

Una Storia dell’Abitabilità Cosmica

Amedeo Balbi

Dipartimento di Fisica Università di Roma “Tor Vergata,” Italy

Correspondence | balbi@roma2.infn.it

Citation | Balbi, Amedeo. 2020. “Una Storia dell’Abitabilità Cosmica.” *Journal of Big History* IV (2): 49-53.

DOI | <https://doi.org/10.22339/jbh.v4i2.4221>

Abstract La nostra comprensione dell'universo si basa sul modello cosmologico del big bang, che descrive un universo in espansione il cui sviluppo è iniziato 13,8 miliardi di anni fa da uno stato caldo e denso. Questo modello introduce una forte prospettiva evolutiva e storica nella spiegazione di molti fenomeni fisici osservati, tra cui l'origine della vita e la sua possibile distribuzione nell'universo. Prendere correttamente in considerazione il “quadro generale” e il suo dispiegamento temporale è rilevante ai fini dell'astrobiologia e del SETI (la ricerca di intelligenza extraterrestre).

Introduzione

Nel secolo scorso abbiamo imparato molto sulla storia dell'universo. Una delle cose più importanti che abbiamo imparato è proprio che l'universo ha una storia, e cioè che l'universo osservabile non è sempre stato come è oggi. Esso si è evoluto per 13,8 miliardi di anni e durante questo periodo è cambiato radicalmente. Tutto è iniziato, in passato, da uno stato molto semplice e indifferenziato, molto vicino all'equilibrio (almeno in un certo senso che chiarirò in seguito) e poi, con il passare del tempo, sono emerse lentamente complessità e struttura (Figura 1). Da

un plasma primordiale caldo di particelle libere, le forze della natura hanno assemblato galassie, stelle, pianeti e molecole. La domanda chiave dell'astrobiologia è capire come la vita si inquadri in questo schema generale, e quanto sia tipica. La vita sulla Terra è stato solo un evento fortunato, senza eguali nel resto dell'universo, o fa parte di un fenomeno generico che è accaduto molte volte altrove? Il punto principale di questo articolo è quello di sottolineare come la prospettiva della “Big History” sia essenziale per avere una buona comprensione di tali problemi.

Per un fisico o un cosmologo, la maggior parte delle cose che sono successe nella storia dell'universo sono piuttosto semplici da prevedere. Ad esempio, sapendo che all'inizio dell'universo c'erano fluttuazioni di densità di una data ampiezza nel plasma primordiale, sarebbe piuttosto facile prevedere che dopo qualche tempo ci saranno stelle e galassie. Dal punto di vista della fisica, il fatto che l'universo sia pieno di stelle non sarebbe una sorpresa nemmeno per qualcuno che non ne abbia mai visto una. Quando proviamo a includere la vita nel quadro cosmico, tuttavia, le cose sono molto più complicate. Non c'è modo, al momento, di prevedere da principi primi cose come l'epoca in cui la vita è apparsa per la prima volta, o la sua frequenza e distribuzione nell'universo.

In effetti, in uno scenario in cui l'universo è esistito e si è evoluto per 13,8 miliardi di anni—vale a dire, nel modello del big bang caldo che costituisce la nostra migliore descrizione attuale della storia cosmica—anche l'esistenza di un singolo esempio di vita su un singolo pianeta pone un enigma. Per capire

