

Heft 10

ELEMENTARTEILCHEN, KOSMOLOGIE: PHYSIK GANZ KLEIN / GANZ GROSS (-)

Das in diesem Heft dargestellte Teilgebiet der Physik hat unbestritten einen besonders niedrigen unmittelbaren Bezug zum gesellschaftlichen Alltag. Dessen ungeachtet finden gerade Forschungsergebnisse aus der Elementarteilchenphysik und der Kosmologie immer wieder ein besonders starkes Interesse einer breiten Öffentlichkeit. Die Entdeckung des Higgs-Bosons Anfang 2012 (s. Abschnitt 10.1.2) z.B. dominierte mehrere Tage lang die Schlagzeilen der Fernsehnachrichten und der Tageszeitungen.

Ich habe mich weder während meines Studiums noch während meiner beruflichen Praxis intensiver mit diesem Gebiet auseinandergesetzt. Meine nun folgende Darstellung ist also das Ergebnis meiner eigenen, etwas oberflächlichen Studien im Laufe der letzten Jahre. Zwangsläufig wird daher der Text meist relativ kurz und summarisch gehalten sein.

Der logische Zusammenhang zwischen der Physik der Elementarteilchen und der Kosmologie ist enger als man zunächst vermuten könnte, obwohl die jeweils typischen Linearabmessungen extrem unterschiedlich sind ($10^{-17} \cdot m$ bzw. $10^{26} \cdot m$). Das Experimentierfeld der Elementarteilchenphysiker sind sicherlich insbesondere die im Zuge des gerätetechnischen Fortschritts immer größer ausfallenden Teilchenbeschleuniger. Andererseits ist aber - wie wir noch sehen werden - jede Theorie des frühen Kosmos, gestützt auf den Ergebnissen, die uns die in immer fernere Welten vordringenden Teleskope ermöglichen, immer eingebettet in eine Theorie der Elementarteilchen und/oder umgekehrt.

10.1 Physik der Elementarteilchen (-)

Bereits in der Vorstellung der Naturphilosophen des vorchristlichen Altertums wies die in der Natur vorkommende Materie keine bis zu beliebig kleinen Dimensionen kontinuierlich verteilte Struktur auf, sondern bestand aus gewissen, nicht mehr weiter teilbaren Bausteinen. Bekannt geworden sind in diesem Zusammenhang insbesondere die Abhandlungen von *Demokrit* (* 460 v.Chr. in Abdera/Thrakien (heute Griechenland); † 371 v.Chr. ebenda). Die auf ihn zurückgehende Wortschöpfung $\alpha\tau\omicron\mu\omicron\varsigma$ (griech. *unzerschneidbar*) für die von ihm postulierten Grundbausteine der Materie hat sich bis heute erhalten. Allerdings wird sie heute zur Kennzeichnung der

Grundbausteine der **chemischen Elemente** verwendet, obwohl wir wissen, dass als Grundbaustein eines bestimmten makroskopischen Materials wie z.B. Wasser oder Eisen das zugehörige Molekül anzusehen ist. Diese sind ihrerseits aus den Atomen der chemischen Elemente zusammen gesetzt.

Gegen Ende des 19. Jahrhunderts wurde jedoch auf Grund neuer experimenteller Fakten offensichtlich, dass diese *Atome* keinesfalls *unteilbar* sind, sondern ihrerseits aus mehreren unterschiedlichen, noch elementareren Teilchen aufgebaut sind. Seitdem wird der Begriff *Elementarteilchen* in unterschiedlicher Bedeutung verwendet. Einige Wissenschaftler wollen diesen Begriff nur denjenigen Teilchen zubilligen, die (zumindest nach dem jeweils aktuellen Stand der Forschung) nicht mehr in andere Teilchen aufgetrennt werden können. Andere Autoren bezeichnen pragmatisch **alle** realen (durch Experimente bestätigten) oder in Theorien hypothetisch postulierten Teilchen **von subatomaren geometrischen Abmessungen** als **Elementarteilchen**. Ich werde mich ebenfalls weitgehend dieser pragmatischen Vorgehensweise anschließen. Allerdings werde ich die durch die Quark-Theorie postulierten noch kleineren Bausteine immer als *Quarks*, und nicht etwa gelegentlich auch als Elementarteilchen bezeichnen.

Ich beginne die Darstellung der Elementarteilchen-Physik mit einer Aufzählung der etwa 1960, also kurz vor der Formulierung des Quark-Modells, bekannten Elementarteilchen und ihrer wichtigsten physikalischen Kenndaten, s. nachfolgenden Abschnitt 10.1.1. Danach werden wir die bereits mehrfach geführte (s. z.B. Abschnitt 3.3.11) Diskussion der Lokalisierung von kontinuierlichen Ladungsverteilungen und den damit verbundenen Energieumsätzen wieder aufgreifen und vertiefen, s. Abschnitt 10.1.2. Es folgt eine Diskussion der für den Aufbau der Elementarteilchen verantwortlichen Wechselwirkungen, die sich an dieser Stelle (noch) weitgehend auf die phänomenologische Beschreibung der experimentell belegten Eigenschaften dieser Wechselwirkungen beschränkt. Auf diese Weise vorbereitet werden wir gemeinsam die Ästhetik des Quark-Modells bewundern, durch das diese wenig überschaubare Vielfalt der über 300 Elementarteilchen auf $2 * 6$ fundamentale Teilchen reduziert wird, zzgl. deren Antiteilchen sowie $1 * 6$ Austauscheteilchen, die die Wechselwirkung zwischen diesen Teilchen bewirken. Aus diesen neuen fundamentalen Teilchen lassen sich dann insbesondere alle experimentell bereits gefundenen Elementarteilchen (im oben genannten Sinne) *zusammensetzen*.

Den Abschluss dieses Kapitels bildet eine (sehr gedrängte) Darstellung der quantitativen Theorie der starken Wechselwirkung, der sog. *Quantenchromodynamik*.

10.1.1 Der Elementarteilchen-Zoo (-)

Die Ära der experimentellen Entdeckung von Elementarteilchen begann 1897: Im Zuge von sog. Kanalstrahl-Experimenten (s. Absatz S. 1407) fand John Thomson auch Spuren von Teilchen mit einer **negativen** elektrischen Ladung und einer Masse, die um mehrere Größenordnungen kleiner war als die Masse des leichtesten

Atoms (Wasserstoff): Er hatte das *Elektron* entdeckt. Kurz danach, 1898 entdeckte Wilhelm Wien durch ähnliche Experimente das *Proton* (von $\pi\rho\tau\omicron\nu$ (griech.) *das Erste*). Eine Vielzahl weiterer Elementarteilchen fand man durch Analyse der kosmischen Strahlung (s. Abschnitt 10.4.1) Dieses sehr erfolgreiche Konzept für die Suche nach neuen Elementarteilchen setzte als erster der britische Experimentalphysiker *Donald H. Perkins* (* 1925 in England; heute Emeritus des St. Catherine's College in Oxford) ein und entdeckte auf diese Weise 1947 das π^- -*Meson* sowie in demselben Jahr das κ -Meson oder *Kaon*. 1953 entdeckte der amerikanische Physiker *Carl David Anderson* (* 1905 in New York; † 1991 in San Marino/Cal. (USA)) auf diese Weise das Σ^- -Teilchen ([33]). Etwa ab 1960 konzentrierte sich die experimentelle Elementarteilchen-Forschung dann vorwiegend auf geeignet konstruierte Kollisionsexperimente mit in Teilchenbeschleunigern (s. Abschnitt 10.5.2) erzeugten hochenergetischen Teilchenströmen. Einige Meilensteine in dieser Entwicklung waren die Entdeckung

- des Ω^- -Teilchens 1964 am Brookhaven National Laboratory in einer Blasenkammer;
- des Ψ -Teilchens (gesprochen *psi*) 1974 nahezu zeitgleich am Stanford Linear Accelerator durch die Arbeitsgruppe von *Burton Richter* (* 1931 in New York; heute Emeritus der Stanford University Cal. (USA)) und am Brookhaven National Laboratory durch die Gruppe von *Samuel Chao Chung Ting* (* 1936 in Ann Arbor/MI (USA); heute MIT Cambridge/Mass. (USA)); Richter und Ting erhielten hierfür den Nobelpreis in Physik 1976;
- der W^+ -, W^- - und Z^0 -Eichbosonen 1983 am CERN durch die Arbeitsgruppe des UA1-Detektors.

Bis ca. 1965 war so die Anzahl der experimentell nachgewiesenen Elementarteilchen auf ca. 300 angewachsen. Zwischen diesen Teilchen ließ sich nur in beschränktem Umfang ein logischer Zusammenhang bzw. eine Strukturierung ihrer Eigenschaften herstellen bzw. eine Systematik in den zwischen ihnen möglichen Umwandlungs-Reaktionen. Diese Systematik äußerte sich primär darin, dass man jedem Elementarteilchen eine (oder mehrere) ganzzahlige Kennzahl(en) in einer Weise zuordnen konnte, dass für jede dieser Kennzahlen deren Summe bei jeder zulässigen Umwandlungs-Reaktion erhalten blieb. Die wichtigsten dieser Kennzahlen sind die *Baryonenzahl* B und die *Leptonenzahl* L . Durch diese Kennzahlen wird die Gesamtheit der Elementarteilchen in *Familien* aufgeteilt: So umfasst die Familie der *Baryonen* (von $\beta\alpha\rho\iota\omicron\sigma$ (griech.) schwer) alle Elementarteilchen mit einer Baryonenzahl $|B| > 0$. Entsprechend gilt für alle zu der Familie der *Leptonen* (von $\lambda\epsilon\pi\tau\omicron\sigma$ (griech.) leicht, fein) gehörenden Elementarteilchen die Bedingung $|L| > 0$. Eine dritte Klasse von Elementarteilchen bildet die Familie der *Mesonen* (von $\mu\epsilon\sigma\omega\sigma$ (griech.) die Mitte). Sie erhielt ihren Namen auf Grund ihrer Ruhemasse, die zwischen der Ruhemasse des Elektrons und der eines Nukleons liegt. Diese Art der

Aufteilung erwies sich jedoch als widersprüchlich, so dass sie mit der Formulierung des sog. *Quarkmodells* modifiziert wurde, s. Abschnitt 10.1.6.

Die nachfolgende Tabelle zeigt eine Auswahl dieser Elementarteilchen und ihre wichtigsten physikalischen Kenndaten. Die zu jedem Teilchen ebenfalls existierenden Antiteilchen habe ich nicht explizit aufgeführt. Die Bedeutung der in der untersten Zeile angegebenen Symbole werde ich erst im Abschnitt 10.1.6 erläutern.

Name	n_0^1	p_1^1	e^-	μ^-	τ^-	π^+
Q/Q₀	0	+1	-1	-1	-1	+1
M₀·c₀²/MeV	939,6	938,3	0,511	105,66	1777	139,6
S/(ħ/2)	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	0
⟨D⟩/fm	1,7	1,7	2,82			
em-WW	×	×	×	×	×	×
starke-WW	×	×	—	—	—	×
schw-WW	×	×	×	×	×	×
grav-WW	×	×	×	×	×	×
τ_{Zerfall}/s	885,7	> 10 ⁴¹	> 10 ³²	2,20 · 10 ⁻⁶	2,91 · 10 ⁻¹³	2,60 · 10 ⁻⁸
Aufbau	<i>udd</i>	<i>uud</i>	—	—	—	<i>u\bar{d}</i>
entdeckt:	1932	1898	1897	1936	1975	1947

Name	κ^+	Ψ^+	Σ^-	Ξ^0	Λ^0
Q/Q₀	+1	+1	-1	0	0
M₀·c₀²/MeV	493,7	3097	1197	1314,9	1115,7
S/(ħ/2)	0		1/2	1/2	1/2
⟨d⟩/fm					
em-WW	×	×	×	—	—
stark-WW	—	×			
schw-WW	×	×			
grav-WW	×	×	×	×	×
τ_{Zerfall}/s	1,24 · 10 ⁻⁸	7,06 · 10 ⁻²¹	1,5 · 10 ⁻¹⁰	2,91 · 10 ⁻¹⁰	2,63 · 10 ⁻¹⁰
Aufbau	<i>u\bar{s}</i>	<i>c\bar{c}</i>	<i>dds</i>	<i>uss</i>	<i>uds</i>
entdeckt:	1947	1974	1956	1959	1950

Name	Δ^-	Δ^{++}	Υ	Σ^0	η	Σ^+
Q/Q₀	-1	+2	0	0	0	+1
M₀·c₀²/MeV	1.232	1.231	9.460	1.192	547	1.189
S/($\hbar/2$)	3/2	3/2		1/2		1/2
⟨d⟩/fm						
em-WW	×	×	—	—	—	×
stark-WW		×	×	×	×	×
schw-WW		×	×			
grav-WW	×	×	×	×	×	×
τ_{Zerfall}/s	$5,58 \cdot 10^{-24}$	$5 \cdot 10^{-24}$	$1,21 \cdot 10^{-20}$	$6 \cdot 10^{-20}$	10^{-25}	$8 \cdot 10^{-11}$
Aufbau	<i>ddd</i>	<i>uuu</i>	$b\bar{b}$	<i>uds</i>	$u\bar{u}/d\bar{d}/s\bar{s}$	<i>uus</i>
entdeckt:			1977	1956	1958	1953
Name	Ω^-	Ξ^-	Δ^+	Δ^0		
Q/Q₀	-1	-1	+1	0		
M₀·c₀²/MeV	1.672,5	1.321	1.232	1.232		
S/($\hbar/2$)	3/2		0	0		
⟨d⟩/fm						
em-WW	×	×	×	—		
stark-WW	×	×	×	×		
schw-WW						
grav-WW	×	×	×	×		
τ_{Zerfall}/s	$8,21 \cdot 10^{-11}$	$1,6 \cdot 10^{-10}$	$5,58 \cdot 10^{-24}$	$5,58 \cdot 10^{-24}$		
Aufbau	<i>sss</i>	<i>dss</i>	<i>uud</i>	<i>udd</i>		
entdeckt:	1964	1952	1952	1952		

In den nun folgenden Absätzen gehe ich etwas näher ein auf die wichtigsten Eigenschaften derjenigen Elementarteilchen, die für die Physik jenseits der Theorie der Elementarteilchenphysik meist alleine relevant sind, nämlich das Proton, das Neutron und das Elektron.

Das Proton (-/-)

(XXX: Der Text des Absatzes *Das Proton* ist noch nicht verfügbar.)

Das Neutron (-/-)

(XXX: Der Text des Absatzes *Das Neutron* ist noch nicht verfügbar.)

Das Elektron (-/-)

(XXX: Der Text des Absatzes *Das Elektron* ist noch nicht verfügbar. In ihm wird auch die nachfolgende Abb. und der sie erläuternde Text aufgehen:)

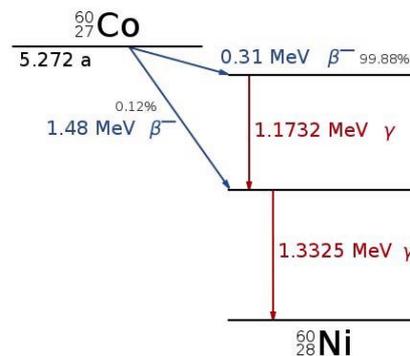


Abb. 1 Zerfalls-Schema des radioaktiven Isotops Co_{27}^{60}

10.1.2 Die Ruhemasse der Elementarteilchen (*)

Im Abschnitt 10.1.1 haben wir dargelegt, welche große Anzahl unterschiedlicher Elementarteilchen in dafür geeignet ausgelegten physikalischen Experimenten gefunden werden. Jeder dieser Teilchensorten ist ein Satz spezifischer, dieser Teilchensorte charakterisierender physikalischer Eigenschaften zugeordnet. Von diesem Satz physikalischer Größen betrachten wir nun die Ruhemasse. Alle Elementarteilchen, die sich nur mit einer endlichen Geschwindigkeit $v < c_0$ bewegen können, besitzen genau eine wohl definierte Ruhemasse $M(v = 0)$. Aus diesem Satz von ca. 300 Zahlenwerten ist keinerlei einfach strukturierte Systematik ableitbar. Von einer Theorie der Elementarteilchen, die ihren Namen verdient und deutlich über das reine Ordnen von experimentellen Daten hinaus geht, werden wir aber verlangen, dass sie alle diese Zahlenwerte nicht nur hinnimmt, sondern dass sie - auf der Basis noch zu entwickelnder Strukturierungskonzepte - das Handwerkzeug bereitstellt, um alle diese Zahlenwerte, oder zumindest fast alle zu **berechnen**. Die ersten orientierenden Überlegungen, die uns die Richtung zur Entwicklung dieser Theorie aufzeigen, werde ich in diesem Abschnitt darlegen.

Wir beginnen unsere Überlegungen am Beispiel des Protons. Dieses trägt eine wohlbestimmte Gesamtladung $Q = 1 \cdot Q_0$. Für die nun folgende Diskussion nehmen wir einmal an, dass diese Gesamtladung bis hinein in den Bereich der geometrischen Abmessungen, wie sie in der Elementarteilchenphysik auftreten, kontinuierlich verteilt sein kann. Wie wir bereits im Abschnitt 4.3.4 erkannt haben, kann dann aber die Ladung des Protons nicht auf ein beliebig kleines Volumen konzentriert sein, da sonst die mit dieser Ladungsverteilung verbundene elektrostatische Feldenergie über alle Grenzen hinweg anwachsen würde. Da andererseits diese Feldenergie auch bei jeder mechanischen Bewegung fest mit der Ortskoordinate des Protons (z.B. dem Schwerpunkt seiner Ladungsverteilung) verbunden ist, bildet sie einen Teil der Ruhemasse (oder, was dasselbe ist, der Ruheenergie) des Protons. Wir berechnen nun die geometrische Ausdehnung des Protons, die sich ergibt, wenn wir seine gesamte

Ruhemasse als dessen elektrische Feldenergie deuten. Hierzu verknüpfen wir die Gl. für die Feldenergie einer über das Volumen einer Kugel vom Radius R homogen verteilten Ladung Q (Gl. 4.190)

$$E_{\text{el.Feld}}(Q) = \frac{3}{5} \cdot \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0} \cdot \frac{Q^2}{R} \quad (10.1)$$

mit dem Zusammenhang zwischen Masse und Energie (Gl. 3.970) und erhalten unmittelbar

$$D = 2 \cdot R = \frac{6}{5} \cdot \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0} \cdot \frac{Q^2}{M_0 \cdot c_0^2} \Rightarrow \quad (10.2)$$

$$D_{\text{Proton}} = 1,54 \cdot 10^{-3} \cdot fm \quad (10.3)$$

Der aus Elektron-Proton-Streuxperimenten bestimmte Durchmesser des Protons beträgt jedoch

$$D_{\text{Proton}} = 1,7550 \cdot fm \quad (10.4)$$

Demzufolge beträgt die elektrische Feldenergie nur

$$E_{\text{el.Feld}}(\text{Proton}) = M_0 \cdot c_0^2 \cdot \frac{1,54 \cdot 10^{-3} \cdot fm}{1,6836 \cdot fm} = M_0 \cdot c_0^2 \cdot 0,878 \cdot 10^{-3} \quad (10.5)$$

Dieser substantielle Unterschied zwingt uns dazu, einen weiteren, sogar dominanten Mechanismus anzunehmen, der die noch fehlenden 99% der Ruhemasse des Protons festlegt.

Wir stellen nun die Frage nach der *Stabilität* der von uns als *Proton* bezeichneten homogenen kugelförmigen Ladungsverteilung mit einem Durchmesser gem. Gl. 10.4. Warum konzentriert sich diese Ladung auf dieses kleine Volumen, obwohl es dabei ein elektrisches Feld der Energie $1,68 \cdot MeV$ aufbauen muss? Und warum kommt diese Konzentration bei genau diesem Wert $1,7550 \cdot fm$ für seinen mittleren Durchmesser zum Stillstand? Diese Fragestellung hat eine enge Verwandtschaft zu der im Abschnitt 7.2.3 gestellten Frage nach der Stabilität der Atome. Es hat sich nur im nun diskutierten Fall das Vorzeichen der betrachteten Feldenergien herumgedreht: Bei dem Wasserstoff-Atom, aufgebaut aus einem elektrisch negativ geladenen Elektron und einem elektrisch positiv geladenen Proton, ergab sich die Annäherung der beiden Teilchen aus der elektrostatischen Wechselwirkung, und wir suchten nach einer Erklärung für die Begrenzung dieser Kontraktion auf ein wohl bestimmtes endliches Volumen. Bei dem Proton als solchem suchen wir bereits nach einer Erklärung für die anfängliche Ladungskonzentration. Es muss offenbar zusätzlich zur in diesem Fall abstoßenden elektrostatischen Wechselwirkung eine anziehende Wechselwirkung existieren, die in einem gewissen Bereich der geometrischen Ausdehnung der Ladungswolke gegenüber der elektromagnetischen Wechselwirkung dominiert. Als Ursache für die Begrenzung der Kontraktion auf das für das Proton typische Volumen sehen wir als Arbeitshypothese wieder die Lokalisationsenergie an. Damit diese wirksam werden

kann, müssen wir dann aber die Existenz von mindestens 2 neuen Teilchen postulieren, aus denen das Proton aufgebaut ist. Wie wir im Abschnitt 10.1.6 sehen werden, ist das Proton aus 3 dieser neuen Teilchen aufgebaut. Die quantenmechanischen Zustände, die dieses 3-Teilchensystem annehmen kann, ergeben sich dann überwiegend aus der Struktur dieser neuen Wechselwirkung. Sie ist mit Sicherheit attraktiv und hat nur eine kurze Reichweite. Diese Aussage lässt sich aus Proton-Elektron-Streuexperimenten ausreichend hoher Energie schließen ([3]). Die zusätzlich auftretende elektromagnetische Wechselwirkung darf dann als Störung dieses allein aus der starken Wechselwirkung errechneten Zustands aufgefasst werden. Die Ruhemasse des Protons ist dann mit der Energie des Grundzustands dieses Systems identisch.

Wir führen nun eine analoge Diskussion für das Elektron. Seine Gesamtladung Q ist mit der des Protons identisch, seine Ruhemasse beträgt jedoch nur knapp $1/2000$ der Ruhemasse des Protons. Wenn wir wieder annehmen, dass diese Gesamtladung bis hinein in den Bereich der geometrischen Abmessungen, wie sie in der Elementarteilchenphysik auftreten, kontinuierlich verteilt sein kann, und wenn wir überdies wieder seine gesamte Ruhemasse als dessen elektrische Feldenergie deuten, dann erhalten wir für den Durchmesser des Elektrons wieder einen Ausdruck von der Form der Gl. 10.2. Wegen des veränderten Zahlenwertes für M_0 ergibt sich nun der Wert

$$D_{\text{Elektron}} = 2,82 \cdot fm \quad (10.6)$$

Die für das Elektron formulierte Version der Gl. 10.2, allerdings ohne den von mir aus den klassischen Gl.-en berechneten Vorfaktor $\frac{6}{5}$, wird in der Literatur meist als die Gl. für den *klassischen Elektronendurchmesser* bezeichnet. Im Fall des Elektrons geben jedoch alle bisher (2011) durchgeführten Streuexperimente keinerlei Hinweise darauf, dass das Elektron eine inhomogene innere Struktur aufweise und daher aus einer gewissen Anzahl neuer Teilchen aufgebaut sei. Damit verliert auch der Begriff der Lokalisationsenergie seine Relevanz. Das Elektron ist daher ein quantenmechanischer Zustand mit wohl definierten Werten eines Satzes physikalischer Variablen

$$\text{Ladung } Q_0 ; \text{ Spin } s ; \dots \quad (10.7)$$

Um zu präzisieren, dass es sich bei dem betrachteten Zustand um ein Elektron handelt, ergänzen wir noch die sog. *Leptonenzahl* L . Dieser ordnen wir in diesem Fall den Wert $+1$ zu,

$$L_{\text{Elektron}} = +1 \quad (10.8)$$

Weitere, auf anderen Fakten und/oder Zahlenwerten basierende Aussagen über die Natur dieses Zustands *Elektron* können auf der Grundlage heute (2011) akzeptierter Theorien (noch) nicht gemacht werden. Wir sind daher z.B. auch noch nicht in der Lage, den genauen Zahlenwert für die Ruhemasse M_0 des Elektrons zu berechnen.

(XXX: Der an dieser Stelle noch vorgesehene weitere Text ist noch nicht verfügbar.)

Auch bei dem Aufbau einer neuen Theorie der Elementarteilchen, die insbesondere den inneren Aufbau des Protons und des Neutrons beschreiben soll, verbleiben die 6 Leptonen

$$e^- ; \nu_e ; \mu ; \nu_\mu ; \tau ; \nu_\tau \quad (10.9)$$

und ihre zugehörigen 6 Antiteilchen als **nicht weiter aufteilbare Elementarteilchen** in der Theorie.

Das bisher dargelegte Konzept zur Deutung der Ruhemasse eines Elementarteilchens hat einen schwerwiegenden und grundsätzlichen Mangel: Durch die Deutung eines Elementarteilchens als den Grundzustand eines bestimmten quantenmechanischen Systems unter Einschluss der jeweils relevanten Wechselwirkungen kann höchstens die Energie bestimmt werden, die bei der Bildung dieses Zustands aus den jeweiligen separierten Bausteinen frei wird, nicht aber die Ruhemasse dieser Bausteine selbst. Es stellt sich daher die grundsätzliche Frage nach der Ursache für die Ruhemasse dieser Bausteine. Zur Lösung dieses Dilemmas schlug der britische Physiker *Peter Higgs* (* 1929 in Wallsend b. Newcastle/Engl.; heute Emeritus in Edingburgh) 1964 die Existenz eines weiteren Feldes vor, das mit den meisten dieser Bausteine wechselwirkt, aber jeweils unterschiedlich stark. Unabhängig von ihm und nahezu zeitgleich veröffentlichten andere Forschungsgruppen weitgehend analoge Hypothesen. An diesen Arbeiten beteiligt waren insbesondere:

- François Englert (* 1932 in Etterbeek (Belgien); heute em. Prof. de l'Université Libre de Bruxelles);
- Robert Brout (* 1928 in New York; † 2011 als em. Prof. de l'Université Libre de Bruxelles);
- Gerald Stanford Guralnik (* 1936 in Cedar Falls/Iowa; heute em. Prof. der Brown University in Providence/Rhode Island);
- Carl Richard Hagen; (* 1937 in Chicago; heute em. Prof. der University of Rochester/NY); und
- Thomas Walter Bannermann-Kibble (* 1932 in Madras (Indien); heute em. Prof. des Imperial College London).

Ungeachtet dieser heute unbestrittenen wissenschaftshistorischen Fakten wird das diesem Feld zugeordnete Bose-Teilchen allgemein als *Higgs-Boson* bezeichnet. Seit vielen Jahren suchen eine Reihe von Forschungsgruppen weltweit nach Hinweisen für die reelle Existenz dieses hypothetischen Teilchens. Theoretische Abschätzungen sagten voraus, dass es eine Ruhemasse von mindestens $100 \cdot GeV$ habe. Am 04.07.2012 wurde nun in einer Pressemitteilung der CERN-Leitung die Entdeckung eines Teilchens mit $M_0 = 127 \cdot GeV$ und dem Zerfallskanal

$$H^0 \rightarrow Z^0 + \text{virtuelles } Z\text{-Boson} \quad (10.10)$$

$$\rightarrow e^+ + e^- \quad (10.11)$$

mitgeteilt. Weitere, von der Theorie vorhersagte Zerfallskanäle werden noch untersucht. Die wissenschaftliche Welt ist sich heute (2013) einig, dass dieses Teilchen mit großer Wahrscheinlichkeit als das lang gesuchte Higgs-Boson anzusehen ist. Meiner Kenntnis nach hat es noch keine einheitliche Kennzeichnung erhalten. Ich werde es b.a.w. mit dem Buchstaben H^0 kennzeichnen.

Higgs und Englert erhielten für ihre theoretischen Arbeiten zu diesem Mechanismus den Nobelpreis für Physik 2013.

10.1.3 Die starke und die schwache Wechselwirkung (-/-)

(XXX: Der Text des Abschnitts *Die starke und die schwache Wechselwirkung* ist noch nicht verfügbar.)

10.1.4 Neutrinos (-)

Neutrino-Physik ist die Kunst, aus der Beobachtung von nichts viel zu lernen.

(Haim Harari, israelischer Elementarteilchenphysiker (* 1940 in Jerusalem; heute em. Prof. und Direktor des Weizmann-Instituts für Wissenschaften in Rehovot/Israel)

Die Neutrino-Physik nahm ihren Anfang durch die experimentellen Daten des sog. β -Zerfalls (s. Absatz S. 767). Bei diesem auch natürlich auftretenden radioaktiven Zerfall zeigte sich, dass das von dem radioaktiven Kern emittierte Elektron keinesfalls eine wohldefinierte, für jeden Einzelprozess identische kinetische Energie besitzt. Vielmehr ist diese Energie über ein Intervall

$$0 < E_{kin} < E_{max} \tag{10.12}$$

kontinuierlich verteilt, s. Abb. 2. Die obere Grenze E_{max} dieser Verteilung jedoch ist eine für den jeweiligen Zerfallsprozess typische Kenngröße; sie ist mit der Energie identisch, die der Atomkern bei diesem Prozess verliert. Dieses Verhalten entdeckten 1911 die österreichisch-schwedische Physikerin *Lise* (urspr. *Elise*) *Meitner* (* 1878 in Wien; † 1968 in Cambridge (UK)) und der deutsche Physiker *Otto Hahn* (* 1879 in Frankfurt a.M.; † 1968 in Göttingen). Es stellte die Gültigkeit der Energieerhaltung sowie der Impulserhaltung zumindest für diesen Bereich der Physik ernsthaft in Frage. Als Ausweg aus diesem Dilemma schlug Pauli 1933 in einem Brief an Fermi vor, dass bei diesem Zerfallsprozess ein weiteres Teilchen erzeugt werde, das den jeweils "fehlenden" Anteil an Energie und Impuls trägt. Der Zerfallsprozess, der zu der Abb. 2 führte, lautete dann



Um es von dem bereits hypothetisch bekannten Neutron zu unterscheiden, gab Fermi diesem Teilchen den Namen *Neutrino**. Auf Grund der experimentellen Fakten lag es

*Wenn Pauli einen aus dem Rheinland stammenden Physiker um einen Namensvorschlag gebeten hätte, hieße es heute vielleicht Neutrönchen.

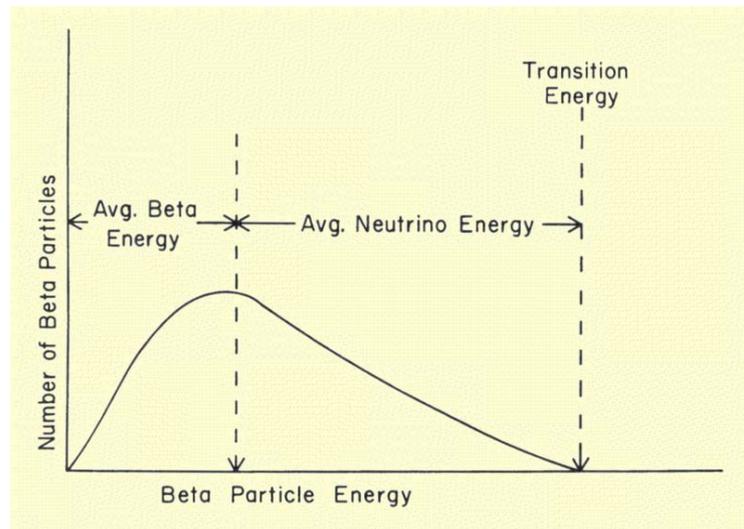


Abb. 2 Energiebezogene Anzahlverteilung der Elektronen bei dem β -Zerfall von Au^{198} (Quelle: diese Abb. basiert auf der Graphik `beta_decay_spectrum` aus der freien Enzyklopädie Wikipedia und steht unter der Lizenz `Creativ Commons Attribution 3.0`; der Autor ist die `Sprawls Educational Foundation`)

nahe anzunehmen, dass dieses Teilchen weder eine elektrische Ladung noch ein magnetisches Moment besitzt. Ebenso wie ihre massebehafteten leptonischen Partner haben alle Neutrinos einen Spin vom Betrag $\frac{1}{2}$. Ob sie eine endliche Ruhemasse besitzen, ist bis heute (2012) nicht vollständig geklärt. Die aktuell (2011) experimentell abgesicherte obere Grenze für diesen Wert beträgt

$$E_0(\nu_e) < 2,2 \cdot eV \quad (10.14)$$

Andererseits ist die Annahme einer endlichen Ruhemasse die einfachste Erklärung für die zweifelsfreie Fähigkeit des Neutrinos, Energie in kontinuierlich abgestuften Mengen zu transportieren und das bei (nahezu) konstanter Geschwindigkeit. Ich komme auf diese Frage insbesondere im Absatz S. 1158 zurück.

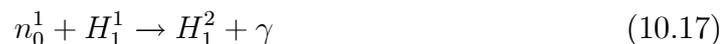
Als ersten experimentellen Nachweis der realen Existenz dieser Neutrinos gelten heute die als *Poltergeist-Experiment* bezeichneten Arbeiten des amerikanischen Chemie-Ingenieurs und Physikers *Clyde Lorrain Cowan Jr.* (* 1919 in Detroit/Mi.; † 1974 in Bethesda/MD als em. Prof. d. kath. Universität Washington/DC) und des Physikers *Frederick Reines* (* 1918 in Paterson/NJ; † 1998 in Orange/Cal.) aus dem Jahr 1956. Sie führten das zum β -Zerfall inverse Experiment durch, indem sie einen ausreichend intensiven Neutrinostrahl durch eine dicke Wasserschicht lenkten und nach dem Auftreten der Reaktion



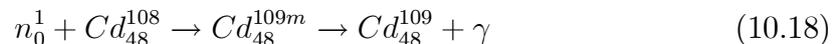
fahndeten. Wegen der Impulserhaltung wird bei diesem Prozess nur wenig kinetische Energie auf das masse-reichere Reaktionsprodukt, das Neutron übertragen. Es ist also annähernd thermisch. Das bei diesem Prozess entstehende Positron fusioniert mit hoher Wahrscheinlichkeit mit einem der Elektronen der benachbarten Wassermoleküle gem.



Ein Neutrino oder Antineutrino entsteht bei diesem Prozess **nicht**, der überschüssige Impuls wird hierbei an das Rumpfatom (H^+ oder O^+) übertragen, das bei dem Prozess ein Elektron verliert. Das bei dem Prozess 10.15 entstehende Neutron reagiert weiter mit einem der in der Wasserschicht vorhandenen Atome, z.B. gem.



Dieser auf mehrere Prozesskanäle verschmierte Prozess der Neutronenabsorption (XXX: präzisieren) lässt sich weitgehend auf genau 1 Kanal konzentrieren, indem man dem Wasser eine Substanz beimischt, die ein Atom enthält mit besonders hoher Absorptionswahrscheinlichkeit für thermische Neutronen. Cowan und Reines wählten hierfür Cadmiumchlorid $CdCl_2$. Cadmium besitzt ein Isotop mit für dieses Experiment besonders günstigen Eigenschaften, das Isotop Cd_{48}^{108} . Dieses hat nicht nur einen besonders hohen Einfangquerschnitt für thermische Neutronen. Der entstehende Kern ist ein Cd -Isotop in einem angeregten, metastabilen Zustand, der mit relativ langer Lebensdauer der Größenordnung $5 \cdot \mu s$ durch γ -Emission in den Grundzustand übergeht:



Hierdurch lässt sich diese 2. Quelle für γ -Strahlung von der 1. nicht nur über die Energie, sondern auch über das Zeitfenster trennen. Messkriterium für das Auftreten der Reaktion 10.15 war demnach das in zeitlich richtiger Reihenfolge Auftreten 2-er γ -Quanten, die den Reaktionen 10.16 und 10.18 zugeordnet werden können.

Cowan und Reines benutzten als Neutrinoquelle zunächst die *Hanford-Site* (s. Absatz S. 791), später dann die *Savanna Site*, eine am Savanna-Fluss gelegene militärische Anlage zur Produktion von Atomwaffen. Der verfügbare Neutrinostrom lag rechnerisch in der Größenordnung

$$J_\nu^{(N)} \approx 5 \cdot 10^{13} \frac{\text{Teilchen}}{s \cdot cm^2} \quad (10.19)$$

Den Probenbehälter mit $0,200 \cdot m^3$ Wasser und etwa XXX Massenanteilen an $CdCl_2$ und den Szintillator-Einheiten und Photomultipliern vergruben sie etwa $11 \cdot m$ vom Reaktor entfernt etwa $10 \cdot m$ tief in den Boden. Zur Bestimmung des Untergrundsignals wurde der Reaktor für eine vereinbarte Zeit abgeschaltet. Während einer mehrmonatigen Messkampagne waren sie in der Lage, der Gl. 10.15 entsprechende Ereignisse in einer Häufigkeit von ca.

$$3 \cdot \frac{\text{Reaktionen}}{h} \quad (10.20)$$

nachzuweisen.

Für diese Arbeiten (s. [38]) erhielt Reines zusammen mit *Martin Lewis Perl* (* 1927 in New York; heute em. Prof. des SLAC) 1995 den Nobelpreis für Chemie.

Im Zuge der weiteren Forschungsarbeiten zeigte sich dann, dass jedem weiteren entdeckten Lepton, also sowohl dem Myon als auch dem Tauon jeweils ein Neutrino zugeordnet ist, wobei zu allen diesen Teilchen jeweils auch das Anti-Teilchen existiert. Wir schreiben alle Neutrino-Teilchen mit dem griechischen Buchstaben ν (gesprochen *nü*) und ergänzen als Index das zugehörige massereichere Lepton. Die wichtigsten physikalischen Daten dieser Teilchen und ihrer massebehafteten Partner sind in der nachfolgenden Tabelle zusammengefasst. Die Leptonenzahl L ist eine Quantenzahl, die bei jedem zulässigen Umwandlungsprozess erhalten bleibt. Deswegen entsteht z.B. beim β^- -Zerfall neben dem Elektron ein Elektron-Antineutrino $\bar{\nu}_e$.

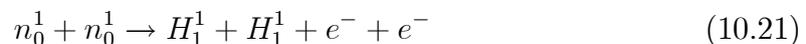
Name	Kennz.	$M_0 \cdot c_0^2 / MeV$	Q/Q_0	L
Elektron-Neutrino	ν_e	$< 2,2 \cdot 10^{-6}$	0	+1
Myon-Neutrino	ν_μ	$< 0,17 \cdot 10^{-3}$	0	+1
Tauon-Neutrino	ν_τ	$< 15,5 \cdot 10^{-3}$	0	+1
Elektron	e	0,511	-1	+1
Myon	μ	105,7	-1	+1
Tauon	τ	1.777	-1	+1
Elektron-Antineutrino	$\bar{\nu}_e$	$< 2,2 \cdot 10^{-6}$	0	-1

Ich habe in dieser Tabelle nur 1 Antiteilchen explizit aufgeführt. Denn auch die weiteren 5 Antiteilchen unterscheiden sich von ihrem zugehörigen Teilchen in den in dieser Tabelle dargestellten Daten lediglich in der Leptonenzahl und ggf. im Vorzeichen der elektrischen Ladung.

Die Erzeugung oder Vernichtung von Neutrinos (oder Antineutrinos) ist typisch für Prozesse, die durch die schwache Wechselwirkung gesteuert werden. Neutrinos tragen keine elektrische Ladung, sie unterliegen also nicht der elektromagnetischen Wechselwirkung. Sie werden aber auch von der starken Wechselwirkung nicht beeinflusst. Es verbleibt also ausschließlich die schwache Wechselwirkung als Mittel ihrer Beeinflussung. Eine unmittelbare Folge ist die außerordentlich große Reichweite dieser Strahlung. Neutrinos durchdringen nahezu unbeeinflusst massive Objekte von astronomischen Abmessungen, also z.B. die Erde oder auch unsere Sonne. Da sie dennoch einen signifikanten Anteil der Reaktionsenergie tragen, der bei dem kernphysikalischen Prozess frei wurde, dem die Neutrinos ihre Existenz verdanken, tragen sie insbesondere bei astronomischen Prozessen einen signifikanten Beitrag zum relevanten Energietransport. Neutrinos können daher Informationen übermitteln über astronomische und kosmologische Prozesse, die in Entfernungen und/oder Umgebungen ablaufen, die mit den konventionellen Techniken der Astronomie, z.B. den optischen Teleskopen nicht erreichbar sind.

Andererseits ist durch den Umstand der außerordentlich großen Reichweite von Neutrinos der experimentelle Nachweis von Neutronenströmen extrem schwierig. Sobald jedoch diese Hürde durch die Arbeiten von Cowan und Reines zumindest im Grundsatz überwunden war, begann das Zeitalter der *Neutrino-Astronomie*, s. Unterabsatz S. 10.1.4. Das am Anfang dieses Abschnitts angeführte Harari-Zitat behielt jedoch weiterhin seine Gültigkeit.

Eine auch heute (2014) nicht abschließend geklärte Frage ist, ob jedes Neutrino mit seinem Antiteilchen identisch ist. Derartige Teilchen bezeichnet man auch als Majoran-Teilchen, benannt nach dem italienischen Physiker *Ettore Majorani* (* 1906 in Catania/Sizilien/Italien; † 1938 (verschwunden)). Dies wäre allerdings ein starker Hinweis auf eine "Physik jenseits des sog. Standardmodells der Elementarteilchenphysik"(XXX: Bezug nennen). Experimentell lässt sich diese Frage durch eine Suche nach dem neutrino-losen doppelten β -Zerfall überprüfen:



Die in dieser Zerfallsgleichung aufgeführten 2 Neutronen gehören zu den Bausteinen eines geeignet ausgewählten Atomkerns. Die "normalerweise" hierbei gebildeten Teilchen $\bar{\nu}_- + \bar{\nu}_-$ entstünden nicht, da sie im Zuge der simultanen Bildung direkt zerstrahlen würden. Erkennen lässt sich dieser Prozess daran, dass die Verteilung eines Teils der Reaktionsenergie auf die beiden Neutrinos entfällt und die Verteilung der Energie der beiden Elektronen relativ scharf ist. Eine mögliche Realisierung dieses Prozesses (von einigen anderen) ist der folgende:



Dies aber wäre nur möglich, wenn das Neutrino sein eigenes Antiteilchen ist. Zu diesem hypothetischen Prozess laufen aktuell mehrere Experimente. Nach einem Zwischenbericht der Forschergruppe des Experimentes Exo-200 ([17]) ergab sich nach 2 Jahren Messzeit kein statistisch bedeutsamer Hinweis auf die Existenz dieses Prozesses. Für die Halbwertszeit dieses hypothetischen Prozesses gaben die Autoren folgende Ungleichung an:

$$\tau_{1/2}(\text{Prozess 10.22}) > 1,1 \cdot 10^{25} \cdot y \quad (10.23)$$

Durch dieses Messergebnis ist die Annahme, dass Neutrinos sog. Majorana-Teilchen sind, wohl nicht widerlegt, sie ist aber sehr unwahrscheinlich geworden.

Eine der überraschendsten und faszinierendsten Eigenschaften der Neutrinos ist ihre Fähigkeit, sich im Zuge ihrer Ausbreitung in den Raum periodisch in einander umzuwandeln. Diesem als *Neutrino-Oszillation* bekannt gewordenen Phänomen werden wir uns nun zuwenden.

Neutrino-Oszillationen (-)

Die Diskussion über dieses von mir bisher nur angedeutete seltsame Verhalten von Neutrinos begann mit dem sog. *solaren Neutrino-Problem*: Seit man der Meinung

war, die kernphysikalischen Prozesse verstanden zu haben, die im Inneren unserer Sonne ablaufen, war man auch in der Lage, auf der Basis des experimentell bestimm-
baren integralen Energiestroms der Sonne den damit verbundenen integralen Neutri-
nostrom zu berechnen. Man begann daher, mit geeigneten Detektor-Anlagen, z.B.
dem Super-Kamiokande-Detektorsystem nahe Hida in Japan, diesen solaren Neutri-
nostrom zu messen. Dabei dienten analoge Messungen von technisch erzeugten, und
damit quantitativ bekannten Neutrinoströmen als Eichstandards für diese Techniken.
Und tatsächlich gelang als erstem XXX, diesen solaren Neutrinostrom zu messen.
Damit galt die Hypothese über die kernphysikalischen Fusionsprozesse als Ener-
giequelle der Sonne als experimentell bestätigt. Ein genauer Vergleich der Zahlen-
werte führte jedoch zu dem Schluss, dass der gemessene Neutrinostrom um ziemlich
genau den Faktor 3 kleiner war als der zur Erklärung des solaren Energiestroms
benötigte Wert.

(XXX: Der an dieser Stelle vorgesehene weitere Text zur Beschreibung der
experimentellen Fakten beim solaren Neutrino-Problem ist noch nicht verfügbar.
Danach folgt:)

Ich skizziere nun die quantenmechanische Deutung dieses Phänomens:

Die 3 Neutrino-Arten Elektron-, Myon- und Tauon-Neutrino sind keine jeweils
völlig andersartigen Elementarteilchen, sondern (lediglich) 3 verschiedene Zustände
desselben Teilchens *Neutrino*. Sie unterscheiden sich in dem Wert einer neuen, bisher
nicht spezifizierten Variablen \mathbf{F} , die meist als *flavor* (engl. *Geschmack*) bezeichnet
wird. Die Variable *flavour* hat genau 3 Eigenwerte, die ich als F_e , F_μ und F_τ bezeich-
nen möchte. Die 3 Eigenzustände

$$|F_e\rangle ; |F_\mu\rangle ; |F_\tau\rangle \quad (10.24)$$

zu diesen Werten F_e , F_μ und F_τ aber sind mit den bisher als Elektron-Neutrino,
Myon-Neutrino und Tauon-Neutrino bezeichneten Teilchen identisch. Und die ma-
thematische Struktur der schwachen Wechselwirkung (s. Abschnitt 10.1.8) erzwingt,
dass bei jedem von ihr gesteuerten Prozess nur ein Neutrino gebildet oder vernichtet
werden kann, das sich in einem dieser Eigenzustände befindet.

Das besondere an dem Teilchen *Neutrino* besteht nun darin, dass diese Eigen-
zustände zu \mathbf{F} keine Eigenzustände zur Energie \mathbf{E} sind, insbesondere nicht zu dem
i.a. als Ruhe-Energie bezeichneten Anteil

$$E_0 = E(v = 0) \quad (10.25)$$

von \mathbf{E} . Bei vorgegebener Gesamtenergie bestimmt aber der Wert E_0 die Geschwin-
digkeit, mit der sich ein zunächst auf ein endliches, kleines Volumen lokalisiertes
Neutrino im Raum ausbreitet (s. auch Aufgabe 2).

(XXX: Der weitere Text des Absatzes *Neutrino-Oszillationen* ist noch nicht
verfügbar.)

Die Neutrino-Astronomie (-/-)

(XXX: Der Text des Absatzes *Die Neutrino-Astronomie* ist noch nicht verfügbar.)
 In ihm werden auch die nachfolgenden Textpassagen aufgehen:

Der Nachweis, dass bei einer Supernova-Explosion mächtige Neutrinoströme generiert werden, gelang 2013 durch Vermessung des Neutrinostrom der Supernova der SN 1987A (s. Absatz S. 1218) über einen längeren Zeitraum. Durch einen glücklichen Umstand wurden die Messungen bereits vor dem ersten signifikanten Anstieg der Strahlung im sichtbaren Spektralbereich begonnen. Für diese Arbeiten erhielten der amerikanische Chemiker Raymond Ray Davis jr. (* 1914 in Washington D.C./USA; † 2006 in Blue Point/New York) und der japanische Physiker Masatoshi Koshiba (* 1926 in ; heute emer. Professor der University of Tokio) den Nobelpreis für Physik 2002.

10.1.5 Die $SU(3)$ -Gruppe (-/-)

(XXX: Der Text des Abschnitts *Die $SU(3)$ -Gruppe* ist noch nicht verfügbar.)

10.1.6 Das Quark-Modell (-)

Den entscheidenden ersten Anstoß zur Befreiung der Elementarteilchenphysik aus dem Dilemma des aus ca. 300 Objekten bestehenden *Elementarteilchen-Zoos* gaben 1961 unabhängig von einander *Murray Gell-Mann* (* 1929 in New York/NY (USA); heute em. Prof. des CalTech in Pasadena/Cal. (USA)) und *Juval Ne'eman* (* 1925 in Tel Aviv (Israel); † 2006 ebenda) durch das phänomenologische Ordnungs-Konzept des sog. *Achtfachen Wegs*. Sie wählten diese Bezeichnung in Anlehnung an die Philosophie Buddhas. In diesem Schema spielt die Zahl 8 eine hervorgehobene Rolle. 1964 erweiterten dann Gell-Mann und unabhängig von ihm *George Zweig* (* 1937 in Moskau (UdSSR); heute Long Island/NY (USA)) dieses Konzept zum sog. *Quark-Modell*. Zweig war zu dieser Zeit noch graduate student am CalTech in Pasadena und promovierte später bei Feynman. Dieses Modell besteht insbesondere aus den folgenden Postulaten:

1. Es gibt eine endliche Menge von neuen Teilchen, aus denen alle schweren Elementarteilchen aufgebaut sind. Diese neuen Teilchen bezeichnete Gell-Mann als *Quarks*. Er nahm zunächst an, dass die Anzahl unterschiedlicher Quarks auf 3 begrenzt sei. Diese 3 Sorten von Quarks erhielten zu ihrer Unterscheidung die (nichts aussagenden) Namen und Abkürzungen

$$up\ u ;\ down\ d ;\ strange\ s \quad (10.26)$$

2. Die Quarks tragen alle den Spin $\frac{1}{2}$, sind also Fermionen.
3. Eine erste Familie von Elementarteilchen, die *Baryonen*, besteht aus genau 3 dieser Quarks.

4. Eine zweite Familie von Teilchen, die *Mesonen*, besteht aus genau 2 dieser Quarks.

Wir diskutieren zunächst die Familie der *Baryonen*. Über die durch das Pauli-Prinzip aufgezwungene Beschränkung ergeben sich 7 unterschiedliche Möglichkeiten des Aufbaus von aus 3 Quarks bestehenden Baryonen, nämlich

$$n(udd) / p(ud) / \Sigma^+(uus) / \Xi^0(uss) / \Xi^-(dss) / \Sigma^-(dds) / \Lambda^0(uds) \quad (10.27)$$

In dieser Aufzählung habe ich bereits die Abkürzung der Baryonen ergänzt, die dem jeweiligen Quark-Triplett zugeordnet wurden. Die elektrische Ladung aller real beobachtbarer Elementarteilchen ist ganzzahlig,

$$\frac{Q}{Q_0} = +1; -1; 0 \quad (10.28)$$

Damit die elektrische Ladung dieser neuen Teilchen mit dieser Bedingung verträglich ist, müssen wir dem *u*-Quark die elektrische Ladung $+\frac{2}{3}$ zuordnen und den *d*- und *s*-Quarks die Ladung $-\frac{1}{3}$. Der Vergleich mit dem experimentellen Kenntnisstand zeigte nun jedoch, dass ein weiteres Teilchen existiert mit einem Verhalten, das dem des Λ^0 sehr ähnlich ist, aber eine geringfügig erhöhte Masse besitzt sowie eine wesentlich kürzere Lebensdauer. Dieses damals bereits bekannte und als Σ^0 bezeichnete Teilchen war daher als **angeregter Zustand** des Λ^0 zu deuten. (Nur) wenn wir es dennoch mitzählen, ergibt sich die Anzahl von 8 Baryonen. Alle diese Teilchen haben den Spin $\frac{1}{2}$, sind also **Fermionen**.

Als nächstes behandeln wir die Familie der *Mesonen*. Diese mittelschweren Teilchen treten sowohl in der kosmischen Strahlung (s. Abschnitt 10.4.1) auf als auch bei den unterschiedlichsten Streuexperimenten mit Teilchenbeschleunigern. Sie haben offensichtlich einen ganzzahligen Spin, sind also **Bosonen**. Nach dem o.a. Postulat sind alle Mesonen aus genau 2 Quarks aufgebaut. Da bis heute keine Elementarteilchen gefunden werden konnten, die eine nicht ganzzahlige elektrische Ladung tragen, fordern wir diese Ganzzahligkeit insbesondere auch für alle Mesonen. Wie wir uns leicht klar machen können, folgt hieraus, dass alle Mesonen jeweils aus einem Quark und einem Anti-Quark bestehen. Damit ergeben sich die Möglichkeiten

$$\pi^+(u\bar{d}) / K^+(u\bar{s}) / K^0(d\bar{s}) \quad (10.29)$$

sowie die aus einem Quark und seinem **eigenen** Anti-Quark bestehenden elektrisch neutralen Teilchen

$$\eta(u\bar{u}) / \eta(d\bar{d}) / \eta(s\bar{s}) \quad (10.30)$$

In diesen Aufzählungen 10.29 und 10.30 habe ich wieder die Abkürzung der Mesonen ergänzt, die dem jeweiligen Quark-Duplett zugeordnet worden sind. Diese Zuordnung erfolgte insbesondere auf Basis der experimentellen Daten über die jeweils auftretenden Zerfallsprozesse. Ein wichtiges Detail ist die Tatsache, dass die 3 als η -Teilchen

bezeichneten Mesonen der Aufzählung 10.30 identische physikalische Eigenschaften haben.

In dem Fall der Mesonen kommen wir also zu der im Ausgangskonzept des Achtfachen Wegs bevorzugten Zahl 8 nur dann, wenn wir

1. das η -Teilchen in seinen 3 Varianten (Aufzählung 10.30) nur einfach zählen;
2. von den in der Aufzählung 10.29 genannten Teilchen auch noch deren Anti-Teilchen

$$\pi^-(\bar{u}d) / K^-(\bar{u}s) / \bar{K}^0(\bar{d}s) \quad (10.31)$$

extra zählen; und

3. das experimentell gefundene π^0 -Teilchen, das aber als quantenmechanische Überlagerung der beiden Zustände π^+ und π^- (das Anti-Teilchen des π^+) gedeutet werden muss (s. Abschnitt 7.9.5),

$$|\pi^0\rangle = \frac{1}{2} \cdot (|\pi^+\rangle + |\pi^-\rangle) \quad (10.32)$$

ebenfalls mitzählen.

Die beiden Familien der *Baryonen* (aus 3 Quarks aufgebaut) und der *Mesonen* (aus 2 Quarks aufgebaut) werden heute zusammen genommen und als *Hadronen* (von $\chi\alpha\vartheta\rho\omega\sigma$ (griech.) stark) bezeichnet.

Das Konzept des sog. *Achtfachen Wegs* war ein historisch wichtiger Schritt auf dem Weg zum Quark-Modell und der Quantenchromodynamik. Meiner Einschätzung nach ist jedoch die Diskussion dieser zunächst konzipierten Strukturen und Regeln heute bei dem Bemühen, die modernen Theorien zu verstehen, nicht mehr besonders hilfreich.

Gell-Mann (aber nicht G. Zweig) erhielt für seine *Beiträge und Entdeckungen betreffend der Klassifizierung der Elementarteilchen und deren Wechselwirkungen* (so die offizielle Laudatio) den Nobelpreis Physik 1969.

Zu dieser Zeit (etwa 1970) waren aber bereits einige weitere, den Hadronen zuzuordnende Teilchen bekannt, insbesondere die Teilchen

$$\Omega^- ; \Delta^- ; \Delta^{++} ; \Psi \quad (10.33)$$

Auf Grund seiner Masse und ebenso seiner typischen Zerfallsreaktion

$$\Omega^- \rightarrow \Xi^0 + \pi^- \quad (10.34)$$

lag es nahe anzunehmen, dass das Ω^- (gespr. Omega) aus 3 *s*-Quarks aufgebaut ist, von denen sich dann bei dem durch die Gl. 10.34 beschriebenen Prozess eines in ein *d*-Quark umwandelt,

$$(sss) \rightarrow (uss) + (\bar{u}d) \quad (10.35)$$

Dies widersprach aber zunächst dem Postulat, dass alle Quarks Fermionen sind. Der Ausweg aus diesem Dilemma war die Annahme einer weiteren, bisher nicht berücksichtigten physikalischen Größe, in deren Wert sich dann diese 3 s -Quarks in dem Ω^- -Teilchen unterscheiden. Die neue physikalische Größe, wenn es denn nur eine ist, musste also mindestens 3 verschiedene Eigenwerte besitzen. Die Physiker *Oscar Wallace Greenberg* (* 1932; heute em. Prof. der University of Maryland, College Park/MD (USA)), *Moo-Young Han* (* 1934 in Seoul (Korea); heute em. Prof. der Duke University in Durham/NC (USA)) und *Yoichiro Nambu* (* 1921 in Tokyo; heute em. Prof. der University of Chicago/MI (USA)) entwickelten das Konzept dieser neuen Größe und nannten sie die *Farbladung* Y eines Quarks. Sie ergänzten die Postulate des Quark-Modells um die nachfolgenden:

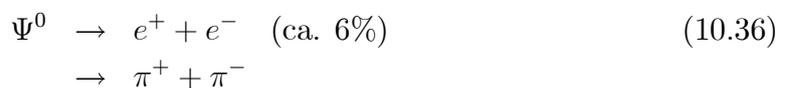
5. Jedes Quark besitzt eine *Farbladung* Y . Diese kann bei Quarks die Werte r (rot), g (grün) oder b (blau) annehmen und bei Anti-Quarks die Werte \bar{r} (anti-rot oder blaugrün), \bar{g} (anti-grün oder purpur) oder \bar{b} (anti-blau oder gelb).

6. Jedes real existierende Teilchen hat die Farbladung 0 (weiß).

Analog zum Verhalten des Spins sind alle erlaubten quantenmechanischen Zustände des Quarks antisymmetrisch bzgl. der Vertauschung 2-er Farbindizes. Das grundsätzlich neue an diesem Konstrukt besteht darin, dass diese physikalische Größe Farbladung nicht 2 diskrete Werte annehmen kann wie z.B. der Spin, sondern genau 3. Die Bezeichnung *Farbladung* mit den Werten rot/grün/blau etc. hat mit der Theorie der Farben (Kapitel 11.14) nichts zu tun. Sie ergab sich einfach aus der kreativen Phantasie der Physiker, die diese Theorie gestalteten. Sie hätten sich genau so für weniger einfallsreiche Bezeichnungen wie eins/zwei/drei entschieden haben können. Die im Postulat 5 formulierte Bedingung wird in der Literatur als *confinement* bezeichnet. Aus ihr folgt insbesondere, dass isolierte Quarks nicht beobachtbar sind, sondern nur die aus mindestens 2 von ihnen aufgebauten Teilchen.

Mit der Einführung der Farbladung werden nun auch die Quarkkonfigurationen uuu und ddd zulässig. Sie entsprechen den zu dieser Zeit bereits gefundenen Teilchen Δ^{++} und Δ^- .

Aus der Existenz des Ψ -Teilchens (gespr. Psi) mit offensichtlich ganzzahligem Spin (s. die beobachteten, teilweise in Gl. 10.36 wiedergegebenen Zerfallskanäle), seiner hohen Ruhemasse und seinen typischen Zerfallsreaktionen



schloss man auf die Existenz eines weiteren Quarks mit der elektrischen Ladung $+\frac{2}{3}$, das den Namen *charm* und die Kennzeichnung c erhielt. Mit seiner Hilfe interpretierte man den Aufbau des Ψ -Teilchens als

$$\Psi^0 = c\bar{c}\tag{10.37}$$

Physik ganz klein / ganz gross (-)

Das dann unabhängig von einander und nahezu zeitgleich von den Arbeitsgruppen Ting und Richter (s. Abschnitt 10.1.1) entdeckte J/Ψ -Teilchen ist **ein** metastabiler Zustand des $(c\bar{c})$ -Teilchens, das sehr oft auch als *Charmonium* bezeichnet wird und eine ganze Reihe weiterer Zustände mit jeweils anderer Energie besitzt.

Die nochmals wesentliche höhere Ruhemasse des 1977 gefundenen Υ -Mesons (gespr. *Ypsilon*) sowie seine typischen Zerfallsreaktionen

$$\Upsilon \rightarrow \tau^+ + \tau^- \quad (10.38)$$

$$\Upsilon \rightarrow \mu^+ + \mu^- \quad (10.39)$$

$$\Upsilon \rightarrow e^+ + e^- \quad (10.40)$$

führten dann zur hypothetischen Einführung eines 5. Quarks, das den Namen *bottom* b erhielt. Es erlaubte dann die Interpretation, dass das Υ -Meson aus dem Paar

$$\Upsilon = b\bar{b} \quad (10.41)$$

aufgebaut ist. Man könnte es daher auch *Bottomium* nennen.

Die Existenz eines weiteren Quarks mit einer noch größeren Masse wurde bereits 1973 von den japanischen Physikern *Makoto Kobayashi* (* 1944 in Nagoya; heute Diamond Fellow am Institut for Nuclear and Particles Studies in Tsukuba (Japan)) und *Toshihide Masukawa* (* 1940 in Nagoya; heute em. Prof. der Sanyo Univ. Kyoto) postuliert, um die CP-Verletzung beim Kaon-Zerfall erklären zu können. Entdeckt wurde dieses Teilchen erst 1995 am Fermilab durch eine internationale Arbeitsgruppe. Es hat den Namen *top-Quark* erhalten und die Abkürzung t (auch in Anlehnung an das Wort $\tau\rho\iota\tau\eta\nu$ (griech.) der dritte). Zusammen mit Nambu erhielten Kobayashi und Masukawa hierfür den Nobelpreis für Physik 2008. An den grundlegenden theoretischen Arbeiten, die die Existenz des top- und des bottom-Quarks vorhersagten, war auch Harari maßgeblich beteiligt.

Mit dieser Entdeckung ergibt sich die aus heutiger Sicht vollständige Tabelle der Quarks als **einer** Gruppe von Grundbausteinen für den Aufbau der Materie:

Name	Kennz.	$M_0 \cdot c_0^2 / \text{MeV}$	Q/Q_0
up	u	2,4	$+\frac{2}{3}$
down	d	4,8	$-\frac{1}{3}$
charm	c	$1,27 \cdot 10^3$	$+\frac{2}{3}$
strange	s	104	$-\frac{1}{3}$
bottom	b	$4,2 \cdot 10^3$	$-\frac{1}{3}$
top	t	$172,9 \cdot 10^3$	$+\frac{2}{3}$

Eine vollständige Aufstellung aller bekannten Elementarteilchen und ihrer physikalischen Kenndaten findet der Leser in [1].

Alle Elementarteilchen, die zu der Familie der Mesonen (2 Quarks) oder der Hadronen (3 Quarks) gehören, sind also aus Quarks aufgebaut. Damit stellt sich auch die Frage, wie wörtlich diese Aussage genommen werden darf: Sind die einzelnen Quarks in einem Meson oder in einem Hadron noch als solche vorhanden? Dann haben Mesonen und Hadronen eine innere räumliche Struktur. Deren Existenz sollte durch geeignete Experimente nachweisbar sein. Oder haben sie sich zu einem Einheitsbrei gewandelt, der dann allerdings die Erinnerung behalten haben muss, aus welchen Quarks er einmal entstanden ist. Denn aus jedem Umwandlungsprozess eines dieser Teilchen kann diese Information wieder herausgelesen werden.

Mit dieser Frage werden wir uns im nachfolgenden Absatz 10.1.6 (*Die innere Struktur von Neutron und Proton*) befassen.

Die innere Struktur von Neutron und Proton (-)

Wir beginnen die Diskussion mit einem der am einfachsten aufgebauten Hadronen, das auch experimentell besonders leicht zugänglich ist, dem Neutron. Es besteht aus 1 *u*-Quark und 2 *d*-Quarks, wobei letztere sich in ihrem Spinwert unterscheiden. Mit Neutronen lassen sich besonders leicht Streuexperimente ausführen, weil das auf eine ausreichend hohe Energie beschleunigte, i.a. elektrisch geladene Teilchen wegen der fehlenden elektrischen Ladung des Target-Teilchens keine Coulomb-Barriere überwinden muss, sondern ungehindert bis zu dem eigentlichen Neutron vordringen kann.

(XXX: Der Text, der die Einzelheiten dieser Streuexperimente beschreibt, ist noch nicht verfügbar. Danach folgt:)

Im Ergebnis lässt sich aus diesen Messdaten die innere Struktur des Neutrons eindeutig und mit für erste Aussagen ausreichender Ortsauflösung ableiten: Das *u*-Quark ist auf einer Bahn mit dem Radius

$$R_u = 0,35 \cdot fm \quad (10.42)$$

um den Schwerpunkt des Neutrons verschmiert und die beiden *d*-Quarks auf Bahnen mit

$$R_d = 0,5 \cdot fm \quad (10.43)$$

Als Literaturwert für die Ausdehnung eines Neutrons gilt heute

$$D_n = 1,7 \cdot fm \quad (10.44)$$

Dieser Wert ist gut mit den in 10.42 und 10.43 genannten Werten verträglich. Daher kann diese experimentell ermittelte innere Struktur des Neutrons als eindrucksvolle Bestätigung des Quarkmodells angesehen werden, bzw. zumindest dafür, dass das Neutron aus 3 experimentell unterscheidbaren Teilchen aufgebaut ist.

Eine auf diesen Ergebnissen aufbauende Frage ist nun, ob die aus den Nukleonen aufgebauten Atomkerne primär aus diesen Nukleonen aufgebaut sind, oder ob

in ihnen die Quarks, die einmal diese Nukleonen gebildet haben, zu einem Quark-Plasma (s. Abschnitt 8.3.8) verschmolzen sind. Diese Frage wird durch die bei diesen Prozessen auftretenden Energien eindeutig beantwortet: Die bei der Bildung der Atomkerne auftretenden Bindungsenergien reichen bei weitem nicht aus, um das angesprochene Quark-Plasma zu bilden (s. jedoch Abschnitt 10.2.4). Atomkerne bestehen also aus Nukleonen als deren Bausteine.

Zum Abschluss dieses Abschnitts bleibt festzuhalten, dass das Quarkmodell zusammen mit der Quantenchromodynamik (Abschnitt 10.1.7) in seiner aktuellen (2011) Version des sog. *Standardmodells* nicht in der Lage ist, die Ruhemassen seiner elementaren Bausteine, also der Quarks und der Leptonen vorherzusagen. Es ist eine Theorie mit 18 noch freien Parametern, die bisher über die experimentellen Daten angepasst werden müssen. Theorien, die diesen Schönheitsfehler beheben, sog. **grand unified theories** (GUTs) existieren in verschiedenen Konzepten, bisher aber nur in Ansätzen. Mit ihnen wird versucht, die 3 fundamentalen Wechselwirkungen, die elektromagnetische, die starke und die schwache Wechselwirkung zu einer gemeinsamen Theorie zu verknüpfen. Dabei besteht die Hoffnung, dass sich dann in einem weiteren Schritt auch die Ruhemassen der Elementarteilchen mit Hilfe dieser GUT und ohne allzu viele freie Parameter werden berechnen lassen.

Ein weiterer, b.a.w. hypothetischer Schritt zur Erweiterung des Quark-Modells ist die Annahme, dass auch die Quarks (noch) nicht unteilbar sind, sondern ihrerseits aus noch kleineren Teilchen aufgebaut sind. Diese hypothetischen Sub-Quarks werden heute oft als *Preonen* bezeichnet. Zu diesem Konzept gibt es aktuell eine Vielzahl unterschiedlicher Modellvorstellungen. Eines dieser Modelle haben Harari und der amerikanische Physiker Michael A. Shupe (* XXX; heute em. Prof. of Theoretical Physics der Univ. of Arizona (USA)) bereits 1979 vorgestellt. Es nimmt die Existenz von lediglich 2 unterschiedlichen Preonen an sowie deren Antiteilchen. Wir wollen sie durch die Kürzel \oplus und \odot bzw. \ominus und $\overline{\odot}$ kennzeichnen. Aus ihnen sind sowohl die Quarks aufgebaut als auch die Leptonen und ebenso die Eich-Bosonen, die für die verschiedenen Wechselwirkungen verantwortlich.

Ich werde jedoch auf die Einzelheiten dieser Theorien (noch) nicht näher eingehen.

10.1.7 Das Grundkonzept der Quantenchromodynamik (-)

In der bisherigen Darstellung des Quarkmodells habe ich mich darauf beschränkt darzustellen, nach welchen Regeln der Aufbau der beobachtbaren Elementarteilchen aus den 6 Quarks erfolgt. Die Frage, durch welche Wechselwirkung die Quarks in diesen Teilchen zusammengehalten werden, habe ich dagegen bisher weitgehend ausgeklammert. Diese Kenntnislücke werde ich nun versuchen zu schließen. Eine im wesentlichen historisch bedingte Hürde für das Verständnis dieser Zusammenhänge besteht nun darin, dass 2 verschiedene Sachverhalte, die wohl eng miteinander verknüpft sind, aber doch unterschiedliche Fakten beschreiben, gedanklich nicht miteinander vermengt werden dürfen. Damit meine ich

1. die Wechselwirkung zwischen den zu einem Atomkern vereinigten Protonen und Neutronen; und
2. die Wechselwirkung zwischen den zu einem Elementarteilchen vereinigten Quarks.

Beide Mechanismen werden als die *starke Wechselwirkung* bezeichnet, und diese Formulierung ist korrekt in dem Sinne, dass ihre Deutung auf derselben Theorie beruht, eben der in diesem Abschnitt zu erläuternden Quantenchromodynamik. Ich halte es dennoch für angebracht, diese beiden Themen nacheinander zu behandeln. Wie wir später sehen werden, entspricht die Theorie der in den Atomkernen wirksamen Bindungskräfte einer *effektiven Theorie* der für die Bindung der Quarks wirksamen Kräfte.

Ich beginne mit der Theorie der starken Wechselwirkung zwischen den in einem Atomkern gebundenen Nukleonen. Diese Wechselwirkung führt bei genügend kleinen Abständen zwischen den Nukleonen zu einer Anziehung, die gegenüber der elektromagnetischen Abstoßung überwiegt. In genügend großer Entfernung von den Nukleonen dominiert dagegen die elektromagnetische Wechselwirkung. Wir werden nun versuchen, auch für die starke Wechselwirkung das Konzept der symmetrischen Wechselwirkung (s. Abschnitt 3.2.5) und damit die Existenz eines Wechselwirkungspotenzials $V(r)$ zu verwenden. r ist wieder der Abstand zwischen dem felderzeugenden Nukleon und dem 2. Nukleon, das mit dem 1. wechselwirkt. Dann suchen wir eine Funktion $V(r)$, die das soeben geschilderte asymptotische Verhalten zeigt. Bereits Anfang der Jahre 1930 schlug der japanische Physiker *Hideki Yukawa* (eigentlich Ogawa) (* 1907 in Azabu (heute Minato/Tokio); † 1981 in Kyoto) als für die starke Wechselwirkung zumindest näherungsweise gültige Funktion $V(r)$ das später nach ihm benannte *Yukawa-Potenzial*

$$V(r) = \frac{A}{r} \cdot e^{-\frac{r}{l}} \quad (10.45)$$

l : Reichweite der Wechselwirkung

vor. A hat die Bedeutung eines Produktes aus der (für die starke Wechselwirkung relevanten) felderzeugenden Ladung und der Kopplungskonstanten der starken Wechselwirkung. Die Gl. 10.45 ist formal weitgehend identisch mit der Gleichung des abgeschirmten Coulomb-Potenzials in verdünnten Lösungen starker Elektrolyte (s. Abschnitt 8.3.3 und Gl. 8.301), aber auch mit dem Coulomb-Potenzial in einem Plasma (s. Abschnitt 8.3.8).(XXX: präzisieren) Wir erwarten daher auch an dieser Stelle, dass es sich um einen Abschirmeffekt handelt, der zu der endlichen Reichweite l des Feldes führt. In diesem Fall finden wir die Erklärung der Abschirmwirkung aus der quantenfeldtheoretischen Betrachtung des Problems. Dann bilden sich bei genügend hohen Feldstärken virtuelle Paare aus den Austauscheteilchen der Wechselwirkung und deren Antiteilchen, s. Kapitel 7.14(XXX: präzisieren). Diese können ebenfalls eine Abschirmung des Feldes bewirken. Dann aber ergibt sich die Reichweite

l aus der Ruhemasse M_0 des die Wechselwirkung vermittelnden Teilchens gem.

$$l = \frac{\hbar}{M_0 \cdot c_0} \quad (10.46)$$

Setzen wir als Reichweite l den aus Streuexperimenten ermittelten Durchmesser des Protons ein, so erhalten wir als Ruhemasse des die starke Wechselwirkung erzeugenden Austausch-Teilchens den Wert

$$M_0 \cdot c_0^2 = \frac{\hbar \cdot c_0}{l} = 117 \cdot \text{MeV} \quad (10.47)$$

Dieser Schätzwert liegt in der Größenordnung der Ruhemasse der μ -Mesons.

(XXX: Der an dieser Stelle vorgesehene weitere Text ist noch nicht verfügbar.)

Yukawa erhielt *for his prediction of the existence of mesons on the basis of theoretical work on nuclear forces* den Nobelpreis für Physik 1949.

Nachdem das Quarkmodell entwickelt war und die Regeln, nach denen sich die Elementarteilchen bilden, überzeugend einfach erklären konnte, war die besondere Bedeutung der Farbladung für die Physik der Elementarteilchen offensichtlich. Es lag daher nahe anzunehmen, dass auch die Wechselwirkung, die die Quarks zusammenhält, im wesentlichen auf dem Austausch von Farbladung beruhte. Die einfachste Annahme für diese Wechselwirkung war daher, dass durch sie außer Energie ausschließlich Farbladung, aber **keine** elektrische Ladung ausgetauscht wird. Die Austauscheteilchen dieser Wechselwirkung tragen daher ebenfalls Farbladung. Aus den bereits bekannten Symmetrie-Eigenschaften (s. Abschnitt 10.1.5) der Farbladung folgt dann, dass das Feld dieser Wechselwirkung genau 8 Eigenvektoren besitzt, die alle einen ganzzahligen Spin haben. Eine oft benutzte Basis hat die Form

$$|r\bar{g}\rangle ; |r\bar{b}\rangle ; |g\bar{b}\rangle \quad (10.48)$$

$$|g\bar{r}\rangle ; |b\bar{r}\rangle ; |b\bar{g}\rangle \quad (10.49)$$

$$\frac{1}{\sqrt{2}} \cdot (|r\bar{r}\rangle - |g\bar{g}\rangle) \quad (10.50)$$

$$\frac{1}{\sqrt{6}} \cdot (|r\bar{r}\rangle + |g\bar{g}\rangle - 2 \cdot |b\bar{b}\rangle) \quad (10.51)$$

Man bezeichnet heute diese Wechselwirkungs-Bosonen als die *Gluonen* (von to glue (engl.) *kleben*) der starken Wechselwirkung. Da diese 8 verschiedenen Gluonen (lediglich) die unterschiedlichen Eigenwerte des Wechselwirkungsfeldes sind, hat man darauf verzichtet, sie mit unterschiedlichen Namen zu versehen.

Die zu entwickelnde Dynamik, die für die Quarks und ihre über die Gluonen vermittelte Wechselwirkung gelten soll, muss nun folgendes asymptotische Verhalten erzwingen:

1. das bereits in den Postulaten des Quark-Modells erläuterte *confinement*. Mit zunehmendem Abstand 2-er Quarks steigt die anziehende Wechselwirkung beliebig an und damit auch die Energie dieses Systems aus 2 gebundenen Quarks.

Es wird daher in mehrere neue Elementarteilchen zerfallen. M.a.W. isolierte Quarks sind nicht beobachtbar.

2. die sog. *asymptotische Freiheit* der Quarks. Bei genügend kleinen Abständen wird der Effekt der starken Wechselwirkung sehr gering. Die Quarks sind nun quasi ungebunden. Ihre aus der starken Wechselwirkung resultierende Bindungsenergie trägt daher zur Ruhemasse der aus ihnen aufgebauten Elementarteilchen nur in geringem Maße bei.

(XXX: Der an dieser Stelle vorgesehene weitere Text ist noch nicht verfügbar. Darauf folgt:)

Die mathematisch konsistente Formulierung dieser Konzepte für die Konstruktion der zwischen der Quarks auftretenden starken Wechselwirkung bezeichnet man heute als *Quantenchromodynamik*. Diese herausragende Leistung lässt sich auch aus heutiger Sicht kaum einem einzelnen Forscher oder einer begrenzten Gruppe von Forschern zuordnen. Sie ist das gemeinsame Werk vieler Physiker und entwickelte sich etwa im Lauf der Jahre 1980 bis 2000. Die amerikanischen Physiker *David J. Gross* (* 1941 in Washington DC (USA); heute UCSB/Cal.(USA)), *Hugh David Politzer* (* 1949 in New York; heute Caltec/Cal.(USA)) und *Frank Wilczek* (* 1951 in New York; heute MIT Cambridge/Mass.(USA)) erhielten für die Entdeckung der *asymptotischen Freiheit in der Theorie der starken Wechselwirkung* den Nobelpreis für Physik 2004.

Wir greifen nun die zu Beginn dieses Abschnitts diskutierte Frage nach der die Atomkerne zusammenhaltenden Wechselwirkung wieder auf. Auf der Grundlage des Quarkmodells und der Quantenchromodynamik werden wir die Sichtweise vertreten, dass bei der Betrachtung eines Atomkerns aus n Protonen und m Neutronen das System eigentlich aus $(2 \cdot n + m)$ u -Quarks und $(2 \cdot m + n)$ d -Quarks besteht, und dass der Grundzustand (und damit die Bindungsenergie) dieses Systems über die QCD berechnet werden muss. Wenn man nun in einem Gedankenexperiment 1 Quark aus diesem Verband heraus zieht, wird die Gesamt-Energie des Systems entsprechend dem confinement extrem ansteigen. Das Quark wird in andere Elementarteilchen zerfallen, aus energetischen Gründen zunächst in ein μ -Meson. Diese Interpretation ist aber äquivalent zu der oben skizzierten effektiven Theorie der Bindung der Nukleonen generierenden Feldes mit dem ruhemasse-behafteten Austauscheteilchen μ -Meson.

Die wichtigste Wechselwirkung, die sowohl zur Bildung der Atomkernbausteine *Proton* und *Neutron* führt als auch zu den mehreren Protonen und Neutronen enthaltenden Atomkernen, ist also die *starke Wechselwirkung*.

Mit Hilfe dieser Theorie der starken Wechselwirkung lassen sich nicht nur die (geeignet definierten) Durchmesser von Proton und Neutron berechnen, sondern auch die der unter terrestrischen Bedingungen stabilen Atomkerne. Dabei zeigt sich, dass die Massendichte dieser Atomkerne in guter Näherung konstant ist. Diesen Wert der

1170
 Physik ganz klein / ganz gross (-)
 Elementarteilchen, Kosmologie:
 mittleren Massendichte der Atomkerne von

$$\frac{M_{\text{Atomkern}}}{\frac{\pi}{6} \cdot D_{\text{Atomkern}}^3} = m_{\text{Nuk}} \approx 1,40 \cdot 10^{17} \cdot \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad (10.52)$$

werden wir noch häufig als Referenzwert für extrem hohe Massendichten verwenden, s. z.B. Absatz S. 1206 (*Neutronensterne*).

(XXX: Der weitere Text des Abschnitts *Das Grundkonzept der Quantenchromodynamik* ist noch nicht verfügbar.)

10.1.8 Die Theorie der schwachen Wechselwirkung (-/-)

(XXX: Der Text des Abschnitts *Die Theorie der schwachen Wechselwirkung* ist noch nicht verfügbar.)

(XXX: Der weitere Text des Kapitels *Physik der Elementarteilchen* ist noch nicht verfügbar.)

10.2 Astronomie (-)

In diesem Kapitel werde ich - leicht schlagwortartig - die Physik der meisten Objekte behandeln, die im Kosmos anzutreffen sind: Sterne in ihren verschiedenen Stufen der Entwicklung und ihre Planeten, Asteroide und Kometen, sowie die Agglomeration von Sternen zu Sternhaufen oder ganzen Galaxien. Dabei wollen wir für alle nun folgenden Abschnitte schon jetzt die Vereinbarung formulieren, dass wir unter *Sternen* im engeren Sinne nur solche Himmelskörper verstehen wollen, die über eine signifikante Zeit ein zumindest annähernd stationäres Fusionsbrennen (s. Abschnitt 10.2.2) zeigen oder einmal gezeigt haben.

Wir überstreichen also in diesem Kapitel einen Bereich der Längendimension von ca. $10^4 \cdot m$ (Durchmesser eines Kometen) bis zu $10^{21} \cdot m$ (Längsausdehnung einer typischen Galaxie). Wir werden sehen, dass zum Verständnis dieser Objekte, ihrer Entstehung und ihres Verhaltens sowohl die gravitative Wechselwirkung dieser Objekte als auch die Prozesse der Kernfusion maßgebend sind, wobei letztere insbesondere von den Gesetzen der starken Wechselwirkung sowie der elektromagnetischen und der schwachen Wechselwirkung gesteuert werden.

Die Physik der Sterne, ihrer Entstehung und ihrer typischen Veränderungen im Laufe ihres Lebenszyklusses habe ich der Übersichtlichkeit halber nicht in einem einzigen Abschnitt zusammengefasst, sondern in insgesamt 4 Abschnitte aufgeteilt, die der Reihe nach die Sternentstehung, die stationären Zustände des Fusionsbrennens, die Endstadien und die verschiedenen Umwandlungsprozesse behandeln. Diesen folgt dann zur Wahrung der Übersicht eine knappe Zusammenfassung all dieser Fakten und Theorien. In der Astrophysik der Sterne ist es weitgehend üblich, die Masse von Sternen in Einheiten der Masse unserer Sonne anzugeben und dabei diese Masseinheit in der Form M_{\odot} anzugeben. Ich werde ebenso verfahren.

Die den Kosmos als ganzes betreffenden Fragen, also die Fragen nach seiner Ausdehnung und Struktur, und insbesondere nach der zeitlichen Entwicklung dieser Größen werden wir dann im Kapitel 10.3 (*Kosmologie*) behandeln.

Einen guten Überblick über alle diese astronomischen und kosmischen Objekte insbesondere in Relation zu den jeweiligen geometrischen Abmessungen und Entfernungen gewinnt man über die nach meiner Einschätzung sehr gut gelungene Serie von Graphiken des *atlas of the universe* von Richard Powell, s. [14].

Etwa seit 1958 ist die Astronomie nicht mehr allein auf die terrestrischen Möglichkeiten der Sternbeobachtung und -vermessung beschränkt. Die seitdem gegebenen Möglichkeiten der Weltraum-Technologie haben der astronomischen Forschung 2 grundsätzlich neue Klassen von Instrumenten bereitgestellt:

1. Satelliten auf stationären Bahnen um die Erde; mit ihnen lassen sich astronomische Objekte beobachten und spektral vermessen, ohne dass die Erdatmosphäre diese Ergebnisse auch nur im Ansatz störend beeinflussen kann;
2. Raumsonden, die bis zu den unterschiedlichen Objekten unseres Planetensystems gesendet werden und dieses Objekt entweder in geeigneter Entfernung passieren oder sogar in eine Umlaufbahn um dieses Objekt einschwenken. Bei hierfür geeigneten Objekten ist sogar eine Landung auf diesem Objekt möglich.

Man kann ohne jede Übertreibung sagen, dass diese technischen Möglichkeiten die Astronomie und Kosmologie auf eine völlig neue Ebene gehoben haben. Was bis dahin allzu oft Spekulation bleiben musste, kann jetzt auf der Basis einer Fülle von experimentellen Fakten geprüft und ggfls. gestützt oder verworfen werden. Auf einige Beispiele dieser bis heute bereits äußerst zahlreichen Satelliten und Raumsonden und ihre Messmöglichkeiten werde ich im Kapitel 10.6 näher eingehen. Der sicherlich bekannteste die Erde umrundende astronomische Satellit ist das **Hubble Space Telescope HST**, s. Absatz S. 1409. Allein dieses Instrument, das seit 1990 arbeitsfähig ist, hat eine riesige Anzahl an Aufnahmen von unschätzbarem wissenschaftlichen Wert und von oft atemberaubender Schönheit geschaffen, s. z.B. die Abb. 11.

10.2.1 Dynamik der Stern-Entstehung (-)

In diesem Abschnitt werden wir uns mit der Frage auseinander setzen, unter welchen Bedingungen und über welche Mechanismen sich aus der im Kosmos über riesige Volumina verteilten Materie Sterne bilden, die in ihrem Zentrum eine Massendichte aufweisen, die ausreicht, um Kernfusionsprozesse auszulösen. Zur Orientierung nenne ich 2 typische Zahlenwerte: Die mittlere Teilchendichte innerhalb einer Galaxie, aber unter Ausschluss der bereits existierenden Sterne beträgt

$$\langle n \rangle_{\text{Galaxie}} \sim 10^6 \frac{\text{Atome}}{m^3} \quad (10.53)$$

Die Teilchendichte im Zentrum eines Sterns, der eine mit unserer Sonne vergleichbare Masse besitzt und sich im Zustand des stationären *H*-Brennens (s. Absatz S. 10.2.2)

1172 Elementarteilchen, Kosmologie:
 Physik ganz klein / ganz gross (-)
 befindet, beträgt dagegen

$$n_{\text{Sternzentrum}} \sim 10^{31} \frac{\text{Atome}}{m^3} \quad (10.54)$$

Wir fragen also nach den Mechanismen, durch die die Teilchendichte lokal mindestens um den Faktor 10^{25} angehoben wird. Dabei ist es naheliegend, als hierfür verantwortlich nicht **einen einzigen** Mechanismus zu vermuten, sondern eher eine ganze **Kette** unterschiedlicher Abläufe.

Als wichtige Orientierung für diese Aufgabe präzisieren wir zunächst, um welche Art von Materie es sich bei dem schon mehrfach zitierten *kosmischen* oder *interstellaren Staub* handelt. Es geht also um die Gesamtheit der im Kosmos außerhalb der Sterne und der sonstigen Himmelskörper vorhandenen Materie. Diese lässt sich nach Herkunft und Zusammensetzung in 2 Arten aufteilen:

1. Die bereits unmittelbar nach dem *Urknall* (s. Absatz S. 1395) gebildete *Urmaterie*. Sie besteht aus isolierten Atomen der Elemente *H*, *He* und (in Spuren) *Li*. Man schätzt den relativen Anteile dieser Elemente in der Urmaterie heute auf

Element	$N_{\text{Element}}/N_{\text{gesamt}}$
<i>H</i>	0,70
<i>He</i>	0,29
<i>Li</i>	0,01

2. Die von Sternen bei Nova- und Supernova-Explosionen und bei anderen explosionsartigen Umwandlungen in den Kosmos ausgestoßenen Materieströme. Diese enthalten außer den leichten Elementen *H* und *He* auch in signifikanter Menge alle Elemente, die vor oder während dieser Stern-Explosion gebildet worden sind. Sofern diese Materiewolken, solange sie noch nicht zu stark verdünnt sind, ausreichend erkalten, bilden sich aus diesem Vorrat an Elementen die unterschiedlichsten Moleküle, insbesondere molekularer Wasserstoff H_2 , aber auch die verschiedensten organischen und anorganischen Verbindungen. Innerhalb dieser Molekülwolken kommt es vermutlich zu ersten Agglomerationsprozessen insbesondere der anorganischen Verbindungen, den Silikaten und Metallverbindungen. Das Ergebnis sind vermutlich submikroskopische Partikel aus diesen Verbindungen, die sich aber im Sinne der Thermodynamik bereits als **makroskopische Objekte** behandeln lassen: Ihnen lässt sich eine Temperatur zuordnen, die ihre Abstrahlung von Energie in Form von IR-Strahlung festlegt, und die entscheidet, ob das jeweilige Teilchen in flüssiger oder fester Form vorliegt. Diese Teilchen bezeichnen wir als *kosmischen* oder *interstellaren Staub* im engeren Sinne. Der relative Anteil dieses kosmischen Staubs in einer Materiewolke bestimmt in starkem Umfang deren weiteres Schicksal.

Zur sauberen Unterscheidung dieser beiden Arten von kosmischer Materie werde ich sie konsequent als *kosmische Urmaterie* oder als *kosmischen Staub* bezeichnen. I.a. tritt kosmischer Staub allerdings nicht in reiner, isolierter Form auf, sondern als Beimischung zu einer Wolke aus kosmischer Urmaterie.

Die Astrophysiker unterscheiden heute 3 verschiedene Populationen oder Typen von Sternen, die sich signifikant in ihrer Element-Zusammensetzung und damit auch in ihrem physikalischen Verhalten unterscheiden. Diese Unterschiede lassen sich auf ihre unterschiedliche Entstehungs- und Entwicklungsgeschichte zurückführen und damit auf ihren unterschiedlichen Gehalt an kosmischem Staub. Diese 3 Typen sind:

1. Sterne der 1. Generation: Diese entstanden in der Frühphase des Universums durch Agglomeration von reiner kosmischer Urmaterie. Denn kosmischer Staub war noch gar nicht entstanden. Sie waren daher völlig frei von Elementen mit mittlerer bis höherer Ordnungszahl. Sie waren überwiegend sehr massereich und sind heute vermutlich alle bereits vergangen. Denn die Lebensdauer eines Sterns nimmt mit seiner Masse stark ab, s.u. .

