



Peter Ulmschneider

Vom Urknall zum modernen Menschen

Die Entwicklung der Welt in Zehn Schritten

SACHBUCH



Springer Spektrum

Peter Ulmschneider

Zentrum für Astronomie Heidelberg,
Institut für Theoretische Astrophysik
Universität Heidelberg
Heidelberg, Deutschland
ulmschneider@uni-heidelberg.de
<http://www.ita.uni-heidelberg.de/~ulm/index.html>

ISBN 978-3-642-29925-4 ISBN 978-3-642-29926-1 (eBook)
DOI 10.1007/978-3-642-29926-1

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Springer Spektrum

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2014

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier.

Springer Spektrum ist eine Marke von Springer DE. Springer DE ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media
www.springer-spektrum.de

Einleitung

„Dass ich sterblich bin weiß ich, und dass meine Tage gezählt sind; aber wenn ich im Geiste den vielfach verschlungenen Kreisbahnen der Gestirne nachspüre, dann berühre ich mit den Füßen nicht mehr die Erde: am Tische des Zeus selbst labt mich Ambrosia, die Götterspeise“. So schrieb *Claudius Ptolemäus* (um 125 n. Chr.), Lehrer an der antiken Bibliothek von Alexandria und Autor des *Almagest*, eines Lehrbuchs der Astronomie, das für 1500 Jahre die Bibel dieser Wissenschaft sein sollte.¹

Ptolemäus' Worte drücken die Faszination über die Phänomene und Gesetzmäßigkeiten der physischen Welt aus, die Menschen schon damals bei der Betrachtung ihrer Umwelt und der eigenen Existenz empfunden haben. Knapp 2000 Jahre später soll das vorliegende Buch den Fortschritt in unserem heutigen Verständnis der Natur, von der Entstehung des Universums bis zum modernen Menschen beschreiben. Jedes der zehn Kapitel dokumentiert einen fundamentalen Schritt dieser Entwicklung.

Kapitel 1 beschreibt wie das Universum im Urknall entstand und wie es wieder enden wird. Dokumentiert werden die Frühgeschichte des Universums, die Ausbildung galaktischer Strukturen und die zukünftige Entwicklung des Weltalls bis zum Kältetod.

Kapitel 2 befasst sich mit dem Kollaps riesiger galaktischer Molekül- und Staubwolken, bei dem Sterne und Planeten entstehen. Diese erleiden dabei in ihrer nachfolgenden Entwicklung sehr unterschiedliche Schicksale.

Nur sehr wenige Planeten ermöglichen günstige Voraussetzungen zur Entstehung von Leben. Welche Eigenschaften solche erdähnliche Planeten besitzen müssen, wird in Kap. 3 anhand der Erde diskutiert.

Entscheidend für das Auftreten von Leben ist die Einzigartigkeit des Elements Kohlenstoff, Grundlage der Organischen Chemie, sowie das Vorhandensein von flüssigem Wasser. Diese und andere für das Leben wichtige Substanzen werden in Kap. 4 behandelt.

In Kap. 5 werden das Phänomen Leben, seine biochemischen Grundlagen, die Sequenzierung und Klassifikation der Organismen sowie die geologischen Lebensspuren und Theorien zur Bildung des Lebens aus einer abiotischen Welt erläutert.

Kapitel 6 widmet sich der anschließenden Entwicklung: dem Darwin-Prozess von Mutation und natürlicher Selektion, der zur Entwicklung der eukaryotischen Zellen führte, ohne die höhere Lebensformen nicht hätten entstehen können.

Ein weiterer fundamentaler Schritt, das Auftreten der Mehrzelligkeit, die vor etwa 1 Mrd. Jahren die Spezialisierung der Zellen und die Bildung von Organen und Körperteilen erlaubte, ist in Kap. 7 erläutert. Die Mehrzelligkeit stellt die Voraussetzung für die Eroberung des Landes durch Pflanzen und Tiere dar.

