

Los orígenes cósmicos de los elementos

CHO-007 · Cosmic History and Its Observers

Una historia científica cronológica desde el universo temprano hasta el presente

Identificador: CHO-007 · Versión: v1.0 · Autor: Juan Seguro

Idioma: Español

Función del artículo: Superposición

Ventana del artículo: Primera nucleosíntesis estelar hasta el corte de la edición

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 Universo temprano caliente proporcionó hidrógeno, helio y trazas de litio. Casi todos los núcleos más pesados presentes en planetas, organismos e instrumentos registran procesamiento nuclear posterior, pero ningún único tipo de estrella o explosión produjo el inventario completo.

Pregunta. ¿A través de qué canales físicos surgieron los elementos y sus isótopos, cómo se transportaron y mezclaron sus productos, y con qué seguridad pueden asignarse las abundancias actuales a lugares astrofísicos concretos?

Evidencia y método. Esta síntesis combina teoría de reacciones nucleares, modelos estelares, cálculos de supernovas y fusiones, observaciones electromagnéticas y de ondas gravitacionales, líneas gamma, meteoritos, espectroscopia solar y patrones de abundancia de estrellas longevas. Distingue producción nuclear de eyección, transporte, incorporación y medición posterior.

Resultado. La combustión estelar hidrostática construye núcleos desde helio hacia especies progresivamente más pesadas, mientras que la combustión explosiva reorganiza y expulsa material en escalas temporales cortas. La captura lenta de neutrones en estrellas evolucionadas, los procesos rápidos ricos en neutrones en fusiones compactas y quizá en explosiones estelares raras, las supernovas termonucleares, las reacciones asociadas a neutrinos y la espalación por rayos cósmicos contribuyen a distintas familias isotópicas. Varios elementos son mezclas de canales. Las contribuciones relativas dependen de masa estelar, composición, evolución binaria, tasas de acontecimientos, tiempos de retardo, mezcla, datos nucleares y modelos observacionales.

Conclusión. La complejidad química se acumuló mediante una red distribuida de lugares nucleares y transporte galáctico. CHO-007 proporciona a los artículos posteriores un mapa de origen calibrado por evidencia, no una leyenda de una fuente por elemento. No hay evidencia de ningún observador vivo o consciente durante la mayor parte de esta historia; el estado del observador permanece en N0 hasta que comienza la secuencia biológica.

Palabras clave: nucleosíntesis; evolución estelar; supernovas; fusiones de estrellas de neutrones; captura de neutrones; rayos cósmicos; evolución química

1. Alcance y orientación cronológica

CHO-007 es una superposición declarada. Comienza cuando los primeros interiores estelares empezaron a procesar gas primordial y sigue los canales de producción de elementos hasta el corte de esta edición. Se solapa con CHO-005 y CHO-006, responsables de los primeros sistemas luminosos, galaxias, la red cósmica y la historia de poblaciones estelares. También se solapa con todos los artículos posteriores porque la materia posterior hereda núcleos anteriores.

El material de partida no está químicamente vacío. CHO-003 es responsable de la nucleosíntesis del Big Bang y transmite hidrógeno, helio y pequeñas cantidades de nucleidos ligeros. CHO-007 pregunta qué ocurrió después de que se formaran las estrellas. No asigna una fecha universal nítida al «primer metal»: la cronología de las primeras

estrellas depende del modelo, la producción ocurre dentro de las estrellas antes de la eyección y el enriquecimiento alcanza distintos reservorios de gas en momentos distintos.

La palabra *metal* tiene dos significados que no deben confundirse. En astrofísica suele designar cualquier elemento más pesado que el helio. En química designa una clase más estrecha. Este artículo utiliza *elementos pesados* cuando es posible y emplea *metalicidad* únicamente en su sentido astronómico.

2. Un mapa de origen requiere isótopos, no solo nombres de elementos

Un elemento se define por su número de protones, pero la nucleosíntesis actúa sobre nucleidos distinguidos por los números de protones y neutrones. Dos isótopos del mismo elemento pueden tener orígenes dominantes diferentes. Un gráfico que asigne un único icono a carbono, hierro o bario comprime por ello una distribución de contribuciones a nivel isotópico en una respuesta singular engañosa.

