

Fermi-Paradoxon

Das **Fermi-Paradoxon** ist ein Gedankengang des Physikers Enrico Fermi aus dem Jahr 1950. Fermi ging davon aus, dass es intelligentes außerirdisches Leben gebe, dass deren technisch hochentwickelte Zivilisationen über Millionen von Jahren aufrecht bestehen können, dass es ihnen in dieser Zeitspanne mittels interstellarer und intergalaktischer Raumfahrt möglich sei, ganze Galaxien zu kolonisieren, und dass dies der Wahrscheinlichkeit nach bereits geschehen sein sollte. Dass dennoch die Suche nach den Spuren von Außerirdischen bisher erfolglos blieb, erschien ihm paradox und als Hinweis darauf, entweder die Annahmen oder die Beobachtungen zu hinterfragen.

Eine detaillierte wissenschaftliche Betrachtung des Problems begann in den frühen 1970er Jahren mit Studien von Michael H. Hart, weswegen auch der Ausdruck *Fermi-Hart-Paradoxon* verwendet wird. Zu ernüchternden Ergebnissen kommen jüngste Lösungen einer Abwandlung der Drake-Gleichung unter Einbeziehung von Wahrscheinlichkeitsverteilungen von Sandberg, Drexler und Ord (2018), die eine nur geringe Wahrscheinlichkeit von außerirdischem Leben innerhalb und außerhalb der Milchstraße nahelegen.

Grundlegende Überlegung

Kern des Fermi-Paradoxons ist folgende Überlegung:

Aufgrund des Alters des Universums und seiner hohen Anzahl an Sternen sollte Leben auch außerhalb der Erde verbreitet sein, vorausgesetzt, die Entstehung von Leben auf der Erde wäre kein ungewöhnlicher Vorgang (Rare-Earth-Hypothese).

Ausgehend von der Annahme, dass die Erde keine absolute Ausnahme unter den Planeten und unser Sonnensystem nicht einzigartig ist (in dem Sinne, dass es intelligente Lebewesen enthält), steht die (bisher nicht bezifferbare) Möglichkeit im Raum, dass weitere technische Zivilisationen in unserer Galaxie existieren. Die Galaxis ist ungefähr 100.000 Lichtjahre breit. Ein Unterlichtantrieb, wie der des Projekt Icarus, mit einer Geschwindigkeit Faktor 0,01 bis 0,1 der Lichtgeschwindigkeit, würde (geradeaus und ohne Zwischenstopps) etwa 1 bis 10 Millionen Jahre für diese Strecke benötigen. Die Galaxis ist etwa 10 Milliarden Jahre alt. Eine Durchquerung wäre in der Dauer ihrer Existenz mehrfach möglich gewesen.

Wenn in der Milchstraße auch nur eine einzige Zivilisation existiert, die zu interstellarer Kolonisation fähig ist, dann könnte die gesamte Galaxis innerhalb weniger Millionen Jahre vollständig kolonisiert sein. Die Milchstraße ist nun weitaus älter als die notwendigen 20 bis 40 Millionen Jahre; folglich sollten außerirdische Zivilisationen überall in unserer galaktischen Nachbarschaft existieren. Bisher konnte jedoch kein Hinweis auf extraterrestrische Zivilisationen gefunden werden.

Mit dem Fermi-Paradoxon eng verbunden ist die Drake-Gleichung, mit deren Hilfe die Wahrscheinlichkeit für die gleichzeitige Existenz anderer Zivilisationen in der Milchstraße abgeschätzt werden soll. Da bisher jedoch die meisten Parameter der Drake-Gleichung unbekannt sind, kann diese derzeit kaum etwas zur Lösung des Paradoxons beitragen.

Letztlich werden bei diesem Erklärungsversuch die Parameter der Drake-Gleichung so gewählt, dass in unserer Galaxie nur eine einzige Zivilisation existiert – die unsere. Insofern verliert das Fermi-Paradoxon seinen paradoxen Charakter, weil bereits eine der Grundannahmen abgelehnt wird.

Obwohl diese Hypothese vielfach als zwingend überzeugend angesehen wird, widersprechen andere der Seltenheit erdähnlicher Planeten (was durch die zunehmende Zahl entdeckter Exoplaneten nahelegt) oder behaupten, komplexes Leben benötige nicht zwingend erdähnliche Bedingungen, um sich zu entwickeln (*siehe Kohlenstoffchauvinismus*).

Eine Sonderform dieses Argumentes geht davon aus, dass die Entwicklung höherer Intelligenz im Laufe der Evolution extrem unwahrscheinlich ist. So ist auch bei keiner der komplexen Lebensformen, die in der Vergangenheit auf der Erde existierten, die Entstehung beziehungsweise das Vorhandensein höherer Intelligenz bekannt.

Unmöglichkeit interstellarer Kolonisation / Kommunikation

Die Voraussetzung des Fermi-Paradoxons, nämlich eine Zivilisation, die zu interstellarer Kolonisation fähig ist, kann möglicherweise prinzipiell nicht erfüllt werden. Unter diesen Umständen könnte es in der Milchstraße mehrere technische Zivilisationen geben, die jedoch räumlich zu weit voneinander entfernt sind, um sich gegenseitig zu beeinflussen.

Nach dem Argument der Selbstauslöschung liege es in der Natur technischer Zivilisationen, sich zu zerstören. Nach Stephen Hawking sei die Entstehung von Leben wahrscheinlich und die Entwicklung von Intelligenz möglich, würde ab einem gewissen Punkt aber instabil werden, so dass es zu einer (unabsichtlichen) Selbstauslöschung käme. Mögliche Auslöser könnten (aktuell) z. B. sein: Atomarer Krieg, genmanipulierte Viren und unkontrollierbarer Treibhauseffekt. Der Technikphilosoph Nick Bostrom sieht daneben die Gefahr durch Nanobots oder einer sich explosionsartig entwickelnden Superintelligenz, die jeweils nicht mehr vom Mensch kontrollierbar seien, sowie prinzipiell noch unbekannter Unwägbarkeiten.

Astrophysikalische Erklärung

Gammastrahlenausbrüche (*GRBs*) gelten als die energiereichsten Phänomene im Universum. Sie können die über die gesamte Lebensdauer eines Sternes freiwerdende Energiemenge in Sekunden in Form fokussierter *Jets* abstrahlen. Auch über Lichtjahre entfernt können diese auf den in ihren Strahlenkegeln befindlichen Planeten Massensterben und die Vernichtung höherer Lebensformen auslösen. Dieser Effekt könnte bei entsprechender Häufigkeit für eine weitgehende Sterilisierung der kosmischen Lebensbedingungen verantwortlich sein. Die Wahrscheinlichkeit für einen die Lebensbedingungen der Erde zerstörenden GRB lag für die vergangenen 500 Millionen Jahre bei 50 %. Nach einer auf den Swift-Daten basierenden Abschätzung (*Tsvi Piran et al.*) soll in Galaxien, die sich in den ersten fünf Milliarden Jahren des Universums bildeten ($z > 0,5$), aufgrund intensiver GRB-Aktivität eine Entwicklung zu komplexeren Lebensformen generell unmöglich gewesen sein. Von den heute existierenden Galaxien soll nur in einer von zehn Leben – wie wir es kennen – ausreichend lange Zeit gehabt haben, sich ungestört entwickeln zu können – insbesondere jedoch in größeren Galaxien als unserer Milchstraße.

Mangelnde Sichtbarkeit

Das Aussenden von Radiosignalen zur Kommunikation ist relativ ineffizient. Falls alle Zivilisationen innerhalb kurzer Zeit zu effizienteren Kommunikationsmethoden übergehen, sinkt der Anteil an Radiostrahlung, über den sich eine Zivilisation bemerkbar machen würde.

Auch wurde vorgeschlagen, ein Ergebnis der Informationstheorie könne das Fehlen erkennbarer Signale erklären. Die Informationstheorie besagt, dass eine maximal komprimierte Nachricht für jene ununterscheidbar vom Hintergrundrauschen ist, die den Kompressionsalgorithmus nicht kennen. SETI hingegen sucht ausschließlich nach dem simpelsten aller Signale, einer unmodulierten Sinuskurve. Die Grundannahme von SETI ist die Bereitschaft anderer Lebensformen, sich durch ein einfach zu entdeckendes Signal deutlich mitzuteilen. Aus diesen Gründen würden die heutigen Suchmethoden eine hochgradig komprimierte Übertragung schlicht übersehen.

Sie existieren – wir werden ignoriert

Bei dieser Annahme wird vorausgesetzt, dass unter allen Zivilisationen in unserer Nachbarschaft ein Konsens darüber herrscht, eine Kontaktaufnahme zu vermeiden. Diese Spekulation wird teilweise auch als „Zoo-Hypothese“ bezeichnet.

Überlegungen uns selbst zu tarnen, sprechen für die Möglichkeit anderer, technisch höher entwickelter Gesellschaften, dies viel besser zu können.

Folgerung

Die bisherige Datenbasis lässt es nicht zu, zu einer Abschätzung auf Basis der Drake-Gleichung hinsichtlich der Häufigkeit außerirdischer Zivilisationen zu kommen.

Wissenschaftler vom *Future of Humanity Institute* an der Universität Oxford haben im Juni 2018 darauf hingewiesen, wie sehr Schätzungen auf Grundlage der Drake-Gleichung auf unausgesprochenen, aber unhaltbaren Vorannahmen beruhten; unter Berücksichtigung des Unsicherheitsfaktors von Schätzungen ergebe sich bei einer Neuberechnung der Drake-Gleichung, dass die menschliche Zivilisation die einzige in der Milchstraße, wenn nicht gar im Universum, sei, und das Fermi-Paradoxon als gelöst gelten dürfe.

Drake-Gleichung

Die **Drake-Gleichung** dient zur Abschätzung der Anzahl der technischen, intelligenten Zivilisationen in unserer Galaxie, der Milchstraße. Sie wurde von Frank Drake, einem US-Astrophysiker, entwickelt und im November 1961 auf einer Konferenz in Green Bank, USA, vorgestellt; sie ist daher auch als **Green-Bank-Formel** oder **SETI-Gleichung** bekannt. Die Formel wird häufig bei Überlegungen in Bezug auf die Suche nach extraterrestrischem Leben herangezogen. Es handelt sich bei der Gleichung um ein Produkt, von dem die meisten Faktoren unbekannt sind. Waren Drakes ursprünglichen Berechnungen sehr optimistisch was die Möglichkeit von außerirdischem Leben angeht, so kommen jüngste Lösungen einer

Abwandlung der Gleichung unter Einbeziehung von Wahrscheinlichkeitsverteilungen von Sandberg, Drexler und Ord (2018) zu ernüchternden Ergebnissen und legen eine nur geringe Wahrscheinlichkeit von außerirdischem Leben innerhalb und außerhalb der Milchstraße nahe.

Vorbetrachtung

Auf Schwefel und Silizium basierendes Leben wird in der Gleichung nicht berücksichtigt, da nicht genau vorhersehbar ist, ob überhaupt und unter welchen Bedingungen solches Leben entstehen kann. Die drakeschen Betrachtungen beziehen sich auf Leben, das sich unter bestimmten Bedingungen bezüglich der Verhältnisse von Stickstoff, Kohlenstoff und weiteren Unsicherheitsfaktoren entwickelt. Die Spezies Mensch gilt als Beweis, dass es funktionieren kann. Das System und der Planet, auf dem sich solches Leben entwickeln soll, muss nach dieser Theorie bestimmte astronomische und physikalisch-chemische Voraussetzungen erfüllen:

Der Zentralstern muss eine geeignete zirkumstellare habitable Zone aufweisen. Dies ist der Fall für Sterne der Spektralklassen F bis M und der Leuchtkraftklasse V. Damit sich einerseits Planeten mit geeigneter Chemie bilden können, andererseits diese Planeten vor allzu häufigen kosmischen Katastrophen wie Supernovaexplosionen geschützt sind, muss sich das System in der galaktischen habitablen Zone befinden. Damit genügend radioaktive Elemente zur Verfügung stehen, um einen Karbonat-Silikat-Zyklus als CO₂-Quelle in Gang zu halten, muss sich der Planet vor Ablauf des kosmischen habitablen Alters bilden (welches allerdings noch 10 bis 20 Milliarden Jahre andauern wird).

Neben diesen als allgemein anerkannten Bedingungen gibt es einige Einschränkungen, die in der Astrobiologie aufgrund der Entwicklung unserer Erde zwar für wahrscheinlich gehalten werden, die aber nicht als unbedingt notwendig anerkannt sind. Zum Beispiel geht man davon aus, dass die Rotationsachse nicht zu stark geneigt sein sollte, damit es keine großen jahreszeitlichen Unterschiede gibt. Ein Mond in der richtigen Größe stabilisiert die Neigung der Rotationsachse und somit das Klima, allerdings kann auch ein Planet mit hoher oder sogar chaotischer Achsneigung habitabel sein.

