Chemie schafft Leben – wenn die Physik stimmt

Warum es wohl Leben auf fremden Planeten gibt – auch anders als wir denken

Rolf Kickuth, Gaiberg

Noch ist kein Beweis dafür erbracht worden, dass es Leben auf fremden Planeten oder Monden gibt. Die Anzeichen mehren sich jedoch lawinenartig. Warum es also wahrscheinlich Leben auf anderen Planeten gibt – und warum wir noch nichts von außerirdischen intelligenten Lebensformen erfahren haben, stellt dieser Artikel zur Diskussion.

In den Tagen der Produktion dieser CLB machte eine Meldung aus NASA-Kreisen Furore: „We're going to have strong indications of life beyond Earth within a decade, and I think we're going to have definitive evidence within 10, 20 to 30 years," sagte Ellen Stofan, Chefwissenschaftlerin der amerikanischen Weltraumbehörde (Abbildung 1). Sie erwartet also starke Hinweise für außerirdisches Leben in zehn, definitive Beweise in spätestens 30 Jahren, aber sie schränkte ein: „Wir sprechen nicht über kleine grüne Männchen, sondern über Mikroben". Diese Bemerkungen spiegeln einen Triumph menschlicher Technik wider, Milliarden von Kilometern von der Erde entfernt Untersuchungen durchführen zu können, die Rückschlüsse auf molekulare Zusammensetzungen erlauben – und könnten Baustein für einen Triumph wissenschaftlichen Denkens über religiös motivierte Alleinstellungsmythen der Menschheit sein („Krone der Schöpfung", „alleine im All", „nach Gottes Ebenbild" etc).

Abbildung 1: NASA-Chefwissenschaftlerin Dr. Ellen Stofan.

Der Autor

Rolf Kickuth (62) ist Verleger der CLB. Schon 1990 entwickelte er mit der „AXON" eine Zeitung für künstliche Intelligenz, insbesondere künstliche neuronale Netze. In den 1990er Jahren war er auch Chefredakteur des „Informatik-Spektrum", der Hauszeitschrift der Gesellschaft für Informatik.

Mit der Suche nach außerirdischem Leben werden nämlich Überlegungen verknüpft, die weit über molekulare Befunde hinausgehen und neue Perspektiven aufzeigen. Schon die Antwort auf die scheinbar einfache Frage „Was ist Leben?" ist nicht ohne Randbedingungen zu beanworten.

Was ist Leben?

Wikipedia schreibt: „Drei wesentliche Eigenschaften haben sich herauskristallisiert, die für alle Lebewesen als Definitionskriterien gelten sollen: 1. Stoffwechsel (Metabolismus) während zumindest einer Lebensphase, was eine Kompartimentierung durch eine Wand oder Membran bedingt; 2. die Fähigkeit zur Selbstreproduktion, und 3. die mit der Selbstreproduktion verbundene genetische Variabilität als Bedingung evolutionärer Entwicklung." Und woanders: „Zu Lebensvorgängen zählen Energie- und Stoffaustausch, Wachstum, Fortpflanzung, Reaktion auf Veränderungen der Umwelt sowie Möglichkeiten, sich über Kommunikationsprozesse zu koordinieren. Als minimale Eigenschaft aller le-

Ein „Leitfaden" für den Artikel

Der Artikel beschreibt Randbedingungen und Denkmodelle für Leben im Universum. Dabei entfernt man sich immer mehr von gängigen Vorstellungen über Leben. Die wichtigsten Stichworte sind:

- Was ist Leben? Das will man ja finden...
- Faktoren zur Lebensentstehung: Gleichung von Drake
- Mechanismen der Sternenphysik und -chemie
- chemischer Lebensursprung / Panspermie / Chiralität
- biologisches Überleben im Weltraum
- Inflation der Kenntnis von Exoplaneten
- Monde und Mars / Chemie fremder Himmelskörper
- andersartiges Leben / Kohlenstoffchauvinismus
- Artefakte von Superkulturen: Dyson-Sphären
- Warum kein Alien-Kontakt? Das Fermi-Paradoxon
- Anthropisches Prinzip und Naturkonstanten
- Multiversen: Kein Grund für Feinabstimmung

benden Systeme gilt jedoch die Autopoiesis: die Fähigkeit, sich selbst zu erhalten und zu reproduzieren."

Dann folgt aber gleich der Hinweis, dass diese Randbedingungen viele hypothetische Frühstadien der Entwicklung des Lebens sowie Grenzformen des Lebens, wie Viren, kategorisch ausschließen. Zudem wird angemerkt: Irdische Lebewesen bestehen vorwiegend aus Wasser, organischen Kohlenstoffverbindungen und häufig aus mineralischen oder mineralisch verstärkten Schalen und Gerüststrukturen. Wie wäre hier Leben einzuordnen, das man nach weitergehender technischer Evolution erhalten könnte? Oder wie behandelt man Vorgänge, die allein im Computer ablaufen, aber auch Wachstum, Reaktions- und Fortpflanzungsfähigkeiten aufweisen?

Vorstellungen zu Aliens

Nun ist für die Frage nach außerirdischem Leben für die Menschen von primärem Interesse, ob sich auf fremden Himmelskörpern etwas entwickelt haben könnte, das mit den normalen Vorstellungen als lebendig bezeichnet wird – und dementsprechend in erster Linie auch eine Gefahr darstellen kann, sei es als eingeschleppte Mikrobe, die nicht zu bekämpfen ist – schon die ersten Mondbesucher mussten nach ihrer Rückkehr auf die Erde zunächst in Quarantäne, sei es als überlegener Außerirdischer, kurz und anglophil „Alien" genannt. Die überwältigende Mehrzahl der Alienromane und -filme stellt diese als Bedrohung der Menschheit dar (Abbildung 2 a), gefährlich und hässlich aussehend. In der Minderzahl der „guten" Aliens sind diese nicht selten nackt oder auch Gestalten aus Licht (Abbildung 2 b). Solche komplexen Lebensformen wird man kaum schnell

Abbildung 2 a: Außerirdische Lebensformen werden in Science Fiction-Filmen vorwiegend als für die Menschen gefährlich und für ihr Empfinden als hässlich dargestellt. Offenbar spiegelt sich darin die tiefe Angst des Menschen vor Fremden wider (Ausschnitte aus (v. l.): Mars Attacks, Star Gate Atlantis (Wraith Todd), Alien 3, Krieg der Welten, Predator).

Abbildung 2 b: Wenn Außerirdische den Menschen wohl gesonnen sind ist ihre Erscheinung nicht selten mehr oder weniger nackt oder eine Lichtgestalt (wobei man nicht nur wegen der US-amerikanischen Prüderie Geschlechtsteile fortlässt: Es gibt ja auch kein Wissen über die Geschlechtlichkeit von Außerirdischen; Ausschnitte aus (v. l.): Unheimliche Begegnung der dritten Art, E.T. – Der Außerirdische, Avatar (Neytiri), Abyss, Star Gate (der Antiker Thor)). Die Nacktheit steht dabei nicht für Armut, Schwäche oder Unterdrückung, sondern gleichermaßen für Freiheit und Stärke – wie es wohl auch Anhänger der Freikörperkultur empfinden. Sehr häufig verfügen die Außerirdischen in bildlichen Darstellungen auch über besonders große oder auch leuchtende Augen sowie über große Köpfe; beides soll ein Zeichen von – verglichen mit den Menschen – überragender Intelligenz und Macht sein; Lichtgestalten vermitteln den Eindruck noch deutlicher. Lange Finger bzw. eine grundsätzliche Feingliedrigkeit stehen hingegen für einen evolutionären Niedergang hinsichtlich der körperlichen Fitness, wohl hervorgerufen durch intensive Nutzung von Maschinen zur körperlichen Unterstützung.

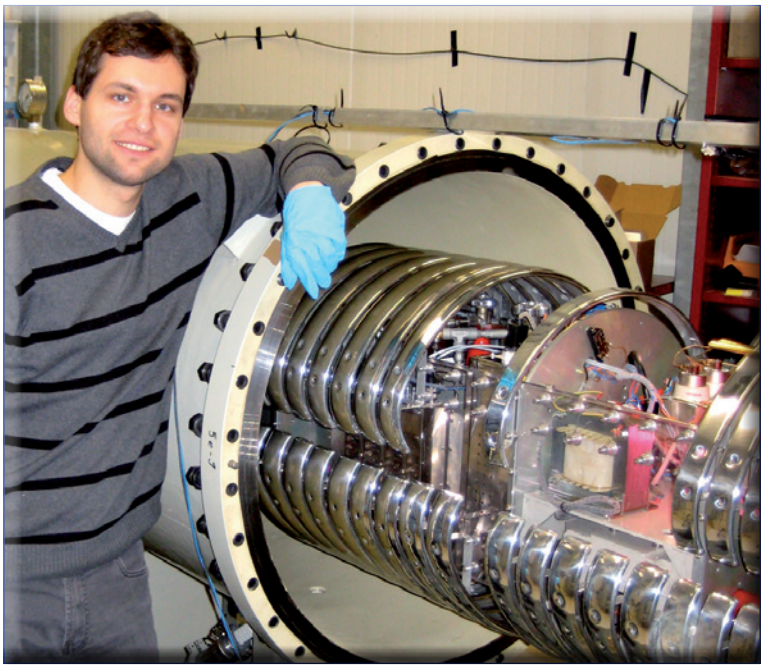


Abbildung 3: Michael Anders vom Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf neben dem LUNA-Beschleuniger im italienischen Gran-Sasso-Massiv. Er stellte durch Beschleunigen von Heliumkernen und Kollisionen mit Deuterium-Zielen Bedingungen zur Elemententstehung im frühen Universum nach; Ergebnis: Die Berechnungen zur Lithiumentstehung stimmen, das Lithiumrätsel bleibt ungelöst (Abb.: HZDR).

finden (es sei denn, sie sind bereits unter uns, s. u.). Allerdings zeigte dieser kleine Ausflug in die Phantasiewelt der Science Fiction doch, wie sehr die Menschen die Frage nach außerirdischem Leben emotional berührt.

Diskussionsgrundlage Drake-Gleichung

Etwas nüchterner ging die Frage nach extraterrestrischem Leben der US-Astrophysiker Frank Drake (geboren 1930 in Chicago) an. Er stellte im November 1961 auf einer Konferenz in Green Bank eine Formel vor, nach der sich Wahrscheinlichkeiten errechnen lassen, in welcher Entfernung von der Erde wir mit derartigen Außerirdischen rechnen können: die Drake-Gleichung. Es handelt sich dabei um ein einfaches Produkt – mit vielen Unbekannten. Die Gleichung lautet:

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

N gibt die mögliche Anzahl der außerirdischen Zivilisationen in der Galaxis an, die technisch in der Lage und gewillt wären, zu kommunizieren. Abhängig soll dies sein von sieben Faktoren. R_* steht für die mittlere Sternentstehungsrate pro Jahr in unserer Galaxie. f_p bezeichnet den Anteil an Sternen mit Planetensystem, n_e die Anzahl der Planeten in der Ökosphäre (der habitablen, also bewohnbaren Zone um eine Sonne), und f_l den Anteil an Planeten mit Leben. Eine Stufe weiter geht f_i: Dieser Faktor steht für den Anteil an bereits mit Lebensformen besiedelten Planeten, auf denen intelligentes Leben evolviert, und schließlich geht f_c dann noch einen Schritt weiter und bezeichnet den Anteil von Planeten mit intelligentem Leben, deren Lebensformen detektierbare Signale ihrer Existenz in den Weltraum senden. L steht für die Zeitdauer, während derer solche Signale von den jeweiligen Zivilisationen in den Weltraum gesendet werden.

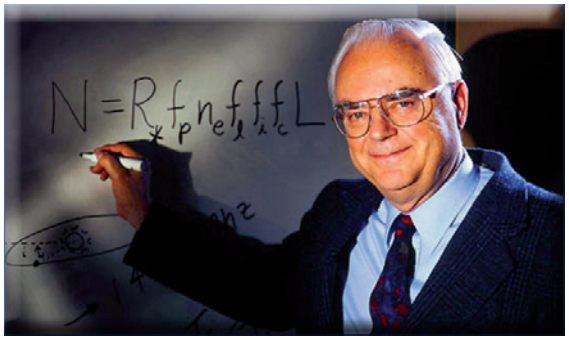
Die einzelnen Faktoren beruhen natürlich selbst wiederum auf mehr oder weniger viele Bedingungen und sind entsprechend ungenau festzustellen. Die Drake-Gleichung eignet sich dennoch als Diskussionsgrundlage für Überlegungen zu außerirdischem Leben. Allerdings sollte zunächst der Blick geschärft werden für die Komplexität der betrachteten Fragestellungen. Dafür kann die detaillierte Betrachtung ausgewählter Themen hilfreich sein. Es lohnt sich ein genauerer Blick in Physik und Chemie des Kosmos.

Entstehung der Elemente

Dabei zeigt die Physik zunächst einmal eine Grenze auf, nämlich hinsichtlich der Entstehung schwererer Elemente, all jener, aus denen unser Körper besteht.

Ist der Physik das Energiemonster, das wir Urknall 13,82 Milliarden Jahren stattgefunden hat, im allerersten Moment seiner Existenz nicht zugänglich, ändert sich dies schon nach nur etwa 10^{-30} Sekunden. Dann sank die Temperatur auf 10^{25} Kelvin ab. Es bildeten sich Quarks und Anti-Quarks, die Bausteine der heutigen schweren Teilchen, etwa Protonen und Neutronen. Zwischen etwa einer Sekunde und einigen Minuten kosmischer Zeit, wenn die Temperatur unterhalb von 10 Milliarden Kelvin gefallen ist, herrschten gerade die richtigen Bedingungen, bei denen sich Protonen und Neutronen ihrerseits zu bestimmten Arten von Atomkernen verbinden konnten. Das war die primordiale Nukleosynthese, die Elemententstehung kurz nach dem Urknall.

Abbildung 4: Frank Drake mit seiner berühmten Gleichung. Seit 1984 ist Drake Präsident des SETI-Institutes (Search for Extraterrestrial Intelligence; Foto: SETI-Institut).



Berechnungen zeigen, dass die leichten Atomkerne im frühen Universum klar im Vorteil waren: Kerne wie die von Wasserstoff und Helium, und zwar nicht nur die Standardvarianten dieser Kerne, sondern auch die Isotope Deuterium (ein Proton, ein Neutron), Tritium (ein Proton, zwei Neutronen) und Helium 3 (zwei Protonen, ein Neutron). Geht man nach den Beiträgen zur Gesamtmasse, dann lag rund ein Viertel der Kernmaterie im frühen Universum in Form von Helium 4 vor. Auf Deuterium, Tritium, Helium 3 und Lithium 7 entfielen deutlich geringere Anteile zwischen einigen Tausendsteln und einigen Milliardsteln, während herkömmlicher Wasserstoff die restlichen rund drei Viertel der Kernmaterie ausmachte. Nach Ablauf der ersten paar Minuten der Entwicklung unseres Universums bleiben die Mengenverhältnisse der gerade entstandenen leichten Atomkerne konstant – zumindest solange bis hunderte von Millionen Jahren später die ersten Sterne entstanden. In ihnen laufen Fusionsprozesse ab, die zu schwereren Elementen führen. [1]

Das Lithiumrätsel

Auch wenn es mit der Lebensentstehung nicht unmittelbar etwas zu tun hat, sei hier doch das Lithiumrätsel angemerkt: Nach den genannten Berechnungen zur primordialen Elemententstehung sollte etwa dreimal soviel Lithium entstanden sein wie man tatsächlich in Sternen vorfindet. Die Berechnungen stimmen aber wohl: Am Laboratory for Underground Nuclear Astrophysics (LUNA) im italienischen Gran-Sasso-Bergmassiv wurde die Kernentstehung von Lithium 2014 von einem internationalen Forscherteam nachgestellt (Abbildung 3). Das Ergebnis des Experiments: Die Daten bestätigten die theoretischen Vorhersagen, die mit den beobachteten Lithium-Konzentrationen im Universum nicht vereinbar sind [2]. Zudem: Ebenfalls im vergangenen Jahr gelang es Astronomen mit dem VLT Survey Telescope am Paranal-Observatorium der ESO im Norden Chiles, den Lithiumgehalt in einer Auswahl von Sternen in Messier 54 zu messen, einem Kugelsternhaufen, der etwa 87 000 Lichtjahre von uns entfernt und mit der Sagittarius-Zwerggalaxie assoziiert ist. Sie stellten fest, dass die Mengen ähnlich zu denen in der Milchstraße sind. Somit ist was auch immer das Lithium beseitigt hat, keine Besonderheit der Milchstraße [3]. Das Lithiumrätsel bleibt weiter ungelöst – und ist nur ein Beispiel dafür, wie komplex die Vorgänge im Universum wohl sind, erst recht, wenn es um das Zusammenspiel so vieler Faktoren geht, die

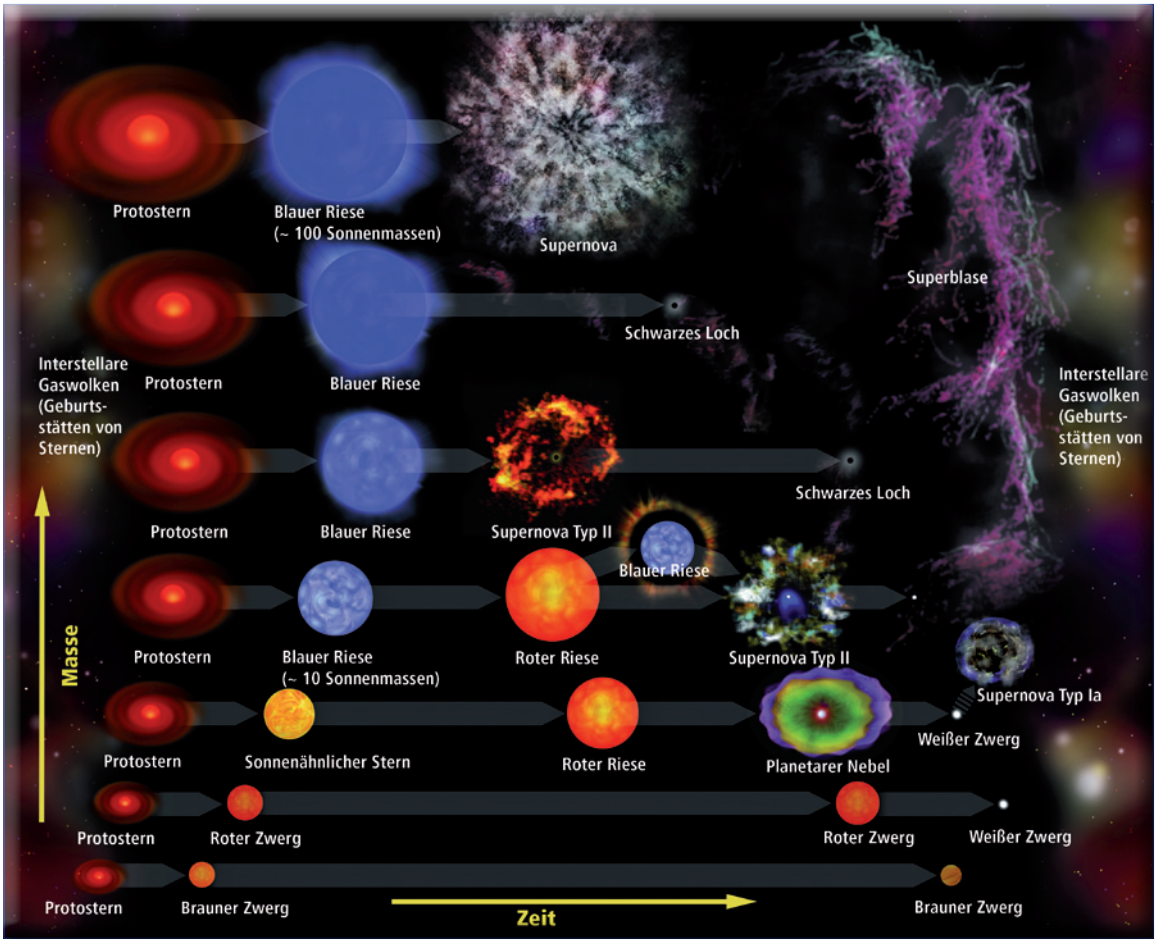


Abbildung 5: Zusammenfassung der stellaren Evolution. Schwerere Elemente als Eisen entstehen in Supernovae. Uns gibt es also nur, weil unser Sonnensystem Gaswolken aufgesammelt hat, die nach Supernova-Explosionen entstanden sind (Abb.: NASA).

Abbildung 6: Das Bild im Wellenlängenbereich sichtbaren Lichts zeigt die Supernova SN 2006gy. Sie befindet sich in der Galaxie NGC 1260, die etwa 238 Millionen Lichtjahre entfernt ist. Ihr Licht (rechts oben) war so hell, dass das Licht des Galaxienkerns links unten klar überstrahlt wurde. Die Explosion dieser zweithellsten bekannten Supernova war so stark, dass sie den Vorgängerstern völlig zerrissen hat, sodass sich kein Schwarzes Loch formen konnte. Mit SN 2006gy wurde erstmals solch ein Effekt nachgewiesen. Bei der Explosion wurden ca. 20 Sonnenmassen an Nickel in den Kosmos freigesetzt (Abb.: NASA).

zum Leben geführt haben. Dennoch gibt es zur Lebensentstehung weitere Erkenntnisse.

So ist die Frage nach der Entstehung der Elemente im Grunde gelöst. Die primordiale Nukleosynthese wurde genannt; weiter geht es mit den Elementen im Inneren von Sternen, und zwar zunächst mit der Fusion von Wasserstoff zu Helium. Wenn ein Stern in seinem Zentralbereich den größten Teil des vorhandenen Wasserstoffs zu Helium gebrannt hat, endet diese erste Brennphase. Der Stern kann dann seinen inneren Druck nicht mehr aufrechterhalten und wird unter dem Einfluss der eigenen Schwerkraft in sich zusammenfallen. Ab einer Mindestmasse werden durch die Verdichtung und gleichzeitige Erhitzung des Sterninneren Bedingungen erreicht, unter denen weitere Fusionsprozesse in Gang kommen, zunächst das Heliumbrennen. Je nach Ausgangsmasse setzen noch weitere Fusionsprozesse ein (Abbildung 5).

