

Christina Tonauer, Innsbruck

Ein Gruß aus dem All: Die Suche nach extraterrestrischen Lebensräumen

Seit Menschengedenken bewegt uns die Frage, ob es außerhalb unseres Planeten noch andere Lebewesen gibt. So formte sich das interdisziplinäre Gebiet der Astrobiologie, welche die Erforschung des Ursprungs und der Evolution von Leben, der Voraussetzungen für Lebensräume sowie der Zukunft von Leben im Universum umfasst. Im Folgenden sollen einige wichtige astrobiologische Ansätze auf der Suche nach extraterrestrischen Lebensräumen sowie Theorien über die Entstehung von Leben umrissen werden.

Leben auf dem Mars ?

Diese Nachricht sorgte nicht nur in der Wissenschaftscommunity für Aufsehen: Am 25. Juli 2018 verkündete ein Team rund um den Forscher Roberto Orosei im Fachjournal *Science* die Entdeckung eines riesigen unterirdischen Sees aus flüssigem Wasser am Mars [1]. Mithilfe von niederfrequenten Radarmessungen in der Region *Planum Australe* an der südlichen Polkappe konnte das Forscherteam etwa 1,5 km unter der Marsoberfläche einen flüssigen Wasserkörper von mindestens 20 km Durchmesser identifizieren. Dieser Fund ist deshalb von hoher Bedeutung, da derartige Seen auch unter den Polkappen der Erde vorkommen, wie die subglazialen Seen *Lake Vostok* [2] und *Lake Whillans* [3] in der Antarktis. In letzterem wurden 2013 nach Bohrungen durch 800 m dickes Eis Bakterien gefunden [4]. Wenn es also Leben unter solch „extremen“ Bedingungen (ohne Sonnenlicht und unter dickem Eis) auf der Erde gibt, stellt sich die Frage, ob es somit auch Leben auf dem Mars geben könnte?

Die Suche nach der Existenz von anderen Lebewesen und deren Lebensräumen außerhalb unseres Planeten bewegt die Menschheit. Neben dem Planeten Mars, werden aufgrund von entdeckten Wasservorkommen auch der Jupitermond Europa sowie der Saturnmond Enceladus als mögliche extraterrestrische Habitate in Betracht gezogen [5].

Der Frage, ob es außer uns noch andere intelligente Wesen in diesem Universum gibt, wurde bereits sehr oft - auf mehr oder weniger seriöse Art und Weise - nachgegangen. *What is life? How does it begin? Are we alone?* Mit dieser Problemstellung beschäftigt sich auch das im kalifornischen Mountain View gelegene SETI-Institut seit den 1980ern (*SETI: Search for Extraterrestrial Intelligence*, <https://www.seti.org>). In verschiedenen Projekten wird unter anderem der Versuch von Kommunikation mit (hypothetischen) extraterrestrischen intelligenten Lebensformen verfolgt.

WissenschaftlerInnen senden dafür elektromagnetische Wellen ins Weltall in der Hoffnung, intelligente Lebewesen hätten ähnliche Technologien zur Verfügung und könnten einerseits das Signal empfangen sowie eine Antwort senden.

ALH84001

Zu den Herangehensweisen auf der Suche nach Spuren von extraterrestrischen Lebensräumen, die weniger nach Science-Fiction klingen, gehört die Untersuchung von astronomischen Objekten wie etwa Meteoriten. Der 1984 entdeckte Marsmeteorit ALH84001 (Allan Hills 84001) ist ein etwa 2 kg schwerer Stein, der seit den Neunzigerjahren hitzige Debatten über die Möglichkeit von (früherem) Leben auf dem Mars befeuert [6, 7]. Der im Allan-Hills-Eisfeld (Antarktis) gefundene Meteorit weist ein geologisches Alter von etwa 4 Milliarden Jahren auf und landete vor ca. 13.000 Jahren auf der Erde. Trotz der langen Verweildauer auf der Erde blieb die geologische Beschaffenheit im Inneren des Meteoriten weitgehend konserviert [7]. Die Sensation war 1996 perfekt als McKay *et al.* nach umfassenden Analysen behaupteten, Relikte von Marslebewesen im Gestein des Meteoriten gefunden zu haben [6, 7]. Im Detail sind es vier Merkmale im Gestein, welche von McKay *et al.* als biogen, d.h. durch Lebewesen auf dem Mars erzeugt, interpretiert wurden. Einerseits enthüllten Aufnahmen eines Elektronenmikroskops die Existenz von Struktu-

