

Das Weltall – auf den Menschen abgestimmt

Peter Rüst, CH-3148 Lanzenhäusern e-mail: pruest@dplanet.ch

VBG-Fachaufsatz 1/00 (VBG-Büro, Postfach, CH-8033 Zürich; e-mail: vbgbuero@bluewin.ch)

Inhalt

| | |
|--|----|
| 0. Einleitung | 2 |
| 0.1 Das anthropische kosmologische Prinzip | 2 |
| 0.2 Wie ist alles entstanden? | 2 |
| 0.3 Was enthält unser Weltall? | 3 |
| 1. Entstehung eines Universums für menschliches Leben | 4 |
| 1.1 Die Expansion des Universums | 4 |
| 1.2 Kausale Trennung | 5 |
| 1.3 Der Urknall | 6 |
| 1.4 Trennung der Kräfte | 7 |
| 1.5 Inflation | 9 |
| 1.6 Die kosmologische Konstante | 10 |
| 1.7 Die Zielgenauigkeit des Schöpfers | 10 |
| 2. Entstehung der chemischen Elemente für menschliches Leben | 12 |
| 2.1 Synthese leichter Elemente im Urknall | 12 |
| 2.2 Beryllium bis Sauerstoff | 13 |
| 2.3 Alle Elemente bis Eisen | 14 |
| 2.4 Supernova-Explosion | 15 |
| 2.5 Feinabstimmung des Universums | 18 |
| 3. Bildung eines Planetensystems für menschliches Leben | 19 |
| 3.1 Ein Planetensystem | 19 |
| 3.2 Die Entwicklung der Erde | 20 |
| 3.3 Die Erdatmosphäre | 21 |
| 3.4 Der erstaunliche Treffer der bewohnbaren Erde | 23 |
| 4. Lebensentstehung | 23 |
| 4.1 Replikation | 23 |
| 4.2 Eine RNS-Welt? | 25 |
| 4.3 Evolution einer neuen Funktionalität | 26 |
| 5. Schlussfolgerung – welches anthropische Prinzip? | 28 |
| 5.1 Befund | 28 |
| 5.2 Zwei ungeeignete Erklärungsversuche | 28 |
| 5.3 Eine sinnvolle Erklärung | 29 |
| Anhang | 30 |

0. Einleitung¹

0.1 Das anthropische kosmologische Prinzip

Das „anthropische kosmologische Prinzip“ sagt, der Kosmos sei auf den Menschen (griechisch: anthropos) zugeschnitten!² Diese überraschende Aussage stammt nicht etwa von Theisten. Was ist damit gemeint? Wie kann das Weltall auf den Menschen zugeschnitten sein? Der Mensch hatte sicher keinen Einfluss auf dessen Entstehung und Entwicklung!

Es gibt triftige Gründe anzunehmen, dass die Umwelt, die wir auf der Erde vorfinden, ein unerhört unwahrscheinlicher Treffer war. Entstehung und Entwicklung des Weltalls sind geprägt von einer grossen Menge an unwahrscheinlichen Umständen, die aber unbedingt eintreffen mussten, wenn es überhaupt menschliches Leben geben sollte.

Wie ist dies zu erklären? Wie konnte es dazu kommen? Ist es physikalische Notwendigkeit? Oder Zufall? Oder war es nicht möglich ohne göttliche Planung?

Analoge Überlegungen treffen auf die Entstehung und Entwicklung der Erde und des Lebens zu. Doch lässt es der Umfang dieser Dokumentation nicht zu, detailliert auf die Bereiche der Geologie und der Biologie einzugehen. Die beispielhafte Erwähnung einiger Punkte muss hier genügen, während das Hauptgewicht auf der Kosmologie liegt.

Das Aufzeigen dieser anthropischen Situation erfordert es stellenweise, auf wissenschaftliche Zusammenhänge und Ideen einzugehen, die nicht zu unserem Alltags-Gedankengut gehören. Ich versuche aber, sie verständlich darzustellen. Ein solcher Abschnitt kann aber auch übersprungen werden, ohne dass der Gesamtzusammenhang verloren geht.

Das Wesentliche dieser Dokumentation soll es sein, etwas von den Wundern des Weltalls, in dem wir uns befinden, zu vermitteln und zum Staunen darüber anzuregen. Es soll klar werden, dass der Schöpfer, auf den die wissenschaftliche Untersuchung des Universums hinweist, nicht von dem in der Bibel offenbarten persönlichen Schöpfergott unterschieden werden kann.

0.2 Wie ist alles entstanden?

Zum Einstieg möge ein kurzer Abschnitt aus einem modernen Astrophysikbuch³ einen Überblick über die Entstehung und Entwicklung von Weltall, Erde und Leben vermitteln:

In unserer Astrophysikvorlesung fragte einmal ein Student: „Weshalb sind wir hier?“ Die Antwort war für uns [Dozenten] ebenso staunenswert wie für die Zuhörerschaft.

Wir sind hier, weil vor über zehn Milliarden Jahren das Universum vom Vakuum Energie borgte, um riesige Mengen an Materie und Antimaterie in nahezu gleichen Mengen zu erschaffen. Das meiste davon annihilierte und füllte das Universum mit Photonen. Weniger als ein Milliardstel überlebte und bildete Protonen und Neutronen, und daraus den Wasserstoff und das Helium, welche den Grossteil von all dem ausmachen, was es gibt.

Einiges von diesem Wasserstoff und Helium stürzte zusammen und bildete die erste Generation massiver Sterne, welche im Feuer ihrer Kerne die erste Charge an schweren Elementen erzeugten. Die Sterne explodierten und reicherten mit diesen Elementen die interstellaren Wolken an, welche dann die nächste Generation von Sternen produzierten.

Schliesslich, etwa vor fünf Milliarden Jahren, kollabierte eine bestimmte Wolke in einer bestimmten Galaxie und bildete unsere Sonne und ihr Planetensystem.

Auf dem dritten Planeten entstand Leben auf der Basis des Wasserstoffs, Kohlenstoffs, Stickstoffs, Sauerstoffs und anderer Elemente, die sich in der protostellaren Wolke vorfan-

¹ Ich bin Hans Rudolf Brugger zu grossem Dank verpflichtet für seine Hilfe im ganzen Bereich der Kosmologie.

² J.D. Barrow, F.J. Tipler, *The Anthropic Cosmological Principle* (Oxford: Clarendon Press, 1986); P. North, „Das anthropische Prinzip oder der Platz des Menschen im Universum“, *Orion* (265, Dez. 1994), 281.

³ B.W. Carroll, S.A. Ostlie, *An Introduction to Modern Astrophysics* (Addison-Wesley, 1996), 1321. (Alle Übersetzungen aus dem Englischen: P.R.).

den. Die Entwicklung des Lebens hatte die Verwandlung der Erdatmosphäre zur Folge, was es dem Leben erlaubte, an Land zu gehen.

Vor fünfundsiebzehn Millionen Jahren beschleunigte ein glücklicher Zusammenstoss mit einem grossen Meteoroiden das Ableben der Dinosaurier. Dies ermöglichte es kleinen, behaarten Säugetieren, den Hauptschauplatz einzunehmen.

Frühmenschen entwickelten sich, wanderten aus Afrika aus und eroberten mit ihren neuen Kenntnissen, Werkzeugen, Sprache und Landwirtschaft die Welt.

Die Nahrungsmittel, welche sie auf dem Land anpflanzten, verzehrten Ihre Ahnen, Ihre Eltern, und dann Sie, und atmeten die Luft. Ihr eigener Körper ist eine Ansammlung von Atomen, die vor Milliarden von Jahren im Innern von Sternen geschaffen wurden, der Bruchteil eines Bruchteils eines Prozentes an normaler Materie, der in der ersten Mikrosekunde des Universums der Annihilierung entging.

Ihr Leben und alles in der Welt um Sie herum ist innig verbunden mit zahllosen Aspekten der modernen Astrophysik.

0.3 Was enthält unser Weltall?

Warum ist der Himmel nachts dunkel? Anfangs des 20. Jahrhunderts dachte man sich das Universum unendlich gross und unendlich alt. Wenn dies der Fall wäre, müsste aber der ganze Himmel etwa so hell strahlen wie die Sonnenoberfläche, und wir wären längst verbrannt. In einem unendlich grossen Weltall müsste man ja in jeder Richtung irgendeinen Stern sehen. Und auch das Licht extrem ferner Sterne müsste in einem unendlich alten Weltall bis zu uns gelangt sein. Dunkelwolken könnten Sternenlicht auch nicht abschirmen, denn sie wären durch Bestrahlung längst auf die gleiche Helligkeit aufgeheizt worden. Das Alter oder die Grösse des Universums – oder beides – muss also endlich sein.

In einigen Schritten soll nun die Struktur unseres Weltalls in zunehmenden Grössenbereichen kurz beschrieben werden.

Die Milchstrasse, die Galaxie, in der wir uns befinden, gleicht einem Diskus von etwa 100'000 Lichtjahren⁴ Durchmesser und besteht aus ungefähr 100 Milliarden Sternen. Ein Blick gegen ihr Zentrum, ca. 25'000 Lichtjahre vom Sonnensystem entfernt, zeigt neben dichten Sternansammlungen auch Dunkelwolken.

Der Diskus unserer Milchstrasse ist umschlossen von einem kugelförmigen Hof, dem „Halo“. Er enthält Kugelsternhaufen, die Hunderttausende von Sternen umfassen. Sie sind fast so alt wie das Universum, daher in einem dynamischen Gleichgewicht und im Grossen sehr nahe der Kugelsymmetrie.

Wie unsere Milchstrasse von aussen etwa aussähe, erkennt man an Spiralgalaxien, die Millionen von Lichtjahren entfernt sind. Die von einem dichten Zentrumswulst ausgehenden Spiralarms sind von jungen, blau leuchtenden Sternen dominiert, was aktive Sternbildung anzeigt.

Das auf einer Erdumlaufbahn befindliche Hubble-Weltraumteleskop (Hubble Space Telescope) erfasste im Projekt „Hubble Deep Field“ eine sehr weit entfernte Region des Universums. Die Bilder dieses Projekts zeigen neben einigen wenigen Vordergrundsternen unserer Galaxie etwa 3000 Galaxien verschiedenster Formen, die wegen der riesigen Entfernungen für uns bis über eine Milliarde Mal schwächer leuchten als die von blossem Auge gerade noch erkennbaren Sterne.

Kürzlich wurde ein Computerbild veröffentlicht,⁵ das die Ergebnisse einer Erfassung von Objekten der 17. bis 20. Helligkeitsklasse⁶ im blauen Spektralbereich über eine Region von 4'300 Quadratgrad um den galaktischen Südpol zeigt. Dies entspricht ungefähr einem Zehntel der Himmelskugel. Das Bild umfasst etwa 2 Millionen Galaxien dieses Helligkeitsbereichs. Im Grossen ergibt sich eine erstaunlich gleichmässige Verteilung der Galaxien. Man schätzt die Anzahl aller Galaxien, die im grundsätzlich sichtbaren Teil des Weltalls enthalten sind, auf etwa hundert Milliarden.

⁴ Licht bewegt sich mit 300'000 km/s oder 9,5 Billionen ($9,5 \times 10^{12}$) km/Jahr. Licht braucht 1 s, um vom Mond zur Erde zu gelangen, 8,5 min von der Sonne, 5,5 h vom äussersten Planeten Pluto, 4,5 Jahre vom nächsten Stern.

⁵ K.S. Wu, O. Lahav, M.J. Rees, *Nature* 397 (1999), 225.

⁶ Die 1. ist die hellste.

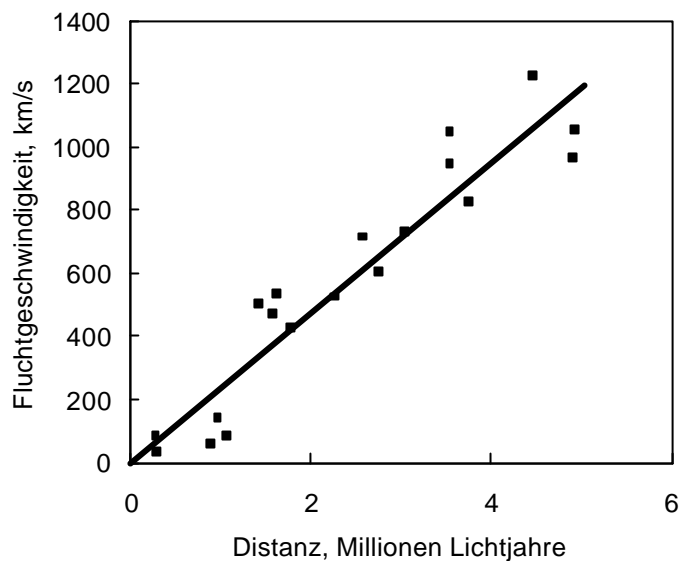
Im grossen Massstab entfernen sich alle Galaxien voneinander mit Geschwindigkeiten, die ungefähr ihren Abständen proportional sind. Gemessen wird die Fluchtgeschwindigkeit durch die Rotverschiebung ihres Lichts.⁷ Abb. 1 zeigt die von Hubble erstmals gemessene Galaxienflucht, publiziert 1929.⁸ Diese Entdeckung sowie Einsteins Relativitätstheorie führten zur Erkenntnis, dass das Universum sich ausdehnt. Man kann diese Expansion zurückextrapolieren und daraus schliessen, dass sie einmal angefangen hat, als alles sehr nahe zusammen war. Es gab also einen Urknall oder „Big Bang“.

Es soll nun die Entstehung

- (1) des Universums,
- (2) der Elemente,
- (3) der Erde, und
- (4) des Lebens

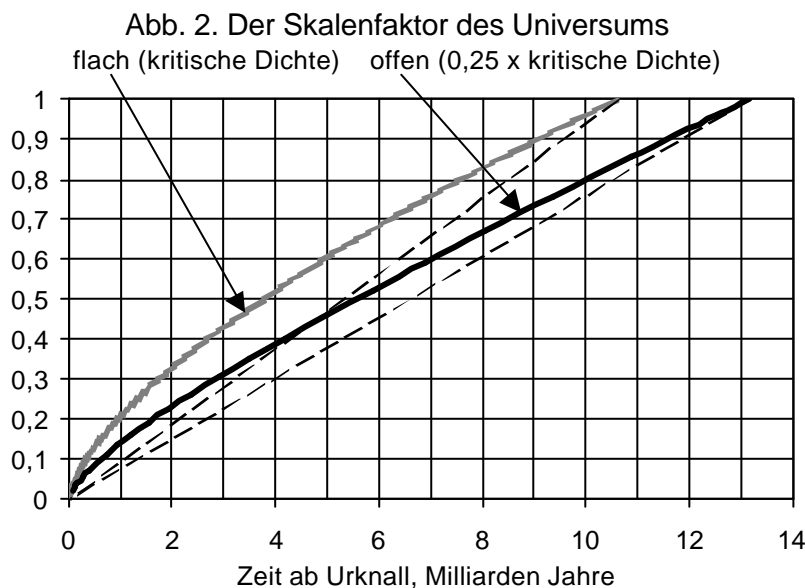
beschrieben und gezeigt werden, in welcher erstaunlicher Weise eine grosse Menge extrem unwahrscheinlicher Vorgänge dazu beitrugen, dass menschliches Leben ermöglicht wurde.

Abb. 1. Hubbles Messung der Galaxienflucht



1. Entstehung eines Universums für menschliches Leben

1.1 Die Expansion des Universums



Berechnungen ergeben einen Urknall vor 10-15 Milliarden Jahren. Der Skalenfaktor misst die lineare Grösse des Universums, definiert als 1 für die Gegenwart.

Die Gravitation (Anziehungskraft zwischen den Galaxien) verzögert die Ausdehnungsgeschwindigkeit, und zwar umso stärker, je höher die mittlere Dichte des Universums ist. Abb. 2 zeigt den Skalenfaktor des Universums für zwei verschiedene mittlere Dichten.⁹ Die Bremswirkung der Gravitation ist aus den Kurven ersichtlich. Wenn die Dichte eine kritische Dichte übersteigen würde, fiel das Weltall

⁷ Die Dopplerverschiebung der Schallwellen ist ein bekanntes Phänomen. Von einem Auto nehmen wir einen höheren Ton wahr, wenn es sich uns nähert, als wenn es von uns wegfährt. Im ersteren Fall erhöht sich die Anzahl der Schallwellenmaxima, die pro Sekunde an unser Ohr dringt, um die Anzahl der Schallwellenmaxima in der Distanz, die das Auto in einer Sekunde zurücklegt, im letzteren erniedrigt sie sich entsprechend. Eine geringere Anzahl Schallwellenmaxima pro Sekunde entspricht einer grösseren Wellenlänge und einem tieferen Ton. Ebenso erhöht eine Galaxienflucht die Wellenlänge des von uns empfangenen Lichts der Galaxie und verschiebt damit die Merkmale des Spektrums gegen die rote Seite.

⁸ Bernstein, J., *An Introduction to Cosmology* (Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1995), 32.

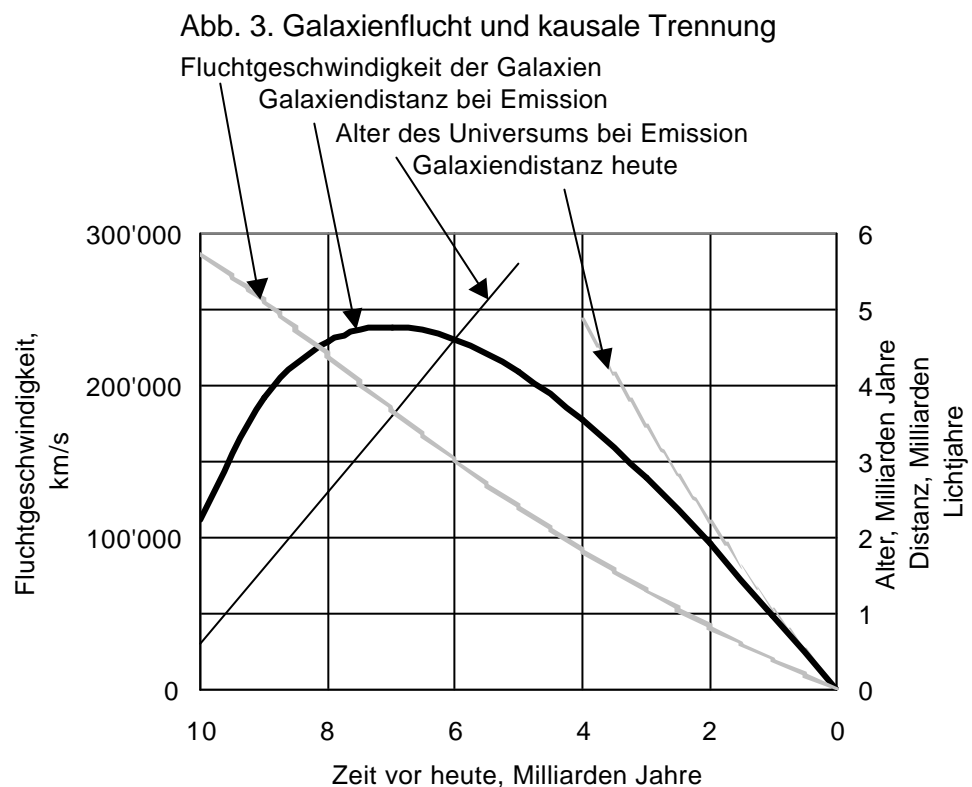
⁹ B.W. Carroll, S.A. Ostlie (1996), loc.cit., 1221.

eines Tages wieder in sich zusammen; es wäre geschlossen. Sonst dehnt es sich unbegrenzt aus. Wenn die Dichte genau kritisch wäre, ergäbe die Expansion eine Parabel, und das Weltall wäre etwa 10 Milliarden Jahre alt. Man hat aber erst Masse für etwa 20-30 % der kritischen Dichte gefunden;¹⁰ dies gibt eine Hyperbel. Zudem sind manche Kugelsternhaufen wesentlich älter als 10 Milliarden Jahre.¹¹ Das Universum ist also offen, mit einer Dichte, die kleiner ist als die kritische. Mit einem Viertel der kritischen Dichte ergäbe sich für das Universum ein Alter von 13,6 Milliarden Jahren, was ungefähr zu den neuesten Schätzungen der Expansionsgeschwindigkeit passt (der neueste Wert ist 14,5 Milliarden Jahre, vergleiche Abschnitt 1.6).

