



Peter Ulmschneider

Vom Urknall zum modernen Menschen

Die Entwicklung der Welt in Zehn Schritten

SACHBUCH



Springer Spektrum

Vom Urknall zum modernen Menschen

Peter Ulmschneider

Vom Urknall zum modernen Menschen

Die Entwicklung der Welt in zehn Schritten

 **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 Manitius 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	Microensing-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 „Gothypothese“ – für und wider	240
	Literatur	242
	Anhangtabellen	243

Das Universum

P. Ulmschneider, Vom Urknall zum modernen Menschen, DOI 10.1007/978-3-642-29926-1_1,
© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2014

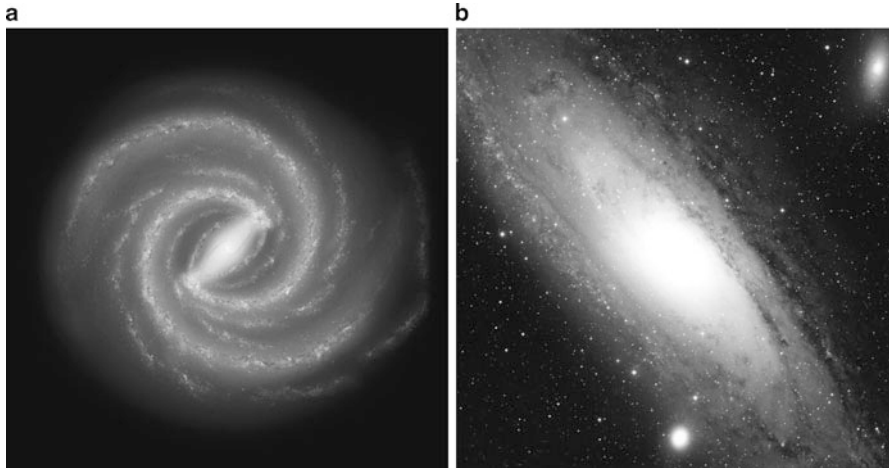
Jahrhundertelange Entwicklung von astronomischen Teleskopen, modernen Instrumenten und analytischen Untersuchungsmethoden sowie, in neuester Zeit, von umfangreichen Computersimulationen deuten darauf hin, dass Urknall und Kältetod den Anfang und das Ende unserer Welt markieren. Weltmodelle und präzise Beobachtungen erlauben, die Entwicklung von extrem heißen Frühphasen des Universums, in der die chemischen Elemente entstanden sind, bis zur Bildung von Sternen, Galaxien und den Strukturen des heutigen Weltalls nachzuvollziehen. Zusätzlich ermöglichen sie, das zukünftige Schicksal unserer Welt vorherzusagen.

1.1 Die Milchstraße und Galaxien

Schon um 480 v. Chr. wusste der vorsokratische griechische Philosoph Parmenides von Elea (nach Diogenes Laertius ca. 200 n. Chr., Leben und Meinungen berühmter Philosophen), dass unsere Erde eine Kugel ist. Ihren wahren Umfang bestimmte erstmals der griechische Mathematiker Erathostenes um 240 v. Chr. In der Antike und im Mittelalter ging man davon aus, dass die Erde im Zentrum des Universums stehe (*geozentrisches System*). Dieses Weltbild erschütterte um 1530 der deutsch-polnische Mathematiker und Arzt Nikolaus Kopernikus, indem er antike Vorstellungen aufgriff und postulierte, dass die Erde als Planet zusammen mit den damals bekannten fünf Planeten Merkur, Venus, Mars, Jupiter und Saturn um die Sonne kreise. Den eindeutigen Nachweis für dieses *heliocentrische System* lieferte zwischen 1609 und 1618 der deutsche Astronom und Mathematiker Johannes Kepler mit der Entdeckung der drei nach ihm benannten Gesetze. Der englische Physiker und Mathematiker Isaak Newton bestätigte dies 60 Jahre später mit den Bewegungsgleichungen und dem Gravitationsgesetz, aus denen er die Kepler-Gesetze ableiten konnte. Die endgültige Bestätigung dieses Systems gelang 1838 dem deutschen Mathematiker Friedrich Wilhelm Bessel mit der ersten Bestimmung der Entfernung zu einem anderen Stern.

Im Jahr 1923 zeigte der amerikanische Astronom Edwin Hubble, dass unser Sonnensystem zu einer riesigen Galaxis – der Milchstraße – gehört, einer scheibenförmigen Ansammlung von ca. 200 Mrd. Sternen mit einem Durchmesser von etwa 100.000 Lj (1 Lichtjahr [Lj] = $9,46 \times 10^{15}$ m). Zwei Jahre später entdeckte er, dass es sich beim Andromedanebel M 31 ebenfalls um eine Galaxie handelt. Abbildung 1.1 zeigt links unsere Heimatgalaxis als eine zweiarmlige Balkenspirale mit einer Balkenlänge von 27.000 Lj, deren Zentrum die Sonne im Abstand von 26.000 Lj umkreist, und rechts den doppelt so großen Andromedanebel, der 2,5 Mio. Lj entfernt liegt.

Zusammen mit einer Reihe weiterer Galaxien gehören beide zur sogenannten Lokalen Gruppe, die zusammen mit anderen den Virgo-Galaxienhaufen bildet, dessen Zentrum sich in einer Entfernung von 60 Mio. Lj befindet. Mittlerweile ist bekannt, dass eine riesige Zahl von Galaxienhaufen mit typischerweise jeweils 50–1000 Mitgliedern ein weitläufiges Universum bevölkert, das mit etwa 100 Mrd. Galaxien und zusammen etwa 10^{23} Sternen einen Durchmesser von mehr als 30 Mrd. Lj besitzt.



■ **Abb. 1.1** Unsere Galaxis (a) und im gleichen Maßstab der Andromedanebel M 31 (b) mit den elliptischen Zwerggalaxien M 32 (unten) und M 110 (oben) (NASA/JPL-Caltech)



■ **Abb. 1.2** Langzeitaufnahme (Hubble Deep Field) mit dem Hubble Space Teleskop (STScI und NASA)

Abbildung 1.2 zeigt eine mit dem Hubble Space Teleskop gewonnene Langzeitaufnahme eines winzigen Gebietes im Sternbild Ursa Major, das eine Überlagerung von 342 Einzelbildern darstellt, die in 10 Tagen im Dez. 1995 aufgenommen wurden. Bis auf wenige zur Milchstraße gehörenden Vordergrundsterne sind alle Lichtfleckchen in diesem Bild Galaxien. Ihre Ausdehnung wird mit der Entfernung immer kleiner, wobei die winzigsten Lichtpünktchen von Galaxien stammen, die bis zu 10 Mrd. Lj entfernt liegen.