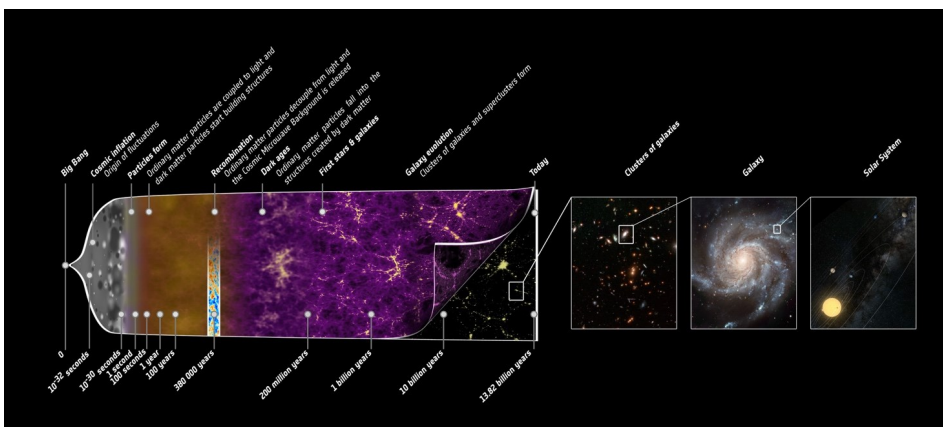


Figura 1: Il “quadro generale” della storia dell'universo secondo il modello cosmologico standard del big bang (Credito immagine: NASA)

perché, basta confrontare la situazione con quella immaginata dall'ormai screditato modello dello stato stazionario (Bondi and Gold 1948), che postulava un universo che esiste da sempre nello stesso stato in cui lo osserviamo oggi: in un universo simile, c'era abbastanza tempo (in effetti, un tempo infinito) per produrre anche la combinazione più improbabile di molecole, da qualche parte. Quindi, in un universo stazionario ed eterno, non si dovrebbe essere troppo sorpresi di osservare che la vita esiste. D'altra parte, la semplice esistenza di un singolo esempio di vita in un universo con un'età finita—il tipo di universo in cui viviamo in realtà—richiede una spiegazione. Cosa altrettanto importante, la valutazione della probabilità della comparsa della vita non può essere facilmente districata dall'evoluzione complessiva del cosmo e dalle sue caratteristiche specifiche, come i valori dei parametri fisici e delle costanti che regolano il suo comportamento (Barrow 1998; Rees 1972).

Storia Cosmica, Complessità e Vita

Nel modello del big bang, la comparsa della vita—o, almeno, l'emergere delle condizioni per la comparsa della vita—richiede una serie di passaggi preliminari. Giusto per nominare quelli principali: prima l'universo deve creare i nuclei degli elementi leggeri nel plasma primordiale, quindi deve formare le stelle, e le stelle devono cucinare elementi più pesanti nei loro nuclei, fino a quando la loro abbondanza è abbastanza alta da formare pianeti rocciosi attorno alle stelle di sequenza principale. Quindi, le nubi molecolari nello spazio interstellare devono formare molecole organiche che possono finire nelle atmosfere e nelle superfici planetarie, mentre le collisioni e gli impatti con corpi ghiacciati devono trasportare abbastanza acqua sui pianeti nella zona abitabile delle loro stelle, dove le temperature e la pressione atmosferica so-

no compatibili con la presenza di laghi e oceani. Solo dopo che tutti questi passaggi hanno avuto luogo c'è la possibilità che appaiano molecole in grado di replicarsi, e magari il metabolismo, i primi microrganismi, la vita complessa e l'intelligenza.

Questo è vero indipendentemente dall'abbondanza di vita nell'universo, sia che sia diffusa o che esista in pochi luoghi nell'intero universo osservabile. Il problema dell'origine della vita non può essere affrontato senza avere una comprensione di questo quadro generale, cioè del contesto cosmico in cui sono avvenuti tutti i passi necessari per la comparsa della vita. È importante notare che tutti questi passaggi possono essere organizzati in una sequenza evolutiva (Chaisson 2001), e questo, a sua volta, rende la prospettiva storica cruciale per interpretare il quadro fisico. Il fatto stesso che esista una tendenza evolutiva può inizialmente sembrare controintuitivo. L'ovvia tendenza dalla semplicità alla complessità che osserviamo nell'universo sembra andare contro la nostra ingenua comprensione della termodinamica: sappiamo che la semplicità è più probabile della com-

