse con materia orgánica o consumo de metano. En fuentes y otras interfaces, gradientes fuertes acercan sustratos reducidos y

oxidantes. El depósito visible suele ser producto de zonas de reacción invisibles organizadas en milímetros.

La metanogénesis y la oxidación microbiana del metano regulan fuentes y sumideros biológicos mayores.[13–15] Ningún lado pertenece a un organismo o hábitat universal. La consecuencia atmosférica neta es la diferencia entre producción, consumo, transporte y oxidación, cada cual incierto. Detectar metano sin ese balance no establece qué proceso lo produjo o preservó.

El oxígeno ofrece el mayor ejemplo histórico. La fotosíntesis oxigénica evolucionó en linajes microbianos y finalmente cambió las condiciones redox superficiales, mientras metabolismos microbianos aún gobiernan retroalimentaciones de carbono y nutrientes.[4,10,11,30,33] Una reserva modesta ejecuta gran flujo mediante reutilización rápida. QTC-025 preguntará cómo las rocas conservan el tiempo y estructura de esa transformación atmosférica.

En qué punto estamos

Los ciclos planetarios son redes de reacciones acopladas, no trofeos asignados a una especie. Su escala emerge del recambio repetido y de interfaces donde el producto de un organismo alimenta a otro. Para entender esa organización, el paso siguiente es dejar de tratar células aisladas como unidad natural del trabajo microbiano.

6. Las comunidades son máquinas metabólicas

Una biopelícula no es una multitud suspendida en líquido uniforme. Las células construyen matrices que retienen agua y moléculas, resisten perturbación y crean gradientes químicos abruptos en distancias microscópicas.[16] El oxígeno puede desaparecer cerca de la superficie mientras procesos anaerobios continúan debajo. La arquitectura comunitaria crea nichos vecinos que un matraz bien mezclado elimina deliberadamente.

La sintrofia refuerza la dependencia. Los socios mantienen hidrógeno, formiato u otros intermediarios a concentraciones que vuelven favorable un conjunto acoplado de reacciones.[15] Ninguna población quizá crezca sola bajo iguales condiciones globales. La unidad metabólica significativa es la red cerrada de intercambio, y perturbar un miembro cambia la termodinámica del resto.

Los genes también cruzan fronteras poblacionales. La transferencia horizontal distribuye funciones entre linajes microbianos, de modo que resistencia, metabolismo o adaptación suelen formar redes aunque la descendencia vertical siga recuperable en marcadores conservados.[24,25] Un árbol génico y un marco de especies responden preguntas relacionadas, pero distintas. QTC-027 seguirá esa diferencia hacia herencia y virus.

Los virus participan sin ser células. La infección mata huéspedes, libera materia orgánica, redirige metabolismo y a veces mueve genes.[17,18] Estudios oceánicos encuentran abundancia y diversidad virales enormes, pero una secuencia o partícula no prueba por sí sola infección activa. Los totales globales dependen de muestreo, clasificación y modelos de partículas sin marcador universal.

Los metagenomas también revelan potencial colectivo, no una ecología terminada. La secuenciación ambiental recupera genes sin cultivo, pero abundancia de secuencia no es abundancia celular, asignación a un genoma, expresión ni tasa de reacción.[17,18,21–23]

Transcritos, proteínas, metabolitos, espacio y flujos aportan enlaces distintos del potencial a la actividad. Las comunidades son máquinas solo cuando esos enlaces se cierran.

En qué punto estamos

Las comunidades microbianas fabrican gradientes, intercambian metabolitos, mueven genes y redirigen materia mediante infección. Su conducta colectiva no se reconstruye desde un aislado o una capa de secuencias. Pero algunos organismos viven cerca de límites físicos llamativos, planteando otro peligro: confundir adaptación moderna con una ventana a la vida temprana.

7. Los extremos revelan adaptación, no ascendencia

La pregunta

Un microbio que crece a temperatura récord demuestra que la vida puede funcionar allí bajo el experimento declarado. No muestra que la mayoría de células naturales prospere allí, que la vida temprana se pareciera a él ni que exista vida en otro mundo.

Cultivos de laboratorio han demostrado proliferación celular microbiana a 121 °C y 122 °C bajo alta presión.[27,28] Esos resultados ampliaron el rango medido de crecimiento, pero importan las cláusulas experimentales. La presión evitó ebullición, el medio aportó sustratos concretos y el crecimiento se juzgó con evidencia celular y química especificada. Un récord es una observación acotada, no una línea universal en todo hábitat.

Otros extremófilos toleran alta salinidad, acidez o alcalinidad fuertes, frío, desecación y radiación mediante adaptaciones moleculares y fisiológicas distintas.[26] La palabra extremo está centrada en humanos: el óptimo de un acidófilo daña un organismo neutro, mientras el oxígeno es tóxico para anaerobios estrictos. Varios estreses combinados pueden ser más difíciles que cualquiera probado por separado.

Los extremófilos modernos son linajes evolucionados, no fósiles vivientes. Sus genomas actuales contienen herencia antigua, innovaciones posteriores, pérdidas y transferencias como otros organismos.[24,26] Un termófilo ayuda a probar si una arquitectura proteica funciona a alta temperatura, pero su hábitat no identifica el ambiente de LUCA ni de las primeras células.

La tolerancia también difiere de la importancia ecológica. Crecer en un límite establece posibilidad bajo una receta; no establece poblaciones naturales grandes, tasas altas ni persistencia cuando temperatura, presión, pH y energía escasa actúan juntos.[26–28] El control de contaminación es decisivo cerca de récords, pues pocas células de crecimiento rápido procedentes de una fase más fría pueden imitar crecimiento débil.

El techo térmico exacto sigue siendo una inferencia experimental ligada a presión, medio, criterios de crecimiento y control de esterilidad.[27,28] Un nuevo récord puede moverlo, mientras la estabilidad macromolecular explica por qué no subirá sin límite. Los extremófilos amplían la habitabilidad plausible; no aportan evidencia de haber encontrado un ambiente extraterrestre habitado.

En qué punto estamos

Los extremos enseñan posibilidad solo cuando las condiciones experimentales acompañan al récord. No resucitan células ancestrales ni pueblan otro planeta por analogía. La misma disciplina rige el

retrato microbiano mayor: como la mayoría de organismos nunca se cultivó, hubo que reconstruir todo el planeta combinando métodos con puntos ciegos distintos.

8. Un planeta microbiano se reconstruye

El cultivo definió durante mucho tiempo el mundo microbiano accesible. La gran anomalía del recuento en placa nombró la brecha entre células vistas al microscopio y colonias formadas con una receta de laboratorio.[19,20] La fracción depende del ambiente y método, no es un porcentaje fijo. Una placa selecciona organismos que toleran nutrientes, superficies, temperatura, atmósfera y asociaciones; no crecer no significa faltar en la naturaleza.

Las sondas de ARN ribosómico y la secuenciación aflojaron ese filtro. Se podían identificar linajes in situ y comparar moléculas conservadas sin cultivar primero cada organismo.[1,2,20] La detección molecular introdujo preguntas propias sobre extracción, copias, contaminación y material inactivo. Cambió qué organismos eran visibles, no la obligación de demostrar qué representa una señal.

La secuenciación ambiental aleatoria amplió la vista desde marcadores hacia genes y rutas colectivos.[21,22,34] Los metagenomas revelan potencial bioquímico comunitario, mientras ensamblaje y agrupación intentan asociar fragmentos con poblaciones. Una ruta montada en una muestra puede repartirse entre socios, y la abundancia relativa de lecturas no equivale automáticamente a células o tasa de reacción.

Genomas unicelulares, genomas ensamblados desde metagenomas y cultivo dirigido añadieron linajes profundos al árbol vital.[23–25,31] Cada vía compensa un obstáculo: comunidades mezcladas, células no cultivadas o contexto fisiológico perdido. Cada una también tiene errores característicos —sesgo de amplificación, bins incompletos, contaminación o selección de laboratorio— que datos independientes deben revelar.

La conclusión planetaria nace de triangulación. La microscopía restringe células; estudios moleculares cartografían linajes y potencial; la química mide inventarios y gradientes; las tasas conectan comunidades con ciclos; el contexto geológico prolonga la historia.[3–6,10,24,30] Estos métodos establecen un planeta microbiano y dejan totales, recambio y transiciones antiguas revisables. QTC-025 sigue una de esas transiciones en el registro rocoso de la atmósfera.

En qué punto estamos

La Tierra es microbiana por medidas convergentes, no por una cifra irrepetible. El retrato sobrevive censos revisados porque sus bases incluyen tiempo profundo, amplitud filogenética, variedad metabólica y flujo planetario. Los microbios también alteraron la atmósfera. El artículo siguiente pregunta cómo las rocas conservan esa historia invisible sin ser fotografías simples del aire antiguo.

Lo que sabemos y cómo lo sabemos

- Bacterias y arqueas son linajes celulares profundamente distintos revelados por evidencia molecular comparada.[1,2]
- Los recuentos planetarios de células y biomasa son extrapolaciones explícitas revisadas al remuestrear hábitats mayores.[3–6]
- Los microorganismos ejecutan transformaciones centrales de los ciclos de carbono, nitrógeno, azufre, metano y oxígeno.

- Sedimentos profundos y subsuelo continental contienen grandes poblaciones microbianas bajo fuerte limitación energética.[5–9,32]
- Métodos moleculares y genómicos revelan linajes y potencial metabólico sin exigir cultivo previo.[20–25,31]

Lo que todavía no sabemos

- El número, biomasa y fracción activa exactos de células microbianas en hábitats profundos poco muestreados.
- Cómo mantenimiento, reparación, latencia y reproducción reparten los diminutos presupuestos energéticos profundos.
- La diversidad taxonómica y funcional completa de linajes no cultivados y virus.
- Los límites naturales de la vida cuando temperatura, presión, actividad del agua, pH y energía escasa actúan juntos.
- La secuencia y estructura ecológica precisas de innovaciones microbianas que transformaron la atmósfera antigua.

Qué podría hacernos cambiar de opinión

- Muestreo global normalizado que cambie sustancialmente volúmenes, densidades celulares o conversiones de carbono de grandes hábitats.
- Mediciones unicelulares prolongadas que separen directamente reparación, mantenimiento y división bajo energía profunda.
- Cultivos y genomas cerrados que confirmen o reorganicen linajes mayores reconstruidos desde fragmentos ambientales.
- Crecimiento reproducible más allá de récords fisicoquímicos con control de contaminación y balance energético completo.
- Registros rocosos que reordenen el tiempo de la fotosíntesis oxigénica u otros metabolismos microbianos globales.

Si solo recuerdas una cosa

La Tierra es microbiana por historia, abundancia, metabolismo y flujo planetario, no solo biomasa. Sus cifras son modelos; comunidades, vida profunda y extremófilos revelan dimensiones distintas y comprobables de dominio.

Artículos relacionados

- QTC-023 — LUCA: el antepasado que reconstruimos
- QTC-025 — Cómo leer una atmósfera en una roca

Referencias

[1] Carl R. Woese; George E. Fox. Phylogenetic structure of the prokaryotic domain: The primary kingdoms. Proceedings of the National Academy of Sciences 74, 5088–5090 (1977). DOI 10.1073/pnas.74.11.5088. https://doi.org/10.1073/pnas.74.11.5088

[2] Norman R. Pace. A molecular view of microbial diversity and the biosphere. Science 276, 734–740 (1997). DOI 10.1126/science.276.5313.734. https://doi.org/10.1126/science.276.5313.734

[3] William B. Whitman; David C. Coleman; William J. Wiebe. Prokaryotes: The unseen majority. Proceedings of the National Academy of Sciences 95, 6578–6583 (1998). DOI 10.1073/pnas.95.12.6578. https://doi.org/10.1073/pnas.95.12.6578

[4] Yinon M. Bar-On; Rob Phillips; Ron Milo. The biomass distribution on Earth. Proceedings of the National Academy of Sciences 115, 6506–6511 (2018). DOI 10.1073/pnas.1711842115. https://doi.org/10.1073/pnas.1711842115

[5] C. Magnabosco; L.-H. Lin; H. Dong; M. Bomberg; W. Ghiorse; H. Stan-Lotter; K. Pedersen; T. L. Kieft; E. van Heerden; T. C. Onstott. The biomass and biodiversity of the continental subsurface. Nature Geoscience 11, 707–717 (2018). DOI 10.1038/s41561-018-0221-6. https://doi.org/10.1038/s41561-018-0221-6

[6] Jens Kallmeyer; Robert Pockalny; Rishi Ram Adhikari; David C. Smith; Steven D'Hondt. Global distribution of microbial abundance and biomass in subseafloor sediment. Proceedings of the National Academy of Sciences 109, 16213–16216 (2012). DOI 10.1073/pnas.1203849109. https://doi.org/10.1073/pnas.1203849109

[7] Bo Barker Jørgensen; Antje Boetius. Feast and famine—microbial life in the deep-sea bed. Nature Reviews Microbiology 5, 770–781 (2007). DOI 10.1038/nrmicro1745. https://doi.org/10.1038/nrmicro1745

[8] Tori M. Hoehler; Bo Barker Jørgensen. Microbial life under extreme energy limitation. Nature Reviews Microbiology 11, 83–94 (2013). DOI 10.1038/nrmicro2939. https://doi.org/10.1038/nrmicro2939

[9] Steven D'Hondt; Bo Barker Jørgensen; D. Jay Miller; Anja Batzke; Ruth Blake; Barry A. Cragg; Heribert Cypionka; Gerald R. Dickens; Timothy Ferdelman; Kai-Uwe Hinrichs; Nils G. Holm; Richard Mitterer; Arthur Spivack; Guizhi Wang; Barbara Bekins; Bert Engelen; Kathryn Ford; Glen Gettemy; Scott D. Rutherford; Henrik Sass; C. Gregory Skilbeck; Ivano W. Aiello; Gilles Guérin; Christopher H. House; Fumio Inagaki; Patrick Meister; Thomas Naehr; Sachiko Niitsuma; R. John Parkes; Axel Schippers; David C. Smith; Andreas Teske; Juergen Wiegel; Christian Naranjo Padilla; Juana Luz Solis Acosta. Distributions of microbial activities in deep subseafloor sediments. Science 306, 2216–2221 (2004). DOI 10.1126/science.1101155. https://doi.org/10.1126/science.1101155

[10] Paul G. Falkowski; Tom Fenchel; Edward F. Delong. The microbial engines that drive Earth's biogeochemical cycles. Science 320, 1034–1039 (2008). DOI 10.1126/science.1153213. https://doi.org/10.1126/science.1153213

[11] Donald E. Canfield; Alexander N. Glazer; Paul G. Falkowski. The evolution and future of Earth's nitrogen cycle. Science 330, 192–196 (2010). DOI 10.1126/science.1186120. https://doi.org/10.1126/science.1186120

[12] Marcel M. M. Kuypers; Hannah K. Marchant; Boran Kartal. The microbial nitrogen-cycling network. Nature Reviews Microbiology 16, 263–276 (2018). DOI 10.1038/nrmicro.2018.9. https://doi.org/10.1038/nrmicro.2018.9

[13] Rudolf K. Thauer; Anne-Kristin Kaster; Henning Seedorf; Wolfgang Buckel; Reiner Hedderich. Methanogenic archaea: ecologically relevant differences in energy conservation. Nature Reviews Microbiology 6, 579–591 (2008). DOI 10.1038/nrmicro1931. https://doi.org/10.1038/nrmicro1931

[14] Katrin Knittel; Antje Boetius. Anaerobic oxidation of methane: progress with an unknown process. Annual Review of Microbiology 63, 311–334 (2009). DOI 10.1146/annurev.micro.61.080706.093130. https://doi.org/10.1146/annurev.micro.61.080706.093130

[15] Alfons J. M. Stams; Caroline M. Plugge. Electron transfer in syntrophic communities of anaerobic bacteria and archaea. Nature Reviews Microbiology 7, 568–577 (2009). DOI 10.1038/nrmicro2166. https://doi.org/10.1038/nrmicro2166

[16] Hans-Curt Flemming; Jost Wingender; Ulrich Szewzyk; Peter Steinberg; Scott A. Rice; Staffan Kjelleberg. Biofilms: an emergent form of bacterial life. Nature Reviews Microbiology 14, 563–575 (2016). DOI 10.1038/nrmicro.2016.94. https://doi.org/10.1038/nrmicro.2016.94

[17] Curtis A. Suttle. Marine viruses—major players in the global ecosystem. Nature Reviews Microbiology 5, 801–812 (2007). DOI 10.1038/nrmicro1750. https://doi.org/10.1038/nrmicro1750

[18] Jennifer R. Brum; J. Cesar Ignacio-Espinoza; Simon Roux; Guilhem Doulcier; Silvia G. Acinas; Adriana Alberti; Samuel Chaffron; Corinne Cruaud; Colomban de Vargas; Josep M. Gasol; Gabriel Gorsky; Ann C. Gregory; Lionel Guidi; Pascal Hingamp; Daniele Iudicone; Fabrice Not; Hiroyuki Ogata; Stéphane Pesant; Bonnie T. Poulos; Sarah M. Schwenck; Sabrina Speich; Celine Dimier; Stefanie Kandels-Lewis; Marc Picheral; Sarah Searson; Tara Oceans Coordinators; Peer Bork; Chris Bowler; Shinichi Sunagawa; Patrick Wincker; Eric Karsenti; Matthew B. Sullivan. Patterns and ecological drivers of ocean viral communities. Science 348, 1261498 (2015). DOI 10.1126/science.1261498. https://doi.org/10.1126/science.1261498

