

# L'Evoluzione Biosferica è Grossolanamente Deterministica

**David Schwartzman**

Professore Emerito, Dipartimento di Biologia, Howard University, Washington, D.C.

Tradotto da Nicoló Anonietti

**Correspondence** | David Schwartzman, dschwartzman@gmail.com

**Citation** | Schwartzman, David. 2020. "L'Evoluzione Biosferica è Grossolanamente Deterministica." Tradotto da Nicoló Anonietti  
*Journal of Big History IV* (2): 67-73.

**DOI** | <https://doi.org/10.22339/jbh.v4i2.4231>

**Astratto** A partire dall'origine della vita, sostengo che il modello generale dell'evoluzione strettamente accoppiata del biota e del clima sulla Terra sia stato il risultato molto probabile di un numero relativamente piccolo di storie possibili alla macroscale, date le stesse condizioni iniziali. Pertanto, l'evoluzione della biosfera auto-seleziona un modello di evoluzione biotica che è grossolanamente deterministico, con vincoli critici che includono probabilmente la temperatura superficiale nonché i livelli di ossigeno e anidride carbonica nell'atmosfera. La fisica e la chimica ambientale guidano i principali eventi dell'evoluzione biotica tra cui la fotosintesi e la fotosintesi ossigenata, l'emergere di nuovi tipi di cellule (eucarioti) dalla fusione di metabolismi complementari e infine la multicellularità e persino l'encefalizzazione.

## **Revival di un vecchio dibattito:**

### **"Riproduzione del nastro", Contingency vs Predictability in Evolution**

Qui rivedo una provocazione, secondo cui l'evoluzione del biota, incorporata nella biosfera, è stata grossolanamente deterministica (Schwartzman 1999, 2002; Schwartzman 2001; Lineweaver e Schwartzman 2004; Schwartzman e Lineweaver 2005). Ovviamente mi schiero in un dibattito vecchio ma ancora attivo, se il "nastro fosse riprodotto di nuovo", il risultato sarebbe più o meno lo stesso, o l'evoluzione biologica non sarebbe ripetibile date condizioni iniziali simili e una storia solare/planetario/di impatti approssimativamente simile? Stephen J. Gould nel suo dibattito con Simon Conway Morris (Conway Morris e Gould 1998-1999) ha

assunto la posizione secondo cui l'origine della vita è molto probabile, ma l'evoluzione biologica non è prevedibile, mentre Conway Morris ha sostenuto che l'evoluzione della vita è prevedibile, ma l'origine della vita è stato un evento improbabile.

Concordo in parte con entrambi gli scienziati dalla parte del determinismo grossolano, entrambi sono molto probabili date le condizioni iniziali della Terra/Sole. La posizione di Conway Morris si basa in gran parte sul suo caso di forte convergenza di morfologie e biochimiche nella storia della vita (Conway Morris 2003, 2010, 2015). La questione della contingenza rispetto al determinismo in questa storia continua a essere al centro di una vigorosa ricer-

ca (ad esempio, Blount 2017; Blount et al. 2018; Simoes 2019). Il determinismo quasi certamente si scompone a livelli più fini; è difficile immaginare che giraffe e balene blu si trovino su pianeti simili alla Terra attorno a stelle simili al Sole nella nostra galassia, tranne nei romanzi di fantascienza!

### **Termobiologia cosmica, emergenza al limite della stabilità**

Ritornando alla probabilità dell'origine della vita sulla Terra, possiamo iniziare con l'osservazione che il raffreddamento della Terra e il suo clima e la crescente complessità delle forme di vita sono correlati, coerenti con la stessa tendenza alla complessità nell'universo dal Big Bang (Lineweaver e Schwartzman 2004; Chaisson 2009). Una termobiologia

cosmica approssimativamente deterministica può essere dedotta dall'evoluzione della vita sulla Terra, permettendoci di prevedere un modello simile di crescente complessità nell'evoluzione biologica sulle superfici dei pianeti terrestri intorno alle stelle simili al Sole. Ovviamente questo modello, in effetti l'abiogenesi stessa, dipende dal contesto del sistema planetario, cioè dalla storia di massa / luminosità stellare, dalla distanza del pianeta terrestre dalla sua stella ospite e dalle condizioni iniziali e dalla storia di impatto del pianeta considerate (si veda capitolo 10, Schwartzman 1999 2002).

