

EVENTOS ASTRONÓMICOS Y EXTINCIONES MASIVAS

Pedro J. López Guaimacuto¹, Luis Velásquez²

¹Centro Regional de Investigaciones Ambientales, UDO, Núcleo Nueva Esparta

²Departamento de Física, Escuela de Ciencias, UDO, Núcleo Nueva Esparta

Resumen

Los paleontólogos definen a las extinciones masivas como la pérdida de un 75% de plantas y animales de un área en un tiempo geológicamente corto. La mayoría de los autores aceptan la ocurrencia de 5 de tales extinciones: Ordovícico Tardío (440 Ma), Devónico Tardío (370 Ma), Finales del Pérmico (250 Ma), Finales del Triásico (220-200 Ma) y Cretáceo-Paleogeno (65 Ma). Los procesos más asociados como iniciadores de las extinciones son las inundaciones volcánicas de basalto y el cambio climático. Muchos otros mecanismos potenciales comprenden la anoxia, liberación de sulfuro de hidrógeno, y el envenenamiento por metales pesados. Frecuentemente los mecanismos astrofísicos han sido propuestos y estudiados como mecanismos iniciadores de extinciones. Ejemplos de orígenes astrofísicos incluyen variaciones en la constante solar, explosiones de supernova, e impactos de asteroides o cometas por perturbaciones en la nube de Oort. Hemos expuesto y discutido el involucramiento de mecanismos astrofísicos en las extinciones masivas y hemos concluido que: 1) Los eventos de extinción ejercen una influencia poderosa en la evolución, 2) el descubrimiento de ^{60}Fe en sedimentos marinos profundos es una señal de la interacción con supernovas, 3) Los mecanismos de muerte por el impacto de bólidos, incluyen el enfriamiento, calentamiento, acidificación y destrucción de la capa de ozono, 4) La vida en la Tierra está sometida a fuertes influencias del Cosmos, y 5) Los eventos de radiación ionizante son reconocidos como amenazas potenciales a la vida en la Tierra, primariamente a través del agotamiento del ozono estratosférico y el subsecuente incremento en la radiación UV-B sobre la superficie del planeta y en las capas superiores de los océanos.

Abstract

Paleontologists define global extinctions on Earth as a loss of about three-quarters of plant and animal species over a relatively short period of time. Most authors accept the occurrence of five such mass extinction events: The Late-Ordovician (440 Ma), Late-Devonian (370–350 Ma), End-Permian (250 Ma), End-Triassic (220–200 Ma) and Cretaceous-Paleogene (65 Ma). The processes most commonly hypothesized as triggers of extinction are flood basalt volcanism and climate change. Many other potential triggers include hydrogen sulfide build-up in the ocean and release to the atmosphere, and poisoning from heavy metals. Astrophysical mechanisms have frequently been cited as possible candidates. Examples of astrophysical origins of mass extinctions include variations in the solar constant, supernova explosions, and meteorite or comet impacts that could be due to perturbations of the Oort cloud. We expose and discuss the involvement of astrophysical mechanisms in mass extinctions and conclude that: 1) Extinction events exert a powerful influence on evolution, 2) The discovery of live ^{60}Fe in the deep ocean provide signal of interaction with supernovae, 3) The proximal kill mechanisms of bolide impact, include cooling, warming, acidification and ozone destruction, 4) The life on Earth is subjected to strong influences from the Cosmos, and 5) Astrophysical ionizing radiation events such as supernovae, gamma-ray bursts, and solar proton events are now recognized as a potential threat to life on Earth, primarily through depletion of stratospheric ozone and subsequent increase in solar UV radiation at Earth's surface and in the upper levels of the ocean.

Introducción

La Tierra nació como un planeta seco sin atmósfera ni océanos hace unos 4560 millones de años, con la subsecuente acreción de los bioelementos carbono, hidrógeno, oxígeno, nitrógeno, azufre, fósforo, y hierro (Maruyama y Ebisuzaki, 2017). Lepot (2020), señaló que en rocas de la era Archea (4 a 2,5 Ga) se encontraron los rastros conclusivos más antiguos de vida, con alfombras microbianas bentónicas de 3,47 Ga, bajo la forma de láminas orgánicas en carbonatos estromatolíticos.