Es hängt dabei nur von der primären Masse des Sterns ab, bis zu welchem Grad die schwereren Elemente im Laufe eines Sternenlebens gebrannt werden können. Sterne wie unsere Sonne produzieren hauptsächlich die leichteren Elemente bis zum Kohlenstoff, während Sterne, die deutlich schwerer sind als die Sonne, sämtliche Elemente bis hin zum Eisen erzeugen können. Hier endet die positive Energiebilanz der Fusionsreaktionen.

Prima für Mensch und Tier, könnte man denken, wenn man jetzt nur die leichten Elemente wie Wasserstoff, Kohlenstoff, Sauerstoff, Stickstoff, Phosphor, Schwefel und noch Calcium, Kalium, Natrium, Chlor und Magnesium in Erinnerung ruft. Damit hat man zwar die elf häufigsten Elemente des menschlichen Körpers genannt, aber er enthält u. a. auch noch Eisen – den Endpunkt der Elementsynthese in Sternen, Zink, Kupfer, Nickel, Jod, Selen und Cobalt, allesamt Elemente mit höherer Ordnungszahl als Eisen. Wo kommen die her?

Nun, solche Elemente bilden sozusagen die Asche bestimmter sterbender Sterne, und zwar sehr schwerer sterbender Sterne. Hat ein Stern seinen Nuklearbrennstoff verbrannt, fällt er in sich zusammen (Abbildung 5). Er kann der eigenen Schwerkraft keine Gegenkraft, wie sie Fusionsprozesse bieten, mehr entgegensetzen. War der sterbende Stern jedoch sehr schwer, zehnmal so schwer wie unsere Sonne oder schwerer, dann ist dieser Kollaps der Sternenmaterie sehr schnell. Bei dieser dramatischen Verdichtung innerhalb weniger Tage wird eine ungeheuer große Menge an Gravitationsenergie freigesetzt, die für eine beträchtliche Erhöhung der Temperatur und damit für eine explosionsartige Ausweitung der möglichen Kernreaktionen im gesamten Sternvolumen sorgt. In dieser Supernova entstehen Elemente mit Ordnungszahlen höher als Eisen. An diesen Reaktionen sind vor allem Neutronen beteiligt, die im Inneren des zerberstenden Sterns unter den dort herrschenden extremen Bedingungen freigesetzt werden und als ungeladene Teilchen vielfältige Kernreaktionen auslösen können. Das Streumaterial der Supernovae bildet die Ausgangsmaterie für die nächste Generation von Galaxien, Sternen und Planeten. Mit zunehmendem Alter des Universums nimmt daher die Menge an schweren Elementen zu. So hat die Supernova SN 2006gy in der Galaxie NGC 1260 150 Sonnenmassen gehabt und bei ihrer Explosion schätzungsweise 20 Sonnenmassen an Nickel in das Universum abgegeben (Abbildung 6).

Wir haben jetzt also prinzipiell geklärt, wie es zur Entstehung der Elemente gekommen ist. Natürlich müssen sich aus den Gaswolken von Supernova-Resten erst wieder Planetensysteme formen. Dafür müssen diese Wolken sich wieder verdichten, kontrahieren. Dieser Prozess ist noch nicht vollständig geklärt. Es kommen dafür Effekte der Eigengravitation solcher Molekülwolken in Frage, ausgelöst durch Inhomogenitäten. Noch effektiver wären Verdichtungen, die durch Druckwellen ausgelöst werden, durch – wiederum – Supernovaexplosionen in der Nähe der Supernova-Gasreste. Auch Gezeitenkräfte in solchen Wolken können in Frage kommen; sie entstehen bei der Begegnung oder Durchdringung zweier Galaxien.

Mit fortschreitender Kontraktion solcher Molekülwolken bilden sich Strudel aus. Sie führen dazu, dass weiteres Material auf den entstehenden Protostern in Spiralen aufkonzentriert wird; der Drehimpuls wird dabei auf den entstehenden Stern, das entstehende Planetensystem übertragen.

Drake: Sternentstehungsrate R_*

R_* steht in der Drake-Gleichung für die mittlere Sternentstehungsrate pro Jahr in unserer Galaxie. Sie wird neueren Beobachtungen zufolge mit etwa sieben angegeben [4]. Ob damit auch Sterne und insbesondere Planetensysteme der Generation gemeint sind, die bereits über Elemente mit Ordnungszahlen höher als Eisen verfügen, wird nicht gesagt. Immerhin explodiert etwa alle 50 Jahre – ein winziger Zeitraum auf der kosmischen Zeitskala – ein Stern als Supernova [4]; es sollte also reichlich „Sternenasche" zur Verfügung stehen. Bei der Überlegung 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. Ebenso sind Doppelsternsysteme oder Sternsysteme im Zentrum der Galaxis wegen – kurz gesagt – unwirtlicher Einflüsse auf die entsprechenden Planeten für die Lebensentstehung kaum zu gebrauchen. Auf der Webseite des SETI-Instituts definiert man R_* daher mittlerweile als „die Rate von neu entstehenden Sternen, die geeignet für die Entwicklung von intelligentem Leben sind". Drake ging 1961 von einem Wert 10 für R_* aus; heutige Schätzungen liegen bei 1.

Wie Leben auf jungen Planeten, die nach den oben beschriebenen Prozessen alle notwendigen chemischen Elemente enthalten, entsteht ist im Detail immer noch nicht bekannt; es gibt jedoch mehrere Szenarien. Die CLB hat zuletzt darüber in Ausgabe 1/2-2015 berichtet [5]; hier daher nur eine kurze Zusammenfassung.

Chemischer Ursprung des Lebens

Voraussetzung für die Entstehung von Leben ist, dass sich kleine Biomoleküle zu komplexen Strukturen zusammenschließen, die sich selbst reproduzieren und genetische Informationen stabil speichern. Das erfordert unter anderem eine hohe Ausgangskonzentration der Biomoleküle.

Das war schon ein Problem des Miller-Urey-Experiments (Abbildung 7): Stanley Miller simulierte 1953 zusammen mit Harold Urey im Labor der University of Chicago eine hypothetische frühe Erdatmosphäre [6]. Dazu mischten sie Substanzen einer hypothetischen frühen Erdatmosphäre: Wasser, Methan, Ammoniak, Wasserstoff und Kohlenstoffmonoxid. Dann setzten sie diese Mischung elektrischen Entladungen aus, welche die Energiezufuhr durch Gewitterblitze nachbilden sollen. Dabei entstanden nach einer gewissen Zeit organische Moleküle, Aminosäuren, wie

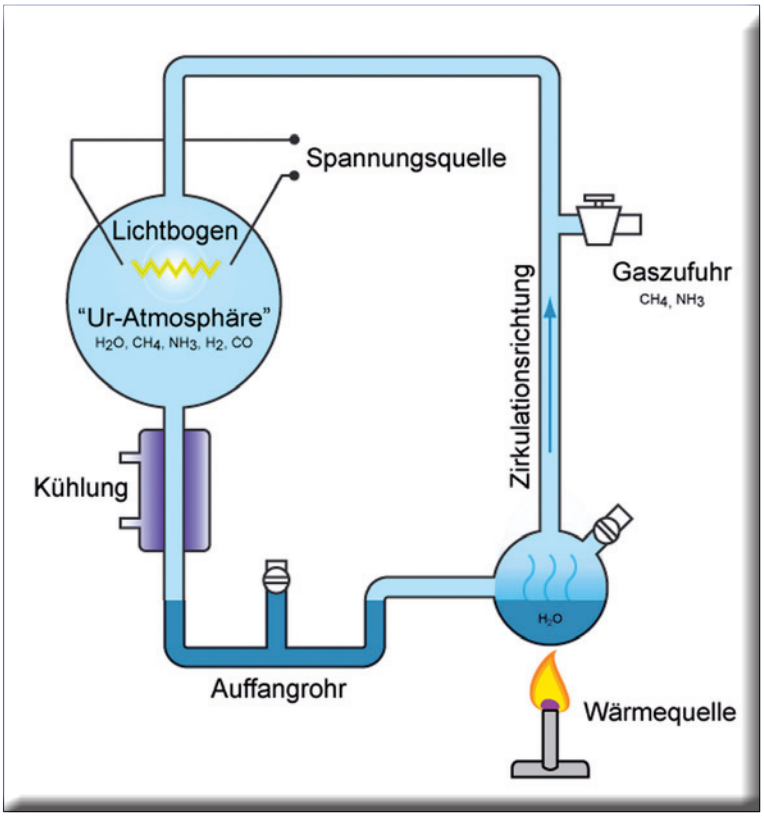


Abbildung 7: Der Versuchsaufbau des Miller-Urey-Experiments. Das entstehende Molekülgemisch wurde chromatographisch untersucht.

man sie in Lebewesen findet. Ein Problem u.a. dabei schon damals: Ihre Konzentration ist zu gering, um Bedingungen für eine weitergehende Evolution zu komplexeren Molekülen zu bilden.

Andere Theorien vermuten die Wiege der Entstehung des Lebens daher in Schichtsilikaten wie etwa Glimmer oder Montmorillonit. 1968 veröffentlichte Ulrich Hoffmann von der Universität Heidelberg einen Artikel mit Bezug auf katalytische Prozesse in Tonmineralien, die zur Lebensentstehung beitragen könnten [7].

Am wahrscheinlichsten wird zur Zeit die Lebensentstehung in speziellen Bereichen des Meeres mit großen Temperaturunterschieden und möglichst angefüllt mit katalytisch wirksamen Metallen angesehen, etwa in der Umgebung „Schwarzer Raucher". Sie gehören zu den hydrothermalen Quellen am Grund der Tiefsee. Im austretenden Wasser des Rauchers sind vor allem Sulfide und andere Salze von Eisen, Mangan, Kupfer und Zink gelöst. Das beim Austritt bis über 400 Grad Celsius heiße, mineralreiche Wasser der Thermalquelle trifft mit dem 2 Grad kalten Wasser des Meeresgrundes zusammen; bei der Abkühlung werden Mineralien ausgefällt, die die „Rauchfahne" und durch Sedimentation den Schornstein oder Kegel bilden.

Solche oder ähnliche Konstrukte haben tatsächlich das Potenzial, als Orte der Lebensentstehung gedient zu haben. In einer „normalen Ursuppe"

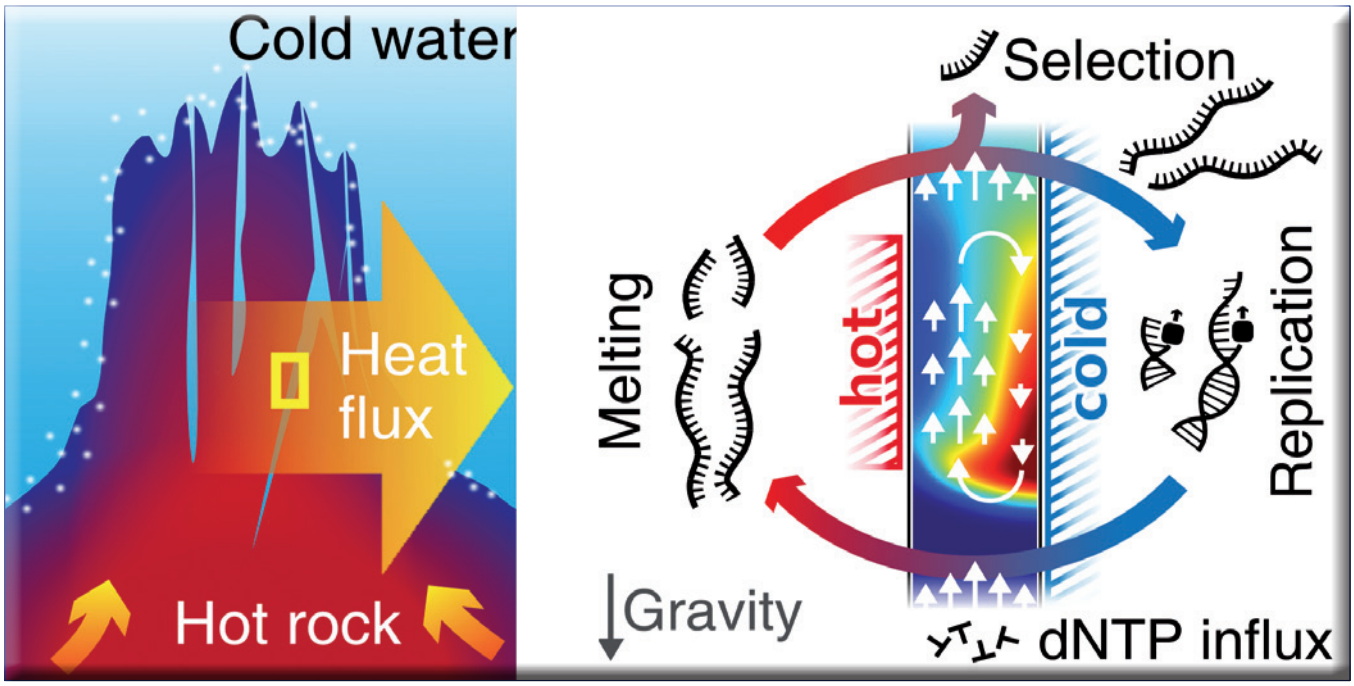


Abbildung 8: Gezeigt ist ein beispielhaftes geologisches Szenario mit ausgeprägtem Temperaturgradienten, wie man sie etwa bei schwarzen oder weißen Rauchern findet (links). In den Gesteinskapillaren dort können Prozesse der Vermehrung von Oligonucleotiden auftreten. Das Prinzip ist rechts dargestellt: Ein Temperaturunterschied in einer millimetergroßen Gesteinspore führt zu einer Molekülansammlung über Thermophorese (Bewegung von Teilchen aufgrund eines Temperaturgradienten) und Konvektion (Kreisprozess im inneren der Röhre). Ein grundsätzlicher Durchfluss durch die Öffnung der Röhre sorgt für Materialnachschub. Der Kreisprozess in der Röhre führt zu einer exponentiellen Replikation. Die Kombination von Durchfluss, Thermophorese und Konvektion hat auch zur Folge, dass lange Moleküle gefangen und kurze ausgespült werden. Die Geschwindigkeit des Durchflusses bestimmt dabei die Länge der selektierten Moleküle (Abb.: Kreysing/Keil/Lanzmich/Braun).

der frühzeitlichen Ozeane kommen Biomoleküle nämlich wohl nur sehr vereinzelt vor.

Wissenschaftler haben jetzt die Funktion von Gesteinsporen im Umfeld solcher Raucher als „Molekülfallen“ nachgewiesen [8]. Ihr grundlegender Mechanismus ist die Thermophorese, die Bewegung von Teilchen aufgrund eines Temperaturgradienten. Danach hat die komplexe Strömungssituation in der Gesteinskapillare verschiedene Konsequenzen (Abbildung 8): Nicht nur werden größere Biomoleküle aufkonzentriert, sondern sie reproduzieren sich dort auch. In den heißeren Zone der Pore schmelzen doppelsträngige DNA-Moleküle auf und teilen sich im Minutentakt in ihre beiden Stränge. Diese werden durch die Konvektionsströmung wieder in den kühleren Bereich transportiert. Dort wird die DNA mit neuen Bausteinen gefüttert und erneut zu einem Doppelstrang ergänzt. Wenn mehr DNA entsteht als akkumuliert werden kann, verlassen neu replizierte Moleküle die Pore und verbreiten sich in benachbarten Porensystemen. Die Geschwindigkeit des Durchflusses bestimmt dabei die Länge der selektierten Moleküle.

Entscheidend auch: Der Kreisprozess in der Röhre führt zu einer exponentiellen Replikation. Bei einem exponentiellen Wachstum, das in der Natur zu finden ist, vervielfacht sich mit jeder Generation die Anzahl neuer Nachkommen um einen konstanten Faktor. So verdoppelt sich die Anzahl der Bakterien mit jeder Generation. Nach der Evolutionstheorie ist exponentielles Wachstum für die Selektion einer Spezies gegenüber anderen erforderlich.

Panspermie-Hypothese

Eine Hypothese zur Entstehung des Lebens auf der Erde verfolgt den Gedanken, dass die Ursprünge des Lebens aus dem Weltall auf die Erde transportiert worden sind. Auch wenn diese „Panspermie-Hypothese“ die Fragen nach der chemischen Evolution hin zum Leben nur auf Orte außerhalb der Erde verlagert sei sie hier doch angesprochen – auch weil sie außerirdische Planeten gleichermaßen betreffen kann. Vertreter der Panspermie-Hypothese versuchen damit, dem nach ihrer Auffassung bestehenden Widerspruch zwischen der hohen Komplexität des Lebens auf der einen Seite und der vergleichsweise kurzen Zeit für seine Entstehung auf der anderen Seite zu begegnen. Die ältesten Gesteine der Erde, die auf knapp vier Milliarden Jahre datiert werden, konnten erst vor etwa 3,8 Milliarden Jahren eine zum Teil bis heute erhaltene feste Kruste bilden, nachdem vor etwa 3,9 Milliarden Jahren die Einschlagshäufigkeit von

Meteoriten deutlich nachgelassen hatte. Vor dieser Zeit hält man eine chemische Evolution hin zu einfachem Leben für unwahrscheinlich. Die ältesten Fossilien sind wahrscheinlich 3,54 bis 3,56 Milliarden Jahre alte Stromatolithen (Abbildung 9), die in Australien und Südafrika gefunden wurden. Es handelt sich dabei um biogene Sedimentgesteine, die durch Einfangen und Bindung von Sedimentpartikeln oder Fällung gelöster Stoffe infolge des Wachstums und Stoffwechsels von Mikroorganismen in einem Gewässer entstanden sind. Stromatolithen könnten demnach Hinweise darauf liefern, wie sich Leben von sehr einfachen zu komplexeren Formen entwickelt hat [9].

Die Erklärung der schnellen Lebensentstehung auf der Erde besteht darin, dass es sich dabei um einen normalen Prozess im Universum handelt, der sofort abläuft, sobald es die Umweltbedingungen zulassen. Anhänger der Panspermie-Hypothese weisen aber darauf hin, dass die Urzeugung notwendigerweise nur chemisch-physikalische Prozesse beinhalten könne. Gerade die Bildung der langkettigen Moleküle und die ausgeprägte Vorherrschaft einer Chiralität bei den Lebewesen auf der Erde sei innerhalb der zugestandenen Zeitskala nicht durch eine derzeit bekannte chemische oder physikalische Wechselwirkung erklärbar.

Abbildung 9: Stromatolithen wachsen: Bestimmte Biopolymere der Biofilme stellen mit anionischen (negativ geladenen) Atomgruppen, an denen sich die positiv geladenen Calcium-Ionen binden, Kristallisationskeime dar. Durch die Anhäufung gebundenen Sediments oder ausgefällten Kalks werden die Mikroorganismen des Biofilms eingeschlossen und bedeckt. Sie wachsen jedoch ständig durch Längenwachstum bzw. Vermehrung in die Höhe, so dass der Biofilm an der Basis zwar inaktiv wird und abstirbt, jedoch nach oben immer weiter wächst. Schichtungen entstehen durch unterschiedliche Prozesse: wechselnder Sedimenteintrag oder saisonal unterschiedliche Wasserinhaltsstoffe beispielsweise. An diesen Stromatolithen aus den östlichen Anden südlich der bolivianischen Stadt Cochabamba ist der feinlagige Aufbau deutlich zu erkennen; Alter etwa 70 Millionen Jahre (Foto: Didier Descouens).

Warum sind Biomoleküle chiral?

Chiralität spielt nicht nur in der Chemie, sonder auch in der Biologie eine fundamentale Rolle. In allen Naturstoffklassen ist jeweils ein Enantiomer bevorzugt, bzw. ausschließlich vorhanden. So findet man in der Natur nur D-Glucose und keine L-Glucose. Chiralität ist auch die Voraussetzung für geordnete Sekundärstrukturen in Proteinen wie etwa der α-Helix der DNA, die nur aus enantiomerenreinen Aminosäuren aufgebaut werden kann – in der Natur L-Aminosäuren. Bis auf die Aminosäure Glycin sind alle proteinogenen – also für Bausteine von Lebewesen geeignete – Aminosäuren chiral. Dabei ist nur die L-Aminosäure proteinogen: der zum Aufbau der Proteine notwendige Apparat – das Ribosom, die tRNA, die Aminoacyl-tRNA-Synthetase (diese belädt die tRNA mit Aminosäuren) und andere – sind selbst auch chiral und können nur die L-Variante erkennen (Abbildung 10). Es ist bis heute nicht geklärt, ob die Bevorzugung eines bestimmten Enantiomers von Biomolekülen sich auf eine zufällige Selektion am Beginn der Evolutionskette begründet, die sich dann selbst verstärkt hat, oder ob es fundamentale Gründe für die Bevorzugung dieser Konfiguration gibt. Aufgrund der Paritätsverletzung bei der Schwachen Wechselwirkung ist nämlich der Energiegehalt zweier Enantiomere nicht exakt gleich. Der Energieunterschied ist jedoch äußerst gering.

Mit Hinblick auf die Chiralität der Moleküle in Lebewesen hat ein internationales Wissenschaftler-Team 2005 einen Hinweis für die These vorgelegt, dass einer der Ursprünge des irdischen Lebens aus dem Weltraum stammen könnte [10]. Es hat in einem Experiment mit Aminosäuren herausgefunden, dass eine ungleiche Verteilung

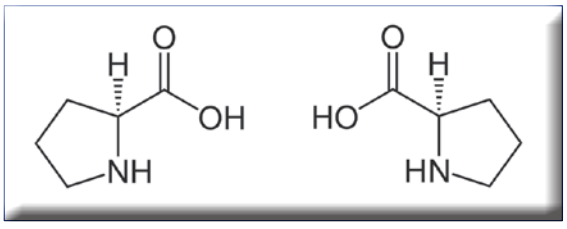


Abbildung 10: L-Prolin (links) ist eine proteinogene Aminosäure, das enantiomere Pendant D-Prolin (rechts) ist nicht für den Aufbau von Proteinen in irdischen Lebewesen geeignet.