ren, die als Mikrofossile gedeutet werden könnten. Andererseits wurden Carbonat, Magnetit sowie organische Verbindungen (polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe, PAH) im Inneren des Meteoriten gefunden, welche auf die Existenz bzw. den Zerfall von Bakterien hinweisen könnten. Obwohl die genannten Spuren in ALH84001 tatsächlich durch biogene Prozesse erklärt werden könnten, kann das Vorkommen jener Merkmale beruhend auf abiotischen chemischen Prozessen (ohne den Einfluss von Lebewesen) nicht ausgeschlossen werden.

Extremophile - Ein Leben am Limit

Auf der Suche nach extraterrestrischen Habitaten wird schnell klar, dass außerhalb der Erde, etwa auf anderen Planeten oder Monden unseres Sonnensystems, mitunter sehr lebensfeindliche Bedingungen herrschen - zumindest aus anthropozentrischer Sicht. So weist der benachbarte Planet Venus eine ca. hundertmal dichtere Atmosphäre als die Erde auf und besteht zu über 90% aus Kohlendioxid (CO₂) [8]. Außerdem herrschen auf der Venusoberfläche ein Druck von 92 bar sowie, aufgrund des ausgeprägten Treibhauseffekts bedingt durch die Kohlendioxidatmosphäre, eine mittlere Oberflächentemperatur von ca.

464 °C [8]. Zudem wirkt auch der u.a. aus konzentrierter Schwefelsäure bestehende Niederschlag, der auf die Venus herabregnet, zumindest auf den ersten Blick alles andere als einladend für Lebewesen. Ähnlich wie die Venus, ist auch der Planet Mars von einer zum Großteil aus Kohlendioxid bestehenden Atmosphäre umgeben, allerdings herrscht ein Druck von nur etwa 6-8 mbar auf der Marsoberfläche [8], was etwa einem Tausendstel des Drucks auf der Erdoberfläche entspricht. Mit einer Durchschnittsoberflächentemperatur von - 55 °C ist es scheinbar ausgeschlossen, dass der Mars für Lebewesen bewohnbar ist.

Bei näherer Betrachtung der Sachlage wird jedoch klar, dass es sehr wohl Lebewesen gibt, die in unüblichen Lebensräumen nicht nur überleben, sondern aufgrund von Selektionsdruck optimal auf die jeweiligen „extremen“ Bedingungen angepasst sein können. Diese Lebewesen werden als *Extremophile* bezeichnet [9]. Auf der Erde befinden sich viele unterschiedliche extreme Habitate, in denen Leben entdeckt wurde. Wie eingangs erwähnt, wurden im unterirdischen *Lake Whillians* in der Antarktis Bakterien entdeckt, die ohne Sonnenlicht und unter 800 m dickem Eis leben [4]. Aber auch andere extreme Faktoren wie kochendes Wasser, Säure, Radioaktivität, hohe Salzkonzentrationen oder gar Giftmüll scheinen Leben nicht auszuschließen [9]. Unter

Extremophilenklasse	Lebensraum	Organismus	Definierende Wachstumsbedingung	Referenz
hyperthermophil („hitze liebend“)	Heiße Quellen	<i>Pyrolobus fumarii</i>	T _{max} = 113°C	[12]
psychrophil („kälte liebend“)	Schnee, Sedimente, Fließwasser, Eis	z.B.: <i>Vibrio</i> , <i>Arthrobacter</i> , <i>Pseudomonas</i> ...	- 17 °C	[13]
acidophil („säure liebend“)	Trockene, schwefelreiche vulkanische Böden	<i>Picrophilus oshimaie</i> , <i>Picrophilus torridus</i>	optimaler pH-Wert: 0,7	[11]
strahlungstolerant	Kühlwasser von Atomreaktoren	<i>Deinococcus radiodurans</i> , <i>Rubrobacter</i>	Gamma-, UV-, Röntgenstrahlung	[14–16]
toxizitätstolerant	Giftmülllager, Industriebetriebe; organische Lösungen und Schwermetalle	z.B.: <i>Rhodococcus</i>	substanzspezifisch (z.B.: Benzol-gesättigtes Wasser)	[17]
barophil/piezophil („druck liebend“)	Tiefsee	z.B.: <i>Photobacterium</i> , <i>Pyrococcus</i>	z.B.: tiefster Punkt Marianengraben: p = 1070 bar	[18]
endolith („in Gestein lebend“)	Verschiedene Gesteinsschichten	z.B.: <i>Methanobacterium subterranean</i> , <i>Pseudomonas</i>	Gestein als Habitat	[19]