plexità, e che il disordine viene dopo l'ordine, non viceversa. In realtà, tuttavia, non c'è nulla di strano in questo. In effetti, l'apparizione spontanea di ordine e auto-organizzazione nell'universo è possibile per due ragioni, entrambe direttamente correlate al comportamento cosmologico generale. La prima è che, in un universo in espansione, qualsiasi processo tende a un certo punto ad andare fuori equilibrio (Figura 2). Ciò è dovuto al fatto che il tempo caratteristico di qualsiasi interazione diventa alla fine maggiore del tempo di espansione dell'universo (il tempo impiegato dall'universo per raddoppiare le sue dimensioni), poiché le due scale di tempo dipendono in modi diversi dalla densità totale dell'universo (Balbi 2018). Quando ciò accade, l'interazione non riesce a essere abbastanza rapida da mantenere l'equilibrio. Pertanto, si può generare squilibrio anche a partire da uno stato iniziale molto uniforme. La seconda ragione è legata al ruolo termodinamico della gravità. Quando pensiamo all'entropia, l'immagine standard da libro di testo è quella di un gas in una scatola (Figura 3). Se il gas inizia con tutte le molecole raggruppate in un

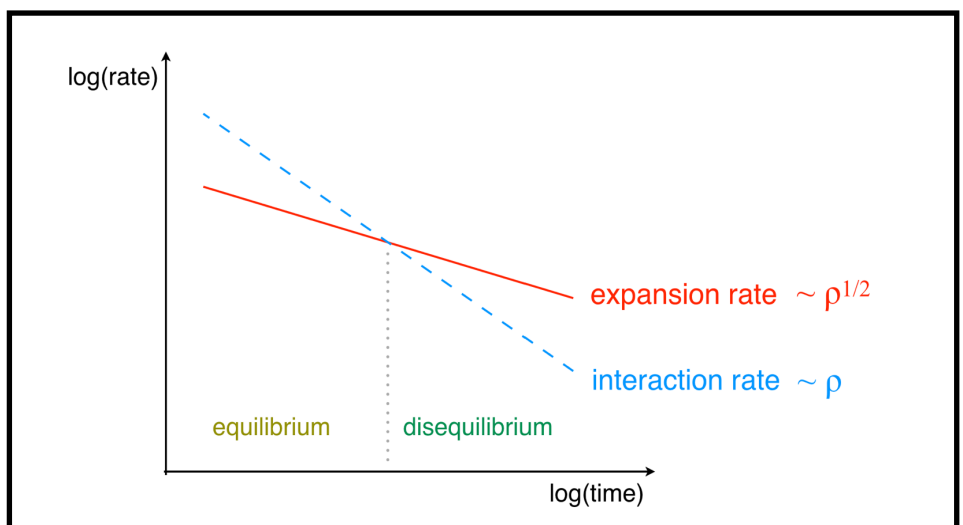


Figura 2: Il tasso di espansione dell'universo e il tasso di interazione di qualsiasi processo a due corpi dipendono in modi diversi dalla densità media dell'universo (che, a sua volta, diminuisce come una potenza del tempo cosmico). Ciò implica che ogni interazione alla fine va fuori equilibrio, poiché la sua velocità diventa più piccola della velocità di espansione dell'universo.

angolo della scatola, ci aspettiamo che in un secondo momento si troverà in uno stato più semplice, più omogeneo e disordinato, in cui le molecole saranno distribuite uniformemente in tutta la scatola. Quindi, tendiamo ad associare alta entropia ad alta uniformità. Ma se in questo quadro si include la gravità, le cose vanno nella direzione opposta: la disuniformità e l'entropia aumentano nella stessa direzione. In effetti, nonostante l'aspetto uniforme, lo stato iniziale dell'universo è molto lontano dal più alto disordine possibile. Nel linguaggio termodinamico, un universo in espansione può aumentare di molto la sua entropia, pur producendo, allo stesso tempo, strutture complesse transitorie (vedi, ad esempio, Carroll 2010).