Die erwähnten Gesamtzahlen an Galaxien ergeben sich aus Zählungen in wie in Abb. 1.2 dargestellten Himmelsgebieten und anschließenden Hochrechnungen auf das ganze Himmelsgewölbe. Abbildung 1.2 zeigt weit in der Vergangenheit liegende Zustände, da die wenigen eingefangenen Lichtquanten Milliarden Jahre unterwegs waren, bevor sie in der Digitalkamera des Hubble Space Teleskops absorbiert wurden. Dabei dürften die meisten der ca. 10^{55} Photonen, die pro Sekunde von solchen Galaxien in alle Himmelsrichtungen ausgesandt wurden, nie eingefangen werden, sondern ewig weiterfliegen (Abschn. 1.17.2).

1.2 Teleskope

Zwei wichtige technische Errungenschaften stellen die Grundlage für unser heutiges Bild des Universums dar: die Erfindung des *Fernrohrs*, das die Welt jenseits des Sonnensystems zu erkunden erlaubte und die Entwicklung von *Entfernungsbestimmungsmethoden*, die es ermöglichen, die Natur der beobachteten Objekte zu verstehen und richtig einzuordnen. Bis heute bringt jedes weiterentwickelte astronomische Beobachtungsinstrument fast unweigerlich neue umwälzende Erkenntnisse.

Warum wurde das aus zwei Linsen und einem Rohr zur Ausblendung des Streulichts bestehende Fernrohr, das erstmalig 1608 von Niederländern konstruiert und 1609 von Galileo Galilei und 1611 von Johannes Kepler für astronomische Zwecke verbessert nachgebaut wurde, nicht bereits in der Antike entwickelt? Wurden doch in der assyrischen (um 700 v. Chr.) und klassisch-griechischen Zeit (um 400 v. Chr.) bereits Linsen als Brenn- und Vergrößerungsgläser hergestellt und war die Mathematik der Kegelschnitte bereits Euklid (ca. 360–280 v. Chr.) und Apollonius von Perge (ca. 262–190 v. Chr.) bekannt. Der Grund liegt in der schlechten Qualität der frühen Linsen. Erst der Fortschritt bei den hochwertigeren homogenen Muranogläsern zur Zeit Galileis erlaubte es, astronomische Fernrohre zuerst mit dreifacher und später mit dreißigfacher Vergrößerung zu konstruieren.

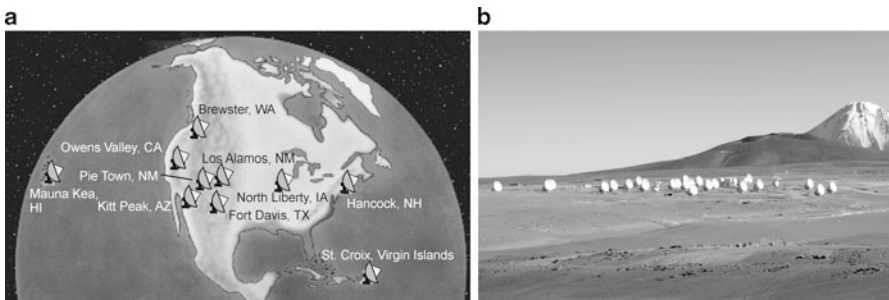
Mit Galileis Entdeckungen begann eine Revolution in der Astronomie, die u. a. den berühmten Refraktor des Yerkes Observatory (1897), die Spiegelteleskope des Mt. Wilson Observatory (1917) und des Mt. Palomar Observatory (1948) hervorbrachte. Mithilfe des Spiegelteleskops auf Mt. Wilson gelang es Hubble 1925 im Andromedanebel Cepheiden, pulsierende Sterne, zu entdecken und damit den bereits erwähnten Nachweis zu erbringen, dass es sich bei dem Andromedanebel um eine Galaxie handelt. Die schnelle Entwicklung zu immer größeren und mächtigeren astronomischen Teleskopen hält bis in die neueste Zeit an.

Abbildung 1.3 zeigt die vier Spiegelteleskope der Europäischen Südsternwarte (ESO) auf dem Cerro Paranal in Chile, die zum Very Large Telescope (VLT) gehören. Ihre Hauptspiegel haben einen Durchmesser von 8 m und können zu einem interferometrischen Gesamtteleskop mit einer Öffnung von maximal 130 m zusammenschaltet werden. Die Spiegel sind mit einer *aktiven Optik* ausgestattet, um stets die Idealform zu bewahren, und sollen noch mit einer *adaptiven Optik* ausgerüstet werden, die es erlaubt, die Luftunruhe zu kompensieren und im sichtbaren und infraroten Spektralbereich außergewöhnlich scharfe Bilder zu erzeugen.

Das zunehmende Interesse an Beobachtungen im Radiofrequenzbereich, der es erlaubt, tief in Staubwolken und Gebiete der Sternentstehung vorzudringen, hat zum Bau von großen Radioteleskopen wie dem Arecibo Observatory auf Puerto Rico mit seinem 305 m Spiegel geführt sowie zu ausgedehnten Arrays von Radioantennen mit einer Basislänge, die praktisch den Durchmesser der Erde erreicht wie das zehn Radioteleskope umfassende Very Long Baseline Array (VLBA) (Abb. 1.4a).