TABELLE 1: BEISPIELE EXTREMOPHILER ORGANISMEN UND DEREN LEBENSÄUMEN [9].

den Extremophilen befinden sich Vertreter aller drei Domänen zellulärer Lebewesen (Bakterien, Archaeen und Eukaryoten). Die Bedeutung der Erforschung extremophiler Organismen und deren Lebensräume liegen darin, dass durch das Verständnis der zugrundeliegenden Anpassungsmechanismen dieser Lebewesen neue Einblicke über die Möglichkeit der Entstehung und Erhaltung von Leben in extraterrestrischen Habitaten gewonnen werden können. Somit ist beispielsweise DNA-Sequenzierung extremophiler Organismen ein wichtiger Forschungsgegenstand der Astrobiologie.

Hyperthermophile sind Mikroorganismen, die optimal bei hohen Temperaturen (jenseits von 40 °C) wachsen und sich vermehren. Selbst bei Temperaturen zwischen 125-140 °C in überhitztem Wasser konnte Wachstum gewisser Hyperthermophiler beobachtet werden [10]. Andere Extremophile (*Picrophilus oshimaie*, *Picrophilus torridus*) sind nicht nur wärme- (thermophil) sondern auch extrem säureliebend (acidophil). Die beiden extremophilen Spezies wurden aus vulkanischen Böden in Japan isoliert und wachsen optimal bei pH 0,7 und 60 °C [11]. Aber auch vom Menschen künstlich erzeugte extreme Umgebungen können als Lebensräume für solche Organismen fungieren. Ein bemerkenswertes

Beispiel dafür ist das strahlungstolerant Bakterium *Deinococcus radiodurans*, welches in Kühlwasserkreisläufen von Atomreaktoren gefunden werden kann [9]. Einige herausragende Beispiele extremophiler Organismen sind in Tabelle 1 aufgelistet.

Die Auflistung in Tabelle 1 verdeutlicht die enorme Anpassungsfähigkeit Extremophiler an paradoxe Habitate. Es scheint, als sei nur die permanente Abwesenheit von flüssigem Wasser ein Ausschlusskriterium für Leben [5, 20]. Somit können etwa Mars, Europa oder Enceladus als mögliche extraterrestrische Habitate nicht ausgeschlossen werden.

Theorien zum Ursprung des Lebens

Auf der Suche nach Leben in außerirdischen Habitaten stellt sich unweigerlich auch die Frage nach dem Ursprung von Leben, d.h. wie und unter welchen Umständen Leben entstehen kann bzw. entstanden ist. Wie also ist Leben auf der Erde entstanden und welche Lehren kann man daraus für extraterrestrische Lebensräume ziehen? Wieviel Zeit ist notwendig, damit dieses auf un-

