

La formación del Sol, los planetas, la Tierra y la Luna

CHO-008 · Cosmic History and Its Observers

Una historia científica cronológica desde el universo temprano hasta el presente

Identificador: CHO-008 · Versión: v1.0 · Autor: Juan Seguro

Idioma: Español

Función del artículo: Columna cronológica con superposición autorizada

Ventana del artículo: [S07, 4.000 Ga atrás]; superposición desde el colapso de la nube formadora del Sistema Solar hasta S07

Corte de eventos: 11 septiembre 2026 · Corte de búsqueda bibliográfica: 12 septiembre 2026

Tipo de documento: Síntesis académica; no es investigación primaria y no ha sido revisado por pares

Resumen estructurado

Contexto. El Sistema Solar surgió de materia interestelar químicamente enriquecida dentro de la Vía Láctea. Su formación no fue un único acontecimiento, sino una secuencia desde el colapso de nube y el crecimiento protoestelar hasta un disco, sólidos, planetesimales, embriones planetarios, planetas diferenciados y el sistema Tierra-Luna.

Pregunta. ¿Qué evidencia ordena esa secuencia, qué relojes datan sus componentes y qué partes del relato estándar siguen dependiendo del modelo?

Evidencia y método. La reconstrucción combina observaciones astronómicas de regiones de formación estelar y discos, sistemas isotópicos de meteoritos, texturas minerales, simulaciones dinámicas, composiciones planetarias y geoquímica Tierra-Luna. S07 está controlado por datación Pb-Pb corregida por U de inclusiones ricas en calcio y aluminio, no por una fecha derivada de modelo para el colapso de nube.

Resultado. Una región de nube molecular colapsó hasta formar una protoestrella y un disco en rotación. Polvo y condensados fueron transportados y procesados repetidamente; la concentración de partículas y el colapso gravitatorio ayudaron a superar la barrera de los planetesimales. La acreción y las colisiones construyeron embriones y planetas, mientras que el calentamiento radiactivo y los impactos impulsaron la diferenciación. La Tierra se ensambló durante un intervalo. La Luna surgió con mayor plausibilidad dentro de una familia de escenarios de impacto gigante, pero la geometría del impacto, las proporciones de procedencia, el equilibrio y la evolución del momento angular siguen en debate.

Conclusión. Para hace 4.000 Ga la serie hereda un sistema Tierra-Luna diferenciado cuyas corteza, atmósfera, hidrosfera e historia de impactos siguen activas. CHO-009 pasa a ser responsable de esos sistemas hadeanos terrestres. No hay evidencia de observador biológico; el estado del observador es N0.

Palabras clave: Sistema Solar; disco protoplanetario; CAI; cóndrulo; planetesimal; acreción terrestre; impacto formador de la Luna

1. La frontera es una población datada, no un nacimiento instantáneo

CHO-008 tiene dos dominios temporales conectados. Su superposición autorizada comienza con el inicio del colapso del material de la nube molecular formadora del Sistema Solar y continúa hasta S07. Su intervalo principal de la columna comienza en S07 y termina en la frontera editorial de hace 4.000 Ga.

S07 es una frontera EVENT definida por la distribución de formación de los sólidos más antiguos datados del Sistema Solar en la evidencia controladora. En el Índice Maestro controlador, S07 permanece provisional V3 a la espera de una lectura registrada del texto completo del pasaje exacto de respaldo y de la distribución de muestras. CHO utiliza por tanto 4.56730 ± 0.00016 Ga atrás solo como orientación provisional y no afirma contenidos no verificados de tabla 1 [1].

Connelly et al. comunican una orientación para CAI de 4567.30 ± 0.16 Myr y edades de cóndrulos que se extienden desde 4567.32 ± 0.42 hasta 4564.71 ± 0.30 Myr [1].

Esa precisión pertenece a la edad de laboratorio y a su método. No significa que la nube molecular comenzara a colapsar en el mismo instante, que todas las CAI se formaran simultáneamente ni que el Sol y todos los planetas tengan un cumpleaños idéntico. Tampoco puede convertirse el valor en tiempo desde el Big Bang con precisión de cinco decimales, porque la incertidumbre de la edad cosmológica es mucho mayor.

2. Materia heredada y nube en colapso

CHO-006 transmite una Vía Láctea estructurada, gas interestelar, polvo y múltiples poblaciones estelares. CHO-007 explica los orígenes nucleares de sus elementos. CHO-008 sigue una concentración local de ese material. Sus átomos portaban ascendencias mezcladas: algunos núcleos eran primordiales, otros habían pasado por interiores estelares, vientos, explosiones o reacciones de rayos cósmicos.