[19] James T. Staley; Allan Konopka. Measurement of in situ activities of nonphotosynthetic microorganisms in aquatic and terrestrial habitats. Annual Review of Microbiology 39, 321–346 (1985). DOI 10.1146/annurev.mi.39.100185.001541. https://doi.org/10.1146/annurev.mi.39.100185.001541

[20] R I Amann; W Ludwig; K H Schleifer. Phylogenetic identification and in situ detection of individual microbial cells without cultivation. Microbiological Reviews 59, 143–169 (1995). DOI 10.1128/mr.59.1.143-169.1995. https://doi.org/10.1128/mr.59.1.143-169.1995

[21] Jo Handelsman. Metagenomics: application of genomics to uncultured microorganisms. Microbiology and Molecular Biology Reviews 68, 669–685 (2004). DOI 10.1128/MMBR.68.4.669-685.2004. https://doi.org/10.1128/MMBR.68.4.669-685.2004

[22] J. Craig Venter; Karin Remington; John F. Heidelberg; Aaron L. Halpern; Doug Rusch; Jonathan A. Eisen; Dongying Wu; Ian Paulsen; Karen E. Nelson; William Nelson; Derrick E. Fouts; Samuel Levy; Anthony H. Knap; Michael W. Lomas; Ken Nealson; Owen White; Jeremy Peterson; Jeff Hoffman; Rachel Parsons; Holly Baden-Tillson; Cynthia Pfannkoch; Yu-Hui Rogers; Hamilton O. Smith. Environmental genome shotgun sequencing of the Sargasso Sea. Science 304, 66–74 (2004). DOI 10.1126/science.1093857. https://doi.org/10.1126/science.1093857

[23] Christian Rinke; Patrick Schwientek; Alexander Sczyrba; Natalia N. Ivanova; Iain J. Anderson; Jan-Fang Cheng; Aaron Darling; Stephanie Malfatti; Brandon K. Swan; Esther A. Gies; Jeremy A. Dodsworth; Brian P. Hedlund; George Tsiamis; Stefan M. Sievert; Wen-Tso Liu; Jonathan A. Eisen; Steven J. Hallam; Nikos C. Kyrpides; Ramunas Stepanauskas; Edward M. Rubin; Philip Hugenholtz; Tanja Woyke. Insights into the phylogeny and coding potential of microbial dark matter. Nature 499, 431–437 (2013). DOI 10.1038/nature12352. https://doi.org/10.1038/nature12352

[24] Laura A. Hug; Brett J. Baker; Karthik Anantharaman; Christopher T. Brown; Alexander J. Probst; Cindy J. Castelle; Cristina N. Butterfield; Alex W. Hernsdorf; Yuki Amano; Kotaro Ise; Yohey Suzuki; Natasha Dudek; David A. Relman; Kari M. Finstad; Ronald Amundson; Brian C. Thomas; Jillian F. Banfield. A new view of the tree of life. Nature Microbiology 1, 16048 (2016). DOI 10.1038/nmicrobiol.2016.48. https://doi.org/10.1038/nmicrobiol.2016.48

[25] Donovan H. Parks; Christian Rinke; Maria Chuvochina; Pierre-Alain Chaumeil; Ben J. Woodcroft; Paul N. Evans; Philip Hugenholtz; Gene W. Tyson. Recovery of nearly 8,000 metagenome-assembled genomes substantially expands the tree of life. Nature Microbiology 2, 1533–1542 (2017). DOI 10.1038/s41564-017-0012-7. https://doi.org/10.1038/s41564-017-0012-7

[26] Lynn J. Rothschild; Rocco L. Mancinelli. Life in extreme environments. Nature 409, 1092–1101 (2001). DOI 10.1038/35059215. https://doi.org/10.1038/35059215

[27] Kazem Kashefi; Derek R. Lovley. Extending the upper temperature limit for life. Science 301, 934 (2003). DOI 10.1126/science.1086823. https://doi.org/10.1126/science.1086823

[28] Ken Takai; Kentaro Nakamura; Tomohiro Toki; Urumu Tsunogai; Masayuki Miyazaki; Junichi Miyazaki; Hisako Hirayama; Satoshi Nakagawa; Takuro Nunoura; Koki Horikoshi. Cell proliferation at 122 °C and isotopically heavy CH4 production by a hyperthermophilic methanogen under high-pressure cultivation. Proceedings of the National Academy of Sciences 105, 10949–10954 (2008). DOI 10.1073/pnas.0712334105. https://doi.org/10.1073/pnas.0712334105

[29] Abigail C. Allwood; Malcolm R. Walter; Balz S. Kamber; Craig P. Marshall; Ian W. Burch. Stromatolite reef from the Early Archaean era of Australia. Nature 441, 714–718 (2006). DOI 10.1038/nature04764. https://doi.org/10.1038/nature04764

[30] Timothy W. Lyons; Christopher T. Reinhard; Noah J. Planavsky. The rise of oxygen in Earth's early ocean and atmosphere. Nature 506, 307–315 (2014). DOI 10.1038/nature13068. https://doi.org/10.1038/nature13068

[31] Hiroyuki Imachi; Masaru K. Nobu; Nozomi Nakahara; Yuki Morono; Miyuki Ogawara; Yoshihiro Takaki; Yoshinori Takano; Katsuyuki Uematsu; Tetsuro Ikuta; Motoo Ito; Yohei Matsui; Masayuki Miyazaki; Kazuyoshi Murata; Yumi Saito; Sanae Sakai; Chihong Song; Eiji Tasumi; Yuko Yamanaka; Takashi Yamaguchi; Yoichi Kamagata; Hideyuki Tamaki; Ken Takai. Isolation of an archaeon at the prokaryote–eukaryote interface. Nature 577, 519–525 (2020). DOI 10.1038/s41586-019-1916-6. https://doi.org/10.1038/s41586-019-1916-6

[32] William D. Orsi. Ecology and evolution of seafloor and subseafloor microbial communities. Nature Reviews Microbiology 16, 671–683 (2018). DOI 10.1038/s41579-018-0046-8. https://doi.org/10.1038/s41579-018-0046-8

[33] Donald A. Bryant; Niels-Ulrik Frigaard. Prokaryotic photosynthesis and phototrophy illuminated. Trends in Microbiology 14, 488–496 (2006). DOI 10.1016/j.tim.2006.09.001. https://doi.org/10.1016/j.tim.2006.09.001

[34] Mary Ann Moran. The global ocean microbiome. Science 350, aac8455 (2015). DOI 10.1126/science.aac8455. https://doi.org/10.1126/science.aac8455

Cómo leer una atmósfera en una roca

QTC-025 · 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

Las rocas antiguas no contienen una muestra continua de aire viejo. Conservan productos de meteorización, fotoquímica, química oceánica y sedimentación, filtrados después por enterramiento y alteración. Reconstruir oxígeno exige una cadena desde medición hasta reacción, ambiente y reservorio planetario. Minerales detríticos, paleosuelos, formaciones de hierro, fraccionamiento independiente de masa del azufre, especiación del hierro y metales sensibles al redox responden preguntas distintas. Juntos establecen una Tierra temprana con poco oxígeno, producción local anterior a la acumulación global, un primer ascenso paleoproterozoico sostenido y oxigenación posterior heterogénea. No identifican un interruptor. Inicios propuestos de la GOE cerca de 2,46–2,43 Ga y cambio rápido hacia 2,33 Ga restringen fases y correlaciones diferentes. Los porcentajes mesoproterozoicos siguen discutidos, y una atmósfera oxigenada no implicaba un océano profundo oxigenado. El acuerdo se gana cuando proxies fechados independientemente, petrografía y modelos de fuentes y sumideros convergen manteniendo visibles sus escalas y supuestos compartidos.

En 60 segundos

Un proxy rocoso no es aire antiguo en un frasco. Un mineral quizá sobreviva solo bajo meteorización pobre en oxígeno; un perfil de suelo pierde elementos al oxidarse; isótopos de azufre conservan fotoquímica atmosférica; hierro y metales traza registran química acuática local. Cada ruta necesita un modelo de respuesta y una edad. El gran fraccionamiento independiente de masa del azufre caracteriza el registro arcaico y exige una vía atmosférica. Su desaparición sostenida marca una reorganización mayor, pero el umbral citado de unas 10^-5 veces el nivel atmosférico presente depende de modelos. Registros metálicos sugieren producción transitoria anterior a la Gran Oxidación, quizá en oasis someros, sin probar una atmósfera globalmente oxigenada. La GOE ocurrió por etapas: una cronología sitúa el inicio entre unos 2,460 y 2,426 Ga; otro registro resuelve oxigenación rápida cerca de 2,33 Ga. No son la misma frontera. Las fuentes debían superar sumideros, así que la fotosíntesis oxigénica pudo preceder la acumulación. Los océanos siguieron estratificados y desiguales; aguas profundas ferruginosas persistieron tras subir el oxígeno atmosférico. Estimaciones posteriores y vínculos con animales siguen discutidos. La reconstrucción triangula proxies, no los fuerza en una curva universal.

Por qué importa esta pregunta

El oxígeno atmosférico hizo posibles metabolismos energéticos, ozono protector y finalmente ecosistemas complejos, pero su historia no se lee en un cambio de color o una razón isotópica. La

cadena de inferencia importa porque una roca mezcla química acuática local, meteorización global y alteración posterior. Separar esos niveles muestra cómo el desacuerdo impulsa la geociencia: un modelo oceánico global superado puede dejar métodos útiles, y dos proxies aparentemente opuestos pueden cartografiar estructura vertical real. La lección es transferible. Una historia planetaria resulta creíble no cuando una señal parece espectacular, sino cuando archivos distintos reproducen una secuencia acotada sin ocultar sus supuestos.

1. Una roca no es una botella de aire antiguo

La pregunta

Si no sobrevive una muestra continua de aire arcaico, ¿cómo puede un mineral formado en suelo o sedimento limitar la atmósfera? Solo reconstruyendo cada transformación entre el aire, la reacción local y la señal medida hoy.

La mayoría de proxies precámbricos no son muestras atmosféricas selladas. Son productos de fotoquímica, meteorización, circulación oceánica, reacción biológica y sedimentación, enterrados después como roca.[1–3] Una lutita integra partículas terrestres y compuestos retirados del agua. Un paleosuelo registra un perfil de meteorización. Una anomalía isotópica nace en el aire y se preserva tras varias transferencias.

La inferencia tiene capas. Una medición identifica mineral, elemento o razón isotópica; un modelo de respuesta la enlaza con una reacción; el contexto geológico sitúa esa reacción en suelo, agua somera o cuenca; otro modelo relaciona el ambiente local con atmósfera y océano.[1,2,35] Saltarse una capa convierte el proxy en eslogan.

La preservación es otro experimento. La diagénesis recristaliza sedimento, el metamorfismo impulsa reacciones, los fluidos importan elementos y la meteorización moderna ataca el afloramiento.[1,14,19] Nada de eso destruye automáticamente el registro. Petrografía, química a escala mineral y relaciones de campo prueban si el dominio medido es primario, está alterado de modo acotado o resulta inútil.

El tiempo entra de forma independiente. Un espectrómetro mide una razón con precisión mientras la edad sedimentaria depende de ceniza volcánica, intrusión, correlación estratigráfica o límites entre unidades.[6,8] Una capa ígnea fechada puede preceder o seguir al estrato con proxy. QTC-017 explica los relojes; aquí su posición geológica controla la cronología atmosférica.

La división también mantiene honesto el corpus. QTC-024 estableció metabolismos microbianos que producen y consumen gases; este artículo pregunta qué consecuencias planetarias dejaron en roca.[1,2] QTC-026 mirará hacia una fusión celular. La atmósfera conecta esas historias sin volver un proxy responsable de las tres.

En qué punto estamos

Una roca se vuelve archivo atmosférico solo al conectar medición, proceso, ambiente, preservación y edad. La cadena larga es una fortaleza porque cada enlace puede probarse. Los primeros son reacciones minerales: granos reducidos, suelos meteorizados, hierro precipitado y metales traza que respondieron a condiciones redox locales dentro de su ambiente.

2. Los minerales recuerdan reacciones

Areniscas antiguas contienen a veces pirita o uraninita detríticas transportadas como granos. Como ambas se oxidan fácilmente hoy en superficie, su supervivencia apoya meteorización pobre en oxígeno si se controlan procedencia y abrasión.[15,16] Sin embargo, sobrevivir es cinético. Tamaño, tiempo de transporte, roca fuente y alteración posterior impiden convertir un grano directamente en porcentaje atmosférico.

Los paleosuelos ofrecen un perfil, no un superviviente. Ganancias y pérdidas de elementos en un horizonte de meteorización antiguo indican movilización oxidativa, pero solo respecto a una roca parental reconstruida.[14,16] Agua subterránea, erosión y metamorfismo pueden modificarlo. El método es potente porque exige balance de masas; por la misma razón es difícil.

Las formaciones de hierro bandeado muestran precipitación enorme, pero no nombran un oxidante. El hierro ferroso disuelto pudo encontrar oxígeno, ser oxidado por fotótrofos anoxigénicos o seguir rutas complejas antes de transformarse durante el enterramiento.[39,40] Los experimentos establecen mecanismos viables. Elegir la mezcla histórica exige sedimentología, isótopos y contexto de cuenca.

La especiación del hierro pasa de bandas visibles a fracciones minerales operativas. La extracción secuencial distingue hierro altamente reactivo, pirita y otras fracciones; calibraciones modernas empíricas infieren depósito óxico, ferruginoso o euxínico.[18,19] Los umbrales dependen de litología y hierro total. Un método validado en lutita quizá no se transfiera intacto a roca metamorfizada o pobre en hierro.

Molibdeno, cromo, renio y otros elementos sensibles al redox añaden meteorización y transporte oceánico.[9–12] La oxidación moviliza un metal en tierra; adsorción, captación biológica y sulfuro lo retiran en el mar. Concentración y razón isotópica integran un ciclo. Restricción de cuenca o fuente alterada pueden imitar un cambio atmosférico global.

En qué punto estamos

Los minerales registran reacciones locales; ninguno escala automáticamente a toda la atmósfera. Una familia de proxies viaja más arriba. Los isótopos de azufre conservan una firma generada por química ultravioleta en el propio aire y aportan un umbral atmosférico cuya potencia depende de mantener unido el modelo fotoquímico bajo condiciones declaradas.

3. El azufre encontró un umbral atmosférico

La pregunta

Los efectos isotópicos ordinarios escalan de forma predecible con la masa. El azufre arcaico rompe repetidamente esa relación. La anomalía conecta rocas con fotoquímica atmosférica, pero traducir presencia o desaparición en oxígeno aún exige gases, reacciones ultravioletas, transporte y preservación.

Las reacciones dependientes de masa desplazan isótopos de azufre según relaciones gobernadas por sus diferencias de masa. Sedimentos arcaicos contienen desviaciones medidas en varios isótopos, llamadas fraccionamiento independiente de masa o MIF del azufre.[4,5] La anomalía es

observación. Su importancia atmosférica surge porque procesos sedimentarios y biológicos conocidos no reproducen solos los grandes patrones multiisotópicos y estratigráficos.

James Farquhar, Huiming Bao y Mark Thiemens conectaron esos patrones con reacciones ultravioletas entre gases atmosféricos de azufre.[4,5,36] Productos fotoquímicos distintos llevaron firmas diferentes a la superficie. Entrada volcánica, metano, bruma, vida de gases, lavado y reciclaje sedimentario afectan magnitud y signo. El MIF es excepcionalmente atmosférico sin ser químicamente simple.

Los modelos muestran por qué importa el oxígeno. Cuando oxígeno y ozono alteran penetración ultravioleta y vida de gases, las anomalías fuertes ya no se producen o conservan igual. Suele citarse un umbral cercano a 10^-5 del nivel atmosférico presente.[5,6] No es una lectura de oxígeno de laboratorio: depende de una red de reacciones y condiciones atmosféricas.

La pérdida sostenida del gran MIF cerca de la transición Arcaico–Proterozoico marca una reorganización profunda.[2,6,7,28] El ascenso de oxígeno es causa principal, unido en algunos modelos al colapso del metano y cambio de bruma. Una desaparición integra transición, resolución, reciclaje e historia de cuenca; no define una tarde globalmente sincrónica.

Bekker y colegas no hallaron gran MIF en estratos con pirita de 2,32 Ga y lo combinaron con rasgos sedimentarios oxidados.[6] Infirieron oxígeno atmosférico significativo por entonces, sobre el umbral del modelo. El resultado limita una sucesión fechada; no convierte 2,32 Ga en el único cumpleaños válido del oxígeno.

En qué punto estamos

> *El MIF del azufre ofrece lo más parecido a un interruptor atmosférico, pero sigue siendo un umbral modelado dentro de transporte y química de bruma. Su persistencia arcaica crea una tensión productiva: otros proxies registran oxidación anterior. Resolverla exige distinguir producción local de oxígeno y acumulación global en espacio y tiempo.*

4. El oxígeno apareció antes de acumularse

Ariel Anbar y colegas hallaron enriquecimiento de molibdeno y renio en lutitas de unos 2,5 Ga y describieron un «soplo» de oxígeno anterior a la GOE.[9,10] La meteorización oxidativa pudo movilizar esos metales terrestres hacia la cuenca. Soplo fue una palabra cuidadosa: denota oxidación transitoria o limitada, no una atmósfera moderna.