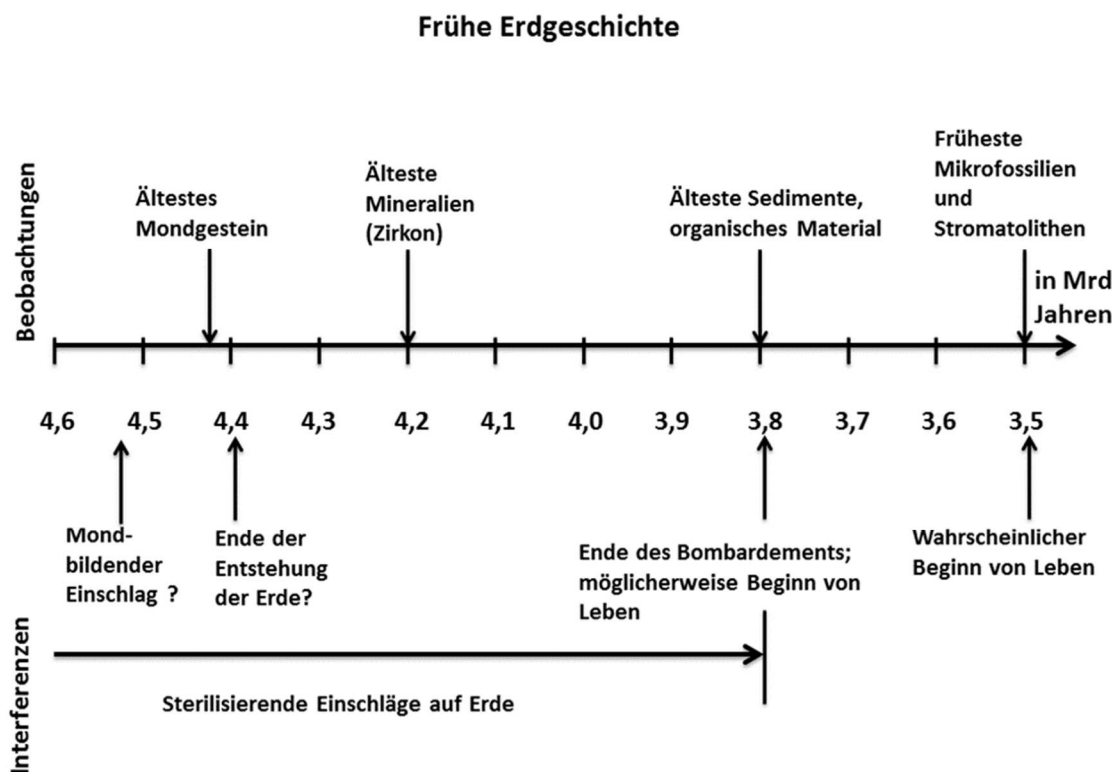


ABBILDUNG 1: ZEITLICHES SCHEMA GESAMMELTER GEOLOGISCHER DATEN UND ZEITLICHE EINORDNUNG WICHTIGER EREIGNISSE DER FRÜHEN ERDGESCHICHTE [21].

zähligen komplexen, ineinandergreifenden Prozessen beruhende Phänomen Leben entsteht? Nicht zuletzt ist die Betrachtung der bestehenden *Origin of Life*-Theorien interessant, da ein großer Teil dieser Erklärungsversuche von einem extraterrestrischen Ursprung des Lebens auf der Erde ausgeht.

Zur Beantwortung der Frage nach dem Zeitraum, der für die Entwicklung von Leben nötig war/ist, liefern die bestehenden geologischen Daten ein relativ klares Bild (siehe Abbildung 1, [21]).

In der Zeit zwischen der Entstehung der Erde (vor etwa 4,6 Mrd Jahren) und dem Ende des *Late Bombardements* (vor etwa 3,8 Mrd Jahren) wurde die Erde von Asteroiden- und Kometeneinschlägen getroffen, die unseren Planeten für diese Zeit zu einem unbewohnbaren Ort machten [21]. Die frühesten gefundenen Mikrofossilien und Stromatolithen (versteinerte Schichten von Mikrobenmaterial in Sedimenten) sind 3,5 Mrd Jahre alt [22]. Es gibt jedoch Funde organischen Materials in Sedimenten, welche aufgrund des charakteristischen Verhältnisses von $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ -Atomen auf die Existenz von Lebewesen schon vor 3,8 Mrd Jahren hindeuten [23]. Das bedeutet, dass Leben vermutlich mit dem Ende des *Late Bombardements* oder - auf einer geologischen

Zeitskala betrachtet - kurz darauf (innerhalb von 300 Mio Jahren) auf der frühen Erde entstanden ist. Spuren dieser Entwicklung (z.B.: mögliche Lebensvorstufen) scheinen jedoch nicht / nicht mehr zu existieren, was einen fruchtbaren Boden für das Aufkommen unterschiedlichster *Origin of Life*-Theorien bietet.

Abbildung 2 zeigt ein Schema der verschiedenen Theorien über den Ursprung von Leben und offenbart zwei große Kategorien: Jene Theorien, die davon ausgehen, dass Leben auf der Erde entstanden ist (terrestrischer Ursprung) und jene, die von einem extraterrestrischen Ursprung desselben ausgehen. Terrestrische Theorien lassen sich weiter nach dem Aspekt unterteilen, ob die Struktur des ersten Lebewesens auf Kohlenstoff (organisch) oder anderen Elementen (anorganisch) basierte. Theorien, die einen organischen Urorganismus postulieren, unterscheiden sich weiter in der Frage, ob organische oder nicht-organische Energiequellen genutzt wurden. Im Falle von organischem Material als Energiequelle stellt sich die Frage nach der Herkunft dieser Stoffe, ob sie auf der Erde erzeugt wurden (endogene Zufuhr) oder von extraterrestrischen Quellen stammten und - z.B.: mittels Kometen oder Asteroiden - auf die Erde „geliefert“ wurden.

