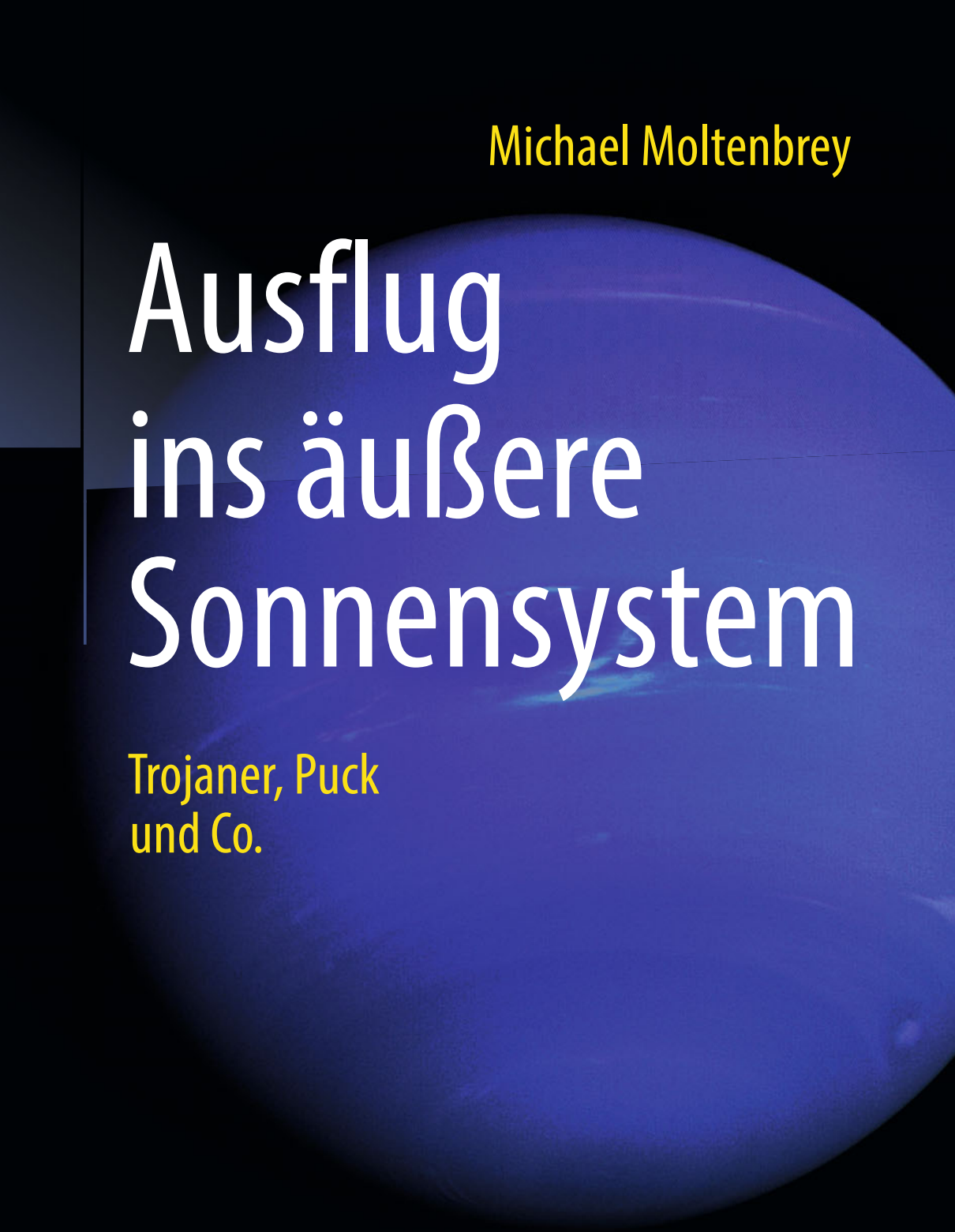
Michael Moltenbrey

Ausflug ins äußere Sonnensystem

Trojaner, Puck und Co.



SACHBUCH

Springer

Ausflug ins äußere Sonnensystem

Michael Moltenbrey

Ausflug ins äußere Sonnensystem

Trojaner, Puck und Co.

Springer

Michael Moltenbrey
München, Deutschland

ISBN 978-3-662-59359-2 ISBN 978-3-662-59360-8 (eBook)
https://doi.org/10.1007/978-3-662-59360-8

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

© Springer-Verlag GmbH Deutschland, ein Teil von Springer Nature 2019
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 allgemein beschreibenden Bezeichnungen, Marken, Unternehmensnamen etc. in diesem Werk bedeutet nicht, dass diese frei durch jedermann benutzt werden dürfen. Die Berechtigung zur Benutzung unterliegt, auch ohne gesonderten Hinweis hierzu, den Regeln des Markenrechts. Die Rechte des jeweiligen Zeicheninhabers sind zu beachten.
Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag, noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Einbandabbildung: NASA/JPL
Planung/Lektorat: Lisa Edelhäuser

Springer ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer-Verlag GmbH, DE und ist ein Teil von Springer Nature.
Die Anschrift der Gesellschaft ist: Heidelberger Platz 3, 14197 Berlin, Germany

Vorwort

Viel ist uns über unser heutiges Sonnensystem bereits bekannt. Vor allem unser Nachbarplanet Mars erfreut sich nach wie vor großer Beliebtheit. Seine Erforschung wird stets medienwirksam in Szene gesetzt.

Aber es gibt noch so viel Unbekanntes dort draußen. Je weiter wir uns von der Erde entfernen und in das äußere Sonnensystem vordringen, desto vager wird die Vorstellung, was uns dort draußen erwartet. Wir kennen schon lange die Gas- und Eisriesen Jupiter, Saturn, Uranus und Neptun. Vielleicht haben wir auch die „Schlacht" um Pluto mitbekommen. Bei den meisten dürften sich hier die Kenntnisse erschöpfen. Warum auch nicht? Eine große Leere erwartet uns dahinter. Oder nicht?

Wir kennen die Bilder der Gasriesen Jupiter, Saturn, Uranus und Neptun. Diese sind beeindruckend und wunderschön. Aber jenseits davon? Ein paar kleine, leblose und langweilige Gesteinsbrocken.

Warum sollte man sich also mit dieser Einöde beschäftigen? Das war lange auch eine Frage, die mich beschäftigte, während ich mich in verschiedene Themen der Astronomie und Astrophysik eingrub. Waren nicht die Gasnebel und die fernen Galaxien – das große Ganze – nicht weitaus abwechslungsreicher und spannender?

Durch Zufall beschäftigte ich mich dann vor einigen Jahren mit der Entstehung unseres Sonnensystems. Es war keineswegs so statisch und langweilig. Die Dynamik der frühen Phasen war beeindruckend. Nicht nur die Sonne und Planeten spielten eine wichtige Rolle, sondern zu meiner Überraschung auch die Vielzahl kleiner Körper. Insbesondere fiel mein Augenmerk auf die Regionen jenseits Neptuns. In der wissenschaftlichen Community war gerade einiges im Gange. Unglaubliche Mengen neuer Erkenntnisse sprudelten mit immer höherer Taktrate herein.

Verblüffend war, dass diese kleinen, fernen Objekte eine schier unglaubliche Vielfalt und Variabilität an den Tag legten. Im Laufe der Jahre wurden viele Erkenntnisse gewonnen. Vieles liegt noch im Dunkeln. Denkt man, man hätte die Antwort auf eine der vielen Fragen gefunden, kommen meist sofort neue Fragen auf. Wir finden hier ein sehr aktives junges Forschungsgebiet vor. Wir stehen erst ganz am Anfang unserer Erkenntnis! Das äußere Sonnensystem und insbesondere jene transneptunische Region fesselten mich und ließen mich seither nicht mehr los.