El cromo empujó la propuesta más atrás. Datos de un paleosuelo y una formación de hierro sudafricanos de unos 3,0 Ga se interpretaron como meteorización oxidativa bajo oxígeno apreciable.[11,12] La cadena cuantitativa está discutida. La movilidad del cromo depende de oxidación del manganeso, fuente y alteración; un mínimo atmosférico es más condicional que la razón isotópica medida.

Isótopos de molibdeno en formación de hierro de al menos 2,95 Ga aportaron otra vía. Su fraccionamiento se interpretó como adsorción previa a óxidos de manganeso y, por tanto, fotosíntesis oxigénica en agua somera.[13] La inferencia no observa cianobacterias. Enlaza Mo, química del manganeso y producción de oxígeno bajo un modelo deposicional con alternativas.

Estos registros conviven con MIF del azufre si el oxígeno formó oasis locales. La fotosíntesis superficial produce oxígeno que reacciona rápido con hierro disuelto, gases volcánicos reducidos y

QTC-025 · v1.0 ES · © 2026 Juan Segurola · All Rights Reserved · 4/13

materia orgánica antes de mezclarse por atmósfera y océano.[2,3,13] Una costa productiva puede oxidar metales mientras el reservorio planetario sigue bajo el umbral fotoquímico.

La distinción separa invención de acumulación. La fotosíntesis oxigénica pudo evolucionar cientos de millones de años antes de que sumideros geológicos quedaran suficientemente saturados o reducidos para que el oxígeno persistiera globalmente.[2,27,36] Su fecha evolutiva sigue indirecta. La lógica general es más firme: producir localmente una molécula y construir un reservorio planetario no son el mismo suceso.

En qué punto estamos

Los oasis locales explican cómo la oxidación precedió a una atmósfera oxigenada sin descartar ningún registro. También eliminan un falso disparador biológico: la fotosíntesis no forzó cambio global inmediato. El problema siguiente es definir la propia Gran Oxidación, una transición cuyo inicio y fases rápidas proceden de relojes y secciones distintos.

5. La Gran Oxidación fue una transición

La pregunta

Un evento suena instantáneo. La Gran Oxidación abarca desaparición de proxies, minerales oxidados, glaciaciones, excursiones isotópicas y cambio ecológico cuyas edades no colapsan en una frontera. ¿Qué comenzó, aceleró o se estabilizó en cada fecha propuesta?

La GOE nombra la primera acumulación atmosférica sostenida a gran escala, reconocida por pérdida del MIF, meteorización oxidativa, cambio mineral sedimentario y nuevos ciclos biogeoquímicos.[1,2,35] No es la primera molécula de oxígeno. Los autores pueden fechar inicio, cruce de umbral, final o excursión asociada de modo distinto si la definición acompaña a la fecha.

Ashley Gumsley y colegas usaron una edad de 2,426 ± 0,003 Ga para magmatismo de la Formación Ongeluk junto con correlación estratigráfica y paleomagnética, situando un inicio entre unos 2,460 y 2,426 Ga.[8] El resultado adelantó un marco. Depende de correlacionar sucesiones lejanas y elegir qué señal marca el inicio.

Genming Luo y colegas resolvieron un patrón rápido de desaparición en isótopos de azufre cerca de 2,33 Ga.[7] Es una fase posterior al inicio de Gumsley y no debe promediarse con él. Rápido significa rápido respecto a muestreo e incertidumbre de edad. Ambos límites son compatibles si la oxigenación cruzó varios umbrales químicos y ecológicos.

La transición también osciló. Registros de azufre, nitrógeno y otros muestran excursiones, reversiones e inestabilidad climática asociada, no ascenso monótono.[7,8,25,29] Un cambio en una cuenca puede ser local y correlacionar cratones tiene coste. Aun así, la no monotonicidad replicada vuelve una función escalón mala representación de la evidencia.

El mecanismo reside en el balance prolongado. El oxígeno se acumula cuando fuentes biológicas y geológicas superan sumideros de gases reducidos, rocas, hierro y materia orgánica.[26,27,37,38] Los modelos reparten causalidad entre volcanismo, metano, nutrientes, tectónica y enterramiento. Ningún balance aceptado convierte la GOE en el día de invención del fotosistema II.

En qué punto estamos

La GOE sobrevive a perder un cumpleaños único porque varios registros establecen cambio planetario sostenido. Su cronología interna sigue estratificada y compiten modelos causales. Incluso tras entrar oxígeno en la atmósfera, no llenó uniformemente el océano en toda cuenca ni profundidad marina. La química conservó otra jerarquía de estados redox.

6. Una atmósfera oxigenada no significaba un océano oxigenado

Atmósfera y océano intercambian gases, pero una atmósfera oxigenada puede cubrir a la vez agua superficial oxigenada, profundidad anóxica y sedimento sulfídico.[2,17,20] Mezcla, productividad y respiración modelan la estructura vertical. Una lutita negra registra su cuenca y columna de agua; no muestrea el océano global solo porque la cuenca era marina.

Los registros de hierro transformaron la imagen del Proterozoico medio. El influyente modelo de Canfield destacó euxinia generalizada —agua anóxica y sulfurosa—; síntesis posteriores de hierro y metales hallaron mayor papel de anoxia ferruginosa rica en hierro.[17,20–22] La euxinia no desapareció. Lo superado fue su supuesto dominio del océano profundo.

La revisión muestra progreso científico. El modelo original organizó observaciones y generó pruebas; mejores extracciones, más datos y nuevas cuencas cambiaron el reparto global.[17,20,21] Un marco puede errar en extensión y aun aportar preguntas y mediciones que lo reemplazan. «Superado» no es sinónimo de necio.

El molibdeno ilustra el problema de escala. La meteorización oxidativa aporta Mo soluble; el mar lo mezcla; adsorción y sulfuro cambian concentración e isótopos.[9,10,21,30] Una cuenca euxínica restringida puede retirar Mo localmente e imitar un reservorio global pequeño. Interpretar atmósfera exige circulación y enterramiento, no solo concentración en lutita.

Proxies aparentemente opuestos pueden cartografiar estructura real. Producción somera oxigenada convive con profundidad ferruginosa y bolsillos euxínicos si edades y ambientes son coetáneos.[20,21,30,31] Antes de invocar gradientes se excluyen alteración y mala correlación. Superadas esas pruebas, el desacuerdo se vuelve sección de un océano antiguo.

En qué punto estamos

Atmósfera, océano superficial y cuencas profundas se oxigenaron con calendarios distintos, así que una curva no los representa a todos. La misma cautela rige después de la GOE. Niveles mesoproterozoicos, cambios neoproterozoicos y requisitos animales forman capítulos posteriores cuyo tiempo y magnitud siguen parcialmente discutidos antes de poder construir una síntesis final.

7. El oxígeno subió en más de una etapa

Isótopos de cromo y otros modelos han producido estimaciones bajas de oxígeno atmosférico mesoproterozoico, muy inferiores al nivel moderno.[12,23,24] Los porcentajes exactos están discutidos. Algunos resultados son límites, no puntos, y la ruta desde umbral de meteorización hasta oxígeno global depende de manganeso, erosión, roca fuente y preservación.

Los registros oceánicos también rechazan una edad media plana. Compilaciones de molibdeno, hierro y otros apoyan oxigenación escalonada y heterogénea, con cambios superficiales y

profundos en tiempos distintos.[2,30–32] Escalonada no significa una escalera común a toda cuenca. Más resolución divide mesetas en excursiones o revela cambios separados espacialmente.

El Evento de Oxigenación Neoproterozoico es, por tanto, un paraguas, no un segundo interruptor. Metales traza, especiación del hierro, ciclos de carbono y azufre y fósiles cambian en intervalos amplios.[31,32] Cada cual responde a reservorios distintos. Tratar sus primeras desviaciones como una fecha repetiría el error evitado para la GOE.

Los animales añaden restricción biológica, no medidor atmosférico. Experimentos y modelos fisiológicos estiman oxígeno requerido por esponjas u organismos concretos, y algunas concentraciones bajas sostienen respiración.[33,34] Los requisitos cambian con tamaño, temperatura, actividad, difusión y ecología. Sobrevivir como análogo no fija el oxígeno antiguo global.

El oxígeno tampoco causa solo la complejidad. Su ascenso amplía posibilidades energéticas y ecológicas, mientras los animales alteran a su vez carbono y hábitats.[2,32,33] Nutrientes, desarrollo, depredación y preservación también intervienen. La afirmación defendible es acoplamiento entre varias transiciones, no un umbral universal que enciende vida compleja.

En qué punto estamos

La oxigenación posterior es una familia de transiciones atmosféricas, oceánicas y biológicas, no repetición tardía de un suceso paleoproterozoico. Los niveles numéricos son más frágiles que la secuencia general. Una síntesis final debe preservar la identidad de cada proxy y explicar cómo se combinan las incertidumbres independientes y compartidas sin falsa precisión.

8. El acuerdo debe construirse entre proxies

La pregunta

Más proxies no significan automáticamente más evidencia independiente. Pueden compartir muestras, cronologías, supuestos de meteorización o modelos oceánicos. La confianza crece solo cuando sus funciones de respuesta distintas predicen una historia compatible sin ocultar esas dependencias.

Triangular no promedia pirita, isótopos de azufre y molibdeno en una cifra. Pregunta si métodos con observables y fallos distintos apoyan la misma historia acotada.[1,2,35] Dos artículos que usan el mismo testigo y modelo de edad no son plenamente independientes. Un mapa de dependencias debe acompañar la compilación.

La inversión cuantitativa empieza con modelo directo. La atmósfera impulsa meteorización o fotoquímica; productos viajan por ríos y océano; se forman minerales; el entierro los altera; el laboratorio mide lo restante.[3,5,23,27] Recorrer la cadena hacia atrás permite varias atmósferas compatibles con una señal. Incertidumbre estrecha dentro de un modelo no incluye todo modelo alternativo.

La discordancia puede ser útil. Un proxy de azufre limita atmósfera, la especiación del hierro cartografía profundidad local y el molibdeno responde al reservorio global y eliminación restringida.[2,20,30] Si pasan edad y preservación, respuestas distintas revelan gradientes. Si fallan, el desacuerdo identifica correlación, alteración o modelo de respuesta como siguiente objetivo.

La cronología impide comodidad narrativa. El marco de inicio 2,460–2,426 Ga, la fase rápida de 2,33 Ga y el límite de oxígeno significativo a 2,32 Ga proceden de secciones y argumentos distintos.[6–8,35] Su proximidad no los duplica. Una cronología creíble registra qué acota cada fecha antes de ordenarlas en transición.

Con esa disciplina emerge una escalera de confianza. La Tierra temprana tenía poquísimo oxígeno atmosférico; oxidación local precedió acumulación global; la GOE estableció ascenso sostenido; océanos y atmósferas posteriores se oxigenaron heterogéneamente.[1–3,32] Porcentajes, sincronía y pesos causales siguen interpretaciones actuales. QTC-026 pregunta ahora cómo una asociación celular cambió lo que podían ser mundos oxigenados.

En qué punto estamos

La atmósfera antigua no se lee en roca como texto en una página. Se reconstruye probando una cadena desde química planetaria hasta medición preservada y de vuelta. El resultado es más fuerte cuando los proxies discrepan por razones comprensibles y aun convergen en secuencia. Desde ese ambiente cambiante, el artículo siguiente sigue la célula dentro de la célula.

Lo que sabemos y cómo lo sabemos

- El gran MIF arcaico del azufre registra fotoquímica atmosférica bajo una atmósfera con poquísimo oxígeno.[4,5]
- Varios cambios independientes establecen un primer ascenso atmosférico sostenido a gran escala en el Paleoproterozoico.[1,2,6–8]
- Señales oxidativas anteriores a la GOE pueden registrar oxígeno local o transitorio sin atmósfera globalmente oxigenada.[9–13]
- La oxigenación atmosférica no oxigenó todo el océano; persistieron aguas ferruginosas y euxínicas heterogéneas.[17,20–22]
- Interpretar proxies exige edad geológica, pruebas de preservación y modelo explícito desde ambiente hasta medición.[1,2,14,35]

Lo que todavía no sabemos

- Las concentraciones atmosféricas exactas asociadas con muchos umbrales e intervalos de proxies.
- La extensión y duración de oasis arcaicos de oxígeno y su intercambio con la atmósfera.
- Los pesos causales relativos de innovación biológica, tectónica, gases volcánicos, nutrientes y enterramiento orgánico en la GOE.
- Las proporciones globales de océano óxico, ferruginoso y euxínico durante muchos intervalos proterozoicos.
- Cómo interactuó causalmente la oxigenación con el tiempo y ecología de la vida compleja temprana.

Qué podría hacernos cambiar de opinión

- Nuevas secciones fechadas con precisión que sincronicen azufre, metales, paleosuelos y sedimentos entre cratones.

- Calibraciones de campo y laboratorio que revisen umbrales de oxígeno de proxies de azufre, cromo o molibdeno.
- Cribado mineral que muestre que una señal central es secundaria o, al contrario, excepcionalmente preservada.
- Compilaciones redox globales corregidas por cuenca, litología, preservación y sesgo compartido de muestreo.
- Modelos acoplados de fuentes y sumideros que predigan trayectorias independientes mejor que mecanismos GOE existentes.

Si solo recuerdas una cosa

Las rocas no preservan directamente aire antiguo. La historia atmosférica emerge cuando convergen proxies minerales, isotópicos y sedimentarios fechados, manteniendo visibles condiciones locales, alteración e incertidumbre de modelo.

Artículos relacionados

- QTC-017 — Cómo aprendimos a fechar el pasado
- QTC-024 — El planeta microbiano
- QTC-026 — La célula dentro de la célula

Referencias

[1] Heinrich D. Holland. The oxygenation of the atmosphere and oceans. Philosophical Transactions of the Royal Society B 361, 903–915 (2006). DOI 10.1098/rstb.2006.1838. https://doi.org/10.1098/rstb.2006.1838

[2] Timothy W. Lyons; Christopher T. Reinhard; Noah J. Planavsky. The rise of oxygen in Earth's early ocean and atmosphere. Nature 506, 307–315 (2014). DOI 10.1038/nature13068. https://doi.org/10.1038/nature13068

[3] David C. Catling; Kevin J. Zahnle. The Archean atmosphere. Science Advances 6, eaax1420 (2020). DOI 10.1126/sciadv.aax1420. https://doi.org/10.1126/sciadv.aax1420

[4] James Farquhar; Huiming Bao; Mark Thiemens. Atmospheric influence of Earth's earliest sulfur cycle. Science 289, 756–758 (2000). DOI 10.1126/science.289.5480.756. https://doi.org/10.1126/science.289.5480.756

[5] A. A. Pavlov; J. F. Kasting. Mass-independent fractionation of sulfur isotopes in Archean sediments: strong evidence for an anoxic Archean atmosphere. Astrobiology 2, 27–41 (2002). DOI 10.1089/153110702753621321. https://doi.org/10.1089/153110702753621321

[6] A. Bekker; H. D. Holland; P.-L. Wang; D. Rumble, III; H. J. Stein; J. L. Hannah; L. L. Coetzee; N. J. Beukes. Dating the rise of atmospheric oxygen. Nature 427, 117–120 (2004). DOI 10.1038/nature02260. https://doi.org/10.1038/nature02260

[7] Genming Luo; Shuhei Ono; Nicolas J. Beukes; David T. Wang; Shucheng Xie; Roger E. Summons. Rapid oxygenation of Earth's atmosphere 2.33 billion years ago. Science Advances 2, e1600134 (2016). DOI 10.1126/sciadv.1600134. https://doi.org/10.1126/sciadv.1600134

[8] Ashley P. Gumsley; Kevin R. Chamberlain; Wouter Bleeker; Ulf Söderlund; Michiel O. de Kock; Emilie R. Larsson; Andrey Bekker. Timing and tempo of the Great Oxidation Event. Proceedings of the National Academy of Sciences 114, 1811–1816 (2017). DOI 10.1073/pnas.1608824114. https://doi.org/10.1073/pnas.1608824114

[9] Ariel D. Anbar; Yun Duan; Timothy W. Lyons; Gail L. Arnold; Brian Kendall; Robert A. Creaser; Alan J. Kaufman; Gwyneth W. Gordon; Clinton Scott; Jessica Garvin; Roger Buick. A whiff of oxygen before the Great Oxidation Event? Science 317, 1903–1906 (2007). DOI 10.1126/science.1140325. https://doi.org/10.1126/science.1140325

[10] M. Wille; J. D. Kramers; T. F. Nägler; N. J. Beukes; S. Schröder; Th. Meisel; J. P. Lacassie; A. R. Voegelin. Evidence for a gradual rise of oxygen between 2.6 and 2.5 Ga from Mo isotopes and Re-PGE signatures in shales. Geochimica et Cosmochimica Acta 71, 2417–2435 (2007). DOI 10.1016/j.gca.2007.02.019. https://doi.org/10.1016/j.gca.2007.02.019