1.2 Kausale Trennung

Die Abb. 3 zeigt die Entwicklung des Universums in den vergangenen 10 Milliarden Jahren.¹² Sie setzt ein flaches Universum voraus, also eines mit kritischer Dichte. Eine geringere Dichte ergäbe hier aber keine wesentlich anderen Zusammenhänge.

Man kann ausrechnen, wie weit von uns entfernt die Galaxien waren, als sie ihr Licht aussandten, das wir heute sehen, und wann sie es aussandten. Die Fluchtgeschwindigkeit der fernsten sichtbaren Galaxien nähert sich der Lichtgeschwindigkeit. Noch weiter entfernte Galaxien könnten wir daher grundsätzlich nicht sehen, weil ihr Licht uns nicht erreichen konnte. Wegen der Expansion des Universums waren uns Galaxien, die ihr Licht z.B. vor 9 Milliarden Jahren aussandten, damals näher als Galaxien, die ihr Licht vor 7 Milliarden Jahren aussandten, es zu ihrer Zeit waren.



Die Entfernung (in Milliarden Lichtjahren) der Galaxien, die ihr Licht vor mehr als 6 Milliarden Jahren aussandten, ist aber grösser als das damalige Alter des Universums in Milliarden Jahren. Jene Galaxien konnten also seit dem Urknall bis vor 6 Milliarden Jahren keinerlei kausalen Kontakt mit unserer Galaxie haben, denn keine Wirkung kann sich schneller ausbreiten als das Licht. Dies führt zu einem Problem, da das Universum im grössten Massstab extrem homogen ist, mit Schwankungen von nur etwa einem Hunderttausendstel. Wie konnten Gebiete, die kausal getrennt waren, sich so genau aufeinander abstimmen?

Um diese Frage zu beantworten, müssen wir die frühesten Zeiten nach dem Urknall etwas genauer betrachten. Wir können aber nur bis zu 5×10^{-44} s nach dem Urknall zurückgehen. Vor jener Zeit, der

¹⁰ N.A. Bahcall, X. Fan, „A lightweight universe?“ *Proc.Natl.Acad.Sci.USA* 95 (1998), 5956.

¹¹ J. Mould, „The age of the globular clusters“, *Nature* 395 (1998), A20.

¹² B.W. Carroll, S.A. Ostlie (1996), loc.cit., 1249.

Planck-Zeit, versagen die heutigen Kenntnisse der Physik, da es bisher noch nicht gelungen ist, die Relativitätstheorie mit der Quantenmechanik zu verbinden.¹³ Aber macht es überhaupt Sinn, von Sekundenbruchteilen zu sprechen, die vor über 10 Milliarden Jahren passiert sind? Die Theorie des Urknalls, die dies beschreibt, hat zu Voraussagen geführt, die durch spätere Beobachtungen sehr präzise bestätigt wurden. Dies verleiht ihr eine sehr grosse Glaubwürdigkeit.

1.3 Der Urknall

Tab. 1. Entwicklung des Universums

| | Zeit nach Urknall | Temperatur | Dichte* | Dimension** | Objekte und Vorgänge |
|---------------------|-----------------------|-------------|--------------------------------|----------------|--|
| | 5×10^{-44} s | 10^{32} K | | 0,004 mm | Planck-Zeit |
| | 10^{-32} s | 10^{27} K | | 2 m | Inflation ? |
| | 10^{-11} s | 10^{16} K | | 50 Mio km | alle Kräfte getrennt |
| Beginn Leptonen-Ära | 0,01 s | 100 Mia K | 4000 t/cm ³ | 0,2 Lichtj. | $e^- \cong e^+ \cong \nu \cong \bar{\nu} \cong \gamma \gg p = n$ (~ 5 n+p pro $10^{10} \gamma$) *** |
| Beginn Strahlen-Ära | 1 s | 10 Mia K | 400 kg/cm ³ | 2 Lichtj. | 3 p/n; $e^- + e^+ \rightarrow 2 \gamma$ (Annihilation, Feuerball) |
| | 200 s | 1 Mia K | 40 g/cm ³ | 25 Lichtj. | 6 p/n; keine e^+ mehr; $2p + 2n \rightarrow He^4$ |
| | 30 min | 300 Mio K | 0,1 g/cm ³ | 80 Lichtj. | 12 H/He (24 % He), nur Kerne; e^- , γ |
| Beginn Materie-Ära | 300'000 J. | 10'000 K | 10^{-20} g/cm ³ | 6 Mio Lichtj. | Atomkerne + $e^- \rightarrow$ Atome: „Entkopplung“ zwischen e^- und γ : Universum wird durchsichtig |
| | 1 Mia J. | 50 K | 400 H/m ³ | 1 Mia Lichtj. | Galaxien- und Sternenbildung |
| | 13,5 Mia J. | 2,73 K | $\approx 0,2$ H/m ³ | 10 Mia Lichtj. | heute |

*) ab 1 Mia J. in H-Atomen/m³ (Mio = Millionen, Mia = Milliarden, Lichtj. = Lichtjahr = $9,5 \times 10^{12}$ km)

) entsprechend der weitesten heutigen Sichtdistanz *) e^- Elektron, e^+ Positron, ν Neutrino, $\bar{\nu}$ Antineutrino, γ Photon (Lichtquant), p Proton, n Neutron

Die Tab. 1 zeigt das Standardmodell der Ereignisse seit dem Urknall, mit der mittleren Temperatur des Universums, seiner mittleren Dichte, sowie einer linearen Grösse, die heute etwa der Distanz zu den entferntesten sichtbaren Galaxien entspricht. Zur Planck-Zeit waren das nur einige μ m, während die Temperatur 10^{32} K betrug.¹⁴ Die Inflation und die Trennung der Kräfte wird später behandelt.

Nach 0,01 s, als die Temperatur nur noch 100 Milliarden K betrug, gab es nur ein Plasma von Elektronen, Neutrinos und ihren Antiteilchen, Photonen und sehr viel weniger Protonen und Neutronen,¹⁵ das Ganze bei einer Dichte von 4000 t/cm³. Die Leptonen-Ära begann.

Nach 1 s annihilierten Elektronen und Positronen und erzeugten einen riesigen Feuerball. Die Strahlen-Ära begann.

¹³ G. Taubes, „String Theorists Find a Rosetta Stone“, *Science* 285 (1999), 512.

¹⁴ K: Grad Kelvin, über dem absoluten Nullpunkt von $-273,15^\circ$ Celsius.

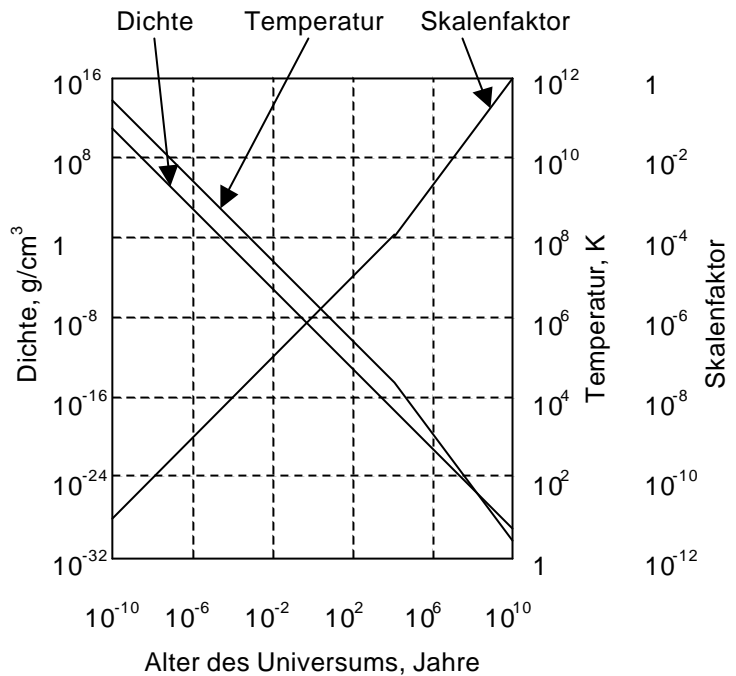
¹⁵ Neutrinos sind elektrisch neutrale, fast masselose Teilchen. Elektronen und Neutrinos werden als Leptonen (leichte Teilchen) bezeichnet, Protonen und Neutronen als Baryonen (schwere Teilchen, 1836 Mal schwerer als Elektronen). Ein Teilchen und sein Antiteilchen annihilieren sich beim Zusammenstoss zu zwei Photonen und können aus diesen wieder erzeugt werden. Positronen sind die Antiteilchen der Elektronen.

Nach 3 Minuten, bei 1 Milliarde K, gab es keine Antimaterie mehr, und Protonen und Neutronen begannen zu Heliumkernen zu verschmelzen (Kernfusion). Dies dauerte etwa eine halbe Stunde. Dann, bei 300 Millionen K, hörte die Kernfusion auf. Etwa 24 % der Baryonenmasse bestand nun aus Heliumkernen, der Rest aus Wasserstoffkernen (Protonen).

Nach 300'000 Jahren war die Temperatur auf 10'000 K gesunken, und aus den Atomkernen und Elektronen konnten sich ganze Atome bilden. Bisher waren die Photonen noch ständig mit den Elektronen zusammengestossen. Die Elektronen wurden durch Bindung in den Atomen von den Photonen entkoppelt. Man nennt dieses Stadium in der Entwicklung des Universums daher „Entkopplung“. Nun konnte sich das Licht frei im Raum ausbreiten, das Universum wurde durchsichtig, und die Materie-Ära begann.

Die doppeltlogarithmische Darstellung in Abb. 4 zeigt die Dichte, die Temperatur und den Skalenfaktor des Universums von 3 ms (10^{-10} Jahre) bis 10^{10} Jahre nach dem Urknall. Mit der Ausdehnung des Universums sinken die Dichte und die Temperatur. Der Knick in den Kurven für den Skalenfaktor und die Temperatur entspricht der Entkopplung von Photonen und Elektronen.

Abb. 4. Entwicklung des Universums



1.4 Trennung der Kräfte

Abb. 5. Die Trennung der Kräfte

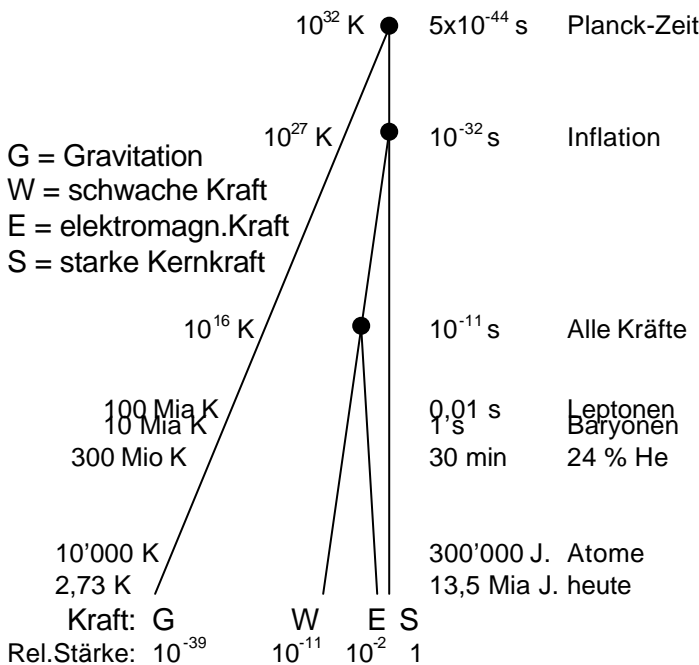


Abb. 5 zeigt die Trennung der Kräfte.¹⁶ Hier ist die Zeitachse vertikal, von der Planckzeit bis heute. Zu kritischen Zeiten ist nochmals die mittlere Temperatur des Weltalls angegeben. Es gibt vier fundamentale physikalische Kräfte, deren sehr unterschiedliche Stärke horizontal aufgetragen ist. Beide Massstäbe sind logarithmisch.

Die starke Kernkraft hält die Teilchen im Atomkern zusammen, wirkt aber nicht darüber hinaus. Die elektromagnetische Kraft ist 100 Mal schwächer. Nochmals 1 Milliarde Mal schwächer ist die schwache Kraft, welche das Verhalten der Elektronen und damit die Chemie bestimmt. Nochmals 10^{28} Mal schwächer ist die Gravitationskraft, die nur bei grossen Massen spürbar wird, aber auch auf sehr grosse Distanzen.

Die Entstehung der elektromagnetischen und der schwachen aus der elektroschwachen Kraft 10^{-11} s nach dem Urknall ist bewiesen, da vorausgesagte Teilchen nachgewiesen wurden. Die Abspaltung dieser elektro-

schwachen von der starken Kraft 10^{-32} s nach dem Urknall ist noch spekulativ, aber sie würde mit der Inflation, deren Erklärung noch folgt, einige Rätsel lösen. Die Abspaltung der Gravitationskraft von dieser

¹⁶ B.W. Carroll, S.A. Ostlie (1996), loc.cit., 1304.

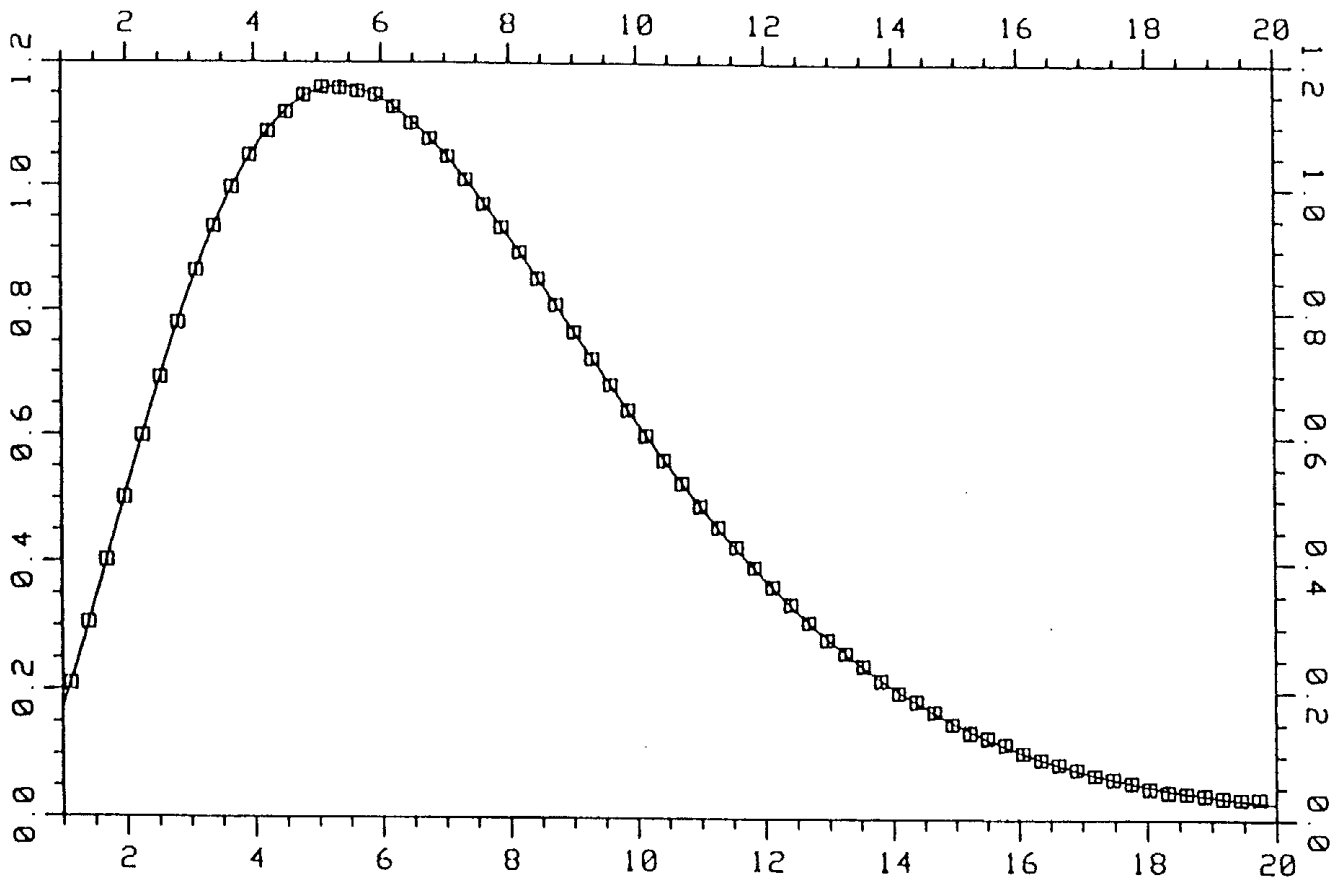
aus starker und elektroschwacher Kraft kombinierten Kraft zur Planck-Zeit kann man erst untersuchen, wenn man die Beziehung zwischen der Relativitätstheorie und der Quantenmechanik versteht.

Die kosmische Mikrowellen-Hintergrundstrahlung¹⁷ stellt eine der markantesten Erfolgsgeschichten der kosmologischen Forschung dar. Für diese beim Durchsichtigerwerden des Universums (bei der Entkopplung zwischen Elektronen und Photonen) frei gewordene Strahlung wurden 1948 vier spezifische Voraussagen gemacht:

- (1) diese Strahlung sollte heute messbar sein;
- (2) sie sei extrem homogen und isotrop, d.h. von allen Seiten her kommend gleich;
- (3) ihr Spektrum sei das einer Schwarzkörperstrahlung;
- (4) ihre Frequenz entspreche heute einer Temperatur von wenigen K.

Diese Hintergrundstrahlung wurde 1965 von Forschern entdeckt, die etwas ganz anderes suchten. Ihre Temperatur beträgt 2,73 K, und ihr in Abb. 6 gezeigtes Spektrum stellt vielleicht die schönste Kurve in der Kosmologie dar. Die theoretische Kurve (ausgezogene Linie) ist das am besten an die Messpunkte (Quadrate) angepasste Schwarzkörperspektrum. Die Abweichungen sind offensichtlich minim.

Abb. 6. Kosmische Mikrowellen-Hintergrundstrahlung
(horizontal: Frequenz, cm^{-1} ; vertikal: Helligkeit, $10^{-4} \text{ erg} / \text{cm}^2 \text{ sr s cm}^{-1}$)



Trotz der hohen Homogenität mussten aber einmal Dichteschwankungen auftreten, so dass sich später in den dichteren Bereichen die Materie durch die Gravitation zu protogalaktischen Wolken zusammenziehen konnte, aus welchen sich später Galaxien und schliesslich Sterne bilden konnten. Die Homogenität durfte nicht absolut sein. Dies ergab eine weitere Voraussage:

- (5) die Strahlung sollte sehr geringe Inhomogenitäten enthalten.
- Solche Inhomogenitäten in der Grösse von 10^{-5} wurden dann 1992 tatsächlich gemessen.

Aber wie konnte eine derart hohe Homogenität über das ganze Universum zu einer Zeit entstehen, als seine verschiedenen Bereiche noch nicht kausal miteinander gekoppelt waren? Das Modell der Inflation scheint gegenwärtig die einzige Möglichkeit einer wissenschaftlichen „Erklärung“ zu sein. Allerdings beinhaltet sie äusserst unkonventionelle Aspekte.

¹⁷ Mather et al., *Ap.J.Lett.* 354 (1990), L37. In: B.W. Carroll, S.A. Ostlie (1996), loc.cit., 1242.

1.5 Inflation

In Abb. 7 sind nochmals die Temperatur- und Skalenfaktorkurven von der Planck-Zeit bis heute doppelt logarithmisch aufgetragen.