Dieses Buch soll dabei helfen dem Leser einen ersten Einblick in diese faszinierenden Welten des äußeren Sonnensystems zu geben. Wir werden gemeinsam einen Ausflug unternehmen vom Asteroidengürtel zwischen Mars und Jupiter, über die Gas- und Eisriesen und deren Monde, weiter über den Kuiper-Gürtel bis hin an die Grenzen unseres Sonnensystems. Ich hoffe, wir werden zusammen eine spannende Reise unternehmen.

Natürlich kann dies nur ein Abriss sein, um einen ersten Überblick zu bekommen. Am Ende jeden Kapitels ist daher weiterführende Literatur aufgeführt, die dabei helfen kann Themen, zu vertiefen. Manche dieser Vorschläge sind mit einem Stern (*) markiert. Hierbei handelt es sich um wissenschaftliche Fachliteratur, die einige mathematische und physikalische Kenntnisse voraussetzt, daher aber einen tiefen Einstieg ermöglicht. Die restlichen Vorschläge sind allgemein verständliche populärwissenschaftliche Arbeiten.

Bedanken möchte ich mich besonders bei Frau Edelhäuser und Frau Adam vom Springer-Verlag, die mich beim Verfassen des Manuskripts begleitet haben. Danke für Ihre Unterstützung und Geduld. Besonderer Dank gilt auch meiner Familie für die Geduld, die sie während des Schreibens des Manuskripts aufbringen mussten.

Aber lassen Sie uns nun unseren Ausflug beginnen…

München
April 2019

Michael Moltenbrey

Inhaltsverzeichnis

1 Einführung 1

1.1 Was wissen wir – der Versuch einer Bestandsaufnahme 2

1.2 Wie alles begann 5

1.3 Von interstellarer Materie zur Urwolke 7

1.4 Von der Urwolke zum Sonnennebel 10

1.5 Die Geburt der Sonne 11

1.6 Die Entstehung der Planeten 13

1.6.1 Terrestrische Planeten – Welten aus Stein 15

1.6.2 Die Gasriesen 17

1.6.3 Die fehlenden Planeten 19

1.7 Die Wanderung der Planeten 20

1.7.1 Die Ausgangssituation 20

1.7.2 Die Wanderung beginnt 21

1.8 Das Sonnensystem heute 24

1.8.1 Die Sonne 24

1.8.2 Die terrestrischen Planeten 26

1.8.3 Der Asteroidengürtel 27

1.8.4 Das Reich der Gasriesen 28

1.8.5 Der Edgeworth-Kuiper-Gürtel und Scattered Disk 29

1.8.6 Die Oort'sche Wolke 33

1.8.7 Trojaner, Zentauren und Kometen 34

1.9 Unsere Reiseroute 37

Weiterführende Literatur 38

2 Der Asteroidengürtel 39
2.1 Die Geschichte einer Entdeckung 39
2.1.1 Aller Anfang ist schwer 40
2.1.2 Die Anzahl der Planeten wächst 41
2.2 Aufbau von Asteroiden 43
2.2.1 Eine Frage der Größe 44
2.2.2 Formenvielfalt 44
2.2.3 Zusammensetzung 46
2.3 Struktur des Asteroidengürtels 47
2.4 Besuch bei einem Riesen – Vesta 50
2.4.1 Tiefe Narben 52
2.4.2 Ein differenziertes Inneres 54
2.5 Auf ein Treffen mit einem Zwergplaneten 56
2.5.1 Oberfläche 57
2.5.2 Innerer Aufbau 59
2.6 Ida und Dactyl 59
2.7 Hauptgürtelkometen 60
Weiterführende Literatur 63

3 Jupiter 65
3.1 Ein Riese stellt sich vor 65
3.2 Wolken und Stürme – eine turbulente Atmosphäre 67
3.2.1 Eine Frage der Farbe 67
3.2.2 Bänder, Zonen und Jets 69
3.2.3 Orchestriertes Chaos – Stürme und Wirbel 69
3.2.4 Aufbau der Atmosphäre 72
3.3 Jupiters Innerstes – eine Frage des Kerns 75
3.4 Magnetfeld 76
3.4.1 Struktur und Ursachen 76
3.4.2 Tanz der Teilchen 77
3.4.3 Polarlichter 78
3.5 Ein dünnes Ringsystem 79
3.6 Jupiters Rolle im Sonnensystem 81
3.7 Jupiters Vorhof – das Reich der Monde 83
3.7.1 Amalthea – der Winzling 83
3.7.2 Io – der Vulkanmond 84
3.7.3 Europa – Welt der Ozeane 89
3.7.4 Ganymed – der Riese 95
3.7.5 Kallisto – die Eisige 97
Weiterführende Literatur 101

4 Trojaner und Zentauren 103
4.1 Trojaner 103
4.1.1 Struktur und Ursprung 105
4.1.2 Auf Besuch bei Hektor und Patroclus 105
4.1.3 Es gibt noch mehr 106
4.2 Zentauren 107
4.2.1 Wie alles begann: der Fall Chiron 108
4.2.2 Chariklo 109
Weiterführende Literatur 112

5 Besuch beim Herrn der Ringe 113
5.1 Der Herr der Ringe gibt sich die Ehre 113
5.2 Atmosphäre 115
5.2.1 Wolken über Wolken 116
5.2.2 Stürme und andere Extreme 116
5.3 Der harte Kern 119
5.4 Magnetfeld 120
5.5 Die Wunderwelt der Ringe 122
5.5.1 Die Struktur der Ringe 122
5.5.2 Eine Größe, die keine ist 124
5.5.3 Ein neuer Ring 125
5.5.4 Seltsame Phänomene 127
5.6 Das Reich der Monde 128
5.6.1 Mimas 129
5.6.2 Enceladus – der Wasserspucker 130
5.6.3 Tethys 133
5.6.4 Dione 135
5.6.5 Rhea 136
5.6.6 Titan – der Verhüllte 137
5.6.7 Iapetus 143
Weiterführende Literatur 145

6 Uranus – Eintritt in die Welt der Eisriesen 147
6.1 Ein kurzer Überblick 147
6.2 Die Entdeckung des Uranus 148
6.3 Atmosphäre 149
6.3.1 Der Abstieg beginnt 150
6.3.2 Ein Meer geladener Teilchen 151
6.3.3 Es wird dichter 152
6.3.4 Strukturlos 152

6.4 Innerer Aufbau 153
6.5 Die Magnetosphäre 155
6.6 Ringsystem 156
6.7 Das Reich der Monde 157
6.7.1 Puck 158
6.7.2 Miranda 159
6.7.3 Ariel 162
6.7.4 Umbriel 164
6.7.5 Titania 165
6.7.6 Oberon 166
Weiterführende Literatur 166

7 Neptun 167
7.1 Ein kurzer Überblick 167
7.2 Entdeckung des Planeten 170
7.3 Atmosphäre 171
7.4 Wolken und Wetter 171
7.5 Innerer Aufbau 173
7.6 Magnetosphäre 174
7.7 Ringsystem 175
7.8 Monde 176
7.8.1 Proteus 177
7.8.2 Triton 177
Weiterführende Literatur 181