Gleichung

$$N = R_* \cdot f_p \cdot n_e \cdot f_l \cdot f_i \cdot f_c \cdot L$$

N gibt die mögliche Anzahl der außerirdischen Zivilisationen in der Galaxis an, die in der Lage und gewillt wären, zu kommunizieren.

Faktoren

*R** mittlere Sternentstehungsrate pro Jahr in unserer Galaxie:

Die mittlere Sternentstehungsrate ist durch empirische Beobachtungen wie zum Beispiel durch das Hubble-Weltraumteleskop relativ gut abschätzbar und wird zwischen 4 und 19 veranschlagt. Bei der Betrachtung ist zu beachten, dass ein Stern mittlerer Größenordnung benötigt wird. Sterne, die größer und leuchtstärker als die Sonne sind, verbrauchen ihre Energie bereits in weniger als einer Milliarde Jahre, so dass für die Entwicklung von Leben auf geeigneten Planeten nicht genug Zeit bleibt. Es wird deshalb nach Sternen gesucht, die

mit unserer Sonne vergleichbar sind, da man davon ausgeht, dass die Entwicklung von Leben wie auf der Erde etwa eine Milliarde Jahre dauert. Etwa 70 Prozent der Sterne sind leuchtschwache rote Zwerge. Zwar haben diese Sterne eine Lebensdauer, die um eine Größenordnung höher ist als die der Sonne, dafür ist ihre Leuchtkraft, ihre Masse und Gravitationskraft wesentlich geringer, wodurch die Habitable Zone sehr nah beim Zentralgestirn liegt und Planeten in dieser Zone demnach starken Gezeitenkräften ausgesetzt wären. Außerdem neigen rote Zwerge zu starken Änderungen der Sonnenaktivität, was der Entwicklung von Leben abträglich wäre.

Ferner ist ungefähr jede zweite Entstehung ein Doppel- oder Mehrfachsternsystem. Es handelt sich hierbei um zwei oder mehr Sterne, die sich gegenseitig umkreisen, genauer gesagt um ihren gemeinsamen Schwerpunkt rotieren. Physikalische Simulationen haben gezeigt, dass Planeten in solchen Systemen eine äußerst instabile Bahn haben und früher oder später in eine der Sonnen abstürzen oder gänzlich aus dem System hinausgeschleudert werden (Drei- und Mehrkörperproblem). Eine Ausnahme bilden Planeten, die von ihren Sonnen so weit entfernt sind, dass die Anziehungskraft der beiden Sterne auf den Planeten wie die eines einzelnen Sterns wirkt und der Planet dadurch wieder eine stabilere Bahn hat (Zweikörperproblem). Die Wahrscheinlichkeit, dass ein Mehrfachsternsystem über längere Zeit Planeten hat, galt lange als sehr gering, allerdings sind mittlerweile um mehrere Doppelsterne planetarische Begleiter gefunden worden.

f_p

Anteil an Sternen mit Planetensystem:

Wie viele Sterne in unserer Galaxie haben ein Planetensystem? Beobachtungen zeigen, dass ungefähr die Hälfte aller Sterne Planetensysteme wie unsere Sonne haben können. Seit 1995 wurden mit sehr empfindlichen Detektoren durch Messung der Radialgeschwindigkeit von Sternen und Beobachtungen von Planetentransits bereits über 3.600 extrasolare Planeten entdeckt (Stand: Juli 2017). Mit zunehmender Genauigkeit der Instrumente, neuen Methoden und besser auflösenden Teleskopen werden noch genauere Messungen möglich sein. Besonders die Mission des Weltraumteleskops Kepler hat die Anzahl der entdeckten kleineren Planeten vervielfacht. Vorher konnten vor allem extrasolare Planeten, die sehr massereich (mehrere Jupitermassen) und/oder sehr nahe an ihrem Stern sind, gefunden werden. In beiden Fällen gibt es voraussichtlich sehr unwirtliche Lebensbedingungen.

n_e

durchschnittliche Anzahl der Planeten (pro Stern) innerhalb der Ökosphäre:

Die Ökosphäre ist der Bereich im Planetensystem, in dem die physikalischen Bedingungen die Entstehung von Leben nicht von vornherein ausschließen. Ein Planet darf, je nach Sonnengröße, nicht zu nah und nicht zu weit von seinem Stern entfernt sein. Ist er zu weit weg, ist er zu kalt; ist er zu nahe, ist er zu heiß und der Sonnenwind bläst die Atmosphäre weg. In unserem Sonnensystem befinden sich Venus, Mars und Erde in der Ökosphäre. 2007 wurden erstmals zwei Exoplaneten entdeckt, die sich in der habitablen Zone befinden könnten: HD 209458 b, und der von seinen Entdeckern als erdähnlich bezeichnete Planet Gliese 581 c. Ob die Bedingungen dort aber wirklich lebensfreundlich sind, ist unter Wissenschaftlern umstritten.

Statistische Analysen der Daten des Kepler-Teleskops deuten darauf hin, dass es in der Milchstraße mehrere Milliarden erdgroße Planeten in der Ökosphäre um sonnenähnliche Sterne gibt.

f_l Anteil an Planeten mit Leben:

Auf wie vielen Planeten in der Ökosphäre entsteht Leben? Für diesen Faktor gibt es keine wissenschaftlich belegbaren Zahlen, denn bisher gibt es nur das Beispiel unseres Sonnensystems. Für die Zukunft erwartet man, mit empfindlicheren Teleskopen auch auf Exoplaneten die Spuren von Leben, zum Beispiel Sauerstoff in der Atmosphäre, suchen zu können.

f_i Anteil an Planeten mit intelligentem Leben:

Wenn sich auf einem Planeten Leben entwickelt, so muss es sich nicht zu intelligentem Leben entwickeln. Auch für diesen Faktor gibt es keine wissenschaftlich belegbaren Zahlen. Es kann nur unser Sonnensystem als Beispiel herangezogen werden. Hier stellt sich auch die Frage, wie Intelligenz definiert ist.

f_c Anteil an Planeten mit Interesse an interstellarer Kommunikation:

Wie viele der intelligenten Zivilisationen haben Interesse an Kommunikation mit anderen Individuen? Denn nur wenn sie Interesse an Kommunikation haben, besteht für uns die Möglichkeit, sie zu finden. Man geht davon aus, dass extraterrestrische intelligente Wesen auch auf die Suche nach Leben gehen.

L Lebensdauer einer technischen Zivilisation in Jahren:

Als technische Zivilisation bezeichnet man eine Zivilisation, die in der Lage ist ein Radiosignal aus dem Weltraum zu empfangen und ein Signal in den Weltraum zu senden. Leben auf Planeten ist durch externe und interne Faktoren bedroht. Eine komplette Zerstörung kann durch Ereignisse ausgelöst werden, die in der Erdgeschichte schon mehrmals zu Massenaussterben geführt haben. Dazu zählen drastische Klimaveränderungen z. B. durch massive Vulkanausbrüche und Einschläge von Kometen oder Kleinplaneten. Denkbar wäre auch die Selbstzerstörung einer technischen Zivilisation und die Zerstörung einer technischen intelligenten Zivilisation durch eine andere Spezies wie z. B. ein Virus.

Da die Lebensdauer von Sternen begrenzt ist, ist auch die Lebensdauer einer Zivilisation im jeweiligen Sonnensystem begrenzt. Zivilisationen außerhalb von Sonnensystemen müssten auf ausreichende sonnenunabhängige Energiequellen umgestiegen sein.

Unsicherheiten

Bestimmend für die Aussagekraft der Drake-Gleichung sind die Unsicherheiten der einzelnen Faktoren. Besonders zu den letzten vier Faktoren gibt es bestenfalls sehr weit streuende Vermutungen über den korrekten Wert. Dadurch wird die aus dem Produkt unsicherer Faktoren abgeschätzte Gesamtzahl intelligenter Zivilisationen extrem ungenau.

Die Drake-Gleichung bezieht sich nur auf unsere Galaxie, die Milchstraße, die eine Balkenspiralgalaxie ist. Diesem Balkenspiraltyp entsprechen nach heutigen Kenntnissen etwa $\frac{2}{3}$ der im Universum befindlichen Galaxien. Unter der Voraussetzung, dass das heute beobachtbare Universum ca. 50–100 Milliarden Galaxien ähnlichen Typs beherbergt, müsste der Wert aus der Drake-Gleichung für das gesamte Universum mit einem entsprechenden Faktor multipliziert werden. Damit erhöht sich zwar die abgeschätzte Gesamtzahl möglicher Zivilisationen ganz erheblich, bleibt jedoch aufgrund bislang unzureichender Daten aus anderen Galaxien immer noch extrem ungenau. Die ermittelten Schätzwerte basieren zudem

auf der Hochrechnung von lediglich vermuteten Ähnlichkeiten der Ausgangsdaten in allen Galaxien.

Die Drake-Gleichung bezieht sich explizit nicht nur auf die theoretisch mögliche Anzahl von Zivilisationen, sondern auf die praktische Möglichkeit von Kontakten. Da schon die nächste weitere Galaxie, der Andromeda-Nebel, 2,5 Millionen Lichtjahre entfernt ist, kommen diese und alle weiteren für praktische Kontaktaufnahme nicht in Betracht.

Der Biologe Ernst Mayr hat darauf hingewiesen, dass sich unter den circa 50 Milliarden Arten, die die Erde hervorgebracht hat, lediglich *eine* Intelligenz entwickelt habe.

Modelle

Auf der oben genannten Green-Bank-Konferenz wurden für die Drake-Gleichung drei Modelle dargestellt.

1. Konservatives Modell: Eine Zivilisation in unserer Milchstraße.
2. Optimistisches Modell: 100 Zivilisationen in unserer Milchstraße, 5000 Lichtjahre mittlerer Abstand zweier sendender Zivilisationen.
3. Enthusiastisches Modell: 4.000.000 Zivilisationen in unserer Milchstraße, 150 Lichtjahre mittlerer Abstand zweier sendender Zivilisationen.

Wenngleich diese Angaben angesichts der geschilderten enormen Unsicherheiten nicht widerlegt werden können, gehen verschiedene spätere Quellen von wesentlich kleineren Werten für das zweite und dritte Modell aus. Zum einen wird die Ökosphäre deutlich enger, wenn man hier schon die prinzipielle Möglichkeit *komplexeren* Lebens einbezieht. Zum anderen setzen die obigen Modelle voraus, dass mit großer Wahrscheinlichkeit irgendwann Leben entsteht, wenn über einen langen Zeitraum die Bedingungen hierfür günstig sind.

Der amerikanische Astronom und Exobiologe Carl Sagan schätzte die Anzahl an Zivilisationen auf zehn.

Rare-Earth-Hypothese

Die **Rare-Earth-Hypothese** (englisch für ‚Seltene-Erde-Hypothese‘) ist die Annahme, dass das komplexe vielzellige Leben der Erde auf eine unwahrscheinliche Kombination vor allem astrophysikalischer und geologischer Voraussetzungen zurückzuführen ist. Die Rare-Earth-Hypothese ist eine Gegenposition zum kopernikanischen Prinzip, zu dessen Befürwortern im Zusammenhang mit außerirdischem Leben unter anderem Carl Sagan und Frank Drake zählen. Demnach ist die Erde ein typischer Gesteinsplanet in einem typischen Planetensystem in einem nicht ungewöhnlichen Bereich einer häufig vorkommenden Balkenspiralgalaxie. Deshalb sei es wahrscheinlich, dass komplexes Leben im Universum häufig vorkomme. Die Rare-Earth-Hypothese behauptet das Gegenteil: Die Kombination von Planeten, Planetensystemen und galaktischen Regionen (die Lage des Sonnensystems innerhalb des Milchstraßensystems), welche so günstig für komplexes Leben wie das auf der Erde ist, sei sehr selten

Argumente für die Rare-Earth-Hypothese

Überblick

Die Rare-Earth-Hypothese nimmt an, dass das Auftauchen komplexen Lebens eine Reihe von günstigen Umständen erfordert. Dies betrifft unter anderem die folgenden Teilaspekte:

- die Lage innerhalb der Galaxie (galaktische habitable Zone),
- die Natur des Zentralgestirns,
- die allgemeine Konfiguration des Planetensystems
- die Lage innerhalb des Planetensystems (zirkumstellare habitable Zone),
- die Größe bzw. Masse des Planeten,
- das Vorhandensein eines großen Mondes im Orbit des habitablen Planeten,
- das Vorhandensein geologischer Voraussetzungen für ein planetares Magnetfeld und Plattentektonik,
- die chemische Zusammensetzung der Lithosphäre, Atmosphäre und Ozeane
- sowie das Auftreten „evolutionsfördernder“ Ereignisse, wie zum Beispiel eine massive Vergletscherung und Einschläge von Kometen oder Asteroiden in größeren Abständen.

Die Entstehung von intelligentem Leben könnte noch andere seltene Vorbedingungen benötigt haben.