Abb. 7. Entwicklung im Standardmodell

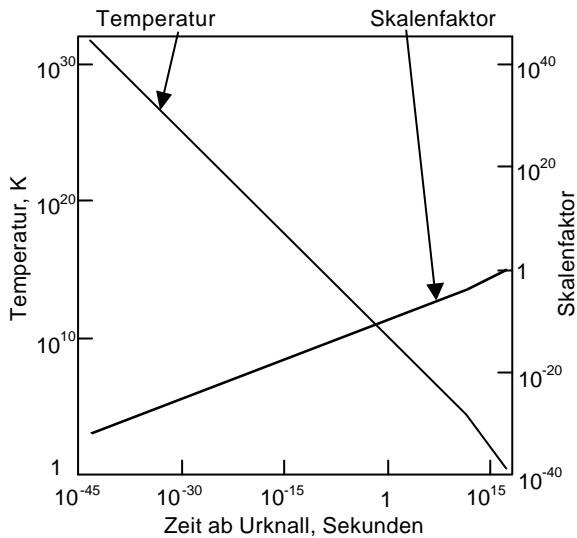
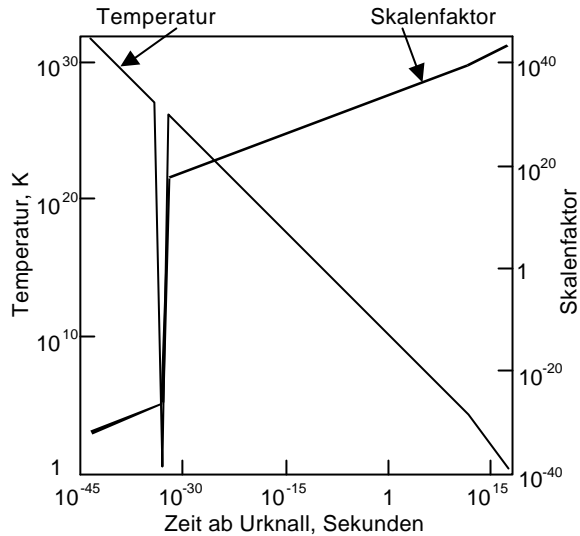


Abb. 8. Entwicklung im Inflationsmodell



In Abb. 8 sind Temperatur- und Skalenfaktorentwicklung im Inflationsmodell¹⁸ mit den genau gleichen Skalen gezeigt wie im Standardmodell in Abb. 7.¹⁹ Das Inflationsmodell setzt bei der Trennung der elektroschwachen Kraft von der starken Kernkraft ein, die um 10^{-34} s nach dem Urknall, bei 10^{27} K, geschah. Das Modell postuliert nun, dies habe einem Phasenübergang entsprochen, wie beim Gefrieren einer Flüssigkeit. Dabei sei zunächst eine Unterkühlung aufgetreten bis 10^{-33} s, bevor die Kräfte sich explosionsartig trennten und die freiwerdende Energie die lineare Grösse des Universums um über 43 Zehnerpotenzen aufblähte. Diese Inflation dauerte nur 10^{-32} s.

Ein Grössenvergleich soll die Immensität dieser Inflation verdeutlichen, so weit dies überhaupt möglich ist. Die Distanz des Ursache-Wirkungskontakts, also die Distanz, welche das Licht seit dem Urknall, 10^{-34} s früher, zurücklegen konnte, war vor der Inflation nur ein Hundertmilliardstel des Protonendurchmessers. Eine solche Distanz erstreckte sich aber nach der Inflation, also nur 10^{-32} s später, über 100 Lichtjahre. Damit war der Ursache-Wirkungskontakt zwischen allen Elementarteilchen verloren. Der Radius des heute beobachtbaren Weltalls von 10 Milliarden Lichtjahren betrug nach der Inflation ca. 3 m. Was wir heute kennen, umfasste also nur 2 Teile in 10^{52} dieser Inflationsblase, wie 1 Wasserstoffatom in 2 Erdvolumen!

Dieses Szenario ist völlig spekulativ, aber es stellt heute die einzige physikalische Erklärung dar für folgende Fakten (die aber hier nicht im Einzelnen erklärt werden sollen):

- (1) dass es keine Antimaterie mehr gibt, nur Materie;
- (2) die Herkunft des Grossteils der kosmischen Hintergrundstrahlung;
- (3) die grosse Homogenität des Universums ohne Ursache-Wirkungskontakt kurz nach dem Urknall;
- (4) die schwachen Homogenitätsschwankungen, die für eine Galaxienbildung nötig waren;
- (5) dass die Gravitation überhaupt Galaxien bilden konnte.

Das anfängliche Verhältnis von Expansionsgeschwindigkeit zu Gravitation musste genau richtig sein. Wenn es nämlich um mehr als einen Teil in 10^{60} vom kritischen abgewichen wäre, hätte die Gravitation entweder in kurzer Zeit das Universum wieder in sich zusammenstürzen lassen, oder sie wäre für eine Galaxienbildung zu schwach gewesen. Dies bedeutet eine unerhörte Präzision! Aber es kommt noch erstaunlicher!

1.6 Die kosmologische Konstante

¹⁸ B.W. Carroll, S.A. Ostlie (1996), loc.cit., 1304.

¹⁹ Der Skalenfaktor ist hier allerdings nicht als 1 für heute definiert, sondern in der Anfangszeit mit demjenigen des Standardmodells gleichgesetzt, um den Unterschied zwischen den zwei Modellen deutlicher zu machen.

Bis vor kurzem passten nicht alle voneinander unabhängigen Altersbestimmungen des Universums genau zusammen. Mit dem Inflationsmodell konnte man die Erzeugung eines „flachen“ Universums erreichen, um die Entstehung von Galaxien zu erklären. Doch könnte ein solches Universum mit genau kritischer Dichte nur gut 10 Milliarden Jahre alt sein. Manche Kugelsternhaufen sind aber älter, und nur ein kleiner Teil der benötigten Masse ist gefunden worden.

Nun hat die Bestimmung der Entfernung von 42 sehr weit entfernten Supernovae zu einem überraschenden Lösungsansatz geführt.²⁰ Mit grosser Wahrscheinlichkeit entfernen sich diese Objekte schneller von uns, als sie es könnten, wenn das Weltall nur von der Gravitation beherrscht wäre! Eine Erklärung dafür ist eine kosmologische Konstante Λ , welche den Raum ausdehnt, und zwar mit zunehmender Geschwindigkeit und unabhängig von der Materie. Einstein hatte einmal ein solches Λ postuliert, um ein statisches, ewiges Universum zu ermöglichen. Nachdem aber Hubble die Expansion des Universums entdeckt hatte, nannte es Einstein seinen „grössten Schnitzer“.

Im neuen Modell der Expansion des Universums war zunächst der Bremseffekt der Gravitation vorherrschend, seit ca. 6 Milliarden Jahren jedoch der sehr kleine Beschleunigungseffekt der kosmologischen Konstante. Dies ermöglicht ein „flaches“ Universum mit einer mittleren Dichte, die den Beobachtungen entspricht. Die mysteriöse „exotische Materie“ wurde überflüssig.²¹ Es ergibt sich ein Alter des Universums von ca. 14,5 Milliarden Jahren, was auch zu den ältesten Kugelsternhaufen passt.

Interessant ist, dass die Grösse von Λ mit einer Genauigkeit von einem Teil in 10^{120} festgelegt sein muss,²² um einen Kosmos mit einer bewohnbaren Erde zu ermöglichen. Das ist Präzision!

1.7 Die Zielgenauigkeit des Schöpfers

Penrose, ein führender Kosmologe und Empfänger der Einstein-Medaille, berechnete die Entropie des Universums heute und für einen Endkollaps, den es bei einem Universum mit überkritischer Dichte einmal geben müsste.

Tab. 2. Die Entropie des Universums

| | Urknall: | heute: | End-Kollaps: |
|----------|--------------------------|------------------------|------------------------|
| Entropie | ~ 0 (Theorie) | 10^{88} (beobachtet) | 10^{123} (berechnet) |
| | anfängliche Singularität | $= 10^8$ / Baryon | End-Singularität |

Die Entropie ist ein Mass für die „Zufälligkeit“ oder „Unordnung“ in einem System, z.B. im gesamten Weltall. Der Zweite Hauptsatz der Thermodynamik besagt, dass die Entropie eines geschlossenen Systems nur zunehmen könne. Ein geschlossenes System ist z.B. das Weltall, das keinerlei physikalischen Ursache-Wirkungskontakt mit irgendwelchen Objekten ausserhalb haben kann.

Die einzige Chance, den Zweiten Hauptsatz der Thermodynamik zu begründen, besteht in der anfänglichen Singularität des Urknalls. Das Weltall hatte im Urknall eine Entropie von nahezu 0, denn sie musste ja sehr viel kleiner sein als die heutige Entropie, die nur 10^8 / Baryon beträgt, was als äusserst klein betrachtet wird. Wie gross die Entropie einer zufällig entstandenen Singularität für ein Weltall wie das unsere sein müsste, kann anhand der Entropie einer End-Singularität abgeschätzt werden, die beim End-Kollaps eines überkritisch dichten Weltalls auftreten würde: sie wäre 10^{123} .

²⁰ A.K.Finkbeiner, „Cosmic yardsticks: Supernovae and the Fate of the Universe“, *Sky & Telescope* (Sep.1998), 38; S.Perlmutter et al., „Measurements of Ω and Λ from 42 High-Redshift Supernovae“, *Astrophys.J.* 517 (1999), 565; R.P.Kirshner, „Supernovae, an accelerating universe and the cosmological constant“, *Proc.Natl. Acad.Sci.USA* 96 (1999), 4224; I.Zehavi, A.Dekel, „Evidence for a positive cosmological constant from flows of galaxies and distant supernovae“, *Nature* 401 (1999), 252.

²¹ Dies ist nicht die bekannte Dunkelmaterie, die aus Objekten wie kleinen dunklen Sternen, schwarzen Löchern, schweren Neutrinoarten usw. besteht.

²² L.M.Krauss, „The End of the Age Problem and the Case for a Cosmological Constant Revisited“, *Astrophys.J.* 501 (1998), 461.

Ein zufälliges Entstehen einer anfänglichen Singularität mit Entropie von nahezu 0, also eines Zustands extremer Dichte und Temperatur, wie es der Urknall beinhaltete, hat nun aber nur eine Wahrscheinlichkeit von 1 in $10^{10(123)}$. Dies ist eine unvorstellbar kleine Zahl: $10^{10(123)}$ ist eine 1 und 10^{123} Nullen, der Exponent 10^{123} ist eine 1 und 123 Nullen! Ist eine solche Singularität denn eine Notwendigkeit? Oder ist es eine unvorstellbare „Zielgenauigkeit des Schöpfers“, wie Penrose sich ausdrückte?

Der nachstehende Extrakt aus Penroses Arbeiten²³ ist in seinen technischen Einzelheiten in unserem Zusammenhang nicht von wesentlicher Bedeutung, aber er zeigt durch die in Anführungszeichen stehenden Aussagen Penroses Urteil über die Unwahrscheinlichkeit eines spontanen Urknalls:

Wenn die kosmologische Singularität wegfällt, „hätten wir etwas verloren, was mir als die beste Chance erscheint, das Geheimnis des Zweiten Hauptsatzes der Thermodynamik erklären zu können.“²⁴

Das Hartle-Hawking-Modell²⁵ „ist weit davon entfernt, die Tatsache erklären zu können, dass Singularitäten in der Vergangenheit kleine Weylsche Krümmungen²⁶ haben, solche in der Zukunft grosse.“²⁷

Wenn wir die anfängliche kosmologische Singularität entfernen, machen wir die Weylsche Krümmungshypothese irrelevant und „wir wären in unseren Versuchen, den Ursprung des Zweiten Hauptsatzes zu verstehen, nicht weiter gekommen.“²⁸

„Hätte es kein einschränkendes Prinzip (wie die Weylsche Krümmungshypothese) gegeben, würde uns die Bekenstein-Hawking-Formel²⁹ sagen, dass die Wahrscheinlichkeit, dass solch eine 'spezielle' Geometrie zufällig auftritt, höchstens etwa 1 Teil in $10^{1000B(3/2)}$ beträgt, wobei B die gegenwärtige Baryonenzahl des Universums darstellt [$\sim 10^{80}$].“³⁰

„Die Zielgenauigkeit des Schöpfers“ müsste also 1 Teil in $10^{10(123)}$ gewesen sein, damit unser Universum existiert.³¹

„Ich erinnere mich nicht, in der Physik je irgendetwas anderes gesehen zu haben, dessen bekannte Genauigkeit auch nur im Entferntesten an eine Zahl wie 1 Teil in $10^{10(123)}$ heranreicht.“³²

Derartige Unwahrscheinlichkeiten sind natürlich auch anderen Physikern ein Dorn im Auge. Die meisten unter ihnen helfen sich mit der Spekulation von unendlich vielen Universen aus der Klemme. Wenn es unendlich viele Universen gäbe, und wenn die Naturgesetze und Parameter in ihnen aus beliebig vielen Möglichkeiten zufällig ausgelesen und kombiniert würden, müsste jede beliebige Kombination einmal auftauchen. Wir haben also einfach Glück gehabt. Unwahrscheinlich wäre es nicht mehr.

Natürlich ist es der Wissenschaft grundsätzlich unmöglich, irgendetwas, was es allenfalls ausserhalb unseres Universums noch geben könnte, je zu beobachten oder zu messen. Die „Erklärung“ mit den

²³ Nach W.L. Craig, „Design & the Cosmological Argument“, in: W.A. Dembski (ed.), *Mere Creation* (Downers Grove, IL: InterVarsity Press, 1998), 332.

²⁴ R. Penrose, „Some Remarks on Gravity and Quantum Mechanics“, in: M.J. Duff, C.J. Isham (eds.), *Quantum Structure of Space and Time* (Cambridge: Cambridge University Press, 1982), 3.

²⁵ Aus einem Punkt, also „aus nichts“ entstandenes Universum.

²⁶ Nicht durch Materie bedingter Anteil der Raumkrümmung.

²⁷ S. Hawking, R. Penrose, *The Nature of Space and Time* (Princeton: Princeton University Press, 1996), 34, 129.

²⁸ R. Penrose (1982), loc.cit.

²⁹ Für die Entropie eines stationären Schwarzen Lochs.

³⁰ R. Penrose (1982), loc.cit.

³¹ R. Penrose, „Time-Asymmetry and Quantum Gravity“, in: C.J. Isham, R. Penrose, D.W. Sciama (eds.), *Quantum Gravity 2* (Oxford: Clarendon Press, 1981), 245; cf. S. Hawking, R. Penrose (1996), loc.cit.

³² R. Penrose (1981), loc.cit.

unendlich vielen Universen ist daher überhaupt keine Erklärung, sondern einfach eine müßige Spekulation.

2. Entstehung der chemischen Elemente für menschliches Leben

2.1 Synthese leichter Elemente im Urknall

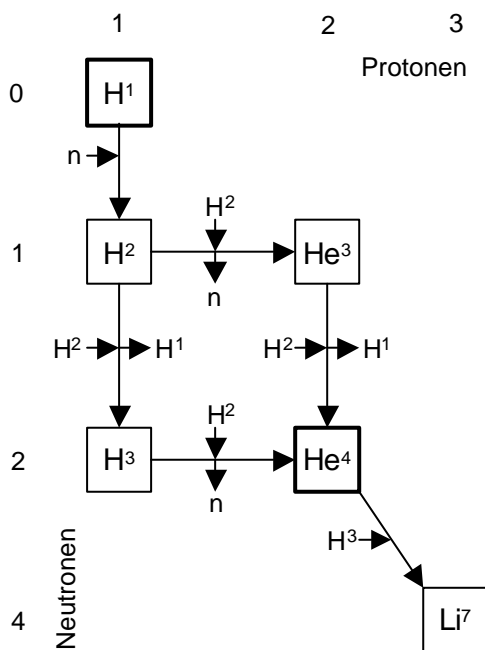
Nur die drei Elemente Wasserstoff (H), Helium (He) und Lithium (Li) entstanden im Urknall. Einige Minuten nach dem Urknall, als die Temperatur nur noch 1 Milliarde K betrug, konnten durch Fusion von Protonen (p oder H^1) und Neutronen (n) zusammengesetzte Atomkerne aufgebaut werden. Abb. 9 zeigt, wie Kerne der schweren Wasserstoffisotopen H^2 (Deuterium), H^3 (Tritium), der Heliumisotopen He^3 und He^4 , sowie Lithium Li^7 entstanden.

Ein H^1 und ein n fusionieren zu H^2 . Zwei H^2 können verschmelzen, stoßen aber gleichzeitig entweder ein H^1 oder ein n aus, unter Bildung von H^3 oder He^3 . H^3 kann ein weiteres H^2 aufnehmen und ein n ausstossen, während He^3 nach der Aufnahme eines weiteren H^2 ein H^1 ausstösst. In beiden Fällen entsteht dabei He^4 . In einer selteneren Reaktion kann dieses mit einem H^3 zu Li^7 fusionieren. Das Hauptprodukt ist He^4 . H^3 ist radioaktiv und zerfällt mit einer Halbwertszeit von 12,4 Jahren unter Abgabe eines Elektrons zu He^3 .

Man hat berechnet, wieviel von jedem dieser Isotopen entstehen musste, abhängig von der heutigen Dichte des Universums.

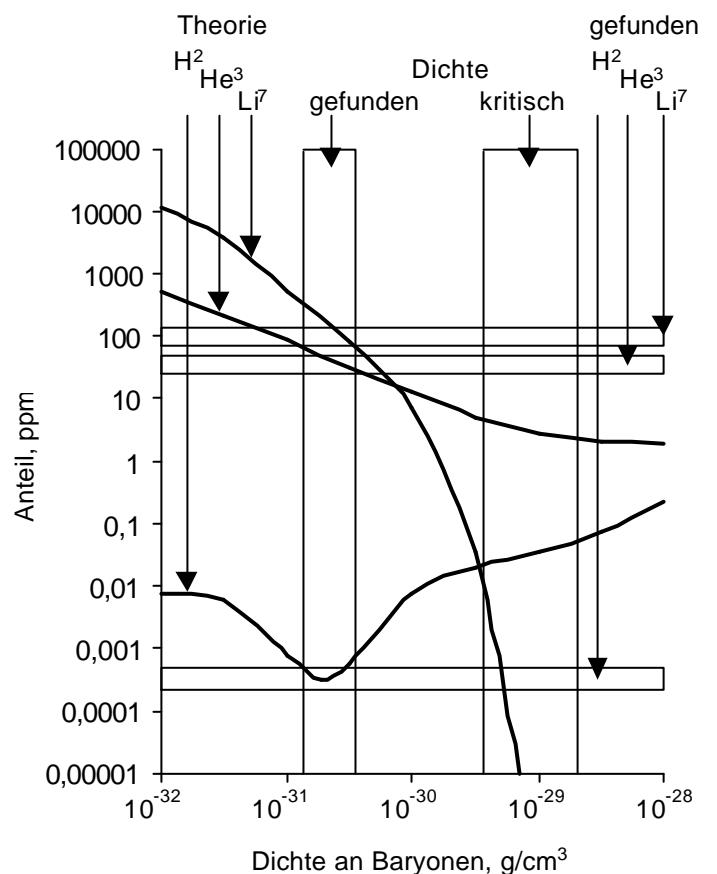
Abb. 10 zeigt die Mengenanteile an leichten Isotopen, die aufgrund der Berechnung im Urknall

Abb. 9. Synthese leichter Elemente



entstehen mussten, im Vergleich zu den heute beobachteten Werten³³ (vertikale Achse, Kurven „Theorie H^2 , He^3 , Li^7 “ und horizontale Balken „gefunden H^2 , He^3 , Li^7 “), als Funktion der heutigen Dichte des Universums (horizontale Achse, in Anzahl Baryonen (Protonen und Neutronen) pro cm^3). Neben den hier gezeigten Isotopen H^2 , He^3 und Li^7 mussten 24 % He^4 entstehen, wie beobachtet, während der Rest H^1 blieb. Die beobachteten Mengen an H^2 , He^3 und Li^7 passen genau mit den berechneten zusammen. Dies gilt aber nur dann, wenn die heutige Dichte des Universums (vertikale Balken) nicht der kritischen Dichte von etwa $10^{-29} g/cm^3$

Abb. 10. Leichte Isotopen im Urknall



³³ B.W. Carroll, S.A. Ostlie (1996), loc.cit., 1289.

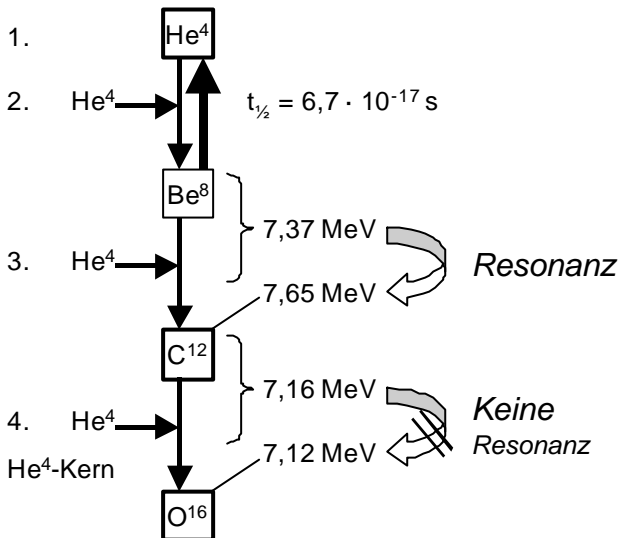
entspricht, sondern nur einigen Prozent davon. Aber dies ist genau das, was den bisherigen Beobachtungen entspricht!