Tutto ciò, ovviamente, è cruciale per la possibilità che la vita abbia origine. La vita prospera proprio sullo squilibrio prodotto dall'evoluzione dell'universo. Si pensi, ad esempio, alla luce solare che colpisce la superficie della Terra. I fotoni del Sole hanno una bassa entropia rispetto a quelli che lasciano la Terra propagandosi nello spazio. Nel mezzo di questo flusso di fotoni da una fonte di calore a bassa entropia (il Sole) a un serbatoio freddo ad alta entropia (lo spazio vuoto), c'è la Terra, e su di essa la vita. La vita è possibile perché c'è lavoro da estrarre da questo motore termodinamico che funziona tra temperature diverse (Lineweaver and Egan 2008). Numerosi studi hanno iniziato ad adottare un punto di vista esplicitamente termodinamico quando si considera la vita nel contesto cosmico (si veda, ad esempio, Frank, Kleidon e Alberti 2017). Un modo per inquadrare il problema è vedere la vita come un modo efficiente (o un modo più efficiente dei sistemi non viventi) di usare energia libera e produrre entropia, secondo il cosiddetto principio di entropia massima (Maximum Entropy Principle, MEP,

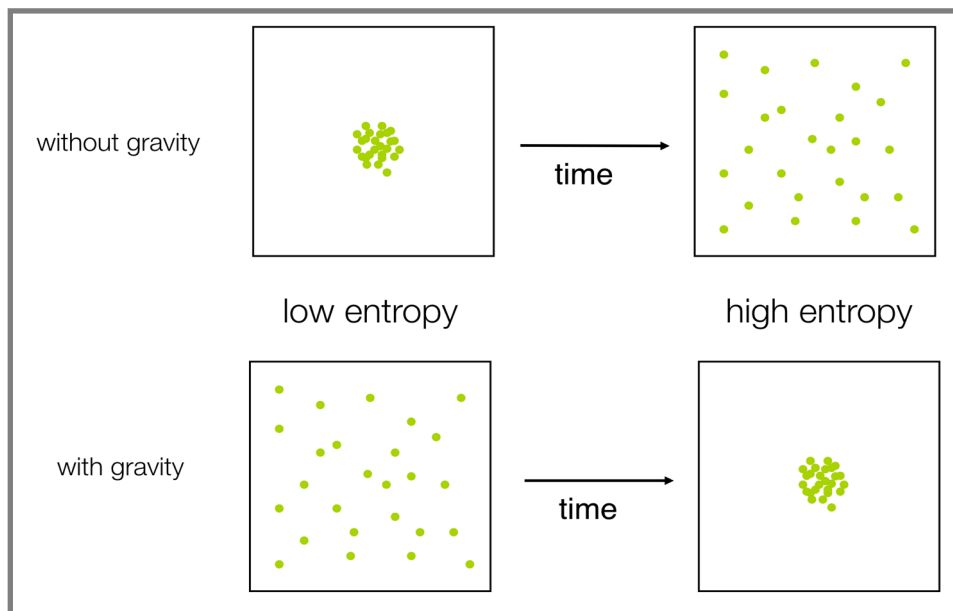


Figura 3: In presenza di gravità, la crescita dell'entropia non corrisponde a una maggiore uniformità, come nell'immagine standard del "gas in una scatola" (pannello superiore): piuttosto, essa porta a una maggiore disuniformità (pannello inferiore). Questo è cruciale per spiegare l'emergere spontaneo, e in qualche modo controintuitivo, della struttura nell'universo col passare del tempo.

si veda, ad esempio, Kleidon 2010a, 2010b).

Vediamo quindi che c'è un forte aspetto storico (nel senso di una profonda relazione con il flusso del tempo) nel tentativo di capire il posto della vita nell'universo. Questo non è vero solo per quanto riguarda la storia cosmica passata, ma anche quando si considera la sua evoluzione futura. Non siamo del tutto sicuri di ciò che accadrà (in effetti, potremmo non essere mai del tutto sicuri, si veda Krauss and Turner 1999), ma se l'universo continuerà ad espandersi a un ritmo accelerato (come suggeriscono le attuali osservazioni) alla fine esso diventerà freddo e privo di strutture, avvicinandosi sempre di più all'equilibrio termodinamico (Adams and Laughlin 1997). Ci sarà un'eternità in cui praticamente non potrà accadere nulla di complesso, poiché l'universo alla fine raggiungerà la "morte termica", lo stato di massima entropia possibile. Ciò pone il tempo presente in una posizione piuttosto strana. Viviamo in un'epoca fugace nella storia generale dell'universo: un piccolo intervallo tempora-

neo in cui possono esserci stelle, pianeti, molecole e vita, racchiusi tra due eoni ugualmente privi di interesse. Una conseguenza potenzialmente profonda di ciò è che, sebbene il copernicanismo sia un buon principio guida quando applicato allo spazio, è certamente sbagliato quando applicato al tempo. La nostra epoca è piuttosto atipica, e dovremmo tenerne conto quando prevediamo la frequenza e la distribuzione della vita nell'universo, o ne giudichiamo la probabilità (Cirkovic e Balbi 2019).