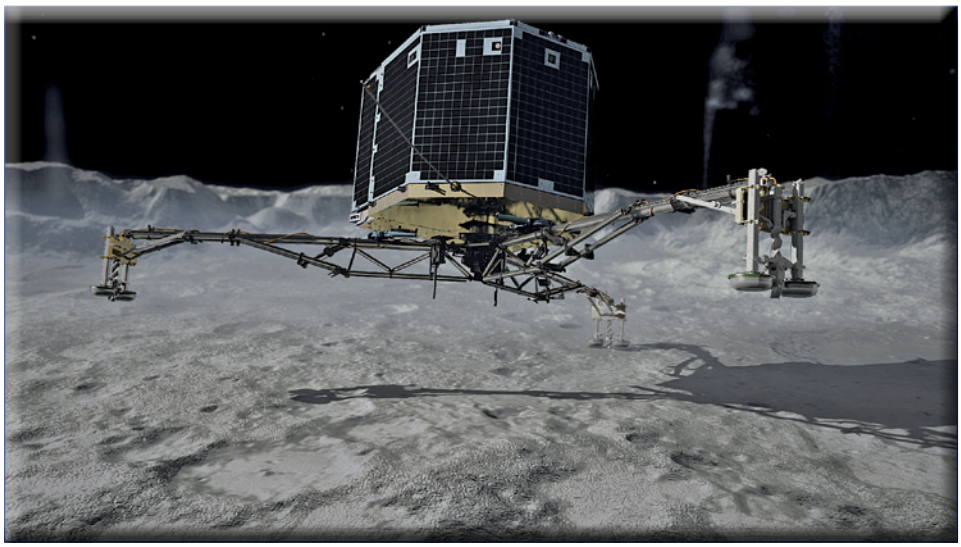


Abbildung 11: Das Landemodul Philae der Raumsonde Rosetta auf dem Kometen Tschurjumow-Gerasimenko, gelandet am 12. November 2014. Leider verlief die Landung nicht so glatt wie auf dieser künstlerischen Darstellung; über mögliche asymmetrische Racemat-Verteilungen vorgefundener organischer Moleküle in der Atmosphäre des Kometen wurde noch nichts bekannt (Abb.: DLR).

von rechts- und linkshändigen Aminosäuren bereits im interstellaren Raum entstehen kann.

Aminosäuren findet man in Proteinen nur in der linkshändigen Form. Zuckermoleküle finden nur in ihrer rechtshändigen Form Verwendung in der Desoxyribonukleinsäure DNS. Die grundlegende Frage ist bisher unbeantwortet: Wie hat die Biologie die linksförmigen Aminosäuren zur Konstruktion von Proteinen ausgewählt? War dies eine zufällige oder determinierte, d.h. vorherbestimmte Auswahl?

Die Forscher vertreten die Meinung, dass der Ursprung der biomolekularen Asymmetrie infolge der Bestrahlung von Aminosäuren bereits im Weltraum stattfand. Während dieser Bestrahlung werden – so die Vermutung – racemische Mischungen von Aminosäuren asymmetrisch. Um diese Hypothese zu testen, wurde die symmetrische Aminosäure Leucin zirkular polarisierter Strahlung im ultravioletten Bereich unterzogen. Zum ersten Mal wurde damit eine Aminosäure in fester Phase dieser Strahlung im Labor ausgesetzt, um Weltraumbedingungen zu simulieren. Die Forscher setzten die enantioselektive GC-MS-Analytik ein, die es ihnen erlaubte, den selektiven Abbau der Linksform der Aminosäure Leucin nach Bestrahlung mit rechts zirkular polarisierter Strahlung zu beobachten. Ein hoher Enantiomerenüberschuss von 2,6 Prozent der Aminosäure Leucin wurde gemessen.

Polarisiertes UV-Licht kommt auch im Weltraum vor. Man hat es beispielsweise im Orion-Nebel nachgewiesen. Es soll durch Streuung unpolarisierten Lichtes an unsymmetrischen, durch Magnetfelder ausgerichteten Staubkörnern in Regionen der Sternenbildung entstehen. Auch sollen schnell rotierende Neutronensterne zirkular polarisierte Synchrotronstrahlung aussenden. Allerdings: Eine asymmetrische Racemat-Verteilung von Biomolekülen ist auch durch anorganische Feststoff-Katalysatoren auf der Erde erklärbar.

Philae auf Tschurjumow-Gerassimenko

Derzeit ruht die Hoffnung auf das Auffinden von Molekülen im Weltraum mit asymmetrischen Racemat-Verteilungen auf die Raumsonde Rosetta der ESA, die den Kometen Tschurjumow-Gerassimenko seit August 2014 umkreist. Sie setzte sogar am 12. November 2014 die Sonde Philae auf dem Kometen ab (Abbildung 11). Mit an Bord ist das Experiment COSAC (COmetary SAmpling and Composition). COSAC wird Bodenproben entnehmen und flüchtige Komponenten erfassen. Es verfügt auch über ein Chiralitäts-Modul. Es kann gaschromatographisch Enantiomere trennen, weil die entsprechenden Kapillarsäulen mit chiral aktiven Filmen versehen sind. Wärmeleit- und Massenspektrometriedetektoren erlauben dann, das Verhältnis der Enantiomeren zu bestimmen. Das Problem nur: Philae war nur kurz in Betrieb. Durch einen kleinen technischen Fehler ist das Modul ungünstig gelandet und kann nur sehr wenig Sonnenlicht für seine Solarzellen auffangen. Am 17. November 2014 gab das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) bekannt: COSAC stellte die Anwesenheit von organischen Molekülen in der Atmosphäre des Kometen fest [12]. Welche Art organischer Moleküle dies sind, oder wie komplex, konnte noch nicht gesagt werden. Im Sommer dieses Jahres könnten laut DLR auf dem Kometen Temperaturen herrschen, die es Philae erlauben, seine Batterie aufzuladen. Der Orbiter Rosetta wird bei seinen Überflügen auf Empfang sein und hören, sobald Philae wieder aus dem Winterschlaf aufwacht.

Überleben im Weltraum

Ein Argument haben die Panspermie-Anhänger noch für sich: Man nimmt mittlerweile an, dass einfache Lebewesen unter Weltraumbedingungen überleben können. Mit der US-amerikanischen Mondmission Surveyor 3 wurden versehentlich Bakterien der Art *Streptococcus mitus* auf den Mond gebracht. Nach ihrem Rücktransport zur Erde 31 Monate später war ein Großteil der Sporen in der Lage, den nor-

malen Lebenszyklus fortzusetzen. Auch hochenergetische Strahlung lässt sich von manchen Bakterien aushalten. So wurden Cyanobakterien der Gattung *Chroococcidiopsis* und insbesondere um das extremophile Bakterium *Deinococcus radiodurans*, das nur wenig empfindlich gegenüber ionisierender Strahlung ist, in Anlagen gefunden, die Lebensmittel durch Bestrahlung haltbar machen sollen...

Ebenso gilt eine lange Überlebenszeit als möglich. Das Bakterium *Desulforudis audaxviator* lebt allein im Grundwasser einige Kilometer tief im Gestein und kann seine Energie einzig aus Wasserstoffperoxid und Wasserstoff beziehen, die in dieser Tiefe nur durch natürliche Radioaktivität im Gestein gebildet werden. Unter diesen Bedingungen würde eine Zellteilung eine Zeit in der Größenordnung von 100 bis 1000 Jahren beanspruchen. Nicht zuletzt gibt es sogar mehrzellige Organismen, beispielsweise Bärtierchen (Abbildung 12), die zur Kryptobiose fähig sind, einem Zustand, bei dem die Stoffwechselvorgänge extrem reduziert sind. Die auch als Tardigrada bekannten Bärtierchen sind zwischen 0,1 und 0,5 Millimeter lang und kommen häufig in Moosen und Flechten vor.

Sie halten 300 bar Luftdruck aus, und extreme Hitze und Trockenheit können ihnen nichts anhaben, so dass sie auch nach Jahren der Dürre wieder zum Leben erweckt werden können. Sie überleben 272 Grad Kälte und 151 Grad Hitze. Man hat mehrere der Bärtierchen in ausgetrocknetem Zustand mit dem Forschungssatelliten Foton-M3 der Europäischen Raumfahrtorganisation (ESA) im September 2007 ins All geschossen. Die meisten Tiere überlebten das Vakuum und die kosmische Strahlung problemlos, einige auch die ultravioletten Sonnenstrahlen, die 1000-fach stärker sind als auf der Erdoberfläche. Die überlebenden Tiere konnten sich anschließend sogar problemlos weiter fortpflanzen. Auch das Auftreffen auf die Erdoberfläche können Kleinlebewesen überstehen. Meteoroiden, welche die irdische Atmosphäre durchdringen und als Meteoriten die Erdoberfläche erreichen, werden nur an der Oberfläche erhitzt und geschmolzen. Bereits ab einem Zentimeter Tiefe wird das Material kaum erhitzt, so dass ein Überleben von Mikroorganismen möglich scheint.

Biologen, Molekularbiologen und Bioinformatikern gelang es 2012 erstmals, mehr als 3 000 Proteine in Bärtierchen-Embryonen sowie in getrockneten und aktiven Bärtierchen zu identifizieren und zu vergleichen [11]. Dabei wurden eine ganze Reihe neuer Stress-, Transport und Kanalproteine entdeckt, die auch bei anderen, ebenfalls trockentoleranten Organismen vorkommen. Verschiedene Stressproteine können andere Proteine in den Zellen beim eintrocknen stabilieren. Nach dem Rehydrieren kommen vor allem Reparaturproteine zum Einsatz, die beschädigte Stukturen neu falten oder effektiv beseitigen, um diese zu ersetzen. Mit den Erkenntnissen lassen sich neue Methoden entwickeln, um Makromoleküle, Zellen und ganze Organismen besser zu konservieren – vielleicht auch das Altern herauszuzögern.

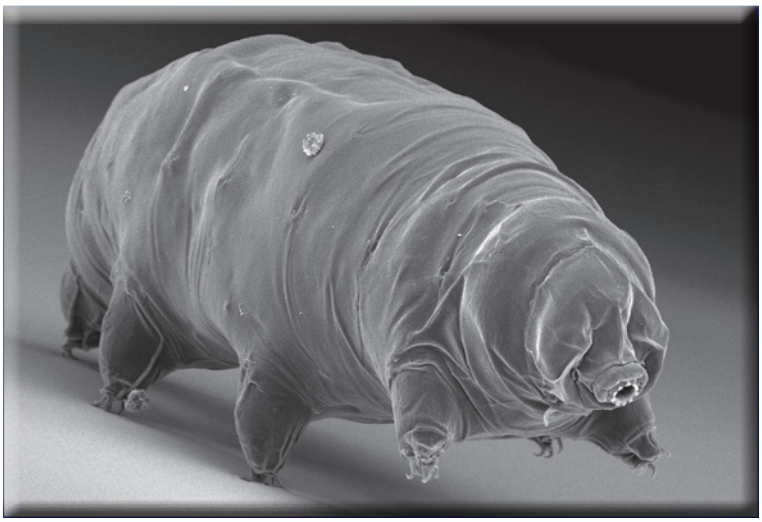


Abbildung 12: Überlebenskünstler Bärtierchen: Sie überstehen auch Weltraumbedingungen (Abb.: Uni Stuttgart).

Inflation der Kenntnis von Exoplaneten

Ob es außerirdisches Leben gibt hängt natürlich unmittelbar mit geeigneten Wohnorten – sprich Planeten oder großen Monden – zusammen. Noch vor wenigen Jahren konnte man darüber nur spekulieren. Im Jahre 1989 wurde die Entdeckung eines Exoplaneten um γ Cephei von Anthony Lawton und P. Wright bekanntgegeben. Das wäre die erste Entdeckung eines solchen Planeten gewesen. Sie wurde jedoch 1992 aus Gründen der Messungenauigkeit widerrufen. 2002 erhärteten neue Messungen dann die Existenz des Planeten. Zwischenzeitlich hatte man bereits 1992 drei Planeten um den Pulsar den Pulsar PSR 1257+12 entdeckt.

Die erste definitive Entdeckung eines Exoplaneten in einem Orbit um einen Stern ähnlich der Sonne wurde 1995 gemacht: Der Planet 51 Pegasi b kreist im 4,2-Tage-Takt um den ca. 50 Lichtjahre von der Erde entfernten Stern 51 Pegasi und hat 0,46 Jupitermassen. Mit dem Stand vom 3. Mai 2015 sind etwa 1918 Exoplaneten in 1211 Systemen bekannt, darunter 482 Systeme mit zwei bis sieben Planeten sowie über 2000 Planetenkandidaten [13]. Planetensysteme gelten heute in der unmittelbaren Umgebung des Sonnensystems als sicher nachgewiesenes, allgemein verbreitetes Phänomen. Untersuchungen und Messungen des Institut astrophysique de Paris ergaben, dass im Durchschnitt jeder Stern der Milchstraße ein bis zwei Planeten hat.

Abbildung 13: Künstlerische Darstellungen von Planeten, die auf der Liste der 30 potenziell bewohnbaren Exoplaneten der Universität von Puerto Rico geführt werden. Erde, Mars, Jupiter und Neptun sind zu Größenvergleichszwecken aufgeführt. Der Wert der Ähnlichkeit zur Erde (Earth Similarity Index, ESI) steht in eckigen Klammern jeweils unter den Planeten; er stellt die Ordnung der Planetenliste dar. Solche, deren Entdeckung noch nicht durch weitere Wissenschaftler bestätigt wurde, sind mit einem Stern gekennzeichnet (Abb.: PHL@UPR Arecibo, April 2, 2015).

Die überwiegende Mehrzahl der entdeckten Planeten ist nach unserer Einschätzung von Lebensmöglichkeiten für Lebewesen nicht oder kaum geeignet. Das liegt nicht zuletzt daran, dass es sehr schwierig ist, Exoplaneten nachzuweisen – wir finden am ehesten riesengroße, für Leben ungeeignete. Bislang konnte man die meisten Exoplaneten nur indirekt nachweisen. Die wichtigsten Methoden sind dabei die Transitmethode und die Radialgeschwindigkeitsmethode. Erstere ist leicht verständlich: Zieht ein Planet aus der Sicht der Erde vor einem Stern vorbei, erzeugen diese Bedeckungen periodische Absenkungen in dessen Helligkeit; diese lassen sich nachweisen. Das klappt natürlich umso besser, je größer die Planeten sind. Planetenriesen ähnlich Jupiter sind da eindeutig im Vorteil – nur beherbergen sie allein aufgrund der hohen Gravitationskräfte kaum Leben, selbst wenn sie den Zentralstern in einer bewohnbaren Zone umkreisen sollten.

Verfügt ein Stern über einen Planeten, hat der auch Einfluss auf den Stern: Beide Himmelskörper bewegen sich um einen gemeinsamen Schwerpunkt. Die Bewegung des Sterns lässt sich durch Beobachtung der abwechselnden Blau- und Rotverschiebung (Doppler-Effekt) in sehr genauen Spektren des Sterns nachweisen. Das klappt natürlich auch umso besser, je größer der Planet und damit sein Einfluss auf den Stern ist.

Dennoch listet der Habitable Exoplanets Catalog des Planetary Hability Laboratory (PHL) der Universität von Puerto Rico at Arecibo mittlerweile 30 potenziell bewohnbare Planeten auf – inklusive der Erde (Abbildung 13) [14]. Der nächste davon (Tau Ceti e) ist „nur“ 12 Lichtjahre entfernt, ein galaktischer Katzensprung. Er hat etwa die vierfache Masse der Erde, umkreist seine Sonne in 168 Tagen. Am erdähnlichsten gilt Kepler-438b. Der Planet ist nur 12 Prozent größer als die Erde und mit 70-prozentiger Wahrscheinlichkeit ein Gesteinsplanet. Er umkreist einen roten Zwergstern, der kleiner und kühler ist als unsere Sonne. Allerdings umrundet Kepler-438b seinen Stern in so geringer Entfernung, dass er etwa 40 Prozent mehr Licht erhält als die Erde von der Sonne. Dadurch liegt er mit 70-prozentiger Wahrscheinlichkeit in der bewohnbaren Zone seines Heimatsterns, der 170 Lichtjahre von der Erde entfernt ist.

Eine Spur von Leben auf solchen Planeten zu finden erscheint aufgrund der riesigen Entfernungen – und seien es nur 12 Lichtjahre – jedoch unmöglich. Dennoch gibt es Hoffnungen. Bisherige Strategien hatten sich auf indirekte Spuren von Leben konzentriert, etwa die Auswirkungen, die Leben auf die Zusammensetzung der Atmosphäre des betreffenden Planeten hat. Wird die Oberfläche eines Exoplaneten allerdings von einer bestimmten Lebensform dominiert, könnte ein direkterer Nachweis von Leben möglich sein: anhand des Lichts, das von Organismen reflektiert wird und dabei eine charakteristische Färbung annimmt.

Außerirdische Astronomen, die detaillierte Beobachtungen unseres Heimatplaneten vornehmen, würden feststellen, dass ein Teil des von der Erde reflektierten Lichts grün eingefärbt ist, weil es von Bäumen und anderen Pflanzen reflektiert wurde. Entsprechend könnte auch ein Organismus, der hinreichend große Teile einer Exoplanetenoberfläche bedeckt, direkt nachge-

wiesen werden, indem man die Färbung misst, die er dem reflektierten Licht aufprägt. Jetzt hat sich eine Gruppe von Astronomen und Biologen daran gemacht, die Möglichkeiten entsprechender Spektren zu erkunden [15]. Zu diesem Zweck stellte man Kulturen von 137 unterschiedlichen Arten (Spezies) von Mikroorganismen zusammen. Hauptkriterium bei der Auswahl der Arten war es, eine möglichst große Vielfalt an Pigmentierungen zu bekommen: Die 137 Organismen weisen eine große Farbvielfalt auf und stammen aus ganz unterschiedlichen Lebensräumen, von der chilenischen Atacamawüste in Chile bis zu Hawaianischem Salzwasser und Holzbauten an einer Solequelle im Boone's Lick State Park in Missouri (Abbildung 14).

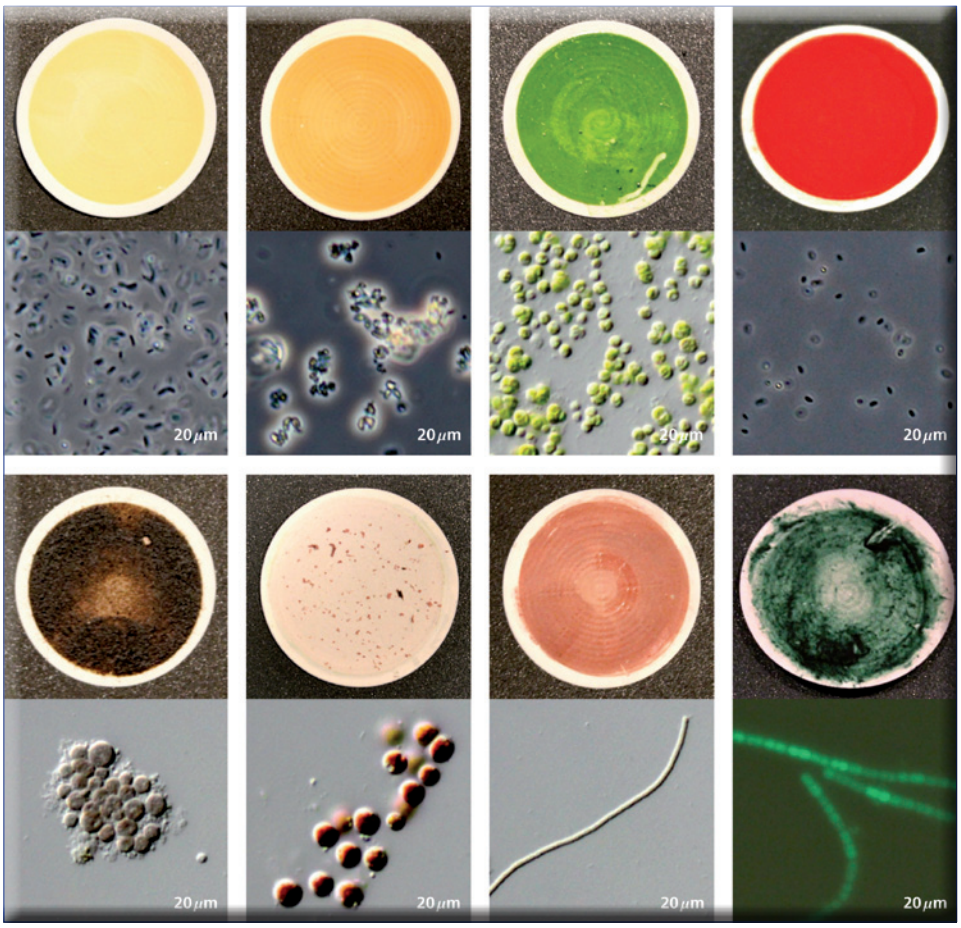


Abbildung 14: Acht der 137 Proben von Mikroorganismen, die genutzt wurden, um die charakteristischen Farben für den Katalog zusammenzustellen. In jedem Bildteil ist oben ein herkömmliches Foto der Probe zu sehen, unten eine Mikrofotografie mit 400facher Vergrößerung (von oben links nach unten rechts: Unbekannte Art vom Genus Bacillus (Sonoran-Wüste, Arizona, USA); unbekannte Art vom Genus Arthrobacter (Atacamawüste, Chile); Chlorella Prototheocoides (Harz einer beschädigten Silberpappel); unbekannte Art vom Genus Ectothiorhodospira (Big Soda Lake, Nevada, USA); unbekannte Art vom Genus Anabaena (mit grün fluoreszierendem Protein; stehendes Süßwasser-Gewässer); unbekannte Art vom Genus Phormidium (Kamori Channel, Palau); Porphyridium purpureum (altes Holz an salziger Quelle, Boone's Lick State Park, Missouri, USA); Dermocarpa violacea (Aquariumwasser, La Jolla, Kalifornien, USA; Bild: Hegde et al. / MPIA).

Der damit erstellte Katalog enthält Reflexionsspektren bei sichtbaren und nahinfraroten Wellenlängen von 0,35 bis 2,5 Mikrometer. Er ist der vollständigste und vielfältigste seiner Art, und der erste Katalog, der direkt im Hinblick auf die Oberflächeneigenschaften von Exoplaneten zusammengestellt wurde. Das Ergebnis sollte nicht nur für Astrobiologen interessant sein, sondern auch für Astronomen, die Modelle für Planetenatmosphären berechnen. Direkte Spektren ließen sich bislang nämlich nicht von Exoplaneten ermitteln; der Stern des entsprechenden Systems überstrahlt alles.

Bislang; jetzt gibt es aber auch hier einen Erfolg. Er betrifft den bereits erwähnten Planeten 51 Pegasi b, der 1995 entdeckt wurde und 50 Lichtjahre von der Erde entfernt ist. Jetzt wird ihm nicht nur die Ehre zuteil, der erste Exoplanet zu sein, dessen Entdeckung auch bestätigt wurde, sondern an ihm ist es erstmals gelungen, das Spektrum, das von einem Exoplaneten reflektiert wurde, im sichtbaren Licht nachzuweisen [16].