La escala del tiempo geológico divide la historia de la Tierra basándose en formas de vida que han existido durante tiempos específicos desde la formación del planeta. Se les conoce como unidades geocronológicas. La mayoría de las formas de vida arriba mencionadas son encontradas como fósiles que son los restos o trazas de un organismo del pasado geológico que ha sido preservado en sedimentos o rocas. Las divisiones de la escala de tiempo geológico son las siguientes: Eón, la subdivisión más larga basada en la abundancia de ciertos fósiles; Eras, marcadas por cambios principales en el registro fósil; Períodos, que se basan en los tipos de vida existentes al momento; y finalmente las Épocas, señaladas por diferencias en las formas de vida y que pueden variar de un continente a otro (South Carolina Geological Survey, 2005).

El origen y la extinción de las especies han ocurrido a través de toda la historia de la vida en el planeta, con un incremento continuo de la diversidad, indicando la predominancia del origen, y las únicas inversiones a esta tendencia han sido las extinciones masivas. Estas son definidas como la extinción de una proporción significativa de la biota del planeta en un área geográfica amplia dentro de un tiempo geológico insignificante. Se reconocen 5 grandes eventos de extinción durante los últimos 560 millones de años (Ma): la de finales del Ordovícico (440 Ma), la del Devónico Tardío (370-350 Ma), finales del Pérmico (250 Ma), finales del Triásico (220-200 Ma) y la de finales del Cretáceo (65 Ma). Es importante distinguir entre los mecanismos de muerte y los de disparo o desencadenamiento. Un mecanismo de muerte es el proceso fisiológico disruptivo que causa la muerte, mientras que un mecanismo de disparo es la perturbación crítica que conduce a que uno o más de los mecanismos de muerte se ponga en juego (Wooldridge, 2008).

Elewa y Joseph (2009), señalaron que las causas de las extinciones masivas incluyen la deriva continental, anoxia, glaciaciones, calentamiento global, erupciones volcánicas, impacto de meteoritos y cometas, oscilaciones extremas del clima, variaciones en el nivel de los océanos, supernovas, rayos cósmicos y estallidos de rayos gamma.

En este trabajo nos estaremos refiriendo a la posible relación de las extinciones masivas con eventos astronómicos tales como supernovas, rayos cósmicos, estallidos de rayos gamma e impactos de meteoritos y cometas.

Extinciones por eventos de radiaciones ionizantes

Svensmark (2012), resalto que la vida en la Tierra siempre ha estado sometida a fuertes influencias del cosmos, señalando el descubrimiento de los ciclos de Melankovitch (cambios periódicos en la órbita y excentricidad del planeta), la insostenibilidad de la vida durante el bombardeo pesado en el Eón Hadeico y la extinción de los dinosaurios no aviares por el asteroide de Chicxulub como casos palpables.

Los eventos de radiación ionizante de origen astrofísico han afectado periódicamente al planeta Tierra, las fuentes de tales radiaciones pueden ser llamaradas solares, eventos solares de protón, supernovas y estallidos de rayos gamma. Eventos extremos como estos pueden eliminar muchas formas de vida, pero se estima improbable que causen una esterilización total global (Melott y Thomas, 2019).

Savaglio (2015), indico que las explosiones de rayos gamma son emisiones fuertes y rápidas de rayos gamma debido al colapso de estrellas masivas o la fusión de remanentes estelares binarios, y que son las explosiones más energéticas en el Universo después del Big Bang. Piron, (2016), señalo que aparecen al azar caracterizándose por una fase corta de emisión intensa y errática de rayos gamma y rayos X, de pocos milisegundos a centenares de segundos; luego sigue una fase post-brillo donde el flujo decrece rápidamente emitiéndose rayos X, ondas de radio y radiación visible.

Gehrels *et al* (2003), mediante cálculos y simulaciones establecieron que, para la destrucción de la capa de ozono, una supernova debía estar a unos 8 parsecs del Sol y que la tasa promedio de colapso de supernovas en la galaxia era de 1500 millones de años; concluyeron que las

extinciones por supernovas podían ser menos importante de lo que al momento se había calculado. Shaviv y Beizer (2003), determinaron que al menos un 66% de la varianza en oscilaciones de la paleotemperatura podía ser atribuida a variaciones en el flujo de rayos cósmicos galácticos, debido probablemente al paso del Sistema Solar a través de los brazos espirales de la galaxia, con ello se mostró que los fenómenos astronómicos pueden ser importantes para entender las variaciones climáticas, la biosfera, y por ende la vida.