2. Sterne der 2. Generation: Diese sind aus kosmischer Materie entstanden, die schon einen gewissen Anteil an kosmischem Staub enthielt, der durch die Explosion von Sternen der 1. Generation gebildet worden war. Im Durchschnitt sind sie daher jünger als die Sterne der 1. Generation und enthalten gewisse, wenn auch minimale Anteile an Elemente von mittlerer bis höherer Ordnungszahl[†]. Typische Werte der relativen Teilchenanzahl sind

Element	$N_{\text{Element}}/N_{\text{gesamt}}$
<i>H</i>	0,70
<i>He</i>	0,29
<i>Li</i>	0,01
übrige	$\lesssim 10^{-6}$

3. Sterne der 3. Generation: Sie sind relativ jung und enthalten im Vergleich zu den anderen Sterntypen einen deutlich höheren Anteil an Elementen von mittlerer bis höherer Ordnungszahl. Typische Werte der relativen Teilchenanzahl sind

Element	$N_{\text{Element}}/N_{\text{gesamt}}$
<i>H</i>	0,70
<i>He</i>	0,29
übrige	$10^{-3} \dots 10^{-4}$

Unsere Sonne gehört zu diesem Sterntyp. Auf Grund der experimentellen Daten

[†]In der Astronomie ist es durchgängig üblich geworden, die Element-Zusammensetzung von Sternen und Galaxien nur nach *H*, *He* und Elementen höherer Ordnungszahl zu differenzieren, und dabei letztere grob vereinfachend als *Metalle* zu bezeichnen.

wird als obere Grenze für die Masse eines Sterns von diesem Typ heute der Wert

$$M_{3.-\text{Gen.}} < 150 \cdot M_{\odot} \quad (10.55)$$

angesehen.

Da bei allen diesen Sternen die Lebensdauer stark mit der Masse abnimmt, sind diese 3 Generationen nicht sauber von einander getrennt: Es entstanden bereits die ersten Sterne der 2. Generation, lange bevor in der Nachbarschaft oder an anderer Stelle im Kosmos die letzten Sterne der 1. Generation erloschen waren. Das aktuell vorliegende Nebeneinander von Sternen der 2. und der 3. Generation ist durch experimentelle Untersuchungen (XXX: präzisieren) belegt. Die auch aktuell noch gegebene Existenz von Sternen der 1. Generation konnte bisher (noch) nicht zweifelsfrei nachgewiesen werden. Es bestehen jedoch reelle Chancen, dass in der frühen Phase der kosmischen Entwicklung, in der sich die Sterne der 1. Generation bildeten, zumindest in gewissen, hierfür geeigneten Bereichen des Kosmos auch einige sehr massearme Sterne entstanden. Wenn sie eine Masse von $M < 0,9 \cdot M_{\odot}$ haben, könnten sie noch heute existieren. Nach derartigen Sternen wird heute intensiv gesucht. Bisher hat man jedoch noch keinen derartigen Stern der 1. Generation entdeckt. Dieses Spezialgebiet der astronomischen Forschung wird auch als *Galaktische Archäologie* bezeichnet.

Die heute einsetzbaren Teleskope liefern eine Fülle von Daten auch für den Abgleich von Theorien der Sternentstehung mit experimentellen Fakten. Allein die in der Abb. 3 wiedergegebene Aufnahme des Orion-Nebels durch das **Hubble Space Telescope** (HST) bietet in der hoch aufgelösten Originalversion Bildinformationen über mehr als 3000 junge Sterne und über mehrere 1000 noch im Entstehen befindliche Protosterne. Der Nebel ist von unserer Sonne $1,5 \cdot 10^3 \cdot L_j$ entfernt. Er enthält eine Anzahl von sehr lichtstarken Sternen, in dessen Licht die den Nebel bildenden Wolken aus kosmischer Materie in unterschiedlichen Farben aufleuchten. Diese Färbung gibt also Hinweise auf die lokale chemische Zusammensetzung dieser Wolken. Die sehr helle Zentralregion beherbergt 4 besonders lichtstarke Sterne. Aktuell ist daher der Orion-Nebel eine der bevorzugten *Experimentierstuben* der auf dem Gebiet der Sternentstehung forschenden Astrophysiker.

Am Anfang unser nun folgenden Überlegungen zur Stern-Entstehung setzen wir die Existenz einer gegenüber dem Rest des Universums separierten, darüber hinaus aber (noch) unstrukturierten Wolke als gegeben voraus, die aus einer Mischung von kosmischer Urmaterie und kosmischem Staub besteht. Die mittlere Teilchendichte n dieser Staubwolke betrage z.B.

$$n \approx 10^{10} \cdot \frac{\text{Teilchen}}{m^3} \quad (10.56)$$

Da der Wasserstoffanteil überwiegt, entspricht dies einer Massendichte der Größen-

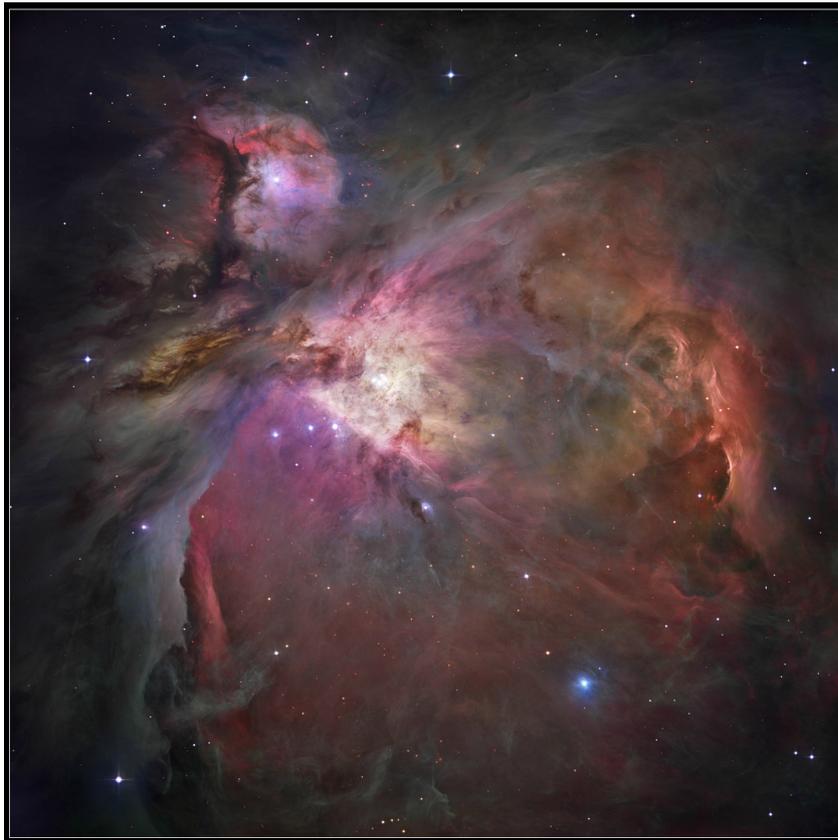


Abb. 3 Vom Hubble Telescope erstellte Übersichtsaufnahme des Orion Nebels
(Quelle: Diese Abb. basiert auf der von der Hubble Organisation im Internet bereitgestellten Aufnahme STScI-PRC2006-01a; Autoren sind M. Robberto (ESA) u. das HST Orion Treasury Project Team)

ordnung

$$\begin{aligned}
 m &= n \cdot M_{H_2} \approx 10^{10} \cdot \frac{\text{Teilchen}}{m^3} \cdot 2 \cdot 1,673 \cdot 10^{-27} \cdot \frac{kg}{H_2\text{-Teilchen}} \\
 &= 3,35 \cdot 10^{-17} \cdot \frac{kg}{m^3}
 \end{aligned}
 \tag{10.57}$$

Die Gesamtmasse der Wolke sei von der Größenordnung

$$M_0 \approx 10 \cdot M_{\odot} \tag{10.58}$$

Diese Masse sei also über ein Volumen der Größenordnung

$$\begin{aligned}
 V &\sim \frac{M_0}{m} = \frac{10 \cdot M_\odot}{3,35 \cdot 10^{-17} \cdot \frac{kg}{m^3}} = \frac{10 \cdot 1,99 \cdot 10^{30} \cdot kg}{3,35 \cdot 10^{-17} \cdot kg} \cdot m^3 \\
 &= 0,594 \cdot 10^{48} \cdot m^3 = \frac{4 \cdot \pi}{3} \cdot (0,52 \cdot 10^{16} \cdot m)^3 \\
 &= \frac{4 \cdot \pi}{3} \cdot (3,48 \cdot 10^4 \cdot AE)^3 \tag{10.59}
 \end{aligned}$$

unstrukturiert, d.h. in 1. Näherung gleichmäßig verteilt. Wir stellen uns diese Wolke als von (zunächst) annähernd kugelförmiger Gestalt vor mit einem Kugelradius von

$$R \approx 3,5 \cdot 10^4 \cdot AE \tag{10.60}$$

Trotz der extrem niedrigen Teilchendichte in dieser Wolke nehmen wir an, dass die zwischen diesen Teilchen vorhandene (im mechanistischen Bild der Physik durch die Häufigkeit der 2-Teilchen-Stöße vorgegebene) Wechselwirkung ausreicht, um diese astronomische Wolke in ein lokales thermodynamisches Gleichgewicht zu bringen. Dann lässt sich die Temperatur dieser Wolke definieren und darüber dann auch der (thermodynamische) Druck dieser Wolke

$$p_{\text{th.-dyn.}} = -\frac{\partial F(T, V, N)}{\partial V} \tag{10.61}$$

Wegen der extrem niedrigen Teilchendichte dürfen wir zweifelsohne die freie Energie der Wolke durch die Gleichungen eines idealen Gases (s. Abschnitt 8.1.10) annähern,

$$p_{\text{th.-dyn.}} = \frac{N}{V} \cdot \kappa \cdot T = \frac{\kappa \cdot T}{\hat{v}} \tag{10.62}$$

Diesem Term überlagert sich nun additiv der Einfluss der Gravitation. Im Abschnitt 3.3.11 haben wir als Gravitationsenergie einer homogen über ein kugelförmiges Volumen V verteilten Gesamt-Masse M den Ausdruck

$$E(R) = -\frac{3}{5} \cdot \gamma \cdot \frac{M^2}{R} \tag{10.63}$$

(s. Gl. 3.872) erhalten. Daraus berechnet sich unmittelbar der Gravitationsdruck zu

$$p = -\frac{dE(V)}{dV} = -\frac{\frac{dE(R)}{dR}}{\frac{dV(R)}{dR}} = -\frac{\frac{3}{5} \cdot \gamma \cdot \frac{M^2}{R^2}}{\frac{4\pi}{3} \cdot 3 \cdot R^2} = -\frac{3}{20 \cdot \pi} \cdot \gamma \cdot \frac{M^2}{R^4} \tag{10.64}$$

Der Gesamtdruck der Wolke beträgt daher

$$p = \frac{\kappa \cdot T}{\hat{v}} - \frac{3}{20 \cdot \pi} \cdot \gamma \cdot \frac{M^2}{R^4} \tag{10.65}$$

Solange dieser Ausdruck positiv ist, die thermische Energie also gegenüber der Gravitation überwiegt, wird sich die Wolke weiter ausdehnen. Sobald jedoch der Ausdruck sein Vorzeichen wechselt,

$$\frac{\kappa \cdot T}{\hat{v}} < \frac{3}{20 \cdot \pi} \cdot \gamma \cdot \frac{M^2}{R^4} \Rightarrow \quad (10.66)$$

$$T < \frac{3}{20 \cdot \pi} \cdot \frac{\gamma}{\kappa} \cdot \frac{M^2}{R^4} \cdot \frac{4 \cdot \pi}{3} \cdot R^3 \cdot \frac{M_{H_2}}{M} = \frac{1}{5} \cdot \frac{\gamma}{\kappa} \cdot \frac{M}{R} \cdot M_{H_2} \quad (10.67)$$

beginnt die Wolke zu kontrahieren. Diese Bedingung 10.67 bezeichnet man nach dem englischen Physiker, Astronomen und Mathematiker *James Hopwood Jeans* (* 1877 in Ormskirk, Lancashire(England); † 1946 in Dorkey/Surrey) als das *Jeans-Kriterium* für das Einsetzen der **Kontraktion** einer Wolke aus kosmischem Staub. In unserem oben aufgeführten Zahlenbeispiel erhalten wir daraus die Bedingung

$$T < \frac{\pi}{5} \cdot \frac{\gamma}{\kappa} \cdot \frac{M}{R} \quad (10.68)$$

Die zeitliche Entwicklung der von uns als zu Beginn unserer Betrachtung bereits existent angenommenen Gaswolke von endlicher Temperatur T nimmt also zunächst folgenden Verlauf:

(1) Ausdehnung der Wolke in seine leere kosmische Umgebung. Diese Ausdehnung erfolgt adiabatisch bis auf die thermische Abstrahlung aus dieser Wolke. Zumindest in den Randbereichen der Gaswolke ist diese Abstrahlung immer gegeben. Sofern die Gaswolke in ihrem Inneren keine permanent aktive Energiequelle enthält, wird sie sich daher im Zuge dieses Vorgangs abkühlen. Sobald dann die Bedingung 10.67 erfüllt ist, setzt der umgekehrte Prozess der Kontraktion ein:

(2) Durch die Gravitation angetriebene Kontraktion der Wolke. Dieser Prozess setzt sich zumindest solange fort, wie der hierdurch generierte Energiestrom noch nicht deutlich größer ist als der Energiestrom der thermischen Abstrahlung. Als typische Dauer dieses bei weiterhin niedriger Temperatur ablaufenden Kontraktionsprozesses sieht man heute den Wert

$$\Delta t = 1 \dots 1,5 \cdot 10^7 \cdot y \quad (10.69)$$

an.

Für die weiteren Überlegungen ist nun die Berücksichtigung des Drehimpulses der Gaswolke von fundamentaler Bedeutung. Die hieraus folgende weitere Entwicklung der Gaswolke ist Gegenstand des nun folgenden Absatzes.

Die Akkretionsscheibe (-)

Sofern die Gaswolke aus einem (ursprünglich) räumlich eng begrenzten Vorgang heraus entstanden ist, z.B. aus einer Supernova-Explosion (s. Unterabsatz S. 1218),

liegt es nahe anzunehmen, dass der Gesamt-Drehimpuls dieser Wolke in 1. Näherung verschwindet. Dies ändert sich jedoch, sobald die Wolke im Verlaufe ihrer weiteren Entwicklung sich ausreichend nahe an einem 2. kosmischen Objekt vorbei bewegt, z.B. an einer weiteren Gaswolke. Dann nämlich findet ein signifikanter Drehimpuls-Austausch zwischen den beiden Objekten statt, in weitgehender Analogie z.B. zu der Wechselwirkung eines Tennisballs mit einem stark elastischen Objekt wie dem Tennisschläger. Im Ergebnis tragen beide Objekte im Anschluss an diese Passage einen signifikanten Drehimpuls in Richtung des Flächenvektors der *Schmiegeebene* (s. Abschnitt 3.2.1) dieser Bewegung, jedoch mit für diese beiden Objekte entgegengesetztem Vorzeichen.

Wir müssen also davon ausgehen, dass der relativ zu seinem Massen-Schwerpunkt berechnete Gesamt-Drehimpuls der von uns betrachteten Staubwolke

$$\vec{L} = \int (\vec{v} \times \vec{r}) \cdot m(\vec{r}) \cdot d^3r \quad (10.70)$$

einen nicht verschwindenden Wert besitzt. Bei allen nun auftretenden Prozessen, die ohne Wechselwirkung mit dem Rest des Universums ablaufen, wird dieser Wert erhalten bleiben. Die anfangs kugelsymmetrische Kontraktion der Gaswolke ist daher zwangsweise mit einer verstärkten Rotation der einzelnen Teilchen der Gaswolke um die Drehimpulsachse verbunden. Als unmittelbare Folge dieser Bedingung der Drehimpuls-Erhaltung sind nun alle Kontraktionsprozesse bevorzugt, die a priori Drehimpuls-erhaltend sind. Dies sind insbesondere Kontraktionsprozesse, die in einer Richtung parallel zur Drehimpulsachse verlaufen. Diese Einschränkung wird insbesondere in Bereichen der Wolke wirksam, die weit entfernt sind vom Gravitationszentrum der Wolke. Die ursprünglich annähernd kugelförmige Gaswolke wird sich also zu einer eher scheibenförmigen Struktur deformieren, deren Ausdehnung senkrecht zur Scheibenebene mit der Entfernung vom Scheibenzentrum deutlich abnimmt.

Wie wir noch mehrfach erkennen werden, ist diese scheibenförmige Struktur von agglomerierter Materie im Makro-Kosmos allgegenwärtig. Diese Konfiguration bezeichnen die Astrophysiker heute als *Akkretionsscheibe* (von *accretio* (lat.) das Anwachsen). Dank der technischen Errungenschaften der modernen Astronomie sind wir heute nicht mehr darauf angewiesen, das Ergebnis derartiger Überlegungen und Simulationsrechnungen an Hand von sekundären Fakten zu überprüfen. Vielmehr können wir das den heutigen Teleskopen zugängliche Universum direkt nach derartigen Objekten absuchen. Und tatsächlich gelang es 2010 der ESO (**E**uropean **S**outhern **O**bservatory) mit ihrem **V**ery **L**arge **T**elescope Array (VLT) in Cerro Paranal (Chile), die um einen jungen Stern vorhandene Akkretionsscheibe direkt aufzuzeichnen. Die Abb. 4 zeigt

(a) die Umgebung des Sterns IRAS 13481-6124 im Sternbild Centaurus als optische Realaufnahme in aktuell maximaler Auflösung; die Entfernung zur Erde beträgt ca. $1 \cdot 10^4 \cdot L_j$;

(b) die daraus geschlossene Struktur der unmittelbaren Sternumgebung als graphische Gestaltung in nochmals höherer Auflösung ([4]).

Die Längsausdehnung und die Gesamtmasse dieses Objektes betragen etwa

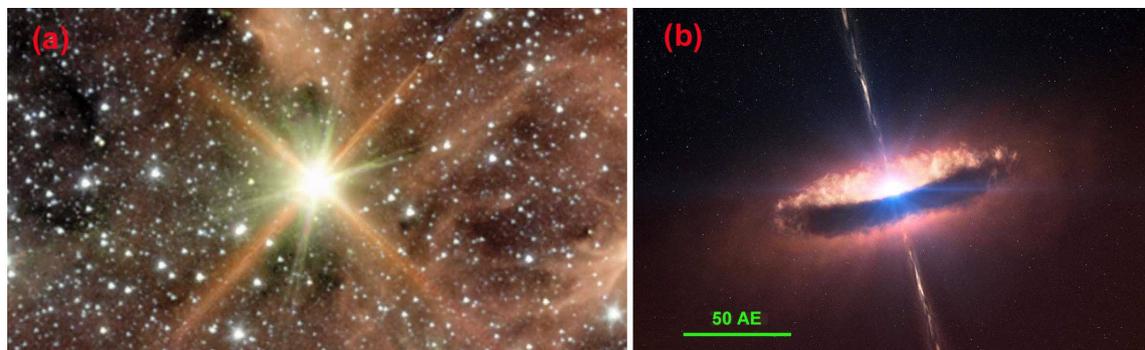


Abb. 4 Direkte Aufnahme der um den massereichen jungen Stern IRAS 13481-6124 konzentrierten Akkretionsscheibe aus interstellarem Staub

(a) reale optische Aufnahme der Umgebung von IRAS 13481-6124 (b) künstlerisch gestaltete vergrößerte Wiedergabe der unmittelbaren Stern-Umgebung

(Quelle: Die Einzelbilder (a) und (b) basieren auf den vom European Southern Observatory (ESO) auf ihrer internet-website bereitgestellten Aufnahmen eso1029a. Sie unterliegen den Bedingungen der Creative Attribute 3.0 Unported Licences)

$$d \approx 130 \cdot AE \quad (10.71)$$

$$M_{\text{ges.}} \approx 20 \cdot M_{\odot} \quad (10.72)$$

(Zur Def. der Einheit AE s. Abschnitt 3.4.1.) Das aktuelle Alter dieses Sterns schätzt man auf

$$\mathbb{A} = 6 \cdot 10^4 \cdot y \quad (10.73)$$

Die in der Abb. 4 (b) senkrecht zur Akkretionsscheibe eingezeichnete dünne Linie ist das Bild eines sog. *Materie-Jets*: Ein Teil des von dem Zentrum akkretierten Gases wird in diesen eng kollimierten Strahl umgelenkt. Die Einzelheiten dieses Prozesses sind noch nicht vollständig aufgeklärt. Es scheint sich aber um ein generelles Phänomen zu handeln, das bei allen verwandten Objekten auftritt und vermutlich eine wichtige Rolle bei der Realisierung der Drehimpuls-Erhaltung spielt.

Die Bildung eines Protosterns (-)

(XXX: Der an dieser Stelle vorgesehene Text, der den Vorgang der weiteren Akkretion beschreibt und erläutert, also die Aufkonzentration von Materie im Zentrum incl. des Drehimpuls-Ausgleichs über einen Jetstrahl entlang der Drehimpulsachse, ist noch nicht verfügbar. Darauf folgt:)

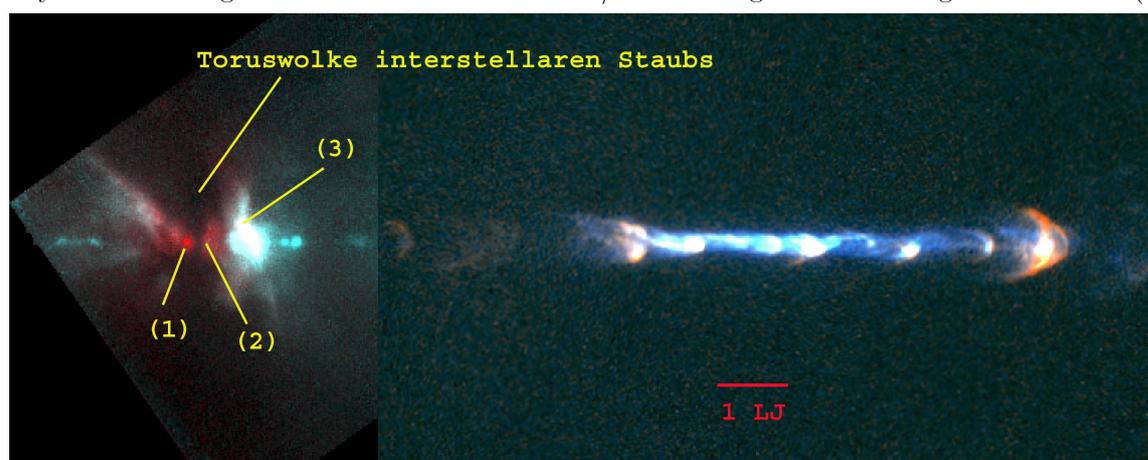


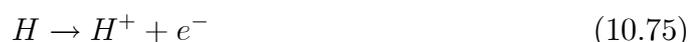
Abb. 5 Jet-erzeugendes Doppelsternsystem, aufgenommen vom Hubble-Teleskope im März (im IR-Licht) bzw. im Nov. (im sichtbaren Licht) 1998 (Quelle: diese Abb. basiert auf dem auf [30] bereitgestellten Bild; credit: NASA and B. Reipurth (CASA, Univ. of Colorado)

s. hierzu auch die Abb. 5. Diese Abb. ist die Überlagerung eines Bildes im IR-Kontrast (aufgenommen mit dem Multi-Object-Spectrometer des HST) und eines Bildes im Kontrast des sichtbaren Lichtes (aufgenommen mit der Wide Field Planetary Camera des HST). Sie zeigt ein 3-Sterne-System in einem Gebiet relativ hoher Staubkonzentration, in dem sich also ständig neue Sterne bilden. Diese torusförmige Staubwolke ist in der Abb. 5 als dunkle Zone erkennbar. Der in dieser Abb. mit der Nomenklatur (3) gekennzeichnete Stern wurde vor einigen $10^3 \cdot y$ durch die gravitative Wechselwirkung dieser 3 Objekte aus dem Verband herausgeschleudert und befindet sich nun auf einer Fluchtbewegung. Einer der beiden anderen Sterne (1) und (2) stößt aktuell in unregelmäßiger Folge in 2 zu einander entgegengesetzte Richtungen orientierte Jets aus, die aus Teilchen von Geschwindigkeiten nahe der Lichtgeschwindigkeit bestehen. (XXX: präzisieren)

Im weiteren Verlauf des Prozesses der Akkretion verdichtet sich der Zentralbereich immer mehr und immer schneller, bis schließlich der Gewinn an Gravitationsenergie ausreicht, um den massereichen Zentralbereich aufzuheizen. Mit dieser stetigen Erhöhung von Temperatur und Massendichte geht eine Veränderung des thermodynamischen Zustands dieser Materie einher: Ab einer Temperatur von $1.800 \cdot K$ dissoziiert der Hauptbestandteil des Protosterns, der Wasserstoff,



Ab $10.000 \cdot K$ ist der Wasserstoff weitgehend ionisiert,



Das Material im Zentrum des Protosterns ist zu einem Plasma geworden, s. Abschnitt 8.3.8. Dieser Prozess der Akkretion dauert etwa $10^3 \dots 10^7 \cdot y$ an, je nach dem Zahlenwert der in der Akkretionsscheibe insgesamt enthaltenen Masse. Ab etwa $6 \cdot 10^5 \cdot K$ zündet in dem Protostern die erste Kernfusion. Dieses ist i.a. das sog. Deuterium-Brennen, s. Absatz S. 1184. Ein neuer Stern ist entstanden, der in dieser Phase immer noch als *Protostern* bezeichnet wird. Ist seine Masse ausreichend groß, so wird schließlich in seinem Zentralbereich die für die Zündung des zentralen H_1^1 -Brennens (s. Absatz S. 1185) erforderliche Temperatur von etwa

$$T_{H\text{-Brennen}} \geq 1,5 \cdot 10^7 \cdot K \quad (10.76)$$

erreicht. Damit ist aus dem Protostern ein *regulärer Stern* geworden, der sich in dem stationären Zustand des H_1^1 -Brennens befindet. In diesem Zustand wird er für eine Zeit der Größenordnung $10^9 \cdot y$ verbleiben. Die Einzelheiten dieser verschiedenen Fusionsprozesse werden wir im Abschnitt 10.2.2 näher untersuchen.

Durch die Möglichkeiten insbesondere der Weltraumteleskopie gelingt es immer öfter, experimentelle Daten bereitzustellen, mit denen die Einzelheiten dieses Entwicklungsprozesses überprüft und oft auch mit konkreten Zahlenwerten präzisiert werden können. Als ein aktuelles Beispiel nenne ich die Untersuchung des Sterns IRAS-1260-6300 aus dem Jahr 2016: Für ihn gelten folgende Daten:

$$A < 1 \cdot 10^7 \cdot y \quad (10.77)$$

$$d = 2,3 \cdot 10^3 \cdot lj \quad (10.78)$$

In der Nähe dieses Sterns befinden sich noch einige Nebelwolken aus kosmischem Staub. Die spektrale Analyse des von dem Stern emittierten Lichtes zeigte eindeutig, dass in dem Stern das H -Brennen noch nicht eingesetzt hat. Denn das Spektrum enthält noch eine Vielzahl von **Emissionslinien**. Der Stern befindet sich daher noch im Zustand der gravitativen Kontraktion.

Die gemessenen Emissionslinien geben überdies Hinweise auf die chemische Zusammensetzung des Protosterns.

Die Bildung massereicher Sterne (-/-)

(XXX: Der Text des Absatzes *Die Bildung massereicher Sterne* ist noch nicht verfügbar. Er wird auch die nachfolgende Abb. 6 und den sie erläuternden Text enthalten:)

Die riesige Wolke W3 aus molekularem Gas ist etwa $6,2 \cdot 10^3 \cdot Lj$ von uns entfernt und hat eine Ausdehnung der Größenordnung $2 \cdot 10^3 \cdot Lj$.

10.2.2 Fusions-Prozesse in Sternen (-)

Wir werden uns nun mit der Frage auseinandersetzen, welche Kernfusionsprozesse als Kandidaten für die real im Zentrum eines Sterns ablaufenden Vorgänge in Frage

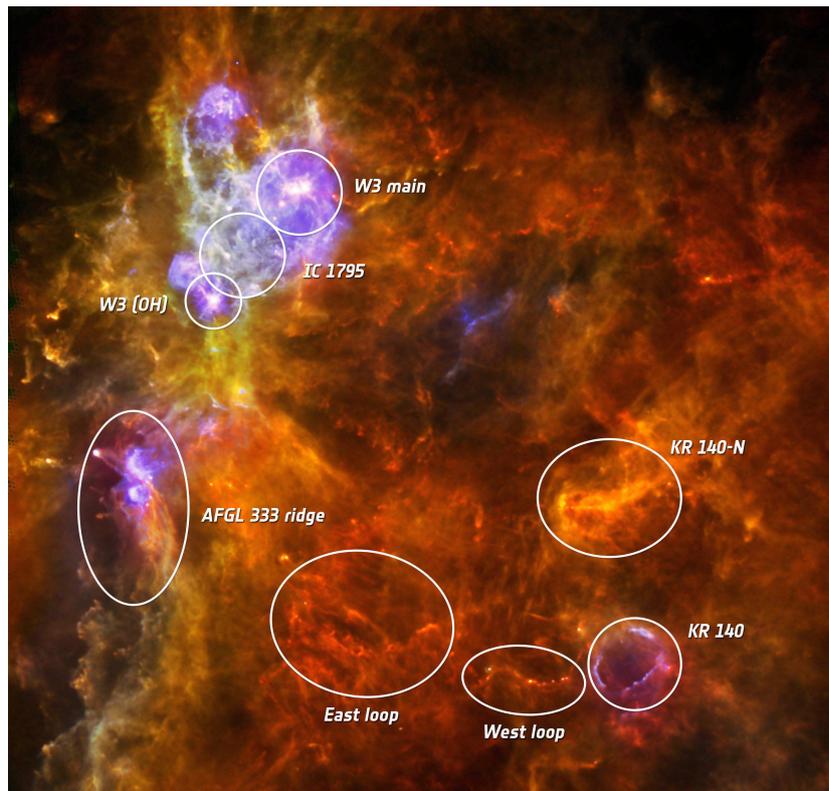
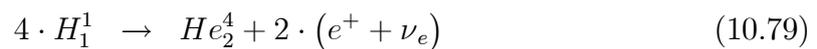


Abb. 6 Infrarotaufnahme der als W3 bezeichneten Wolke aus molekularem Gas innerhalb des Pegasus, einem der Haupt-Spiralarms unserer Milchstraße (Quelle: ESA/Herschel)

kommen. Ein Blick auf die Abb. 19 im Heft 7 (*Quantenmechanik*) zeigt uns, dass im Bereich niedriger Kernladungszahlen der Nettoprozess



$$\Delta E = 18,77 \cdot MeV \quad (10.80)$$

derjenige ist, der ein besonders günstiges Verhältnis von erzeugter Energie und Komplexität des Prozesses aufweist. Solange also als "Brennmaterial" im wesentlichen nur Wasserstoff zur Verfügung steht, ist man geneigt, diesen Gesamtprozess als den wahrscheinlichsten anzusehen. Unter realistischen Werten von (T, p) sind jedoch 4-Körperprozesse äußerst selten. Damit dieser Prozess mit signifikanter Wahrscheinlichkeit möglich wird, müssen wir ihn in Einzelschritte zerlegen, die nach Möglichkeit entweder spontane Zerfälle sind oder 2-Körper-Stoßprozesse. Für das Einsetzen eines Fusionsprozesses im Verlauf der gravitativen Kontraktion eines Protosterns kommen daher durchaus auch andere Fusionsprozesse in Frage als der Prozess 10.79. Diese weisen evtl. eine geringere Reaktionsenergie auf, sind aber einfacher strukturiert. Sie bestehen z.B. aus einem einzelnen 2-Körper-Stoßprozess.

Damit es im Zentralbereich eines Sterns in dem dort als Plasma vorliegenden Sternmaterial ausreichend oft zu 2-Körper-Stößen kommt, muss die Teilchendichte der beteiligten Teilchen, also letztlich die Gesamt-Massendichte einen gewissen Grenzwert m_{init} überschreiten. Und damit sodann bei diesen Stößen mit ausreichender Wahrscheinlichkeit auch wirklich ein bestimmter Prozess abläuft, müssen die kinetischen Energien der an diesen Stößen beteiligten Teilchen hoch genug sein, um die jeweilige Coulomb-Barriere überbrücken zu können. M.a.W. auch die Temperatur des Plasmas muss über einem gewissen Schwellwert T_{init} liegen. Wenn wir annehmen, dass die thermische Energie der Stoßpartner nicht deutlich kleiner sein darf als die Energie der Coulomb-Barriere, dann folgt

$$\kappa \cdot T_{\text{init}} \approx \left| \frac{Q_1 \cdot Q_2}{4 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0} \cdot \frac{1}{(R_1 + R_2)} \right| \quad (10.81)$$

$(Q_i; R_i)$ sind die Ladung und der Teilchenradius der beiden Stoßpartner (1) und (2). Die Kernradien schätzen wir ab über die Faustformel

$$R \approx 1,4 \cdot 10^{-15} \cdot m \cdot \sqrt[3]{\frac{M}{M_H}} \quad (10.82)$$

Im Fall eines Proton-Proton-Stoßes folgt

$$T_{\text{init}} \approx \left| \frac{Q_0^2}{4 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0} \cdot \frac{1}{2 \cdot R_H} \cdot \frac{1}{\kappa} \right| = 3,9 \cdot 10^9 \cdot K \quad (10.83)$$

Dieser Wert liegt etwa um den Faktor $2 \cdot 10^2$ **über** dem heute in der Literatur für das H -Brennen im Zentrum typischer Sterne als korrekt angesehenen Wert (XXX: Referenz nennen) von

$$T_{\text{init}} \approx 1,5 \cdot 10^7 \cdot K \quad (10.84)$$

Die Erklärung für diese Diskrepanz ergibt sich insbesondere aus der Tatsache, dass das Ausgangsmaterial für die Fusions-Reaktion nicht als neutrales Gas, sondern als Plasma vorliegt. Wir müssen also die Abschirmwirkung der Teilchen einer elektrischen Polarität durch die entgegen gesetzt geladenen Teilchen berücksichtigen, s. hierzu die Abschnitte 8.3.3 und 8.3.8.

Bei einem aus mehreren Einzelschritten bestehenden Prozess ergeben sich für den Gesamtprozess integrale Grenzwerte $(m_{\text{init}} ; T_{\text{init}})$, die nicht nur von den Grenzwerten der einzelnen Prozesse abhängen, sondern auch davon, ob alle Zwischenprodukte stabil sind. Im Falle von spontan zerfallenden Zwischenprodukten steigen diese Grenzwerte evtl. steil an, da nun innerhalb der mittleren Lebensdauer dieses Zwischenproduktes bereits ein erneuter, erfolgreicher Stoßprozess mit dem richtigen Stoßpartner stattfinden muss. Diese Betrachtung ist auch für relativ langlebige Zwischenprodukte von Bedeutung, weil nämlich die mittlere Lebensdauer eines Fusionspartners innerhalb der Brennzone relativ lang ist, meist von derselben

Größenordnung wie die Gesamtdauer dieses Fusionsprozesses in dem betrachteten Stern.

Wie in der Literatur üblich werden wir diese verschiedenen in einem Stern ablaufenden Prozess der Kernfusion durchgängig als *Brennen* bezeichnen. Dabei verstehen wir unter dem Begriff K_z^m -Brennen die Fusion eines K_z^m -Kerns mit einem weiteren Partner zu einem Atomkern höherer Ladungszahl und/oder Massenzahl als das Ausgangsprodukt K_z^m . Die Namensgebung eines bestimmten Brennprozesses benutzt also immer den Ausgangskern dieses Prozesses.

Als Literatur zu diesem Gebiet der sog. *Nukleosynthese* verweise ich auf [34].

Das H_1^2 -Brennen (*)

Deuterium H_1^2 ist ein stabiles Isotop des Elementes Wasserstoff. Es ist also auch in dem Material des Protosterns zu einem relativen Anteil der Größenordnung $1,5 \cdot 10^{-2}$ enthalten. Es ermöglicht den 2-Körper-Prozess



$$\Delta E = 5,49 \cdot MeV \quad (10.86)$$

Der überwiegende Teil dieser Reaktionsenergie wird als elektromagnetische Energie abgestrahlt, also in Form eines γ -Quants. Dieser Prozess setzt bereits bei einer Temperatur

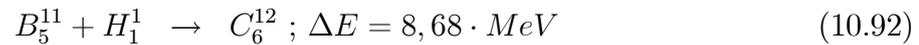
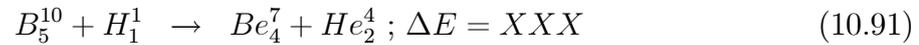
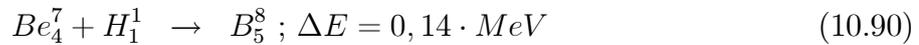
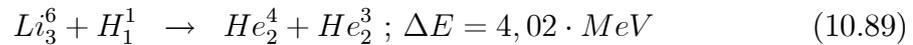
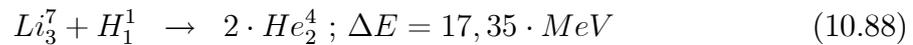
$$T_{\text{init}}(H_1^2\text{-Brennen}) \approx 6 \cdot 10^5 \cdot K \quad (10.87)$$

ein. Er ist damit der 1. Fusionsprozess in einem jungen Stern. Zu diesem Zeitpunkt seiner Entwicklungsgeschichte hat der junge Stern noch nicht ein thermodynamisches und strömungsmechanisches Gleichgewicht erreicht. Vielmehr sorgt die noch immer frei werdende Gravitationsenergie für konvektive Ausgleichströme in seinem Inneren. Dies bewirkt nun, dass dem einsetzenden H_1^2 -Brennen nahezu der gesamte Vorrat an H_1^2 zur Verfügung steht. Trotzdem ist dieser Vorrat nach einer Zeit der Größenordnung $10^5 \cdot y$ erschöpft.

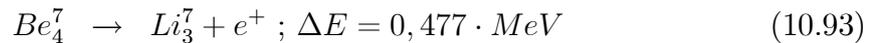
Proton-Einfang durch leichte Elemente (-)

Eine weitere Klasse von 2-Körper-Stoßprozessen, die eine signifikante Fusionsenergie ergeben, ist der Proton-Einfang durch leichte Elemente. Die Beschränkung auf leichte Elemente ergibt sich einfach aus der Tatsache, dass mit wachsender Ordnungszahl die zu überwindende Coulomb-Barriere immer größer wird. Typische in diese Klasse

fallende Prozesse sind:



Das Reaktionsprodukt Be_4^7 ist instabil und zerfällt spontan gem.



$$\tau_{1/2} = 53,22 \cdot d \quad (10.94)$$

Dies hat aber auf den Primärprozess keinen signifikanten Einfluss, erhöht nur die insgesamt frei werdende Energie. Diese Prozesse benötigen zu ihrer Zündung eine Temperatur von

$$T_{\text{init}}(Li, Be, B\text{-Brennen}) \approx 2 \cdot 10^6 \cdot K \quad (10.95)$$

Sie setzen also erst zu einem späteren Zeitpunkt in der Entwicklungsgeschichte des jungen Sterns ein als das H_1^2 -Brennen. Voraussetzung hierfür ist eine Masse des Protosterns von mindestens

$$M(\text{Stern}) > 50 \cdot M_{\text{Jupiter}} = 0,5 \cdot 10^{-4} \cdot M_{\odot} \quad (10.96)$$

Je nach der Sternmasse dauert dieser Vorgang

$$\Delta t_{Li\text{-Brennen}} = 50 \dots 250 \cdot 10^6 \cdot y \quad (10.97)$$

Während dieser Zeit ist die gravitative Kontraktion durch die bereits brennenden Fusionsprozesse weitgehend angehalten, so dass kaum noch konvektive Masseströme auftreten. Daher steht für diese Prozesse (10.88 bis 10.92) nur der in der Brennzone des Stern-Zentrums vorhandene Vorrat an leichten Elementen zur Verfügung.

Gegen Ende dieses Ablaufs kontrahiert der Stern langsam weiter und erreicht irgendwann die für das eigentliche H_1^1 -Brennen erforderliche Zündtemperatur, s. nachfolgenden Absatz.

Das H_1^1 -Brennen (-)

Wir wenden uns nun konkret dem bereits in der Einleitung zu diesem Abschnitt 10.2.2 angeführten Prozess des eigentlichen H_1^1 -Brennens zu, s. Gl. 10.79. **Eine** Möglichkeit, diesen Prozess in Einzelschritte zu zerlegen, ist der folgende, aus 3 Einzelreaktionen bestehende Zyklus:

Physik	ganz	klein	/	ganz	gross	(-)
Edukte	Produkte	$\Delta E / \text{MeV}$				
$H_1^1 + H_1^1$	$H_1^2 + e^+ + \nu_e$	0,42				
$H_1^1 + H_1^2$	$He_2^3 + \gamma$	5,49				
$He_2^3 + He_2^3$	$H_1^1 + H_1^1 + He_2^4$	12,86				

Dieser hat den Namen *Proton-Proton-Zyklus* erhalten. Er besteht aus 3 getrennten 2-Körper-Stoßprozessen, die alle einen positiven Wert der Reaktionsenergie aufweisen. Damit es im Zentralbereich eines Sterns in dem dort als Plasma vorliegenden Sternmaterial ausreichend oft zu diesen 2-Körper-Stößen kommt, muss wieder die Teilchendichte der beteiligten Teilchen, also letztlich die Gesamt-Massendichte einen gewissen Grenzwert m_{init} überschreiten, und ebenso die Temperatur einen gewissen Schwellwert T_{init} .

Für die 2. Reaktion



erwarten wir eine ähnliche Temperatur T_{init} wie für die 1. Reaktion, da sich die Ladung der Stoßpartner gegenüber der 1. Reaktion nicht verändert hat. Lediglich der Teilchenradius von einem der beiden Stoßpartner ist etwas größer. Für die 3. Reaktion dagegen ist der Wert der Coulomb-Barriere um den Faktor

$$\frac{4 \cdot 2}{(1 + \sqrt[3]{3})} \approx 3,3 \quad (10.99)$$

größer als für die 1. Reaktion. Diese Reaktion bestimmt also die für das Einsetzen des Proton-Proton-Zyklus insgesamt geltende Schwellwert-Temperatur T_{init} . Dieser beträgt etwa

$$T_{\text{init}}(\text{p-p}) = 4 \cdot 10^6 \cdot K \quad (10.100)$$

Eine weitere Möglichkeit der Realisierung der Netto-Reaktion gem. Gl. 10.79 ist der sog *CNO-Zyklus* (nach den Symbolen für Kohlenstoff, Stickstoff und Sauerstoff). Er besteht aus den Einzelschritten

Edukte	Produkte	$\Delta E / \text{MeV}$	Lebensdauer
$C_6^{12} + H_1^1$	$N_7^{13} + \gamma$	1,95	$(1,3 \cdot 10^7 \cdot y)$
N_7^{13}	$C_6^{13} + e^- + \bar{\nu}_e$	1,37	7 · min
$C_6^{13} + H_1^1$	$N_7^{14} + \gamma$	7,54	$(2,7 \cdot 10^6 \cdot y)$
$N_7^{14} + H_1^1$	$O_8^{15} + \gamma$	7,35	$(3,2 \cdot 10^8 \cdot y)$
O_8^{15}	$N_7^{15} + e^- + \bar{\nu}_e$	1,86	82 · s
$N_7^{15} + H_1^1$	$C_6^{12} + He_2^4$	4,96	$(1,12 \cdot 10^5 \cdot y)$

Auch bei diesem Zyklus hat jeder Einzelschritt eine positive Reaktionsenergie, er läuft also von selbst ab. Er wurde Mitte der 30-er Jahre unabhängig von einander von *Hans Albrecht Bethe* (* 1906 in Straßburg (heute Strasbourg/Frankreich); † 2005 in Ithaka/N.Y.(USA)) ([7]) und *Carl Friedrich v. Weizsäcker* (* 1912 in Kiel; † 2007 in Söcking/Starnberger See)([5], [6]) als möglicher Prozess der Kernfusion in Sternen

vorgeschlagen. Dieser Zyklus wird daher oft auch als *Bethe-Weizsäcker-Zyklus* bezeichnet.

Der CNO-Zyklus besteht aus 4 2-Teilchen-Stoßprozessen, in die 2 spontane Zerfallsprozesse mit relativ kurzer Lebensdauer eingebettet sind. Alle 4 Stoßprozesse bestehen in dem Einfang eines Protons durch einen etwas schwereren Kern als He_2^4 . Damit dieser Zyklus ablaufen kann, muss daher im Zentrum des Sterns zumindest eines der Elemente *C*, *N* oder *O* zumindest in Spuren vorhanden sein. Diese Bedingung ist zumindest bei Sternen der 3. Generation (s. Kopftext des Abschnitts 10.2.1) erfüllt. Diese Elemente wirken jedoch nur als Katalysatoren, sie werden durch diesen Zyklus nicht verbraucht! Die auf die Reaktion gem. Gl. 10.85 bezogene Coulomb-Barriere für einen dieser Stoßprozesse beträgt

$$\frac{7 \cdot 2}{(1 + \sqrt[3]{13})} \approx 4,2 \quad (10.101)$$

und ist im Vergleich zur Gl. 10.99 (nur) etwa um den Faktor 1,3 erhöht. Wir erwarten daher auch für den realen Wert $T_{\text{init}}(\text{CNO-Zyklus})$ einen etwa um diesen Faktor höheren Wert. Die auf die Gesamtanzahl der in der Brennzzone vorhandenen Katalysatorkerne bezogene Wahrscheinlichkeit für das Auftreten dieser Prozesse ist jedoch relativ niedrig, so dass jeder Katalysator-Kern relativ lange in der Brennzzone verbleibt, bis er erneut in den CNO-Prozess einbezogen wird. Die unter den heute für realistisch angesehenen Bedingungen für realistisch angesehene Wartezeit für diese Prozesse ist in der obigen Tabelle als Pseudo-Lebensdauer (in Klammern gesetzt) mit angegeben.

Das He-Brennen (-)

Die für das *He*-Brennen erforderliche Mindesttemperatur T_{init} liegt deutlich über der Temperatur des H_1^1 -Brennens. Daher müssen wir davon ausgehen, dass diese beiden Prozesse nicht gleichzeitig und an demselben Ort ablaufen werden, s. hierzu Abschnitt 10.2.3. Außerdem führt auch die starke Gravitation im Kernbereich des Sterns zu einer Konzentration des gebildeten *He* im Zentrum des Sterns. Als Fusionsprozesse des *He*-Brennens kommen daher bevorzugt solche in Frage, die *He*-Kerne (und ggfls. schwerere Elemente) benötigen, aber keine *H*-Kerne. Der einfachste denkbare Fusionsprozess ist daher der Prozess



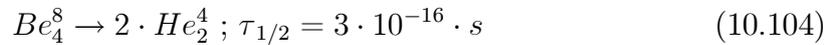
Für die erforderliche Reaktionsenergie von $91,78 \cdot keV$ steht primär die thermische Energie der beiden Stoßpartner zur Verfügung. Bei einer Temperatur der Größenordnung $10^8 \cdot K$ gilt

$$\kappa \cdot T \approx 10 \cdot keV \quad (10.103)$$

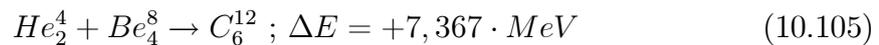
so dass im Schwerpunktsystem des Stoßprozesses im Mittel eine thermische Energie von $20 \cdot keV$ zur Verfügung steht. Der noch fehlende Faktor 5 bedeutet, dass nur

der höherenergetische Teil in der Energieverteilung des Helium-Plasmas zum Fusionsbrennen beitragen kann.

Das Reaktionsprodukt Be_4^8 ist jedoch sehr instabil, es zerfällt spontan wieder zurück in 2 He_2^4 -Kerne,



Um zu einem Gesamt-Prozess mit einer signifikanten Netto-Produktionsrate zu gelangen, müssen wir einen weiteren Prozessschritt ergänzen. Setzen wir weiterhin nur He_2^4 -Kerne ein, so erhalten wir



Die Verknüpfung dieser beiden Reaktionen 10.102 und 10.105 stellt den vermutlich dominierenden Mechanismus für das *He*-Brennen dar und hat den Namen *3-Alpha-Prozess* oder *Salpeter-Prozess* erhalten, benannt nach dem österreichisch/australisch/amerikanischen Physiker *Erwin Ernest Salpeter* (* 1924 in Wien; † 2008 in Ithaka/NY als em. Prof. der Cornell University (NY)). Bei diesem 2-stufigen Prozess fusionieren insgesamt 3 α -Teilchen (daher der Name) zu einem *C*-Atomkern.

Dass der 3-Alpha-Prozess trotz dieses extrem kurzlebigen Zwischenkerns überhaupt mit ausreichender Wahrscheinlichkeit möglich ist, liegt an der sog. *doppelten Resonanz*: Die Energie des Be_4^8 in seinem Grundzustand beträgt nahezu exakt das Doppelte der Energie des He_2^4 . Und der Kern C_6^{12} hat einen angeregten Kernzustand, der nahezu exakt $7,367 \cdot MeV$ über seinem Grundzustand liegt.

Dennoch benötigt dieser Prozess wegen der extrem kurzen Zerfallszeit des Be_4^8 sehr hohe Temperaturen,

$$T_{\text{init}}(\text{He-Brennen}) \approx 1 \cdot 10^8 \cdot K \quad (10.106)$$

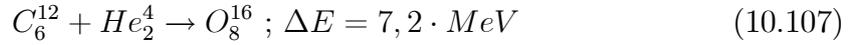
und ist extrem empfindlich gegenüber Änderungen der Temperatur. Für eine Verdopplung des Energieumsatzes wird ein relativer Temperaturanstieg von lediglich 2,3% benötigt. Daher ist ein Stern während seiner Phase des *He*-Brennens relativ labil. Es kommt leicht zu einem starken Überschwingen der Reaktionsgeschwindigkeit bis hin zu einer Nova-Explosion (s. Absatz S. 1215).

Insgesamt entspricht die Dauer des *He*-Brennens nur etwa $\frac{1}{10}$ der vorangegangenen Dauer des H_1^1 -Brennens.

Das C-Brennen (-)

Sofern die gravitativen Kräfte gegenüber den Konvektionsströmen überwiegen, bildet der durch das voran gegangene *He*-Brennen gebildete Kohlenstoff den Kernbereich des Sterns, der von einer ihn umschließenden *He*-Schale und einer sich daran anschließenden *H*-Hülle umgeben ist. Bei Sternen, deren Gesamtmasse oberhalb eines gewissen Grenzwertes liegt, setzt irgendwann das *C*-Brennen ein: Zum einen kommt

es in der Grenzzone zwischen der *He*-Schale und dem Kernbereich mit den schwereren Elementen zu einem erneuten α -Einfang gem.



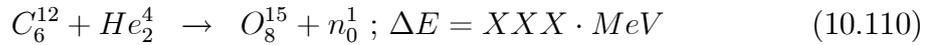
Dieses Reaktionsprodukt ist ein absolut stabiles Isotop. Aus Modellrechnungen konnte geschlossen werden, dass die hierfür erforderliche Mindest-Temperatur

$$T_{init}(C\text{-Brennen}) = 5 \cdot 10^8 \cdot K \quad (10.108)$$

beträgt. Daneben treten auch die analogen Prozesse auf mit den übrigen Isotopen der Elemente *C* und *He*, z.B



Bei der Diskussion all dieser Fusionsprozesse gilt es zu bedenken, dass zusätzlich zu den kernphysikalisch bedingten energetischen Bedingungen immer auch der Gesamtimpuls erhalten bleiben muss, damit der Prozess auch wirklich stattfinden kann. Diese Bedingung aber ist leichter erfüllbar, wenn als Ergebnis der Reaktion an Stelle von nur einem Ergebniskern mindestens 2 Teilchen entstehen. Daher treten neben den Reaktionen vom Typ der Gl. 10.109 immer auch Prozesse mit mehr als einem Ergebniskern auf, an dieser Stelle also z.B. die Prozesse



Aus Analogie-Überlegungen liegt es nahe anzunehmen, dass sich an jeden dieser O_8 erzeugenden Prozesse der Prozess

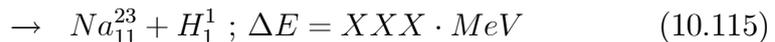
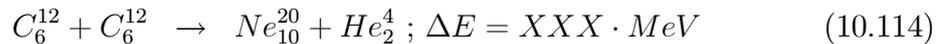


anschließt. Dieser Prozess tritt jedoch **nicht** auf. Er ist wegen spezieller Auswahlregeln des Kernspins extrem unwahrscheinlich(XXX: Bezug nennen).

Im Kernbereich des Sterns überwiegt beim *C*-Brennen ein anderer Prozess, nämlich



bzw. die mit diesem Prozess verwandten Reaktionen mit 2 Ergebniskernen, u.a.



(XXX: Der weitere Text des Absatzes *Das C-Brennen* ist noch nicht verfügbar.)

Weitere Brenn-Prozesse (-)

In ähnlicher Weise wie beim C -Brennen sind als Fortsetzung dieser Kette von Fusions-Prozessen weitere Prozesse möglich, die entweder als α -Einfangprozesse beschrieben werden können oder als direkte 2-Körper-Reaktionen zwischen in Vorgänger-Reaktionen gebildeten mittelschweren Kernen. Z.B. reagiert der Sauerstoff weiter zu Schwefel (S),



und über die gemischte Reaktion bildet sich Si ,



Den (vorläufigen) Abschluss dieser Reaktionskette bildet der Prozess



Reaktionsprozesse, die zu Kernen mit einer Ladungszahl $z > 26$ führen, haben jedoch i.a. negative Reaktionsenergien, so dass sie unter den bisher diskutierten Bedingungen nicht mit signifikanter Wahrscheinlichkeit auftreten. Denn die Reaktionspartner müssten sich vor der jeweiligen Fusionsreaktion bereits in hochangeregten (Kern-)Zuständen befinden, um so die erforderliche Reaktionsenergie mit einzubringen. Ihre Bildung ist daher auf besondere instationäre Umstände beschränkt, wie sie z.B. bei der Explosion von Sternen auftreten, s. Abschnitt 10.2.5.

Parallel zu den bisher diskutierten Prozessen ereignen sich ständig weitere Proton- und Neutron-Einfangprozesse und sich daran ggfls. anschließende spontane (e^- -, e^+ -, n_0^1 -, p_1^1 -)Emissionsprozesse. Durch diese Prozesse entsteht die ganze Bandbreite der weiteren, bisher nicht diskutierten Elemente und Isotope mit $z \leq 26$ ebenfalls.

10.2.3 Stationäre Zustände v. Sternen (-)

Ein *stationärer*, d.h. ein über einen (auf einer astronomischen Zeitskala) signifikanten Zeitraum **stabiler** Zustand eines Sterns ist dann gegeben, wenn der an jeder Stelle des Sterninneren vorhandene Gravitationsdruck $p < 0$ durch einen vom Inneren des Sterns aufgebauten Gegendruck $p > 0$ kompensiert wird. In den meisten Fällen ist dies primär der thermodynamische Druck des auf eine ausreichend hohe Temperatur aufgeheizten Sternmaterials an dieser Stelle. Aber auch der Strahlungsdruck der elektromagnetischen Strahlung trägt signifikant zur Druckbilanz bei. Er entsteht primär durch die inelastische Streuung der Photonen an den freien Elektronen des Sternplasmas.

Außerdem muss der von den Fusionsprozessen insgesamt generierte Energiestrom identisch sein mit dem insgesamt in das Weltall abgestrahlten Energiestrom. Dieser besteht primär aus der abgestrahlten elektromagnetischen Energie. Es müssen jedoch auch die übrigen Teilchenströme berücksichtigt werden, die den Stern verlassen. Für die Gesamt-Energiebilanz relevant ist auch der aus den Fusionsprozessen

resultierende Neutrinoström. Er macht jedoch nur etwa 1% der insgesamt erzeugten Energie aus (s. Aufgabe 4). Dieser durchdringt jedoch den Weg von der Brennzonenzone bis zur Sternoberfläche ohne eine signifikante Schwächung. Er trägt also weder zum Druck noch zum Wärmetransport innerhalb des Sterns bei und wirft daher auch keine Konvektionsströme an.

Den Gravitationsdruck einer rotationssymmetrischen Massenverteilung haben wir bereits im Absatz S. 1171 berechnet, s. Gl. 10.64. Er beträgt

$$p = -\frac{3}{20 \cdot \pi} \cdot \gamma \cdot \frac{M^2}{R^4} \quad (10.120)$$

Sofern wir die äußere Hülle des Sterns als (klassisches) ideales Gas behandeln dürfen, beträgt dessen Druck (s. Gl. 8.117)

$$p_{\text{therm.}} = +\frac{N \cdot \kappa \cdot T_O}{V} = n \cdot \kappa \cdot T_O \quad (10.121)$$

Dabei ist T_O die Temperatur der Sternoberfläche. Der Gesamtdruck auf die äußere Hülle des Stern verschwindet also genau dann, wenn gilt

$$-\frac{3}{20 \cdot \pi} \cdot \gamma \cdot \frac{M^2}{R^4} + n \cdot \kappa \cdot T_O = 0 \Leftrightarrow \quad (10.122)$$

$$T_O = \frac{3}{20 \cdot \pi} \cdot \gamma \cdot \frac{M^2}{R^4} \cdot \frac{1}{n \cdot \kappa} \quad (10.123)$$

Wenn wir voraussetzen, dass die Sternhülle nahezu ausschließlich atomaren Wasserstoff enthält, dann wird die Gl. 10.123 zu

$$T_O = \frac{1}{5} \cdot \gamma \cdot \frac{M}{R} \cdot \frac{\hat{m}_H}{\kappa} \quad (10.124)$$

Bei vorgegebener Gesamtmasse M des Sterns gibt es also nicht etwa nur genau **einen** Sternradius R , bei dem die Gleichgewichts-Bedingung 10.121 erfüllt ist, sondern diese Bedingung gilt für die durch die Gl. 10.123 definierte 1-dimensionale Schar von Wertepaaren (T_O, R) .

Dass sich genau **ein** stationärer Zustand einstellt, resultiert aus einer weiteren Bedingung. Diese wird durch die Energiebilanz erbracht. Sobald nämlich der Stern eine Oberflächentemperatur T_O aufweist, strahlt er einen Energiestrom an elektromagnetischer Strahlung ab von (Gl. 8.474)

$$J_{\text{Strahlg}}^{(E)}(T_O) = \sigma \cdot 4 \cdot \pi \cdot R^2 \cdot T_O^4 \quad (10.125)$$

In dieser Gl. ist σ eine Naturkonstante, nämlich die Stefan-Boltzmann-Konstante, s. Abschnitt 8.5.2. In einem stationären Zustand muss der Wert $J_{\text{Strahlg}}^{(E)}(T_O)$ identisch sein mit dem im Inneren des Sterns durch Prozesse der Kernfusion erzeugten Energiestrom $J_{\text{Fusion}}^{(E)}(T_i)$,

$$\left| J_{\text{Strahlg}}^{(E)}(T_O) \right| = \left| J_{\text{Fusion}}^{(E)}(T_i) \right| \quad (10.126)$$

Dieser hängt nun seinerseits in komplizierter Weise von dem im Inneren des Sterns vorliegenden Temperaturprofil $T_i(r)$ ab, also letztlich von der Oberflächentemperatur T_O . Wir wollen annehmen, dass die Zeitkonstante, mit der der integrale Fusionsprozess in der Zentralregion des Sterns auf eine Änderung der Oberflächentemperatur T_O reagiert, groß ist gegen die Zeitkonstante, mit der sich das Druck-Gleichgewicht an der Oberfläche einstellt. Dann dürfen wir für die Dauer dieses Einstellprozesses den aus dem Zentralbereich des Sterns an der Oberfläche eintreffenden, von der Kernfusion erzeugten Energiestrom als konstant ansehen. Dann muss gelten

$$\left| J_{\text{Fusion}}^{(E)}(T_i) \right| = \sigma \cdot 4 \cdot \pi \cdot R^2 \cdot T_O^4 \quad (10.127)$$

und es folgt unter Verwendung der Gl. 10.124

$$T_O = \frac{\kappa \cdot \sqrt{\frac{|J_{\text{Fusion}}^{(E)}(T_i)|}{4 \cdot \pi \cdot \sigma}}}{\frac{1}{5} \cdot \gamma \cdot M \cdot \hat{m}_H} \quad (10.128)$$

$$R = \sqrt{\frac{4 \cdot \pi \cdot \sigma}{|J_{\text{Fusion}}^{(E)}(T_i)|}} \cdot \left(\frac{1}{5} \cdot \frac{\gamma}{\kappa} \cdot M \cdot \hat{m}_H \right)^2 \quad (10.129)$$

Die in der Gl. 10.128 verwendete Temperatur T_i sei die in dem von der Kernfusion erfassten Zentralbereich des Sterns herrschende mittlere Temperatur. Bei vorgegebener Gesamtmasse M und bei bekanntem integralen Strahlungsstrom $|J_{\text{Strahlg}}^{(E)}|$ eines Sterns sind wir also in der Lage, dessen geometrische Größe R und Oberflächentemperatur T_O zu berechnen. Wir gehen davon aus, dass (bei vorgegebener chemischer Zusammensetzung) bereits die Kenntnis der Stern-Masse genügt, um daraus für den Zustand des stationären H -Brennens den integralen Strahlungsstrom $|J_{\text{Strahlg}}^{(E)}|$ zu berechnen. Wie bereits angedeutet benötigen wir hierzu ein realistisches Gesamt-Modell für diesen Stern-Zustand. Dieses Modell muss die wichtigsten hierbei auftretenden Prozesse und ihre jeweilige Abhängigkeit von den Variablen T, p, m, r ausreichend genau erfassen:

1. Die im Zentrum des Stern ablaufenden Prozesse der Kernfusion und deren Abhängigkeit insbesondere von (T, p) ;
2. die den Energietransport bis an die Sternoberfläche ausführenden Prozesse der Massenkongvektion und der diffusen Ausbreitung elektromagnetischer Strahlung;
3. die thermodynamischen Ausgleichprozesse, durch die sich (über nicht zu kleine Volumina gemittelt) ein stationäres Temperaturprofil $T(r)$ und Massendichteprofil $m(r)$ einstellen.

Für den Energietransport bis an die Sternoberfläche ist die auch an dieser Stelle als *Opazität* bezeichnete Kenngröße des Sternmaterials entscheidend. Sie gibt

an, in welchem Umfang die elektromagnetische Strahlung, die von der Brennzone der Kernfusion als thermische Strahlung emittiert wird, von dem umgebenden Sternmaterial absorbiert wird, bevor sie den Stern verlassen kann. Der Problemstellung besser angepasst ist die Kenngröße der Reichweite für diese Strahlung. Sie gibt nämlich direkt an, wie weit diese Strahlung ungehindert bis in die weiter außen liegenden Schichten des Sterns vordringen kann, bevor sie absorbiert wird. Die von einem Sternzentrum mit zentralem H_1^1 -Brennen ausgehende thermische Strahlung hat ihr Maximum bei (s. Gl. 8.469)

$$\lambda_{\max} = \frac{2,8978 \cdot \text{mm} \cdot K}{T} = \frac{2,8978 \cdot \text{mm} \cdot K}{1,5 \cdot 10^7 \cdot K} = 0,19 \cdot \text{nm} \quad (10.130)$$

Sie liegt also im typischen Bereich der Röntgenstrahlung (s. Absatz S. 6.2.3), wie sie von schwereren Elementen absorbiert wird, wenn eines ihrer inneren Elektronen z.B. aus der k-Schale angeregt wird.

An dieser Stelle müssen wir nun wieder zwischen Sternen der 2. und der 3. Generation unterscheiden, s. Abschnitt 10.2.1: Sterne der 3. Generation enthalten einen signifikanten Anteil an schwereren Elementen. Solange von diesen ein gewisser Anteil noch nicht völlig ionisiert ist, wirken diese Atome als Absorptionszentren für die hier zu betrachtende Strahlung und der Stern ist für diese hochenergetische thermische Strahlung opak. D.h. die Strahlung wird derart stark (in diesem Fall überwiegend inelastisch) gestreut, dass sie pro effektive Fortschreitungsänge eine extrem hohe Anzahl von Streuprozessen benötigt. Die erzeugte Fusionsenergie wird also ganz überwiegend nicht als Strahlung in die äußeren Bereiche des Sterns transportiert sondern als konvektiver Massestrom. Erst wenn der Energiestrom eine Schale des Sterns erreicht hat, deren Temperatur bereits deutlich niedriger ist, wird das Sternmaterial für die zugehörige thermische Strahlung zunehmend transparent und der Energiestrom kann den restlichen Weg innerhalb des Sterns mehr und mehr in Form von Strahlung verlassen. In Sternen der 3. Generation erfolgt der Energietransport also in der Nähe des Zentrums überwiegend konvektiv und im Randbereich überwiegend über Strahlung.

Sterne der 2. Generation enthalten praktisch keine schweren Elemente. Daher kann die hochenergetische thermische Strahlung, die vom H_1^1 -brennenden Zentrum erzeugt wird, eine relativ lange Strecke innerhalb des Sterns zurücklegen, bis sie schließlich doch absorbiert worden ist. Innerhalb dieses inneren Bereichs des Sterns erfolgt der Energietransport also überwiegend über Strahlung. Die verbleibende äußere Schale des Sterns befindet sich jedoch bereits auf einer deutlich niedrigeren Temperatur, so dass die von ihr re-emittierte thermische Strahlung deutlich langwelliger ist und von dem weiterhin als Plasma vorliegenden Sternmaterial ohne weiteres reabsorbiert werden kann. Der Stern ist für diese Strahlung also wieder opak, und der Energietransport erfolgt überwiegend über konvektive Masseströme. In Sternen der 2. Generation erfolgt der Energietransport also in der Nähe des Zentrums überwiegend über die Strahlung und im Randbereich überwiegend konvektiv.

Diese unterschiedliche Schichtung der Mechanismen des Energietransports resultiert aus dem unterschiedlichen Gehalt der Sterne der 2. und der 3. Generation an schwereren Elementen. Da nun andererseits besonders massereiche Sterne oft Sterne der 2. Generation sind, wird dieses unterschiedliche Verhalten in vielen Schriften unmittelbar der unterschiedlichen Masse zugeordnet. Wie ich gerade erläutert habe, ist dies meiner Kenntnis nach in dieser Form nicht richtig bzw. zumindest missverständlich.

Wir werden uns jedoch mit all diesen Fragen der Modellierung der in Sternen ablaufenden dynamischen Prozesse nun nicht tiefer gehend befassen, sondern uns darauf beschränken, die Kenndaten der bis heute vermessenen Sterne zu Rate zu ziehen. Als Vorbereitung auf diese Diskussion machen wir uns im nachfolgenden Absatz *Helligkeits-Definitionen der Astronomie* mit den verschiedenen Kenngrößen vertraut, die in der Astronomie zur Quantifizierung der Helligkeit eines Himmelsobjektes benutzt werden.

Helligkeits-Definitionen der Astronomie (*)

Die am häufigsten benutzte Kenngröße zur Charakterisierung eines Sterns ist seine *Helligkeit*. Diese Kenngröße werden wir nun genauer definieren. Dabei können wir uns nicht direkt auf geometrisch-physikalisch sauber definierte Größen beziehen, wie sie im Kapitel 11.7 ausführlich dargestellt sind. Denn die astrophysikalische Messtechnik ist historisch einen anderen Weg gegangen.

Ausgangsgröße für alle weiteren astronomischen Helligkeitsdefinitionen ist die *scheinbare Helligkeit* eines Sterns:

Definition 184 Die *scheinbare Helligkeit* H_{sch}^\ddagger eines Sterns ist gleich dem Messsignal I_S , das dieser Stern in einem astronomischen Detektor generiert, bezogen auf das Signal I_{ref} , das ein geeignetes Referenzobjekt in demselben Detektor generiert.

$$H_{sch} = \frac{I_S}{I_{ref}} \quad (10.131)$$

Entspricht die relative spektrale Empfindlichkeit des Detektors der Augenempfindlichkeit (s. Abschnitt 11.14.5), so bezeichnet man diese scheinbare Helligkeit des Sterns als *visuelle Helligkeit* $H_{sch-vis}$. Ist die relative spektrale Empfindlichkeit des Detektors in ausreichender Näherung wellenlängen-unabhängig, so bezeichnet man die hiermit gemessene scheinbare Helligkeit als *bolometrische Helligkeit* $H_{sch-bol}$.

[‡]In der astronomischen Literatur wird diese Messgröße häufig mit dem Buchstaben M gekennzeichnet, vermutlich weil diese Messgröße von den Astronomen der Antike als Magnitude bezeichnet wurde. Ich habe mich entschlossen, davon abzuweichen, um eine Verwechslung mit der Masse zu vermeiden.

Als Referenzstern dient der Stern Wega, der hellste Stern im Sternbild der Leier. Aus historischen Gründen wird dieser Referenzwert jedoch noch mit einem leicht von der Zahl 1,0 abweichenden Korrekturfaktor multipliziert,

$$H_{\text{sch}} = \frac{I_S}{1,0280 \cdot I_{\text{Wega}}} \quad (10.132)$$

Diese Helligkeitsdefinition ist für alle Himmelskörper anwendbar, sowohl für die selbst leuchtenden Sterne als auch für die wesentlich näheren Objekte aus unserem eigenen Planetensystem, also für unsere Sonne und für die nicht selbst leuchtenden, sondern das Sonnenlicht partiell reflektierenden Planeten, Monde, Asteroide etc. . Schließen wir alle diese Himmelsobjekte mit ein, so überstreicht die scheinbare Helligkeit dieser Objekte einen Bereich von etwa

$$10^{-11} < H_{\text{sch-vis}}(\text{Himmelsobjekt}) < 10^{11} \quad (10.133)$$

Es bot sich daher an, diesen Helligkeitswert in logarithmischen Einheiten anzugeben. Die heute noch geltende Vorgehensweise geht auf den englischen Astronomen *Norman Robert Pogson* (* 1829 in Nottingham; † 1891 in Chennai (Indien) als Direktor des Hartwell-Hall-Observatory in Cambridge) zurück. Er war bemüht, bei diesem Schritt die bis dahin geltende Einteilung der Sterne in ganzzahlige Helligkeits-Klassen zumindest näherungsweise zu erhalten. Diese von Hipparchos intuitiv getroffene Einteilung war annähernd logarithmisch skaliert. Die mittlere Helligkeit änderte sich von einer Helligkeitsklasse zur nächsten etwa um den Faktor 1,5. Unglücklicherweise hat es sich nun eingebürgert, diese logarithmische Größe ebenfalls *Helligkeit* zu nennen und diese beiden Helligkeitswerte (lediglich) dadurch zu unterscheiden, dass man die logarithmische Kenngröße um die wie eine Dimension behandelte Kennung *mag* (für magnitude (engl.) die Größe) ergänzte, obwohl jede als Logarithmus definierte Größe eigentlich dimensionslos ist (s. Kapitel 2.1). Diese den Neuling verwirrende und physikalisch unsinnige Kennzeichnung hat sich leider durchgesetzt, so dass ich sie in den astronomischen Kapiteln dieses Lehrbuchs ebenfalls verwenden werde. Dabei werde ich mir erlauben, zur Verdeutlichung des öfteren die Kennung *mag* als hochgestellten Index zu ergänzen.

Aus diesem Gesamtkonzept resultierte die

Definition 185 Die logarithmisch skalierte scheinbare Helligkeit eines Himmelsobjektes, das in einem astronomischen Detektor ein Messsignal I_S erzeugt, ist definiert als

$$H_{\text{sch}}^{\text{mag}} = 2,5 \cdot \log \left(\frac{1,0280 \cdot I_{\text{Wega}}}{I_S} \right) \cdot \text{mag} \quad (10.134)$$

Diese Definition bewirkt auch, dass besonders helle Sterne eine besonders kleine (i.a. sogar negative) scheinbare (logarithmische) Helligkeit haben und besonders dunkle eine besonders große positive. Der real auftretende Wertebereich beträgt etwa

$$-27 < H_{\text{sch}}^{\text{mag}} < +28 \quad (10.135)$$

Der Wert -27 entspricht etwa der scheinbaren Helligkeit unserer Sonne und der Wert $+28$ der Helligkeit eines bestimmten Objektes im Sternbild Orion, das vermutlich ein brauner Zwerg (s. Absatz S. 1202) ist.

Die Messgröße der scheinbaren Helligkeit ist ein Maß für die Intensität an elektromagnetischer Strahlung, die von diesem Stern auf unserer Erde **ankommt**, jedoch nicht für den gesamten Energiestrom, den dieser Stern **abstrahlt**. Um auch für diese physikalische Größe zumindest einen relativ zu einem Standardobjekt bestimmten Kennwert angeben zu können, haben die Astronomen die sog. *absolute Helligkeit* eines Himmelsobjektes definiert. Hierzu berechnen sie zu jedem konkreten Objekt die scheinbare Helligkeit, die dieses Objekt hätte, wenn es sich in einer Entfernung von

$$\Delta r_{ref} = 10 \cdot pc \quad (10.136)$$

von der Erde befinden würde, und wenn die emittierte Strahlung entlang dieser Strecke nicht geschwächt würde. Zur Definition dieser in der Astronomie häufig benutzten Längeneinheit *parsec* (mit der Abkürzung *pc*)

$$1 \cdot pc = 3,26 \cdot Lj \quad (10.137)$$

s. Absatz S. 1412. Dieses Gedankenexperiment führt dann zu der

Definition 186 *Die absolute Helligkeit H_{abs} eines Sterns ist gleich der scheinbaren Helligkeit, die derselbe Stern[§] hätte, wenn er sich in einer Entfernung von $10 \cdot pc$ befinden würde und die von ihm emittierte Strahlung diesen Weg bis zur Messstelle auf der Erde ohne Absorption durchlaufen würde.*

Auch die absolute Helligkeit wird meist in logarithmischer Skalierung angegeben und dann um die Kennung *Mag* (mit großem Anfangsbuchstaben geschrieben) ergänzt. Zur Unterscheidung der linearen und der logarithmisch skalierten absoluten Helligkeit werde ich bei letzterer meist den Ausdruck *Mag* als hochgestellten Index ergänzen:

$$H_{abs}^{Mag} = 2,5 \cdot \log \left(\frac{I_{ref}}{I_S} \right) \cdot Mag \quad (10.138)$$

Der real auftretende Wertebereich dieser Größe beträgt etwa

$$-9 \cdot Mag < H_{abs}^{Mag} < +17 \cdot Mag \quad (10.139)$$

Wird die absolute Helligkeit in bolometrischer spektraler Empfindlichkeit gemessen, bezeichnet man sie oft auch als die *Leuchtkraft* des Sterns. Sie ist bis auf einen Skalierungsfaktor identisch mit dem integralen Energiestrom $J^{(E)}$ der insgesamt von

[§]Gelegentlich wird in der Astronomie auch eine absolute Helligkeit nicht selbst leuchtender Objekte benutzt, und zwar unter Verwendung einer geänderten Referenz-Entfernung. Ich halte diese Definition für unsinnig und werde sie nicht verwenden.

dem Stern emittierten elektromagnetischen Strahlung. Ich halte diese Bezeichnung für zumindest irreführend und werde sie nach Möglichkeit nicht verwenden: Zum einen halte ich es für didaktisch ungeschickt, einer Größe, die bereits wohl definiert ist und für die auch eine allgemein akzeptierte Kennzeichnung existiert, in einem Teilbereich der Physik - hier der Astronomie - einen neuen Namen zu geben und auch eine neue Kennzeichnung. Zum anderen sind in der Photometrie Größen, deren Name die Wortelemente *Licht-* oder *Leucht-* enthält, immer solche, die auf einer spektralen Gewichtung gemäss der genormten **visuellen** Empfindlichkeit beruhen. Als Beispiel nenne ich die *Beleuchtungsstärke* und die *Leuchtdichte*. Die Leuchtkraft eines Sterns wird aber mit einem **bolometrischen** Photodetektor bestimmt.

Diese für die Astronomie weitgehend empirisch definierten Helligkeits-Kenngrößen stehen in einem einfachen Zusammenhang mit den strahlungsphysikalischen Messgrößen, die wir im Kapitel 11.7 kennenlernen werden. Ich werde hierauf am Ende dieses Kapitels zurückkommen.

Das Hertzsprung-Russel-Diagramm (-)

Die Idee, die Fülle von physikalischen Messdaten, die Anfang des 20. Jahrhunderts über die nicht zu weit von uns entfernten Sterne bereits vorlag, empirisch in eine leicht überschaubare Ordnung zu bringen, wird heute dem dänischen Astronom und Physiker *Ejnar Hertzsprung* (* 1873 in Frederiksborg (Dänemark); † 1967 in Tølløse auf Seeland) zugesprochen. Er stellte etwa 1910 diese Sterne in einem Punktdiagramm mit den Achsen Strahlungstemperatur (damals Spektralklasse) und absolute Helligkeit (damals Leuchtkraft) dar und stellte fest, dass die meisten Sterne um eine Linie herum konzentriert waren. Diese wurde als *Hauptreihe* bezeichnet. Der amerikanische Astronom *Henry Norris Russell* (* 1877 in Oyster Bay/NY (USA); † 1957 in Princeton/NJ (USA)) kümmerte sich dann um eine verbesserte Darstellung und Interpretation dieses Diagramms und verhalf ihm 1914 insbesondere zu einer viel beachteten Publikation ([32]). Seitdem wird diese Art der Darstellung von Sterndaten allgemein als *Hertzsprung-Russell-Diagramm* bezeichnet. Die Abb. 7 zeigt ein mit Hilfe der heute verfügbaren Daten erstelltes **Hertzsprung-Russel-Diagramm** (HRD) der 10.000 sonnen-nächsten Sterne.

Offensichtlich sind diese Sterne nicht etwa annähernd gleichmäßig über dieses Diagramm verteilt, sondern gruppieren sich mehr oder weniger eng um einige wenige Linien. Die von links oben (hohe Strahlungstemperatur u. hohe Helligkeit) nach rechts unten (niedrige Strahlungstemperatur und niedrige Helligkeit) führende Linie, um die sich die meisten Sterne gruppieren, wird als die *Hauptreihe* des HRD bezeichnet und entsprechend die zu ihr gehörenden Sterne als *Hauptreihen-Sterne* (Absatz S. 1199). Im HRD unterhalb der Hauptreihe (bei gleicher Strahlungstemperatur deutlich niedrigere Helligkeit) befinden sich die *weißen Zwerge* (Unterabsatz S. 1204), und im oben rechts gelegenen Bereich (niedrige Strahlungstemperatur, aber hohe Helligkeit) liegt der sog. *Riesenast* mit den *roten Riesen* (Absatz S. 1200). Häufig wird versucht,

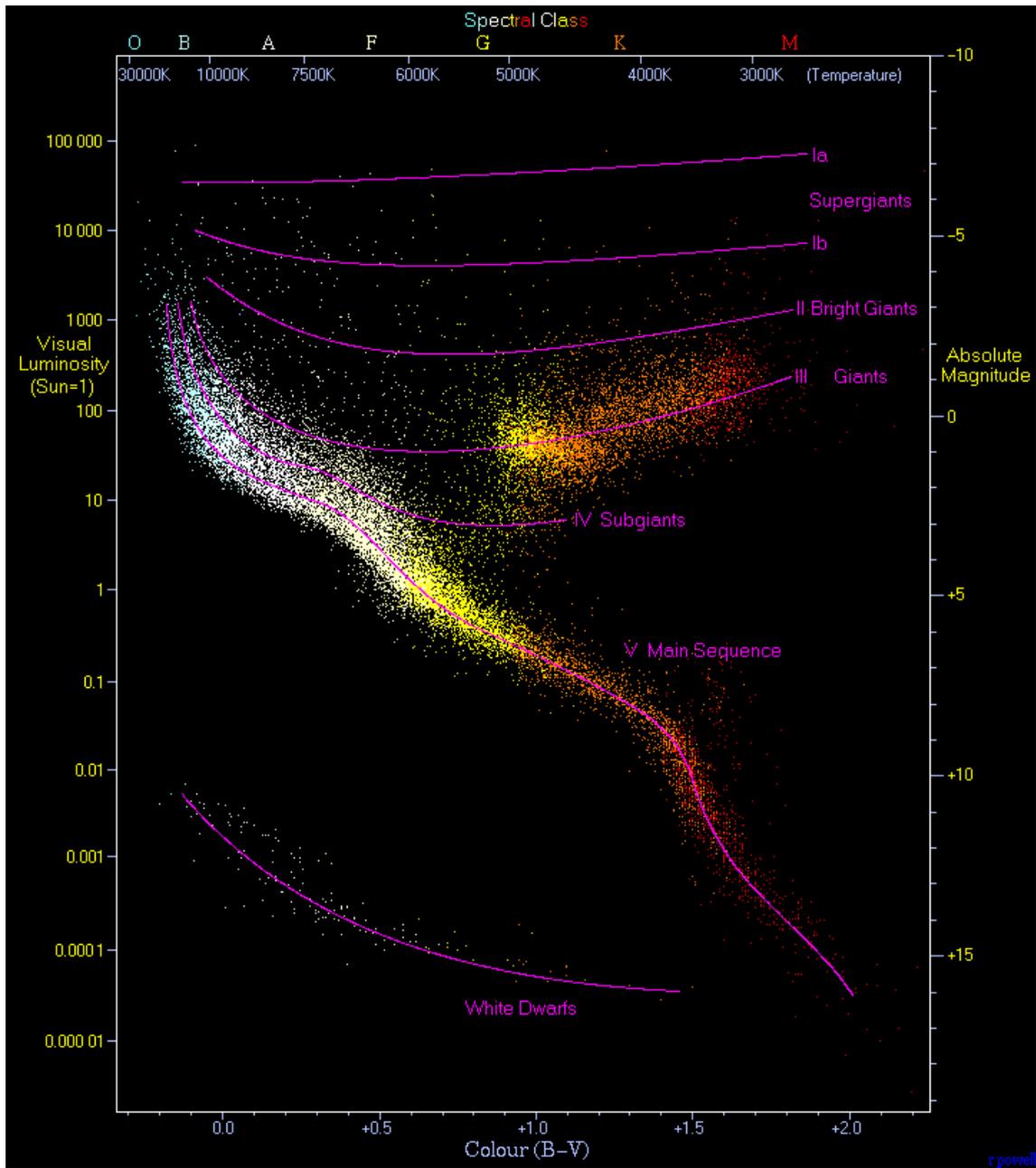


Abb. 7 Helligkeit u. Strahlungstemperatur der ca. 10000 Sonnen-nächsten Sterne (Quelle: Diese Abb. basiert auf der Graphik hr.gif von Richard Powell ([14]) und steht unter dem Copyright Creative Commons Attribution Share Alike 2.5)

diesen Riesenast in 3 Unteräste aufzuteilen, den der *Unterriesen*, der *Riesen* und der *Superriesen*. Der rechte Randbereich dieser Darstellung (niedrige Strahlungstemperatur; beliebige Helligkeit) enthält offenbar keine Sterne. In diesem Bereich gibt es also keine stationär brennenden Sterne. Die (mit ein wenig Phantasie) in dem HRD erkennbare Grenzlinie dieses Bereichs, die Stabilitätsgrenze, wird nach dem japanischen Astrophysiker *Chushiro Hayashi* (* 1920 in Kyoto; † 2010 ebenda) als *Hayashi-Linie* bezeichnet. Sie verläuft nahezu senkrecht bei einer Temperatur unterhalb von $3000 \cdot K$. Auch zu hohen Temperaturen hin glaubt man eine Stabilitätsgrenze zu erkennen, etwa bei $\gtrsim 2 \cdot 10^4 \cdot K$. Auch diese Grenze (wenn sie denn wirklich existiert) scheint annähernd unabhängig zu sein von der absoluten Helligkeit des Sterns.

Bei der Interpretation dieser Darstellung gilt es zu beachten, dass (aus historischen Gründen) die Achse der Strahlungstemperatur nicht exakt linear geteilt ist. Außerdem verläuft die Temperaturachse von rechts nach links, d.h. die Sterne mit besonders hoher Temperatur ihrer strahlenden Oberfläche befinden sich nahe dem **linken** Rand dieser Darstellung.

Hauptreihen-Sterne (-)

Durch eine Vielzahl von Messdaten ist heute belegt, dass sich alle Sterne, die im HRD genügend nahe bei der als *Hauptlinie* bezeichneten Kurve liegen, in einem stationären Zustand befinden, in dem genau 1 Fusionsprozess dominiert, nämlich das H_1^1 -Brennen im Kernbereich des Sterns. Die Lage eines jeden Sterns auf dieser Linie ist primär durch seine Gesamtmasse M festgelegt. Die nachfolgende Tabelle zeigt die Kenndaten einiger typischer Hauptreihensterne, die ich so ausgewählt habe, dass sie in etwa die insgesamt auftretende Spannweite überstreichen. Sofern bei der Oberflächentemperatur T_O 2 Werte angegeben sind, ist dies die Spannweite, innerhalb der sich diese Temperatur im Verlauf des zentralen H_1^1 -Brennens bewegen wird.

	M $/M_\odot$	D $/D_\odot$	T_O $/(10^3 \cdot K)$	$\Delta t_{\text{zentr.}H-Br}$ $/(10^9 \cdot y)$	\mathbb{A} $/(10^9 \cdot y)$	H_{abs}^{Mag}
R136a1	(320) 265		40 ... ??	$9,6 \cdot 10^{-6}$	10^{-3}	
Zeta Ophiuchi	20	5,4	30 ... 50	$6,08 \cdot 10^{-2}$	$4 \cdot 10^{-3}$	-2,71
Wega, Sirius	2,2	2,4	7,5 ... 9,75	1,53	0,48	
Sonne	1	1	5,3 ... 5,9	11	4,57	4,83
ε Eridani	0,82	0,735	4,25 ... 5,3	19	0,5	
Gliese 581	0,33	0,38	2,0 ... 3,65	223	4,3	11,6

Der in dieser Tabelle an 1. Stelle aufgeführte Stern R136a1 befindet sich in der sog. *großen Magellanschen Wolke* (**L**arge **M**agellanian **C**loud **L**MC) am Rand unserer Milchstraßen-Galaxie und in einer Entfernung von

$$d(\text{R136a1}) = 1,65 \cdot 10^5 \cdot Lj \quad (10.140)$$

Zu Beginn seines stationären Zustands als H_1^1 -Brenner hatte er vermutlich die in der Tabelle in Klammern angegebene Masse von $320 \cdot M_\odot$.

Aus dem Verlauf der Hauptreihen-Linie lässt sich herauslesen, dass für einen Hauptreihen-Stern die Beziehung

$$\left| J_{\text{Strahlg}}^{(E)} \right| = \Xi \cdot M^{3,5} \quad (10.141)$$

in guter Näherung erfüllt ist: Die Größe Ξ hat für alle auf der Hauptlinie des Hertzsprung-Russel-Diagramms liegenden Sterne in guter Näherung denselben Wert. Zu kleineren Massen weicht dann das reale Verhalten immer deutlicher von diesem einfachen Zusammenhang ab. Wir setzen dieses empirische Ergebnis in die Gl.-en 10.128 und 10.129 ein und erhalten

$$T_O = \frac{\kappa \cdot \sqrt{\frac{\Xi}{4 \cdot \pi \cdot \sigma}}}{\frac{1}{5} \cdot \gamma \cdot \hat{m}_H} \cdot M^{\frac{3}{4}} \quad (10.142)$$

$$R = \sqrt{\frac{4 \cdot \pi \cdot \sigma}{\Xi}} \cdot \left(\frac{1}{5} \cdot \frac{\gamma}{\kappa} \cdot \hat{m}_H \right)^2 \cdot M^{\frac{5}{4}} \quad (10.143)$$

Diese Verknüpfung von theoretischen Überlegungen mit experimentellen Daten führt uns zu dem Schluss, dass bei einem durch H_1^1 -Brennen stationären Stern die Oberflächentemperatur etwas unterproportional und der Radius etwas überproportional mit seiner Gesamtmasse zunimmt.

Riesensterne (-)

In diesem Absatz werde ich alle Sterne diskutieren, die im HRD deutlich oberhalb der Hauptreihenlinie liegen, die also eine Absoluthelligkeit zeigen, die deutlich höher ist als die Helligkeit eines Hauptreihensterns derselben Oberflächentemperatur. Strahlungsphysikalisch ist diese Situation nur möglich, wenn der Stern deutlich größer ist als der zugehörige Hauptreihenstern, eben ein *Riesenstern*. Wie wir noch sehen werden, wird der Begriff Riesenstern damit zu einem Sammelbegriff einer Menge von Sternen, die sich in unterschiedlichen stationären Zuständen des Fusions-Brennens befinden. Viele dieser Sterne haben im Laufe ihres Lebenszyklusses bereits unterschiedliche dieser Zustände angenommen bzw. werden diese noch annehmen. Dabei verlassen sie jeweils einen dieser verschiedenen Äste und wandern im Laufe eines (im Vergleich zur Brenndauer eines Hauptreihensterns) kurzen Zeitraums zu einem anderen Ast, auf dem sie dann wieder längere Zeit verweilen usw. .

Von diesen Ästen ist der am dichtesten mit Sternen belegte der in der Abb. 7 mit *III-Giants* gekennzeichnete Ast. Auf ihm finden wir alle Sterne, deren Fusions-Brennen vom zentralen H_1^1 -Brennen zum zonalen H_1^1 -Brennen übergegangen ist. Dieser Übergang erfolgt meist unspektakulär, also ohne einen instationären, explosionsartigen Ablauf. Er dauert jedoch nur einen Bruchteil der Zeit des vorherigen

zentralen H_1^1 -Brennens (XXX: präzisieren). Als Folge dieser strukturellen Veränderung, insbesondere der vollständigen Separierung des erzeugten He von der aktuellen Brennzone, steigt die Temperatur in der Brennzone (und aus thermodynamischen Gründen damit auch im mit He gefüllten Zentrum) auf

$$T_{\text{Brennz.}} > 10^8 \cdot K \quad (10.144)$$

Entsprechend nimmt der generierte Energiestrom zu. Da gleichzeitig der Sterndurchmesser stark zunimmt, sinkt i.a. die Oberflächentemperatur und der Stern wird zu einem *roten* oder *orangenen Riesen*. Wie wir aus der Abb. 7 ablesen können, nimmt die Oberflächentemperatur T_O sogar leicht mit der absoluten Helligkeit ab,

$$\frac{dT_O}{dJ_{\text{Strahlg}}} (\text{Riesens Stern}) \lesssim 0 \quad (10.145)$$

Auf den weiteren, weniger deutlich ausgeprägten Ästen oberhalb dieses eigentlichen Riesenastes finden wir Sterne, in denen bereits Fusionsprozesse ablaufen, die Atomkerne höherer Kernladungszahl erzeugen (C_6 , O_8 , Ne_{10} , Mg_{12}).