Quando L'universo è Diventato Abitabile?

Prendere in considerazione la variabile temporale, quindi, è della massima importanza per l'astrobiologia e per il SETI. Un aspetto del ruolo del tempo è nel considerare *quando* l'universo sia diventato adatto alla vita. Potrebbe sembrare una domanda ovvia (specialmente in una prospettiva di "Big History") ma essa ha ricevuto un'attenzione sorprendentemente bassa fino a non molto tempo fa. In effetti, di solito pensiamo

all'abitabilità solo come una questione di *dove* possano esserci le condizioni necessarie per l'origine e il mantenimento della vita (vedi, ad esempio, Cockell et al 2016). Ad esempio, c'è molto interesse nel trovare pianeti intorno alla zona abitabile di altre stelle, ovvero dove la temperatura può essere compatibile con la presenza stabile di acqua liquida sulla superficie (Kopparapu et al 2013). Sono anche stati fatti alcuni studi per identificare i luoghi nella nostra galassia dove è più probabile la presenza di pianeti abitabili, e forse di vita: la cosiddetta "zona abitabile galattica" (Lineweaver 2001; Lineweaver et al 2004; Gonzales 2005). Ma relativamente poco è stato fatto per valutare in quale epoca della storia cosmica abbia iniziato a essere possibile la vita (Dayall et al 2016; Loeb et al 2016). Dalla discussione precedente è chiaro che le giuste condizioni non erano presenti nel nostro universo sin dall'inizio, e potrebbero non essere più presenti in un lontano futuro.

Esistono esempi noti di processi astrofisici con una forte dipendenza temporale che possono potenzialmente influire sull'abitabilità non solo sulla scala locale dei sistemi planetari, ma anche su scala galattica. Ad esempio, sappiamo che durante la prima fase della storia della nostra galassia (circa 8 miliardi di anni fa) il buco nero supermassiccio al suo centro era in attività, cioè accumulava materia a un ritmo molto alto. Di conseguenza, dal nucleo galattico venivano emessi alti livelli di radiazioni ionizzanti: ciò avrebbe potuto avere un impatto sull'abitabilità complessiva della galassia. Gli esopianeti rocciosi che erano abbastanza vicini al buco nero (entro un raggio di circa mille anni luce, vale a dire nella regione del "bulge", il rigonfiamento attorno al nucleo della galassia) mentre esso era attivo (un periodo che potrebbe essersi prolungato per circa 100 milioni di anni) potrebbe-

ro aver perso una frazione sostanziale delle loro atmosfere (Balbi and Tombesi 2017). Inoltre, la vita su tali pianeti potrebbe aver subito gravi danni biologici. Naturalmente, questo è un argomento molto ampio e complesso, e stiamo appena iniziando a grattarne la superficie: è difficile dire se le radiazioni ionizzanti siano solo dannose per la vita o, in qualche modo, anche necessarie, ad esempio per indurre mutazioni e altri effetti biogenici (Lingam et al 2019). Ad ogni modo, c'è chiaramente molto da imparare dallo studio della connessione tra la storia dell'universo e la sua abitabilità sia su piccola che su grande scala. Mettere insieme una storia dell'abitabilità cosmica potrebbe essere un ambito potenzialmente fecondo della "Big History."