Melott *et al* (2005), al usar simulaciones encontraron que la opacidad ocasionada por el NO₂ en la atmósfera podría iniciar una glaciación que comenzaría en los polos, acelerada por un efecto de retroalimentación positiva del albedo. Mediante simulaciones se mostró que una explosión de rayos gamma (ERG) a unos 2 kpc de la Tierra podría causar un daño a la biosfera a través del agotamiento de la capa de ozono, enfriamiento global por acción de NO₂ y el incremento en la radiación UV-B, y que el máximo daño ocurriría a latitudes medias y bajas (Thomas *et al*, 2005).

Martin *et al* (2009), indicaron que debido a la no existencia de una relación lineal y a una alta variabilidad en la respuesta de los sistemas biológicos a las radiaciones, es difícil predecir el daño y la recuperación de la biosfera bajo el impacto de una "típica" explosión de rayos gamma, se necesitarían más datos sobre los efectos de la radiación ultravioleta sobre los organismos fotosintéticos. Beech (2011), estableció que una supernova debe estar a menos de 10 pc para que tenga efectos nocivos sobre la atmósfera/biosfera, mientras que para un estallido de rayos gamma la distancia estaría por los 10 Kpc; a pesar de los altos niveles de energía involucrados, el registro geológico no provee evidencia clara de alguna extinción masiva inducida por supernova. Actualmente se conocen unos 12 sistemas potenciales de pre-supernova dentro de 1 Kpc del Sol, IK Pegasi es la más cercana del tipo I y Betelgeuse la más cercana del tipo II.

Una re-evaluación de los efectos de una supernova sobre el planeta (Thomas y Yelland, 2023), señalo la ocurrencia de una ionización atmosférica más baja, un menor agotamiento de la capa de ozono y un daño menor por radiación de muon al nivel del mar; concluyendo en que una supernova debe estar a menos de 20 pc del Sol. Con una distancia mayor, estos

fenómenos se harían más comunes y podrían estar más implicados en extinciones y con periodos de cambio climático.

Kataoka *et al* (2014), manifestaron que los encuentros con nebulosas, tales como remanentes de supernovas y nubes oscuras en la galaxia, pueden conducir a catástrofes ambientales en la Tierra a través de alteraciones en el clima y destrucción de la capa de ozono por el aumento en los flujos de rayos cósmicos y partículas de polvo cósmico; la reducción en la productividad primaria se traduciría en extinciones masivas por agotamiento del oxígeno y los suministros de alimentos, así como también por anoxia oceánica.

Un cierto número de eventos naturales pueden causar el agotamiento de la capa de ozono, entre ellos se incluyen los impactos de cometas y asteroides, el vulcanismo a gran escala cuando involucra la inyección estratosférica de cloro, y eventos cósmicos cercanos como una supernova. Tras estos sucesos, la radiación UV-B puede incrementarse. En el caso de impactos y vulcanismo, los taxones afectados por el aumento de la UV-B probablemente sean similares a los afectados por enfriamiento y a la caída inicial de la irradiación debido al polvo atmosférico. La radiación UV-B puede incrementar sinérgicamente los efectos adversos de otras perturbaciones ambientales (Cockell, 2016).

Una nube oscura consiste de gas neutro de alta densidad (100-10000 protones/cm³) y de baja temperatura (8-40 K), las anomalías en el contenido de iridio en sedimentos marinos profundos indicaron el encuentro del planeta con una nube oscura, lo que llevo a un enfriamiento global a finales del Cretáceo y a una extinción masiva en el límite Cretáceo-Paleogeno (Nimura *et al*, 2016).

Ludwing *et al* (2016), determinaron la presencia del isótopo ⁶⁰Fe en sedimentos marinos de hace 2,6 a 2,8 Ma, cerca del límite del Pleistoceno, en cristales de magnetita (en fósiles de bacterias magnetotáticas), lo que es una evidencia directa de la interacción del planeta con una supernova. Las simulaciones de eventos de radiación ionizante de origen astrofísico resultaron en la producción de óxidos de nitrógeno y al agotamiento del ozono estratosférico, lo que se tradujo en una mayor incidencia de la radiación UV-B (280-315 nm) y a longitudes de onda más largas (> 600 nm) de la radiación disponible para fotosíntesis (400-700 nm), lo

que en poblaciones de las cianobacterias marinas *Synechococcus* y *Prochlorococcus* produjo una disminución de la productividad del 2 al 7% (Neale y Thomas, 2016).