Damit Leben auf einem kleinen, felsigen Planeten möglich ist, müssten nach Ward und Brownlee die Werte der Parameter innerhalb sehr enger Grenzen stimmen. Das Universum ist so groß, dass es sehr viele erdähnliche Planeten enthalten könnte. Sollten diese Planeten existieren, ist anzunehmen, dass diese viele tausend Lichtjahre voneinander entfernt sind. Diese riesigen Entfernungen machen es praktisch unmöglich, dass eine irgendwo entstandene intelligente Spezies mit einer anderen kommuniziert (um damit das Fermi-Paradoxon zu lösen). Eine Supernova ist Voraussetzung für Leben, aber kann auch sein Ende bedeuten. Ähnlich verhält es sich mit Asteroiden, die chemische Verbindungen und Wasser zur Erde bringen, während ein zu großes Bombardement andererseits zu einem Massenaussterben von Lebewesen führen kann.

Des Weiteren wird vorgebracht, die Entwicklung der Erde sei ein Glücksfall und nicht so einfach wiederholbar. Selbst wenn man annimmt, dass es tausend Sonnensysteme mit gleichem Ausgangszustand gibt, so wäre doch zu erwarten, dass die Beschaffenheit, Größe und die Bahneigenschaften ihrer Planeten zu unterschiedlich wären, um eine Wiederholung der Evolution, ähnlich der Entwicklung auf der Erde, in einem dieser Systeme zuzulassen. Dafür können die vier inneren Gesteinsplaneten als Beleg gelten: Sie sind aus sehr ähnlichem Ursprungsmaterial aufgebaut, unterscheiden sich aber doch grundlegend voneinander.

Erste Lebensformen sind vor mindestens 3 Milliarden Jahren entstanden (könnten aber noch älter sein; bis vor 3,8 Mrd. Jahren wird vermutet). Danach dauerte es sehr lange (bis etwa vor 600 Millionen Jahren), bis sich komplexe vielzellige Lebewesen (Tiere) entwickelten, wofür die unterschiedlichsten Gründe vorliegen könnten. Unter anderem gibt es Sauerstoff in der Atmosphäre erst seit etwa 2 Milliarden Jahren, und die Anreicherung durch die Lebewesen, die Photosynthese betrieben – die damit eine Voraussetzung für die weitere Entwicklung selbst wurde –, ging sehr langsam vor sich.

Die lange Zeitspanne vom ersten Auftreten von Bakterien bis zur kambrischen Explosion vor etwa 540 bis 490 Millionen Jahren deutet darauf hin, dass komplexes Leben, wie wir es auf

der Erde kennen, sehr lange für seine Entwicklung braucht (und genügend Sauerstoff in der Atmosphäre erfordert), und dass zudem die Bedingungen dafür sehr genau passen müssen. Zudem vollzog sich diese Entwicklung in den Ozeanen. Das heißt, höher entwickeltes Leben gibt es nur im letzten Zehntel der bisherigen Lebensdauer der Erde. Die weitere Entwicklung der Arten erfolgte damals auch nicht allmählich, sondern in größeren Sprüngen in relativ kurzen Zeiten. Das Leben entwickelte sich in seiner Komplexität anscheinend nicht linear (wie meist, bedingt durch die Evolutionstheorie, angenommen wird), sondern in sehr unregelmäßigen Sprüngen. Deshalb hat die Erforschung der kambrischen Explosion große Bedeutung für die Einschätzung, wie groß die Wahrscheinlichkeit ist, dass sich Planeten entwickelt haben, auf denen Leben möglich ist. Dass tierisches Leben sehr selten vorkommen dürfte und der Sprung von einfachem Leben zu komplexem sehr unwahrscheinlich ist, wird auch von der Rare-Earth-Hypothese vertreten.

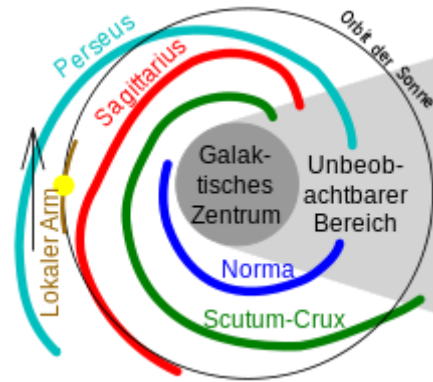
Ein weiteres Argument ist, dass komplexes Leben aufgrund seines ungleich komplizierteren Aufbaues viel empfindlicher gegen kosmische Katastrophen ist als die einfach aufgebauten einzelligen Prokaryoten (Bakterien und Archäen).

Außerdem kann nicht eingeschätzt werden, wie hoch die Barriere zwischen höher entwickelten Tieren und intelligenten Lebewesen ist, die mit anderen Arten im All kommunizieren könnten oder gar andere Planetensysteme bereisen oder besiedeln könnten.

Die galaktische habitable Zone

Der Rare-Earth-Hypothese zufolge kann im größten Teil des bekannten Universums, wie auch in großen Teilen unserer Galaxis, kein komplexes Leben vorkommen. Ward und Brownlee bezeichnen diese Regionen als „Todeszonen“. Diejenigen Bereiche, in denen komplexes Leben vorkommen könnte, werden galaktische habitable Zonen genannt. Diese Zone hängt in erster Linie von der Distanz vom galaktischen Zentrum ab. Zunehmende Entfernung vom Zentrum hat nämlich folgende Auswirkungen:

1. Es nimmt die Metallizität der Sterne ab, und Metalle (in der Astronomie werden außer Wasserstoff und Helium alle Elemente als Metalle bezeichnet) sind notwendig, um terrestrische Planeten zu bilden. Die schweren Elemente sorgen bei der Erde auch dafür, dass durch die Hitzeentwicklung aufgrund des radioaktiven Zerfalls im Innern des Planeten die Plattentektonik angetrieben wird.
2. Die Röntgen- und Gammastrahlung aus dem Schwarzen Loch im Zentrum der Galaxis und von den Neutronensternen in Zentrumsnähe wird weniger intensiv. Strahlen dieser Art werden als gefährlich für komplexes Leben erachtet. Deshalb führt die Rare-Earth-Hypothese für sich ins Feld, dass das frühe Universum und möglicherweise gegenwärtig Regionen im Zentrum der Galaxis, in denen die Sternendichte hoch ist und Supernovae häufiger auftreten, ungeeignet für die Entwicklung komplexen Lebens sind. Die Strahlung einer Supernova, die weniger als ein Lichtjahr entfernt wäre, würde die Erde sterilisieren. Leben beeinträchtigen würde eine Supernova bis zu einer Distanz von 30 Lichtjahren.
3. Gravitative Störungen von Planeten und Planetesimalen durch nahe Sterne werden weniger wahrscheinlich, da die Sternendichte bei zunehmender Distanz zum Galaxiezentrum abnimmt. Daher wird die Gefahr, dass der Planet durch einen Meteorboliden getroffen wird, umso geringer, je weiter der Planet vom Zentrum der Galaxie entfernt ist. Ein genügend großer Einschlag könnte das gesamte komplexe Leben eines Planeten auslöschen. Auch nimmt die Wahrscheinlichkeit ab, dass ein Stern dem anderen zu nahe kommt, wodurch es zu Bahnstörungen der Planeten käme, was mit einem Zusammenprall, einem Sturz in die Sonne oder einem Verlassen des Planetensystems enden könnte.



Schema der beobachteten Spiralarme des Milchstraßensystems (der gelbe Kreis stellt die Lage der Sonne dar)

(1) schließt äußere Regionen einer Galaxie aus; (2) und (3) dagegen die inneren Bereiche, Kugelsternhaufen und die Spiralarme von Spiralgalaxien. Diese Arme sind keine physikalischen Objekte, sondern Regionen einer Galaxie, die eine höhere Rate der Sternbildung aufweisen, während sie sich sehr langsam wellenartig durch die Galaxie bewegen. Besonders in Kugelsternhaufen ist die Dichte mit typischerweise 100.000 Sternen in einem Durchmesser von 10 bis 100 Lichtjahren extrem groß. Es würden die Planeten andauernd durch gravitative Wirkungen der Nachbarsterne, Novae und energiereiche Strahlen gestört werden. Bewegt man sich vom Inneren der Galaxie nach außen, steigen zunächst die Chancen, lebensfreundliche Bedingungen vorzufinden; weiter außen werden sie wieder ungünstiger. Deshalb ist die habitable Zone ringförmig eingebettet zwischen dem lebensfeindlichen Zentrum und den äußeren Bereichen. Das System muss lange Zeit stabil sein, um dem Leben die nötige Zeit für seine Entwicklung zu geben. Gerade in diesem Bereich des Milchstraßensystems (zwischen den großen Spiralarmen) mit geringer Sternendichte befindet sich die Sonne.

Befindet sich nun ein Planetensystem in dieser habitablen Zone (also weder im galaktischen Zentrum noch in den Spiralarmen), muss noch sichergestellt sein, dass es so lange in diesem Bereich bleibt, wie die Entwicklung komplexen Lebens benötigt. Wäre die galaktische Umlaufbahn des Planetensystems exzentrisch (elliptisch oder hyperbolisch), würde der Planet auch in die Bereiche der Spiralarme gelangen. Ist hingegen die Umlaufbahn fast kreisförmig und entspricht die Umlaufgeschwindigkeit der der Spiralarme, gelangt der Stern nur allmählich, wenn überhaupt, in die Spiralarmregion.

Elliptische oder irreguläre Galaxien sind für Leben generell weniger geeignet, da weniger Material zur Sternentstehung vorhanden ist. Dies führt zu geringerer Sternbildung und alte Sterne dominieren. In offenen Sternhaufen befinden sich meist sehr junge Sterne mit einem typischen Alter von 10 Millionen Jahren. Aufgrund der fehlenden Zeit und auch möglicher Störungen der Planetenbahnen durch die Nachbarsterne scheiden diese Orte ebenfalls für Leben aus.

Daraus schließen Befürworter der Rare-Earth-Hypothese, dass ein lebensspendender Stern eine nahezu kreisförmige Umlaufbahn um sein galaktisches Zentrum haben muss. Die benötigte Synchronisation der Umlaufgeschwindigkeit eines Zentralsterns mit der Wellengeschwindigkeit der Spiralarme kann nur innerhalb eines ziemlich kleinen Bereichs des Abstands vom galaktischen Zentrum erfolgen. Diese Region wird die „galaktische habitable Zone“ genannt. Lineweaver et al. berechnen, dass diese galaktische habitable Zone auf einen Ring von einem Durchmesser von 7 bis 9 Kiloparsec beschränkt ist. In diesen

Bereich fallen nicht mehr als 10 % der Sterne des Milchstraßensystems. Basierend auf konservativen Schätzungen, bezogen auf die Gesamtzahl der Sterne in der Galaxie, bleiben etwa 20 bis 40 Milliarden Sterne übrig.

Die Bahn der Sonne um das Zentrum des Milchstraßensystems ist tatsächlich beinahe kreisförmig. Die Umlaufzeit beträgt 226 Millionen Jahre. Damit stimmt sie mit der Rotationsperiode der Galaxis fast genau überein. Karen Masters berechnete, dass sich die Sonne alle 100 Millionen Jahre durch einen großen Spiralarm der Galaxie bewegt. Im Gegensatz dazu glaubt die Rare-Earth-Hypothese, dass die Sonne seit ihrer Formation noch keinen einzigen Spiralarm durchquert hat. Es meinen jedoch einige Forscher, dass mehrere Massenaussterben mit früheren Durchquerungen der Spiralarme zusammenhängen.

Metallizität

Es ist kein Weg bekannt, Leben ohne komplexe Chemie zu schaffen. Diese Chemie benötigt Metalle, das heißt, andere Elemente als Wasserstoff und Helium. Nur Wasserstoff mit 75 % und Helium-4 (^4He) mit 25 % Stoffmengenanteil sind, neben heute kaum noch vorhandenen Mengen Lithium, direkt nach dem Urknall entstanden. Das geschah beim ersten Fusionsprozess, der auch als primordiale Nukleosynthese bekannt ist. Dabei entstanden noch 0,001 % Deuterium sowie Spuren von Helium-3 (^3He) und Beryllium.

Mittelgroße Sterne wie die Sonne synthetisieren zunächst Helium aus Wasserstoff (Proton-Proton-Reaktion). In ihnen kann später der Drei-Alpha-Prozess beginnen, bei dem aus Helium Kohlenstoff entsteht. Alle schwereren Elemente können ausschließlich in Riesensternen erbrütet werden.

Der einzige bekannte Mechanismus, der Metalle schafft und verteilt, ist eine Supernova-Explosion. Das Vorhandensein von Metallen in Sternen wird durch ihr Absorptionsspektrum enthüllt. Eine Studie von Sternspektren zeigt, dass viele, möglicherweise die meisten Sterne, arm an Metallen sind. Niedrige Metallizität charakterisiert das frühe Universum, Kugelsternhaufen und andere Sterne, die sich formten, als das Universum noch jung war, des Weiteren Sterne in den meisten Galaxien, die keine großen Spiralgalaxien sind, und Sterne in den äußeren Bereichen aller Galaxien. Daher sind metallreiche Zentralsterne, die komplexes Leben ermöglichen könnten, höchstwahrscheinlich in den ruhigen Gebieten weit außerhalb des Zentrums in den großen Spiralgalaxien zu finden. Überdies ist in diesen Regionen die Strahlenbelastung generell geringer.