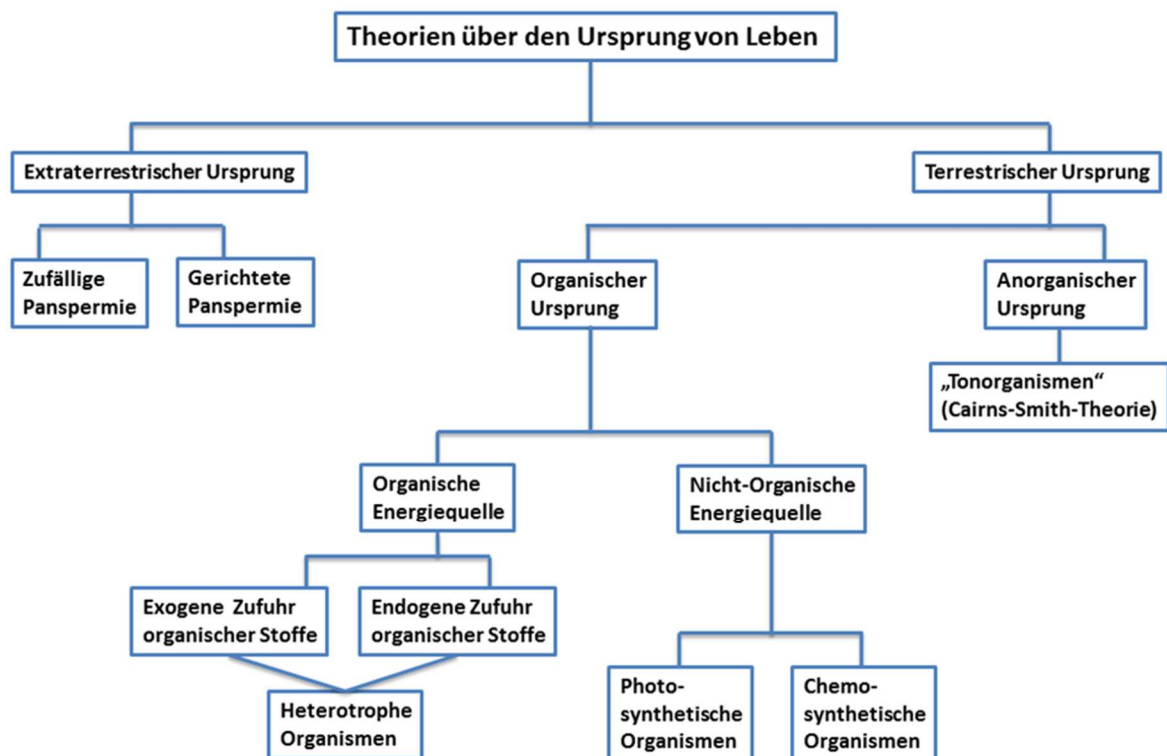


ABBILDUNG 2:

DIAGRAMM ZUR EINTEILUNG DER VERSCHIEDENEN *ORIGIN OF LIFE*-THEORIEN [21].

Als Standardtheorie gilt die *Oparin-Haldane*-Theorie, die von einer spontanen Bildung organischer Lebensbausteine in einer reduzierenden Atmosphäre (ohne Sauerstoff O₂, aber mit Wasserstoff H₂, Methan CH₄, Ammoniak NH₃) der frühen Erde ausgeht. [5, 21]. Das berühmte *Miller-Urey*-Experiment, in welchem die „Ursuppe“ simuliert wurde und durch Blitzentladungen Aminosäuren (die Grundbausteine von Proteinen) synthetisiert werden konnten [24], stützt diese Theorie. Andererseits bestehen Zweifel, ob tatsächlich eine reduzierende Atmosphäre auf der frühen Erde existierte und nicht eher eine Atmosphäre aus hauptsächlich Kohlendioxid CO₂, Stickstoff N₂ und Wasser H₂O [25]. Wäre letzteres der Fall, wären die im *Miller-Urey*-Experiment gezeigten Synthesen deutlich unwahrscheinlicher.