Bei einem Riesens Stern, der sich im Zustand des stationären zonalen H_1^1 -Brennens befindet, kommt es nun relativ häufig vor, dass - vorzugsweise in seinem Zentrum - die Bedingungen (T, n) für das Einsetzen des He -Brennens erreicht werden. Dann setzt sich dieser Prozess in Form einer Stoßfront bis weit in die Zone des H_1^1 -Brennens hinein fort. Dabei steigt die Temperatur erneut, so dass nun im Bereich der Stoßfront auch Fusionsprozesse einsetzen, die Elemente mit höherer Ordnungszahl erzeugen bis hin zum Fe . Diese Stoßfront läuft danach (auch ohne die Unterstützung durch weiteres Zünden des H_1^1 -Brennens oder He -Brennens) bis an die Oberfläche des Sterns und sprengt dort signifikante Teile der oberflächennahe Materieschicht ab. Diesen Vorgang bezeichnet man (auch) als *Nova-Explosion*, s. Absatz S. 1215. Der Riesens Stern verliert hierdurch merklich an Masse.

In der nachfolgenden Tabelle sind die typischen Eigenschaften einiger Riesensterne wiedergegeben:

	M / M_{\odot}	D / D_{\odot}	T_O / $(10^3 \cdot K)$	bolometr. absol. Helligkeit <i>mag</i>
Alkione	7	3,4	25,6	-2,5*
Antares	15 ... 18	820	3,4	-5,3(?)
Capella B	2,6	9,3	5,7	
Mira	1,2		3,0	
Pollux	1,86	9,14	4,5	+1,08*

Die mit einem * gekennzeichneten Helligkeitswerte sind visuelle absolute Helligkeiten

1202 Elementarteilchen, Kosmologie:
 Physik ganz klein / ganz gross (-)

(XXX: Die in dieser Tab. fehlenden Zahlenangaben für weitere Sterne sind noch nicht verfügbar.)

Dass man unter den Riesensternen noch keinen Stern gefunden hat mit einer Masse $M < 0,8 \cdot M_{\odot}$, hat einen trivialen Grund: Für Hauptreihensterne mit einer in diesem Bereich liegenden Masse ist die Dauer des H_1^1 -Brennens länger als das bisherige Alter des Weltalls. Daher wird es Riesensternen mit einer derart kleinen Masse auch erst in einer fernen Zukunft geben.

(XXX: Der weitere Text des Absatzes *Riesensterne* ist noch nicht verfügbar. In ihm wird auch die nachfolgende Texpassage aufgehen:)

Ein ausreichend massereicher Stern, der in der Lage ist, zeitlich auf einander folgend alle diese Fusionsprozesse als (mehr oder weniger) stationäre Brennprozesse zu durchlaufen, hat danach eine Schalenstruktur der Abfolge (von innen(links) nach außen(rechts))



Zwergsterne (-)

Mit dem Begriff *Zwergstern* bezeichnen wir an dieser Stelle **nicht** ein bestimmtes Endstadium von Hauptreihensternen mit dem Namen *weißer Zwerg*. Dieses Objekt werden wir im Absatz S. 1204 behandeln. Hier diskutieren wir Sterne, deren Masse nicht ausreicht, um das BH_1^1 -Brennen zu zünden, s. Abschnitt 10.2.2. Diese Bedingung ist etwa für den Massenbereich

$$M < 0,08 \cdot M_{\odot} \tag{10.146}$$

erfüllt. Diese Sterne erreichen zum Ende ihres gravitationsgesteuerten Agglomerationsprozesses eine bestimmte Temperatur $T_0 < T_{init}(H_1^1\text{-Brennen})$. Evtl. reicht diese Temperatur jedoch aus, um einen der Fusionsprozesse zu zünden, die in den Absätzen *Das H_1^2 -Brennen* (S. 1184) und *Proton-Einfang durch leichte Elemente* (S. 1184) genannt wurden. Dann laufen diese Prozesse ab, bis der Vorrat an den hierfür erforderlichen Brennstoffen erschöpft ist. Die dabei erreichte Oberflächentemperatur liegt deutlich unterhalb des Wertes, der einem Hauptreihenstern entsprechen würde. Diese Sterne bezeichnet man als *braune Zwerge*. In jedem Stern ist jedoch nur der Wasserstoff H_1^1 in einem Umfang enthalten, der ein (auf astronomischer Skala) lang andauerndes stationäres Fusions-Brennen ermöglicht. Ein brauner Zwerg verbleibt daher nur eine relativ begrenzte Zeit in einem stationären, durch Fusionsprozesse stabilisierten Zustand. Danach versiegen diese Prozesse und die Temperatur des Sterns sinkt stetig auf Grund seiner Eigenstrahlung, ganz analog zum Verhalten eines weißen Zwergs.

Zwergsterne mit einer Gesamtmasse, die nicht ausreicht, um überhaupt irgendeinen Fusionsprozess auszulösen, kontrahieren solange, bis im Kernbereich des

Sterns das Elektronensystem den Zustand der Entartung annimmt. Analog zur Situation in einem weißen Zwerg wird hierdurch die weitere Kontraktion aufgehalten. Für den Kernbereich des Sterns gelten dann etwa folgende Bedingungen:

$$\begin{aligned} 10 \cdot \frac{g}{\text{cm}^3} &< m_{\text{Core}} < 10^3 \cdot \frac{g}{\text{cm}^3} \\ T_{\text{Core}} &\lesssim 3 \cdot 10^6 \cdot K \\ p_{\text{Core}} &\sim 10^5 \cdot \text{Mbar} \end{aligned}$$

Die nachfolgende Tabelle zeigt die charakteristischen Daten von einigen typischen Zwergsternen:

	$M/(10^{-3} \cdot M_{\odot})$	D/D_{\odot}	T_{O}/K	d/L_j
2M1207 A	24	0,25		172
Gliese 229B	20... 50	0,047	950	
Teide 1	52	0,1	2600	400
WISE 1828	~ 5 (0,5 ... 20 * M-Jupiter)		300 ... 500	47
WISE J085510	3 ... 10 * M-Jupiter		245	7,2

Der braune Zwerg mit der niedrigsten bisher entdeckten Strahlungstemperatur ist der letzte der in der obigen Tabelle angeführte Stern. (XXX: Die in dieser Tabelle noch fehlenden Zahlenwerte sind noch nicht verfügbar.)

10.2.4 Spätzustände von Sternen (-)

Die bisher diskutierten stationären Zustände eines Sterns zeichnen sich dadurch aus, dass im Inneren des Sterns ein Kernfusionsprozess abläuft (oder auch mehrere). Wenn diese alle erloschen sind, entspricht die räumliche Konfiguration der Element- und Massenverteilung, wie sie bisher vorlag, nicht mehr einem stabilen Zustand des Sterns. Denn es fehlt der stationäre nach aussen gerichtete Energiestrom, der für die Stabilität des Sterns in seiner bisherigen Konfiguration unverzichtbar ist. Es kommt also zu einem Gravitationskollaps, der erst zum Stillstand kommt, wenn ein neuer Prozess einsetzt, der für die Stabilität des Sterns sorgt. Um welchen Prozess es sich jeweils handelt, werden wir bei den verschiedenen bisher bekannten bzw. hypothetisch als existent angenommenen Zuständen diskutieren. Da ein Stern, der einen dieser Zustände angenommen hat, nicht zwangsweise auf Dauer in diesem Zustand verbleiben wird, nenne ich diese Zustände nicht die *Endstadien* eines Sterns sondern seine möglichen *Spätstadien*.

Weiße Zwerge (-)

Als *weiße Zwerge* bezeichnet man eine Klasse von Sternen, die - ähnlich wie die sog. Hauptreihensterne - im Hertzsprung-Russelldiagramm (HRD) relativ eng um eine Kurve gruppiert sind, die jedoch deutlich unterhalb der Hauptreihe verläuft. Bei gleicher Strahlungstemperatur der Oberfläche ist die absolute Helligkeit eines weißen Zwergs etwa um den Faktor 10^4 kleiner als die eines Hauptreihensterns, s. Abb. 7. Da aber bei vorgegebener Oberflächentemperatur die absolute Helligkeit proportional zur Sternoberfläche ist, also proportional zu D^2 , ist - wieder bei vorgegebener Oberflächentemperatur - ein weißer Zwerg etwa um den Faktor 10^4 kleiner als ein Hauptreihenstern. Seine Masse beträgt etwa

$$M_{\text{weißer Zwerg}} \sim 0,5 \dots 0,7 \cdot M_{\odot} \quad (10.147)$$

Die physikalische Struktur dieser Sterne ist durch eine heute allgemein akzeptierte und durch viele experimentelle Fakten gestützte Theorie bekannt: Ein weißer Zwerg entsteht, wenn nach dem Erlöschen aller Kernfusionen der Gravitationskollaps durch die Lokalisationsenergie der Teilchen gestoppt wird, aus denen das durch diesen Kollaps gebildete Plasma besteht. Dieses Plasma besteht aus einem Elektronengas und aus dem Gas der vollständig ionisierten Atomkerne. Wie man aus der Zustandsgleichung eines Fermigas unmittelbar abliest, leistet das von den Elektronen gebildete entartete Gas den dominierenden Beitrag zum Gesamtdruck des Systems. Auf Grund der voran gegangenen Fusionsprozesse des *H*- und danach des *He*-Brennens und der sich daran anschließenden weiteren Fusionsprozesse bestehen weiße Zwerge zu einem relevanten Anteil aus *C* und *O*. Oft enthalten sie auch noch signifikante Anteile an Elementen höherer Ordnungszahl. Da in einem weißen Zwerg der thermisch bedingte Druck klein ist gegen den Gravitationsdruck, und da außerdem keinerlei Konvektionsströme auftreten, findet eine nahezu vollständige Entmischung der Atomkerne unterschiedlicher Massenzahl statt. Die Temperatur im Zentrum des Sterns beträgt

$$T(r \ll R) = (10^7 \dots 10^8) \cdot K \quad (10.148)$$

Der Stern besitzt also einen Kern aus *C*-Atomkernen (evtl. mit Beimengungen an noch schwereren Elementen), gefolgt von einem Mantel aus *O*-Kernen und einer oberflächennahen Schicht aus *He*. Diese Anteile verschieben sich mit zunehmender Gesamtmasse des Sterns zugunsten der schwereren Atomkerne. Liegt die Masse nahe der Chandrasekhar-Grenze (s. Absatz S. 8.4.7), ist die Oberflächenschicht aus *He* auf eine extrem dünne Schicht der Größenordnung

$$M(\text{He}) \approx 10^{-2} \dots 10^{-4} \cdot M_{\text{Stern}} \quad (10.149)$$

geschrumpft. Wegen der dominierenden Wirkung der Lokalisationsenergie sind die zugehörigen Elektronen gleichmäßig über den Stern verteilt.

(XXX: Der an dieser Stelle vorgesehene weitere Text zur Theorie dieser Sterne ist noch nicht verfügbar. Darauf folgt:)

Typische, aus dieser Theorie unmittelbar resultierende Kenndaten eines weißen Zwergs sind:

$$m \approx (10^5 \dots 10^6) \cdot m_{\odot} \quad (10.150)$$

$$D \approx 10^4 \cdot km \quad (10.151)$$

Die Oberflächentemperatur des Sterns ist zeitlich nicht konstant. Ausgehend von der aus der Kontraktion eines Hauptreihensterns zu einem weißen Zwerg (s. Absatz S. 1214) resultierenden Gesamtenergie des Zwergsterns kühlt dieser unter Ausbildung eines quasistationären Temperaturprofils ab, indem er gemäß der sich einstellenden Oberflächentemperatur stetig durch Emission von elektromagnetischer Strahlung Energie verliert. (XXX: präzisieren) Wegen der relativ kleinen Oberfläche des Sterns dauert dieser Vorgang relativ lange. Als einen typischen Wert nenne ich

$$t_{\text{Abkling}} \lesssim 10^{10} \cdot y \quad (10.152)$$

Auch unsere Sonne wird in den Zustand eines weißen Zwergs als ihrem Endzustand übergehen, sobald ihre Vorräte an Brennstoff für die verschiedenen Fusionsprozesse aufgebraucht sind. Dies wird in etwa

$$\Delta t \sim 5 \cdot 10^9 \cdot y \quad (10.153)$$

der Fall sein.

Die Gesamtmasse eines weißen Zwergs ist nach oben durch die Chandrasekhar-Grenze limitiert:

$$M_{\text{ges}} < 1,44 \cdot M_{\odot} \quad (10.154)$$

Bei diesem Wert wird in der oberflächen-nahen Schicht des Sterns eine Massendichte erreicht, bei der für das Fermigas der Elektronen die Stabilitätsbedingung

$$\frac{\partial p(T, \hat{v})}{\partial \hat{v}} < 0 \quad (10.155)$$

verletzt ist. Das Elektronengas ist also nicht mehr in der Lage, eine Fortsetzung der gravitativen Kontraktion zu verhindern. Wird daher durch irgend einen Vorgang diese Bedingung verletzt, kommt es zu einem Kollaps des Sterns. Dies kann insbesondere dadurch eintreten, dass der weiße Zwerg mit einem weiteren Stern ein Doppelsternsystem bildet und von diesem durch gravitative Wechselwirkung ständig Masse absaugt, s. Absatz S. 1218.

Für den Begleiterstern des Sirius, einen weißen Zwerg der Bezeichnung Sirius-B, konnten 2012 durch Messungen einige verlässliche Kenndaten bestimmt werden. Sie lauten:

$$H^{Mag} = 11,43 ; M = 0,978 \cdot M_{\odot} \quad (10.156)$$

$$D = 1,2 \cdot 10^4 \cdot km = 0,017 \cdot D_{\odot} \quad (10.157)$$

1206 Elementarteilchen, Kosmologie:
 Physik ganz klein / ganz gross (-)

Hieraus resultiert eine mittlere Massendichte von

$$\langle m \rangle = 3,4 \cdot 10^{16} \cdot \frac{kg}{m^3} \quad (10.158)$$

Dieser Wert liegt nur knapp eine Größenordnung unter dem für die Materie in den Atomkernen geltenden Wert von

$$\langle m \rangle_{\text{Atomkern}} = 1,4 \cdot 10^{17} \cdot \frac{kg}{m^3} \quad (10.159)$$

Neutronensterne (-)

Wissenschafts-historisch betrachtet begann die Geschichte der Neutronensterne 1931 durch eine theoretische Arbeit von Landau. Er schlug diesen neuen Zustand der Materie als einen möglichen Endzustand von Sternen vor, den diese annehmen können, wenn sämtliche Möglichkeiten einer Energieerzeugung durch Kernfusion erschöpft sind. 1933 stellten dann *Walter Baade* (* 1863 in Schröttinghausen (heute Ortsteil von Preussisch-Oldendorf b. Minden; † 1960 in Göttingen) und *Fritz Zwicky* (* 1898 in Warna (Bulgarien); † 1974 in Pasadena/Cal. (USA)) die Hypothese auf, dass dieser Zustand im Anschluss an eine Supernova-Explosion angenommen wird. 1967 entdeckte dann *Susan Jocelyn Bell* (* 1943 in Belfast/Northern Ireland; heute (2010) Visiting Professor of Astrophysics an der University of Oxford (England)) eine Quelle periodischer Radiosignale im Frequenzbereich $85 \cdot MHz$ bis $2,7 \cdot GHz$. Es kam von einem Objekt innerhalb unserer Milchstraße im Sternbild *Füchschen* und in einer Entfernung von $400 \cdot Lj$ von unserer Erde. Diese Quelle strahlt Impulse aus von einer Länge

$$\delta t = 0,04 \cdot s \quad (10.160)$$

und mit einer konstanten Wiederholungsperiode von

$$\Delta t = 1,337 \cdot s \quad (10.161)$$

Bell machte diese zunächst völlig überraschende und von der Wissenschaft heftig angezweifelte Entdeckung im Rahmen ihrer Dissertation am Cavendish Laboratory der University of Cambridge. Ihr Doktorvater, *Antony Hewish* (* 1924 in Cornwall/Engl.; bis 1988 Leiter des Mullard Radio Astronomy Observatory in Lards Bridge/Engl.), erklärte sich erst nach langem Zögern bereit, diese Arbeiten zu publizieren ([29]). Die von Bell entdeckte Radioquelle trägt heute den Namen RXJ185636-3754. Derartige Objekte erhielten den Namen *Pulsar* (**P**ulsating **S**ource of **R**adio **E**mission) und wurden, in Übereinstimmung mit der bereits 1968 von *Thomas Gold* (* 1920 in Wien; † 2004 in Ithaka/NY. (USA)) formulierten Vermutung, später als **rotierende** Neutronensterne identifiziert. Für ihre Entdeckung erhielten Hewish und

Sir (seit 1966) Martin Ryle (* 1918 in Brighton; † 1984 in Cambridge) (aber **nicht** Bell !) 1974 den Nobelpreis für Physik. Heute gilt als gesichert, dass eine bestimmte Klasse von real existierenden Himmelsobjekten mit den typischen Eigenschaften

$$1,5 \cdot M_{\odot} < M_S < 3,2 \cdot M_{\odot} \quad (10.162)$$

$$m(r = 0) \approx (1 \cdot 10^{11} \dots 2,5 \cdot 10^{12}) \cdot \frac{kg}{cm^3} \\ \approx (0,5 \dots 13) \cdot m_{\text{Atomkern}} \quad (10.163)$$

$$T_{\text{Oberfl}} < 10^6 \cdot K \quad (10.164)$$

Objekte also von einem Durchmesser im Bereich einiger $10 \cdot km$ und mit einer Dichte von der Größenordnung der Atomkerne oder noch darüber, aus einer Materie aufgebaut sind, die in 1. Näherung als *Neutronengas* aufgefasst werden darf. Derartige Objekte entstehen, wenn in einem kompakten Objekt ausreichend großer Masse (s. Gl. 10.162) alle Kernfusionsprozesse erloschen sind. Da die Masse nun oberhalb der Chandrasekhar-Grenze (s. Gl. 10.154) liegt, kann das Elektronengas des Objektes den Gravitationskollaps nicht stoppen. Dem Prinzip von Le Chatelier folgend antwortet das System auf diesen aufgeprägten Gravitationsdruck mit einer *Teilchenvernichtung* gem. der Bruttoreaktion



(XXX: Der die Zustandsgl. des Neutronengases beschreibende Text ist noch nicht verfügbar.)

Dieser Kontraktionsvorgang verläuft in 1. Näherung ohne Beteiligung anderer Objekte. Daher bleibt hierbei der Gesamt-Drehimpuls des Objektes erhalten. Wenn also das Ausgangsobjekt eine gewisse Eigenrotation der Frequenz ω_0 hatte, erhöht sich diese Frequenz im Zuge der Kontraktion zum Neutronenstern etwa um den Faktor

$$\frac{\omega}{\omega_0} = \left(\frac{r_0}{r}\right)^2 \approx \left(\frac{1,4 \cdot 10^6 \cdot km}{20 \cdot km}\right)^2 = 5 \cdot 10^9 \quad (10.166)$$

Wenn also der Vorläuferstern ein Hauptreihenstern ist mit Kenndaten ähnlich unserer Sonne, also mit einer Umlaufzeit der Größenordnung $30 \cdot d$, dann hat der daraus entstandene Neutronenstern eine Umlaufzeit der Eigenrotation im Bereich von $1 \cdot ms$. Die meisten bis heute identifizierten Pulsare haben eine Umlaufzeit im Bereich

$$0,08 \cdot s < \Delta t < 85 \cdot s \quad (10.167)$$

Es gibt aber auch sog. *ms-Pulsare*. Die höchste bisher gemessene Wiederholungsfrequenz zeigt der Stern PSR J1748-2446ad im Kugelsternhaufen Terzan 5

$$f(\text{PSRJ1748-2446ad}) = 716 \cdot Hz \quad (10.168)$$

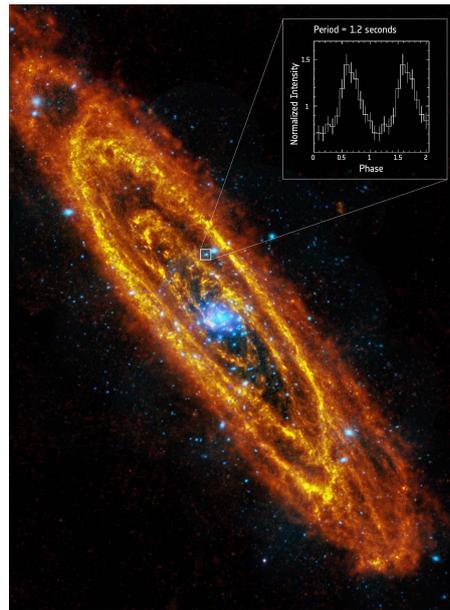


Abb. 8 Position des 1. in der Andromeda Galaxie entdeckten Pulsars
(Copyright:.. 2000 - 2006 European Space Agency)

Dieser Sternhaufen befindet sich in der Bulge (s. Abschnitt 10.2.12) unserer Milchstraße und wurde 1968 von dem französisch-armenischen Astronom *Agop Terzan* (* 1927 in Istanbul) entdeckt. Der o.g. Pulsar wurde in diesem Sternhaufen zusammen mit 13 weiteren *ms*-Pulsaren 2004 von S.M. Ransom et al. entdeckt.

Nachdem man glaubte, den Mechanismus der Bildung von Neutronensternen im Grundsatz verstanden zu haben, war es naheliegend anzunehmen, dass nicht nur unsere Milchstraße eine Fülle von derartigen Neutronensternen beherbergt, sondern andere Galaxien ebenso. Um so überraschender war es, dass es lange Zeit nicht gelang, in der uns benachbarten Galaxie, dem Andromeda-Nebel (s. Abb. 97), die Existenz auch nur eines schnell rotierenden Neutronensterns nachzuweisen. Mit Hilfe des ESA-XMM-Newton-Space-Teleskope gelang dies zu Beginn des Jahres 2016. Die Abb. 8 zeigt die bereits für die Abb. 97 (b) benutzte Aufnahme dieser Galaxie im sub-mm- und Röntgenkontrast, in die die Position dieses Sterns (der Codierung 3XMM J004301.4+413017) mit einem Quadrat markiert ist. Die graphische Darstellung in der oberen Ecke dieser Abb. gibt die Messwerte der Röntgen-Intensität als Funktion der Zeit wieder. Diese Intensität oszilliert mit einer Periode von

$$\frac{1}{f} = 1,2 \cdot s \tag{10.169}$$

Wahrscheinlich handelt es sich bei diesem Objekt um ein Doppelsternsystem, deren Sterne einander mit einer Periode von $1,3 \cdot d$ umkreisen.

Der primäre Mechanismus, durch den diese Radio-Impulse erzeugt werden,

steht in weitgehender Analogie zur sog. Synchrotronstrahlung : Die in dem Neutronenstern gespeicherte Wärme erzeugt ein zur Oberfläche des Sterns gerichtetes System von Konvektionsströmen. Da die Teilchen, die diese Strömungen aufbauen, teilweise elektrische Ladungen tragen (XXX: präzisieren), ist dieses System von Masseströmungen mit der Erzeugung eines Magnetfelds verbunden. Dieser Mechanismus ist weitgehend analog zur Entstehung des Erdmagnetfeldes, das ebenfalls aus den im Inneren der Erde vorhandenen konvektiven Masseströmen resultiert. Bei einem Neutronenstern kommt es nun zusätzlich ständig zu großräumigen Veränderungen dieses Strömungssystems und damit zu der Generierung von statistischen Oszillationen dieser Magnetfelder. Diese generieren ihrerseits elektromagnetische Wellen, die in das Weltall abgestrahlt werden. Da diese Masseströme stark durch die Eigenrotation des Neutronensterns beeinflusst werden, orientiert sich die Längsachse des erzeugten Dipolfeldes annähernd parallel zur mechanischen Drehachse. Die Orientierung ist aber i.a. keinesfalls perfekt, wie auch das Beispiel des Magnetfelds der Erde zeigt (s. Absatz S. 1262). Wenn aber diese beiden Symmetrieachsen einen signifikanten Verkippungswinkel bilden, dann oszilliert die Intensität der emittierten Dipolstrahlung in jeder beliebigen Beobachtungsrichtung mit der Frequenz der Eigenrotation. Ist diese Strahlung besonders eng um die Dipolachse konzentriert, ist dieser Intensitätsunterschied besonders groß.

Wie jedes andere System muss auch das Neutronengas die Stabilitätsbedingung

$$\frac{\partial p(T, \hat{v})}{\partial \hat{v}} < 0 \quad (10.170)$$

erfüllen. Und in völliger Analogie zum Elektronengas ist diese Größe insbesondere durch die Gesamtmasse des Sterns vorgegeben. Ausgehend von der (klassischen) Newton-Gleichung einer isotropen Flüssigkeit, ergänzt um die Annahme eines entarteten Systems (nicht zu hohe Temperatur) berechneten 1939 Oppenheimer und *George Michael Volkoff* (* 1914 in Moskau; † 2000 in Vancouver (Canada)) ([8]) die Bedingung

$$M_{NS} < 0,7 \cdot M_{\odot} \quad (10.171)$$

Dies entspricht offensichtlich nicht der Realität. Ein typischer Neutronenstern ist also entweder nicht entartet, oder er hat einen Aufbau, für den das Modell des idealen Neutronensterns nur eine sehr grobe, nicht ausreichend gute Näherung ist. Die heute auch nach dem US-amerikanischen Physiker *Richard Chase Tolman* (* 1881 in West Newton/MA (USA); † 1948 in Pasadena/Cal (USA)) als *Tolmann-Oppenheimer-Volkoff-Grenze* bezeichnete Stabilitätsgrenze eines Neutronensterns ergibt sich, wenn man eine analoge Berechnung im Rahmen der ART durchführt. Nun liegt die Stabilitätsgrenze bei etwa

$$M_{NS} < 3,2 \cdot M_{\odot} \quad (10.172)$$

Dieses Ergebnis scheint mit den bisher vorliegenden astronomischen Messdaten gut verträglich zu sein.

2013 gelang es durch Verknüpfung von Messergebnissen, die mit den Röntgen-Teleskopen Chandra, XMM-Newton und RXTE erzielt worden sind, einen quantitativen Zusammenhang herzustellen zwischen der Gesamtmasse und dem Durchmesser der analysierten Neutronensterne ([39]). Eines der so erzielten Ergebnisse war:

$$M = 1,4 \cdot M_{\odot} ; R = 10,4 \dots 12,9 \cdot km \quad (10.173)$$

$$\Rightarrow m(\text{Sternzentrum}) \approx 8 \cdot m_{\text{Nuk}} \quad (10.174)$$

m_{Nuk} ist die unter terrestrischen Bedingungen auftretende mittlere Massendichte der Atomkerne, s. Abschnitt 10.1.7.

(XXX: Der weitere Text des Absatzes *Neutronensterne* ist noch nicht verfügbar. Er wird auch die nachfolgende Abb. 9 und den sie erläuternden Text enthalten:)



Abb. 9 Farbkodierte multispektrale Aufnahme des Crabb-Nebels

(credit: x-ray: NASA/CXC/J. Hester(ASU)

. optical: NASA/ESA/J. Hester & A. Loll(ASU)

. IR: NASA/JPL-Caltech/R. Gehrz(Univ. Minn.)

Die spektralen Kenndaten für die Einzelaufnahmen, aus denen diese Abb. zusammengesetzt wurde, sind:

- (a) blau: Röntgenstrahlungsaufnahme bei $1 \cdot keV$
- (b) gelb: optische Aufnahme bei $500 \cdot nm$
- (c) rot : optische Aufnahme bei $656 \cdot nm$
- (d) violett: IR-Aufnahme bei $24 \cdot \mu m$

Nach meiner Kenntnis, die sich auf eine sorgfältige Analyse der von der NASA bereit gestellten Informationen stützt, handelt es sich bei diesem Bild um eine ausschließlich aus gemessenen Daten nach objektiven Verfahren erzielte reale **Aufnahme** (und nicht etwa um eine sog. *artist impression*). Wenn das zutrifft, ist diese Aufnahme für mich als geradezu spektakulär einzuordnen. Denn sie zeigt nicht nur sehr deutlich (über die emittierte Röntgen-Strahlung) den aus dem Zentralbereich des Krebs-Nebels austretenden Jet-Strahl. Man erkennt sogar den eigentlichen Neutronenstern als kleine, ebenfalls Röntgen-Strahlung emittierende Kugel.

(XXX: Der weitere Text des Absatzes *Neutronensterne* ist noch nicht verfügbar. In ihm wird auch die Abb. 10 und deren nachfolgende Erklärung aufgehen:)Die

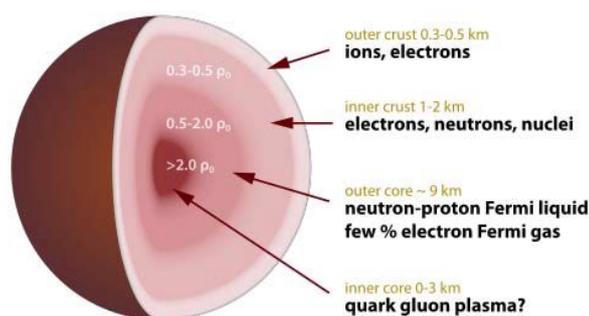


Abb. 10 Schalenstruktur eines Neutronensterns der Masse $XXX \cdot M_{\odot}$

(Quelle: Diese Abb.basiert auf dem Bild `neutron_star_cross_section` aus der freien Enzyklopädie Wikipedia und unterliegt dem `creativecommons Attribution-Share Alike 3.0`; der Autor ist Robert Schulze)

Abb. 10 zeigt die Schalenstruktur eines Neutronensterns, wie sie sich aus diesen theoretischen Modellrechnungen ableiten lässt. Die Zahlenangaben in dieser Abb. gelten für einen Neutronenstern der Gesamtmasse $XXX \cdot M_{\odot}$. Die Strukturelemente, die den Gegendruck gegen die Fortsetzung des Gravitationskollapses aufbauen, sind primär der innere und der äussere Kern. Den Durchmesser des inneren Kerns schätzt man auf

$$D(\text{innerer Kern}) = 1,44 \cdot 10^{-5} \cdot D_{\odot} \quad (10.175)$$

Zur Prüfung dieser Struktur-Aussagen ist man evtl. nicht allein auf die Überprüfung der benutzten theoretischen Modelle und Annahmen angewiesen. Es besteht

Hoffnung, diese Struktur durch die Messung und Analyse des Frequenzspektrums der Anregungsschwingungen eines Neutronensterns überprüfen zu können.

Als Referenzwert für die bei diesen Objekten auftretenden extrem hohen Masendichten verwendet man meist die Dichte, die eine dichteste Packung von Neutronen hätte, wenn man als deren Durchmesser den aus Streuexperimenten resultierenden Messwert ansetzt,

$$D_n = 1,7 \cdot 10^{-15} \cdot m \quad (10.176)$$

Für diese in der Abb. 10 mit ρ_0 gekennzeichnete Größe werde ich die Kennzeichnung m_n verwenden. Es gilt

$$m_n = \frac{M_n}{\frac{4 \cdot \pi}{3} \cdot D_n^3 \cdot \frac{\pi}{3 \cdot \sqrt{2}}} = \frac{9}{2 \cdot \sqrt{2}} \cdot \frac{M_n}{\pi^2 \cdot D_n^3} = 1,1 \cdot 10^{17} \cdot \frac{kg}{m^3} \quad (10.177)$$

Der Ausdruck $\frac{\pi}{3 \cdot \sqrt{2}}$ ist der Zahlenwert der Packungsdichte einer dichtesten Kugelpackung, s. Gl. 9.2. Es gilt z.B.

$$m_{\text{Atomkern}} = 1,27 \cdot m_n \quad (10.178)$$

Schwarze Löcher (-)

(XXX: Der Text des Unterabsatzes *Schwarze Löcher* ist noch nicht verfügbar. Er wird auch die nachfolgende Textpassage enthalten:)

Notwendige und hinreichende Bedingung für die Existenz ist demnach die Existenz eines Ereignishorizontes, also die Erfüllung der durch die Ungleichung 3.789 definierten Bedingung:

$$R^2 \geq \frac{1,61 \cdot 10^{26}}{m^{(M)}} \cdot \frac{kg}{m} \quad (10.179)$$

Wir berechnen den dem Gleichheitszeichen entsprechenden Mindestradius R_{grenz} für einige typische Masendichten $m^{(M)}$, s. nachfolgende Tabelle:

Material	$m^{(M)} / \frac{kg}{m^3}$	R_{grenz} / m	$M_{\text{grenz}} / M_{\odot}$
<i>Fe/Ni</i> (fest)	$8 \cdot 10^3$	$1,4 \cdot 10^{11}$	$4,62 \cdot 10^7$
Plasma e. Hauptreihensterns	$1,41 \cdot 10^3$	$3,4 \cdot 10^{11}$	$1,17 \cdot 10^8$
Atomkern-Material	$1,40 \cdot 10^{17}$	$3,4 \cdot 10^4$	11,59
Neutronenstern	$1,1 \cdot 10^{18}$	$1,2 \cdot 10^4$	4,0
Quark-Gluon-Plasma	$1,7 \cdot 10^{19}$	$3,1 \cdot 10^3$	1,07

Als Masendichte von festem *Fe/N*-Material habe ich der Einfachheit halber den für die sog. Normalbedingungen ($T = 20^\circ C$; $p = 1 \cdot bar$) geltenden Wert genommen, obwohl ein hypothetisches Objekt mit einer Masse von der Größenordnung des hieraus abgeschätzten Wertes von M_{grenz} in seinem Inneren einen unvorstellbar hohen Druck aufbauen würde, unter dem die Masendichte stark ansteigen würde. Als mittlere Masendichte des in einem Hauptreihenstern vorliegenden Materials habe ich den

Wert genommen, der aus den gemessenen Kennwerten (Gesamtmasse, Durchmesser) unserer Sonne resultiert. Als typische Massendichte eines Neutronensterns habe ich den in der Gl. 10.174 wiedergegebenen Messwert gewählt. Die Existenz eines Quark-Gluon-Plasmas muss b.a.w. als spekulativ angesehen werden. Man schätzt seine Massendichte auf das 5- bis 20-fache der Massendichte eines Neutronensterns. Ich habe in die Tabelle das 15-fache eingetragen.

Die in dieser Tabelle zusammengetragenen Richtwerte zeigen uns, dass aus Materie, wie wir sie aus unserem täglichen Leben her kennen, z.B. aus festen Metallen oder Gesteinen, sich niemals direkt ein Objekt bilden kann, das einen Ereignishorizont besitzt, also ein *Schwarzes Loch*. Hierzu müsste es eine Ausdehnung haben, die weit über die Ausdehnung unseres Planetensystems hinausgeht. Ein solches Objekt würde aber unmittelbar einen Gravitationskollaps erleiden. Realistische Mindestabmessungen werden erst mit Materialien erreicht, deren Massendichte in der Größenordnung des Atomkernmaterials liegt oder sogar noch darüber. Die dann zur Bildung eines BH erforderliche Mindestmasse liegt sicherlich im Bereich einer Sonnenmasse M_{\odot} . Die stabilen Zustände eines derartigen Systems werden aber durch die Quantenmechanik bzw. genauer durch die Quantenchromodynamik vorgegeben. Um ein makroskopisches Objekt mit einer Ausdehnung von der Größenordnung seines Ereignishorizontes korrekt beschreiben zu können, müssen daher sowohl die Gesetze der Quantenmechanik wie die der Allgemeinen Relativitätstheorie ART beachtet werden. Bis heute gibt es aber keine anerkannte physikalische Theorie, die diese beiden Theorien miteinander vereint.

Erst auf Basis einer mit der ART verträglichen Quantenchromodynamik lassen sich die quantenmechanischen Eigenzustände eines BHs bestimmen. Aus diesen wiederum könnte man dann eine thermodynamische Zustandfunktion dieses Systems bestimmen. Bis dahin ist jedoch noch ein weiter Weg.

Eine auch nur annähernd verlässliche physikalische Beschreibung eines BHs ist daher b.a.w. nicht möglich. Alle bisher publizierten Aussagen zu diesen Objekten sind somit weitgehend spekulativ.

Man ist heute sicher, dass im Kosmos zwei unterschiedliche Arten von BHs existieren:

1. BHs, die sich als Endzustand eines Sterns bilden, wenn es nach dem Erlöschen der Kernfusionsprozesse zu einem Gravitationskollaps kommt, der durch keinerlei andere physikalische Mechanismen gestoppt werden kann. Dies tritt immer dann ein, wenn die Sternmasse einen gewissen Grenzwert überschreitet. Nach heutiger (2014) Kenntnis ist dies der Wert

$$M_S > 3,2 \cdot M_{\odot} \quad (10.180)$$

Die bisher entdeckten und vermessenen BHs liegen im Bereich

$$4 < M_{BH} < 30 \cdot M_{\odot} \quad (10.181)$$

2. Massereiche BHs im Zentrum einer Galaxie. Diese saugen ständig weitere Sterne in sich auf und nehmen so ständig an Masse zu. Ich werde auf diese Objekte im Rahmen des Abschnitts 10.2.12 kurz eingehen.

(XXX: Der weitere Text des Absatzes *Schwarze Löcher* ist noch nicht verfügbar.)

10.2.5 Sternumwandlungen (-)

Wir wenden uns nun den Vorgängen zu, die dazu führen, dass ein Stern von einem stationären Zustand in einen anderen übergeht. Dieser andere Zustand kann bereits einer der oben diskutierten Endzustände eines Sterns sein oder auch ein Zustand, der im weiteren Verlauf der individuellen Sternentwicklung nochmals eine Sternumwandlung durchmachen wird. Eine derartige Sternumwandlung kann eine (auch in astronomischen Maßstäben) längere Zeit in Anspruch nehmen. Der Vorgang kann aber auch zumindest in einem (oder mehreren) Teilschritt(en) in extrem kurzer Zeit, d.h. als *Explosion* ablaufen. Die bereits im Unterabsatz S. 1179 behandelte Kontraktion einer Wolke aus interstellarem Staub zu einem Protostern ist ein Beispiel für einen *langsamen* Umwandlungsprozess des betrachteten Objektes, und die Supernova-Explosionen sind das heute bekannteste und spektakulärste Beispiel einer Stern-*Explosion*.

Langsame Umwandlungsprozesse (-/-)

(XXX: Der Text des Absatzes *Langsame Umwandlungsprozesse* ist noch nicht verfügbar. Er wird auch die nachfolgende Tabelle und deren Diskussion enthalten:)

Brenndauer Δt eines Sterns der Masse $1 \cdot M_{\odot}$:

Brenn-Prozess	T_{Kern}/K	Δt
H_1^1 -Brennen	$1,6 \cdot 10^7$	$9,5 \cdot 10^9 \cdot y$
H_1^1 -Zonenbrennen		$1,4 \cdot 10^9 \cdot y$
<i>He</i> -Brennen		

Der Übergang vom H_1^1 -Brennen im Kernbereich eines Sterns zum H_1^1 -Zonenbrennen ist ein kontinuierlicher Vorgang, bei dem sich die Brennzone immer weiter ausdehnt und der Stern ein immer größer werdendes Volumen einnimmt. Insgesamt dauert der H_1^1 -Zonenbrennprozess nur wenig länger als dieser Prozess des Zonenwachstums.

Die sich an das *He*-Brennen anschließenden Fusionsprozesse treten bei Sternen dieser Masse nicht auf.

Brenndauer Δt eines Sterns der Masse $25 \cdot M_{\odot}$:

Brenn-Prozess	T/K	Δt
H_1^1 -Brennen	$6 \cdot 10^7$	$7 \cdot 10^6 \cdot y$
He -Brennen	$2,3 \cdot 10^8$	$5 \cdot 10^5 \cdot y$
C -Brennen	$9,3 \cdot 10^9$	$6 \cdot 10^2 \cdot y$
Ne -Brennen	$1,7 \cdot 10^9$	$1 \cdot y$
O -Brennen	$2,3 \cdot 10^9$	$180 \cdot d$
Si -Brennen	$4,1 \cdot 10^9$	$1 \cdot d$

Nova-Explosionen (-)

Der Begriff Nova-Explosion war lange Zeit eine Sammelbezeichnung für verschiedene Sternumwandlungen, die sich dadurch auszeichnen, dass ihre Auswirkungen (aus heutiger Sicht) etwas weniger spektakulär sind als die mit einer Supernova-Explosion (s. Absatz S. 1218) verknüpften Effekte. Heute bezeichnet man als Nova-Explosion einen ganz bestimmten, heute wohl bekannten Umwandlungsprozess eines Sterns, der daher auch ein wohl definiertes, nachfolgend aufgezähltes typische Verhalten zeigt:

- Die absolute Helligkeit des Sterns steigt innerhalb von wenigen Tagen etwa um $9 \cdot mag$ an, bleibt danach für einige Tage auf diesem Helligkeitsniveau und steigt danach innerhalb von Tagen bis Wochen nochmals um etwa $2 \cdot mag$ an. Der sich daran anschließende Helligkeitsabfall verläuft wesentlich langsamer, nämlich innerhalb von einigen Wochen bis einigen Jahren, bis wieder die ursprüngliche Helligkeit oder auch ein neuer stationärer Wert erreicht ist, der aber meist von derselben Größenordnung ist wie der Ausgangswert.
- Während dieses Vorgangs stößt der Stern eine Materiewolke ab, die sich anfangs mit Geschwindigkeiten der Größenordnung $10^2 \dots 10^3 \cdot \frac{km}{s}$ ausbreitet. Diese Gaswolke wird durch die elektromagnetische Strahlung des Sterns ständig erhitzt und strahlt daher selbst. Sie wird (fälschlicherweise und aus historischen Gründen, aber überwiegend auch heute noch) als *planetarischer Nebel* bezeichnet.

Die von einer Nova-Explosion ausgestoßene Gaswolke hat eine Lebensdauer der Größenordnung $10^4 \cdot y$. Danach hat sie sich so stark ausgedünnt, dass sie nicht mehr als zusammengehörig und mit dem Ursprungstern verbunden interpretiert wird. Das aktuelle Bild eines von einem planetarischen Nebel umgebenen Sterns gibt also die Auswirkungen seiner Entwicklung der letzten etwa $10^4 \cdot y$ wieder. Ein auch ästhetisch besonders eindrucksvolles Beispiel eines weißen Zwergs, der von einem planetarischen Nebel umgeben ist, zeigt die Abb. 11. Diese Aufnahmen sind entstanden durch die Überlagerung eines Röntgenbildes (violett codiert, aufgenommen von der Sonde Chandra) und eines im sichtbaren Licht aufgenommenen Bildes (blau/grün/rot codiert, aufgenommen vom Hubble-Teleskop). Die Abb. 12 zeigt 2 weitere planetarische Nebel in derselben Aufnahme- und Wiedergabetechnik. Die in diesen Aufnah-

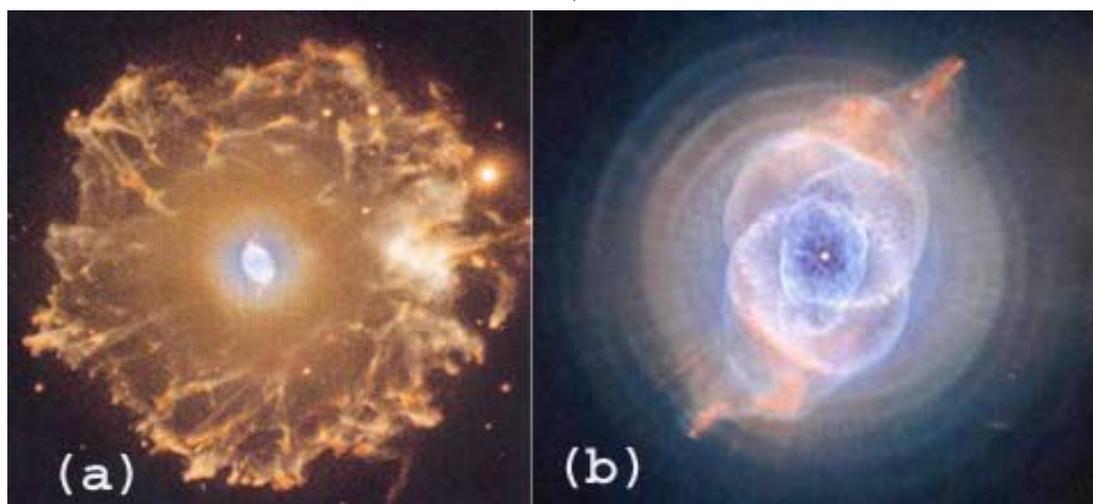


Abb. 11 Aufnahme des als Katzenaugennebel bezeichneten Planetarischen Nebels mit dem Hubble-Teleskope

(a) Gesamtaufnahme (b) Aufnahme des Zentrums

(Quelle: www.imagsrc.hubblesit.org; image hs-2004-27;

credit: x-ray NASA/CXC/RIT/J; Optical NASA/STSci)

men vorhandenen gelb-codierten kleineren Strukturelemente werden als Gas-Knoten gedeutet, die vermutlich durch Jets entstanden sind, die zu einem bestimmten Moment während dieser Prozesses lokal aus dem Stern ausgestossen wurden. Der Vergleich dieser Aufnahmen zeigt, dass die Struktur dieser Nebel von Objekt zu Objekt sehr unterschiedlich sein kann. Den jeweiligen Nova-Explosionen hat man oft auch einen modifizierten Namen gegeben. Hierauf werde ich jedoch nicht näher eingehen.

Nicht alle Einzelheiten dieses Explosionsprozesses sind bereits verstanden, insbesondere nicht die Mechanismen, die zu der anfänglich hohen Symmetrie in der Struktur der ausgestoßenen Gaswolke führen.

Die stellare Konstellation, die zu Nova-Explosionen führt, ist ein Doppelsternsystem aus einem weißen Zwerg und einem Stern mit einer Masse deutlich über der Masse unserer Sonne. Der mittlere Abstand der beiden Sterne ist derart klein (XXX: präzisieren), dass die Umlaufzeit dieser beiden Sterne um ihren gemeinsamen Schwerpunkt im Bereich von wenigen Stunden liegt. Insbesondere erfolgt aber unter diesen Bedingungen ein signifikanter Massentransfer von dem massereicheren Stern zu dem weißen Zwerg. Hierdurch wird der weiße Zwerg wieder mit H -Kernen versorgt. Ausserdem heizt sich der weiße Zwerg durch die bei dem Einfang des Massentromms frei werdende Gravitationsenergie stark auf. Das Zusammenwirken dieser beiden Effekte führt dazu, dass irgendwann erneut und weitgehend unkontrolliert ein H_1^1 -Brennen einsetzt und zwar meist über den CNO-Prozess, s. Absatz S. 1185. Dieser explosionsartige Vorgang, der mit einem starken Ausstoß von heißer Materie



Abb. 12 4-Farben-Aufnahme der planetarischen Nebel NGC 7009 und NGC 6826; violett=Röntgenaufnahme der Sonde CHANDRA; blau/grün/rot=Aufnahme des Weltraum-Teleskops Hubble;
(credit: x-ray NASA/CXC/RIT/J; Optical NASA/STSci)

verknüpft ist, wird dann als *Nova-Explosion* bezeichnet. Gegen Ende dieses 1. Teils einer Nova-Explosion beträgt die Temperatur im Inneren des Stern nur noch etwa $1 \cdot 10^6 \cdot K$. Während des Abklingens der Helligkeit des Sterns schrumpft das Sternvolumen erneut und die Temperatur im Zentrum steigt wieder an, bis schließlich erneut ein H_1^1 -Brennen einsetzt, das sich nun aber quasi-stabil verhält. Dieses dauert an, bis der Vorrat an H_1^1 erneut erschöpft ist. Dann erlischt die Kernfusion erneut und der Stern wird wieder zu einem weißen Zwerg.

Da sich bei diesem Gesamtvorgang die astronomische Konstellation des Doppelsterns aus massereichem Stern und weißem Zwerg nicht verändert, kann sich danach dieser Ablauf wiederholen: Es kommt erneut zu einer stetigen Massenübertragung vom massereichen Stern zu dem weißen Zwerg, bis nach einem Zeitraum von ca. $10^3 \cdot y$ erneut das H_1^1 -Brennen einsetzt und wieder eine Nova-Explosion auslöst. Sterne mit diesem Verhalten werden in der Astronomie auch als *kataklysmische Veränderliche* (nach *κατακλισημοσ* (griech.) die Überschwämmung) bezeichnet. Bis vor einigen Jahren waren diese Überlegungen schon das Ergebnis der sorgfältigen Analyse einer Vielzahl von Beobachtungen und Messdaten. Das Wiedereinsetzen einer Nova-Explosion eines Sterns, der bereits von einem planetaren Nebel umgeben ist, war jedoch noch nicht unmittelbar beobachtet worden.

I.a. nimmt durch diese Abläufe die Masse des weißen Zwergs insgesamt dennoch zu, da die durch Fusion erzeugten schwereren Bestandteile in seinem Zentrum verbleiben. Irgendwann wird dann die Chandrasekhar-Grenze (s. Absatz S. 8.4.7) erreicht und es kommt zu einer Supernova-Explosion, s. Absatz S. 1218.

dieser Struktur auf Grund seines geometrischen Erscheinungsbildes den Namen *Krebsnebel*. Bis heute hat sich diese Explosionswolke auf einen Bereich mit einer Längsausdehnung von $7 \dots 11 \cdot L_j$ ausgedehnt, s. Abb. 13. Dieser *Krebsnebel* wurde zu

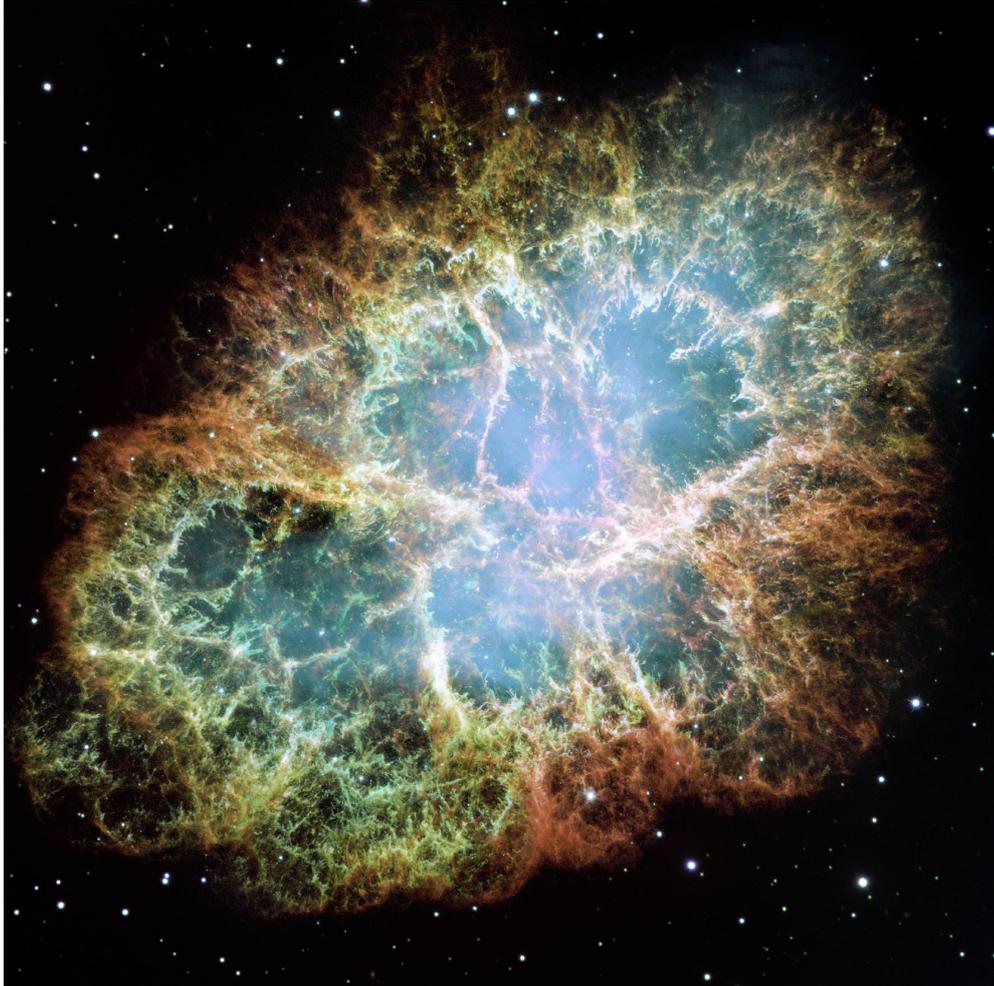


Abb. 13 Struktur der Explosionswolke der im Jahr 1054 explodierten Supernova
(Quelle: <http://hubblesite.org/gallery/album/star>)

einem Lehr-Objekt der Astronomen und Astrophysiker, an dem sie schrittweise ihre Kenntnisse über Supernova-Explosionen und ihre Deutungs-Konzepte für die dabei auftretenden Abläufe und ihre Prognosen für die weitere Entwicklung derartiger Objekte erweitern und prüfen konnten. So gelang es

- 1948 die als *Taurus A* bezeichnete Quelle von elektromagnetischer Strahlung im Wellenlängenbereich von $10 \cdot m \dots 10 \cdot mm$;
- 1964 die als *Taurus X1* bezeichnete Quelle von elektromagnetischer Strahlung im Röntgen- und γ -Strahlungsbereich;

- 1968/69 die Position des in regelmäßigen Abständen von $33 \cdot ms$ optische Strahlungsimpulse aussendenden Pulsars PSR-B0531

jeweils mit dem Zentrum dieses Krebsnebels zu identifizieren. (XXX: weitere Aussagen ?)

Als 2. zeitnahe Supernova-Explosion aus unserer Nachbarschaft nenne ich das Ereignis Supernova 1987A. Diese Explosion ereignete sich am 23.02.1987 in der großen Magellanschen Wolke (**L**arge **M**agellanian **C**loud LMC) am Rand unserer Milchstraßen-Galaxie, also in einer Entfernung von $1,8 \cdot 10^5 \cdot Lj$ von unserer Sonne. Mit blosem Auge war dieses Ereignis **nicht** zu erkennen. Seit der Erfindung der optischen Teleskope ist dies die am nächsten zu unserer Sonne aufgetretene Supernova-Explosion überhaupt. Durch die heute verfügbaren technischen Möglichkeiten gelang es, den zeitlichen Ablauf dieses Ereignisses, primär also die von diesem Objekt emittierte elektromagnetische Strahlung in einer Fülle von messtechnischen Details aufzuzeichnen. Dabei erlaubte die vergleichsweise geringe Entfernung dieses Objektes sogar eine **räumliche** Auflösung dieses Vorgangs, insbesondere dank der besonderen Möglichkeiten des Hubble Space Telescopes. Die Abb. 14 zeigt das Objekt SN 1987A in seiner im April 1994 aufgezeichneten Struktur. Der zentrale helle Fleck markiert die



Abb. 14 Struktur der Explosionswolke der Supernova 1987A, im April 1994 vom Hubble space telescope aufgenommen
(credit: Dr. Christopher Burrows, ESA/STScI and NASA)

Position des aus der Explosion entstandenen Objektes (vermutlich ein Neutronenstern). Der ihn umschließende Ring ist das Abbild der Stoßwellenfront der Explosionswolke. Die reale geometrische Struktur dieser Stoßwellenfront ist eine sich

ausweitende Kugelschale endlicher Dicke. Innerhalb dieser Schale kommt es zu Leucht-Erscheinungen. Durch die teleskopische Beobachtung werden diese Leucht-Erscheinungen in eine Ebene, die Bildebene projiziert und es entsteht eine leuchtende **Kreisfläche**. Dabei ist die effektive Schichtdicke der projizierten, leuchtenden Schicht am Kreisrand am größten. Sie erscheint daher in dem aufgezeichneten Bild am hellsten. In der Kreismitte ist diese effektive Schichtdicke dagegen am kleinsten, dieser Bildteil erscheint daher am dunkelsten. De facto entsteht so ein verwaschener **Kreisring**.

Die beiden in der Abb. extrem hellen Flecken sind 2 Sterne, die sich während der Aufnahme zwischen dem Objekt SN 1987 A und dem Teleskop befanden. Die physikalische Ursache der beiden weiteren auf der Aufnahmen erkennbaren äußeren Ringe ist noch nicht eindeutig geklärt. Vielleicht handelt es sich um ältere Stossfronten, die sich im Laufe der Zeit gegenüber dem Zentrum verschoben haben. Ich werde hierauf nicht näher eingehen.

Eine Vorstellung von der relativen Häufigkeit von Supernova-Explosionen vermittelt die in der Abb. 97 (b) wiedergegebene Aufnahme der uns benachbarten Galaxie, des sog. *Andromeda-Nebels*. In dieser Aufnahme entspricht jeder einzelne hellblaue Punkt einer intensiven Quelle von Röntgenstrahlung, also dem Überrest einer Supernova-Explosion.

Im Zuge der Erforschung von Supernova-Explosionen und auf Grund des raschen Anstiegs an Messergebnissen teilte man die Menge der (meist nur in ihrem Abklingverhalten) beobachteten Supernova-Explosionen in Klassen ein, die sich in ihren typischen experimentellen Daten unterscheiden. Bei dieser zunächst rein empirischen Vorgehensweise orientierte man sich primär an den Spektren der emittierten sichtbaren Strahlung. Man erzielte so eine immer feinere Aufteilung und sprach dann bald von Supernovae vom Typ Ia, Ib, Ic, II-L und II-P. Heute gibt es aber bereits fundierte Theorien über die Voraussetzungen für diese Explosionen und für die dabei ablaufenden Prozesse. Auf Basis dieser prozess-orientierten Sichtweise gibt es primär 2 unterschiedliche Klassen von Supernova-Explosionen:

1. Die **thermonukleare** Supernova-Explosion. Sie entsteht durch die spontane Zündung eines neuen Kernfusionsprozesses, der danach unkontrolliert bis zur Erschöpfung des hierfür benötigten Fusionsmaterials weiterbrennt.
2. Die **Kollaps-** oder **hydrodynamische** Supernova-Explosion. Sie entsteht dadurch, dass der Stern eine Stabilitätsgrenze seines aktuellen Zustands (eines stationären Kernfusions-Brennens) überschreitet, so dass nun spontan wieder die Wirkung der Gravitation dominiert. Der Stern kollabiert, bis ein neuer, bis dahin nicht relevanter Mechanismus über die Gravitation dominiert und sich dadurch erneut ein stationärer Zustand einstellt.

Ich beginne mit den **thermonuklearen** Supernova-Explosionen. Ein typisches Beispiel hierfür sind Supernova vom **Typ Ia**. Sie zeichnen sich insbesondere dadurch aus, dass der zeitliche Ablauf ihrer absoluten Helligkeit und ebenso deren

Maximalwert bei allen diesen Ereignissen nahezu identisch ist. Ausserdem treten diese spezifischen Supernova-Explosionen im gesamten Kosmos relativ häufig auf. In unserer Milchstrassen-Galaxie sind es

$$N(\text{Typ 1a SN; Milchstrasse}) \sim \frac{1 \dots 3}{100 \cdot y} \quad (10.182)$$

Man bezeichnet sie daher auch oft als sog. *Standardkerzen* der astronomischen Photometrie (s. insbesondere Absatz S. 1415). Typ-Ia-Supernova treten an Doppelsystemen auf, von denen der eine Stern ein weißer Zwerg ist und der andere meist eine Masse deutlich über der Masse unserer Sonne besitzt. Der mittlere Abstand der beiden Sterne von einander ist ausreichend klein (XXX: präzisieren), so dass ein signifikanter Massentransfer von dem massereicheren Stern zu dem weißen Zwerg erfolgt. Hierdurch wird irgendwann die Stabilitätsgrenze eines weißen Zwergs, die Chandrasekha-Grenze der Stabilisierung über den Entartungsdruck (s. Absatz S. 8.4.7) von

$$M_{\text{krit}} = 1,44 \cdot M_{\odot} \quad (10.183)$$

überschritten. Die Folge ist ein Gravitationskollaps des weißen Zwergs, verbunden mit einem extremen Anstieg von T und p in seinem Zentrum. Da der Stern durch die vorangegangenen Prozesse, insbesondere durch die i.a. mehrfachen Nova-Explosionen, einen signifikanten Anteil an Elementen schwerer als He enthält, setzt nun explosionsartig erneut ein Fusions-Brennen ein, i.a. zunächst das C -Brennen (s. Absatz S. 1188). Dies führt zu einer Druckwelle in Richtung der Sternoberfläche, in deren Stoßfront ebenfalls sehr hohe Werte von T und p vorherrschen, die ihrerseits weitere Fusionsprozesse auslösen und so die Energie der Stoßwelle weiter erhöhen. Im Ergebnis wird der Stern komplett zerstört. Die bei dieser Explosion insgesamt frei werdende Energie liegt in der Größenordnung von $10^{44} \cdot J$. Sie wird überwiegend in Form von hochenergetischer elektromagnetischer Strahlung in das Weltall abgegeben. Der während dieser Prozesse erzeugte Neutrino-Strom enthält einen relativen Anteil dieser Gesamtenergie von lediglich etwa $XXX \cdot \%$ (s. hierzu auch die Aufgabe 1).

Der bisherige Begleiter-Stern findet im Anschluss an diese Explosion kein Gravitationszentrum seines bisherigen Doppelsystempartners mehr vor und fliegt mit der Tangentialgeschwindigkeit seiner bisherigen Umlaufbewegung als sog. *Runaway-Stern* davon. Die Supernova SN 2011fe in der Feuerrad-Galaxie im Sternbild des großen Bären, s. Abb. 95 (b), ist ein aktuelles Beispiel für eine thermonukleare Supernova-Explosion. Dieser Stern steht zur Erde in einer Entfernung von $2,1 \cdot 10^7 \cdot L_j$, also noch relativ nahe. Das besondere an dieser Explosion besteht insbesondere darin, dass sie bereits mehrere Stunden **vor** der eigentlichen Explosion als solche erkannt wurde. Dadurch liegen über diese Explosion bereits jetzt (01.2012) weit mehr Daten vor als über jede andere vorangegangene Explosion, s. [9].

Neueste experimentelle Befunde, insbesondere von dieser SN 2011fe, aber auch von der SNR 0509-67.5 in der großen Magellanschen Wolke sowie von der SN 1006 und von der von Kepler beobachteten Supernova SN 1604, haben zu der Hypothese

geführt, dass eine thermonukleare Supernova-Explosion auch durch das Verschmelzen **zweier** weißer Zwerge auftreten kann. Das spezifische an diesem besonderen Typ von Explosion besteht dann darin, dass in diesem Fall beide Ausgangsterne zunächst mit einander verschmelzen und danach explodieren, so dass im Anschluss an diese Explosion **kein** Runaway-Stern auftritt. Die LMC ist von uns etwa $1,6 \cdot 10^5 \cdot Lj$ entfernt. Die SNR 0509-67.5 ereignete sich für Erdbeobachter vor etwa $400 \cdot y$. Die Abb. 15 zeigt



Abb. 15 Umgebung der vor ca. $400 \cdot a$ in der großen Magellanschen Wolke explodierten Supernova SNR 0509-675

(rot) Emissionsstrahlung von heißem Wasserstoff

(s/w) Abbildung der Umgebung im sichtbaren Licht

(blau/grün) Röntgenstrahlung

(Quelle: NASA image gallery;

credits: X-Ray: NASA/CXC/SAO/J. Hughes et al.

Optical: NASA/ESA/Hubble Heritage Team (STScI/AURA)

eine Aufnahme dieser Region als Kombination eines Bildes im Kontrast des heißen Wasserstoffs, eines Bildes im Kontrast des sichtbaren Lichts (beide aufgenommen vom Hubble-Teleskop) und eines Bildes im Röntgenstrahlungskontrast (aufgenommen vom NASA Chandra-X-Ray-Observatory). Das Bild zeigt die aktuelle Stoßfront der sich in das Weltall ausbreitenden Reaktionsprodukte dieser Explosion. Die Blase aus heißen Gasen hat einen Durchmesser der Größenordnung $23 \cdot Lj$ erreicht, was einer mittleren Fluchtgeschwindigkeit der Größenordnung $5 \cdot 10^3 \cdot \frac{km}{s}$ entspricht. Zu ihrer Überraschung haben die Astronomen jedoch trotz intensiver Suche im Zentralbereich dieser Blase keinerlei Anzeichen für einen Runaway-Stern gefunden.

Ich komme nun zu den **Kollaps-** oder **hydrodynamischen** Supernova-Explosionen und zwar zu denen, die auch als vom Typ II bezeichnet werden:

Nach dem aktuell weitgehend als abgesichert geltenden Kenntnisstand läuft eine derartige hydrodynamische Supernova-Explosion in den folgenden Teilschritten ab:

1. Ausgangszustand für diesen Prozess ist der folgende: Die verschiedenen Fusionszyklen in einem Stern sind zumindest in seinem Kernbereich weitgehend erschöpft. Es hat sich eine Schalenstruktur mit jeweils unterschiedlicher Element-Zusammensetzung gebildet, bei der der Kern im wesentlichen aus Fe besteht. Infolge der erschöpften Energieproduktion dominiert erneut die Gravitation und der Kern schrumpft weiter. Dabei bildet sich ein Elektronen/ Fe -Plasma. Sobald nun dessen Chandrasekhar-Grenze überschritten ist, kommt es spontan, d.h. innerhalb von ms zu einem Gravitationskollaps des Kernbereichs, der erst zum Stillstand kommt, wenn ein neuer Mechanismus greift. Im hier diskutierten Fall ist dies die Umwandlung des Elektronen/ Fe -Plasmas in ein Neutronenplasma, s. Absatz S. 1206. Das Neutronengas hat dann eine Dichte von der Größenordnung der Kernmaterie und baut einen Druck auf, der sich mit dem Gravitationsdruck in das Gleichgewicht einstellt.
2. Diesem spontanen Gravitationskollaps konnten nur die innersten, ausreichend dichten Schichten des Sterns folgen. Die übrigen Schichten haben sich hierbei von dem kollabierenden Kern getrennt und stürzen nun in Form einer Stoßwelle auf den inzwischen hochdicht gewordenen Kern zu. Die Stoßwelle wird dann an der Kernoberfläche reflektiert und bewegt sich danach in Richtung der **Sternoberfläche**.
3. Diese nach außen gerichtete Stoßwelle erzeugt in ihrer Front extrem hohe Werte von T und p . Da in diesen Schichten des Vorläufersterns noch nicht alle fusionsfähigen Anteile verbrannt sind, setzt hier erneut die Fusion ein und erhöht die Energie der Stoßwelle.
4. In der Druckwelle ist auch Material enthalten, das sich vor Beginn der Explosion im Kern des Sterns befand, also stark mit Neutronen angereichert ist. Diese erbrüten nun über den sog. *r-Prozess* (s. Absatz S. 777) in merklichem Umfang schwerere Elemente jenseits von Fe .
5. Einige Stunden nach dem Einsatz des Gravitations-Kollaps erreicht die Druckwelle die Sternoberfläche. In diesem Moment stößt sie einen sog. *breakout-Burst* aus. Dessen Strahlung überstreicht das gesamte Spektrum vom IR über das sichtbare Licht bis weit in den Bereich der Röntgenstrahlung. Kurz danach steigt die absolute Helligkeit stark an und erreicht im Verlauf von Tagen oder Wochen ihr Maximum.

Der genaue zeitliche Verlauf der Helligkeit ist von Ereignis zu Ereignis unterschiedlich, s. Abb. 16. Anfang des Jahres 2016 gelang der direkte Nachweis

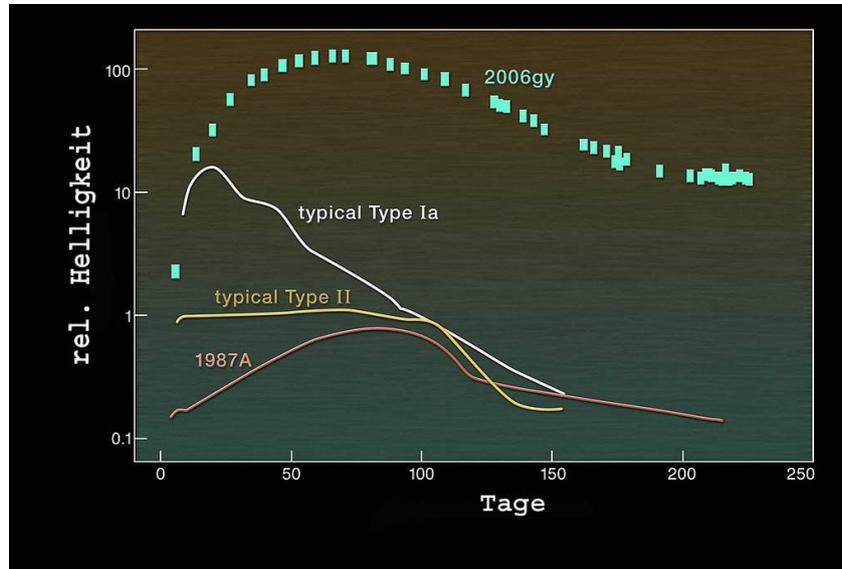


Abb. 16 Zeitlicher Verlauf der visuellen Helligkeit verschiedener Supernova-Explosionen (Quelle: Diese Abb. basiert auf einer Graphik aus den Wikimedia Commons; Urheber: NASA/CXC/UC Berkeley/N.Smith et al.)

dieses breakout-bursts, s. Abb. 17, durch eine akribische Auswertung der Messdaten des Kepler-Programms (s. Unterabsatz S. 1422). Die ursprüngliche Aufgabe dieser Weltraumsonde war der Nachweis sog. *Exo-Planeten*. Wie das wiedergegebene Beispiel zeigt, eignen sich die Messdaten jedoch auch hervorragend für die Suche nach Supernova-Ereignissen. Die in der Abb. 17 wiedergegebene Messkurve zeigt die Helligkeit des Sterns von einem Zeitpunkt von mehreren Tagen vor dem ersten Helligkeitsanstieg bis zum Erreichen der maximalen Helligkeit. Der relative Anstieg beträgt fast 5 Größenordnungen. Der shock breakout zu Beginn des Anstiegs ist deutlich zu erkennen. Er dauert nur wenige Minuten und entspricht einem relativen Helligkeitsanstieg von $6 \cdot 10^3$. Diese Supernova hat die Bezeichnung KSN 2011d erhalten. Ihr Vorläuferstern war ein roter Riese der Masse

$$M_{\text{KSN2011d}} \sim 500 \cdot M_{\odot} \quad (10.184)$$

Seine Entfernung beträgt

$$d_{\text{KSN2011d}} = 1,2 \cdot 10^9 \cdot Lj \quad (10.185)$$

Generell gilt, dass die thermonuklearen Supernova-Explosionen ihr Helligkeitsmaximum schneller erreichen als die hydrodynamischen, und dass ihre Helligkeit danach auch wieder rascher abklingt. Dies ist wohl am plausibelsten mit der deutlich geringeren Gesamtmasse der Vorläufersterne zu erklären, die als thermonukleare

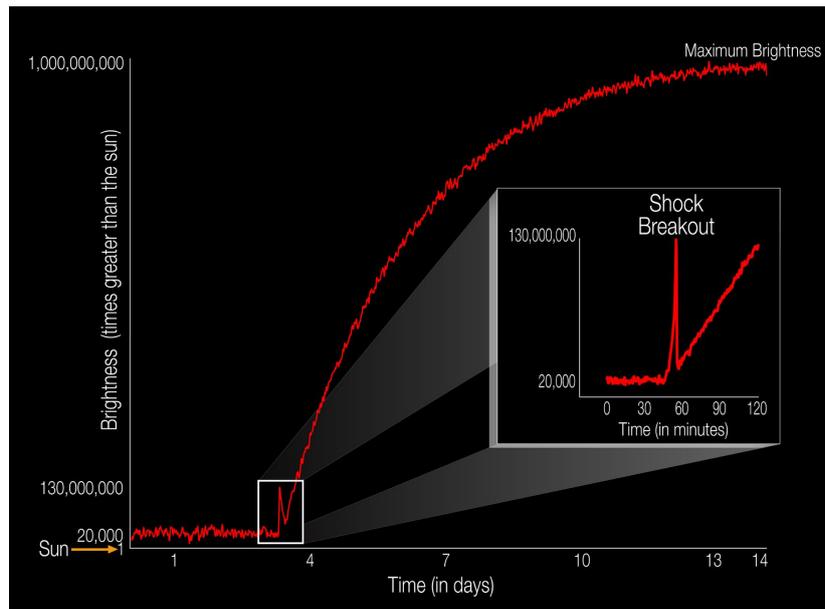


Abb. 17 Zeitliche Entwicklung der Sternhelligkeit im Verlauf einer Typ II-Supernova-Explosion
(credit: NASA Ames / W.Stenzel)

SN explodieren. Voraussetzung für diesen Vorgang ist ein Vorläuferstern mit einer Gesamtmasse im Bereich

$$8(10) \cdot M_{\odot} < M_S < 30 \cdot M_{\odot} \quad (10.186)$$

Bzgl. der unteren Grenze besteht aktuell (2012) noch eine gewisse Unsicherheit. Ein typisches Beispiel für eine hydrodynamische Supernova vom Typ II ist SN 1987A. Dessen Vorläuferstern war ein sog. *blauer Überriese* mit einer Masse von

$$M \approx 27 \cdot M_{\odot} \quad (10.187)$$

und befand sich in einem 3-Sterne-System, das

$$d_{\text{SN1987A}} = 1,68 \cdot 10^5 \cdot L_j \quad (10.188)$$

von uns entfernt ist. Als Ergebnis dieser Explosion entstand vermutlich ein Neutronenstern. Allerdings konnte er bis heute trotz intensiver Suche noch nicht gefunden werden. Wir können aktuell daher nicht ausschließen, dass sich ein *schwarzes Loch* (s. Unterabsatz S. 1212) bildete oder gar ein noch spekulativeres Objekt, z.B. ein *Quarkstern*.

Kurz vor dem Einsatz des Helligkeitsanstiegs sandte der Stern einen intensiven Neutrino-burst aus, der die Erde etwa $3 \cdot h$ vor der zugehörigen sichtbaren

Strahlung erreichte. Diese Beobachtung wird dahin gehend gedeutet, dass dieser Neutrinostrom generiert wird, wenn die vom Kollaps des Sternkerns generierte Stosswelle an der Grenzfläche des Sternkerns reflektiert wird. Wegen der extrem geringen Wechselwirkung zwischen Neutrinos und Materie kann dieser Neutrinostrom die Sternhülle nahezu ungehindert verlassen, während die Stosswelle erst noch bis zur Sternoberfläche laufen muss, bis von ihr elektromagnetische Strahlung direkt in das Weltall abgestrahlt wird. Dieser experimentelle Befund gibt aber auch noch einen für die Elementarteilchenphysik wichtigen Hinweis: Wenn wirklich die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Neutrinos messbar kleiner ist als die Lichtgeschwindigkeit, können wir aus den (SN 1987A)-Daten eine Obergrenze für diese Geschwindigkeitsdifferenz ableiten:

$$\frac{c_0 - v_{\text{Neutrino}}}{c_0} < \frac{10 \cdot h}{1,68 \cdot 10^5 \cdot y} = 0,68 \cdot 10^{-10} \quad (10.189)$$

Dem wir sehen als unwahrscheinlich an, dass bei dem beobachteten Stern die Laufzeit der Stosswelle innerhalb des Sterns den Laufzeitunterschied des Neutrino- und des Lichtstroms bis zu unserer Erde um mehrere Größenordnungen übertraf und sich dennoch zufällig gerade in etwa kompensierte, so dass sich als Messwert für den Unterschied in der Ankunftszeit der relativ kleine Wert von $3 \cdot h$ ergab.

Auf die Besonderheiten der Supernova 2006gy werde ich noch eingehen.

Wir kommen nun zu den ebenfalls hydrodynamischen Supernova-Explosionen, nun aber vom Typ Ib oder Ic. Sie treten an Vorläufersternen auf mit einer Masse von

$$M_S > 30 \cdot M_{\odot} \quad (10.190)$$

(XXX: Der weitere Text des Absatzes *Supernova-Explosionen* ist noch nicht verfügbar.)

10.2.6 Physik der Sterne / Zusammenfassende Darstellung (-)

Wie wir an Hand der vorangegangenen Abschnitte gesehen haben, ist die Physik der Sternentwicklung komplex strukturiert und enthält viele Einzelfakten und Besonderheiten. Überdies sind viele Einzelheiten dieser Entwicklung noch keinesfalls abschließend geklärt, sondern Gegenstand der aktuellen Forschung. Um dem Leser die Chance zu geben, dennoch nicht den roten Faden zu verlieren, bringe ich nun eine kurze Zusammenfassung der wesentlichen bereits diskutierten Fakten.

Die individuelle Entwicklungsgeschichte eines Sterns beginnt mit der über die Gravitation gesteuerten Kontraktion einer Wolke aus interstellarem Staub zu einer Akkretionsscheibe und zu einer Konzentration eines Großteils der Gesamtmasse dieser Scheibe in deren Zentrum. Sobald der so gebildete Protostern in seinem Kern ausreichend hohe Werte von Massendichte m und Temperatur T erreicht hat, setzt in diesem Kern das H -Brennen ein.

Das weitere Schicksal des so gebildeten jungen Sterns ergibt sich weitgehend aus 2 Kenngrößen:

- seiner Gesamtmasse M und

- seinem Gehalt an Elementen mit einer Kernladungszahl $z > 2$.

Sterne mit nur sehr geringen Anteil an schwereren Elementen, Sterne also der 2. Generation (oder gar der 1. Generation), sind bis zu sehr großen Massen stabil. Der massereichste Stern dieses Typs, der bisher entdeckt wurde, ist der Stern R136a1 in der LMC. Er hat die Daten

$$M = 265 \cdot M_{\odot} ; T_{\text{Oberfl.}} \sim 4 \cdot 10^4 \cdot K ; \quad (10.191)$$

Das Zeitintervall, in der ein Stern im stabilen Zustand des H -Brennens in seinem Kern verbleibt, ist um so kürzer, je größer seine Masse ist.

Der typische zeitliche Ablauf eines Stern der 2. Generation) ist in der Abb. ?? wiedergegeben. (XXX: Diese Abb. und der sie erläuternde Text sind noch nicht verfügbar.)

Die verschiedenen stationären Phasen und die Übergänge zwischen diesen Phasen, die ein Stern durchlaufen kann, sind noch einmal in der nachfolgenden Tabelle aufgeführt.

M/M_{\odot}	zeitliches Verhalten	Endzustand
$< 0,08$	keine zentrale H -Fusion	Brauner Zwerg
$< 0,9$	keine He -Fusion	Weißer Zwerg
< 8	H -Fus./ He -Fus./Riesenstern/ spaltet Materie ab, bis $M/M_{\odot} < 0,9$	Weißer Zwerg
> 8	H -Fus./ He -Fus./ ... /Supernova	Neutronenstern (Pulsar)
$\gg 8$	H -Fus./ He -Fus./ ... /Supernova	schwarzes Loch

Ich schließe diese Darstellung der Physik der Sternentwicklung mit einer Aufzählung der aus meiner Sicht wichtigsten noch nicht geklärten Fragen:

1. Wie lautet das Grundprinzip, nach dem das Drehimpuls-Problem bei der Sternentstehung gelöst wird? Welche Bedeutung kommt hierbei der Bildung eines zentralen Jet-Strahls zu?

(XXX: Der weitere Text, der die noch nicht geklärten Fragen aufzählt, ist noch nicht verfügbar.)

10.2.7 Die Entstehung von Planetensystemen (-)

Die Frage, ob außer der Sonne **unseres** Planetensystems auch noch andere Sonnen existieren, die von sie umkreisenden Planeten umgeben sind, wurde lange Zeit kontrovers diskutiert. Das Interesse an einer verlässlichen Antwort auf diese Frage war keinesfalls nur auf die Astronomen begrenzt, sondern beschäftigte schon immer insbesondere die Philosophen und darüber hinaus eine breite interessierte Öffentlichkeit. Schließlich war es von der Annahme eines weiteren Planetensystems (und damit wohl eher einer großen Anzahl derartiger Systeme) nur noch ein kleiner Schritt zur Annahme der Existenz eines erdähnlichen Planeten und damit der extraterrestrischen

Existenz von Leben, vielleicht sogar von intelligenten Lebewesen. Lange Zeit war jedoch die experimentelle Astronomie nicht in der Lage, diese Frage zu beantworten. Seit Beginn des 21. Jahrhunderts hat man nun verschiedene Methoden zum zunächst indirekten, später dann sogar direkten Nachweis von nicht zu unserem Planetensystem gehörenden Planeten entwickelt (s. Abschnitt 10.6.11) und dabei die Nachweisgrenze immer weiter verfeinert. Aktuell (Beginn des Jahres 2010) gelten über 400 Beobachtungen von Sternen mit 1 bis 5 sie umkreisenden Planeten als gesichert. Diese Planeten werden allgemein als *extrasolare* Planeten oder kurz *Exo-Planeten* bezeichnet. Die Zahl der entdeckten Exo-Planeten wird in der nahen Zukunft voraussichtlich stark ansteigen insbesondere dank der bereits erfolgreich begonnenen Arbeitsaufnahme der NASA-Sonde *Kepler* (s. Abschnitt 10.6.11). Der kleinste bisher (2010) nachgewiesene Planet hat eine Masse von etwa 5 Erdmassen. Die erste **optische** Aufnahme eines extrasolaren Planeten gelang 2004 mit dem **V**ery **L**arge **T**elescope (VLT) des **E**uropean **S**outhern **O**bservatory (ESO), s. Abb. 18. Der Zentralstern dieses Systems ist ein

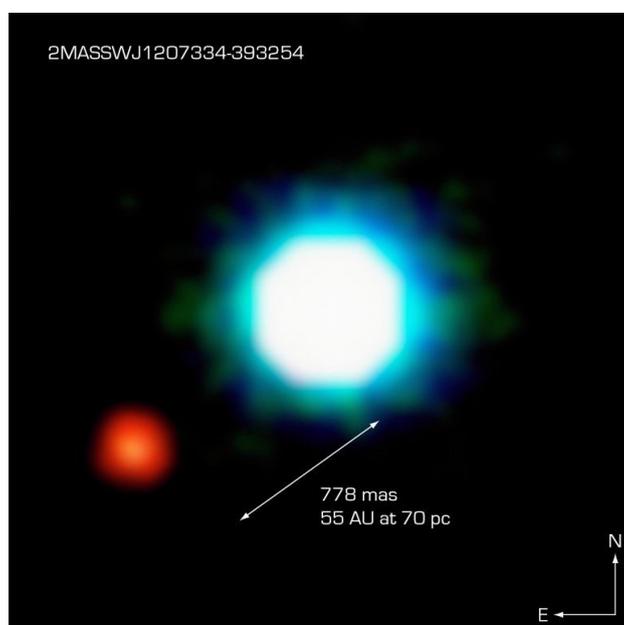


Abb. 18 Stern 2M1207 im Sternbild Hydra mit Planeten
(Quelle: www.eso.org/public/news/eso0428
Autor des Bildes ist Gaël Chauvin)

sog. *brauner Zwerg* (s. Absatz *Zwergsterne* S. 1202) im Sternbild der *Hydra*, der die astronomische Kennung 2M1207 erhalten hat. Der in der Abb. 18 als kleine rote Kugel wiedergegebene Planet umkreist seine Sonne auf einer Bahn mit einem Radius von

$$R_{\text{Bahn}} \approx 55 \cdot AE \quad (10.192)$$

Von der $220 \cdot L_j$ entfernten Erde aus betrachtet ergibt dieser Wert einen Beobachtungswinkel von knapp $0,8 \cdot \text{arcsec}$. Dieser Wert liegt noch deutlich über dem Auflösungsvermögen des VLT von $1 \cdot 10^{-3} \cdot \text{arcsec}$. Die neuesten (2012) insbesondere mit der Keplersonde erzielten Ergebnisse haben die Anzahl der erkannten Planeten sehr stark angehoben. Nun geht man davon aus, dass etwa $\frac{1}{3}$ aller in unserer Milchstraße vorhandenen Sterne ein Planetensystem besitzen.

Wir haben daher heute gute Gründe anzunehmen, dass die Bildung eines Planetensystems, also eines Systems aus einem Stern, der elektromagnetische Strahlung emittiert, und einer Anzahl von diesen Stern umlaufenden Planeten eine im Kosmos als häufig oder gar als **normal** anzusehende Konfiguration darstellt. Um so relevanter ist die Frage nach den Voraussetzungen für die Entstehung eines derartigen Systems und dem generellen Ablauf dieses Entstehungsprozesses. Da trotz aller spektakulären Erfolge der modernen Astronomie die Beobachtungsfakten insbesondere zur Entstehung der Planetensysteme immer noch sehr dürftig sind, bewegen sich die aktuell publizierten Hypothesen zu dieser Frage noch weitgehend im Bereich der Spekulation.

Planetesimale (-)

Ausgangspunkt unserer Überlegungen ist die Existenz einer Akkretionsscheibe oder protoplanetaren Scheibe um den sich bildenden jungen Stern. Da man zur Erklärung der Akkretion das Auftreten von Scher- und Turbulenzeffekten innerhalb dieser sich aufkonzentrierenden Massenverteilung voraussetzen muss, wird es im Zuge dieses Prozesses auch zu Sedimentationseffekten kommen im dem Sinne, dass die Konzentration schwererer Elemente zum Zentrum der Massenverteilung hin zunimmt. Wir erwarten also, dass die über die gesamte protoplanetare Scheibe gemittelte Elementverteilung nicht mit der in dem sich bildenden jungen Stern vorliegenden Elementverteilung übereinstimmt. Und auch innerhalb der protoplanetaren Scheibe sollte die relative Häufigkeit der schwereren Elemente nach außen hin abnehmen. Diese Annahme sollte auch für unser eigenes Planetensystem zutreffen. Wir vermuten also, dass die über alle Planeten unseres Planetensystems gemittelte Elementverteilung signifikant weniger schwerere Elemente enthält als unsere Sonne. Deren Elementverteilung ist in der Abb. 19 wiedergegeben. In jedem Fall bestehen auch die außerhalb ihres Zentrums liegenden Bereiche einer protoplanetaren Scheibe ganz überwiegend aus H_2 . Sobald es jedoch innerhalb dieser Bereiche zu lokalen Fluktuationen der Massendichte kommt, sind hierbei Agglomerationen der schwereren Anteile des Staubs deutlich bevorzugt. Es wird also zu ersten Agglomeraten kommen, die bevorzugt aus schwereren Elementen als H bestehen. Als Dauer dieser ersten Phase der Agglomeration von kosmischem Staub zu den sog. Planetesimalen schätzt man heute den Wert

$$\Delta t(\text{Planetesimalen-Bildg.}) < 1 \cdot 10^5 \cdot y \quad (10.193)$$

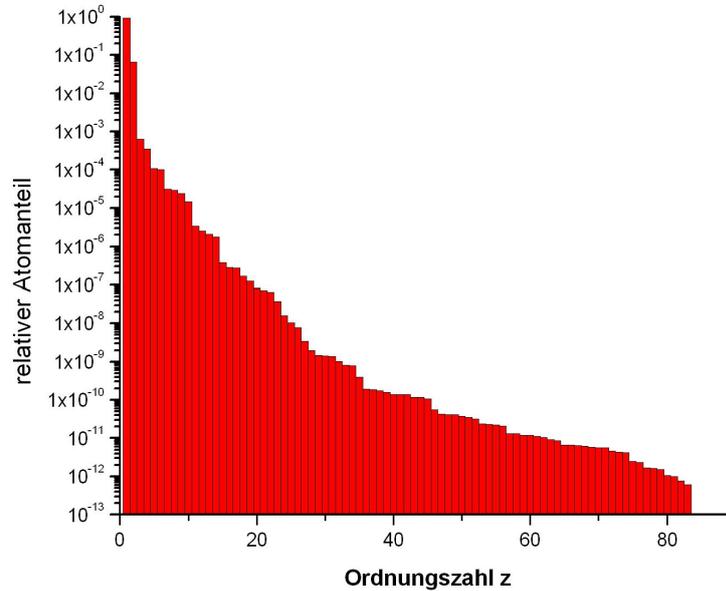
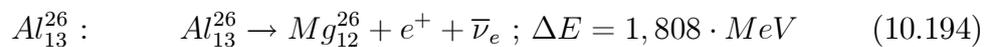


Abb. 19 Elementzusammensetzung unseres Solarsystems(Quelle: [20])

Diese Planetesimale enthalten aus der Entstehungsphase dieser Elemente (s. Absatz S. 1218) auch noch radioaktive Isotope mit mittlerer Halbwertszeit, z.B. das Isotop



$$\tau_{1/2} = 7,4 \cdot 10^5 \cdot y \quad (10.195)$$

Dieses Isotop ist ein e^+ -Strahler, so dass nicht nur die o.g. Energie von $1,808 \cdot MeV$ frei wird, sondern zusätzlich auch noch die Zerstrahlungsenergie bei dem anschließenden Prozess

$$e^+ + e^- \rightarrow \gamma : \hbar \cdot \omega = 1,02 \cdot MeV \quad (10.196)$$

Ein weiterer möglicher Kandidat für diese Prozesse ist das Isotop



$$\tau_{1/2} = 2,62 \cdot 10^6 \cdot y \quad (10.198)$$

Diese verschiedenen Prozesse des radioaktiven Zerfalls heizen die bereits gebildeten Agglomerate auf, so dass sie miteinander verschmelzen und so die ersten Planetesimale bilden. Damit dieser Mechanismus die Agglomeration der Planetesimale wirksam unterstützen kann, muss die Halbwertszeit der radioaktiven Isotope in einem günstigen Bereich liegen:

Physik ganz klein / ganz gross (-)

- Isotope mit einer Halbwertszeit $\tau_{1/2} \ll \mathbb{A}(\text{kosm. Staub})$ sind bereits überwiegend zerfallen, wenn sie in die Planetesimale der Akkretionsscheibe eingebaut werden.
- Isotope mit einer Halbwertszeit $\tau_{1/2} \gg$ Dauer der Bildungsphase der Planetesimale tragen während dieser Bildungsphase nur wenig zur Erwärmung der Planetesimale bei, da sie während dieser Zeit nur zu einem geringen Bruchteil zerfallen.