Deben separarse cuatro pasos:

1. **Producción:** las reacciones nucleares transforman un nucleido en otro.
2. **Eyección o exposición:** los productos salen de un interior estelar o se crean en materia irradiada.
3. **Transporte y mezcla:** vientos, explosiones, flujos salientes, rayos cósmicos y movimientos de gas los redistribuyen.
4. **Incorporación y medición:** estrellas, planetas, meteoritos o espectros posteriores conservan una muestra imperfecta.

Un fallo en cualquiera de estos pasos puede ocultar un lugar de producción. Una estrella puede sintetizar núcleos que caigan en un remanente compacto. Una explosión puede expulsarlos a gas caliente que se mezcle lentamente. Una estrella longeva puede conservar solo un acontecimiento de enriquecimiento muestreado localmente. Un patrón de abundancias observado es, por tanto, evidencia sobre una cadena causal completa, no una fotografía directa de un horno nuclear.

3. Por qué la fusión estelar tiene un límite estructurado

Las estrellas brillan porque las reacciones nucleares pueden transformar núcleos ligados liberando energía. La combustión de hidrógeno convierte protones en helio mediante redes de reacciones cuya importancia relativa depende de temperatura y composición. La combustión de helio produce carbono mediante la vía triple-alfa y convierte parte del carbono en oxígeno. En estrellas suficientemente masivas, etapas posteriores procesan carbono, neón, oxígeno y silicio en regiones anidadas y en intervalos cada vez más cortos [1,3].

La frase habitual «la fusión fabrica elementos hasta el hierro» es útil pero incompleta. La energía de enlace nuclear por nucleón aumenta en términos generales hacia el grupo del hierro, por lo que la fusión de núcleos ligeros puede liberar energía mientras ensambla núcleos más fuertemente ligados. Sin embargo, los rendimientos reales dependen de tasas de reacción, temperatura, densidad, interacciones débiles, convección, rotación, pérdida de masa e intercambio binario. «Hierro» no es una única pared, y las condiciones explosivas pueden producir o reorganizar núcleos a ambos lados de la frontera simplificada.

Cuando un núcleo del grupo del hierro ya no puede sostener una estrella masiva mediante más combustión central exotérmica, puede seguir el colapso. El acontecimiento resultante acopla física de neutrinos, hidrodinámica, equilibrio estadístico nuclear, procesamiento por choque, *fallback* y decaimiento radiactivo. Los modelos predicen familias de rendimientos, no una única composición estándar de supernova [3].

4. El primer enriquecimiento estelar

Las primeras estrellas se formaron a partir de material prácticamente sin elementos pesados preexistentes. Su estructura interna, pérdida de masa, rotación, multiplicidad y destinos finales no tienen por qué coincidir con las poblaciones posteriores enriquecidas en metales. Los cálculos muestran que progenitores distintos de metalicidad cero pueden producir patrones de abundancia muy diferentes; núcleos de helio suficientemente masivos pueden entrar en inestabilidad de pares y desintegrar la estrella en lugar de dejar un remanente compacto ordinario [2].

Las generaciones siguientes pueden conservar registros parciales de esos acontecimientos. Los espectros de alta resolución de estrellas pobres en metales miden líneas de absorción y después infieren abundancias mediante atmós-

feras modelo, datos atómicos y supuestos sobre equilibrio termodinámico. Una firma propuesta de inestabilidad de pares en J1010+2358 se basó en un marcado patrón par-impar, sodio y cobalto muy bajos respecto al hierro y comparación con rendimientos de modelos [12]. Análisis independientes posteriores mostraron que mezclas de supernovas de colapso del núcleo también pueden ajustar las abundancias y cuestionaron la interpretación de inestabilidad de pares [14,15,16]. El objeto es, por tanto, contraprueba frente a cualquier afirmación de inversión única tanto como firma candidata. CHO-007 no lo trata como prueba de un intervalo de masas de las primeras estrellas.

El enriquecimiento temprano fue espacialmente desigual. Una nube de gas podía estar influida por un pequeño número de explosiones mientras otra permanecía mucho menos procesada. La abundancia de una estrella muy antigua muestrea, por consiguiente, ascendencia y mezcla locales, no una composición cósmica universal en una fecha concreta.

5. Estrellas evolucionadas y captura lenta de neutrones

Las estrellas de masa baja e intermedia pueden convertirse en estrellas de la rama gigante asintótica. Los pulsos térmicos, episodios de mezcla y reacciones productoras de neutrones permiten que los núcleos capturen neutrones a tasas generalmente lentas respecto al decaimiento beta. Este *proceso s* sigue trayectorias próximas a núcleos estables y contribuye de forma sustancial a muchos nucleidos más pesados que el hierro. Los vientos estelares devuelven después material procesado al espacio circundante.