[11] Sean A. Crowe; Lasse N. Døssing; Nicolas J. Beukes; Michael Bau; Stephanus J. Kruger; Robert Frei; Donald E. Canfield. Atmospheric oxygenation three billion years ago. Nature 501, 535–538 (2013). DOI 10.1038/nature12426. https://doi.org/10.1038/nature12426

[12] Robert Frei; Claudio Gaucher; Simon W. Poulton; Don E. Canfield. Fluctuations in Precambrian atmospheric oxygenation recorded by chromium isotopes. Nature 461, 250–253 (2009). DOI 10.1038/nature08266. https://doi.org/10.1038/nature08266

[13] Noah J. Planavsky; Dan Asael; Axel Hofmann; Christopher T. Reinhard; Stefan V. Lalonde; Andrew Knudsen; Xiangli Wang; Frantz Ossa Ossa; Ernesto Pecoits; Albertus J. B. Smith; Nicolas J. Beukes; Andrey Bekker; Thomas M. Johnson; Kurt O. Konhauser; Timothy W. Lyons; Olivier J. Rouxel. Evidence for oxygenic photosynthesis half a billion years before the Great Oxidation Event. Nature Geoscience 7, 283–286 (2014). DOI 10.1038/ngeo2122. https://doi.org/10.1038/ngeo2122

[14] R. Rye; H. D. Holland. Paleosols and the evolution of atmospheric oxygen: a critical review. American Journal of Science 298, 621–672 (1998). DOI 10.2475/ajs.298.8.621. https://doi.org/10.2475/ajs.298.8.621

[15] D. Grandstaff. Origin of uraniferous conglomerates at Elliot Lake, Canada, and Witwatersrand, South Africa: implications for oxygen in the Precambrian atmosphere. Precambrian Research 13, 1–26 (1980). DOI 10.1016/0301-9268(80)90056-x. https://doi.org/10.1016/0301-9268(80)90056-x

[16] Birger Rasmussen; Roger Buick. Redox state of the Archean atmosphere: evidence from detrital heavy minerals in ca. 3250–2750 Ma sandstones from the Pilbara Craton, Australia. Geology 27, 115–118 (1999). DOI 10.1130/0091-7613(1999)027<0115:RSOTAA>2.3.CO;2. https://doi.org/10.1130/0091-7613(1999)027%3C0115:RSOTAA%3E2.3.CO;2

[17] D. E. Canfield. A new model for Proterozoic ocean chemistry. Nature 396, 450–453 (1998). DOI 10.1038/24839. https://doi.org/10.1038/24839

[18] Simon W. Poulton; Donald E. Canfield. Development of a sequential extraction procedure for iron: implications for iron partitioning in continentally derived particulates. Chemical Geology 214, 209–221 (2005). DOI 10.1016/j.chemgeo.2004.09.003. https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2004.09.003

[19] R. Raiswell; D. E. Canfield. Sources of iron for pyrite formation in marine sediments. American Journal of Science 298, 219–245 (1998). DOI 10.2475/ajs.298.3.219. https://doi.org/10.2475/ajs.298.3.219

[20] S. W. Poulton; D. E. Canfield. Ferruginous conditions: a dominant feature of the ocean through Earth's history. Elements 7, 107–112 (2011). DOI 10.2113/gselements.7.2.107. https://doi.org/10.2113/gselements.7.2.107

[21] Noah J. Planavsky; Peter McGoldrick; Clinton T. Scott; Chao Li; Christopher T. Reinhard; Amy E. Kelly; Xuelei Chu; Andrey Bekker; Gordon D. Love; Timothy W. Lyons. Widespread iron-rich conditions in the mid-Proterozoic ocean. Nature 477, 448–451 (2011). DOI 10.1038/nature10327. https://doi.org/10.1038/nature10327

[22] Donald E. Canfield; Simon W. Poulton; Andrew H. Knoll; Guy M. Narbonne; Gerry Ross; Tatiana Goldberg; Harald Strauss. Ferruginous conditions dominated later Neoproterozoic deep-water chemistry. Science 321, 949–952 (2008). DOI 10.1126/science.1154499. https://doi.org/10.1126/science.1154499

[23] Noah J. Planavsky; Christopher T. Reinhard; Xiangli Wang; Danielle Thomson; Peter McGoldrick; Robert H. Rainbird; Thomas Johnson; Woodward W. Fischer; Timothy W. Lyons. Low Mid-Proterozoic atmospheric oxygen levels and the delayed rise of animals. Science 346, 635–638 (2014). DOI 10.1126/science.1258410. https://doi.org/10.1126/science.1258410

[24] Erik A. Sperling; Charles J. Wolock; Alex S. Morgan; Benjamin C. Gill; Marcus Kunzmann; Galen P. Halverson; Francis A. Macdonald; Andrew H. Knoll; David T. Johnston. Statistical analysis of iron geochemical data suggests limited late Proterozoic oxygenation. Nature 523, 451–454 (2015). DOI 10.1038/nature14589. https://doi.org/10.1038/nature14589

[25] Aubrey L. Zerkle; Simon W. Poulton; Robert J. Newton; Colin Mettam; Mark W. Claire; Andrey Bekker; Christopher K. Junium. Onset of the aerobic nitrogen cycle during the Great Oxidation Event. Nature 542, 465–467 (2017). DOI 10.1038/nature20826. https://doi.org/10.1038/nature20826

[26] Lee R. Kump; Mark E. Barley. Increased subaerial volcanism and the rise of atmospheric oxygen 2.5 billion years ago. Nature 448, 1033–1036 (2007). DOI 10.1038/nature06058. https://doi.org/10.1038/nature06058

[27] David C. Catling; Mark W. Claire. How Earth's atmosphere evolved to an oxic state: a status report. Earth and Planetary Science Letters 237, 1–20 (2005). DOI 10.1016/j.epsl.2005.06.013. https://doi.org/10.1016/j.epsl.2005.06.013

[28] K. Zahnle; M. Claire; D. Catling. The loss of mass-independent fractionation in sulfur due to a Palaeoproterozoic collapse of atmospheric methane. Geobiology 4, 271–283 (2006). DOI 10.1111/j.1472-4669.2006.00085.x. https://doi.org/10.1111/j.1472-4669.2006.00085.x

[29] Qingjun Guo; Harald Strauss; Alan J. Kaufman; Stefan Schröder; Jens Gutzmer; Boswell Wing; Margaret A. Baker; Andrey Bekker; Qusheng Jin; Sang-Tae Kim; James Farquhar. Reconstructing Earth's surface oxidation across the Archean-Proterozoic transition. Geology 37, 399–402 (2009). DOI 10.1130/G25423A.1. https://doi.org/10.1130/G25423A.1

[30] Christopher T. Reinhard; Noah J. Planavsky; Leslie J. Robbins; Camille A. Partin; Benjamin C. Gill; Stefan V. Lalonde; Andrey Bekker; Kurt O. Konhauser; Timothy W. Lyons. Proterozoic ocean

redox and biogeochemical stasis. Proceedings of the National Academy of Sciences 110, 5357–5362 (2013). DOI 10.1073/pnas.1208622110. https://doi.org/10.1073/pnas.1208622110

[31] C. Scott; T. W. Lyons; A. Bekker; Y. Shen; S. W. Poulton; X. Chu; A. D. Anbar. Tracing the stepwise oxygenation of the Proterozoic ocean. Nature 452, 456–459 (2008). DOI 10.1038/nature06811. https://doi.org/10.1038/nature06811

[32] Lawrence M. Och; Graham A. Shields-Zhou. The Neoproterozoic oxygenation event: environmental perturbations and biogeochemical cycling. Earth-Science Reviews 110, 26–57 (2012). DOI 10.1016/j.earscirev.2011.09.004. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2011.09.004

[33] Daniel B. Mills; Lewis M. Ward; CarriAyne Jones; Brittany Sweeten; Michael Forth; Alexander H. Treusch; Donald E. Canfield. Oxygen requirements of the earliest animals. Proceedings of the National Academy of Sciences 111, 4168–4172 (2014). DOI 10.1073/pnas.1400547111. https://doi.org/10.1073/pnas.1400547111

[34] Shuichang Zhang; Xiaomei Wang; Huajian Wang; Christian J. Bjerrum; Emma U. Hammarlund; M. Mafalda Costa; James N. Connelly; Baomin Zhang; Jin Su; Donald E. Canfield. Sufficient oxygen for animal respiration 1,400 million years ago. Proceedings of the National Academy of Sciences 113, 1731–1736 (2016). DOI 10.1073/pnas.1523449113. https://doi.org/10.1073/pnas.1523449113

[35] D. E. Canfield. The early history of atmospheric oxygen: homage to Robert M. Garrels. Annual Review of Earth and Planetary Sciences 33, 1–36 (2005). DOI 10.1146/annurev.earth.33.092203.122711. https://doi.org/10.1146/annurev.earth.33.092203.122711

[36] James Farquhar; Aubrey L. Zerkle; Andrey Bekker. Geological constraints on the origin of oxygenic photosynthesis. Photosynthesis Research 107, 11–36 (2011). DOI 10.1007/s11120-010-9594-0. https://doi.org/10.1007/s11120-010-9594-0

[37] D. T. Johnston; F. Wolfe-Simon; A. Pearson; A. H. Knoll. Anoxygenic photosynthesis modulated Proterozoic oxygen and sustained Earth’s middle age. Proceedings of the National Academy of Sciences 106, 16925–16929 (2009). DOI 10.1073/pnas.0909248106. https://doi.org/10.1073/pnas.0909248106

[38] Kurt O. Konhauser; Ernesto Pecoits; Stefan V. Lalonde; Dominic Papineau; Euan G. Nisbet; Mark E. Barley; Nicholas T. Arndt; Kevin Zahnle; Balz S. Kamber. Oceanic nickel depletion and a methanogen famine before the Great Oxidation Event. Nature 458, 750–753 (2009). DOI 10.1038/nature07858. https://doi.org/10.1038/nature07858

[39] Kurt O. Konhauser; Tristan Hamade; Rob Raiswell; Richard C. Morris; F. Grant Ferris; Gordon Southam; Donald E. Canfield. Could bacteria have formed the Precambrian banded iron formations? Geology 30, 1079–1082 (2002). DOI 10.1130/0091-7613(2002)030<1079:cbhftp>2.0.co;2. https://doi.org/10.1130/0091-7613(2002)030%3C1079:cbhftp%3E2.0.co;2

[40] Andreas Kappler; Claudia Pasquero; Kurt O. Konhauser; Dianne K. Newman. Deposition of banded iron formations by anoxygenic phototrophic Fe(II)-oxidizing bacteria. Geology 33, 865–868 (2005). DOI 10.1130/G21658.1. https://doi.org/10.1130/G21658.1

La célula dentro de la célula

QTC-026 · De los quarks a la consciencia

El universo, la vida y cómo llegamos a saberlo

Autor: Juan Segurola

Versión: v1.1 ES · 5 de septiembre de 2026

Perfil epistémico: Interpretación científica actual

Licencia: All Rights Reserved

Resumen del artículo

Una célula eucariota no es la descendiente agrandada de un solo linaje simple. Las mitocondrias conservan ascendencia bacteriana dentro de un hospedador cuya maquinaria informacional está emparentada con arqueas; los plastos registran una adquisición cianobacteriana posterior. Genomas, membranas, sistemas de división e importación de proteínas convierten la endosimbiosis en conocimiento establecido. El mecanismo histórico exacto es menos seguro. Los modelos discrepan sobre la complejidad del hospedador, el metabolismo que unió a los socios y si las mitocondrias llegaron antes o después de grandes innovaciones eucariotas. La transferencia génica trasladó mucha biología del orgánulo al núcleo, mientras orgánulos reducidos y pérdidas secundarias borraron huellas. El artículo separa la fusión segura de sus reconstrucciones discutidas y explica por qué la ascendencia eucariota es una red de historias unidas.

En 60 segundos

Mitocondrias y plastos comenzaron como bacterias dentro de otras células. Sus genomas reducidos, árboles génicos bacterianos, membranas, sistemas de división e importación de proteínas convergen en esa conclusión. El linaje hospedador que produjo eucariotas está emparentado con arqueas, y las arqueas Asgard figuran entre sus parientes conocidos más cercanos. Lo no resuelto es la secuencia: ¿un hospedador complejo y fagocítico incorporó al antepasado mitocondrial o la simbiosis ayudó a construir la complejidad eucariota? Hipótesis metabólicas, relojes moleculares y duplicaciones antiguas responden distinto. La integración trasladó genes al núcleo e hizo dependientes a los orgánulos de proteínas importadas. Hidrogenosomas y mitosomas son parientes mitocondriales modificados; Monocercomonoides perdió el orgánulo secundariamente. Los plastos surgieron de una cianobacteria y se propagaron mediante nuevas fusiones. Paulinella adquirió otro orgánulo fotosintético mucho después. El acontecimiento central es seguro; socios, metabolismo y orden exactos siguen siendo reconstrucción activa. Las pruebas apoyan una fusión, pero dejan varias rutas científicamente competitivas.

Por qué importa esta pregunta

Todo animal, planta, hongo y protista hereda una célula ensamblada mediante una asociación antigua. Esa historia cambia qué es un linaje: no un hilo sellado, sino un sistema capaz de unir genomas, membranas y metabolismos. También ofrece un modelo de confianza científica. Varias observaciones establecen la endosimbiosis, mientras las mismas pruebas permiten discrepancias sobre mecanismo y tiempo. Separar esas capas evita dos errores opuestos: tratar la fusión como

especulación o presentar un relato elegante como suceso grabado. La célula dentro de la célula es a la vez un hecho de ascendencia y una reconstrucción inacabada.

1. La célula eucariota es un compuesto histórico

La pregunta

Una mitocondria parece una parte normal de la célula. ¿Por qué afirmar que desciende de una bacteria separada y cómo puede seguir visible una fusión tras más de mil millones de años de evolución compartida?

Una célula eucariota contiene historias que no comenzaron juntas. Sus mitocondrias descienden de bacterias; en plantas y algas, los plastos descienden de cianobacterias.[1,3–5,25] Los socios formaron un linaje reproductivo, pero genes y máquinas moleculares conservan direcciones filogenéticas distintas. Una célula puede ser organismo y registro de una asociación antigua a la vez.

La conclusión no descansa en parecerse a un microbio con forma de judía. Genomas de orgánulos, afinidades génicas bacterianas, química de membranas, división e importación de proteínas controlada por el núcleo convergen en endosimbiosis.[3,4,22,23] Cada línea tiene límites. Juntas explican más que un modelo donde todos los compartimentos nacieron solo al plegarse la membrana del hospedador.

El artículo de Lynn Sagan de 1967 reunió un origen simbiótico amplio para las células eucariotas y ayudó a recuperar una tradición con autores anteriores.[1,2] Las filogenias moleculares posteriores transformaron las propuestas mitocondrial y plástida de síntesis audaz en ascendencia establecida. El crédito es plural: proponer, integrar y comprobar fueron logros distintos en tiempos distintos.

La caricatura habitual —una bacteria tragada por una célula ya moderna— empieza demasiado acabada. La eucariogénesis implicó transferencia génica prolongada, acoplamiento metabólico y construcción de tráfico.[3,18,33,36] Se discute cuánta complejidad poseía ya el hospedador. Lo seguro es la integración; el orden exacto de sus pasos celulares se reconstruye, no se observa.

Esa distinción fija la frontera. QTC-023 siguió la ascendencia común de toda vida y QTC-024 mostró que los microbios aún dominan diversidad y metabolismo planetarios. Aquí preguntamos cómo historias microbianas unidas produjeron la célula eucariota. QTC-027 preguntará qué construyeron después los linajes con esa célula.[3,4]

En qué punto estamos

La célula eucariota es un compuesto sin ser una alianza temporal: la integración creó un linaje duradero a partir de historias aún detectables. Para ver por qué esa conclusión se volvió segura, el paso siguiente es inspeccionar las pruebas conservadas en los orgánulos: genomas, membranas, división y dependencia de proteínas codificadas fuera.

2. Dos membranas y genomas bacterianos

Mitocondrias y plastos contienen ADN, pero no copias diminutas de un genoma bacteriano. Sus cromosomas están reducidos, reorganizados y difieren entre linajes.[3,4,25,27] Genes ribosómicos y

proteicos conservados sitúan, sin embargo, secuencias mitocondriales con bacterias y plástidas con cianobacterias.[7,25,29,31] La reducción registra dependencia, no pérdida de ascendencia.

Una comparación bioquímica temprana conectó Paracoccus denitrificans con la respiración mitocondrial; después, filogenias de secuencia situaron genes mitocondriales entre Alphaproteobacteria.[6,7] La primera comparación fue productiva sin hacer de Paracoccus el antepasado. Los seres actuales son primos tras enorme divergencia; un antepasado es una población histórica, no la especie moderna más parecida.

Dos membranas circundantes encajan con un origen intracelular. Pero su número no repite mecánicamente una fagocitosis.[24,25,28] Membranas interna y externa adquirieron proteínas, contactos y funciones nuevos; algunos plastos sumaron membranas mediante endosimbiosis posteriores. La topología sostiene una historia solo junto con composición, direccionamiento y filogenia.

La división del orgánulo contiene elementos bacterianos, aunque el hospedador la controla y distintos eucariotas la remodelaron.[3,4,23,32] El mismo mosaico aparece en membranas bioenergéticas: maquinaria bacteriana antigua de transferencia electrónica funciona junto a proteínas surgidas o reclutadas tras la integración. Llamar bacteria a todo el orgánulo borraría casi toda su historia posterior.