Die derzeit am weitesten verbreitete Methode, die Atmosphäre eines Exoplaneten zu untersuchen, beruht auf der Beobachtung des Spektrums des Muttersterns während des Vorübergangs des Planeten vor dem Stern. Dabei durchläuft ein kleiner Teil des Sternlichts die Atmosphäre des Planeten und wird dabei gefiltert – eine Technik, die man als Absorptionsspektroskopie bezeichnet. Die neue Technik hängt nicht davon ab, ob es von der Erde aus gesehen zu einem Transit kommt, so dass man deutlich mehr Exoplaneten damit untersuchen könnte. Dabei wird das Sternspektrum als Vorlage für die Suche nach einer abgeschwächten Version desselben Signals verwendet, das von Sternlicht stammt, das vom Planeten reflektiert wird. Aufgrund der Bewegung des Planeten auf seiner Umlaufbahn verschieben sich die spektralen Signaturen des reflektierten Lichts relativ zum Stern. Die Messung dieses Effekts ist eine äußerst anspruchsvolle Aufgabe, da die Planeten im Vergleich zum gleißend hellen Mutterstern sehr lichtschwach sind. Das Signal vom Planeten wird außerdem leicht durch andere winzig kleine Effekte und Rauschquellen überlagert. Die Messmethode ermöglicht auch, den Reflektionsgrad, die Albedo, des Planeten abzuschätzen, woraus man wiederum die Zusammensetzung sowohl der Planetenoberfläche als auch der Atmosphäre ableiten kann.

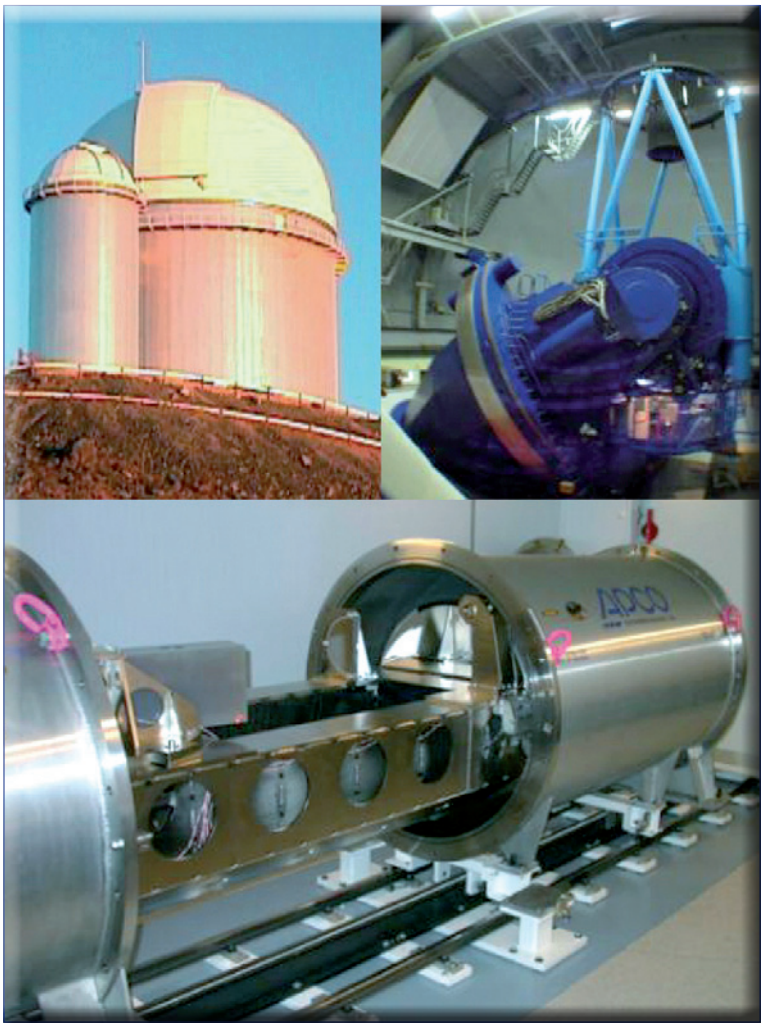


Abbildung 15: Oben: Dom des 3,6-Meter-Teleskops in La Silla und das Teleskop selbst. Unten: der HARPS-Spektrograph bei Tests mit geöffnetem Vakuumtank (Abb.: ESO).

Gelungen ist die Messung mit dem HARPS-Instrument am La Silla-Observatorium der ESO in Chile (Abbildung 15). HARPS (High Accuracy Radial velocity Planet Searcher) ist ein Spektrograph für das 3,6-Meter-Teleskop. Er dient der hochpräzisen Messung der Radialgeschwindigkeit von Sternen und damit der Entdeckung von Exoplaneten. Die Tatsache, dass dieses Ergebnis mit dem 3,6-Meter-Teleskop der ESO gewonnen wurde, das bei dieser Technik nur einen beschränkten Anwendungsbereich hat, stellt für Astronomen eine aufregende Neuigkeit dar, denn die zur Zeit existierenden Instrumentenkonfigurationen werden in Kürze von deutlich leistungsfähigeren Instrumenten an größeren Teleskopen, wie dem Very Large Telescope der ESO und dem zukünftigen European Extremely Large Telescope, übertroffen werden.

Warum in die Ferne schweifen? Solares

Außerirdisches Leben kann uns jedoch näher sein als wir denken; darauf weist ja auch die Aussage der NASA-Chefwissenschaftlerin Ellen Stofan hin. Nicht nur Planeten können nämlich Heimstätte für Lebewesen bilden, sondern auch große Monde – und da gibt es auch in unserem Planetensystem mehrere.

Saturnmond Enceladus

Auf dem Saturnmond Enceladus gibt es vermutlich hydrothermale Aktivität, was die Wahrscheinlichkeit erhöht, dass der Trabant an manchen Stellen geeignete Bedingungen für lebende Organismen bietet. Das zeigen neue Datenauswertungen der europäisch-amerikanischen Cassini-Huygens-Mission, an der Wissenschaftler der Universitäten Heidelberg und Stuttgart beteiligt sind [17]. Die Forscher sehen mikroskopisch kleine Gesteinskörner, die in der Nähe des Saturns nachgewiesen wurden, als erste klare Anhaltspunkte für eine hydrothermale Aktivität auf einem eisbedeckten Mond (Abbildung 16). Dabei dringt Meerwasser in die Gesteinskruste ein und reagiert damit, so dass es beim Austritt eine heiße, mit Mineralen angereicherte Lösung bildet.

Die 1997 gestartete Cassini-Huygens-Mission zur wissenschaftlichen Untersuchung des Gasplaneten Saturn und seiner Monde ist ein gemeinsames Projekt der NASA, der ESA und der italienischen Weltraumbehörde ASI, das die Raumsonde Cassini und die Atmosphärensonde Huygens umfasst. 2005 konnte die Mission mit dem Nachweis von Wassereis-Fontänen erstmals geologische Aktivität auf Enceladus zeigen. 2014 veröffentlichte Untersuchungsergebnisse zum Gravitationsfeld des Enceladus legen nahe, dass es auf dem Mond einen 10000 Meter tiefen Ozean gibt, der von einer 30 bis 40 Kilometer dicken Eiskruste bedeckt wird. Die aktuellen Erkenntnisse sind Ergebnis einer umfangreichen vierjährigen Analyse von Daten der Raumsonde sowie Computersimulationen und Laborexperimenten. Cassini hatte wiederholt sehr kleine Gesteinspartikel entdeckt, die stark siliziumhaltig waren und in derselben Entfernung wie Enceladus um den Saturn kreisten.

In einem Ausschlussverfahren ermittelten die Forscher, dass es sich bei diesen Partikeln um Siliziumdioxid-Körner handeln muss, die auf der Erde in Sand und dem Mineral Quarz vorkommen. Die immer gleiche Größe dieser Körner – die größten waren etwa sechs bis neun Nanometer groß – gab den entscheidenden Hinweis, dass ein bestimmter Prozess dafür verantwortlich sein könnte: Auf der Erde bilden sich Siliziumdioxid-Körner dieser Größe meist durch hydrothermale Aktivität unter einer Reihe von bestimmten Bedingungen, nämlich dann, wenn leicht alkalisches Wasser mit nur

mäßigem Salzgehalt, das zugleich mit Siliziumdioxid übersättigt ist, einem großen Temperaturgefälle ausgesetzt ist. Die Körnchen formen sich sehr wahrscheinlich dann, wenn heißes Wasser mit gelösten Mineralen aus dem felsigen Inneren des Mondes nach oben wandert und dort in Kontakt mit kälterem Wasser kommt. Für diese Wechselwirkungen, aus denen dann winzige Steinkörnchen entstehen, werden Temperaturen von mindestens 90 Grad Celsius benötigt. Die Wissenschaftler gehen davon aus, dass diese Bedingungen auf dem Meeresboden von Enceladus herrschen, wo heißes Wasser aus dem Inneren auf das relativ kalte Wasser des Ozeanbodens trifft.

Jupitermonde Ganymed, Kallisto und Europa

Enceladus ist nicht der einzige Mond, der als Kandidat für die Beherbergung von Lebensformen in unserem Planetensystem in Frage kommt. Das Weltraumteleskop Hubble entdeckte, dass der Jupitermond Europa bis zu 200 Kilometer hohe Fontänen aus Wasserdampf ins All spuckt, die höchstwahrscheinlich von einem unterirdischen Ozean stammen. Der Mond Europa ist fast so groß wie unser Mond. Satellitenbilder seiner Oberfläche erinnern an die überfrorenen Ozeane in den Polargebieten der Erde. Krater gibt es so gut wie nicht. Unter der Eiskruste Europas vermuten Forscher einen bis zu 100 Kilometer tiefen globalen Ozean, der mehr Wasser enthält als alle unsere Weltmeere zusammen.

Nach einem neuen Modell der Kruste des Jupiter-Mondes Ganymed nach Daten der Raumsonde Galileo wäre es auch auf ihm möglich, dass sich unter der Eisoberfläche ein leicht salzhaltiger Ozean befindet. In dessen unterem Bereich könnten sich durch hohen Druck Kristalle einer dichteren Eissorte bilden.

Die Monde unseres Planetensystems – und davon gibt es reichlich: mit den 8 Monden der Zwergplaneten Pluto, Haumea und Eris sind es 181 Monde – sind also heiße Kandidaten für das Auffinden von Lebensformen. Wen wunderts: Zu einer einzigartigen Erkundungstour zum Jupiter und seinen Eismonden soll die Raumsonde JUICE (JUpiter ICy moon Explorer) der europäischen Weltraumagentur ESA im Jahr 2022 aufbrechen. Eines der Ziele ist es zu klären, ob tief im Inneren der Jupitermonde Ganymed, Kallisto und Europa flüssiges Wasser — und damit die Grundvoraussetzung für die Entstehung von Leben — verborgen ist. Das Jupitersystem soll die Sonde acht Jahre später erreichen (Abbildung 17). Nach mehreren Vorbeiflügen an den Monden Kallisto und Europa soll JUICE im Jahr 2032 in eine Umlaufbahn um den Mond Ganymed einschwenken.

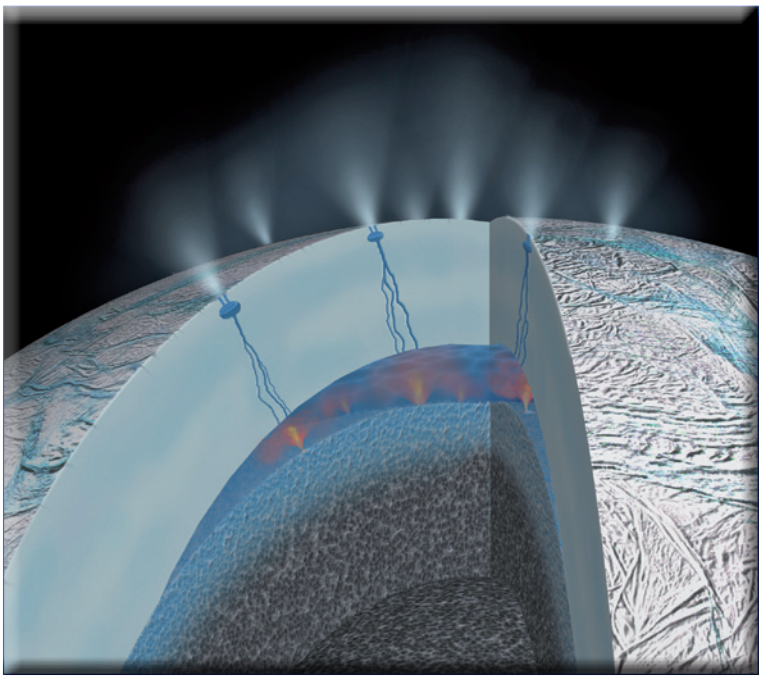
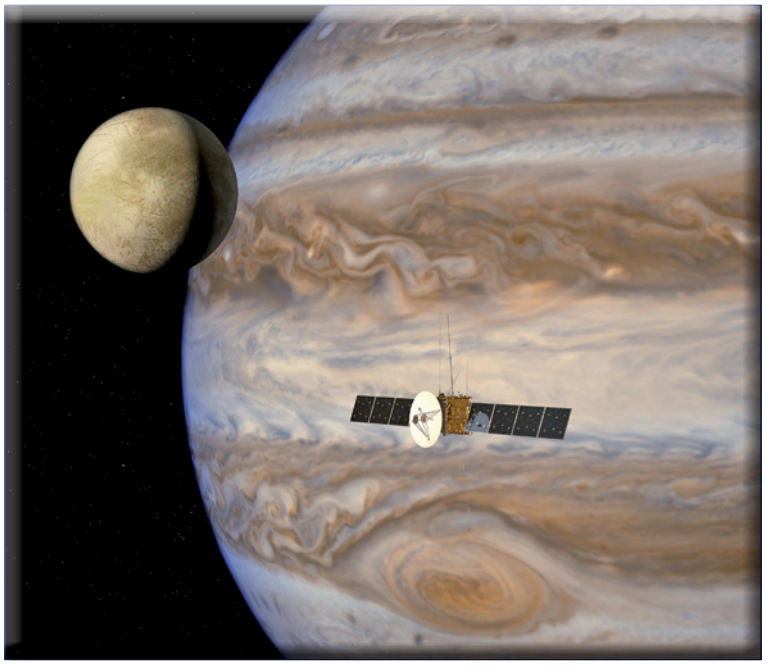


Abbildung 16: Die künstlerische Darstellung des Inneren des Saturnmondes Enceladus zeigt die Wechselwirkungen zwischen heißem Wasser und Fels am unter der Oberfläche gelegenen Meeresboden (Abb.: NASA/JPL-Caltech).

Mysteriöser Saturnmond Titan

Nicht zu vergessen ist Titan, ganz im Gegenteil: Bei ihm laufen mysteriöse Vorgänge ab, die sich am ehesten mit Metabolismen von Leben erklären lassen, fremdartigem Leben. Titan ist mit einem Durchmesser von 5150 Kilometern

Abbildung 17: 2022 soll die Raumsonde „JUICE" ins All starten und acht Jahre später ihr Ziel erreichen: das Jupitersystem. U. a. will man auf den Monden Ganymed, Kallisto und Europa flüssiges Wasser nachweisen (Grafik: ESA/AOES).



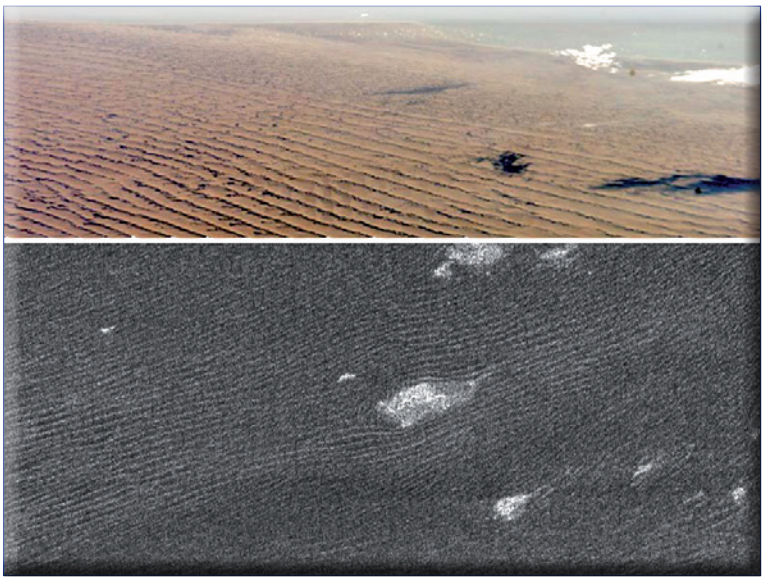


Abbildung 18: Ein Zeichen einer Atmosphäre: Dünen. Oben: Dünen im afrikanischen Namibia; unten: Radarbilder von Dünen auf dem Saturnmond Titan (die hellen Flecken sind keine Wolken, sondern andere Oberflächenstrukturen (Abb.: NASA).

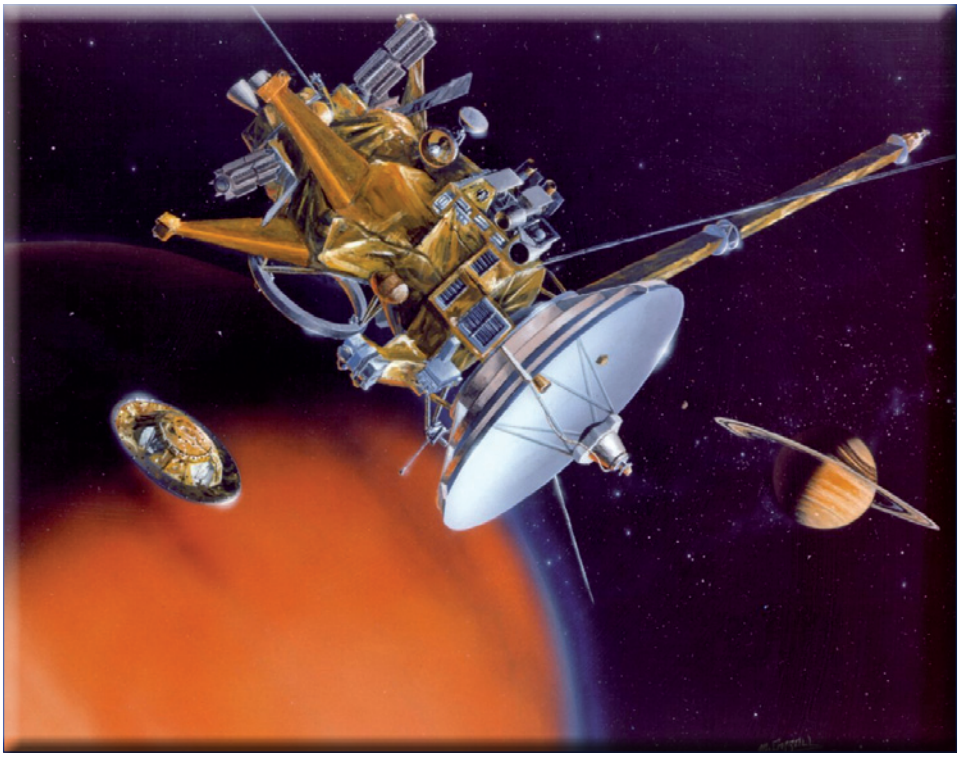
der größte Mond des Planeten Saturn. Es handelt sich bei ihm um einen Eismond, nach Ganymed der zweitgrößte Mond im Sonnensystem und der einzige mit einer dichten Gashülle Abbildung 18). Die Atmosphäre des Titan besteht zu 98,4 % aus Stickstoff und etwa 1,6 % aus Argon. Dazu kommt Methan, das in der oberen Atmosphäre aufgrund seiner geringen Dichte (57 % von Stickstoff) vorherrscht. Außerdem finden sich Spuren von mindestens einem Dutzend anderer organischer Verbindungen, unter anderem Ethan, Propan, Ethin und Cyanwasserstoff. Helium, Kohlenstoffdioxid und Wasser wurden ebenfalls gefunden, jedoch praktisch kein freier Sauerstoff [18].

Die Daten hat man der Cassini-Huygens-Mission zu verdanken (Abbildung 19). Die beiden aneinandergekoppelten Sonden wurden am 15. Oktober 1997 vom Launch Complex 40 auf Cape Canaveral mit einer Titan-IVB-Rakete gestartet. Am 1. Juli 2004 schwenkte Cassini in die Umlaufbahn um den Saturn ein, und am 14. Januar 2005 landete Huygens drei Wochen nach der Trennung von Cassini auf Titan und sandte 72 Minuten lang Daten, die das Verständnis über den Mond deutlich verbesserten.

2010 wurde nach Analyse von Daten der Raumsonde Cassini Hinweise gefunden, dass auf Titan Leben existieren könnte, welches auf einem Methanstoffwechsel basiert. Es ist jedoch nicht ausgeschlossen, dass es sich dabei um unbekannte chemische Prozesse handelt [19]. Konkret stellte man fest, dass Wasserstoff aus der Atmosphäre des Mondes zu Boden sinkt und dort praktisch verschwindet. Gleichzeitig gibt es auf der Oberfläche einen Mangel an Ethin (Acetylen). Selbiges soll sich besonders gut als Energieversorger für Lebensformen eignen, die auf Methan basieren.

Die Huygens-Sonde dokumentierte dann, ungesättigte Kohlenwasserstoffverbindungen – Alkine wie etwa Ethin und die aus ihnen durch UV-Einstrahlung gebildeten Tholine – und auch gesättigte Kohlenwasserstoffe (Alkane wie Ethan) „flocken“ aus der dichten Atmosphäre aus und erreichen die Mondoberfläche. Wenn Mikroben diese Stoffe als Energielieferanten nutzen werden sie dadurch jedoch nur mit dem Minimum für ihre Stoffwechselaktivitäten versorgt. Ethin hingegen bietet ein sechsmal höheres Energiepotential pro Mol an. Abfallprodukt eines solchen letztlich auf Wasserstoff basierenden Metabolismus wäre Methan, und davon findet man auf Titan ganze Seen. Insgesamt bleibt das Verschwinden von Wasserstoff aus der Atmosphäre des Mondes Titan und der Mangel an Ethin mysteriös. Es bildeten sich drei Haupterklärungen dafür heraus: 1. Es liegen Fehlmessungen vor (wenig wahrscheinlich); 2. es existiert ein physikalischer

Abbildung 19: Künstlerische Darstellung der Sonde Cassini (große Sonde) mit dem sich bereits gelösten Landemodul Huygens (links) vor Titan (Vordergrund) und Saturn (Hintergrund; Abb.: NASA).