Los rendimientos AGB dependen de masa y metalicidad iniciales, del tratamiento de mezcla, pérdida de masa, convección y tasas nucleares [4]. Los rendimientos de carbono y nitrógeno también reflejan procesamiento repetido y *dredge-up*. La transferencia de masa binaria puede depositar material rico en *proceso s* sobre una compañera, por lo que una estrella superviviente químicamente inusual no tuvo por qué fabricar todo el material hoy visible en su superficie.

Las estrellas masivas también albergan una componente *s* más débil. «El *proceso s* ocurre en estrellas AGB» no es, por tanto, exclusivo. La afirmación útil es específica de isótopo y régimen: distintas exposiciones a neutrones, abundancias semilla y estructuras estelares pueblan distintas partes de la distribución de abundancias.

6. Producción explosiva y grupo del hierro

Las explosiones de colapso del núcleo procesan y expulsan material de estrellas masivas. Son fuentes importantes de oxígeno y varios núcleos asociados a elementos alfa, y contribuyen a algunas especies del grupo del hierro y otras. Sus rendimientos están condicionados por la estrella previa al colapso y por energía de explosión, geometría, *fallback* e interacciones de neutrinos. Algunas estrellas masivas pueden colapsar con poca eyección, mientras otras producen acontecimientos inusualmente energéticos.

Las supernovas termonucleares destruyen en sistemas binarios enanas blancas ricas en carbono-oxígeno o configuraciones degeneradas relacionadas. La combustión a alta densidad produce grandes cantidades de núcleos del grupo del hierro, muchos inicialmente radiactivos. La cadena de decaimiento de níquel-56 a cobalto-56 y después a hierro-56 alimenta gran parte de la luz óptica de acontecimientos típicos. Los cálculos multidimensionales muestran que mezcla, propagación de llama y geometría de explosión afectan a los rendimientos detallados [5].

La etiqueta *Type Ia* es observacional, mientras que los canales de progenitor y explosión son físicos. La población puede incluir más de una vía. Los modelos de evolución química utilizan tasas de acontecimientos, distribuciones de tiempos de retardo y rendimientos para explicar por qué el enriquecimiento del grupo del hierro no sigue al enriquecimiento en elementos alfa en una razón fija única. Es una inferencia poblacional, no una afirmación de que cada átomo de hierro proceda de una supernova de tipo Ia.

7. Captura de neutrones más allá de la región del hierro

La captura de neutrones puede construir núcleos pesados sin las barreras de partículas cargadas que inhiben cada vez más la fusión. En el régimen lento, el decaimiento beta suele ocurrir entre capturas. En el régimen rápido, las capturas avanzan lejos de la estabilidad antes de que los núcleos inestables decaigan de vuelta hacia especies estables. Los regímenes de densidad intermedia de neutrones también pueden contribuir a determinados patrones.

El origen astrofísico del inventario del *proceso r* no puede reducirse a una única fuente establecida. GW170817 estableció una espiral binaria de estrellas de neutrones mediante ondas gravitacionales [6]. Su contrapartida electro-

magnética fue compatible con ejecta en expansión calentada radiativamente cuya opacidad y evolución cromática requerían núcleos pesados en modelos de transferencia radiativa [7]. Un análisis espectral posterior identificó estroncio en la ejecta de la fusión [8]. En conjunto, estas observaciones muestran que al menos algunas fusiones de estrellas de neutrones sintetizan material del proceso r.

Por sí solas no establecen que las fusiones suministren todos los nucleidos del proceso r en todos los entornos. Tasas de acontecimientos, masas eyectadas, tiempos de retardo binario, retención en galaxias pequeñas y los registros de abundancia más tempranos de estrellas pobres en metales deben concordar simultáneamente. Las observaciones posteriores a GW170817 han reforzado, no completado, esta clase de acontecimientos: espectroscopia JWST de una fusión de objetos compactos encontró telurio y emisión compatible con más especies pesadas [17], mientras que un estallido gamma de larga duración mostró una kilonova rica en lantánidos que complica cualquier correspondencia uno-a-uno con una clase de transitorio [18]. Colapsares, explosiones magnetorrotacionales y otros canales raros continúan investigándose. Un cálculo de 2019 propuso los colapsares como contribuyentes principales [9]; CHO registra esto como una afirmación de presupuesto dependiente de modelo, no como cierre de la cuestión del lugar de producción.