Ninguna observación soporta sola el caso. El ADN podría ser material transferido; una doble membrana tiene otras causas; la fisión está extendida.[2,3,24] La fuerza reside en su acuerdo con importación y árboles génicos. La endosimbiosis predice un paquete correlacionado de herencia bacteriana y control del hospedador, y ese paquete es lo que contienen las células.

En qué punto estamos

Genomas y biología celular vuelven difícil eludir la ascendencia bacteriana, pero ascendencia es menos específica que identidad. Las pruebas sitúan mitocondrias cerca de Alphaproteobacteria sin nombrar una bacteria viva como progenitora. Esa brecha abre el problema siguiente: ¿hasta dónde pueden acercarse las filogenias al antepasado mitocondrial desaparecido y qué metabolismo poseía?

3. El antepasado mitocondrial

La pregunta

Si los genes mitocondriales son bacterianos, su rama debería tener parientes. Pero la filogenia profunda cambia con los genomas muestreados y los modelos evolutivos. ¿Cuánto de la bacteria fundadora puede identificar un árbol moderno con confianza hoy?

Las secuencias establecieron una relación alfaproteobacteriana, pero la rama exacta sigue abierta.[5,7,8] Un análisis situó las mitocondrias fuera de Alphaproteobacteria muestreadas; otro, con modelos de variación entre sitios y ramas, las favoreció como grupo hermano.[5,8] Ambos rechazan descender literalmente de una especie viva nombrada. Discrepan sobre topología profunda, no sobre origen bacteriano.

La filogenia profunda es difícil por razones previsibles. Los genes mitocondriales son antiguos, reducidos y cambian rápido; muchos pasaron al núcleo o desaparecieron. Muestreo, atracción de ramas largas, sesgo composicional y elección de genes mueven la rama.[4,5,8] Un modelo sofisticado mejora el ajuste sin convertir un antepasado no observado en organismo muestreado.

Los candidatos anteriores aún importan históricamente. Paracoccus iluminó semejanza respiratoria y Rickettsiales atrajo porque la vida intracelular recuerda la simbiosis.[6,8] Más muestreo y análisis atentos al sesgo debilitaron identificaciones literales. Superado no significa inútil: esas propuestas generaron comparaciones que separaron semejanzas ancestrales, convergentes o propias de vivir dentro de células.

El metabolismo es más difícil de reconstruir que la posición. La bacteria fundadora pudo ser aerobia, anaerobia facultativa o metabólicamente flexible; mitocondrias modernas, anaerobias e hidrogenosomas conservan subconjuntos distintos.[4,13,21] Pérdida génica y redireccionamiento ocultan el inventario inicial. Una vía actual demuestra posibilidad y herencia, no el pacto ecológico exacto que inició la asociación.

Una conclusión es más firme: el antepasado común de los eucariotas vivos ya poseía mitocondria o derivado.[3,4,19,21] Linajes anaerobios y parásitos modificaron, redujeron o perdieron funciones repetidamente. Incluso Monocercomonoides, sin orgánulo mitocondrial detectable, desciende de antepasados que lo tuvieron. Una ausencia secundaria no es una etapa premitocondrial superviviente.

En qué punto estamos

> *El antepasado mitocondrial estaba emparentado con alfaproteobacterias, pero su primo muestreado más cercano y su fisiología siguen abiertos. El otro socio se reconstruye con otro archivo: genes informacionales nucleares y genomas arqueanos. Seguirlo desplaza la historia desde la bacteria incorporada hasta el linaje hospedador, cuya identidad también cambió con nuevo muestreo.*

4. El hospedador arqueano

Los genes nucleares eucariotas no cuentan una ascendencia simple. Sistemas de información —replicación, transcripción y traducción— muestran fuerte afinidad arqueana, mientras muchos genes metabólicos tienen historias bacterianas.[3,11,16,35] Transferencia, duplicación y pérdida diferencial complican cada porcentaje. El mosaico amplio es robusto; un inventario repartido limpiamente entre dos donantes exactos no lo es.

Los análisis filogenómicos sitúan cada vez más a los eucariotas dentro de Archaea en un árbol de dos dominios.[9,10,12] El hospedador queda emparentado con arqueas, no como tercer linaje primario independiente junto a Bacteria y Archaea. Raíz y modelos aún importan. «Dentro de Archaea» limita la ascendencia sin nombrar especie ni forma celular.

Las arqueas Asgard afinaron ese límite. Sus genomas contienen homólogos de proteínas que en eucariotas participan en citoesqueleto, remodelado de membranas y tráfico, y sus ramas quedan cerca de eucariotas en muchos análisis.[9,10] Esas proteínas firma señalan capacidades ancestrales. No prueban que una célula Asgard ya tuviera núcleo o fagocitosis.

Prometheoarchaeum syntrophicum aportó el primer representante Asgard cultivado tras años de enriquecimiento.[11] Crece despacio, depende de socios metabólicos y forma protrusiones, hechos que volvieron físicamente imaginables modelos sintróficos. Sigue siendo una especie moderna separada del hospedador por enorme tiempo. Un cultivo restringe posibilidades; no representa de nuevo la eucariogénesis.

El hospedador tiene, pues, dirección pero no retrato. Afinidad Asgard, maquinaria informacional arqueana y aportes metabólicos bacterianos definen partes del problema.[10,11,14,18] Dejan abiertos linaje exacto, socios y complejidad previa. Reconstrucciones génicas de 2026 sugieren además asociaciones con más fuentes microbianas que las capturadas por una fórmula limpia de dos partes.[15,16]

En qué punto estamos

Genomas y cultivos Asgard redujeron el hospedador desde una abstracción hasta un linaje emparentado con arqueas y con capacidades celulares comprobables. No revelaron la secuencia de la fusión. Ahí divergen más los modelos: si el metabolismo unió primero socios simples, si la fagocitosis precedió la entrada y si la energía mitocondrial causó o siguió a la complejidad.

5. Cómo ocurrió la fusión

La pregunta

Los socios están mejor delimitados que su encuentro. Sin un fósil de la fusión, ¿pueden realmente genes antiguos, metabolismo y membranas distinguir un hospedador que tragó una presa de socios que primero dependieron entre sí?

Ninguna roca conserva la primera endosimbiosis mitocondrial. Los mecanismos deben satisfacer filogenia, bioenergética, topología de membranas y orden de innovaciones eucariotas.[3,18,33] Eso no los vuelve meros relatos: cada modelo arriesga predicciones distintas. Sí significa que nombrar una vía plausible no equivale a observar el acontecimiento histórico.

La hipótesis del hidrógeno propone un hospedador arqueano dependiente del hidrógeno producido por un socio bacteriano anaerobio facultativo.[13,34] La dependencia metabólica estabilizaría la asociación antes de la integración. Es suficientemente específica para contrastarla con vías ancestrales, pero esas vías se reconstruyen tras transferencia y pérdida. Sigue activa, no es biografía establecida del primer eucariota.

Los modelos de hospedador primero conceden a la célula arqueana complejidad interna o fagocitosis antes de la entrada mitocondrial. Los de mitocondria temprana vuelven la simbiosis central para construir esos rasgos.[13–15,18,33] Cada campo contiene variantes, y temprano o tardío exige referencia. Núcleo, endomembranas, citoesqueleto e importación no tuvieron que aparecer juntos.

Los análisis de edad génica muestran promesa y fragilidad. Un estudio de 2016 infirió adquisición tardía; trabajos sobre duplicaciones antiguas de 2021 y 2026 reconstruyeron otras secuencias, incluida considerable complejidad previa.[14,15,33] Raíz, paralogía oculta, transferencia, pérdida y reloj cambian el orden. Una estimación molecular no es un intermedio fotografiado.

Un modelo energético sostiene que muchas membranas bioenergéticas internas dieron a los eucariotas potencia por gen para ampliar genomas y complejidad.[17,18] Es influyente y cuantitativo. Su necesidad se discute porque la escala moderna quizá no reproduzca la ecología ancestral y una ventaja no fija el tiempo. Las mitocondrias transformaron la energía; que fueran el disparador requerido sigue abierto.

En qué punto estamos

Los modelos mecanísticos convierten una fusión establecida en historias causales rivales. Sus desacuerdos son útiles porque muestran qué observaciones aún carecen de orden. Cualquiera que fuera la ruta inicial, persistir exigió otra transformación: genes trasladados, proteínas devueltas desde el citosol y bacterias antes autónomas convertidas en orgánulos reducibles casi hasta volverlos irreconocibles.

6. Los genes se trasladaron, los orgánulos encogieron

La transferencia génica endosimbiótica movió genes desde los genomas de orgánulos hasta cromosomas nucleares.[22,24,31] Un gen trasladado solo servía al orgánulo si su producto podía expresarse y regresar al compartimento correcto. La transferencia acopló reducción genómica con una logística nueva. El núcleo no confiscó simplemente ADN; la biología celular tuvo que reconstruir la entrega.

Hoy la mayoría de proteínas mitocondriales y plástidas se codifican en el núcleo y entran mediante complejos de translocación.[23,24,32] Secuencias de direccionamiento conducen precursores por membranas y el hospedador coordina su producción con el genoma residual. Los canales modernos son sistemas derivados. Su complejidad registra integración prolongada, no un aparato ya listo antes de la endosimbiosis.

Por qué algunos genes permanecen dentro sigue sin resolverse. Control redox cerca de membranas electrónicas, hidrofobicidad, cambios del código y barreras a una transferencia eficaz pueden contribuir.[3,22,24] Cada orgánulo retuvo inventarios distintos. Una explicación atractiva no tiene que regir todo gen, y un genoma pequeño no demuestra integración incompleta.

Algunas mitocondrias cambiaron tanto que primero se trataron como ausencias. Mitosomas de Entamoeba y numerosos hidrogenosomas carecen de fosforilación oxidativa familiar, pero conservan maquinaria o ascendencia mitocondrial.[20,21] La reducción siguió a la adaptación anaerobia o parásita. Estos orgánulos muestran por qué buscar solo centrales aerobias borraría sistemáticamente historia mitocondrial.

Monocercomonoides llega más lejos: no se detecta orgánulo mitocondrial y una función esencial de ensamblaje hierro–azufre fue sustituida por un sistema citosólico.[19] El linaje anida entre eucariotas con mitocondrias. Perdió el orgánulo secundariamente. La excepción refuerza así la diferencia evolutiva entre ausencia ancestral y pérdida tras integración profunda.

En qué punto estamos

La integración puede ocultar sus propias pruebas: genes transferidos dejan un genoma diminuto, proteínas importadas difuminan el origen y la pérdida secundaria borra el compartimento. Los plastos sufrieron la misma conversión amplia de endosimbionte en orgánulo controlado y añadieron otra complicación: la fotosíntesis se propagó cuando eucariotas enteros se asociaron dentro de otros eucariotas.

7. Los plastos repitieron la lógica

La pregunta

> *Las mitocondrias podrían parecer un accidente evolutivo demasiado antiguo para compararlo bajo las mismas reglas físicas. Los plastos y Paulinella aportan otras fusiones. ¿Qué rasgos se repiten y cuáles pertenecen solo a una ruta hacia la dependencia del orgánulo?*

Los plastos primarios proceden de un endosimbionte cianobacteriano integrado en el antepasado de Archaeplastida.[25–29] Genomas plástidos y genes cianobacterianos nucleares conservan esa ascendencia. La rama cianobacteriana exacta depende del muestreo y la filogenia temprana. Como en mitocondrias, la confianza es máxima en el origen amplio y menor en el donante preciso.

Transferencia génica e importación cambiaron otra vez la propiedad. Análisis comparativos asignan historia cianobacteriana a miles de genes nucleares, mientras sistemas de direccionamiento devuelven muchos productos al plasto.[22,31,32] Los recuentos varían por pérdida, otras transferencias y árboles difíciles. El proceso está establecido aunque el donante de un gen sea incierto.

La fotosíntesis se propagó después mediante endosimbiosis secundarias y posteriores. Un hospedador eucariota retuvo otro eucariota fotosintético, produciendo plastos con membranas adicionales e historias del hospedador, del plasto y a veces de un núcleo residual.[24–26,28] Los grupos algales vivieron adquisiciones, reemplazos y pérdidas. Una palabra —plasto— cubre orgánulos con números desiguales de antepasados anidados.

Paulinella chromatophora aporta un caso independiente y mucho más joven. Su cromatóforo derivado de cianobacteria sufrió reducción genómica e integración, con genes del endosimbionte fundador y otras bacterias contribuyendo a funciones del hospedador.[30] Paulinella no es una fase hacia los plastos vegetales. Es otro experimento que vuelve comparativamente accesible la organelogénesis temprana.

La comparación revela recurrencia y contingencia. Se repiten herencia estable, dependencia metabólica, reducción genómica, transferencia y direccionamiento; cambian socios, vías y membranas.[25,30] Un segundo orgánulo fotosintético primario muestra que la organelogénesis puede repetirse físicamente. No demuestra que la fusión mitocondrial siguiera el mismo mecanismo.

En qué punto estamos

> *Plastos y Paulinella convierten un suceso antiguo en ciencia comparada. Confirman requisitos recurrentes de herencia y control del hospedador, mientras revelan varias rutas por membranas y transferencia génica. La consecuencia final rebasa los orgánulos: cuando los linajes se fusionan, genes distintos conservan árboles distintos y la ascendencia eucariota se vuelve una red que aún debe sostener una historia coherente.*

8. Una fusión cambió el árbol

Un gen ribosómico nuclear, uno mitocondrial y uno plástido pueden seguir tres ramas distintas sin contradicción.[3,16,35] Cada árbol responde sobre un componente heredado. La historia de especie

debe explicar cómo quedaron unidos. Tratar un marcador como organismo entero convertiría estructura endosimbiótica real en conflicto aparente.

La fórmula «hospedador arqueano más alfaproteobacteria» captura dos ascendencias centrales, pero no cada gen nuclear.[15,16,35] Transferencias bacterianas, asociaciones virales, duplicaciones antiguas y pérdida diferencial añaden capas. Un análisis de 2026 infirió asociaciones microbianas diversas durante la eucariogénesis.[16] Asociación en un árbol no identifica automáticamente otro endosimbionte permanente; el cuadro más rico depende del método.

Las redes no vuelven obsoletos los árboles. La descendencia vertical aún conecta progenitores y descendientes, y los árboles enraizados siguen siendo esenciales para genes y linajes celulares.[3,35] Las redes añaden aristas donde la herencia cruzó linajes. Hay que demostrar esas aristas con historias génicas, mecanismos y tiempo compatibles, no reemplazar toda rama difícil por una fusión imprecisa.

La confianza debe seguir la escala. Un origen mitocondrial anterior a la diversificación de los eucariotas vivos está bien apoyado; especie hospedadora, pacto metabólico y orden de innovaciones exactos no.[4,18,21,36] El perfil queda en interpretación científica actual. Observaciones establecidas sostienen una célula compuesta, mientras su tesis incluye una reconstrucción cuya secuencia interna sigue revisable.

Esa célula compuesta permitió historias posteriores sin dictarlas. Las mitocondrias transformaron el metabolismo, el núcleo y las endomembranas reorganizaron información y tráfico, y los plastos abrieron mundos fotosintéticos. La fusión también dejó genes distintos con árboles distintos.[3,35] QTC-027 pregunta cómo sigue siendo rastreable la descendencia cuando transferencia y virus conectan linajes.

En qué punto estamos

La célula dentro de la célula es historia establecida a gran escala y reconstrucción inacabada en detalle. Genomas independientes revelan la fusión; el control del hospedador explica su duración; el desacuerdo marca la secuencia perdida, no ignorancia del suceso. Desde esta célula integrada, la serie pasa a la herencia ramificada, la transferencia génica y los virus.

Lo que sabemos y cómo lo sabemos

- Mitocondrias y plastos tienen origen endosimbiótico bacteriano apoyado por genomas, filogenia e importación controlada.[3,4,22–25]
- El linaje hospedador eucariota está emparentado con arqueas, y Asgard figura entre sus parientes conocidos más cercanos.[9–12]
- El antepasado de los eucariotas vivos ya poseía mitocondria o derivado mitocondrial.[3,4,19,21]
- Transferencia al núcleo e importación proteica transformaron endosimbiontes en orgánulos dependientes.[22–24,31,32]

Lo que todavía no sabemos

- El linaje bacteriano exacto más cercano al antepasado mitocondrial.
- El linaje arqueano hospedador preciso y su complejidad celular antes de la fusión.
- Si sintrofía metabólica, fagocitosis u otra interacción inició la endosimbiosis estable.

- El orden relativo de mitocondria, núcleo, endomembranas, citoesqueleto y maquinaria fagocítica.
- Por qué ciertos genes permanecen en genomas de orgánulos mientras otros pasaron al núcleo.

Qué podría hacernos cambiar de opinión

- Más genomas bacterianos y arqueanos que estabilicen las ramas filogenéticas más profundas.
- Análisis independientes de duplicaciones antiguas y relojes que converjan en un orden de innovaciones.
- Diversidad Asgard cultivada y sintrofías experimentales que vuelvan probable o inviable una fusión propuesta.
- Reconciliación de árboles que muestre contaminación, paralogía oculta o transferencia posterior en una ascendencia central.
- Un linaje eucariota demostrablemente amitochondriado de forma primitiva.