A partire da The Last Universal Common Ancestor of Life (LUCA), sostengo che l'emergere dei principali gruppi di organismi viventi si è verificato al limite della stabilità, ai limiti di temperatura superiori. LUCA è emersa a temperature termofile-ipertermofiliiche in presenza d'aria idrotermali alcaline sottomarine (Martin e Russell 2007; Lane 2015; Weiss et al. 2016a; Sojo et al. 2016). Questo scenario è fortemente supportato, ad esempio, dalla stereochimica dei cluster di FeS nei nuclei di enzimi primitivi come la ferredossina, che si presume sia stata ereditata dai minerali di solfuro depositati nelle aperture (Russell e Hall 1997) e dal ruolo chiave della catalisi del ferro e minerali di solfuro di ferro nell'origine della vita (Camprubi et al. 2017; Li et al. 2018).

Un fattore critico del determinismo nella storia dell'evoluzione è stato il forte accoppiamento dell'evoluzione biologica con la storia del clima a seguito del ciclo del carbonio biogeochimico a lungo termine. Un processo chiave in questo ciclo è il progressivo aumento del miglioramento biotico degli agenti atmosferici risultante dall'aumento della produttività terrestre e dall'evoluzione del biota terrestre nella storia della vita (Schwartzman 1999; 2002;

2015). Nel caso della Terra, la tendenza a presentare la riduzione della degassificazione vulcanica, l'aumento dell'area continentale e il miglioramento biotico degli agenti atmosferici ha superato l'influenza del riscaldamento dell'aumento della luminosità solare, ma quest'ultima supererà in futuro le influenze di raffreddamento (ad esempio Caldeira e Kasting 1992). Inoltre, considerando le implicazioni astrobiologiche, se le biosfere emergono in un contesto fortemente abitabile, la loro sopravvivenza è probabilmente migliorata da analoghi forti meccanismi coevolutivi (Nicholson et al. 2018; Lenton et al 2018).

Di seguito è un test della difficoltà per i passaggi nelle principali emergenze evolutive:

Se un potenziale vincolo viene rilasciato al momento dell'emergenza, allora è

stato praticamente inevitabile ("facile"). I limiti di temperatura superiore della crescita dei principali gruppi di organismi viventi corrispondono alla temperatura climatica approssimativa ai tempi della loro prima emergenza, assumendo un clima archeano molto caldo (Schwartzman 1999; 2002; Schwartzman e Knauth 2009; Garcia et al. 2017; Schwartzman 2017). A breve verrà delineata la causa di un clima archeano molto caldo. Queste emergenze sono illustrate nella Figura 1, sul clima curva della temperatura coerente con lo scenario caldo del clima precoce, nonché nella tabella 1.

Il clima della Terra è passato da una "serra" a una "ghiacciaia" negli ultimi 4 miliardi di anni. I numeri sulla curva corrispondono al rapporto dell'attuale potenziamento biotico di agenti atmosferici rispetto a quello al momento indicato nel passato, come derivato

Group	Approximate upper temperature limit (°C)	Time of Emergence (Ga)
<i>"Higher" kingdoms:</i>		
Plants	50	0.5-1.5
Metazoa (Animals)	50	0.6-1.5
Fungi	60	0.6-2.4 (?)
Eukaryotes	60	2.1-2.8
<i>Prokaryotes</i>		
Phototrophs	70	>3.5
Hyperthermophiles	>100	>3.8

(Temperatures from Brock et al. 1994)

Tabella 1. Upper temperature limits for growth of living organisms, approximate times of their emergence.

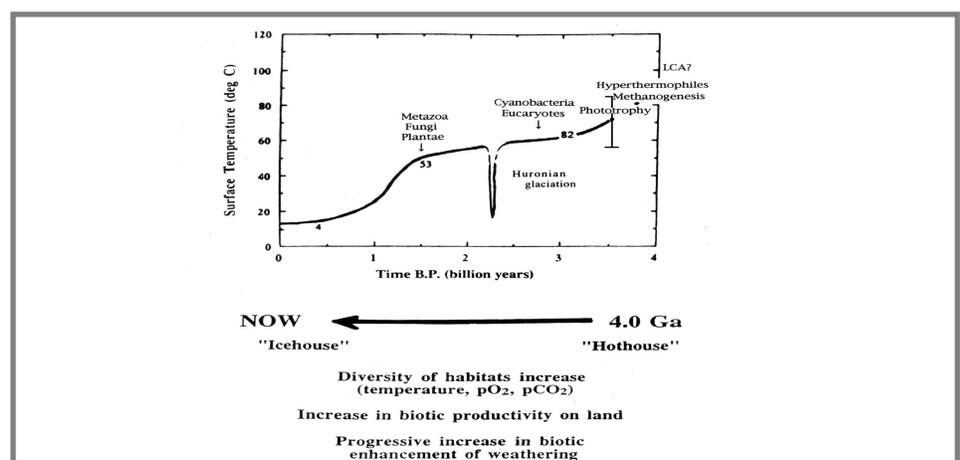


Figura 1. Temperature History of Biosphere

dalla modellazione in Schwartzman (1999 2002); vedi aggiornamento in Schwartzman (2017). Questa curva lascia fuori altre Escursioni termiche negli ultimi miliardi di anni, Compresi i principali episodi glaciali.