Neben der Expansion des Universums und der kosmischen Mikrowellen-Hintergrundstrahlung ist diese Übereinstimmung der Häufigkeit der leichten Isotopen über 9 Größenordnungen einer der stärksten Beweise für das Urknallmodell.

2.2 Beryllium bis Sauerstoff

Nach der ersten halben Stunde nach dem Urknall war die Temperatur auf 300 Millionen K gesunken, und es konnten keine Atomkerne mehr synthetisiert werden. Es gab aber erst die drei leichtesten Elemente H, He und Li. Erst in den Sternen wurde es durch die hohe Dichte im Innern wieder so heiss, dass Kernfusionen erneut eintreten konnten. Auch hier fusioniert zunächst wieder H zu He.

Abb. 11. Synthese von Kohlenstoff und Sauerstoff



Wenn der Wasserstoff im Zentrum des Sterns fast aufgebraucht ist, genügt die erzeugte Energie nicht mehr, um den Gravitationsdruck der Sternmasse aufzuhalten, und der Stern kollabiert. Dadurch wird sein Zentrum weiter aufgeheizt, bis die Fusion von Helium zu schwereren Elementen gezündet wird. Dies bläht nun die äussere Hülle auf, und der Stern wird zum Roten Riesen. Später kann ein Teil der Hülle abgestossen werden. Dies ist z.B. beim Ring-Nebel ersichtlich, der aus einer solchen abgestossenen Hülle besteht und bereits einen Durchmesser von einem Lichtjahr hat.

Mit der Helium-Verschmelzung (Abb. 11) beginnen nun neue Wunder.

(1) Bei der Helium-Fusion verschmilzt He^4 zu Beryllium Be^8 . Dieses zerfällt sofort wieder zu He^4 , aber mit einer Halbwertszeit von $6,7 \times 10^{-17} \text{ s}$ viel langsamer als erwartet. Dadurch besteht die Möglichkeit, dass das Be^8 noch ein drittes He^4 einfangen kann.

(2) Da die Gesamtenergie von $\text{Be}^8 + \text{He}^4$ $7,37 \text{ MeV}$ beträgt, also gerade ein bisschen kleiner ist als diejenige von Kohlenstoff C^{12} , $7,65 \text{ MeV}$, ergibt sich mit der Stossenergie zusammen eine Resonanz mit diesem C^{12} -Energieniveau, und C^{12} entsteht. Ohne Resonanz würde kein C entstehen.

(3) Beim Einfang eines weiteren He^4 entsteht Sauerstoff O^{16} , aber da die Gesamtenergie von $\text{C}^{12} + \text{He}^4$ etwas grösser ist als diejenige von O^{16} , ist keine Resonanz möglich, und nicht alles C^{12} wird in O^{16} verwandelt. Mit Resonanz würde kein C übrig bleiben, mit nur wenig kleinerer oder wenig grösserer Energie von $\text{C}^{12} + \text{He}^4$ entstünde kein O.

Die Rahmenbedingungen dafür, dass diese Nukleosynthesen funktionieren können, sind extrem eng. Diesen drei unglaublichen Zufällen ist es zu verdanken, dass es sowohl C als auch O in brauchbaren Mengen gibt. Hoyle,³⁴ der Entdecker dieser Zusammenhänge, schloss aus der Tatsache, dass wir mit unserem C und O existieren, dass die Energien genau so sein müssten und sagte dieses Resonanzschema voraus, das dann auch tatsächlich gefunden wurde. Dies war eine der ersten Anwendungen des anthropischen kosmologischen Prinzips.

Nachdem Hoyle 1953 die seltsamen „Zufälle“ bei der Nukleosynthese von C und O entdeckt hatte, schloss er: „ein Superintellekt hat mit der Physik herumgespielt, wie auch mit der Chemie und Biologie.“ Der Einschluss der Chemie und Biologie bezieht sich darauf, dass er zudem aus der Komplexität des Lebens folgerte, dass dieses nicht zufällig auf der Erde habe entstehen können. Er erachtete die dar-

³⁴ Sir Fred Hoyle ist zusammen mit Willy Fowler, der später dafür den Nobelpreis erhielt, der Autor grundlegender Arbeiten über Nukleosynthese in Sternen.

wünsche Evolution in einem kosmischen Zeitrahmen von nur zehn oder zwanzig Milliarden Jahren für unmöglich, in seinen eigenen Worten:³⁵

Ich schätzte (auf einer sehr konservativen Basis) die Wahrscheinlichkeit, dass ein zufälliges Zusammenwürfeln von Aminosäuren einen funktionierenden Satz von Enzymen erzeugen könnte, auf weniger als $10^{-40'000}$. Da die Winzigkeit dieser Wahrscheinlichkeit jeden Gedanken daran, dass das Leben auf der Erde entstanden sein könnte, vom Tisch wischt, argumentieren viele, deren Gedanken irreversibel auf einen Glauben an einen irdischen Ursprung des Lebens programmiert sind, dafür, dass die Enzymschätzung falsch sei. Sie ist es – sie ist nämlich zu konservativ.

Da es für Hoyles agnostischen Glauben essentiell ist, jede Art von göttlicher Schöpfung des Lebens auszuschließen, zog er den Schluss, dass der einzige gangbare Weg, mit so kleinen Wahrscheinlichkeiten wie $10^{-40'000}$ fertigzuwerden, der ist, zu fordern, dass das Universum in Zeit und Ausdehnung unendlich sein müsse. Sogar 1990 verteidigte er noch sein zeitloses Fließgleichgewichts-Modell als eine Alternative zum allgemein akzeptierten Urknall-Modell,³⁶ obwohl er dadurch mit dem ganzen Kosmologie-Establishment in Konflikt geriet.

2.3 Alle Elemente bis Eisen

In schwereren Sternen wiederholt sich am Ende jeder Kernfusionsstufe der Kollaps des Sterns mit Temperaturerhöhung und dem Start neuer Kernreaktionen, bis zur Synthese von Eisenkernen (Fe). Jede Stufe geht schneller als die vorhergehende, da immer weniger Energie frei wird. Schwerere Elemente als Fe können nicht gebildet werden, da bei ihrer Bildung keine Energie freigesetzt wird, sondern zugeführt werden müsste.

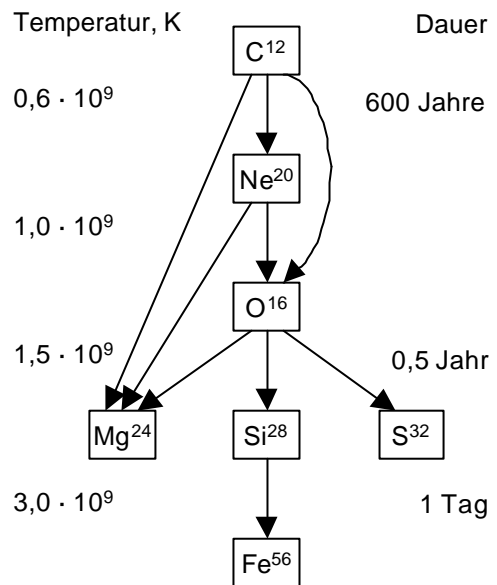
Abb. 12 zeigt die Hauptreaktionen (α -Prozesse) unter Teilnahme von He^4 -Kernen (α -Teilchen), was zu der „Vierreihe“ in den Atomgewichten führt (vgl. die Elementhäufigkeiten, Abb. 15: die Elemente C, O, Neon (Ne), Magnesium (Mg), Silizium (Si), Schwefel (S) sind jeweils etwa zehnmal häufiger als die dazwischen liegenden; die Häufigkeit des stabilen Fe übertrifft diejenigen aller Elemente, die schwerer als Si sind).

Zwischen den α -Prozessen, die zu C, O, Ne, Mg, Si, S usw. führen, gehen viele weiteren Kernreaktionen vor sich, die alle anderen Elemente bis zu den Eisenmetallen bilden.³⁷ Neutronen-Einfang führt zu immer schwereren Isotopen aller Elemente, bis eines davon radioaktiv ist und unter Abgabe eines Elektrons zerfällt (β -Zerfall) und damit das nächsthöhere Element bildet. In Abb. 13 sind die häufigsten Isotopen eines Elements mit durchgehenden Rahmen versehen (die durch α -Prozesse entstandenen mit einem dicken), die weniger häufigen gestrichelt und die radioaktiven punktiert.

Eine Ausnahme stellt N^{16} dar, das nach dem β -Zerfall sofort noch ein α -Teilchen abgibt und zu C^{12} zerfällt. Da aber O^{16} auch durch den Hoyleschen α -Prozess entsteht, hat dies keine Folgen für die O-Häufigkeit.

Schwerwiegendere Konsequenzen hat die spezielle Situation bei Fluor (F), von dem in den normalen schweren Sternen praktisch nichts übrigbleibt, weil der von O^{18} zu O^{19} führende Neutronen-Einfang viel schwächer verläuft als der von F^{19} zu F^{20} führende (die Wirksamkeit des Neutroneneinfangs wird durch

Abb. 12. Elemente bis Eisen



³⁵ F. Hoyle, *Annu.Rev.Astron.Astroph.* 20 (1982), 4

³⁶ H.C.Arnp, G.Burbidge, F.Hoyle, J.V.Narlikar, N.C.Wickramasinghe, *Nature* 346 (1990), 807.

³⁷ R.L. Heath, in: R.C. Weast, M.J. Astle, W.H. Beyer (eds.), *CRC Handbook of Chemistry and Physics* (Boca Raton, FL: CRC Press, 66th ed. 1986), B-233.

den thermalen Neutronenquerschnitt³⁸ gemessen). Aus diesem nur sehr ineffizient entstehenden O¹⁹ erfolgt aber durch β -Zerfall die Bildung von F¹⁹, von welchem daher nur sehr wenig vorhanden ist. Andererseits zerstört der β -Zerfall zu Ne²⁰ das sehr effizient aus F¹⁹ entstehende F²⁰ sofort wieder.

Fluor ist für uns aber lebensnotwendig. Woher haben wir es also, wenn es nicht in genügenden Mengen entstehen konnte? Es wäre müssig, darüber zu spekulieren, ob es nicht eine „bessere Welt“ mit weniger stabilem O¹⁸ oder stabilerem F¹⁹ geben könnte. Die physikalischen Parameter der Isotopen sind nicht individuell und allenfalls sogar zufällig bestimmt, denn sie sind eine Folge der fundamentalen

physikalischen Parameter, wie die Stärke der Kernkräfte, Massen der Elementarteilchen usw.

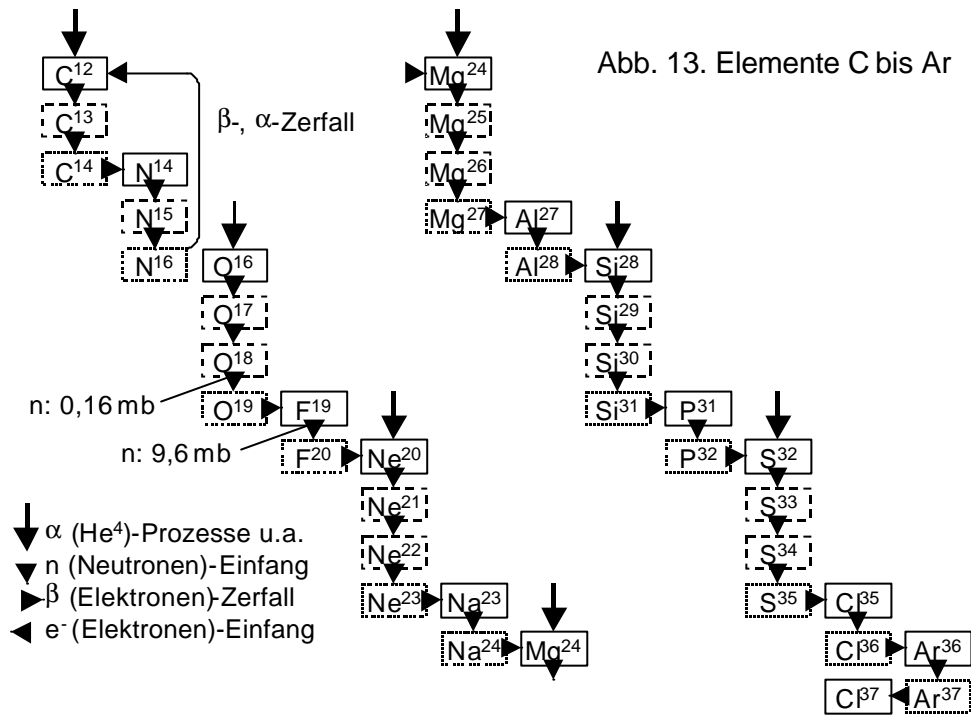


Abb. 13. Elemente C bis Ar

Glücklicherweise gab es eine Lösung für das Fluor-Problem. Um für einen Leben ermöglichenden Planeten genügend F zu erhalten, braucht es eine ganz spezielle Art von Doppelsternen. Einer der beiden Sterne muss ein Weisser Zwerg sein (eine alte Sternruine extremer Dichte), und er muss durch seine hohe Gravitationskraft vom anderen Stern Materie ansaugen können. Diese löst dann beim Aufprall an seiner Oberfläche Kernreaktionen aus und synthetisiert unter anderem F. Ausserdem ist die

Grösse der Masse dieses Weissen Zwerges kritisch. Ein zu schwerer Stern wird nicht zum Weissen Zwerg, ein zu leichtes Doppelsternsystem hat nicht genügend Masse für die Bildung einer Supernova. Der Weisse Zwerg muss ja genügend schwer werden und durch seine Explosion seine Materie in den Weltraum zerstreuen können.

2.4 Supernova-Explosion

Die Tab. 3 gibt einen Überblick über die Stadien der Elementsynthese in Sternen. Durch die gegen innen zunehmende Temperatur gibt es mit der Zeit Schalen verschiedener Reaktionen, die zuletzt alle gleichzeitig ablaufen („Zwiebelschalen“). In der äussersten, der H-Schale, in welcher H zu He fusioniert, entstehen nur die gleichen Elemente, die schon im Urknall entstanden sind und daher ohnehin überall reichlich zur Verfügung stehen. Für uns wichtige Elemente werden aber in den inneren Schalen synthetisiert. In der He-Schale entstehen C, O, und Stickstoff (N). In der C-Schale entstehen vor allem O, Ne, Mg, Natrium (Na), und Aluminium (Al). In der Ne-Schale entstehen vor allem O und Mg. In der O-Schale entstehen vor allem Mg, Si, S, Phosphor (P), Chlor (Cl), Argon (Ar), Kalium (K), und Kalzium (Ca). In der Si-Schale entstehen die Eisenelemente Fe, Titan (Ti), Vanadium (V), Chrom (Cr), Mangan (Mn), Kobalt (Co), und Nickel (Ni).

Für die Entstehung von Planeten, die Leben ermöglichen sollen, ist es von entscheidender Bedeutung, was von den neuen Elementen in den Weltraum herausgelangt. Zuerst, nach Ablauf der Phase, in welcher H zu He fusioniert, wird nur H und He ausgestossen, welche im Weltraum schon im Überfluss vorhanden sind. Bei kleinen bis mittleren Sternen bleibt es dabei. Die schwereren Elemente werden nur

³⁸ Der thermale Neutronen-Querschnitt n für den Neutronen-Einfang wird in mbarn (mb) gemessen: $1 \text{ barn} = 10^{-24} \text{ cm}^2 = 10^{-8} \text{ \AA}^2$.

bei Sternen mit mindestens 25 Sonnenmassen freigesetzt, und zwar durch eine Supernova-Explosion. Das Leben auf der Erde ist also absolut von Supernova-Explosionen abhängig!

Tab. 3. Schwere Elemente für den Weltraum

| Kernreaktionen | mindestens ... Sonnenmassen | Temperatur, K | Veränderung am Schluss | ungefähre Dauer (bei 25 [1] Sonnenmassen) |
|-----------------------------------|--------------------------------|------------------|--|--|
| H ⇒ He | 0,1 | 15 Mio. | Anschwellen, Ausstoss von H und He | 10 Mio. [10 Mia.] Jahre |
| He ⇒ C, O N | | 100 Mio. | Kollaps | 3 Mio. [100 Mio.] Jahre |
| C ⇒ O, Ne, Mg Na, Al | 4 | 600 Mio. | Kollaps | 600 Jahre |
| Ne ⇒ O, Mg | 9 | 1 Mia. | | 1 Jahr |
| O ⇒ Mg, Si, S P, Cl, Ar, K, Ca | | 1,5 Mia. | | 6 Monate |
| Si ⇒ Fe Ti, V, Cr, Mn, Co, Ni | 20 | 3 Mia. | Kernkollaps | < 1 Tag |
| | 25 | | Supernova, Ausstoss aller Elemente | |

Glücklicherweise läuft die Entwicklung schwerer Sterne viel schneller ab als diejenige leichter Sterne. Die Phase der H-Fusion dauert bei einem Stern von der Masse der Sonne etwa 10 Milliarden Jahre, bei einem von 25 Sonnenmassen aber nur 10 Millionen Jahre. In der Folge wurde einerseits der Weltraum durch grosse Sterne schon relativ früh mit allen Elementen angereichert, während andererseits für Leben geeignete kleine Sterne genügend lange stabil bleiben.

Abb. 14. Supernova

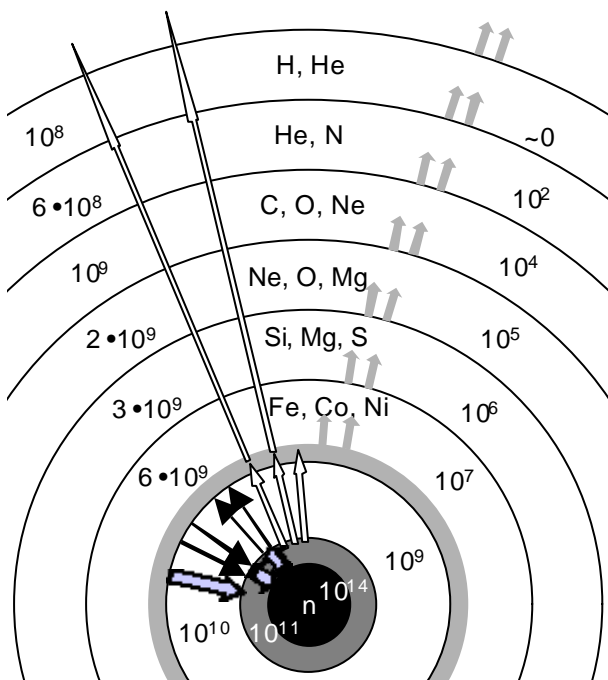


Abb. 14 zeigt, was bei der Supernova-Explosion eines Sterns mit etwa 25 Sonnenmassen geschieht. Die Zwiebelschalen der verschiedenen Kernreaktionen sind mit ihren Temperaturen (links, in K), Hauptelementen (Mitte) und Dichten (rechts, in g/cm^3) angegeben. Die Dicke der Schalen ist nicht massstabsgetreu gezeichnet. Von links nach rechts sind mit Pfeilen die Ereignisse in der Reihenfolge ihres Eintretens eingezeichnet.

Wenn im Innersten des Sterns genügend Fe entstanden ist, fällt er unter dem Druck der Gravitation plötzlich zu einem Neutronenstern zusammen (dicker grauer Pfeil). Schon vorher bestand diese innerste Sternregion aus extrem komprimiertem Gas aus Ionen und Elektronen, mit einer Dichte von 1000 t/cm^3 (Tonnen!). Nun stürzen die Ionen-Reste zusammen und alle Elektronen und Protonen vereinigen sich zu Neutronen, so dass die resultierende Dichte nochmals um den Faktor 100'000 auf 10^8 t/cm^3 steigt.