Si solo recuerdas una cosa

Mitocondrias y plastos son descendientes bacterianos integrados. Su ascendencia está establecida; hospedador, metabolismo y orden de innovaciones que produjeron la primera célula eucariota siguen reconstruyéndose en detalle.

Artículos relacionados

- QTC-023 — LUCA: el antepasado que reconstruimos
- QTC-024 — El planeta microbiano
- QTC-027 — De la información a la herencia: árbol, red y virus

Referencias

[1] Lynn Sagan. On the origin of mitosing cells. Journal of Theoretical Biology 14, 255–274 (1967). DOI 10.1016/0022-5193(67)90079-3. https://doi.org/10.1016/0022-5193(67)90079-3

[2] Maureen A. O'Malley. The first eukaryote cell: An unfinished history of contestation. Studies in History and Philosophy of Biological and Biomedical Sciences 41, 212–224 (2010). DOI 10.1016/j.shpsc.2010.07.010. https://doi.org/10.1016/j.shpsc.2010.07.010

[3] T. Martin Embley; William Martin. Eukaryotic evolution, changes and challenges. Nature 440, 623–630 (2006). DOI 10.1038/nature04546. https://doi.org/10.1038/nature04546

[4] Andrew J. Roger; Sergio A. Muñoz-Gómez; Ryoma Kamikawa. The Origin and Diversification of Mitochondria. Current Biology 27, R1177–R1192 (2017). DOI 10.1016/j.cub.2017.09.015. https://doi.org/10.1016/j.cub.2017.09.015

[5] Sergio A. Muñoz-Gómez; Edward Susko; Kelsey Williamson; Laura Eme; Claudio H. Slamovits; David Moreira; Purificación López-García; Andrew J. Roger. Site-and-branch-heterogeneous analyses of an expanded dataset favour mitochondria as sister to known Alphaproteobacteria. Nature Ecology & Evolution 6, 253–262 (2022). DOI 10.1038/s41559-021-01638-2. https://doi.org/10.1038/s41559-021-01638-2

[6] Philip John; F. R. Whatley. Paracoccus denitrificans and the evolutionary origin of the mitochondrion. Nature 254, 495–498 (1975). DOI 10.1038/254495a0. https://doi.org/10.1038/254495a0

[7] D. Yang; Y. Oyaizu; H. Oyaizu; G. J. Olsen; C. R. Woese. Mitochondrial origins. Proceedings of the National Academy of Sciences 82, 4443–4447 (1985). DOI 10.1073/pnas.82.13.4443. https://doi.org/10.1073/pnas.82.13.4443

[8] Joran Martijn; Julian Vosseberg; Lionel Guy; Pierre Offre; Thijs J. G. Ettema. Deep mitochondrial origin outside the sampled alphaproteobacteria. Nature 557, 101–105 (2018). DOI 10.1038/s41586-018-0059-5. https://doi.org/10.1038/s41586-018-0059-5

[9] Anja Spang; Jimmy H. Saw; Steffen L. Jørgensen; Katarzyna Zaremba-Niedzwiedzka; Joran Martijn; Anders E. Lind; Roel van Eijk; Christa Schleper; Lionel Guy; Thijs J. G. Ettema. Complex archaea that bridge the gap between prokaryotes and eukaryotes. Nature 521, 173–179 (2015). DOI 10.1038/nature14447. https://doi.org/10.1038/nature14447

[10] Katarzyna Zaremba-Niedzwiedzka; Eva F. Caceres; Jimmy H. Saw; Disa Bäckström; Lina Juzokaite; Emmelien Vancaester; Kiley W. Seitz; Karthik Anantharaman; Piotr Starnawski; Kasper U. Kjeldsen; Matthew B. Stott; Takuro Nunoura; Jillian F. Banfield; Andreas Schramm; Brett J. Baker; Anja Spang; Thijs J. G. Ettema. Asgard archaea illuminate the origin of eukaryotic cellular complexity. Nature 541, 353–358 (2017). DOI 10.1038/nature21031. https://doi.org/10.1038/nature21031

[11] Hiroyuki Imachi; Masaru K. Nobu; Nozomi Nakahara; Yuki Morono; Miyuki Ogawara; Yoshihiro Takaki; Yoshinori Takano; Katsuyuki Uematsu; Tetsuro Ikuta; Motoo Ito; Yohei Matsui; Masayuki Miyazaki; Kazuyoshi Murata; Yumi Saito; Sanae Sakai; Chihong Song; Eiji Tasumi; Yuko Yamanaka; Takashi Yamaguchi; Yoichi Kamagata; Hideyuki Tamaki; Ken Takai. Isolation of an archaeon at the prokaryote–eukaryote interface. Nature 577, 519–525 (2020). DOI 10.1038/s41586-019-1916-6. https://doi.org/10.1038/s41586-019-1916-6

[12] Tom A. Williams; Cymon J. Cox; Peter G. Foster; Gergely J. Szöllősi; T. Martin Embley. Phylogenomics provides robust support for a two-domains tree of life. Nature Ecology & Evolution 4, 138–147 (2020). DOI 10.1038/s41559-019-1040-x. https://doi.org/10.1038/s41559-019-1040-x

[13] William Martin; Miklós Müller. The hydrogen hypothesis for the first eukaryote. Nature 392, 37–41 (1998). DOI 10.1038/32096. https://doi.org/10.1038/32096

[14] Alexandros A. Pittis; Toni Gabaldón. Late acquisition of mitochondria by a host with chimaeric prokaryotic ancestry. Nature 531, 101–104 (2016). DOI 10.1038/nature16941. https://doi.org/10.1038/nature16941

[15] Christopher J. Kay; Anja Spang; Gergely J. Szöllősi; Davide Pisani; Tom A. Williams; Philip C. J. Donoghue. Dated gene duplications elucidate the evolutionary assembly of eukaryotes. Nature 650, 129–140 (2026). DOI 10.1038/s41586-025-09808-z. https://doi.org/10.1038/s41586-025-09808-z

[16] Moisès Bernabeu; Saioa Manzano-Morales; Marina Marcet-Houben; Toni Gabaldón. Gene ancestries reveal diverse microbial associations during eukaryogenesis. Nature 656, 399–405 (2026). DOI 10.1038/s41586-026-10639-9. https://doi.org/10.1038/s41586-026-10639-9

[17] Nick Lane; William Martin. The energetics of genome complexity. Nature 467, 929–934 (2010). DOI 10.1038/nature09486. https://doi.org/10.1038/nature09486

[18] A. M. Poole; S. Gribaldo. Eukaryotic origins: How and when was the mitochondrion acquired?. Cold Spring Harbor Perspectives in Biology 6, a015990 (2014). DOI 10.1101/cshperspect.a015990. https://doi.org/10.1101/cshperspect.a015990

[19] Anna Karnkowska; Vojtěch Vacek; Zuzana Zubáčová; Sebastian C. Treitli; Romana Petrželková; Laura Eme; Lukáš Novák; Vojtěch Žárský; Lael D. Barlow; Emily K. Herman; Petr Soukal; Miluše Hroudová; Pavel Doležal; Courtney W. Stairs; Andrew J. Roger; Marek Eliáš; Joel B. Dacks; Čestmír Vlček; Vladimír Hampl. A Eukaryote without a Mitochondrial Organelle. Current Biology 26, 1274–1284 (2016). DOI 10.1016/j.cub.2016.03.053. https://doi.org/10.1016/j.cub.2016.03.053

[20] Jorge Tovar; Anke Fischer; C. Graham Clark. The mitosome, a novel organelle related to mitochondria in the amitochondrial parasite Entamoeba histolytica. Molecular Microbiology 32, 1013–1021 (1999). DOI 10.1046/j.1365-2958.1999.01414.x. https://doi.org/10.1046/j.1365-2958.1999.01414.x

[21] Miklós Müller; Marek Mentel; Jaap J. van Hellemond; Katrin Henze; Christian Woehle; Sven B. Gould; Re-Young Yu; Mark van der Giezen; Aloysius G. M. Tielens; William F. Martin. Biochemistry and Evolution of Anaerobic Energy Metabolism in Eukaryotes. Microbiology and Molecular Biology Reviews 76, 444–495 (2012). DOI 10.1128/MMBR.05024-11. https://doi.org/10.1128/MMBR.05024-11

[22] Jeremy N. Timmis; Michael A. Ayliffe; Chun Y. Huang; William Martin. Endosymbiotic gene transfer: organelle genomes forge eukaryotic chromosomes. Nature Reviews Genetics 5, 123–135 (2004). DOI 10.1038/nrg1271. https://doi.org/10.1038/nrg1271

[23] Walter Neupert; Johannes M. Herrmann. Translocation of Proteins into Mitochondria. Annual Review of Biochemistry 76, 723–749 (2007). DOI 10.1146/annurev.biochem.76.052705.163409. https://doi.org/10.1146/annurev.biochem.76.052705.163409

[24] Toni Gabaldón; Martijn A. Huynen. From Endosymbiont to Host-Controlled Organelle: The Hijacking of Mitochondrial Protein Synthesis and Metabolism. PLoS Computational Biology 3, e219 (2007). DOI 10.1371/journal.pcbi.0030219. https://doi.org/10.1371/journal.pcbi.0030219

[25] John M. Archibald. Endosymbiosis and Eukaryotic Cell Evolution. Current Biology 25, R911–R921 (2015). DOI 10.1016/j.cub.2015.07.055. https://doi.org/10.1016/j.cub.2015.07.055

[26] Patrick J. Keeling. The endosymbiotic origin, diversification and fate of plastids. Philosophical Transactions of the Royal Society B 365, 729–748 (2010). DOI 10.1098/rstb.2009.0103. https://doi.org/10.1098/rstb.2009.0103

[27] Sven B. Gould; Ross F. Waller; Geoffrey I. McFadden. Plastid Evolution. Annual Review of Plant Biology 59, 491–517 (2008). DOI 10.1146/annurev.arplant.59.032607.092915. https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.59.032607.092915

[28] G. I. McFadden. Origin and Evolution of Plastids and Photosynthesis in Eukaryotes. Cold Spring Harbor Perspectives in Biology 6, a016105 (2014). DOI 10.1101/cshperspect.a016105. https://doi.org/10.1101/cshperspect.a016105

[29] Rafael I. Ponce-Toledo; Philippe Deschamps; Purificación López-García; Yvan Zivanovic; Karim Benzerara; David Moreira. An Early-Branching Freshwater Cyanobacterium at the Origin of Plastids. Current Biology 27, 386–391 (2017). DOI 10.1016/j.cub.2016.11.056. https://doi.org/10.1016/j.cub.2016.11.056

[30] Eva C. M. Nowack; Dana C. Price; Debashish Bhattacharya; Anna Singer; Michael Melkonian; Arthur R. Grossman. Gene transfers from diverse bacteria compensate for reductive genome evolution in the chromatophore of Paulinella chromatophora. Proceedings of the National Academy of Sciences 113, 12214–12219 (2016). DOI 10.1073/pnas.1608016113. https://doi.org/10.1073/pnas.1608016113

[31] William Martin; Tamas Rujan; Erik Richly; Andrea Hansen; Sabine Cornelsen; Thomas Lins; Dario Leister; Bettina Stoebe; Masami Hasegawa; David Penny. Evolutionary analysis of Arabidopsis, cyanobacterial, and chloroplast genomes reveals plastid phylogeny and thousands of cyanobacterial genes in the nucleus. Proceedings of the National Academy of Sciences 99, 12246–12251 (2002). DOI 10.1073/pnas.182432999. https://doi.org/10.1073/pnas.182432999

[32] Enrico Schleiff; Thomas Becker. Common ground for protein translocation: access control for mitochondria and chloroplasts. Nature Reviews Molecular Cell Biology 12, 48–59 (2011). DOI 10.1038/nrm3027. https://doi.org/10.1038/nrm3027

[33] Julian Vosseberg; Jolien J. E. van Hooff; Marina Marcet-Houben; Anne van Vlimmeren; Leny M. van Wijk; Toni Gabaldón; Berend Snel. Timing the origin of eukaryotic cellular complexity with ancient duplications. Nature Ecology & Evolution 5, 92–100 (2021). DOI 10.1038/s41559-020-01320-z. https://doi.org/10.1038/s41559-020-01320-z

[34] Purificación López-García; David Moreira. The Syntrophy hypothesis for the origin of eukaryotes revisited. Nature Microbiology 5, 655–667 (2020). DOI 10.1038/s41564-020-0710-4. https://doi.org/10.1038/s41564-020-0710-4

[35] Chuan Ku; Shijulal Nelson-Sathi; Mayo Roettger; Filipa L. Sousa; Peter J. Lockhart; David Bryant; Einat Hazkani-Covo; James O. McInerney; Giddy Landan; William F. Martin. Endosymbiotic origin and differential loss of eukaryotic genes. Nature 524, 427–432 (2015). DOI 10.1038/nature14963. https://doi.org/10.1038/nature14963

[36] Thomas A. Richards; Laura Eme; John M. Archibald; Guy Leonard; Susana M. Coelho; Alex de Mendoza; Christophe Dessimoz; Pavel Dolezal; Lillian K. Fritz-Laylin; Toni Gabaldón; Vladimír Hampl; Geert J. P. L. Kops; Michelle M. Leger; Purificacion Lopez-Garcia; James O. McInerney; David Moreira; Sergio A. Muñoz-Gómez; Daniel J. Richter; Iñaki Ruiz-Trillo; Alyson E. Santoro; Arnau Sebé-Pedrós; Berend Snel; Courtney W. Stairs; Eelco C. Tromer; Jolien J. E. van Hooff; Bill Wickstead; Tom A. Williams; Andrew J. Roger; Joel B. Dacks; Jeremy G. Wideman. Reconstructing the last common ancestor of all eukaryotes. PLOS Biology 22, e3002917 (2024). DOI 10.1371/journal.pbio.3002917. https://doi.org/10.1371/journal.pbio.3002917

De la información a la herencia: árbol, red y virus

QTC-027 · 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

La herencia no es el almacenamiento pasivo de un código. Es una historia física de moléculas copiadas con fidelidad alta pero finita, reparadas, reorganizadas y a veces trasladadas entre linajes. La descendencia vertical produce árboles reales, aunque genes distintos sigan rutas diferentes por duplicación, pérdida, recombinación, transferencia horizontal y endosimbiosis. Los virus complican más la imagen: dependen de células, intercambian genes con ellas, dejan fósiles heredados en genomas y provocan defensas con memoria molecular adquirida. Nada de esto convierte la ascendencia en una red indiferenciada. Las historias celulares conservadas aún proporcionan un armazón ramificado y las transferencias añaden conexiones rastreables, fechables y sometidas a pruebas independientes. El artículo sigue la información desde replicación y mutación hasta filogenia, elementos móviles y conflicto viral, y muestra por qué la vida conserva su pasado mediante continuidad y oportunidades reguladas de cambio.

En 60 segundos

La información genética tiene soporte físico. En la vida celular, las secuencias de ADN se copian semiconservativamente, se corrigen y reparan, pero algunas diferencias sobreviven como mutaciones. Si la copia fuera perfecta cesaría la novedad; si fuera demasiado inexacta se disolverían adaptaciones heredadas. La transmisión entre progenitores y descendientes crea genealogías ramificadas, y genes conservados revelan ascendencia celular profunda. Pero los genes también se mueven lateralmente por transformación, conjugación y transducción mediante fagos. Los virus añaden historias de ADN o ARN que no forman un árbol viral universal. Algunos entraron en líneas germinales y hoy ocupan partes reconocibles de genomas animales; envolturas virales capturadas ayudan a construir placentas. Las células responden con restricción y memorias CRISPR, mientras los fagos desarrollan contradefensas. Transposones y plásmidos añaden otros intereses replicativos dentro de la misma célula y entre células distintas. El resultado no es árbol perfecto ni red sin forma: la descendencia celular aporta el armazón y las transferencias forman injertos fechables. La herencia funciona porque continuidad y cambio están acoplados.

Por qué importa esta pregunta

Cada genoma es mecanismo y archivo. Debe copiar suficiente estructura para mantener viable al organismo, pero también contiene mutaciones, genes prestados, virus antiguos y elementos móviles

cuyas historias no coinciden. Leer ese archivo cambia cómo entendemos ascendencia, resistencia antibiótica, inmunidad e incluso desarrollo placentario a través de tiempos evolutivos muy diferentes. También evita una elección falsa. La transferencia horizontal no demuestra que los árboles evolutivos carezcan de sentido, y un árbol celular no vuelve vertical a cada gen. La tarea científica consiste en identificar qué proceso produjo cada patrón y con qué confianza puede reconstruirse su dirección.

1. La información necesita un soporte físico

La pregunta

Si la información genética es más que una metáfora, ¿dónde se localiza físicamente, qué se copia exactamente y cómo conserva una secuencia molecular una diferencia entre generaciones y contextos celulares sin determinar por sí sola un organismo?

La información genética no es un fluido invisible vertido en la química. Nombra relaciones medibles: una secuencia molecular puede copiarse, compararse con otra y alterar causalmente un producto o proceso regulador.[1,2,4] El contexto aún importa. El mismo ADN actúa distinto entre células, ambientes y etapas de desarrollo; la secuencia porta diferencias heredadas, no es un manual completo separado del sistema vivo.