Ein wichtige Basis-Annahme, durch die die Entstehung von Planeten nahezu zwangsläufig wird, ist die Ausbildung von lokalen Verwirbelungen innerhalb der gesamten Akkretionsscheibe erfassenden Systems von Partikel-Strömungen. Jeder der hierbei gebildeten Wirbelkerne ist ein Kandidat für die Agglomeration von Planetesimalen zu einem Planeten. Eine weitere natürliche Folge dieser Hypothese ist die Bildung von Monden, die den sich bildenden Planeten umlaufen und zwar in demselben Drehsinn wie die Bahn des Planeten um den Stern.

An gewissen, ausgezeichneten Stellen der protoplanetaren Scheibe, die u.a. durch den Gesamt-Drehimpuls der Scheibe vorgegeben sind, heben sich die gravitativen Kräfte der übrigen Teile der Scheibe weitgehend auf. Insbesondere an diesen Stellen kann sich dieser Agglomerationsprozess weitgehend ungestört fortsetzen, so dass diese Planetesimale stetig an Masse zunehmen und bereits als Planetoiden bezeichnet werden können. Eine typische Abmessung dieser nur in sehr grober Näherung kugelförmigen Objekte in dieser Phase ihrer Entwicklung ist

$$\langle D \rangle < 1 \cdot km \quad (10.199)$$

Ab einer gewissen Größe dominiert bei dem weiteren Wachstum eines Planetoiden der Zusammenstoß mit anderen ebenfalls relativ großen Planetoiden gegenüber der gravitativ getriebenen Agglomeration mit relativ kleinen Planetesimalen. Unter günstigen Umständen werden diese Planetoiden zu Objekten mit Durchmessern von einigen $10^3 \cdot km$, die sich auf zeitlich konstanten Bahnen um ihren Zentralstern bewegen. Derartige Objekte bezeichnen wir als *Planeten*. Während dieses Prozesses werden erneut große Mengen an Gravitationsenergie frei (vgl. Aufgabe 19 im Heft 8). Diese reichen aus, um den gesamten Planeten aufzuschmelzen. Erst wenn dieser Prozess weitgehend abgeschlossen ist, beginnt der Planet (erneut) zu erstarren und hat nun eine nahezu ideal kugelförmige Gestalt. Während der nun folgenden Phase der Entwicklung "reinigt" der Planet die Umgebung seiner Planetenbahn weitgehend von den noch vorhandenen Resten interplanetaren Staubs, indem er diesen über seine Gravitation "aufsaugt". Dieses Material besteht überwiegend aus Wasserstoff.

Die typische Dauer dieses Entstehungsprozesses von Planeten schätzt man heute auf

$$\Delta t(\text{Planetenbildung}) \sim 1 \cdot 10^8 \cdot y \quad (10.200)$$

Der sog. *Asteroidengürtel* unseres Planetensystems (s. Absatz S. 1358), dessen Bahnbereich zwischen den Bahnen der Planeten Jupiter und Mars liegt, besteht noch

heute zu einem großen Anteil aus derartigen Planetoiden. An dieser Stelle unseres Planetensystems ist offenbar der weitere Prozess der Planetenbildung zum Stillstand gekommen. Man vermutet heute, dass dies eine unmittelbare Folge der zu engen Nachbarschaft zu dem massereichen Planeten Jupiter gewesen ist.

Dank der vielfältigen experimentellen Möglichkeiten der Astronomie müssen heute diese Modelle zur Entstehung von Planetensystemen nicht mehr ausschließlich spekulativ bleiben. Nachdem unser eigenes Planetensystem ein Beispiel ist für ein ca. $4,55 \cdot 10^9 \cdot y$ altes System, können wir nun auf die Suche gehen nach deutlich jüngeren Systemen, bei denen die Bildung der Planeten noch nicht abgeschlossen ist. Die Abb. 20 (a) zeigt ein derartiges System als Überlagerung eines Bildes im Kontrast des sichtbaren Lichtes und einer Nah-Infrarotaufnahme. Im Zentrum dieses Bildes befindet sich der Stern *Fomalhaut*, der hellste Stern des Sternbildes *südliche Fische*. Er ist $25 \cdot L_j$ von uns entfernt. Das NIR-Bild ist (zur Vermeidung von Überstrahlungen) in einem Nahbereich um den Stern herum mechanisch ausgeblendet. Bei dem als "Scattered Starlight noise" bezeichneten Teil des Bildes handelt es sich um einen abbildungsbedingten Artefakt. Relevant ist dagegen die als *dust ring* bezeichnete Struktur. Diese ist als ein Ring aus interplanetarem Staub zu deuten, aus dem sich gerade ein Planet bildet. Dieser ist bereits zu erkennen, wie der Bildausschnitt verdeutlicht. Er zeigt einen gegenüber der Umgebung deutlich helleren Punkt, der sich auf einer Keplerbahn um den Stern bewegt. Das ungefähre Analogon zu diesem Ring in unserem Planetensystem ist der Kuiper-Gürtel, s. Absatz S. 1361.

Dieser Planet hat bereits den in Bezug auf seine Bahn weiter innen liegenden Teil dieses Staubrings absorbiert, so dass dessen innere Begrenzung nun relativ scharf ist. Man schätzt seine Bahndaten auf

$$D_{\text{Bahn}} \approx 115 \cdot AE ; T_b = 872 \cdot y \quad (10.201)$$

Seine Masse konnte bisher nur sehr grob abgeschätzt werden,

$$0,5 \cdot M_{\text{Jupiter}} < M < 2 \cdot M_{\text{Jupiter}} \quad (10.202)$$

Zu diesem Wert passt jedoch nicht die außergewöhnlich hohe absolute Helligkeit dieses Planeten. Eine mögliche Erklärung ist, dass dieser Planet bereits ein sehr großes Ringsystem besitzt, das diese Zusatzhelligkeit erzeugt.

Alle diese Objekte sind aus derselben protoplanetaren Scheibe entstanden. Daher umlaufen sie ihren Zentral-Stern alle annähernd innerhalb derselben Ebene und insbesondere alle in demselben Drehsinn. Eine Abweichung von dieser generellen Regel kann sich nur einstellen, wenn ein Objekt nach seiner Entstehung Partner einer Kollision mit einem weiteren kosmischen Objekt geworden ist.

Die Abb. 20 (b) zeigt die Akkretionsscheibe des Sterns HL Tauri aus dem Sternbild *Stier*. Dieser Stern befindet sich innerhalb der Molekülwolke TMC-1 in einer Entfernung von $450 \cdot L_j$ von uns und ist sehr jung. Die aktuell (2015) publizierten

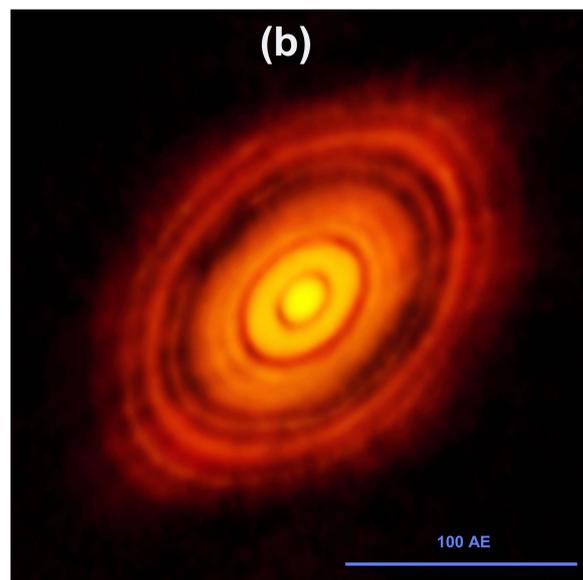
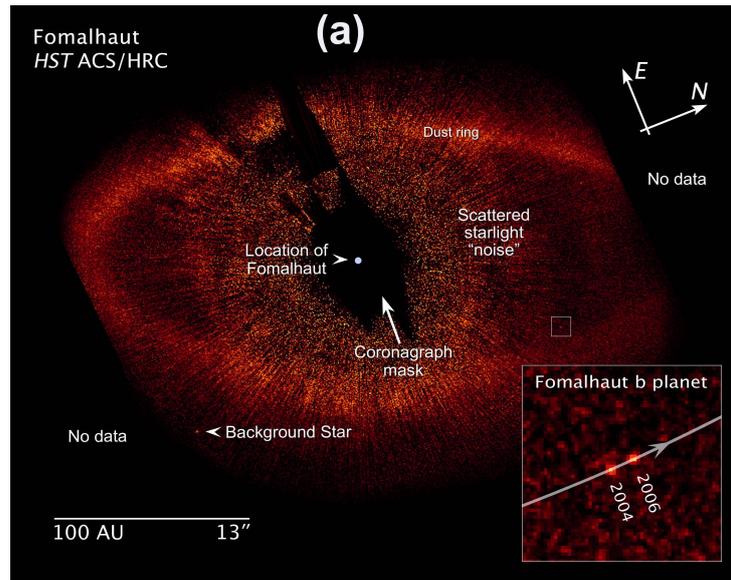


Abb. 20 Teleskopische Aufnahmen junger Planetensysteme
(a) Stern Fomalhaut, aufgenommen am 13.11.2008 vom Hubble Telescope als überlagerte Aufnahme im sichtbaren und im NIR-Licht
(Credit: NASA/ESA, P.Kalas, J.Graham, E.Chiang, E.Kite (Univ. of Cal. Berkeley), M.Clampin (NASA Godard Space Flight Center), M.Fitzgerald (Lawrence Livermore Nat. Lab.), K.Stapelfeldt a. J.Krist (NASA Jet Propulsion Lab.))
(b) Der Stern HL-Tauri und seine Akkretionsscheibe, aufgenommen als Bild im Spektralbereich der mm-Wellen im September 2014 vom ALMA-(sub-)mm-Teleskop
(credit: ALMA(ESO/NAO/NRAO))

Schätzungen seiner wichtigsten physikalischen Kenndaten liegen im Bereich

$$M_{\text{HL-Tauri}} \approx 1 \cdot M_{\odot} \quad (10.203)$$

$$1 \cdot 10^5 \cdot y < \mathbb{A}(\text{HL Tauri}) \lesssim 1 \cdot 10^6 \cdot y \quad (10.204)$$

Die Aufnahme ist eines des ersten Ergebnisse der Anfang September 2014 begonnenen Messkampagne des ALMA-Teleskops in Atacama/Chile unter Einsatz einer Basislänge der Antennen von $15 \cdot km$ ([35]). Die Winkelauflösung lag mit

$$\delta\alpha = 3,5 \cdot 10^{-2} \cdot sec$$

nahe dem aktuell maximal erreichbaren Grenzwert. Auf der Abb. 20 (b) entspricht dies einer Ortsauflösung von $5 \cdot AE$. Man erkennt neben dem Zentralstern die noch weitgehend großräumig mit kosmischem Staub und Planetesimalen gefüllte Akkretionsscheibe. Deren Gesamtmasse schätzt man auf

$$M_{\text{disk}} \sim 0,1 \cdot M_{\odot} \quad (10.205)$$

In ihr zeichnen sich aber bereits eine Anzahl von dunklen Ringen ab, in denen aller Voraussicht nach die Bildung von Planeten bereits relativ weit fortgeschritten ist. Denn die nähere Umgebung dieser Planetenbahnen ist von Staub und Planetesimalen bereits weitgehend "gesäubert". Die Ausdehnung dieser Akkretionsscheibe beträgt etwa

$$D_{\text{Akkr.-sch.}} \gtrsim 90 \cdot AE \quad (10.206)$$

Dieser Wert entspricht etwa dem Durchmesser des Kuipergürtels in unserem Planetensystem.

Zum Abschluss dieses Absatzes *Planetesimale* fasse ich wieder die aus meiner Sicht wichtigsten offenen Fragen zur Theorie der Planetenbildung zusammen:

1. Über welchen Mechanismus gelingt es der Natur, bei dem Anwachsen von mikroskopischen Planetesimalen zu makroskopischen, großen Objekten im Bereich $> 10^3 \cdot kg$ die sog. *Meterhürde* zu überwinden?

(XXX: Der weitere Text zu den offenen Fragen der Planetenbildung ist noch nicht verfügbar.)

Planeten (-)

Als Ergebnis der im voran gegangenen Absatz skizzierten Prozesse erwarten wir um viele Sterne eine gewisse Anzahl von Planeten auf unterschiedlichen Bahnen um diesen Stern, die alle eine ähnliche Struktur haben. Sie bestehen aus

- einem Kern aus Metallen und den unterschiedlichsten Verbindungen zwischen schwereren Elementen, die alle bei genügend niedrigen Temperaturen erstarren; häufig hat sich dieser Kern in chemisch unterschiedliche Schalen aufgetrennt, die durch wohl definierte Grenzflächen von einander getrennt sind; der innerste Bereich wird meist als Kern (im engeren Sinne) bezeichnet und die nachfolgenden festen Schalen als Mantel; und um diesen Kern herum
- einer Hülle aus leichteren, flüssigen bzw. gasförmigen Verbindungen von Wasserstoff mit mittelschweren Elementen. Bleibt der gasförmige Teil dieser Hülle gasförmig bis zu der Grenzfläche, die ihn von dem restlichen Planeten trennt, so bezeichnet man ihn als die *Atmosphäre* des Planeten.

Ein prinzipieller Unterschied zwischen sog. *Gesteinsplaneten* und *Gasplaneten* ist nach diesem Modell offenbar nicht gegeben. Es verschiebt sich lediglich der relative Massenanteil von festem Kern und flüssiger bzw. gasförmiger Hülle von den inneren zu den äußeren Planeten zu Gunsten der leichteren Hülle. Ab einer gewissen Mindestgröße des gebildeten Planeten reicht die Wärmeerzeugung durch die noch vorhandenen radioaktiven Isotope der schwereren Elemente aus, um den Kern des Planeten über Zeiten der Größenordnung $10^9 \cdot y$ im flüssigen Zustand zu halten.

Aus diesem Modell der Planeten-Entstehung folgt, dass die Gesamtmasse der Kerne aller entstandenen Planeten deutlich geringer sein muss als der ursprüngliche Gehalt der protoplanetaren Scheibe an schwereren Elementen. Mit Hilfe der Abb. 19 gelangen wir also für unser Planetensystem zu der Abschätzung

$$\sum_{\text{Planeten}} M_i(\text{Kern}) \lesssim 2 \cdot 10^{-4} \cdot M_{\odot} \quad (10.207)$$

Diese Abschätzung zeigt auch, dass nur ein extrem kleiner Anteil der Masse, die ursprünglich in der protoplanetaren Scheibe enthalten war, sich letztlich in den Planeten wieder findet. Der ganz überwiegende Anteil konzentriert sich in dem Zentralstern des Planetensystems.

(XXX: Der weitere Text des Absatzes *Planeten* ist noch nicht verfügbar.)

Monde (-)

Himmelskörper, die sich auf einer stabilen Bahn um einen Planeten befinden, bezeichnet man als Monde. In unserem Planetensystem haben die meisten Planeten einen oder mehrere Monde, s. Abschnitt 10.2.10. Ob dies auch für die übrigen, im Kosmos in großer Zahl vorhandenen Planetensysteme gilt, ist aktuell (2014) noch eine offene Frage. Es gibt jedoch gute Gründe, dieses anzunehmen.

Als Szenarien für die Bildung von Monden werden heute 3 unterschiedliche Abläufe diskutiert, die vermutlich alle 3 neben einander aufgetreten:

1. die **Agglomeration** aus dem kosmischen Staub, der in der Scheibe enthalten ist, die sich um den Planeten gebildet hat und um diesen rotiert.
2. der **Zusammenstoß** des Planeten mit einem hinreichend großen Asteroiden; als Folge dieser Katastrophe werden dieser Asteroid sowie große Teile der oberflächennahen Schicht des Planeten in eine Vielzahl von Bruchstücke zerrissen und in die weitere Umgebung des Planeten geschleudert. Es bildet sich eine Wolke aus diesen Bruchstücken, die um den Planeten rotiert. Dann agglomerieren diese Bruchstücke zu einem zusammenhängenden Körper, der als Mond um den Planeten kreist.
3. die Zerstörung eines **Doppelplaneten-Systems**, wie es gelegentlich im Zuge der Bildung eines Planetensystems entstehen kann. Ein derartiges Paar von Planeten rotiert einerseits um seinen gemeinsamen Massenschwerpunkt und andererseits als ganzes um den Zentralstern dieses Planetensystems. Kommt nun dieses Doppelplaneten-System einem wesentlich massereicheren Planeten aus demselben Planetensystem relativ nahe, kann es passieren, dass der Planet dieses Doppelplaneten-System durch seine Gravitation zerreißt und der eine Planet von ihm eingefangen wird. Der zweite Planet des ursprünglichen Doppelplaneten-Systems spürt dann die nun fehlende Anziehung durch seinen bisherigen Partner und wird dadurch weit aus seiner bisherigen Bahn um den Zentralstern herausgeschleudert.

Monde, die über den 1. Prozess entstanden sind, haben i.a. einen Bahndrehimpuls, der in guter Näherung parallel zum Bahndrehimpuls ihres Planeten orientiert ist. Ihre Masse ist immer sehr viel geringer als die ihres Planeten (XXX: präzisieren). Z.B. sind 8 der insgesamt 62 heute bekannten Jupitermonde vermutlich über diesen Prozess entstanden, s. Unterabsatz S. 1310. Der Neigungswinkel α_b zwischen dem Bahndrehimpuls des jeweiligen Mondes und dem Bahndrehimpuls des Jupiters beträgt bei diesen 8 Monde

$$\alpha_b \leq 1,07^\circ \quad (10.208)$$

und die Masse

$$\frac{M_{Mond}}{M_{Jup.}} < 10^{-4} \quad (10.209)$$

Monde, die über den 2. Prozess entstanden sind, erkennt man insbesondere an ihrer chemischen Zusammensetzung. Sie enthalten nämlich einen überraschend hohen Anteil an den Elementen, die auch in der Mantelschicht des Planeten dominieren. Sehr wahrscheinlich ist der Erdmond über diesen Prozess entstanden, s. Absatz S. 1262.

Monde, die über den 3. Prozess entstanden sind, sind oft zu massereich, als dass für sie der 1. Prozess als Erstehungsprozess in Frage kämen. Außerdem weicht die Richtung ihres Bahndrehimpulses (und ebenso ihres Eigendrehimpulses) oft stark

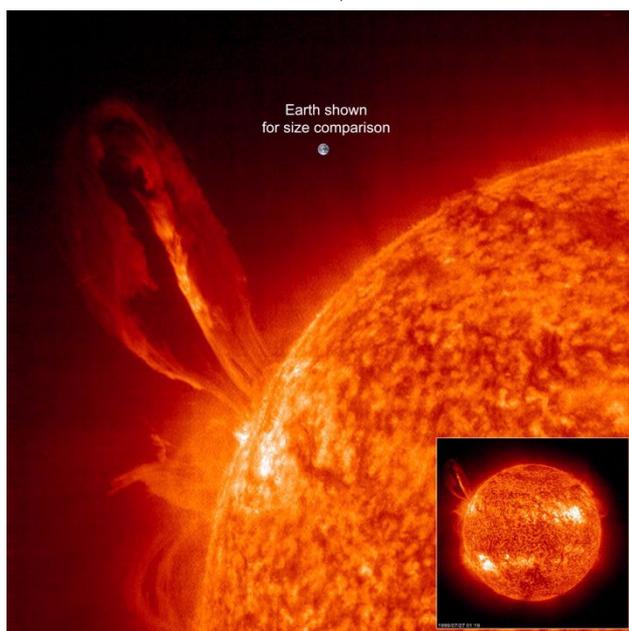


Abb. 21 Extrem starke Eruption von heissen Gasen aus der Sonnen-Oberfläche, aufgenommen am 27.07.1999 vom UV-Teleskop der Sonde SOHO (Copyright: SOHO(ESA & NASA))

von der Richtung des Bahndrehimpulses ihres Planeten ab. Der Neptun-Mond Triton ist vermutlich über diesen Prozess entstanden, s. Unterabsatz S. 1349.

Ringsysteme (-/-)

(XXX: Der Text des Absatzes *Ringsysteme* ist noch nicht verfügbar.)

(XXX: Der weitere Text des Abschnitts *Das Entstehen von Planetensystemen* ist noch nicht verfügbar.)

10.2.8 Physik unserer Sonne (-/-)

(XXX: Der Text des Abschnitts *Physik unserer Sonne* ist noch nicht verfügbar. Er wird auch die nachfolgende Abb. 21 und den sie erläuternden Text enthalten:) Diese Abb. zeigt insbesondere eine riesige Eruption heißer Gase (überwiegend ionisiertes Helium) von der Sonnenoberfläche. Zur Veranschaulichung der Größenverhältnisse ist in der Detailaufnahme die Erde mit eingezeichnet. Der grösste Teil dieses Eruptionsmaterials kehrt nach Durchlaufen eines Bogens zur Sonnenoberfläche zurück. Zur Abbildung wurde die Emissions-Wellenlänge des einfach ionisierten Heliums ($30,4 \cdot nm$) benutzt. Die Temperatur des diese Eruption bildenden Materials wird auf $7 \cdot 10^4 \cdot K$ geschätzt.)

10.2.9 Physik unserer Erde (-)

Physikalisch betrachtet ist die Erde lediglich einer der 9 Planeten im Planetensysteme eines Sterns, der von uns aus den ca. $3 \cdot 10^{11}$ in unserer Galaxie vorhandenen Sternen herausgegriffen wurde, und den wir üblicherweise als *Sonne* bezeichnen. Für jeden von uns jedoch hat dieser Planet Erde emotional einen ganz anderen herausgehobenen Stellenwert. Schließlich bildet er die Grundlage unserer persönlichen Existenz und wird b.a.w. auch für alle unsere Nachkommen die unabdingbare Voraussetzung für deren Existenz bleiben. Daher haben alle Fakten, die über die Erde, ihre Vergangenheit und ihre voraussichtliche weitere Entwicklung bekannt sind oder neu entdeckt werden, für unsere Gesellschaft und für jeden von uns eine ganz besondere Bedeutung. Als ein Indiz für die Berechtigung dieser meiner Bewertung sehe ich auch die besondere Resonanz an, die die Veröffentlichung der ersten von der Erde aus dem Weltall aufgenommenen photographischen Bilder in der Öffentlichkeit gefunden hat. Die Abb. 22 zeigt eines dieser Bilder: die Erde (mit Blick auf die Kontinente Afrika und Antarktis), aufgenommen von den Astronauten der Apollo-17-Mission zu dem Zeitpunkt, als ihre Raumfähre aus der Umlaufbahn um die Erde in die zum Mond gerichtete Bahn eingeschwenkt war.

Ich beginne mit einer kurzen Darstellung der Elementzusammensetzung der Erde, s. Absatz S. 1239. Aus dieser ergibt sich dann zwangsläufig die im Absatz S. 1241 erläuterte Schalenstruktur des Erdinneren. Die im Absatz S. 1247 dargelegte Abschätzung der Wärmebilanz des Erdinneren wird uns in die Lage versetzen, den zeitlichen Verlauf der Abkühlung der frühen Erde zumindest grob abzuschätzen. Insbesondere aber werden wir erkennen, dass das Erdinnere offenbar auch heute noch eine ergiebige Wärmequelle enthält. Als deren Mechanismus werden wir die Zerfallsprozesse der im Erdinneren vorhandenen radioaktiven Isotope identifizieren. Die Existenz dieser Wärmequelle wiederum hat zwangsläufig die im Absatz S. 1250 beschriebene Kontinentalverschiebung zur Folge. Diese wiederum ist eines der Schlüsselfakten zum Verständnis des sich über erdgeschichtliche Zeiträume entwickelnden globalen Klimas, das wir bereits im Absatz S. 1003 diskutiert haben.

Die Element-Zusammensetzung der Erde (-)

Wir beginnen die Diskussion der physikalischen Struktur des Planeten Erde mit einem Blick auf deren integrale Element-Zusammensetzung, s. die nachfolgende Tabelle:

Element	z	$\frac{M(z)}{M_{\text{ges.}}}$	$\frac{N(z)}{N_{\text{ges.}}}$	$\frac{M}{V}$ (N.B.) g/cm^{-3}
Eisen	26	0,398	0,212	7,8
Sauerstoff	8	0,277	0,515	$1,3 \cdot 10^{-3}$
Silizium	14	0,145	0,154	2,3
Magnesium	12	0,087	0,047	1,7
Nickel	28	0,032	0,016	8,8



Abb. 22 Blick aus dem Weltall auf die Erde;
aufgenommen am 07.12.1972 durch Astronauten der Apollo-17-Mission
(Quelle: www.nasa.gov)

Eine auch die selteneren Elemente einschließende Tabelle findet der Leser im Kapitel 10.9 . Als Vorbereitung auf die nun folgende Diskussion sind in dieser Tabelle auch die Werte der Massendichte der reinen Elemente unter Normalbedingungen ($T = 293 \cdot K$; $p = 1 \cdot 10^5 \cdot Pa$) aufgeführt.

In Bezug auf den Massenanteil ist demnach Eisen das in der Erde häufigste Element. Die von der Gravitation beherrschten Effekte werden daher durch das Eisen dominiert. Bezüglich des Atomanteils ist dagegen der Sauerstoff das in der Erde weitaus häufigste Element. Wie man leicht nachrechnen kann, leistet hierzu der heute in der Atmosphäre vorhandene Sauerstoff nur einen vernachlässigbar geringen relativen Beitrag von ca. $7,2 \cdot 10^{-7}$. Auch der im Oberflächenwasser der Erde (also im wesentlichen in den Weltmeeren) enthaltene Sauerstoff trägt zu dem insgesamt in der Erde enthaltenen Sauerstoff nur knapp $1 \cdot \%$ bei. Es kann also erwartet werden, dass der Sauerstoff eine dominierende Rolle bzgl. der sich bildenden chemischen

Verbindungen spielt bzw. gespielt hat.

Die in der Häufigkeit auf das letzte in dieser Tabelle noch aufgeführte Element Nickel folgenden weiteren Elemente erreichen jedes für sich genommen nur einen relativen Atomanteil von weniger als 0,02. Insgesamt machen sie nur noch einen relativen Massenanteil von 0,036 aus. Wie wir in den nachfolgenden Absätzen sehen werden, spielen einige von ihnen dennoch eine dominierende Rolle bei der Ausbildung der Struktur der Erde.

Im nun folgenden Absatz werde ich versuchen zu zeigen, dass bereits aus diesen Fakten der chemischen Brutto-Zusammensetzung nahezu zwangsläufig die heute auch durch experimentelle Ergebnisse als gesichert anzusehende *Schalenstruktur* des Erdinneren resultiert.

Die Schalenstruktur des Erdinneren (-)

Grundlage unserer weiteren Überlegungen ist die oben diskutierte chemische Brutto-Zusammensetzung der Erde. Zusätzlich werden wir voraussetzen, dass sich die Erde in einem frühen Stadium ihrer Entstehungsgeschichte auf eine Temperatur aufgeheizt hatte, bei der alle Bestandteile als **Elemente** (also nicht etwa als chemische Verbindungen) vorlagen und sich im flüssigen (wenn nicht gasförmigen) Zustand befanden. Diese Bedingungen waren sicher erfüllt, sobald die Temperatur der Erde zu diesem Zeitpunkt mindestens $4000 \cdot K$ betrug, s. auch Aufgabe 19 im Heft 8). Dann folgt zwangsläufig, dass sich in dieser frühen Phase der Erdentwicklung die schwersten Elemente (insbesondere Eisen und Nickel) auf Grund der Gravitation im Zentrum dieser Massekugel anreicherten, während die leichteren Elemente, insbesondere Silizium, Magnesium und Aluminium eine *äußere Schale* um das Zentrum der frühen Erde bildeten.

Da die Oxidation von Silizium ebenso wie die der Metalle stark exotherm ist, liegt unterhalb einer gewissen Temperatur (XXX: präzisieren) die freie Enthalpie der jeweiligen Oxide **unter** der der reinen Elemente. Sobald also die frühe Erde sich über die Emission von Strahlung bis unter diese Temperatur abkühlen konnte, weil nämlich das weitere Bombardement der Erde mit Meteoriten und interplanetarem Staub ausreichend stark abgenommen hatte, setzte die Oxidation insbesondere der Elemente Silizium, Magnesium und Aluminium ein und es bildeten sich Silikat- und Silikat-Magnesium-Aluminat-Verbindungen. Diese haben überwiegend Schmelztemperaturen deutlich **oberhalb** der Schmelztemperatur ihrer reinen Element-Bestandteile, so dass diese Verbindungen unmittelbar nach ihrer Bildung zu festen Gesteinen erstarrten. Deren Dichte (unter Normalbedingungen) liegt durchgängig im Bereich $< 5 \cdot g \cdot cm^{-3}$, so dass sie im oberflächennahen Bereich der jungen Erde verblieben. Der nach der vollständigen Oxidation dieser Elemente Silizium Aluminium etc. noch verbliebene freie Sauerstoff wurde überwiegend als *Kristallwasser* H_2O in die Gesteine eingelagert. Ein minimaler Anteil an Sauerstoff sammelte sich im weiteren Ablauf der erdgeschichtlichen Entwicklung als Wasser H_2O auf der Erd-

oberfläche und bildete die Weltmeere sowie einen Bestandteil der Atmosphäre. Damit diese chemischen Prozesse der Oxidation von Wasserstoff zu Wasser H_2O in globalem Masstab möglich waren, musste die Erde diese Phase der oberflächennahen Abkühlung erreichen, bevor der vorhandene Wasserstoff vollständig in das Weltall abdiffundiert war.

Später sammelte sich ein weiterer, nochmals um mehrere Größenordnungen geringerer Anteil des insgesamt auf der Erde vorhandenen Sauerstoffs O_2 als gasförmiger Sauerstoff in der Atmosphäre.

Der eisenreiche Kern der Erde dagegen verblieb weitgehend ohne direkten Kontakt zum Sauerstoff, so dass er bis heute auch an seiner Randzone nicht oxidiert ist. Die Abb. 23 zeigt das Phasendiagramm von Reineisen bis in den Bereich der Drucke und Temperaturen, die im Erdinneren auftreten.

(XXX: Die Daten, um dieses Diagramm wirklich bis zu den im Erdinneren herrschen-

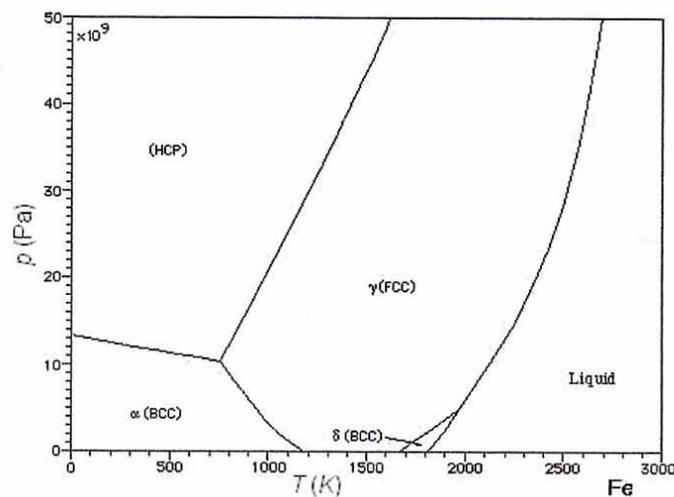


Abb. 23 Phasendiagramm von Reineisen

den Drucken und Temperaturen hin ergänzen zu können, sind noch nicht verfügbar.)

Von der Erdoberfläche zum Erdinneren hin nehmen der Druck $p = p(x)$ (gem. Gl. 8.281) und die Temperatur $T = T(x)$ (auf Grund des zur Erdoberfläche gerichteten Wärmestroms, s. insbesondere Absatz *Die Wärmebilanz des Erdinneren* ab S. 1247) kontinuierlich zu. Den für den heutigen Zustand der Erde aktuell als weitgehend korrekt angesehenen Verlauf dieser Funktionen zeigt die Abb. 24.

(XXX: Die zur Verbesserung dieser Abb. noch fehlenden Daten habe ich noch nicht verfügbar.)

Aus diesen Abhängigkeiten ergibt sich eine 1-dimensionale Mannigfaltigkeit von innerhalb der Erde vorliegenden Zuständen (T, p) , die ich als Kurve $T = T(p)$ in die Abb. 24 mit eingezeichnet habe. Diese Kurve schneidet die Schmelzpunk-

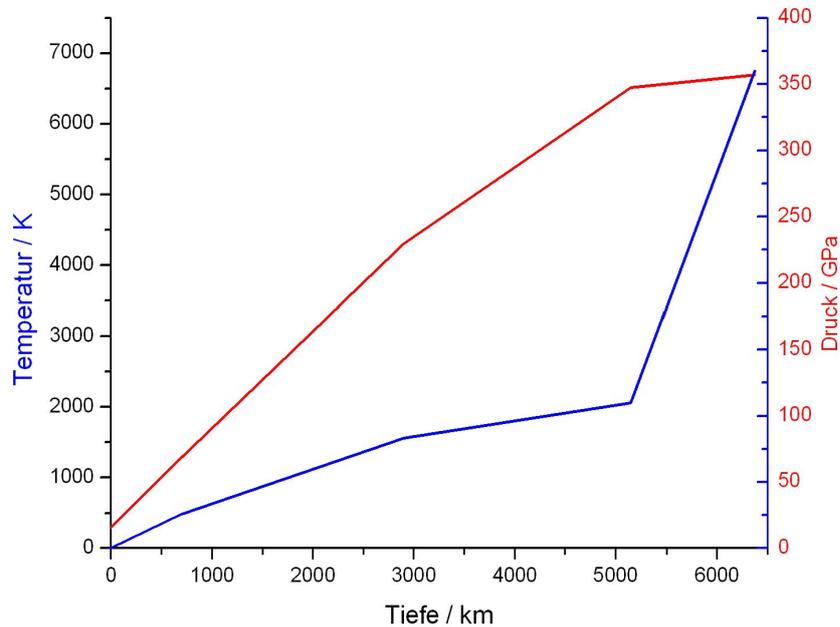


Abb. 24 Lokale Temperatur T und statischer Druck p im Inneren der Erde als Funktion der Tiefe relativ zur Erdoberfläche

tkurve von Eisen(XXX: präzisieren), also in einer Tiefe von $5100 \cdot km$. Daher ist der eisenreiche Erdkern vom Erd-Zentrum her bis an diese Stelle **fest** und bei den dann folgenden (auf die Erdoberfläche bezogenen) geringeren Tiefen **flüssig**.

Auf diesen 2-schaligen Erdkern folgen 3 Schalen von deutlich unterschiedlicher chemischer Zusammensetzung und mit daher ebenfalls stark unterschiedlichen physikalischen Eigenschaften:

1. Eine von einer Tiefe von ca. $650 \cdot km$ bis ca. $2900 \cdot km$ reichende Schicht aus schweren Silikaten und Metalloxiden und einer relativ hohen mittleren Massendichte von etwa $5 \cdot g \cdot cm^{-3}$, insbesondere auf Grund des noch relativ hohen Anteils von insgesamt etwa 30-Atom-% an Magnesium, Eisen und weiteren Metallen. Der in der Geologie üblichen Nomenklatur folgend bezeichnen wir diese Schicht als den *unteren Erdmantel*. Ein typisches Gestein des unteren Erdmantels ist Magnesium-Perowskit. Es hat die Bruttoformel $(Mg, Fe)SiO_3$ und macht vermutlich ca. 80% Massenanteil aus. Dieses Gestein bildet sich erst ab Drucken

$$p_{\text{Perowskit}} > 2,3 \cdot 10^5 \cdot \text{bar}$$

Es ist für elektromagnetische Strahlung im sichtbaren und im IR weitgehend transparent.

2. Eine von der Erdoberfläche bis ca. $650 \cdot km$ reichende Schicht aus Metall-Silikat-Mineralien mit einem bereits deutlich geringeren Metall-Anteil, insbesondere auch an Magnesium, so dass die mittlere Massendichte nur noch etwa $3,2 \cdot g \cdot cm^{-3}$ beträgt. Diese Schicht bezeichnen wir als den *oberen Erdmantel*. Ein für diese Erdschicht typisches Gestein ist der *Basalt* (von $\beta\alpha\sigma\alpha\nu\iota\tau\eta\varsigma$ (griech.)), der (sehr harte) *Probierstein*, ein (SiO_2) -armes Mischgestein aus *Fe*- und *Mg*-Silikaten mit einer Dichte von $2,9 \dots 3,15 \cdot \frac{g}{cm^3}$.

3. Eine auf dem oberen Erdmantel *schwimmende* (s.u.) Schicht aus Siliziumoxiden, die nur noch wenig Eisen und Magnesium enthalten, sowie aus sog. *Sedimenten*. Das sind zu einem festen Material kompaktierte Zerfallsprodukte, die durch Verwitterung von Gesteinen oder durch die Zersetzung von biologischen Objekten entstanden sind.

Diese Schicht ist mit ca. $2,7 \cdot g \cdot cm^{-3}$ deutlich leichter als der obere Erdmantel. Sie wird als die *kontinentale Erdkruste* bezeichnet. Ein für diese Erdschicht typisches Gestein ist der *Granit* (von *granum* (lat.), das *Korn*), ein an Quarz (SiO_2) und Feldspaten $((Ba, Ca, Na, NH_4)(Al, B, Si)_4O_8)$ reiches Mischgestein mit einer Dichte von $2,5 \dots 2,8 \cdot \frac{g}{cm^3}$. Die Gesamtmasse der kontinentalen Kruste beträgt etwa $2,23 \cdot 10^{22} \cdot kg$. Das sind etwa 0,374% der Gesamtmasse der Erde. Wenn diese Masse gleichmäßig über die Erdoberfläche verteilt wäre, ergäbe sich eine Schichtdicke der kontinentalen Kruste von ca. $16,3 \cdot km$. Im aktuellen Zustand der Erde bedeckt sie jedoch nur etwa 35% der Erdoberfläche, so dass ihre mittlere Schichtdicke ca. $45 \cdot km$ beträgt. In dem verbleibenden Bereich der Erdoberfläche reicht das Material des oberen Erdmantels bis an die Erdoberfläche heran und bildet dort die (unabhängig von ihrer jeweiligen chemischen Zusammensetzung) üblicherweise als *Erdkruste* bezeichnete äußerste Schicht der Erde. Auch die erdoberflächennahe Temperatur nimmt in diesem Bereich der Erdkruste ähnliche Werte an wie im Bereich der kontinentalen Kruste, also Werte der Größenordnung $300 \cdot K$. Man bezeichnet diesen Teil der Erdkruste als die *ozeanische Kruste*. Ihre Schichtdicke beträgt meist knapp $10 \cdot km$.

Ich halte es für wichtig, darauf hinzuweisen, dass die Schichtenstruktur der Erde in der geophysikalischen Literatur durchgehend (auch bereits in den einführenden Lehrbüchern) in einer wesentlich verfeinerten Darstellung präsentiert wird. Diese aus der Sicht der Geophysik unverzichtbare Art der Darstellung wird verständlich, wenn man bedenkt, dass von den historischen Anfängen der Geowissenschaft an und bis heute das wichtigste Messgerät zur Untersuchung des inneren Aufbaus der Erde der *Seismograph* (s. Abschnitt 10.6.10) war und es bis heute geblieben ist. Dieses Messverfahren registriert Reflexions-Signale von durch das Erdinnere fortschreitenden elastischen Wellen. Es erkennt daher insbesondere jede Art von in 1. Näherung sprunghaftigen Veränderungen der elastischen Kenndaten des jeweiligen Erdmaterials. Jedes auf diese Weise registrierte Reflexions-Signal interpretiert daher der Seismologe als Indiz für das Vorhandensein einer Grenzfläche zwischen 2 unterschiedlichen Schichten

innerhalb des Schalenaufbaus der Erde. Hierbei muss es sich aber nicht notwendig um 2 Schichten von unterschiedlicher **chemischer** Zusammensetzung handeln. Vielmehr genügt für das Auftreten dieses Mess-Signals völlig, wenn an dieser Stelle z.B. auf Grund des vorherrschenden Temperatur- und Druckprofils das Material in eine andere Phase übergeht, z.B. die Kristallstruktur verändert. Da ich mich jedoch im Rahmen dieses Absatzes auf die Darstellung der Zusammenhänge beschränken möchte, die unverzichtbar sind zum grundsätzlichen Verständnis der Schalenstruktur der Erde und der daraus resultierenden Mechanismen, insbesondere zum Verständnis der sog. *Plattentektonik*, werde ich auf diese feinere Unterteilung der Schichtstruktur nicht näher eingehen. Wie wir sehr bald sehen werden, erleichtert diese vereinfachte (aber nicht falsche !) Strukturierung ganz entscheidend das Verständnis der grundlegenden geophysikalischen Prozesse.

Die zeitliche Entwicklung der Erde im Zuge ihrer Abkühlung und partiellen Erstarrung ist nämlich nun offensichtlich: Mit dem Beginn der Erstarrung von verschiedenen Silikat-Mineralien schwammen die Anteile mit der geringsten Dichte auf und bildeten den Keim für die später als *kontinentale Kruste* bezeichnete Schicht. Ob dieses Material anfangs die Erdoberfläche komplett bedeckte, ist meiner Kenntnis nach bisher nicht durch Fakten belegt. Derartige Fakten sind vermutlich auch besonders schwierig zu finden. Meiner persönlichen Einschätzung nach ist die temporäre (s.u.) komplette Bedeckung der Erdoberfläche mit kontinentaler Kruste allerdings ausgesprochen plausibel. Das weitere Schicksal der Erdkruste werden wir im Absatz *Kontinentalverschiebung / Plattentektonik* ab S. 1250 diskutieren. Die in diesem Absatz geschilderten Vorgänge führten auch dazu, dass die evtl. zunächst gleichmäßige Verteilung der kontinentalen Kruste zerstört wurde und deren Material sich an verschiedenen Bereichen der Erdoberfläche zu höheren Schichtdicken aufkonzentrierte.

Gleichzeitig mit der Bildung der kontinentalen Kruste fand eine partielle Entmischung innerhalb des noch durchgängig flüssigen Erdmantels statt, durch den sich die Anteile geringerer Dichte nahe der Erdoberfläche aufkonzentrierten. Schließlich erstarrten diese ebenfalls und bildeten die heute als *obere bzw. untere Mantelschicht* bezeichneten Schichten. Beide Schichten befinden sich in einem Zustand, der über erdgeschichtliche Zeiträume materialwissenschaftlich betrachtet als *visko-elastisch* (s. Abschnitt 12.3) bezeichnet werden muss. Der Zahlenwert der Viskosität kann sich für die verschiedenen Anteile dieser Schichten durchaus noch um mehrere Größenordnungen unterscheiden (XXX: präzisieren). Die der oberen Mantelschicht zuordbare Zeitkonstante für die Relaxation mechanischer Spannung bleibt jedoch in einem Bereich, der im Vergleich zu den erdgeschichtlich relevanten Zeiten als *kurz* bezeichnet werden darf. Daher *schwimmt* die insgesamt betrachtet nicht nur **leichtere**, sondern auch deutlich **festere** kontinentale Kruste auf dieser oberen Mantelschicht und taucht in diese partiell ein, s. Abb. 25. Den relativen Anteil, mit dem die kontinentale Kruste in den Mantel eintaucht, können wir über die Gl. 3.935 aus dem Verhältnis

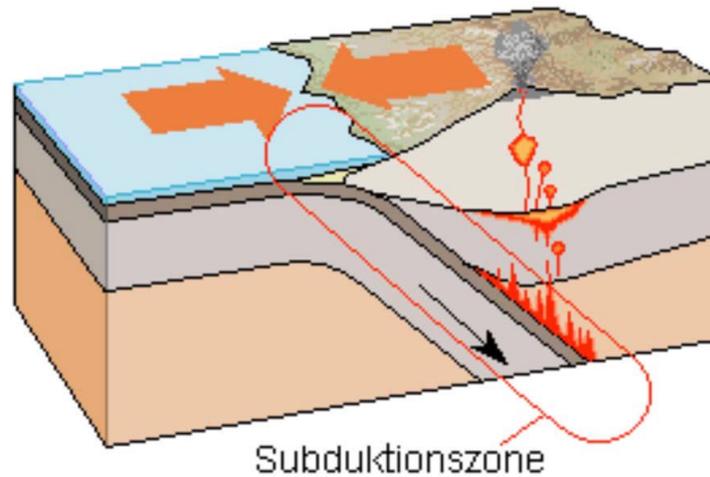


Abb. 25 Prinzipskizze der oberen Schichtstruktur der Erde (hier im Bereich einer Subduktionszone)
(Quelle: diese Abb. basiert auf dem Bild *Subduktionszone* aus der freien Enzyklopädie Wikipedia und unterliegt der GNU-Lizenz für freie Dokumentation Version 1.2; Autor des Bildes ist Luis Maria Benitez)

der Massendichten von kontinentaler Kruste und oberer Mantelschicht berechnen,

$$\alpha_{kK} = \frac{m_{kK}}{m_{oM}} = \frac{2,7}{3,3} = 0,82 \quad (10.210)$$

Die kontinentale Kruste ragt also mit (nur) 18 · % ihrer Gesamtdicke über die obere Mantelschicht, also über das obere Niveau der ozeanischen Kruste hinaus. Da die Dicke d_{kK} der kontinentalen Kruste aktuell etwa über den Bereich

$$35 \cdot km < d_{kK} < 80 \cdot km \quad (10.211)$$

variiert, ragt sie um den Betrag

$$6,3 \cdot km < h < 14,4 \cdot km \quad (10.212)$$

aus der Oberfläche der ozeanischen Kruste heraus. Dieser Unterschied von etwa $8,1 \cdot km$ entspricht in der Tat in akzeptabler Näherung dem aktuellen Unterschied zwischen dem Höhen-Niveau (über dem aktuellen sog. Meeresspiegel) der kontinentalen Tiefebene und dem Gipfel-Niveau der Hochgebirge.

Der aktuell von der ozeanischen Kruste bedeckte Teil der Erdoberfläche ist mit dem Wasser der Ozeane bedeckt. Diese Wasserschicht taucht offenbar mit dem relativen Anteil

$$\alpha_{Ozean} = \frac{m_{Ozean}}{m_{oM}} = \frac{1,0}{3,3} = 0,3 \quad (10.213)$$

in den oberen Mantel ein. Bei einer mittleren Meerestiefe von $3,8 \cdot km$ sind dies etwa $1,1 \cdot km$. Durch diesen Effekt bleiben jedoch die bereits abgeschätzten Höhenunterschiede innerhalb der Struktur der kontinentalen Kruste unverändert.

Die Wärmebilanz des Erdinneren (-)

Wir diskutieren nun die Mechanismen des Wärmetransports vom Erdinneren zur Erdoberfläche. Hierzu betrachten wir die Wärmebilanz des Erdinneren. Wir lassen also den Energieaustausch zwischen der Erdoberfläche und der Außenwelt (dem Weltall) weitgehend außer acht (dieser ist Gegenstand des Abschnitts 8.7.1), verwenden jedoch die daraus resultierende mittlere Temperatur der Erdoberfläche von $+15^\circ C$ als Randbedingung für die Bestimmung (bzw. Abschätzung) des Temperaturprofils im Inneren der Erde. Diese Vorgehensweise ist zulässig, weil der gesamte von der Erde aufgenommene Strahlungsstrom der Sonne

$$J_{\text{solar}}^{(E)} = 1,1 \cdot 10^{17} \cdot W \quad (10.214)$$

um etwa 4 Größenordnungen größer ist als der im Erdinneren erzeugte Wärmestrom.

Als wichtigste Quelle für den vom Erdinneren zur Erdoberfläche gerichteten Wärmestrom wird heute der radioaktive Zerfall insbesondere von U^{238} , Th^{232} und K^{40} ([36]) angesehen. Man schätzt den Gesamtwert heute ([12]) auf

$$J_{\text{Erdinnere}}^{(E)} = 3,2 \cdot 10^{13} \cdot W \quad (10.215)$$

Dieser Wert kann heute (2012) immer verlässlicher überprüft und in seine von den einzelnen Isotopen herrührenden Beiträge zerlegt werden, nämlich mit Hilfe der Messung und Analyse der von der Sonne und der aus dem Erdinneren kommenden Neutrino-Ströme. (XXX: Referenz nennen)

Auf die Frage, in welchen Mengenverhältnissen diese 3 Elemente auf die verschiedenen Schichten des Erdinneren verteilt sind, kann ich z.Zt. noch keine über die wissenschaftliche Literatur abgestützte Aussage machen. Wegen ihrer im Vergleich zum Eisen nochmals höheren Massendichte (s. Kapitel 3.8) gehe ich davon aus, dass die Metalle Uran und Thorium, ähnlich wie das Eisen, überwiegend im Erdkern konzentriert sind und nur zu einem geringen Anteil in Mineralen des Erdmantels vorhanden sind, insbesondere als UO_2 (*Uraninit/Pechblende*). Das Kalium dagegen wird wohl überwiegend in den Mineralen des Erdmantels konzentriert sein.

Der von diesen radioaktiven Isotopen erzeugte Energiestrom muss in Form von Wärme ständig vom inneren Kern bzw. dem Erdmantel der Erde bis an die Erdoberfläche transportiert werden. Zur Orientierung über die für diesen Wärmetransport relevanten Mechanismen schätzen wir die Temperaturdifferenz ab, die sich zwischen dem Kern und der Oberfläche einstellen würde, wenn dieser Transport ausschließlich über den Mechanismus der Wärmeleitung (Abschnitt 8.2.5) ablaufen würde. Da es (wie wir sogleich sehen werden) völlig genügt, diese Temperaturdifferenz sehr grob

abzuschätzen, verzichten wir darauf, die Wärmeleitungsgleichung (Gl. 8.280) für die hier vorliegende kugelsymmetrische Geometrie und mit den beiden unterschiedlichen Wärmequellen von jeweils kontinuierlich über den Erdkern bzw. den Erdmantel verteilter Quellendichte zu lösen. Statt dessen approximieren wir die reale Situation durch folgendes quasi-1-dimensionale Modell:

- Konzentration der Wärmequellen auf eine quadratische Ebene der Fläche

$$A = 4 \cdot \pi \cdot \left(\frac{2}{3} \cdot R \right)^2 = \frac{16}{9} \cdot \pi \cdot R^2 \quad (10.216)$$

R : mittlerer Erdradius

- Ersetzen der Erdoberfläche durch eine Ebene gleichen Flächeninhalts im Abstand

$$x = \frac{R}{2} \quad (10.217)$$

zur erstgenannten Ebene.

In dieser extrem vereinfachten Näherung erhalten wir über die Wärmeleitungsgleichung (Gl. 8.281) unmittelbar das Ergebnis

$$\Delta T = J_{\text{Erdkern}}^{(E)} \cdot \frac{x}{A \cdot \lambda} = J_{\text{Erdkern}}^{(E)} \cdot \frac{9}{32 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot R} \quad (10.218)$$

Setzen wir in diese Gl. als Wärmeleitzahl λ die für Gesteine geltende Größenordnung von $2 \cdot \frac{W}{m \cdot K}$ ein, so erhalten wir den Wert

$$\Delta T \approx 3 \cdot 10^{11} \cdot K \quad (10.219)$$

also einen um mehr als den Faktor 10^7 (!) höheren Wert als der Realität entspricht. Denn es gilt heute als gesichert, dass die Temperatur im Zentrum der Erde etwa $5 \cdot 10^3 \cdot K$ beträgt. Unsere sehr grobe Abschätzung ist also bereits völlig ausreichend, um zu zeigen, dass der Transport der durch die Kernspaltungsprozesse erzeugten Wärme an die Erdoberfläche ganz überwiegend durch **andere** Prozesse erfolgen muss als durch Wärmeleitung. Als ein solcher Prozess kommt aber nur die **Wärmekonvektion** in Frage! M.a.W. es stellt sich zwangsläufig im Erdinneren ein Temperaturprofil ein, bei dem im Zusammenwirken mit dem primär durch die Massenverteilung erzeugten Druckprofil die vorhandene Materie sich in einem viskoelastischen Zustand befindet mit hinreichend niedriger Viskosität. Die Viskosität muss nämlich Massenströme zulassen, die in der Lage sind, für den erforderlichen Wärmetransport zu sorgen. Damit ist aber **auch** bereits gesichert, dass diese Konvektionsströme erst dann zum Erliegen kommen werden, wenn die genannten Kernspaltungsprozesse abgeklungen sind. Deren Halbwertszeiten (s. Kapitel 7.20) sind aber von derselben Größenordnung wie das Alter der Erde von $4,55 \cdot 10^9 \cdot y$ (Abschnitt 10.6.8). Daher wird dieser Prozess

der wärmestromgetriebenen Kreiszirkulation von Erdmantelmaterial wohl zumindest noch einige $10^8 \cdot y$, vermutlich sogar einige $10^9 \cdot y$ andauern und damit auch alle dadurch erzeugten Sekundärprozesse, insbesondere die Erdbeben-Aktivitäten und die Plattentektonik, s. Absatz *Kontinentalverschiebung / Plattentektonik* ab S. 1250.

Durch eine ähnlich grobe Abschätzung sind wir aber auch in der Lage, die Größenordnung der **Geschwindigkeit** dieser Masseströme abzuschätzen: Der mit einem Massestrom verknüpfte Wärmestrom beträgt (s. Abschnitt 8.8.2)

$$J^{(Q)} = c_V \cdot m \cdot A_Q \cdot v \cdot \Delta T_{\text{eff}} \quad (10.220)$$

Hierin bedeutet

- c_V : spezifische Wärmekapazität
- m : volumenbezogene Massendichte
- A_Q : vom Wärmestrom gefüllte Fläche
- v : Geschwindigkeit des Massestrom
- ΔT_{eff} : relevante Temperaturdifferenz

Im vorliegenden Fall eines ringförmigen Konvektionsstroms ist ΔT die Differenz zwischen der mittleren Temperatur des rückfließenden Stroms und der mittleren Temperatur des Massestroms, der die Zone des Wärmeaustauschs wieder verlässt. Wir setzen diese Größe als proportional an zur gesamten Temperaturdifferenz zwischen Kern und Kruste:

$$\Delta T_{\text{eff}} = \alpha_T \cdot (T_{\text{Kern}} - T_{\text{Kruste}}) \quad (10.221)$$

Auch die Fläche A_Q ist nicht etwa die gesamte dem Konvektions-Ringstrom zur Verfügung stehende Fläche A , sondern nur ein gewisser Bruchteil hiervon. Der übrige Anteil wird von dem rückfließenden Massestrom eingenommen und von den dazwischen liegenden strömungsmechanischen Übergangsbereichen. Wir verwenden wieder einen Proportionalitätsansatz

$$A_Q = \alpha_A \cdot A \quad (10.222)$$

Zu unserer Orientierung verwenden wir die Werte

$$\alpha_T = 0,04 \quad ; \quad \alpha_A = 0,1 \quad (10.223)$$

Diese Auswahl ist sicherlich nicht völlig unsinnig, jedoch - solange eine nähere Begründung fehlt - bis zu einem gewissen Grad willkürlich[¶]. Setzen wir diese Zahlenwerte in die Gl. ?? ein, verwenden als Fläche A wieder die oben erläuterte Näherung und verwenden als Materialkennwerte c_V und m die für Silikatgesteine geltende Größenordnung, so erhalten wir das Ergebnis

$$v \approx 0,1 \cdot \frac{m}{y} \quad (10.224)$$

[¶]In der Realität habe ich das Parameterprodukt $\alpha_T \cdot \alpha_A$ so gewählt, dass sich als Geschwindigkeit v genau der dem aktuellen Kenntnisstand nach richtige Wert ergibt.

Unsere Abschätzung zeigt uns also, dass Konvektionsströme mit einer mittleren Geschwindigkeit dieser Größenordnung bereits in der Lage sind, den im Erdkern erzeugten Wärmestrom von $3,2 \cdot 10^{13} \cdot W$ bis an die Erdoberfläche zu transportieren. Wie wir im nachfolgenden Absatz sehen werden, sind die typischen Geschwindigkeiten der durch diese Konvektionsströme erzwungenen Bewegungen der Erdkruste von genau dieser Größenordnung.

Kontinentalverschiebung / Plattentektonik (-)

Die aus der Wärmestrombilanz des Erdinneren zwangsweise resultierenden Materialströme sind offensichtlich radial orientierte Ringströme. Die genaue Struktur dieser Ströme können wir an dieser Stelle der Diskussion jedoch noch nicht näher angeben. In jedem Fall aber dreht sich nahe der Erdoberfläche jede vertikal und nach außen zeigende Strömungsrichtung zunächst in eine Richtung parallel zur Erdoberfläche um und danach an einer anderen Stelle in die zur Ausgangssituation entgegengesetzte zum Erdinneren zeigende vertikale Richtung. Wir haben jedoch noch keine orientierende Information über die typische parallel zur Erdoberfläche gemessene Länge, innerhalb der sich diese Richtungsumkehr vollzieht. In diesem Bereich werden starke laterale Scherspannungen erzeugt, die so stark sind, dass die obere Grenzschicht des Erdmantels hiervon nahezu komplett erfasst wird. Dabei gilt es, 2 typische Unterstrukturen mit jeweils 2 unterschiedlichen Varianten getrennt zu diskutieren, s. Abb. 26:

1. Im Bereich eines **aufwärts** zur Erdoberfläche hin gerichteten Teils der Ringströmung teilt sich dieser Strom nahe der Erdoberfläche in 2 Teilströme auf, die danach beide parallel zur Erdoberfläche weiterfließen, aber in zu einander entgegengesetzten Richtungen. Ein derartiger Bereich der Erdkruste wird als *Divergenz-Zone* bezeichnet. Die jeweils dem (gedachten) Zentrum dieses Prozesses zugeordneten Punkte bilden nach ihrer Projektion auf die Erdoberfläche eine Linie, die ich im Folgenden als eine *Divergenzlinie* bezeichnen werde. Wegen der hohen Scherviskosität des Erdmaterials wird die im oberen Mantel aufgebaute Scherkraftstruktur auf die darüber liegende Schicht übertragen.
 - a) Besteht die Erdkruste an dieser Stelle aus *kontinentaler Kruste*, so wird sie durch diese Scherkraftstruktur auseinander gezogen und es entsteht ein *kontinentaler Graben*, der sich langfristig sogar zu einer vollständigen Auftrennung des Kontinentes an dieser Stelle erweitern kann. Beispiele für aktuell existierende kontinentale Gräben sind der *ostafrikanische Graben* und der *Rhein-Rhône-Graben*.
 - b) Besteht die Erdkruste an dieser Stelle aus *ozeanischer Kruste*, so wird sie durch diese Scherkraftstruktur ebenfalls auseinander gezogen. Da nun jedoch das nachströmende Mantelmaterial und das Material der Erdkruste chemisch nahezu identisch sind, durchmischen sich diese miteinander und führen anschließend auch eine weitgehend gemeinsame scherfeld-induzierte Bewegung

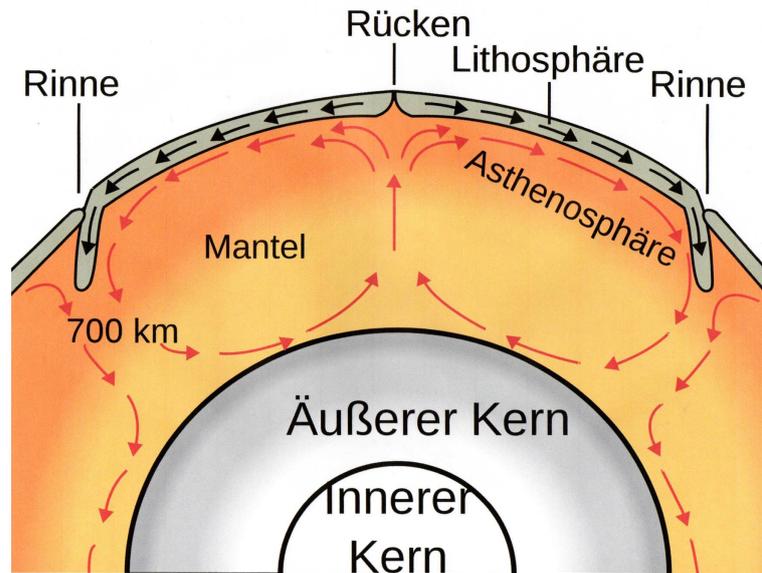


Abb. 26 Prinzipskizze der Masseströme im Erdmantel und der dadurch erzeugten Konversions- und Divergenzzonen

(Quelle: diese Abb. basiert auf dem Bild *Oceanic_spreading_de* aus der freien Enzyklopädie Wikipedia und unterliegt der GNU-Lizenz für freie Dokumentation Version 1.2; der Autor ist Surachit)

aus. In der Summe wird so auf beiden Seiten dieser Divergenz-Linie ständig neue ozeanische Kruste gebildet, die sodann senkrecht zur Divergenzlinie zu beiden Seiten abfließt. Da die treibende Kraft für diesen Vorschub in dem aufwärts strömenden Mantelmaterial lokalisiert ist, kommt es zusätzlich zu den seitlich gerichteten Materialströmen auch zu einer Aufwulstung des Mantelmaterials an dieser Stelle. Das Höhenprofil dieser Zone entspricht also eher einem Gebirge als einem Graben. Daher haben diese Zonen auch die Bezeichnung *mittel-ozeanischer Rücken* (engl. **mid-oceanic-ridge** MOR) erhalten. Beispiele für aktuell existierende mittel-ozeanische Rücken sind der *mittelatlantische Rücken* und der *ost-pazifische Rücken*.

2. Im Bereich eines **abwärts** zum Erdkern hin gerichteten Teils der Ringströmung von Erdmantelmaterial wird ein von beiden Seiten zu dieser Zone hin gerichtetes Scherspannungsfeld auf die darüber liegende Erdkruste übertragen, so dass sich die beiden links und rechts dieser Zone liegenden Teile der Erdkruste aufeinander zu bewegen. Ein derartiger Bereich der Erdkruste wird als *Konvergenz-Zone* bezeichnet. Die jeweils dem (gedachten) Zentrum dieses Prozesses zugeordneten Punkte bilden nach ihrer Projektion auf die Erdoberfläche ebenfalls eine Linie, die ich als *Konvergenzlinie* bezeichnen möchte.

a) Besteht die Erdkruste an dieser Stelle aus *kontinentaler Kruste*, so wird diese auf Grund der geringeren Massendichte **nicht** mit in das Erdinnere gezogen. Die auf einander treffenden Materialströme werden daher im Bereich der Zone gestaucht und die Dicke der kontinentalen Kruste hierdurch massiv erhöht. Im Ergebnis entsteht über dieser Subduktionszone ein *Faltengebirge*. Beispiele für aktuell existierende Faltengebirge sind die *Alpen* und der *Himalaya*.

b) Besteht die Erdkruste an dieser Stelle aus *ozeanischer Kruste*, so wird diese innerhalb dieser Zone als ganzes von der Abwärtsströmung erfasst und mit in das Erdinnere gezogen. Insgesamt entsteht an dieser Stelle eine Vertiefung des Meeresbodens. Diese Struktur wird als *Tiefsee-Rinne* bezeichnet^{||}. Beispiele für aktuell existierende Tiefsee-Rinnen sind die *Marianen-Rinne* im Pazifik und die *Diamantinan-Rinne* im Indischen Ozean.

Zur Veranschaulichung und Konkretisierung dieser typischen Strukturen, die der Erdoberfläche durch die Konvektionsströmungen des Mantelmaterials aufgeprägt werden, zeigen die folgenden Abbildungen einige reale, heute vorliegende Höhen- bzw. Tiefenprofile der Erdkruste im Bereich von ausgeprägten Konvergenz- bzw. Divergenz-Zonen. Die hierfür benutzten geodätischen Daten habe ich mit Hilfe des Programms *GoogleEarth*[®] (Stand 23.08.2009) ermittelt.

Die Abb. 27 zeigt das Höhenprofil des Festlands entlang einer senkrecht zur Divergenzlinie des *ostafrikanischen Grabens* verlaufenden Linie, angenähert durch den von einer Stelle nördlich des Viktoriasees in Tansania bis zur somalischen Ostküste verlaufenden Teil des Breitengrades $4^{\circ}N$. Die kontinentale Kruste ist hier sogar an 2 Stellen fast auseinander gerissen worden und hat dort Bereiche mit niedrigem Höhenniveau entstehen lassen. Der westlichere Bereich ist in der Ausdehnung parallel zur Divergenzlinie auf ca. $250 \cdot km$ begrenzt und hat so den Lake Turkana gebildet. Der weiter östliche liegende Bereich beginnt auf dem für die Abb. 27 gewählten Breitengrad $4^{\circ}N$ und verläuft über ca. $600 \cdot km$ annähernd in Nord/Süd-Richtung bis zur Küstenlinie.

Die Abb. 28 zeigt das Tiefenprofil des Meeresbodens entlang einer senkrecht zur Divergenzlinie des *mittelatlantischen Rückens* verlaufenden Linie, angenähert durch den von Cuba bis zur West-Sahara verlaufenden Teil des Breitengrades $21^{\circ}N$. Die maximale Erhebung des mittelatlantischen Rückens befindet sich an dieser Stelle offensichtlich ziemlich genau in der Mitte des Atlantiks, d.h. auf halbem Weg zwischen der Karibik und der westafrikanischen Küste. Sie liegt aber mit einem Meeresniveau von über $3000 \cdot m$ noch weit unterhalb der Meeresoberfläche. Im Bereich dieses Rückens gibt es aber auch senkrecht zu der Divergenzlinie, also etwa entlang eines Breitengrads verlaufende tiefe Einschnitte, die an manchen Stellen eine Meerestiefe $> 8 \cdot km$ erreichen.

^{||}Die an dieser Stelle früher häufig verwendete Bezeichnung *ozeanischer Graben* ist missverständlich, da die Tiefsee-Rinnen durch einen **Konvergenz**-Prozess entstehen, die kontinentalen Gräben dagegen durch einen **Divergenz**-Prozess. Ich werde daher die Bezeichnung *ozeanischer Graben* nicht verwenden.

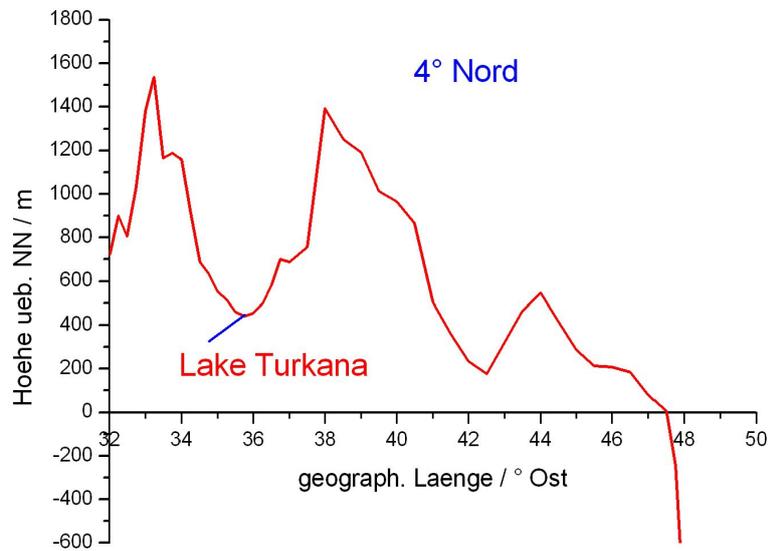


Abb. 27 Höhenprofil des ostafrikanischen Grabens entlang des Breitengrades $4^{\circ}N$

Ein eindrucksvolles Beispiel eines *Faltengebirges* ist der im Südwesten Asiens gelegene *Himalaya*. Er trennt die tibetische Hochebene von der pakistanischen Taklamatan-Ebene, s. Abb. 29 (a). Das Höhenprofil entlang der in die Abb. 29 (a) eingezeichneten roten Linie ist in der Abb. 29 (b) wiedergegeben.

Ein markantes Beispiel für eine Tiefsee-Rinne ist die *Marianen-Rinne*, in der Form eines Kreissegmentes gebogen und in der Mitte des Pazifik gelegen. Sie ist von einigen ähnlich geformten Aufwölbungen umgeben, die an einigen Stellen bis an die Meeresoberfläche reichen und so einen Bogen von Inseln bilden, z.B. die Marianen-Inseln und die Insel Guam. Die Marianen-Rinne enthält auch eine der tiefsten Stellen der Weltmeere, das Challengertief mit den Koordinaten $11^{\circ}19'35''N/142^{\circ}11'14''O$ und mit einer Tiefe von ca. $11 \cdot km$.

Die Abb. XXX (XXX: Diese Abb. ist noch nicht verfügbar) zeigt das Tiefenprofil des Pazifik entlang einer senkrecht zur Marianen-Rinne verlaufenden Linie, die so gewählt wurde, dass sie die Insel Guam schneidet.

Zur Vervollständigung dieser Aufzählung von typischen Strukturen der Erdkruste diskutieren wir nun den Fall, dass eine Tiefsee-Rinne ein Alter erreicht hat, bei dem auf einer Seite der Konvergenzlinie nahezu die gesamte ozeanische Platte bereits in das Erdinnere gezogen worden ist. M.a.W. die Subduktions-Zone befindet sich nicht mehr vollständig unter ozeanischer Kruste, sondern nun auf der Grenzlinie

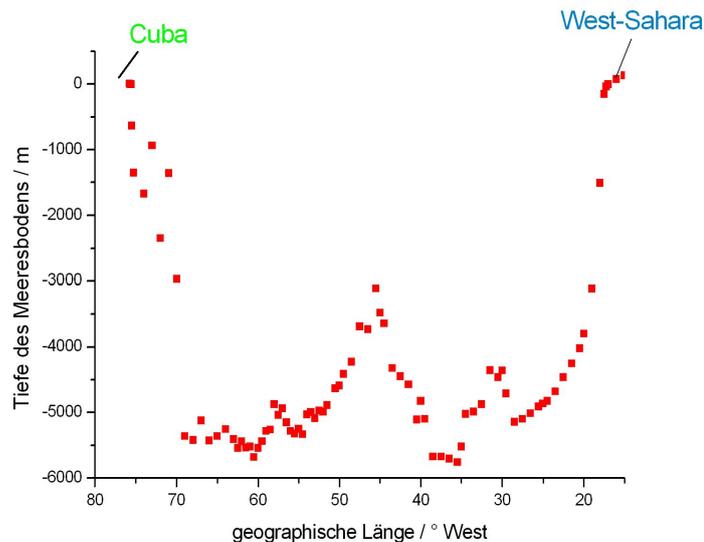


Abb. 28 Tiefenprofil des Atlantiks entlang dem Breitengrad $21^{\circ}N$

zwischen ozeanischer und kontinentaler Kruste. Da letztere auch in dieser Konfiguration nicht in das Erdinnere gezogen wird, ändert sich die typische Deformations- und Stauchungsstruktur der beteiligten Schichten: Die ozeanische Kruste wird auch in diesem Fall in das Erdinnere gezogen, schiebt sich aber zunächst unter die kontinentale Kruste, bevor sie dann in das Erdinnere abbiegt. Im Ergebnis staucht sich die kontinentale Kruste in diesem Bereich zu besonders hohen Faltungsgebirgen auf. Diese Struktur ist bereits in der Abb. 25 dargestellt. Ein typisches Beispiel für diese Struktur ist der Bereich der Westküste Südamerikas mit den *Anden* als Faltungsgebirge.

Die Gesamtheit der durch diese Mechanismen erzeugten Bewegungen der unterschiedlichen Teile der Erdkruste bezeichnet man als *Plattentektonik*. (von $\tau\epsilon\kappa\tau\omicron\nu\iota\kappa\omicron\varsigma$ (griech.), *die Baukunst betreffend*). Sie bewirkt, dass die geometrische Konfiguration der Kontinente und der Weltmeere nicht konstant ist, sondern sich im Verlauf erdgeschichtlicher Zeiträume stark verändert. Diese Theorie der ständigen Bewegung der verschiedenen Teile der Erdkruste wurde anfänglich allein aus der Ähnlichkeit der (heute) einander gegenüber liegenden Kontinentalküsten geschlossen. Besonders auffällig ist diese Ähnlichkeit bei der Westküste Afrikas und der Ostküste Südamerikas. Historisch belegt sind derartige Spekulationen bereits aus dem späten Mittelalter. Oft genannt wird in diesem Zusammenhang der englische Theologe und Naturphilosoph *Sir Francis Bacon* (* 1561 in London; † 1629 in Highgate (heute Stadtteil v. London)). Der britische Geologe *Charles Lyell* (* 1797 in Kinnordy/Forfarshire; † 1875 in London) formulierte das Konzept der Kontinentaldrift als Hypothese in seinen *Principles of Geology* ([16]) und deutete diesen Mechanismus als die primäre Ursache für

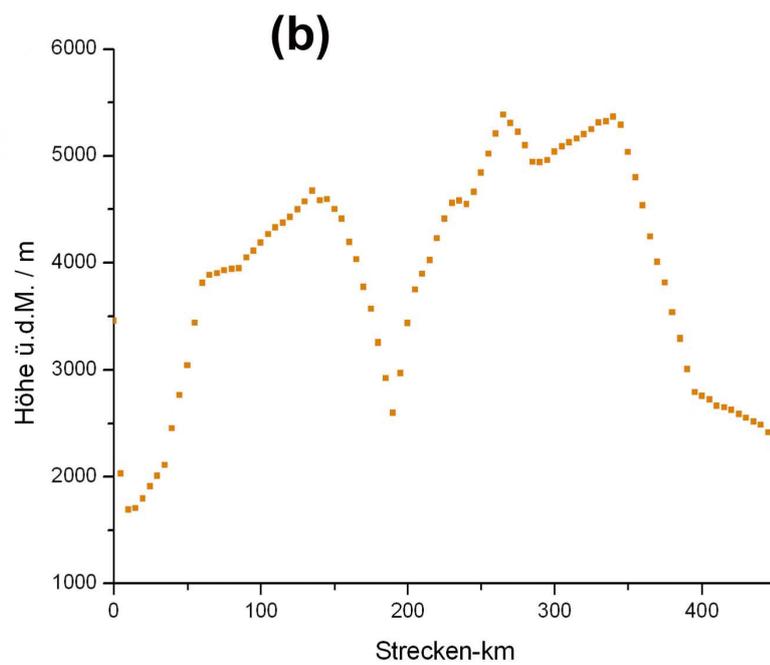
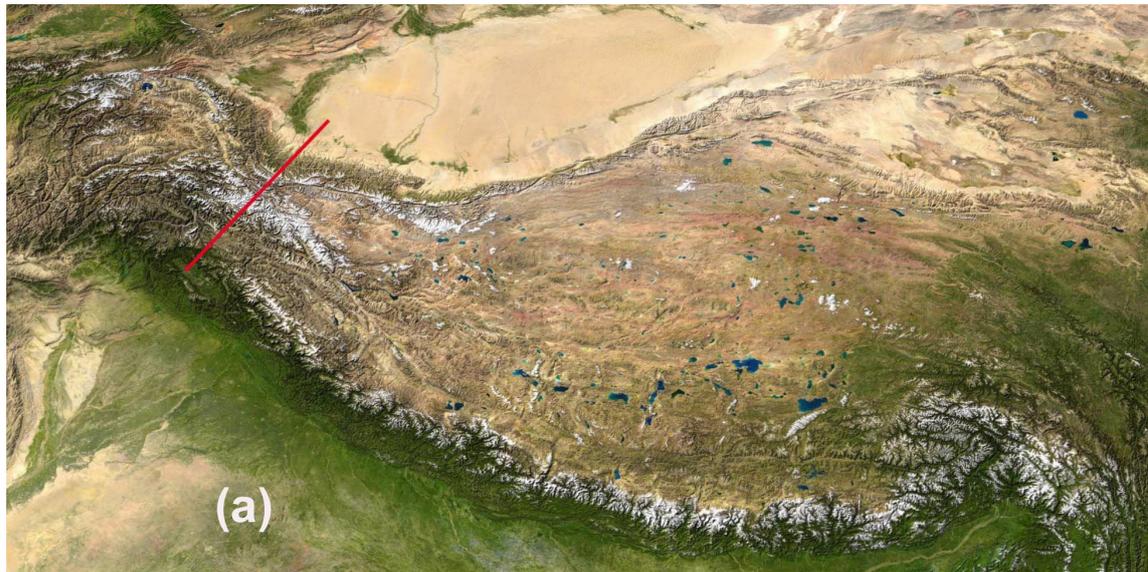


Abb. 29 Höhenprofil des Himalaya entlang der Linie $34^{\circ}N/74^{\circ}30'E$ zu $37^{\circ}30'N/77^{\circ}30'E$
(a) Luftbildaufnahme der Himalaya-Region mit der Tibetischen Hochebene (oben rechts) und der pakistanischen Taklamatan-Ebene
(b) Höhenprofil entlang der in (a) eingezeichneten roten Linie

die in gewissen Teilen der Erde gehäuft auftretenden Erdbeben. Diese Idee inspirierte Darwin bei seinen Überlegungen zu den Mechanismen der Arten-Selektion, insbesondere nachdem er persönlich die Schäden des Erdbebens v. 20.02.1835 in der Stadt Concepción/Chile gesehen hatte. Größere Aufmerksamkeit fand jedoch erst das 1915 erschienene Buch des deutschen Meteorologen und Polarforschers *Alfred Wegener* (* 1880 in Berlin; † 1930 in Grönland) ([15]). Wegener gilt auch als Schöpfer des Namens *Pangaea* für den Super-Kontinent, der sich zum Beginn des *Karbons* (s. Abschnitt 8.7.5) gebildet hatte. Einen durch Experimente gestützten Hinweis auf die Gültigkeit dieser Hypothese der Kontinentalverschiebung konnte Wegener jedoch noch nicht liefern. Eine direkte Messung der Verschiebungs-Geschwindigkeiten der Kontinente relativ zu einander gelang erst Anfang der 1990-er Jahre durch die Entwicklung der satellitengestützten Vermessungstechnik, s. Abschnitt 10.6.4. Typische Messwerte für diese Verschiebungs-Geschwindigkeiten liegen im Bereich von $0,02 \dots 0,2 \cdot m/y$.

Auf Basis dieser Kenntnisse der Plattentektonik und der diese auslösenden Konvektionsströme im Inneren der Erde ist auch das wahrscheinliche Einsetzen dieses Prozesses naheliegend: Wenn wirklich in einem sehr frühen Stadium der Erde zunächst eine die gesamte Erdoberfläche bedeckende Schicht aus kontinentaler Kruste existierte, dann wurde diese spätestens mit Ausbildung der annähernd regelmäßig strukturierten Konvektionsströmungen innerhalb des Erdmantels aufgerissen und zu Bruchstücken reduzierter Flächenausdehnung, aber erhöhter Schichtdicke gestaucht. Diese bildeten die erste Generation von Kontinenten.

Wie man sich nun leicht klar machen kann, ist auf Grund der bereits erläuterten Mechanismen und Gegebenheiten jede beliebige geometrische Konfiguration von ozeanischer und kontinentaler Kruste über erdgeschichtlich lange Zeiträume betrachtet **niemals stationär**: Ist z.B. die kontinentale Kruste im wesentlichen auf **einen** zusammenhängenden Bereich konzentriert (Existenz eines sog. *Super-Kontinents*), dann bedeckt dieser immerhin ca. 30% der Erdoberfläche. Dann aber muss man davon ausgehen, dass zumindest einer der aufwärts gerichteten Mantelmaterial-Strömungen auf diesen Bereich auftrifft, so dass der Super-Kontinent an dieser Stelle wieder auseinander gerissen wird. Dieser Prozess setzt sich der Tendenz nach fort, bis die kontinentale Kruste in ausreichend viele Teile aufgetrennt ist. Wegen des bei diesem Prozess annähernd konstant bleibenden Flächenverhältnisses von kontinentaler und ozeanischer Kruste nimmt dann die Wahrscheinlichkeit immer mehr zu, dass die meisten (oder sogar alle) Rücken sich im Bereich der ozeanischen Kruste lokalisiert haben. (XXX: deutlicher) Eine weitere Zerstückelung der Kontinente findet also nicht mehr statt. Auf Grund der besonderen Topologie der Erdoberfläche als Oberfläche einer Kugel werden nun aber die Kontinente wieder auf einander zu getrieben. Zusammen mit der enormen Trägheit dieses Gesamtsystems führt dies dazu, dass letztlich die kontinentale Kruste wieder auf einen zusammenhängenden Bereich zusammengedrängt wird. Dabei ist es allerdings nicht unwahrscheinlich, dass das eine oder andere kleinere Bruchstück eines früheren Kontinents in diesen Prozess der Re-Integration nicht mehr mit einbezogen wird.

Es kommt also zu einem annähernd **zyklischen** Prozess, der nach dem kanadischen Geophysiker *John Tuzo Wilson* (* 1908 in Ottawa; † 1993 in Toronto) die Bezeichnung *Wilson-Zyklus* erhalten hat. Wie oft ein derartiger Super-Kontinent bisher wirklich existiert hat, ist noch Gegenstand der wissenschaftlichen Auseinandersetzung. Als gesichert oder zumindest sehr wahrscheinlich gilt die Existenz von:

Bezeichnung	Anfang	Ende	Dauer
	$/ 10^9 \cdot y$	$/ 10^9 \cdot y$	$/ 10^8 \cdot y$
Kenorland	2,45	2,11	3,4
Columbia	1,8	1,5	3
Rodinia	1,1	0,8	3
Pangaea	0,3	0,15	1,5

Die in dieser Tabelle wiedergegebenen, aus geologischen Untersuchungen geschlossenen zeitlichen Daten dieser 4 Super-Kontinente zeigen eine gut erkennbare Regelmäßigkeit: Der zeitliche Abstand zwischen der Bildung 2-er aufeinander folgender Super-Kontinente beträgt jeweils etwa $7 \cdot 10^8 \cdot y$ und deren Lebensdauer jeweils etwa die Hälfte dieser Kenngröße. Lediglich der jüngste dieser Kontinente (Pangaea) zerbrach bereits nach etwa $1,5 \cdot 10^8 \cdot y$.

Durch eine akribische und detektivische Sammlung und Analyse aller verfügbaren Informationen ist es den Geologen gelungen, die zeitliche Entwicklung der Landmassenverteilung bis weit in die geologische Vergangenheit der Erde zu rekonstruieren. Die in den nachfolgenden Abbildungen 30 bis 33 dargestellte Veränderung der Landmassenverteilung während der letzten $500 \cdot My$ verwendet Abbildungsreihen, die von Ronald C. Blakey, Prof. Emeritus der Northern Arizona University Flagstaff/Arizona angefertigt wurden. Ihm ist es zu verdanken, dass diese äußerst instruktiven Bilder über die freie Enzyklopädie Wikipedia für jedermann frei zugänglich wurden. Sie stehen daher unter der GNU-Lizenz für freie Dokumentation Version 1.2. Die Bild-Darstellung entspricht einem Blick eines hypothetischen exterrestischen Beobachters auf die Erde dieser Epoche (s. zum Vergleich die Abb. 22). Um eine Darstellung der gesamten Erdoberfläche in der Papierebene zu ermöglichen, wurde zusätzlich diese Kugeloberfläche durch eine sog. *Mollweide-Projektion* auf das Innere einer ebenen Ellipse abgebildet. Diese Projektion gewährleistet, dass die Flächenverhältnisse und die lokalen Winkelverhältnisse in etwa erhalten bleiben.