Transportprozess von Wasserstoff aus der Atmosphäre auf die Oberfläche des Mondes, und dort findet eine Katalysator-unterstützte Hydrierungsreaktion statt. Das ganze müsste allerdings bei minus 180 Grad Celsius Oberflächentemperatur ablaufen, und ein Katalysator, der das leistet, ist bislang in der Chemie nicht bekannt. 3. Es gibt doch einen bislang unbekannten methanbasierten Metabolismus... Die Cassini-Mission soll noch bis Ende 2017 laufen – 20 Jahre nach ihrem Start – und viele Umrundungen bzw. Vorbeiflüge von Saturn, Titan und Enceladus beinhalten.

Tholine – unbekannte Vorläufer des Lebens

Übrigens: Es liegt im vorhergehenden Absatz kein Druckfehler vor: Die Rede ist nicht von Thiolen (Alkohole, deren Sauerstoffatom durch ein Schwefelatom ersetzt ist), sondern von Tholinen. Sollte man davon bislang nichts gehört haben ist, dies nicht verwunderlich: Ihr genauer Aufbau ist Chemikern immer noch unklar. Tholine (das Wort bedeutet „schlammig“) sind organische Moleküle, die das durch ultraviolette Strahlung aus einfachen organischen Substanzen wie Methan oder Ethan gebildet werden. Im Grunde sind sie ähnlich aufgebaut wie irdische Kunststoffe. Salopp ausgedrückt könnte man sagen: Auf dem Titan regnet es Plastik (Abbildung 20). Die Tholine weisen jedoch insgesamt eine komplexe Zusammensetzung auf und bestehen aus Kohlenwasserstoffen, Nitrilen und Aminen.

A propos Kunststoff: Tatsächlich wurden am 30. September 2013 Ergebnisse von Messungen der Raumsonde Cassini veröffentlicht, welche die Existenz von Propen (auch als Propylen bekannt) in der Atmosphäre von Titan nachweisen, der erste Nachweis dieses Kunststoff-Vorläufermoleküls (nämlich Polypropylen) außerhalb der Erde [20]. Die Entdeckung gelang im Rahmen einer Spektralanalyse der Infrarotstrahlung der unteren Titanatmosphäre durch das Composite Infrared Spectrometer (CIRS), einem der 12 wissenschaftlichen Instrumenten an Bord von Cassini.

Tholine gelten als Vorläufer für Bausteine des Lebens. Spektralanalysen weisen auf Heteropolymere hin; die Substanzen haben eine rötlich-braune Farbe. Der Astronom Carl Sagan entdeckte sie in der Atmosphäre von Titan. Eine Reihe von Bakterien sind in der Lage, Tholine als Kohlenstoffquelle zu nutzen. Daher vermutet man, dass sie in der Frühgeschichte der Erde eine Rolle bei der Entstehung und dem Stoffwechsel der ersten Mikroorganismen spielten. Auch auf Kometen wurden Tholine mittlerweile entdeckt. Bemerkenswert gerade auch für die Diskussion über Leben in fremden Planetensystemen: Außerhalb unseres Sonnensystems wurde der Stoff

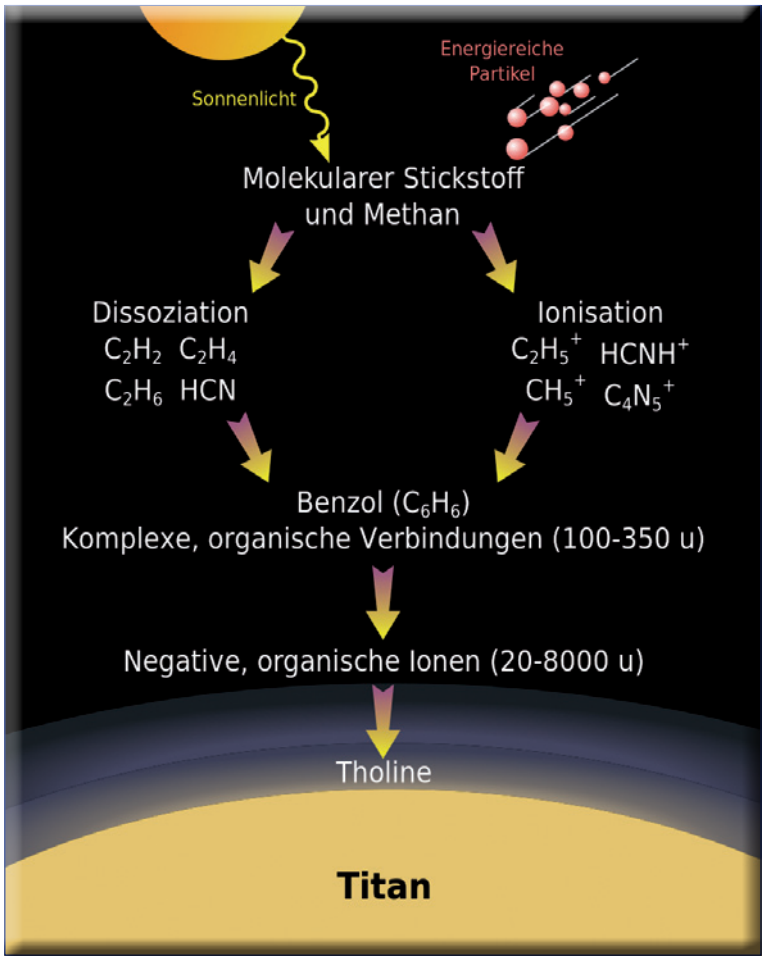


Abbildung 20: Eine ungefähre Vorstellung von der Entstehung von Tholinen hoch in der Atmosphäre des Titan gibt diese Grafik. Tholine, komplexe organische Moleküle, spielen wohl eine wesentliche Rolle in der präbiotischen Chemie (Abb.: NASA).

im Jahr 2007 in der Staubscheibe um den Stern HR 4796A (220 Lichtjahre von der Erde entfernt) erstmals nachgewiesen.

Zellmembran für flüssiges Methan

Noch ist methanbasiertes Leben unbekannt. Jüngst gab es jedoch eine Veröffentlichung, in der Forscher künstliche Zellmembranen vorstellten, die sich in Umgebungen wie auf dem Titanmond formen könnten. Die Analoga auf der Erde sind Liposome. Ein Liposom ist ein Vesikels, das eine wässrige Phase einschließt, und dessen Membranhülle aus einer Doppelschicht von Molekülen besteht: Sie verfügen sowohl über einen unpolaren, lipophilen, als auch einen polaren, hydrophilen Teil. Meist handelt es sich bei den membranbildenden Molekülen um Substanzen aus der Stoffklasse der Lipide, wie zum Beispiel Phospholipide und Fettsäuren.

US-amerikanische Chemieingenieure haben zusammen mit Astronomen nun nach Überlegungen, welche Grundstoffe auf Titan anzutreffen wären, mit Software ein Vesikel simuliert, das ganz ohne Sauerstoff auskommt, eine Zellhülle bilden kann, die so stabil und flexibel ist wie solche aus Phos-

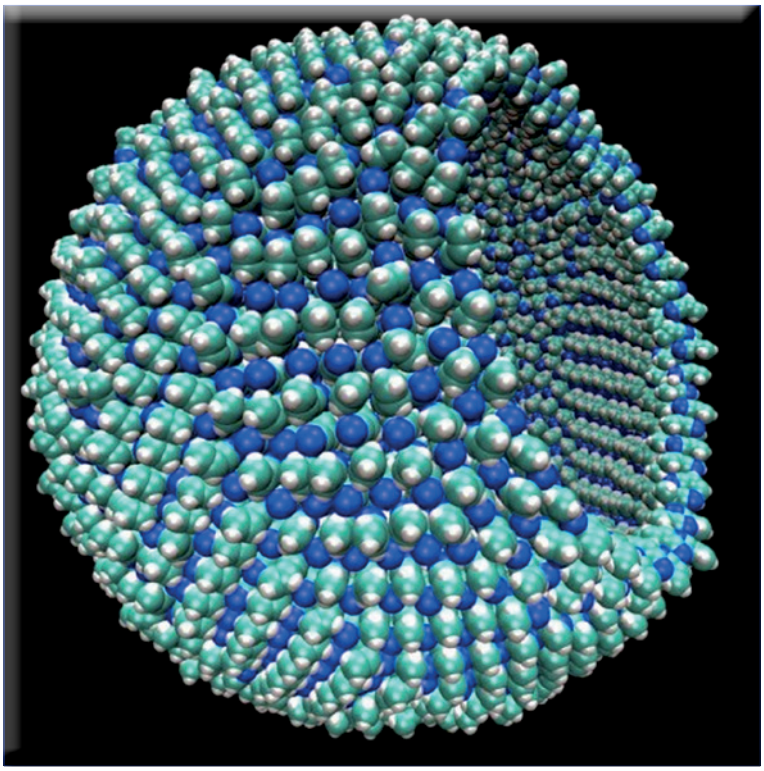


Abbildung 21: Ein Modell eines Azotosoms, eines Vesikels ähnlich dem eines Lipids, aber bei minus 180 Grad noch flexibel. Der Durchmesser beträgt 9 Nanometer, die Größe eines kleinen Virus (Abb.: James Stevenson / Cornell University).

pholipiden, und das sich ebenso selbstorganisierend bildet [21]. Sie nannten das neue Vesikel „Azotosom“, entsprechend Liposom (mit den Wortbestandteilen „Fett“ und „Körper“). Wie der Name schon sagt – „azote“ steht im Französischen für Stickstoff – besteht das künstliche Vesikel aus Stickstoff, dazu Kohlenstoff und Wasserstoff. Als Ausgangsverbindungen für Azotosome (Abbildung 21) nahmen die Forscher Nitrile wie Acrylnitril und Amine, da man von Tholinen in der Atmosphäre des Titan ausging. Die Moleküle, die man wählte, waren viel kürzer als typische Phospholipide mit ihren Kohlenstoffketten aus 20 bis 25 Atomen. Damit trug man allerdings auch der Kälte Rechnung: Die sich bildenden Vesikel sollten ja zwischen minus 182 und minus 162 Grad Celsius flexibel und stabil sein – dem Schmelz- und Siedepunkt von Methan.

Das Resultat der Programmläufe mit Software der Moleküldynamik zeigte dann, dass Azotosome bei Temperaturen flüssigen Methans eine Flexibilität wie Lipide bei Raumtemperatur aufwiesen. Als treibende Kraft zur Selbstorganisation gilt die Polarität, die durch die Stickstoffatome in die Moleküle eingebracht wird. Das Experiment beweist kein neuartiges Leben, aber es zeigt nach Aussage der Forscher, dass es Möglichkeiten exotischer Metabolismen auch unter den eisigen Bedingungen flüssigen Methans gibt, die Erfordernissen von Lebensbausteinen genügen.

Methanbasierte Lebensformen sind übrigens nicht mit Methanbildner (früher auch Methanbakterien genannt) zu verwechseln. Dabei handelt es sich um Archaeen (Archaebakterien), bei deren Energiestoffwechsel Methanbildung stattfindet. Die Methanbildner nutzen die Energie freisetzende Methanogenese als Energiequelle. Einige wasserstoffoxidierende Methanogene nutzen Kohlenstoffdioxid als einzige Kohlenstoffquelle bei der Synthese aller zellulären Bestandteile. Sie assimilieren CO2 auf dem Acetyl-CoA-Weg. Bei dem reduktiven Acetyl-CoA-Weg handelt es sich um einen nichtzyklischen Weg der Fixierung von Kohlenstoffdioxid bzw. verschiedenen C1-Verbindungen wie Formiat, Methanol, Kohlenmonoxid, Methylamin oder Methylether. Als Reduktionsmittel dient hierbei elementarer Wasserstoff. Die Methanbildner sind strikt anaerob. Ihr Stoffwechsel läuft bei Temperaturen zwischen 0 und 70 Grad Celsius ab, bei wenigen Arten sogar bei bis zu 90 Grad.

Exomonde

Dass es so viele Monde in einem Planetensystem wie dem unseren gibt ist wohl auch kein Einzelfall. Noch ist kein Exomond einwandfrei nachgewiesen. Im April 2014 meldete die NASA, einen möglichen Exomond-Kandidaten mittels Gravitationslinseneffekts gefunden zu haben [22]. Die Beobachtungsdaten des Systems MOA-2011-BLG-262 stehen mit einem frei fliegenden Exoplaneten im Einklang, der von einem Exomond (der etwas kleiner als die Erde sein dürfte) in einem Abstand von etwa 0,13 AE (etwa 20 Mio. Kilometer) umkreist wird. Allerdings können die Daten auch mit einem System aus einem Braunen Zwerg und einem jupiterähnlichen Gasplaneten erklärt werden, sodass keine definitive Entdeckung eines Exomondes vorliegt. Das System wurde mit Hilfe des Gravitationslinseneffekts gefunden. Darunter versteht man die Verstärkung des Lichts eines Hintergrundobjekts durch Gravitationslinsenwirkung eines Vordergrundsterns. Masse krümmt den Raum – und „verbiegt“ dadurch auch Lichtstrahlen. Eine große Masse kann dabei den Effekt einer optischen Linse haben. Bei der Beobachtung heißt dies: Die Verstärkung nimmt zu und wieder ab, während sich der Stern vor dem Hintergrundobjekt vorbeibewegt. Solche Ereignisse sind selten, erlauben aber auch Beobachtungen bei weit entfernten Sternen. MOA-2011-BLG-262 ist 1800 Lichtjahre von der Erde entfernt...

Mittlerweile sucht man auch mit Computern nach Exomonden, in den Datenmengen, die das Weltraumteleskop „Kepler“ liefert. Das astronomische Forschungsprojekt „The Hunt for Exomoons with Kepler“ (HEK) am Center for As-

trophysics in Harvard sucht nach Signaturen von Exomonden in den Daten des 2009 gestarteten Weltraumteleskops. Es wurde von der NASA speziell dafür konzipiert, Exoplaneten zu finden. Aufgrund der riesigen Datenmengen denkt man, dass das Projekt 2017 abgeschlossen sein wird.

Und der Mars?

Marsianer, meist klein und grün, mit großen Augen beschrieben, sind ein Mythos, der schon Ende des 19. Jahrhunderts aufkam und auch von vielen Wissenschaftlern verfolgt wurde (siehe auch Abbildung 2). Tatsächlich ist der Mars von besonderem Interesse für das Studium des Ursprungs des Lebens, da er der frühen Erde sehr ähnlich ist. Mindestens zwei Drittel der Marsoberfläche sind mehr als 3,5 Milliarden Jahre alt. Daher könnte der Mars präbiotische Bedingungen besitzen, die zur spontanen Erzeugung von Leben geführt haben könnten – auch wenn es jetzt nicht mehr existiert. Es gibt sogar Meinungen, die sich auf die Hypothese der Panspermie stützen und sagen, Leben sei von dem Mars auf die Erde gebracht worden.

Anfang 2014 meldete die NASA, dass aktuelle Untersuchungen der Marsrover Curiosity (Abbildung 22) und Opportunity nun nach Anzeichen für Leben auf dem Mars suchen würden. Das weitgehend autonome Gefährt, dessen Namen auf deutsch „Neugier“ bedeutet, landete am 6. August 2012 auf dem Nachbarplaneten. Bereits seit dem 25. Januar 2004 befand sich das Vehikel „Opportunity“ (deutsch: Chance / Gelegenheit) dort, drei Wochen nach der baugleichen Schwestersonde Spirit (4. Januar 2004). Beide werden als „Mars Exploration Rover“ (MER) bezeichnet. Hinweise vom Boden auf ehemals flüssiges Wasser auf dem Mars konnte die NASA erstmals am 2. März 2004 vermelden: Opportunitys Instrumente entdeckten hohe Schwefelkonzentrationen im Gestein, wie sie unter irdischen Bedingungen meist nur in Gips bzw. Anhydrit (beides Calciumsulfat) zu finden sind. Derartiges Gestein entsteht auf der Erde fast ausschließlich durch Eindampfung mineralhaltiger Wässer. Des Weiteren fanden die Instrumente des Rovers Jarosit, ein Eisen-Schwefel-Mineral, das auf der Erde ebenfalls nur unter Mitwirkung von Wasser entsteht. Auf der Erde ist das Vorkommen dieser Salze in den vorliegenden Konzentrationen ein eindeutiges Anzeichen dafür, dass das Gestein entweder in offen stehendem Wasser ausgefällt wurde oder über einen längeren Zeitraum hinweg Grundwasser ausgesetzt war. Diese Entdeckungen waren mit den beiden in Deutschland entwickelten, nur faustgroßen und damit extrem miniaturisierten Instrumenten APXS (Alpha Particle X-Ray Spectrometer) und MIMOS

Abbildung 22: „Selfie“ des Mars-Rovers Curiosity mit Hilfe eines Robotarms im Krater Gale am 31. Oktober 2012 auf dem Mars (Abb.: NASA).

II (Miniaturisiertes Mößbauer-Spektrometer) möglich geworden. Einer NASA-Mitteilung vom 23. März 2004 zufolge kann als sicher gelten, dass an der Landestelle früher ein offener flacher Salzsee oder Ozean bestanden hat. Der Rover konnte in einer Serie von über 200 Mikrofotos an einem Teilaufschluss der anstehenden Gesteinsschichten Sedimentstrukturen räumlich erfassen, deren irdische Äquivalente nur durch bewegtes Wasser entstehen. Wikipedia wertet: Die Doppelmission der Mars Exploration Rovers darf bereits jetzt, noch vor ihrem Abschluss, als in technischer und wissenschaftlicher Hinsicht außerordentlich erfolgreich gelten. Es ist zum ersten Mal der Nachweis direkt vor Ort gelungen, dass auch auf anderen Planeten flüssige Wasservorkommen und damit die Voraussetzungen für die mögliche Entstehung von Leben auf dem Mars existieren oder existiert haben. Es ist das erste Mal, dass Sedimentgesteine eines fremden Planeten untersucht werden konnten [23].

Auch die Sonde Curiosity hat Erfolg, mit Fotos (Abbildung 23) und chemischen Analysen. Am 12. März 2013 gab die NASA bekannt, dass man in der ersten 6,4 cm tiefen Bohrung Anfang Fe-

Abbildung 23: Sonnenuntergang auf dem Mars. Das Panorama wurde vom Curiosity-Rover im Februar 2013 aufgenommen (Abb.: NASA).

bruar eine große Zahl der „Bausteine des Lebens“ gefunden hat. Dies sei ein starker Hinweis darauf, dass der Mars in seiner Vergangenheit Leben beherbergen konnte. Im Detail wurden signifikante Mengen der Elemente Wasserstoff, Sauerstoff, Kohlenstoff, Stickstoff, Phosphor und Schwefel in der Probe gefunden. Diese befanden sich zudem in unterschiedlichen Oxidationszuständen, was auf eine dynamische chemische Umgebung hindeute, wobei insbesondere die Schwefelverbindungen als Energielieferant für Mikroorganismen gedient haben könnten [24].

Erst im April dieses Jahres wurde ein weiterer Erfolg bekannt: Auf dem Mars gibt es möglicherweise auch heute noch flüssiges Wasser. Darauf deuten jedenfalls Messungen des Mars-Rovers Curiosity hin [25]. Man entdeckte Calciumperchlorat im Boden, das unter Bedingungen, wie sie auf dem Mars beispielsweise nachts herrschen, Wasserdampf aus der Atmosphäre absorbieren kann. Wenn Nachts der Wasserdampf aus der Atmosphäre als Reif kondensiert, bildet er am Boden mit dem Calciumperchlorat eine Salzlauge, wobei der Gefrierpunkt sinkt und der Reif so zu einer Flüssigkeit werden kann. Diese sickert dann ein paar Zentimeter in den porösen Boden ein – und entlässt am nächsten Tag das Wasser wieder als Dampf.

Drake: Anteil an Sternen mit Planetensystem f_p

Wir wollen die Drake-Gleichung als Diskussionsgrundlage über extraterrestrisches Leben nicht ganz aus den Augen verlieren. Mit den Betrachtungen über Planeten und Monde wurden jetzt schon viele Eindrücke geliefert, ob es sich bei Planetensystemen um andere Sterne um eher seltene oder – wie wohl anzunehmen ist – häufige, geradezu normale Konfigurationen handelt. Man nimmt mittlerweile an, dass etwa die Hälfte aller Sterne über Planetensysteme wie das unserer Sonne verfügt. f_p wäre demnach mit 0,5 anzusetzen; etliche Astronomen halten die Entstehung von Planetensystemen für unausweichlich und setzen f_p demnach auf 1. Drake war etwas vorsichtiger und kalkulierte mit 0,2 bis 0,5.

Drake: Anzahl der Planeten in der Ökosphäre n_e

Bei der Betrachtung der Exoplaneten klang auch schon der Begriff „habitabel“ an. Gemeint ist damit die nach unseren Vorstellungen grundsätzliche Besiedelbarkeit durch Lebewesen. Dazu sollten sich die Planeten in der Ökosphäre ihres Zentralgestirns befinden. Ihr Abstand von der jeweiligen Sonne muss also so ausgerichtet sein, dass dauerhaft flüssiges Wasser auf dem Planeten existiert, Voraussetzung für die Lebensentstehung. Gelegentlich wird das Konzept einer Umgebung, in der Leben in der uns bekannten oder ähnlicher Form möglich ist, auch auf andere Parameter als Klima und flüssiges Wasser ausgedehnt. So wird von einer UV-habitablen Zone gesprochen, in der die ultraviolette Strahlung der der (frühen) Erde entsprechen muss. Primär hängt die habitable Zone von der Temperatur und Leuchtkraft des Sterns ab, um den der Planet kreist. Darüber hinaus spielen Oberflächenbeschaffenheit des Planeten (die Albedo, also das das Rückstrahlvermögen) sowie die Atmosphäre (Stichworte Klimagase und Treibhauseffekt) eine wichtige Rolle.