Ganz abgesehen von diesem Konflikt, ist es ein weiter Weg zwischen primitiven Lebensbausteinen wie Aminosäuren oder Zuckern zu Polymeren wie Proteinen, RNA und DNA zu schließlich einer selbstreplizierenden, komplex strukturierten Einheit wie einer lebenden Zelle. Abiogenese, also die Bildung von Leben aus nicht-lebenden Bestandteilen, bleibt weiterhin ein Rätsel.

Panspermie („All-Saat“)

Dieses hypothetische Konzept wurde zuerst von Arrhenius am Beginn des 20. Jahrhunderts vorgeschlagen [21]. Seiner Vorstellung nach kamen Sporen aus anderen Planetensystemen durch den „Druck des Sonnenlichts“ zur Erde und brachten auf diese Weise Leben auf die Erde. Modernere Auslegungen dieser Idee postulieren, dass Leben im Weltall, möglicherweise im interstellaren Medium oder gar im gleichen Sonnensystem existiert und durch Meteoriten, Asteroiden oder Kometen an die Oberfläche von Planeten gebracht werden (*Zufällige Panspermie*, Abbildung 2) [26]. Dem gegenübersteht die Hypothese der *Gerichteten Panspermie*, die eine absichtliche Verbreitung von Leben im Weltall durch intelligente Lebewesen vorschlägt. Diese - zugegebenermaßen- kühne Hypothese wurde von niemand Geringerem als dem Nobelpreisträger Francis Crick (zusammen mit Leslie Orgel) aufgestellt

[27].

Die Panspermie-Hypothese liefert eine Erklärung für das mögliche frühe Auftreten von Leben auf der Erde nach dem *Late Bombardement* vor 3,8 Mrd Jahren (Abbildung 1). Demnach hätten sich Lebewesen an einem anderen Ort im Weltall entwickelt, unbeeinflusst von den Asteroideneinschlägen im inneren Sonnensystem vor 4,6-3,8 Mrd Jahren und hätten, transportiert durch Himmelskörper, nach Ende der sterilen Zeit die junge Erde aufgrund günstiger Lebensbedingungen bevölkern können. Experimente mit Bakterien in der *Long Duration Exposure Facility* zeigen, dass Bakterien den Transport durch den Weltraum unter Umständen überleben könnten [28].

Die brennende Frage ist nun, bei Annahme eines panspermischen Szenarios, wo nun tatsächlich im Weltall Leben entstanden ist. In den letzten Jahren rückten vermehrt interstellare Staubkörner (*interstellar dust grains*) in den Fokus der Astrobiologie. Sie werden von Vielen als wichtige Oberflächen zur photochemischen Synthese von Lebensbausteinen, wenn nicht als Hort für Leben(svorstufen) gehandelt [29]. Es werden aber zukünftige Studien sein, die interstellare Staubkörner als mögliche extraterrestrische Lebensräume bestätigen oder widerlegen werden.

CHRISTINA MARIA TONAUER

IST DOKTORANDIN AM INSTITUT FÜR PHYSIKALISCHE CHEMIE DER UNIVERSITÄT INNSBRUCK. IHR WISSENSCHAFTLICHES INTERESSE GILT SEIT IHRER MASTERARBEIT IN DER ARBEITSGRUPPE VON THOMAS LÖRTING DER ERFORSCHUNG DER ZAHLREICHEN KRISTALLINEN UND AMORPHEN PHASEN VON EIS. NEBEN IHREM CHEMIESTUDIUM SCHLOSS SIE 2017 IM FACH VIOLINE AB. PRO SCIENTIA GEFÖRDERT SEIT 2018.

Literatur

- [1] Orosei R, Lauro SE, Pettinelli E, et al. Radar evidence of subglacial liquid water on Mars. *Science* 2018; eaar7268.
- [2] Showstack R. Scientists Provide Perspectives as Drilling Reaches Subglacial Antarctic Lake Vostok. *Eos Trans Am Geophys Union* 2012; 93: 80–81.
- [3] Showstack R. Drilling reaches Antarctic subglacial Lake Whillans. *Eos Trans Am Geophys Union* 2013; 94: 63–63.