8. Canales especializados: neutrinos, flujos ricos en protones y núcleos ligeros

Los neutrinos emitidos durante el colapso del núcleo pueden interactuar con núcleos de capas estelares suprayacentes y modificar la producción de determinados isótopos raros. El proceso v se desarrolló cuantitativamente como contribución distinta a nucleidos como boro-11 y flúor-19 [11]. Los flujos ricos en protones pueden sostener secuencias de captura de protones y decaimiento beta. Los isótopos estables deficientes en neutrones más allá del hierro, los núcleos p, requieren tratamiento adicional: las secuencias de fotodesintegración del proceso γ son un candidato principal, pero los modelos estelares actuales mantienen discrepancias de abundancia y de lugar de producción [19,20]. Estos canales importan precisamente porque un mapa grueso de la tabla periódica puede borrar orígenes específicos de isótopos.

Las novae clásicas añaden otra vía especializada. Las fugas termonucleares en enanas blancas en acreción pueden eyectar patrones isotópicos que dependen de si la enana blanca subyacente es de carbono-oxígeno o de oxígeno-neón [21]. Las novae no son un origen universal de los elementos, pero omitirlas dejaría incompleto el inventario de producción.

Litio, berilio y boro requieren especial cautela. Parte del litio es primordial y otra parte puede producirse en entornos estelares o explosivos, pero estos núcleos frágiles también se destruyen con facilidad dentro de las estrellas. Los rayos cósmicos galácticos que colisionan con núcleos de carbono, nitrógeno y oxígeno pueden fragmentarlos en especies más ligeras. Los cálculos clásicos de espalación vincularon este proceso a las abundancias LiBeB [10]. El balance entre protones y partículas alfa acelerados que golpean núcleos pesados ambientales, o núcleos pesados acelerados que golpean hidrógeno y helio, afecta a cómo escala la producción con la metalicidad.

El decaimiento radiactivo es otro puente indispensable. Los núcleos estables observados pueden ser hijos de núcleos inestables sintetizados antes. Las líneas gamma de radionucleidos vivos pueden revelar producción galáctica en curso, mientras que los meteoritos conservan excesos de productos hijos procedentes de radionucleidos extintos. El reloj comienza en la producción isotópica y el cierre de un sistema físico, no en el nacimiento del nombre de un elemento.

9. De rendimientos a evolución química

Un rendimiento estelar es la cantidad de un nucleido devuelta por una estrella modelo o un acontecimiento, habitualmente separada del material que simplemente entró en ella al nacer. Un modelo de evolución química combina rendimientos con una función inicial de masas, historia de formación estelar, tasas de acontecimientos, tiempos de retardo, flujos de gas y mezcla. Combinaciones diferentes pueden reproducir tendencias de abundancia similares, generando degeneración.

Las razones de abundancia rompen parcialmente esa degeneración porque los canales operan en escalas temporales diferentes. Las estrellas masivas devuelven material rápidamente. Las estrellas AGB y los binarios compactos introducen distribuciones de retardos. Las supernovas termonucleares añaden producción del grupo del hierro después de evolución binaria. Sin embargo, «pronto» y «retardado» son distribuciones, no relojes exactos, y la inhomogeneidad local puede dominar los sistemas tempranos.

La metalicidad tampoco es una coordenada temporal universal. Una estrella joven en una galaxia enana que se enriquece lentamente puede ser más pobre en metales que una estrella más antigua formada en una región enriquecida rápidamente. Razones como $[X/Fe]$ comparan razones logarítmicas de abundancia numérica con una referencia solar identificada. Su interpretación depende de la composición solar adoptada, la modelización espectral, la estructura atmosférica tridimensional y las desviaciones del equilibrio termodinámico local [13].

10. Cómo se pone a prueba la evidencia

Ninguna observación individual cierra el mapa de origen.