8 Kuiper-Gürtel 183
8.1 Ein kurzer Überblick 183
8.2 Von ersten Hypothesen bis zur Entdeckung 184
8.3 Struktur des Kuiper-Gürtels 186
8.3.1 Resonante Objekte 187
8.3.2 Klassische Kuiper-Gürtel-Objekte 189
8.4 Physikalische Eigenschaften und Zusammensetzung 191
8.5 Zu Besuch beim gefallenen Planeten Pluto 193
8.5.1 Planet X gefunden und verloren 193
8.5.2 Ein kurzer Überblick 196
8.5.3 Eine dünne Atmosphäre 198
8.5.4 Eine Welt aus Eis 201
8.5.5 Innerer Aufbau 204
8.5.6 Die Begleiter Plutos 205

8.6 Orcus – Willkommen in der Unterwelt 208
8.7 Haumea 209
8.8 Makemake 212
8.9 Ultima Thule 214
8.10 Die Scattered Disk 216
8.10.1 Struktur und Ausdehnung 216
8.10.2 Kometenreservoir 218
8.10.3 Eris – der Plutokiller 218
Weiterführende Literatur 221

9 Zwischen den Welten 223
9.1 Detached Objects – ein Überblick 223
9.2 Sedna 225
Weiterführende Literatur 228

10 Die Oort'sche Wolke 229
10.1 Wo kommen all die Kometen her? 229
10.1.1 Die Ausdehnung 230
10.1.2 Aus Eins mach Zwei 231
10.2 Kometen 232
10.2.1 Komet ist nicht gleich Komet 233
10.2.2 Was ist ein Komet? 234
10.3 Das Ende der Reise 238
Weiterführende Literatur 238

11 Das Ende einer langen Reise 239
11.1 Ein Blick zurück 239
11.2 Ist da noch etwas? 240
11.2.1 Ein Begleiter unserer Sonne 241
11.2.2 Ein weiterer Planet? 241
Weiterführende Literatur 243

Stichwortverzeichnis 245

1

Einführung

Unser Sonnensystem scheint auf den ersten Blick ein wohl geordnetes Gebilde zu sein. Zunächst haben wir in seinem Zentrum unsere Sonne. Um sie herum tanzen im steten Reigen die neun Planeten auf nahezu kreisförmigen Bahnen. Begleitet werden die meisten von ihnen von Monden – kalten, felsigen, monotonen toten Körpern, die gravitativ gebunden um ihren Planeten kreisen. Zwischen unserem roten Nachbarplaneten Mars und dem Gasriesen Jupiter befindet sich eine kleinere Zahl von weiteren leblosen Gesteinsbrocken, sogenannten Asteroiden, die sich im sogenannten Asteroidengürtel zusammengefunden haben. Schließlich wird diese stabile Ordnung unseres Sonnensystems durch den gelegentlichen Besuch von Kometen unterbrochen, die in einer imposanten Erscheinung durch den Raum streifen, sich der Sonne nähern und schließlich wieder in den Weiten des Weltalls verschwinden.

So oder so ähnlich mag das Bild von unserem Sonnensystem noch in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts vermittelt worden sein. Seither hat sich jedoch unser Verständnis in riesigen Schritten erweitert. Was damals noch als unumstößlich galt, steht heute unter Umständen schon wieder infrage.

Wir wissen heute, dass das Sonnensystem weitaus komplexer und vielschichtiger ist als es noch vor gut 100 Jahren angenommen wurde. Neue Erkenntnisse unterwerfen unser Bild des Sonnensystems einem steten Wandel. Besonders der Vorstoß in vormals unbekannte Regionen im äußeren Bereich unseres Planetensystems wirft viele neue Fragen auf und vermag an den Grundfesten unseres Verständnisses über die Struktur und Entstehung des ganzen Systems zu rütteln.

© Springer-Verlag GmbH Deutschland, ein Teil von Springer Nature 2019

M. Moltenbrey, *Ausflug ins äußere Sonnensystem,*
https://doi.org/10.1007/978-3-662-59360-8_1

1.1 Was wissen wir – der Versuch einer Bestandsaufnahme

Was wissen wir also heute über unser Sonnensystem. Wagen wir uns an eine Bestandsaufnahme. Es gibt einige wenige Dinge, die – zumindest nach dem ersten Augenschein – unverändert sind. Nach wie vor befindet sich unsere Sonne im Zentrum des Sonnensystems. In den letzten 100 Jahren haben wir jedoch unzählige neue Erkenntnisse über Aufbau und Entstehung der Sonne gewonnen. So mag der Blick von außen noch nahezu derselbe sein, der Rest hat sich jedoch drastisch gewandelt.

Unsere acht Planeten bewegen sich in nach wie vor auf nahezu kreisförmigen, genauer auf elliptischen Bahnen um die Sonne. Moment acht Planeten? Hatten wir vorhin nicht noch von neun gesprochen? In der Tat bestand unser Sonnensystem seit der Entdeckung Plutos im Jahr 1930 durch den amerikanischen Astronomen Clyde Tombaugh offiziell aus neun Planeten. Die Entdeckung vergleichbarer Objekte im äußeren Sonnensystem seit den frühen 1990er-Jahren führte jedoch zu einer bis heute kontrovers diskutierten Herabstufung Plutos zu einem „Zwergplaneten“ durch die Internationale Astronomische Union (IAU) im Jahr 2006. Wir werden im weiteren Verlauf dieses Buches noch genauer auf diesen Sachverhalt eingehen. Es genügt an dieser Stelle festzuhalten, dass es neben den acht großen Planeten (Merkur, Venus, Erde, Mars, Jupiter, Saturn, Uranus und Neptun, Abb. 1.1) noch einige weitere größere Objekte gibt, die wir Zwergplaneten nennen. Auch die Planeten selbst sind keineswegs homogen in ihrem Auftreten. So unterscheiden wir die erdähnlichen Planeten des inneren Sonnensystems von den Gasriesen des äußeren.

Entfernungen im Weltall

In der Astronomie werden verschiedene Entfernungsmaße eingesetzt, da die Dimensionen im Universum sehr unterschiedlich sein können. Ein Maß für alles scheint dabei nicht sonderlich praktikabel zu sein. Entfernungen auf der Erde wie auch auf anderen Planeten lassen sich gut in Metern (m) oder Kilometern (km) erfassen. Betrachtet man aber schon den Abstand zwischen Erde und Sonne, so sind dies bereits unglaubliche 1.495.978.715 Mio. km. Zum sonnennächsten Stern, Proxima Centauri, sind es bereits etwa 39.735.068 Mio. km. Andere Maßeinheiten haben sich daher durchgesetzt.

Die Entfernung Erde–Sonne ist als eine *Astronomische Einheit* (AE) definiert, d. h. 1.495.978.715 Mio. km = 1 AE.