■ **Abb. 1.3** Die vier 8-m-Teleskope des Europäischen Very Large Telescope (VLT) auf dem Cerro Paranal in den chilenischen Anden (ESO)

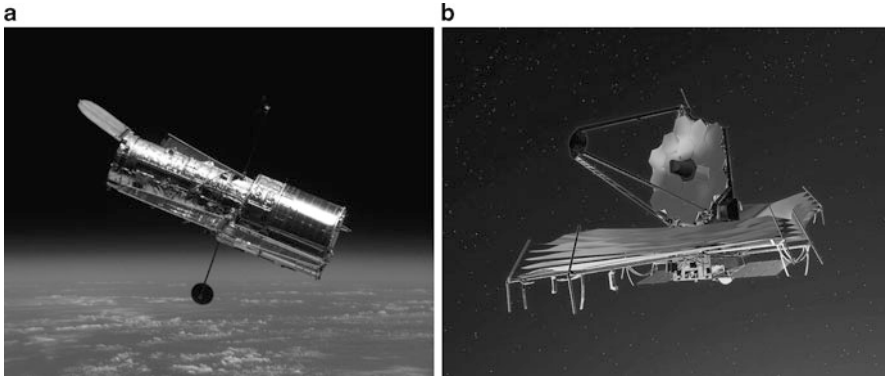


■ **Abb. 1.4** Das Very Long Baseline Array (VLBA) Radioteleskop (a) und das im Bau befindliche Atacama Large Millimeter Array (ALMA) (b) (NAIC, ESO)

Eines der ehrgeizigsten Projekte der bodengebundenen Astronomie stellt das voraussichtlich bis Ende 2013 fertiggestellte Atacama Large Millimeter Array (ALMA) dar, das 66 versetzbare Radioantennen besitzen soll (Abb. 1.4b). Das Array wird auf dem 5000 m hohen Hochplateau Chajnantor in der Atacamawüste von Chile errichtet, wo es kaum störenden atmosphärischen Wasserdampf gibt. Durch Verschieben der Antennen kann ALMA in ein Gesamteleskop mit einer Öffnung bis zu 16 km verwandelt werden.

Große Teleskope werden zunehmend auch im Weltraum stationiert (Abb. 1.5), so das Hubble Space Telescope (HST), das 1990 mit einem Space Shuttle in eine 575 km hohe Erdumlaufbahn gebrachte wurde. Das im Bau befindliche James Webb Space Telescope (JWST) soll 2018 gestartet werden, um das HST zu ersetzen. Im sogenannten Lagrange-Punkt L_2 wird es in 1,5 Mio. km Entfernung von der Erde auf ihrer sonnenabgewandten Seite stationiert werden und zusammen mit der Erde um die Sonne kreisen. Der Hauptspiegel des HST hat einen Durchmesser von 2,4 m, während der des JWST 6,5 m betragen wird.

Ein weiteres wichtiges im Bau befindliches Instrument ist der ESA Astrometrie Satellit GAIA, der eine präzise Vermessung des lokalen Weltalls zum Ziel hat. Er verfügt über zwei mit CCDs ausgestattete Teleskope, die in einem festen Winkel von $106,5^\circ$ zueinander montiert



■ **Abb. 1.5** Hubble Space Telescope (a) und James Webb Space Telescope (b) (STScI, NASA)

sind. Durch Rotation des Satelliten wird eine präzise dreidimensionale Karte von 10^9 Sternen der Milchstraße aufgebaut, wobei jedes Objekt etwa 70-mal beobachtet wird. Damit können erheblich genauere Entfernungen als mit dem Vorgängersatelliten Hipparcos erzielt werden.

1.3 Entfernungen

Entfernungsbestimmungsmethoden sind die zweite essenzielle Errungenschaft, die eine Vorstellung von dem uns umgebenden Universum ermöglicht.

1.3.1 Sonnenentfernung des Aristarch von Samos

Schon in der Antike bemühte man sich, Entfernungen im Sonnensystem zu messen. Wie Ptolemäus berichtet, bestimmte Aristarch von Samos (ca. 310–230 v. Chr.) die Mondentfernung in Einheiten des Erdradius, indem er zunächst den Durchmesser des Erdschattens bei Mondfinsternissen mit 2,6 Monddurchmessern ermittelte (Manitius 1963). Sodann berechnete er die Sonnenentfernung als 19-mal größer als die Mondentfernung. Dies leitete er aus einem gemessenen Winkelabstand von 87° zwischen Sonne und Mond ab, wenn Letzterer genau im ersten Viertel stand und somit Erde, Mond und Sonne ein rechtwinkliges Dreieck bildeten. Die geometrischen Beziehungen im Schattenkegel der Erde bei einer Mondfinsternis erlaubten dann aus den beiden gemessenen Werten die Größenverhältnisse des Sonne-Erde-Mond-Systems zu bestimmen (Heath 1981).

Es ergab sich eine Mondentfernung von 67 Erdradien und dass die Sonne 5,6-mal und der Mond 0,3-mal so groß waren wie die Erde. Die von Aristarch errechnete, fast zweitausend Jahre lang akzeptierte Messgröße von 19, muss in Wahrheit 400 lauten. Die Werte für die Größe des Mondes und dessen Entfernung sind jedoch realistisch, besonders als Eratosthenes, wie erwähnt, den Erdradius auf 16 % genau bestimmte. Da also zu Zeiten des Hellenismus die Dimensionen des Sonne-Erde-Mond-Systems grob bekannt waren, postulierte Aristarch ein heliozentrisches Sonnensystem, in dem die Erde zusammen mit den anderen Planeten um die

Sonne kreist, wobei der Tag-Nacht-Rhythmus und die scheinbare Rotation der Fixsternsphäre um die Erde als Eigenrotation der Erde um ihre Achse verstanden wurde.

1.3.2 Die kosmische Entfernungsleiter

Diese Geschichte zeigt, wie entscheidend eine präzise astronomische Entfernungsbestimmung für unsere Vorstellung vom Weltall ist. Wegen der gigantischen Größe des Universums gibt es keine *einzelne* Methode, die es erlaubt, alle Distanzen der Objekte zu messen. Man stützt sich vielmehr auf die *kosmische Entfernungsleiter*, die von der *Triangulierung* über die *Cepheiden* zu den *Supernovae* reicht und eine Hierarchie von Entfernungsmessmethoden darstellt, die jeweils gegeneinander geeicht werden müssen. Für Objekte des Sonnensystems liefern die Rückkehrzeiten von Radar- oder Lasersignalen sehr genaue Entfernungen. Für nahe Sterne, in Distanzen bis zu 100 Lj nutzt man die Triangulierungen von der Erdbahn aus. Hier wird ein naher Stern vor dem weit dahinter liegenden Sternfeld im Abstand von einem halben Jahr beobachtet, nachdem die Erde an gegenüberliegenden Punkten ihrer Bahn um die Sonne angekommen ist. Von dem erwähnten Astrometriesatelliten GAIA werden präzise trigonometrische Entfernungen von Sternen bis zu einigen 1000 Lj erwartet.