Es ist anzunehmen, dass nicht allzu lange vor der Entstehung des Sonnensystems eine oder mehrere Supernovae in der stellaren Nachbarschaft stattgefunden haben müssen. Die Häufigkeit von Supernovae nimmt mit der Zeit ab und damit auch die Entstehung von schweren Metallen. Vor fünf Milliarden Jahren war die Anzahl der Supernovae noch höher.

Bei der Entstehung der Erde und der anderen terrestrischen Elemente aus einem Teil des Urnebels des Sonnensystems konnten sich die leichten Elemente nicht halten. Überdies war in dem inneren Bereich der flachen Materiescheibe die Zusammensetzung der Elemente anders als weiter außen, wo die Gasplaneten entstanden. Dadurch unterscheiden sich die Gesteinsplaneten grundlegend von den Gasriesen (die eher dem durchschnittlichen Massenverhältnis der Elemente im Sonnensystem entsprechen). 99,86 % der gesamten Materie des Sonnensystems sind in der Sonne enthalten. Zwei Drittel der restlichen 0,14 % beansprucht dabei der Planet Jupiter. Die Sonne, ein Stern der Population I, enthält etwa 25 % mehr Metalle als andere nahe, vergleichbare Sterne und stellt damit einen Sonderfall dar.

Elementverteilung auf der Erde und ihre Bedeutung für Leben

Die häufigsten Elemente im Erdmantel sind (in Gewichtsprozent) Sauerstoff (45 %), Silizium (22 %) und Magnesium mit 23 % Anteil. Diese Elemente bilden in den chemischen Verbindungen SiO_2 (Siliciumdioxid) mit 46 % und MgO (Magnesiumoxid) mit 37,8 % die Hauptmasse mit den häufigsten Erscheinungsformen. Im Erdkern stellt Eisen mit 79,4 % Massenanteil das mit Abstand häufigste Element dar. Insgesamt besteht die Erde in Massenanteilen zu etwa 30 % aus Sauerstoff, 30 % aus Eisen, 15 % aus Magnesium, 15 % aus Silizium und zum Rest aus anderen Elementen.

Es ist eine Voraussetzung für Leben in einem Sonnensystem, dass die Materie Metalle enthält. Auch ein richtiger Anteil an Kohlenstoff für kohlenstoffbasierendes Leben ist wichtig. Aber es sollte auch nicht zu viel sein, um den Treibhauseffekt nicht zu sehr zu forcieren. Kohlenstoff ist ein grundlegendes Element für Leben, da es viele Variationen von Verbindungen mit anderen Elementen eingehen kann. Obgleich Silizium ebenfalls sehr viele Verbindungen eingehen kann (und es als Basis für Leben in anderen Formen dienen könnte, wie einige Wissenschaftler vermuten), ist es doch viel weniger geeignet als Kohlenstoff. Wasserstoff, der in Verbindung mit Sauerstoff in Form von Meerwasser existiert, macht nur 0,1 %, Kohlenstoff nur 0,05 % der Gesamtmasse der Erde aus.

Für einen Planeten, der Leben Platz bieten soll, ist auch ein dichter Kern aus Eisen, Nickel und weiteren Schwermetallen wichtig. Er kann ein Magnetfeld erzeugen, das den Planeten von schädlichen Strahlen aus dem Weltall abschirmt. Zudem befinden sich unter den Schwermetallen zahlreiche Elemente, die ausschließlich radioaktive Isotope aufweisen. Speziell Uran und Thorium tragen durch ihren radioaktiven Zerfall dazu bei, dass im Inneren eines Planeten Wärme produziert und seine Auskühlung stark verlangsamt wird. Die Wärme wird durch Konvektion nach außen abgegeben, was eine Voraussetzung für die Entstehung und Aufrechterhaltung von Plattentektonik ist. Diese wiederum wird begleitet von vulkanischer Aktivität, die eine bedeutende Quelle für das Treibhausgas CO_2 ist und damit für ausgeglichene globale Oberflächentemperaturen sorgt.

Das Leben selbst braucht neben Sauerstoff, Kohlenstoff, Stickstoff und Wasserstoff viele verschiedene chemische Elemente. In höher entwickeltem Leben wurden 26 verschiedene Metalle gefunden.

Ein geeigneter Zentralstern

Es wird vorausgesetzt, dass ein Stern felsige Planeten innerhalb der habitablen Zone besitzt. Obwohl die habitable Zone von heißen Sternen wie Sirius oder Wega breit ist, ergeben sich zwei Probleme:

1. Unter der Annahme, terrestrische Planeten hätten sich näher am Zentralstern gebildet (wie bei unserem Sonnensystem), würde sich der Planet zu nahe am Hauptstern befinden, um in der habitablen Zone zu liegen. Dies würde jedoch nicht einen natürlichen Mond eines Gasriesen ausschließen. Heiße Sterne strahlen auch mehr ultraviolette Strahlen ab, die jede planetarische Atmosphäre ionisieren und letztendlich abtragen würden. Zu intensives UV-Licht würde biologische Moleküle aufbrechen. So strahlt die Sonne weniger als 10 % ihrer Gesamtabstrahlung im ultravioletten Bereich ab, hingegen heißere Sterne wie Sirius mehr als die Hälfte.

2. Heiße Sterne haben, wie oben erwähnt, eine kurze Lebensdauer. Sie entwickeln sich bereits innerhalb einer Milliarde Jahre zu Roten Riesen. Diese Zeitspanne könnte für die Entwicklung höheren Lebens zu knapp sein.

Nach diesen Überlegungen können massive und leistungsstarke Sterne der Typen F6 bis O (siehe Spektralklassen) keinem vielzelligem Leben die nötigen Voraussetzungen bieten, ebenso alle Sterne, die sich außerhalb der Hauptreihe befinden wie Weiße Zwerge, Neutronensterne, Pulsare, Braune Zwerge (die streng genommen keine „richtigen“ Sterne sind) und Sterne, die sich im Riesenstadium befinden. Ferner kann sich aller Wahrscheinlichkeit nach kein höher entwickeltes Leben auf Planeten entfalten, deren Sonne ein veränderlicher Stern ist.

Problematisch für höheres Leben wären auch Doppelsterne, da sie ihre Bahnen gegenseitig erheblich stören. Etwa zwei Drittel aller Sterne sind Mitglieder von Doppel- oder Mehrfachsystemen. Neuere Studien besagen, dass Planeten nicht entstehen können, wenn die beiden Sterne nicht mindestens 50 AE voneinander entfernt sind. Planeten könnten auf zwei verschiedenen Umlaufbahnen laufen. Entweder um beide Sterne gemeinsam, wenn diese nicht weiter als 20 Mio. Kilometer voneinander entfernt wären, oder um einen Stern, wenn der andere Stern mindestens 1,6 Milliarden Kilometer vom anderen entfernt wäre.

Auf der anderen Seite haben die kleineren unter den Roten Zwergen mit üblicherweise etwa 10 % der Sonnenmasse habitable Zonen mit einem geringen Radius. Diese Nähe zum Hauptstern hat zur Folge, dass eine Seite des Planeten stets dem Stern zugewandt ist, während die andere Seite dauernd im Dunkeln liegt, ein Umstand, der als gebundene Rotation bekannt ist. Die sonnenzugewandte Seite wird dabei sehr heiß, während die abgewandte Seite sehr kalt bleibt. Solche Planeten innerhalb der habitablen Zone mit einer geringen Entfernung zum Hauptstern sind überdies einer größeren Gefahr von Sonneneruptionen ausgesetzt, die zu einer Ionisierung der Atmosphäre führen und folglich gegenüber komplexem Leben feindlich wären. *Rare-Earth*-Befürworter behaupten, dass Leben in solchen Systemen ausgeschlossen ist. Dennoch nehmen einige Astrobiologen an, dass es eine Lebenszone unter den richtigen Umständen geben könnte. Hätte ein Planet noch eine CO₂-reiche Atmosphäre, könnte auch die dunkle Nachtseite mit Wärme versorgt werden. Dies ist ein zentraler Punkt der Auseinandersetzung um diese Theorie, da diese späten K- und M-Sterne etwa 82 % aller wasserstofffusionierenden Sterne ausmachen.

Rare-Earth-Befürworter behaupten, dass die „passenden“ stellaren Typen eines Zentralsterns von F7 bis etwa K1 reichen. Solche Sterne treten eher selten auf: G-Typ-Sterne wie die Sonne – Gelbe Zwerge zwischen den heißeren F- und den kühleren K-Sternen – umfassen nur etwa 9 % aller wasserstofffusionierenden Sterne im Milchstraßensystem. Auch hier muss der Abstand des Planeten zum Stern ausreichend groß sein und die habitable Zone entsprechend weit vom Stern hinausreichen, damit der Planet nicht in eine gebundene Rotation gezwungen wird.

Bei älteren Sternen wie den Roten Riesen und den Weißen Zwergen ist es ebenfalls sehr unwahrscheinlich, dass sie Leben ermöglichen können. Rote Riesen treten häufig in Kugelsternhaufen und in elliptischen Galaxien auf. Weiße Zwerge sind meist sterbende Sterne, die das Stadium als Roter Riese schon hinter sich haben. Der Durchmesser eines Roten Riesen hat sich gegenüber dem jüngeren Stern bedeutend vergrößert. Ein Planet befände sich in der habitablen Phase, solange sich der Stern im frühen oder mittleren Stadium befindet. Expandiert der Stern am Ende seiner Entwicklung zum Roten Riesen, würde dieser

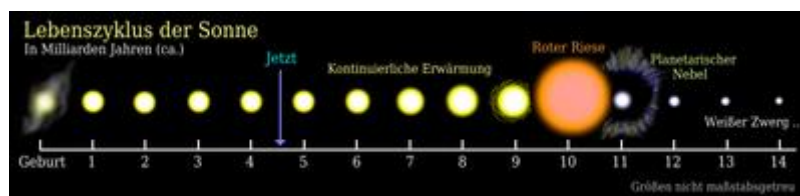
Planet regelrecht gegrillt werden (obwohl dann ein Planet in einer viel größeren Entfernung theoretisch habitabel würde).

Die Energieabgabe eines Sternes über seine Lebenszeit sollte sich nur langsam ändern. Variable Sterne wie zum Beispiel die Cepheiden wären sehr schlecht geeignet, Leben zu ermöglichen. Wenn die Energieabgabe des Zentralsterns plötzlich sinkt – auch für nur kurze Zeit –, könnte das Wasser des Planeten gefrieren. Wenn andererseits die Energiefreisetzung signifikant ansteigt, könnten die Ozeane verdampfen, was den Treibhauseffekt verstärken würde. Damit würde verhindert, dass sich später wieder Ozeane bilden.

Zirkumstellare habitable Zonen

Das Beispiel der Erde legt nahe, dass komplexes Leben Wasser in flüssigem Zustand erfordert. Darum muss sich der Planet in einer geeigneten Entfernung zum Zentralstern befinden. Dieser Bereich wird als habitable Zone oder Goldilocks Zone bezeichnet. Die habitable Zone stellt einen ringförmigen Bereich um den Zentralstern dar. Wenn ein Planet zu nahe oder zu fern seiner Sonne steht, wird die Oberflächentemperatur es nicht zulassen, dass Wasser in flüssigem Zustand vorliegt (obwohl flüssiges Wasser, wie beispielsweise bei Europa, Enceladus und Ceres, unter der Oberfläche existieren könnte). Kasting u. a. (1993) vermuten, dass die habitable Zone bei unserer Sonne etwa von 0,95 bis 1,15 Astronomische Einheiten reicht. Wichtig ist, dass der Planet in einem stabilen, nicht zu exzentrischen Orbit den Stern umkreist. Die empfangene Sonnenenergie kann bis zu 10 % schwanken, ohne große Auswirkungen auf die Habitabilität zu haben. Die habitable Zone wurde früher noch enger angesetzt, bis man den thermostatischen Effekt des CO₂-Silikat-Zyklus entdeckte. Bei zu großer Wärme nimmt die Verwitterung aus der Atmosphäre mehr Kohlendioxid, was den Treibhauseffekt wieder senkt. CO₂ gelangt großteils durch vulkanischen Ausstoß in die Atmosphäre.

Die habitable Zone variiert mit dem Spektraltyp und dem Alter des Zentralsterns. Da 95 % der Sterne weniger massereich sind als die Sonne, stellt sie nicht, wie gemeinhin angenommen, einen durchschnittlichen Stern dar. Die Lebenszone für einen Hauptreihenstern bewegt sich langsam und stetig nach außen, bis er zu einem Weißen Zwerg wird, wobei zu diesem Zeitpunkt die habitable Zone verschwindet. Die habitable Zone ist mit dem Treibhauseffekt, der durch Wasserdampf und Spurengase wie Kohlendioxid (CO₂) oder Methan in der Atmosphäre entsteht, eng verbunden. So ist die durchschnittliche Oberflächentemperatur der Erde um etwa 40 °C höher, als sie es ohne diesen Effekt wäre.