Bei einem *Lichtjahr* (ly) handelt es sich nicht um eine Zeiteinheit, sondern um ein Entfernungsmaß, nämlich die Strecke, die das Licht in einem Jahr im Vakuum zurücklegt. Wie viel ist das? Das lässt sich leicht berechnen. Die Lichtgeschwindigkeit in Vakuum beträgt $299.792{,}458\,\frac{\mathrm{km}}{\mathrm{s}}$. Folglich legt das Licht in einem

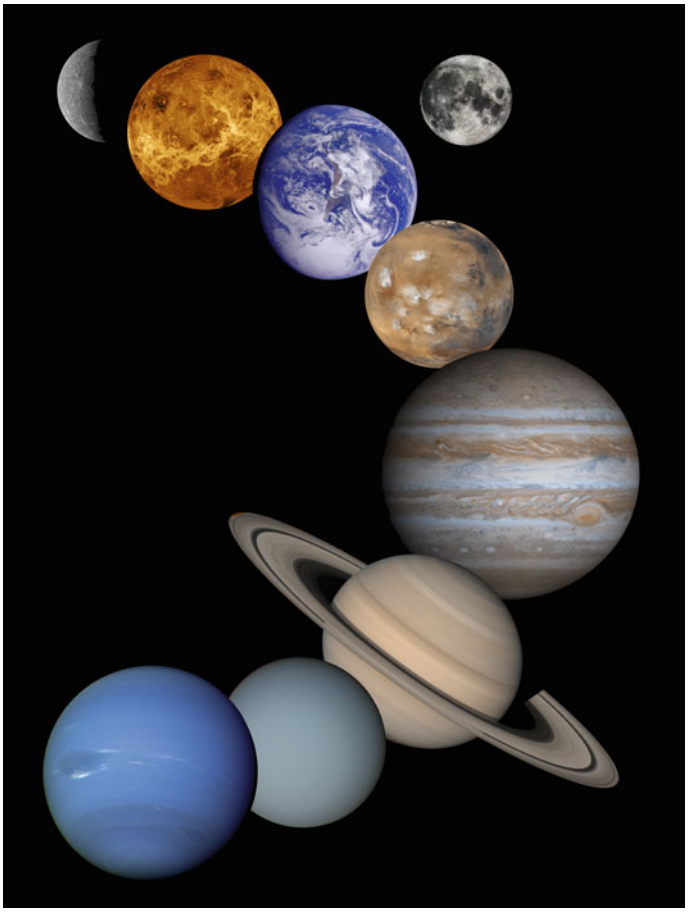


Abb. 1.1 Montage von Planetenbildern, die von verschiedenen Raumsonden des Jet Propulsion Laboratory (JPL) in Pasadena, CA aufgenommen wurden. Die Bilder zeigen (von oben nach unten): Merkur, Venus, Erde (und Mond), Mars, Jupiter, Saturn, Uranus and Neptun (Quelle: NASA/JPL)

Jahr etwa $9{,}46 \times 10^{12}$ km zurück (10^{12} ist dabei eine 1 gefolgt von 12 Nullen: 1.000.000.000.000). Mithilfe eines Lichtjahrs kann man die Entfernung zu Proxima Centauri nun mit etwa 4,2 Lichtjahren angeben, d. h., das Licht ist 4,2 Jahre dorthin unterwegs. Die Entfernung Erde–Sonne beträgt 8 Lichtminuten.

Ein weiteres Entfernungsmaß ist das *Parsec* (pc), welches 3,26 ly, 0,206 Mio. AE oder $3{,}09 \times 10^{13}$ km entspricht. In der Fachsprache sind Angaben in Parsec üblicher als in Lichtjahren.

Neben diesen größeren Körpern existieren noch eine Vielzahl kleinerer Objekte in unserem Sonnensystem, die sich teils auf geordneten, teils auf chaotischen Bahnen bewegen. Zu ihnen zählen die eingangs erwähnten Asteroiden. Eine Vielzahl befindet sich im Asteroidengürtel zwischen Mars und Jupiter. Asteroiden bevölkern aber auch das innere und äußere Sonnensystem. Sie können dabei die Bahnen der Planeten kreuzen oder gar mit ihnen kollidieren. Die Schwerkraft der Planeten beeinflusst deren Bahnen um die Sonne. Insbesondere Jupiter spielt hier eine entscheidende Rolle. Von Stabilität und Ordnung kann hier nur selten gesprochen werden.

Hunderttausende weiterer Objekte, die sich in ihrer Zusammensetzung zum Teil deutlich von Asteroiden unterscheiden, befinden sich in den äußeren Bereichen des Sonnensystems, das auch heute noch nahezu unerforscht ist. In diesen Regionen sind auch die Ursprünge der Kometen zu suchen, die hin und wieder durch das innere Sonnensystem wandern und ein imposantes Himmelsschauspiel bieten können.

Sogenannte Trojaner teilen zu Tausenden die Umlaufbahnen der meisten Planeten. Zwitterobjekte, die Zentauren, die sowohl Merkmale von Asteroiden als auch Kometen aufweisen, wandeln in der Region der Gasriesen.

Was ist mit den Monden? Viele von ihnen sind keinesfalls so kalt und langweilig wie früher angenommen. Es offenbart sich bei näherer Betrachtung eine unglaubliche Vielfalt. Wir finden vulkanisch aktive Monde wie Jupiters Begleiter Io. Europa, ebenfalls ein Begleiter Jupiters, besitzt vermutlich einen gigantischen Ozean aus flüssigem Wasser unter seiner vereisten Oberfläche. Titan, Saturns größter Mond, ist von einer Atmosphäre umhüllt. Einige Wissenschaftler gehen mittlerweile sogar so weit die Monde der Planeten als Orte möglichen Lebens in Betracht zu ziehen.

Diese komplexe Ansammlung von Objekten wirft zwangsläufig Fragen auf. Was wissen wir über sie? Wie konnte eine solche Vielfalt entstehen? Ja, wie entwickelte sich unser Sonnensystem überhaupt?

Wir wollen uns im Verlauf dieses Buches gemeinsam auf eine Reise hin zu den fernen, nahezu unbekannten Regionen des äußeren Sonnensystems begeben. Es werden sich uns fremde Welten bizarrer Schönheit offenbaren, von denen noch so viel im Dunkeln liegt. Bevor wir jedoch unsere Reise beginnen können, müssen wir uns erst einige Grundlagen aneignen, die wir für das weitere Verständnis benötigen.

Zunächst wollen wir uns genauer anschauen, wie unser Sonnensystem in all seiner Vielfalt entstand. Dies wird uns ermöglichen, unsere Reiseroute festzulegen. Anschließend stellen wir uns die Frage, wie wir überhaupt all die Kenntnisse erwerben konnten, die wir heute besitzen.

1.2 Wie alles begann

Schauen wir uns zunächst einmal unser Sonnensystem genauer an. Was uns dabei sofort ins Auge sticht, ist, dass sich die großen Planeten und ihre Monde nahezu in einer Ebene bewegen, der Bahnebene Erde-Sonne oder auch *Ekliptik* genannt. Sie weichen mit ihren nahezu kreisförmigen Umlaufbahnen nur geringfügig davon ab. Außerdem scheinen sie in der gleichen Richtung um die Sonne zu wandern und zwar *gegen* den Uhrzeigersinn.

Das Sonnensystem scheint wie ein perfektes Uhrwerk zu ticken. Das war auch die Vorstellung, die Immanuel Kant (1724–1804) und Pierre-Simon Laplace (1749–1827) im 18. Jahrhundert vorfanden. 1755 beschäftigte sich Kant in seinem Werk „Allgemeine Naturgeschichte und Theorie des Himmels" eingehend mit der Entstehungsgeschichte. Laplace zog unabhängig von ihm 1796 in „Exposition du système du monde" (franz. Darstellung des Weltsystems) ähnliche Schlüsse. Beide sollten es sein, die mit der sogenannten *Nebularhypothese* den ersten Grundstein für unser heutiges Verständnis der Entstehung unseres Sonnensystem legten. Sie waren überzeugt, dass die Sonne und die Planeten aus einer rotierenden Scheibe aus Gas und Staub entstanden waren in deren Zentrum sich die Sonne befand. Im Laufe der Zeit formten sich dann aus diesem Nebel die Planeten. Diese Lösung war elegant und fand rasche Verbreitung innerhalb der wissenschaftlichen Gemeinde.