Dieser Kollaps geschieht so plötzlich, dass die darüber liegenden Schalen des Sterns zu-

nächst zurückbleiben und dann mit bis zu 15 % der Lichtgeschwindigkeit nachstürzen (dünne Pfeile gegen innen). Die Masse schlägt auf den Neutronenkern auf, dieser stösst elastisch zurück (kleine dicke Pfeile) und jagt eine Schockwelle (äusserer grauer Kreis) durch den ganzen Stern nach aussen (dünne schwarze Pfeile gegen aussen, dann graue Doppelpfeile). Die nach aussen gestossenen Massen werden aber in den riesigen Dimensionen des Gesamtsterns gebremst und bilden eine hoch verdichtete Schockfront. Dies würde aber trotzdem noch nicht genügen, den Stern zur Explosion zu bringen.

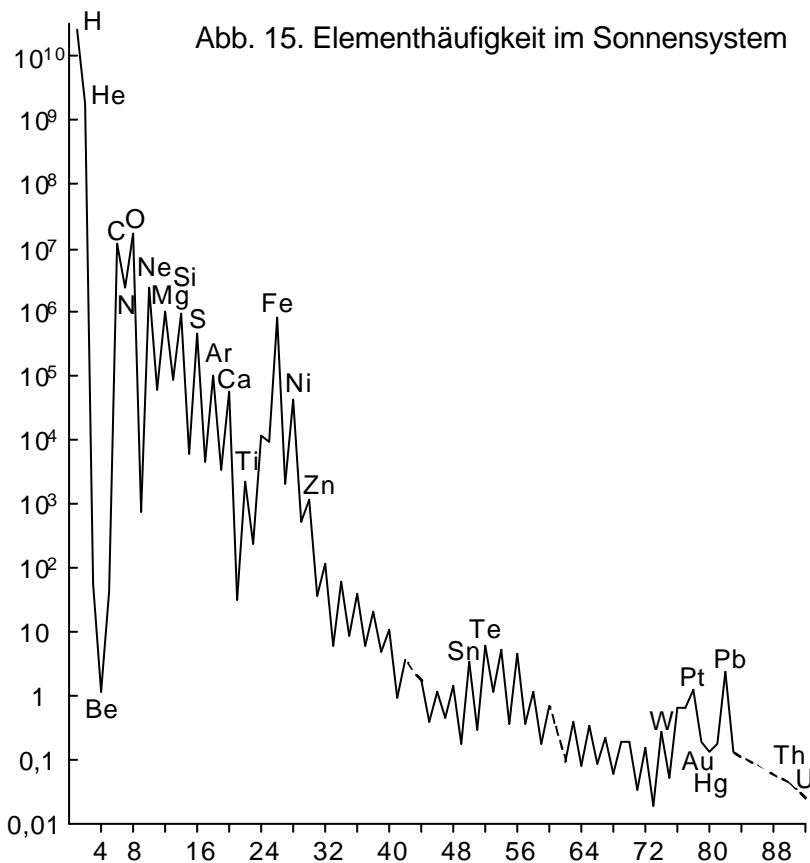
Beim Aufprall der innersten Schale auf den Neutronenkern entstehen Neutrinos, welche die Schockfront einholen (innere weisse Pfeile). Teils durchfliegen die Neutrinos den ganzen Stern ungehindert (lange weisse Pfeile), teils bleiben sie aber in der verdichteten Schockfront „stecken“. Sie starten eine Lawine von Kernreaktionen, durch welche auch alle Elemente entstehen, die noch schwerer als Fe sind. Dazu gehören unter anderem die lebenswichtigen Elemente Kupfer (Cu), Zink (Zn), Selen (Se), Molybdän (Mo), und Jod (I), ebenso die für die geologische Entwicklung der Erde wichtigen radioaktiven Elemente Uran (U) und Plutonium (Pu).

Die Neutrinos müssen gerade die richtige Energie besitzen, so dass sie aus dem Neutronenkern freikommen, aber trotzdem nicht alle einfach wirkungslos durch die komprimierte Schockfront nach aussen fliegen – wieder eine Feinabstimmung! Der zusätzliche Impuls der Neutrinos reicht nun, um den Stern zur Explosion zu bringen. So gelangen die darin gebildeten Elemente in den Weltraum, wo sie Material für neue Sterne, und vor allem Planeten, liefern können.

Supernova-Explosionen gibt es nur bei schweren Sternen, die nur einige Millionen Jahre als werden. Daher tauchen sie vor allem in Gebieten aktiver Sternbildung auf, so in den Spiralarmen von Spiralgalaxien, besonders aber auch in aktiven Galaxienkernen (z.B. in der 10 Millionen Lichtjahre entfernten Galaxie M82,³⁹ deren Kern Wolken von leuchtendem Gas ausstösst). Aktive Sternbildung ist am blauen Licht zu erkennen, denn schwere Sterne haben eine hohe Oberflächentemperatur im blauen Bereich.

Schon seit Jahrhunderten sind einzelne Supernovae aufgrund der auffälligen Erhöhung ihrer Helligkeit innerhalb von Tagen entdeckt worden. Innerhalb von Wochen geht die Strahlungsintensität dann wieder zurück. Mit modernen Instrumenten können aber auch die Überreste alter Supernovae heute noch untersucht werden, z.B. die Überreste der Supernova ε Carinae,⁴⁰ deren Explosion 1841 gesehen wurde. Der Stern, ursprünglich 150 Sonnenmassen schwer, ist ca. 10'000 Lichtjahre entfernt. Man sieht heute zwei grosse, stickstoffhaltige Wolken, die sich mit etwa 900 km/s entfernen. Sie sind in den gut 150 Jahren fast ein halbes Lichtjahr weit gekommen.

Alle stabilen Elemente sind im Sonnensystem vorhanden. Ihre relative Häufigkeit ist aus Abb. 15



³⁹ S. Veilleux, G. Cecil, J. Bland-Hawthorn, *Scientific American* (Feb. 1996), 86.

⁴⁰ R.P. Kirschner, *Scientific American* (Oct. 1994), 37. Aufnahme: Hubble Space Telescope.

ersichtlich.⁴¹ Die Häufigkeitsskala ist logarithmisch und ist auf 10^6 für Si normiert. Die horizontale Skala gibt die Anzahl Protonen im Kern an.

Die gestrichelten Teile der Häufigkeitskurve betreffen Elemente, die nur als radioaktive Isotopen existieren. Mit Ausnahme von Thorium Th und Uran U, welche Halbwertszeiten von mehreren Milliarden Jahren aufweisen, sind alle davon im Laufe der Geschichte des Sonnensystems vollständig zerfallen. Sie sind deshalb hier nicht aufgeführt, obwohl sie unter dem Einfluss der kosmischen Strahlung laufend in Spuren neu entstehen.

Der regelmässige Zickzackverlauf der Kurve von C bis Neodym (60 Protonen) zeigt, dass Kerne mit einer geraden Anzahl Protonen stabiler sind als solche mit einer ungeraden. Dies entspricht auch ihrem Aufbau aus He^4 -Kernen aufgrund des α -Prozesses. Von He bis S enthalten die stabilsten Isotopen dieser Elemente mit gerader Protonenzahl auch gleichviele Neutronen wie Protonen. Ihre Atomgewichte entsprechen daher der in Abb. 12 angetroffenen „Viererreihe“. Die relativ hohe Menge an Fe zeigt auch, dass dieser Kern eine besonders stabile Konfiguration darstellt.

Viele dieser Elemente sind für den Aufbau einer bewohnbaren Erde und für unser Leben notwendig.

2.5 Feinabstimmung des Universums

Es gibt viele physikalischen Parameter, die nicht zu gross und nicht zu klein sein dürfen, wenn es überhaupt bewohnbare Planeten geben soll. Die Tab. A1 im Anhang (Feinabstimmung des Universums für bewohnbare Planeten⁴²) zeigt eine Liste von 34 Parametern, die ungefähr den bisher besprochenen Teil der Kosmologie abdeckt. Die zulässigen Bereiche in den Parameterwerten sind z.T. sehr eng, z.B. die anfängliche Expansionsgeschwindigkeit innerhalb 1 Teil in 10^{60} . Wenn nur ein einziger dieser Parameter ausserhalb des lebensfreundlichen Bereichs fällt, ist im ganzen Universum kein Leben möglich.

Es geht dabei unter anderem darum, dass es Strahlung und Materie mit stabilen Atomkernen geben konnte; dass sich Galaxien und Sterne bilden konnten; dass Sterne mit der richtigen Masse, Temperatur, Leuchtkraft möglich waren, die genügend lange stabil brennen; dass es stabile Sternen- und Planetenbahnen in Regionen geben konnte, die zwar genügend schwere Elemente für feste Planeten, aber nicht zuviel schädliche Strahlung enthalten; dass genügend Mengen aller für die Biochemie nötigen Elemente vorhanden waren, besonders an C, O und F; dass Wasser ein stabiles Lebensmilieu abgibt, dass die chemische Bindung die lebensnotwendigen Reaktionen zulässt usw.

Dabei muss berücksichtigt werden, dass die Feinabstimmung der vielen verschiedenen physikalischen Parameter nicht unabhängig voneinander geschehen kann, sondern dass das Ganze aus einem Guss ist. Zu grosse Veränderungen eines Parameters würden die Harmonie von vielen anderen zerstören, und das Gesamtsystem würde nicht mehr funktionieren. Alle grundlegenden Eigenschaften des Universums sind aufeinander aufgebaut und voneinander abhängig, angefangen mit der Urknall-Entropie, der Anzahl der Dimensionen, der Quantenmechanik und Relativität, über die fundamentalen Kräfte, zu den Elementarteilchen und ihren Eigenschaften. Dabei bestünde für die Wertewahl vieler anderer, scheinbar zufälliger Parameter durchaus die Wahl aus grossen Wertebereichen, aber nur ein ganz bestimmter Teilbereich erlaubt Leben auf einem Planeten mehr als 10 Milliarden Jahre später.

Ist diese Feinabstimmung der Parameter Notwendigkeit oder Zufall? Oder ist intelligente Planung die einzige vernünftige Erklärung? Dabei beinhaltet „Notwendigkeit“ das Eingebundensein in ein System von vorgegebenen „Naturgesetzen“, während „Zufall“ die nicht physikalisch determinierte Wahl eines bestimmten Wertes aus einer bestimmten Werteverteilung beschreibt. Ein intelligenter Planer hat es natürlich in der Hand, sowohl den zugrundeliegenden Naturgesetzen als auch den Verteilungen die richtige Form zu geben. Er kann ebenso jede Wertewahl entsprechend seinem Plan soweit nötig eingrenzen.

3. Bildung eines Planetensystems für menschliches Leben

3.1 Ein Planetensystem

⁴¹ Nach A.G.W. Cameron, Preprint (1980), in: E. Keppler, *Sonne, Monde und Planeten* (München: Piper Verlag, 1982), 168.

⁴² H. Ross, *Big Bang Refined by Fire* (Pasadena, CA: Reasons to Believe, 1998), 13.

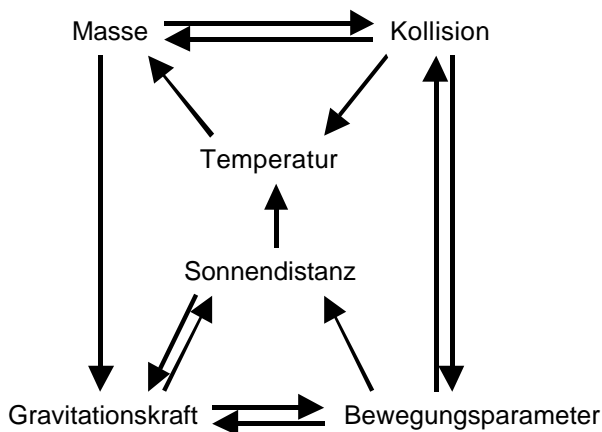
Im Universum können Bereiche erhöhter mittlerer Dichte aufgrund der Gravitation zur Bildung von Galaxienhaufen und Galaxien führen. Ebenso sind Bereiche erhöhter Dichte in einer Galaxie Ausgangspunkte für die Bildung von Sternen mit ihren Planetensystemen. Es ist nicht bekannt, ob verhältnismässig viele oder nur wenige Sterne Planetensysteme haben. Und wenn ein Planetensystem vorhanden ist, kann es sein, dass keiner der Planeten bewohnbar ist. Die paar Dutzend bisher entdeckten Planeten anderer Sterne weisen jedenfalls darauf hin, dass es sehr verschiedene Arten von Planetensystemen geben kann.

Die Vorgänge, die zur Bildung eines Planetensystems führen, kann man sich wie folgt vorstellen: in einer galaktischen Wolke aus Gas und Staub gibt es Bereiche erhöhter Dichte in den Spiralarmen. Ein Gebiet einer solchen Wolke kann auch durch die von einer Supernova ausgehende Schockwelle zusätzlich verdichtet werden. Den noch viel dichteren Kern der Galaxie brauchen wir nicht in Betracht zu ziehen, da es dort wegen der hohen Dichte an Sternen ohnehin keine genügend stabilen Planetenbahnen geben kann.

Aufgrund der Gravitation zieht sich eine verdichtete Region zunächst langsam, dann immer schneller zusammen. Beim Komprimieren erhöht sich die Temperatur des Gases. Wenn sie im Zentrum über etwa 10 Millionen K erreicht hat, beginnt die Kernfusion, und ein Stern ist geboren. Er ist aber immer noch von einer grossen Wolke von Gas und Staub umgeben, dem protoplanetaren Nebel, aus dem sich Planeten bilden können.

Wenn die ganze verdichtete Region auch nur einen minimalen Drehimpuls besass, muss dieser erhalten bleiben. Beim Zusammenziehen erhöht sich daher die Rotationsgeschwindigkeit des Ganzen. Alle Teilchen bewegen sich ungefähr auf Kreisbahnen um die gemeinsame Rotationsachse. Je schneller die Bewegung wird, desto mehr flacht sich wegen der Gravitationskraft (hier als Zentripetalkraft) das Gesamtsystem ab, bis es grob einem Diskus gleicht.

Abb. 16. Entwicklung eines Planetensystems



Da auch zwischen kleinsten Teilchen Gravitationskräfte wirken, beeinflussen sich ihre Bahnen, und es kommt gelegentlich zu Kollisionen. Weil aber anfänglich alle Teilchen noch sehr klein sind und ungefähr gleichlaufende Kreisbahnen aufweisen, sind die relativen Geschwindigkeiten bei Kollisionen zwischen ihnen zunächst meist sehr klein. In solchen Fällen besteht die Tendenz, dass die kollidierenden Körper zusammenhaften, so dass diese Planetesimale im Laufe der Zeit immer grösser werden. Bei höheren Geschwindigkeiten wird es eher elastische Stösse und damit Bahnveränderungen geben. Bei grossen relativen Geschwindigkeiten, und besonders bei grossen Massen, wird es zu sehr heftigen Zusammenstössen kommen, welche zum Schmelzen der Körper und zum Ver-

dampfen und Auswurf von Material führen können.

Grosse Massen ziehen kleinere an sich; sie „wischen“ ihr Umfeld sauber. Die gesamthafte Tendenz ist es, dass wenige grosse Massen übrigbleiben, von denen jede einen grossen freien Raum um ihre Bahn hat. So entstehen Planeten und, in etwas komplizierterem Zusammenspiel der gleichen Kräfte, Monde, Kometen und kleinere Körper.

Die Dynamik eines Planetensystems wird durch diverse Einflüsse bestimmt, die voneinander abhängig sind (Abb. 16). Das Vielkörpersystem folgt nichtlinearen Bewegungsgleichungen, die möglicherweise zu nicht voraussehbaren chaotischen Bewegungen führen.⁴³ Computersimulationen haben gezeigt, dass

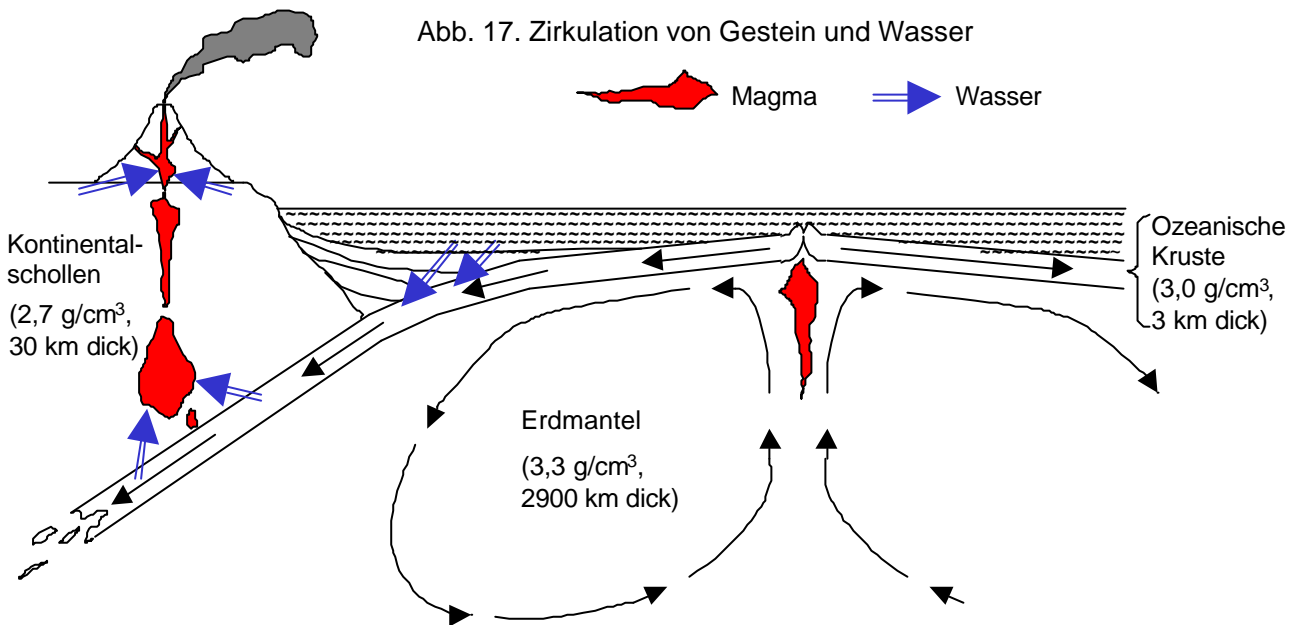
⁴³ G.P. Williams, *Chaos Theory Tamed* (Washington, DC: Joseph Henry Press, 1997), 9, 221ff. Durch nichtlineare Gleichungen beschriebene Systeme, also alle ausser den einfachsten, lassen keine zuverlässigen Voraussagen über den zukünftigen Systemzustand zu. Ein solches System kann lange in einem bestimmten Bewegungsablauf bleiben, dann plötzlich in eine Phase ständig ändernder Bewegungen kommen, um später in einen neuen ge-

eine Planetenbahn während Jahrtausenden stabil sein und dann plötzlich chaotische Phasen durchmachen kann. Solche Ereignisse könnten problemlos das Leben auf einem Planeten auslöschen. Die Erde war aber während 4 Milliarden Jahren lebensfreundlich! Weshalb? Auch dies scheint eine ganz ungewöhnliche Situation zu sein.

3.2 Die Entwicklung der Erde

Das Leben ist davon abhängig, ständig genügend Wasser und alle nötigen Mineralien (viele Elemente) zur Verfügung zu haben. Keines davon darf also im Laufe der Zeit (z.B. durch Sedimentation im Meer) verschwinden. Wir brauchen daher Kreisläufe aller Elemente. Dies geschieht durch das System der Plattentektonik,⁴⁴ die immer wieder zu Kontinentalverschiebungen geführt hat. Sie ist notwendigerweise auch mit Erdbeben und Vulkanismus verbunden.

Vor 4.56 Milliarden Jahren wurde die Erde gebildet. 50 Millionen Jahre später stiess ein etwa mars-grosser Körper tangential mit ihr zusammen. Das beim Zusammenstoss ausgeworfene Material kreiste zunächst in einem Ring um die Erde, wie beim Saturn. Daraus kondensierte der Mond,⁴⁵ der nun die Dynamik der Erdbewegung stabilisiert und gleichzeitig Meeresbewegungen antreibt. Bei der Kollision schmolz die Erde, und Eisen und Silikate trennten sich. Es bildete sich ein Eisenkern, der trotz der hohen Temperatur nur aussen flüssig, aber wegen der hohen Dichte und eines bestimmten Schwefelgehalts innen fest ist. Dies ergab einen Dynamo, der ein Magnetfeld erzeugt, welches uns vor kosmischer Strahlung schützt.