Der Lebenszyklus der Sonne

Da ein Stern mit der Zeit immer leuchtkräftiger wird, wird die Zone, die sich über die gesamte Zeit im habitablen Bereich befindet, auch als CHZ (constant habitable zone) bezeichnet. So war die Strahlungsleistung der Sonne in ihrer Anfangszeit etwa 30 % geringer als heute. In 4 Mrd. Jahren wird die Sonne doppelt so hell sein wie heute. Dann beginnt das Stadium als Roter Riese, das bis zu einer Milliarde Jahre anhalten kann. Auch gibt es noch die AHZ

(animal habitable zone), die enger ist als die habitable Zone, da Temperaturen über 50 °C komplexeres Leben verhindern würden.

Planetensystem

Eine Gaswolke, die einen Stern entstehen lässt, kann ebenfalls Gasplaneten, metallarme jovianische Planeten wie Jupiter oder Saturn, entstehen lassen. Diese Gasplaneten haben jedoch keine feste Oberfläche, die eine Voraussetzung für komplexes Leben sein sollte (obwohl ihre Monde diese aufweisen könnten). Wards und Brownlees Behauptungen zufolge sollte ein Sonnensystem, das komplexes Leben hervorbringt, mehr oder weniger wie unser Sonnensystem strukturiert sein, mit kleineren dichten inneren Planeten und Gasplaneten in den äußeren Bereichen. Neuere Forschungsergebnisse stellen diese strikte Forderung jedoch in Frage.

Wichtig ist auch der Transport biogener Moleküle vom äußeren Sonnensystem zu den inneren Planeten. Dieses Material gelangt durch Ablenkung der großen Gasplaneten im äußeren Sonnensystem zu den inneren Planeten. Auch heute noch nimmt die Erde jährlich etwa 40.000 Tonnen Materie auf. Im Bereich der Erde gab es vergleichsweise wenig Wasser und Kohlenstoff. Wäre die Erde aus dem Material entstanden, das sich im Asteroidengürtel zwischen Mars und Jupiter befindet, wäre zu viel Wasser vorhanden. Die Erde wäre mit einem mehrere 100 Kilometer tiefen Ozean bedeckt und die Atmosphäre mit einer zu hohen Menge von CO₂ angereichert gewesen. Damit wäre ein starker Treibhauseffekt entstanden.

Durch Gasriesen kann ein Planetensystem relativ leicht instabil werden. Ein dritter großer Gasriese (neben Saturn und Jupiter) hätte schon alleine für einen Rauswurf von Planeten aus dem Sonnensystem oder den Sturz in die Sonne sorgen können. Auch müssen die Umlaufbahnen sehr kreisförmig sein. Ein der Erde zu naher Gasriese wäre ebenfalls problematisch (immerhin ist Jupiter fünfmal weiter von der Sonne entfernt als die Erde).

Störungen der Umlaufbahn

Ein Gasriese darf nicht zu nahe an einem Objekt sein, das Leben beherbergt (es sei denn, das Objekt ist einer seiner Monde). Ein naher Aufenthalt könnte die Umlaufbahn eines Leben tragenden Planeten stören, entweder direkt, oder indem er in die habitable Zone eindringt. Auch andere ungünstige Anordnungen wie sehr exzentrische Umlaufbahnen stellen ein Problem dar. Die in den letzten Jahren entdeckten Hot Jupiters sind solche ungünstigen Planeten. Sie könnten die Bahnen der anderen inneren Planeten empfindlich stören.

Nach Newtons Gesetz der Dynamik (Zweites Newtonsches Gesetz) können chaotische planetarische Umlaufbahnen entstehen, speziell in einem System, das große Planeten wie Gasriesen mit hoch exzentrischen Bahnen (Dreikörperproblem) enthält.

Die Voraussetzung für stabile Umlaufbahnen schließt Systeme mit Exoplaneten aus, die große Planeten mit engen Umlaufbahnen um ihren Zentralstern (Hot Jupiters) haben. Man nimmt an, dass solche Gasriesen viel weiter entfernt vom Zentralstern entstanden, dann jedoch mit der Zeit nach innen gewandert sind. Dabei könnten sie die Bahnen der anderen Planeten, die in der habitablen Zone kreisen, durcheinandergebracht haben.

Einschläge und Massenaussterben

Etwa alle 300.000 Jahre kommt es im Durchschnitt zu einem Einschlag eines Objektes mit einer Größe von 1 Kilometer. 10 Kilometer große Asteroiden oder andere Himmelskörper treffen die Erde etwa alle 100 Millionen Jahre, was in Massensterben und Massenaussterben resultieren kann. Der letzte dieser großen Treffer und seine Folgen für das Klima dürfte zum Aussterben der Dinosaurier vor 65 Millionen Jahren geführt haben. Zur Zeit des großen Bombardements dürfte die Erde mehrere Male sterilisiert worden sein. Hätte es bis dahin schon Leben gegeben, hätte es sich wieder neu entwickeln müssen.

Wassertransport durch Kometen

Die terrestrischen Planeten sind bei ihrer Entstehung aufgrund ihrer Materie zunächst einmal staubtrocken. Ein Modell von Dr. John Chambers vom NASA Ames Research Center zeigte, dass der Wassertransport von den äußeren Kometen ins Innere eines Planetensystems am besten funktionierte, wenn die Planeten in der Position von Jupiter und Saturn viel kleiner wären als diese beiden Gasriesen in unserem Sonnensystem. Deshalb war die Effizienz des Wassertransports in unserem Planetensystem vergleichsweise gering. Sogar schon kleinere Gasplaneten wie Uranus oder Neptun würden für erheblich mehr Wasser für terrestrische Planeten sorgen. Auf der anderen Seite wäre so ein Planet bald mit Wasser völlig bedeckt, und dies wäre nicht förderlich für eine artenreiche Evolution.

Ein geeigneter Planet

Der Planet sollte sich im Bereich der habitablen Zone befinden. Die Temperaturen sollten in einem Bereich sein, in dem Wasser in flüssigem Zustand existieren kann. Neben Wasser sollte eine ausreichende Menge von Kohlenstoff (oder für hypothetische andere Lebensformen Silizium) zur Verfügung stehen. Diese Elemente erlauben sehr vielfältige Verbindungen mit anderen chemischen Elementen, die maßgeblich zur Bildung von Aminosäuren und Proteinen beitragen.

Weiter sind eine ausgeprägte Atmosphäre mit Sauerstoff, die vor schädlicher Strahlung schützt und einen Stoffwechsel zulässt, und ein Magnetfeld, das kosmische Strahlung ablenkt, für Leben, wie wir es kennen, grundlegend. Die Rotationsachse sollte nicht zu stark geneigt sein, und die Rotation sollte nicht zu lange dauern.

Es muss sich nicht zwangsläufig um einen Planeten handeln. Auch ein Mond eines größeren Planeten wie eines Gasriesens könnte in der richtigen Entfernung zu seiner Sonne die Voraussetzungen für Leben bieten. Mögliche Kandidaten in unserem Sonnensystem wären unter anderem der Jupitermond Europa oder die Saturnmonde Titan (→Leben auf Titan) oder Enceladus. Da sie sehr weit von der Sonne entfernt sind (und es daher auf der Oberfläche zu kalt ist), könnte sich Leben nur in einem hypothetischen Ozean unter der Oberfläche bilden.

Größe eines Planeten

Ein Planet, der zu klein ist, kann keine dichte Atmosphäre halten. Das hat zur Folge, dass die Temperatur größeren Schwankungen unterworfen ist und die Durchschnittstemperatur sinkt. Große und beständige Ozeane wären nicht möglich. Ein kleiner Planet würde zu einer rauen Oberfläche mit hohen Bergen und tiefen Canyons tendieren. Der Kern würde früher auskühlen und Plattentektonik würde es nicht so lange geben, wie es auf einem größeren Planeten der Fall wäre, oder könnte gar nicht auftreten. Die Atmosphäre soll neben der

Aufgabe, für ein konstantes Klima zu sorgen, auch noch in der richtigen Zusammensetzung und mit entsprechendem Druck vorhanden sein.

Atmosphäre

Die Zusammensetzung der Atmosphäre wird durch biologische Prozesse kontrolliert. Die irdische Atmosphäre unterscheidet sich wesentlich von den Atmosphären der anderen terrestrischen Planeten, sowohl in Druck als auch in ihren Stoffverteilungen. Da sie im chemischen Ungleichgewicht ist, kann sie nur durch die Lebewesen in dieser Form aufrechterhalten und erneuert werden. Andernfalls würde Sauerstoff schnell mit der Materie der Oberfläche oder mit dem Stickstoff reagieren. Darüber hinaus würde ohne Lebewesen der CO₂-Anteil der Atmosphäre stetig steigen und den Treibhauseffekt verstärken. Schon aus großer Entfernung würde man bei einem Planeten, der eine solche oder ähnliche Komposition der Atmosphäre vorweisen kann, auf biologische Vorgänge schließen können. Diese Suche nach Signaturen von Atmosphären wäre deshalb auch einer der Schwerpunkte bei der geplanten Suche mit dem Terrestrial Planet Finder gewesen.

Wasser

Der Wasserkreislauf ist für Leben an Land wichtig. Wasser ist ein gutes Lösungsmittel. Das ist sowohl für die Verteilung von Elementen auf der Oberfläche als auch für den Stofftransport zu den Zellen in Lebewesen wichtig. In den Regionen, in denen viel Wasser vorkommt, gibt es etwa zehnmal mehr Arten von Lebewesen als in ariden Gebieten.

Die Herkunft des Wassers ist noch nicht ganz geklärt. Ein Teil stammt von der Erde selbst (infolge der Planetenbildung), ein anderer Teil geht auf Kometeneinschläge (siehe auch Herkunft des irdischen Wassers) zurück. Insgesamt macht Wasser etwa 0,5 % der Erdmasse aus.

Dass Wassereis leichter ist als Wasser in flüssigem Zustand ist wichtig für Leben in Seen und Ozeanen, da Wasser von oben zufriert und Leben durch diese isolierende Schicht geschützt ist. Das Wasser kann Wasserstoffbrücken bilden. Diese haftende Eigenschaft ist vorteilhaft für die DNA, da die Verbindungen der Basen etwa zum Kopieren der Erbinformation leicht getrennt werden können.

Für Leben, wie wir es auf der Erde kennen, müssen folgende Voraussetzungen erfüllt sein:

- es muss genügend Wasser vorhanden sein, um Ozeane bilden zu können
- an der Oberfläche muss Wasser existieren
- Wasser darf nicht ins Weltall entweichen
- es muss hauptsächlich in flüssigem Zustand vorliegen.

Großer Mond

Der irdische Mond ist ungewöhnlich, da die anderen Gesteinsplaneten im Sonnensystem entweder keinen Mond (Merkur und Venus), oder winzige Trabanten, wie die wahrscheinlich eingefangenen Asteroiden des Mars, aufweisen. Nur der Zwergplanet Pluto hat einen im Verhältnis vergleichbar großen Mond.

Der Mond hat drei wichtige Auswirkungen auf die Erde und damit auch auf das Leben. Er stabilisiert die Erdachse über einen langen Zeitraum (so schwankt sie langfristig höchstens ein

bis zwei Prozent), bewirkt die Gezeiten (die Gezeitenkräfte des Mondes sind doppelt so groß wie die der Sonne) und bremst die Erdrotation.

Die Entstehung des Mondes ist wahrscheinlich auf den Einschlag eines marsgroßen Objektes, Theia, auf die junge Erde zurückzuführen. Dieser gewaltige Einschlag verursachte auch die heutige Neigung der Rotationsachse und hatte Einfluss auf die Rotationsgeschwindigkeit. Nach seiner Bildung war der Mond nur etwa 25.000 km von der Erdoberfläche entfernt und die Erde rotierte in etwa 5 Stunden. Es ist denkbar, dass es auch auf Venus so eine Kollision gab, jedoch retrograd und damit die extrem langsame Rotation verursachte und auch kein Mond übrigblieb. Hätte der marsgroße Körper nicht zu diesem Zeitpunkt, in dem Winkel und in dieser Geschwindigkeit eingeschlagen, gäbe es auf der Erde vermutlich noch mehr Wasser, Kohlenstoff und Stickstoff. Möglicherweise wäre ein hoher Treibhauseffekt die Folge.

Die relativ kurze Rotationsdauer reduziert die täglichen Temperaturschwankungen und macht dadurch die Photosynthese möglich. Weiter behauptet die *Rare-Earth-Hypothese*, dass die Achsenneigung nicht zu groß oder klein sein darf (relativ zur Umlaufbahnebene). Ein Planet mit einer sehr stark geneigten Rotationsachse würde extreme klimatische Variationen in den Jahreszeiten hervorrufen, die nicht förderlich für komplexes Leben wären. Durch die nur gering geneigte Achse entstehen gleichbleibende Jahreszeiten und dies wirkt ebenfalls klimastabilisierend. Wäre die Erdachse mehr als 54 Grad geneigt, bekämen die Pole über das Jahr mehr Strahlungsleistung von der Sonne ab als die Äquatorregionen.