Doch bald darauf traten erste Probleme auf. Wie des öfteren in der Wissenschaftsgeschichte, war auch diese Erkenntnis einem glücklichen Umstand geschuldet. Was beide, Laplace und Kant, zu jener Zeit nicht wussten, ist, dass das Sonnensystem keineswegs so ein perfektes Uhrwerk ist. Nicht alle Planeten rotieren in der gleichen Richtung, beispielsweise rotieren Venus und Uranus retrograd, d. h. rückläufig im Uhrzeigersinn.

Wie konnte ein solches Verhalten mit der Entwicklung aus einer rotierende Scheibe heraus erklärt werden? Es zeigte sich aber ein noch weitaus schwerwiegenderes Problem. Das aus der Nebularhypothese vorhergesagte Sonnensystem unterscheidet sich in einem Punkt gravierend von dem tatsächlichen, wie wir es beobachten können: in der Verteilung des Drehimpulses. Die Planeten besitzen etwa 99 % des gesamten Drehimpulses, wobei der Löwenanteil auf Jupiter entfällt. Lediglich 1 % des Gesamtdrehimpulses sind in der Sonne zu finden. Letztere nimmt jedoch einen Großteil der Masse ein (etwa 98 %) und bewegt sich sehr langsam. All das steht im Widerspruch zur Vorhersage: Die Sonne müsste schneller rotieren und auch einen wesentlich größeren Anteil des Drehimpulses beanspruchen.

Vor allem das Problem der Drehimpulsverteilung schien unlösbar und ließ Die Kant-Laplace'sche Theorie in Ungnade fallen. Erst in den 1960er-Jahren

sollte sie durch den sowjetischen Astronomen Victor Safranov (1917–1999) wiederbelebt werden, der die ursprüngliche Idee in seiner Arbeit „Evolution of the protoplanetary cloud and Formation of the Earth and the planets“ modifizierte. Das von ihm vorgeschlagene Solar-Nebula-Disk-Model (SNDM, engl. Sonnennebelscheibenmodell) etablierte sich rasch in der wissenschaftlichen Gemeinde und gilt heute, mit weiteren Modifikationen, als die allgemein akzeptierte Erklärung für die Entstehung von Sonnensystemen. Die heutigen Teleskope erlauben es uns, ferne Sternentstehungsgebiete, wie den Orionnebel (siehe Abb. 1.2), im Detail zu studieren. Und tatsächlich lässt sich manchmal ein Blick auf frühe Sonnensysteme erhaschen, die das Modell zu bestätigen scheinen (siehe Abb. 1.4).

Vor allem in der Zeit vor Safranov entwickelten sich weitere Theorien, deren wichtigste Vertreter, die Gezeitentheorien und Akkretionstheorien, in Kasten *Alternative Theorien* skizziert sind.

Alternative Theorien

Im Laufe der Zeit entwickelten sich weitere Theorien über die Entstehung unseres Sonnensystems, nicht zuletzt auch deshalb, weil die Nebularhypothese unlösbare Probleme aufzuweisen schien. Gegen die Nebularhyptohese bzw. das SNDM spricht, nach Ansicht der Verfechter der Alternativtheorien, das Problem der Drehimpulsverteilung. Wäre unsere Sonne tatsächlich durch den Kollaps einer Urwolke entstanden, so sollten die Planeten deutlich langsamer rotieren als sie es in Wirklichkeit tun. Demgegenüber müsste die Sonne sich im gleichen Maße schneller bewegen. Dies widerspricht allerdings den Beobachtungen. Wir können drei große Hauptgruppen von Alternativtheorien unterscheiden.

Die **Gezeitentheorien** basieren auf Arbeiten des Astronomen James Jeans aus dem Jahre 1917. Er schlug vor, dass sich die Planeten im Zuge eines nahen Vorbeiziehens eines anderen Sterns an unserer Sonne entwickelten. Durch die dadurch entstandenen Gezeitenkräfte wären große Mengen an Materie aus der jungen Sonne gezogen worden, die dann letztendlich in Form von Planeten kondensierte. Gegen eine solche Form der Entstehung spricht, dass eine solche sehr nahe Begegnung unserer Sonne mit einem anderen Stern sehr unwahrscheinlich ist (wie der Astronom Harold Jeffreys im Jahr 1929 zeigte). Zudem, so wandte der amerikanische Astronom Henry Norris Russell ein, würden diese Theorien keineswegs alle Probleme der Drehimpulsverteilung lösen. Im Gegenteil, sie würden weitere im Hinblick auf die äußeren Planeten aufwerfen.

Capture-Theorien gehen davon aus, dass sich das Sonnensystem ebenfalls durch Gezeitenwechselwirkungen entwickelte. M. M. Woolfson schlug 1964 vor, dass unsere Sonne einen Begleiter, einen Protostern geringer Dichte, hatte. Durch ihre größere Masse und damit stärker wirkende Gravitationskraft hätte die Sonne Materie aus dem Protostern gerissen. Aus dieser Materie hätten sich dann die Planeten gebildet. Folglich müssten sich die Sonne und die Planeten zu unterschiedlichen Zeitpunkten entwickelt haben. Dies widerspricht jedoch unseren Beobachtungen gemäß derer die Entstehung zeitgleich stattfand.

Abb. 1.2 Eine der detailreichsten Aufnahmen des Großen Orionnebels, einem noch heute aktiven Sternentstehunsgebiet (Quelle: NASA, ESA, M. Robberto (Space Telescope Science Institute/ESA) and the Hubble Space Telescope Orion Treasury Project Team).

Eine andere verbreitete Theorie geht von dem Einfluss einer dichten **interstellaren Wolke** aus, durch die unsere Sonne flog und dabei eine Hülle aus Staub und Gas absog, aus der sich dann die Planeten bildeten. Diese ursprünglich vom sowjetischen Astronomen Otto Schmidt vorgeschlagene Theorie löste das Problem der Drehimpulsverteilung. Viktor Safronov konnte jedoch zeigen, dass eine Entstehung der Planeten aus einer solch diffusen Hülle aus Staub und Gas nur sehr langsam geschehen wäre. Es hätte schlicht nicht genügend Zeit für die Bildung der Planeten zur Verfügung gestanden.

1.3 Von interstellarer Materie zur Urwolke

Wir können uns jetzt vorstellen, dass unser Sonnensystem und andere ähnliche Systeme aus rotierenden Scheiben aus Gas und Staub entstanden sind. Aber woher kommen diese Scheiben? Und wie kann sich aus einer solchen einfachen Struktur ein so facettenreiches Gebilde wie unser Sonnensystem entwickeln?

Anders als man zunächst einmal annehmen könnte, ist das Weltall zwischen den Sternen nicht leer. Es ist gefüllt mit Gas und Staub. Beides ist allerdings

recht dünn gestreut. Im Durchschnitt findet man etwa ein Atom pro Kubikzentimeter. Nur zum Vergleich: unsere Atmosphäre zum Beispiel besitzt auf Meereshöhe etwa $2{,}5 \times 10^{19}$ Teilchen pro Kubikzentimeter, ist also um ein Vielfaches dichter.