Die leichteren Silikatgesteine bildeten den Erdmantel. Der Erdmantel ist hochviskos, aber langfristig beweglich. Strömungen im Erdmantel (Abb. 17) werden durch die Rotation der Erde und wahrscheinlich Vorgänge an der Kern-Mantel-Grenzschicht angetrieben. Es ergeben sich lokal aufsteigende heisse Zonen, wo sich flüssiges Magma bildet. Dieses erstarrt an der Oberfläche zur Kruste und treibt diese Kruste beidseitig auseinander (einige cm/Jahr). Wo diese wandernden Platten zusammenstossen, bildet sich wegen des mitgerissenen Wassers und der Erdwärme wieder Magma, und was leichter ist, steigt auf. So entstehen mit der Zeit dicke Kontinental-schollen aus leichterem Gestein, während die Primärkruste in die Tiefe geschoben wird (Subduktion). Sobald die Kontinente dick genug waren, tauchten sie aus den Ozeanen über der dünneren Primärkruste oder ozeanischen Kruste auf. Nun begann die wetterbedingte Erosion der Kontinente und die Überlagerung der ozeanischen Kruste mit Sedimenten.

ordneten Bewegungsablauf überzugehen, der aber vom ersten völlig verschieden sein kann. Dies gilt sogar bei völlig deterministischer Physik, wird aber höchstens noch unvorhersehbarer, wenn Zufallsgrössen mitspielen.

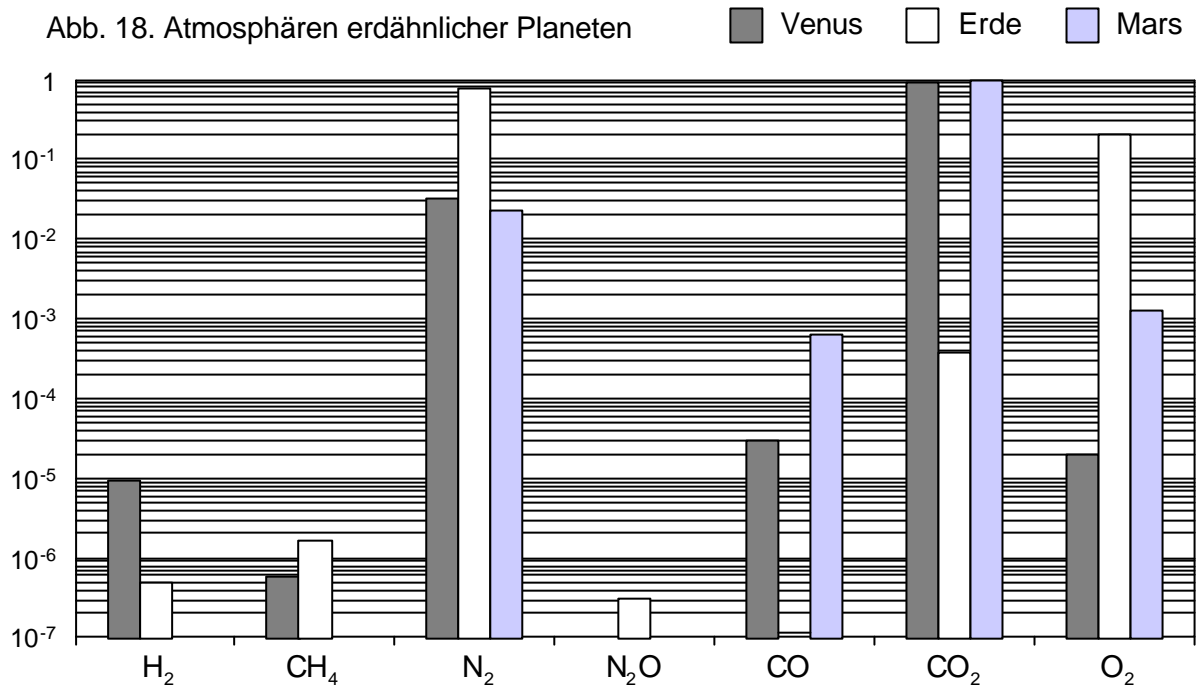
⁴⁴ F. Press, R. Siever, *Earth* (New York: W.H. Freeman, 3rd. ed. 1982), 441.

⁴⁵ S. Ida, R.M. Canup, G.R. Stewart, „Lunar accretion from an impact-generated disk“, *Nature* 389 (1997), 353.

Das Gesamtsystem ist in einem dynamischen Gleichgewicht, mit drei Gesteinsbereichen abnehmender mittlerer Dichte: Mantel, ozeanische Kruste, kontinentale Kruste. Das Fließgleichgewicht dieses Systems erzeugte den benötigten Kreislauf aller Elemente. Im Erdinnern wird das Gestein transportiert durch die Verschiebung und Subduktion der ozeanischen Platten, durch Strömungen im Erdmantel, durch aufsteigendes Magma, und Wasser wird mitgerissen. Vulkane und Erosion bringen die zirkulierten Elemente wieder mit der Biosphäre in Berührung.

3.3 Die Erdatmosphäre

Nicht jeder Planet entwickelt sich so, dass er Leben tragen kann. Mars und Venus, unsere Nachbarn, waren zunächst der Erde sehr ähnlich, aber heute ist die Venus eine Hölle heisser Schwefelsäuredämpfe



und der Mars eine eiskalte, luftlose Wüste mit tödlicher UV-Strahlung. Abb. 18 zeigt die drei radikal verschiedenen Atmosphären⁴⁶ (die Anteile sind logarithmisch gegeben).

Nur in der Erdatmosphäre sind Stickstoff (N₂) und Sauerstoff (O₂) vorherrschend, mit stark reduziertem Anteil an Kohlendioxyd (CO₂). Mars und Venus haben CO₂-Atmosphären mit relativ kleinem N₂- und noch kleinerem O₂-Anteil. Das giftige Kohlenmonoxyd (CO) kommt bei Venus und Mars in gleichen Mengen wie O₂ vor, auf der Erde nur in ungefährlichen Spuren. Das für das Leben bedeutsame Stickoxyd (N₂O) kommt nur auf der Erde vor, die ebenso wichtigen reduzierten Gase Wasserstoff (H₂) und Methan (CH₄) kommen auf der Erde und der Venus in ähnlichen Größenordnungen vor, obwohl die Erdatmosphäre 10'000 Mal höhere Konzentrationen des Oxydationsmittels O₂ enthält. Die Erdatmosphäre, die Leben ermöglichte, wurde ihrerseits durch das Leben geprägt. Sie ist vom chemischen Gleichgewicht weit entfernt, aber in einem dynamischen Fließgleichgewicht.

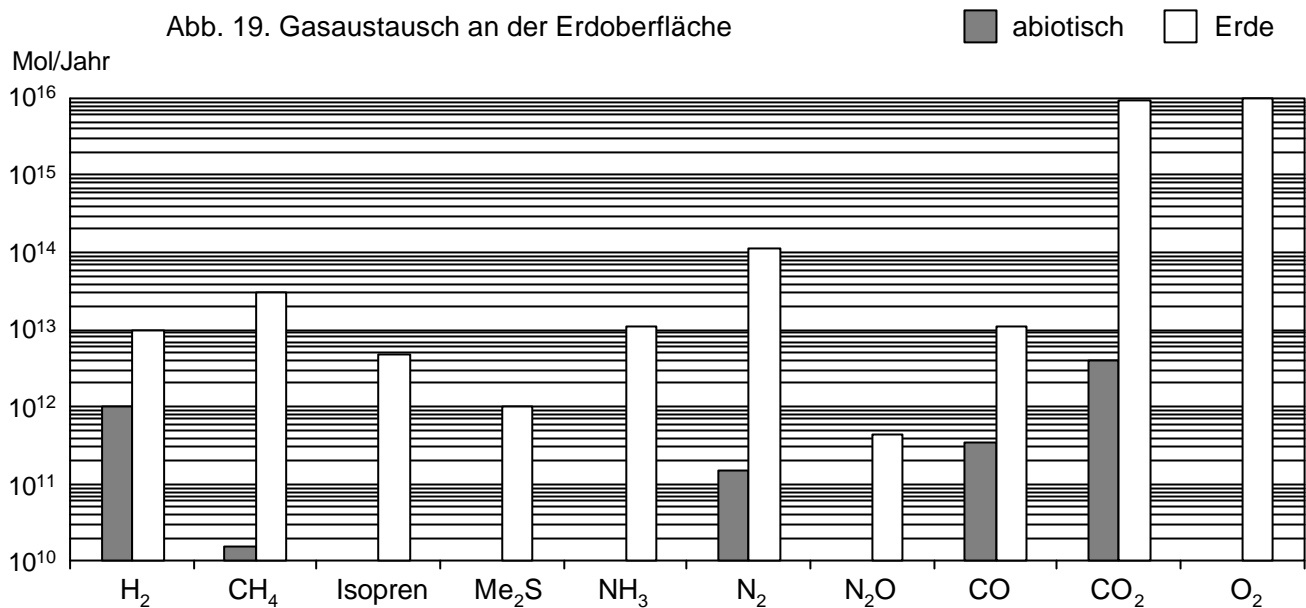
Das Fließgleichgewicht der chemischen Zusammensetzung der Erdatmosphäre wird u.a. auch durch den Gasaustausch an der Erdoberfläche sichtbar (Abb. 19).⁴⁷ Er ist massgeblich durch das Leben geprägt, und das Leben wird seinerseits durch diese Gase beeinflusst. Viele davon werden in Mengen ausgetauscht, die um eine bis über drei Zehnerpotenzen höher sind, als wenn es kein Leben gäbe. Zudem wird abiotisch überhaupt kein O₂, N₂O, Ammoniak (NH₃), Dimethylsulfid (Me₂S) und Isopren⁴⁸ ausgetauscht.

⁴⁶ T.M. Lenton, „Gaia and natural selection“, *Nature* 394 (1998), 439.

⁴⁷ T.M. Lenton (1998), loc.cit.

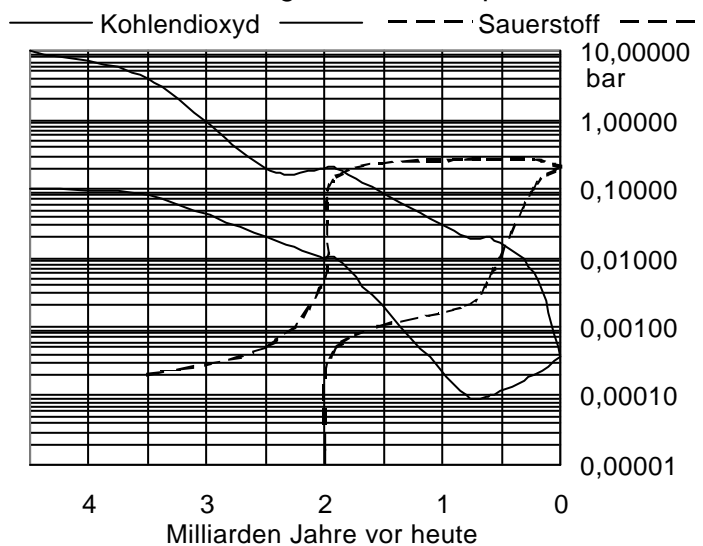
⁴⁸ 2-Methyl-1,3-Butadien, CH₂=C(CH₃)-CH=CH₂.

Abb. 19. Gasaustausch an der Erdoberfläche



Im Laufe der Erdgeschichte hat sich die Atmosphäre aber auch radikal verändert. Die früheren Konzentrationen an CO₂ und O₂ sind trotz verschiedener Anhaltspunkte noch sehr ungenau bekannt; mögliche Bereiche sind in Abb. 20 gezeigt.⁴⁹ Man weiss, dass vor 4,5 Milliarden Jahren die Sonneneinstrahlung um 30 % geringer war als heute. Mit der heutigen Atmosphäre wären dabei die Ozeane irreversibel gefroren. Um dies zu verhindern, war eine Treibhausatmosphäre nötig. Man nimmt an, dass in erster Linie CO₂ und wahrscheinlich CH₄ dazu beitrugen. Eine solche Atmosphäre hätte aber später zu einer irreversiblen Treibhauskatastrophe wie auf der Venus geführt. Die Konzentration der Treibhausgase musste daher im Gleichschritt mit der Zunahme der Sonneneinstrahlung abnehmen, um diese jederzeit exakt zu kompensieren. Aufgrund der Geschichte des Lebens weiss man, dass es mindestens seit 3,8 Milliarden Jahren weder eine Tiefgefrier- noch eine Treibhauskatastrophe gab.

Abb. 20. Entwicklung der Erdatmosphäre



Die Zunahme des O₂ erfolgte aufgrund der Entwicklung der Biosphäre, wahrscheinlich in mehreren Stufen, am markantesten vor etwa 2 Milliarden Jahren. Dafür war in erster Linie die Photosynthese durch grüne Bakterien und später Pflanzen verantwortlich. Dabei muss berücksichtigt werden, dass während 2 Milliarden Jahren das entstehende O₂ zunächst durch sehr grosse Mengen an reduzierenden Salzen und Mineralien aufgebraucht wurde. Erst später, etwa vor 600 Millionen Jahren, konnten vielzellige Organismen leben, welche eine gewisse Konzentration an verfügbarem O₂ brauchen. Grössere Organismen, besonders sich schnell bewegende Tiere, brauchen noch mehr O₂; sie tauchten erst etwa vor 400 Millionen Jahren auf. Da O₂ auch nötig ist, um einen Strahlungsschirm

aus Ozon (O₃) aufzubauen, konnte das Festland erst vor etwa 475 Millionen Jahren durch Pflanzen und vor etwa 335 Millionen Jahren durch Tiere besiedelt werden.⁵⁰

3.4 Der erstaunliche Treffer der bewohnbaren Erde

⁴⁹ J.F. Kasting, „Earth's Early Atmosphere“, *Science* 259 (1993), 920.

⁵⁰ M.J. Benton (ed.), *The Fossil Record 2* (London: Chapman & Hall, 1993).

Die Tab. A2 im Anhang zeigt nochmals eine Liste kritischer physikalischer Parameter, deren Werte in einem bestimmten Bereich sein müssen, damit es eine bewohnbare Erde geben kann. Diesmal geht es ausschliesslich um das System Galaxie – Sonne – Erde – Mond.⁵¹ Es sind 75 Parameter; bei jedem wurde die Wahrscheinlichkeit abgeschätzt, dass sein Wert in einem Bereich liegt, der das Leben, und insbesondere auch höheres Leben, ermöglicht. Diese Wahrscheinlichkeiten bewegen sich zwischen 0.0001 und 0,4.

Tab. 4. Wahrscheinlichkeit eines für Leben geeigneten Planeten ⁵²

| | | |
|---|---|---------------------|
| ⇒ | Jeder von 75 physikalischen Parametern eines Systems Galaxie – Stern – Planet – Mond muss innerhalb bestimmter Limiten sein, um die Bildung eines für Leben geeigneten Planeten zu ermöglichen. | |
| | Geschätzte Wahrscheinlichkeiten, dass diese Faktoren im richtigen Bereich sind | 0,4 bis 0,0001 |
| | Geschätzte Abhängigkeitsfaktoren | 10 ¹¹ |
| | Geschätzte Anforderungen an Dauerhaftigkeit | 0.00001 |
| | Wahrscheinlichkeit des kombinierten Eintreffens aller 75 Parameter im richtigen Bereich | ≈ 10 ⁻⁹⁹ |
| | Maximal mögliche Anzahl Planeten im Universum | ≈ 10 ²² |
| ⇒ | Wahrscheinlichkeit, im Universum auch nur einen einzigen für Leben geeigneten Planeten zu finden | ≈ 10 ⁻⁷⁷ |

Wenn man die Wahrscheinlichkeit ausrechnet, dass diese 75 Parameterwerte alle gleichzeitig in ihren richtigen Bereichen liegen (Tab. 4), und noch einige Korrekturen anbringt, ergibt sich eine geschätzte Gesamtwahrscheinlichkeit von ungefähr 10⁻⁹⁹. Da es (im grundsätzlich der Beobachtung zugänglichen Teil des Universums) etwa 10¹¹ Galaxien mit je etwa 10¹¹ Sternen gibt und jeder höchstens einen für Leben geeigneten Planeten haben kann, ist die Wahrscheinlichkeit, im ganzen Universum auch nur einen einzigen für menschliches Leben geeigneten Planeten zu finden, ungefähr 10⁻⁷⁷. Natürlich ist diese Schätzung sehr ungenau, aber bei solch geringen Wahrscheinlichkeiten fallen sogar Fehler von mehreren Zehnerpotenzen nicht mehr ins Gewicht! Es ist wohl nicht übertrieben, zu sagen, es sei ein Wunder, dass es unsere Erde überhaupt gibt.

4. Lebensentstehung

Eine spontane Lebensentstehung und spontane Evolution wesentlich neuer biologischer Strukturen und Funktionen ist extrem unwahrscheinlich. Das Hauptproblem ist der Ursprung aller dafür benötigten Information. Lebensentstehung und Evolution können höchstens mit der Aktivität eines intelligenten Schöpfers plausibel gemacht werden.⁵³ Hier kann nur kurz auf ein paar zentrale Punkte eingegangen werden.

4.1 Replikation

Wenn die Bedingungen für Leben richtig sind, muss dieses auch noch entstehen. Zuerst müssen die richtigen organischen Kleinmoleküle vorhanden sein, z.B. Biomonomere (Bausteine) wie Aminosäuren, dann die richtigen Verbindungen davon, Biopolymere (Ketten), die dann ein selbstreplizierendes System bilden müssen. Ein in diesem Bereich führender Forscher, Leslie Orgel, hat sich kürzlich folgendermassen dazu geäussert:⁵⁴

⁵¹ H. Ross (1998), loc.cit., 18.

⁵² H. Ross (1998), loc.cit., 27.

⁵³ P. Rüst, „How has life and its diversity been produced?“ *Persp.Sci.Christ.Faith* 44 (1992), 80; P. Rüst, *Die Herkunft des Lebens - Wissen und Glaube* (VBG-Dokumentation,1994); P. Rüst, „Spezielle und allgemeine Evolutionstheorie: Fakten und Spekulation“, in: E. Gutsche, P.C. Hägele, H. Hafner (eds.), *Zur Diskussion um Schöpfung und Evolution* (Marburg: SMD, 4.Aufl. 1998), 51.

⁵⁴ L.E. Orgel, *Trends Bioch.Sci.* 23 (1998), 491.

Es gibt drei hauptsächliche rivalisierende Theorien für die präbiotische Herkunft von Biomonomeren [1. stark reduzierende Uratmosphäre, 2. Meteoriten, 3. Tiefsee-Schlote]. Keine ist überzeugend, und keine kann ohne weiteres verworfen werden. ...

Bezüglich der Evolution eines selbstreplizierenden Systems ist die Situation weniger befriedigend; es gibt mindestens so viele Vermutungen, aber praktisch keinerlei experimentelle Fakten. ...

[Es existiert] eine sehr grosse Lücke zwischen der Komplexität von Molekülen, die ohne weiteres synthetisiert werden können, wenn man die [vermutete] Chemie der frühen Erde simuliert, und den Molekülen, von denen man weiss, dass sie potentiell replizierende Informationsstrukturen bilden. ...

Es gibt verschiedene alternative Thesen für eine mögliche Selbstorganisation eines selbstreplizierenden Systems aus präbiotischem Material, aber alle, die gut ausformuliert sind, basieren auf chemisch problematischen Synthesen. ...

Auf andere wichtige Aspekte der präbiotischen Chemie bin ich hier nicht eingegangen (z.B. den Ursprung der Chiralität, die organische Chemie auf anderen Planeten, die Bildung von Membranen). ...

Die bekannte Chemie ergibt keinerlei Grundlage zu der Annahme, dass lange Reaktionssequenzen sich spontan organisieren könnten – aber allen Grund zu glauben, dass sie es nicht können.

Orgel hat auch den Meisterdetektiv Sherlock Holmes bemüht, um das Rätsel der Lebensentstehung abzuklären. In einer Zeichnung⁵⁵ sieht man ihn mit einer grossen Lupe eine Doppelhelix inspizieren. Offenbar hat sie Holmes' Gehilfe Watson entdeckt. Holmes lobt ihn für diesen hervorragenden Ansatz und heisst ihn dann einen Spiegel holen, denn leider ist die Doppelhelix eine Linksschraube statt der benötigten Rechtsschraube. Die Frage der Entstehung der richtigen Händigkeit (Chiralität) der Biomoleküle ist eines der vielen noch ungelösten Probleme.