Bei einem Planeten mit geringer oder gar keiner Neigung würde hingegen wieder die stimulierende Wirkung auf die Evolution fehlen. So gesehen ist die Neigung der Rotationsachse der Erde „gerade richtig“. Die Gravitation eines großen Satelliten stabilisiert zudem die Neigung der Rotationsachse des Planeten. Ohne diesen Effekt würde die Achsenneigung chaotisch schwanken. Dies würde es komplexem Leben unmöglich machen, sich zu entfalten. Der Mond entfernt sich etwa 4 cm pro Jahr. In 2 Milliarden Jahren wird er zu weit entfernt sein, um die Rotationsachse der Erde weiterhin langfristig stabilisieren zu können. Gleichzeitig wird die Sonne in dieser Zeit viel heißer sein als heute. Würde die Umlaufbahn entgegengesetzt der Rotationsachse der Erde verlaufen, würde er sich immer weiter an die Erde annähern und schließlich auf sie stürzen. Beim Mond Triton wird das in ferner Zukunft der Fall sein, wenn er mit dem Neptun kollidiert, sofern er nicht schon vorher durch die Gezeitenkräfte zerrissen wird.

Hätte die Erde keinen Mond, wären die Gezeiten der Ozeane durch die alleinige Wirkung der Sonne höchst moderat. Ein Mond verstärkt die Gezeitentümpel, die wiederum essentiell für die Formation von Makromolekülen und damit komplexen Lebens sind.

Ein großer Satellit erhöht auch durch die Gezeitenwirkung auf die Oberfläche des Planeten die Wahrscheinlichkeit von Plattentektonik. Nach der Entstehung des Mondes waren die Gezeitenkräfte immens. Die Fluten waren mehrere hundert Meter hoch und die Erdkruste wurde durchgewalkt. Der Einschlag, der zur Bildung des Mondes führte, könnte die Plattentektonik überhaupt erst in Gang gebracht haben. Sonst würde die Erdkruste einfach nur die gesamte Erde bedecken und keinen Platz für die ozeanische Erdkruste lassen. Es ist möglich, dass die gewaltige Mantelkonvektion, die notwendig ist, um die Kontinentalbewegung anzutreiben, ohne die Inhomogenität der Erdkruste nicht entstanden wäre. Es gibt jedoch überzeugende Beweise, dass es in der Vergangenheit auch auf dem Mars Plattentektonik gab, die ohne diesen initiierenden Mechanismus auskam.

Mal verfestigte (vor mehr als 4 Milliarden Jahren), schon etwa die Hälfte der Wärme aus dem Inneren entwichen.

Ohne Plattentektonik gäbe es keine größeren, zusammenhängenden Landmassen und keine hohen Gebirge in der Form, in der wir sie kennen. Die Bildung der heutigen Kontinentalkerne erfolgte in relativ kurzer Zeit. Von vor 2,7 bis 2,5 Milliarden Jahren wuchs der Anteil kontinentaler Kruste von 5 auf 30 %. Plattentektonik sorgt auch für die fortlaufende Anreicherung bzw. die Rückführung von chemischen Elementen und Verbindungen in die Meere, sowohl direkt durch Materialnachschub aus dem Erdmantel als auch durch den Wasserkreislauf, wobei gelöstes Material durch Flüsse ins Meer gelangt. Früher war die Plattentektonik intensiver und die Platten bewegten sich schneller, da noch mehr Wärme im Erdinneren gespeichert war. Besonders intensiv war sie u. a. zur Zeit der kambrischen Explosion. Zu dieser Zeit zerbrach eine riesige Landmasse (Pannotia) in kleinere Kontinente.

Die Plattentektonik ist ursächlich für die Kontinentaldrift. Diese hat wiederum verschiedene Effekte auf das Weltklima und die Lebewelten. So führt die Drift großer Landmassen über die Polarregionen zu großflächigen Vergletscherungen, was wiederum Rückkopplungen auf das Klima, u. a. infolge einer Erhöhung der Albedo, d. h. den Wert der Rückstrahlung von Sonnenlicht von der Erdoberfläche, hat. Brechen größere Landmassen auseinander führt das zur Isolation der Lebewelten auf dem Land und auf den Schelfen, da Meere für die meisten Landbewohner und die Tiefsee bzw. der offene Ozean für die meisten Schelfbewohner nur schwer überbrückbare Barrieren darstellen. Dies erhöht global gesehen die Artenvielfalt. Die aktuelle Konfiguration der Kontinente mit fünf relativ isolierten Kontinentalblöcken (Nordamerika, Südamerika, Afrika-Eurasien, Australien und Antarktika) begünstigt eine global eher hohe Artenvielfalt. Es gibt heute etwa 3 bis 30 Millionen verschiedene Arten.

Die NASA-Wissenschaftler C. McKay und H. Hartmann glauben jedoch, dass gerade die Plattentektonik die Entwicklung von höherem Leben lange hinausgezögert hat, da die wichtige Voraussetzung, die Verfügbarkeit von genügend Sauerstoff, so lange von ihr verhindert wurde. Es wird der Sauerstoff vorher durch Oxydation verbraucht. Erst nach einer Sauerstoffsättigung im Meer kann sich Sauerstoff in der Atmosphäre anreichern. Die Plattentektonik beansprucht durch den ständig neuen Oxydationsprozess aber mehr Sauerstoff. Die beiden Wissenschaftler gehen weiter davon aus, dass sich Leben, wenn es auf dem Mars solches gegeben hat, dadurch ungleich schneller (möglicherweise innerhalb von 100 Millionen Jahren) gebildet haben könnte.

„Trägheitsbedingtes Austauschereignis“

Es gibt deutliche Hinweise darauf, dass die Rate der Kontinentaldrift während der kambrischen Explosion ungewöhnlich hoch war. Tatsächlich bewegten sich in 15 Millionen Jahren (oder weniger) Kontinente von arktischen in äquatoriale Breiten und umgekehrt.

Klima, Temperatur und Treibhauseffekt

Die globale Durchschnittstemperatur betrüge ohne die Treibhausgase, wie auf dem Mond, $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$. Tatsächlich liegt sie $33\text{ }^{\circ}\text{C}$ höher bei $+15\text{ }^{\circ}\text{C}$. Verantwortlich dafür sind die Gase in der Atmosphäre, die drei oder mehr Atome enthalten. Diese sorgen dafür, dass Infrarotstrahlung nicht ungehindert wieder zurück ins All abgestrahlt wird, und führen so zu einer Erwärmung der Erde. Zu erwähnen sind in diesem Zusammenhang besonders Kohlendioxid (CO_2), Wasserdampf, Ozon (O_3) sowie Methan (CH_4), das gleich aus fünf Atomen besteht. Obwohl es sich hierbei um sogenannte atmosphärische Spurengase mit nur

geringen Volumenanteilen handelt (Wasserdampf hat bis zu 4 %, CO₂ 0,04 %), gelten sie als entscheidend für das Klima auf der Erde. Besonders wichtig ist der Treibhauseffekt für tierisches Leben, das sich am besten bei einer Temperatur von +2 °C bis +45 °C entwickelt.

Gäbe die Sonne für längere Zeit weniger Strahlung ab, würden die Kontinente mit mächtigen Eisschilden und die Ozeane mit einer dicken Meereissschicht überzogen. Auch wenn die Sonne dann wieder mit normaler Leuchtkraft strahlte, würde durch die starke Albedo zu viel Wärme wieder abgestrahlt, um die Ozeane wieder aufzutauen. Dies entspricht einem „sich-selbst-verstärkenden globalen Eishauseffekt“ (engl.: *global runaway Icehouse effect*). Umgekehrt würden bei längerfristig vermehrter Energieabgabe der Sonne die Ozeane verdampfen und es würde auch danach bei normaler Leuchtkraft wegen des Treibhauseffektes des Wasserdampfes zu keiner nennenswerten Abkühlung mehr kommen („sich-selbst-verstärkender globaler Treibhauseffekt“ oder engl.: *global runaway greenhouse effect*), vgl. galoppierender Treibhauseffekt.

Magnetfeld

Das Magnetfeld schützt einerseits vor tödlichen Strahlen und Sonnenwind, andererseits gewährleistet es, dass die Atmosphäre nicht nach und nach abgetragen wird, wie dies beim Planeten Mars der Fall war.

Warum einfaches Leben häufiger vorkommen sollte

Die Verfechter der Rare-Earth-Hypothese glauben jedoch, dass einfaches Leben relativ leicht entstehen könnte. Bewiesen ist die Annahme jedoch nicht, da außer auf der Erde bis jetzt keine Lebensformen bekannt sind.

Anfang der 1980er Jahre wurden Kleinlebewesen in Umgebungen gefunden, die so extrem waren, dass man bis dahin annahm, Leben könne dort nicht existieren.

Tief unter der Erde, in Meerestiefen von Tausenden von Metern, in kochend heißem Wasser und in der Nähe der *Black Smoker* (Schwarze Raucher) wurden Bakterien und Archäen entdeckt, die unter extremen Bedingungen wie hoher Hitze, großem Druck, völlig ohne Sauerstoff und ohne Licht leben können. Es wurden Arten entdeckt, die bei 105 °C am besten gedeihen und sich bis 112 °C reproduzieren. Aber es sind auch schon Einzeller gefunden worden, die bis 121 °C Hitze bestehen können. Andere Arten zeichnen sich dadurch aus, dass sie in sehr salziger, saurer oder basischer Umgebung leben. Auch in Eisbergen oder gefrorenem Meereis wurden Lebewesen nachgewiesen. Viele davon verwenden nicht Licht als Energiequelle (Photosynthese), sondern Schwefelwasserstoff oder Methan (siehe auch Extremophile).

Auch in der Erdkruste gibt es Leben. Bei Bohrungen in Südafrika wurden Lebewesen in einer Tiefe von 3,5 Kilometern bei Temperaturen von über 70 °C nachgewiesen. Der Astronom und Geologe Thomas Gold vermutete, dass die Masse aller Lebewesen unter der Oberfläche bis zum Siebenfachen der Masse der Lebewesen, die auf der Oberfläche leben, ausmachen könnte. So gesehen könnte auch beispielsweise unter der Oberfläche von Pluto Leben möglich sein.

Demnach kann man darauf schließen, dass einfaches Leben nicht so hohe Anforderungen an seine Umgebung stellt, wie früher angenommen wurde. Das bestärkt Hoffnungen, dass es auch auf anderen Himmelskörpern unter harschen Bedingungen Leben geben könnte. Dies

würde auch für Planeten gelten, die weit von ihrer Sonne entfernt sind, da diese Lebewesen nicht auf deren wärmendes Licht angewiesen wären. Dies gilt auch für Monde, wie zum Beispiel in unserem Sonnensystem den Jupitermond Europa oder die noch weiter entfernten Saturnmonde Titan und Enceladus. Auf dem Mars herrschten vor 3 Milliarden Jahren viel höhere Temperaturen, die Atmosphäre war dichter und auf der Oberfläche gab es Wasser. Demnach sollte es für Mikroben nicht zu schwer gewesen sein, sich auf dem Mars zu entwickeln und zu leben. Das Konzept der habitablen Zone müsste man, bezieht man die Extremophilen mit ein, neu definieren.

Ob jetzt Leben auf einem Planeten nur existieren kann (und hierher transportiert wurde) oder ob es dort entstanden ist, ist jedoch ein wichtiger Unterschied. Erwähnenswert ist jedoch, dass gerade anscheinend die ältesten Lebewesen, wie diese, die sich kaum verändert haben, diejenigen sind, die auch unter sehr unwirtlichen Bedingungen gedeihen können. Die widerstandsfähigsten sind die Archäen, daneben gibt es noch einige thermophile Bakterien. Durch ungünstige Klimatalagen wie lange Eiszeiten oder kosmische Katastrophen können höher entwickelte Lebewesen rasch aussterben, wohingegen einfaches Leben diese Zeiten länger überbrücken kann.

Offene Fragen zur Entstehung von Leben

Es gibt hier noch mehrere ungelöste Fragen. Offen ist immer noch die Frage, ob RNA der Vorläufer von DNA war. Da sie einander bedingen, ist das ein „Henne-Ei-Problem“ hinsichtlich der Frage, wer zuerst da war. Messenger-RNA könnten jedoch Teilaufgaben von DNA übernommen haben (RNA-Welt-Hypothese). Dabei kann neben der eigentlichen Aufgabe, Proteine zu bilden, noch die Aufgabe der Speicherung der Baupläne teilweise mitübernommen werden.