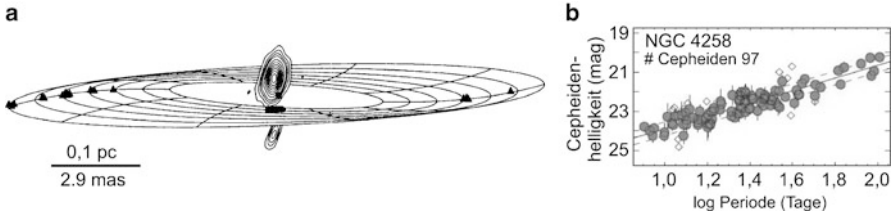
1.3.3 Cepheiden

Der nächste Schritt auf der Entfernungsleiter sind die *Cepheiden*, helle pulsierende Sterne, aus deren beobachteter Pulsationsdauer man ihre absolute Helligkeit ableiten und durch Vergleich mit der gemessenen scheinbaren Helligkeit die Entfernung bestimmen kann. Der Nachweis von Cepheiden in Nachbargalaxien erlaubt, Entfernungen bis ca. 10^8 Lj zu messen. Um die Cepheiden der Milchstraße zu eichen, benutzte man früher eine Reihe von Methoden wie die Sternstromparallaxe und das Hauptreihenfitting; inzwischen sind neuere Methoden, wie z. B. die Beobachtung von Lichtechos, verfügbar (Benedict et al. 2007; Kervella et al. 2008).

Mithilfe der 23,5 Mio. Lj entfernten sogenannten „Anker“-Galaxie NGC4258 kann man neuerdings extragalaktische Cepheiden direkt eichen. Hier handelt es sich um eine sogenannte AGN-Galaxie, die in ihrem Kern ein aktives galaktisches supermassereiches Schwarzes Loch (SMBH) besitzt. Während der Kern unserer Galaxis verhältnismäßig ruhig ist, stürzen bei AGN-Galaxien große Gasmengen in den Kern und erzeugen gewaltige Leuchterscheinungen. Aus Gründen der Drehimpulserhaltung können diese Massen nicht direkt in den Kern fließen, sondern bilden eine Akkretionsscheibe, in der sie in spiralförmigen Bahnen den Kern umkreisen, bis sie schließlich in ihn hineinstürzen.

Von den 22 AGN-Galaxien in unserer Nachbarschaft ist NGC4258 die einzige, in deren Akkretionsscheibe mit dem Very Long Baseline Array (VLBA) Maserlinien von Wasserdampf beobachtet wurden. Maser funktionieren wie Laser und erzeugen eine intensive Radioemission. An den mit Dreiecken bezeichneten Stellen in Abb. 1.6a treten enge Maserlinien auf, mit denen sich die Rotation der Scheibe präzise messen lässt. Auf der linken Seite kommen Gasmassen mit bis zu 1500 km/s auf uns zu und auf der rechten Seite fliegen sie mit 450 km/s von uns weg. Aus den beobachteten Winkelabständen und Geschwindigkeiten konnte die genaue Entfernung von NGC4258 bestimmt und der mit dem Hubble Space Telescope beobachtete Zusammenhang zwischen der scheinbaren Helligkeit (Größenklasse) und Pulsationsperiode der Cepheiden ermittelt werden (Abb. 1.6b).

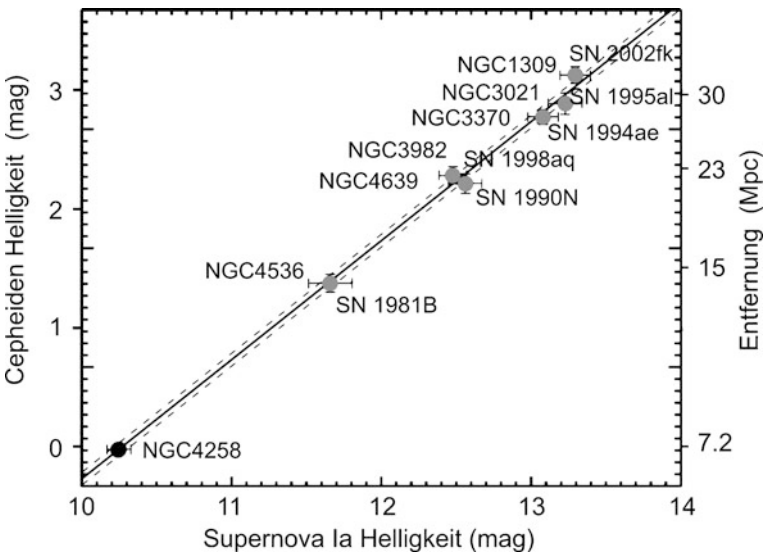
1.3 · Entfernungen



■ **Abb. 1.6** Die „Anker“-Galaxie NGC4258. **a** Akkretionsscheibe aus Messungen im Radiogebiet. Die Skala zeigt einen Winkel von 2,9 Millibogensekunden (Herrnstein et al. 1999), **b** Leuchtkraftperiodendiagramm von 97 Cepheiden dieser Galaxie (Riess et al. 2009)

1.3.4 Typ-Ia-Supernovae

Der letzte Schritt auf der kosmischen Entfernungsleiter sind *Typ-Ia-Supernovae*, die ihrerseits mit Cepheiden geeicht werden müssen. Bei einer Supernova Ia handelt es sich um die Explosion und Vernichtung eines *Weißen Zwergsterns*. Letztere sind extrem kompakte Sterne, die als Endprodukte der normalen Sternentwicklung entstehen und in Abschn. 2.3 näher besprochen werden. Sie können eine maximale Masse annehmen, die durch die Chandrasekhar-Grenze von ca. 1,4 Sonnenmassen gegeben ist. Jenseits dieser Grenze ist es dem Weißen Zwerg nicht mehr möglich, sein Gewicht mithilfe des sogenannten Elektronentartungsdrucks stabil zu halten: Es findet ein Kollaps mit anschließender Explosion statt, die den Weißen Zwerg zerreißt. Supernovae Ia treten in Doppelsternsystemen auf, in denen ein Weißer Zwerg einen