Man kann sich gut vorstellen, dass unter solchen Bedingungen eine Entstehung größerer Objekte wie Sterne nur schwer möglich wäre. Glücklicherweise ist die interstellare Materie nicht gleichmäßig verteilt. Es existieren Orte gehäufter Konzentration, sogenannte *Molekülwolken.* Diese Wolken können in ihrer Größe variieren. Zum einen gibt es diffuse, kleinere Wolken mit einem Durchmesser von einigen Parsec, die Materie von bis zu 100 Sonnenmassen enthalten. Auf der anderen Seite finden wir Riesenmolekülwolken(giant molecular clouds), die etwa $10^5 - 10^6$ Sonnenmassen vereinen und sich auf einem Raum von 100–1000 pc erstrecken. Etwa 80 % des molekularen Wasserstoffs (H_2) in unserer Milchstraße ist in solchen Riesenmolekülwolken zu finden. Eine ihrer bekanntesten Vertreterinnen ist die Orion-Molekülwolke, deren sichtbaren Teil wir bereits mit bloßem Auge am winterlichen Nachthimmel als Orionnebel wahrnehmen können (Abb. 1.2).

Zwischen diesen beiden Extremen, den Zwergwolken und den Riesenwolken, sind Wolken unterschiedlicher Größe beheimatet.

Eine dieser Wolken, die *Urwolke,* die vor etwa 4,6 Mrd. Jahren existierte, ist der Geburtsort unserer Sonne. Sie dehnte sich etwa 20 pc aus und setzte sich zu einem großen Teil (98–99 %) aus Wasserstoff und Helium, den ursprünglichen Überresten des Urknalls und der ersten Generation der Sterne zusammen. Den Rest bildeten schwerere Elemente und Moleküle, darunter Wasser (H_2O), Kohlenmonoxid (CO), Kohlenstoffdioxid (CO_2), verschiedene Kohlenwasserstoffe, Ammoniak (NH_3) und Siliziumverbindungen.

Woher kamen diese schwereren Verbindungen, die man auch heute noch in Molekülwolken vorfindet? Kurz nach dem Urknall entstand der Grundbaustein unseres Universums, der Wasserstoff. Er ist das einfachste Element, das lediglich aus einem Proton und einem Elektron besteht. Im Laufe der Zeit entstanden daraus die Galaxien und Sterne.

In Letzteren haben wir einen der „Schuldigen" für die Elementvielfalt zu suchen. Warum? In ihnen tobt die Kernfusion in deren Verlauf schwerere Atome „gebacken" werden. In unserer Sonne beispielsweise verschmelzen jeweils vier Wasserstoffatome zu einem Heliumatom, welches aus zwei Protonen und zwei Neutronen besteht. Hierbei wird Energie frei, die das „Sternenfeuer" antreibt. Durch diese Fusion entsteht also ein weiteres Element. Sterne in

der Spätphase ihres Lebens verändern ihr Verhalten. Wenn ihre Wasserstoffvorräte aufgebraucht sind können sie sich zu einem roten Riesen aufblähen, und ein Heliumbrennen kann einsetzen, bei dem Heliumkerne zu Kohlenstoff „verbrannt" werden. Abhängig von der ursprünglichen Masse, können anschließend weitere Fusionsprozesse stattfinden, die noch schwerere Elemente hervorbringen.

Am Ende ihres Lebens können Sterne Teile ihrer Materie an das Weltall abgeben. Besonders beeindruckend sind dabei Supernovae oder Novae, bei denen in gigantischen Explosionen das Sternmaterial in das All ausgestoßen wird (Abb. 1.3). Dieses ausgestoßene Material bildet schließlich den anorganischen Bestandteil der interstellaren Molekülwolken.

Die organischen Verbindungen in ihnen, wie die meisten Kohlenwasserstoffe, haben jedoch einen anderen Ursprung. Sie entstehen nicht in der Glut der Sterne, sondern später in der Kälte des Universums durch Akkretion und Anregungen durch ultraviolettes Licht, welches von nahen jungen Sterne kommt. In den Sternen selbst ist es zu heiß, als dass sich längere Molekülketten bilden könnten. Sie würden durch thermische Unruhe stets wieder auseinanderbrechen.

Abb. 1.3 M57, der berühmte Ringnebel im Sternbild Leier ist das Relikt eines Sternentods, in welchem in einer gewaltigen Explosion Teile der Gashülle des Sterns ins All abgestoßen wurden (Quelle: NASA, ESA and the Hubble Heritage (STScI/AURA)-ESA/Hubble Collaboration)

1.4 Von der Urwolke zum Sonnennebel

Wie entsteht nun aber aus der riesigen, unförmigen, diffusen Urwolke die Staub- und Gasscheibe, die wir für die Entstehung unseres Sonnensystems benötigen? Wie wir heute in anderen Sternentstehungsgebieten beobachten können (Abb. 1.4), neigen Molekülwolken dazu zu fragmentieren, d. h. in kleinere Teile auseinanderzufallen. Genau das geschah auch mit der Urwolke, wobei aus einem der Fragments schließlich unser Sonnensystem hervorgehen sollte. Doch warum zerfällt eine solche Wolke?

Diese Frage ist heute noch nicht endgültig beantwortet. Es gibt jedoch starke Hinweise darauf, dass Supernovae in der näheren Umgebung der Wolke eine der Ursachen sein könnten. Explodiert ein Stern, so werden hierdurch sehr starke Druckwellen ausgelöst, die sich durch den Raum bewegen. Man kann sich dies gut als Wellen vorstellen, die sich durch das Wasser bewegen,

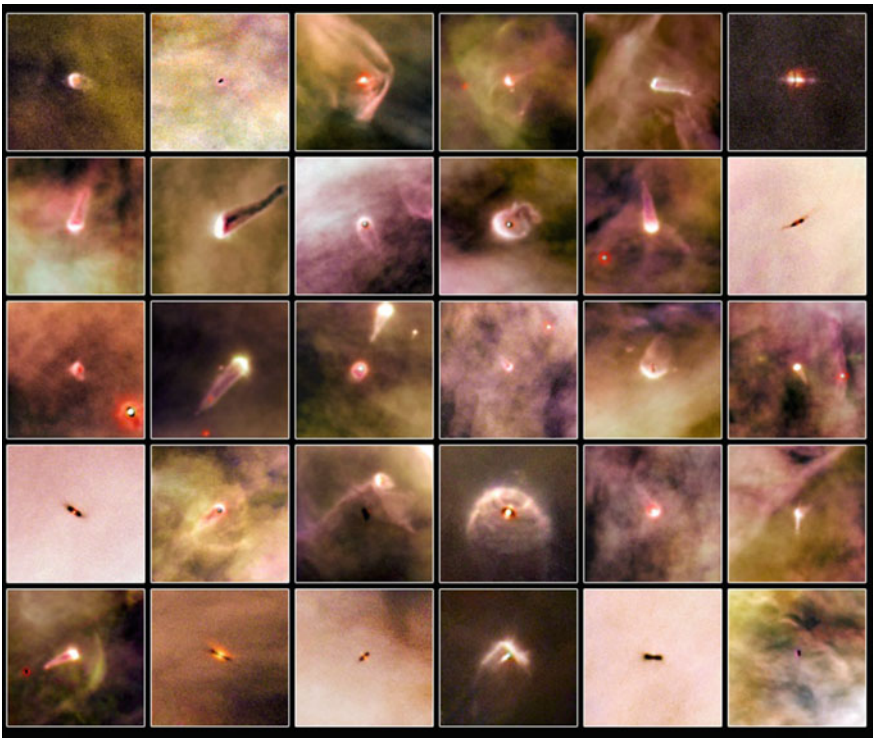


Abb. 1.4 Eine Auswahl aus 30 protoplanetaren Scheiben, die sich um neu entstandene Sterne im Orionnebel entwickelt haben. Diese äußerst detaillierten Aufnahmen gelangen mithilfe des Hubble-Weltraumteleskops und gewähren einen einmaligen Blick in die Geburtsstube junger Sternensysteme (Quelle: NASA/ESA and L. Ricci (ESO)).

nachdem man einen Stein hineingeworfen hat. Treffen solche Wellen auf eine Molekülwolke, so kommt es zu lokalen Verdichtungen, die sich schließlich von der Hauptwolke ablösen können.