In Kap. 8 werden die Entwicklung der Säugetiere, das Massensterben am Ende der Kreidezeit, die Evolution der Primaten und die Entwicklung der Intelligenz besprochen. Zum Verständnis der höheren Gehirnfunktionen bei Tieren haben hier auch große Fortschritte auf dem Gebiet der Künstlichen Intelligenz und Robotik beigetragen.

Kapitel 9 beschäftigt sich mit der Entstehung des modernen Menschen. Der aufrechte Gang, die Befreiung der Hände von der Fortbewegung sowie die Entwicklung des Gehirns erlaubten die mentale Evolution, die sich sowohl in einer technologischen (Werkzeuggebrauch, Feuer-nutzung) als auch kulturellen Evolution (Sprache, Recht) äußert.

¹ Manilius K (1963) Ptolemäus, Handbuch der Astronomie Band I. Teubner, Leipzig, S XXXII.

Die zukünftige Entwicklung der Menschheit und die wahrscheinliche Existenz extraterrestrischer intelligenter Zivilisationen werden in Kap. 10 diskutiert. Eine Hypothese stellt das Streben der mentalen Evolution des Lebens im Universum auf einen evolutionären Konvergenzpunkt hin dar.

Tabelle A1 mit astronomischen und physikalischen Einheiten sowie Tab. A2 mit geologischen Zeitepochen finden sich zur besseren Übersicht im Anhang.

Für großzügige Unterstützung bei der Korrekturlesung von Teilen oder dem ganzen Manuskript sowie für zahlreiche Hinweise und Verbesserungsvorschläge habe ich vielen zu danken. Zunächst meinen Astrophysikkollegen Immo Appenzeller, Matthias Bartelmann, Hans-Peter Gail und Joachim Krautter von der Universität Heidelberg sowie Dietrich Lemke (Max-Planck-Institut für Astronomie, Heidelberg) und Volker Bromm (University of Texas, Austin, USA). Aus anderen Fächern kommen hinzu: die Kollegen Karl Doehring (öffentl. Recht), Andreas Draguhn (Neurophysiologie), Claudia Erbar (Botanik), Thomas Fuchs (Psychopathologie), Joachim Funke (Psychologie), Joachim Kirsch (Zellbiologie), Peter Leins (Botanik) und Volker Storch (Zoologie) der Universität Heidelberg sowie Hermann Dertinger (Strahlenbiologie, Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe), Dieter Godel (Physik, Jade Hochschule, Wilhelmshaven), Armin Kreiner (Theologie, Universität München), Martin Ulmschneider (Molekulare Biophysik, Johns Hopkins University, Baltimore, USA), János Vic (Theologie, Universität Cluj, Rumänien) und Uwe Walzer (Geowissenschaften, Universität Jena). Besonderer Dank gebührt auch Reinhard Breuer (Spektrum der Wissenschaft, Heidelberg), Katharina Ulmschneider (Universität Oxford) und Helgard Ulmschneider.