Auch Francis Crick, der mit James Watson zusammen für die Aufklärung der DNS-Struktur (die berühmte Doppelhelix) den Nobelpreis erhielt, hat Schwierigkeiten, sich eine spontane Lebensentstehung vorzustellen (dieser Watson ist aber nicht Sherlock Holmes' Gehilfe ...). Im nachfolgenden Auszug aus einem Interview mit Crick stehen seine eigenen Worte zwischen Anführungszeichen:⁵⁶

„Eine der erschreckendsten Tatsachen in der westlichen Welt, und besonders in diesem Land [USA], ist die Anzahl Leute, die an Dinge glauben, die wissenschaftlich falsch sind,“ sagt [Crick]. „Wenn mir jemand sagt, die Erde sei weniger als 10'000 Jahre alt, sollte er meiner Meinung nach einen Psychiater konsultieren.“

Einige Wissenschaftler sagten 1981 dasselbe von Crick, nachdem *Life Itself [Das Leben selbst]* erschienen war, ein Buch über den Ursprung des Lebens, das er zusammen mit Leslie E. Orgel vom Salk-Institut verfasste. Das Buch schlug vor, die Samen des Lebens seien in einem Raumschiff zur Erde gesandt worden, das von Wesen auf einem anderen Planeten gestartet worden sei. Die Theorie, genannt gezielte Panspermie, wurde von anderen Wissenschaftlern verspottet, und Orgel selbst beschrieb sie kürzlich als „eine Art Witz.“

Aber Crick besteht darauf, dass angesichts der Schwächen aller Theorien irdischer Lebensentstehung gezielte Panspermie immer noch als „eine ernsthafte Möglichkeit“ betrachtet werden sollte.

Crick hat die Wahrscheinlichkeit der spontanen Lebensentstehung auf 10^{-1000} geschätzt. Wenn er aber statt der Erde das ganze Universum zu Hilfe nimmt, was er mit der Theorie der Panspermie offenbar beabsichtigte, gewinnt er, wie gezeigt worden ist, einen Faktor von 10^{22} , einen Tropfen auf einen heissen Stein. Im Gegensatz zu Hoyle wagt es Crick nicht, das Urknall-Modell infrage zu stellen.

Was bringt führende Fachleute dazu, sich vor ihren Kollegen derart zu exponieren? Es sind etablierte Forscher, die ihren Erfolg im Leben nicht mehr verlieren können. Sie können es sich leisten, offen auf die

⁵⁵ L.E. Orgel (1998), loc.cit., 493. Zeichnung: Simon.

⁵⁶ Interview durch J. Horgan, *Scientific American* (Feb. 1992), 16.

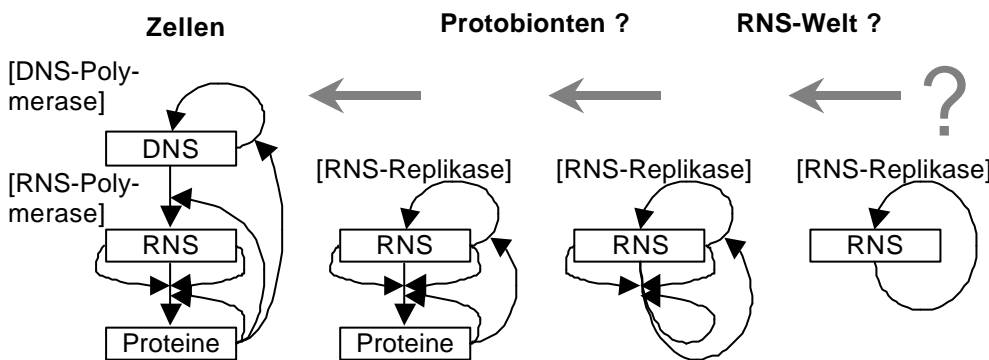
riesigen Probleme der Theorie der spontanen Lebensentstehung hinzuweisen, während andere damit ihre Karriere aufs Spiel setzen würden!

Orgel nennt zwar die Panspermie „eine Art Witz“, aber seine ernsthaften Aussagen zur Chemie der Lebensentstehung lassen keinerlei Zweifel daran aufkommen, dass vorläufig trotz intensiver Tätigkeit vieler Forschergruppen während vier Jahrzehnten noch keinerlei Aussicht auf eine Lösung des Problems besteht.

4.2 Eine RNS-Welt?

Heute enthält eine minimale lebensfähige Zelle (1) Deoxyribonukleinsäure (DNS) als Genom (Erbmaterial), das alle benötigte Information speichert, (2) diverse Arten von Ribonukleinsäuren (RNS), die nach Überschreibung der Information aus der DNS der Übersetzung derselben in Protein-Sequenzen dienen, und (3) Proteine, welche als Enzyme die DNS-Replikation, Überschreibung in RNS und Übersetzung in Proteine katalysieren (Abb. 21). Es braucht Proteine, um Nukleinsäuren zu synthetisieren, aber Nukleinsäuren, um Proteine zu codieren. Was war früher da, Proteine oder Nukleinsäuren – das Huhn oder das Ei?

Abb. 21. Ursprünglich einfachere Zellfunktionalität ?



Es gibt gewisse Viren, deren Genom aus RNS besteht (sie vermehren sich aber nur in vollständigen Zellen mit DNS-Genom). Zudem hat man RNS mit gewissen katalytischen Aktivitäten entdeckt.

So glaubt man nun, es habe einmal eine RNS-Welt gegeben, in welcher RNS allein alle Funktionen der

Replikation und Katalyse ausübte (Abb. 21). Leider ist man sich dabei zu wenig bewusst, dass dadurch die Anforderungen an diese RNS so hoch werden, dass eine spontane Entstehung dieser gesamten Funktionalität wieder höchst fragwürdig ist.

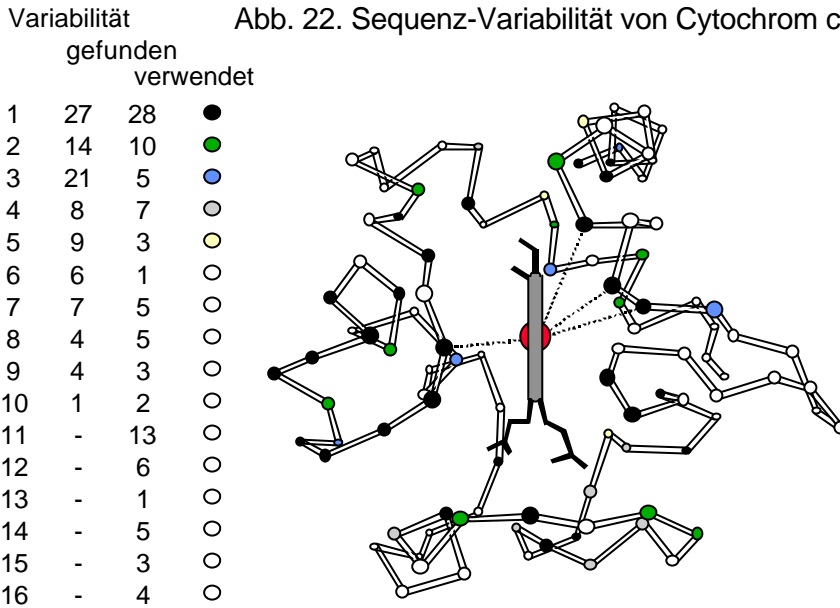
Das einfachste Urelbewesen, das am wenigsten Information benötigte, hätte nur aus einem einzigen RNS-Molekül bestanden. Mehrere Moleküle müssten ja zusammengehalten werden durch zusätzliche Organisation, z.B. eine Membran, die weitere Information voraussetzt. Die erste RNS müsste eine RNS-Replikase-Funktion ausgeübt haben, und sämtliche nötigen energiereichen Bausteine müssten zu ihrer Synthese reichlich zur Verfügung gestanden haben. Eine Ur-Replikase müsste sehr einfach gewesen sein, also auch fehlerhaft funktioniert haben. Eine solche Replikase könnte aber nur eine sehr kurze RNS replizieren, ohne dass eine Fehlerkatastrophe einträte,⁵⁷ bei welcher die RNS mit jeder Replikation mehr Fehler enthielte, bis sie (als Replikase) nicht mehr funktionieren würde. Der einzige mögliche Evolutionsdruck (natürliche Selektion) hätte aber darin bestanden, die RNS-Replikation schneller zu Ende zu bringen. Am einfachsten ist dies, wenn die zu replizierende RNS kürzer wird⁵⁸ und damit weniger Information enthält. Die Evolution käme damit zum Stillstand. Einen Ausweg aus dieser Sackgasse gäbe es erst, wenn das Genom durch eine Membran von der Umwelt abgeschirmt wäre. Dann könnte die natürliche Selektion am gesamten „Organismus“ angreifen statt direkt an einem Genom-Molekül. Das Gesamtpaket wäre damit aber sehr viel komplexer.

⁵⁷ M. Eigen, P. Schuster, „The Hypercycle, a Principle of Natural Self-Organization“, *Naturwiss.* 64 (1977), 541.

⁵⁸ S. Spiegelman, I. Haruna, „A Rationale for an Analysis of RNA Replication“, *Proc.Natl.Acad.Sci.USA* 55 (1966), 1539.

4.3 Evolution einer neuen Funktionalität

Wieviel Information braucht es für eine biologische Aktivität? Konnte sie spontan, d.h. zufällig entstehen? Am Beispiel von Cytochrom c untersuchte Hubert Yockey diese Frage.⁵⁹ Cytochrom c ist ein kleines Enzym aus der Atmungskette, mit nur gut 100 Aminosäuren. In Abb. 22 sind die Aminosäuren als kleine Kugeln dargestellt, durch Stäbe verbunden.⁶⁰ Die Aminosäurenkette gruppiert sich um das im Häminmolekül eingebettete Eisenatom, welches das katalytisch aktive Zentrum darstellt.



Die beobachtete Variabilität bekannter Cytochrome c in vielen verschiedenen biologischen Arten ist durch die Tabelle in Abb. 22 angegeben. Die Spalte „Variabilität“ gibt die Anzahl verschiedener Aminosäuren, die an einer gegebenen Position in Cytochrom c vorkommen können. Die Spalte „gefunden“ zeigt die Anzahl Positionen in Cyto-

chrom c, welche die entsprechende Variabilität aufweisen. Chemisch ähnliche Aminosäuren können sich an einer gegebenen Position in einem Protein gelegentlich ohne grossen Aktivitätsverlust ersetzen (wenigstens wenn man allfällige artspezifische Erfordernisse oder Optimierung ignoriert). Als optimistische Annahme gibt daher die Spalte „verwendet“ die in diesem Sinne erweiterte Variabilität an, welche für die Wahrscheinlichkeitsberechnung verwendet wurde. Gefunden wurden also Variabilitäten von 1 bis 10, verwendet solche bis 16. An 27 von 101 Aminosäurepositionen weisen also alle Cytochrome c jeweils dieselbe Aminosäure auf (in der Grafik schwarz gekennzeichnet), offenbar weil sie absolut erforderlich sind für die Funktionalität des Enzyms.

Daraus berechnet sich die Anzahl verschiedener Cytochrome c, die vermutlich aktiv wären: 4×10^{61} . Dabei wird angenommen, dass weder das Ersetzen einer Aminosäure an einer gegebenen Position durch eine chemisch ähnliche, noch beliebige Kombinationen zulässiger Besetzungen irgendeinen Aktivitätsverlust ergeben. Aber die Wahrscheinlichkeit, dass irgendeines dieser vielen theoretisch möglichen Cytochrome c durch reine Zufallsprozesse entsteht, ist trotzdem nur 2×10^{-65} , also viel zu klein, als dass eine spontane Entstehung vernünftigerweise erwartet werden dürfte.

Könnte es vielleicht in den frühesten Organismen viel einfachere oder variabelere Proteine gegeben haben, die eine höhere Entstehungswahrscheinlichkeit aufweisen, und dennoch eine gewisse minimale Aktivität zeigten? Eine solche Minimalaktivität müsste definitionsgemäss zunächst rein zufällig entstehen, bevor die natürliche Selektion angreifen und die darwinsche Evolution für dieses Enzym funktionieren könnte. So 20-30 spezifische Aminosäuren-Besetzungen (die richtige Aminosäure am richtigen Ort) scheint heute für eine spezifische Aktivität üblich zu sein (auch für Ribonukleasen wurde eine ähnliche Anforderung gezeigt).

Wenn man nur eine neue Teilfunktion betrachtet, z.B. in verschiedenen Umgebungen verwendete Hämoglobine oder Lysozyme, scheinen etwa 5 spezifische Aminosäuren-Ersetzungen erforderlich zu sein, um die gleiche Enzymaktivität an ein neues Umfeld anzupassen. Könnte ein neues Enzym allenfalls mit 4-5 spezifischen Besetzungen auskommen? Natürlich weiss man dies nicht, denn es gibt heute keine „primitiven“ Enzyme mehr.

⁵⁹ H.P. Yockey, „A Calculation of the Probability of Spontaneous Biogenesis by Information Theory“, *J.theoretical Biology* 67 (1977), 377.

⁶⁰ In Wirklichkeit füllen sie den ganzen Raum.

Aber man könnte die Frage umkehren. Wieviele spezifische Aminosäuren-Ersetzungen (ausgehend von einer Sequenz ohne die betrachtete Aktivität) kann man einem Zufallspfad ohne natürliche Selektion zumuten? Eine Modellrechnung zeigt, dass dies nicht mehr als zwei sein können!

Tab. 5. Modellrechnung für spontane Entstehung eines minimalen Enzyms

| Bekannte Daten: | | Modellrechnung: | |
|---|--|---|---|
| 3,05 Codons pro Aminosäure 2,16 Mutationen pro Aminosäure-Ersetzung (geometrisches Mittel) 1 Mutation pro 10^8 replizierte Nukleotide | | $r = 1 / [3,05 (3 \times 10^{-8})^{2,16}] = 5,8 \times 10^{15}$ Nukleotid-Replikationen im Mittel für 1 spezifische Aminosäure-Ersetzung | |
| 10^{16} Mol C pro Jahr umgesetzt in heutiger Biosphäre 10^{14} Bakterien pro Mol C $4,7 \times 10^6$ Nukleotidpaare pro Bakterium | | $R = 10^{16} \times 10^{14} \times 4,7 \times 10^6 = 4,7 \times 10^{36}$ Nukleotid-Replikationen pro Jahr maximal möglich auf der Erde | |
| Anzahl spezifische Aminosäure-Ersetzungen (ohne Selektion der Zwischenstufen) | benötigte Anzahl Nukleotid-Replikationen | mittlere Wartezeit für 1 Treffer | mittlere Anzahl Treffer in 300 Millionen Jahren |
| s = | $r^s =$ | $(r^s) / R =$ | $3 \times 10^8 \times R / (r^s) =$ |
| 1 | $5,8 \times 10^{15}$ | 4×10^{-14} Sekunden | 2×10^{29} |
| 2 | $3,4 \times 10^{31}$ | 4 Minuten | 4×10^{13} |
| 3 | $2,0 \times 10^{47}$ | 40 Milliarden Jahre | 0,007 |
| 4 | $1,2 \times 10^{63}$ | 2×10^{26} Jahre | 10^{-18} |
| 5 | $6,7 \times 10^{78}$ | 10^{42} Jahre | 2×10^{-34} |

Diese Modellrechnung (Tab. 5) setzt extrem optimistische Bedingungen voraus. Wenn wir die gesamte Biomasse der Erde Proteine machen und mutieren lassen, und zwar in den effizientesten Synthesemaschinen, die wir kennen, Bakterien, dürfen wir alle 4 Minuten damit rechnen, irgendwo auf der Erde eine neue, spezifische Kombination von 2 Aminosäure-Besetzungen zu finden. Wenn es aber eine Kombination von 3 spezifischen Besetzungen sein muss, brauchen wir 40 Milliarden Jahre – die wir sicher nicht zur Verfügung haben! Die ersten Organismen müssen in weniger als 300 Millionen Jahren entstanden sein, und ohne bereits vorhandene „Synthesemaschinen“!

Die Tab. 6 fasst das Argument für die Unwahrscheinlichkeit der spontanen Entstehung einer minimalen Information für eine biologische Funktion nochmals zusammen. Es basiert auf der Annahme, dass der darwinsche Evolutionsmechanismus richtig ist, d.h. dass biologische Strukturen zufälligen Mutationen unterworfen sind, und dass die natürliche Selektion zum Überleben der besser funktionierenden Organismen, Strukturen, Enzyme usw. führt. Eine Folge davon ist, dass für jede grundsätzlich neue Struktur oder Funktion die Minimalversion, welche gerade erst ein wenig aktiv ist, durch einen ausschliesslich zufälligen Mutationenweg, ohne jegliche natürliche Selektion erreicht werden muss. Jede Proteinsequenz kann grundsätzlich aus jeder anderen durch eine Reihe von Mutationen erzeugt werden, und die mittlere Wahrscheinlichkeit für das Entstehen einer bestimmten Kombination essentieller Aminosäurenbesetzungen lässt sich berechnen.

Es darf also nicht einmal für bereits funktionierende Organismen und funktionierende natürliche Selektion erwartet werden, dass die Minimalkonfiguration für eine einzige biologische Funktionalität spontan entstanden ist. Wie soll da der erste lebensfähige Organismus spontan entstanden sein, bevor die darwinschen Evolutionsmechanismen funktionieren konnten? Und wie sollen viele Tausende von grundsätzlich verschiedenen, voneinander unabhängigen biologischen Funktionen der gesamten Biosphäre nachher spontan entstanden sein?

Tab. 6. Spontane Entstehung einer Minimalkonfiguration

Anforderungen an bekannte Enzyme:

Wieviele spezifische Besetzungen (richtiger Baustein am richtigen Ort) sind nötig?

Invariante Positionen: ~ 30 Aminosäuren (Cytochrom c, Ribonuklease; 25 %)
Spezifische Teilfunktion: ~ 5 Aminosäuren (Hämoglobin, Lysozym; 3-5 %)

Minimalkonfiguration:

Natürliche Selektion kann erst angreifen, wenn minimale Aktivität vorhanden ist.
Vorher reiner Zufallspfad für „Evolution“.

Wie gross kann eine zufällig erreichbare Minimalkonfiguration höchstens sein?

ganzer Biosphären-Umsatz in Bakterien (schnellst-replizierende Organismen):
gibt 5×10^{36} Nukleotid-Replikationen pro Jahr

1 Mutation pro 10^8 replizierte Nukleotide:
braucht 6×10^{15} Nukleotidreplikationen für 1 spezifische Aminosäuren-Ersetzung

daher sind zu erwarten (1 Mal irgendwo auf der Erde):

| | | |
|---|-------------------------------------|--------------------------|
| 2 | spezifische Aminosäure-Ersetzungen: | alle 4 Minuten |
| 3 | | alle 40 Milliarden Jahre |



Minimalkonfiguration kann also nicht zufällig entstehen!

5. Schlussfolgerung – welches anthropische Prinzip?

5.1 Befund

Das Universum ist äusserst spezifisch für die Möglichkeit von intelligentem Leben auf der Erde eingerichtet. Die Wahrscheinlichkeit, dass dies durch spontane Prozesse geschah, ist verschwindend klein.

5.2 Zwei ungeeignete Erklärungsversuche

Notwendigkeit? – Das „Starke Anthropische Prinzip“:

„Das Universum musste sich zwangsweise so entwickeln, dass intelligentes Leben entstehen konnte.“

- Kaum ein Wissenschaftler wird diese Behauptung akzeptieren.

Zufall? – Das „Schwache Anthropische Prinzip“:

„Wenn das Universum sich nicht so entwickelt hätte, dass intelligentes Leben entstehen konnte, wäre niemand da, um sich darüber zu wundern.“

- Dies erklärt überhaupt nichts.
- Kaum ein Wissenschaftler wird Vorgänge mit extrem kleinen Wahrscheinlichkeiten als Erklärung akzeptieren.
- Man spekuliert deshalb mit unendlich vielen Universen. Dann dürfte man erwarten, dass eines davon die unwahrscheinliche Kombination Leben ermöglichender Parameter aufweist. Andere Universen sind aber grundsätzlich jenseits jeglicher Erkenntnis-möglichkeit.
- Ockhams Prinzip, „**Erklärungselemente nicht über das Nötige hinaus vermehren!**“ bezeichnet solche ad-hoc-Erklärungen als sinnlos.