Wahrscheinlich geschah genau dies auch im Falle unserer Urwolke. Neben den Schlüssen, die wir aus der Beobachtung anderer Entstehungsgebiete ziehen, gibt es noch ganz praktische Indizien aus unserem Sonnensystem, die dafür sprechen. Glücklicherweise steht uns Materie aus der Entstehungszeit unseres Sonnensystems zur Verfügung. Einschlüsse in Meteoriten, die etwa 4,6 Mrd. Jahre alt sind, weisen Spuren von Zerfallsprodukten von kurzlebigen Isotopen wie Fe^{60} auf, die sich nur in Supernovae bilden. Dementsprechend muss zu jener Zeit mindestens eine solche Sternexplosion in der Nachbarschaft der Urwolke geschehen sein. Andernfalls lässt sich das Vorkommen dieser Isotope nicht erklären.

Dadurch können wir aber auch noch mehr über die Wiege unseres Sonnensystems erfahren. Das Leben eines Sterns endet nur in einer Supernova, wenn dieser deutlich massereicher ist als unsere Sonne. Dies wiederum bedeutet aber, dass unser Zentralgestirn in einer Region entstanden sein muss, wo sich solche massereichen Sterne entwickeln konnten. Man nimmt heute an, dass unsere Sonne inmitten eines großen Haufens von etwa 1000 bis 10.000 Sternen, die sich auf einen Raum von 6,5 bis 19,5 Lichtjahren verteilten, ihren Ursprung nahm.

Aus der Urwolke spaltete sich ein etwa ein Parsec großes Fragment ab, welches sich durch den Einfluss der Schwerkraft weiter zu einem kompakteren Kern von 0,01 bis 0,1 pc zusammenzog. Der „Sonnennebel" war geboren.

1.5 Die Geburt der Sonne

Damit hatte die Entwicklung natürlich noch kein Ende gefunden. Die Schwerkraft wirkte unerbittlich weiter, hatte jedoch zumindest einen mächtigen Gegenspieler: die thermische Unruhe. Die Gas- und Staubteilchen bewegten sich wild innerhalb der Nebels in nahezu willkürlichen Richtungen. Die Masse des Sonnennebels war glücklicherweise groß genug, dass die Schwerkraft diese thermische Unruhe dominieren konnte. Folglich begann die Materie des Sonnennebels in Richtung des Zentrums, dem Ort der höchsten Dichte, zu stürzen.

Da aber der Nebel bereits einen gewissen, wenn auch minimalen Drehimpuls besessen haben musste, so fielen die einzelnen Teilchen nicht direkt Richtung Zentrum, sondern auf gekrümmten Bahnen. Die Wolke kollabierte. Da der Drehimpuls erhalten bleiben musste, stieg die Rotationsgeschwindigkeit

an. Die wirkenden Fliehkräfte sorgten dafür, dass sich der Sonnennebel zu einer dicken Scheibe abflachte. Ein Teil der Wolke kollabierte zunächst zu einer solchen *Akkretionsscheibe.* Weiterhin fiel aber Material aus der umgebenden Wolke auf die Scheibe ein und wurde allmählich aufgezehrt.

Das Material der Scheibe konzentrierte sich immer weiter im Zentrum. Dort entstand daher eine so hohe Materiedichte, dass die Teilchen häufiger zusammenstießen. Bei diesen Kollisionen wurde nun jeweils ein Teil der Bewegungsenergie (kinetische Energie) in Wärme umgewandelt. Das Zentrum, man spricht jetzt von einem *Protostern,* begann sich aufzuheizen. Je mehr Materie sich dort ansammelte, desto heißer wurde es und der Druck stieg.

Als eine Temperatur von etwa 3 Mio. Kelvin überschritten wurde, zündete das Sternenfeuer und unsere Sonne war geboren. Fortan tobte die Kernfusion. In diesem Prozess wird Energie in Form von Photonen frei, die sich dann durch die Sonne auswärts bewegen. Treffen die Photonen auf andere Teilchen, so erzeugen sie einen nach außen gerichteten *Strahlungsdruck,* der der nach innen gerichteten Schwerkraft entgegenwirkt. Sind diese beiden Kräfte gleich groß, wie im Fall unserer Sonne, so ist ein stabiler Zustand erreicht. Man spricht auch vom *hydrostatischen Gleichgewicht* (Abb. 1.5).

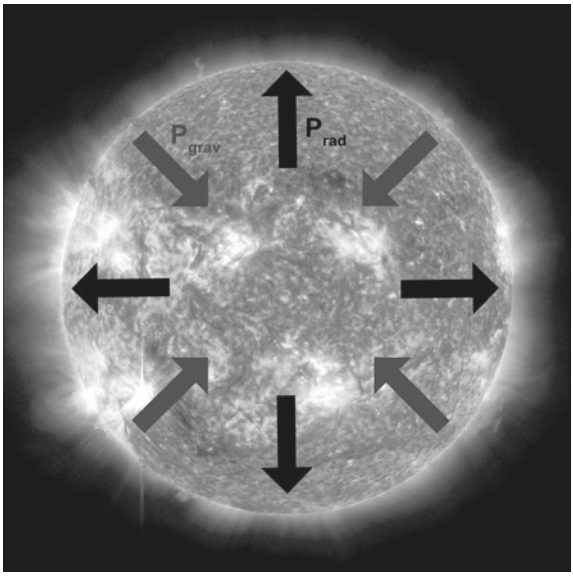


Abb. 1.5 Veranschaulichung des hydrostatischen Gleichgewichts. Dem Gravitationsdruck P_{grav} wirkt der Strahlungsdruck P_{rad} entgegen. Die Gravitation sorgt dafür, dass sich die Sonne weiter zusammenziehen möchte. Der Strahlungsdruck wirkt nach außen. Entspricht die Gravitation dem Strahlungsdruck, ist ein stabiler Zustand erreicht, wie er derzeit auch auf unserer Sonne herrscht (basiert auf Quelle: NASA/SDO)

1.6 Die Entstehung der Planeten

Die junge Sonne brannte und sandte ihre Strahlen aus. Sie hatte sich während ihrer Entstehung große Teile der sie umgebenden Materie einverleibt (etwa 99 %). Noch war sie aber von den Resten aus Gas und Staub, der *protoplanetaren Scheibe,* umgeben (Abb. 1.6). Aus diesem Gemisch winzigster Teilchen sollte sich schließlich die ganze Vielfalt der Planeten und Kleinkörper unseres Sonnensystems entwickeln.

Die Planeten unseres heutigen Sonnensystems sind jedoch nicht alle gleich. Vielmehr lassen sich zwei Gruppen unterscheiden. Da sind zum einen die terrestrischen Planeten, die vornehmlich aus Gestein bestehen und im inneren Sonnensystem beheimatet sind. Zum anderen bevölkern die Gas- und Eisriesen das äußere System. Anders als die terrestrischen Planeten besitzen diese Giganten womöglich nur einen kleinen festen Kern und eine riesige Hülle aus Gas. Aber nicht nur in der Zusammensetzung gibt es gravierende Unterschiede, sondern auch in Größe und Masse.