Gli Appetiti Temporali di SETI

Comprendere la storia dell'abitabilità cosmica avrebbe anche un forte impatto sulla ricerca di vita intelligente nell'universo. Sfortunatamente, il fattore temporale è stato tradizionalmente quasi interamente trascurato negli studi SETI (Cirkovic 2004). Un'area in cui il tempo entra in gioco è nelle proprietà causali di qualsiasi segnale che potremmo essere in grado di rilevare. In altre parole, quando cerchiamo civiltà comunicanti che possano popolare la nostra galassia, dobbiamo essere consapevoli che esiste un requisito rigoroso che qualsiasi segnale elettromagnetico (o, più in generale, qualsiasi interazione fisica) deve soddisfare per essere osservato da noi oggi. Giusto per fissare le idee, si può pensare a un messaggio radio emesso da una posizione a mille anni luce dal Sole: se tale comunicazione fosse cessata prima di mille anni fa, oggi non potremmo più osservarla. Questo può sembrare sulle prime un fatto banale, ma ha profonde implicazioni (Balbi 2017; Grimaldi 2017). Ad esempio, implica che qualsiasi civiltà

tecnologica di cui potremmo trovare prove empiriche debba essere o di lunga durata o quasi coeva alla nostra. Implica anche che la probabilità di scoprire la vita intelligente al di fuori della Terra dipende da come la vita è stata distribuita nel tempo nel corso della storia cosmica. Se siamo ritardatari, e la maggior parte delle altre civiltà si è già estinta, potremmo essere soli. Altrimenti, se la vita ha iniziato ad apparire solo di recente, e l'universo si sta svegliando proprio ora, potremmo essere solo uno dei tanti esempi di civiltà nella fase di "infanzia" tecnologica. Ciò potrebbe far luce su enigmi antichi come la discrepanza tra il numero di luoghi potenzialmente abitabili nell'universo e l'assenza di prove di vita intelligente oltre la Terra (un enigma di solito incarnato dalla domanda di Fermi: "Dove sono tutti quanti?"). Se l'universo non era così adatto alla vita in passato come lo è oggi, allora l'enigma può dissolversi, o almeno essere mitigato. In generale, valutare le possibilità di successo del SETI, o anche interpretarne i risultati negativi, deve presupporre una conoscenza di come la propensione alla vita nel nostro universo sia cambiata nel tempo, una prospettiva inseparabile dagli aspetti storici ed evolutivi dello scenario cosmologico.

Conclusioni

Il fatto viviamo in un universo in espansione con un'età finita e il cui stato fisico è cambiato drasticamente nel tempo introduce una prospettiva storica in molti dei processi che la scienza cerca di spiegare. Ho mostrato come il problema dell'origine della vita, sulla Terra e altrove, deve abbracciare pienamente questo punto di vista storico ed evolutivo. Investigare la storia dell'abitabilità cosmica—cioè della propensione dell'universo a ospitare la vita—può illuminare molti aspetti della ricerca. Il fatto che viviamo in un universo in

contemporanea sia in astrobiologia che nel SETI. Alla fine, questa è ancora un'ulteriore indicazione del fatto che l'adozione di una prospettiva di "Big History" può avere profonde conseguenze sulla comprensione del nostro posto nel cosmo.