Die unterschiedlichen, zur ozeanischen oder zur kontinentalen Kruste gehörenden Bereiche der Erdoberfläche haben je nach (vermuteter) Oberflächenbeschaffenheit eine unterschiedliche Farbdarstellung:

- Die zur ozeanischen Kruste gehörenden Bereiche der Erdoberfläche erscheinen tiefblau; dabei ist die Farbsättigung ein qualitatives Maß für die lokale Tiefe des Meeresbodens;
- Festlandbereiche mit nicht näher bekannter Oberflächenbeschaffenheit erscheinen grau/braun;

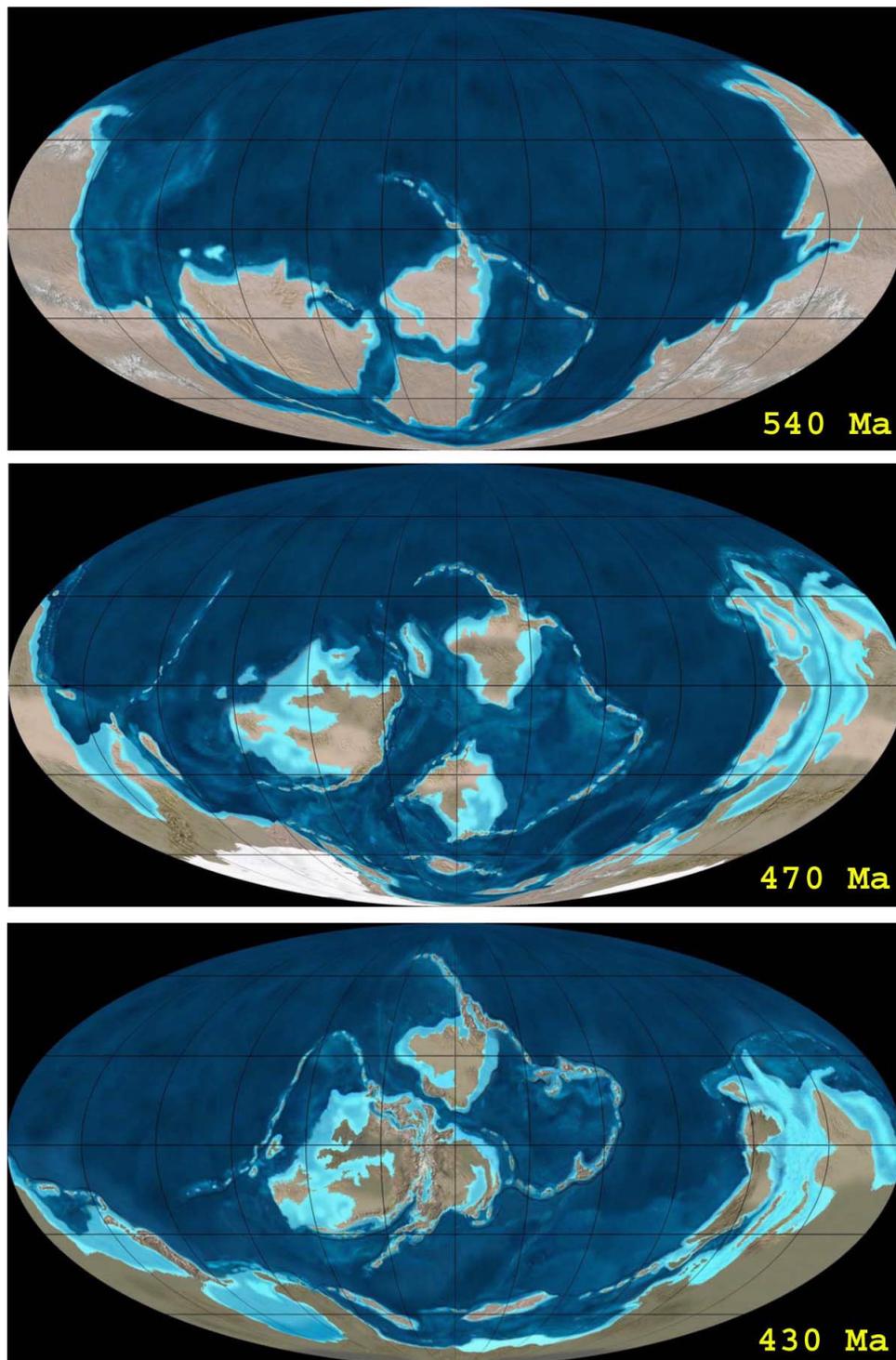


Abb. 30 Zeitliche Entwicklung der Festlandverteilung im Laufe der letzten $5 \cdot 10^8 \cdot y$
Teil 1: $540 \cdot My$ - $430 \cdot My$

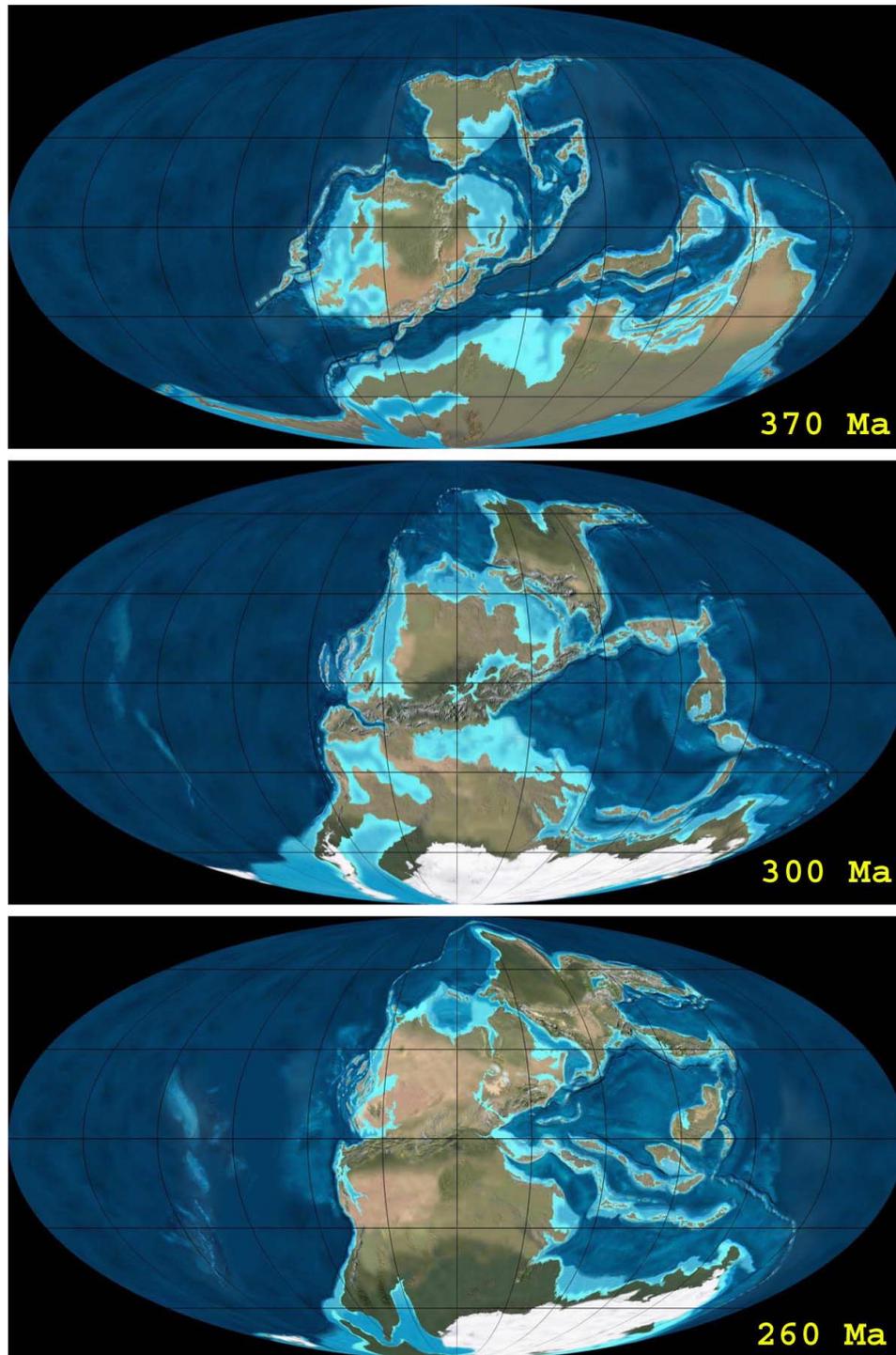


Abb. 31 Zeitliche Entwicklung der Festlandverteilung im Laufe der letzten $5 \cdot 10^8 \cdot y$
Teil 2: $370 \cdot My$ - $260 \cdot My$

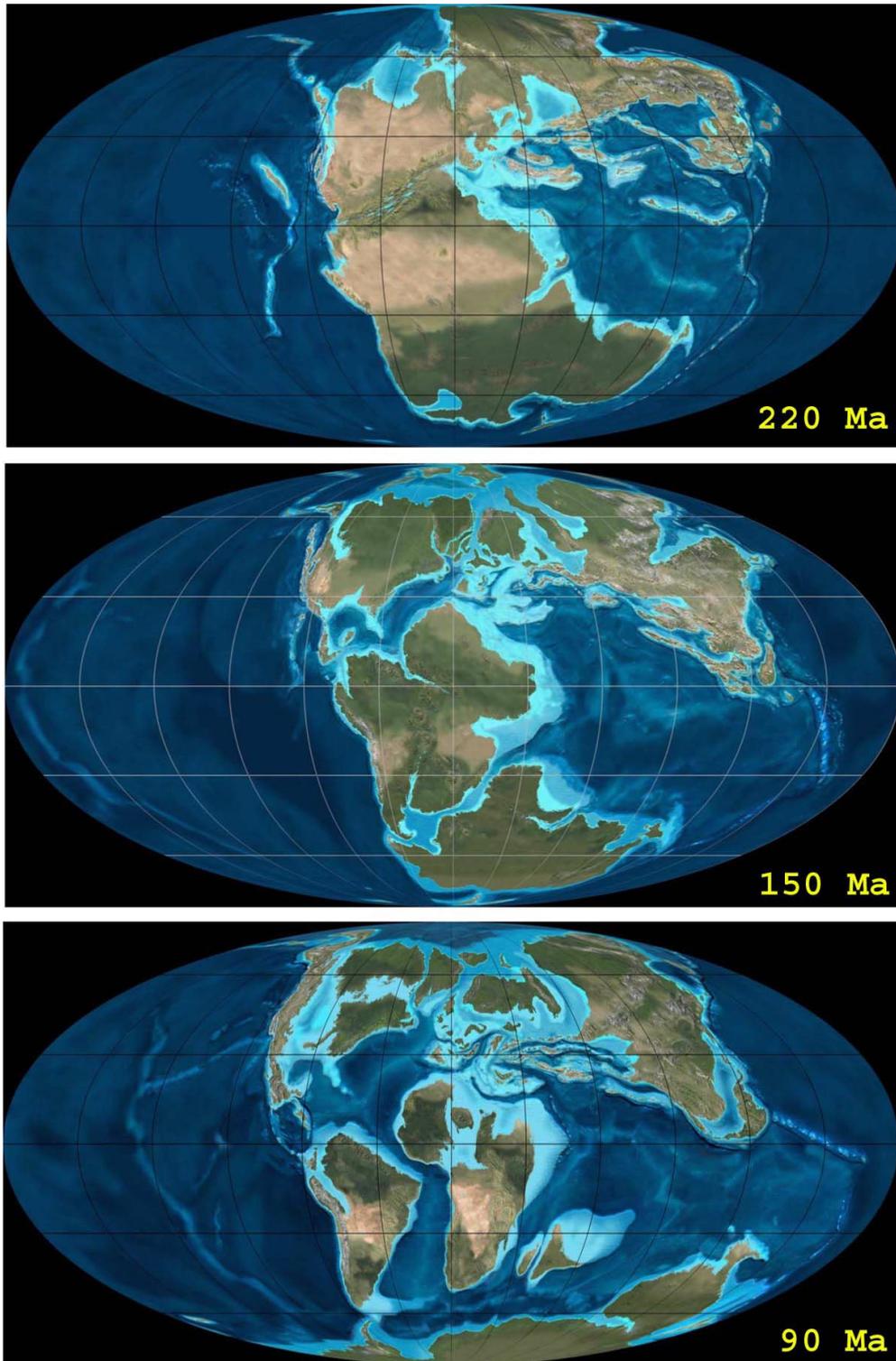


Abb. 32 Zeitliche Entwicklung der Festlandverteilung im Laufe der letzten $5 \cdot 10^8 \cdot y$
Teil 3: $220 \cdot My$ - $90 \cdot My$

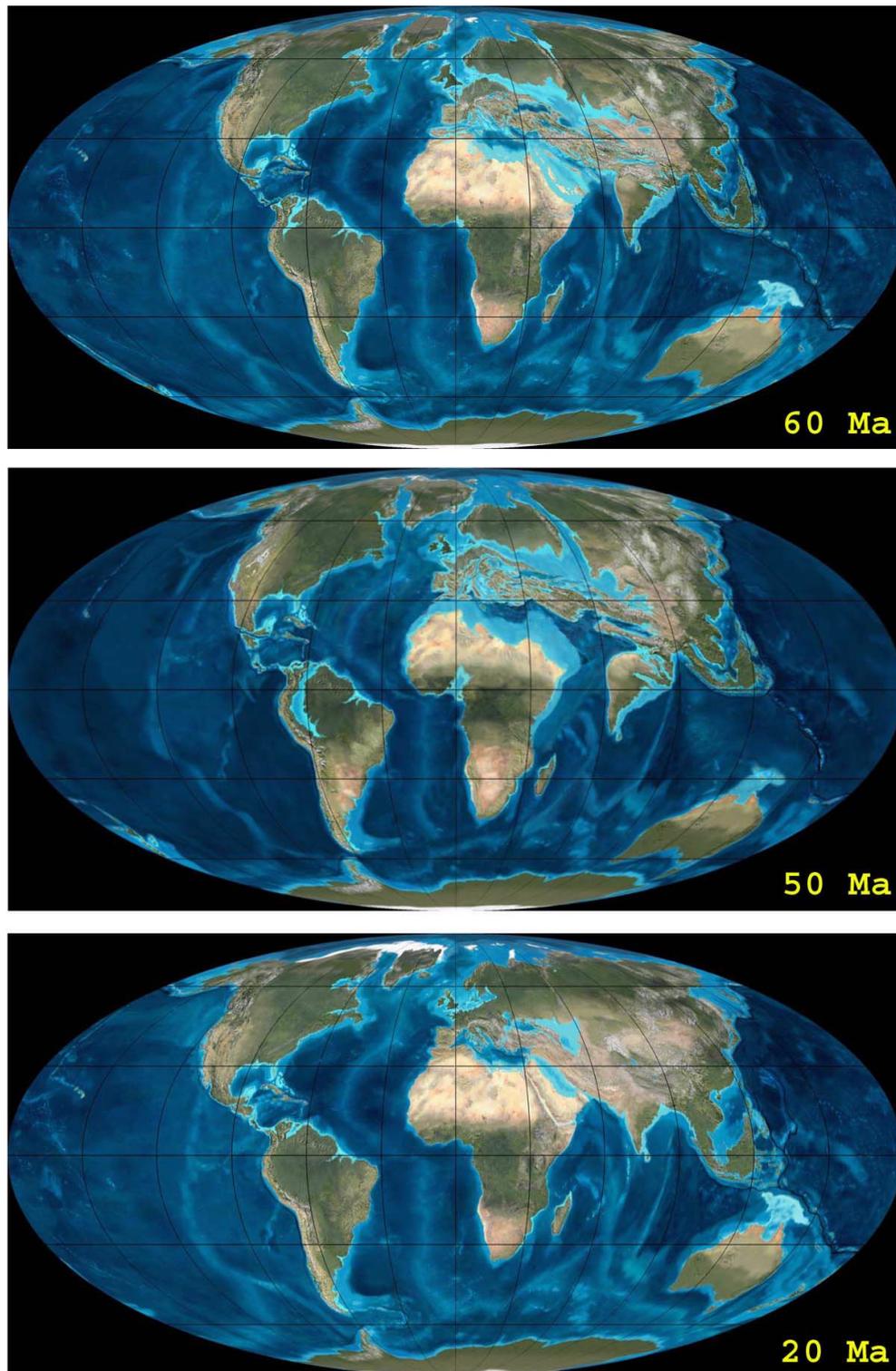


Abb. 33 Zeitliche Entwicklung der Festlandverteilung im Laufe der letzten $5 \cdot 10^8 \cdot y$
Teil 4: $60 \cdot My$ - $20 \cdot My$

- knapp unterhalb des jeweiligen Meeresspiegels liegende Teile des sog. Festlandsockels erscheinen türkisblau;
- bewachsene (Wald/Savanne) Festlandbereiche erscheinen grün;
- wüstenähnliche Festlandbereiche erscheinen hellbraun;
- ganzjährig mit Eis bedeckte Bereiche erscheinen weiß.

Beim Vergleich mit der Wiedergabe der heutigen Erde durch eine reale Photographie (z.B. Abb. 22) vermisst man allerdings eine Wiedergabe der zu dem jeweiligen Zeitpunkt ggfls. in der Atmosphäre vorhanden gewesenen Wolken in ihrer damals typischen Struktur.

Das Magnetfeld der Erde (-/-)

(XXX: Der Text des Absatzes *Das Magnetfeld der Erde* ist noch nicht verfügbar. Er wird auch die folgende Beziehung und den sie erläuternden Text enthalten:)

Das von der Erde erzeugte Magnetfeld hat eine räumliche Struktur, die außerhalb der Erde in guter Näherung einem Dipolfeld entspricht. Dessen Dipolmoment hat den Wert

$$\mathcal{M}_{magn} = 7,9 \cdot 10^{15} \cdot T \cdot m^3 \quad (10.225)$$

Der Erd-Mond (-)

Die Erde hat genau **einen** ihn umkreisenden Mond. Die geometrischen Daten seiner Bahnbewegung und der Eigenrotation zeigt die nachfolgende Tabelle:

	$p(\text{Bahn})$	e	$T_b^{(sid.)}$	$T_b^{(syn.)}$	α_b	T_r	α_r
	$/10^5 \cdot km$		$/d$	$/d$	$/^\circ$	$/d$	$/^\circ$
Erd-Mond	3,844	0,0549	27,3217	29,53	5,1457	27,3217	6,68

Der Erd-Mond führt eine einfach gebundene Rotation aus: Die Umlaufzeit der Bahnbewegung des Mondes um die Erde und die Umlauf der Eigenrotation des Mondes sind identisch. In dieser Konfiguration bleibt der Spannungszustand, der durch die Gezeitenefekte im Mond erzeugt wird, in Bezug auf das mit dem Mond verknüpfte Koordinatensystem zeitlich konstant. Er erzeugt also keine mechanischen Verluste. Dieser Zustand ist hierdurch der natürliche stationäre Zustand des Systems. Für einen Beobachter auf der Erde bedeutet dies, dass der Mond uns immer dieselbe Hemisphäre zuwendet. (XXX: präzisieren) Im Gegensatz zu anderen Systemen von Himmelskörpern, die auch eine einfach gebundene Rotation ausführen, ist die Achse der Eigenrotation des Mondes signifikant gegen die Achse seiner Bahnbewegung verkippt, nämlich um fast 7° .

Unsere Kenntnisse über den physikalisch/chemischen Aufbau des Mondes basieren ganz wesentlich auf den Ergebnissen der bis heute bereits zahlreichen Raum-Missionen zum Mond. Das Zeitalter dieser Missionen begann am 02.01.1959 mit dem Start der Sonde *Lunik 1* der Sowjetunion, die den Mond in einer Minimal-Entfernung von ca. $6000 \cdot km$ passierte. Danach folgten in kurzen Abständen eine große Anzahl von Versuchen zu einer Raum-Mission zum Mond, von denen anfangs aber ein großer Teil ganz oder partiell scheiterte. Bis Ende 2011 waren es insgesamt 114 Versuche, zunächst durchgeführt von der Sowjetunion und den USA, später auch von Japan, Europa, der Volksrepublik China und Indien. Meilensteine dieser technologischen und wissenschaftlichen Entwicklungen waren

- die 1. (harte) Landung auf dem Mond durch *Lunik 2* am 13.09.1959;
- die harte Landung auf dem Mond von *Ranger 7* am 28.07.1964; während des Anflugs übertrug die Sonde 4300 Nahaufnahmen des Mondes zur Erde;
- die 1. weiche Landung auf dem Mond durch *Ranger 8* am 20.02.1965; die Sonde übertrug danach eine Vielzahl Bilder und Messdaten zur Erde;
- die Sonde *Lunar Orbiter* der NASA, die als 1. Orbiter ab dem 14.08.1966 den Mond umkreiste und ebenfalls eine Vielzahl Bilder und Messdaten zur Erde sendete;
- die 1. Landung eines Menschen auf dem Mond am 20.07.1969 durch die NASA-Mission *Apollo 11*;
- die 1. Landung eines Fahrzeug-Roboters auf dem Mond im Nov. 1970 durch die Mission *Luna 17*; der Mondrover legte während der folgenden 11 Monate insgesamt $10,54 \cdot km$ auf der Mondoberfläche zurück und führte ca. 500 Analysen des Bodenmaterials durch;
- die NASA-Sonde **Lunar Reconnaissance Orbiter** LRO, die am 18.06.2009 gestartet wurde und seit dieser Zeit den Mond umkreist; die ersten 3 Jahre befand sie sich auf einer relativ niedrigen, nahezu kreisförmigen Bahn über die Pole, um die gesamte Mondoberfläche in hoher Auflösung zu photographieren und zu kartographieren; danach wurde sie auf eine stationäre, d.h. antriebslose stark elliptische Bahn angehoben, die ihren mond nächsten Punkt in der Nähe seines Südpols hat.

Insbesondere die 1. Landung eines Menschen auf dem Mond (s. Abb. 34) erregte weltweite Aufmerksamkeit und Begeisterung. Der wissenschaftliche Wert der Apollo-Missionen muss insbesondere im Vergleich zu den neueren unbemannten Missionen und beim Vergleich der jeweils aufgewendeten Kosten als eher moderat angesehen werden.

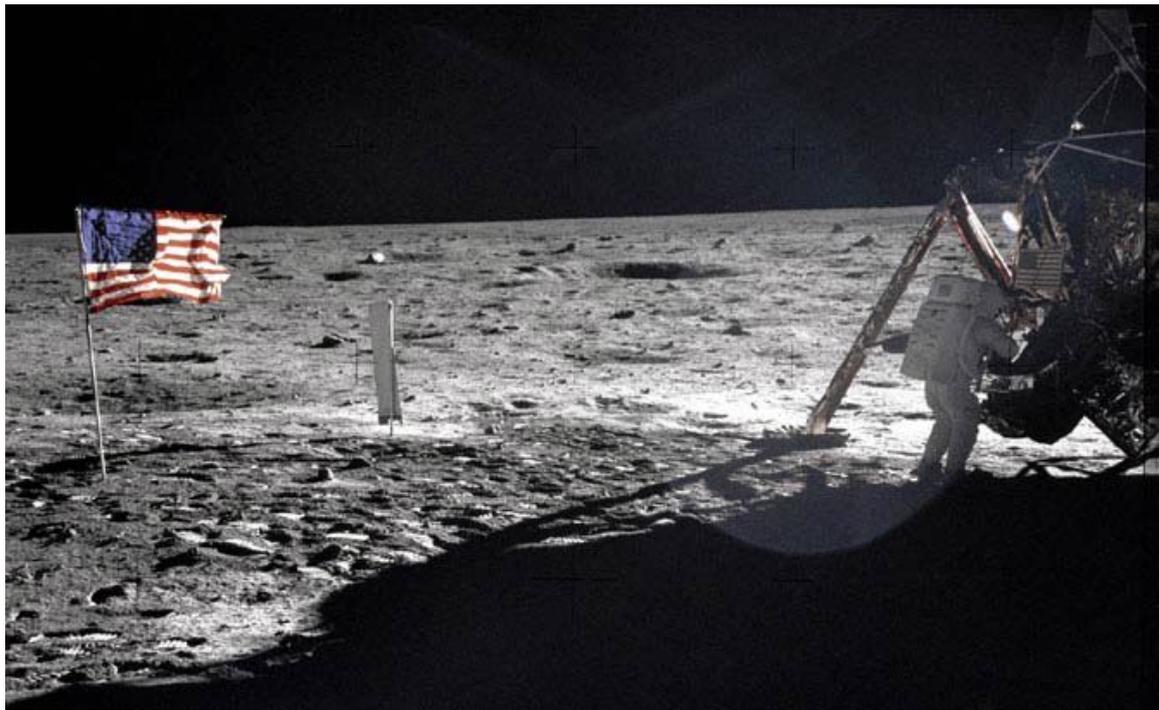


Abb. 34 Neill Armstrong während Kontrollarbeiten am Lande-Modul, aufgenommen auf dem Mond am 20.07.1969
(credit: NASA)

Die wichtigsten integralen physikalischen Daten des Mondes sind in der nun folgenden Tabelle zusammengestellt:

	$M_{\text{ges.}}$ / $10^{22} \cdot \text{kg}$	$\langle D_{\text{Mond}} \rangle$ / $10^3 \cdot \text{km}$	$\langle m \rangle$ / $10^3 \cdot \text{kg/m}^3$	T_{ref} / K	$M_{\text{Atmosph.}}$ / kg	$p_{\text{Oberfl.}}$ / Pa	$\langle T_{\text{Oberfl.}} \rangle$ / K
Mond	7,349	3,476	3,341	279		$3 \cdot 10^{-10}$	218

Über die integrale Element-Zusammensetzung des Mondes gibt es immer noch keine verlässlichen Angaben. Für die oberflächen-nahe Schicht des Mondes ist der Kenntnisstand insbesondere Dank der verschiedenen Mond-Missionen deutlich besser. Die Abb. 35 zeigt den relativen Elementanteil der oberflächen-nahen Schicht des Mondes im Vergleich zu einer vergleichbaren Schicht der kontinentalen Erdkruste und zur Erde insgesamt.

(XXX: Der diese Abb. erläuternde Text ist noch nicht verfügbar. Danach folgt:)

Zur Entstehung des Erd-Mondes gab es lange Zeit unterschiedliche konkurrierende Hypothesen. Die verschiedenen Mond-Missionen, insbesondere die mineralogischen Befunde an den im Rahmen des Apollo-Projektes zur Erde transportierten

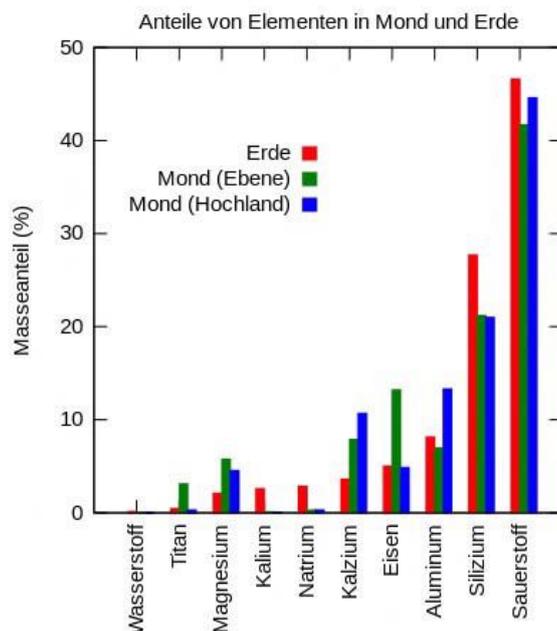


Abb. 35 Elementzusammensetzung der Oberflächenschicht von Erde und Mond

Proben von Mondgestein haben dann im wesentlichen die sog. *Einschlagtheorie* für die Mondentstehung gestützt, s. Absatz S. 1236:

In einer frühen Phase seiner Entwicklung kollidierte die teilweise noch flüssige Proto-Erde mit einem annähernd marsgroßen weiteren Proto-Planeten unserer frühen Sonne. Die Erde verlor hierbei etwa $\frac{1}{3}$ ihrer ursprünglichen Masse. Ein Teil der Trümmer von Erde und Stoßpartner agglomerierten dann gravitativ zu dem heutigen Mond. Eine wichtige Stütze dieser Hypothese ist der experimentelle Befund, dass das *O*-Isotopenverhältnis der Mineralien von Erde und Erd-Mond identisch ist (XXX: präzisieren). Dieser hypothetische Proto-Planet und Kollisionspartner der frühen Erde hat in der astronomischen Literatur auch schon einen Namen erhalten. Er wird *Theia* (griech. $\Theta\epsilon\iota\alpha$) genannt nach einer Gestalt aus der griechischen Mythologie. Als **eine** Folge (von vielen anderen) dieser Kollision finden sich heute signifikante Mengen von Edelmetallen in oberflächennahen Schichten der Erde. Ohne dieses Ereignis wären diese schweren Elemente ganz überwiegend im Erdkern konzentriert.

Aus der Analyse des Isotops W^{182} (s. Absatz XXX) schließt man heute auf ein Alter des Mondes von

$$\mathbb{A}_{Mond} = (4,524 \pm 0,010) \cdot 10^9 \cdot y \quad (10.226)$$

Demnach ereignete sich diese Kollision nur etwa

$$\mathbb{A}_{\odot} - \mathbb{A}_{Mond} = 30 \dots 50 \cdot 10^6 \cdot y \quad (10.227)$$

nach der Entstehung unserer Sonne.

(XXX: Der Text zur Schalenstruktur des Mondes ist noch nicht verfügbar. In ihm werden auch die folgenden Sätze aufgehen:)

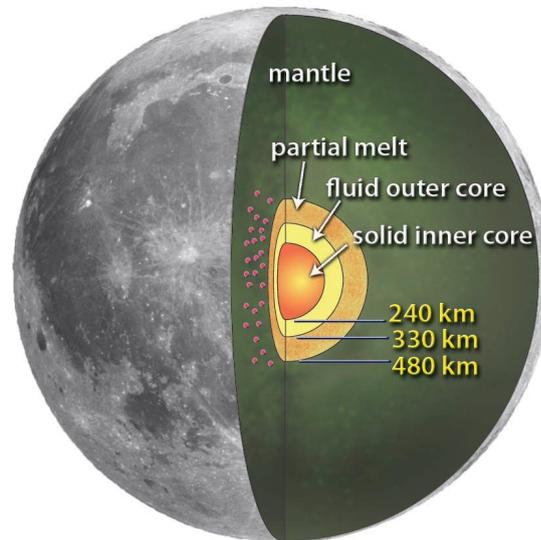


Abb. 36 Aus seismologischen Messungen geschlossene innere Struktur des Mondes (credit: NASA/MSFC/Renee Weber)

Unsere Kenntnisse über die Struktur des Mondinneren, insbesondere seines Kernbereichs, konnten durch eine sorgfältige und verfeinerte Auswertung von seismologischen Messdaten des Mondes aus den Jahren 1969 bis 1977 deutlich erweitert werden ([22]). Es handelt sich um Messdaten von seismometrischen Sonden, die im Rahmen des Apollo-Programms auf dem Mond installiert worden waren. Entscheidend waren hierbei neue aus der Erd-Seismologie übernommene Techniken der Störsignal-Bereinigung. Das Ergebnis dieser Arbeiten ist in der Abb. 36 dargestellt. Die in diese Abb. eingetragenen Zahlenwerte gelten für die Außenradien der jeweiligen Kugelschalen. Hiernach enthält der eisenreiche Kern geringe Anteile an leichteren Elementen wie Schwefel und hat einen Durchmesser von

$$D_{Kern, fest} \approx 480 \cdot km \quad (10.228)$$

Darauf folgt eine flüssige Kugelschale der Dicke

$$d_{Kern, flüss.} \approx 90 \cdot km \quad (10.229)$$

und darauf eine Schale der Dicke

$$d_{Kern, part. flüss.} \approx 150 \cdot km \quad (10.230)$$

die nur noch partiell geschmolzen ist. Deren obere Grenze befindet sich also - von der Mond-Oberfläche her gemessen, in einer Tiefe Υ von

$$u_{Kerngrenze} \approx 1260 \cdot km \quad (10.231)$$

Auf diese Schale folgt dann die eigentliche, weitgehend feste Mantelschicht. Die bis an die Mond-Oberfläche reichende Mondkruste hat eine Dicke im Bereich

$$60 \cdot km < d_{Kruste} < 100 \cdot km \quad (10.232)$$

Als Richtwert für die Temperatur im Zentrum des Mondes gilt heute

$$T_{Mond}(r = 0) = 1300 \dots 1900 \cdot K \quad (10.233)$$

Es gibt heute auf dem Mond keinerlei Hinweise auf einen evtl. noch bestehenden Vulkanismus. Es gilt jedoch als wahrscheinlich, dass es in einer frühen Phase der Entwicklung, etwa von

$$-3,7 \cdot 10^9 \cdot y < t < -3,0 \cdot 10^9 \cdot y \quad (10.234)$$

vulkanische Aktivitäten auf dem Mond gegeben hat.

Die Oberflächen-Topographie des Mondes ist heute Dank der Messdaten der LRO-Sonde (s.o.) sehr genau bekannt, s. Abb. 37. Diese Abb. wurde aus den photographischen Aufnahmen und den Laser-Abstandsmessungen errechnet, die die Sonde LRO während einer Vielzahl von Umläufen registriert hat. Sie zeigt die Rückseite des Mondes, also den Teil der Mondoberfläche, der von der Erdoberfläche aus nicht sichtbar ist, als sog. *orthographische Projektion*. Hierbei wird die reale Fläche, hier also die Hälfte einer Kugeloberfläche, durch Parallel-Projektion auf eine ebene Fläche abgebildet. Relativ zu der als Referenz dienenden Kugeloberfläche treten Erhebungen (Gebirge) auf bis zu $10760 \cdot m$ und Vertiefungen (Mare) bis zu $9150 \cdot m$.

Der Mond hat keine Atmosphäre im eigentlichen Sinne, also eine aus verschiedenen Substanzen bestehende gasförmige Hülle, die sich an die Oberfläche anschließt und auf dieser Oberfläche einen signifikanten Druck von der Größenordnung $1 \cdot 10^5 \cdot Pa$ oder mehr erzeugt. Das oberhalb der Mond-Oberfläche liegende Volumen ist jedoch nicht völlig leer. In ihm befinden sich in extrem niedrigen Konzentrationen Gase, die

- insbesondere als Folge der Sonneneinstrahlung aus der Mond-Oberfläche austreten bzw.
- die in dem sog. Sonnenwind enthalten waren, der von der Sonne kommend sich z.T. auf dem Mond niederschlägt.

Eine einen Himmelskörper umgebende Gashülle mit diesen Eigenschaften bezeichnet man als *Exosphäre*.

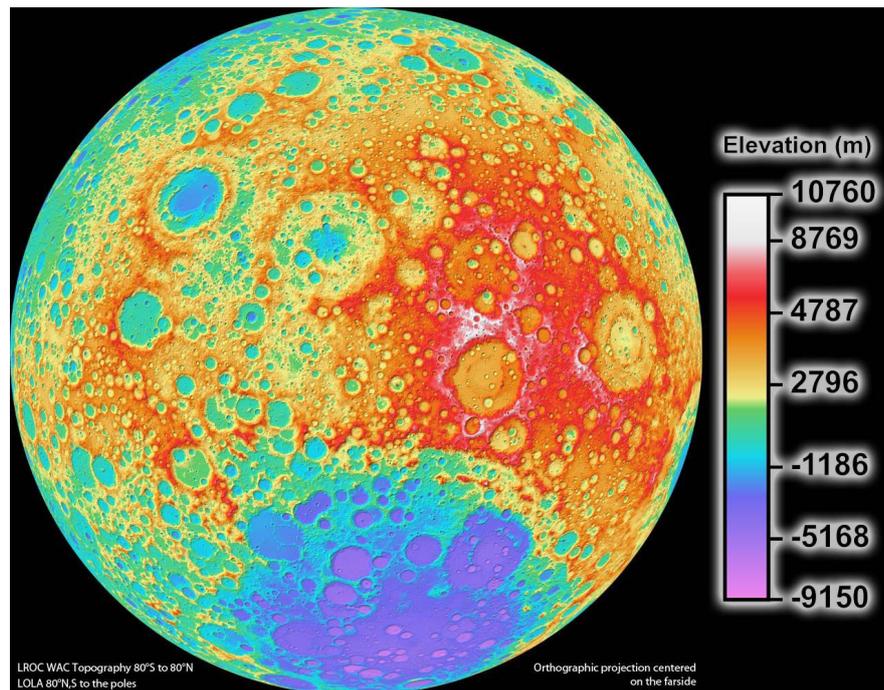


Abb. 37 Topographie der Rückseite des Mondes (orthographische Projektion)

Der Mond besitzt aktuell kein messbares Magnetfeld (mehr). Auf Grund der Analysen, die von dem auf die Erde gebrachten Mondgestein gemacht wurden, folgt jedoch nahezu zwingend, dass der Mond in einer frühen Phase seiner Entwicklung ein Magnetfeld gehabt haben muss mit einer Dipolstärke von ähnlicher Größenordnung wie das heutige Erd-Magnetfeld.

Neue Erkenntnisse insbesondere über die Zusammensetzung der Mond-Atmosphäre und der die Mondoberfläche bedeckenden Staubschicht erhofft man sich von der Raum-Mission LADEE (**L**unar **A**tmosphere and **D**ust **E**nvirement **E**xplorer) der NASA. Diese Sonde wurde am 07.09.2013 gestartet und befindet sich seit Oktober 2013 auf einer Umlaufbahn um den Mond.

Als Abschluss dieses Absatzes *Der Erd-Mond* nenne ich einige aus meiner Sicht besonders wichtige bzw. interessante offene Fragen:

- Gab es auf dem Mond wirklich in der Frühzeit seiner Entwicklung Vulkanismus? Und bestand die primäre Ursache hierfür (wie bei der Erde) in inneren vertikalen zirkularen Masseströmen ?
- Falls es einmal Vulkanismus auf dem Mond gegeben hat, wodurch kam dieser Prozess dann zum Erliegen?
- XXX

Zum Abschluss des Abschnitts *Physik unserer Erde* nenne ich wieder einige aus meiner Sicht fundamentale offene Fragen:

1. Warum ist der Anteil der Elemente *Fe*, *Si* und *O* in der Elementzusammensetzung der Erde so extrem hoch? Die Auszeichnung dieser 3 Elemente ist in der integralen Elementzusammensetzung unseres Planetensystems (Abb. 19 nicht zu erkennen. Gilt eine verwandte Aussage auch für andere Planeten unseres Planetensystems?

(XXX: Der Text mit den weiteren offenen Fragen ist noch nicht verfügbar.)

10.2.10 *Physik unserer Planeten (-)*

In diesem Abschnitt werde ich mich auf die Behandlung der Planeten **unseres** Sonnensystems beschränken, da nur über sie eine Reihe von experimentell abgesicherten Fakten bekannt ist. Es gibt aber gute Gründe für die Annahme, dass die Planeten anderer Planetensysteme einen verwandten Aufbau haben und auch verwandte Eigenschaften besitzen. Erste Ergebnisse der Erforschung sog. Exo-Planeten zeigen aber auch, dass diese z.T. globale Kenndaten (Gesamtmasse, Umlaufzeit um ihren Zentralstern etc.) besitzen, die sich von den in unserem Planetensystem auftretenden Kenndaten extrem stark unterscheiden.

Die Physik unserer Planeten Erde habe ich innerhalb des Kapitels *Astronomie* bereits im Rahmen des separaten Abschnitts 10.2.9 diskutiert. Diese Art der Gliederung bietet uns nun die Möglichkeit, bei der Behandlung der übrigen Planeten alle Erkenntnisse zu nutzen, die wir auf Grund der umfangreichen, über die Erde bekannten experimentellen Fakten haben erzielen können. Dies wird sich als eine große Hilfe herausstellen. Denn über die meisten konkreten physikalischen und chemischen Daten der übrigen Planeten gibt es bis heute nur relative grobe, meist erst noch zu überprüfende Annahmen.

Allerdings verbessert sich diese Situation seit einiger Zeit mit geradezu atemberaubender Geschwindigkeit: Mit der im Januar 1959 erfolgreich gestarteten sowjetischen Mondsonde *Lunik 1* begann das Zeitalter der *Forschungssonden*, die inzwischen zu den verschiedensten Himmelskörpern geschickt wurden, insbesondere zu fast allen Planeten unseres Sonnensystems. Das Ergebnis dieser Projekte waren und sind nicht nur Aufnahmen dieser Himmelskörper mit ständig verbesserter Auflösung und von oft ergreifender Schönheit. Wir erhalten auf diese Weise auch eine ständig wachsende Zahl verlässlicher Messdaten über diese Himmelskörper. Ich habe in die nun folgende Diskussion der Planeten den Pluto nicht mit einbezogen, da ihm auf der Tagung der *International Astronomical Union* 2006 der Status eines "richtigen" Planeten aberkannt wurde. Als primäres Kriterium für die Entscheidung, ob ein Himmelskörper, der einen Stern umkreist, als Planet bezeichnet wird, dient seitdem die Frage, ob es ihm gelungen ist, den Nahbereich um seine Bahn weitgehend von planetarem Staub und kleineren Planetesimalen zu *reinigen*, indem er diese überwiegend in sich

aufgesogen hat. Pluto ist seitdem ein Zwergplanet innerhalb des Kuiper-Gürtels. (S. hierzu auch den Unterabsatz *Der Kuiper-Gürtel* ab S. 1361).

Zu Eingewöhnung beginne ich mit einer Zusammenfassung der geometrisch-kinetischen Kenndaten dieser Planeten. Die hierin auftretenden Winkel α_b und α_r sind wie folgt festgelegt:

- α_b : Winkel zwischen den Drehachsen der Bahnbewegung des Planeten und der Bewegung der Erde um die Sonne; (Verkipfung der Planetenbewegung gegen die Ekliptik). Diese Größe bestimmt u.a. den Weg, den der Planet aus der Sicht eines Beobachters auf der Erde auf der Himmelssphäre (s. Absatz S. 210) nimmt.
- α_r : Winkel zwischen der Achse der Eigenrotation des Planeten und dem Flächenvektor **seiner** Ebene der Bahnbewegung. Diese Größe bestimmt u.a. die Stärke von Jahreszeit-Effekten auf dem Planeten. Sie wird positiv gezählt, wenn die Rotationsachse in Richtung der Bahnbewegung verkippt ist. Ein Wert nahe 180° bedeutet daher, dass der Planet nahezu exakt **entgegen** seiner Bahnbewegung rotiert.

Planet	p (Bahn) /AE	T_b /d bzw. y	e	α_b /°	T_r /h	α_r /°
Merkur	0,387	$87,79 \cdot d$	0,2056	7,00	58,53	0,01
Venus	0,723	224,7	0,0068	3,395	$197 \cdot d$	177,36
Erde	1,00	365,256	0,0167	0,00	23,945	23,44
Mars	1,524	686,98	0,0935	1,850	24,623	25,19
Jupiter	5,203	$11,86 \cdot y$	0,0484	1,0305	9,925	3,13
Saturn	9,582	29,457	0,05415	2,484	10,78	26,73
Uranus	19,201	84,011	0,0472	0,770	17,24	97,77
Neptun	30,047	164,79	0,0113	1,769	15,966	28,32

Die an dieser Stelle erscheinenden Umlaufzeiten kennzeichne ich weiterhin mit dem Buchstaben T , wohl wissend, dass die ebenfalls auftretenden Temperaturen dieselbe Kennzeichnung haben. Dies entspricht nicht nur der bisher gewählten Vorgehensweise in diesem Lehrbuch, sondern genau so der Literatur-üblichen Art. Ich gehe davon aus, dass der Leser sich hierdurch nicht verwirren lässt. Die in dieser Tabelle angegebenen Zeiteinheiten $y/d/h$ sind Erdjahre, -tage bzw. -stunden. p ist die große Halbachse der Planetenbahn.

Ich werde diese Daten jedoch nicht erneut kommentieren, da wir uns nicht (mehr) um die Kinematik der Planeten**bahnen**, deren Entstehung und zeitliche Veränderung kümmern werden. Diese Thematik haben wir in den Abschnitten 3.2.4,

3.2.10, 3.6.6 und 10.2.7 behandelt. Im nun folgenden Text werden wir uns auf den chemischen und physikalischen Aufbau dieser Planeten konzentrieren und uns dabei bemühen, die Gemeinsamkeiten und Unterschiede im Aufbau dieser Planeten deutlich herauszustellen.

Daher folgt nun eine Gegenüberstellung von einigen der wichtigsten globalen **physikalischen** Daten aller 8 Planeten unseres Planetensystems, s. die auf S. 1271 wiedergegebene Tabelle.

Planet	M_{ges} / $10^{24} \cdot kg$	D / $10^3 \cdot km$	m / $10^3 \cdot \frac{kg}{m^3}$	T_{ref} / K	$M_{Atm.}$ / kg	T_O / K	ε_a
Merkur	0,3302	4,879	5,427	447,5	$< 1 \cdot 10^3$	440	0,894
Venus	4,8635	12,1036	5,243	327,6	$4,8 \cdot 10^{20}$	737	0,35
Erde	5,9736	12,742	5,515	278,6	$5,1 \cdot 10^{18}$	288	0,633
Mars	0,64185	6,779	3,933	225,8	$2,5 \cdot 10^{16}$	210	0,85
Jupiter	1.898,6	139,822	1,326	122,2		165	0,47
Saturn	568,46	116,464	0,687	90,2		135	0,53
Uranus	86,832	50,724	1,27	63,6		76	0,49
Neptun	102,41	49,244	1,638	50,8		73	0,59

Die in diese Tabelle aufgenommenen Zahlenwerte basieren insbesondere auf den in [13] verfügbaren Daten. Die von mir berechnete Größe T_{ref} ist die im Abschnitt 8.7.1 erläuterte astronomische Referenztemperatur des jeweiligen Planeten. Diese Größe ergibt sich aus ausschließlich astronomischen Kenndaten des Planeten. Sofern man den Treibhauseffekt (s. wieder Abschnitt 8.7.1) vernachlässigen kann, beträgt die Oberflächentemperatur des Planeten einfach

$$T_{\text{Oberfl.}} = \sqrt[4]{\frac{\varepsilon_a}{\varepsilon_e}} \cdot T_{ref} \quad (10.235)$$

Zur genauen Bedeutung der Größen ε_a (spektral korrekt gemittelter Absorptionskoeffizient der Planeten-Oberfläche) und ε_e (spektral korrekt gemittelter Emmissionskoeffizient der Planeten-Oberfläche) s. wieder Abschnitt 8.7.1. Als die Oberfläche eines Planeten definieren wir diejenige geschlossene Fläche, die die gasförmige Atmosphäre von dem flüssigen oder festen Teil des Planeten trennt.

Gem. dieser Tabelle nimmt, grob betrachtet, die Gesamtmasse der Planeten kontinuierlich von den inneren zu den äußeren Planeten hin zu, während ihre Massendichte kontinuierlich abnimmt. Eine physikalische Besonderheit der sog. Gasplaneten entsteht dadurch, dass diese massereichen, weit von der Sonne entfernten Planeten eine derart niedrige Oberflächentemperaturen haben, dass chemisch einfache Gase kondensieren und so Weltmeere aus kondensierbaren Flüssigkeiten, also nicht nur aus Wasser generieren. Andererseits wächst bereits in dem gasförmigen äußersten Bereich des Planeten der Druck rasch auf Werte jenseits des kritischen Drucks (s. Abschnitt 8.1.15) an. Daher besitzen diese Planeten keine echte Oberfläche im Sinne

der oben gegebenen Definition, bei der die Atmosphäre endet und der eigentliche Planet beginnt. Es fehlt daher für diese Planeten in der obigen Tabelle der Wert für den Oberflächendruck. Als Oberflächentemperatur habe ich in diesen Fällen die Temperatur angegeben, die ein externer Beobachter auf Basis der von dem Planeten emittierten Eigenstrahlung als seine (Oberflächen-)Temperatur deutet.

Da die Planeten ebenso wie unsere Sonne, wenn auch ca. $XXX \cdot y$ nach ihr, aus dem Materialgemenge der Akkretionsscheibe entstanden sind, haben wir gute Gründe anzunehmen, dass die integrale chemische Zusammensetzung auch der Planeten untereinander zumindest ähnlich ist. Allerdings ist zu erwarten, dass die Konzentrationen der schwereren Elemente im Vergleich zu den Konzentrationen der leichteren Elemente stark abnehmen, wenn wir von den sonnennäheren Planeten zu den sonnenferneren Planeten übergehen. Dies ist auf Grund der während der Akkretionsphase dominierenden Gravitationseffekte zu erwarten, s. Absatz S. 1228. Allerdings muss bei dem Vergleich dieser Ausgangshypothese mit der heute real vorliegenden (integralen) atomaren Zusammensetzung der Planeten berücksichtigt werden, dass die im Verlauf der zeitlichen Weiter-Entwicklung der Planeten eingetretenen Prozesse und Ereignisse die anfangs vorgelegene Zusammensetzung evtl. signifikant verändert haben. Als Beispiele derartiger möglicher Prozesse und Ereignisse nenne ich:

- den ständigen Aufprall von Meteoriten;
- den Zusammenstoß des betrachteten Planeten mit einem masse-reichen anderen Himmelskörper;
- die partielle oder totale Abdiffusion der Gas-Atmosphäre in das Weltall; und umgekehrt
- das gravitative Einfangen von Staubpartikel und Gasen aus der Nachbarschaft des von der jeweiligen Planetenbahn erfassten Raumbereichs.

Wir können davon ausgehen, dass zumindest bei den sonnennahen Planeten Merkur und Venus der überwiegende Anteil der ursprünglich in ihrer Atmosphäre vorhanden gewesenen leichten Gase H_2 und He (und evtl. weiterer Gase) durch die intensive Sonneneinstrahlung in den interplanetaren Raum abdiffundiert ist. Bei den äußeren Planeten, deren äußerste Schicht sich bereits auf einer relativ niedrigen Temperatur befindet, überwiegt dagegen der Effekt des gravitativen Einfangs von Gasen und Partikeln. Relativ gut bekannt ist die integrale atomare Zusammensetzung der Erde. Hier liegt ein ausreichend umfangreiches Datenmaterial vor, aus dem durch plausible Zusatzannahmen ein realistisches Modell ihrer Gesamtstruktur und damit auch ihrer integralen Zusammensetzung entwickelt werden kann. Von den übrigen Planeten ist meist außer der Gesamtmasse und dem Volumen (s. Tabelle auf S. 1271) (wenn überhaupt) nur die chemische Zusammensetzung der (äußeren) Atmosphäre bekannt, aber nicht die der darauf folgenden tieferen Schichten. Bis in die nahe Vergangenheit war man sogar der Meinung, dass nur die sonnennahen Planeten Merkur,

Venus, Mars und Erde einen festen Kern besitzen, der dann von einer jeweils unterschiedlich dicken und dichten Atmosphäre umgeben ist. Man nannte sie daher auch die *Gesteinsplaneten*. Die äußeren Planeten Jupiter, Saturn, Uranus und Neptun wurden dagegen als *Gasplaneten* bezeichnet. Inzwischen wird es immer wahrscheinlicher, dass **alle** Planeten unseres Planetensystems auch einen i.a. festen Kern aus schwereren Elementen besitzen. Nach heutigem (2012) Kenntnisstand beträgt die Gesamtmasse dieser planetaren Zentren aus Gesteinen und Metallen bei diesen Planeten

	Merkur	Venus	Erde	Mars	Jupiter	Saturn	Uranus	Neptun
$M_{\text{Kern+Mantel}} / 10^{24} \cdot kg$	0,330	4,86	5,974	0,642	76	142	7,5	3,3

Die sog. Gasplaneten unterscheiden sich von den sog. Gesteinsplaneten primär also **nicht** dadurch, dass bei ihnen der aus Gesteinen gebildete Mantel und der darin eingeschlossene metallische Kern fehlen oder auch nur besonders klein sind. Im Gegenteil, der Kern von Jupiter und Saturn ist absolut betrachtet sogar besonders groß. Die Gesamtmasse der Kerne aller 8 Planeten beträgt

$$M_{\text{Kern,ges.}} = 240,6 \cdot 10^{24} \cdot kg = 1,2 \cdot 10^{-4} \cdot M_{\odot} \quad (10.236)$$

Dieser auf Messdaten basierende Wert steht in überraschend guter Übereinstimmung mit dem aus der integralen Elementzusammensetzung unseres Sonnensystems (Abb. 19) abgegeschätzten Wert. Der Unterschied zwischen sog. Gesteins- und Gasplaneten besteht vielmehr darin, dass die Gasplaneten zusätzlich riesige Mengen an chemisch einfachen Verbindungen von niedriger Molmasse gravitativ an sich gebunden haben, die unter moderaten Bedingungen von Temperatur und Druck gasförmig sind. Wegen der relativ niedrigen Oberflächentemperaturen dieser äußeren Planeten (s. die in der Abb. ?? wiedergegebene Tabelle und Gl. 10.242) sind diese Gase nicht in das Weltall re-diffundiert. In den tieferen Schichten der Atmosphäre liegen diese Verbindungen dann auf Grund des hohen Drucks in flüssiger Form vor.

Verlässliche Zahlenwerte über die integrale atomare Zusammensetzung dieser Planeten stehen aktuell (2012) noch nicht zur Verfügung. Ich habe mich dennoch bemüht, aus der mir verfügbaren Literatur möglichst viele aktuell als plausibel angesehene Zahlenwerte zu ermitteln. Das Ergebnis dieser Arbeit ist in der auf S. 1273 wiedergegebenen Tabelle zusammengestellt:

$\frac{\Delta N}{N}$	Merkur	Venus	Mars	Erde	Jupiter	Saturn	Uranus	Neptun
H						0,96		
O				0,515				
Si				0,154				
Fe				0,212				
Mg				0,047				
Ni				0,016				
übr.				0,056				

Auf Grund der in der Einleitung zu diesem Abschnitt dargelegten Überlegungen erwarten wir (eigentlich), dass auch der Merkur einen Mantel aus Silikaten und einen Kern aus Eisen/Nickel-Verbindungen besitzt. Außerdem erwarten wir, dass der Merkur einen ähnlichen relativen Anteil an noch schwereren Elementen besitzt, insbesondere auch an langlebigen radioaktiven Isotopen (insbesondere K_{19}^{40} , U_{92}^{238} , Th_{90}^{232}). Diese aber erzeugen im Inneren des Planeten einen Wärmestrom, der allein über Wärmeleitung nicht bis an die Oberfläche des Planeten transportiert werden kann, s. die entsprechenden Abschätzungen im Absatz S. 1247. Wir erwarten also, dass auch der Merkur einen zumindest teilweise flüssigen Kern besitzt, in dem diese Wärme über Konvektionsströme zu den oberflächennahen Schichten transportiert wird. Als Folgeerscheinung erwarten wir einen bis in die Gegenwart andauernden Vulkanismus, vielleicht sogar ein Analogon zur Plattentektonik der Erde. Außerdem sollte der Merkur auch ein endliches Magnetfeld besitzen. Alle diese Annahmen wurden bis vor kurzem in der Wissenschaft kontrovers diskutiert und mehrheitlich angezweifelt.

Wir werden nun die heute bekannten Fakten diskutieren. Ich verwende zunächst ein Paar von Übersichtsaufnahmen einer Merkur-Hemisphäre, s. Abb. 38. Die in

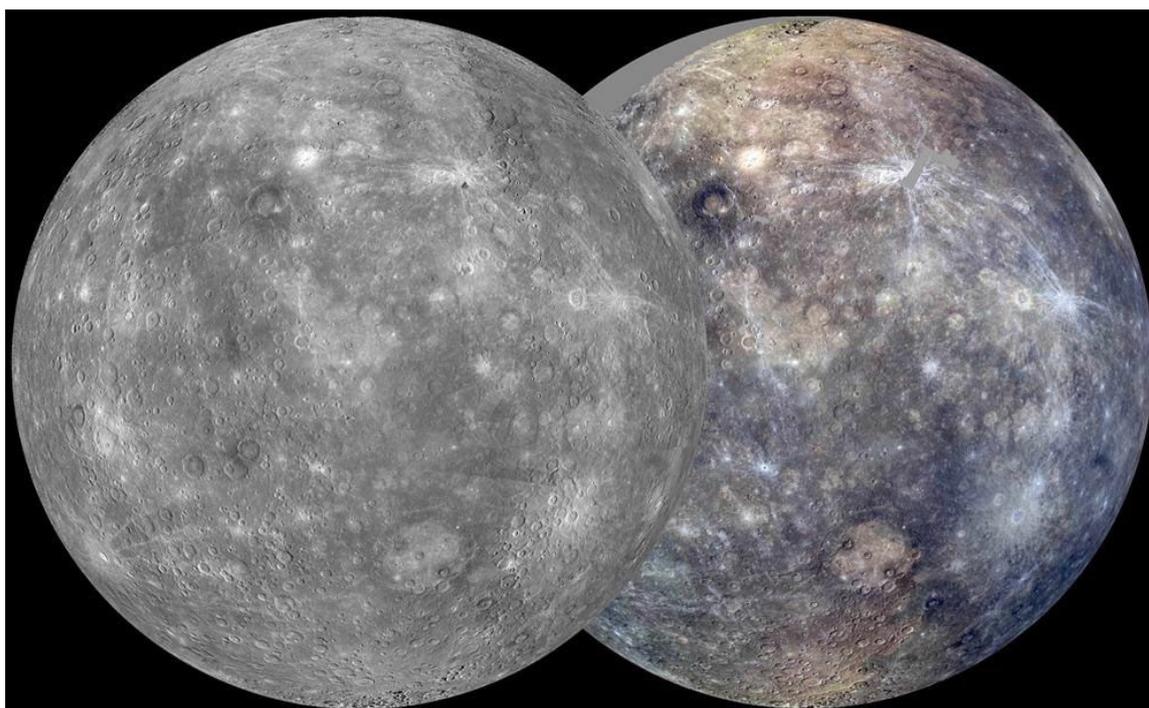


Abb. 38 Aufnahmen der Merkur­oberfläche (monochrom (links) und Falschfarbenaufnahme $1000 \cdot nm$ / $750 \cdot nm$ / $430 \cdot nm$ (rechts)); das Bildzentrum entspricht jeweils $75^\circ O$ / $0^\circ N$.

(Quelle: NASA/Messenger Image Gallery; Credit: NASA/Johns Hopkins University Applied Physics Laboratory / Carnegie Institution of Washington)

dieser Abb. wiedergegebenen Bilder wurden aus den Einzelscans errechnet, die Messenger während eines gesamten Merkurtages aufgenommen hatte. Die Ortsauflösung der Originalbilder beträgt $1 \cdot px/250 \cdot m$ bei der Monochromaufnahme und $1 \cdot px/km$ bei der 3-Farbaufnahme. Aus der Farbtönung der rechten Aufnahme kann man erste Rückschlüsse ziehen auf die chemische Zusammensetzung des Materials auf der Merkur-Oberfläche.

Zu der Positionsangabe für dieses Bild (Bildmitte = $75^\circ O / 0^\circ N$) scheint mir folgende Anmerkung angebracht: Die Festlegung der Breitengrade ist offensichtlich, nämlich durch die Eigenrotation des Merkur vorgegeben und völlig analog zur Nomenklatur der Erdoberfläche. Wie bei der Erdoberfläche auch kann der Referenz-Längengrad ($0^\circ O$ oder W) grundsätzlich willkürlich festgelegt werden. Bei der Erdoberfläche hat man sich auf den Ort der Sternwarte in London-Greenwich geeinigt. Bei dem Merkur hat man sich für das Zentrum eines bestimmten Kraters (XXX: präzisieren)entschieden.

Bereits die bis jetzt (04.2012) publizierten Ergebnisse der Messenger-Mission haben etliche bisher akzeptierte Hypothesen über die physikalische und chemische Struktur des Merkur widerlegt, z.B. die Annahme, dass der Planet bis in sein Zentrum aus festem Gestein besteht. Interessanterweise haben sich dabei im Gegenzug die in der Einleitung zu diesem Abschnitt aufgeführten, insbesondere aus Analogie-Überlegungen im Vergleich zur Erde geschlossenen Vermutungen weitgehend bestätigt:

1. Auch der Planet Merkur besteht zu einem bedeutenden relativen Anteil aus Eisen und anderen schweren Elementen. Dieser relative Anteil ist mit

$$\frac{M_{Fe/Ni}}{M_{ges}} \approx 0,72 \quad (10.238)$$

sogar höher als bei der Erde. Er bildet den Kern des Planeten.

2. Ein signifikanter Anteil dieses eisenreichen Kerns ist flüssig.
3. Auch der Merkur besitzt einen den Kern umschließenden Mantel aus Silikaten. Der Massenanteil dieser Silikate beträgt etwa

$$\frac{M_{Silikate}}{M_{ges}} \approx 0,28 \quad (10.239)$$

4. 40% der Oberfläche sind mit Ablagerungen vulkanischen Ursprungs bedeckt. Die eigentliche Kruste besteht aus mehreren Schichten vulkanischen Ursprungs. Dabei handelt es sich um Feldspat und basalt-ähnliche Pyroxene, also Metall- oder Halogenid-Silikate unterschiedlichster chemischer Zusammensetzung.

5. Merkur erzeugt heute ein wenn auch äußerst schwaches Magnetfeld von

$$B \lesssim 0,5 \cdot nT \quad (10.240)$$

Messenger ist aber in der Lage, dieses Feld zu vermessen.

6. Merkur enthält langlebige radioaktive Isotope in einem relativen Anteil, der in guter Näherung den Verhältnissen bei der Erde entspricht. Damit erwarten wir einen vom Kern zur Oberfläche gerichteten Wärmestrom von einer Größenordnung gleich dem im Erdinneren fließenden Wärmestrom, lediglich korrigiert entsprechend der unterschiedlichen Geometrie und Gesamtmasse der beiden Planeten.

Als Beleg für die in der obigen Aufzählung an der 6. Stelle formulierte Aussage zeige ich in der Abb. 39 ein von der NASA publiziertes Zwischenergebnis über den

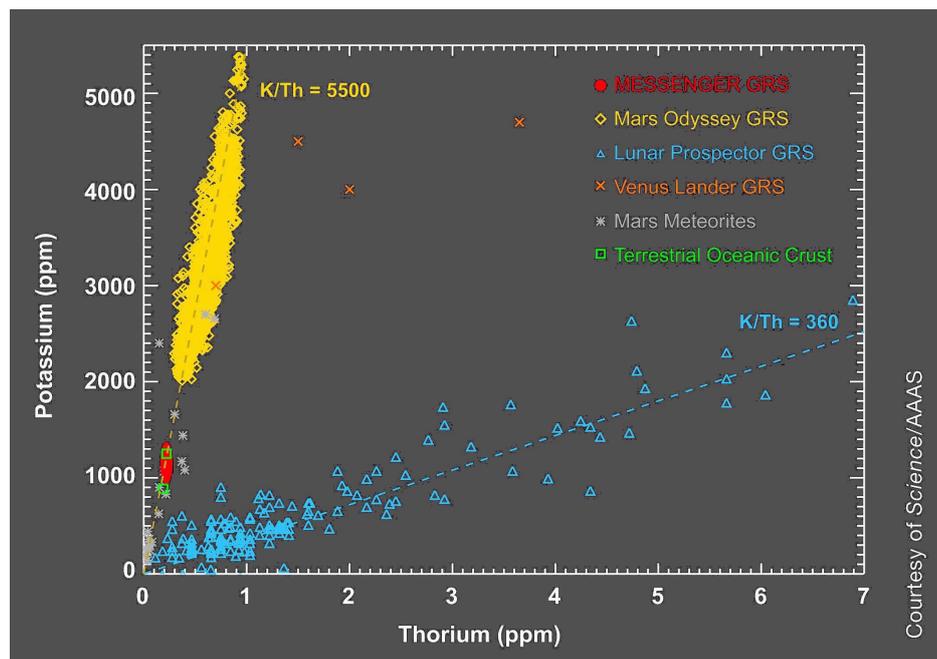


Abb. 39 Kalium/Thorium-Verhältnis von verschiedenen terrestrischen und extraterrestrischen Gesteinsproben
(Quelle: die Abb. basiert auf dem Bild 115 der NASA/Messenger image gallery; credit: courtesy AAAS/Science)

Zusammenhang zwischen dem gemessenen Kalium- und dem Thorium-Anteil in dem oberflächennahen Material des Merkur. Offensichtlich passen die von Messenger am Merkur gemessenen Wertepaare (rote Messpunkte) gut zu den am Mars (gelbe und graue Messpunkte) und an der Erdkruste (grüne Messpunkte) gemessenen Werten, jedoch nicht zu den Messungen an der Mondoberfläche (blaue Messpunkte).

Das in der obigen Aufzählung an der 5. Stelle genannte Magnetfeld ist vermutlich in einer frühen Phase der Entwicklung des Merkur deutlich stärker gewesen. Man vermutet, dass es diesen hohen Wert bereits etwa $5 \cdot 10^8 \cdot y$ nach der Bildung des Merkur verloren hat. Diese Vermutungen wurden durch Messenger-Messungen

bestätigt, die diese Sonde während seiner letzten oberflächennahen Bahn kurz vor dem harten Aufprall am 15.04.2015 ausführen konnte. Der Zeitpunkt, zu dem das Magnetfeld von einem Wert ähnlich dem des Erd-Magnetfeldes auf den heutigen sehr niedrigen Wert ansank, schätzt man auf Basis dieser Messungen zu

$$\Delta = -3,7 \dots -3,9 \cdot 10^9 \cdot y$$

Aus der Gesamtheit der aktuellen Messwerte, insbesondere aus Messungen der Reflexion von Radiowellen sehen sich die NASA-Wissenschaftler in der Lage, ein neues Konzept für die Schalenstruktur des Merkur zu entwerfen, s. Abb. 40. Zunächst

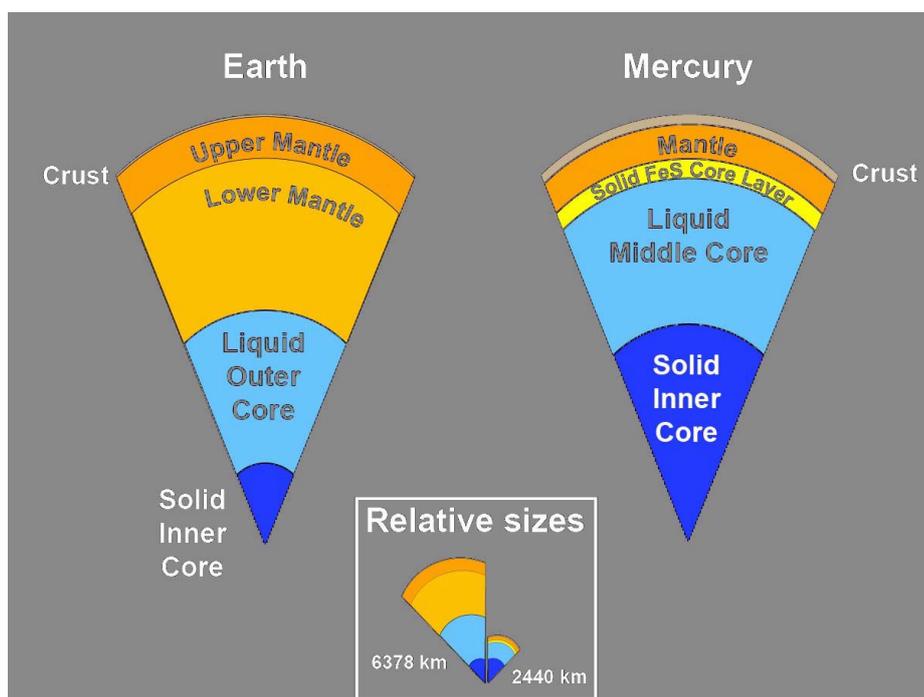


Abb. 40 Schalenstruktur von Erde und Merkur im Vergleich

(Quelle: NASA/Messenger Image Gallery; Credit: NASA/Johns Hopkins University Applied Physics Laboratory / Carnegie Institution of Washington)

einmal bleibt festzuhalten, dass die inneren Strukturen der beiden Planeten Erde und Merkur einander stärker ähneln als noch bis vor kurzem von vielen Wissenschaftlern angenommen wurde: Beide Planeten haben einen festen eisenreichen Kern, gefolgt von einer flüssigen, immer noch stark eisenhaltigen Schicht sowie von weiteren Schichten geringerer Massendichte. Den Abschluss bildet die als *Kruste* bezeichnete feste Oberflächenschicht. Diese Oberflächenschicht ist von Einschlagkratern überseht. Aus deren Anzahl kann man grob das Alter dieser Schicht abschätzen. Danach ist diese Schicht nur wenig jünger als der Merkur selbst, so dass es auf dem Merkur wohl

niemals einen der Plattentektonik auf der Erde verwandten Mechanismus gegeben hat.

Abgesehen von den deutlich unterschiedlichen geometrischen Verhältnissen dieser verschiedenen Schichten besteht der auffälligste Unterschied in der Existenz der inneren, ca. $100 \cdot km$ dicken Schicht aus festem FeS , die den Mantel des Merkur von dem flüssigen Teil des Kerns trennt. Über den Schmelzpunkt von FeS ,

$$T_m(FeS; 1 \cdot bar) = 1468 \cdot K \quad (10.241)$$

wissen wir, dass die Temperatur des Merkurs in dieser Tiefe bereits unter einem Wert dieser Größenordnung liegen muss (XXX: präzisieren). Zu berücksichtigen ist jedoch noch die Änderung des Schmelzpunktes beim Übergang von dem Wert $1 \cdot bar$ auf den an dieser Stelle herrschenden Druck. Eine Schicht verwandter Zusammensetzung hat die Erde nicht.

Eine ganze Gruppe von wichtigen Unterschieden beruht auf dem jeweiligen Gehalt an Sauerstoff. Im Gegensatz zur Erde, bei der nahezu alle Gesteine einen deutlichen atomaren Anteil an Sauerstoff enthalten, scheint beim Merkur die Bedeutung dieses Elements für den Aufbau der Gesteine wesentlich geringer zu sein. An seine Stelle ist dann häufig der Schwefel getreten und zwar in der nicht oxidierten Form. Außerdem ist im Mantel- und im Krusten-Material des Merkur der Anteil an Aluminium und Magnesium relativ zum Silizium deutlich höher als bei der Erde, so dass diese Mineralien vermutlich eine geringere Massendichte haben als die entsprechenden silizium- und sauerstoff-reicheren Mantel- und Krustenmaterialien der Erde.

Alle diese Fakten sind ein starker Hinweis darauf, dass der integrale atomare Anteil an Sauerstoff, der bei der Erde mehr als 0,5 beträgt, beim Merkur sehr viel niedriger ist. Eine nahe liegende Deutungshypothese hierfür ist, dass der zunächst auch im Merkur vorhandene Sauerstoff in einer sehr frühen Phase seiner Entwicklungsgeschichte als Gas in den interplanetaren Raum diffundiert ist, sodass bereits während der Phase der Erstarrung zu Mineralien kaum noch Sauerstoff verfügbar war. Zur Prüfung dieser Hypothese bestimmen wir die Größenordnung der Temperatur, die der Fluchtgeschwindigkeit von O_2 vom Merkur entspricht:

$$T \sim \frac{M_{O_2} \cdot v_{\text{Flucht}}^2}{2 \cdot \kappa} = \frac{32 \cdot 1,66 \cdot 10^{-27} \cdot kg \cdot \left(4,3 \cdot \frac{km}{s}\right)^2}{2 \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot \frac{J}{K}} = 3,6 \cdot 10^4 \cdot K \quad (10.242)$$

Diese Temperatur liegt interessanterweise in derselben Größenordnung wie die Temperatur, die man unter sehr vereinfachenden Annahmen für die Temperatur der Planetenoberfläche erhält, die der Merkur während seiner Entstehung im Anschluss an den Gravitationskollaps angenommen hatte, s. Aufgabe 19 des Heftes 3 (*Mechanik*).

Diese Unterschiede in der chemischen Zusammensetzung der äußeren Schichten von Erde und Merkur sind wohl auch der Grund dafür, dass ein bis an die Oberfläche gelangender Vulkanismus lediglich in einer sehr frühen Phase der Planetenentwicklung auch auf dem Merkur vorhanden war, dann aber sehr früh erloschen ist. Im

Inneren des Merkur existieren aber vermutlich weiterhin Masseströme, die den von dem Kernmaterial erzeugten Wärmestrom bis an die *FeS*-Schicht transportieren. Denn der Merkur erzeugt ein gut messbares Magnetfeld. Am Äquator beträgt es

$$B_{\text{Äqu.}} \sim 450 \cdot nT \quad (10.243)$$

Dieser Wert liegt wohl etwa um den Faktor 150 unter dem analogen Wert für die Erde. Man geht aber heute (2013) davon aus, dass das Magnetfeld des Merkur durch den Einfluss des Sonnenwindes (s. Abschnitt 10.4.1) stark abgeschirmt wird. Es sollte in Zukunft möglich sein, aus der 2-dimensionalen Struktur des oberflächennahen Magnetfeldes auf die Struktur der das Magnetfeld generierenden Masseströme zu schließen.

Infolge seiner Nähe zur Sonne beträgt die mittlere Oberflächentemperatur des Merkur

$$\langle T_O \rangle = 440 \cdot K \quad (10.244)$$

Auf den jeweils von der Sonne beschienenen Teilen der Oberfläche erreicht die Temperatur sogar Werte bis $700 \cdot K$.

Auch auf dem Merkur treten Jahreszeiten auf, also sich mit dem Umlauf um die Sonne periodisch wiederholende unterschiedliche klimatische Verhältnisse auf der Merkur-Oberfläche. Sie haben jedoch eine andere astronomisch-kinematische Ursache. Ihr Hauptbeitrag resultiert nicht aus der Verkippung der Achse der Eigenrotation gegen die Ebene der Bewegung des Merkur um die Sonne, sondern aus der starken Exzentrizität der Merkurbahn von mehr als 0,2. Hierdurch oszilliert die Energie-Einstrahlung auf die Merkur-Oberfläche mit einem relativen Hub von ca. 2,3 (!). Als Folge hiervon ist der klimatische Unterschied zwischen einem Merkur-Sommer und einem Merkur-Winter besonders groß. Es gibt jedoch keine klimatischen Unterschiede zwischen der nördlichen und der südlichen Hemisphäre.

Der Merkur hat nur noch eine Gashölle von extrem niedriger Massendichte. Der Gasdruck an der Oberfläche beträgt lediglich

$$p_O = 1,5 \cdot 10^{-15} \cdot \text{bar} = 1,5 \cdot 10^{-10} \cdot \text{Pa} \quad (10.245)$$

Diese Schicht hat jedoch eine relativ große vertikale Ausdehnung. Wegen dieser besonderen Eigenschaften wird sie nicht als Atmosphäre bezeichnet, sondern als *Exosphäre*. Sie entsteht primär durch den sog. *Sonnenwind* (s. Abschnitt 10.4.1), der bei seinem Auftreffen auf die Merkur-Oberfläche aus dieser verschiedene Partikel herausschlägt. Es handelt sich daher nicht um eine statisch an den Merkur gebundene Gasschicht sondern um den annähernd stationären Zustand, der sich durch das Zusammenwirken von Gas-Abdrift in den Weltraum und Gas-Erzeugung durch Erodieren des Oberflächenmaterials einstellt.

Durch die hochauflösenden Aufnahmen der Sonde *Messenger* wurde auch die Hypothese der Existenz von H_2O -Eis-Ablagerungen in der Nähe der Pole gestützt. Es handelt sich um durchaus beachtliche Gesamtmengen. Dass dies trotz der relativen

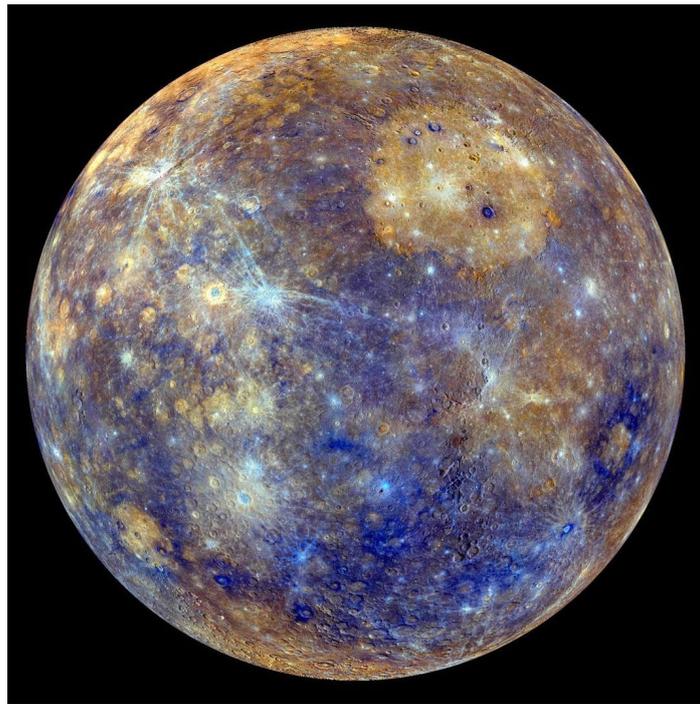


Abb. 41 Die Merkur-Oberfläche in farbgetreuem, aber stark angehobenen Farbkontrast, aufgenommen von der Sonde Messenger
(credit: NASA / JHU Applied Physics Lab / Carnegie Inst. Washington)

Nähe zur Sonne möglich ist, liegt daran, dass die Rotationsachse des Merkur nur um $0,01^\circ$ gegen die Achse seiner Bahnbewegung um die Sonne verkippt ist, so dass die Polbereiche immer nur **streifend** von der Sonne beschienen werden.

Ich zeige an dieser Stelle noch eine aktuellere Aufnahme der Merkur-Oberfläche, s. Abb. 41, die ebenfalls auf Aufnahmen der Sonde Messenger basiert. Der Kontrast in dieser Aufnahme entsteht durch das leicht unterschiedliche Reflexionsverhalten des Mars-Gesteins, wie es sich aus der jeweiligen Entstehungsgeschichte ergibt:

- Die dunkleren Regionen haben insbesondere für langwelligeres Licht einen niedrigen Reflexionsfaktor und sind auf dem Bild daher dunkelblau gefärbt. Diese Oberflächenbereiche sind besonders alt.
- Die in verschiedenen Richtungen verlaufenden hellen blauen oder farbneutralen Linien kennzeichnen relativ junge Teile der Oberfläche. Diese sind noch nicht so stark durch die intensive UV-Bestrahlung degradiert worden.
- Die gelblich schimmernden Regionen weisen auf ein mittleres Alter ihrer Gesteine hin.

Unsere Erkenntnisse über die chemische und physikalische Struktur des Merkur werden voraussichtlich einen signifikanten Schub erhalten, wenn die nun für 2017 geplante Raum-Mission *BepiColombo* der ESA erfolgreich durchgeführt werden kann. Sie wird in enger Absprache mit der NASA die Ergebnisse der Messenger-Mission weiter führen und 2 separate Orbiter auf eine Bahn um den Merkur lenken:

1. den *Mercury Planetary Orbiter MPO*, einen mit verschiedenen Kameras und Sensoren ausgerüsteten Satelliten, und
2. den *Mercury Magnetospheric Orbiter MMO*, der die Ursache für das magnetische Feld des Merkur untersuchen soll.

Diese Raum-Mission wurde nach dem Spitznamen des italienischen Ingenieurs Mathematikers *Giuseppe Colombo* (* 1920 in Padua/Italien; † 1984 ebenda) benannt. Colombo war u.a. maßgeblich an der Planung der Raum-Mission Mariner 10 beteiligt. Er war auch der erste, der die Idee eines Swing-By-Manövers formulierte. Durch diese Technik können Raumsonden während eines lang andauernden Flugs zum Ziel mit einem Himmelskörper, z.B. einem Planeten Energie austauschen, s. XXX. (XXX: Hinweis X)

Der Merkur besitzt keine Monde.

Als Abschluss dieses Abschnitts nenne ich einige aus meiner Sicht besonders wichtige bzw. interessante offene Fragen:

- Über welche Mechanismen und Strukturen gelangt der im Kernbereich des Merkur erzeugte Wärmestrom bis an die Planeten-Oberfläche? Warum ist das hierüber erzeugte Magnetfeld deutlich kleiner als das Magnetfeld der Erde ?
- Enthielt der Merkur in einer frühen Phase seiner Entwicklung einen ähnlichen relativen Anteil an Sauerstoff wie die Erde? Über welchen Mechanismus ist in diesem Fall dieser Sauerstoff in das Weltall entwichen?

Der Planet Venus (-)

In der Reihenfolge der jeweiligen Entfernungen der Planeten von der Sonne folgt auf den Merkur die *Venus*. Sie ist das hellste Objekt an unserem Nachthimmel. Wegen ihrer sehr geringen Neigung gegenüber der Ekliptik ist sie von der Erde aus höchstens kurzzeitig am Abend- oder Morgenhimmel zu sehen. Dann aber ist sie deutlich leichter zu erkennen als der Merkur, da der von den Raumpunkten Erde, Sonne, Venus gebildete Winkel bis zu 23° betragen kann. Sie führt eine rückläufige Eigenrotation aus, d.h. die Orientierung der Drehachsen ihrer Eigenrotation und Bewegung um die Sonne bilden einen Winkel nahe 180°. Von der Erde aus lassen sich bereits mit

einem einfachen Fernrohr die Phasen der Venus beobachten. Das sind, ebenso wie die Mondphasen (Abschnitt 3.5.3), die Anteile der von der Erde aus betrachteten Venusscheibe, die von der Sonne beleuchtet werden, in Abhängigkeit der geometrischen Positionen der 3 Objekte Erde, Venus und Sonne. Als erstem gelang diese Beobachtung 1610 Galilei, für den diese Beobachtung eine weitere starke Stütze für das heliozentrische Weltbild war.

Bis zu den ersten Raummissionen zur Venus verbarg dieser Planet nahezu alle seine Geheimnisse hinter seiner optisch dichten Wolkendecke, so dass die Wissenschaft bzgl. aller über die geometrischen Daten hinausgehenden Eigenschaften auf Spekulationen angewiesen war. Mit dem Vorbeiflug der Sonde Mariner-2 an der Venus in einer Minimalentfernung von $3,4 \cdot 10^4 \cdot km$ begann dann das Zeitalter der Venus-Erkundung über geeignete Raum-Missionen. Bis Ende 2005 wurden insgesamt 35 Missionen gestartet, deren Ziel die Venus war. Von diesen waren 20 zumindest teilweise erfolgreich. Als Meilensteine in dieser Entwicklung sehe ich folgende Missionen an:

1. Bereits die Sonde Mariner-2, die als erste überhaupt die Venus erreichte, lieferte erste verlässliche Daten über die Atmosphäre und die Temperatur an der Venus-Oberfläche.
2. Durch die verschiedenen Verena-Sonden der UdSSR gelang es in den Jahren 1967 bis 1975, detaillierte Messdaten aus den verschiedenen Schichten der Venus-Atmosphäre und auch Bilder und Messdaten von der Venus-Oberfläche zur Erde zu übertragen.
3. Die NASA-Mission Magellan kartographierte ab dem 10.08.1990 mit Hilfe eines Radar-Scanners 90% der Venus-Oberfläche.
4. Die ESA-Sonde befindet sich seit dem 11.04.2006 in einer stark elliptischen Umlaufbahn um die Venus und liefert seit dieser Zeit eine Fülle von Bildern und Messdaten(XXX: präzisieren). Der Abstand der Sonde von der Venus oszilliert zwischen $250 \cdot km$ und $6,6 \cdot 10^4 \cdot km$.

Die Venus ist nicht nur in ihrem äußeren Abmessungen der Erde sehr ähnlich, sie hat auch eine weitgehend ähnliche chemische Zusammensetzung in ihrem Inneren. Auf Basis der bis heute (2013) verfügbaren Messdaten hat die Wissenschaft als den inneren Aufbau der Venus das folgende (vorläufige) Modell entwickelt:

Die Venus besteht aus

- einem metallischen Kern mit einem Durchmesser

$$D_{\text{Kern}} \approx 3 \cdot 10^3 \cdot km \quad (10.246)$$

dieser Kern ist zumindest teilweise flüssig;

- einem Mantel aus Gesteinen ähnlich dem irdischen Olivin und Perovskit; die Dicke dieser Mantelschicht beträgt ebenfalls etwa

$$d_{\text{Mantel}} \approx 3 \cdot 10^3 \cdot km \quad (10.247)$$

und

- einer basaltischen Kruste von etwa

$$d_{\text{Kruste}} \approx 3 \cdot 10^3 \cdot km \quad (10.248)$$

Der metallische Kern enthält, ähnlich wie die Erde, noch nicht abgeklungene radioaktive Isotope, die eine den inneren Wärmehaushalt des Planeten beherrschende Wärmestromquelle bilden. Die Venus zeigt jedoch **keine** Plattentektonik. Das hängt vermutlich auch damit zusammen, dass das vermutlich anfangs auch auf der Venus vorhanden gewesene Wasser vollständig verschwunden ist. Dadurch konnte sich in die Gesteine der Mantelschicht kein Kristallwasser mehr einlagern, wodurch die Fließfähigkeit dieses Materials extrem reduziert wird. Wegen der fehlenden Plattentektonik kann nun aber der aus dem Kern kommende Wärmestrom nicht über konvektive Masseströme quasi-stetig bis nahe an die Venus-Oberfläche gelangen. Er staut sich im Inneren und bricht sich dann evtl. sporadisch durch eine massive vulkanische Aktivität den Weg an die Oberfläche. Durch genaue Analyse von Oberflächenaufnahmen im NIR-Kontrast, die von der VMC (**V**enus **M**onitoring **C**amera) der ESA-Sonde *Venus Express* aufgenommen worden sind, gelang es 2015 erstmals nachzuweisen, dass auch heute noch vulkanisch aktive Gebiete auf der Venus existieren ([23]).

Es gelang bisher nicht, ein signifikantes von der Venus erzeugtes Magnetfeld zu messen. Das lässt vermuten, dass die Masseströme im Inneren der Venus, wenn sie denn existieren, in viele einzelne Stromschleifen aufgeteilt sind.

Die Oberflächenschicht der Venus besteht zu ca. 90% aus Gesteinen, die typisch sind für einen vulkanischen Ursprung, s. auch Abb. 42. Ihre Topographie ähnelt der Topographie der Erde: 60% bestehen aus leichten Erhebungen mit Höhenunterschieden von maximal $\pm 500 \cdot m$. Es gibt aber auch hohe Gebirgszüge; die höchste Gebirgskette der Venus, die *Maxwell Montes*, erreicht Höhen bis zu $11,8 \cdot km$. Die Oberfläche enthält auch eine Vielzahl von z.T. riesigen Vulkanen mit Durchmessern bis zu $350 \cdot km$ sowie Gebiete mit Gesteinsformationen, die offensichtlich erstarrte Lavaströme darstellen. Der längste dieser Stränge, der *Mylitta Fluctus*, hat eine Länge von $800 \cdot km$. Den höchsten Vulkan, einen sog. *Pfannkuchen-Vulkan* mit dem Namen *Maat Mons*, zeigt die Abb. 43.

Eine weitere, für die Venus-Oberfläche typische topographische Struktur sind die *Coronae* (von corona (lat.) der Kranz, die Krone). Das sind kraterähnliche Strukturen, deren Begrenzungswall mehr oder weniger deutlich an eine Krone erinnert, und dessen innerer Bereich relativ eben ist. Man nennt diese Strukturen oft auch *Einbruch-Vulkane*. Es gibt von ihnen mehrere 100, der größte von ihnen, die *Artemis Corona*, hat einen mittleren Durchmesser von $2600 \cdot km$.

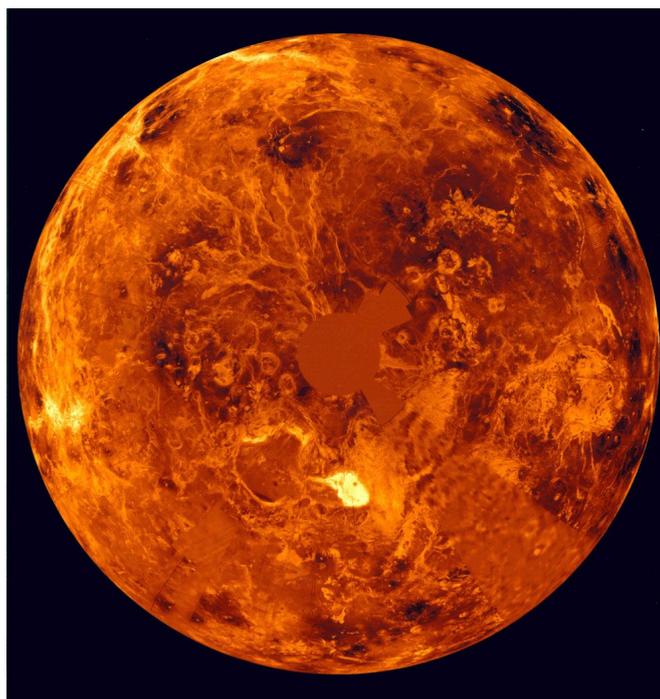


Abb. 42 Falschfarbenaufnahme der Nordpolregion des Planeten Venus, aus am 29.10.1991 von der Raumsonde Magellan erstellten Radarbildern der Venusoberfläche berechnet

(Quelle: nssdcftp.gsfc.nasa.gov/miscellaneous/planetary/magellan
NASA-Image-ID P-39334)

Auf der Oberfläche gibt es 963 Krater, die relativ gleichmäßig über die Oberfläche verteilt sind und offensichtlich durch Meteoriten-Einschläge entstanden sind, s. Abb. 44. Diese Abb. ist eine computergenerierte Graphik, die aus den Synthetic-Aperture-Radar-Messdaten der Magellan-Sonde erzeugt wurde. Die 3 wiedergegebenen Krater haben einen Durchmesser von

$$D_{\text{Saskia}} = 37,3 \cdot km ; D_{\text{Danilova}} = 47,6 \cdot km ; D_{\text{Aglaonice}} = 62,7 \cdot km \quad (10.249)$$

Die Farbgebung erfolgte in Anlehnung an die von den Sonden Verena-13 und -14 aufgenommenen Bilder der Venus-Oberfläche.

Auffällig ist, dass alle diese 963 Einschlagkrater relativ groß sind. Der mächtigste Krater mit dem Namen *Mead* (benannt zu Ehren der US-amerikanischen Kultur-Anthropologin *Margaret Mead* (* 1901 in Philadelphia/Penn.; † 1978 in New York)) hat einen Durchmesser von $270 \cdot km$. Kleinere Krater mit einem Durchmesser $< 2 \cdot km$ sind dagegen eher selten, wahrscheinlich weil Meteoriten, die sie erzeugen könnten, in der sehr dichten Atmosphäre zerplatzen und verglühen.

Die Erosion der Gesteine verläuft auf der Venus vergleichsweise langsam ab, da das Wasser als Mittel der Erosion schon seit sehr langer Zeit nicht verfügbar ist.

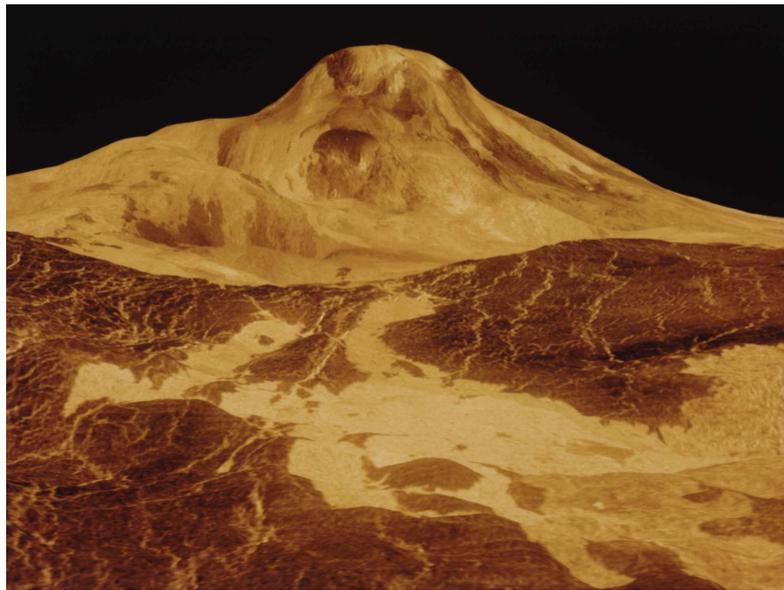


Abb. 43 Perspektivische Aufnahme des Maat Mons; aus Radarmessdaten erzeugte Computergraphik
(Quelle: NASA photo galery NSSDC)

Die ältesten Teile der Venus-Oberflächengesteine haben ein geschätztes Alter von

$$A_0(\text{Venus}) \sim 8 \cdot 10^8 \cdot y \quad (10.250)$$

Man könnte also vermuten, dass die Vulkane seit dieser Zeit nicht mehr aktiv sind. Andererseits wurde von 1978 bis 1992 durch die Venus-Pioneer-Sonde und seit 2006 von der Sonde Venus-Express die SO_2 -Konzentration in den höheren Schichten der Atmosphäre gemessen, s. Abb. 45. Diese Abb. zeigt (über dem künstlerisch gestalteten Hintergrund eines Blicks auf die Venus-Oberfläche) den zeitlichen Verlauf des SO_2 -Gehalts in diesen Schichten. Da dieses Gas, wenn es sich in diesen Schichten befindet, innerhalb von wenigen Tagen durch das Sonnenlicht zersetzt wird, sind diese Veränderungen ein klarer Hinweis darauf, dass sich die integrale SO_2 -Konzentration in den darunter liegenden Schichten der Atmosphäre während dieser Zeit zumindest um einen vergleichbaren relativen Anteil verändert haben muss. Dieses Messergebnis ist ein starker Hinweis darauf, dass es auf der Venus-Oberfläche während dieses Zeitraums, insbesondere 2006 zu starken vulkanischen Aktivitäten gekommen ist.

Diese Frage wird aktuell weiterhin kontrovers diskutiert.

Die Atmosphäre der Venus hat eine völlig andere chemische Zusammensetzung als die der Erde und demzufolge auch einen völlig anderen Aufbau, s. Abb. 46. Die bodennahe, ca. $50 \cdot km$ dicke Schicht besteht überwiegend aus CO_2 . Darauf folgt eine Schicht von ca. $20 \cdot km$ Dicke und bereits deutlich niedrigerer Massendichte, in der das Atom Schwefel dominiert, je nach lokaler Temperatur in der Form SO_2 oder H_2SO_4 .