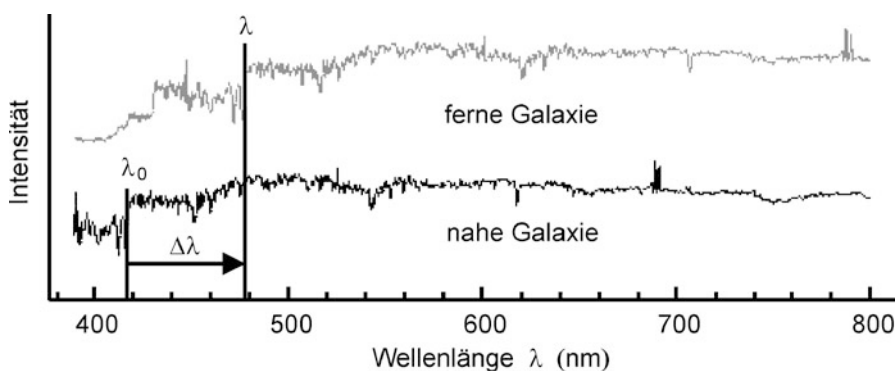
■ **Abb. 1.7** Der Zusammenhang von Cepheiden und Supernovae-Ia-Helligkeiten von sechs Galaxien legt als Eichung eine fiktive Supernovahelligkeit in der „Anker“-Galaxie NGC4258 fest. Rechts eine Entfernungsskala. Modifiziert nach Riess et al. (2009)

Roten Riesenstern begleitet. Rote Riesen haben ausgedehnte Hüllen und besitzen massereiche Sternwinde. Davon wird Masse auf den nahen Weißen Zwerg übertragen, bis dieser die Chandrasekhar-Grenze erreicht, kollabiert und explodiert.

Da im Moment des Kollapses alle Weißen Zwerge die gleiche Masse besitzen, müssen bei den Supernovae Ia dieselben absoluten Helligkeiten auftreten, was zur Entfernungsbestimmung benutzt wird. Abbildung 1.7 zeigt den linearen Zusammenhang der scheinbaren Helligkeiten (Magnituden) von Cepheiden und Typ-Ia-Supernovae bei *sechs* nahen Galaxien. Aus der bekannten Entfernung von NGC4258 und den beobachteten Helligkeitsunterschieden der Cepheiden der *sieben* Galaxien lassen sich die absoluten Helligkeiten der Supernovae Ia ermitteln. Da diese zu den hellsten Erscheinungen im Universum gehören, kann man mit ihnen die Distanzen zu den fernsten Objekten des Universums bestimmen.

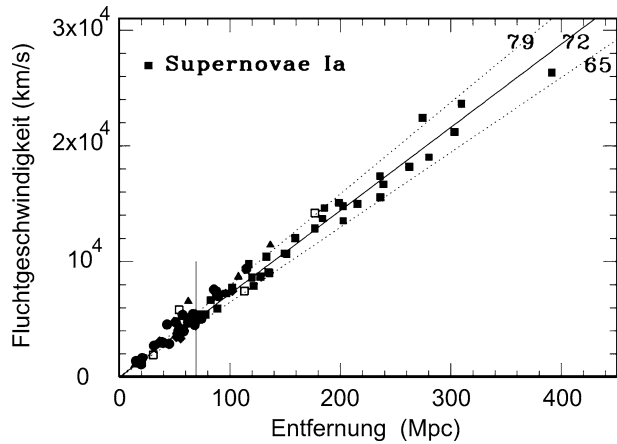
1.4 Rotverschiebung, Fluchtgeschwindigkeit

Vergleicht man die Spektren naher Galaxien mit denen der fernen von Abb. 1.2, findet man, dass bekannte Spektrallinien, die man für nahe Galaxien bei einer Wellenlänge λ_0 beobachtet, für ferne bei einer Wellenlänge λ auftreten, wobei λ stets größer ist als λ_0 (Abb. 1.8). Da diese Verschiebung um $\Delta\lambda = \lambda - \lambda_0$ zum roten Spektralbereich hin erfolgt, spricht man von *Rotverschiebung* (Abb. 1.8, Pfeil). Diese wird oft auch mit dem sogenannten z -Parameter angegeben, wobei $z = \Delta\lambda/\lambda_0$ ist. Bei der Entdeckung dieses Effektes hatte man die Rotverschiebung auf eine *Fluchtgeschwindigkeit* v der fernen Galaxien zurückgeführt, wobei für Geschwindigkeiten v , die viel kleiner als die Lichtgeschwindigkeit c sind, die Beziehung $v = cz$ gilt. Heute betrachtet man den eingebürgerten Begriff Fluchtgeschwindigkeit allerdings als wenig glücklich, da erkannt wurde, dass die Rotverschiebung nicht von einer Bewegung der fernen Galaxien gegenüber den lokalen herrührt, sondern daher, dass sich der Raum zwischen den fernen und nahen Galaxien ständig ausdehnt.



■ **Abb. 1.8** Die Wellenlängen der Spektren ferner und naher Galaxien sind um den Betrag $\Delta\lambda$ gegeneinander verschoben

■ **Abb. 1.9** Das Hubble-Gesetz
(Freedman et al. 2001)



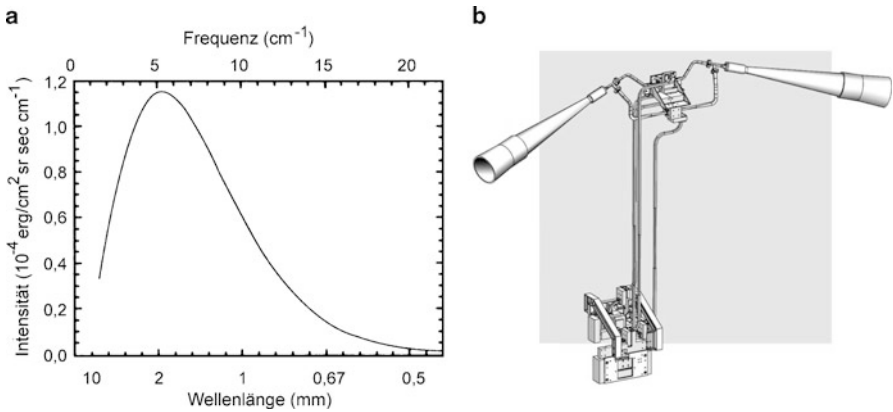
1.5 Das Hubble-Gesetz, der Urknall (Big Bang)