Referenze

- Adams, Fred C., and Gregory Laughlin. 1997. "A Dying Universe: The Long Term Fate and Evolution of Astrophysical Objects." *Reviews of Modern Physics* 69 (2): 337, doi:10.1103/RevModPhys.69.337.
- Balbi, Amedeo. 2013. "Cosmology and Time." *EPJ Web of Conferences* 58, doi:10.1051/epjconf/20135802004.
- Balbi, Amedeo. 2018. "The Impact of the Temporal Distribution of Communicating Civilizations on Their Detectability." *Astrobiology* 18 (1): 54.
- Balbi, Amedeo, and Francesco Tombesi. 2017. "The Habitability of the Milky Way during the Active Phase of Its Central Supermassive Black Hole." *Scientific Reports* 7, doi:org/10/1038/s41598-017-16110-0.
- Barrow, John D. 2008. *Cosmology and the Origin of Life*. November 30, 1998. Invited presentation. Varenna Conference on the Origin of Intelligent Life in the Universe. ArXiv:astro-ph/9811461.
- Bondi, H., and T. Gold. 1948. "The Steady-state Theory of the Expanding Universe." *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 108 (3): 252-270, doi:org/10.1093/mnras/108.3.252.
- Carroll, Sean. 2010. *From Eternity to Here: The Quest for the Ultimate Theory of Time*. New York: Dutton.
- Chaisson, Eric J. 2001. *Cosmic Evolution: the Rise of Complexity in Nature*. Cambridge, MA: Harvard University Press.
- Ćirković, Milan M. 2004. "The Temporal Aspect of the Drake Equation and SETI." *Astrobiology* 4 (2): 225.
- Ćirković, Milan M., and Amedeo Balbi. 2019. "Copernicanism and the Typicality in Time." *International Journal of Astrobiology* 19 (2): 1-9, doi:org/10.1017/S1473550419000223.
- Cockell, C. S., T. Bush, C. Bryce, S. Direito, M. Fox-Powell, J. P. Harrison, H. Lammer, et al. 2016. "Habitability: a Review." *Astrobiology* 16 (1): 89-117, doi:org/10.1089/ast.2015.1295.
- Dayal, Pratika, Martin Ward, and Charles Cockell. 2016. "The Habitability of the Universe through 13 Billion Years of Cosmic Time." ArXiv:1606.09224.
- Frank, Adam, Axel Kleidon, and Marina Alberti. 2017. "Earth as a Hybrid Planet: The Anthropocene in an Evolutionary Astrobiological Context." *Anthropocene* 19: 13.
- Gonzalez, Guillermo. 2005. "Habitable Zones in the Universe." *Origin of Life and Evolution of the Biospheres* 35 (6): 555-606.
- Grimaldi, Claudio. 2017. "Signal Coverage Approach to the Detection Probability of Hypothetical Extraterrestrial Emitters in the Milky Way." *Scientific Reports* 7 (46273).
- Kleidon, A. 2010. "A Basic Introduction to the Thermodynamics of the Earth System Far from Equilibrium and Maximum Entropy Production." *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences*. 365 (1545): 1303.
- Kleidon, Axel. 2010. "Life, Hierarchy, and the Thermodynamic Machinery of Planet Earth." *Physics of Life Reviews* 7 (4): 424.
- Kopparapu, Ravi Kumar, Ramses Ramirez, James F. Kasting, Vincent Eymet, Tyler D. Robinson, Suvrath Mahadevan, Ryan C. Terrien, et al. 2013. "Habitable Zones around Main-sequence Stars: New Estimates." *Astrophysical Journal*, 765 (131): 1-16.
- Krauss, Lawrence M., and Michael S. Turner. 1999. "Geometry and Destiny." *General Relativity and Gravitation* 31: 1453.
- Lineweaver, C. H. 2001. "An Estimate of the Age Distribution of Terrestrial Planets in the Universe: Quantifying Metallicity as a Selection Effect." *Icarus* 151: 307-313.
- Lineweaver, C. H., Y. Fenner, and B. K. Gibson. 2004. "The Galactic Habitable Zone and the Age Distribution of Complex Life in the Milky Way." *Science* 303 (5654): 59-62.
- Lineweaver, Charles H. 2005. Cosmological and Biological Reproducibility: Limits of the Maximum Entropy Production Principle. In Kleidon, A., and R. Lorenz. *Non-equilibrium Thermodynamics and the Production of Entropy: Life, Earth, and Beyond 2*: 67.
- Lineweaver, Charles H., and Chas A. Egan. 2008. Life, Gravity and the Second Law of Thermodynamics. *Physics of Life Reviews* 5(4): 225.
- Lingam, Manasvi, Idan Ginsburg, and Shmuel Bialy. 2019. "Active Galactic Nuclei: Boon or Bane for Biota?" *Astrophysical Journal* 877: 62.
- Loeb, Abraham, Rafael A. Batista, and David Sloan. 2016. "Relative Likelihood for Life as a Function of Cosmic Time." *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics* 8: 10.
- Rees, M. J. 1972. "Cosmological Significance of e_2/Gm_2 and Related Large Numbers." *Comments on Astrophysics and Space Physics* 4: 179-185.