Heidelberg, März 2013

Peter Ulmschneider

Inhaltsverzeichnis

1	Das Universum	1
1.1	Die Milchstraße und Galaxien	1
1.2	Teleskope	3
1.3	Entfernungen	5
1.3.1	Sonnenentfernung des Aristarch von Samos	5
1.3.2	Die kosmische Entfernungsleiter	6
1.3.3	Cepheiden	6
1.3.4	Typ-Ia-Supernovae	7
1.4	Rotverschiebung, Fluchtgeschwindigkeit	8
1.5	Das Hubble-Gesetz, der Urknall (Big Bang)	9
1.6	Die kosmische Mikrowellenhintergrundstrahlung	9
1.6.1	COBE-Ergebnisse	10
1.6.2	WMAP und Planck-Ergebnisse	10
1.7	Weltmodelle	12
1.8	Planck-Epoche, der Beginn der Welt?	13
1.8.1	Die Planck-Zeit	14
1.8.2	Theorien der Quantengravitation	15
1.9	Der Zoo der Elementarteilchen	16
1.10	Die Frühgeschichte des Universums bis zur Rekombination	17
1.10.1	GUT-Epoche (10^{-43} – 10^{-36} s)	20
1.10.2	Elektroschwache Epoche (10^{-36} – 10^{-12} s)	20
1.10.3	Quark-, Hadronen- und Leptonen-Epoche (10^{-12} s bis 3 min)	21
1.10.4	Photonen-Epoche (3 min bis 380.000 Jahre)	22
1.11	Die Rekombinationszeit, Analyse der kosmischen Hintergrundstrahlung	23
1.12	Galaxien, Sternhaufen und ihre Verteilung	25
1.12.1	Morphologie der Objekte	25
1.12.2	Verteilung der Galaxien im Weltall	27
1.13	Dunkle Materie	28
1.13.1	Hinweise auf Dunkle Materie	28
1.13.2	Kandidaten für Dunkle Materie	30
1.14	Die Strukturentwicklung nach der Rekombinationsepoche	31
1.15	Die frühen massereichen Objekte des Weltalls	32
1.15.1	Beobachtung von frühen Galaxien und Quasaren	33
1.15.2	Die ersten Population-III-Sterne	33
1.15.3	Die Entstehung von Galaxien	35

1.15.4	Bildung von supermassereichen Schwarzen Löchern und Quasaren	37
1.15.5	Kugelhaufen und Offene Sternhaufen	37
1.15.6	Galaxienentwicklung bis zur Gegenwart	37
1.16	Die zukünftige Entwicklung des Universums, das Ende der Welt	38
1.16.1	Big Rip	39
1.16.2	Der Kältetod (Big Freeze)	40
1.17	Multiversen, Weltgeschichte und das kosmische Archiv	41
1.17.1	Beobachtungen und Theorie	41
1.17.2	Weltgeschichte, das kosmische Archiv	41
1.17.3	Andere Welten, Multiversen	43
	Literatur	44
2	Sterne und Planeten	47
2.1	Sternentstehung	47
2.1.1	Molekülwolken und Staub	47
2.1.2	Kollapssimulationen	48
2.2	Vor-Hauptreihenentwicklung der Sterne	49
2.2.1	Innere Entwicklung	49
2.2.2	T-Tauri-Stadium	51
2.3	Nach-Hauptreihenentwicklung der Sterne	53
2.4	Die Mitglieder des Sonnensystems	55
2.4.1	Planeten	55
2.4.2	Monde	58
2.4.3	Meteorite	60
2.4.4	Asteroiden	61
2.4.5	Kometen	64
2.5	Planeten außerhalb des Sonnensystems	66
2.5.1	Anzahl der extrasolaren Planeten	66
2.5.2	Radialgeschwindigkeitsmethode	67
2.5.3	Transit-Methode	68
2.5.4	Microlensing-Methode	69
2.5.5	Direkte Methoden	69
2.6	Protoplanetare Scheiben	70
2.7	Planetesimale	72
2.7.1	Bildung der Planetesimale	72
2.7.2	Altersbestimmung der Planetesimale und ihrer Bestandteile	73
2.7.3	Die ältesten Objekte des Sonnensystems	73
2.7.4	Schmelzvorgänge in Planetesimalen	74