- [4] Schiermeier Q. Lake-drilling team discovers life under the ice. *Nature* 2013.
- [5] Lal AK. Origin of Life. *Astrophys Space Sci* 2008; 317: 267–278.
- [6] McKay DS, Gibson EK, Thomas-Keprta KL, et al. Search for Past Life on Mars: Possible Relic Biogenic Activity in Martian Meteorite ALH84001. *Science* 1996; 273: 924–930.
- [7] McKay DS, Thomas-Keprta KL, Clemett SJ, et al. Life on Mars: new evidence from martian meteorites. In: Hoover RB, Levin GV, Rozanov AY, et al. (eds), p. 744102.
- [8] Wayne RP. *Chemistry of atmospheres: an introduction to the chemistry of the atmospheres of earth, the planets, and their satellites*. 3rd ed. Oxford [England]□; New York: Oxford University Press, 2000.
- [9] Cavicchioli R. Extremophiles and the Search for Extraterrestrial Life. *Astrobiology* 2002; 2: 281–292.
- [10] Madigan MT. *Brock biology of microorganisms*. Fourteenth edition. Boston: Pearson, 2015.
- [11] Schleper C, Puehler G, Holz I, et al. *Picrophilus* gen. nov., fam. nov.: a novel aerobic, heterotrophic, thermoacidophilic genus and family comprising archaea capable of growth around pH 0. *J Bacteriol* 1995; 177: 7050–7059.
- [12] Blöchl E, Rachel R, Burggraf S, et al. *Pyrolobus fumarii*, gen. and sp. nov., represents a novel group of archaea, extending the upper temperature limit for life to 113°C. *Extremophiles* 1997; 1: 14–21.
- [13] Carpenter EJ, Lin S, Capone DG. Bacterial Activity in South Pole Snow. *Appl Environ Microbiol* 2000; 66: 4514–4517.
- [14] Battista JR. AGAINST ALL ODDS: The Survival Strategies of *Deinococcus radiodurans*. *Annu Rev Microbiol* 1997; 51: 203–224.
- [15] DiRuggiero J, Santangelo N, Nackerdien Z, et al. Repair of extensive ionizing-radiation DNA damage at 95 degrees C in the hyperthermophilic archaeon *Pyrococcus furiosus*. *J Bacteriol* 1997; 179: 4643–4645.
- [16] Ferreira AC, Nobre MF, Moore E, et al. Characterization and radiation resistance of new isolates of *Rubrobacter radiotolerans* and *Rubrobacter xylanophilus*. *Extremophiles* 1999; 3: 235–238.
- [17] Isken S, de Bont JA. Active efflux of toluene in a solvent-resistant bacterium. *J Bacteriol* 1996; 178: 6056–6058.
- [18] Horikoshi K. Barophiles: deep-sea microorganisms adapted to an extreme environment. *Curr Opin Microbiol* 1998; 1: 291–295.
- [19] Atlas RM, Bartha R. *Microbial ecology: fundamentals and applications*. 4th ed. Menlo Park, Calif: Benjamin/Cummings, 1998.
- [20] Brack A, Horneck G, Cockell CS, et al. Origin and Evolution of Life on Terrestrial Planets. *Astrobiology* 2010; 10: 69–76.
- [21] Davis WL, McKay CP. Origins of life: A comparison of theories and application to Mars. *Orig Life Evol Biosph* 1996; 26: 61–73.
- [22] Schopf JW, 1983. Earth's Earliest Biosphere. Its Origin and Evolution. Princeton University Press. *Geol Mag* 1984; 121: 389.
- [23] Schidlowski M. A 3,800-million-year isotopic record of life from carbon in sedimentary rocks. *Nature* 1988; 333: 313–318.
- [24] Miller SL. A Production of Amino Acids Under Possible Primitive Earth Conditions. *Science* 1953; 117: 528–529.
- [25] Hunten DM. Atmospheric Evolution of the Terrestrial Planets. *Science* 1993; 259: 915–920.
- [26] Wickramasinghe C. The astrobiological case for our cosmic ancestry. *Int J Astrobiol* 2010; 9: 119.
- [27] Crick FHC, Orgel LE. Directed panspermia. *Icarus* 1973; 19: 341–346.
- [28] Horneck G. Survival of microorganisms in space: A review. *Adv Space Res* 1981; 1: 39–48.
- [29] Hill HGM, Nuth JA. The Catalytic Potential of Cosmic Dust: Implications for Prebiotic Chemistry in the Solar Nebula and Other Protoplanetary Systems. *Astrobiology* 2003; 3: 291–304.