Nach den jetzt verfügbaren Daten von Exoplaneten oder Kandidaten für Exoplaneten (also gemessenen Datensätzen, die noch weiterer Klärung bedürfen) liegt ein nicht unbeträchtlicher Anteil von ihnen in der habitablen Zone des jeweiligen Zentralgestirns (Abbildung 24) [26]. Da die NASA zur aktuellen Exoplanetenforschung kontinuierlich Zahlen veröffentlicht [27], lässt sich der Anteil von Exoplaneten in Ökosphären relativ gut abschätzen. Nach Stand vom 3. Mai 2015 waren von den 4637 Planetenmessungen des Kepler-Teleskops (davon 1023 abgesicherte Planetenentdeckungen, die anderen Kandiaten dafür) 297 in einer habitablen Zone verortet. Es spricht also einiges dafür, wenn man den Anteil von Exoplaneten in habitablen Zonen auf rund 7 Prozent setzt, n_e der Drake-Gleichung also mit dem Wert 0,07 versieht.

Drake selbst gab den Wert mit 2 an, nach einer etwas anderen Zählweise: Er wollte damit die Anzahl bewohnbarer Planeten in jedem Planeten-

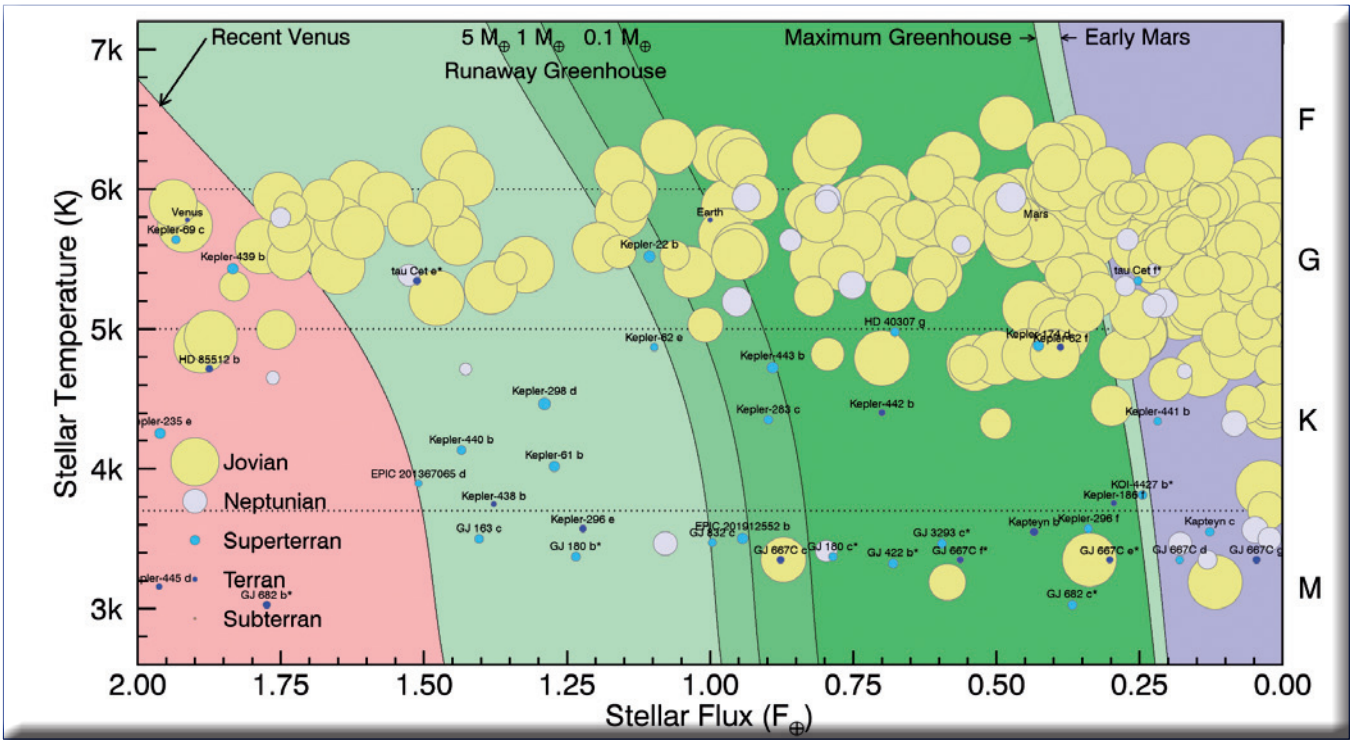


Abbildung 24: Alle bekannten (teils noch unbestätigten, mit Stern gekennzeichneten) Planeten, die sich in der Nähe der habitablen (bewohnbaren) Zone (grüne Schattierungen) eines Sterns befinden. Es wurden nur solche Planeten gekennzeichnet, die weniger als 10 Erdmassen schwer oder kleiner als das 2,5-fache des Erdradius sind. Die Größe der Kreise korrespondiert mit dem Radius der Planeten. In dem Diagramm ist die Temperatur des Sterns gegen seine Strahlung aufgetragen (Abb.: phl.upr.edu, April 2015).

system darstellen und ging von unserem Sonnensystem aus. Und da ist die Erde sicher bewohnt, und er zählte noch den Mars als bewohnbar hinzu. Auf der Webseite des SETI-Instituts ist auch jetzt zu lesen: „n_e = The number of planets, per solar system, with an environment suitable for life" – also die ursprüngliche Drake-Definition. Insofern wäre 1 ein sinnvoller Wert; ein in der heutigen Diskussion häufig genannter Wert für ist n_e = 0,2, aber auch 0,01 ist zu finden, warum? Inzwischen geht man davon aus, dass noch mehr Voraussetzungen für die Entstehung von Leben gegeben sein müssen als nur Wasser. Der Planet solle etwa eine passende Größe haben. Ab einem Gewicht von rund zehn Erdmassen zieht der Planet riesige Mengen Gas an, wird zu einer Art Jupiter. Dessen Gasschichten lassen wohl kein Leben zu. Kleine Planeten andererseits können keine Atmosphäre halten. Und es gibt noch weitere Einschränkungen...

Drake: Anzahl der Planeten mit Leben f_l

Jetzt wird es sehr spekulativ, den davon kennen wir zur Zeit nur einen: Drake führte in seiner Gleichung auch den Faktor f_l auf. f_l steht dabei für den Anteil an Planeten, auf denen Leben existiert. Wie gesagt, wir kennen nur einen, unsere Erde. f_l bezieht sich allerdings auf den zuvor genannten Faktor n_e . Drake ging davon aus, das praktisch auf allen Planeten, auf denen Leben möglich ist, zwangsläufig auch Leben entsteht. Er setzte f_l daher auf 1. Nach den heutigen Erkenntnissen der Lebensentstehung und -erhaltung, auch unter extremen Bedingungen (Schwarzer Raucher, Weltraum (Bärtierchen) etc.) ist diese Annahme nicht von der Hand zu weisen; viele Wissenschaftler halten die entsprechenden Übelegungen für realistisch.

Drake: Hochspekulativ f_i, f_c und L

Hochspekulativ wird es, wenn man die Faktoren f_i , f_c und L der Drake-Gleichung mit Zahlen belegen will. f_i steht wie schon erläutert für den Anteil der bereits mit Lebensformen besiedelten Planeten, auf denen intelligentes Leben evolviert. f_c geht dann noch einen Schritt weiter und bezeichnet den Anteil von Planeten mit intelligentem Leben, deren Lebensformen detektierbare Signale ihrer Existenz in den Weltraum senden. L schließlich steht für die Zeitdauer, während derer solche Signale von den jeweiligen Zivilisationen in den Weltraum gesendet werden.

Um es kurz zu machen: Drake diskutierte für f_i Zahlen zwischen 0,01 und 1, sprich 1 bis 100 Prozent aller Planeten, die Leben entwickeln, entwickeln auch intelligentes Leben. Für f_c – Intelligenzen, die Botschaften in den Weltraum senden – nahm er einen Anteil zwischen 1 und 10 Prozent an, also die Werte 0,01 bis 0,1. Zu L – der Zeitdauer, in der diese Nachrichten ver-

Abbildung 25: Die zwei Galaxien NGC 5426 and NGC 5427 kommen sich – 127 Millionen Lichtjahre entfernt von uns und in ihrer Gesamtausdehnung 130 000 Lichtjahre messend – gefährlich nahe. Simulationen zeigen, dass Ähnliches in 5 Milliarden Jahren mit unserer Milchstraße und der benachbarten Andromeda-Galaxie passieren wird, die derzeit noch 2,6 Millionen Lichtjahre entfernt ist. Durch Gravitationsschwankungen zwischen den beiden großen Galaxien kommt es zu Kompressionen von Gasen zwischen ihnen, durch die neue Sterne entstehen.
Galaxien enthalten im Durchschnitt etwa 100 Milliarden Sterne – und es gibt rund 100 Milliarden Galaxien im bekannten Universum; auf dem Bild sind ja auch noch etliche als unscharfe Bildflecken zu sehen. Da soll es nirgendwo wieder eine Konstellation von Molekülen und Wärme gegeben haben, die zu Leben geführt hat? Eher unwahrscheinlich (Abb.: Gemini Observatory / NSF).

schickt werden – wird ein Durchschnittswert von 10 000 Jahren überliefert. Hier nochmal die ganze Gleichung zur Erinnerung: $N = R_* \cdot f_p \cdot n_e \cdot f_l \cdot f_i \cdot f_c \cdot L$

In der Sendung „Quarks & Co“ des Westdeutschen Rundfunks vom 2. Februar 2010 mit dem Titel „Die Drake-Gleichung: Sind wir alleine im Universum?“ erhielt der bekannte Wissenschaftsjournalist Ranga Yogeshwar von Wissenschaftlern Angaben vermittelt, die ihn zu folgenden Werten veranlassten: 0,001 für f_i, also nur jeder tausendste Planet, auf dem sich Lebensformen finden, soll auch intelligentes Leben entwickeln. Davon dann nahmen die Berater von Yogeshwar aber an, dass jede zehnte Zivilisation kommunikativ ist, demnach f_c 0,1 sei – insgesamt etwas positiver als Drake. Für L wählte Quarks & Co eine mittlere Schätzung und ging von 20 000 Jahren aus. f_l (lebensgeeignete Planeten, auf denen dann auch Leben besteht) bezifferte die Sendung wie Drake auf 1, n_e (Planeten in Ökosphäre) mit 0,01, f_p (Anteil an Sternen mit Planetensystemen) mit 0,5 sowie R_* (Anzahl neuer Sterne, die in ihrem System Leben tragen könnten, pro Jahr in der Galaxis) mit 1. Als Ergebnis N erhielt die Fernsehmannschaft damit 0,01, also eine hundertstel Zivilisation in unserer Galaxis, anders ausgedrück: Rein rechnerisch dauert es einhundert Jahre, bis wir mit einer außerirdischen Zivilisation in Kontakt treten können. Hauptgrund für diesen niedrigen Wert: Die sehr geringe Annahme von n_e *;* nur 0,01 Planeten pro Planetensystem sollen bewohnbar sein.

In der ursprünglichen Konferenz, auf der John Drake die Formel vorstellte, ergab sich, dass nach den Schätzungen seiner Zeitgenossen die Anzahl der Zivilisationen in unserer Galaxis, mit denen wir Kontakt aufnehmen können, etwa mit der Anzahl der angenommenen Jahre der Existenz von in den Weltraum versendeten Signalen korrelierte, also im Schnitt bei 10 000 lag – mit der großen Spannweite zwischen einer Zivilisation und mehreren Millionen... L ist sowieso der wichtigste – und willkürlichste – Faktor in der Gleichung, da die anderen meist Werte zwischen o und 1 annehmen. Die genannten großen Differenzen relativieren sich etwas, sieht man, welche riesigen Raumdimensionen damit verknüpft sind: Der mittlerer Abstand zweier sendender Zivilisationen liegt bei 100 Zivilisationen in unserer Galaxis bei 5000 Lichtjahren; bei Millionen Zivilisationen sind es aber immer noch etliche Lichtjahre! Der amerikanische Astronom und Exobiologe Carl Sagan schätzte übrigens die Anzahl an Zivilisationen auf zehn. Nicht zu vergessen: Unsere Milchstraße enthält ungefähr 300 Milliarden Sterne – wie etwa die meisten ähnlichen Galaxien (Abbildung 25).

Leben – einmal anders gesehen

Ich denke, die Drake-Fraktion liegt mit 10 000 angenommenen Zivilisationen in unserer Galaxis gar nicht so falsch, allerdings aus anderen Gründen. Wohl auch John Drake hat – wie die

meisten, die über Leben auf fernen Planeten spekulieren – an das uns bekannte Leben gedacht: Kohlenstoffbasierte Organismen, intelligente Einzelwesen, spitz formuliert: Marsmenschen... Das ist meiner Ansicht nach zu kurz gedach, auch im wörtlichen Sinne: die evolutionäre Entwicklung in ihrer möglichen zukünftigen Ausprägung kommt dabei nicht zum Tragen. Details dazu bieten die CLB-Artikel „Evolution und Information: Wachstum ist quasi ein Naturgesetz“ (CLB 1/2-2014, S. 26-40) sowie „Transhumanismus: Technologie für Verheißung, Drohung oder Normalität?“ (CLB 1/2-2015, S. 8-34).

Zusammengefasst lässt sich sagen: Es gibt eine physikalische Evolution, ausgehend vom Urknall über die Entstehung der Elementarteilchen bis hin zu den Molekülen; man kann auch eine geologische Evolution in dem Entstehen von Planeten aus interstellarem Staub hin zu glühenden Planeten bis hin zu unserer Erde sehen. Es gibt zweifellos eine biologische Evolution, und es gibt eine Evolution der technischen Möglichkeiten der Menschen. Es gibt aber keinen Grund, Grenzen zwischen diesen Evolutionen zu ziehen. Alles wird durch die physikalischen Gesetze beschrieben.

Zwar gibt es Unterschiede in den Evolutionsschritten. Bei jeder Entstehung von als natürlich bezeichneten Dingen erfolgt der Prozess des Entstehens durch Nutzung von Mitteln zur Informationsübermittlung, die weitestgehend auf molekulare Mechanismen zurückgehen. Bei als künstlich angesehenen Produkten gibt es immer mindestens einen Schritt in der Entstehungsgeschichte, der auf nicht-molekulare Informationsweitergabe beruht, sei es durch Akustik (zum Beispiel Sprache), Optik (etwa Schrift) oder andere entsprechende Wege wie beispielsweise Computerprogramme – die ja selbst in der Entstehung irgendwann auf Sprache, Schrift etc. zurückgreifen.

Was ist dann daran so „schlimm“ – in mancher Argumentation von grün angehauchten Mitmenschen, dass Künstliches nicht nur auf molekulare Mechanismen zurückgreift? Ist das nicht sogar als positiv zu beurteilen, als ein Zeichen fortgeschrittener Evolution? Nun, da hilft der Blick auf einen maßgeblichen Unterschied zwischen der molekularen Informationsübermittlung und derjenigen, die auf andere oben genannte Wege zurückgreift: die sind erheblich schneller.

Nie hat man das in der Menschheitsgeschichte so beobachten können wie in den letzten drei Generationen – nachdem dutzende Generationen im Mittelalter Stillstand oder sogar Rückgang gegenüber der griechischen und römischen Kultur und Technik erleben mussten (siehe CLB 7/8-2012, S. 310-319 „1000 verlorene Jahre – mindestens“): Meine Großeltern erlebten die Mechanisierung der Arbeitswelt, meine Eltern schnelle Kommunikation durch Verkehrswege und -mittel sowie durch Radio und Telefon, und ich selbst habe den Kulturschock vom „Plumpsklo“, das bei einigen Bekannten in meiner Kindheit noch normal war, bis hin zum Petaflops-Computer und allgegenwärtigen Internet bislang gut verkraftet ;-)

2014 wurden voraussichtlich rund 1,3 Milliarden Smartphones abgesetzt. Gemäß einer neuen Studie soll es bis zum Jahr 2020 weltweit 6,1 Milliarden Smartphoneteilnehmer geben [28]. Zusätzlich mit normalen Handys, mobilen Computern, Tablets etc. soll der gesamte Mobilfunkbereich bis dahin auf insgesamt 9,5 Milliarden Geräte ansteigen. 90 Prozent der Weltbevölkerung über sechs Jahren sollen zumindest über ein Gerät dieser Art verfügen. Und alles ist miteinander verbunden. Wen wundert es da, dass Ideen eines globalen Bewusstseins auftauchen? Schließlich wird mit der Anzahl der Menschen von etwa sieben Milliarden eine Größenordnung erreicht, die in die Nähe der Anzahl der Neuronen im menschlichen Gehirn kommt.

In absehbarer Zeit wird es wohl etwas geben, dass dem Menschen geistig überlegen ist – wie man salopp sagen könnte. Ob dies nun über das Internet und die mit ihm verbundenen Menschen – die ja selbst auch immer mehr mit Hilfe elektronischer Implantate zu „Cyborgs“ werden – oder über einen separaten Supercomputer mit neuromorpher Hardware geschieht mag dahingestellt bleiben. Das bedeutet noch lange nicht, dass dann die Menschen ihre Führungsrolle auf diesem Planeten aufgeben werden oder müssen. Fehler wie die Übereignung nuklearer Waffengewalt an die Künstliche Intelligenz – wie bereits in dem Film „Colossus“ von 1969 thematisiert – dürften die Menschen nicht machen. Sicherlich ist es aber eine gute Idee etwa von Google, einen Ethikrat ins Leben zu rufen, der die Entwicklung von Systemen künstlicher Intelligenz begleitet. Ebenso wird es von Vorteil sein, transhumanistische Überlegungen anzustellen.

Die Kardaschow-Skala

In fernerer Zukunft jedoch haben die Menschen vielleicht noch eine geduldete (und vielleicht unterstützte) Bleibe auf dem Planeten. Mehr und mehr wird der sich jedoch in eine riesige „Denkmaschine“ verwandelt haben. Visionäre Wissenschaftler gehen davon aus, dass immer mehr Strukturen auf einem Planeten der Informationsverarbeitung dienen – bis er von ihnen nicht nur vollständig bedeckt ist, sondern insgesamt daraus besteht. Ein Suchen nach organischen Molekülen, Wasser auf Planeten etc. ist bei Lebensformen, die derart fortgeschritten sind,

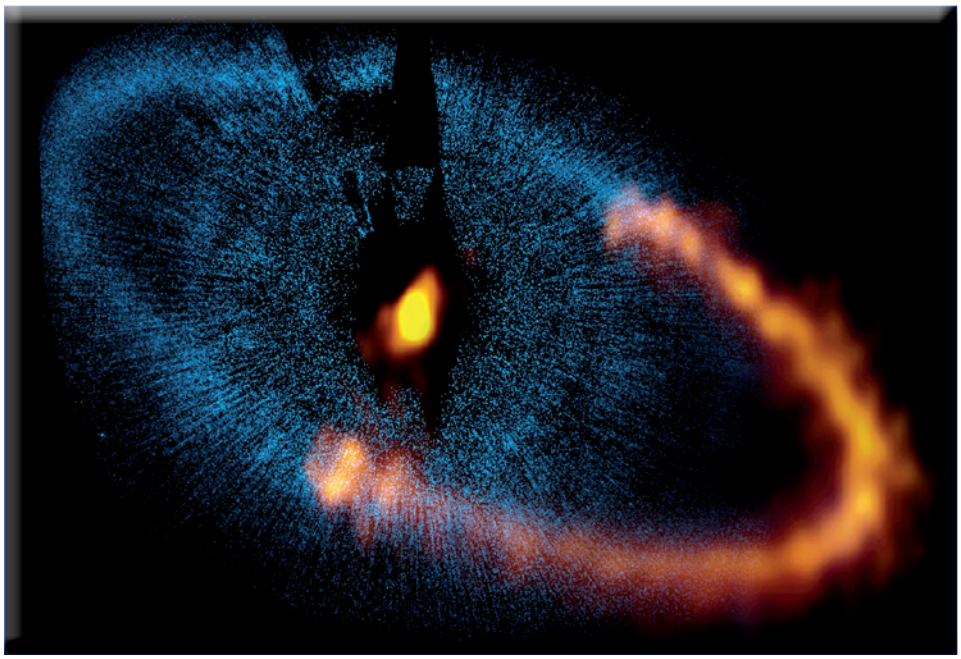


Abbildung 26: Der Stern Formalhaut nur 25 Lichtjahre von der Sonne entfernt ist von einer dichten Staubwolke umgeben. Eine Dyson-Sphäre dürfte eine Strahlung mit ähnlicher Charakteristik aussenden. Das Bild zeigt die Staubscheibe mit einer Aufnahmenkombination des Hubble-Weltraumteleskops (blauer Teil) und des neueren ALMA-Observatoriums (siehe Kasten unten; Abb.: ESO/NAOJ/NRAO/ESA/NASA).

ein zu kurz gegriffenes Mittel, um außerirdisches Leben zu finden.

Kohlenstoffchauvinismus

Bisher denkt man ja: Man könnte möglicherweise dieses Leben nachweisen, indem man die Atmosphäre des entsprechenden Planeten auf Sauerstoff untersucht. Ohne die Produktion von Sauerstoff durch Lebewesen würde das Gas nicht lange in der Atmosphäre bleiben, weil es recht einfach mit anderen Elementen reagiert. Deshalb wird Sauerstoff auch als Biomarker bezeichnet. Lebewesen, die sich aus der technischen Evolution entfalten, könnten aber ganz andere energieliefernde Prozesse als Oxidationsprozesse nutzen. Für die eingeschränkte Sehensweise auf kohlenstoffbasiertes Leben gibt es mittlerweile sogar eine Bezeichnung: Kohlenstoffchauvinismus. In der Astrobiologie werden Haltungen als kohlenstoffchauvinistisch kritisiert, wenn sie die Möglichkeit der Entstehung von extraterrestrischem Leben nur auf Kohlenstoffbasis diskutieren.

Es gibt seit längerem Szenarien, welche vorstellbaren Schritte technische Zivilisationen nehmen können. Sie werden u.a. mit der Kardaschow-Skala beschrieben. Ein Szenario darin bilden Dyson-Sphären.