I limiti di temperatura superiori sono molto probabilmente caratteri primitivi determinati dalla biochimica intrinseca/biofisica dei componenti cellulari, ad esempio le membrane nucleare e mitocondriale. Gli organismi fototrofici avevano oltre tre miliardi di anni per adattarsi alle temperature ipertermofili (sopra gli 80 °C)" ma non ci riuscirono mai, allo stesso modo durante almeno due miliardi di anni gli eucarioti non riuscirono ad adattarsi a temperature superiori a circa 65 gradi °C; non ci sono fototrofi o eucarioti ipertermofili viventi. Le basi empiriche di questa storia della temperatura derivano dal record isotopico dell'ossigeno sedimentario, in particolare dal più alto rapporto  $O_{18}/O_{16}$  a qualsiasi età, nonché da altre prove riassunte come segue:

- 1) Il record di isotopi di ossigeno nel cheros sedimentario e il caso convincente per una composizione di ossigeno isotopica pressoché costante dell'acqua di mare nel tempo geologico supportano le temperature termofile della superficie prevalenti nell'arceano, con un certo supporto per le condizioni calde che durano fino a circa 1,5 miliardi di anni fa, a parte temperature più basse durante gli episodi glaciali a 2,2- 2,4 Ga e una problematica a 2,9 Ga (Pongola).
- 2) Le temperature di fusione delle proteine resuscitate da sequenze dedotte da robuste filogenesi molecolari danno paleotemperature all'emergenza coerenti con un clima molto caldo all'inizio (vedi discussione sotto).

3) I livelli atmosferici elevati di  $pCO_2$  nell'arceano sono coerenti con le alte temperature climatiche vicino al punto triplo dei minerali di ferro primari nelle formazioni di ferro legato e la formazione di cluster di Mn-bicarbonato che portano alla fotosintesi ossigenata.

4) Le intensità atmosferiche più elevate sulla terra nell'arceano non si sarebbero verificate se l'erosione del fondo marino avesse dominato il pozzo di carbonio, abbassando la temperatura, quindi questa evidenza empirica supporta un clima caldo e alti livelli di anidride carbonica, similmente coerenti con 50-60 bar di  $CO_2$  nella crosta come carbonato e carbonio organico ridotto.

5) La viscosità inferita dell'acqua di mare a 2,7 Ga è coerente con un clima caldo delle Archean.

6) Un Archean freddo è difficile da spiegare tenendo conto dei più alti tassi di degassificazione di anidride carbonica, aree terrestri significativamente più piccole e un miglioramento biotico degli agenti atmosferici rispetto al presente nel contesto del ciclo del carbonio a lungo termine, tenendo conto del sole Archean più debole nella modellistica climatica.

Questo caso è discusso in modo più dettagliato, inclusi riferimenti con supporto per gli argomenti e le prove presentati nell'elenco precedente in Schwartzman 2015; 2017; 2018.

### **Critica delle recenti sfide a un clima caldo delle Archean**

*Ri: Galili et al (2019)*

Nel loro studio sulla composizione isotopica dell'ossigeno degli ossidi di ferro marini, hanno concluso che l'acqua di mare è diventata isotopicamente più leggera dai primi paleozoici ai tempi degli Archea. Tuttavia, il loro caso si

basa sull'inferenza di una variazione non uniforme del rapporto isotopico dell'ossigeno nell'acqua di mare allo scopo di minare un clima caldo delle Archean. Per una confutazione della loro interpretazione della documentazione isotopica dell'ossigeno Archean, vedi Knauth e Lowe (2003). Criticamente, la loro tendenza a ridurre i rapporti isotopici dell'ossigeno dei fluidi parentali per gli ossidi di Fe risalenti a 1,88 Ga (la loro Figure 2D) è coerente con un'influenza meteorica dell'acqua nella diagenesi nella piattaforma continentale o in un ambiente estuarico (vedi ad es. Fralick et al. 2017, rilevando che i più antichi ossidi di Fe campionati da Galili et al. (2019) provengono dalla Giberterra Iron Formation, un deposito canadese della stessa età della Gunflint Formation).