El soporte fue pregunta experimental antes de volverse certeza escolar. Avery, MacLeod y McCarty purificaron de neumococos una fracción que transmitía un tipo encapsulado y heredable, y hallaron actividad compatible con ADN.[1] Hershey y Chase marcaron después por separado proteína y ADN de fagos: entró la mayor parte del ADN y quedó fuera la mayoría de proteína.[2] Fueron experimentos convergentes, no un instante mágico que borró toda excepción.

Identificado el ADN como material hereditario celular, había que comprobar la copia. Meselson y Stahl cultivaron bacterias con nitrógeno pesado, las pasaron a nitrógeno ligero y siguieron la densidad del ADN durante generaciones.[3] Las bandas coincidieron con replicación semiconservativa: cada doble hélice hija retuvo una hebra antigua junto a otra nueva. La herencia apareció como continuidad material, no fabricación de copias enteramente nuevas sin estructura parental.

El dogma central de Crick suele abreviarse hasta volverse falso. Su formulación de 1970 trataba la transferencia de información secuencial: ADN y ARN pueden moldear ácidos nucleicos, estos especifican proteína, pero la secuencia proteica no moldea una secuencia nucleica.[4] La retrotranscripción no lo viola. Tampoco niega retroalimentación, regulación o causalidad ambiental. Limita una clase de relación de copia.

Este artículo comienza donde terminan otros. QTC-010 explicó mutación y selección; QTC-023 reconstruyó la ascendencia celular común; QTC-026 siguió la fusión que construyó la célula eucariota.[16,17] Ahora preguntamos cómo la información heredada cruza generaciones y, a veces, linajes. Ese cambio convierte una secuencia almacenada en historia cuya fidelidad debe medirse antes de confiar en sus ramas.

En qué punto estamos

La información genética es lo bastante física para marcarla, separarla y seguirla al replicarse, pero tan contextual que la secuencia nunca actúa sola. La copia semiconservativa aporta continuidad,

aunque solo sirve si casi todos los errores se corrigen y algunos sobreviven. El problema siguiente es cómo la vida construye exactitud sin eliminar el cambio.

2. La fidelidad se construye, no es perfecta

La replicación del ADN empieza con discriminación química, no certeza. Las polimerasas eligen nucleótidos, algunas eliminan un extremo mal emparejado y sistemas de reparación de apareamientos inspeccionan después el ADN nuevo.[6,8] Cada capa rechaza fallos omitidos por la anterior. Su acción combinada estabiliza genomas entre generaciones, mientras diferencias entre organismos y condiciones muestran una fidelidad construida con partes, costes y modos de fallo.

Los errores restantes no se distribuyen uniformemente. Acumulación de mutaciones y secuenciación de profundidad máxima revelan probabilidades distintas entre sitios, contextos y estados fisiológicos.[6,7] Algunas incorporaciones incorrectas ocurren mucho más que la mutación heredada porque la reparación las elimina. Un espectro mutacional es la salida filtrada de daño, replicación y reparación. Azar respecto al beneficio no significa ausencia de estructura química.

Luria y Delbrück hicieron visible esa diferencia antes de poder secuenciar genes. Cultivos bacterianos independientes expuestos a fagos dieron cantidades muy dispares de colonias resistentes, incluidos jackpots de mutaciones tempranas.[5] La distribución encajó mejor con resistencia previa que con fagos instruyendo a cada célula para mutar útilmente. Las respuestas modernas al estrés alteran tasas y espectros, pero no convierten el valor adaptativo futuro en molde molecular.

Muy poca fidelidad también destruye herencia. Los modelos de cuasiespecies de Eigen conectan error, ventaja selectiva y longitud: superado un umbral, una secuencia privilegiada pierde localización en el espacio mutante.[9] Es un resultado preciso dentro de un modelo, no un precipicio universal medido para toda vida. Poblaciones reales recombinan, reparan, se compartimentan y habitan paisajes complejos. La teoría identifica una restricción, no un límite empírico único.

Tampoco se favorece automáticamente la fidelidad máxima. Corrección y reparación requieren maquinaria, y la selección apenas mejora diferencias minúsculas de error en poblaciones pequeñas. El marco de la barrera de deriva conecta tasas alcanzables con tamaño efectivo y coste molecular.[7,10] Sigue siendo un marco, no un número para la vida. El equilibrio entre error, reparación y selección debe medirse en cada linaje.

En qué punto estamos

La fidelidad de copia no es accidental ni absoluta: capas moleculares suprimen casi todos los errores, procesos poblacionales limitan mejoras y mutaciones supervivientes impiden historias idénticas. Cuando las diferencias persisten, la descendencia adquiere geometría. El paso siguiente es preguntar por qué la transmisión vertical crea árboles reales aunque ningún gen registre perfectamente cada rama.

3. La descendencia vertical construye árboles

La pregunta

> *Si los genomas recombinan y los genes pueden moverse después entre organismos, ¿es el árbol evolutivo solo una imagen cómoda o conserva la herencia entre progenitores y descendientes una historia ramificada recuperable pese a intercambios posteriores?*

Una genealogía se ramifica cuando descendientes se separan de un linaje progenitor y acumulan historias distintas. Esa relación es arbórea aunque contactos posteriores añadan conexiones.[11,12] El árbol no afirma que los organismos jamás intercambien genes. Afirma algo sobre descendencia vertical: las células vienen de células y los linajes reproductivos se dividen. La evidencia de una rama depende de caracteres copiados lo bastante bien para conservar ascendencia compartida.

El ARN ribosómico aportó caracteres excepcionalmente profundos. Woese y Fox lo usaron para distinguir un gran linaje arqueano de bacterias conocidas; Woese, Kandler y Wheelis formalizaron después Bacteria, Archaea y Eucarya como dominios.[11,12] Trabajos posteriores suelen anidar eucariotas dentro de Archaea. Esa revisión muestra para qué sirve un árbol científico: la topología cambia mientras homología medida y singularidad arqueana permanecen.

Ninguna regla exige que todos los genes muestren la misma topología. Duplicación crea parálogos, pérdida borra ramas, transferencia cambia propietarios, recombinación une segmentos y ordenamiento incompleto permite que variantes ancestrales crucen especiaciones sucesivas.[14,15,17] En ciertos rangos poblacionales, el árbol génico más probable puede diferir del árbol de especies. La discordancia exige explicación; no prueba automáticamente que la filogenia fracasó.

La ascendencia común universal descansa en correspondencias moleculares conservadas y comparaciones estadísticas explícitas, no en parecido visual con un diagrama.[13,16] La prueba formal de Theobald favoreció fuertemente ascendencia común frente a alternativas independientes dentro de sus modelos.[16] No reconstruye cuerpo, metabolismo o ambiente de LUCA. Trata descendencia compartida; QTC-023 conserva las preguntas más difíciles sobre fenotipo y raíz.

La filogenómica moderna combina muchos marcadores y modela procesos que separan sus historias.[13–15,18] Un marco de especies es una inferencia con apoyos, muestreo y supuestos, no un árbol sagrado. La misma disciplina que protege la historia vertical impide forzar un gen transferido o duplicado sobre la rama incorrecta. Pensar en árboles se fortalece cuando la discordancia se modela en vez de ocultarse.

En qué punto estamos

> *La herencia vertical da a la ascendencia celular un armazón ramificado, mientras la discordancia revela duplicación, pérdida, ordenamiento e intercambio. El árbol sobrevive porque representa un proceso especificado, no todos a la vez. La sección siguiente sigue la excepción más visible: genes que cruzan entre contemporáneos mediante mecanismos separables experimentalmente y detectables en genomas.*

4. Los genes también se mueven lateralmente

La transferencia horizontal no es un solo mecanismo. La transformación natural capta material del ambiente; la conjugación usa maquinaria asociada a células; la transducción empaqueta ADN del hospedador en partículas de fago.[1,19,20] Los experimentos clásicos distinguieron resultados antes de conocer cada componente. Sus etiquetas modernas resumen trabajo posterior: la justicia histórica exige no negar lo demostrado ni fingir que sus autores ya tenían los diagramas actuales.

El principio transformante de Avery cambió un carácter bacteriano heredable sin reproducción.[1] Lederberg y Tatum recuperaron E. coli recombinantes de cultivos mezclados y establecieron intercambio entre células.[19] Zinder y Lederberg hallaron después un agente filtrable que mediaba intercambio en Salmonella y lo rastrearon hasta un bacteriófago, revelando transducción.[20] Tres rutas impusieron una lección: un linaje puede adquirir material heredable de algo distinto de su progenitor.

Las comparaciones genómicas ampliaron mecanismos aislados hasta una fuerza evolutiva. Un análisis de 2024 reconcilió árboles génicos con un marco de especies en 8.790 especies procariotas y detectó millones de transferencias putativas.[21] La fracción precisa depende del método y los sucesos antiguos cuestan más de reconocer. La conclusión robusta es heterogeneidad: el intercambio varía con contacto ecológico, distancia filogenética, función y persistencia del ADN extraño.

Las transferencias recientes estaban enriquecidas en funciones accesorias, moviloma y resistencia antimicrobiana; algunas antiguas se habían vuelto genes metabólicos extendidos.[21,23] No significa que la resistencia naciera con la medicina ni que toda vía metabólica fuera importada. Muestra un proceso de selección: llegan genes, muchos desaparecen y un subconjunto persiste porque ecología, compatibilidad y selección lo vuelven útil o al menos tolerable.

El movimiento lateral puede aclarar la cronología vertical. La reconciliación sitúa un gen transferido en ramas donante y receptora, e implica que el donante existía antes de la adquisición.[18,22] Muchas restricciones ordenan nodos y prueban relojes. Una transferencia tiene dos caras epistémicas: vuelve engañoso a un gen como marcador de especie, pero aporta evidencia cuando su ruta no vertical se identifica bien.

En qué punto estamos

Transformación, conjugación y transducción convierten la herencia horizontal en mecanismo, y la filogenómica muestra frecuencia y persistencia estructuradas, no universales. Los fagos ya aparecieron como transportistas, pero los virus hacen más que trasladar genes bacterianos. Tienen historias diversas, entran en líneas germinales y a veces se vuelven partes indispensables de la biología hospedadora.

5. Los virus son vectores y archivos

La pregunta

Los virus no se reproducen sin células, pero cruzan linajes y dejan genes que los descendientes pueden heredar durante millones de años. ¿Son parásitos externos, ramas de la vida, genomas móviles o cosas distintas en historias distintas?

La diversidad viral derrota una definición ordenada. Los virus usan ADN o ARN, hebras simples o dobles, genomas segmentados o continuos, y dependen de la traducción hospedadora para reproducirse.[24,25] Esa dependencia los vuelve casos frontera en la pregunta de QTC-009 sobre la vida, pero no marginales. La secuenciación ambiental descubrió enormes cantidades de secuencias virales desconocidas, revelando un mundo genético apenas muestreado por cultivo.[24]

Ningún gen conocido une todos los virus como genes conservados de traducción conectan la vida celular.[25,26] Algunos grupos comparten rasgos de cápside o replicación; otros no. Escape desde células, reducción de parásitos celulares y orígenes entre replicadores precelulares explican partes de la evidencia.[25,26] La conclusión abierta es plural: puede haber orígenes múltiples y ningún escenario debe ascender a historia universal registrada.

Los virus también se vuelven fósiles. Cuando un retrovirus entra en una célula germinal y su ADN persiste, los descendientes heredan la inserción. El genoma humano de referencia contiene material retroviral endógeno reconocible cercano al ocho por ciento, dentro de una fracción transponible mucho mayor.[27] Los porcentajes dependen de anotación y referencia. La conclusión es histórica: parte del ADN aparentemente humano llegó mediante infecciones ancestrales.

A veces un fósil se vuelve maquinaria. La sincitina humana es una envoltura retroviral capturada con actividad fusogénica en placenta.[28] En ratones, eliminar Syncytin-A alteró la arquitectura placentaria y causó muerte embrionaria, prueba causal más allá del parecido de secuencia.[29] Grupos mamíferos distintos capturaron envolturas diferentes. Los virus no inventaron una placenta universal; la evolución reclutó repetidamente herramientas virales de fusión para desarrollos propios.

Los fagos transforman hospedadores sin esperar tiempo geológico. CTXphi porta genes de toxina colérica y la conversión lisogénica vuelve productores de toxina a Vibrio cholerae susceptibles.[33] La enfermedad no es «un virus» aislado: importan regulación bacteriana, carga del fago, ecología y hospedador humano. Pero el ejemplo hace concreta la herencia: un genoma viral añade un rasgo que viaja después con un linaje bacteriano.

En qué punto estamos

> *Los virus son parásitos, vehículos y archivos heredados, a veces dentro de una misma historia. La ausencia de gen universal deja abiertos sus orígenes; secuencias endógenas y conversión lisogénica vuelven observables sus efectos. Pero los hospedadores no son receptores pasivos. Sigue la historia recíproca: defensas que recuerdan invasiones y contramedidas virales que las derrotan.*

6. Las células se defienden, los virus contraatacan

La defensa bacteriana empieza con discriminación molecular. Los sistemas de restricción cortan ADN susceptible, y una modificación controlada por el hospedador protege ADN residente coincidente.[31] La diferencia es bioquímica: sitios, enzimas y estados de modificación determinan supervivencia. Estos sistemas bloquean fagos y genes entrantes, aunque su movilidad y coste complican la imagen simple de un genoma defendiendo un yo fijo y permanente.

CRISPR-Cas añade otra herencia. Barrangou y colaboradores desafiaron Streptococcus thermophilus con fagos y observaron nuevos espaciadores derivados de secuencias virales; añadir

o quitar espaciadores concretos cambió la resistencia.[30] Un linaje celular hereda así un registro molecular de exposición y usa complementariedad contra invasores relacionados. La memoria es adquirida y específica, pero se construye con ADN encontrado, no con previsión de necesidades futuras.

Ninguna defensa termina el conflicto. Bondy-Denomy y colaboradores identificaron genes de fagos que inactivan sistemas CRISPR-Cas concretos, hoy llamados anti-CRISPR.[32] Una innovación hospedadora cambia el ambiente viral; una contramedida lo cambia de nuevo. Receptores, sitios de restricción, espaciadores e inhibidores evolucionan. Lo que parece mecanismo inmune estable en un momento es un movimiento dentro de una historia recíproca mayor.

«Carrera armamentística» sirve solo si no se hace universal. Algunos sistemas muestran escalada de defensa y escape; otros ciclan genotipos, toleran infección o alcanzan coexistencia.[30,32,33] El modelo apropiado depende de ecología, estructura poblacional y costes. La evolución no tiene obligación de maximizar resistencia. Una defensa que bloquee todo elemento móvil quizá bloquee también genes beneficiosos bajo una condición nueva.

Ese compromiso une inmunidad y herencia. CRISPR, restricción y otras defensas cambian qué ADN cruza una frontera celular, mientras contradefensas de fagos reabren rutas.[21,30,32] El genoma no es biblioteca abierta ni cámara sellada. Es una historia selectivamente permeable cuyos filtros evolucionan. Para entender sus conflictos, la unidad copiada debe poder variar entre cromosoma, plásmido y transposón.

En qué punto estamos

Las defensas vuelven selectiva la herencia y las contradefensas hacen temporal esa selectividad. Un mismo genoma rechaza una secuencia, archiva otra y después depende de un gen viral capturado. La inestabilidad desplaza la atención desde organismos hacia replicadores internos. La sección siguiente sigue transposones y plásmidos, cuya persistencia puede alinearse con el hospedador u oponerse.

7. La herencia tiene más de un canal

La pregunta

Cromosoma, plásmido y transposón pueden copiarse, pero sus probabilidades de persistencia no tienen por qué coincidir entre generaciones, ambientes o escalas de selección. ¿La herencia de quién describimos cuando varios replicadores comparten una célula dentro del mismo organismo vivo?

Barbara McClintock infirió loci móviles a partir de pigmentación cambiante y comportamiento cromosómico en maíz antes de que los transposones tuvieran nombre molecular.[34] Sus experimentos mostraron que el ADN heredado podía cambiar posición y regulación dentro de un genoma. Los elementos actuales usan mecanismos distintos, pero la lección permanece: un movimiento no necesita cruzar organismos para rehacer herencia. El genoma tiene tráfico interno además de transmisión vertical.

El genoma humano de referencia mostró la escala. Secuencia reconocible derivada de elementos transponibles ocupa cerca del cuarenta y cinco por ciento, con restos retrovirales endógenos próximos al ocho por ciento.[27] Son categorías dependientes de anotación, no un censo de genes saltadores activos. Casi todas las copias están dañadas o inmóviles. La abundancia registra replicación e inserción pasadas; no prueba por sí sola función, daño o adaptación presentes.

Los plásmidos vuelven medibles los intereses replicativos. Se copian dentro de células, segregan a descendientes y a veces pasan entre células.[19,35] Portarlos ralentiza el crecimiento cuando sus genes sobran, pero la selección de un rasgo plasmídico o la compensación del hospedador estabilizan la asociación. Los experimentos muestran que una llegada costosa no tiene que seguir siéndolo. La persistencia emerge de dinámicas intra e intercelulares.

Llamar egoísta a un elemento móvil es abreviatura, no psicología. Puede aumentar su transmisión dañando la reproducción hospedadora, volverse casi neutral o portar una función beneficiosa bajo ciertas condiciones.[27,33,35] El signo cambia con ambiente y escala. Fago de toxina colérica, plásmido de resistencia y resto retroviral silencioso son secuencias heredadas, pero sus relaciones con hospedadores no son intercambiables.