ALMA: Hoher Aufwand für extrasolare Planetenforschung

Extrasolare Planetenforschung wird mit immer höherem Aufwand betrieben. Neuestes Beispiel dafür ist ALMA: Das „Atacama Large Millimeter/submillimeter Array" ist seit seiner Fertigstellung im Juni 2014 ein aus 66 Einzelantennen (davon 50 frei positionierbar) bestehendes Interferometer für Millimeterwellen und Submillimeterwellen. Die Antennenanordnung befindet sich 5000 m über dem Meeresspiegel auf dem Chajnantor-Plateau in der Atacamawüste im Norden von Chile. ALMA ist eines der größten Projekte der bodengebundenen Astronomie. Zu den Aufgaben des von Nordamerika, Japan und Europa gemeinsam finanzierten Instruments gehört es, die Entstehungsgebiete von Planeten und Sternen in kalten interstellaren Wolken und protoplanetaren Akkretionsscheiben zu erforschen. Die Millimeterwellen sind besonders geeignet, ausgedehnte Gas- und Staubwolken zu durchdringen, die die Stern- und Planeten-Entstehungsgebiete verhüllen. Dabei fallen riesige Datenmengen an. Für ihre Verarbeitung sorgt der ALMA-Korrelator, ein Rechner mit 134 Millionen Prozessoren, welche die empfangenen Signale mit 17 PetaFLOPS aufarbeiten können. Die Bilder zeigen einen Ausschnitt des Antennenarrays in 5000 Metern Höhe sowie einen Teil des ALMA-Korrelators. Das Antennenarray wurde bei kristallklarer Nacht aufgenommen und zeigt als helle Lichtquelle in der Mitte den Mond. Um den Mondschein herum zeichnet sich dann noch unsere Milchstraße als nebelartiger Streifen ab (Abbildungen: ALMA (ESO/B. Tafreshi (Array) / ESO).

Leben wird typischerweise charakterisiert durch Systeme, die sich von der Umwelt abgrenzen, einen Stoffwechsel aufweisen und einen Energiehaushalt haben, sich selbst organisieren sowie vermehren. Zivilisationen von intelligenten lebenden Systemen lässt sich sicherlich durch Kommunikation und – grundlegend – durch ihren Energieverbrauch kennzeichnen. Genau das macht die Kardaschow-Skala. Sie ist eine von dem russischen Astronomen Nikolai Kardaschow bereits 1964 vorgeschlagene Kategorisierung der Entwicklungsstufe extraterrestrischer Zivilisationen nach deren Energieverbrauch.

Demnach gibt es folgende Haupt-Zivilisationstypen:

- Typ I: Die Zivilisation ist auf der technologischen Stufe der Erde von 1964, dem Zeitpunkt der Erstellung der Skala, mit einem Energieverbrauch von 4·1012 Kilowattstunden. Später wurde dies daraufhin geändert, dass die Zivilisation in der Lage ist, die gesamte auf einem Planeten verfügbare Leistung zu nutzen. Das sind ungefähr 1016 bis 1017 Watt. Für die Erde ist dieser Wert etwas größer als 1,74·1014 Kilowatt.
- Typ II: Die Zivilisation ist in der Lage, die Gesamtleistung ihres Zentralsterns zu nutzen. Das sind ungefähr 4·1023 Kilowatt.
- Typ III: Die Zivilisation ist in der Lage, die Gesamtleistung einer Galaxie zu nutzen. Das sind ungefähr 4·1034 Kilowatt.

Die menschliche Zivilisation ist derzeit unterhalb von Typ I, da wir nur in der Lage sind, einen Teil der verfügbaren Leistung auf der Erde zu nutzen. Carl Sagan hat den derzeitigen Status des Menschen auf 0,7 geschätzt.

Ein möglicher ausschlaggebender Faktor für den Sprung zur Typ-I-Zivilisation ist die massive Nutzung der Energiegewinnung aus Ozeanen, Windkraft, Sonnenenergie und Geothermie. Das Wachstum der Solarenergieproduktion während der letzten 20 Jahre entspricht einer Verdopplung alle 18 Monate. Falls sich diese Entwicklung unverändert fortsetzt ist unsere 2041 eine vollständige Typ-I-Zivilisation, im Jahr 2113 den sogar eine Typ-II-Zivilisation.

Eine Typ-II-Zivilisation könnte eine Dyson-Sphäre oder ein ähnliches Konstrukt nutzen, um die gesamte Leistung eines Sternes zu ernten. Eine Dyson-Sphäre ist ein Konstrukt, das einen Stern im Idealfall vollständig kugelförmig umschließt, um dessen Energie zu absorbieren oder umzulenken und damit optimal nutzen zu können.

Dyson-Sphären

Solch eine Struktur wurde erstmals von dem Physiker Freeman Dyson in der Juni-Ausgabe der Zeitschrift Science im Jahr 1960 beschrieben. Dabei ging es darum, bei der Suche nach fortgeschrittenen außerirdischen Intelligenzen nach Infrarotquellen zu suchen, da die Energie des jeweiligen Zentralgestirns auch nach ihrer vollständigen Nutzung für die Zwecke jener Zivilisation wieder abgegeben werden muss. Das würde aber, nachdem die Energie des kurzwelligen Lichts dazu genutzt wurde, um die Entropie des Systems zu verringern, in langwelligerer Form, und daher im Infrarotbereich, geschehen (Abbildung 26). Eine denkbare Dyson-Sphäre könnte aus einem Schwarm von Sonnenkollektoren bestehen, die den Stern umkreisen und seine Energie einfangen und zur Nutzung verfügbar machen. Wohl ab 2018 steht mit dem James-Webb-Space-Telecope

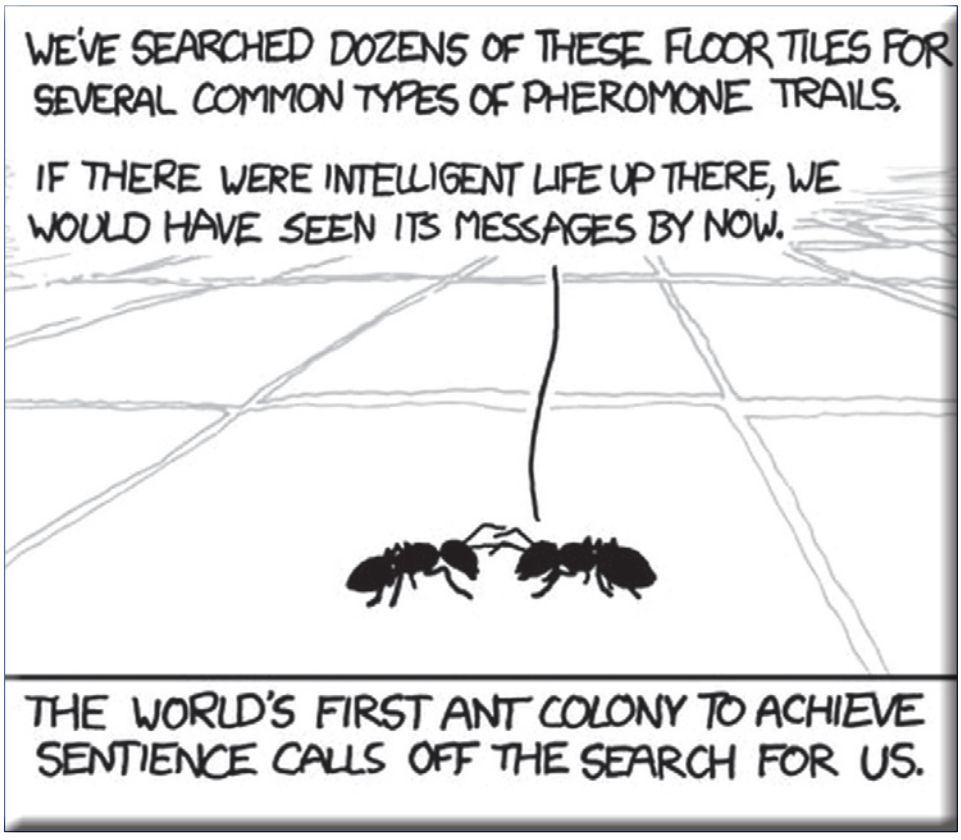


Abbildung 27: Die Vorstellungen von außerirdischem Leben orientieren sich zu sehr auf menschliche Eigenschaften und Fähigkeiten. Das versperrt den Blick für darüber hinaus gehende Möglichkeiten, wie dieser Cartoon treffend verdeutlicht.
Übersetzung: Wir haben Dutzende dieser Bodenfliesen auf verschiedene typische Pheromonspuren hin untersucht. Wenn es irgendein intelligentes Leben dort gäbe, hätten wir dessen Botschaften mittlerweile aufgespürt. / Die erste Ameisenkolonie der Welt, die einen höheren Grad der Wahrnehmung erreicht hat, bläst die Suche nach uns ab (Abb.: http://xkcd.com).

ein hochempfindliches Infrarot-Weltraumteleskop zur Verfügung, das solche Superzivilisationen entdecken könnte.

Und wofür dürfte die Sternenenergie verwendet werden? Nun, zum Denken. Womöglich würden wir gar nicht wahrnehmen, dass ein Überbewusstsein entsteht – wie die Ameisen die Menschen nicht wahrnehmen (Abbildung 27).

Fermi-Paradoxon

Wenn es also andere Zivilisationen im Universum und speziell in unserer Milchstraße gibt – meine Annahme dafür dürfte der bisherige Artikel belegen – stellt sich die Frage: Warum haben wir noch nichts nachprüfbares von ihnen gehört (Mythen, Legenden oder auch einmalige Ereignisse (Wow-Signal, siehe Kasten rechts) gibt es etliche) [29]? Dieser Frage widmete sich 1950 auf dem Weg zum Mittagessen im Los Alamos National Laboratory Enrico Fermi zusammen mit Edward Teller, Emil Konopinski und Herbert York – allesamt Physiker und im Rahmen des Manhattan-Projekts beteiligt am Bau der ersten Atombombe der Amerikaner. Sie diskutierten damals angebliche UFO-Sichtungen.

Fermis Überlegung: Unsere Galaxis hat eine maximale Ausdehnung von etwa 100 000 Lichtjahren. Ein Unterlicht-Antrieb mit einer Geschwindigkeit von 0,01 bis 0,1 der Lichtgeschwindigkeit – so etwas ist technisch denkbar und wird bereits im Projekt Icarus von der British Interplanetary Society überdacht [30] – würde (ohne Stopps) etwa eine bis zehn Millionen Jahre für diese Strecke benötigen. Die Galaxie ist etwa 10 Milliarden Jahre alt. 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. Bisher hat man jedoch noch keine solche Zivilisation gefunden.

Eine Erklärung des Fermi-Paradoxons ist: Es gibt eben doch nur eine technische Zivilisation in der Milchstraße. Immerhin gibt es viele Bedingungen, die die Erde erfüllt hat, damit die Evolution zu uns Menschen führte, auch solche, an die man nicht sofort denkt: Einen großen Mond etwa, der die Erdachse – und damit das Klima – stabilisiert. Einerseits sorgen bei diesem Beispiel Computersimulationen ein anderes Bild: Allein der Riesenplanet Jupiter sorgt für eine ausreichend stabile Rotationsachse der Erde. Andererseits widerspricht die zunehmende Anzahl von – auch erdähnlichen – Exoplaneten obiger Erklärung. Dazu kommt die immer mehr ins Gespräch gebrachte Annahme, komplexes Leben benötige nicht zwingend erdähnliche Bedingungen, um sich zu entwickeln.

Eine andere Erklärung des Paradoxons bezieht sich auf die riesigen Entfernungen zwischen den Sternen und eine ungleichmäßige Bevölkerung in der Milchstraße. Sollte unsere Erde in einem weniger dicht bevölkerten Gebiet der Galaxis liegen, dann wurden wir vielleicht einfach übersehen...

Eine dritte Erklärung bezieht sich auf die großen Zeiträume, in denen technische Zivilisationen bestehen – und auch wieder untergehen – könnten. Vielleicht hat man sich daher nur verpasst... Man denke über die „1000 verlorenen Jahre“ nach, die unsere technische Entwicklung im Mittelalter zu verzeichnen hat [31]. Und es geht auch extrem: Das älteste bisher bekannte Sonnensystem, das Planeten von erdähnlicher Größe enthält, haben Forscher Ende 2014 unter Leitung der Universität Birmingham entdeckt. Gleich fünf solcher vergleichsweise kleinen Planeten umkreisen den Stern Kepler-444, dessen Geburt etwa 11,2 Milliarden Jahre zurückliegt [32]. Der Fund beruht auf Messdaten des Weltraumteleskops Kepler. Offenbar haben lebensfreundliche Welten bereits früher im Universum existiert als bisher gedacht. Zu der Studie haben Forscher des Max-Planck-Instituts für Sonnensystemforschung und der Universität Göttingen maßgeblich beigetragen. Diese Entdeckung beweist, dass während des Großteils der etwa 13,8 Milliarden Jahre währenden kosmischen Geschichte Planeten von erdähnlicher Größe entstanden sind. Es ist somit denkbar, dass auch in früheren Phasen des Universums Leben entstanden ist – milliarden Jahre früher...

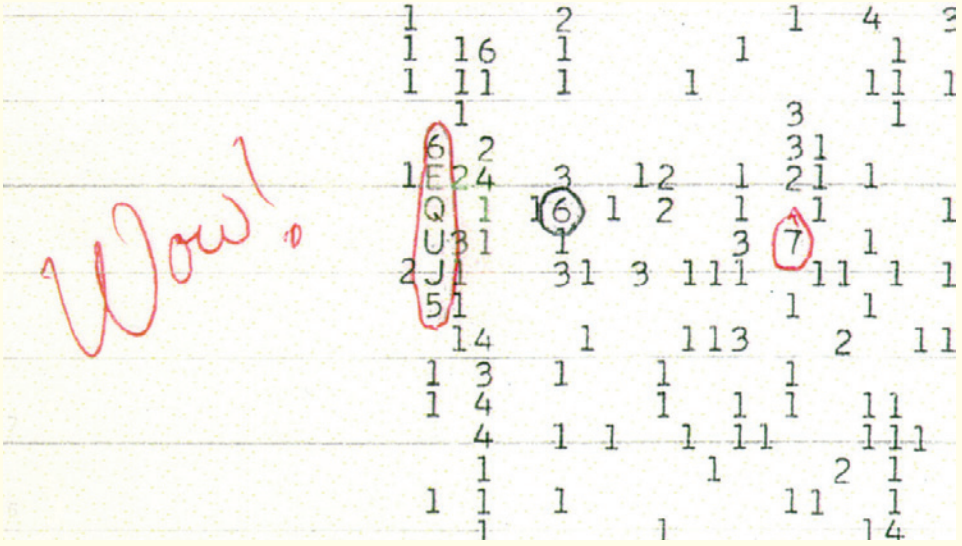
Vielleicht haben Zivilisationen, die so lange bestehen, gar kein Interesse, mit uns in Kontakt zu treten, oder sie haben eine Art von Kommunikation entwickelt, die uns vollständig unzugänglich ist.

Desgleichen gibt es die Möglichkeit, dass unsere Suchmuster bislang falsch sind. Das betrifft nicht nur die Einschränkung auf Leben, wie wir es kennen (Stichwort: Kohlenstoffchauvinismus). Ein Beispiel dafür: Erst Ende März wurde ein Artikel veröffentlicht, der eine andere Vorstellung einer Dyson-Sphäre darlegte. Zwei türkische Physiker geben darin eine Möglichkeit an, warum bislang noch kein Nachweis solcher Megastrukturen erfolgt sein könnte [33]. Die typische Annahme für eine Dyson-Sphäre ist, dass sie um einen sonnenähnlichen Stern angelegt wurde, etwa in der Distanz Erde-Sonne – wohl auch eine zu sehr auf uns Menschen bezogene Einstellung; vielleicht schauen wir nach den falschen Objekten.

Die beiden Physiker aus Istanbul vermuten hingegen, ein Weißer Zwerg könnte ein geeigneteres Objekt für eine Dyson-Sphäre sein. Weiße Zwerge sind Überreste kollabierter Sterne; sie

Das Wow!-Signal – Botschaft von Aliens?

Das Wow!-Signal war ein Schmalband-Radiosignal, das der Astrophysiker Jerry R. Ehman im Rahmen eines SETI-Projekts am „Big Ear"-Radioteleskop der Ohio State University am 15. August 1977 aus Richtung des Sternbildes Schütze aufzeichnete. Die Ursache des Signals ist bis heute nicht eindeutig geklärt. Das Bild zeigt den Computerausdruck vom Wow!-Signal (Abb.: Ohio State University Radio Observatory and the North American AstroPhysical Observatory). Das Signal war mit dem 30-fachen der Standardabweichung signifikant stärker als das Hintergrundrauschen. Die Bandbreite betrug weniger als 10 kHz. Die Frequenz lag mit 1420,456 MHz sehr nahe an der Frequenz von 1420,405 MHz, die vom Hyperfeinstruktur-Übergang des neutralen Wasserstoffs im Universum erzeugt wird. Tau Sagittarii im Sternbild Schütze ist der nächste sichtbare Stern. Das Signal war also mindestens 122 Jahre alt, als es die Antenne traf. Verblüfft, wie schmalbandig das Signal war, und wie sehr das Intensitäts-Profil dem glich, das ein lokalisiertes Signal in der verwendeten Antenne erzeugen würde, umrandete J. R. Ehman auf dem Computer-Ausdruck den Zeichencode „6EQUJ5" (die empfangenen Intensitäten wurden aufsteigend codiert mit den Zahlen 1 bis 9, über 9 hinaus mit den Buchstaben A bis Z, „Z" höchste Intensität) der Intensitätsvariation mit dem Stift und schrieb den Kommentar „Wow!" an den Seitenrand. Dieser Kommentar wurde zum Namen des Signals. Im Rahmen der Fernsehdokumentation Die Aliens – Mythos und Wahrheit (ZDF, 2010) erklärte Harald Lesch, dass das Wow!-Signal alle Kennzeichen eines interstellaren Kommunikationsversuchs zeigte, es aber auch ein gigantischer Ausbruch eines Pulsars gewesen sein könnte.



haben etwa die Größe unseres Planeten Erde. Die habitable Zone um sie herum ist entsprechend klein, und so könnte auch eine Dyson-Späre darum – im Maßstab eines Sonnensystems – klein ausfallen. Eine ein Meter dicke Sphäre ließe sich mit etwa 10^{23} Kilogramm an Baumaterial errichten – etwa die Masse unseres Mondes. Wenn die türkischen Wissenschaftler Recht haben ist es jedoch sehr schwierig, ein entsprechendes Dyson-Sphärensystem zu entdecken. Die Leuchtkraft eines weißen Zwergs ist viel kleiner als die normaler Sterne, und ein Infrarotsignal, dass von solch einer Dyson-Sphäre ausgeht, wäre kaum von einem natürlichen Infrarotsignal des Sterns zu unterscheiden. Dennoch bleibt die Erkenntnis: Es gibt durchaus Auflösungen für das Fermi-Paradoxon.

Anthropisches Prinzip

Eine grundlegende Frage, die bei der Suche nach extraterrestrischem Leben immer wieder auftaucht, ist die nach der Ausnahmestellung der Erde. Anders ausgedrückt: Sind die Bedingungen für intelligentes Leben auf der Erde so einzigartig, sodass es in unserer Milchstraße, im ganzen Universum gar keine anderen intelligenten Lebewesen geben kann? Diskutiert wird diese Frage unter der Bezeichnung „anthropisches Prinzip". Das besagt einfach, dass die Beobachtung eines Universums kompatibel mit der Entstehung eines Bewusstseins sein muss, dass diese Beobachtung macht. Es gibt verschiedene Auslegungen des anthropischen Prinzips; neben dieser schwachen etwa auch die starke Auslegung, das Universum habe so geformt werden müssen, um die Entstehung von Beobachtern in ihm zu erlauben. Diese starke Interpretation setzt also eine Zielrichtung voraus; man spricht von teleologischer Interpretation (telos steht im griechischen für Zweck oder Ziel; logos für Lehre).

Befürworter der teleologischen Interpretation führen häufig die genaue Abstimmung der Naturkonstanten an, die notwendig ist, um Leben im Universum zu erlauben; fast könnte man von einer theologischen Interpretation (theos = griechisch für Gott) sprechen. Die Glaubenssache an der starken Auslegung des anthropischen Prinzips liegt darin, dass nur eine geplante, einzigartige Feinabstimmung es ermöglicht hat, dass Intelligenzen im Universum entstehen. Damit geht man jedoch einen Weg, den man mit dem geozentrischen Weltbild, also der Erde als Mittelpunkt des Universums, schon einmal – nachweislich falsch – gegangen ist. Auch der schon genannte Kohlenstoffchauvinismus schränkt ja die Existent von Leben in eine Richtung ein, obwohl mittlerweile andere Existenzformen denkbar sind.

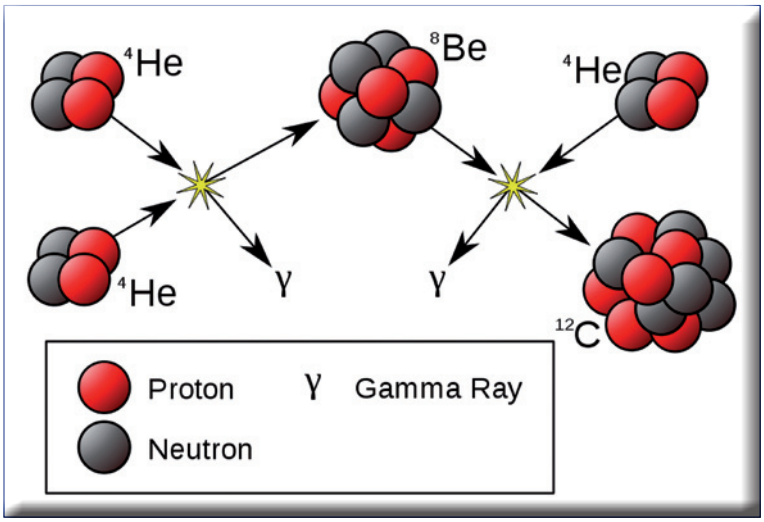


Abbildung 28: Der 3α-Prozess liefert über die Zwischenstufe aktivierten Berylliums und der Teilnahme von insgesamt 3 Heliumkernen (α-Teilchen) Kohlenstoff-12. Für eine gute Ausbeute sorgt dabei die energetische Abstimmung der beteiligten Teilchen. Bereits 1954, in dem Jahr, in dem Fred Hoyle diesen „Energie-Resonanz-Prozess" vorhersagte, wurde er experimentell bestätigt. Erst kürzlich gelang es, ihn auch zu berechnen. Das gelang mit dem Supercomputer am Forschungszentrum Jülich, „Jugene" im Jahr 2011.