Inoltre, ignorano le prove per il rapporto quasi odierno  $O_{18} / O_{16}$  dell'acqua di mare che risale nell'arceano tra cui:

- 1) Esistono misure dirette di acqua di mare fossile da inclusioni di sale per acqua di mare paleozoica (Knauth e Roberts 1991). La stessa conclusione deriva da studi di isotopi raggruppati (Bergmann et al. 2017; Henkes et al. 2018; Ryb and Eiler 2018).
- 2) Allo stesso modo la stessa conclusione viene dal rapporto inferito di acqua di mare nel Neoproterozoico (760 Ma: Hodel et al. 2018) e Early Proterozoic (2.4 Ga: Zakharov and Bindeman 2019).
- 3) Ancora una volta la stessa conclusione è dedotta dalla documentazione geologica di antiche croste oceaniche alterate dall'acqua di mare (ofoliti, loro proxy ecologici, pietre preziose). A parte la loro interpretazione problematica di questa documentazione geologica, Galili et al. (2019) non riescono a confrontare le prove dei proxy ecologici archeani per crosta

oceanica alterata / arricchita con alterazioni dell'acqua di mare (Jacob 2004) con abbondanti valori esauriti, chiara evidenza di interazione ad alta temperatura con acqua di mare, una fonte di O<sub>18</sub> per l'acqua di mare durante il processo di buffering, osservando che un modo preferito per generare rapporti più leggeri è stato quello di sostenere che questo processo non stava accadendo nei primi anni del Precambrian.

*Ri: Krissansen-Totton et al. (2018)*

Modellano il ciclo del carbonio a lungo termine, concludono che l'attuale migliore conoscenza di questo ciclo preclude un caldo Archean. Tuttavia, piuttosto che criticare effettivamente il solido caso empirico per un caldo clima archeano che citano, creano un modello per confutarlo, generando un modello Sleep and Zahnle (2001) con sufficiente alterazione del fondo marino per mantenere le temperature degli Archean sotto i 50 gradi C. Ignorata è la prova di alti livelli di pCO<sub>2</sub> Hadean/Archean in atmosfera / oceano, nonché di maggiori intensità di agenti atmosferici sulla terra.

*Ri: Charnay et al. (2017)*

Dal loro modello 3D clima-carbonio, "favoriscono i climi freddi o temperati con temperature medie globali comprese tra circa 8° C (281 K) e 30° C (303 K) e con 0,1-0,36 bar di CO<sub>2</sub> per il tardo Hadean e il primo Archean." Tuttavia, il potenziamento biotico molto più basso degli agenti atmosferici sulla terra in questi primi tempi non è stato incluso nella loro modellizzazione del ciclo del carbonio a lungo termine, inoltre il riciclo della CO<sub>2</sub> nelle zone di subduzione in Archean era probabilmente vicino al 100% di efficienza a causa di un mantello superiore più caldo, anziché il valore inferiore che assumono.

### **Storia della temperatura dalla filogenesi molecolare**

Ulteriori prove per questa storia di tem-

peratura provengono dalla filogenesi molecolare di organismi appartenenti ai tre principali domini della vita, i batteri, l'archaea e l'eucarià, notando l'apparente assenza sull'albero filogenetico rRNA di mesofili / psicofili profondamente radicati (vedi ad esempio, Figura 1 in Schwartzman e Lineweaver 2004). Se le temperature degli Archea erano simili al Fanerozoico, allora alcuni dei procarioti a bassa temperatura dovrebbero essere raggruppati vicino alla radice con gli ipertermofili / i termofili. Mentre alcuni alberi filogenetici più recenti sono più ambigui riguardo a questa conclusione (ad esempio, vedi Lineweaver e Chopra 2019, citando Hug et al. 2016; Weiss et al. 2016a) la ricerca supporta un LUCA termofilo:

Il concetto di un ultimo antenato comune universale di tutte le cellule (LUCA, o progenote) è centrale nello studio della prima evoluzione e dell'origine della vita, ma mancano informazioni su come e dove viveva LUCA. Abbiamo studiato tutti i gruppi e gli alberi filogenetici per 6,1 milioni di geni codificanti proteine da genomi procariotici sequenziati al fine di ricostruire l'ecologia microbica del LUCA. Tra 286.514 gruppi di proteine, abbiamo identificato 355 famiglie di proteine (~0,1%) che risalgono al LUCA secondo criteri filogenetici. Poiché queste proteine non sono distribuite universalmente, possono far luce sulla fisiologia di LUCA. Le loro funzioni, proprietà e gruppi protesici descrivono il LUCA come anaerobico, fissatore di CO<sub>2</sub>, dipendente da H<sub>2</sub> con un percorso di Wood-Ljungdahl, fissante N<sub>2</sub> e termofilo. La biochimica di LUCA era piena di ammassi di FeS e meccanismi di reazione radicale... Le 355 filogenesi identificano clostridi e metanogeni, i cui stili di vita moderni assomigliano a quelli di LUCA, come base tra i loro rispet-

tivi domini. LUCA abitava un ambiente geochimicamente attivo ricco di H<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> e ferro. I dati supportano la teoria di un'origine autotrofica della vita che coinvolge il sentiero Wood-Ljungdahl in un ambiente idrotermale." (Abstract)

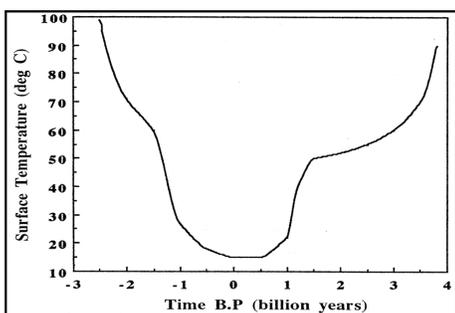
Per ulteriori opinioni sul concetto di LUCA e la sua identificazione, ad esempio, consultare i seguenti articoli: Gogarten e Deamer (2016) con una risposta di Weiss et al. (2016b), Di Giulio (2019) e Lineweaver (in corso di stampa).

Sono le paleotemperature dedotte dalle proteine resuscitate (allungamento) dei cianobatteri coerente con un caldo clima archeano, con i cianobatteri che emergono a circa 60 ° C a 2,8 Ga. (Garcia et al. 2017, come proposto da Schwartzman et al. 2008 e Gaucher et al. 2008; vedi anche Fournier e Alm 2015; Romero-Romero et al. 2016; Bous-sau et al. 2008).

### **Lo scoppio dell'encefalizzazione nel tardo Cenozoico**

Per gli animali a sangue caldo, la temperatura corporea T<sub>body</sub> è vicina al limite superiore di 40 ° C per i vertebrati, fornendo così al cervello ad alta intensità energetica mentre il differenziale tra la temperatura corporea e climatica, T<sub>body</sub> - T<sub>climate</sub>, determina l'efficienza della perdita di calore da cervello, riconoscendo che l'umidità e l'evoluzione della sudorazione e la distribuzione dei capelli sul corpo influiscono anche sulla perdita di calore. Pertanto, abbiamo proposto che il raffreddamento climatico sia un fattore di rilascio principale per l'encefalizzazione (Schwartzman et al. 2009), con la finestra di opportunità per la massima encefalizzazione mostrata nella Figura 2. Pertanto, sostengo che una nicchia di intelligenza, tra le altre soluzioni per la sopravvivenza riproduttiva, esiste sul nostro pianeta e,

di conseguenza, potenzialmente su altri pianeti simili alla Terra attorno a stelle simili al Sole. Sulla Terra abbiamo una nicchia di intelligenza per lignaggi negli uccelli (ad es. Corvidi), mammiferi marini (ad es. Delfini) e mammiferi terrestri (ad es. Elefanti, scimmie antropoidi, ominine) nel Cenozoico. Il caso forte di Dunbar (2016) per la socialità che guida l'evoluzione dei cervelli grandi nei mammiferi è il contesto per il raffreddamento del clima che riduce il vincolo della perdita di calore inefficiente da parte dei cervelli più grandi. Pertanto, gli animali sociali sono una nicchia di attrattore apparente per l'encefalizzazione e per gli animali a sangue caldo la perdita di calore da un cervello ad alta intensità energetica è un vincolo. Per i primati in particolare, Street et al. (2017) hanno dimostrato in modo convincente che l'espansione del cervello e la forte dipendenza da comportamenti trasmessi culturalmente hanno favorito la socialità e la durata della vita estesa.



**Figura 2.** La temperatura superficiale della Terra in passato e proiettata per il futuro (rispettivamente positivo e negative sull'asse x) notando che 0 è il presente e la temperatura la curva del passato si avvicina e comprime ciò che si vede nella figura 1. A window for maximum encephalization is generated between +1 and -1 billion years B.P.