Trägt man die Fluchtgeschwindigkeiten gegen die Entfernungen auf, fällt eine erstaunliche Beziehung zwischen diesen Messgrößen auf (Abb. 1.9). Diese von Georges Lemaître 1927 theoretisch abgeleitete und von Hubble 1929 durch Beobachtung bestätigte Beziehung, das *Hubble-Gesetz*, besagt, dass Galaxien umso größere Fluchtgeschwindigkeiten v besitzen, je weiter sie entfernt sind.

Das Gesetz kann durch $v = H_0 d$ ausgedrückt werden, wobei d die Entfernung und H_0 die *Hubblekonstante* bezeichnen. In Abb. 1.9 findet man den Wert $H_0 = 72$ km/s/Mpc mit einem Fehler von ± 8 km/s/Mpc (1 Mpc = 10^6 pc, mit 1 pc (Parsec) = $3,09 \times 10^{16}$ m). Ein vergleichbarer Wert von $H_0 = 74,2 \pm 3,6$ km/s/Mpc wurde vom Nobelpreisträger Adam Riess mit seiner im Abschn. 1.3.4 besprochenen besseren Eichung der Supernovae Ia entdeckt (Riess et al. 2009). Rechnet man die Fluchtbewegungen (Raumausdehnung) von der beobachteten Distanz aus zurück, ergibt sich, dass unsere Welt explosionsartig aus einem hochkonzentrierten Zustand heraus entstanden sein muss. Dieses, *Urknall* (oder *Big Bang*) genannte Ereignis, hat vor ca. 13,7 Mrd. Jahren stattgefunden und man nimmt an, dass damals Raum, Zeit, Energie und Materie sowie die Naturgesetze entstanden sind.

1.6 Die kosmische Mikrowellenhintergrundstrahlung

Überraschenderweise konnten die Expansion des Weltalls und der Wert der Hubblekonstante von einem ganz anderen Gebiet der Astronomie – den Messungen der *kosmischen Mikrowellenhintergrundstrahlung* (CMB) – voll bestätigt werden. Hier handelt es sich um eine kurzwellige Radiostrahlung in einem Frequenzbereich um 160 GHz und Wellenlängenbereich um $\lambda = 1,9$ mm (Abb. 1.10a), die das ganze Universum in alle Richtungen durchzieht. Sie ist mit hoher Genauigkeit isotrop, d. h. unabhängig von der Himmelsrichtung.



■ **Abb. 1.10** a Planck-Spektrum der kosmischen Hintergrundstrahlung, gemessen vom amerikanischen Satelliten COBE (Fixsen et al. 1996), b In Paaren unter einem Winkel von 140° angeordnete Radiometer des WMAP Satelliten (NASA/WMAP Science Team)

1.6.1 COBE-Resultate

Obwohl diese Radiostrahlung bereits in den 1960er Jahren entdeckt wurde, gipfelten zunehmend genauere Messung dann in dem 1989 gestarteten amerikanischen Satelliten COBE (Cosmic Background Explorer). COBE konnte zeigen, dass die kosmische Hintergrundstrahlung mit hoher Genauigkeit dem Planck-Strahlungsgesetz für eine Temperatur von $2,725 \pm 0,002$ K folgt (Fixsen und Mather 2002). Bei gegebener Temperatur sagt das Gesetz die Intensität der Radiostrahlung bei verschiedenen Wellenlängen voraus. Die gemessenen Datenpunkte dieses sogenannten Planck-Spektrums lagen so präzise auf der theoretischen Kurve, dass sie in der Strichdicke der gezeichneten Linie verschwanden (Abb. 1.10a).

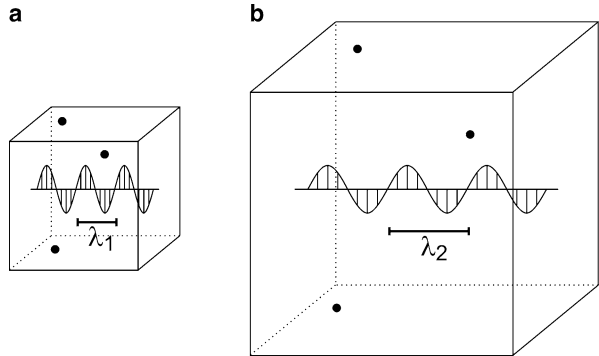
Es zeigt sich, dass die kosmische Hintergrundstrahlung 99,994 % der im Weltall vorhandenen Strahlungsenergie ausmacht, von der Materie und sonstigen Bestandteilen des Universums praktisch abgekoppelt ist und auf eine Expansion des Weltalls hinweist.

Abbildung 1.11 zeigt wie sich Dichte und Energiedichte bei einer kosmischen Expansion verhalten. Während für materielle Teilchen die Energiedichte (die Energie pro Volumen) mit zunehmendem Volumen abnimmt, da sich eine feste Anzahl von Teilchen auf einen immer größeren Raum verteilt, verkleinert sich die Energiedichte von Photonen schneller, weil sich außerdem die Wellenlänge der Photonen vergrößert. Da die Energiedichte und die Temperatur eng miteinander verknüpft sind, sinkt bei der Expansion auch die Temperatur rapide ab. Dies bedeutet, je kleiner das ursprüngliche Volumen des Universums war, desto höher waren seine Temperaturen.

