

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 $4567,30 \pm 0,16$ 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 acreció 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 producir las 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 $4567,30 \pm 0,16$ 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 condriticos. 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 acreció 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 $4567,30 \pm 0,16$ 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](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 Čuk; 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>