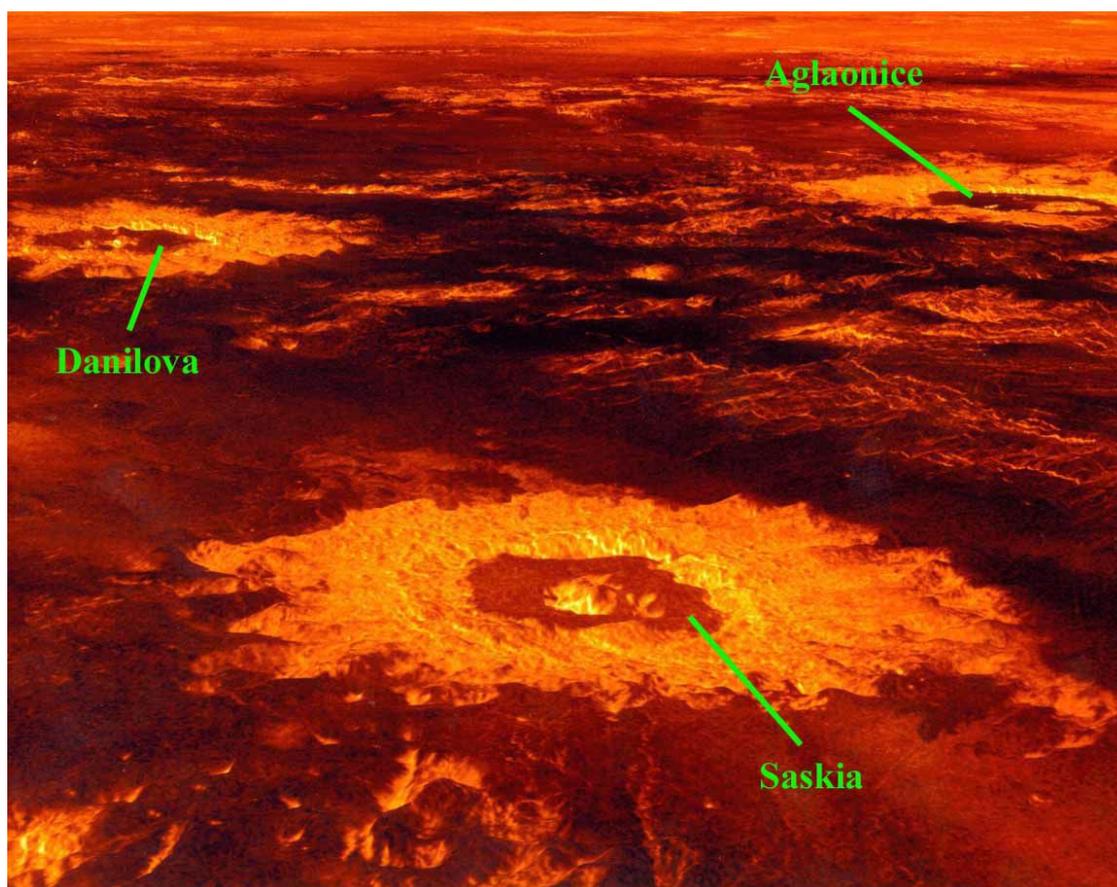


Abb. 44 Perspektivische Darstellung der Krater-Farm, einer Gruppe von 3 Kratern;
(Quelle: NASA NSSDC image gallery)

Diese Schicht bildet eine optisch dichte Wolkenschicht. In 90 bis 120 · km Höhe befindet sich eine Ozon-haltige Schicht, allerdings mit einer Gesamtkonzentration an Ozon, die etwa um den Faktor 10^2 bis 10^3 niedriger ist als die der irdischen Ozonschicht. Insgesamt ergibt sich für die Venus-Atmosphäre eine relative Massenverteilung von

$$\frac{M(CO_2)}{M} = 0,965 ; \frac{M(N_2)}{M} = 0,035 ; \frac{M(SO_2)}{M} = 0,15 \cdot 10^{-3} \quad (10.251)$$

Die Bedingungen an der Venusoberfläche sind heute durch Messdaten belegt:

$$T_O = 737 \cdot K = 464^\circ C ; p_O = 92 \cdot bar = 9,2 \cdot 10^6 \cdot Pa \quad (10.252)$$

Diese Werte sind für biologisches Leben ungeeignet und machen das technische Konzept auch einer unbemannten Venus-Erkundung durch eine Station, die auf der Venus-Oberfläche landet und über längere Zeit funktionsfähig verbleibt, sehr schwierig.

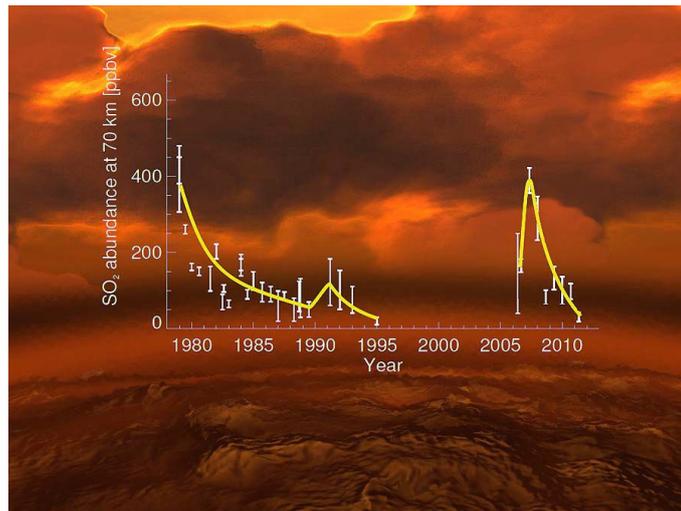


Abb. 45 Zeitliche Veränderung des SO_2 -Gehalts in größeren Höhen der Venusatmosphäre
(Credits: Data: E. Marq et al. (Venus Express); I. Esposito et al. (earlier data); background image : ESA/AOES)

Eine zusätzliche Besonderheit der Venus-Atmosphäre ist ihre sog. *Superrotation*. Sie strömt in ca. $4 \cdot d$ einmal um den Planeten. Dies entspricht einer Geschwindigkeit relativ zur Venus-Oberfläche von ca.

$$v_{\text{rad.}} = \frac{\pi \cdot D}{4 \cdot d} = 396 \cdot \frac{km}{h} \quad (10.253)$$

Aus Langzeitmessungen des Venus-Express geht nun hervor, dass diese Windgeschwindigkeiten sogar noch zunehmen. Die Abb. 47 zeigt die mittlere Geschwindigkeit von Wolkenformationen in $70 \cdot km$ Höhe im Verlauf der Jahre 2006 bis 2012. Die beiden in der Abb. gezeigten Messkurven sind die von 2 Auswertegruppen unabhängig von einander auf Basis desselben Bilddaten-Materials erzielten Ergebnisse. Beide Ergebnisse zeigen ein Anwachsen der Windgeschwindigkeit von ca. $300 \cdot \frac{km}{h}$ im Jahr 2006 auf ca. $400 \cdot \frac{km}{h}$ im Jahr 2012.

Eine kinematische Besonderheit des Planeten Venus ist seine besonders langsame Eigenrotation. Ein Venustag ist 197 Erdtage lang, also bereits fast 88% der Länge eines Venusjahres. Überdies rotiert die Venus im zu ihrer Umlaufbahn entgegengesetzten Richtungssinn. Ich sehe mich nicht in der Lage, hierfür eine auch nur annähernd plausible mögliche Ursache zu nennen:

- Ein Erklärungsversuch auf Basis der Gezeitenwirkung der Sonne scheidet aus. Denn diese ist sicherlich von derselben Größenordnung wie die Wirkung auf die benachbarten Planeten Merkur und Erde. Trotzdem ist deren Eigenrotation aktuell etwa um mehr als den Faktor 100 schneller.

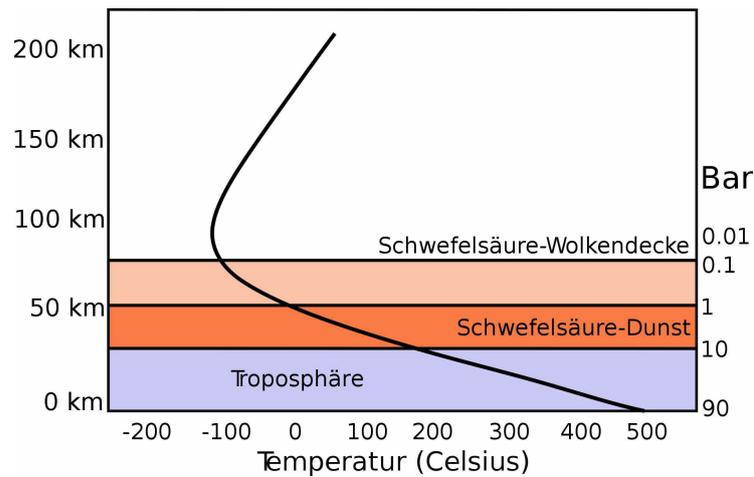


Abb. 46 Schichtstruktur der Venusatmosphäre (Prinzipiskizze)

- Man könnte auch annehmen, dass die Venus in einer frühen Phase ihrer Entwicklung mit einem interstellaren Körper zusammen gestoßen ist und hierbei auf sie ein Drehimpuls übertragen wurde, dessen Betrag etwas größer war als ihr bisheriger Drehimpuls. Zusätzlich müssten die Richtungen dieser beiden Drehimpulse in guter Näherung entgegengesetzt orientiert gewesen sein. Ein derartiges Ereignis mit derartig fein auf einander abgestimmten Parametern ist mit Sicherheit extrem selten. D.h. auch dieser Deutungsversuch ist nicht überzeugend. Auch die sehr niedrige Exzentrizität der Venusbahn spricht gegen diese Hypothese.

Die Venus ist heute nicht mehr weit entfernt von dem Zustand der *gebundenen Rotation*, bei dem die Umlaufzeit der Bahnbewegung um die Sonne und die Zeit der Eigenrotation identisch sind. Um diesen Zustand zu erreichen, wird die Venus durch den Zustand der Rotationsgeschwindigkeit $T_r = \infty$ hindurch gehen. Erst bei dem Zustand $T_r = T_b$ werden die energieverzehrenden Effekte der Gezeitenwirkung zu Null. Dieser Zustand ist z.B. für die Bewegung der Erdmondes um die Erde bereits gegeben.

Die Venus besitzt keine Monde.

Der Planet Mars (-)

Der in Richtung der äußeren Bereiche unseres Planetensystems auf die Erde folgende Planet ist der *Mars*. Dank des nur moderaten Unterschiedes zwischen den Bahnradien von Erde und Mars von ca. $0,5 \cdot AE$ ist der Mars bereits mit einfachen optischen Fernrohren vom Erdboden aus gut zu erkennen. Es lassen sich sogar gewisse Strukturen auf seiner Oberfläche erkennen. Wegen dieser in früheren Zeiten oft als *Marskanäle* bezeichneten Strukturen weckte er schon früh die Phantasie einer breiteren Schicht

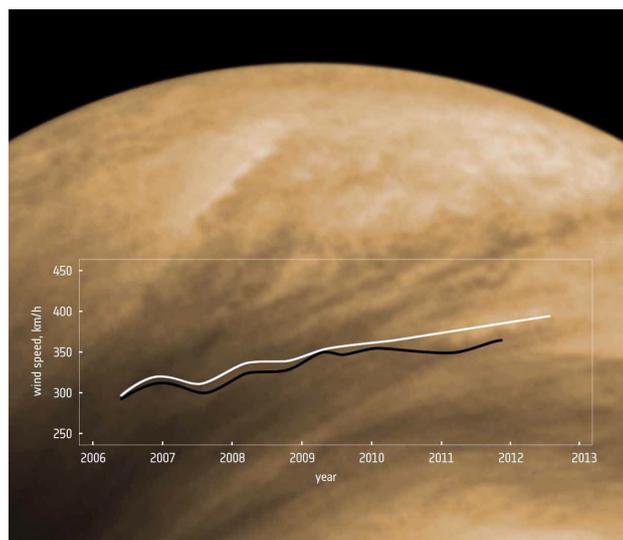


Abb. 47 Windgeschwindigkeit in der Venus-Atmosphäre in $70 \cdot km$ Höhe
(Quelle: ESA/Space Science/ Venus Express)

von astronomisch Interessierten. Vielleicht auch deswegen, primär aber wohl wegen seiner für derartige Projekte vergleichsweise günstigen Oberflächenbeschaffenheit, ist der Mars bis heute derjenige Planet, der am häufigsten als Ziel einer Raumfahrtmission ausgewählt wurde. Aktuell (2013) waren es bisher insgesamt 41, von denen allerdings nur 15 zumindest einen Teilerfolg erzielen konnten. Ich verzichte an dieser Stelle auf eine vollständige Aufzählung dieser Missionen, sondern hebe nur einige Meilensteine hervor:

1. Der Sonde Mariner 4 der USA gelang 1965 der 1. Vorbeiflug am Mars; die dabei aufgenommenen Bilder wurden aus einer Entfernung von minimal $9844 \cdot km$ aufgenommen.
2. Die Sonden Viking 1 und 2 der USA landeten 1969 auf dem Mars und übertrugen Messdaten der Mars-Atmosphäre und des Bodens zur Erde.
3. Der Mars Global Surveyor der NASA befindet sich seit 09.1997 auf einer Umlaufbahn um den Mars und erstellte bis 01.2006 kontinuierlich kartographische Aufnahmen der Mars-Oberfläche.
4. Der Mars-Express der ESA befindet sich seit 2003 auf einer Umlaufbahn über die Pole und photographiert seitdem die unterschiedlichsten Objekte in vorgebarerer Auflösung und Filterung. Der von ihm ausgelöste Landungseinheit Beagle-2 ist wie geplant auf dem Mars gelandet. Der Mars-Express hat jedoch keine Signale von dieser Einheit empfangen können.

5. Aufbauend auf den Erfahrungen mit mehreren Vorläufer-Apparaten befindet sich seit dem 06.08.2012 der Mars-Roboter *Curiosity* der NASA auf der Mars-Oberfläche und steuert verschiedene Ziele an, um dort detaillierte Bodenuntersuchungen auszuführen.

Insgesamt lieferten, und liefern täglich auf das Neue, diese Missionen eine Fülle von Bildern und wissenschaftlichen Messdaten, die es heute ermöglichen, ein bereits detailreiches Bild von der Struktur und der physikalisch/chemischen Geschichte dieses Planeten zu zeichnen, auch wenn viele wichtige Fragen weiterhin als noch offen bezeichnet werden müssen.

Der Planet Mars zeigt (bereits) bei visueller Betrachtung von der Erde aus eine deutlich orangefarbene bis rote Färbung, s. Abb. 48 (a). Wohl mit aus diesem Grund hat er seinen nach dem römischen Kriegsgott *Mars* benannten Namen erhalten. Ursache dieser Färbung ist der in den großen Ebenen der Marsoberfläche reichlich vorhandene Anteil an Eisenoxid.

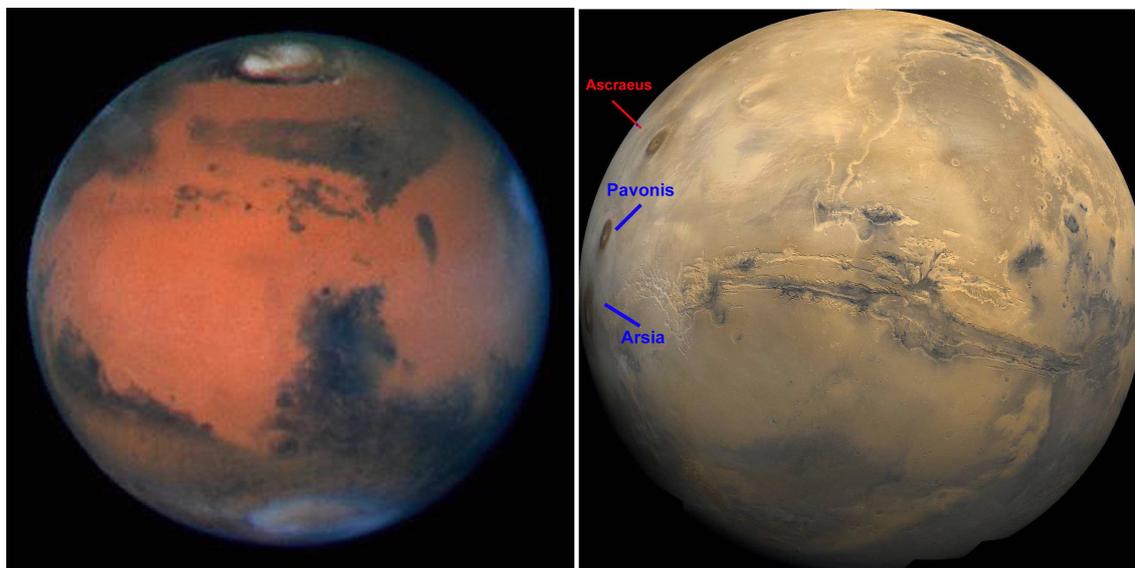


Abb. 48 (a) Echtfarben-Aufnahme des Mars mit der Wide Field Planetary Camera des Hubble Telescopes

(Quelle: Hubble Image Gallery; Credit: David Crisp and the WFPC2 Science Team (Jet Propulsion Laboratory / Caltech / NASA)

(b) Blick auf den Mars aus einer Höhe von $2500 \cdot km$

(Quelle: nssdc.gsfc.nasa.org/image/planetary/mars/marsglobe.jpg)

Die für die Abb. 48 (a) benutzte Aufnahme wurde am 10.03.1997 erstellt. Zu diesem Zeitpunkt herrschte auf der nördlichen Hemisphäre des Mars Frühling und der Abstand Erde-Mars war mit ca. $1 \cdot 10^8 \cdot km$ annähernd minimal. Der Mars-Nordpol befindet sich auf dem Bild oben im Bereich des weißen Fleckens. Dieser besteht aus

einer Mischung von CO_2 - und H_2O -Eis. Die blauen Flecken insbesondere in der Nähe des Südpols sind H_2O -Eiswolken. Das für die Abb. 48 (b) verwendete Bild mit der NASA-ID MF07S078 wurde am 22.02.1980 von der Sonde Viking-1 erstellt. Die Schwarz-Weiss-Aufnahmen konstruiert und perspektivisch auf eine Beobachtung aus einer Höhe von $2500 \cdot km$ umgerechnet. Im Zentrum dieses Bildes liegt der Canyon *Valles Marinensis*, s. auch Abb. 49. Am linken Bildrand erkennt man die 3 Vulkane *Ascraeus*, *Pavonis* und *Arsia*.

Die mittlere Massendichte des Mars beträgt etwa 71% der Dichte der Erde, s. die auf S. 1271 wiedergegebene Tabelle. Das lässt zum einen bereits vermuten, dass die chemische Zusammensetzung beider Planeten wohl ähnlich ist. Zum anderen muss auf Grund der fast um eine Größenordnung kleineren Gesamtmasse bei allen thermisch gesteuerten Abläufen in der Entwicklung des Mars mit deutlich kleineren Zeitkonstanten gerechnet werden. Auch der Mars besteht aus einem Gesteinsmantel und einem metallreichen Kern. Letzterer nimmt etwa 12% des Planetenvolumens ein,

$$D_{\text{Kern}} = 3,04 \dots 3,68 \cdot 10^3 \cdot km \quad (10.254)$$

enthält größere Mengen an Schwefel,

$$\frac{M_S(\text{Kern})}{M(\text{Kern})} \approx 0,14 \dots 0,17 \quad (10.255)$$

und ist flüssig. Weitere Informationen über den inneren Aufbau des Mars erwarten wir von der NASA-Sonde *InSight* (**I**nterior **E**xploration and **U**sing **S**eismic **I**nvestigations, **G**eodesy and **H**eat **T**ransport), deren Start für März 2016 geplant ist.

Die Mars-Oberfläche enthält eine größere Anzahl Vulkane von z.T. monumentalen Abmessungen. Der größte von ihnen, der *Olympus Mons* ist mit einer Höhe von $24 \cdot km$ der größte unseres Planetensystems. Die Vulkane sind aber heute anscheinend alle inaktiv. Dies lässt vermuten, dass der auf dem Mars ursprünglich vorhanden gewesene Vulkanismus bereits erloschen ist. Hierfür spricht auch, dass der Mars wohl ursprünglich ein Magnetfeld der Größenordnung XXX besaß, das aber heute nicht mehr vorhanden ist. Wenn wir uns jedoch die Ergebnisse unserer Abschätzungen über den Wärmetransport im Inneren der Erde in Erinnerung rufen, gibt es für das Erlöschen des Vulkanismus auf dem Mars keine einfache Erklärung: Da wir davon ausgehen, dass auch der Mars einen *Fe/Ni*-reichen Kern besitzt mit einer vergleichbaren, vielleicht um den Faktor 8 kleineren Masse, dann enthält er vermutlich auch einen entsprechenden Anteil an radioaktiven Isotopen (insbesondere K_{19}^{40} , U_{92}^{238} , Th_{90}^{232}), s. hierzu auch die Abb. 39 und die hierzu im Absatz S. 1274 geführte Diskussion. Wir erwarten also eine Wärmestromquelle im Inneren des Mars, dessen Strom wie bei der Erde nur über Konvektionsströme an die Marsoberfläche gelangen kann, wenn nicht die Temperaturdifferenz zwischen dem Ort dieser Wärmestromquelle und der Marsoberfläche unphysikalisch hohe Werte annehmen soll. Eine denkbare Erklärung wäre, dass der Vulkanismus intermittierend aktiv ist, dann aber

mit um so intensiveren Auswirkungen. Wir werden wohl auf neue Messdaten insbesondere von der Sonde *InSight* warten müssen, bis diese offene Frage (vielleicht) beantwortet werden kann.

Auf Grund der geophysikalischen Erkenntnisse, die aus den an der Erde erzielten Messdaten gewonnen wurden, geht man heute davon aus, dass es zwischen den Phänomenen

- des Wärmetransports durch Masseströme,
- des aktiven Vulkanismus und
- der Plattentektonik

eine enge logische Verknüpfung gibt. Wenn es daher zumindest in einer frühen Phase der Marsentwicklung diesen Vulkanismus gegeben hat, dann erwarten wir zumindest einige Zeugnisse einer Art von Plattentektonik, s. Absatz S. 1250. Eine typische Struktur, die aus den Bewegungen derartiger Platten resultiert, sind Gräben, die sich in den Bereichen der Divergenzlinien bilden, weil an diesen Stellen 2 Platten auseinander gerissen werden. Auf der Erde ist hierfür der Grand Canyon in den USA ein typisches Beispiel. Die am Anfang dieses Abschnitts erwähnten Marskanäle sind nichts anderes als derartige Divergenz-Gräben. Die Abb. 49 zeigt den größten dieser Gräben, den *Valles Marinenses*, als Vogelflugaufnahme konstruiert aus den Daten, die die Sonde Mars-Express während 20 Mars-Umläufen erstellt hat. Die Höhenausdehnung des Reliefs ist in dieser Aufnahme 4-fach überhöht wiedergegeben. Der Valles Marinenses ist mehr als $4000 \cdot km$ lang und bis zu $200 \cdot km$ breit. Er hat eine mittlere Grabentiefe der Größenordnung $7 \cdot km$, also mehr als das 3-fache des Grand Canyon. Er liegt in unmittelbarer Nachbarschaft zu dem riesigen Vulkan *Olympus Mons*.

Die Mars-Oberfläche enthält heute kein freies Wasser. An Stellen, die ganzjährig nicht von der Sonneneinstrahlung erreicht werden, findet man jedoch auch heute noch festes H_2O an der Oberfläche. Die Abb. 50 zeigt ein derartiges Beispiel, nämlich das Innere eines Kraters, der sich in der größten Flachebene des Mars befindet, der *Vastitatis Borealis*. Diese Ebene erstreckt sich bis in hohe nördliche Breitengrade. Der in dieser Abb. wiedergegebene Krater liegt knapp nördlich des 70-ten Breitengrades und hat, vom Kraterrand gerechnet, eine Tiefe von $2 \cdot km$. Daher liegt der untere Bereich dieses Kraters auf Dauer im Schatten der Sonneneinstrahlung, und es herrschen dort extrem niedrige Temperaturen. Der blauweiße Bereich am Boden dieses Kraters besteht aus H_2O -Eis.

Die Polkappen des Mars sind mit einer Kappe aus einer Mischung von H_2O -Eis und CO_2 -Eis bedeckt. Durch die Sonde Mars-Express gelang es, den Bereich des Nordpols in hoher Auflösung aufzuzeichnen, s. Abb. 51. Dieses Bild wurde aus insgesamt 57 Einzelaufnahmen erstellt, die jeweils aufgenommen wurden, wenn die Sonde den Nordpol des Planeten auf einer besonders engen Bahn (zwischen 300 und

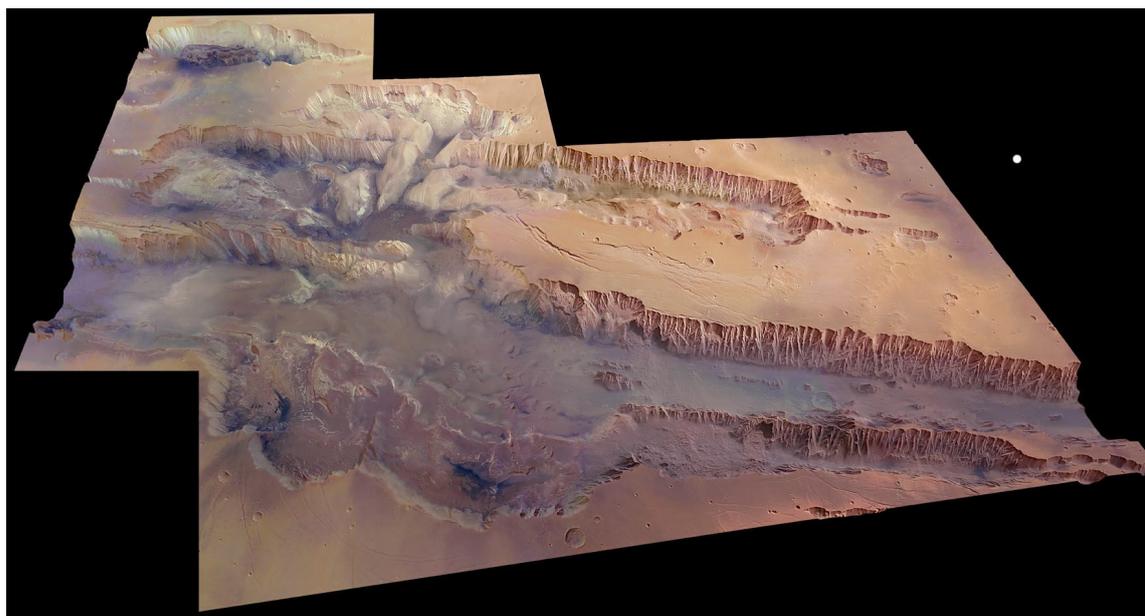


Abb. 49 Der Canyon *Valles Marineris*, in Echtfarben aufgenommen von der Sonde Mars Express
(Quelle: ESA/DLR/FU Berlin (G. Neukum))

500 · km) überflog. Diese den Nordpol bedeckende Eiskappe besteht überwiegend aus H_2O -Eis und ist bis zu ca. 2 · km dick, wie Radarmessungen zeigten, die ebenfalls vom Mars-Express ausgeführt wurden. Diese Schicht aus H_2O -Eis ist von einer Schicht aus CO_2 -Eis bedeckt, die zwischen einigen mm und einigen cm dick ist. Die in der Abb. 51 deutlich erkennbaren spiralförmigen Abstufungen entstehen durch den jahreszeitlichen Wechsel von Perioden der Sublimation von CO_2 und des Aufwachsens von H_2O -Eisschichten.

Ein analoger Mechanismus tritt auch am Mars-Südpol auf und führt hier ebenfalls zu einem System abgestufter Schichten, s. Abb. 52. (XXX: Der diese Abb. diskutierende Text ist noch nicht verfügbar.)

Dank der Ergebnisse der verschiedenen Mars-Sonden gibt es heute eine Vielzahl von eindeutigen Hinweisen darauf, dass auf dem Mars in seiner frühen Vergangenheit (vermutlich bis vor etwa $3,5 \cdot 10^9 \cdot y$) Oberflächenwasser in großem Umfang existierte. Dieses wird dann zu entsprechender Wettertätigkeit geführt haben: Verdunstung von Wasser über den Seen und Ozeanen, Regenfälle in den Bergen und die Bildungen eines Systems von z.T. riesigen Flüssen, in denen das Wasser zurück in die Niederungen strömte. Der in der Abb. 53 wiedergegebene ca. 8 · km tiefe Graben im nordwestlichen Teil des Valles Marineris enthält einen dieser Belege. Denn an seinen Hängen erkennt man deutlich ein System von talwärts gerichteten Vertiefungen, die kaum anders gedeutet werden können als durch Wasserströmungen



Abb. 50 Krater im großen Flachland (Vastitatis-Borealis) des Mars, 2005 von der ESA-Sonde aufgenommen

(Quelle: diese Abb. basiert auf dem ESA-Photo der Bez. 20622_3; Credit: ESA/DLR/FU Berlin G. Neukum)

im Laufe von mehreren $10^8 \cdot y$ erodierte Strukturen. Außerdem konnten an dieser Stelle gips-ähnliche Gesteine nachgewiesen werden. Als Gips bezeichnet man hydratisiertes Calciumsulfat der Bruttoformel $Ca(SO_4)_2 \cdot 2H_2O$. Es bildet sich entweder als Niederschlag in mit Calciumsulfat übersättigtem Wasser oder bei der Verwitterung von sulfidischen Erzen in ausreichend feuchter Umgebung. In jedem Fall ist daher die Existenz derartiger Gesteine ein eindeutiges Indiz darauf, dass auf der Marsoberfläche zu dem Zeitpunkt, in dem sich diese Gesteine bildeten, Wasser vorhanden war.**

Auch die nun folgende, im September 2012 erstellte Aufnahme der Sonde Curiosity ist eine starke Stütze für die Annahme von über längere Zeit auf dem Mars vorhanden gewesenem fließendem Oberflächenwasser. In einem flachen Graben wurden cm -große Kieselsteine gefunden (s. Abb. 54), wie sie wohl in der Natur nur durch langjährigen Transport in einem strömenden Bach oder Fluss geformt werden. An dieser Stelle befand sich in der Mars-Vergangenheit wohl über längere Zeit ein zumindest knie-tiefer Bach mit strömendem Wasser.

Gesteinsanalysen, die Curiosity Anfang 2013 durch Probebohrungen in einem dieser Flussbette erstellte, ergaben hohe Anteile an Tonmaterialien und Sedimen-

** Auf dem Internet-Portal der ESA ([44]) findet der Leser die virtuelle Video-Aufzeichnung eines Hubschrauberflugs durch diesen Canyon. Dieses Video wurde aus einer Vielzahl von Realbildern berechnet, die die Mars-Express-Sonde aufgenommen hat.



Abb. 50 Krater im großen Flachland (Vastitatis-Borealis) des Mars, 2005 von der ESA-Sonde aufgenommen

(Quelle: diese Abb. basiert auf dem ESA-Photo der Bez. 20622_3; Credit: ESA/DLR/FU Berlin G. Neukum)

im Laufe von mehreren $10^8 \cdot y$ erodierte Strukturen. Außerdem konnten an dieser Stelle gips-ähnliche Gesteine nachgewiesen werden. Als Gips bezeichnet man hydratisiertes Calciumsulfat der Bruttoformel $Ca(SO_4)_2 \cdot 2H_2O$. Es bildet sich entweder als Niederschlag in mit Calciumsulfat übersättigtem Wasser oder bei der Verwitterung von sulfidischen Erzen in ausreichend feuchter Umgebung. In jedem Fall ist daher die Existenz derartiger Gesteine ein eindeutiges Indiz darauf, dass auf der Marsoberfläche zu dem Zeitpunkt, in dem sich diese Gesteine bildeten, Wasser vorhanden war.**

Auch die nun folgende, im September 2012 erstellte Aufnahme der Sonde Curiosity ist eine starke Stütze für die Annahme von über längere Zeit auf dem Mars vorhanden gewesenem fließendem Oberflächenwasser. In einem flachen Graben wurden *cm*-große Kieselsteine gefunden (s. Abb. 54), wie sie wohl in der Natur nur durch langjährigen Transport in einem strömenden Bach oder Fluss geformt werden. An dieser Stelle befand sich in der Mars-Vergangenheit wohl über längere Zeit ein zumindest knie-tiefer Bach mit strömendem Wasser.

Gesteinsanalysen, die Curiosity Anfang 2013 durch Probebohrungen in einem dieser Flussbette erstellte, ergaben hohe Anteile an Tonmaterialien und Sedimen-

** Auf dem Internet-Portal der ESA ([44]) findet der Leser die virtuelle Video-Aufzeichnung eines Hubschrauberflugs durch diesen Canyon. Dieses Video wurde aus einer Vielzahl von Realbildern berechnet, die die Mars-Express-Sonde aufgenommen hat.

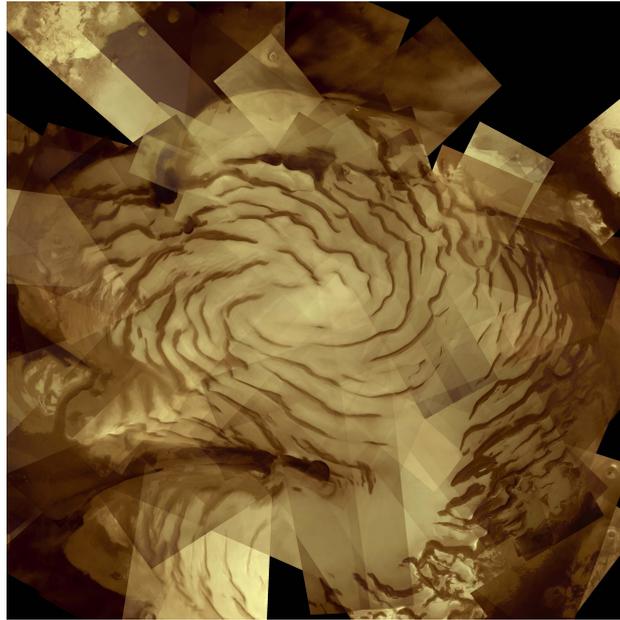


Abb. 51 Nordpolregion des Mars, aufgenommen von der HRSC der Mars-Express-Sonde aus einer Höhe von 300 bis 500 · km
(credit: ESA/DLR/FU Berlin _ G. Neukum)

ten, die reichliche Mengen an S , N , P , H , O und C enthielten und zwar in einer Zusammensetzung, die die Bildung von Mikroben fördert. Dies sehen die NASA-Forscher als einen weiteren starken Hinweis darauf an, dass in einer frühen Phase der Marsentwicklung zumindest primitives Leben auf dem Mars möglich war. Ob die Natur diese Möglichkeit auch wirklich genutzt hat, ist damit jedoch nicht geklärt.

Aktuelle (2013) Auswertungen der NASA-Sonde MRO belegen die Existenz einer H_2O -angereicherten Schicht in geringen Tiefen unterhalb der Mars-Oberfläche zumindest an zahlreichen Stellen der Oberfläche. Dies konnte aus dem Radarsignal vom Boden frisch entstandener Einschlagkrater geschlossen werden.

Aktuell besitzt der Mars nur eine äußerst dünne Atmosphäre, die an der Mars-Oberfläche ein Druck von

$$p_O = 6,36 \cdot 10^{-3} \cdot bar = 636 \cdot Pa \quad (10.256)$$

erzeugt. Sie besteht zu 95% aus CO_2 . Die genaue Zusammensetzung zeigt die folgende Tabelle

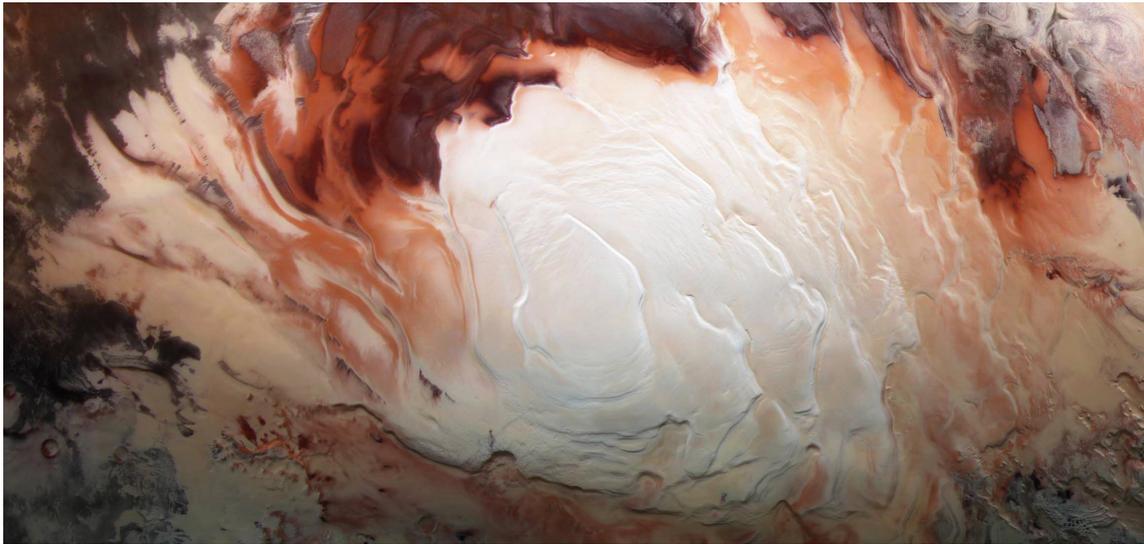


Abb. 52

	$\frac{M}{M_{ges}}$	Quelle
CO_2	0,9532	
N_2	0,027	
Ar	0,016	
O_2	$1,3 \cdot 10^{-3}$	
CO	$0,8 \cdot 10^{-3}$	
H_2O	$0,2 \cdot 10^{-3}$	
CH_4	$< 5 \cdot 10^{-3} \cdot ppm$	LIDAR des Curiosity

Bzgl. des Gehalts von Methan in der Mars-Atmosphäre gab es 2004 positive Hinweise, die sich aber durch die Messungen des am Curiosity installierten LIDAR-Messsystems nicht bestätigt haben. Es gibt gute Gründe für die Annahme, dass der Mars während einer frühen Phase seiner Existenz, etwa während der ersten $1 \cdot 10^9 \cdot y$, eine deutlich dichtere Atmosphäre besaß, die danach jedoch aus bis heute nicht eindeutig bekannten Gründen verschwunden ist.

Auch auf dem Mars gibt es einen periodischen Wechsel der klimatischen Bedingungen in Form von Jahreszeiten. Da jedoch die Exzentrizität der Bahnbewegung relativ groß ist (s. Tabelle S. 1270), die Neigung der Rotationsachse dagegen einen ähnlichen Wert hat wie die der Erde, werden auf dem Mars die Jahreszeiten von der Bahnbewegung dominiert und nicht von der Orientierung der Rotationsachse relativ zur Verbindungslinie Planet/Sonne. Die klimatischen Unterschiede zwischen der nördlichen und der südlichen Halbkugel bilden daher nur eine Störung dieser generellen Aussage. Auf der gesamten Marsoberfläche ist also Sommer, wenn der



Abb. 53 Teilansicht des Marsgrabens Hebes-Chasma nahe dem Mars-Äquator (aufgenommen von der Marssonde Mars-Express)
(Quelle: ESA multimedia gallery / image; ESA/DLR/FU Berlin (G. Neukum) ID-No. SEM0E5R03EF)

Mars sich nahe seinem Perihel befindet, und es ist Winter, wenn er nahe am Aphel ist. Bei genügend tiefen Temperaturen bilden sich lokal (bevorzugt im Bereich der Pole) Wolken, die ebenso wie die Atmosphäre überwiegend aus CO_2 bestehen, und es kommt dann auch zu Niederschlägen aus CO_2 -Partikeln. Wegen des im Bereich der Wolken stark erhöhten Reflexionsfaktors ε beeinflusst dieses Phänomen deutlich das lokale Wetter.

Trotz der nur geringen Massendichte der Atmosphäre werden in ihr häufig z.T. heftige Stürme angeworfen, die dann die Staubschichten aufwirbeln, die große Teile der Mars-Oberfläche bedecken. Da diese Staubschichten in merklichem Umfang eisenhaltige Verbindungen enthalten, färbt sich während dieser Stürme die Mars-Atmosphäre deutlich rötlich, s. Abb. 48 (a).

Es existieren heute vermehrt Anzeichen dafür, dass auch die Mars-Atmosphäre in einer früheren Phase der Entwicklung des Planeten wesentlich dichter war und vermutlich auch eine deutlich andere chemische Zusammensetzung hatte. Wir betrachten hierzu die in der Abb. 55 wiedergegebene Mars-Landschaft. Sie zeigt den

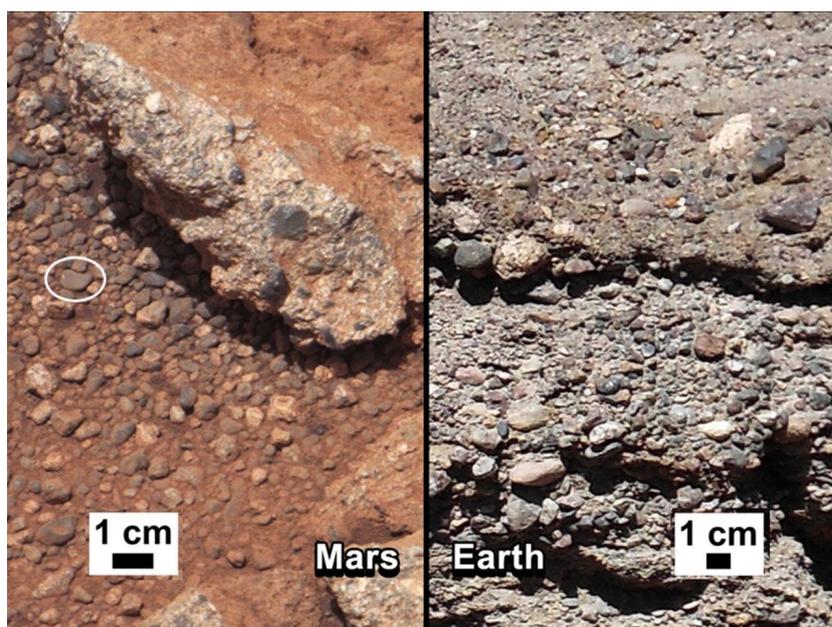


Abb. 54 Steinige Ablagerungen in einem Marsgraben und in einem Flussbett auf der Erde

(credit: NASA/JPL/Caltech/MSSS and PSI)

Blick auf den Berg *Aeolis Mons* (früher häufig als Mont Sharp bezeichnet), den ca. $5 \cdot km$ hohen Berg im Zentrum des *Gale Crater*, der wiederum am Nordwestrand der Ebene mit dem Namen *Aeolis* liegt. Der Boden dieses Kraters wurde von der NASA als Landestelle für ihren Roboter Curiosity ausgewählt. Die Abb. 55 wurde von dem Mast des Curiosity aus mit einem Teleobjektiv aufgenommen. Die Struktur dieses Berges erinnert klar an Erhebungen auf der Erde, die aus Sedimentschichten bestehen, die nach ihrer Bildung durch tektonische Aktivitäten gehoben wurden und danach über eine ausreichend lange Zeit der Erosion durch Regen und Wind ausgesetzt waren. Die Abb. 56 zeigt zum Vergleich ein irdisches Sedimentgestein, das in einer frühen Phase der erdgeschichtlichen Entwicklung entstanden ist und vor etwa $1 \cdot 10^8 \cdot y$ mit der Bildung der Pyrenäen an die Erdoberfläche gehoben und dabei verkippt wurde. Es liegt also nahe anzunehmen, dass auch dieser Berg auf dem Mars auf eine analoge Weise entstanden ist und geformt wurde. Das würde bedeuten, dass im Anschluss an die Bildung des Gale Kraters (vermutlich durch den Einschlag eines Meteoriten) dieser evtl. in seiner ganzen Ausdehnung mit Sedimentschichten gefüllt wurde, wobei die Schichtung dadurch entstand, dass die Primäreffekte, die zu den sedimentierenden Partikeln führte, langzeitigen Schwankungen unterworfen war. Ob diese Sedimentation in einem See stattfand, der zu dieser Zeit den Krater ausfüllte, oder ob es sich um eine reine Windverwirbelung handelte, wird heute noch kontrovers diskutiert. Im Anschluss an diese Sedimentation wurde dann der größte



Abb. 55 Aufnahme der Marsoberfläche nahe der Landestelle der Sonde Curiosity v. August 2012;
(credit: NASA/JPL-Caltech/MSSS)

Teil des Kraters durch Erosion wieder freigelegt. Selbst über lange Zeiten der Größenordnung 10^8 bis $10^9 \cdot y$ betrachtet sind derartige Effekte nur dann vorstellbar, wenn die Atmosphäre damals deutlich dichter war als sie heute ist. Ein weiteres, aktuell (2014) entdecktes Indiz für die Berechtigung dieser Annahme ist ein ca. $2 \cdot m$ langer Eisenmeteorit, der von dem Rover Curiosity auf der Mars-Oberfläche offen liegend entdeckt wurde. Bei einer Atmosphäre, wie sie aktuell vorherrscht, wäre dieser Meteorit praktisch ungebremst auf die Mars-Oberfläche aufgeschlagen und durch die dabei frei werdende Energie nahezu vollständig verdampft. Falls es also gelänge, eines Tages den Einschlagzeitpunkt dieses Meteoriten zu bestimmen, wäre dieses Datum eine untere Grenze für die Zeit, bis zu der der Mars noch eine wesentlich dichtere Atmosphäre hatte.

Wegen der heute äußerst dünnen Atmosphäre erzeugt jeder Meteorit oder Asteroid, der auf dem Mars aufschlägt, einen Krater. Dessen Durchmesser ergibt einen Orientierungswert über die Größe dieses Himmelskörpers zum Zeitpunkt sei-

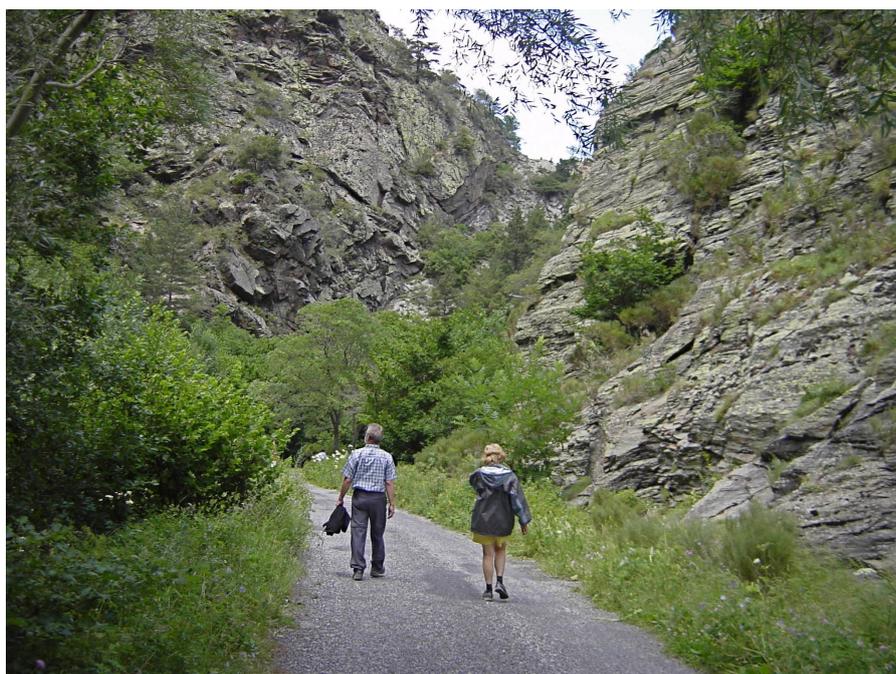


Abb. 56 Sedimentgestein in der östlichen Pyrenäen, aufgenommen im September 2009 (Quelle: Aufnahme des Autors)

nes Aufschlags auf der Marsoberfläche. Nun wird aber seit 2006 die Marsoberfläche kontinuierlich von der den Mars umkreisenden Sonde **Mars Reconnaissance Orbiter** MRO abgescannt. Hierdurch ist heute recht genau die Häufigkeit und Größenverteilung der Asteroide bekannt, die neu auf den Mars aufschlagen. Es gilt der Richtwert

$$\frac{\Delta N (\text{Krater} \geq 3,9 \cdot m)}{\Delta t} \gtrsim \frac{200}{y} \quad (10.257)$$

Dieser Wert dient inzwischen auch als Referenzwert bzgl. der statistischen Analyse von Einschlagkratern auf anderen Himmelskörpern.

Es gilt heute als gesichert, dass der Mars während der ersten $5 \cdot 10^8 \cdot y$ seiner Existenz ein Magnetfeld besaß von einer ähnlichen Größenordnung wie das Erd-Magnetfeld, dieses aber sodann verloren hat. Die genaue Ursache hierfür ist noch nicht abgesichert. Einer Hypothese zufolge ist jedoch dieser Verlust des Magnetfeldes als Auslöser für den Verlust der Atmosphäre anzusehen: Ohne das schützende Magnetfeld ist auch der Mars schutzlos dem Sonnenwind ausgesetzt, der dann im Laufe von Jahrtausenden die Atmosphäre abgetragen hat.

Ungeachtet des enormen Anstiegs an Fakten und Messwerten, die uns die Vielzahl der Mars-Missionen gebracht haben, bleiben weiterhin eine ganze Reihe fundamentaler, den Mars betreffender Fragen offen. Als Abschluss dieses Abschnitts nenne ich einige aus meiner Sicht besonders wichtige bzw. interessante offene Fragen:

- Ist der Vulkanismus auf dem Mars wirklich erloschen? Oder wird es irgendwann in der Zukunft wieder zu einer spontanen, aber extrem starken Eruption kommen?
- Hatte der Mars in seiner frühen Entwicklungsphase wirklich eine deutlich dichtere Atmosphäre? Wann und über welchen Mechanismus hat er ggfls. diese Atmosphäre weitgehend verloren?
- Gab es einmal Leben auf dem Mars? Und ggfls. in welcher Form?
- Über welchen Mechanismus und wohin ist das in einer frühen Entwicklungsphase einmal vorhanden gewesene Oberflächenwasser verschwunden?

Wichtige neue Informationen zur Beantwortung einiger dieser Fragen erhofft man sich von der NASA-Mission **Mars Atmosphere and Volatile Evolution** MAVEN,. Sie wurde am 18.11.2013 gestartet und schwenkte am 21.09.2014 in eine Umlaufbahn um den Mars ein. Ihre stationäre Umlaufbahn dauert $4,5 \cdot h$ und ist schwach elliptisch mit einem Minimalabstand von $150 \cdot km$ und einem Maximalabstand von $6300 \cdot km$. Ihr regulärer Messbetrieb beginnt im November 2014.

Zur Überbrückung der Zeit, in der wir auf brauchbare neue Messdaten warten müssen, die uns vielleicht helfen werden, einer Antwort auf diesen Satz von Fragen ein Stück näher zu kommen, biete ich dem Leser meine eigene, zugegeben etwas mutige Hypothese als Szenario an:

In seiner frühen Phase der Entwicklungsgeschichte war der Mars intensiv vulkanisch aktiv. Dieser Prozess dauerte zumindest bis vor etwa

$$\Delta t = 0,5 \cdot 10^8 \cdot y$$

Jahren an, wie sich insbesondere aus Beobachtungen der LRO-Sonde ergab. Hierdurch gelangten ständig größere Mengen an CO_2 in seine Atmosphäre. Der damit verbundene Treibhauseffekt erzeugte eine stetig ansteigende Oberflächen-Temperatur, da zunächst ein Mechanismus fehlte, der das CO_2 wieder aus der Atmosphäre entfernte. Schließlich erreichte die Oberflächen-Temperatur Werte $> 0^\circ C$ und es entwickelte sich eine aerobe Biologie. Diese entzog in steigendem Maße CO_2 aus der Atmosphäre und deponierte die erzeugte Biomasse auf eine Weise, die eine schnelle Verwitterung weitgehend verhinderte. Sobald jedoch der Vulkanismus zum Erliegen kam, sank der CO_2 -Gehalt der Mars-Atmosphäre wieder und damit auch die Oberflächen-Temperatur. Daher unterschritt irgendwann die mittlere Temperatur wieder den Wert $0^\circ C$, die gesamte Biologie kam wieder zum Erliegen und der Mars überzog sich mit einer Eisschicht, die schließlich das gesamte Oberflächenwasser in sich vereinte. Diese Eisschicht ist dann im Laufe der nachfolgenden mehreren $10^9 \cdot y$ bis auf geringe Reste verdunstet, evtl. auch zu einem relevanten Anteil unter einer oberflächenschicht aus Sedimenten und Staub begraben. Für die reale Existenz dieser

Mengen an verborgenem, aber oberflächennahe festen Wasser mehrten sich die Indizien. Eine verlässliche Antwort auf diese Frage wird von zukünftigen Probebohrungen eines Marsroboters erwartet. Das in der Atmosphäre vorhandene Wasser wurde durch die intensive Sonneneinstrahlung zersetzt und diffundierte als molekularer oder atomarer Wasserstoff und Sauerstoff in das Weltall ab.

Das war, wohl bemerkt, meine ganz persönliche Hypothese über die frühe Entwicklungsphase des Mars von ca. $1,5 \cdot 10^9 \cdot y$. Ich halte sie für zumindest nicht völlig abwegig.

Die Mars-Monde (-) Der Mars hat 2 ihn umkreisende Monde, die die Namen *Phobos* (von $\varphi\omicron\beta\omicron\varsigma$ (griech.) die Angst) und *Deimos* (von $\Delta\epsilon\iota\mu\omicron\varsigma$ (griech.) der Schrecken) erhalten haben^{††}. Beide wurden 1877 durch den amerikanischen Astronomen *Asaph Hall* (* 1829 in Goshun/Conn. (USA); † 1907 in Annapolis/Maryland (USA)) entdeckt. Bei beiden Monden handelt es sich vermutlich um Asteroide, die vom Mars eingefangen wurden. Die geometrischen Daten der Bahnbewegung und der Rotation dieser beiden Monde zeigt die nachfolgende Tabelle:

	$p(\text{Bahn})$ / $10^3 \cdot km$	e / 10^{-3}	$T_b^{(sid.)}$ / d	α_b / $^\circ$
Phobos	9,378	15,1	0,3189	1,075
Deimos	23,459	0,33	1,262	0,93

Auch diese beiden Monde führen eine einfach gebundene Rotation aus, d.h. ihre Zeiten für einen Umlauf um den Mars und für eine Eigenrotation sind identisch, und die Drehachsen der Eigenrotation und der Bahnbewegung um den Mars sind in guter Näherung parallel.

Die wichtigsten physikalischen Daten dieser Monde sind in der nun folgenden Tabelle zusammengestellt.

	Phobos	Deimos
ε_r		
$M_{\text{ges.}} / 10^{16} \cdot kg$	1,08	0,18
$\langle D_{\text{Mond}} \rangle / km$	22,2	~ 12
$\langle m \rangle / 10^3 \cdot kg/m^3$	1,887	1,7
$M_{\text{Atmosph.}} / kg$		
$p_{\text{Oberfl.}} / bar$		
$T_{\text{Oberfl.}} / K$	163/268	

Die Abb. 57 zeigt die zerklüftete Oberfläche des stark unrunderen Mondes Phobos als Stereobild. (Der Leser benötigt zu dessen Betrachtung eine konventionelle

^{††}Phobos und Deimos waren in der griechischen Mythologie die ständigen Begleiter des Kriegsgottes Mars.

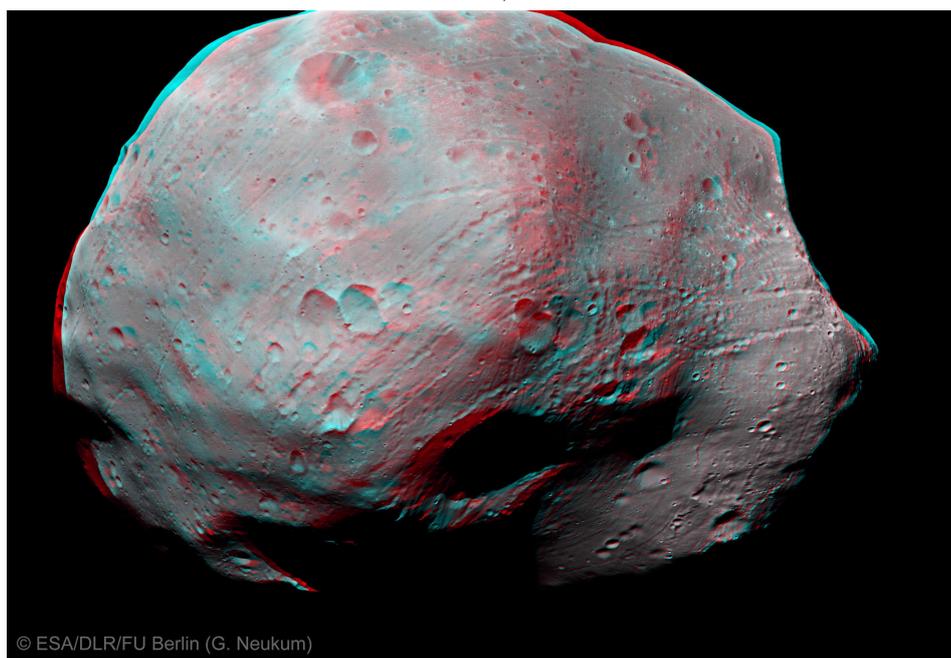


Abb. 57 Stereobild der Phobos-Oberfläche, aufgenommen mit der HRSC-Camera der Mars-Express-Sonde am 09.01.2011 aus ca. $100 \cdot km$ Entfernung (credits: ESA/DLR/FU Berlin (G. Neukum))

rot/grün-Stereobrille) Wegen seiner engen Bahn um den Mars ist Phobos extremen Gezeitenkräften ausgesetzt. Man schätzt, dass er in ca. $5 \cdot 10^7 \cdot y$ zerbrechen und einen Ring um den Mars bilden wird (ähnlich den anderen in unserem Planetensystem existierenden Ringsystemen, s. Absatz S. 1238).

(XXX: Der weitere Text des Absatzes *Die Mars-Monde* ist noch nicht verfügbar.)

Der Planet Jupiter(-)

In der Reihenfolge der jeweiligen Entfernungen von der Sonne folgt auf den Mars der Planet Jupiter. Er ist mit einer Masse von

$$M_{\text{Jupiter}} = 1,8986 \cdot 10^{27} \cdot kg = 0,955 \cdot 10^{-3} \cdot M_{\odot} \quad (10.258)$$

der massereichste Planet unseres Sonnensystems, auch wenn der Saturn bzgl. der Masse durchaus mit ihm vergleichbar ist. Mit einer scheinbaren Helligkeit (s. Absatz S. 1194) von $-2,94$ gehört er zu den hellsten Objekten unseres Nachthimmels und war daher bereits für die Astronomen der Antike ein wichtiges Beobachtungsobjekt. Er trägt den Namen der obersten römischen Götterfigur. Seine Bahn ist nur ca. 1° gegen die Erdbahn verkippt und seine Umlaufzeit ist mit fast $12 \cdot y$ deutlich länger als

die der Erde. Daher folgt der Jupiter an unserem Himmel immer nahezu synchron der Sonne auf ihrer Bahn und in einem annähernd konstanten zeitlichen Abstand. Die Zeitdifferenz zwischen Sonnen- und Jupiter-Zenith verschiebt sich mit einer Geschwindigkeit von

$$\frac{d\Delta t}{dt} \approx \frac{24 \cdot h}{12 \cdot y} = \frac{3 \cdot \text{min}}{d} \quad (10.259)$$

Seine Erkundung mit Hilfe von Raum-Missionen begann mit den NASA-Sonden Pioneer-10 und -11, die am 03.12.1973 in $1,3 \cdot 10^5 \cdot km$ Entfernung bzw. am 03.12.1974 in $4,3 \cdot 10^4 \cdot km$ Entfernung am Jupiter vorbeiflogen und dabei insgesamt 680 Bilder von der Außenhülle des Jupiters aufnahmen sowie eine Vielzahl von Messungen durchführten. Danach flogen bis heute (2013) 3 weitere Sonden auf dem Weg zu einem anderen Ziel an Jupiter vorbei, photographierten ihn (s. Abb. 58) und einige seiner

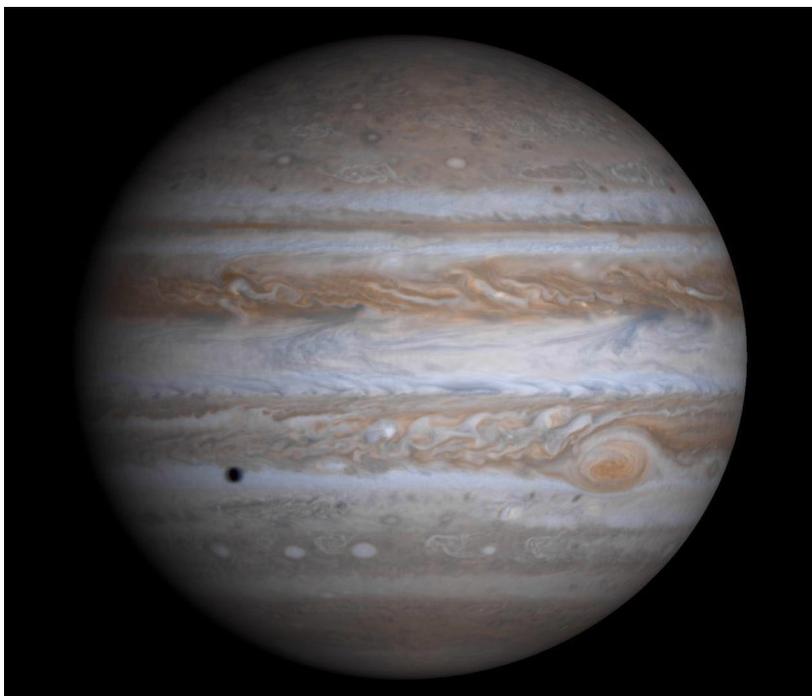


Abb. 58 Farbaufnahme des Jupiter, aufgenommen am 07.12.2000 von der Raumsonde Cassini

(Quelle: www.nasa.gov/multimedia/imagegallery)

Autor dieser Aufnahme: NASA/JPL/University of Arizona)

Monde und führten verschiedene Messungen aus. Die Abb. 58 zeigt eine in den natürlichen Farben wiedergegebene, aus 4 Einzelbildern zusammengesetzte Aufnahme der Jupiter-Oberfläche. Die Auflösung beträgt ca. $144 \cdot km/px$. Der seit langem bekannte sog. *große rote Fleck*, ein in Äquatornähe annähernd stationär vorhandener

Wirbelsturm, ist gut zu erkennen. Der kleine dunkle Fleck unterhalb des Äquators ist der Schatten des Jupiter-Mondes *Europa*.

Der bisherige Höhepunkt der Erkundung des Jupiters durch Raum-Missionen war 1995 das erfolgreiche Einschwenken der Sonde Galileo in eine Umlaufbahn um den Jupiter. Aus dieser Bahn schickte Galileo dann ein Tauchsonde auf eine Bahn in Richtung des Jupiters, die dann in dessen Atmosphäre eintauchte und hierbei Messdaten an Galileo übermittelte. Die Sonde tauchte nach Erreichen des Punktes z_0 mit

$$p(z_0) = 1 \cdot \text{bar} \quad (10.260)$$

noch weitere $160 \cdot \text{km}$ in die Gashülle ein. Dann brach der Funkkontakt ab. Der letzte übertragene Datensatz gehörte zu den Messwerten

$$T = 152^\circ \text{C} ; p = 22 \cdot \text{bar} \quad (10.261)$$

Einen weiteren Sprung in den Erkenntnissen über die Struktur des Jupiters und seiner Monde erwartet die Wissenschaft von den Raum-Missionen

- *Juno* oder auch *Jupiter Polar Orbiter* der NASA; der Start erfolgte am 05.08.2011; nach einem Fly-by-Manöver an der Erde am 09.10.2013 wird die Sonde im 07.2016 in eine Umlaufbahn um den Jupiter einschwenken; bei der stationären Umlaufbahn wird Juno die Pole überfliegen, wobei die Minimalentfernung zum Jupiter ca. $500 \cdot \text{km}$ betragen wird; Juno wird insbesondere das Gravitationsfeld und das Magnetfeld des Jupiters präzise vermessen und so zur Erforschung des Jupiterkerns beitragen und zur Klärung der Frage nach der Quelle dieses Magnetfeldes; und
- **Jupiter Icy Moons Explorer JUICE** der ESA; die Sonde wird in eine stark elliptische Umlaufbahn um den Jupiter einschwenken und u.a. auch die Monde Ganymed, Kallisto und Europa analysieren. Der kürzeste Abstand zum Jupiter wird ca. $5000 \cdot \text{km}$ betragen. Der Start ist für 06.2022 geplant, die Ankunft am Jupiter-System für 2030.

In der Elementzusammensetzung des Jupiters dominieren eindeutig die Elemente H und He , während alle weiteren Elemente deutlich unter dem Wert 0,01 liegen, s. Tabelle auf S. 1270. Durch gravimetrische Messungen und ergänzende Modellrechnungen konnte man jedoch feststellen, dass auch der Planet Jupiter, ebenso wie die weiter innen in unserem Planetensystem angesiedelten Planeten, einen festen Kern besitzt, der überwiegend aus Fe und Ni besteht. Man schätzt seine Masse heute auf

$$M_{\text{Kern}}(\text{Jupiter}) \approx 10 \dots 20 \cdot M_{\text{Erde}} \quad (10.262)$$

Wie ich bereits mehrfach erläutert habe, gibt es gute Gründe für die Annahme, dass innerhalb dieses Kerns das Elementverhältnis von noch schwereren Elementen zu Fe ähnliche Werte annimmt wie z.B. im Erdkern.

Der Jupiter hat keine Atmosphäre im engeren Sinne, also keine gasförmige Außenschicht, die auf die wohl definierte Oberfläche einer festen oder flüssigen Planeten-Kruste folgt. Vielmehr nimmt in der fast ausschließlich aus H_2 und He bestehenden äußeren Schicht der Druck derart hohe Werte an, dass der H_2 flüssig bzw. fest wird und eine metallische Leitfähigkeit zeigt. Jupiter hat also vermutlich die in der Abb. 59 (a) skizzierte Struktur: Auf eine insgesamt ca $2,2 \cdot 10^4 \cdot km$ dicke Schicht aus

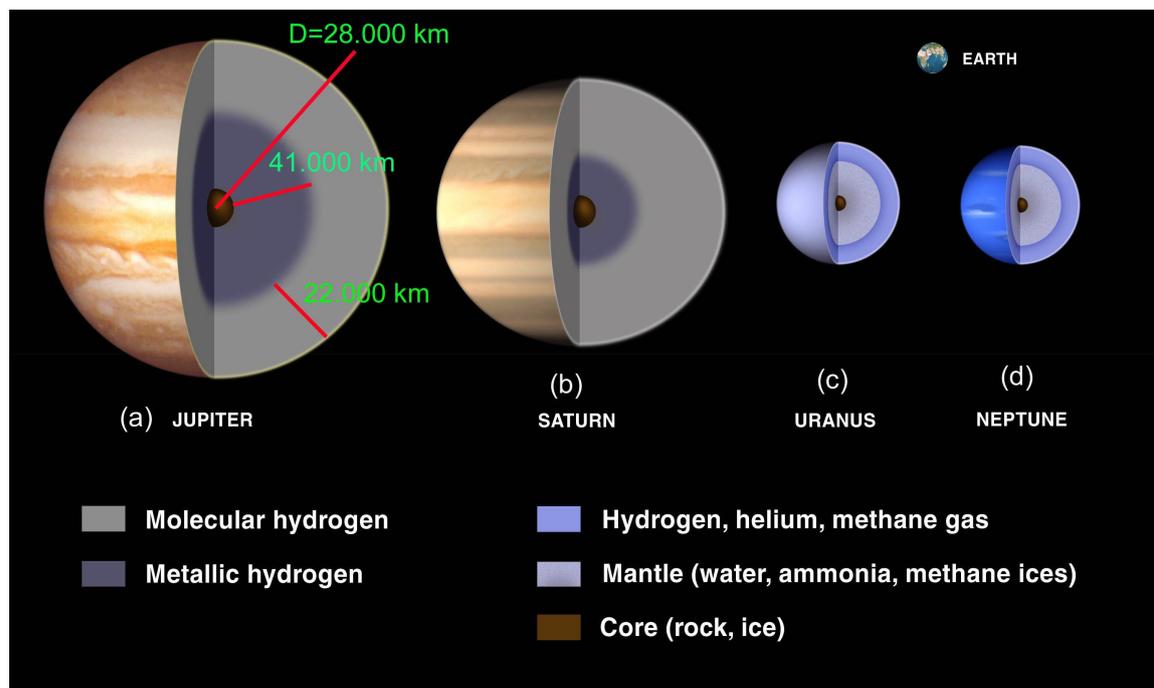


Abb. 59 Schalenstruktur der Planeten Jupiter, Saturn, Uranus und Neptun (Quelle: NASA Image Galery; credit: Lunar and Planetary Institute)

(überwiegend) molekularem H_2 , von der nur die ersten $1 \cdot 10^3 \cdot km$ gasförmig sind und die dann folgende Schicht vermutlich flüssig, folgt eine ca $4,1 \cdot 10^4 \cdot km$ dicke Schicht aus flüssigem oder festem, **metallischen** Wasserstoff. Der Kern des Planeten hat einen Durchmesser von ca. $2,8 \cdot 10^4 \cdot km$ und besteht aus Fe , Ni und Spuren von schwereren Elementen. Die Temperatur im Zentrum schätzt man auf

$$T(z = 0) \gtrsim 2 \cdot 10^4 \cdot K \quad (10.263)$$

Wir diskutieren nun die Wärmebilanz des Jupiter. Der gesamte dem System zugeführte Energiestrom ist der von der Sonne ankommende Strahlungsstrom (s. Gl. 8.487)

$$J_a = \varepsilon_a \cdot J_S \cdot \frac{D^2}{16 \cdot p^2} \quad (10.264)$$

p : große Halbachse der Jupiterbahn um die Sonne

Alle in dieser Gl. vorkommenden Größen sind uns bekannt. Mit ihnen erhalten wir den Wert

$$J_a = 0,47 \cdot 3,845 \cdot 10^{26} \cdot W \cdot \left(\frac{1,398 \cdot 10^5 \cdot km}{4 \cdot 5,203 \cdot AE} \right)^2 = 3,643 \cdot 10^{17} \cdot W \quad (10.265)$$

(XXX: Der an dieser Stelle vorgesehene weitere Text zur Wärmebilanz des Jupiter ist noch nicht verfügbar.)

Die deutlich erkennbare ringförmige Strukturierung der äußeren Schichten des Jupiters entsteht durch die starken Gasströmungen, die in diesem Bereich vorherrschen. Der optische Kontrast in den dadurch generierten Strömungsstrukturen ergibt sich insbesondere durch die in diesen Schichten der Jupiter-Atmosphäre vorhandenen Wolken. Diese bestehen aus den (insgesamt betrachtet) in Spuren vorhandenen Anteilen der Atmosphäre an Ammoniak (NH_3) und Ammoniumsulfat ($(NH_4)_2SO_4$). Sie sind auch für die Färbung der Atmosphäre an diesen Stellen verantwortlich.

Primäre Ursache für die Bildung von Gasströmungen ist der von der Sonneneinstrahlung generierte Wärmetransport vom Äquator zu den Polen. Jeder geringste in diese Richtung gerichtete Massestrom ist aber auch der auf der Eigenrotation des Jupiters beruhenden Corioliskraft ausgesetzt. Diese hat jedoch im Vergleich zu den Gegebenheiten auf der Erde eine alle anderen Effekte überdeckende Wirkung. Schließlich entspricht die Eigenrotation des Jupiters einer Tangentialgeschwindigkeit der obersten Schichten am Äquator von (s. Gl. 3.542)

$$v_{\text{Äqu.}}^{(t)} = \frac{D \cdot 2 \cdot \pi}{2 \cdot T_r} = \frac{1,398 \cdot 10^5 \cdot km \cdot \pi}{9,925 \cdot h} = 4,43 \cdot 10^4 \cdot \frac{km}{h} \quad (10.266)$$

Es stellt sich daher immer eine nahezu ideale der geostrophischen Windrichtung entsprechende Strömungsrichtung ein, die auf der nördlichen Hemisphäre in Richtung Osten und auf der südlichen in Richtung Westen verläuft. In Äquatornähe erreichen diese Gasströmungen Geschwindigkeiten der Größenordnung

$$v_{\text{Äqu.}} \lesssim 540 \cdot \frac{km}{h} \quad (10.267)$$

In Analogie zu den Verhältnissen in der Erdatmosphäre (s. Absatz S. 985) bildet sich ein System von torusförmigen Konvektions-Schläuchen. Im Fall der Erde besteht dieses System von Strömungsstrukturen aktuell aus insgesamt 6 derartigen Strömungs-Schläuchen, die nur leicht gegen die Nord-Süd-Richtung verkippt sind. Beim Jupiter sind es aktuell anscheinend 11 (s. Abb. 58). Im Bereich einer Grenzzone zwischen 2 derartigen Strömungs-Schläuchen kann es zur Bildung von Strömungs-Wirbeln kommen, die im Fall der Erde als Hochdruck- bzw. Tiefdruck-Gebiete bezeichnet werden. Beim Jupiter hat sich aktuell insbesondere 1 großer Wirbel gebildet, der offenbar über

Jahre nahezu ortsfest verharret, nämlich der auch in der Abb. 58 gut erkennbare sog. *große rote Fleck*.

Der Jupiter erzeugt um sich herum ein relativ starkes Magnetfeld, das in 1. Näherung die Form eines Dipolfeldes hat mit dem Dipolmoment

$$\mathcal{M}_{\text{magn}} = 1,55 \cdot 10^{20} \cdot \mathcal{T} \cdot m^3 \quad (10.268)$$

wobei die Achse der Rotationssymmetrie nur grob mit der Drehachse der Eigenrotation des Jupiters zusammenfällt. Der Winkel zwischen diesen beiden Achsen beträgt aktuell ca. 11° . Der magnetische Nordpol befindet sich in der Nähe des geographischen Südpols. Typische Werte der Flussdichte dieses Feldes sind

$$\text{am Äquator} : B(\text{Jupiter}) = 400 \cdot \mu\mathcal{T} ; B(\text{Erde}) = 30 \cdot \mu\mathcal{T} \quad (10.269)$$

$$\text{a. d. Polen} : B(\text{Jupiter}) = 1040 \dots 1400 \cdot \mu\mathcal{T} ; B(\text{Erde}) = 60 \cdot \mu\mathcal{T} \quad (10.270)$$

Zur Orientierung habe ich an dieser Stelle die für die Erde geltenden Werte mit angeführt. Als primäre Ursache für dieses Magnetfeld vermutet man heute die Existenz von stationären Kreisströmen innerhalb der Schale aus metallischem Wasserstoff.

Die Struktur dieses Magnetfeldes insbesondere in den weiter außen liegenden Bereichen wurde von der Cassini-Sonde vermessen, s. Abb. 60. Durch das starke

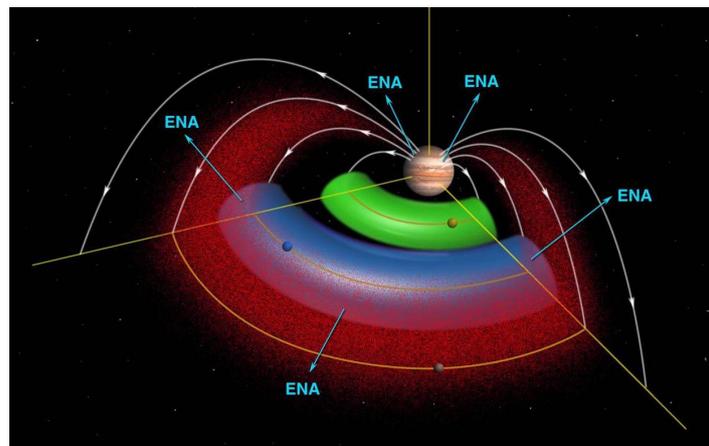


Abb. 60 Schnittbild-Skizze des Jupiter-Magnetfeldes;

ENA: **e**nergetic **n**eutral **a**toms; rot: magnetisch eingefangene Ionen der kosmischen Strahlung; grün (Io) bzw. blau (Europa): Torus um den Mond aus neutralem Gas; (credit: NASA/JPL)

Magnetfeld werden einige der ankommenden Ionen der kosmischen Strahlung in einen Torus eingefangen (in der Abb. 60 rot markiert). Den Jupiter-Monden, deren Bahn im Inneren dieses Bereichs liegt, gelingt es in einem Teilbereich um ihre Bahn herum, diese Ionen zu neutralisieren.

(XXX: Der weitere Text des Absatzes *Der Planet Jupiter* ist noch nicht verfügbar. Er wird insbesondere die wichtigsten heute noch ungeklärten Fragen zur Physik des Jupiters aufzählen.)

Die Jupitermonde (-) Heute kennt man insgesamt 62 Trabanten, die den Planeten Jupiter umkreisen. Von ihnen haben nur die innersten 8 Trabanten Bahndaten, wie sie typisch sind für Monde, die aus derselben Akkretionsscheibe entstanden sind wie ihr Planet: Der Drehimpulsvektor ihrer Bahnbewegung um den Jupiter ist annähernd parallel zum Drehimpulsvektor der Jupiter-Eigenrotation und die Mond-Bahn ist nur schwach elliptisch. Die übrigen Trabanten des Jupiter werden als *irreguläre Satelliten* bezeichnet. Die großen Halbachsen ihrer Bahnbewegungen sind deutlich größer als die der 8 inneren Monde, ihre Bahnen sind z.T. stark elliptisch und ihre Bahndrehimpulsvektoren sind mehr oder weniger stark gegen den Drehimpuls der Jupiter-Rotation verkippt, z.T. um mehr als 90°.

Die geometrischen Daten der Bahnbewegung und der Rotation der 4 größten dieser regulären Monde zeigt die nachfolgende Tabelle:

	$p(\text{Bahn})$ / $10^5 \cdot km$	e / 10^{-3}	$T_b^{(sid.)}$ / d	α_b / $^\circ$
Io	4,218	4,1	1,77	0,036
Europa	6,71	9	3,55	0,467
Ganymed	10,7	1,5	7,155	7,155
Kallisto	18,82	7	16,69	0,307

Alle diese Monde führen eine einfach gebundene Rotation aus, d.h. ihre Zeiten für einen Umlauf um den Jupiter und für eine Eigenrotation sind identisch, und die Drehachsen der Eigenrotation und der Bahnbewegung um den Jupiter sind in guter Näherung parallel. Dieses Faktum resultiert aus den enormen Gezeitenwirkungen auf Grund ihrer sehr engen Bahnen um den Jupiter. Ihre mittleren Bahnradialen sind nicht mehr weit entfernt von ihrer jeweiligen Roche-Grenze, s. Absatz S. 1238. Diese engen Bahnradialen und die daraus resultierenden Bahn-Umlaufzeiten von nur wenigen (Erd-)Tagen waren von großer wissenschafts-historischer Bedeutung. Da es bei dieser geometrischen Konstellation von der Erde aus betrachtet bei jedem Umlauf zu einer Transit-Konstellation (s. Abschnitt 3.5.4) kommt, sind diese Ereignisse bereits mit relativ einfachen optischen Hilfsmitteln beobachtbar. Nur dank dieser glücklichen Umstände gelang es Galilei 1610, den Umlauf dieser 4 Monde um den Jupiter zu beobachten und die Umlaufzeiten zu bestimmen ([42]). Sie werden auch heute noch meist als die *Galilei-schen Monde* bezeichnet. Die Abb. 61 zeigt sie als relativ zueinander maßstabsgerechte Montage von Aufnahmen, die die Raumsonde *New Horizon* im Februar 2007 bei ihrem Vorbeiflug erstellte. Zur Orientierung habe ich den Erddurchmesser als Vergleichslänge mit eingezeichnet. Die Monde Io, Europa und Ganymed befinden sich im Zustand einer gebrochen gebundenen Bahnresonanz

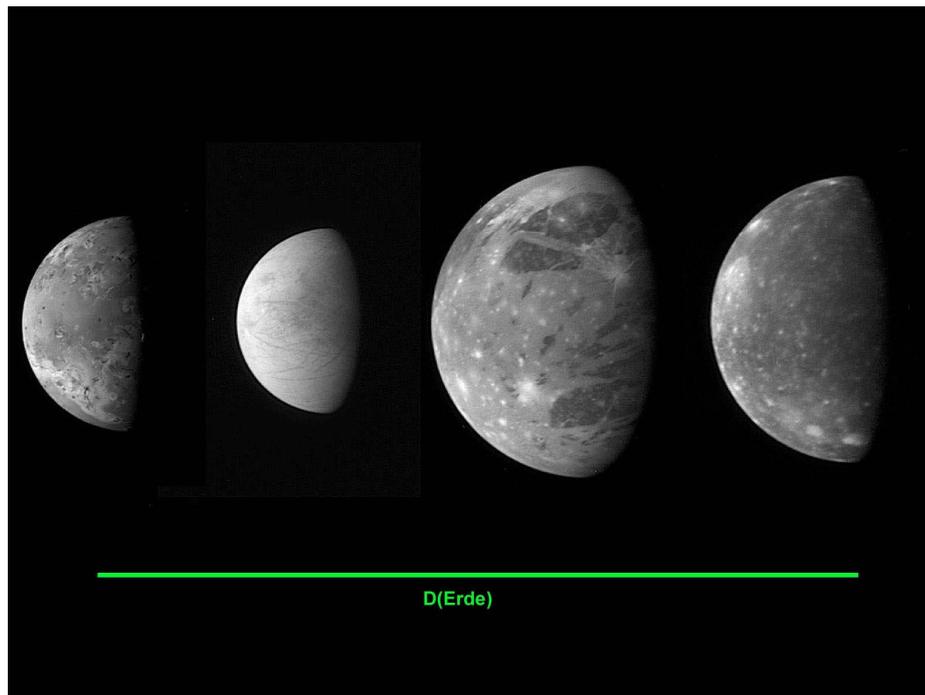


Abb. 61 Die 4 Jupiter-Monde Io, Europa, Ganymed und Kallisto
(Quelle: www.nasa.gov/multimedia/imagegalery)

um den Jupiter, ihre Umlaufzeiten betragen

$$T_{\text{Io}} : T_{\text{Europa}} : T_{\text{Ganymed}} = 1 : 2 : 3 \quad (10.271)$$

Das besondere Interesse der Wissenschaft an diesen Monden (ebenso wie an einigen der Saturn-Monde) resultiert auch aus der Verwandtschaft dieser Himmelskörper mit der Erde, wenn man als Kriterium hierfür insbesondere ihre geometrische Abmessung und ihre mittlere Massendichte nimmt.

Die wichtigsten physikalischen Daten dieser 4 Monde sind in der nachfolgenden Tabelle zusammengestellt.

	Io	Europa	Ganymed	Kallisto
ε	0,39	0,32	0,57	0,81
$M_{\text{ges.}} / 10^{23} \cdot kg$	0,894	0,480	1,482	1,08
$\langle D \rangle / 10^3 \cdot km$	3,643	3,122	5,262	4,821
$\langle m \rangle / 10^3 \cdot kg/m^3$	3,56	3,01	1,936	1,830
$T_{\text{O.}} / K$	130/200	102/125	110/152	134/165
$M_{\text{Atmosph.}} / kg$				
$p_{\text{O.}} / Pa$	$\lesssim 10^{-6}$	$\lesssim 10^{-6}$		$\lesssim 10^{-6}$

Die in dieser Tabelle abgegebenen Temperaturen der Mond-Oberfläche sind die jewei-

ligen Maximal- und Minimal-Temperaturen während eines Mondtages. Sie müssen im Vergleich zur astronomischen Referenztemperatur an dieser Stelle des Planetensystems von

$$T_{ref} = 122,2 \cdot K \quad (10.272)$$

diskutiert werden.

Die ersten beiden Monde, *Io* und *Europa* sind offensichtlich gesteinsartige Himmelskörper. Denn ihre Massendichte bewegt sich noch in demselben Bereich wie z.B. der Mars. *Ganymed* und *Kallisto* dagegen haben bereits eine deutlich kleinere mittlere Massendichte, so dass wir bei ihnen eine Oberflächenschicht signifikanter Dicke mit geringerer Massendichte vermuten, z.B. Wassereis. Unsere Kenntnisse über diese Monde verdanken wir nahezu ausschließlich den bereits im Absatz S. 1304 angeführten Raum-Missionen.

Die 4 weiteren regulären Monde tragen die Namen *Metis*, *Adastrea*, *Amalthea* und *Thebe*. Ihre Bahnen verlaufen alle innerhalb der *Io*-Umlaufbahn. Ihre Massen sind deutlich kleiner als die der Galilei'schen Monde und ihre geometrische Form zeigt deutliche Abweichungen von der Kugelform. Wir müssen daher annehmen, dass sie während ihrer Entstehung nicht mehr vollständig aufgeschmolzen sind.

Io (-) Wir beginnen die Diskussionsreihe einiger Jupitermonde mit *Io*, dem innersten der Galilei'schen Monde. Die große Halbachse seiner Bahn hat die Länge

$$p(\text{Io-Bahn}) = 4,218 \cdot 10^5 \cdot km \quad (10.273)$$

Dieser Wert liegt in derselben Größenordnung wie der entsprechende Wert der Bahn des Erdmondes um die Erde

$$p(\text{Erdmond-Bahn}) = 3,844 \cdot 10^5 \cdot km \quad (10.274)$$

Nicht die Größe seiner Umlaufbahn ist also das besondere an *Io* (und den weiteren Galilei'schen Monden), sondern seine Umlaufzeit von lediglich

$$T_{\text{Bahn}}(\text{Io}) = 1,77 \cdot d \quad (10.275)$$

Genauer: es überrascht, dass die im Vergleich zur Erde wesentlich größere Masse des Jupiter nicht dazu geführt hat, dass sowohl der Bahndurchmesser seiner Monde als auch deren Umlaufzeit größere Werte angenommen haben. Dieser Unterschied hat sich im wesentlichen in der Umlaufzeit niedergeschlagen. Ich werde auf diesen Umstand im Zusammenhang mit Überlegungen zu Entstehungsgeschichte des Jupiter zurück kommen.

Die Masse von *Io* ist nur wenig größer als die des Erdmondes, und sie ist deutlich größer als die der übrigen Galilei'schen Monde. Auch seine Massendichte ist etwas größer als die des Erdmondes. Wie bereits auf den von Voyager-1 und -2 erstellten Aufnahmen zu erkennen war, ist *Io* bis heute vulkanisch aktiv. Er stößt

dabei schwefelreiche Dämpfe und Lavaflüsse aus. Hierdurch bilden sich Silikatgesteine der unterschiedlichsten Zusammensetzung, und die Io-Oberfläche hat dadurch eine an Farbnuancen reiche Struktur erhalten, s. Abb. 62.

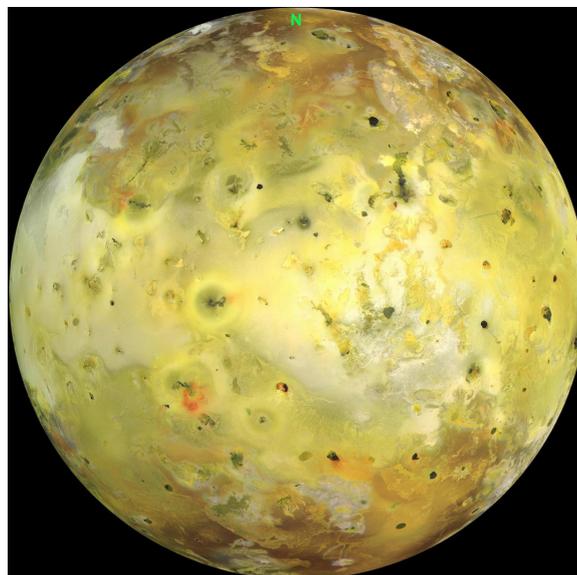


Abb. 62 Farbaufnahme der Io-Oberfläche, aufgenommen am 3.07.1999 von der Sonde Galileo aus einer Entfernung von $1,3 \cdot 10^5 \cdot km$
(Quelle: photojournal.jpl.nasa.gov/catalog/PIA02308; credit: NASA/JPL/Univ. of Arizona)

Der Nordpol von Io ist in dieser Abb. 62 oben (s. Markierung); die Sonne stand zum Zeitpunkt der Aufnahme direkt hinter der aufnehmenden Kamera. Die Aufnahme ist in ihrer Farbwiedergabe nur leicht verfälscht: Der rote Farbkanal ist in den IR-Bereich verschoben und der blaue Kanal in das nahe UV. Hierdurch wird der Farbkontrast deutlich verstärkt. Durch diesen verstärkten Farbkontrast wird deutlich, dass die Lavaströme und ihre schwefelhaltigen Ablagerungen komplex strukturierte und zusammengesetzte Mischungen enthalten. Es gibt jedoch keine Anzeichen für die Existenz von freiem H_2O oder von wasser-haltigen Verbindungen.

Die Io-Oberfläche ist mit geschätzten

$$A_O \approx 1 \cdot 10^7 \cdot y \quad (10.276)$$

relativ jung. Neben den mehreren 100 Vulkan-Calderen enthält sie auch einige Berge, die **nicht** vulkanischen Ursprungs sind. Sie werden als Zeugen einer (zumindest in früheren Zeiten aktiv gewesenen) Plattentektonik angesehen. Es gibt auf Io auch einige *hot spots*, an denen die Io-Oberfläche Temperaturen bis zu $T > 2000 \cdot K$ annehmen kann(XXX: präzisieren).

Als besonders beeindruckenden Beleg für den bis heute andauernden Vulkanismus verweise ich auf die Abb. 63. Im Zentrum der Aufnahme nahe der Tag-

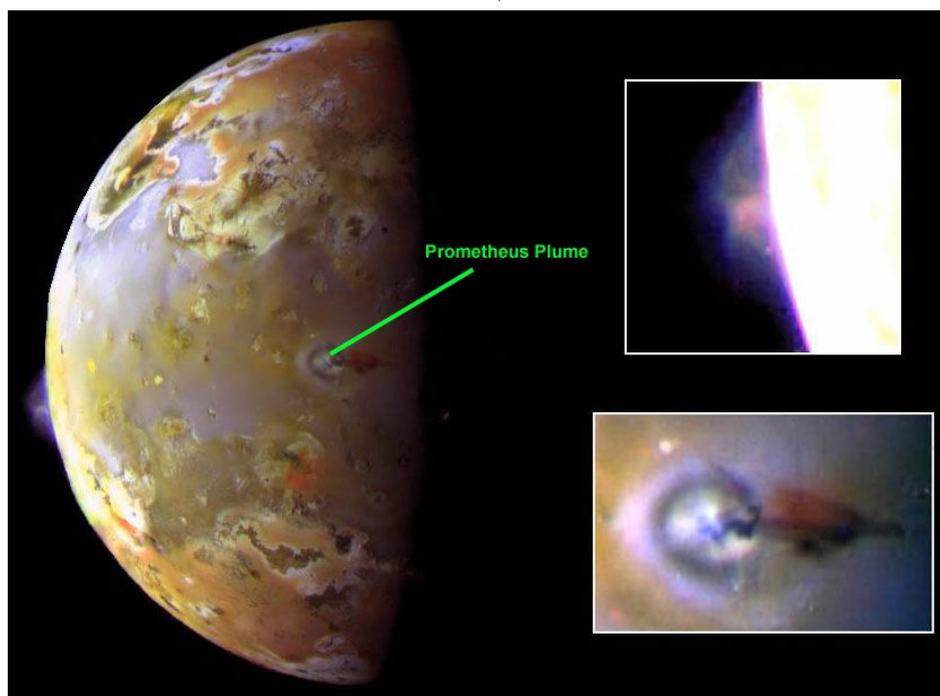


Abb. 63 Vulkanausbrüche auf der Io-Oberfläche, aufgenommen von der Sonde Galileo am 28.06.1997 aus einer Entfernung von ca. $6 \cdot 10^5 \cdot km$
(Quelle: diese Abb. basiert auf dem Bild www.nasa.gov/multimedia/imagegallery/image_featur_758.htm
credit: NASA/JPL)

/Nachtgrenze (und im unteren vergrößerten Bildausschnitt) erkennt man den Vulkan *Prometheus Plume* und die von ihm ausgestoßene Wolke aus Rauch und Asche. Dieser Vulkan war bisher auf jedem Bild, das von der Io-Oberfläche aufgenommen wurde, als aktiv erkennbar, auch auf den bereits 1979 von den Sonden Voyager 1 und 2 erstellten Bildern. Der 2. aktive Vulkan, der auf diesem Bild gerade als Silhouette gegen den dunklen Himmel abgebildet wird (s. oberen Bildausschnitt), wirft seine Staub- und Aschewolke bis in eine Höhe von etwa $140 \cdot km$!