5.3 Eine sinnvolle Erklärung

Intelligente Planung: – Das „Intelligente Anthropische Prinzip“:

- Dass ein allmächtiger, intelligenter Schöpfer das Universum, die Erde und das Leben geplant, erschaffen und entwickelt hat, bleibt die einzige Erklärung, die sowohl rational als auch einfach ist.

Im Zusammenhang mit einer solchen Erklärung besteht die Gefahr verschiedener Missverständnisse, zu denen hier kurz Stellung genommen werden soll. Aufgrund heutiger wissenschaftlicher Erkenntnisse wird hier ein „allmächtiger, intelligenter Schöpfer“ postuliert. Der in der Bibel offenbarte Gott ist dies, aber er ist noch viel mehr. Seine transzendente Realität ist aber menschlicher Erkenntnis nicht ohne die Offenbarung zugänglich. Im Folgenden ist der Einfachheit halber einfach von „Gott“ die Rede, obwohl in diesem Zusammenhang genau genommen „der allmächtige, intelligente Schöpfer“ gesagt werden müsste (ausser, wo ausdrücklich Offenbarung erwähnt wird, wobei die biblische Offenbarung gemeint ist).

- (1) Es wird *nicht* postuliert, Gott habe auf miraculöse Art alles erschaffen, und die Wissenschaft könne daher nicht ausfindig machen, wie alles entstanden sei. Natürlich wäre es Gott ein Leichtes, so zu erschaffen, aber es bestehen keinerlei Anhaltspunkte dafür, dass dies seiner Methode entspricht.
- (2) Es wird *nicht* postuliert, dass Gott ein Universum erschaffen habe und seither immer wieder in tausenderlei Bereichen „interveniere“. Diese Ansicht trennt fälschlicherweise auf in Ereignisse, die Gottes Tätigkeit zuzuschreiben seien, und andere Ereignisse, die ohne Gottes „Eingreifen“ eintreten oder ablaufen würden.
- (3) Es wäre *falsch anzunehmen*, dass es ein Geschehen gebe, das *nicht* unter Gottes Kontrolle stehe. Er ist nicht nur Schöpfer, sondern auch Erhalter, in dem Sinne, dass die fortdauernde Existenz seiner ganzen Schöpfung (d.h. von allem, was ausserhalb Gottes selbst existiert) jeden Augenblick von seinem aktiven Willen und Tun abhängig ist.
- (4) Es wird aber *nicht* postuliert, dass Gott für restlos alles verantwortlich wäre, so dass die ganze Schöpfung und alle Geschöpfe reine Automaten oder Marionetten wären. Es existieren Geschöpfe mit echt freiem Willen – dies ist, was wir Menschen über uns selbst durch unmittelbares Bewusstsein und Erfahren wissen. Gemäss der Offenbarung gehören auch Geistwesen, also Engel (und gefallene Engel), zu den Geschöpfen mit freiem Willen. Dieser freie Wille wird gemäss Gottes Schöpfungsanordnungen und allenfalls Einschränkungen ausgeübt. Er ist untrennbar verbunden mit der entsprechenden echten Verantwortung.
- (5) Es wird *nicht* postuliert, dass es keine Zufallsereignisse gebe, sofern der Zufall im wissenschaftlichen Sinne der stochastischen Theorie gemeint ist, und nicht im Sinne einer Weltanschauung. Es steht Gott frei, Elementar- oder andere Ereignisse entweder im Einzelnen auszuführen, oder eine Verteilung möglicher Ereignisse zu spezifizieren (vielleicht in der Art der Programmierung eines Zufallsgenerators). Schöpfungsspezifikationen sind auf jeder Ebene des Detaillierungsgrades möglich, auch dort, wo die Wissenschaft nicht mehr mitkommt, wie z.B. bei Elementarereignissen in der Quantenmechanik, innerhalb der Heisenbergschen Unschärferelation, des radioaktiven Zerfalls, der DNS-Mutationen usw.
- (6) Es wird *nicht* postuliert, dass es keine Entwicklung oder Evolution gebe. Entwicklungen auf den verschiedensten Ebenen sind integrierender Teil der Schöpfung und der Geschichte. Wo aber von spontaner biologischer Evolution die Rede ist, darf nicht vergessen werden, dass diese Theorie eine Folgerung aus heutigen Beobachtungen der Ergebnisse der Geschichte des Lebens ist. Die darwinsche Erklärung ist aber insofern ungenügend, als eine Erklärung der Herkunft biologischer Information bis heute völlig fehlt. Zufallsprozesse allein sind für die Herkunft komplexer Strukturen absolut ungeeignet. Doch ist dies nur in einem atheistischen System problematisch, nicht aber, wenn Gott die Information liefert.
- (7) Es wäre *falsch anzunehmen*, ein Ereignis, eine Entwicklung, ein Organismus könne nur entweder ein Produkt von Gottes Aktivität oder ein reines Zufallsprodukt sein. Es gibt wohl Wunder, die ausschliesslich Gottes Tun darstellen, aber keine „natürlichen“ Prozesse oder Produkte, die nicht ebenso aus Gottes schöpferischer Aktivität resultieren. Dabei ist es durchaus möglich, dass Gott in ein „natürlich“ entstandenes Geschöpf eine Dimension wie Seele (bei höheren Tieren, beim Menschen) und Geist (beim Menschen) hineingibt, die wissenschaftlich nicht vollständig oder

überhaupt nicht erforschbar sind. Der Ursprung der seelischen und der geistlichen Dimension sind ebenso reine göttliche Schöpfungswunder wie der „Urknall“ des physikalischen Universums.

- (8) Es wäre *falsch* anzunehmen, Geschöpfe, denen Gott zusätzliche Dimensionen wie Seele und Geist gegeben hat, seien aus trennbaren Komponenten zusammengesetzt. Sie sind eine leiblich-seelisch-geistliche Einheit. Seele und Geist manifestieren sich auch in leiblichen Bereichen. Diese Manifestationen können dann natürlich auch wissenschaftlich erforscht – aber nicht restlos „erklärt“ werden.
- (9) Es wird *nicht* postuliert, der Nachweis transastronomischer Unwahrscheinlichkeiten für sehr viele Zusammenhänge in der Geschichte des Universums, der Erde und des Lebens stelle einen wissenschaftlichen Beweis Gottes dar. Auf der wissenschaftlichen Ebene sind wir grundsätzlich auf Wahrscheinlichkeiten angewiesen, die nie eine hundertprozentige Sicherheit erreichen. Aus der Offenbarung erscheint es sogar plausibel, dass es zur göttlich gewollten Freiheit des Menschen gehört, aus freiem Willen an Gott glauben oder nicht glauben zu können. Dies würde jede Möglichkeit eines wissenschaftlichen Gottesbeweises grundsätzlich ausschliessen. Es ist anzunehmen, dass Gott bei der Erschaffung des Universums und unserer ganzen Realität diese Freiheit bereits vorgeplant hat.

Es ist also durchaus möglich, die neuesten Befunde naturwissenschaftlicher Forschungsbereiche von der Kosmologie bis zur Molekularbiologie mit der biblischen Sicht der Schöpfung zu verbinden. Dies kann zu Interpretationen führen, die nicht nur den gesicherten Befunden aus beiden „Informationsquellen“ entsprechen, sondern rationaler, widerspruchsfreier, umfassender und sinnvoller sind als die gängigen atheistischen Mythen. Es ist kürzlich auch gezeigt worden, dass eine Lesung des biblischen Schöpfungsberichts möglich ist, die mit den heutigen Erkenntnissen der Naturwissenschaft harmoniert, sofern man den hebräischen Urtext zugrundelegt, statt traditioneller Übersetzungen und Deutungen.⁶¹

Anhang

Tab. A1. Feinabstimmung des Universums für bewohnbare Planeten
(links stehen die Parameter, rechts die davon beeinflussten Systeme)

| | |
|--|--------------------------------|
| 1. Anzahl wirksamer Dimensionen im frühen Universum (11) | Quantenmechanik + Relativität |
| 2. Anzahl wirksamer Dimensionen im heutigen Universum (4) | stabile Umlaufbahnen |
| 3. anfänglicher Überschuss v.Nukleonen über Antinukleonen | Materie/Strahlung für Planeten |
| 4. Zerfallsgeschwindigkeit der Protonen | Materie/Strahlung für Leben |
| 5. Konstante der starken Kernkraft | stabile Atomkerne |
| 6. Massendichte des Universums | Deuterium- und Heliummenge |
| 7. Konstante der schwachen Kernkraft | Heliumbildung im Urknall |
| 8. Neutrinomasse | Galaxienbildung |
| 9. Expansionsgeschwindigkeit des Universums | Galaxienbildung |
| 10. Inhomogenitäten im frühen Feuerball | Galaxienbildung |
| 11. Entropie des Universums | Galaxien- und Sternbildung |
| 12. Verhältnis der Masse exotischer zu normaler Materie | Galaxien- und Sternbildung |
| 13. anfängliche Gleichmässigkeit der Strahlung | Galaxien- und Sternbildung |
| 14. Verhältnis der Anzahl Protonen zur Anzahl Elektronen | Kondensation grosser Objekte |
| 15. Gravitationskonstante | Serntemperaturen |
| 16. Verhältnis der elektromagnetischen Kraft zur Gravitation | Sternmassen |
| 17. Feinstrukturkonstante (Aufspaltung von Spektrallinien) | Sternmassen |
| 18. Lichtgeschwindigkeit | Leuchtkraft der Sterne |
| 19. Alter des Universums | stabil brennende Sterne |
| 20. kosmologische Konstante | langsam brennende Sterne |
| 21. mittlere Distanz zwischen Galaxienhaufen | Sternbahnen, Planetensysteme |
| 22. mittlere Distanz zwischen Galaxien | Sternbahnen, Planetensysteme |
| 23. mittlere Distanz zwischen Sternen | feste Planeten, stabile Bahnen |
| 24. Supernova-Distanz, -Häufigkeit, -Zeit | strahlungsarme feste Planeten |
| 25. Verhältnis von Neutronenmasse zu Protonenmasse | stabile Sterne, schwere Elem. |
| 26. Zerfallsgeschwindigkeit von Be^8 | stabile Sterne, schwere Elem. |
| 27. Grund-Energieniveau von He^4 | genügend C und O |

⁶¹ A.Held, P.Rüst, „Genesis Reconsidered“, *Persp.Sci.Christ.Faith* 51 (1999), 231.

| | |
|---|---|
| 28. Verhältnis der Kernenergie-Niveaus von C ¹² zu O ¹⁶ | genügend C und O |
| 29. Doppelsysteme aus Weissen Zwergen: Häufigkeit, Zeit | genug Fluor, stabile Planeten |
| 30. Konstante der elektromagnetischen Kraft | Stärke d.chemischen Bindung |
| 31. Verhältnis von Elektronenmasse zu Protonenmasse | Stärke d.chemischen Bindung |
| 32. Grösse des relativistischen Dehnungsfaktors | chemische Reaktionen |
| 33. Polarität des Wassermoleküls | stabiles Lebensmilieu |
| 34. Grösse der Heisenbergschen Unschärfe | O ₂ -Transport, stabile Elemente |

Tab. A2. Kritische Parameter für das System Galaxie – Sonne – bewohnbare Erde
(nach dem Parameter stehen in Klammern die beeinflussten Systeme, rechts die geschätzte Wahrscheinlichkeit, dass der kritische Bereich zufällig getroffen wurde)

| | |
|---|--------|
| 1. Ort der Galaxie (Störung durch schwere Galaxien und Galaxienhaufen) | 0,1 |
| 2. Galaxiegrösse (Einströmgeschwindigkeit von Gas) | 0,1 |
| 3. Galaxietyp (regelmässige Spiralgalaxie, Elemente, Strahlung) | 0,1 |
| 4. Mittlerer Abstand des Sterns vom Galaxiezentrum (Sterndichte, Elemente) | 0,2 |
| 5. Exzentrizität der Sternbahn um das Galaxiezentrum | 0,1 |
| 6. Mittlerer Abstand des Sterns von der Galaxieebene (Strahlung vom Galaxiekern) | 0,1 |
| 7. Extremabstände des Sterns von der Galaxieebene | 0,1 |
| 8. Abstand des Sterns vom nächsten Spiralarm (Sterndichte, Stabilität, Elemente) | 0,1 |
| 9. Abstand des Sterns von der letzten Supernova-Explosion (Elemente, Stabilität) | 0,01 |
| 10. Zeit der Sternbildung seit der letzten Supernova-Explosion (Elemente, Stabilität) | 0,01 |
| 11. Zeit der Sternbildung seit dem Urknall (Elemente, stabiles Brennen) | 0,2 |
| 12. Gehalt des Sterns an schwereren Elementen | 0,05 |
| 13. Weisse Zwerg-Doppelsterne, Art, Häufigkeit, Abstände (Fluorbildung) | 0,01 |
| 14. Einzelstern statt Stern in gekoppeltem Mehrsterne-System (stabile Planetenbahn) | 0,2 |
| 15. Masse des Sterns (Leuchtkraft, Dauer, Stabilität, Jahreslänge, Photosynthese) | 0,001 |
| 16. Sternfarbe (Photosynthese) | 0,4 |
| 17. Alter des Sterns (stabiles Brennen) | 0,4 |
| 18. Leuchtkraft des Sterns im Verhältnis zur Entwicklung des Lebens (Temp.konst.) | 0,0001 |
| 19. Wasserstoffionen-Produktion (Bildung von Planeten mit Lebens-Chemie) | 0,1 |
| 20. Häufigkeit und Abstände von Supernova-Explosionen (Elemente, Strahlung) | 0,01 |
| 21. Abstand des Planeten vom Stern (stabiler Wasserkreislauf) | 0,001 |
| 22. Neigung der Planetenbahn (Temperaturspannweite) | 0,5 |
| 23. Exzentrizität der Planetenbahn (jahreszeitliche Temperaturspannweite) | 0,3 |
| 24. Nähe und Masse Jupiters (Schutz vor Kollisionen ohne Bahnstörungen) | 0,01 |
| 25. Exzentrizitäten der grossen Planeten (Störung der Erdbahn) | 0,1 |
| 26. Bahn-Instabilitäten der grossen Planeten (Störung der Erdbahn) | 0,1 |
| 27. Änderung der Bahnen der grossen Planeten (Kollisionsschutz, stabile Erdbahn) | 0,1 |
| 28. Masse des Körpers, der mit der Uerde zusammenstiess (Erdbahn, Atmosphäre) | 0,002 |
| 29. Zeitpunkt des Zusammenstosses mit der Uerde (Atmosphäre, Strahlung) | 0,05 |
| 30. Rotationsperiode des Planeten (Tagestemperaturspanne, Windstärken) | 0,1 |
| 31. Änderungsgeschwindigkeit der Rotationsperiode des Planeten (höheres Leben) | 0,05 |
| 32. Schwerkraft an der Planetenoberfläche (Verlust wichtiger Kleinmoleküle) | 0,001 |
| 33. Gezeitenkraft (stabiles Klima, Nährstoffzirkulation, Strahlenschutz) | 0,1 |
| 34. Mittlere Dichte des Planeten (Krustenbildung, Magnetfeld) | 0,1 |
| 35. Neigung der Planetenachse (Temperaturunterschiede, diverse Lebensformen) | 0,3 |
| 36. Änderungsgeschwindigkeit der Neigung der Planetenachse (Klimawechsel) | 0,01 |
| 37. Magnetfeld (Strahlenschutz ohne Magnetstürme) | 0,01 |
| 38. Viskosität des Erdkerns an der Kerngrenze (tektonische Zirkulation) | 0,01 |
| 39. Menge an Schwefel im Planetenkern (Bildung des soliden Erdkerns, Magnetfeld) | 0,1 |
| 40. Kollisionshäufigkeit mit Asteroiden und Kometen (Elemente, ökolog.Gleichgew.) | 0,1 |
| 41. Änderung der Kollisionshäufigkeit mit Asteroiden und Kometen | 0,1 |
| 42. Änderungsgeschwindigkeit der Kollisionshäufigkeit mit Asteroiden und Kometen | 0,1 |
| 43. Regelmässigkeit des Kometen-Einfalls (Stabilität ökolog.Gleichgewicht) | 0,1 |
| 44. Verhältnis zwischen Biomasse und Einfallhäufigkeit von Kometen (Treibhaus) | 0,01 |
| 45. Tektonische Aktivität (Nährstoffzirkulation, Erdbebenkatastrophen) | 0,1 |
| 46. Vulkanische Aktivität (Nährstoff-, Wasserzirkulation, vulkanische Katastrophen) | 0,1 |
| 47. Abnahmegeschwindigkeit der tektonischen Aktivität (Nährstoffe, Landstabilität) | 0,1 |
| 48. Abnahmegeschwindigkeit der vulkanischen Aktivität (Nährstoffe, Landstabilität) | 0,1 |
| 49. Krustendicke (freier Sauerstoff bei stabilen Landmassen) | 0,01 |
| 50. Anteil der Ozeane an der Gesamtoberfläche (Vielfalt der Lebensformen) | 0,2 |

| | | |
|-----|---|------|
| 51. | Änderungsgeschwindigkeit des Ozeananteils an Gesamtoberfläche (höh.Leben) | 0,1 |
| 52. | Globale Verteilung der Kontinente (Klimastabilität) | 0,3 |
| 53. | Albedo (Anteil reflektierter Strahlung für Temperaturstabilität) | 0,1 |
| 54. | Häufigkeit und Umfang der Eiszeiten (fruchtbare Täler, keine Globalvereisung) | 0,1 |
| 55. | Druck der Atmosphäre (Wasserkreislauf, Sonneneinstrahlung) | 0,1 |
| 56. | Transparenz der Atmosphäre (richtiges Spektrum der Sonneneinstrahlung) | 0,01 |
| 57. | Häufigkeit elektrischer Entladungen in der Atmosphäre (N ₂ -Fixierung, Brände) | 0,1 |
| 58. | Häufigkeit und Umfang der Wald- und Präriebrände (N ₂ -Fixierung, pflanzl.Prod.) | 0,01 |
| 59. | Temperaturgradient in der Atmosphäre (Klima) | 0,01 |
| 60. | Kohlendioxidgehalt der Atmosphäre (Photosynthese ohne Treibhausatmosph.) | 0,01 |
| 61. | Sauerstoffgehalt der Atmosphäre (Atmung ohne Brandkatastrophen) | 0,01 |
| 62. | Eisenmenge in den Ozeanen (Nährstoffregulation ohne Vergiftung) | 0,1 |
| 63. | Chlorgehalt der Atmosphäre (Erosion, Umwelt-Säuregrad, Stoffwechselrate) | 0,1 |
| 64. | Troposphärische Ozonmenge (Atmung, pflanzliche Produktivität, Luftreinheit) | 0,01 |
| 65. | Stratosphärische Ozonmenge (Strahlungsschutz, Vitamine, Pflanzenproduktion) | 0,01 |
| 66. | Mesosphärische Ozonmenge (Zirkulation und Chemie atmosphärischer Gase) | 0,01 |
| 67. | Wasserdampfgehalt der Atmosphäre (Regenmenge ohne Treibhausatmosph.) | 0,01 |
| 68. | Sauerstoff-Stickstoff-Verhältnis in der Atmosphäre (höhere Lebensfunktionen) | 0,1 |
| 69. | Menge an Treibhausgasen in der Atmosphäre | 0,01 |
| 70. | Bodenmineralisierung (Vielfalt und Komplexität der Lebensformen) | 0,1 |
| 71. | Menge an Meersalz-Ärosolen (Wolkenbildung, Wasserkreislauf, Temperatur) | 0,1 |
| 72. | Menge an zersetzenden Bakterien im Boden (Nährstoffkreislauf) | 0,01 |
| 73. | Menge an Wurzelgeflecht-Pilzen im Boden | 0,01 |
| 74. | Menge an nitrifizierenden Mikroben im Boden (N ₂ -Fixierung, pflanzl.Produktion) | 0,01 |
| 75. | Menge an Schwefel im Boden (Proteine, Stickstoffzyklus ohne Vergiftung) | 0,1 |