Una periodicidad de 188 Ma asociada al paso del Sistema Solar por los brazos espirales de la galaxia estuvo asociada con el registro estratigráfico según el trabajo de Gillman y Erenler (2019). Melott y Thomas (2019), propusieron que hace unos 2,6 millones de años una explosión de supernova ionizó la atmósfera conduciendo a una alta actividad de los rayos, con mayor deposición de nitratos y la ocurrencia de incendios de vegetación; en estratos sedimentarios de la época se han encontrado depósitos de hollín y carbón. Fields *et al* (2023), propusieron que, durante el Devónico, una explosión de supernova, un poco más allá del límite de los 20 pc, ocasionó una caída en el nivel de ozono y un aumento global de la temperatura, además señalaron que la detección en estratos del Devónico de los isótopos ^{146}Sm o ^{248}Pu podrían confirmar este origen.

Cristoudias *et al* (2024), aplicaron sistemas de simulación para estudiar el efecto de una supernova sobre la biosfera y determinaron que el efecto de una explosión corta de rayos gamma, sería pequeño porque se atenúa significativamente antes de alcanzar la estratosfera baja, la radiación intensa afectaría al ozono estratosférico, pero debido a los efectos compensadores en los ciclos químicos catalíticos, el agotamiento del ozono sería moderado y de una magnitud comparable al de las actuales emisiones antropogénicas.

Simulando los efectos de rayos cósmicos acelerados por ondas de choque a causa de una supernova cercana, la que según el modelo debía estar situada a unos 18 parsecs del Sol y con una energía cercana a los 10^{51} ergios, se mostró que la ionización podía penetrar hasta los 70 a 100 m de profundidad, y que la desintegración del ^{14}C cosmogénico sería capaz de irradiar toda la biosfera (Shchepkin *et al*, 2024).

Impactos de cometas y asteroides

Un impacto planetario es una colisión entre un planeta y otro objeto celestial que produce efectos físicos y químicos mensurables, pueden ocurrir durante la formación (acreción) o después de haberse formado el planeta, son fenómenos comunes y sus tasas, magnitudes y consecuencias cambian con el tiempo (Black y Bermingham, 2025).

Koeberl *et al* (1996), evidenciaron mediante perfiles sísmicos, análisis de núcleos de sedimentos y datos de gravedad, que el cráter (90 km) de la Bahía de Chesapeake se debió al impacto de un meteorito hace unos 2,6 Ma; las rocas mostraron evidencias de metamorfismo por impacto. El análisis geoquímico de rocas indico un aumento en el flujo de helio 3 en el Eoceno tardío, coincidiendo con los impactos de los cráteres Popigai y la Bahía de Chesapeake, hace unos 36 millones de años; se asoció con una lluvia de cometas por una perturbación en la Nube de Oort (Forley *et al*, 1998).

Un isótopo de osmio en sedimentos arcillosos en Japón, evidencio el impacto de un meteorito (3,3 a 7,8 km de diámetro) durante el Triásico Tardío (Sato *et al*, 2003).

Kaiho *et al* (2016), determinaron mediante simulaciones que en la extinción del Cretáceo-Terciario el mecanismo se debió a la presencia de hollín en la estratosfera, debido a que el asteroide impacto sobre sedimentos ricos en hidrocarburos; el hollín ocasiono un enfriamiento global, sequía y disminución de la fotosíntesis en un plazo de pocos meses a años después del impacto. Kaiho *et al* (2017), sostuvieron que se liberaron aerosoles de sulfato que condujeron también a un enfriamiento global.

Para los impactos de meteoritos se ha señalado que los de diámetro superior a los 70 km estarían asociados a una extinción superior a la de fondo. Los 6 más grandes cráteres de impacto conocidos de los últimos 250 Ma y de 70 o más km de diámetro, coinciden con 4 o más ocasiones de eventos de extinción reconocidos (Rampino y Caldeiva, 2017). Rumpf *et al* (2017), señalaron que los efectos del impacto de un asteroide son vientos de muy alta velocidad, ondas de choque y sobrepresión, radiación térmica, formación de cráteres, deposición de eyecciones, formación de nubes de polvo y aerosoles en la estratosfera, tsunamis y choque sísmico.