Als mögliche Energiequelle für diesen Vulkanismus werden häufig die Gezeiteneffekte angeführt, die Jupiter auf den Mond ausübt. Ich halte diesen Erklärungsversuch für wenig einleuchtend. Zum einen führt Io - wie wir bereits diskutiert haben und ebenso wie die anderen 3 Galilei-Monde - eine einfach gebundene Rotation aus und seine Bahn ist nur minimal elliptisch. Der von den Gezeiteneffekten erzeugte Spannungszustand innerhalb des Mondes ist also in dem Ruhesystem des Mondes ortsfest, so dass in 1. Näherung **keine** Reibungsverluste erzeugt werden. Zum anderen sind die Bahnen von Europa und Ganymed auch nicht so viel größer, so dass gezeiten-induzierte Effekte bei ihnen in ähnlichem Umfang auftreten sollten wie

bei Io. Aus meiner Sicht ist es wahrscheinlicher anzunehmen, dass der Vulkanismus auf Io dieselbe Basisursache hat wie der Vulkanismus auf der Erde: Der Kern von Io enthält einen signifikanten Anteil von langlebigen radioaktiven Isotopen schwerer Elemente und generiert hierüber einen bis heute anhaltenden Wärmestrom aus dem Zentrum des Mondes zu seiner Oberfläche hin.

Aus den heute verfügbaren Informationen schließt man auf folgende innere Struktur von Io:

Auf einen Fe/Ni -reichen Kern mit

$$D(\text{Kern}) \gtrsim 900 \cdot km \quad (10.277)$$

folgt eine Mantelschicht aus Silikatgestein, die bis nahe an die Mond-Oberfläche reicht. Diese Silikatgesteine enthalten einen vergleichsweise hohen Anteil an S , aber kein H_2O . Die Kruste besteht aus Gesteinen und Erosionsprodukten von Gesteinen vulkanischen Ursprungs.

Die extrem dünne Exosphäre besteht überwiegend aus SO_2 .

Europa (-) In der Reihenfolge der Entfernung von ihrem Gravitationszentrum, dem Jupiter, folgt auf Io der Mond *Europa*. Er ist, sowohl bzgl. der Masse als auch des Durchmessers, der kleinste der 4 Galilei'schen Monde. Auf Basis der insbesondere aus den Raum-Missionen erzielten Informationen schließt man auf einen zumindest 3-schichtigen Aufbau von Europa nach folgendem Schema:

Auf einen metallischen Kern aus Fe und Ni folgt ein Mantel aus Silikatgesteinen noch nicht näher bekannter Zusammensetzung. Vermutlich schließt sich diesem Mantel eine ca. $100 \cdot km$ dicke H_2O -Schicht an, die stark salzhaltig und evtl. flüssig ist. Die Oberflächenschicht des Mondes besteht aus einer ca. $15 \cdot km$ dicken Kruste aus H_2O -Eis, in das in signifikantem Umfang Mineralien eingelagert sind. Hieraus erklärt sich der relativ niedrige Absorptionsfaktor der Europa-Oberfläche von 0,32. Durch diesen Aufbau sind die Krustenschicht und der Gesteinskern eventuell partiell mechanisch entkoppelt und rotieren dann sogar mit unterschiedlichen Frequenzen.

Die Oberfläche von Europa ist relativ glatt. Die dominierenden Unebenheiten bestehen aus einem Netz von Gräben und Furchen in dieser Eisschicht. Insbesondere in diesen Furchen ist das Oberflächenmaterial deutlich dunkler gefärbt als seine Umgebung. Aus Laboruntersuchungen schließt man heute, dass es sich vermutlich um Salzablagerungen handelt, die durch die intensive Bestrahlung mit kosmischer Strahlung modifiziert worden sind.

Dazu kommen einige wenige Einschlagkrater. Der zweitgrößte von ihnen trägt den Namen *Pwyll* (der Name wurde der walisischen Mythologie entnommen) und hat einen Durchmesser von $26 \cdot km$. Auf Basis der morphologischen Analyse der Europa-Oberfläche (Häufigkeit und Grad der Verwitterung von Einschlagkratern) schätzt man heute das Alter dieser Oberflächenschicht auf lediglich

$$A_0 \lesssim 3 \cdot 10^7 \cdot y \quad (10.278)$$

Bisher konnten keine Anzeichen von früherem oder noch heute aktivem Vulkanismus festgestellt werden. Dennoch besitzt Europa ein Magnetfeld, das von der Sonde Galileo vermessen werden konnte. Es beträgt etwa

$$B_{\text{äqu.}}(\text{Europa}) \approx 0,2 \cdot \mu T \quad (10.279)$$

Europa hat eine nur extrem dünne Exosphäre, die überwiegend aus O_2 besteht. Dieser entsteht vermutlich durch die Einwirkung der kosmischen Strahlung auf die Oberflächenschicht aus Wassereis.

Ganymed (-) Der in der Reihenfolge der Entfernung von Jupiter auf Europa folgende Mond, *Ganymed*, ist der größte der Galilei'schen Jupiter-Monde. Die Raumsonde Galileo passierte ihn 2-mal, und zwar in einer minimalen Entfernung von $838 \cdot km$ bzw. $264 \cdot km$. Aus den hierbei erstellten Farbbildserien wurde das in der



Abb. 64 Farbbild des Jupitermond Ganymed, zusammengesetzt aus der von der Sonde Galileo am 26.06.1996 erstellten Aufnahmenserie (credit: NASA/JPL)

Abb. 64 gezeigte Bild seiner Oberfläche berechnet.

Sein innerer Aufbau ist vermutlich dem von Europa sehr ähnlich. Jedoch ist die H_2O -Schicht vermutlich nicht flüssig, sondern zumindest partiell fest. Die Oberflächenkruste besteht wieder aus Wassereis. Jedoch ist eine deutliche Zweiteilung zu erkennen in:

- eine dunkle, geologisch relativ alte Platte, die viele Einschlagkrater aufweist; und in
- eine hellere, geologisch jüngere Platte, deren Oberfläche primär durch Gräben und Verwerfungen strukturiert ist.

Die Wissenschaft deutet dies heute als Hinweis auf die Existenz von 2 unterschiedlichen Gruppen tektonischer Platten.

Ganymed besitzt ein relativ starkes Magnetfeld, das in guter Näherung einem Dipolfeld entspricht. Die Symmetrieachse dieses Feldes ist um etwa 10° gegen die Achse der Eigenrotation verkippt. Die Feldstärke in Äquaturnähe beträgt

$$B_{\text{Äqu.}}(\text{Ganymed}) = 750 \cdot n\mathcal{T} \quad (10.280)$$

Zum Vergleich: Die Feldstärke des von Jupiter erzeugten Magnetfeldes beträgt an dieser Stelle

$$B_{\text{Ganymed}}(\text{Jupiter}) = 120 \cdot n\mathcal{T} \quad (10.281)$$

D.h. im Bereich der Ganymed-Oberfläche dominiert das von Ganymed selbst erzeugte Magnetfeld. Dieses wird allerdings von dem Jupiterfeld signifikant gestört.

Tiefer gehende Informationen über Ganymed verspricht insbesondere die geplante Mission JUICE. Nach mehreren Vorbeifügen an Jupiter und Europa ist das Einschwenken in eine Umlaufbahn um Ganymed geplant.

Kallisto (-) Auf Ganymed folgt in der Reihenfolge der Entfernung von Jupiter der Galilei-Mond *Kallisto* (im engl. Sprachbereich meist Callisto) (von $\kappa\alpha\lambda\lambda\iota\sigma\tau\eta$ (griech.) die Schönste). Er ist der zweitgrößte der Galilei'schen Monde und steht ebenfalls in einer gebrochen gebundenen Bahn-Resonanz, nämlich im Verhältnis 3:7 bzgl. Ganymed.

Seine Masse entspricht etwa der des Planeten Merkur.

Die innere Struktur von Kallisto ähnelt vermutlich weitgehend der Struktur von Europa und Ganymed. Um einen Kern aus Silikatgestein schließt sich eine ca. $10 \cdot km$ dicke Schicht aus flüssigem Salzwasser an, sodann folgt eine ca. $200 \cdot km$ dicke Schicht aus festem Wassereis, die auch bereits die Kruste der Kallisto-Oberfläche bildet. Diese Oberflächenschicht ist von Einschlagkratern geradezu übersät, stärker als alle anderen Himmelskörper unseres Planetensystems. Hieraus schließen wir auf ein besonders hohes Alter dieser Schicht:

$$A_O(\text{Kallisto}) \approx 4 \cdot 10^9 \cdot y \quad (10.282)$$



Abb. 65 Echtfarbenaufnahme der Kallisto-Oberfläche, aufgenommen im Mai 2001 durch die NASA-Sonde Galileo
(Copyright NASA/JPL/DLR)

Die vom Jupiter erzeugte Gezeitenwirkung auf Kallisto ist wegen des gegenüber den anderen Galilei'schen Monden deutlich größeren Bahndurchmessers nur noch von untergeordneter Bedeutung.

Es konnten bisher keine Anzeichen für eine Plattentektonik gefunden werden. Man kann daher vermuten, dass Kallisto im Gegensatz zu den anderen Galilei'schen Monden gar keinen oder nur einen vergleichsweise kleinen Kern aus Fe und Ni besitzt.

Kallisto hat ebenso wie die anderen Galilei'schen Monde eine extrem dünne Exosphäre. In seinem Fall besteht sie überwiegend aus CO_2 .

Die irregulären Jupiter-Monde (-) Alle weiteren Jupiter-Monde, aktuell (2013) bekannt sind 54, gehören zu den sog. *irregulären Satelliten*:

1. Ihre Bahnen sind alle deutlich größer als die Kallisto-Bahn,

$$p(\text{irreg. Jupiter-Satellit}) > 10^8 \cdot km \quad (10.283)$$

2. sie sind deutlich exzentrisch,

$$e > 0,1 \quad (10.284)$$

3. und sie sind meist deutlich gegen die Jupiter-Bahn verkippt. Am häufigsten sind Verkipnungen von

$$|\alpha_b| = 30^\circ \dots 50^\circ \text{ oder} \quad (10.285)$$

$$= 130^\circ \dots 150^\circ \quad (10.286)$$

4. Auch die Achse ihrer Eigenrotation ist deutlich gegen ihre jeweilige Bahnebene verkippt, bei einigen von ihnen bis nahe an der Wert $|\alpha_r| = 180^\circ$.

Außerdem ist ihre Masse deutlich kleiner als die der regulären Satelliten,

$$M(\text{irreg. Jupiter-Satellit}) < 10^{18} \cdot kg \quad (10.287)$$

Die kleinsten bisher entdeckten Jupiter-Satelliten haben eine Masse der Größenordnung

$$M = 1,5 \cdot 10^{12} \cdot kg \quad (10.288)$$

(XXX: Der an dieser Stelle vorgesehene Text über die Massendichte dieser Satelliten ist noch nicht verfügbar.)

Auf Grund dieser typischen Unterschiede zwischen den sog. regulären Monden und den irregulären Satelliten des Jupiters geht man heute davon aus, dass

- die regulären Jupiter-Monde zusammen mit dem Planeten Jupiter oder (in astronomischen Zeiträumen bewertet) relativ kurz danach aus der planetarischen Akkretionsscheibe entstanden sind; und dass im Gegensatz dazu
- die irregulären Satelliten zu einem späteren Zeitpunkt, als das Rumpfsystem aus Jupiter und seinen regulären Monden bereits stabil existierte, von diesem System durch seine Gravitation eingefangen wurden. Primäre Heimat dieser Satelliten sind daher andere Bereiche unseres Planetensystems. Bevorzugte Kandidaten hierfür sind der Kuiper-Gürtel und die Oort'sche Wolke, s. die Unterabsätze S. 1361 und S. 1366. Durch eine genauere Untersuchung dieser Satelliten werden wir also nicht unbedingt viel über die Entstehung des von Jupiter und seinen Monden gebildeten Systems lernen sondern eher etwas über die Himmelskörper, aus denen die beiden gerade genannten Asteroidengürtel bestehen.

Die Jupiter-Ringe (-) Jupiter besitzt ein (im Vergleich zu dem Ringsystem des Saturns) sehr dünnes Ringsystem aus bisher entdeckten 3 einzelnen Ringen. Diese liegen ebenfalls alle **innerhalb** der Io-Bahn.

(Der weitere Text des Unterabsatzes *Die Jupiter-Ringe* ist noch nicht verfügbar.)

Der Planet Saturn (-)

Auf den Jupiter folgt in unserem Planetensystem in Richtung größerer Entfernungen zur Sonne der Planet *Saturn*, benannt nach dem römischen Gott *saturnus*, dem Gott des Ackerbaus. Die Gesamtmasse des Saturn beträgt

$$M_{\text{Saturn}} = 5,6846 \cdot 10^{26} \cdot \text{kg} = 0,286 \cdot 10^{-3} \cdot M_{\odot} \quad (10.289)$$

also knapp 1/3 der Jupiter-Masse. Seine mittlere Entfernung von der Sonne ist etwa doppelt so groß wie die mittlere Entfernung Sonne/Jupiter, und seine Umlaufzeit um die Sonne beträgt

$$T_b^{(\text{sid.})} = 29,457 \cdot y \quad (10.290)$$

Die Exzentrizität seiner Bahn von

$$e = 0,054 \quad (10.291)$$

ist noch etwas größer als die der Jupiterbahn, und die Umlaufzeit seiner Eigenrotation ist mit

$$T_r = 10,783 \cdot h \quad (10.292)$$

nur geringfügig länger als die Jupiter-Umlaufzeit. Die Drehachse dieser Eigenrotation ist um den Winkel

$$\alpha_r = 26,73^\circ \quad (10.293)$$

gegen den Flächenvektor seiner Bahn verkippt. Dieser Wert entspricht etwa dem der Erde. Wir erwarten also zum einen Jahreszeiteffekte, die in der nördlichen und der südlichen Hemisphäre um 1/2 Saturnjahr gegen einander verschoben sind und eine relative Intensität zeigen ähnlich wie die Jahreszeiten auf der Erde. Zum anderen aber ändert sich die Sonneneinstrahlung überall auf dem Saturn im gleichem Maße periodisch im Laufe eines Saturnjahres auf Grund des oszillierenden Abstands von der Sonne. Die Amplitude dieses Effektes beträgt

$$\frac{\delta I_0}{I} \approx 0,11 \quad (10.294)$$

I.a. sind diese beiden Effekte um einen gewissen Phasenwinkel gegen einander verschoben. Im Jahr 2004 war auf der nördlichen Hemisphäre des Saturn gerade Winter.

Mit einer scheinbaren Helligkeit (s. Absatz S. 1194) von $-0,2$ ist der Saturn an unserem Nachthimmel gerade noch mit blosem Auge zu erkennen und war daher bereits den Astronomen der Antike bekannt. Seine Bahn ist um den Winkel

$$\alpha_b = 2,484^\circ \quad (10.295)$$

gegen die Erdbahn verkippt, und seine Umlaufzeit ist mit fast $30 \cdot y$ wesentlich länger als die der Erde. Daher folgt der Saturn an unserem Himmel immer nahezu synchron der Sonne auf ihrer Bahn und in einem nahezu konstanten zeitlichen Abstand. Die

Zeitdifferenz zwischen Sonnen- und Saturn-Zenith verschiebt sich mit einer Geschwindigkeit von

$$\frac{d\Delta t}{dt} \approx \frac{24 \cdot h}{29,5 \cdot y} = \frac{1 \cdot min}{7,5 \cdot d} \quad (10.296)$$

Unsere heutigen Kenntnisse über Saturn und seine Monde verdanken wir dem Vorbeiflug der Sonde Voyager-2 im Jahr 1980 und insbesondere der kombinierten NASA/-ESA-Mission *Cassini-Huygens*. Nach verschiedenen Manövern und Vorbeiflügen wurde die ESA-Sonde Huygens von Cassini entkoppelt und landete am 14.01.2005 auf dem Saturn-Mond Titan (s. Unterabsatz S. 1331). Die NASA-Sonde Cassini schwenkte am 07.07.2004 in eine Umlaufbahn um den Saturn ein. Die Abb. 66 zeigt

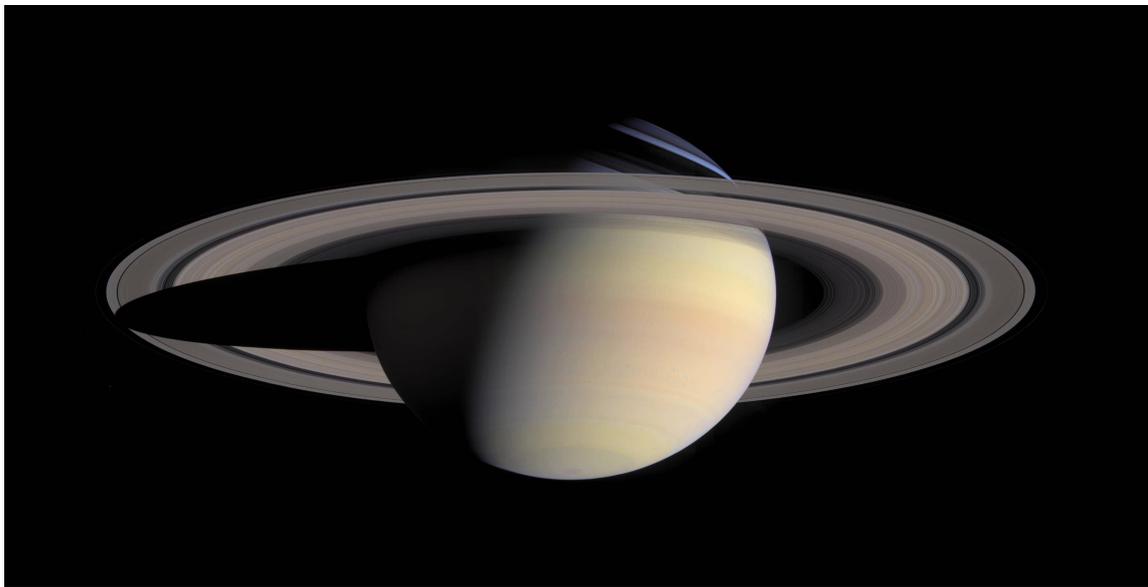


Abb. 66 Übersichtsaufnahme des Saturn, aus 126 von Cassini im Oktober 2004 aufgenommenen Einzel-Farbbildern erstellt
(credit: NASA/JPL/Space Science Institutes)

den Saturn in einer Übersichtsaufnahme, die aus 126 Einzelbildern zusammengesetzt wurde, die Cassini im Oktober 2004 aus einer Entfernung von $6,3 \cdot 10^6 \cdot km$ im Laufe von mehreren Stunden aufnahm. Der von den Objekten *Sonne / Saturn / Cassini* gebildete Winkel betrug während dieser Zeit 72° . Das den Saturn auszeichnende Ringsystem und die unterschiedliche Farbtönung der verschiedenen Bereiche der Saturn-Atmosphäre springen sofort ins Auge. Auf verschiedene Einzelheiten, die in dieser in den natürlichen Farben wiedergegebenen Aufnahme zu erkennen sind, werde ich noch zurück kommen.

Über die integrale Element-Zusammensetzung des Saturn gibt es bis heute nur

sehr grobe Schätzungen. Aus der mittleren Massendichte von

$$\langle m \rangle_{\text{Saturn}} = 0,687 \cdot 10^3 \cdot \frac{kg}{m^3} \quad (10.297)$$

- dies entspricht nur der Hälfte des für Jupiter geltenden Wertes - folgt, dass der relative Anteil an schwereren Elementen nochmals deutlich geringer ist. Saturn hat die geringste mittlere Massendichte von allen Planeten in unserem Planetensystem. Man ist sich jedoch heute sicher, dass auch der Saturn einen Kern aus Gesteinen und *Fe/Ni*-reichen Metallerzen besitzt. Die Gesamtmasse dieses Kerns schätzt man auf

$$M(\text{Kern}) \approx (3 \dots 16) \cdot M_{\text{Erde}} \quad (10.298)$$

und die Temperatur im Zentrum des Planeten auf

$$T_{\text{Kern}} \approx 1,2 \cdot 10^4 \cdot K \quad (10.299)$$

Wegen des enormen Drucks in diesem Kernbereich des Planeten ist der Kern vermutlich fest. Insgesamt ergibt sich aus diesen und weiteren Überlegungen sowie den bisher vorliegenden Messdaten die in der Abb. 58 (b) eingezeichnete Schalenstruktur:

Auf einen Kern aus Gesteinen und Metallerzen mit einem Durchmesser von $1,7 \cdot 10^4 \cdot km$ folgt eine $XXX \cdot 10^4 \cdot km$ dicke Mantelschale aus festem Wasser (H_2O), Ammoniak (NH_3) und Methan (CH_4). Die äußere Hülle aus Wasserstoff (H_2), Helium (He) und Methan (CH_4) hat eine Dicke von $XXX \cdot 10^4 \cdot km$. Man schätzt ihre Zusammensetzung auf

$$\frac{M(H_2)}{M_{ges}} = 0,93 ; \frac{M(He)}{M_{ges}} = 0,007 ; \frac{M(CH_4)}{M_{ges}} = XXX \quad (10.300)$$

(XXX: Die in dieser Aufzählung mit XXX gekennzeichneten Zahlenwerte sind noch nicht verlässlich verfügbar, s.u. . Daher habe ich sie auch noch nicht in die Abb. 58 (b) eingezeichnet.)

In den untersten Lagen dieser Schicht, etwa ab einer Tiefe von $3,1 \cdot 10^4 \cdot km$ wird der Wasserstoff auf Grund des dort herrschenden hohen Drucks wieder metallisch leitend (s. Absatz S. 1304). Die aktuell (2013) in der Literatur genannten Angaben über die Dicke dieser Schichten sind jedoch noch sehr widersprüchlich. Auch die (auf die NASA zurück gehende) Behauptung, dass der Kern auch (Wasser-)Eis enthalte, halte ich für mehr als fragwürdig, zumindest solange der in der Gl. 10.299 genannte Wert für die Temperatur im Zentrum des Kerns nicht angezweifelt wird.

Saturn erzeugt ein stationäres Magnetfeld, das in guter Näherung einem Dipolfeld entspricht mit dem Dipolmoment

$$\mathcal{M}_{magn} = 4,6 \cdot 10^{18} \cdot \mathcal{T} \cdot m^3 \quad (10.301)$$

Als primäre Ursache für dieses Magnetfeld vermutet man, ebenso wie beim Jupiter, heute die Existenz von stationären Kreisströmen innerhalb der Schale aus metallischem Wasserstoff.

Die Wärmebilanz des Saturns ist zumindest qualitativ in vielen Details mit der Bilanz des Jupiters vergleichbar. Bei beiden Planeten ist die Strahlungsbilanz > 1 :

$$\frac{J_e}{J_a}(\text{Saturn}) = 1,78 \quad (10.302)$$

Auch im Fall des Saturn müssen wir daher (zusätzlich zur Sonneneinstrahlung) eine stationäre Energiestromquelle ausfindig machen, die dazu führt, dass der Planet ständig fast das doppelte an Energiestrom abstrahlt als er von der Sonne empfängt.

(XXX: Der weitere Text über die Wärmebilanz des Saturn ist noch nicht verfügbar.)

Die obersten Schichten der Saturn-Atmosphäre bestehen überwiegend aus Methan mit geringen Beimengungen an Ammoniak und Wasser. Diese Beimengungen sind in diesen Schichten überwiegend gefroren und bilden Wolken. Insbesondere in Folge dieser Wolken sind diese Schichten für sichtbares Licht stark streuend und leicht gefärbt. Der Effekt der optischen Streuung lässt sich zur tiefenselektiven Analyse dieser obersten Schichten der Atmosphäre nutzen, insbesondere wenn man die benutzten Wellenlängen in einen für die gestellte Aufgabe optimalen Wellenlängenbereich i.a. innerhalb des **nahen Infrarot (NIR)** legt.

Wir beginnen jedoch die weitere Diskussion der Saturn-Atmosphäre mit einem Blick auf den Saturn in seinen natürlichen Farben, s. Abb. 67.

Der Nordpol des Planeten befindet sich auf diesem Bild oben, wobei die Drehachse leicht nach links verkippt ist. Die Position der aufnehmenden Kamera lag in diesem Fall leicht oberhalb der von den Saturnringen gebildeten Ebene, so dass diese keine Schatten warfen. Das Bild wurde aus insgesamt 6 Einzelaufnahmen zusammengestellt, jeweils 2 Aufnahmen hinter einem Schmalbandfilter im Wellenlängenbereich blau, grün, rot. Es zeigt den mit dem Wechsel der Jahreszeiten verbundenen Farbwechsel der jeweiligen Hemisphäre. Die Saturn-Atmosphäre nimmt im späten Frühjahr bis zum Herbstbeginn eine gelbliche Färbung an und wechselt im Spätherbst dann wieder in die azurblaue Färbung, eine unmittelbare Folge der unterschiedlich starken Bewölkung, die sich je nach mittlerer Temperatur der hierfür relevanten Schicht in der Atmosphäre bildet.

Die Auswertemethode, die zu der in der Abb. 68 wiedergegebenen Falschfarbendarstellung führte, hatte die Aufgabe, wolkenartige Strukturen innerhalb der Saturn-Atmosphäre darzustellen. Hierzu wurden 3 spektral unterschiedlich gefilterte Aufnahmen in den Farben blau ($890 \cdot nm$) / grün ($728 \cdot nm$) / rot ($752 \cdot nm$) dargestellt. Durch diese Technik der Darstellung im NIR-Rückstreukontrast erscheinen tief innerhalb der Atmosphäre liegende Wolken rot/orange, in großen Höhen liegende Wolken dagegen weiß. Die zwischen der Raumsonde und dem Planeten liegenden Saturnringe erzeugen dünne, horizontal verlaufende weiße Streifen, da diese Objekte weit außerhalb der Atmosphäre liegen. Die Ringe, die nicht im von der Kamera aufgenommenen Bereich liegen, erzeugen dagegen als schwarze Streifen bzw. Bänder wirkende Schatten. (XXX: Hinweis1)Die Ortsauflösung dieses Bildes beträgt $102 \cdot km/px$. Die

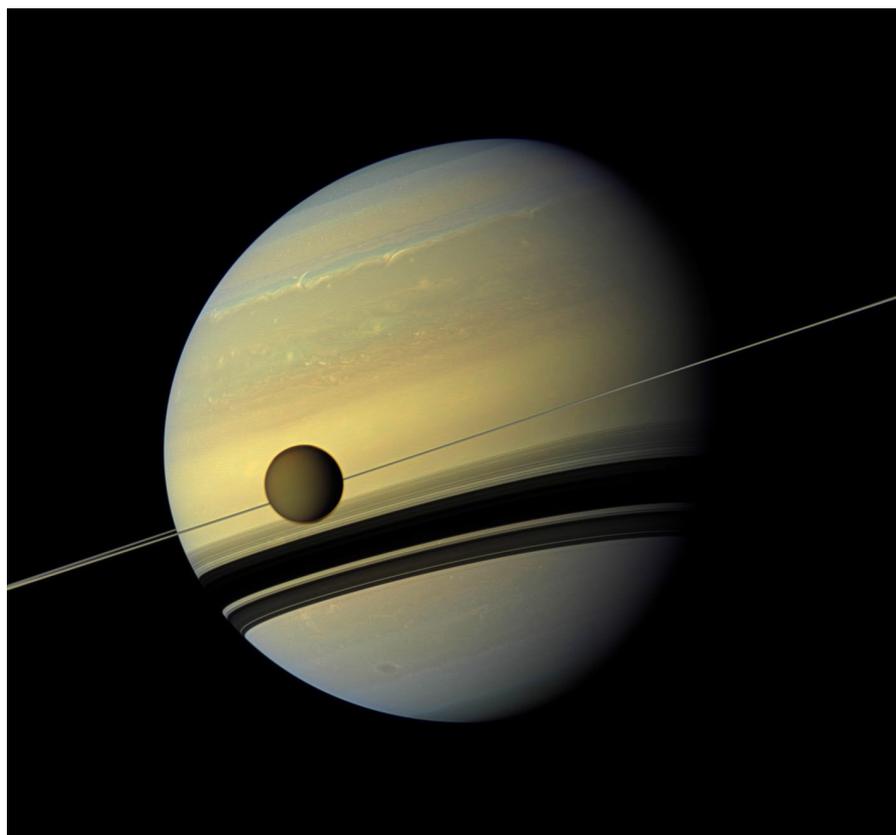


Abb. 67 Saturn und sein Mond Titan als annähernde Echtfarbenaufnahme, aufgenommen von der Sonde Cassini am 06.05.2012 aus einer Entfernung von $7,78 \cdot 10^5 \cdot km$ (Quelle: diese Abb. basiert auf einer Aufnahme aus der Cassini Multimedia Gallery; credit: NASA/JPL-Caltech/SSI)

deutlich erkennbaren Wirbelstrukturen sind also Strömungen tief innerhalb der Atmosphäre. Diese Wirbelstrukturen ändern sich offensichtlich stark mit den Jahreszeiten auf dem Saturn. Als sie zum ersten Mal entdeckt wurden, bestand sie im wesentlichen in einem einzigen großen Wirbel. Dieser erhielt, in Anlehnung an den Wirbel in der Jupiter-Atmosphäre, den Namen *großer weißer Fleck*.

An beiden Polen des Saturn befinden sich großräumige Wirbelstrukturen, s. Abb. 69. Diese sind offenbar stationär und ortsfest und zeigen eine Wolkenstruktur, die mit den auf der Erde in tropischen Wirbelstürmen auftretenden Strukturen verwandt ist. Die Drehrichtung dieser Wirbelstürme ist positiv (als entgegen dem Uhrzeigersinn) bei dem nordpolaren und negativ bei dem südpolaren Sturm. Bei der Abb. 69 entspricht die Technik der Farschfarbendarstellung der der Abb. 67. Sie zeigt lediglich das sog. *Auge* dieses Sturms, das aber bereits eine Ausdehnung der Größenordnung $2000 \cdot km$ hat. Die tiefe Rotfärbung in dieser Falschfarben aufnahme besagt, dass die registrierten Wolkenstrukturen sich tief im Inneren der Saturn-Atmosphäre

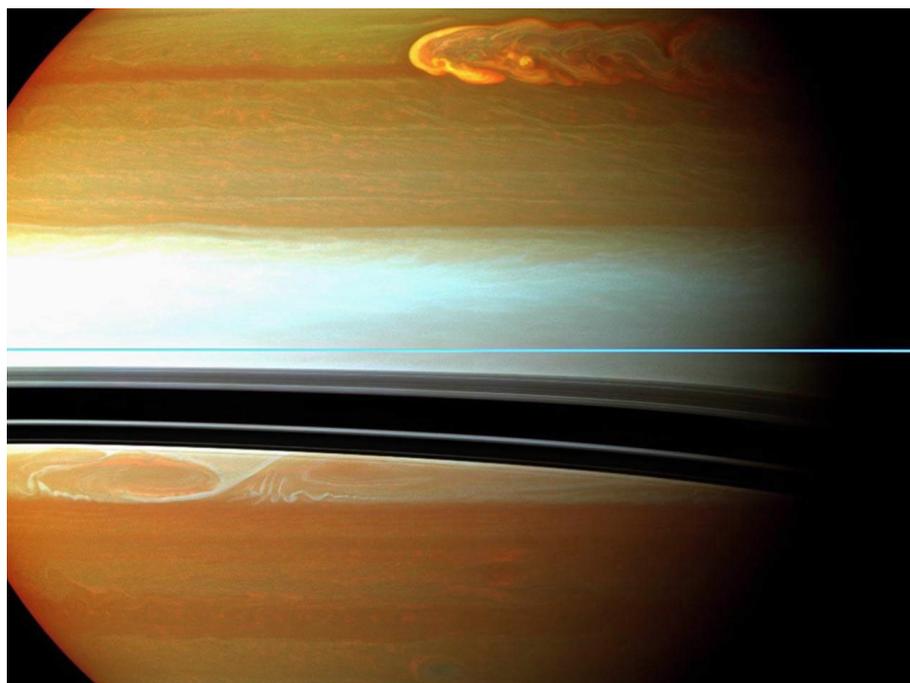


Abb. 68 Falschfarbendarstellung der Saturn-Atmosphäre, berechnet aus am 11.01.2011 von Cassini aus einer Entfernung von $9,15 \cdot 10^5 \cdot km$ aufgenommenen NIR-Aufnahmen (Quelle: Das Bild basiert auf dem image 29 der Cassini Image Gallery; credit: NASA/JPL/SSI)

befinden. Der gesamte Wirbelsturm hat eine Ausdehnung von ca. $2,5 \cdot 10^4 \cdot km$, und der äußere Wolkenbereich zeigt eine Umfangsgeschwindigkeit von $540 \cdot \frac{km}{h}$. Er existiert ohne Unterbrechung zumindest seit 2006. Und bereits 1981 entdeckte die Sonde Voyager 2 an derselben Stelle Teile einer ähnlichen Wirbelstruktur. Der diesen Wirbel steuernde strömungsphysikalische Mechanismus ist noch nicht geklärt. Wir müssen jedoch davon ausgehen, dass, wie im Fall der Hurrikans auf der Erde, die primäre Triebkraft ein vertikal gerichteter konvektiver Wärmestrom ist. Auch am Südpol des Saturn existiert ein Hurrikan-ähnlicher Wirbelsturm von einer ähnlichen Ausdehnung. Dieser wurde bereits 2006 von der Sonde Cassini entdeckt und photographiert. Seine Drehrichtung wurde zu diesem Zeitpunkt als rechtsdrehend identifiziert. Es wird die Hypothese diskutiert, dass die vollständige Strömungsstruktur, die sich durch diese beiden Wirbelstürme äußert, einer einzigen von Pol zu Pol reichenden Hadley-Zelle entspricht. Hierfür spricht u.a. die jeweilige Drehrichtung der polaren Wirbelstürme. Wenn die Sonneneinstrahlung die primäre Energiequelle für diese Strömung darstellt, müsste sie 2-mal pro Saturnjahr ihre Richtung umkehren.

(XXX: Der weitere Text über die Saturn-Atmosphäre ist noch nicht verfügbar.)

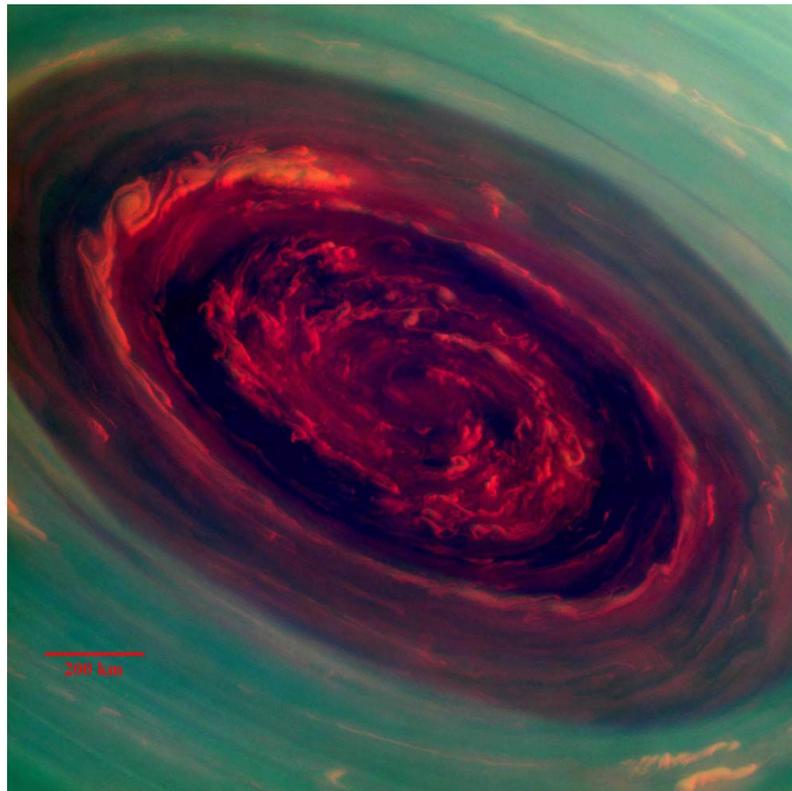


Abb. 69 Wolkenstruktur am Saturn-Nordpol als Falschfarbendarstellung, aufgenommen am 27.11.2012 von der Cassini-Raumsonde
(Quelle: Diese Abb. basiert auf der unter http://www.esa.int/Our_Activities/Space_Science/Cassini_eyes_Saturn_hurricane publizierten Aufnahme;
Credit: NASA/JPL-Caltech/SSI

Die Saturn-Monde (-) Heute sind insgesamt 62 Trabanten des Planeten Saturn bekannt. Die nachfolgende Tabelle zeigt die geometrischen Daten der Bahnbewegung und der Rotation der 5 der Masse nach größten dieser Monde. Die hierfür gewählte Reihenfolge orientiert sich an der Größe der Bahnen. Alle diese 5 Monde wurden bereits in den Jahren 1672 bis 1684 von Cassini entdeckt.

	$p(\text{Bahn})$ $/10^5 \cdot km$	e $/10^{-3}$	$T_b^{(sid.)}$ $/d$	α_b $/^\circ$	α_r $/^\circ$
Tethys	2,9460	0,1	1,888	1,12	0,034
Dione	3,774	2,2	2,737	0,02	0,006
Rhea	5,271	1	4,518	0,35	0,029
Titan	12,22	29,2	15,945	0,33	1,942
Iapetus	35,61	28,28	79,33	7,52	0°

Auch diese 5 Monde führen, genau so wie die Galilei'schen Jupiter-Monde, eine einfach gebundene Rotation aus, d.h. ihre Zeiten für einen Umlauf um den Saturn und für eine Eigenrotation sind identisch. Ihre Drehachse der Eigenrotation ist nur minimal gegenüber ihrer Bahnebene verkippt.

Die wichtigsten **physikalischen** Daten dieser Monde sind in der nun folgenden Tabelle zusammengestellt.

	Tethys	Dione	Rhea	Titan	Iapetus
$M_{\text{ges.}} / 10^{21} \cdot kg$	0,6176	1,096	2,3166	134,5	1,974
$\langle D_{\text{Mond}} \rangle / 10^3 \cdot km$	1,060	1,118	1,528	5,150	1,436
$\langle m \rangle / 10^3 \cdot kg/m^3$	0,984	1,476	1,233	1,88	1,17
$\varepsilon_{\text{Oberfl.}}$	0,20	0,45	0,35	0,79	0,96 / 0,5
$T_{\text{Oberfl.}} / K$	86	87	73	94	53 / 123
$M_{\text{Atmosph.}} / kg$					
$p_{\text{Oberfl.}} / bar$				1,467	

Von diesen herausgegriffenen 5 Saturn-Monden erreicht nur der Mond Titan eine Masse, die mit der Masse der Galilei'schen Jupiter-Monde vergleichbar ist. Auf die Masse des Titan bezogen liegt die Masse der übrigen 4 in diese Tabelle aufgenommenen Saturn-Monde nur im Bereich von 1 ... 2 · %. Man kann daher vermuten, dass nur der Saturn-Mond Titan nach einem ähnlichen Mechanismus entstanden ist wie die Galilei'schen Jupiter-Monde.

Die übrigen Saturn-Monde sind allesamt nochmals deutlich kleiner, für sie gilt

$$M < 1 \cdot 10^{20} \cdot kg ; D < 500 \cdot km \quad (10.303)$$

Eine simultane Real-Aufnahme von insgesamt 5 der Saturn-Monde gelang der Sonde Cassini am 29.07.2011, s. Abb. 70. Diese Abb. basiert auf einer Real-Aufnahme der Cassini-Sonde und zeigt im Vordergrund (und den Saturn verdeckend) den Mond Rhea. Seine Entfernung zur Sonde betrug zum Zeitpunkt der Aufnahme $1,1 \cdot 10^6 \cdot km$. Dahinter und knapp oberhalb der Ebene, in der sich die Saturnringe befinden, erkennen wir (partiell von Rhea verdeckt) den Mond Mimas. Im Sonnenlicht hell leuchtend und deutlich oberhalb der inneren Ringstrukturen befindet sich der Mond Enceladus, während der kleine Mond Pandora sich innerhalb des Ringsystems bewegt. Deutlich außerhalb dieser Ringstrukturen erkennen wir schließlich noch den Mond Janus mit seiner deutlich von der Kugelform abweichenden Form.

Der Kenntnisstand über die Saturn-Monde hat sich insbesondere durch die Cassini-Huygens-Mission von NASA, ESA und ASI (**A**genza **S**paziale **I**taliana) ganz wesentlich verbessert. Erste Hinweise über die chemische Zusammensetzung dieser Monde erhält man bereits auf Basis ihrer mittleren Massendichte. Man geht heute davon aus, dass alle diese Trabanten als Hauptbestandteile Wasser und Silikatgesteine enthalten und (zumindest teilweise) Verbindungen, die schwerere Elemente wie Eisen und Nickel enthalten. Dazu hat man Hinweise auf (zumindest geringe) Anteile an

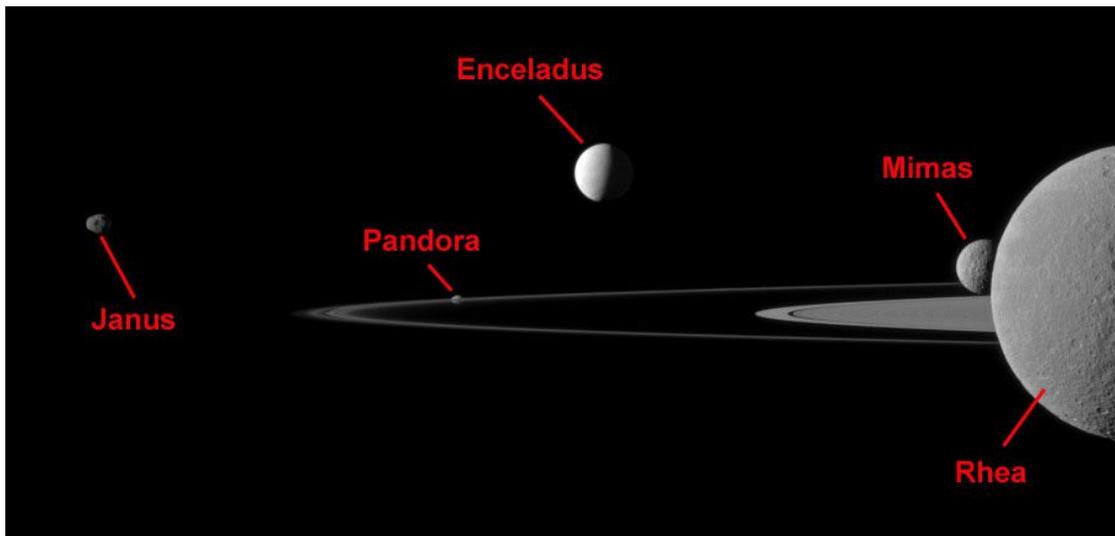


Abb. 70 Die Saturn-Monde Rhera, Mimas, Enceladus, Pandora und Janus, aufgenommen am 29.07.2011 von der Raumsonde Cassini

(Quelle: diese Abb. basiert auf dem Bild Quintet of moons der NASA; credit NASA/JPL-Catech/Space Science Institute)

einfachen organischen Verbindungen (CH_4 , NH_3 etc.) erhalten. Wir wollen nun als grobes Modell annehmen, dass ein Saturn-Mond in 1. Näherung aus einem silikatischen Kern und einem (flüssigen oder festen) Mantel aus Wasser besteht. Den Durchmesser des Mondkerns kennzeichnen wir mit D_K , den Gesamtdurchmessers des Mondes mit D . Als Richtwert für die Massendichte dieses Kerns orientieren wir uns an der Massendichte des oberen Erdmantels, für den Mantel verwenden wir die Dichte von Eis:

$$m_K \approx 5 \cdot \frac{g}{cm^3}; m_M \approx 0,92 \cdot \frac{g}{cm^3} \quad (10.304)$$

Die mittlere Massendichte eines derartigen Objektes ist offenbar

$$\begin{aligned} m &= \frac{6}{\pi \cdot D^3} \cdot \left(\frac{\pi}{6} \cdot D_K^3 \cdot m_K + \frac{\pi}{6} \cdot \{D^3 - D_K^3\} \cdot m_M \right) \\ &= \frac{1}{D^3} \cdot (D_K^3 \cdot m_K + \{D^3 - D_K^3\} \cdot m_M) \end{aligned} \quad (10.305)$$

Wir lösen diese Gl. auf nach dem Durchmesserverhältnis:

$$\left(\frac{D_K}{D} \right)^3 = \frac{m - m_M}{m_K - m_M} \quad (10.306)$$

Mit Hilfe dieser Gl. erhalten wir also einen ersten Orientierungswert für das Größenverhältnis von Silikatkern und Wassereismantel eines jeden Mondes.

Die angegebenen Oberflächentemperaturen sind wieder im Vergleich zu der für diese Position innerhalb unseres Planetensystems geltende astronomische Referenztemperatur von

$$T_{ref}(\text{Saturn}) = 90,2 \cdot K \quad (10.307)$$

zu diskutieren.

In den nun folgenden Unterabsätzen werde ich insgesamt 6 dieser Saturnmonde näher beschreiben. Dabei werde ich u.a. die lfd. Nr. angeben, die deren Bahndurchmesser in der Gesamtheit der aktuell (2014) bekannten Saturnmonde jeweils einnimmt. Hierbei verwende ich eine von innen nach außen führende Zählung. Bei Monden, auf deren Bahn sich auch noch Trojaner befinden (s. auch Absatz S.), werde ich diese Bahn nur einfach zählen.

Tethys (-) Der Saturnmond *Tethys* nimmt in der Massenabfolge den 5. und in der Reihenfolge der Bahndurchmesser den 15. Platz der heute bekannten Saturnmonde ein. Er wurde 1684 von Cassini entdeckt. Seinen Namen erhielt er von *Tethys*, der Tochter des *Uranos* und der *Gaia* aus der griechischen Mythologie. Seine Bahn ist fast perfekt kreisförmig.

Die Masse von Tethys entspricht nur etwa 1% der Masse des Jupitermondes Io. Auf seiner Bahn befinden sich auch - als Trojaner jeweils um 60° verschoben - die noch kleineren Monde *Teleso* und *Calypso*.

Die besonders niedrige mittlere Massendichte von $0,984 \cdot \frac{g}{cm^3}$ deutet darauf hin, dass Tethys überwiegend aus Wassereis besteht. Über die Gl. 10.306 erhalten wir einen Richtwert von

$$\frac{D_K}{D} = \sqrt[3]{\frac{m - m_M}{m_K - m_M}} = \sqrt[3]{\frac{0,984 - 0,92}{5 - 0,92}} = 0,25 \quad (10.308)$$

Trotz seiner geringen Masse war auch dieser Himmelskörper im Anschluss an seine Entstehung noch einmal vollständig verflüssigt und zwar für eine Zeit, die ausreichte, um über die Eigen-Gravitation eine weitgehend kugelförmige Gestalt anzunehmen, wie sie in der Abb. 71 wiedergegeben ist. Da Tethys vermutlich überwiegend aus Wasser besteht, genügte hierfür ein Temperatur der Größenordnung 100°C.

Dione (-) Der Saturnmond *Dione* nimmt in der Massenabfolge den 4. und in der Reihenfolge der Bahndurchmesser den 16. Platz der heute bekannten Saturnmonde ein. Er wurde 1684 von Cassini entdeckt. Seinen Namen erhielt er von *Dione*, einer Titanin aus der griechischen Mythologie, der Mutter der Aphrodite.

Auf der Dione-Bahn befinden sich auch - als Trojaner jeweils um 60° verschoben - die nochmals deutlich kleineren Monde *Helene* und *Polydemes*.

Dione hat mit einem Absorptionskoeffizienten von 0,45 eine vergleichsweise dunkle Oberfläche. Die mittlere Massendichte von $1,4763 \cdot \frac{g}{cm^3}$ belegt, dass Dione nicht nur aus Wassereis bestehen kann, sondern vermutlich einen Kern besitzt aus

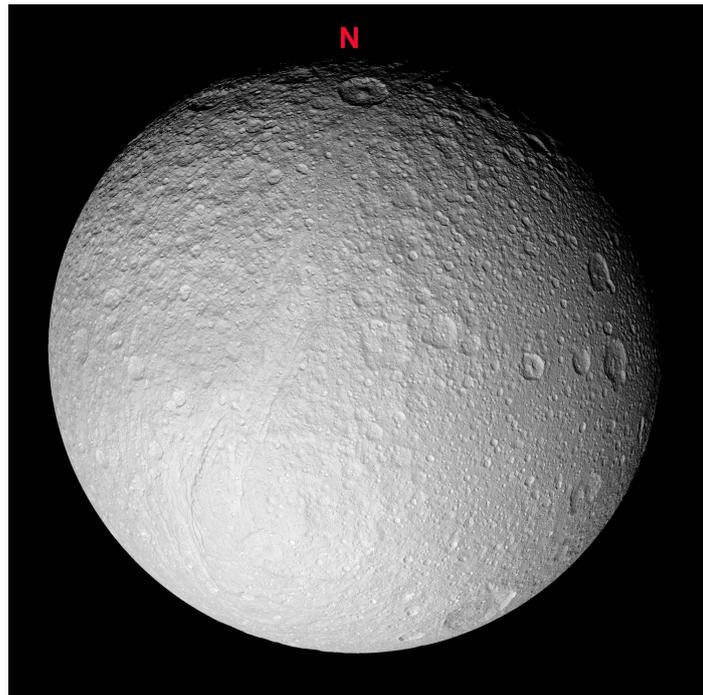


Abb. 71 Oberfläche von Tethys, aufgenommen am 24.09.2005 von der Sonde Cassini aus einer Entfernung von $1,5 \cdot 10^3 \cdot km$; das Bild wurde aus 9 Einzelbildern zusammengesetzt (credit: NASA/JPL/Space Science Institute; catalog no. PIA07738)

Materialien höherer Massendichte als Wasser, vermutlich aus Silikatgesteinen. Über die Gl. 10.306 erhalten wir für den Durchmesser dieses Kerns einen Richtwert von

$$\frac{D_K}{D} = \sqrt[3]{\frac{m - m_M}{m_K - m_M}} = \sqrt[3]{\frac{1,4763 - 0,92}{5 - 0,92}} = 0,515 \quad (10.309)$$

Zu diesem Befund passen auch die Hinweise, dass Dione in seiner Frühzeit sog. Kryovulkanismus zeigte. Diese Vermutung folgert man aus den auf der Dione-Oberfläche vorhandenen Rissen.

Die Exosphäre von Dione besteht überwiegend aus O_2 . (XXX: Der weitere Text des Unterabsatzes *Dione* ist noch nicht verfügbar.)

Rhea (-) Der Saturnmond *Rhea* nimmt in der Massenabfolge den 2. und in der Reihenfolge der Bahndurchmesser den 17. Platz der heute bekannten Saturnmonde ein. Rhea wurde 1672 von Cassini entdeckt. Seinen Namen erhielt er von *Rhea*, einer der Töchter des Uranos und der Gaia aus der griechischen Mythologie. Die Bahn von Rhea ist nahezu perfekt kreisförmig.

Aus der mittleren Massendichte von $1,233 \cdot \frac{g}{cm^3}$ schließen wir, dass auch Rhea unter einem Mantel aus Wassereis einen Kern aus Silikatgestein besitzt. Auf Basis

der Gl. 10.306 erhalten wir als Richtwert des Durchmesserverhältnisses

$$\frac{D_K}{D} = \sqrt[3]{\frac{m - m_M}{m_K - m_M}} = \sqrt[3]{\frac{1,233 - 0,92}{5 - 0,92}} = 0,42 \quad (10.310)$$

Die Rhea-Oberfläche ist mit einem Absorptionsfaktor von 0,35 relativ dunkel.

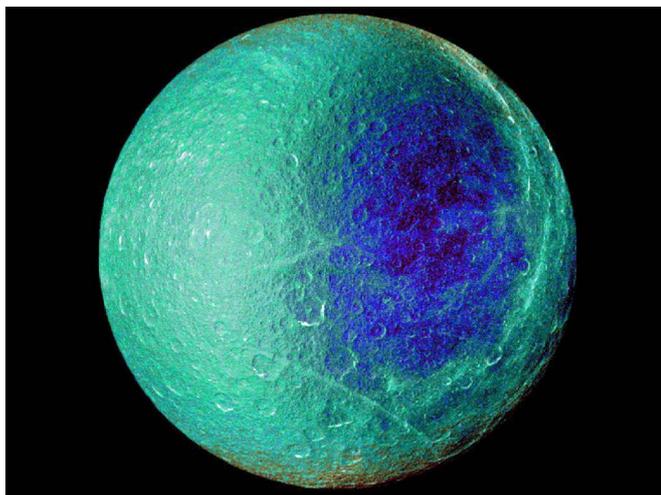


Abb. 72 Falschfarbenaufnahme von Rhea, aufgenommen am 2.03.2010 von der Sonde Cassini
(credit: NASA)

Sie enthält wahrscheinlich signifikante Beimengungen von Materialien, die sichtbares Licht stark absorbieren, z.B. Ammoniumsulfat $((NH_4)_2SO_4)$. Aussagekräftige Aufnahmen der Rhea-Oberfläche gelangen der Sonde Cassini am 02.03.2010 bei einem Vorbeiflug, der sie bis auf einen Minimalabstand von $3,5 \cdot 10^4 \cdot km$ an den Mond heranzuführte. Die in der Abb. 72 wiedergegebene Aufnahme zeigt die Hemisphäre von Rhea, die ständig dem Saturn zugewandt ist. Die Bewegungsrichtung von Rhea verläuft in dieser Abb. von links nach rechts. Die Farbdarstellung entspricht einer starken Überhöhung des realen Farbkontrastes unter Beibehaltung der relativen Unterschiede im integralen Rückstreukontrast: Es wurden 4 unterschiedlich gefilterte Aufnahmen gewichtet überlagert: UV / grün / IR / farbneutral. Die ersten 3 dieser Bilder wurden den Farben blau / grün / rot zugeordnet und danach derart mit dem farbneutralen Bild vermischt, dass der integrale Rückstreukontrast korrekt wiedergegeben wird. Von welcher Art die offenbar vorhandenen Unterschiede in der Struktur der Oberflächenschicht sind und welches die Ursachen für das Zustandekommen dieser Unterschiede sind, ist noch weitgehend ungeklärt.

Die Exosphäre von Rhea besteht überwiegend aus O_2 u. CO_2 .

Titan (-) *Titan* ist der Saturn-Mond mit der weitaus größten Masse. Er wurde 1789 von Herschel entdeckt. Seinen Namen erhielt er von der Familie von Riesen in Menschengestalt aus der griechischen Mythologie, den *Titanen* (griech. *Τιταν*). In der Reihenfolge der Bahndurchmesser nimmt er den 18. Platz der heute bekannten Saturnmonde ein. Er hat das besondere Interesse der Wissenschaft insbesondere deshalb gefunden, weil er in einer Reihe von Kenndaten unserer Erde sehr ähnlich ist. Sein Durchmesser beträgt

$$D(\text{Titan}) \approx 0,404 \cdot D(\text{Erde}) \quad (10.311)$$

seine Masse erreicht jedoch nur den Wert

$$M(\text{Titan}) \approx 0,023 \cdot M(\text{Erde}) \quad (10.312)$$

Vergleiche mit der Erde können daher schon allein aus diesem Grund nur sehr eingeschränkt gezogen werden.

Mit einer scheinbaren Helligkeit von

$$H_{\text{sch}}(\text{Titan}) = 8,4 \quad (10.313)$$

und für einen Erdbeobachter einem Winkelabstand von Saturn von

$$\alpha \leq 3' \quad (10.314)$$

ist er bereits mit einfachen Teleskopen vom Erdboden aus beobachtbar. Unsere Kenntnisse über den Titan verdanken wir wieder ganz überwiegend der Cassini-Huygens-Mission, jetzt nicht nur über die während mehrerer Vorbeiflüge gewonnenen Messdaten, sondern auch durch die im Januar 2005 gelungene weiche Landung der Sonde *Huygens* auf der Titan-Oberfläche. (XXX: Der diese Abb. beschreibende Text ist noch nicht verfügbar.)

Der Beruhigungsvorgang im Anschluss an den 1. Bodenkontakt dauerte etwa $10 \cdot s$. Hieraus schlossen die verantwortlichen Wissenschaftler auf einen weichen, dämpfenden, sand-ähnlichen Boden an der Landestelle. Im Anschluss an diese Landung sendete Huygens noch während gut $1 \cdot h$ Messdaten und Bilder von der Titan-Oberfläche (s. Abb. 73), um danach für immer zu verstummen.

(XXX: Der die Elementzusammensetzung des Titan behandelnde Text ist noch nicht verfügbar.)

Titan hat kein mit den bisher eingesetzten Techniken nachweisbares Magnetfeld.

Der Titan hat vermutlich in etwa die in der Abb. XXX skizzierte Schalenstruktur:

(XXX: Diese Abb. ist noch nicht verfügbar.)

Auf einen Kern aus *Fe/Ni* und aus Silikatgesteinen folgt eine ca. $250 \cdot km$ tiefe Schicht aus flüssigem Wasser, angereichert mit verschiedenen organischen Substanzen. Die

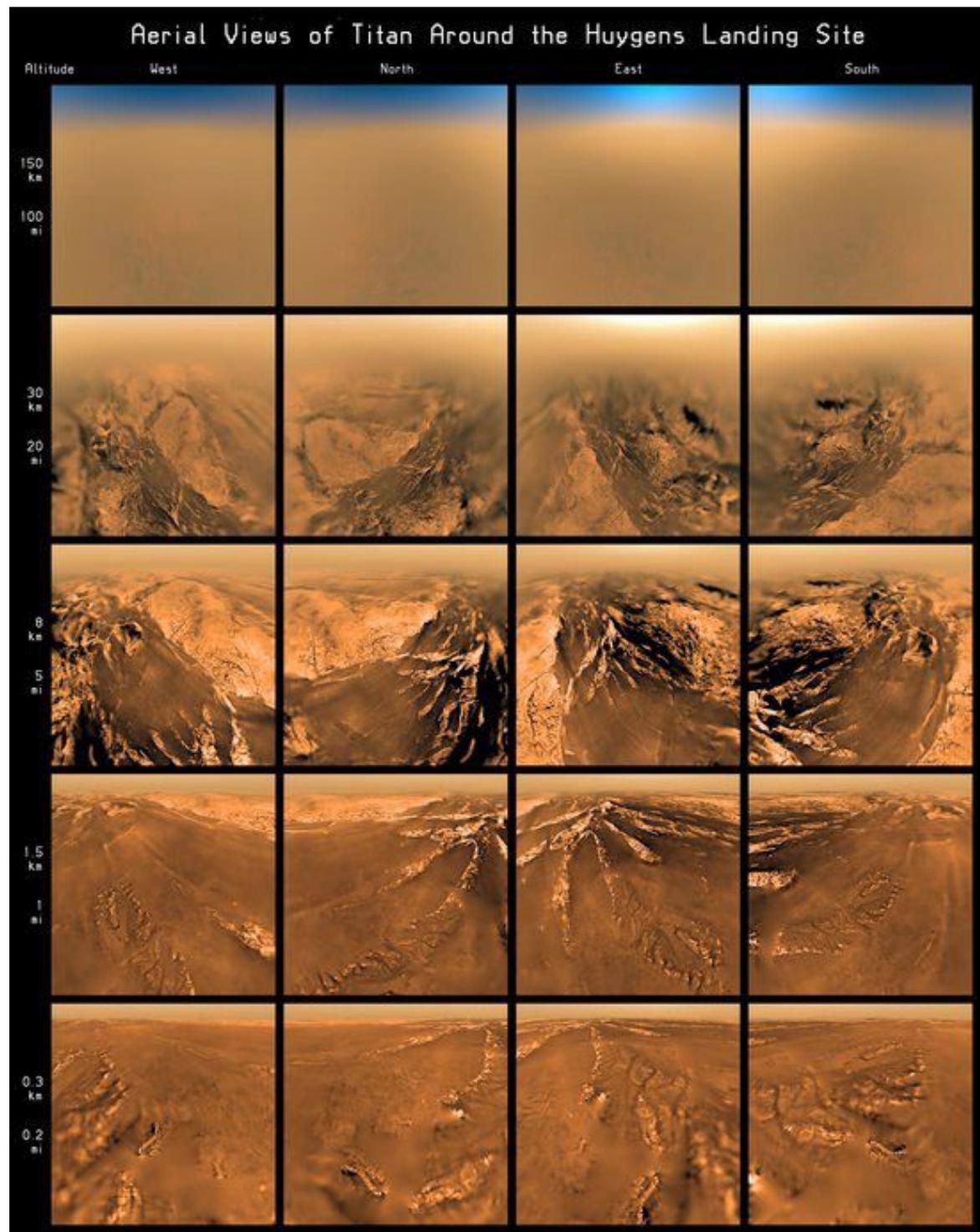


Abb. 73 360°-Panorama-Aufnahmen der Titan-Oberflächenstruktur, aufgenommen von der Sonde Huygens während ihres Sinkflugs bis zum Titan-Boden.
(credit: ESA/NASA/JPL/University of Arizona)

ca. $50 \cdot km$ dicke feste Oberflächenschicht besteht aus mit Ammonium (als NH_4^+ -Ion gelöstes Ammoniak) und Ammoniumsulfat ($(NH_4)_2 SO_4$) sowie verschiedenen organischen Substanzen angereichertem Wassereis. Die Titan-Oberfläche ist in weiten Bereichen nahezu eben. Eine Ausnahme bildet die Äquatorregion. Diese trägt den Namen *Xanadu* und ist von Bergrücken durchzogen, die Gipfelwerte bis zu $2000 \cdot m$ erreichen. Die sich daran anschließende Region der mittleren Breiten ist topographisch kaum strukturiert und von einer sand-ähnlichen Schicht bedeckt. Der dort vorherrschende Wind erzeugt in ihnen dünen-ähnliche Verwerfungen.

Es gibt Hinweise darauf, dass auch der Mond Titan vulkanisch aktiv ist oder zumindest in der Vergangenheit gewesen ist. Primäre Triebkraft hierfür kann auch in diesem Fall nur eine im Inneren des Titan lokalisierte Wärmestromquelle ausreichender Intensität sein. Auch meiner Einschätzung nach ist die naheliegende Erklärung auch in diesem Fall der Gehalt an langlebigen radioaktiven Elementen in einem für diesen Ablauf ausreichenden Umfang. Wegen seines im Vergleich zur Erde deutlich anderen Schichtaufbaus besteht beim Titan der bei einem Vulkanausbruch an die Oberfläche austretende Materialstrom nicht wie bei der Erde aus über $1200 \cdot K$ heißen und daher flüssigen basaltischen Silikaten, sondern aus erschmolzenem Wassereis, Kohlenwasserstoffen und Ammoniak. Dieser Vorgang wird meist als *Kryo-Vulkanismus* bezeichnet, eine Formulierung, die aus meiner Sicht zumindest didaktisch ungeschickt, wenn nicht irreführend gewählt ist.

Die integrale chemische Zusammensetzung der Titan-Atmosphäre zeigt die folgende Tabelle:

Substanz i	N_2	CH_4	C_2H_5OH	Ar
M_i/M_{ges}	0,984	XXX	XXX	0,016

Wegen seiner deutlich geringeren Dichte als N_2 sammelt sich das Methan (CH_4) zusammen mit weiteren, in Spuren vorhandenen Kohlenwasserstoffen überwiegend in mittleren Höhen der Atmosphäre und bildet dort Wolken. In deutlich größeren Höhen bilden sich durch die UV-Einstrahlung eine Vielzahl sehr unterschiedlicher organischer, z.T. polyzyklischer Verbindungen. Die schwereren Substanzen unter diesem Gemisch sinken bis in die Oberflächennähe ab und bilden einen orangefarbenen Nebel. Wegen dieses Nebels ist die Atmosphäre insgesamt betrachtet optisch stark streuend und orange bis braun gefärbt, so dass durch externe optische Beobachtungen z.B. von der Erde aus oder auch von der den Titan passierenden Sonde Cassini kein Blick bis auf die Titan-Oberfläche möglich ist. Daher wurde Cassini mit einem abbildenden Radarsystem ausgestattet. Insgesamt betrachtet zeigt die Titan-Atmosphäre eine deutliche Schichtung in eine Vielzahl unterschiedlich zusammengesetzter Schichten. Die für den Wärmetransport durch Gasströmungen verantwortliche Schicht, die auch beim Titan als *Troposphäre* bezeichnet wird, reicht bis zu einer Höhe von ca. $44 \cdot km$. Die darauf folgende Ionosphäre hat ihr Zentrum in etwa $1200 \cdot km$ Höhe. In ihr laufen

die bereits genannten UV-induzierten organisch-chemischen Prozesse ab.

Eine Deutungs-Hypothese zur Entstehung dieser Atmosphäre lautet: Durch den UV-Strahlungsanteil des Sonnenlichtes wurden Teile der Oberflächenschicht des Titans zersetzt. Der dabei entstehende Stickstoff bildet die heutige Atmosphäre, der Wasserstoff diffundierte in den Weltraum ab. Eine weitere, aktuell (2013) ernsthaft diskutierte Deutungs-Hypothese für das Fehlen von Wasserstoff und gewissen weiteren Kohlenwasserstoffen, die sich unter diesen Bedingungen bilden sollten, insbesondere Ethin (Trivialname Acetylen, Strukturformel s. Abb. 74 (b)), lautet:

Diese Substanzen werden von hierauf spezialisierten Mikro-Organismen für ihren Stoffwechsel verwendet und von ihnen in andere Substanzen (XXX: präzisieren) umgewandelt.

Hierfür gibt es jedoch bisher (noch) keine weiteren belastbaren Hinweise. Interessant ist jedoch in diesem Zusammenhang, dass die Sonde Cassini in der Titan-Atmosphäre kein Ethin nachweisen konnte, dafür aber signifikante Mengen von Propen (C_3H_6 , Trivialname Propylen, Strukturformel s. Abb. 74 (a)) nachweisen konnte.

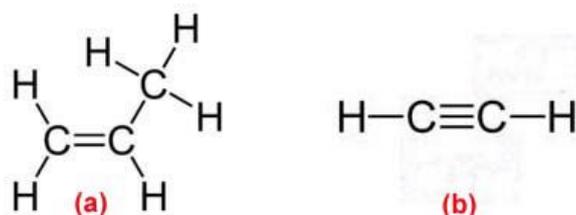


Abb. 74 Strukturformel von (a) Propen und (b) Ethin

Das Methan spielt für die Wärmeströme und Stofftransporte innerhalb der Titan-Atmosphäre dieselbe Rolle wie das Wasser in der Erd-Atmosphäre: Es kondensiert in größeren Höhen zu (Methan-)Wolken, die sich an anderer Stelle wieder abregnen. Dieser Methan-Niederschlag sammelt sich dann in Flüssen und Seen, aus denen er wieder verdunstet. Insgesamt führt dieser Zyklus zu einem Wärmetransport von der Titan-Oberfläche in größere Höhen der Titan-Atmosphäre. Dank der Cassini-Mission ist diese Deutung keine Arbeitshypothese mehr, sondern durch Fakten belegt. Die Abb. 75 zeigt den in den nördlichen Regionen des Titan gelegenen Methan-See *Ligeia Mare*, von Cassini während seiner Vorbeiflüge in der Zeit von 02.2006 bis 02.2007 im Radar-Rückstreukontrast aufgenommen und danach graphisch aufbereitet.

Das Zentrum dieses Sees liegt auf $79^\circ N/248; 0^\circ W$. Die Gesamtheit von meanderförmigen Zuflüssen in den fast $500 \cdot km$ langen See und kleinen Inseln innerhalb dieses Sees erinnert stark an ähnliche Landschaften auf der Erde. Insgesamt ist aktuell die Konzentration an Methan-Seen auf der südlichen Hemisphäre deutlich geringer als auf der nördlichen Hemisphäre (XXX: präzisieren). Man nimmt an, dass es sich

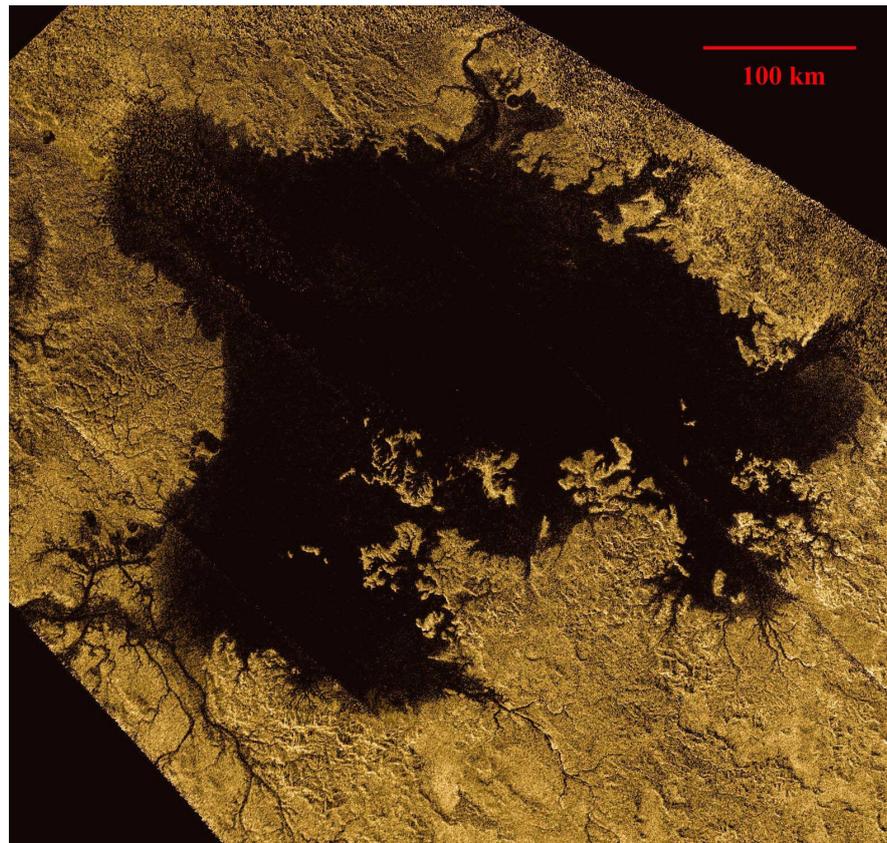


Abb. 75 See Ligeia Mare in der Nordregion des Titan; aus Radar-Messungen der Sonde Cassini errechnet und zwecks Kontrastanhebung falschfarbenkodiert (credit: NASA/JPL-Caltech/ASI/Cornell)

hierbei um einen jahreszeitlich gesteuerten Vorgang handelt. Aktuell (2013) ist auf der nördlichen Hemisphäre des Titan, genau so wie auf dem Saturn), gerade später Frühling. Die Sommer-Sonnenwende wird 2016 erreicht. Wenn die obige Annahme zutrifft, werden sich die Verhältnisse bis zum Jahr 2023 herum gedreht haben. Dann werden die nördlichen Seen überwiegend ausgetrocknet sein, und auf der südlichen Hemisphäre werden sich in ähnlichem Umfang Seen gebildet haben.

Iapetus (-) Der Saturnmond *Iapetus* nimmt in der Massenabfolge den 3. und in der Reihenfolge der Bahndurchmesser den 20. Platz der heute bekannten Saturnmonde ein. Er wurde 1671 von Cassini entdeckt. Seinen Namen erhielt er von *Iapetos*, einem Sohn des Uranos und der Gaia aus der griechischen Mythologie. Iapetus ist der größte Körper in unserem Planetensystem, bei dem die Laplace-Ebene sowohl von seiner Äquatorebene als auch von der Ekliptik stark abweicht(XXX: präzisieren).

Aus der mittleren Massendichte von $1,17 \cdot \frac{g}{cm^3}$ schließen wir, dass auch Iapetus unter einem Mantel aus Wassereis einen Kern aus Silikatgestein besitzt. Auf Basis der Gl. 10.306 erhalten wir als Richtwert des Durchmesserverhältnisses

$$\frac{D_K}{D} = \sqrt[3]{\frac{m - m_M}{m_K - m_M}} = \sqrt[3]{\frac{1,17 - 0,92}{5 - 0,92}} = 0,183. \quad (10.315)$$

Seine Oberfläche besteht aus 2 optisch deutlich unterscheidbaren Teilen. Die Absorptionskoeffizienten dieser beiden Teilflächen betragen

$$\varepsilon(A_1) = 0,95 \dots 0,97 \quad (10.316)$$

$$\varepsilon(A_2) = 0,5 \quad (10.317)$$

D.h. die Fläche A_1 ist nahezu ideal schwarz und die Fläche A_2 etwas dunkler als im globalen Mittel unsere Erdoberfläche.

(XXX: Der weitere Text des Unterabsatzes *Iapetus* ist noch nicht verfügbar.)

Enceladus (-) Der Saturnmond *Enceladus* nimmt in der Massenabfolge den 6. und in der Reihenfolge der Bahnradien den 14. Platz der heute bekannten Saturnmonde ein. Er wurde 1789 von Herschel entdeckt. Sein Name geht auf *Enkelados* (griech. *Εγκελαδος*, der Tobende) zurück, einem der Giganten aus der griechischen Mythologie. Seine fast perfekt kreisförmige Bahn liegt vollständig innerhalb des sog. E-Ringes des Ringsystems des Saturn, s. Unterabsatz S. 1339. Ich habe diesen Mond mit in die Beschreibung einiger ausgewählter Saturnmonde aufgenommen, weil Dank der Cassini-Huygens-Mission gerade über diesen Mond besonders viele und z.T. überraschende Fakten bekannt geworden sind.

Aus der mittleren Massendichte von $1,61 \cdot \frac{g}{cm^3}$ schließen wir, dass auch Enceladus unter einem Mantel aus Wassereis einen Kern aus Silikatgestein besitzt. Auf Basis der Gl. 10.306 erhalten wir als Richtwert des Durchmesserverhältnisses

$$\frac{D_K}{D} = \sqrt[3]{\frac{m - m_M}{m_K - m_M}} = \sqrt[3]{\frac{1,61 - 0,92}{5 - 0,92}} = 0,553 \quad (10.318)$$

Die globale Wärmebilanz von Enceladus ist signifikant positiv. Man schätzt heute (2014) den in seinem Inneren generierten Wärmestrom auf

$$J = 15,8 \cdot GW \quad (10.319)$$

Einen guten Überblick über die Oberflächenstruktur von Enceladus gibt die Abb. 76. Auf dieser Aufnahme befindet sich der Enceladus-Nordpol mittig am oberen Bildrand. Die Oberfläche weist relativ wenig Einschlagkrater auf, sie ist daher relativ jung. Man schätzt ihr mittleres Alter auf

$$\mathbb{A} \gtrsim 10^8 \cdot y \quad (10.320)$$

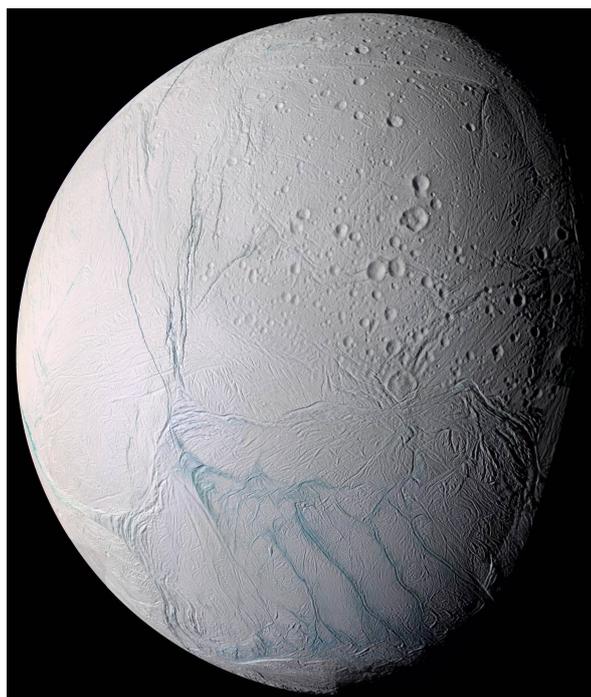


Abb. 76 Blick von der Sonde Cassini auf die dem Saturn abgewandte Hemisphäre des Enceladus; diese Falschfarbenaufnahme wurde aus 21 am 14.07.2005 aufgenommenen Einzelbildern errechnet. Sie umfasst den Spektralbereich vom UV bis zum IR. (credit: NASA/JPL/Space Science Institute)

In der Nähe seines Südpols erkennt man eine Reihe von Bruchstellen seiner Oberfläche, den sog. *tiger stripes*. Aus ihnen stößt Enceladus Jetstrahlen von Eis und Wasserdampf aus, s. Abb. 77. Diese Jets befinden sich auf einer deutlich höheren Temperatur als das übrige Material der Enceladus-Oberfläche. Man nimmt heute an, dass dieser Materialausstoß eine wesentlich Ursache ist für die Ausbildung des sog. E-Ringes des Saturn-Ringsystems (s. Unterabsatz S. 1339).

Während der Jahre 2010 und 2012 flog dann die Cassini-Sonde 3-mal in einer Entfernung von weniger als $100 \cdot km$ an Enceladus vorbei. Über eine präzise Vermessung der hierbei aufgetretenen Veränderungen der Cassini-Bahn infolge der gravitativen Wechselwirkung mit Enceladus konnte ein Modell der 3D-Massenverteilung von Enceladus erstellt werden. Hiernach besteht der Mond außer aus einem XXX Kern und einer XXX Oberflächenschicht aus einer in ca. 30 bis $40 \cdot km$ Tiefe liegenden Schicht aus flüssigem Wasser. Diese ist aber nicht homogen über alle Längen- und Breitengrade verteilt, sondern auf die südliche Hemisphäre beschränkt, etwa vom Südpol bis zum 50 . südlichen Breitengrad. Die Existenz dieser Schicht aus flüssigem Wasser steht sehr wahrscheinlich in direktem Zusammenhang mit dem Auftreten der o.a. Jetstrahlen.

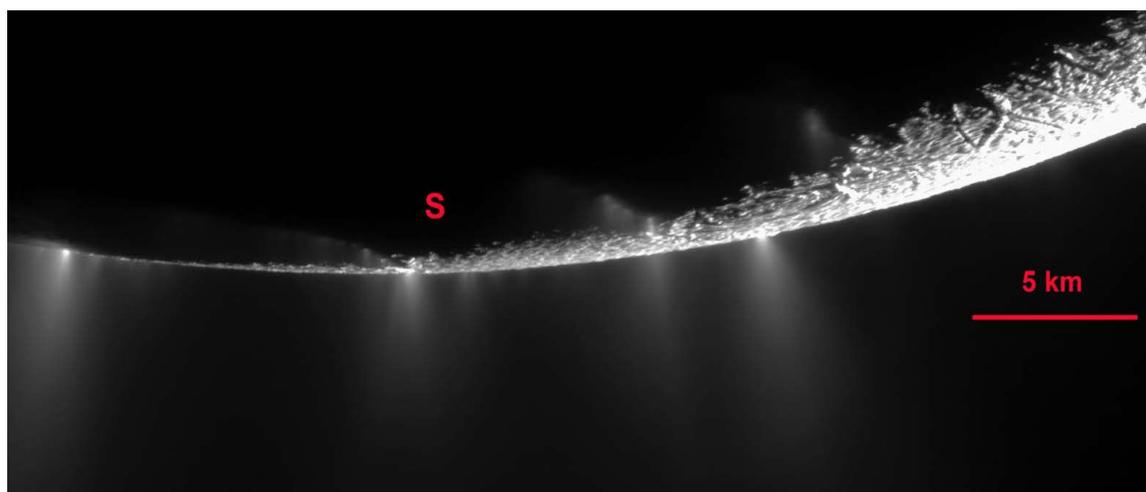


Abb. 77 Ausschnitt der Südpolregion von Enceladus, aus ca. $1,4 \cdot 10^4 \cdot km$ im Gegenlicht aufgenommen von der Sonde Cassini
(credit: NASA/JPL/Space Science Institute; image PIA11688 v. 23.02.2010)

Das Ring-System des Saturn (-) Alle sog. Gasplaneten, also Jupiter, Saturn und die noch zu behandelnden Planeten Uranus und Neptun, besitzen ein mehr oder weniger stark ausgeprägtes System von Ringen, s. Absatz S. 1238. Von diesen Gasplaneten hat Saturn das bei weitem größte und hellste Ringsystem, s. wieder Abb. 66. Es besteht aus über 10^5 Ringen, die alle nahezu kreisförmig sind und kaum gegen die Äquatorebene des Saturn verkippt. Die Bahnradien p_i der Ringe bewegen sich im Bereich

$$1,35 \cdot 10^5 \cdot km < p_i < 9,6 \cdot 10^5 \cdot km \quad (10.321)$$

Alle diese einzelnen Ringe bestehen aus einzelnen Objekten mit einer geometrischen Abmessung im Bereich von

$$1 \cdot mm < \langle D \rangle < 10 \cdot m \quad (10.322)$$

die entweder überwiegend aus (Wasser-)Eis bestehen oder aus gesteinsartigen Silikaten. Sie entsprechen in ihrer chemischen Zusammensetzung also den Objekten, die den Kuiper-Gürtel (s. Absatz S. 1361) bzw. die Oort'sche Wolke (s. Absatz S. 1366) bilden. In der Literatur findet man wiederholt auch die Hypothese, dass die Ringe die Reste der Oberflächen-Eisschicht von früheren Saturn-Monden wären, die zur Frühzeit des Saturns von diesem eingefangen wurden.

Es gilt heute als gesichert, dass sie sich innerhalb ihres Ringsystems weitgehend synchron bewegen: Sie führen alle eine nahezu kreisförmige Kepler-Bewegung aus, und der relative Abstand 2-er Nachbarn auf derselben Kreisbahn bleibt nahezu unverändert.

Ein weiterer, den Saturn umschließender Ring wurde mit Hilfe des im IR arbeitenden *Spitzer Space Telescope* der NASA entdeckt. Die geometrische Konfiguration

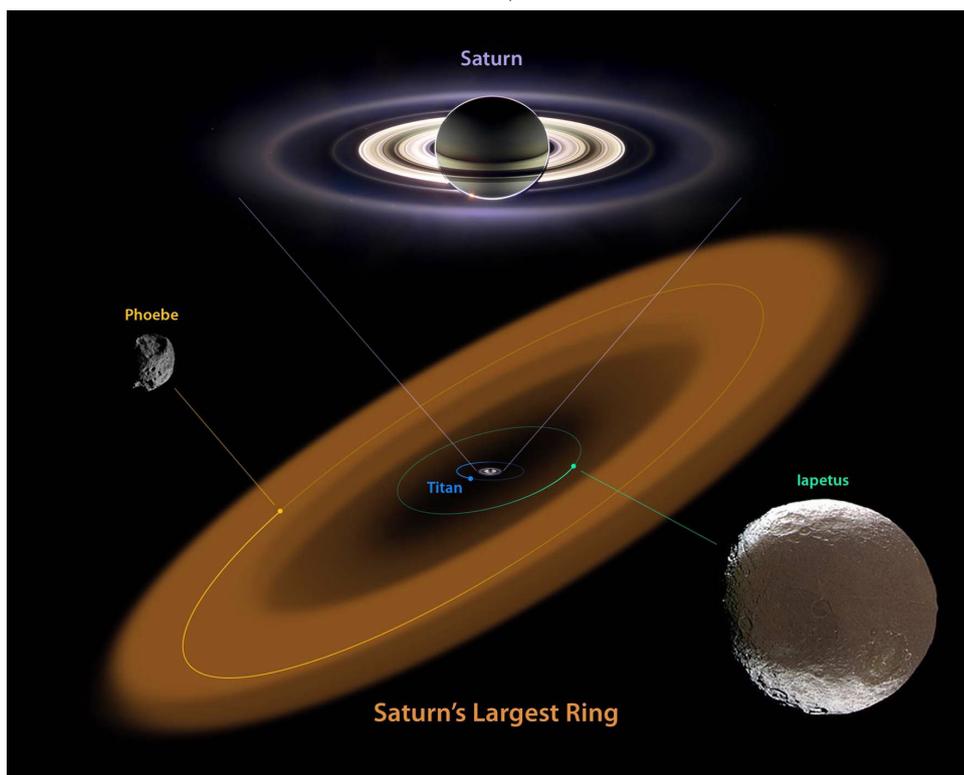


Abb. 78 Saturn-System aus Planet, Monde, Ringsystem und äußerem Ring
(credit: NASA/JPL-Caltech)

dieses Ringes relativ zum übrigen System des Saturn und seiner Monde ist in der Abb. 78 wiedergegeben, einer Montage aus Realaufnahmen des Saturn und seiner (übrigen) Ringe sowie der beiden Trabanten Iapetus und Phoebe. Diese Abb. ist (bis auf die zusätzlich vergrößert wiedergegebenen Objekte) maßstabsgerecht. Der äußere Ring ist gegen die von den Hauptringen gebildete Ebene um ca. 27° verkippt. Die in dem Ring enthaltenen Teilchen bewegen sich in entgegengesetzter Richtung zu der Bewegung in den Hauptringen. Der Mond Phoebe, dessen Bahn ganz innerhalb dieses Rings verläuft, hat dieselbe Bewegungsrichtung wie der Ring.

Die geometrischen Abmessungen dieses Ringes sind gigantisch. Die erhöhte Massendichte ist etwa auf den Bereich

$$6 \cdot 10^6 \cdot km < R < 18 \cdot 10^6 \cdot km \quad (10.323)$$

konzentriert. Die senkrecht zu seiner Hauptausdehnung gemessene Dicke ist von der Größenordnung

$$d_{\perp} \sim 2 \cdot 10^6 \cdot km \quad (10.324)$$

Das ist etwa das 20-fache des Saturndurchmessers. Die Massendichte des Ringes ist jedoch extrem gering. Ein Schätzwert für diese Größe ist mir (noch) nicht bekannt.

Eine Hypothese über die Entstehung dieses Ringes ist mir nicht bekannt.

Der Planet Uranus (-)

Der in der Reihenfolge der Entfernung von der Sonne 7. Planet unseres Planetensystems, der Planet *Uranus* (nach *ουρανός* (griech.) der Himmel) wurde 1781 von Friedrich Herschel entdeckt. Sein mittlerer Abstand von der Sonne beträgt in guter Näherung das doppelte des Abstandes Sonne-Saturn und seine Umlaufzeit um die Sonne

$$T_b^{(sid.)} = 84,011 \cdot y \quad (10.325)$$

Seine Bahnebene um die Sonne zeigt mit $0,77^\circ$ die geringste Verkippung relativ zur Erdbahn. Daher folgt Uranus für einen Beobachter auf der Erdoberfläche immer nahezu synchron der Sonne auf ihrer Bahn und in einem nahezu konstanten zeitlichen Abstand. Die Zeitdifferenz zwischen Sonnen- und Uranus-Zenith verschiebt sich mit einer Geschwindigkeit von

$$\frac{d\Delta t}{dt} \approx \frac{24 \cdot h}{84 \cdot y} = \frac{1 \cdot min}{21 \cdot d} \quad (10.326)$$

Die Exzentrizität seiner Bahn ist mit

$$e = 0,0472 \quad (10.327)$$

relativ hoch. Das bedeutet, dass die Jahreszeiten auf dem Uranus von dem Unterschied zwischen dem Aphel und Perihel der Bahn maßgeblich beeinflusst werden. Die Umlaufzeit seiner Eigenrotation beträgt mit

$$T_r = 17,24 \cdot h \quad (10.328)$$

fast das 2-fache der Jupiter-Umlaufzeit, liegt also zwischen den Werten von Jupiter und Saturn. Auffällig und völlig ungewöhnlich ist jedoch, dass die Rotationsachse des Uranus gegenüber seiner Bahn um nahezu 90° verkippt ist,

$$\alpha_r = 97,17^\circ \quad (10.329)$$

Das hat u.a. zur Folge, dass die relative Intensität der durch die Verkippung der Rotationsachse bedingten Jahreszeiteffekte nahe bei ihrem theoretisch möglichen Extremwert liegt: Befindet sich der Planet in der Nähe eines seiner Äquinocumpunkte, sind die Verhältnisse des Sonnenstands genau so, wie wir es von der Erde her gewohnt sind: Tag und Nacht sind überall auf dem Uranus gleich lang, nur der aktuelle Sonnenhöchststand hängt von der geographischen Breite des jeweiligen Standorts ab. Am stärksten wirken sich die Jahreszeiten an den Polen aus. Hier geht die Sonne in einer Zeitspanne nahe der Sommer-Sonnenwende nicht nur gar nicht unter (wie auch auf der Erde), sondern sie steht auch unverändert im Zenith.