## Conclusioni

Il caso qui delineato indica un'importante conclusione riguardante l'evoluzione biologica, vale a dire al ruolo critico di un vincolo di temperatura che trattiene l'emergenza dei principali gruppi organici, iniziando con i fototro-

fi nell'arceano, culminando con eucarioti, poi metazoi nel proterozoico e scoppi di encefalizzazione nel tardo cenozoico (è importante anche riconoscere che i vincoli sull'evoluzione biotica hanno incluso i livelli di ossigeno atmosferico sui macroeucarioti, compresi i metazoi nel Fanerozoico, insieme ai livelli atmosferici di anidride carbonica sull'emergenza di licheni e foglie (megaphylls) in Devoniano.

Il modello di evoluzione della biosfera sostenuto qui aumenta il potenziale di simili relazioni coevolutive della vita e del suo ambiente su pianeti simili alla Terra attorno a stelle simili al Sole.

## Riferimenti

- Bergmann, K., S. Finnegan, R. Creel, et al. 2017. "A Paired Apatite and Calcite Clumped Isotope Thermometry Approach to Estimating Cambro-Ordovician Seawater Temperatures and Isotopic Composition." *Geochimica et Cosmochimica Acta* 224: 18-41.
- Blount, Z. D. 2017. "Replaying Evolution." *American Scientist* 105 (3): 156-165.
- Blount, Z. D., R. E. Lenski, and J. B. Losos. 2018. "Contingency and Determinism in Evolution: Replaying Life's Tape." *Science* 362 (6415), doi: 10.1126/science.aam5979.
- Boussau, B., S. Blanquart, A. Necsulea, N. Lartillot, and M. Gouy. 2008. "Parallel Adaptations to High Temperatures in the Archaean Eon." *Nature* 456: 942-945.
- Brock, T. D., M. T. Madigan, J. M. Martinko, and J. Parker. 1994. *Biology of Microorganisms*. 7th ed. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall.
- Caldeira, K., and J. F. Kasting. 1992. "The Life Span of the Biosphere Revisited." *Nature* 360: 721-723.
- Camprubi, E., S. F. Jordan, R. Vasiliadou, et al. 2017. "Iron Catalysis at the Origin of Life." *IUBMB Life* 69(6): 373-381.
- Chaisson, E. J. 2009. "Exobiology and Complexity." In: R. Myers, ed. *Encyclopedia of Complexity and Systems Science*. Berlin: Springer, 3267- 3284.
- Charnay, B., G. Le Hir, F. Fluteau, F. Forget, and D. C. Catling. 2017. "A Warm or a Cold Early Earth? New Insights from a 3-D Climate-carbon Model." *Earth and Planetary Science Letters* 474: 97-109.
- Conway Morris, S. 2003. *Life's Solution: Inevitable Humans in a Lonely Universe*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Conway Morris, S. 2010. "Evolution: Like Any Other Science It Is Predictable." *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*: 365, 133-145. doi:10.1098/rstb.2009.0154.
- Conway Morris, S. 2015. *The Runes of Evolution: How the Universe Became Self-Aware*. West Conshohocken: Templeton Press.
- Conway Morris, S and S. J. Gould. 1998-1999. "Showdown on the Burgess Shale." *Natural History* 107 (10): 48-55.
- Di Giulio, M. 2019. The Universal Ancestor, the Deeper Nodes of the Tree of Life, and the Fundamental Types of Primary Cells (Cellular Domains)." *Journal of Theoretical Biology* 460: 142-143.
- Dunbar, R. 2016. *Human Evolution*. Oxford UK: Oxford University Press.
- Fournier, G. P., and E. J. Alm. 2015. "Ancestral Reconstruction of a Pre-LUCA Aminoacyl-tRNA Synthetase Ancestor Supports the Late Addition of Trp to the Genetic Code." *Journal*