Chiarenza *et al* (2020), mediante la combinación de datos de la ocurrencia de fósiles, con paleoclima y modelos de apropiabilidad del hábitat, se determinó que el invierno provocado por el impacto de Chicxulub suprimió los hábitats de los dinosaurios no aviares conduciendo a su extinción, mientras que el calentamiento inducido por el vulcanismo del Deccan conduciría a un incremento de la habitabilidad por lo que el impacto y no el vulcanismo fue

el responsable del evento de extinción. El estudio de la estructura del cráter de impacto Boltysh (Ucrania) de 24 km de diámetro mostró que fue producido por un meteorito 650000 años después del evento Chicxulub, mientras la biosfera se recuperaba de los efectos de este suceso y de los ocasionados por las inundaciones de basalto del Deccan (Pickersgill et al, 2021).

Fu *et al* (2024), mediante simulaciones de modelos climáticos mostraron que el impacto de un asteroide similar al de Chicxulub pudo iniciar un enfriamiento global que condujo a la Tierra Bola de Nieve durante el Neoproterozoico y Paleoproterozoico. Kennett *et al* (2025), concluyeron que el estallido aéreo provocado por un meteorito contribuyo significativamente a la extinción de la megafauna norteamericana y al colapso de la cultura Clovis, hace unos 12800 años, corroborado por el hallazgo de granos de cuarzo chocado, cuarzo fracturado con sílice fundida en las fracturas.

Dai y Timmermann (2025), simularon la colisión con un asteroide tipo Bennu, que indico la inyección de unos 400 millones de toneladas de polvo en la estratosfera, con una caída de 4 grados C en la temperatura promedio global, una disminución en las precipitaciones del 15% y con reducciones en la productividad primaria neta terrestre y marina de 36 y 25%, respectivamente. Señalaron además floraciones masivas de diatomeas en algunas zonas oceánicas.

Gulick *et al* (2026), señalaron que una expedición científica al cráter Chicxulub encontró evidencias claras del ingreso a la atmósfera de polvo, aerosoles de sulfato y hollín, que probablemente contribuyeron a un enfriamiento global y a una reducción de la fotosíntesis que desencadenaron la extinción; además se determinó una rápida recuperación de la vida lo que demuestra que las extinciones son un mecanismo de evolución.

CONCLUSIONES

- 1) Las extinciones masivas ejercen una fuerza y son un mecanismo poderoso en la evolución.
- 2) La presencia de ⁶⁰Fe en sedimentos marinos profundos señala sin lugar a dudas la interacción del planeta con supernovas
- 3) Los mecanismos más probables en los impactos por asteroides y cometas incluyen el enfriamiento global, calentamiento, acidificación de los océanos y la destrucción de la capa de ozono.
- 4) La Tierra está sometida a las influencias del Cosmos, lo que influye decisivamente sobre el planeta y la vida que el alberga.
- 5) Las radiaciones ionizantes de origen astrofísico tales como las supernovas, explosiones de rayos gamma y eventos solares de protón son reconocidos como amenazas potenciales a la vida en la Tierra, primariamente a través del agotamiento del ozono estratosférico y el aumento en la radiación UV-B en la superficie del planeta y en las capas superiores de los océanos