2.7.5	Zusammensetzung der Planetesimale und der Erde	75
2.8	Planetenentstehung	75
2.9	Migrationen, Instabilitäten	77
	Literatur	79
3	Die Erde und Erd-ähnliche Planeten	81
3.1	Die frühe Erde	81
3.1.1	Die Entstehung des Mondes	81
3.1.2	Das späte schwere Bombardement (LHB)	82
3.1.3	Die Umwelt auf der frühen Erde	83
3.2	Seismologie und der Aufbau der Erde	85
3.3	Vulkanismus und die Zusammensetzung der Gesteine	87
3.4	Zusammensetzung von Erdkern und Erdmantel	91
3.5	Das Erdmagnetfeld und die Spreizung des Ozeanbodens	91
3.6	Konvektion, Hotspots und Plattentektonik	93
3.6.1	Mantelkonvektion	94
3.6.2	Plume-Konvektion	95
3.6.3	Plattengrenzen	95
3.7	Gebirgsbildung und die Entwicklung der Kontinente	97
3.8	Die Atmosphäre	100
3.8.1	Habitable Zone	100
3.8.2	Planetenmasse und das Festhalten der Atmosphäre	101
3.9	Lebensdauer der Sterne	103
3.10	Gezeitenwirkungen auf die Planeten	103
3.11	Sonnenleuchtkraft und die kontinuierlich habitable Zone	104
3.12	Instabilitäten der Planetenatmosphären	105
3.12.1	Der Carbonat-Silicat-Zyklus	106
3.12.2	Irreversibler und feuchter Treibhauseffekt	106
3.12.3	Irreversible Vereisung	107
3.13	Achsenvariationen der Planeten	108
3.14	Biogene Auswirkungen auf die Atmosphären	110
3.15	Vereisungen des Proterozoikums, die Schneeball-Erde	111
3.16	Grenzen der kontinuierlich habitablen Zone	112
3.17	Anzahl der habitablen Planeten in der Galaxis	113
	Literatur	114
4	Die einzigartigen Substanzen Kohlenstoff und Wasser	117
4.1	Die chemischen Elemente	117

4.2	Für das Leben wichtige Elemente	117
4.3	Die Einzigartigkeit des Elements Kohlenstoff, organische Verbindungen	118
4.4	Leben auf der Basis von anderen Elementen?	120
4.5	Die Einzigartigkeit von Wasser	121
	Literatur	122
5	Das Leben und seine Entstehung	123
5.1	Das Phänomen Leben	123
5.2	Elemente der Biochemie	123
5.2.1	Proteine, Kohlenhydrate, Lipide und Nukleinsäuren	123
5.2.2	Der genetische Code	127
5.2.3	ATP, der Energielieferant der biochemischen Welt	127
5.2.4	Die Synthese von RNA, DNA und Proteinen	128
5.3	Zellen und Organellen	130
5.4	Sequenzierung und Klassifikation der Organismen	131
5.4.1	Methode der Sequenzierung	131
5.4.2	Molekulare Uhren	132
5.4.3	Der evolutionäre Baum der Bakterien	132
5.4.4	Zeitskala der Evolution des Lebens	133
5.4.5	Sequenzierung und das komplette Genom	134
5.5	Geologische Spuren des Lebens	134
5.6	Die Umwelt zu Beginn des Lebens	136
5.6.1	Die Urey-Miller Experimente	137
5.6.2	Synthetische Biologie und die Schaffung von Leben	138
5.6.3	Die Suche nach LUCA	139
5.6.4	Randbedingungen	139
5.7	Abiotische chemische Evolution und Lebensbildungstheorien	140
	Literatur	143
6	Die Darwinsche Theorie und die Eukaryoten	145
6.1	Die Darwin-Theorie der Evolution	145
6.2	Gerichtete Evolution und Konvergenz	146
6.3	Entwicklung der Eukaryoten und die Endosymbiose	147
6.4	Sauerstoff als Umweltkatastrophe	148
6.5	Zellkern und Mitose	150
6.6	Sexualität und Meiose	151
6.7	Genetische Evolution	152
	Literatur	153