Los genomas combinan canales. La copia vertical aporta continuidad cromosómica; la recombinación reorganiza variantes; plásmidos y fagos cruzan células; transposones se mueven dentro; la endosimbiosis une linajes enteros.[18,27,36] No se disuelven en una red metafórica. Cada proceso tiene partículas, tasas y pruebas de dirección distintas. Reconstruir ascendencia exige asignar una ruta a cada secuencia, no imponer una sola a todo.

En qué punto estamos

Varios replicadores comparten célula sin compartir destino, y varias rutas moldean un genoma sin volverse equivalentes. Queda un problema de representación. Si ramas, transferencias e inserciones son reales, la historia necesita diagramas que conserven diferencias: árboles donde domina descendencia, redes donde los linajes se unen y duda donde el origen sigue abierto.

8. Un árbol con injertos, no un árbol caído

La elección entre árbol y red es falsa cuando se especifican procesos. La reproducción celular crea un armazón ramificado; genes concretos se apartan mediante transferencia, recombinación, duplicación y pérdida.[13,18,36] Una red sin dirección ni mecanismo pierde evidencia. Un árbol que fuerza toda secuencia sobre una topología también. La representación útil sigue la ruta de herencia del objeto estudiado.

Los virus son la adición más difícil porque sus raíces no quedan aseguradas por un gen universal.[25,26,38] Los escenarios de escape derivan genomas virales de elementos celulares; los de reducción, algunos virus de parásitos complejos; modelos semejantes a virus-primero sitúan replicadores antes de células modernas. Distintos reinos pueden tener historias diferentes. El estado honesto es pluralidad disputada, no árbol único ni permiso para inventar cualquier origen.

La evolución abierta añade otra capa sin resolver. Eigen mostró por qué la retención falla con copia demasiado inexacta, y la genética poblacional explica por qué fidelidad perfecta no es alcanzable ni siempre favorecida.[9,10] La teoría de grandes transiciones sigue cambios en cómo se empaqueta y transmite información.[37] Pero ninguna fórmula de fidelidad, variación e intercambio predice innovación indefinida en células, ecosistemas y sistemas artificiales. Ingredientes necesarios no son condiciones suficientes.

La reticulación puede ser fuente, no solo ruido. Si un gen pasó de un linaje a otro, restricciones de donante y receptor ordenan sucesos que genes verticales fechan mal.[18,20,22] La anomalía que rompe un árbol simple quizá conserve contacto entre poblaciones antiguas. La reconstrucción

mejora cuando pregunta qué proceso generó discordancia antes de decidir si debe descartarla o aprovecharla.

La herencia es continuidad restringida. La copia semiconservativa lleva hebras antiguas; la reparación protege función; la mutación produce diferencias; selección y deriva cambian su destino; transferencia y virus conectan linajes; elementos móviles persisten parcialmente por su cuenta.[4,16,21,24,36,37] La temporada cierra sin código sellado ni red amorfa. La vida guarda historia porque copia bien y evoluciona porque heredar nunca significó aislamiento perfecto.

En qué punto estamos

Un árbol registra descendencia vertical; los injertos, transferencias; los fósiles virales, infecciones convertidas en herencia. Ninguno cancela a los demás. Juntos muestran por qué la información biológica es histórica y no solo almacenada: cada secuencia superviviente porta vía de copia y registro de cambio. Ese acoplamiento cierra la Temporada 1: de leyes físicas a vida que conserva y revisa su pasado.

Lo que sabemos y cómo lo sabemos

- El ADN se copia semiconservativamente, y capas de corrección y reparación reducen mucho los errores heredados.[3,6,8]
- La herencia vertical produce genealogías celulares arbóreas, aunque los árboles génicos difieran por duplicación, pérdida, transferencia y ordenamiento de linajes.[11–15]
- Transformación, conjugación y transducción son rutas distintas y demostradas de transferencia horizontal.[1,19,20]
- Virus y elementos móviles pueden entrar en genomas, transmitir rasgos y ser cooptados para funciones del hospedador.[27–29,33–35]

Lo que todavía no sabemos

- Si todos los grandes linajes virales comparten algún origen profundo.
- Qué escenarios de origen viral se aplican a cada reino y en qué secuencia.
- Los límites inferiores y costes cuantitativos que fijan tasas de mutación entre linajes.
- Cuándo dominan carrera armamentística, selección fluctuante o coexistencia en la evolución hospedador-virus.
- Una teoría suficiente y predictiva de innovación evolutiva abierta.

Qué podría hacernos cambiar de opinión

- Un núcleo homólogo universal que conecte todos los reinos virales.
- Métodos filogenómicos resistentes al sesgo que borren o refuercen de forma consistente el armazón celular vertical.
- Experimentos prolongados que aíslen límites universales de mutación entre tamaños poblacionales y sistemas moleculares.
- Reconstrucciones directas que muestren que transferencias supuestas son duplicación, pérdida, contaminación o error arbóreo.
- Una teoría transversal que prediga cuándo fidelidad, variación e intercambio producen evolución abierta.

Si solo recuerdas una cosa

La herencia conserva diferencias físicas sin sellar linajes. La descendencia crea árboles; mutación, elementos móviles y virus añaden cambio, injertos y conflictos rastreables a esas historias ramificadas.

Artículos relacionados

- QTC-010 — Variación al azar y un filtro
- QTC-023 — LUCA: el antepasado que reconstruimos
- QTC-026 — La célula dentro de la célula

Referencias

[1] Oswald T. Avery; Colin M. MacLeod; Maclyn McCarty. Studies on the Chemical Nature of the Substance Inducing Transformation of Pneumococcal Types. Journal of Experimental Medicine 79, 137–158 (1944). DOI 10.1084/jem.79.2.137. https://doi.org/10.1084/jem.79.2.137

[2] A. D. Hershey; Martha Chase. Independent Functions of Viral Protein and Nucleic Acid in Growth of Bacteriophage. Journal of General Physiology 36, 39–56 (1952). DOI 10.1085/jgp.36.1.39. https://doi.org/10.1085/jgp.36.1.39

[3] Matthew Meselson; Franklin W. Stahl. The Replication of DNA in Escherichia coli. Proceedings of the National Academy of Sciences 44, 671–682 (1958). DOI 10.1073/pnas.44.7.671. https://doi.org/10.1073/pnas.44.7.671

[4] Francis Crick. Central Dogma of Molecular Biology. Nature 227, 561–563 (1970). DOI 10.1038/227561a0. https://doi.org/10.1038/227561a0

[5] S. E. Luria; M. Delbrück. Mutations of Bacteria from Virus Sensitivity to Virus Resistance. Genetics 28, 491–511 (1943). DOI 10.1093/genetics/28.6.491. https://doi.org/10.1093/genetics/28.6.491

[6] Justin Jee; Aviram Rasouly; Ilya Shamovsky; Yonatan Akivis; Susan R. Steinman; Bud Mishra; Evgeny Nudler. Rates and Mechanisms of Bacterial Mutagenesis from Maximum-Depth Sequencing. Nature 534, 693–696 (2016). DOI 10.1038/nature18313. https://doi.org/10.1038/nature18313

[7] Heewook Lee; Ellen Popodi; Haixu Tang; Patricia L. Foster. Rate and Molecular Spectrum of Spontaneous Mutations in the Bacterium Escherichia coli as Determined by Whole-Genome Sequencing. Proceedings of the National Academy of Sciences 109, E2774–E2783 (2012). DOI 10.1073/pnas.1210309109. https://doi.org/10.1073/pnas.1210309109

[8] R. M. Schaaper. Base Selection, Proofreading, and Mismatch Repair during DNA Replication in Escherichia coli. Journal of Biological Chemistry 268, 23762–23765 (1993). DOI 10.1016/S0021-9258(20)80446-3. https://doi.org/10.1016/S0021-9258(20)80446-3

[9] Manfred Eigen. Selforganization of Matter and the Evolution of Biological Macromolecules. Naturwissenschaften 58, 465–523 (1971). DOI 10.1007/BF00623322. https://doi.org/10.1007/BF00623322

[10] Michael Lynch. The Lower Bound to the Evolution of Mutation Rates. Genome Biology and Evolution 3, 1107–1118 (2011). DOI 10.1093/gbe/evr066. https://doi.org/10.1093/gbe/evr066

[11] Carl R. Woese; George E. Fox. Phylogenetic Structure of the Prokaryotic Domain: The Primary Kingdoms. Proceedings of the National Academy of Sciences 74, 5088–5090 (1977). DOI 10.1073/pnas.74.11.5088. https://doi.org/10.1073/pnas.74.11.5088

[12] C. R. Woese; O. Kandler; M. L. Wheelis. Towards a Natural System of Organisms: Proposal for the Domains Archaea, Bacteria, and Eucarya. Proceedings of the National Academy of Sciences 87, 4576–4579 (1990). DOI 10.1073/pnas.87.12.4576. https://doi.org/10.1073/pnas.87.12.4576

[13] Laura A. Hug; Brett J. Baker; Karthik Anantharaman; Christopher T. Brown; Alexander J. Probst; Cindy J. Castelle; Cristina N. Butterfield; Alex W. Hernsdorf; Yuki Amano; Kotaro Ise; Yohey Suzuki; Natasha Dudek; David A. Relman; Kari M. Finstad; Ronald Amundson; Brian C. Thomas; Jillian F. Banfield. A New View of the Tree of Life. Nature Microbiology 1, 16048 (2016). DOI 10.1038/nmicrobiol.2016.48. https://doi.org/10.1038/nmicrobiol.2016.48

[14] Wayne P. Maddison. Gene Trees in Species Trees. Systematic Biology 46, 523–536 (1997). DOI 10.1093/sysbio/46.3.523. https://doi.org/10.1093/sysbio/46.3.523

[15] James H. Degnan; Noah A. Rosenberg. Discordance of Species Trees with Their Most Likely Gene Trees. PLoS Genetics 2, e68 (2006). DOI 10.1371/journal.pgen.0020068. https://doi.org/10.1371/journal.pgen.0020068

[16] Douglas L. Theobald. A Formal Test of the Theory of Universal Common Ancestry. Nature 465, 219–222 (2010). DOI 10.1038/nature09014. https://doi.org/10.1038/nature09014

[17] W. Ford Doolittle. Phylogenetic Classification and the Universal Tree. Science 284, 2124–2129 (1999). DOI 10.1126/science.284.5423.2124. https://doi.org/10.1126/science.284.5423.2124

[18] Sophie S. Abby; Eric Tannier; Manolo Gouy; Vincent Daubin. Lateral Gene Transfer as a Support for the Tree of Life. Proceedings of the National Academy of Sciences 109, 4962–4967 (2012). DOI 10.1073/pnas.1116871109. https://doi.org/10.1073/pnas.1116871109

[19] Joshua Lederberg; E. L. Tatum. Gene Recombination in Escherichia coli. Nature 158, 558 (1946). DOI 10.1038/158558a0. https://doi.org/10.1038/158558a0

[20] Norton D. Zinder; Joshua Lederberg. Genetic Exchange in Salmonella. Journal of Bacteriology 64, 679–699 (1952). DOI 10.1128/jb.64.5.679-699.1952. https://doi.org/10.1128/jb.64.5.679-699.1952

[21] Marija Dmitrijeva; Janko Tackmann; João Frederico Matias Rodrigues; Jaime Huerta-Cepas; Luis Pedro Coelho; Christian von Mering. A Global Survey of Prokaryotic Genomes Reveals the Eco-evolutionary Pressures Driving Horizontal Gene Transfer. Nature Ecology & Evolution 8, 986–998 (2024). DOI 10.1038/s41559-024-02357-0. https://doi.org/10.1038/s41559-024-02357-0

[22] Adrián A. Davín; Eric Tannier; Tom A. Williams; Bastien Boussau; Vincent Daubin; Gergely J. Szöllősi. Gene Transfers Can Date the Tree of Life. Nature Ecology & Evolution 2, 904–909 (2018). DOI 10.1038/s41559-018-0525-3. https://doi.org/10.1038/s41559-018-0525-3

[23] Howard Ochman; Jeffrey G. Lawrence; Eduardo A. Groisman. Lateral Gene Transfer and the Nature of Bacterial Innovation. Nature 405, 299–304 (2000). DOI 10.1038/35012500. https://doi.org/10.1038/35012500

[24] David Paez-Espino; Emiley A. Eloe-Fadrosh; Georgios A. Pavlopoulos; Alex D. Thomas; Marcel Huntemann; Natalia Mikhailova; Edward Rubin; Natalia N. Ivanova; Nikos C. Kyrpides. Uncovering

Earth's Virome. Nature 536, 425–430 (2016). DOI 10.1038/nature19094. https://doi.org/10.1038/nature19094

[25] Mart Krupovic; Valerian V. Dolja; Eugene V. Koonin. Origin of Viruses: Primordial Replicators Recruiting Capsids from Hosts. Nature Reviews Microbiology 17, 449–458 (2019). DOI 10.1038/s41579-019-0205-6. https://doi.org/10.1038/s41579-019-0205-6

[26] Eugene V. Koonin; Tatiana G. Senkevich; Valerian V. Dolja. The Ancient Virus World and Evolution of Cells. Biology Direct 1, 29 (2006). DOI 10.1186/1745-6150-1-29. https://doi.org/10.1186/1745-6150-1-29

[27] International Human Genome Sequencing Consortium. Initial Sequencing and Analysis of the Human Genome. Nature 409, 860–921 (2001). DOI 10.1038/35057062. https://doi.org/10.1038/35057062

[28] Sha Mi; Xinhua Lee; Xiang-ping Li; Geertruida M. Veldman; Heather Finnerty; Lisa Racie; Edward LaVallie; Xiang-Yang Tang; Philippe Edouard; Steve Howes; James C. Keith, Jr.; John M. McCoy. Syncytin Is a Captive Retroviral Envelope Protein Involved in Human Placental Morphogenesis. Nature 403, 785–789 (2000). DOI 10.1038/35001608. https://doi.org/10.1038/35001608

[29] Anne Dupressoir; Cécile Vernochet; Olivia Bawa; Francis Harper; Gérard Pierron; Paule Opolon; Thierry Heidmann. Syncytin-A Knockout Mice Demonstrate the Critical Role in Placentation of a Fusogenic, Endogenous Retrovirus-derived, Envelope Gene. Proceedings of the National Academy of Sciences 106, 12127–12132 (2009). DOI 10.1073/pnas.0902925106. https://doi.org/10.1073/pnas.0902925106

[30] Rodolphe Barrangou; Christophe Fremaux; Hélène Deveau; Melissa Richards; Patrick Boyaval; Sylvain Moineau; Dennis A. Romero; Philippe Horvath. CRISPR Provides Acquired Resistance Against Viruses in Prokaryotes. Science 315, 1709–1712 (2007). DOI 10.1126/science.1138140. https://doi.org/10.1126/science.1138140

[31] Werner Arber; Daisy Dussoix. Host Specificity of DNA Produced by Escherichia coli. I. Host Controlled Modification of Bacteriophage Lambda. Journal of Molecular Biology 5, 18–36 (1962). DOI 10.1016/S0022-2836(62)80058-8. https://doi.org/10.1016/S0022-2836(62)80058-8

[32] Joe Bondy-Denomy; April Pawluk; Karen L. Maxwell; Alan R. Davidson. Bacteriophage Genes That Inactivate the CRISPR/Cas Bacterial Immune System. Nature 493, 429–432 (2013). DOI 10.1038/nature11723. https://doi.org/10.1038/nature11723

[33] Matthew K. Waldor; John J. Mekalanos. Lysogenic Conversion by a Filamentous Phage Encoding Cholera Toxin. Science 272, 1910–1914 (1996). DOI 10.1126/science.272.5270.1910. https://doi.org/10.1126/science.272.5270.1910

[34] Barbara McClintock. The Origin and Behavior of Mutable Loci in Maize. Proceedings of the National Academy of Sciences 36, 344–355 (1950). DOI 10.1073/pnas.36.6.344. https://doi.org/10.1073/pnas.36.6.344

[35] A. San Millan; R. Peña-Miller; M. Toll-Riera; Z. V. Halbert; A. R. McLean; B. S. Cooper; R. C. MacLean. Positive Selection and Compensatory Adaptation Interact to Stabilize Non-transmissible

Plasmids. Nature Communications 5, 5208 (2014). DOI 10.1038/ncomms6208. https://doi.org/10.1038/ncomms6208

[36] Pere Puigbò; Yuri I. Wolf; Eugene V. Koonin. The Tree and Net Components of Prokaryote Evolution. Genome Biology and Evolution 2, 745–756 (2010). DOI 10.1093/gbe/evq062. https://doi.org/10.1093/gbe/evq062

[37] Eörs Szathmáry; John Maynard Smith. The Major Evolutionary Transitions. Nature 374, 227–232 (1995). DOI 10.1038/374227a0. https://doi.org/10.1038/374227a0

[38] Patrick Forterre. Three RNA Cells for Ribosomal Lineages and Three DNA Viruses to Replicate Their Genomes: A Hypothesis for the Origin of Cellular Domain. Proceedings of the National Academy of Sciences 103, 3669–3674 (2006). DOI 10.1073/pnas.0510333103. https://doi.org/10.1073/pnas.0510333103