Ruta de evidencia	Qué restringe	Limitación principal
Física nuclear de laboratorio	Tasas de reacción, masas, vidas medias, ramas de decaimiento	Muchos núcleos inestables siguen siendo difíciles de medir
Espectros estelares	Composición superficial y tendencias poblacionales	Modelos de atmósfera, datos de líneas, agotamiento, transferencia binaria
Luz/espectros de supernovas y kilonovas	Composición, calentamiento y velocidad de la eyección	Degeneraciones de transferencia radiativa y opacidad
Ondas gravitacionales	Masas y dinámica de sistemas compactos	Por sí solas no miden la composición detallada
Líneas gamma	Núcleos radiactivos vivos	Sensibilidad, distancia, transporte
Meteoritos	Anomalías isotópicas y radionucleidos extintos	Procesamiento del Sistema Solar y mezcla de fuentes
Simulaciones	Rendimientos condicionales y transporte	Supuestos de explosión, mezcla, resolución y red nuclear

Una atribución fuerte une varias rutas. Por ejemplo, GW170817 identifica la fusión compacta, las observaciones electromagnéticas restringen la eyección, la espectroscopia atómica identifica estroncio y los modelos nucleares/de transferencia radiativa conectan el transitorio con el calentamiento del proceso r [6–8]. Incluso esta cadena especialmente rica respalda con mayor seguridad una clase de acontecimientos productores que su presupuesto cósmico total.

11. Estado del observador

Durante la mayor parte del intervalo cubierto aquí, el estado del observador es N0. Reacciones nucleares, eyección, granos, atmósferas estelares y meteoritos conservan registros físicos sin detectarlos ni interpretarlos. La existencia de información en un espectro no implica que la fuente fuera un observador.

Los observadores vivos y científicos aparecen en artículos CHO posteriores. Reconstruyen la nucleosíntesis mediante detectores, laboratorios, modelos estadísticos y teorías. Sus mediciones son intervenciones con efectos de selección e historias de calibración. La consciencia no es necesaria para que los núcleos se formen, decaigan o mezclen.

12. Incertidumbre, alternativas y ausencia de teleología

La nucleosíntesis no apuntaba hacia la química del carbono, los planetas o los observadores. Carbono y oxígeno se volvieron abundantes mediante vías físicas bajo condiciones estelares concretas; la vida posterior aprovechó la química disponible. Una narración que sigue la ascendencia material de la Tierra es una selección retrospectiva, no evidencia de que el universo estuviera dirigido hacia ella.

Entre las incertidumbres importantes están las tasas de reacción, fronteras convectivas, interacción binaria, pérdida de masa, mecanismo de colapso del núcleo, *fallback*, mezcla de progenitores de tipo Ia, fracciones de lugares del proceso r, historias de tasas de acontecimientos y mezcla interestelar. Un gráfico de origen de la tabla periódica debe, por tanto, codificar mezclas e incertidumbre. Nunca debe implicar que cada elemento tenga un único lugar de nacimiento ni que el origen de cada isótopo sea igual de seguro.

Clase de afirmación	Uso en CHO-007
E1 medido	Líneas espectrales, razones isotópicas, luz transitoria, ondas gravitacionales, rayos gamma
E2 reconstruido	Abundancias estelares, composición de ejecta, tasas de acontecimientos, historias químicas
E3 dependiente de modelo	Rendimientos estelares y explosivos, ejecta de fusiones, transporte, presupuestos integrados
E4 controvertido	Lugares relativos del proceso r, algunas firmas de primeras estrellas, fracciones de canales Ia
E5 especulativo	Asignaciones exclusivas no verificadas o interpretaciones teleológicas

13. Estado final y transición

CHO-007 proporciona al resto de la serie materia con historia. Antes de que se formara el Sistema Solar, múltiples poblaciones estelares y acontecimientos explosivos habían procesado y redistribuido núcleos. CHO-008 examinará cómo una porción de ese material interestelar enriquecido entró en una nube en colapso, un disco, planetesimales, planetas, la Tierra y la Luna. Puede heredar poblaciones isotópicas y relojes de radionucleidos, pero no vuelve a apropiarse de sus canales generales de producción cósmica.

La imagen final correcta es distribuida. Su inventario estándar de rutas incluye combustión de partículas cargadas; combustión hidrostática y explosiva; captura lenta, intermedia y rápida de neutrones; proceso γ ; proceso v ; flujos ricos en protones; espalación de rayos cósmicos; novas clásicas; decaimiento radiactivo; y transporte galáctico. La nucleosíntesis primordial sigue siendo responsabilidad de CHO-003. El mapa es causal y probabilístico, no un catálogo de orígenes singulares.