1.6.2 WMAP und Planck-Ergebnisse

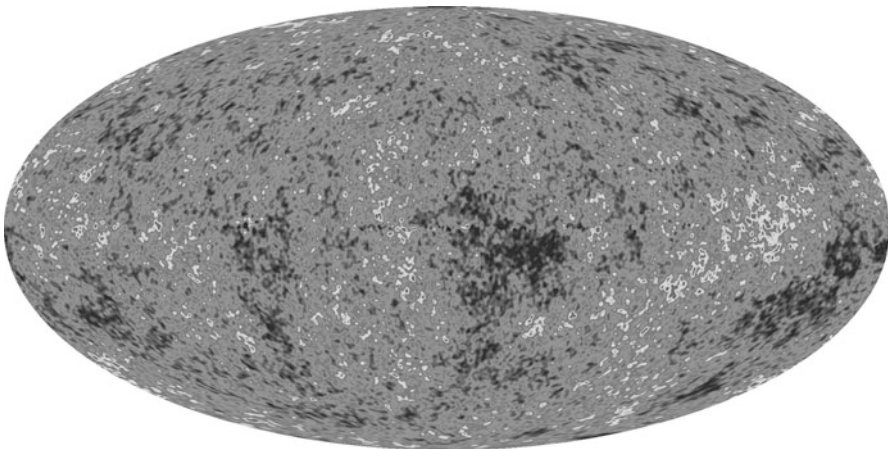
Während man bereits aus dem Wert und der Isotropie der Temperatur der kosmischen Hintergrundstrahlung wichtige Erkenntnisse über die Zeit unmittelbar nach dem Urknall gewinnen konnte, führte die Beobachtung der winzigen Temperaturschwankungen um den Mittelwert zu

■ **Abb. 1.11** Die Expansion des Raumes von einer früheren (a) zu einer späteren Epoche (b). Die Punkte stellen Protonen, die Welle ein Photon dar mit der Wellenlänge λ .



einer wahren Fundgrube an Informationen über den Anfang und die Frühgeschichte unseres Universums. Da die von COBE gemessenen Temperaturschwankungen und die Winkelauflösung von 7° nicht genau genug waren, wurde 2001 der amerikanische Satellit WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe) gestartet, der eine verbesserte Winkelauflösung ($0,25^\circ$) und Temperatursensitivität besaß. Um Störsignale von Sonne und Erde auszuschalten, wurde er 1,5 Mio. km von der Erde entfernt im Lagrange-Punkt L_2 in eine stabile Umlaufbahn außerhalb der Erdbahn um die Sonne stationiert.

Mit 20 Radiometern ausgestattet, beobachtete WMAP, anders als COBE, nicht die Temperatur selbst, sondern mithilfe eines um einen Winkel von 140° auseinander gerichteten Radiometerpaars die Temperaturdifferenzen der verschiedenen Himmelsregionen (Abb. 1.10b). Aufgrund fortlaufender Rotation des Satelliten überstrichen die Radiometer mit der Zeit mehrfach alle Orte des Himmelsgewölbes. Als Resultat einer 7-jährigen Beobachtung durch WMAP zeigt Abb. 1.12 eine Karte der Temperaturschwankungen (Jarosik et al. 2011). Eine neuere Karte mit höherer Auflösung ergibt sich aus 16 Monate langen Beobachtungen des ESA Planck-Satelliten (<http://www.nasa.gov/planck>). Die Analyse der Karten wird in Abschn. 1.11 präsentiert.



■ **Abb. 1.12** Über das Himmelsgewölbe verteilte Temperaturschwankungen der kosmischen Hintergrundstrahlung, gemessen vom WMAP-Satelliten. Die Variationen um einen Mittelwert von 2,725 K betragen ca. 0,0004 K von den kältesten (dunklen) zu den heißesten (hellen) Gebieten (<http://map.gsfc.nasa.gov/media/t21238/index.html>)

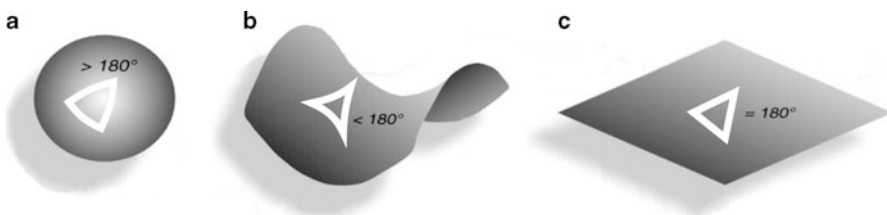
1.7 Weltmodelle

Zur Analyse der kosmischen Hintergrundstrahlung bedarf es theoretischer Modelle, aufgrund derer man diese Beobachtungen verstehen kann. In der Physik gibt es zwei Theorien, die wichtige Fundamente darstellen und sich in der Konfrontation mit Beobachtungen immer wieder als zutreffend und verlässlich erwiesen haben: die von Albert Einstein 1915 vorgeschlagene *Allgemeine Relativitätstheorie* und die auf Max Planck um 1900 zurückgehende, von Erwin Schrödinger, Werner Heisenberg und anderen in den 1920er und 1930er Jahren ausgebaute *Quantenmechanik*, die zur *Quantenfeldtheorie* erweitert wurde.

Die Allgemeine Relativitätstheorie beschreibt die Wechselwirkung der Materie mit Raum und Zeit. Sie lehrt, dass Gravitation, Materiedichte und die Krümmung des Raumes eng zusammenhängen. Einen *ebenen Raum* erhält man, wenn man im Weltall eine homogene Massenverteilung mit einer kritischen Materiedichte $\rho_{\text{krit}} = 9,7 \times 10^{-30} \text{ g/cm}^3$ annimmt. Hier tritt bei beliebig im Raum liegenden Dreiecken stets eine Winkelsumme von genau 180° auf (Abb. 1.13c). Bei Materiedichten größer als ρ_{krit} ist der *Raum sphärisch gekrümmt*. Dies kann man feststellen, indem man die Winkelsumme von Dreiecken misst und einen Wert von mehr als 180° findet. Diese Krümmungseigenschaft des dreidimensionalen Raumes, die sich unserer direkten Vorstellung entzieht, lässt sich auf einer zweidimensionalen Kugel anschaulich darstellen (Abb. 1.13a). Ist die Materiedichte kleiner als ρ_{krit} , erhält man einen *hyperbolisch gekrümmten Raum* mit einer Dreieckswinkelsumme von weniger als 180° (Abb. 1.13b).