- of *Molecular Evolution*. doi:10.1007/s00239-015-9672-1.
- Fralick, P., N. Planavsky, J. Burton, et al. 2017. "Geochemistry of Paleoproterozoic Gunflint Formation Carbonate: Implications for Hydrosphere-atmosphere Evolution." *Precambrian Research* 290: 126-146.
- Galili, N., A. Shemesh, R. Yam, et al. 2019. "The Geologic History of Seawater Oxygen Isotopes from Marine Iron Oxides." *Science* 365 (6452): 469-473.
- Garcia, A. K., J.W. Schopf, S-i Yokobori, et al. 2017. "Reconstructed Ancestral Enzymes Suggest Long-term Cooling of Earth's Photic Zone since the Archean." *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 114: 4619-4624.
- Gaucher, E.A., S. Govindaraja, and O. K. Ganesh. 2008. "Palaeotemperature Trend for Precambrian Life Inferred from Resurrected Proteins." *Nature* 451, 704-708.
- Gogarten, J. P., and D. Deamer. 2016. "Is LUCA a Thermophilic Progenote?" *Nature Microbiology* 1: 16229. doi: 10.1038/NMICROBIOL.2016.229.
- Henkes, G. A., B. H. Passey, E. L. Grossman, et al. 2018. "Temperature Evolution and the Oxygen Isotope Composition of Phanerozoic Oceans from Carbonate Clumped Isotope Thermometry." *Earth and Planetary Science Letters* 490: 40-50.
- Hodel, F., M. Macouin, R.I. F. Trindade, et al. 2018. "Fossil Black Smoker Yields Oxygen Isotopic Composition of Neoproterozoic Seawater." *Nature Communications* 9:1453. doi: 10.1038/s41467-018-03890-w.
- Hug, L., B. J. Baker, K. Anantharaman, et al. 2016. "A New View of the Tree of Life." *Nature Microbiology* 1: 16048.
- Jacob, D. E. 2004. "Nature and Origin of Eclogite Xenoliths from Kimberlites." *Lithos* 77: 295-316.
- Knauth, L.P., and D. R. Lowe. 2003. "High Archean Climatic Temperature Inferred from Oxygen Isotope Geochemistry of Cherts in the 3.5 Ga Swaziland Supergroup, South Africa." *Geological Society of America Bulletin* 115 (5): 566-580.
- Knauth, L. P., and S. K. Roberts. 1991. "The Hydrogen and Oxygen Isotopic History of the Silurian- Permian Hydrosphere as Determined by Direct Measurement of Fossil Water." *Geochemical Society Special Publication* No. 3: 91-104.
- Krissansen-Totton, J, G. N. Arney, and D. C. Catling. 2018. "Constraining the Climate and Ocean pH of the Early Earth with a Geological Carbon Cycle Model." *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 115 (16): 4105-4110.
- Lane, N. 2015. *The Vital Question: Energy, Evolution and the Origins of Complex Life*. New York: W. W. Norton.
- Lenton, T. M., S. J. Daines, J. G. Dyke, A. E. Nicholson, D. M. Wilkinson, and H. T. P. Williams. 2018. "Selection for Gaia across Multiple Scales." *Trends in Ecology & Evolution* 33: 633-645.
- Li, Y., N. Kitadai, and R. Nakamura. 2018. "Chemical Diversity of Metal Sulfide Minerals and Its Implications for the Origin of Life." *Life* 8: 46; doi:10.3390/life8040046.
- Lineweaver, C. H. In press. "What Do the DPANN Archaea and the CPR Bacteria Tell Us about the Last Universal Common Ancestors?" In: Seckbach J. and H. Stan-Lotter (eds) *Extremophiles as Astrobiological Models*. Beverly, MA: Scrivener-Wiley.
- Lineweaver, C. H., and A. Chopra. 2019. "The Biological Overview Effect: Our Place in Nature." *Journal of Big History* III (3): 109-122.
- Lineweaver, C. H., and D. Schwartzman. 2004. "Cosmic Thermobiology, Thermal Constraints on the Origin and Evolution of Life." In: Seckbach, J. (ed) *Origins: Genesis, Evolution and Biodiversity of Microbial Life in the Universe*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 233-248.
- Martin, W., and M. J. Russell. 2007. "On the Origin of Biochemistry at an Alkaline Hydrothermal Vent." *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 362: 1887-925.
- Nicholson, A. E., D. M. Wilkinson, H. T. P. Williams, and T. M. Lenton. 2018. "Alternative Mechanisms for Gaia." *Journal of Theoretical Biology* 457: 249-257.
- Pace, N. R. 1997. "A Molecular View of Microbial Diversity and the Biosphere." *Science* 276: 734-740.
- Romero-Romero, M. L., V. A. Risso, S. Martinez-Rodriguez, E. A. Gaucher, et al. 2016. "Selection for Protein Kinetic Stability Connects Denaturation Temperatures to Organismal Temperatures and Provides Clues to Archaeal Life." *PLoS ONE* 11(6): e0156657.
- Russell, M. J., and A. J. Hall. 1997. "The Emergence of Life from Iron Monosulfide Bubbles at a Submarine Hydrothermal Redox and pH Front." *Journal of the Geological Society, London* 154, 377-402.
- Ryb, U., and J. M. Eiler. 2018. "Oxygen Isotope Composition of the Phanerozoic Ocean and a Possible Solution to the Dolomite Problem." *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 115 (26): 6602-6607.