Ebenso ist die Frage, ob sich alles Leben aus einem einzigen erstmals entstandenen DNA-Molekül entwickelt hat oder ob mehrere Moleküle unabhängig voneinander entstanden sind, noch ungeklärt. Weiters ist der Prozess vom Übergang von unbelebter zu belebter Materie noch offen. Auch Kristalle zeigen ähnliche Eigenschaften wie reproduzierende biologische Formen. Auch die Frage, wann und warum es zur Bildung von Eukaryoten bzw. zur Abspaltung von den Prokaryoten kam, ist unbeantwortet. Dies erfolgte erst ein bis eineinhalb Milliarden Jahren nach dem ersten Auftreten der Prokaryoten. Prokaryoten können aufgrund des einfacheren Aufbaus im Temperaturbereich von 0 bis 100 °C bestehen, Eukaryoten nur bis etwa 60 °C. Sicher nachgewiesen sind sie erst ab einem Zeitpunkt vor 1,6 Milliarden Jahren. Das war in etwa der Zeitpunkt, wo sich tierisches Leben aufgrund von erstmals genügend vorhandenem Sauerstoff bilden konnte.

Ungewiss ist auch, wie weit sich die Extremophilen und die Exemplare vor 3 Milliarden Jahren ähneln oder ob sich seit damals das Erbgut entscheidend verändert hat. Es könnte sein, dass es eine Zeit evolutionärer Experimente gab, in der sich am Ende eine einzige Art durchgesetzt hat. Während sich Prokaryoten besonders an chemische Prozesse zur Energiegewinnung angepasst haben, entwickelten sich Eukaryoten eher in Richtung Größe und Variationen im Körperbau weiter.

Einen Sonderfall nimmt ein Virus ein, das für sich nicht lebensfähig ist, sich aber dennoch vermehren kann, indem es in andere Zellen eindringt und sie infiziert, und so sein Erbgut verbreitet.

Die Beantwortung dieser Fragen würde helfen, die Wahrscheinlichkeit der Entstehung von primitivem Leben besser einschätzen zu können.

Situation in der Frühzeit der Erde

Leben müsste sich auf der Urerde nach dem Abklingen des großen Bombardements (vor etwa 3,8 Milliarden Jahren) sehr rasch entwickelt haben bzw. müsste zu dieser Zeit die Besiedelung schnell passiert sein. Bereits bis spätestens vor 3,5 Milliarden Jahren sind Lebewesen nachgewiesen worden. Stanley Miller (Mitinitiator des Miller-Urey-Experiments) behauptete, dass sich der Übergang von präbiotischer Materie zu den ersten Cyanobakterien innerhalb von 10 Millionen Jahren vollzogen haben könnte.

Erste Lebensformen

Entgegen älteren Ansichten war die Uratmosphäre nicht reduzierend (mit einem hohen Methan- und Ammoniakanteil), sondern bestand vor allen Dingen aus Kohlendioxid (100- bis 1000-mal mehr als heute). Nur das Ozeanwasser hatte aufgrund des fehlenden Sauerstoffs chemisch reduzierende Eigenschaften. Es war heiß (sowohl die Atmosphäre als auch das Ozeanwasser), das Wasser bedeckte bis auf ein paar Vulkane die gesamte Erdoberfläche und viele chemische Elemente und Verbindungen waren aufgrund der heftigen vulkanischen Tätigkeit vorhanden. Immer wieder verdampfte ein Großteil des Meeres durch kosmische Einschläge, um anschließend wieder herabzuregnen. Die intensive UV-Strahlung (aufgrund des fehlenden freien Sauerstoffs konnte sich keine Ozonschicht bilden), die nahezu ungehindert die Oberfläche erreichte, kam als hindernder Faktor für Leben noch dazu.

Die Wiege des Lebens waren offenbar nicht die lauen Teiche, wie Darwin gemeint hat, sondern geschützt vor Meteoriten und UV-Strahlung die Meeresböden, oder sie lag tief unter der Erdoberfläche. Die ersten Lebewesen waren möglicherweise mesophile (wärmeliebenden) Archäen (die thermophilen Archäen entstanden erst später aufgrund von noch extremeren Bedingungen).

Die Theorie der Panspermie hingegen besagt, dass das Leben nicht auf der Erde entstanden sei, sondern vom frühen Mars, der vor Jahrmilliarden viel lebensfreundlicher gewesen sein dürfte, stamme. Fast 10 Prozent des Materials, das vom Mars durch kosmische Einschläge in den Weltraum geschleudert wurde, sei auf der Erde gelandet.

Vor etwa 1,2 Milliarden Jahren tauchten die ersten Tiere auf. Dies ist jedoch weitgehend umstritten, da keine Fossilien gefunden wurden, die älter als 600 Millionen Jahre zu sein scheinen. Auf der anderen Seite behaupten dies jedoch die Genetiker aufgrund der „molekularen Uhr“. Größere (makroskopische) Tiere entstanden etwa vor 600 Millionen Jahren. Damit ergibt sich die Frage, warum es so lange gedauert hat und ob dafür gewisse Umweltbedingungen (geänderte chemische Zusammensetzung der Meere, freier Sauerstoff in Atmosphäre und Ozeanen, Eiszeit, Kontinentaldrift) erforderlich sind oder ob es nur eine Frage der Zeit war, die die Evolution braucht. Diese Erkenntnis ist auch wichtig in der Einschätzung, ob es auf anderen Planeten zur Entwicklung von tierischem Leben kommen kann. Sauerstoff ist auch ein Hauptfaktor für das Größenwachstum von Lebewesen. Ohne Sauerstoff bleiben sie meist so klein, dass sie für das bloße Auge nicht sichtbar sind.

Schneeball Erde

Es gab mindestens zwei globale Eiszeiten, während deren die gesamte Erde (bis auf die Äquatorgebiete) zufror (im Gegensatz zu jüngeren Eiszeiten, die nur die Polgebiete bis Regionen der mittleren Breite betrafen). Die erste war vor 2,5 Milliarden Jahren, die zweite etwa vor 600 bis 800 Millionen Jahren. Beide stimmen mit wichtigen Übergängen zeitlich überein, das erstmalige Auftauchen der Eukaryoten und der Beginn der Entwicklung der Tiere (kambrische Explosion). Nach der ersten globalen Eiszeit, auch als „Schneeball Erde“ (engl. *Snowball Earth*) bezeichnet, war plötzlich viel freier Sauerstoff vorhanden. Das Ende der Eiszeit wurde durch die Anreicherung von Treibhausgasen in der Atmosphäre durch Vulkane ausgelöst. Die Lebewesen, die die Eiszeit in größerer Tiefe oder nahe Vulkanen oder Geysiren überlebten, mussten sich radikal umstellen. Diejenigen, die das schafften, entwickelten sich mit dem nun vorhandenen Sauerstoff in eine andere Richtung weiter. Eine andere Ursache für die schnelle Weiterentwicklung damals könnte die fortschreitende Isolation der Lebewesen infolge der Plattentektonik gewesen sein.

Kambrische Explosion

Im Zuge der kambrischen Explosion entwickelten sich viele Phyla, wovon einige mittlerweile bereits ausgestorben sind. Diese Tatsache ist von zentraler Bedeutung, dass alle Baupläne in dieser relativ kurzen Zeit „entworfen“ wurden und die Bandbreite damals höher war als heutzutage. Gründe für diesen Schwung könnte der hohe Sauerstoffgehalt damals, in großen Mengen verfügbare Phosphatvorräte, die schnelle Kontinentalverschiebung, ein mögliches Kippen der Erdachse oder eine Kombination aus diesen Faktoren gewesen sein.

Vor etwa 200 bis 300 Millionen Jahren lag der Volumenanteil des Sauerstoffs in der Atmosphäre mit bis zu 35 % so hoch wie nie zuvor (und auch nachher; derzeit liegt er bei etwa 21 %). Dies begünstigte das Größenwachstum einiger Tiere.

Massenaussterben

In der Geschichte der Erde gab es etwa 15-mal größere Massenaussterben. Als Ursache kommen in Frage: Änderung der Rotationsdauer der Erde, eine Verschiebung der habitablen Zone, ausgelöst durch eine Änderung in der Leuchtintensität der Sonne oder der Bewegung der Erde, Kometen-, Meteoriten- oder Asteroideneinschläge, eine Supernova, die die Ozonschicht zerstört haben könnte, Gammastrahlenausbrüche, Eiszeiten, Zeiten höheren Treibhauseffekts und schlussendlich eine intelligente Lebensform (der Mensch heute). Zum mit Abstand verheerendsten Aussterben kam es vor 250 Millionen Jahren an der Perm-Trias-Grenze.

Hauptsächlich sind die Faktoren, die zum Massenaussterben führen, Änderung im Klima, Änderung der Zusammensetzung der Atmosphäre (wie etwa Kohlendioxid- oder Sauerstoffgehalt) und kosmische Einschläge.

Rätselhaft ist das plötzliche Aussterben von vielen Arten am Ende der kambrischen Explosion, nachdem sich gerade in dieser Zeit die Vielzahl von Arten gebildet hatte. Es gab zwar viele Phyla und Spezies, aber jeweils nur eine sehr begrenzte Anzahl von Individuen einer Art. Deswegen starben bestimmte Arten aus. Bemerkenswert ist noch, dass seit dem Ende der kambrischen Explosion kein einziges Phylum mehr ausgestorben ist.

So gesehen ist Diversität der größte Schutz vor dem Aussterben ganzer Arten, denn je höher die Entwicklung (Komplexität), desto anfälliger ist die Art, ausgelöscht zu werden. Dem entspricht, dass noch nie ein Massenaussterben von Bakterien beobachtet wurde.

Situation auf dem Planeten Mars

Der Mars liegt je nach Definition am Rand oder knapp außerhalb der habitablen Zone. Es sind bis zum heutigen Tag auf ihm keine Lebensspuren nachgewiesen, weder gegenwärtige noch vergangene. Das bedeutet auch, dass man nicht ausschließen kann, dass es auf dem Mars jemals Leben gegeben hat.

Jedenfalls gab es früher viel mehr Wasser und eine dichtere Atmosphäre als heute, wenngleich, verglichen mit der Erde, viel weniger Wasser und eine schon immer dünnere Atmosphäre. Dass es ehemals Wasser gegeben haben muss, erkennt man an ausgetrockneten Flusstälern und anderen Erosionserscheinungen.

Einige Forscher glauben, dass ein großer Einschlag möglicherweise lokal riesigen Schaden angerichtet habe, aber die globalen Auswirkungen der Katastrophe weniger stark gewesen seien als auf der Erde, denn das Klima habe sich wegen der geringen Menge an Wasserdampf weniger starker Treibhauseffekte aufgrund der dünneren Atmosphäre weniger stark verändert, so dass eventuell vorhandenes Leben nicht so dramatisch beeinträchtigt worden wäre.

Forschung und Möglichkeiten zum Nachweis

Bewohner eines mehr oder weniger fernen Sternsystems könnten bei der Auswertung des Spektrums der Atmosphäre der Erde im infraroten Wellenbereich die interessante Entdeckung machen, dass im Gegensatz zu den meisten anderen Planeten die Atmosphäre der Erde Anteile von Wasserdampf, Ozon und Kohlendioxid aufweist. Dies ist nicht im chemischen Gleichgewicht. Somit könnten sie schließen, dass der Planet Oberflächengewässer besitzen muss (dass der Planet flüssiges Wasser erlaubt und sich somit in der habitablen Zone befinden muss). Der Nachweis von Ozon ließe auf freien Sauerstoff in der Atmosphäre schließen, den es ohne Lebewesen, die Photosynthese betreiben, nicht geben könnte, da er sonst schnell mit anderen Stoffen reagieren würde und nur durch fortwährende Bildung nachgeliefert werden kann.

Die nachgewiesene Signatur Sauerstoff, Stickstoff und Wasserdampf in der Atmosphäre eines Exoplaneten wäre ein starkes Indiz für biologische Prozesse. Sauerstoff macht einen großen Anteil an der Erde aus (85 % Anteil im Volumen und 45 % Anteil an Gewicht) und wirkt prinzipiell toxisch auf Lebewesen, es sei denn, sie haben sich an den Umgang und Verwertbarkeit mit ihm angepasst. Sie müssen auch Schutzmechanismen für diesen reaktionsfreudigen Stoff entwickelt haben.

Die Auswertungen der Materialien des Mondes, die durch die Apollomissionen auf die Erde gebracht wurden, haben erwartungsgemäß keine Ergebnisse gebracht, die auf Leben hindeuten könnten.

Auch das Viking Programm hat keine eindeutig positiven Resultate vom Mars geliefert. Noch ist offen, welche Ergebnisse vom Mars Sample Return Programm zu erwarten sind.

Das Projekt SETI sucht nach Radiowellen (und im optischen Bereich) nach Hinweisen einer höheren Zivilisation. Die Suche konzentriert sich vor allem auf die Frequenz des neutralen Wasserstoffs bei 1,42 GHz.