7	Mehrzelligkeit	155
7.1	Mehrzelligkeit, Organe und der programmierte Zelltod	155
7.2	Leben auf dem Land	158
7.3	Eroberung des Landes durch die Pflanzen	159
7.3.1	Die Devonische Revolution	161
7.3.2	Wurzeln und Nahrungsbedarf	161
7.3.3	Leitungssysteme	161
7.3.4	Stämme	162
7.4	Die Radiation der Landpflanzen	162
7.4.1	Moose und Gefäßsporenpflanzen	162
7.4.2	Nacktsamige Pflanzen (Gymnospermen)	162
7.4.3	Blütenpflanzen (Angiospermen)	164
7.5	Die Eroberung des Landes durch Tiere	164
	Literatur	167
8	Säugetiere und Intelligenz	169
8.1	Geschichte der Säugetiere	169
8.2	Das große Massensterben an der K/T-Grenze	171
8.3	Das Tertiär und die Evolution der Säugetiere	174
8.4	Evolution der Primaten	174
8.5	Gehirngrößen	178
8.6	Entwicklung der Intelligenz	179
8.7	Die Spiegelselbsterkenntnis	181
8.8	Künstliche Intelligenz und Robotik	183
8.8.1	Zentraleinheiten (CPUs), Mikro-Maus-Roboter	183
8.8.2	Reaktive Gehirnarchitektur	184
8.8.3	Imaginative Gehirnarchitektur	185
8.9	Das Phänomen Bewusstsein	186
8.9.1	Was ist Bewusstsein?	186
8.9.2	Das „leichte“ und „harte“ Problem des Bewusstseins	187
8.10	Höhere Gehirnfunktionen bei Tieren	187
8.10.1	Gedächtnisse	187
8.10.2	Analyse von Sinneswahrnehmungen	188
8.10.3	Imagination, mentale Bilder, Vorwärtsmodelle	188
8.10.4	Aufmerksamkeit	188
8.10.5	Selbstbewusstsein, das „Ich“	188
8.10.6	Zweckbestimmtes Handeln	189
8.10.7	Emotionalität	190

8.10.8	Freier Wille	190
8.11	Materie, Geist und Information	190
8.12	Simulation der Evolution?	192
	Literatur	193
9	Der Moderne Mensch	197
9.1	Geschichte des modernen Menschen	197
9.1.1	Entwicklung der Hominiden	197
9.1.2	Aufrechter Gang, Freilegung der Hände	200
9.1.3	Gehirnentwicklung	200
9.2	Technologische Evolution	201
9.2.1	Werkzeuggebrauch bei den Menschenaffen	201
9.2.2	Werkzeuggebrauch der Hominini	202
9.2.3	Steinwerkzeuge	203
9.2.4	Speere	204
9.2.5	Feuer, Kochen	205
9.2.6	Arbeitsteilung, Unterricht, Monogamie	206
9.2.7	Bauten, Siedlungen	206
9.2.8	Kommunikation, Sprache	208
9.2.9	Ötzi	208
9.2.10	Hochtechnologie, Schrift	210
9.3	Kulturelle Evolution	210
9.3.1	Recht	211
9.3.2	Religion	212
9.4	Die Biologie des Gehirns	214
9.5	Neurophysiologische Untersuchungsmethoden	215
9.5.1	Magnetresonanztomographie (MRT)	216
9.5.2	Funktionelle Magnetresonanztomographie (fMRI)	217
9.5.3	Positronen-Emissions-Tomographie (PET) und andere Verfahren	217
9.6	Zentren des Gehirns	218
9.6.1	Die verschiedenen Gehirnareale	218
9.6.2	Somatosensorischer und motorischer Cortex	219
9.6.3	Visueller und auditorischer Cortex	220
9.6.4	Hypothalamus, Hippocampus, Thalamus und Kleinhirn	221
9.7	Die höchsten Gehirnfunktionen beim Menschen	221
9.7.1	Bewusstsein	222
9.7.2	Selbstbewusstsein, das Ich, die Erste-Person-Perspektive	223
9.7.3	Emotionalität	224

9.7.4	Freier Wille	224
9.7.5	Zielorientiertes Handeln	228
9.7.6	Logisches verbales Denken	228
9.8	Der Unterschied zwischen Mensch und Tier	229
	Literatur	231
10	Die Zukunft der Menschheit	235
10.1	Der unaufhaltsame technologische Fortschritt	235
10.2	Die anhaltende kulturelle Evolution	236
10.3	Der evolutionäre Konvergenzpunkt	237
10.4	Extraterrestrisches intelligentes Leben	238
10.5	Gefahren, das Fermi-Paradox	239
10.6	Die „Gotthypothese“ – für und wider	240
	Literatur	242
	Anhangtabellen	243