- Schwartzman, D. 1999, 2002. *Life, Temperature, and the Earth: The Self-Organizing Biosphere*. New York: Columbia University Press.
- Schwartzman, D. 2001. "Playing the Tape Again, a Deterministic Theory of Biosphere/Biotic Evolution." In: *Earth System Science: A New Subject for Study (Geophysiology) or a New Philosophy? International School Earth and Planetary Sciences, Proceedings* (S. Guerzoni, S. Harding, T. Lenton and F. Ricci Lucchi, eds.), Siena 2001, 53-60.
- Schwartzman, D. 2015. "The Case for a Hot Archean Climate and Its Implications to the History of the Biosphere." *Arxiv.org.*, April 1.
- Schwartzman, D. 2017. "Life's Critical Role in the Long-term Carbon Cycle: the Biotic Enhancement of Weathering." *AIMS Geosciences* 3(2): 216-238.
- Schwartzman, D. 2018. "The Dialectics of Biospheric Evolution." In Awerbuch, Tamara, Maynard S. Clark, and Peter J. Taylor, eds. *The Truth is the Whole: Essays in Honor of Richard Levins*. Arlington, MA: The Pumping Station, 21-33.
- Schwartzman D, K. Caldeira, and A. Pavlov. 2008. "Cyanobacterial Emergence at 2.8 Gya and Greenhouse Feedbacks." *Astrobiology* 8 (1): 187-203.
- Schwartzman, D., and C. H. Lineweaver. 2005. "Temperature, Biogenesis and Biospheric Self-Organization." In: Kleidon, A., and R. D. Lorenz, eds. *Non-Equilibrium Thermodynamics and the Production of Entropy: Life, Earth, and Beyond*. Berlin: Springer, Chapter 16, 207-221.
- Schwartzman, D., G. Middendorf, and M. Armour-Chelu. 2009. "Was Climate the Prime Releaser for Encephalization?" *Climatic Change* 95 (3): 439-447.
- Schwartzman, D. W., and L. P. Knauth. 2009. "A Hot Climate on Early Earth: Implications to Biospheric Evolution." In: Meech K. J. et al., eds. *Bioastronomy 2007: Molecules, Microbes, and Extraterrestrial Life* 420, 221-228, Astronomical Society of the Pacific Conference Series, San Francisco.
- Schwartzman, D. W., and C. H. Lineweaver. 2004. "The Hyperthermophilic Origin of Life Revisited." *Biochemical Society Transactions* 32: 168-171.
- Simoës, T. R. 2019. "Contingency vs. Predictability in Evolution." *Nature Research: Ecology and Evolution*. <https://natureecoevocommunity.nature.com/users/87830-tiago-r-simoës/posts/43332-contingency-vs-predictability-in-evolution>.
- Sleep, N. H., and K. Zahnle. 2001. "Carbon Dioxide Cycling and Implications for Climate on Ancient Earth." *Journal of Geophysical Research: Planets* 106: 1373-1399.
- Sojo, V., B. Herschy, A. Whicher, et al. 2016. "The Origin of Life in Alkaline Hydrothermal Vents." *Astrobiology* 16 (2): 181-197.
- Street, S. E., A. F. Navarrete, S. M. Reader, et al. 2017. "Coevolution of Cultural Intelligence, Extended Life History, Sociality, and Brain Size in Primates." *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 114 (30): 7908-7914.
- Weiss, M. C., S. Neukirchen, M. Roettger, et al. 2016b. Reply to "Is LUCA a Thermophilic Progenote?" *Nature Microbiology* 1: 16230. doi: 10.1038/NMICROBIOL.2016.230.
- Weiss, M. C., F. L. Sousa, N. Mrnjavac, et al. 2016a. "The Physiology and Habitat of the Last Universal Common Ancestor." *Nature Microbiology* 1: 16116. doi: 10.1038/NMICROBIOL.2016.116.
- Zakharov, D. O., and I. N. Bindeman. 2019. "Triple Oxygen and Hydrogen Isotopic Study of Hydrothermally Altered Rocks from the 2.43-2.41 Ga Vetryny Belt, Russia: An Insight into the Early Paleoproterozoic Seawater." *Geochimica et Cosmochimica Acta* 248: 185-209.