Die Planeten des inneren Sonnensystems (Merkur, Venus, Erde und Mars) kommen zusammen auf etwa zwei Erdmassen. Das wirkt fast vernachlässigbar klein gegenüber den knapp 410 Erdmassen, die alleine Jupiter und Saturn auf die Waage bringen. Die beiden Eisriesen Uranus und Neptun fügen dem nochmals etwa 32 Erdmassen hinzu. Tab. 1.1 zeigt die wichtigsten Unterschiedsmerkmale der Planeten unseres Sonnensystems.

Wie kam es jedoch zu dieser Zweiteilung? Waren die Voraussetzungen in der protoplanetaren Scheibe nicht überall gleich?

Abb. 1.6 Künstlerische Darstellung einer protoplanetaren Scheibe (Quelle: NASA/JPL-Caltech/T. Pyle (SSC))

Tab. 1.1 Übersicht über die Planeten des Sonnensystems mit einer Auswahl an charakteristischen Merkmalen

	Entfernung (AE)	Mittlerer Radius (km)	Masse (kg)	Dichte $\left(\frac{g}{cm^3}\right)$
Merkur	0,387	$2439{,}7 \pm 1{,}0$	$3{,}301 \times 10^{23}$ $0{,}055\ M_E$	5,427
Venus	0,723	$6051{,}8 \pm 1{,}0$	$4{,}869 \times 10^{24}$ $0{,}815\ M_E$	5,243
Erde	1,0	6371	$5{,}974 \times 10^{24}$ $1{,}0\ M_E$	5,515
Mars	1,524	$3389{,}5 \pm 0{,}2$	$6{,}419 \times 10^{23}$ $0{,}151\ M_E$	3,933
Jupiter	5,203	$69911 \pm 6{,}0$	$1{,}899 \times 10^{27}$ $317{,}8\ M_E$	1,326
Saturn	9,582	$58232 \pm 6{,}0$	$5{,}685 \times 10^{26}$ $95{,}152\ M_E$	0,687
Uranus	19,891	$25362 \pm 7{,}0$	$8{,}681 \times 10^{25}$ $14{,}536\ M_E$	1,27
Neptun	30,071	$24622 \pm 19{,}0$	$1{,}024 \times 10^{26}$ $17{,}147\ M_E$	1,638

In der Tat war die protoplanetare Scheibe in der Frühphase unseres Sonnensystems keineswegs homogen. Wir haben ja bereits gesehen, dass sich die Materie in erster Linie aus Wasserstoff und Helium zusammensetzte. Zusätzlich fand man aber auch schwerere Verbindungen vor. Die junge Sonne hatte nun einen entscheidenden Einfluss. In unmittelbarer Nähe unseres Zentralgestirns war es sehr heiß. Je weiter man sich von ihr entfernte, desto kühler wurde es. Das ist wie an einem Lagerfeuer. Je näher wir uns an ihm befinden, desto heißer ist es.

Nahe bei der Sonne war es zu heiß für flüchtige Elemente und Verbindungen wie Wasserstoff, Helium und Stickstoff, um zu kondensieren, d. h. in fester Form vorzuliegen. Sie wurden durch den Sonnenwind davongetragen. Dementsprechend existierten im inneren Bereich der Scheibe vor allem Metalle wie Eisen, Nickel und Aluminium sowie Silikate, die eine höhere Schmelztemperatur besitzen und nicht so leicht beweglich sind. Entfernt man sich weiter von der Sonne, so können bereits etwas leichter flüchtige Moleküle wie kohlenstoffhaltige Verbindungen kondensieren.

Jenseits der sogenannten *Eis-* oder *Schneelinie,* die im heutigen Asteroidengürtel zwischen Mars und Jupiter verläuft, können bereits Wasser und andere deutlich flüchtigere Verbindungen in gefrorener Form vorliegen. Dringt man noch weiter in die äußeren Bereiche vor, so können immer flüchtigere Moleküle gefrieren. Eine weitere markante Eislinie befindet sich zwischen

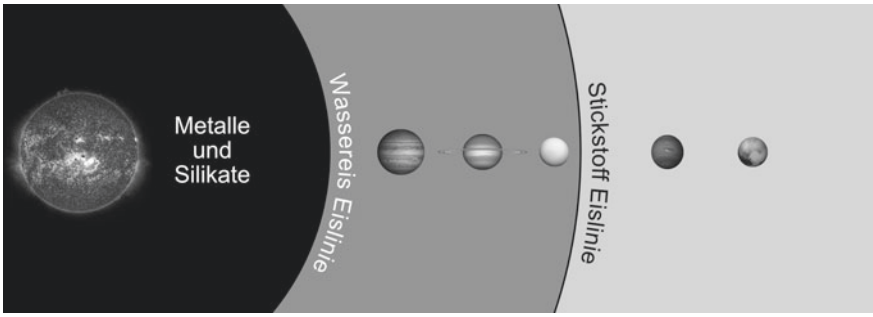


Abb. 1.7 Eislinien im Sonnensystem. In unterschiedlichen Bereichen des Sonnensystems können lediglich bestimmte Moleküle kondensieren. Je weiter wir uns von der Sonne wegbewegen, desto leichtere Stoffe können gefrieren

Uranus und Neptun. Sie markiert den Punkt, ab welchem das leichtflüchtige Element Stickstoff gefrieren kann. Abb. 1.7 gibt einen schematischen, nichtmaßstäblichen Überblick über die Struktur der protoplanetaren Scheibe. In dieser Verteilung der Materie, wie wir sie gerade gesehen haben, sind auch die Ursprünge für die beiden Populationen von Planeten zu suchen.

1.6.1 Terrestrische Planeten – Welten aus Stein

Heute geht man davon aus, dass der Mechanismus, der der Planetenbildung zugrunde liegt, die *Akkretion* ist. Dabei spielten die in der protoplanetaren Scheibe vorhandenen winzigen Staubpartikel eine entscheidenden Rolle.

Die Erde und die anderen terrestrischen Planeten unseres heutigen inneren Sonnensystems entstanden in eben jenem Bereich der protoplanetaren Scheibe, in welchem sich die metallischen bzw. silikatischen Elemente angesammelt hatten. Die steinigen Keimzellen für die Planeten waren also gelegt.

In einem ersten Schritt, der sogenannten *Agglomeration* verklebten einige Staubkörner miteinander zu Partikeln von wenigen Millimetern Größe. Dieser Vorgang setzte sich fort, bis auf diese Weise schließlich Objekte von mehreren Kilometern Durchmesser entstanden waren: die *Planetesimale.*

Diese Körper waren nun aber zu groß, als dass sie noch durch einfaches Verkleben wachsen konnten. Die Gravitation entfaltete mit zunehmender Masse ihre Wirkung und dominierte über das Verkleben. Die Planetesimale beeinflussten sich bei ihren Bewegungen gegenseitig. Immer wieder kam es zu Kollisionen. Viele davon verliefen „tödlich" für die Beteiligten und endeten in ihrer Zerstörung. Andere hingegen führten zum weiteren Wachstum (Akkretion).

Die Objekte wuchsen zu *planetarischen Embryos* heran, deren Durchmesser von einigen hundert Kilometern hin zu einigen Tausend Kilometern reichte.