Las regiones densas de nubes moleculares pueden volverse gravitatoriamente inestables. Turbulencia, campos magnéticos, radiación, rotación y realimentación complican el colapso; no permiten un simple reloj esférico. La conservación del momento angular ayuda a producir una estructura en rotación alrededor de una protoestrella en crecimiento. El material cae a través de una envoltura y un disco mientras chorros y vientos eliminan masa y momento angular.

Las observaciones modernas de sistemas jóvenes muestran discos con anillos, huecos, espirales, asimetrías y subestructura. La imagen de alta resolución de HL Tau hizo visible esa estructura en un disco muy joven [2]. Es evidencia comparativa sobre procesos disponibles para sistemas formadores de planetas, no una imagen de la nebulosa solar ancestral.

3. Un disco con gradientes, reservorios y transporte

El disco protoplanetario no era un conjunto estático de carriles circulares. El gas acrecía, se extendía, calentaba, enfriaba y dispersaba. Los sólidos condensaban, evaporaban, recocían, colisionaban, fragmentaban y derivaban. Temperatura, presión, estado de oxidación, irradiación y distancia al protosol variaban con el tiempo.

Las CAI registran procesamiento a alta temperatura. Los cóndrulos son gotas ígneas producidas por calentamiento transitorio de sólidos precursores. Sus edades Pb-Pb solapadas muestran que la imagen tradicional en la que terminaba la formación de CAI antes de comenzar la de cóndrulos es demasiado simple [1]. Componentes formados en lugares o momentos diferentes se mezclaron en cuerpos parentales de meteoritos.

Las anomalías isotópicas de meteoritos revelan reservorios que no se homogeneizaron por completo. La distinción entre materiales carbonáceos y no carbonáceos se ha interpretado como separación espacial prolongada, posiblemente asociada al crecimiento temprano de Júpiter [4]. La inferencia une mediciones isotópicas con un modelo de transporte en disco. No fotografía directamente a Júpiter ni proporciona una fecha exacta de finalización del planeta.

4. Del polvo a los planetesimales

Los granos micrométricos pueden adherirse mediante fuerzas superficiales, pero el crecimiento encuentra barreras. Las colisiones pueden hacer rebotar o fragmentar agregados. El arrastre del gas hace que los sólidos pierdan momento angular y deriven radialmente. La turbulencia puede aumentar las velocidades de colisión y concentrar partículas. Una explicación satisfactoria debe mostrar cómo algunos sólidos sobrevivieron el tiempo suficiente para convertirse en planetesimales ligados gravitatoriamente.

La inestabilidad de *streaming* proporciona una vía. El movimiento relativo entre sólidos y gas puede concentrar partículas; las simulaciones muestran que concentraciones suficientemente densas pueden colapsar gravitatoriamente en cuerpos ligados [3]. Es un mecanismo condicional cuya eficiencia depende del tamaño de las partículas, la razón sólido-gas, la turbulencia, la estructura de presión y el tratamiento numérico. No debe presentarse como la única vía en todos los discos.

Una vez existentes los planetesimales, la gravedad aceleró el crecimiento. Las colisiones produjeron acreción, fragmentación, encuentros de choque y fuga y dispersión. Los radionucleidos de vida corta calentaron algunos cuerpos

pequeños lo suficiente para fundirse y diferenciarse. Por ello, pudieron formarse núcleos ricos en hierro y mantos de silicatos antes de completarse los planetas terrestres.

5. Planetas gigantes y arquitectura del sistema

En los modelos de acreción del núcleo, un núcleo sólido crece y puede capturar una envoltura gaseosa masiva antes de que se disperse el gas del disco. La restricción temporal hace importante el crecimiento temprano de planetas gigantes. Alternativamente, la inestabilidad gravitatoria puede operar en regiones de disco suficientemente masivas y frías. Son familias de modelos con requisitos diferentes, y la arquitectura del Sistema Solar no demuestra por sí sola una vía universal única para los planetas gigantes.

Los planetas en crecimiento alteraron el disco. Resonancias, dispersión, migración e interacciones con gas redistribuyeron cuerpos pequeños. Los modelos en los que Júpiter y Saturno se desplazan pueden explicar rasgos seleccionados de poblaciones de asteroides y planetas terrestres, pero sus trayectorias detalladas son reconstruidas y no datadas directamente.

La disposición orbital actual es la superviviente de una historia dinámica. No puede leerse hacia atrás de forma única. Muchas configuraciones iniciales pueden quedar eliminadas y más de una puede seguir siendo compatible con las restricciones actuales.

6. Construcción de los planetas terrestres

Dentro del disco más cálido, sólidos pobres en volátiles se acumularon en planetesimales y embriones. Sus encuentros gravitatorios entraron en un régimen oligárquico y después caótico. Grandes impactos combinaron, erosionaron o despojaron cuerpos. Se intercambió material a través de distancias heliocéntricas en lugar de permanecer dentro de zonas de alimentación perfectamente aisladas.