REFERENCIAS

- Beech, M. (2011). The past, present and future supernova threat to Earth's biosphere. *Astrophys. Space Sci.* 336(2):287-302. <https://doi.org/10.1007/s10509-011-0873-9>
- Black, B., and K. R. Bermingham. (2025). Planetary impacts: Friend or foe? *Astrobiology.* 25 (12): 861-873. <https://doi.org/10.1177/15311074251399212>
- Chiarenza, A. A., A. Farnsworth, P. D. Mannion, D. J. Lunt, P. J. Valdes, J. V. Morgand and P. A. Allison. (2020). Asteroid impact, not volcanism, caused the end-Cretaceous dinosaur extinction. *PNAS.* 117(29): 17084-17093. <https://doi.org/10.1073/pnas.2006087117>
- Cockell, C. S. (2016). Crises and extinction in the fossil record – A role for ultraviolet radiation. *Paleobiology.* 25(2):212-225. <https://doi.org/10.1017/S0094837300026518>
- Cristoudias, T., J. Kirkby, D. Stolsenburg, A. Posser, E. Sommer, G. P. Brasseur, M. Kulmala and J. Lelieveld. (2024). Earth's atmosphere protects the biosphere from nearby supernovae. *Comm. Earth & Environ.* 5:326. <https://doi.org/10.1038/s43247-024-01490-9>
- Dai, L., and A. Timmermann. (2025). Climatic and ecological responses to Bennu-type asteroid collisions. *Sci. Adv.* 11: eadq5399. <https://doi.org/10.1126/aciadv.adq5399>
- Elewa, A. M. T., and R. Joseph. (2009). The history, origins and causes of mass extinctions. *J. Cosmol.* 2:201-220.
- Farley, K. A., A. Montanari, E. M. Shoemaker and C. S. Shoemaker. (1998). Geochemical evidence for a comet shower in the Late Eocene. *Science.* 280(5367):1250-1253. <https://doi.org/10.1126/science.280.5367.1250>
- Fields, B. D., A. L. Melott, J. Ellis, A. F. Ertel, B. J. Fray, B. S. Lieberman, Z. Liu, J. A. Miller and B. C. Thomas. (2023). Supernova triggers for End-Devonian extinctions. *PNAS.* 117(35):21008-21010. <https://doi.org/10.1073/pnas.2013774117>
- Fu, M., D. S. Abbot, C. Koeberl and A. Fedorov. (2024). Impact induced initiation of Snowball Earth: A model study. *Sci. Adv.* 10: eadk5489. <https://doi.org/10.1126/sciadv.adk5489>

Gehrels, N., C. M. Laird, C. H. Canizzio, B. J. Mattson and W. Chen. (2003). Ozone depletion from nearby supernovae. *The Astrophys. J.* 585:1169-1176. <https://doi.org/10.1086/346127>

Gillman, M., and H. Erenler. (2019). Reconciling the Earth's stratigraphic record with the structure of our galaxy. *Geosci. Front.* 10:2147-2151. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2019.06.001>

Gullick, S. P. S., P. Kaskes, C. M. Lowery, A. S. P. Rae and S. M. Tikoo. (2026). From impact to extinction to recovery: Discoveries of IODP-ICDP expedition 364 to the Chicxulub impact structure. *Mar. Geol.* 491:107661. <https://doi.org/j.margeo.2025.107661>

Kaiho, K., N. Oshima, K. Adachi, Y. Adachi, T. Mizukama, M. Fubiyashi and R. Sato. (2016). Global climate change driven by soot at the K-Pg boundary as the cause of mass extinction. *Sci, Rep.* 6:28427. <https://doi.org/10.1038/srep28427>

Kaiho, K., and N. Oshima. (2017). Site of asteroid impact changed the history of life on Earth: The low probability of mass extinction. *Sci. Rep.* 7:14855. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-14199-x>

Kataoka, R., T. Ebisuzaki, H. Miyahara, T. Nimura, T. Tomida, T. Sato and S. Maruyama. (2014). The Nebula Winter: The united view of the snowball Earth, mass extinctions, and explosive evolution in the late Neoproterozoic and Cambrian periods. *Gondwana Res.* 25(3):1153-1163. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2013.05.003>

Knennett, J. P., M. A. LeCompte, C. R. Moore, G. Kletetschka, J. R. Johnson, W. S. Wolbach, et al (2025). Shocked quartz at the Younger Dryas onset (12.8 ka) support cosmic airburst/impact contributing to North America megafaunal extinction and collapse of the Clovis technocomplex. *PLoS One.* 20(9): e0319840. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0319840>

Koeberl, C., C. W. Poag, W. U. Reimold and D. Brandt. (1996). Impact origin of the Chesapeake Bay structure and the source of the North America tektites. *Science.* 271(5253):1263-1266. <https://doi.org/science.271.5253.1263>

Ludwing, P., S. Bishop, R. Egli, V. Chernenko, B. Deneva, T. Faestermann, N. Famulok, L. Fimiani, J. M. Gómez-Guzmán, K. Hain, G. Korschinek, M. Hanzlik, S. Merchel, and G. Rugel. (2016). Time-resolved 2-million-year-old supernova activity discovered in Earth's microfossil record. PNAS. 113(33):9232-9237. <https://doi.org/10.1073/pnas.1601040113>