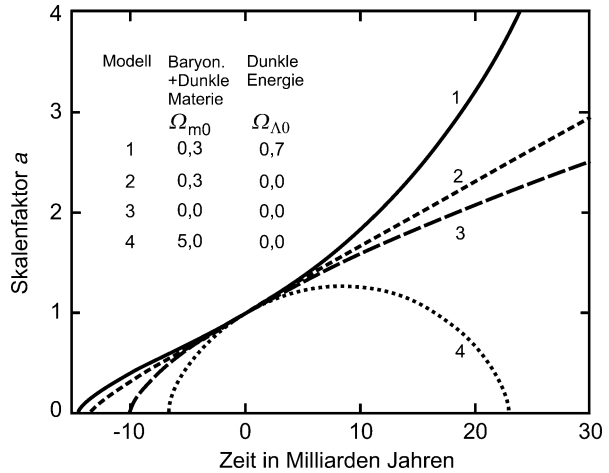
1922 gelang es dem russischen Mathematiker Alexander Friedmann, aus der Allgemeinen Relativitätstheorie die nach ihm benannten *Friedmann-Gleichungen* abzuleiten, mit deren Hilfe er die *Friedmann-Weltmodelle* konstruierte. Wenn man sich das beobachtbare Weltall als eine Kugel gefüllt mit „gasartiger“ isotrop und homogen verteilter Materie vorstellt, erlauben die Gleichungen, unter Annahme bestimmter Anfangsbedingungen, die Expansion des Weltalls theoretisch vorherzusagen. Nimmt man an, dass diese Kugel den heutigen Radius r_0 besitzt, kann seine Entwicklung durch einen *Skalenfaktor* a beschrieben werden, der den Radius r in Einheiten von r_0 beschreibt. Beim Urknall hat man $a = 0$, also ein Weltall mit der Ausdehnung null, auch Singularität genannt, während das heutige Weltall die Ausdehnung (Skalenfaktor) $a = 1$ besitzt.

Für die Weltmodelle wird weiter angenommen, dass der aus „gasartigen“ Teilchen bestehende Inhalt der Kugel eine Dichte ρ besitzt, die sich aus drei Komponenten zusammensetzt: der *Baryonischen Materie* ρ_b (ein Stoff, den wir sehen und fühlen können), der hypothetischen *Dunklen Materie* ρ_c (Abschn. 1.13) und der *Dunklen Energie* ρ_Λ (Abschn. 1.16), wobei ρ_b und ρ_c bei der Expansion wie $1/a^3$ oder $1/a^4$ abnehmen (Abschn. 1.10) und $\rho_\Lambda = 7,2 \times 10^{-30} \text{ g/cm}^3$



■ **Abb. 1.13** Winkelsumme bei Dreiecken auf einer Kugel (a), einer Sattelfläche (b) und einer Ebene (c)

■ **Abb. 1.14** Skalenfaktor a als Funktion der Zeit t . Verschiedene Weltmodelle aufgrund der Auswahl von Dichteparametern Ω_{m0} und $\Omega_{\Lambda 0}$ (NASA/WMAP Science Team)



konstant bleibt. Zudem kann man vereinfachend dem „gasartigen“ Inhalt der Kugel eine Temperatur T und einen Druck p zuordnen. Als primäre Parameter, die die Weltmodelle eindeutig festlegen, dienen die sogenannten Dichteparameter $\Omega_{b0} = \rho_{b0}/\rho_{\text{krit}}$, $\Omega_{c0} = \rho_{c0}/\rho_{\text{krit}}$ und $\Omega_{\Lambda 0} = \rho_{\Lambda 0}/\rho_{\text{krit}}$, die die heutigen Dichten der drei Komponenten in Einheiten der erwähnten heutigen kritischen Dichte ρ_{krit} angeben. Abbildung 1.14 zeigt vier Weltmodelle, die sich aufgrund der Auswahl der drei erwähnten und dreier weiterer *Primärparameter* ergeben, wobei noch der Dichteparameter $\Omega_{m0} = \Omega_{b0} + \Omega_{c0}$ angegeben werden kann (Spergel et al. 2003; Komatsu et al. 2011).

Alle anderen Parameter, wie z. B. die Hubblekonstante H_0 , sind dann als Resultat der Wahl der sechs Primärparameter durch die sich ergebenden Weltmodelle festgelegt. Für diese Modelle gilt, dass sie bei $a = 0$ beginnen und bei $a = 1$ den heutigen Zeitpunkt erreichen. Da die räumliche Geometrie eines Weltmodells vom Wert der Gesamtdichte $\Omega_{\text{tot}} = \Omega_{m0} + \Omega_{\Lambda 0}$ abhängt, ergibt sich bei den Weltmodellen 1 und 3 mit $\Omega_{\text{tot}} = 1,0$ ein flaches Universum. Im Weltmodell 2 mit der Dichte $\Omega_{\text{tot}} = 0,3$, wie für Fälle, bei denen Ω_{tot} kleiner als 1,0 ist, hat man Welten mit negativ gekrümmtem Raum. Wie bei flachen Weltmodellen expandiert hier der Raum immer weiter und dehnt sich bis ins Unendliche aus.

Bei Weltmodell 4 mit der Gesamtdichte $\Omega_{\text{tot}} = 5$, wie in allen Fällen mit Ω_{tot} größer als 1,0, hat man eine Welt mit positiv gekrümmtem Raum. Wie Abb. 1.14 zeigt, erreicht bei solchen Weltmodellen der Raum zu einer bestimmten Zeit eine maximale Ausdehnung, um dann wieder zusammenzufallen und schließlich in einer Singularität $a = 0$ zu enden. Die Beobachtungen des WMAP-Satelliten zeigen (Abschn. 1.11), dass für unsere Welt das Modell 1 zutrifft. Sie begann vor 13,7 Mrd. Jahren (Abb. 1.14), hat sich bis vor ca. 5 Mrd. Jahren relativ gemächlich ausgedehnt, und wird in einer rapid beschleunigten Expansion in 20 Mrd. Jahren die dreifache heutige Ausdehnung erreichen.

1.8 Planck-Epoche, der Beginn der Welt?

Die zeitliche Entwicklung des Skalenfaktors a in Weltmodell 1 (Abb. 1.14) kann die oben erwähnte Expansion des Weltalls erklären. Wenn man die in Abb. 1.11 eingezeichneten Teilchen