Rare-Earth-Gleichung

Die Rare-Earth-Gleichung ist die Antwort von Ward und Brownlee auf die Drake-Gleichung. Sie berechnet N , die Anzahl von erdähnlichen Planeten in der Milchstraße, die komplexes Leben beherbergen, als:

$$N = N^* \cdot n_e \cdot f_g \cdot f_p \cdot f_{pm} \cdot f_i \cdot f_c \cdot f_l \cdot f_m \cdot f_j \cdot f_{me}$$

wobei:

- N^* ist die Anzahl der Sterne im Milchstraßensystem. Die Anzahl kann nicht gut geschätzt werden, weil die Masse der Milchstraße nicht genau bekannt ist. Darüber hinaus ist die Anzahl der sehr kleinen Sterne nicht bekannt. N^* macht mindestens 100 Milliarden aus, und könnte bis zu 500 Milliarden betragen, wenn es viele leuchtschwache Sterne gibt.
- n_e ist die durchschnittliche Anzahl der Planeten in der habitablen Zone eines Sterns. Diese Zone ist sehr eng, denn sie ist dadurch beschränkt, dass die durchschnittliche Temperatur über die gesamte Zeit, die komplexes Leben benötigt, sich zu entwickeln, in dem Bereich sein muss, in dem Wasser flüssig bleibt. Daher ist $n_e = 1$ wahrscheinlich die Höchstgrenze.

Wir nehmen $N^* \cdot n_e = 5 \cdot 10^{11}$ an. Die Rare-Earth-Hypothese kann dann als das Produkt von neun Rare-Earth-Faktoren betrachtet werden, die unten aufgelistet sind. Dieses Produkt

ist nicht größer als 10^{-10} , es könnte aber sogar nur 10^{-12} sein. Im letzteren Fall könnte kleiner als 1 oder nahe 0 sein. Ward und Brownlee berechnen den Wert von N nicht, weil es zu einigen der unten angegebenen Faktoren keine Daten gibt. Die Erde, ein Gesteinsplanet, umkreist einen G2-Stern in einer ruhigen Ecke der großen Balkenspiralgalaxie, und die Heimat der einzigen intelligenten Spezies, die wir kennen, ist unsere Erde selbst.

- f_g ist der Anteil der Sterne in der galaktischen habitablen Zone (Ward, Brownlee und Gonzalez schätzen diesen Faktor auf 0,1).
- f_p ist der Anteil der Sterne im Milchstraßensystem mit Planeten.
- f_{pm} ist der Anteil der Planeten, die felsig („metallisch“) anstatt gasförmig sind.
- f_i ist der Anteil der habitablen Planeten, bei denen Mikroorganismen entstehen. Ward und Brownlee glauben, dieser Anteil sei nicht zu niedrig.
- f_c ist der Anteil der Planeten, bei denen sich komplexes Leben entwickelt. 80 % der Zeit ab dem Zeitpunkt, zu dem die ersten Mikroorganismen entstanden, gab es nur bakterielles Leben. Daher glauben Ward und Brownlee, dass der Anteil sehr klein sein muss.
- f_l ist der Anteil der gesamten Lebensdauer eines Planeten, während dessen komplexes Leben existiert. Komplexes Leben kann zeitlich nicht unbegrenzt andauern, da sich der Energieausstoß eines Sterns, der komplexes Leben gedeihen lässt, je nach Spektraltyp des Sterns, allmählich erhöht, bis sich der Zentralstern zum Roten Riesen entwickelt, um dann

alle Planeten in der habitablen Zone zu verschlingen. Wenn man genügend Zeit voraussetzt, kann auch eine Katastrophe das gesamte Leben auslöschen, und diese Gefahr steigt mit zunehmender Dauer immer mehr an.

- f_m ist der Anteil der habitablen Planeten mit einem großen Mond. Wenn die Entstehung des Mondes durch die Kollisionstheorie zutreffend erklärt wird, ist diese Zahl sehr klein.
- f_j ist der Anteil der Planetensysteme mit großen Gasriesen. Diese Zahl könnte relativ groß sein.
- f_{me} ist der Anteil der Planeten, die nur mit einer genügend kleinen Wahrscheinlichkeit von einem Auslöschungsereignis betroffen sind. Ward und Brownlee behaupten, dass die niedrige Anzahl solcher Ereignisse auf der Erde, die seit der kambrischen Explosion stattfanden, ungewöhnlich ist. So wird auch dieser Wert als relativ niedrig angenommen.

Die Rare-Earth-Gleichung beachtet, im Unterschied zur Drake-Gleichung, nicht den Faktor der Wahrscheinlichkeit, dass komplexes Leben sich zu intelligentem Leben entwickelt, das Technologie entdeckt und entwickelt (Ward und Brownlee sind auch keine Evolutionsbiologen). Barrow und Tipler fassen den Konsens unter den Biologen dahingehend zusammen, dass der Weg der Evolution von primitiven kambrischen Chordatieren – zum Beispiel Pikaia – zum *Homo sapiens* ein höchst unwahrscheinliches Ereignis war. Zum Beispiel hat das große Gehirn des Menschen adaptive Nachteile gebracht, da sein Stoffwechsel sehr aufwändig ist, es eine lange Schwangerschaft und eine Kindheit erfordert, die mehr als 25 % der durchschnittlichen Gesamtlebenszeit eines Menschen einnimmt. Andere unwahrscheinliche Kennzeichen des Menschen sind:

- Er ist das einzige momentan existierende bipede Landwirbeltier (außer Vögeln). Kombiniert mit der ungewöhnlichen Auge-Hand-Koordination ermöglicht dies geschickte Manipulationen der physisch-materiellen Umgebung mit seinen Händen;
- Ein Stimmorganismus, der weit ausdrucksfähiger ist als der jedes anderen Säugetiers und der das Sprechen ermöglicht. Die Sprache macht es möglich, dass Menschen untereinander kooperieren, Wissen teilen und sich eine Kultur schaffen und aneignen können.
- Die Fähigkeit, abstrakte Begriffe zu formulieren bis zu einem Grad, der die Erfindung der Mathematik, die Entdeckung der Wissenschaften und der Technik ermöglichte. Zu beachten ist, in welcher kurzen Zeit die Menschheit die wissenschaftliche und technologische Entwicklung durchlaufen hat.

Kritik

Kritik an der Rare-Earth-Hypothese drückt sich in verschiedenen Formen und Argumenten aus.

Exoplaneten sind häufig

Gegenwärtig sind fast 3700 Exoplaneten in 2751 Planetensystemen bekannt (Stand: Oktober 2017), und es werden laufend weitere entdeckt. Alan Boss vom Carnegie Institution for Science schätzt, dass es etwa 100 Milliarden erdähnliche Planeten allein im Milchstraßensystem geben könnte. Boss glaubt, viele könnten einfache Lebensformen aufweisen und es könnte Tausende von Zivilisationen in der Galaxie geben. Er vermutet, dass jeder sonnenähnliche Stern im Durchschnitt einen erdähnlichen Planeten in seinem System besitzt.

Die meisten der bisher entdeckten Exoplaneten sind jedoch Gasriesen, die sehr nahe (meist viel näher als der Abstand von Merkur zur Sonne) um ihren Zentralstern kreisen. Es kann angenommen werden, dass solche Planetensysteme keine erdähnlichen wasserreichen Planeten mit dauerhaft stabilen Umlaufbahnen beherbergen. Da man massereiche Objekte nahe am Zentralstern am ehesten (und mit den derzeit angewendeten Methoden zuerst) entdecken kann, kann man jedoch keinesfalls darauf schließen, dass solche Systeme typisch wären. Es dürfte sich vielmehr um ein momentan bestehendes Messungsartefakt handeln, und der Kenntnisstand zum Aufbau fremder Planetensysteme wird sich wahrscheinlich mit dem Fortschritt in der astronomischen Forschung noch ändern.

Evolutionäre Biologie

Zentral an der Rare-Earth-Hypothese ist die folgende Behauptung über die Evolution: Während Mikroben im Universum häufig auftreten könnten, ist dies bei komplexem Leben nicht der Fall. Die Hypothese schließt damit, dass komplexes Leben selten ist, da es sich nur auf der Oberfläche eines erdähnlichen Planeten oder auf einem geeigneten Mond eines Planeten entwickeln kann. Erdähnliche Planeten könnten tatsächlich sehr selten sein, ein nicht auf Kohlenstoff basierendes komplexes Leben könnte sich möglicherweise aber in anderen Umgebungen entwickelt haben.

Kohlenstoffchauvinismus

Kohlenstoffchauvinismus (englisch *carbon chauvinism*) ist ein polemischer Begriff der Astrobiologie und philosophischen Bewusstseinsdebatte. In der Astrobiologie werden Positionen als kohlenstoffchauvinistisch kritisiert, wenn sie die Möglichkeit der Entstehung von außerirdischem Leben nur auf Kohlenstoffbasis diskutieren. In der Bewusstseinsdebatte ist der Vorwurf des Kohlenstoffchauvinismus gegen Positionen gerichtet, die Bewusstseins- und Gehirnzustände miteinander identifizieren und somit die Möglichkeit von bewussten Systemen ohne biologisches Gehirn ausschließen. Diese Debatte wird insbesondere in Bezug auf die Möglichkeit von bewussten Computern oder Robotern diskutiert.

Leben

Da für das Leben und seine Entstehung nur die kohlenstoffbasierte, organische Biologie als Erfahrungswert existiert, wird diese als Ausgangspunkt für Theorien zur Entstehung von Leben im Allgemeinen verwendet. Bereits 1973 verwendete der Astrophysiker Carl Sagan den Begriff „Kohlenstoffchauvinismus“, um die Begrenztheit des menschlichen Denkens über extraterrestrisches Leben zu illustrieren. Man könne in keiner Weise ausschließen, dass sich Leben auf anderen Planeten in einer ganz anderen, anorganischen Form entwickelt habe.

Das beliebteste Beispiel für ein alternatives Element als Basis für Leben ist Silicium, das ähnliche Eigenschaften wie Kohlenstoff aufweist. Allerdings sind Mehrfachbindungen im Vergleich zu Kohlenstoff schwerer herzustellen, und langkettige Siliciumverbindungen sind deutlich starrer und unflexibler als entsprechende Kohlenstoffverbindungen. Außerdem gibt es in der Erdhülle mehr als 100-mal so viele Siliciumatome wie Kohlenstoffatome und dennoch basiert das irdische Leben auf Kohlenstoff.

Die weitgehende Beschränkung der Astrobiologie auf Kohlenstoff ist jedoch nicht an die Annahme geknüpft, dass die Entwicklung von Leben auf der Basis anderer Elemente unmöglich sei. Vielmehr wird der Bezug auf organisch-chemische Verbindungen methodologisch gerechtfertigt: Über die Umweltbedingungen auf Planeten jenseits des Sonnensystems liegen nur wenige Daten vor, in jedem Fall lässt sich die Existenz oder Nichtexistenz von Leben nicht direkt untersuchen. Die Astrobiologie könne daher allenfalls zu Wahrscheinlichkeitsabschätzungen kommen, indem sie nach Planeten suche, deren Umweltbedingungen der Erde hinreichend ähnlich für die Entwicklung von organischem Leben sind. Welche Bedingungen für die Entwicklung von anorganischem Leben notwendig wären, sei demgegenüber vollkommen unbekannt, weswegen die Wissenschaft hierzu keine seriösen Aussagen machen könne. In diesem Sinne bezieht sich etwa die bekannte, exobiologische Drake-Gleichung nur auf organisches Leben.

Bewusstsein

In den 1950er Jahren wurde die materialistische Identitätstheorie als Reaktion auf den Behaviorismus entwickelt. Behavioristen erklären, dass ein Bewusstseinszustand nichts anderes als ein bestimmtes Verhaltensmuster sei. Gegen eine solche Positionen spricht, dass etwa Schmerzen auf eine bestimmte Weise empfunden werden (vgl. Qualia) und daher mehr als bloßes Verhalten darstellen. Die Philosophen Ullin Place und John Jamieson Carswell Smart erklärten daher, dass man Bewusstseinszustände mit Gehirnaktivitäten identifizieren sollte. „Kopfschmerzen haben“ hieße also nichts anderes als „in einem bestimmten Gehirnzustand sein“.

Gegen die Identitätstheorie wird unter anderem der Einwand des Kohlenstoffchauvinismus erhoben: Wenn Bewusstseins- und Gehirnzustände allgemein miteinander identifiziert werden, so schließt man aus, dass Systeme ohne biologisches Gehirn Bewusstsein haben können. Dies würde etwa die Existenz von bewussten Robotern oder bewussten, anorganischen Lebensformen prinzipiell unmöglich machen. Der Einwand des Kohlenstoffchauvinismus sagt jedoch, dass man entsprechende Systeme zumindest nicht prinzipiell ausschließen könne. Infolge dieses Einwands wurde in der Philosophie des Geistes der Funktionalismus entwickelt. Funktionalisten erklären, dass man Bewusstseinszustände mit abstrakten, funktionalen Zuständen identifizieren solle, die durch Verbindungen zwischen Eingabe-, Ausgabe- und Übergangszuständen definiert sind. Solche funktionalen Zustände lassen sich in sehr verschiedenen physischen Systemen realisieren, etwa in einem biologischen Gehirn oder einem Computer.

Quelle: mehrere (reduzierte) Wikipedia-Artikel zu den Themen Fermi-Paradoxon, Drake-Gleichung, Rare-Earth-Hypothese, Kohlenstoffchauvinismus

s. auch <https://www.youtube.com/watch?v=9WBwbVOUqp0>