La Tierra no apareció en una única frontera. Su formación incluye acreción de masa, segregación de metal hacia un núcleo, diferenciación de silicatos, pérdida y reposición atmosférica, aporte de volátiles y adiciones tardías después de gran parte de la formación del núcleo. Los sistemas isotópicos Hf-W y relacionados restringen estos procesos mediante evolución radiactiva padre-hijo y supuestos sobre partición metal-silicato [5]. Distintos relojes datan diferentes acontecimientos de cierre o diferenciación.

El trabajo con isótopos de plomo estableció la escala de tiempo profunda de meteoritos y Tierra [10], pero «la edad de la Tierra» es una convención que resume evidencia de formación. CHO evita transferir la precisión de un componente meteorítico a la duración del ensamblaje de todo el planeta.

7. Volátiles y agua

El agua terrestre y otros volátiles pudieron incorporarse durante la acreción, ser aportados después, intercambiarse con un océano de magma y la atmósfera, perderse al espacio y reciclarse hacia el interior. Los isótopos de hidrógeno, nitrógeno y gases nobles restringen reservorios de procedencia, pero los propios cuerpos fuente eran heterogéneos y procesos posteriores fraccionaron sus señales [9].

El antiguo contraste entre una Tierra completamente seca más agua cometaria tardía y una Tierra local completamente húmeda es insuficiente. Material semejante a asteroides carbonáceos, interacciones nebulares, impactores diferenciados y una contribución cometaria menor pueden ponerse a prueba. Las fracciones relativas dependen de qué sistemas isotópicos e historias dinámicas se combinen. Ninguna molécula de agua superviviente identifica su reservorio de origen sin un modelo.

8. Diferenciación, océanos de magma y atmósfera

La energía de acreción, la segregación del núcleo, el decaimiento radiactivo y los grandes impactos generaron fusión extensa. Los océanos de magma promovieron diferenciación química e intercambio de volátiles. El metal denso descendió; los reservorios de silicatos evolucionaron; se formó una atmósfera temprana a partir de captura nebular, aporte por impactos, desgasificación y material vaporizado, mientras impactos y escape eliminaron partes de ella.

Manto y núcleo no son muestras de material inicial intacto. Los elementos siderófilos se repartieron preferentemente al metal, los litófilos a silicatos y los volátiles sufrieron pérdida y redistribución. La convección posterior del

manto, la producción de corteza y los impactos sobreimprimieron estados anteriores. Por tanto, la inversión química depende de coeficientes de partición, trayectorias presión-temperatura, estado de oxidación y supuestos sobre equilibrio.

9. El acontecimiento formador de la Luna

El pequeño núcleo de hierro de la Luna, el momento angular orbital, el inventario empobrecido en volátiles y la relación isotópica con la Tierra restringen su origen. Las simulaciones de una colisión rasante cerca del final de la acreción principal terrestre produjeron un disco de residuos pobre en hierro capaz de formar una Luna [6]. Esto estableció una potente familia canónica de impactos.

No cerró todos los problemas. En muchas simulaciones canónicas, gran parte del material lunar procede del impactor, mientras que Tierra y Luna muestran notables similitudes isotópicas. Una mezcla vigorosa después del impacto puede reducir las diferencias [8]. Impactos de alto momento angular sobre una Tierra en rápida rotación, seguidos de pérdida resonante de momento angular, proporcionan otra familia [7]. Otros trabajos varían composición del impactor, energía del impacto, vaporización, equilibrio y evolución posterior del disco.

«El impacto gigante» debe significar, por tanto, una clase restringida de historias energéticas Tierra-impactor, no una única condición inicial acordada. La similitud isotópica puede reflejar reservorios de origen comunes, mezcla, equilibrio o combinaciones. La acreción y diferenciación de la Luna también siguieron a la colisión; el impacto no es idéntico a la finalización de la Luna.

10. Jerarquía de evidencia e incertidumbre

Evidencia	Medido directamente	Reconstruido
Sistemas isotópicos de meteoritos	Razones, contexto mineral, incertidumbre analítica	Edad de formación, separación de reservorios, historia térmica
Observaciones de discos	Radiación, morfología, trazadores moleculares y de polvo	Densidad superficial, tamaños de grano, planetas embebidos
Muestras planetarias	Química, mineralogía, razones isotópicas	Regiones fuente, diferenciación, mezcla
Órbitas y masas	Estado dinámico actual	Migración e inestabilidad anteriores
Simulaciones numéricas	Evolución condicional desde entradas especificadas	Historias plausibles, no acontecimientos pasados únicos

Una historia coherente debe satisfacer simultáneamente varias clases de evidencia. La concordancia con una razón isotópica o un rasgo orbital no es suficiente. Las simulaciones numéricas prueban si historias propuestas son físicamente posibles bajo sus supuestos; no observan el pasado.