Martin, O., R. Cardenas, M. Guimaraes, L. Peñate, J. Horvath and D. Galante. (2009). Effects of gamma ray bursts in Earth's biosphere. Astrophys. Space Sci. 326(1): 61-67. <https://doi.org/10.1007/s10509-009-0211-7>

Maruyama, S., and T. Ebisuzaki. (2017). Origin of the Earth: A proposal new model called ABEL. Geosci. Front. 8: 253-274. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2016.10.005>

Melott, A. L., B. C. Thomas, D. P. Hogan, L. M. Ejzak and C. H. Jackman. (2005). Climatic and biogeochemical effects of a galactic gamma ray burst. Geophys. Res. Lett. 32: L14808. <https://doi.org/10.1029/2005GL023073>

Melott, A. L., and B. C. Thomas. (2019). From cosmic explosions to terrestrial fires? The J. Geol. 127(4):475-481. <https://doi.org/10.1086/703418>

Neale, P. J., and B. C. Thomas. (2016). Solar irradiance changes and phytoplankton productivity in Earth's ocean following astrophysical ionizing radiation events. Astrobiology. 16(4):245-258. <https://doi.org/10.1089/ast.2015.1360>

Pickersgill, A. E., D. F. Maric, M. R. Lee, S. P. Kelley and D. W. Jolley. (2021). The Boltys impact structure: An early Danian impact event during recovery from the K-Pg mass extinction. Sci. Adv. 7:eabe6530. <https://doi.org/10.1126/sciadv.abe6530>

Piron, F. (2016). Gamma-ray bursts at high and very high energies. C. R. Physique. 17:617-631. <http://dx.doi.org/10.1016/j.crhy.2016.04.005>

Rampino, M. R., and K. Caldeiva. (2017). Correlation of the largest craters, stratigraphic impact signatures, and extinction events over the past 250 Myr. Geosci. Front. 8:1241-1245. <http://dx.doi.org/10.1016/j.gsf.2017.03.002>

Rumpf, C. M., H. G. Lewis and P. M. Atkinson. (2017). Asteroid impact effects and their immediate hazards for human populations. *Geophys. Res. Lett.* 44:3433-3440. <https://doi.org/10.1002/2017GL073191>

Sato, H., T. Onoue, T. Nozaki and K. Suzuki. (2013). Osmium isotope evidence for a large Late Triassic impact event. *Nat. Comm.* 4:2455. <https://doi.org/10.1038/ncomms3455>

Savaglio, S. (2015). Galaxies as seen through the most energetic explosions in the Universe. *J. High Energy Astrophys.* 7:95-104. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jheap.2015.06.004>

Shaviv, N. J., and J. Veizer. (2003). Celestial driver of Phanerozoic climate? *GSA Today* 13(7):4-10

Shchepkin, A. A., G. I. Vasilyev, V. M. Ostrakov and A. K. Pavlov. (2024). Sharp rise in cosmic ray irradiation of organisms on Earth caused by a nearby SN shockwave passage. *Astrobiology*. 24(6): 604-612. <https://doi.org/10.1089/ast.2023.0126>

South Carolina Geological Survey. Department of Natural Resources. (2005). *Geologic Time and Earth's Biological History*. 32 p.

Svensmark, H. (2012). Evidence of nearby supernovae affecting life on Earth. *Mont. Not. R. Astron. Soc.* 423:1234-1253. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2012.20953.x>

Thomas, B. C., A. L. Melott, C. H. Jackman, C. M. Laird, M. K. Medvedev, R. S. Stolarski, N. Gehrels, J. K. Canizzio, D. P. Hogan and L. M. Ejzak. (2005). Gamma ray burst and the Earth: Exploration of atmospheric, biological, climatic and biogeochemical effects. *The Astrophys. J.* 634: 509-533. <https://doi.org/10.1086/496914>

Thomas, B. C., and A. M. Yelland. (2023). Terrestrial effects of a nearby supernovae: Update modelling. *The Astrophys. J.* 950:41. <https://doi.org/10.3847/1538-4357/accf8a>

Wooldridge, S. A. (2008). Mass extinctions past and present: A unifying hypothesis. *Biogeosci. Discuss.* 5:2401-2423. www.biogeosciences-discuss.net/5/2401/2008/