Referencias

- Burbidge, E. M., Burbidge, G. R., Fowler, W. A., and Hoyle, F. “Synthesis of the Elements in Stars.” *Reviews of Modern Physics* 29, 547–650 (1957). <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.29.547>
- Heger, A., and Woosley, S. E. “The Nucleosynthetic Signature of Population III.” *Astrophysical Journal* 567, 532–543 (2002). <https://doi.org/10.1086/338487>
- Woosley, S. E., Heger, A., and Weaver, T. A. “The evolution and explosion of massive stars.” *Reviews of Modern Physics* 74, 1015–1071 (2002). <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.74.1015>
- Karakas, A. I. “Updated stellar yields from asymptotic giant branch models.” *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 403, 1413–1425 (2010). <https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2009.16198.x>
- Travaglio, C., Hillebrandt, W., Reinecke, M., and Thielemann, F.-K. “Nucleosynthesis in multi-dimensional SN Ia explosions.” *Astronomy & Astrophysics* 425, 1029–1040 (2004). <https://doi.org/10.1051/0004-6361:20041108>
- Abbott, B. P., et al. “GW170817: Observation of Gravitational Waves from a Binary Neutron Star Inspiral.” *Physical Review Letters* 119, 161101 (2017). <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.119.161101>
- Kasen, D., Metzger, B., Barnes, J., Quataert, E., and Ramirez-Ruiz, E. “Origin of the heavy elements in binary neutron-star mergers from a gravitational-wave event.” *Nature* 551, 80–84 (2017). <https://doi.org/10.1038/nature24453>
- Watson, D., et al. “Identification of strontium in the merger of two neutron stars.” *Nature* 574, 497–500 (2019). <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1676-3>
- Siegel, D. M., Barnes, J., and Metzger, B. D. “Collapsars as a major source of r-process elements.” *Nature* 569, 241–244 (2019). <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1136-0>
- Meneguzzi, M., Audouze, J., and Reeves, H. “The production of the elements Li, Be, B by galactic cosmic rays in space and its relation with stellar observations.” *Astronomy & Astrophysics* 15, 337–359 (1971). ADS 1971A&A....15..337M.
- Woosley, S. E., Hartmann, D. H., Hoffman, R. D., and Haxton, W. C. “The v-process.” *Astrophysical Journal* 356, 272–301 (1990). <https://doi.org/10.1086/168839>
- Xing, Q.-F., et al. “A metal-poor star with abundances from a pair-instability supernova.” *Nature* 618, 712–715 (2023). <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06028-1>
- Asplund, M., Amarsi, A. M., and Grevesse, N. “The chemical make-up of the Sun: A 2020 vision.” *Astronomy & Astrophysics* 653, A141 (2021). <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202140445>
- Skúladóttir, Á., et al. “On the Pair-instability Supernova Origin of J1010+2358.” *Astrophysical Journal Letters* 968, L23 (2024). <https://doi.org/10.3847/2041-8213/ad4b1a>
- Jeena, S. K., Banerjee, P., and Heger, A. “On the core-collapse supernova explanation for LAMOST J1010+2358.” *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 527(3), 4790–4796 (2024). <https://doi.org/10.1093/mnras/stad3498>

16. Thibodeaux, P. N., Ji, A. P., Cerny, W., Kirby, E. N., and Simon, J. D. "LAMOST J1010+2358 is not a Pair-Instability Supernova Relic." *The Open Journal of Astrophysics* 7 (2024). <https://doi.org/10.33232/001c.122335>
 17. Levan, A. J., et al. "Heavy-element production in a compact object merger observed by JWST." *Nature* 626, 737–741 (2024). <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06759-1>
 18. Yang, Y.-H., et al. "A lanthanide-rich kilonova in the aftermath of a long gamma-ray burst." *Nature* 626, 742–745 (2024). <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06979-5>
 19. Pignatari, M., Göbel, K., Reifarth, R., and Travaglio, C. "The production of proton-rich isotopes beyond iron: The γ process in stars." *International Journal of Modern Physics E* 25(4), 1630003 (2016). <https://doi.org/10.1142/S0218301316300034>
 20. Roberti, L., et al. "The γ -process nucleosynthesis in core-collapse supernovae. I. A novel analysis of γ -process yields in massive stars." *Astronomy & Astrophysics* 677, A22 (2023). <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202346556>
 21. José, J., and Hernanz, M. "Nucleosynthesis in Classical Novae: CO versus ONe White Dwarfs." *Astrophysical Journal* 494, 680–690 (1998). <https://doi.org/10.1086/305244>
-

Declaración

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