11. Capacidades del observador

El estado del observador permanece en N0. El disco y los planetas respondieron a gravedad, radiación, colisiones y química, pero la respuesta física no es detección biológica. Meteoritos y rocas lunares se convirtieron en registros sin registrar con un propósito.

Mucho después, los observadores científicos aprendieron a extraer tiempo de sistemas isotópicos y a comparar el Sistema Solar con discos jóvenes. Esa medición retrospectiva no hace que la formación del Sistema Solar dependa del observador.

12. Contingencia y ausencia de teleología

La secuencia fue contingente. Historias de colisiones, trayectorias de migración, vidas de discos o aportes de volátiles ligeramente diferentes podrían haber producido planetas distintos. La supervivencia de la Tierra y su habitabilidad posterior no demuestra que el disco evolucionara hacia observadores.

El artículo sigue a la Tierra porque el libro rastrea el linaje que acabaría siendo capaz de reconstruir el universo. Esta selección narrativa no debe convertirse en un principio físico.

13. Estado final y transición

Para la frontera BOOK de hace 4.000 Ga, Tierra y Luna existen como cuerpos diferenciados, pero sus superficies e interiores siguen dinámicamente activos. Atmósfera, océanos, corteza, regímenes de impacto y pérdida de calor no son resultados congelados del ensamblaje. CHO-009 pasa a ser responsable de esos sistemas hadeanos. CHO-010 es responsable por separado de los mecanismos de origen de la vida, mientras que CHO-011 adjudicará las afirmaciones sobre la evidencia más antigua de vida.

La transición es, por tanto, un planeta, no un hábitat terminado: químicamente diferenciado, portador de agua y volátiles de historias mezcladas, orbitando un Sol joven, acompañado por la Luna y sometido a impactos y evolución interna continuados.

Bouvier y Wadhwa comunicaron 4568.2 Ma para otra inclusión meteorítica utilizando una muestra y un marco analítico Pb-Pb diferentes [11]. El valor alternativo permanece como contraprueba explícita dependiente del método, no como una anomalía descartada.

Referencias

1. Connelly, J. N., et al. "The Absolute Chronology and Thermal Processing of Solids in the Solar Protoplanetary Disk." *Science* 338, 651–655 (2012). <https://doi.org/10.1126/science.1226919>
2. ALMA Partnership, et al. "The 2014 ALMA Long Baseline Campaign: First Results from High Angular Resolution Observations toward the HL Tau Region." *Astrophysical Journal Letters* 808, L3 (2015). <https://doi.org/10.1088/2041-8205/808/1/L3>
3. Johansen, A., et al. "Rapid planetesimal formation in turbulent circumstellar disks." *Nature* 448, 1022–1025 (2007). <https://doi.org/10.1038/nature06086>
4. Kruijer, T. S., Kleine, T., Burkhardt, C., and Budde, G. "Age of Jupiter inferred from the distinct genetics and formation times of meteorites." *PNAS* 114, 6712–6716 (2017). <https://doi.org/10.1073/pnas.1704461114>
5. Kleine, T., et al. "Hf-W chronology of the accretion and early evolution of asteroids and terrestrial planets." *Geochimica et Cosmochimica Acta* 73, 5150–5188 (2009). <https://doi.org/10.1016/j.gca.2008.11.047>
6. Canup, R. M., and Asphaug, E. "Origin of the Moon in a giant impact near the end of the Earth's formation." *Nature* 412, 708–712 (2001). <https://doi.org/10.1038/35089010>
7. Čuk, M., and Stewart, S. T. "Making the Moon from a Fast-Spinning Earth: A Giant Impact Followed by Resonant Despinning." *Science* 338, 1047–1052 (2012). <https://doi.org/10.1126/science.1225542>
8. Young, E. D., et al. "Oxygen isotopic evidence for vigorous mixing during the Moon-forming giant impact." *Science* 351, 493–496 (2016). <https://doi.org/10.1126/science.aad0525>
9. Marty, B. "The origins and concentrations of water, carbon, nitrogen and noble gases on Earth." *Earth and Planetary Science Letters* 313–314, 56–66 (2012). <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2011.10.040>
10. Patterson, C. "Age of meteorites and the Earth." *Geochimica et Cosmochimica Acta* 10, 230–237 (1956). [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(56\)90036-9](https://doi.org/10.1016/0016-7037(56)90036-9)
11. Bouvier, A., and Wadhwa, M. "The age of the Solar System redefined by the oldest Pb-Pb age of a meteoritic inclusion." *Nature Geoscience* 3, 637–641 (2010). <https://doi.org/10.1038/ngeo941>

Declaración

Este documento es una síntesis académica; no es investigación primaria y no ha sido revisado por pares. Juan Seguro es el único autor. Aprobó el texto final y es responsable de su contenido.