Kohlenstoffsynthese über 3α-Prozess

Tatsächlich erscheinen die Naturkonstanten als gut aufeinander abgestimmt. Ein interessantes Beispiel dafür ist gerade auch das Element, auf das Leben nach irdischer Art aufbaut: der Kohlenstoff. Wie anfangs schon erläutert entstanden bei der primordiale Nukleosynthese, der Elemententstehung kurz nach dem Urknall, Wasserstoff, Helium und Lithium in verschiedenen Isotopen. Beryllium-8, das aus zwei Helium-4-Kernen entstehen könnte, ist zu instabil. Kohlenstoff-12 könnte aus drei Helium-4-Kernen entstehen. Das Problem: Weil drei Kerne gleichzeitig miteinander reagieren müssen ist diese Reaktion zu selten, um den hohen Kohlenstoffanteil auf der Erde zu erklären.

Daher kam man doch zu dem instabilen, angeregten Beryllium-8 zurück: Wenn dies nochmals mit Helium-4 zusammenstößt ergibt sich wieder ^{12}C. Beryllium-8 lebt zwar nur $2{,}6 \cdot 10^{-16}$ Sekunden; in dieser Zeit kann es jedoch zu 10000 Stößen mit ^{4}He kommen – und somit ist eine Kohlenstoff-12-Synthese über diesen Weg wahrscheinlich. Fred Hoyle, britischer Astronom und Mathematiker, erkannte allerdings 1954, dass auch diese Reaktion – der 3α-Prozess (Abbildung 28) – nicht ergiebig genug ist, es sei denn, sie läuft resonant ab, wobei der Kohlenstoff-12-Kern nur bestimmte Energieniveaus einnehmen kann. Massen- und kinetische Energie des ^{4}He- sowie des ^{8}Be*-Kerns müssen also gerade einem geeigneten Energieniveau von ^{12}C entsprechen, in Resonanz sein, um eine ausreichend ergiebige Reaktion zu erhalten. Hoyle sagte aufgrund dessen, dass heute kohlenstoffbasiertes Leben existiert, ein damals unbekanntes Energieniveau des ^{12}C-Kerns von 7,65 Megaelektronenvolt voraus. Bemerkenswert ist auch, dass ^{12}C nach derselben Methode nicht vollständig zu Sauerstoff-16 weiter reagiert – und damit wieder verschwindet. Tatsächlich hat ^{16}O ein beinahe geeignetes Energieniveau; es ist allerdings ein Prozent zu niedrig für eine Reaktion mit ausreichend hoher Ausbeute, und nur ein Teil der ^{12}C-Kerne fusionieren mit ^{4}H-Kernen zu ^{16}O – noch eine Feinabstimmung?

Der Urknall konnte zwar kein ^{12}C produzieren, aber durch den 3α-Prozess waren bereits die Sterne der ersten nach dem Urknall entstandenen Generation in der Lage, ^{12}C in großen Mengen zu erzeugen. Durch den 3α-Prozess) werden im Inneren von Sternen also drei Helium-Kerne (α-Teilchen) durch Kernfusionsreaktionen in Kohlenstoff umgewandelt und senden dabei Gammastrahlung aus. Dies wird auch als Heliumbrennen oder, nach seinem Entdecker Edwin Salpeter, als Salpeter-Prozess bezeichnet. Diese Kernfusionsreaktion kann nur bei Temperaturen über 100 Millionen Kelvin ablaufen und setzt das reiche Vorhandensein von Helium voraus. Daher tritt sie normalerweise nur in den Zentren von Sternen in späten Phasen ihrer Entwicklung auf, in denen ein höherer Druck und höhere Temperaturen als momentan in der Sonne herrschen. Der nächste Umwandlungsschritt, bei dem Sauerstoff ^{16}O mit α-Teilchen fusionieren würde, um Neon Neon-20 zu erzeugen, stellt sich aufgrund von Kernspinregeln als unwahrscheinlich heraus. So produziert die stellare Nukleosynthese große Mengen an Kohlenstoff und Sauerstoff, nicht mehr aber Neon.

Verhältnis Elektronen- zu Protonenmasse

Ein weiteres Beispiel für passende Parameter zur Lebensentstehung: Der schwedisch-amerikanische Kosmologe Max Tegmark weist darauf hin, dass nach Auffassung des deutschen Physikers Max Born bei annähernd gleicher Protonen- und Neutronenmasse die Eigenschaften aller atomaren und molekularen Systeme im Wesentlichen durch zwei Parameter bestimmt sind: das Massenverhältnis von Elektron zu Proton sowie die Feinstrukturkonstante, welche die Stärke der elektromagnetischen Wechselwirkung angibt. Tegmark zeigte, dass beim Auftragen des Verhältnisses von Elektronenmasse zu Protonenmasse in einem Diagramm über die Feinstrukturkonstante sich Bereiche ergeben, in denen Leben nach unserer Kenntnis nicht möglich ist (Abbildung 29) [34]. So würden bei einem zu hohen Massenverhältnis wegen zu großer Kernfluktuationen keine stabilen molekularen Systeme existieren; im Fall

einer zu großen Feinstrukturkonstante könnten keine Sterne existieren.

Allerdings wies Tegmark in dieser Veröffentlichung darauf hin, dass manche Annahmen, welche Parameter Leben erlauben oder verbieten, keine felsenfesten Grundlagen haben, also relativ schwach sein können. Legt man solche „weichen" Bedingungen zugrunde, könnten beispielsweise in dem gezeigten Diagramm eine große Zahl kleiner Inseln habitabler Bedingungen für – wie Tegmark es so neutal wie möglich ausdrücken will – SAS geben, self-aware substructures, sich selbst bewusster Teilstrukturen des als mathematische Struktur zu beschreibenden Kosmos, unter unseren Bedingungen die Menschen. Andere habitable Bedingungen, also andere Parameter in dem gezeigten Diagramm, bedeutet aber: eine andere Chemie...

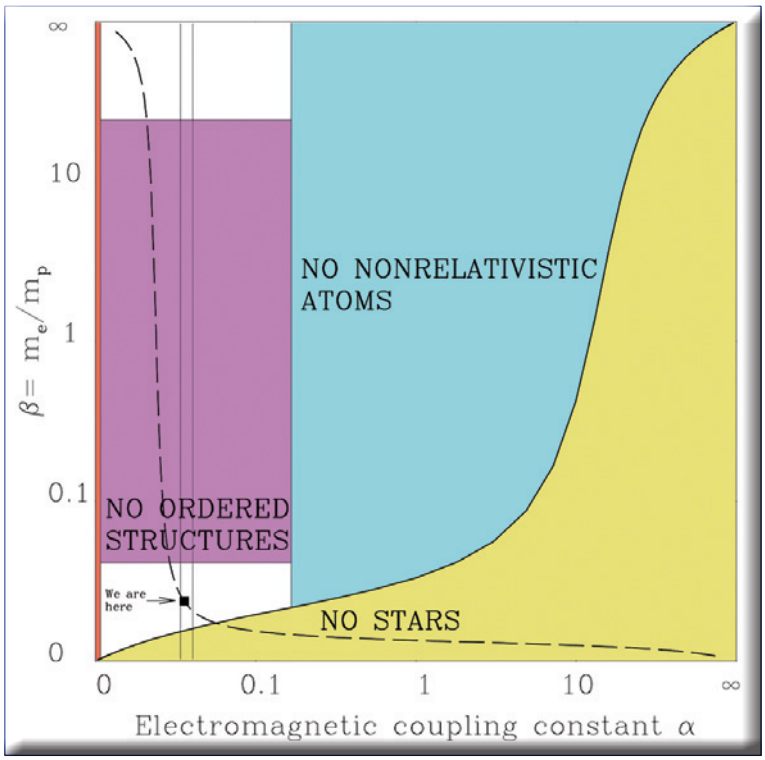


Abbildung 29: Trägt man das Verhältnis b der Elektronen- zu Protonenmasse gegen die Feinstrukturkonstante a auf, ergeben sich Bereiche, in denen Leben nicht möglich erscheint. Allerdings gibt es außerhalb des mit „we are here" gekennzeichneten Parameterbereichs auch eine große Zahl von Inseln mit habitablen Bedingungen für „self aware substructures". Diese SAS – selbstbewusste Unterstrukturen einer mathematisch beschriebenen Kosmos-Struktur, im praktischen Falle Menschen – würden freilich mit anderer Chemie leben, da die Parameter des Diagramms praktisch die gesamte Chemie festlegen (Abb.: M. Tegmark).

Kritik: Keine umfassende Theorie

Mittlerweile wurde gezeigt, dass es noch mehr Variationsmöglichkeiten gibt. Der US-amerikanische Physiker Victor J. Stenger kam durch Analysen und Computersimulationen, in denen er – anders als Tegmark – vier Konstanten gleichzeitig variieren ließ, zu dem Ergebnis, dass viel größere Schwankungen der Konstanten erlaubt seien [35]. Analysen von hundert Universen, in denen er die Konstanten Elektronenmasse, Protonenmasse, Stärke der elektromagnetischen Kraft sowie Stärke der starken Kraft zufällig in einem Bereich von zehn Größenordnungen (10^{10}) schwanken ließ, führten in mehr als der Hälfte der Fälle zu Sternen mit einer Lebensdauer von mehr als einer Milliarde Jahren. Dies könne man, so Stenger, wohl kaum Feinabstimmung nennen.

Eine Hauptkritik gegen die Existenz einer Feinabstimmung im Universum macht darauf aufmerksam, dass unsere gegenwärtigen physikalischen Theorien nur jeweils Teile unseres Kosmos beschreiben. So ist noch keine Vereinigung der Quantentheorie mit der Theorie der Gravitation gelungen; beide Theorien funktionieren für ihre Bereiche jedoch sehr gut. Eine scheinbare Feinabstimmung könnte eventuell nur ein Ausprägung der Unvollkommenheit der existierenden Einzeltheorien sein, das eben solche Konstanten benötigt. Eine „Theorie von Allem", eine „Weltformel", eine fundamentale, vereinheitlichte Theorie sollte ohne solche Konstanten auskommen. Die Physiker arbeiten noch daran. Wer sich damit befassen möchte: Die betreffenden Theorien sind die Stringtheorie bzw. deren übergeordnete Weiterentwicklung, die M-Theorie (Abbildung 30).

Multiversen ohne anthropisches Prinzip

Eine Feinabstimmung gemäß des anthropischen Prinzips anzunehmen wird auch obsolet, nimmt man Multiversen als gegeben an, wie sie aus der Stringtheorie hervorgehen. Demnach ist unser Universum wie viele andere auch aus einem Bläschen des Multiversums entstanden. Eine Krücke für die Vorstellung eines solchen Prozesses mögen die Siedebläschen sein, die sich beim Kochen von Wasser bilden und zu groß-

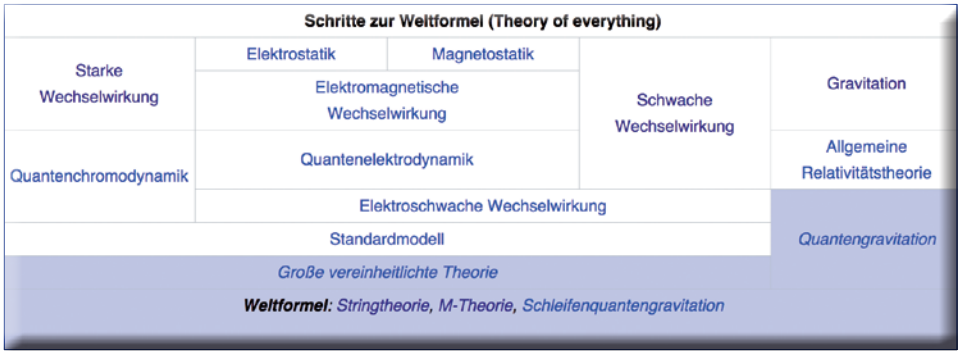


Abbildung 30: Geschichtliche Entwicklung hin zur „Weltformel". Theorien in frühem Stadium der Entwicklung sind kursiv gesetzt und blau hinterlegt.

en Blasen werden. Unser Universum ist dann eben eins der Untergruppe von Universen insgesamt, in denen Leben entstehen kann – so wie unser Planet Erde der Planet ist, bei dem alle Bedingungen so liegen, dass Leben entstehen kann. Das Multiversum selbst sollte ohne Feinabstimmungen auskommen. Die Annahme von Multiversen (übrigens zu unterscheiden von der Viele-Welten-Interpretation der Quantenmechanik, die 1957 von Hugh Everett erstmals vorgeschlagen wurde) findet unter Wissenschaftlern immer mehr Befürworter.

Schlussfolgerungen

Die Wahrscheinlichkeit für außerirdisches Leben ist hoch. Selbst in unserem Planetensystem könnten sich bald Spuren außerirdischen Lebens finden. Auch die Wahrscheinlichkeit außerirdischen intelligenten Lebens ist hoch, allein in unserer eigenen Milchstraße. Allerdings müssen wir uns von den typischen Vorstellungen verabschieden, nach denen entsprechende Lebensformen an ein menschliches Äußeres angelehnt sind. Möglicherweise sind es planetengroße Systeme, die wir im weitesten Sinne als Maschinen bezeichnen würden. Bezieht man alle Galaxien des Universums ein, wird die Wahrscheinlichkeit von Leben erdrückend groß. Multiversen schließlich eröffnen Möglichkeiten für Leben, das nach ganz anderen Gesetzmäßigkeiten entstanden sein könnte. Wie gesagt schätzt schon die NASA, dass man einfaches außerirdisches Leben in den kommenden eins bis drei Dekaden entdeckt. Eine Kontaktaufnahme zu außerirdischem intelligenten Leben bleibt hingegen auf absehbare Zeit Science fiction. ***CLB***

Literatur

[1] Achim Weiss, „ Elemententstehung im frühen Universum „ in: Einstein Online Band 02 (2006), 1111

[2] M. Anders et al. (2014), First Direct Measurement of the 2H(α,γ)6Li Cross Section at Big Bang Energies and the Primordial Lithium Problem. Physical Review Letters 113, 042501; DOI 10.1103/PhysRevLett.113.042501

[3] The cosmological Lithium problem outside the Galaxy: the Sagittarius globular cluster M54; A. Mucciarelli, M. Salaris, P. Bonifacio, L. Monaco, S. Villanova; arXiv:1407.7596, 28.7.2014

[4] http://www.nasa.gov/centers/goddard/news/topstory/2006/milkyway_seven.html

[5] Leben: Am Anfang war die heiße Steinpore; CLB 1/2-2015, Seiten 50-53

[6] S. L. Miller: A production of amino acids under possible primitive earth conditions. In: Science. Band 117 (3046), 1953

[7] U. Hoffmann: Aus der Chemie des Tons; Angew. Chemie 80:736, 1968

[8] M. Kreysing, L. Keil, S. Lanzmich, D. Braun: Heat flux across an open pore enables the continuous replication and selection of oligonucleotides towards increasing length; Nature Chemistry (2015) doi:10.1038/nchem.2155, published online 26 January 2015

[9] Stepping Stones through Time; Leslie Mullen; Astrobiology Magazine, October 2010

[10] Meierhenrich U.J., Nahon L., Alcaraz C., Bredehöft J.H., Hoffmann S.V., Barbier B., Brack A.: Asymmetric Vacuum UV photolysis of the Amino Acid Leucine in the Solid State. Angew. Chem. 117 (2005), 5774-5779

[11] Schokraie E, Hotz-Wagenblatt A, Warnken U, Mali B, Frohme M, Förster F, Dandekar T, Hengherr S, Schill RO, Schnölzer M (2012) Comparative proteome analysis of Milnesium tardigradum in early embryonic state versus adults in active and anhydrobiotic state. PLoS ONE 7(9): e45682. doi:10.1371/journal.pone.0045682

[12] http://www.dlr.de/dlr/desktopdefault.aspx/tabid-10212/332_read-12176/#/gallery/17219

[13] http://exoplanet.eu/catalog/ (Stand 3.5.2015)

[14] http://phl.upr.edu/projects/habitable-exoplanets-catalog

[15] Hegde et al.: Surface biosignatures of exo-Earths: Remote detection of extraterrestrial life; PNAS 2015 112 (13) 3886-3891; published ahead of print March 16, 2015

[16] Evidence for a spectroscopic direct detection of reflected light from 51 Peg b; J. Martins et al., Journal Astronomy & Astrophysics, 22 April 2015

[17] S. Hsu, F. Postberg, et al.: Ongoing hydrothermal activities within Enceladus. Nature (12. März 2015), doi:10.1038/nature14262

[18] H. B. Niemann, et al.: The abundances of constituents of Titan's atmosphere from the GCMS instrument on the Huygens probe. In: Nature. 438, 2005, S. 779–784

[19] Jia-Rui Cook, Cathy Weselby: What is Consuming Hydrogen and Acetylene on Titan? NASA, 3. Juni 2010; http://www.nasa.gov/topics/solarsystem/features/titan20100603.html

[20] C. A. Nixon et al.: Detection of Propene in Titan's Stratosphere, Astrophysical Journal, 30. 9. 2013

[21] Membrane alternatives in worlds without oxygen: Creation of an azotosome; James Stevenson, Jonathan Lunine, Paulette Clancy; Science Advances 27 Feb 2015: Vol. 1 no. 1 e1400067 DOI: 10.1126/sciadv.1400067

[22] http://www.jpl.nasa.gov/news/news.php?release=2014-109

[23] http://de.wikipedia.org/wiki/Opportunity

[24] http://mars.jpl.nasa.gov/news/whatsnew/index.cfm?FuseAction=ShowNews&NewsID=1438

[25] F. Javier Martín-Torres et al.: Transient liquid water and water activity at Gale crater on Mars; Nature Geoscience 8, 357–361 (2015) doi:10.1038/ngeo2412; Published online 13 April 2015

[26] Habitable Zones around Main-sequence Stars: Dependence on Planetary Mass; Ravi Kumar Kopparapu et al. 2014 ApJ 787 L29. doi:10.1088/2041-8205/787/2/L29

[27] http://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/docs/counts_detail.html

[28] Ericsson Mobility Report, November 2014

[29] Stephen Webb: If the Universe Is Teeming with Aliens ... Where Is Everybody? Springer 2015, ISBN 978-3-319-13235-8

[30] http://www.icarusinterstellar.org/

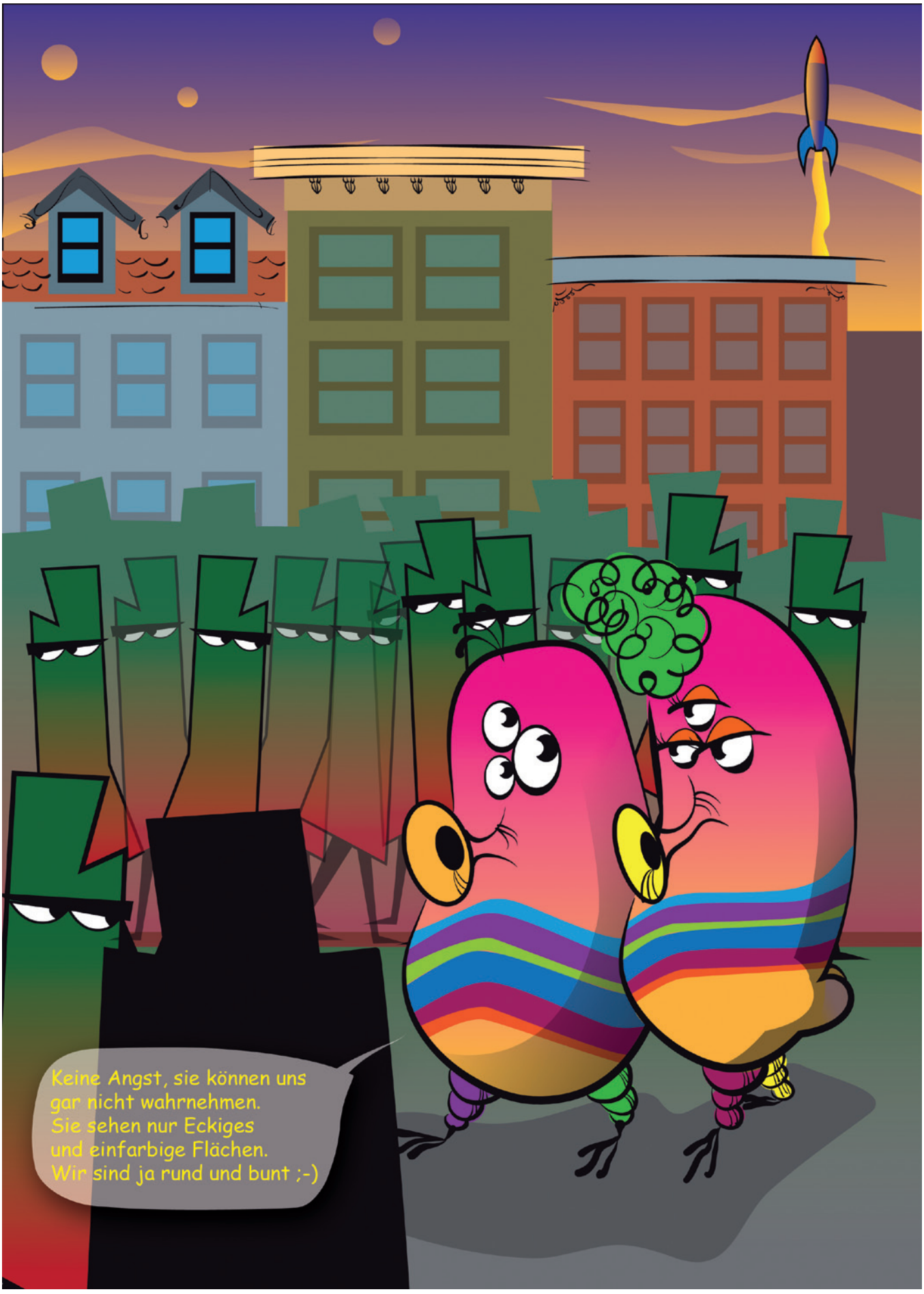
[31] Reinhold Schlotz: „1000 verlorene Jahre – mindestens"; CLB 7/8-2012, S. 310-319

[32] T. L. Campante et al.: An ancient extrasolar system with five sub-Earth-size planets; 2015 ApJ 799 170 doi:10.1088/0004-637X/799/2/170

[33] İbrahim Semiz, Salim Oğur: Dyson Spheres around White Dwarfs; arXiv:1503.04376 [physics.pop-ph], 15. März 2015

[34] Max Tegmark: Is "the theory of everything" merely the ultimate ensemble theory? in: Annals of Physics. 270, 1998, 1–51.

[35] Stenger, Victor: „Natural Explanations for the Anthropic Coincidences", Philo 3 (2), 2000: 50–67


Keine Angst, sie können uns gar nicht wahrnehmen. Sie sehen nur Eckiges und einfarbige Flächen. Wir sind ja rund und bunt ;-)