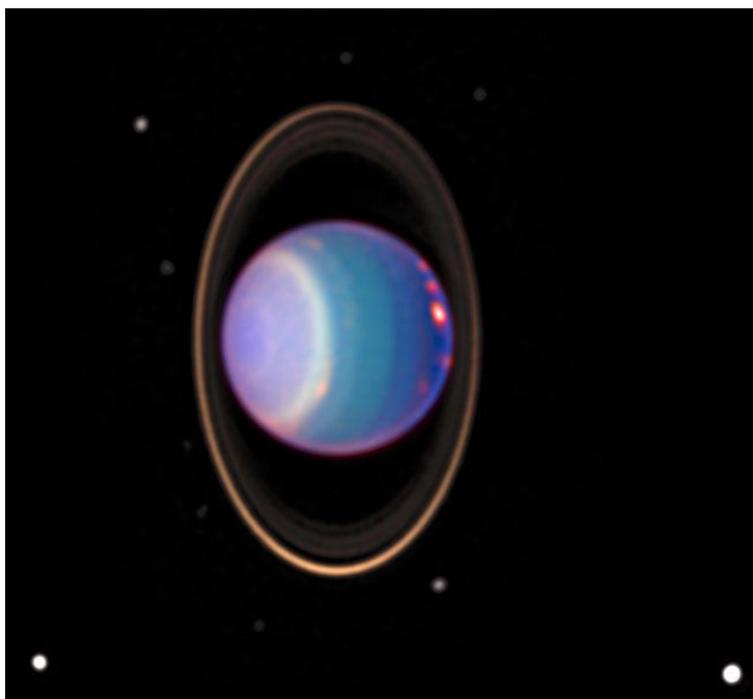


Abb. 79 Vom Hubble Space Telescope am 08.08.1998 erstellte Falschfarben-Aufnahme des Uranus
(Quelle: hubblesite.org/newscenter/archive/releases/1998/35/image
Autor: Erich Karkoschka (University of Arizona); Mark Marley (New Mexico State University)

Der letzte Durchgang des Uranus durch einen seiner Aequinoctumpunkte erfolgte im Jahr 2007.

Eines der wenigen bis heute (2012) existierenden Aufnahmen dieses Planeten zeigt die Abb. 79.

Sie wurde 1998 vom HST erstellt. Die Falschfarbencodierung dieser Aufnahme wurde wie folgt erzeugt: Es wurden 3 Bilder im nahen Infrarot aufgenommen und zwar bei den Schwerpunkts-Wellenlängen $0,9 \cdot \mu m$, $1,1 \cdot \mu m$ und $1,7 \cdot \mu m$. Diese wurden dann bei der Bild-Wiedergabe den Kanälen blau/grün/rot zugeordnet. Der so entstehende Farbkontrast in der Uranus-Atmosphäre ist primär ein Höhenkontrast: Grüne und blaue Bereiche zeigen an, dass die Atmosphäre in diesem Bereich weitgehend klar ist und das Sonnenlicht daher bis tief in die Uranus-Atmosphäre hinein eindringen kann. In gelben oder blauen Bereichen wird das Sonnenlicht überwiegend von hoch liegendem Dunst oder Wolken reflektiert. Orangefarbene oder rote Bereiche zeigen die Existenz sehr hoch gelegener Wolken an, ähnlich den Zirkus-Wolken auf der Erde.

Die hellen Kreisflächen am äußeren Rand dieser Aufnahme sind die Bilder

einiger der Uranus-Monde.

Die Gesamtmasse des Uranus von

$$M_{\text{Uranus}} = 8,6832 \cdot 10^{25} \cdot \text{kg} = 4,366 \cdot 10^{-5} \cdot M_{\odot} \quad (10.330)$$

entspricht nur knapp 1/20 der Jupiter-Masse.

Uranus besitzt eine Schalenstruktur aus

- einem Kern aus Metallen und Gesteinen; letztere sind evtl. mit Wassereis durchmischt; die Temperatur im Zentrum des Planeten schätzt man auf

$$T_{\text{Kern}} \approx 7 \cdot 10^3 \cdot \text{K} \quad (10.331)$$

- einem Mantel aus H_2O , NH_3 und festem CH_4 ;
- einer Atmosphäre aus H_2 , He und Spuren von gasförmigem CH_4 und
- einer darüber liegenden Wolkenschicht,

s. hierzu Abb. 80.

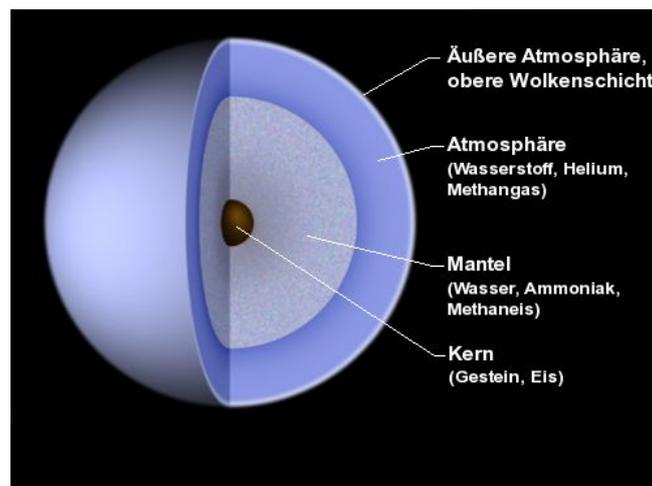


Abb. 80 Schalenstruktur des Uranus

(Quelle: diese Abb.basiert auf dem Bild Uranus-intern-de aus der freien Enzyklopädie Wikipedia und ist gemeinfrei; der Autor ist FrancescoA)

Uranus besitzt ein etwa um den Faktor 48 stärkeres Magnetfeld als die Erde, das aber nicht durch ein Dipolfeld angenähert werden kann sondern eine relativ komplexe räumliche Struktur zeigt. Die Hauptrichtung dieses Feldes ist gegenüber der Rotationsachse des Planeten um ca. 60° verkippt.

(XXX: Der weitere Text zum Magnetfeld des Uranus ist noch nicht verfügbar.)

1344 Elementarteilchen, Kosmologie:
 Physik ganz klein / ganz gross (-)

Die integrale chemische Zusammensetzung der Uranus-Atmosphäre zeigt die folgende Tabelle:

Substanz i	H_2	He	CH_4	Ar
M_i/M_{ges}	0,825	0,152	0,023	XXX

Quelle:

(XXX: Der Text zu den Jahreszeiteffekten in der Uranus-Atmosphäre ist noch nicht verfügbar.)

Ähnlich wie der Saturn ist auch Uranus von einer Ringstruktur umgeben, s. wieder Abb. 79.

Die Uranus-Monde (-) Als den Planeten Uranus umkreisende Satelliten sind bis heute insgesamt 27 Objekte bekannt. Die kleineren dieser Objekte haben meistens eine nahezu perfektparallel zur Eigenrotation des Uranus orientierte Bahnbewegung um den Planeten. Die geometrischen Daten der Bahnbewegung und der Rotation der 4 größten dieser Monde zeigt die nachfolgende Tabelle:

	$p(\text{Bahn})$ / $10^5 \cdot km$	e / 10^{-3}	$T_b^{(sid.)}$ / d	α_b / $^\circ$
Ariel	1,91020	1,2	2,52	0,041
Umbriel	2,663	3,9	4,144	0,128
Titania	4,3591	1,1	8,706	0,079
Oberon	5,835	1,4	13,46	0,068

Auch diese Monde führen eine einfach gebundene Rotation aus, d.h. ihre Zeiten für einen Umlauf um den Uranus und für eine Eigenrotation sind identisch, und die Drehachsen der Eigenrotation und der Bahnbewegung um den Uranus sind in guter Näherung zu einander parallel.

Die wichtigsten physikalischen Daten dieser Monde sind in der nachfolgenden Tabelle zusammengestellt.

	Ariel	Umbriel	Titania	Oberon
ε		0,84		
$M_{ges.} / 10^{21} \cdot kg$	1,35	1,17	3,53	3,01
$\langle D_{Mond} \rangle / 10^3 \cdot km$	1,158	1,169	1,578	1,523
$\langle m \rangle / 10^3 \cdot kg/m^3$	1,66	1,39	1,711	1,63
T_{ref} / K	63,6	63,6	63,6	63,6
$M_{Atmosph.} / kg$				
$p_{Oberfl.} / bar$				
$T_{Oberfl.} / K$	60/84	75/85	60/89	70/80

Wenn man den wesentlich größeren Saturn-Mond Titan außer Betracht lässt, dann bewegt sich die Gesamtmasse dieser 4 großen Uranus-Monde in derselben Grö-

Benennung wie die der großen Saturn-Monde Thetys, Dione, Rhea und Iapetus. Aktuell gibt es nur wenige verlässliche Informationen über die physikalischen Eigenschaften dieser Monde. Sie stützen sich im wesentlichen auf die Messdaten, die die Sonde Voyager-2 bei ihrem Vorbeiflug im Jahr 1986 aufnehmen konnte.

(XXX: Der weitere Text des Absatzes *Die Uranus-Monde* ist noch nicht verfügbar.)

Der Planet Neptun (-)

Der 8. und äußerste Planet unseres Planetensystems ist der *Neptun*, der seinen Namen von dem römischen Gott des Meeres erhalten hat, vermutlich wegen seiner tiefblauen Färbung, s. Abb. 81. Dieses Bild wurde aus 2 Einzelbildern zusammengesetzt, die

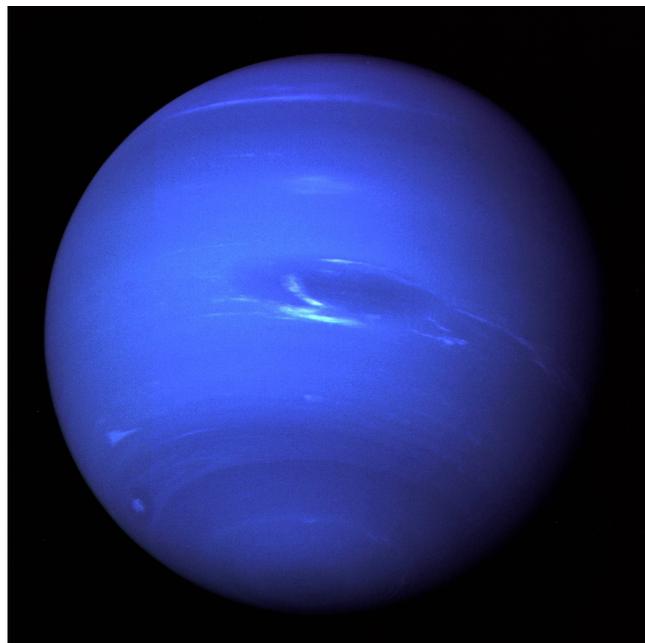


Abb. 81 (Fast-)Echtfarbenaufnahme des Neptun, aufgenommen von der Sonde Voyager 2 am 20.08.1989 aus einer Entfernung von $4,4 \cdot 10^6 \cdot km$ (credit: NASA)

hinter einem Grün- bzw. einem Orange-Filter aufgenommen worden waren. Auf die Ursache für die tief blaue Färbung der Neptun-Oberfläche sowie auf die verschiedenen in der Aufnahme erkennbaren Objekte werde ich noch innerhalb dieses Absatzes eingehen.

Die Existenz eines weiteren Planeten außerhalb der Bahn des Uranus wurde 1816 von dem französischen Mathematiker und Astronom *Urbain Jean Joseph Le Verrier* (* 1811 in Saint-Lô/Dep. Manche (Frankreich); † 1877 in Paris) aus mathematischen Berechnungen geschlossen, die eine signifikante Unregelmäßigkeit des

Uranus belegten. Le Verrier übersandte diese Ergebnisse dem deutschen Astronomen *Johann Gottfried Galle* (* 1812 in Radis/Landkreis Wittenberg; † 1910 in Potsdam als em. Prof. für Astronomie der Universität Breslau), damals wissenschaftlicher Gehilfe an der Berliner Sternwarte. Bereits während der 1. Beobachtungsnacht im September 1846 konnte Galle den neuen Planeten nachweisen, er befand sich nahezu exakt an der von Le Verrier berechneten Stelle.

Sein mittlerer Abstand von der Sonne ist mit

$$p(\text{Neptun}) = 4,498 \cdot 10^9 \cdot km = 30,0699 \cdot AE \quad (10.332)$$

in guter Näherung um den Faktor $3/2$ größer als der Abstand Sonne-Uranus und seine Umlaufzeit um die Sonne beträgt

$$T_b^{(sid.)} = 164,79 \cdot y \quad (10.333)$$

Neptun befindet sich also in guter Näherung in einer (2 : 1)-Bahnresonanz mit dem Uranus. Seine Bahnebene um die Sonne ist nur um $1,77^\circ$ gegen die Erdbahn verkippt. Auch der Neptun folgt daher für einen Beobachter auf der Erdoberfläche nahezu synchron der Sonne auf ihrer Bahn und in einem nahezu konstanten zeitlichen Abstand. Die Zeitdifferenz zwischen Sonnen- und Uranus-Zenith verschiebt sich mit einer Geschwindigkeit von

$$\frac{d\Delta t}{dt} \approx \frac{24 \cdot h}{165 \cdot y} = \frac{1 \cdot min}{42 \cdot d} \quad (10.334)$$

Auch der Neptun ist daher für einen Beobachter auf der Erdoberfläche in etwa an einer bestimmten Winkelposition auf der für diesen Ort geltenden aktuellen Bahn der Sonne fixiert. Diese Winkelposition verschiebt sich mit einer Winkelgeschwindigkeit von

$$\frac{d\alpha}{dt} \approx \frac{360^\circ}{164,79 \cdot y} = \frac{1^\circ}{167 \cdot d} = 0,91 \cdot \frac{\text{Bogensec.}}{h} \quad (10.335)$$

Die Exzentrizität seiner Bahn ist mit

$$e = 0,0086 \quad (10.336)$$

nicht sehr hoch. Das bedeutet, dass die Jahreszeiten auf dem Uranus von dem Unterschied zwischen dem Aphel und Perihel der Bahn nur wenig beeinflusst werden. Die Umlaufzeit seiner Eigenrotation liegt mit

$$T_r = 15,966 \cdot h \quad (10.337)$$

in einem ähnlichen Bereich wie die Uranus-Umlaufzeit. Die Rotationsachse des Neptun ist gegenüber seiner Bahn um den Winkel

$$\alpha_r = 28,3^\circ \quad (10.338)$$

verkippt. Dieser Wert ist ähnlich wie der entsprechende, für die Erde geltende Wert. Wir erwarten also hierauf beruhende Jahreszeit-Effekte von einer relativen Größenordnung, wie wir sie von der Erde gewohnt sind.

Der Neptun befindet sich aktuell (2013) in der Nähe des für die nördliche Hemisphäre geltenden Frühlingspunktes. D.h. während der voran gegangenen 40 (Erd-)Jahre herrschte auf der südlichen Halbkugel Sommer.

Unsere Kenntnisse über die physikalischen Eigenschaften des Neptun basieren nahezu ausschließlich auf den Ergebnissen des Voyager-2-Vorbeiflugs im September 1989. Danach hat noch keine weitere Raumsonde den Neptun untersucht. Die Gesamtmasse des Neptun von

$$M_{\text{Neptun}} = 1,0241 \cdot 10^{26} \cdot \text{kg} = 5,149 \cdot 10^{-5} \cdot M_{\odot} \quad (10.339)$$

ist nur wenig größer als die Uranus-Masse.

Neptun hat ebenfalls eine Schalenstruktur, die im Zentrum mit einem Kern aus Gesteinen und Metallen beginnt. Dessen Masse schätzt man heute auf

$$M_{\text{Gesteine+Metall}} \approx 1,0 \dots 1,5 \cdot M_{\text{Erde}} \quad (10.340)$$

Darauf folgt eine Mantelschicht aus vermutlich gefrorenem Wasser, Ammoniak und Methan sowie eine gasförmige Schicht, also eine Atmosphäre, die überwiegend aus Wasserstoff besteht.

(XXX: Der Text, der die Wärmebilanz des Neptun diskutiert, ist noch nicht verfügbar.)

Neptun besitzt ein starkes Magnetfeld, das jedoch zeitlich nicht konstant ist und auch nicht durch ein Dipolfeld angenähert werden kann. Die Feldstärke in Äquatornähe beträgt etwa

$$B_{\text{Äquator}}(\text{Neptun}) \approx 37 \cdot B_{\text{Äquator}}(\text{Erde}) \quad (10.341)$$

Die Symmetrieachse dieses Feldes ist um ca. 47° gegen die Achse der Eigenrotation verkippt. Es ist also in seinem Erscheinungsbild dem Magnetfeld des Uranus stark verwandt.

Die integrale Zusammensetzung der Atmosphäre schätzt man auf

Substanz <i>i</i>	H_2	He	CH_4	Ar	H_2O
M_i/M_{ges}	0,85	0,13	0,02	XXX	XXX

Quelle NASA NASA NASA

Sie ist also der Uranus-Atmosphäre sehr ähnlich. Der Gehalt an Methan wird als die Ursache für die blaue Färbung angesehen. Weshalb jedoch Neptun wesentlich intensiver blau gefärbt ist als Uranus, gilt bis heute als noch nicht geklärt. Man vermutet daher die Existenz einer weiteren, noch nicht bekannten Substanz in der Neptun-Atmosphäre.

In großen Höhen der Neptun-Atmosphäre bilden sich Cirrus-ähnliche Wolken. Sie bestehen aus gefrorenem Methan und Wasser. In der Neptun-Atmosphäre dominieren anscheinend ähnliche Strömungsvorgänge wie in der anderen sog. Gasriesen: Insgesamt treten Gasströmungen auf mit relativ zur Atmosphäre sehr hohen Geschwindigkeiten der Größenordnung

$$v_{\text{Gas}} \lesssim 1,5 \cdot 10^3 \cdot \frac{\text{km}}{\text{h}} \quad (10.342)$$

Im Bereich mittlerer Breiten gibt es ebenfalls einen vermutlich ortsfesten großen Wirbelsturm, der auch im Fall des Neptun als *großer* (in diesem Fall) *dunkler Fleck* (engl. *great dark spot*) bezeichnet wird. Seine aktuelle Drehrichtung entspricht der mathematisch positiven Drehrichtung. Auf der Abb. 81 befindet er sich in der Bildmitte. Außerdem bilden sich gelegentlich lange, relativ dünne, in Ost-West-Richtung ausgedehnte Strömungsbänder. Die Sonde Voyager entdeckte auch einen relativ kleinen Wirbelstrom, der sich mit hoher Geschwindigkeit innerhalb der Atmosphäre bewegte. Die beteiligten Wissenschaftler gaben diesem Ereignis den Namen *Scooter*.

(XXX: Der weitere Text des Absatzes *Der Planet Neptun* ist noch nicht verfügbar. Er wird auch die nachfolgende Abb. und den sie erläuternden Text enthalten:)In

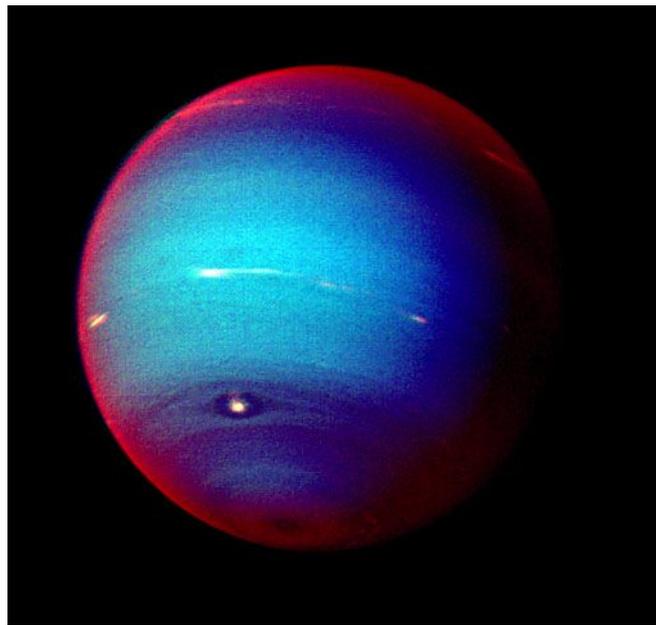


Abb. 82 Farbaufnahme des Neptun, erstellt von der Raumsonde Voyager 2 im Januar 1989

(Quelle: nasa.gov/multimedia/imagegallery//image+feature+596)

Autor: NASA/JPL)

den rot wiedergegeben Teilen dieser Aufnahme resultiert das Messlicht überwiegend

aus dem Streulicht, das von der stark streuenden Atmosphäre des Planeten generiert wird. In den blau wiedergegebenen Teilen resultiert das Messlicht überwiegend aus Sonnenlicht, das wesentlich tiefer in den Planeten eingedrungen ist. Diese Aufnahme ist eines letzten Bilder, die Voyager 2 erzeugte, bevor er unser Planetensystem verließ und in den interstellaren Raum eintauchte. Seit dieser Zeit hat es bis heute (2011) keinen erneuten Vorbeiflug einer Raumsonde an Neptun gegeben und damit auch keine aktuelleren Aufnahmen dieses Planeten.

Die Neptun-Monde (-) Heute (2013) kennt man insgesamt 15 Trabanten, die den Planeten Neptun umkreisen. Von diesen wurden allein 6 erst durch die Sonde Voyager-2 entdeckt. Die Entdeckung des 15. Mondes gelang am 01.07.2013 durch Auswertung einer Sequenz von Aufnahmen des Hubble-Teleskops HST. Die geometrischen Daten der Bahnbewegung und der Rotation der 3 größten dieser Monde zeigt die nachfolgende Tabelle:

	$p(\text{Bahn})$ / $10^5 \cdot km$	e / 10^{-3}	$T_b^{(sid.)}$ / d	α_b / $^\circ$	$T_r^{(sid.)}$ / d	α_r / $^\circ$
Proteus	1,17647	0,53	1,122		1,122	
Triton	3,547	0,016	5,877	129,8	5,877	156,9
Nereid	55,134	750	360	5,07	360	32,55

Auch diese Monde führen eine einfach gebundene Rotation aus, d.h. ihre Zeiten für einen Umlauf um den Neptun und für eine Eigenrotation sind identisch. Die Drehachsen der Eigenrotation und der Bahnbewegung um den Neptun sind bei ihnen jedoch überhaupt nicht parallel.

Die wichtigsten physikalischen Daten dieser Monde sind in der nachfolgenden Tabelle zusammengestellt.

	Proteus	Triton	Nereid
$M_{\text{ges.}} / 10^{20} \cdot kg$	0,50	214	0,31
$\langle D_{\text{Mond}} \rangle / 10^3 \cdot km$	0,420	2,707	0,68
$\langle m \rangle / 10^3 \cdot kg/m^3$	1,3	2,06	1,5
$M_{\text{Atmosph.}} / kg$			
$p_{\text{Oberfl.}} / bar$			
$T_{\text{Oberfl.}} / K$	51	35,6	50

(XXX: Der weitere Text des Absatzes *Die Neptun-Monde* ist noch nicht verfügbar.)

Das Ring-System des Neptun (-) Neptun besitzt ebenfalls ein Ring-System, von dem bisher 4 Ringe nachgewiesen wurden. Der mittlere Durchmesser ihrer Bahnen

1350		Elementarteilchen, Kosmologie:				(-)
Physik	ganz	klein	/	ganz	gross	
beträgt						

$$4,19 \cdot 10^4 \cdot km / 5,32 \cdot 10^4 \cdot km / 5,32 \cdot 10^4 \cdot km / 6,29.3 \cdot 10^4 \cdot km \quad (10.343)$$

Einige dieser Ringe haben eine "klumpige" Struktur. Die Monde Nereid und Thalassa befinden sich innerhalb dieses Ringsystems, Larissa und Proteus außerhalb.

(XXX: Der weitere Text des Unterabsatzes *Das Ring-System* des Neptun ist noch nicht verfügbar.)

10.2.11 *Asteroide und Kometen* (-)

In diesem Abschnitt werde ich Himmelskörper diskutieren, die wohl Teil unseres Planetensystems sind, die sich aber von den bisher behandelten Planeten deutlich unterscheiden und entweder als Asteroide oder als Kometen bezeichnet werden. Insbesondere bei den Kometen war man sich lange nicht sicher, ob sie wirklich alle zu unserem Planetensystem gehören, sich also auf einer stabilen periodischen Bahn um unsere Sonne befinden. Manche hielt man eher für einmalig unser Planetensystem besuchende Besucher aus den Tiefen des Weltalls, in das sie darauf hin auch wieder verschwinden. Heute sind wir uns sicher, dass alle bisher beobachteten Asteroide und Kometen in dem gerade erläuterten Sinne zu unserem Planetensystem gehören.

(XXX: Der weitere Kopftext des Abschnitts *Asteroide und Kometen* ist noch nicht verfügbar.)

Kometen (-)

Im Bild der Allgemeinheit sind Kometen Himmelskörper, die an unserem Nachthimmel als gut sichtbare Objekte und mit einer typischen Struktur erscheinen und dann wieder verschwinden. Typisch ist der leuchtende Kometenschweif, der sich an der sonnenabgewandten Seite bildet, sobald sich der Komet der Sonne ausreichend stark genähert hat. Einige dieser Kometen befinden sich auf einer stark exzentrischen, aber dennoch ebenfalls periodischen Bahn um die Sonne. Wenn diese Bahn die Bewegungsebene der Erde um die Sonne schneidet, kann es vorkommen, dass der Komet relativ nahe an unserer Erde vorbei fliegt. Von ihnen ist der nach Edmond Halley benannte *Halleysche Komet* am bekanntesten. Er besitzt eine Umlaufzeit von rund $76 \cdot y$. Wegen der ebenfalls wiederkehrenden Bahnstörungen durch den Planeten Jupiter schwankt dieser Wert jeweils um mehrere Jahre. Die meisten Himmelskörper dieser Struktur verbleiben jedoch auf Dauer in einer derart großen Entfernung von der Sonne, dass sie nur in hierfür geeigneten Teleskopen detektierbar sind.

Unsere aktuellen (2013) Kenntnisse über die chemische und physikalische Struktur von Kometen wurden ebenfalls durch die Erfolge von Raumsonden-Missionen ganz wesentlich erweitert und auf durch Messungen belegte Daten abgestützt. Diese Serie von Erfolgen begann mit der ESA-Sonde *Giotto*, benannt nach dem italienischen Maler *Giotto de Bondone*, der im 13. Jahrh. in seinem Hauptwerk, der Freskenserie in der Scrovegni-Kapelle in Padua/Italien, in der Szene "Anbetung Jesu durch die

heiligen 3 Könige" den Halley'schen Kometen in seiner typischen Struktur als Stern von Bethlehem an den Himmel malte. Dieser am 02.07.1985 gestarteten Sonde gelang 1986 ein Vorbeiflug an dem Halley'schen Kometen mit einem Minimalabstand von nur $600 \cdot km$. Die zu diesem Zeitpunkt von der Multicolour Camera der Sonde erstellte



Abb. 83 Der Halley'sche Komet, am 13.03.1986 aus $600 \cdot km$ Entfernung aufgenommen von der ESA-Sonde Giotto
(credit: ESA/MPAe Lindau)

Aufnahme ist in der Abb. 83 wiedergegeben. Der Halley'sche Komet hat eine Größe von ca. $10 \cdot km * 15 \cdot km$ und einen Absorptionsfaktor für sichtbares Licht von

$$\varepsilon(\text{Halley}) = 0,96 \quad (10.344)$$

Seine Oberfläche ist also fast ideal **schwarz** (!). Zur großen Überraschung des Giotto-Teams wurde ihre Sonde während des Vorbeiflugs nur teilweise zerstört, so dass sie noch zu dem Kometen *Grigg-Skjellup* gelenkt werden konnte, den sie 1992 passierte.

Der nächste Meilenstein für die Kometenforschung war die Deep-Space-Comet-Hunter-Mission der NASA. Sie wurde im Januar 2005 gestartet und erreichte ihren 1. Höhepunkt durch ein Rendezvous mit dem Kometen *Tempel-1* am 04.7.2005, bei dem ein Testobjekt zu einer gezielten Kollision auf den Kometen geschossen wurde. Der dabei ausgestoßene Staub wurde von der Sonde spektroskopisch analysiert. Neben den Hauptbestandteilen H_2O und CO_2 konnten Silikate, Carbonate, Metallsulfide und polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe nachgewiesen werden. Ein weiteres wichtiges Ergebnis dieses Experiments war die Bestätigung, dass das Kometen-Innere stark porös ist. Im Anschluss an dieses Experiment wurde die Sonde zu einem Fly-By-Manöver mit dem Kometen *Hartley* gelenkt, das am 04.11.2010 erfolgte und eine Fülle weiterer Messdaten und Aufnahmen erbrachte. Seit Beginn des Jahres 2013 ist die Kontrolle dieser Sonde verloren gegangen. Sie wurde am 20.09.2013 aufgegeben.

Kometen (von $\kappa\omicron\mu\eta\tau\eta\sigma$ (griech.) der Mähnen-Stern) bestehen überwiegend aus leichteren Elementen und enthalten meist zu einem erheblichen Anteil gefrorenes Wasser, festes CO_2 sowie einen signifikanten Anteil an diversen organischen Verbindungen. Sie haben einen typischen Durchmesser von

$$D(\text{Komet}) \sim 5 \cdot km \quad (10.345)$$

und besitzen ein stark poröses Innere. Nähert sich ein Komet ausreichend stark (XXX: präzisieren) der Sonne, so verdunstet das bis dahin feste CO_2 und H_2O zu einem merklichen Umfang und bildet eine den Kometen umgebende Gashölle, die meist als *Koma* bezeichnet wird und eine typische Ausdehnung von

$$D(\text{Koma}) \sim 2 \dots 3 \cdot 10^6 \cdot km \quad (10.346)$$

hat. Mit weiterer Annäherung an die Sonne nimmt nicht nur die Ausdehnung der Koma zu, sie wird auch durch den Strahlungsdruck und den sog. Sonnenwind (s. Abschnitt 10.4.1) zur Sonnen-abgewandten Seite hin deformiert und abgelenkt. Diese Struktur wird umgangssprachlich als *Kometen-Schweif* bezeichnet. Als ein typisches Beispiel eines derartigen Himmelskörpers zeigt die Abb. 84 eine HST-Aufnahme des



Abb. 84 Komet Ison, vom HST am 30.04.2013 aufgenommen; Wiedergabe als Überlagerung

(a) einer nachgeführten Aufnahme des Kometen im Helligkeitskontrast und
(b) einer Einzelaufnahme des Bildfeld-Hintergrunds im gelb-grün / rot-Farbkontrast
(Credit: NASA/ESA/Hubble Heritage-Team STScI/AURA)

Kometen *Ison*. Dieser Komet wurde am 21.09.2012 von den weiß-russischen Amateur-Astronomen Artjom Nowitschonok und Vitali Newski entdeckt. Er erreichte seinen sonnennächsten Punkt mit

$$\Delta r(\text{Sonne-Ison}) = 1,2 \cdot 10^6 \cdot km = 0,8 \cdot 10^{-2} \cdot AE \quad (10.347)$$

am 28.11.2013. Die Abb. 84 ist eine am 30.04.2013 erstellte Aufnahme des HST.

Einige physikalische Kenndaten der heute (2014) am besten bekannten Kometen und Asteroide sind in der nachfolgenden Tabelle zusammengestellt:

	Lutetia	Chury
$M_{\text{ges.}} / kg$	$1,7 \cdot 10^{18}$	10^{13}
$\langle D \rangle / km$	$121 * 101 * 75$	$3 * 5$
$\langle m \rangle / 10^3 \cdot kg/m^3$	3,4	0,4
ε	0,7788	
T_b / y		6,55
T_r / h		12

(XXX: Die weiteren für diese Tabelle vorgesehenen Daten sind noch nicht verfügbar.)

Kometen gelten heute als zu den Planetesimalen (s. Absatz S. 1230) zählende primitive Bildungseinheiten für Planeten, in denen die leichteren Bestandteile einer protoplanetaren Scheibe agglomeriert sind. In unserem Planetensystem ist dieser Typ von Planetesimalen insbesondere in der Oortschen Wolke enthalten sowie im Kuipergürtel. Der in der Abb. 84 wiedergegebene Komet *Ison* stammt z.B. aus der Oort'schen Wolke. Der sog. Hauptgürtel enthält dagegen überwiegend Asteroide (s. Unterabsatz S. 1358) und nur wenige Kometen. Innerhalb dieses Kollektivs von Planetesimalen kommt es immer einmal wieder zu einem besonders heftigen Zusammenstoß von zweien dieser Objekte mit der Folge, dass beide auf neue Bahnen gelenkt werden, die sie dann aus diesem ihnen angestammten Bereich des Planetensystems herausführt. Dabei werden sie sich auch einmal einem der großen Planeten dieses Systems nähern und zwar so stark, dass sie von ihm eingefangen werden und auf ihm zerschellen.

Heute ist ein Großteil dieser Himmelskörper bereits von einem der Planeten eingefangen worden und hat auf diesen den Anteil der leichteren Elemente erhöht. Den noch verbliebenen Kometen insbesondere aus dem Kuipergürtel droht langfristig das gleiche Schicksal.

Eine starke Stütze für dieses Bündel an Hypothesen sind Aufnahmen von sonnenähnlichen Sternen, die ein System aus Planeten besitzen, deren Massen zwischen denen der Erde und des Neptun liegen, aber nicht darüber hinausgehen. Diese Planetensysteme besitzen jedoch alle einen Kometengürtel aus etwa 10-mal soviel Kometen, als der Kuipergürtel heute enthält. Ein derartiges Beispiel ist der Stern 61_Vir, s. Abb. 85. Dieser Stern ist $27,8 \cdot L_j$ von uns entfernt und befindet sich im Sternbild Virgo. Seine Masse ist etwas größer als die unserer Sonne. Die Abb. 85 zeigt die reale von Herschel erstellte Aufnahme dieses Sterns sowie eine künstlerische Darstellung der hieraus (und aus anderen Quellen) geschlossenen Struktur seines Planetensystems.

Die Astrophysiker leiten daraus die Hypothese ab, dass es primär einem Plane-

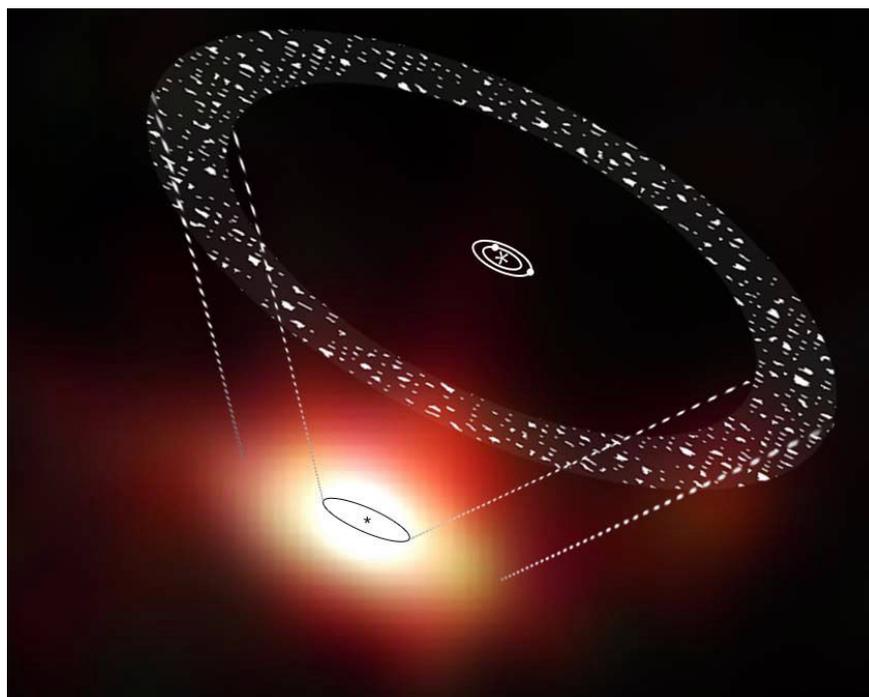


Abb. 85 Sonnenähnlicher Stern 61_VIR, umgeben von einer Staubwolke von ca $70 \cdot K$, aufgenommen vom Herschel Space Observatory (credits: ESA/AOES)

ten mit einer Masse ähnlich der Jupitermasse gelingt, ausreichend häufig ein Objekt aus dem Kometengürtel derart abzulenken, dass er schließlich mit einem der Planeten kollidiert. Sie nehmen an, dass dieser intensive Kometenbeschuss in unserem Planetensystem mehrere $10^6 \cdot y$ andauert hat und für einen signifikanten Anteil des oberflächennahen O_2 , N_2 und H_2O auf diesen Planeten verantwortlich ist. Danach wurde dieser Vorfall immer seltener. Gelegentlich werden auch heute noch Kometen von Planeten eingefangen. Ein konkretes aktuelles Beispiel hierfür ist der Eintritt des Kometen Shoemaker-Lévy-9 in die Jupiter-Atmosphäre im Juli 1994. Dieses Ereignis wurde u.a. von der Raumsonde Galileo photographiert. Durch die enormen Gezeitenkräfte des Jupiter auf dieses Objekt wurde Shoemaker-Lévy-9 bereits einige Monate vor seiner endgültigen Vernichtung in insgesamt 21 Teilstücke zerlegt, s. Abb. 86, sicherlich eine unmittelbare Folge der immer stärker gewordenen Gezeitenkräfte. Das Eintauchen in die äußeren Schichten des Jupiters führte zu einer explosionsartigen Störung seiner Struktur.

Einen Schub an zusätzlichen Messdaten von Kometen wird die astronomische Forschung verfügbar haben, wenn die ESA-Sonde *ROSETTA* ^{‡‡} ihre Aufgabe erfüllt

^{‡‡}Die Namen ROSETTA und PHILAE sind nicht als Abkürzung einer technischen Funktionsbeschreibung entstanden. Sie wurden der Geschichte der Entzifferung der ägyptischen Hieroglyphen



Abb. 86 Die 21 Bruchstücke des Kometen Shoemaker-Lévy, aufgenommen am 17.05.1994 vom Hubble Telescope aus einer Entfernung von $6,6 \cdot 10^8 \cdot km$ (credits: NASA/ESA/H. Weaver E. Smith (STScI))

hat und ihre Daten ausgewertet worden sind. Aus den bisherigen (Januar 2015) Messungen ergibt sich u.a. , dass die von dem Kometen ausgestoßenen Gase folgende Komponenten enthalten:



sowie Verbindungen, die *Na* oder *Mg* enthalten.

(XXX: Der die Abb. 87 erläuternde Text ist noch nicht verfügbar. In diesen wird die nachfolgende Textpassage aufgehen:)

Die Abkürzung OSIRIS steht für **O**ptical, **S**pectroscopic and **I**nfrared **R**emote **I**maging **S**ystem.

Die Raumsonde wurde im März 2004 gestartet und flog nach mehreren Swing-by-Manövern an Erde (2005, 2007 und 2009) und Mars (2007) in Richtung des Asteroiden-Hauptgürtels. Am 05.09.2008 photographierte sie den Asteroiden *2867-Šteins* aus einer Entfernung von ca. $300 \cdot km$ und am 10.07.2010 den Asteroiden *Lutetia* aus einer Entfernung von $3.162 \cdot km$. Danach wurde sie (ohne weitere Fly-by-Manöver) in Richtung der Bahn des Kometen *67P/Churyumov-Gerasimenco* gelenkt, der eine maximale Ausdehnung von ca. $4 \cdot km$ hat und sich auf einer periodischen, deutlich elliptischen Bahn um die Sonne befindet mit einer Umlaufzeit von $6,6 \cdot y$. Diesem näherte sie sich im Laufe des Jahres 2014 und schwenkte nach mehreren Manövern am 06.08.2014 in eine stabile Umlaufbahn um den Kometen ein. Die Abb. 88 zeigt diesen Kometen aus einer Entfernung von $285 \cdot km$. Zu diesem

entnommen: Die wichtigsten archäologischen Funde, durch die diese Entzifferung gelang, waren ein nahe der Stadt Rashid (ital. *Rosetta*) gefundener Stein mit Inschriften in griechischer Sprache und in der ägyptischen Hieroglyphenschrift und ein auf der Nil-Insel *Philae* gefundener Obelisk mit einem Text über Kleopatra und Ptolemaeus.

Heute hoffen die ESA-Forscher, mit den Daten, die ihre Raumsonde liefern wird, massgeblich zur Entschlüsselung der Frage nach der Entstehung unseres Planetensystems beizutragen.

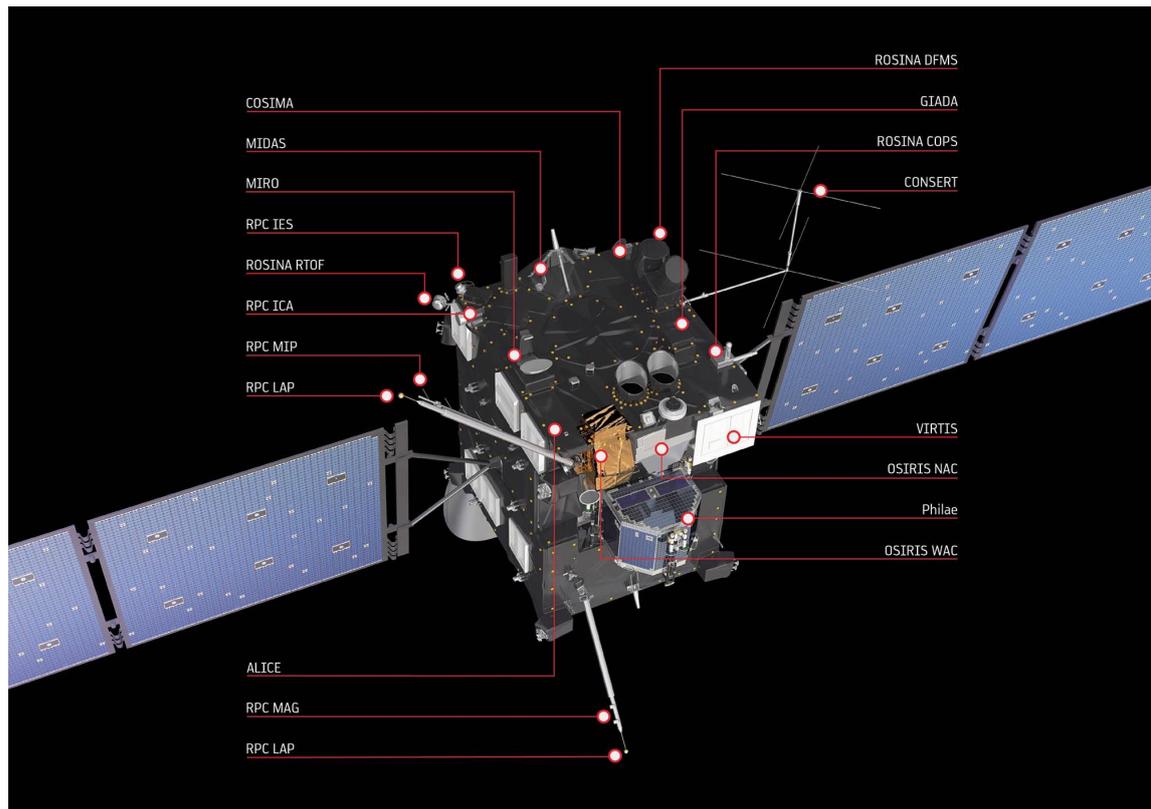


Abb. 87 Computer-Graphik der ESA-Sonde ROSETTA und ihrer Messsysteme
(Copyright ESA/ATG medialab)

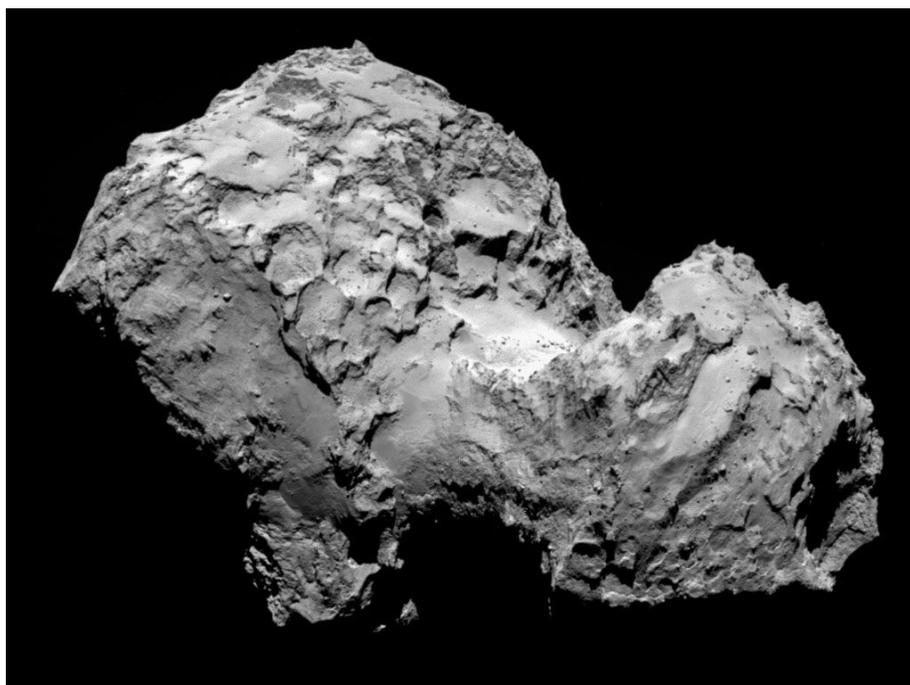


Abb. 88 Der Komet 67P/Churyumov-Gerasimenco, von Rosetta aus einer Umlaufbahn am 03.08.2014 aufgenommen

(credit: ESA:Rosetta/MPS for OSIRIS-Team:
MPS/UPD/LAM/IAA/SSD/IN/UPM/DASP/IDATA)

Zeitpunkt betrug der Abstand des Kometen von der Sonne

$$d(\text{Sonne-67P}; 03.08.2014) \approx 4,5 \cdot 10^6 \cdot km \quad (10.348)$$

Rosetta wird nun den Kometen auf seinem Weg in Richtung der Sonne begleiten. Am 12.11.2014 setzte Rosetta seine Landeeinheit *Philae* auf dem Kometen ab. Die Landung gelang nur partiell: Wegen Ausfall verschiedener mechanischer Landehilfen vollführte *Philae* mehrere Bodenberührungen und kam erst nach mehreren Stunden letztlich nicht auf dem geplanten, weitgehend ebenen Landeplatz zum Stillstand, sondern vermutlich an einem Gesteins-Abhang, der überdies die meiste Zeit im Sonnenschatten liegt. *Philae* ist trotzdem weitgehend funktionsbereit, musste jedoch bereits nach wenigen Arbeitsschritten wegen Energiemangels in den Schlafzustand geschaltet werden. Ein wichtiges, auf Grund dieses ungewollt komplex verlaufenen Landeprozesses besonders gut abgesichertes Ergebnis ist das gänzliche Fehlen eines von diesem Kometen erzeugten Magnetfeldes.

Das ESA-Team hofft, im Zuge des weiteren Weges in Richtung Sonne die Sonde nochmals in Betrieb nehmen zu können. In jedem Fall wird der Orbiter Rosetta seine Messkampagne fortsetzen.

Asteroide und Zwergplaneten (-)

Unser Planetensystem enthält 2 ausgedehnte, ringförmige Bereiche, die wohl grundsätzlich den Platz für die Bildung je eines weiteren Planeten geboten hätten, in denen es aber hierzu nicht gekommen ist. Statt dessen enthalten diese beiden Bereiche eine Vielzahl kleinerer Objekte, von denen die Astronomen heute (2012) annehmen, dass es sich um die Restpopulation von Planetesimalen handelt, die - analog wie in den übrigen Bereichen der protoplanetaren Scheibe - im Zuge der Akkretion durch lokale Agglomeration des Staubmaterials dieser Scheibe entstanden sind, bei denen es aber nicht zu einer weiteren Agglomeration bis hin zur Bildung eines Planeten gekommen ist. Diese Planetesimale haben den Namen *Asteroide* (von $\alpha\sigma\tau\epsilon\rho$ (griech.) der Stern; und $\epsilon\iota\delta\epsilon\varsigma$ (griech.) ähnlich) erhalten. Viele dieser Asteroide sind seitdem als Folge einer Kollision zerplatzt oder haben diesen Bereich verlassen, z.B. um danach als *Meteorite* auf einen der großen Planeten aufzuschlagen. Die übrigen bilden diese beiden *Asteroidengürtel*, die wir nun kurz beschreiben werden.

Der Hauptgürtel (-) Der sonnen-nähere dieser beiden Gürtel umfasst den Bereich von

$$2,0 \cdot AE < R < 3,4 \cdot AE \quad (10.349)$$

wenn R der mittlere Durchmesser der Bahn eines Asteroids um die Sonne ist, s. auch Abb. 81 in Heft 3. Diese Ansammlung von kleineren Objekten mit Durchmessern bis hin zu mehreren $100 \cdot km$ hat die (etwas unspezifische) Bezeichnung *Asteroidengürtel* oder *Hauptgürtel* erhalten. Bis heute (2012) sind knapp $6 \cdot 10^5$ Asteroide dieses Gürtels identifiziert, die reale Gesamtzahl wird auf deutlich $> 10^6$ geschätzt. Die Gesamtmasse aller dieser Objekte schätzt man auf

$$M_{ges}(\text{Hauptgürtel}) \approx 10^{-3} \dots 10^{-4} \cdot M_{\text{Erde}} \quad (10.350)$$

Diese Asteroide bestehen meist aus silikatreichen Gesteinen. Einige haben auch starke Anteile an C und seinen Verbindungen. Man erkennt sie an ihrem deutlich höheren Absorptionsvermögen ϵ .

Der größte bisher identifizierte Asteroid in diesem Hauptgürtel ist Ceres. 2 weitere relativ große Asteroide sind Pallas und Vesta. Einige ihrer physikalischen Daten sind in der nachfolgenden Tabelle zusammengestellt:

	Ceres	Pallas	Vesta
$\langle \Delta r_{\text{Bahn}} \rangle / AE$	2,767	2,772	2,362
$M_{\text{ges.}} / 10^{20} \cdot kg$	9,35	2,34	2,59
$\langle D \rangle / 10^3 \cdot km$	0,909... 0,975	0,546	0,517
$\langle m \rangle / 10^3 \cdot kg/m^3$	2,077	2,76	3,456
T_{ref} / K	36,4	36,3	49,9
$T_{\text{Oberfl.}} / K$	167	164	85 / 270
ϵ			0,577

Vesta und Ceres sind das Forschungsziel der NASA-Sonde DAWN (von *dawn* (engl.) die Morgenröte). DAWN wurde am 27.09.2007 gestartet und hat Vesta ab Juli 2011 13 Monate lang in einer Umlaufbahn von zunächst $210 \cdot km$ und danach $680 \cdot km$ umkreist und intensiv untersucht. Im August 2012 startete DAWN in Richtung Ceres. Das Einschwenken in eine Umlaufbahn um Ceres ist für Februar 2015 geplant. Untersuchungen mit dem Herschel-Teleskop aus dem Jahr 2014 haben gezeigt, dass Ceres wohl mit einer geschlossenen Schicht aus festem H_2O umhüllt ist, vom dem aber nur einige Stellen warm genug sind, um in signifikantem Ausmaß H_2O auf dem Wege der Sublimation an die Atmosphäre abzugeben.

Vesta (*) Der Asteroid *Vesta* wurde 1877 von dem deutschen Arzt und Astronom *Heinrich Wilhelm Olbers* (* 1758 in Arbergen b.Bremen; † 1840 in Bremen) entdeckt. Seine Gesamtmasse entspricht nur etwa 1% der Masse des Zwergplaneten Pluto (s. Unterabsatz S. 1362). Unsere Kenntnisse über diesen Himmelskörper haben sich mit der erfolgreichen Mission der Raumsonde DAWN sprunghaft erweitert, s. Abb. 89.

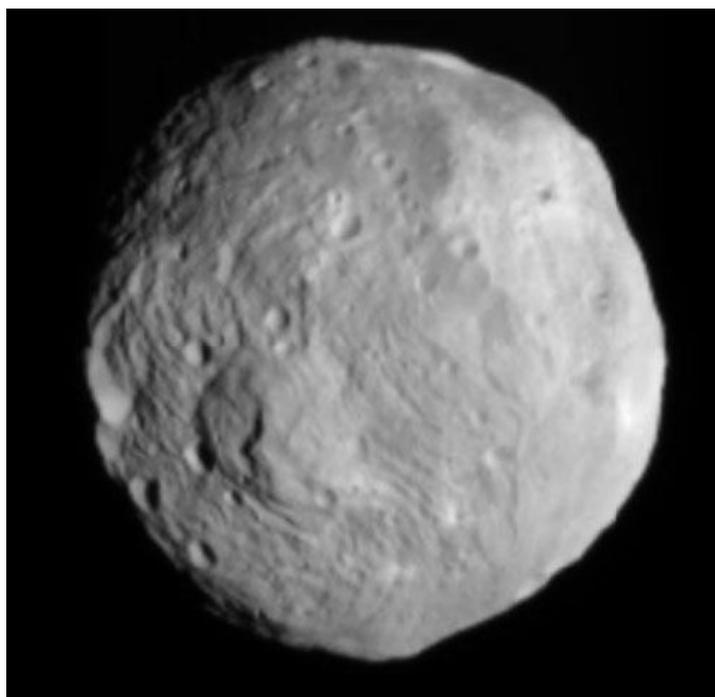


Abb. 89 Asteroid Vesta, aufgenommen am 09.07.2011 von der Raumsonde DAWN
(Quelle: www.nasa.gov/
credit: NASA/JPLK-Caltech/UCLA/MPS/DLR/IDA)

Wir wissen jetzt, dass Vesta zum Ende seiner Agglomerationsphase vollständig aufgeschmolzen war, so dass sich durch gravitative Separation eine Schalenschicht

ausbilden konnte, die bis heute erhalten geblieben ist, s. Abb. 90. Vesta hat eine

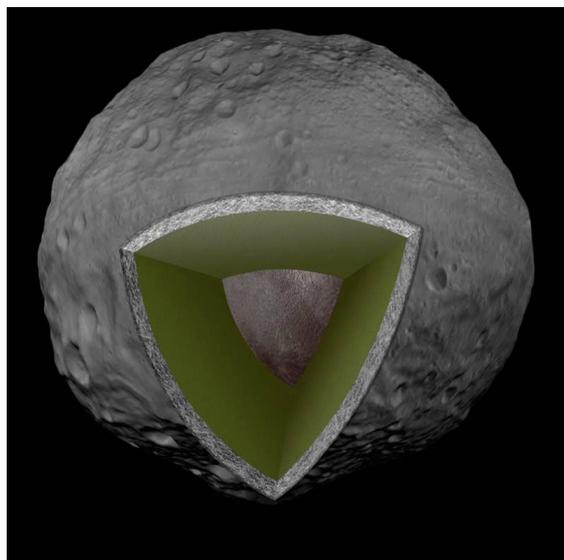


Abb. 90 Schalenstruktur des Asteroiden Vesta

(Quelle: diese Abb. basiert auf dem image no. 1 der DAWN Image Gallery; credit: NASA/JPL-Caltech)

basaltische Kruste, einen Silikat-Mantel und einen Eisen-Nickel-Kern von $R \approx 110 \cdot km$. Dieser Aufbau entspricht also bereits weitgehend dem der großen Planeten. Während der ersten Phase $1,5 \cdot 10^8 \cdot y$ seiner Existenz war Vesta geologisch aktiv. Auf Grund von radiometrischen Untersuchungen an Meteoriten, die von Vesta stammen, geht man heute davon aus, dass diese Phase bereits zum Zeitpunkt

$$t_{\odot} = 1 \cdot 10^7 \cdot y$$

beendet war. (Zur Definition dieser mit der Entstehung unserer Sonne beginnenden Zeitskala s. Abschnitt 10.3.3). Danach war der vertikale Temperaturgradient soweit abgeklungen, dass die inneren Konvektionsströme zum Erliegen kamen. Innerhalb der letzten $2 \cdot 10^9 \cdot y$ kam es zu 2 großen Kollisionen mit anderen Himmelskörpern. Deren Einschläge in der Nähe des Vesta-Südpols waren aber nicht in der Lage, Vesta komplett zu zerschlagen.

Infolge der von Jupiter auf Vesta generierten starken Gezeitenkräfte werden immer wieder Teile der Vesta-Oberflächenschicht herausgerissen. 6% aller Meteoriten, die die Erde erreichen, stammen von Vesta.

Ceres (-) Der Asteroid *Ceres* wurde 1801 von dem italienischen Priester, Astronom und Mathematiker *Guisepppe Piazzi* (* 1748 in Ponte in Valtellina/Lombardei; † 1826 in Neapel) entdeckt. Man bezeichnet ihn heute als sog. differenzierten

Zwergplaneten. Seine Bahn zeichnet sich gegenüber den restlichen Asteroiden des Hauptgürtels durch seine starke Neigung gegen die Ekliptik ($34,9^\circ$) und seine hohe Exzentrizität (0,2310) aus. Er besitzt vermutlich einen Kern aus Metallen und Gesteinen, umgeben von einem Mantel aus Wassereis sowie einer Kruste aus einer Mischung von Wassereis und stark verwitterten Mineralen. Seinen integralen Gehalt an H_2O (überwiegend in Form von Eis) schätzt man auf

$$\frac{M(H_2O)}{M} \approx 0,17\dots 0,27 \quad (10.351)$$

Wegen seiner relativ niedrigen mittleren Massendichte kann man spekulieren, dass er im Gegensatz zu Vesta vielleicht keinen rein-metallischen Kern besitzt.

(XXX: Der weitere Text des Unterabsatzes *Ceres* ist noch nicht verfügbar.)

Der Kuiper-Gürtel (-) Ein weiterer Gürtel von Asteroiden findet sich außerhalb der Bahnebene des Neptun, etwa in dem Bereich

$$30 \cdot AE < R < 50 \cdot AE \quad (10.352)$$

Dieser Asteroidengürtel wird heute meist als *Kuiper-Gürtel* bezeichnet, benannt nach dem niederländisch/US-amerikanischen Astronomen *Gerard Peter* (eigentlich Gerit Pieter) *Kuiper* (* 1905 in Harenkarspel/Westfriesland (Niederlande); † 1973 in Mexico-City). Ebenso wie einige andere Forscher stellte Kuiper 1951 und 1974 in Publikationen die Hypothese von der Existenz eines Asteroidengürtels in diesem Bereich unseres Planetensystems auf. Der Kuiper-Gürtel besteht aus $1,4 \cdot 10^3$ registrierten Objekten, darunter sind 8 Asteroide mit einem Durchmesser $> 1000 \cdot km$. Hierzu zählt der Zwergplanet *Pluto* und sein Mond *Charon* sowie ein weiterer Zwergplanet jenseits der Plutobahn, der 2005 von dem US-amerikanischen Astronomen *Michael E. Brown* (* 1965 in Huntsville/Alabama; heute Prof. am Caltech Berkeley XXX) am Caltech Palomar Observatory entdeckt wurde und den Namen *Eris* erhalten hat. Brown entdeckte eine Vielzahl weiterer sog. **trans Neptun objects** (TNO), u.a. auch den Eris-Mond *Dysnomia*. Die nachfolgende Tabelle zeigt die wichtigsten physikalischen Eigenschaften dieser gerade genannten 3 Zwergplaneten.

	Eris	Pluto	Charon
$\langle R_{\text{Bahn}} \rangle / AE$	68	39,482	39,482
$M_{\text{ges.}} / 10^{21} \cdot kg$	16,6	12,5	1,9
$\langle D \rangle / 10^3 \cdot km$	2,326	2,39	1,207
$\langle m \rangle / 10^3 \cdot kg/m^3$	2,52	1,75	2,06
$T_{\text{Oberfl.}} / K$		73	

Bis 2014 gelang es mit Hilfe des Herschel-IR-Teleskops (s. Absatz S. 1411), von 132 dieser Objekte die Strahlungstemperatur T , den mittleren Durchmesser D und die

1362
 Physik ganz klein / ganz gross (-)

Elliptizität der strahlenden Oberfläche und ihr Emissionsvermögen ε zu vermessen. Diese Messwerte überstreichen einen Bereich von

$$50 \cdot km < D < 2,4 \cdot 10^3 \cdot km \quad (10.353)$$

$$0,01 < \varepsilon < 0,9 \quad (10.354)$$

$$T \sim 40 \cdot K \quad (10.355)$$

Der Kuipergürtel enthält zu einem merklichen Anteil auch Planetesimale vom Typ eines Kometen.

Eine Vielzahl von neuen Informationen über den Kuipergürtel, insbesondere über seinen äußeren Rand verspricht die weitere Fortsetzung der New-Horizon-Mission. Anfang des Jahres 2015 hat diese Sonde diesen Bereich unseres Planetensystems erreicht. Ein Vorbeiflug am Zwergplaneten Pluto ist für den 14.07.2015 geplant. Mit Hilfe des Hubble-Teleskops hat die NASA bereits 3 weitere interessante Ziele ausgewählt, die New-Horizon anpeilen könnte.

Der Zwergplanet Pluto (-) Der Zwergplanet *Pluto* wurde 1930 durch den US-amerikanischen Astronomen *Clyde William Tombaugh* (* 1906 in Streator/Ill (USA); † 1997 in Las Cruces/NM (USA) als em. Prof. der New Mexico State Univ.) entdeckt, damals *junior astronomer* am Lowell-Observatory in Flagstaff/Ariz. (USA). Seine Bahn verläuft innerhalb des Kuiper-Gürtels. Sie entspricht einer (3:2)-Resonanz mit dem Planeten Neptun.

(XXX: Der weitere Text des Absatzes *Der Planet Pluto* ist noch nicht verfügbar. Er wird auch die nachfolgende Abb. 91 und deren Erläuterung sowie die daran anschließend wiedergegebene Textpassage enthalten:)

Die unterschiedliche Färbung der verschiedenen Bereiche der Planeten-Oberfläche wird als jahreszeiten-abhängige Sublimationseffekte auf der eisbedeckten Planeten-Oberfläche gedeutet.

Pluto führt - ebenso wie die Venus - eine rückläufige Eigenrotation aus, d.h. seine Drehachsen der Eigenrotation und der Bewegung um die Sonne bilden einen Winkel nahe 180°.

Der Stand der Kenntnisse über Pluto und seine Monde wird sich voraussichtlich während des Jahres 2015 grundlegend verbessern. Dann nämlich wird (der Planung nach am 14.07.2015) die Raumsonde *New Horizon*, die 2006 gestartet wurde, an Pluto und an Charon in einer Entfernung von

$$\Delta r = 1,25 \cdot 10^4 \cdot km \quad (10.356)$$

vorbei fliegen, allerdings mit einer Relativgeschwindigkeit der Größenordnung

$$v(\text{NewHorizon}/\text{Pluto}) \sim 4,3 \cdot 10^4 \cdot \frac{km}{h} \quad (10.357)$$

und dabei die ersten Photos dieses Zwergplaneten zur Erde funken. Danach wird sie weiter in die Tiefen des Kuipergürtels eindringen zu einem Ziel, das die NASA

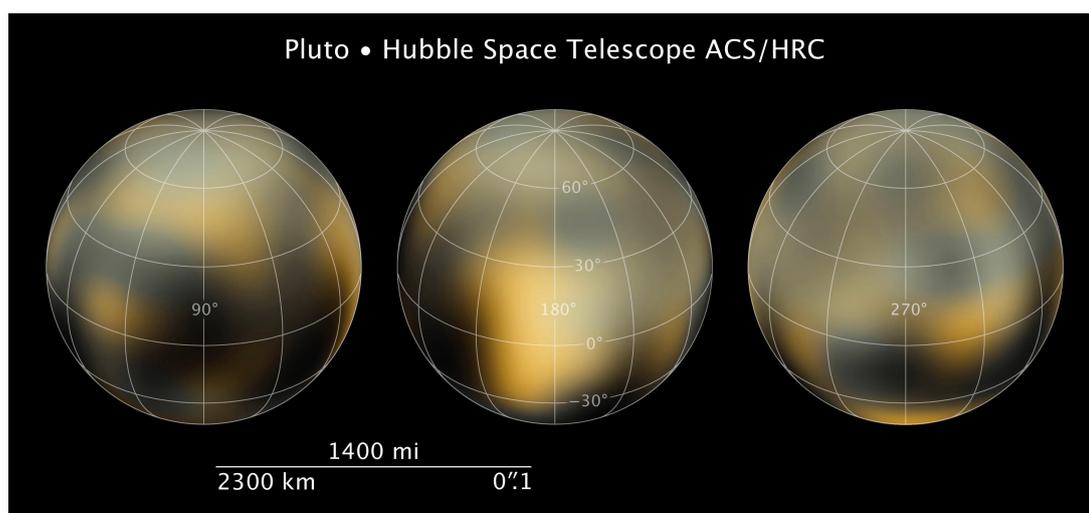


Abb. 91 Vom Hubble Space Telescope in den Jahren 2002 und 2003 erstellte Echtfarben-Aufnahmenserie des Pluto

(Quelle: nasa.gov/mission_pages/hubble/science/pluto-20100204)

erst nach dem Vorbeiflug an Pluto festlegen wird. Die Aufnahme der Pluto-Oberfläche (Abb. 91 (a)) ist eine Echtfarbenaufnahme vom 14.07.2015 aus einer Entfernung von $4,5 \cdot 10^5 \cdot km$, die durch Verknüpfung einer hochauflösenden LORRI-Aufnahme mit den Farbinformationen einer RALPH-Messung errechnet wurde. Der Nordpol befindet sich in dieser Darstellung in der Mitte des Bildes oben. Die insbesondere die Pluto-Atmosphäre zeigende Aufnahme (Abb. 91 (b)) wurde am 15.07.2015 aus einer Entfernung von $2 \cdot 10^6 \cdot km$ registriert. Wegen der nahezu exakt entgegengesetzt zur Sonnenrichtung orientierten Bahn von New Horizon war zu diesem Zeitpunkt die von der Kamera erfasste Pluto-Oberfläche völlig abgeschattet.

Die Pluto-Atmosphäre besteht vermutlich zu über 90% aus Stickstoff.

Die Pluto-Monde (-) Bis heute (2012) kennt man 5 Trabanten, die den Planeten Pluto umkreisen. Deren wichtigste physikalische Daten sind in der nachfolgenden Tabelle zusammengestellt.

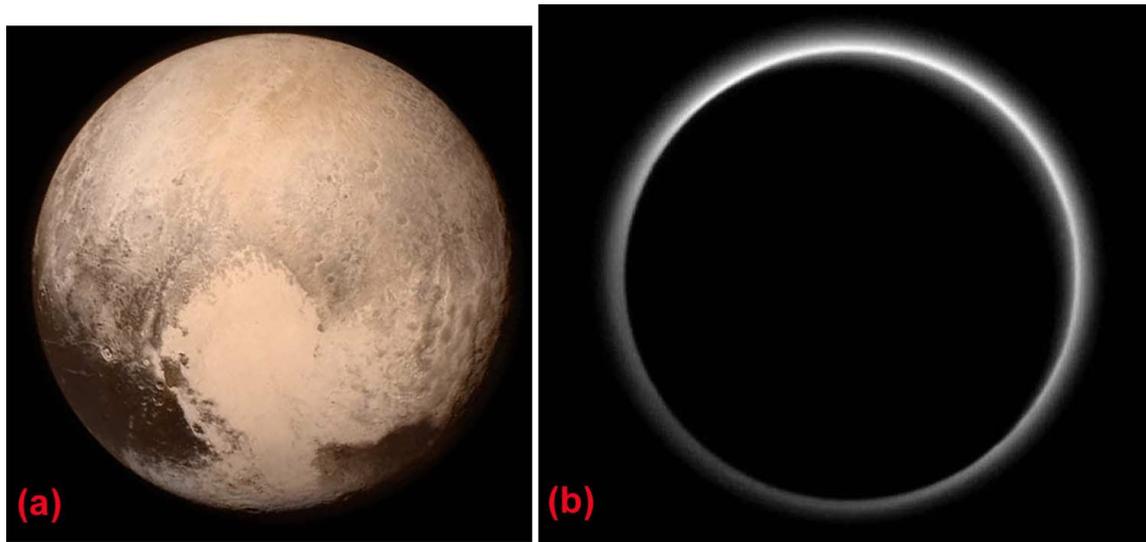


Abb. 92 Pluto-Oberfläche (a) und -Atmosphäre (b), aufgenommen von der Sonde New Horizon während ihres Vorbeiflugs im September 2015 (images credit: NASA/JHUARL/SwRI)

	Charon	Nix	Hydra	Kerberos	Styx
$\langle R_{\text{Bahn}} \rangle / 10^3 \cdot km$	19,640	48,675	64,780	59	
$\langle D_{\text{Mond}} \rangle / km$	1.212	66,9	80,9	30,6	
e_{Mond}	~ 0	1,95	0,81	~ 0	
$M_{\text{ges.}} / 10^{21} \cdot kg$	1,52				
$\langle m \rangle / 10^3 \cdot kg/m^3$	1,63				
$\varepsilon_{\text{Oberfl}}$	0,628	$\sim 0,6$	$\sim 0,6$	$\lesssim 1,0$	
$T_{\text{Oberfl.}} / K$	63				
$M_{\text{Atmosph.}} / kg$					

Der größte dieser Monde, Charon, hat einen Durchmesser, der etwa der Hälfte des Pluto-Durchmessers entspricht. Er führt zusammen mit Pluto eine *doppelt gebundene Rotation* aus, d.h. die Dauer der Eigenrotation des Pluto und die Umlaufzeit des Mondes um Pluto sind identisch. Dadurch ist die wechselseitige Gezeitenkraft stationär, und es tritt keine weitere Abbremsung dieser Bewegung auf. Seine Oberfläche ist vermutlich mit Wassereis bedeckt.

Die Monde Nix und Hydra wurden 2005 mit dem Hubble-Teleskope entdeckt. Beide Monde befinden sich vermutlich in einer Bahnresonanz mit Charon:

$$\frac{T_{\text{Bahn}}(\text{Nix})}{T_{\text{Bahn}}(\text{Charon})} = \frac{4}{1}; \quad \frac{T_{\text{Bahn}}(\text{Hydra})}{T_{\text{Bahn}}(\text{Charon})} = \frac{6}{1} \quad (10.358)$$

Als Hypothese für die Entstehung dieser Monde nimmt man heute (2012) an, dass in einer frühen Phase der Bildung unseres Planetensystems Pluto mit einem

größeren Objekt kollidiert ist, das vermutlich aus dem Kuiper-Gürtel stammte, und dabei etwa $\frac{1}{8}$ seiner Masse verloren hat. Diese Bruchstücke sind dann zu den 5 Monden agglomeriert. 2015 durchgeführte Untersuchungen mit Hilfe des Hubble-

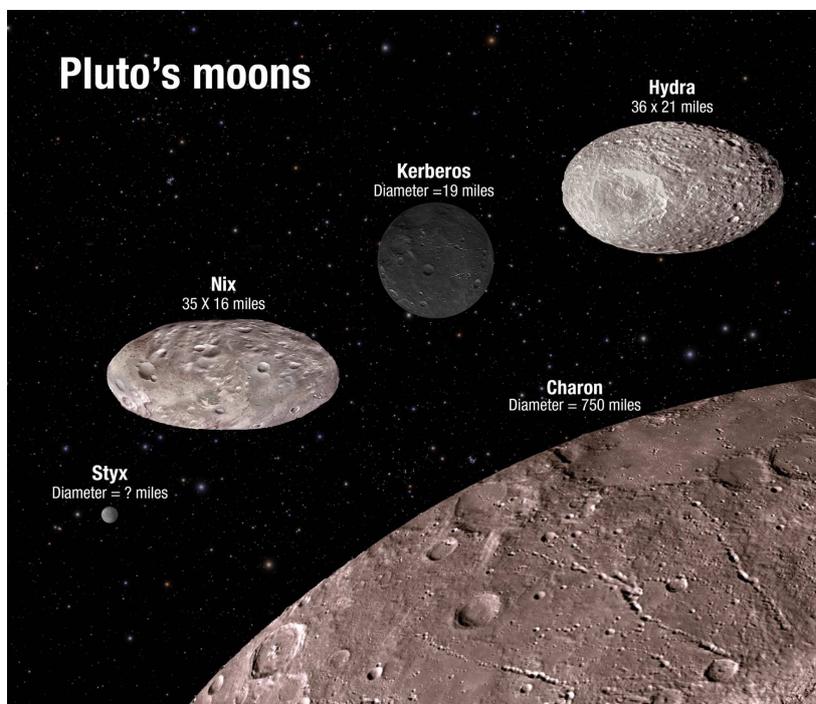


Abb. 93 Illustration der geometrischen Abmessungen der 5 Plutomonde (credit: NASA/ESA/A.Feidl (STScI))

Telescope zeigten, dass Nix und Hydra eine stark unrunde Gestalt haben, die durch einen Rotations-Ellipsoid beschrieben werden kann. Kerberos dagegen ist in guter Näherung kugelförmig, s. auch Abb. 93. Außerdem führen sie nicht etwa - wie die Monde aller Planeten - eine in guter Näherung konstante Eigenrotation aus. Sie drehen sich um sich selbst in Form einer nahezu chaotischen Taumelbewegungen aus. Ursache hierfür sind die ständigen zeitlichen Schwankungen des lokalen Gravitationsfeldes, bedingt durch die resonante Rotationsbewegung von Pluto und seinem größten Mond Charon um deren gemeinsamen Masse-Schwerpunkt. Durch diese Schwankungen des lokalen Gravitationsfeldes ist auch die Stabilität der Bahnbewegung dieser Monde beeinträchtigt. Stabilisierend wirkt hier die 3-Körper-Bahnresonanz der Monde Nix, Hydra und Kerberos.

Die in der Abb. 93 dargestellten strukturellen Details der Oberflächen entsprechen den aktuellen Vorstellungen der Astronomen. Sie gründen jedoch nicht auf realen Aufnahmen, sondern resultieren aus der künstlerischen Phantasie des Zeichners. Die Emissionskoeffizienten dieser Oberflächen unterscheiden sich stark. Kerberos ist nahezu ideal schwarz, während die Monde Nix und Hydra deutlich grau sind ent-

sprechend einem Emissionskoeffizienten ähnlich wie trockener Sand.

(XXX: Der weitere Text des Absatzes *Die Pluto-Monde* ist noch nicht verfügbar.)

Die Oortsche Wolke (-) In nochmals größerer Entfernung von der Sonne, in einem mittleren Abstand der Größenordnung $1 \cdot 10^5 \cdot AE$ befindet sich eine weitere Ansammlung von Planetesimalen, die ganz überwiegend vom Typ eines Kometen sind. Auf sie wirken sich bereits die Gravitationskräfte der benachbarten Sterne aus, so dass sie eine annähernd isotrope Verteilung innerhalb dieser Schale aufweisen. Diese Ansammlung von Kometen wurde nach dem niederländischen Astronomen *Jan Hendrik Oort* (* 1900 in Franeker (Niederlande); † 1992 in Leiden als em. Prof. der Universität Leiden) benannt und als *Oortsche Wolke* bezeichnet. Innerhalb dieser Wolke kommt es immer wieder zu Kollisionen zwischen 2 ihrer Kometen. Je nach den Massenverhältnissen kann hierbei einer der Stoßpartner derart weit aus seiner bisherigen Bahn abgelenkt werden, dass er die Wolke verlässt und in eine stark elliptische Bahn um die Sonne wechselt. Hierbei nähert er sich evtl. derart stark einem der Planeten, dass er von diesem sogar eingefangen wird.

(XXX: Der weitere Text des Unterabsatzes *Die Oortsche Wolke* ist noch nicht verfügbar.)

Bevor wir nun den Abschnitt *Asteroide und Kometen* und mit ihm auch unser Planetensystem verlassen, ist es mir wichtig festzuhalten, dass insbesondere Dank der neueren Ergebnissen der verschiedensten Weltraum-Missionen der Unterschied zwischen den als *Kometen* bezeichneten Objekten und den *Asteroiden* weitgehend in sich zusammengebrochen ist. Beide Klassen von Objekten enthalten sowohl gesteinsartige Bestandteile als auch Anteile an Wasser-Eis. Allerdings können die relativen Anteile über einen weiten Bereich variieren, wobei alle Zwischenwerte offenbar ebenfalls möglich sind.

10.2.12 Galaxien (-)

Innerhalb eines Planetensystems, das aus einem Zentralstern und den um ihn umlaufenden Planeten besteht, ist die Materie extrem ungleichmäßig verteilt: Das von dem Stern eingenommene Volumen hat eine Massendichte der Größenordnung

$$m_{\text{Sonne}} = 1,4 \cdot 10^3 \cdot \frac{kg}{m^3} \quad (10.359)$$

Das von den Planeten jeweils eingenommene Volumen hat eine Dichte von etwa

$$m_{\text{Planet}} = 0,7 \dots 5,5 \cdot 10^3 \cdot \frac{kg}{m^3} \quad (10.360)$$

Das verbleibende Volumen des Planetensystems dagegen hat im Mittel eine Teilchendichte von nur noch

$$n_{\text{interplanetar}} \sim 5 \cdot \frac{\text{Teilchen}}{cm^3} \quad (10.361)$$

Da es sich bei diesen Teilchen überwiegend um Wasserstoff handelt, entspricht dies einer Massendichte von

$$m_{\text{interplanetar}} \sim 10^{-21} \cdot \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad (10.362)$$

Aber auch über Volumenbereiche gemittelt, die sehr viel größer sind als das von einem Planetensystem eingenommene Volumen, ist der Kosmos keinesfalls annähernd gleichmäßig mit Materie gefüllt. Wählen wir z.B. ein Testvolumen der Größe

$$V_{\text{Test}} = (10 \cdot L_j)^3 \quad (10.363)$$

so kann die mittlere Massendichte in diesem Volumen einen Wert der Größenordnung

$$m_1 \sim 1 \cdot \frac{M_{\odot}}{L_j^3} = 2,4 \cdot 10^{-18} \cdot \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad (10.364)$$

annehmen, aber auch Werte im Bereich von

$$m_2 \sim 10 \cdot \frac{\text{Teilchen}}{\text{m}^3} \cdot \frac{1,7 \cdot 10^{-27} \cdot \text{kg}}{\text{Teilchen}} = 1,7 \cdot 10^{-26} \cdot \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad (10.365)$$

Die kosmische Materie in der Form von Staubwolken und von aus ihnen entstandenen Sternen ist also überwiegend auf gewisse, begrenzte Volumina konzentriert, während der verbleibende Rest des Kosmos im Vergleich dazu nahezu masseleer ist. In diesen Bereichen höherer Massenkonzentration bilden die Gaswolken und Sterne bestimmte typische räumliche Strukturen aus. Diese Strukturen bezeichnet der Astronom als *Galaxien* (von $\gamma\alpha\lambda\alpha\xi\iota\alpha\varsigma$ (griech.) die Milchstraße). Die Gesamtanzahl der im beobachtbaren (s. Abschnitt 10.3.4) Universum vorhandenen Galaxien schätzt man heute (2012) auf ca.

$$N_{\text{Galaxien}} = 5 \cdot 10^{11} \quad (10.366)$$

Ihre jeweils größte Längsausdehnung liegt im Bereich

$$L_{\text{max}}(\text{Galaxie}) \sim 10^4 \cdot L_j \dots 10^5 \cdot L_j \quad (10.367)$$

Die größte, bisher (2013) detektierte Galaxie trägt die Kennung NGC 6872 und hat eine maximale Ausdehnung von

$$L_{\text{max}}(\text{NGC 6872}) = 5,22 \cdot 10^5 \cdot L_j \quad (10.368)$$

Die Abkürzung NGC bedeutet **N**ew **G**eneral **C**atalogue und bezeichnet einen Katalog von astronomischen Objekten, der auf den dänischem Astronomen und Wissenschafts-Historiker *Johan Ludvig Emil Dreyer* (* 1852 in Kopenhagen; † 1926 in Oxford/England) zurückgeht. Zu einem international akzeptierten Nachfolger dieses Katalogs ist es nicht gekommen, so dass er auch heute nicht nur von Hobby-Astronomen, sondern auch von der astronomischen Forschung gerne verwendet wird.

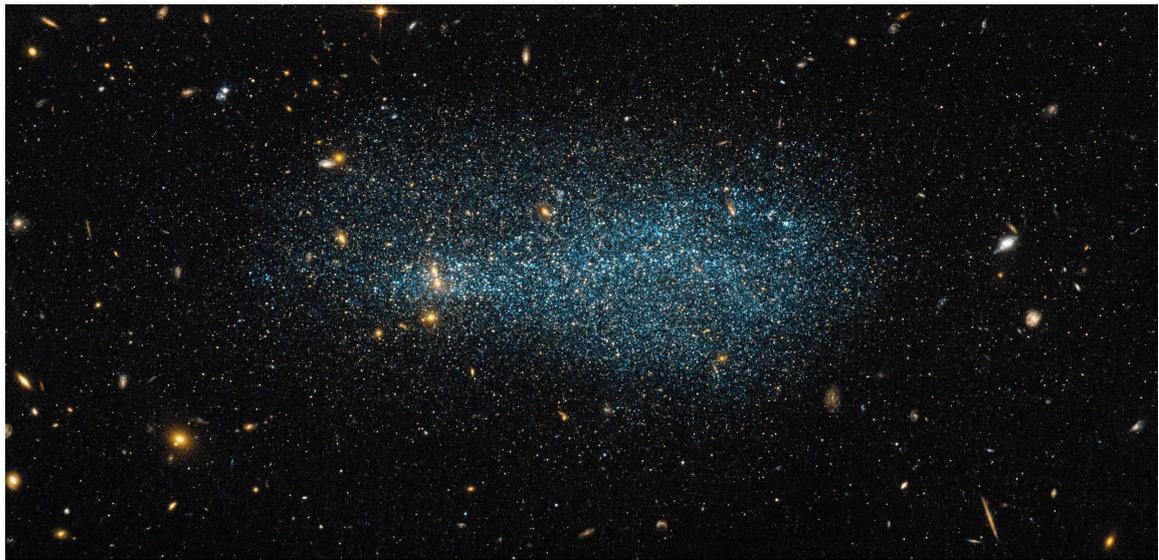


Abb. 94 Zwerg-Galaxie Eso 540-31 in der Cetus-Constellation, aufgenommen vom Hubble-Teleskope
(credit: ESA/Hubble & NASA; acknowledgement: L. Limatola)

Die Anzahl der in einer Galaxie enthaltenen Sterne schätzt man auf

$$N_{\text{Sterne}}(\text{Galaxie}) \sim 1 \cdot 10^9 \dots 3 \cdot 10^{13} \quad (10.369)$$

Galaxien mit einer Anzahl von Sternen nahe der unteren Grenze des in der Gl. 10.369 angegebenen Bereichs bezeichnet man als *Zwerg-Galaxien*. Ein typischer Vertreter dieser Klasse ist die in der Abb. 94 wiedergegebene Galaxie ESO 540-31. Ihre Entfernung von der Erde beträgt ca. $1,1 \cdot 10^7 \cdot Lj$. Im Hintergrund dieser Aufnahme erkennt man eine Vielzahl weiterer Galaxien, die aber wesentlich weiter entfernt von uns sind.

Auch unsere Sonne ist Teil einer Galaxie, die von uns als *Milchstraße* bezeichnet wird (s. Abb. 95 (a)). Ihre maximale Ausdehnung beträgt etwa

$$D(\text{Milchstrasse}) \approx 1 \cdot 10^5 \cdot Lj \quad (10.370)$$

Die Anzahl der in ihr enthaltenen Sterne beträgt

$$N_{\text{Sterne}}(\text{Milchstraße}) \sim 1 \dots 3 \cdot 10^{11} \quad (10.371)$$

Die unserer Milchstraße am nächsten gelegene Galaxie ist die *Andromeda-Galaxie* (s. Abb. 97), die aus historischen Gründen (fälschlicherweise) oft als *Andromeda-Nebel* bezeichnet wird. Ihre Entfernung von unserer Erde beträgt $2,54 \cdot 10^6 \cdot Lj$. Sie besteht aus ca. 10^{12} Sternen und hat eine Gesamtausdehnung von etwa $1,4 \cdot 10^5 \cdot Lj$. Innerhalb der am nächsten zu uns liegenden Galaxien, der sog. *lokalen Gruppe*, ist die

Andromeda-Galaxie zusammen mit unserer Milchstraße die massereichste. In klaren, mondlosen Nächten ist sie sogar mit bloßem Auge zu erkennen. Sie überstreicht mit $186'$ ihrer scheinbaren Längsausdehnung etwa das 6-fache des vom Mond bedeckten Winkelbereiches.

Mit den größten heute (2012) verfügbaren Teleskopen ist man in der Lage, Galaxien zu erkennen, die von uns mehr als $1 \cdot 10^{10} \cdot L_j$ entfernt sind (s. [25]). Die am weitesten von uns entfernte Galaxie, die bisher (2012) entdeckt wurde, befindet sich in einer Entfernung von

$$d(\text{Galaxie}) \approx 1,33 \cdot 10^{10} \cdot L_j \quad (10.372)$$

Wir sehen sie also in einem Zustand, den sie nur $4,5 \cdot 10^8 \cdot y$ nach dem sog. *Urknall* vor $1,37 \cdot 10^{10} \cdot y$ (s. Abschnitt 10.3.4) angenommen hatte.

Alle Galaxien sind derart weit von uns entfernt, dass wir sie immer unter demselben Blickwinkel betrachten. Und da ihre Bewegungen im Raum langsam sind gegenüber historischen Zeiten, können wir auf ihre 3-dimensionale Struktur nur indirekt schließen. Dies gelingt einerseits über Analogie-Betrachtungen innerhalb einer Klasse von Galaxien, die von der Astrophysik als ähnlich strukturiert eingestuft werden, andererseits über Modellrechnungen der zeitlichen Entwicklung von Galaxien. Grundlage für diese Rechnungen sind die klassische Gravitationstheorie und insbesondere die Allgemeine Relativitätstheorie.

Die Astrophysik unterscheidet heute im wesentlichen 3 typische Strukturen von Galaxien:

1. Scheibengalaxien; deren Masse ist in einer rotationssymmetrischen Scheibe konzentriert, wobei die Höhengausdehnung klein ist gegen den Scheibendurchmesser. Innerhalb der Scheibe sind die Sterne nahezu gleichverteilt.
2. Spiralgalaxien; deren Masse ist ebenfalls in einer rotationssymmetrischen Scheibe konzentriert. Bei ihnen sind jedoch die Sterne innerhalb dieser Scheibe keinesfalls gleichverteilt, sondern überwiegend auf einer Anzahl von Spiralarmen konzentriert.
3. Elliptische Galaxien; deren Masse ist innerhalb eines Ellipsoids annähernd gleichverteilt. Die Helligkeit nimmt innerhalb dieses Ellipsoids kontinuierlich von innen nach außen ab. Elliptische Galaxien haben nur eine sehr geringe Eigenrotation. Man sieht sie heute als *alte, sterbende* Galaxien an in dem Sinne, dass in ihnen der Sternbildungsprozess bereits stark abgenommen hat. Der hierfür verantwortliche Prozess ist noch nicht verstanden. Er setzt im Zentrum der elliptischen Galaxie ein und pflanzt sich dann nach außen hin fort.

Das Zentrum dieser Galaxien verlangt eine besondere Betrachtung. In vielen Fällen findet man hier eine mehr oder weniger große, annähernd kugelförmige Verdickung, die der englischen Bezeichnung folgend meist als *Bulge* bezeichnet wird. Diese

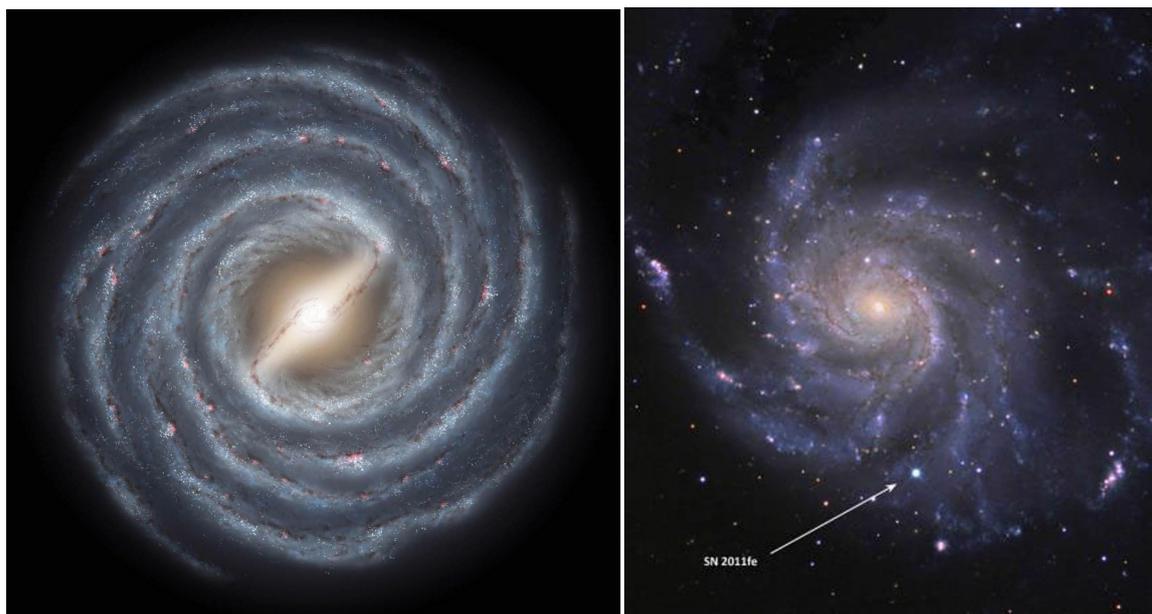


Abb. 95 Spiralgalaxien

(a) fiktive Aufnahme unserer Milchstrasse durch einen externen Beobachter

(Dieses Bild basiert auf dem Bild Milky_Way-2005.jpg aus der freien Enzyklopädie Wikipedia und steht unter der GNU-Lizenz für freie Dokumentation. Der Urheber dieses Bildes ist R.Hurt, JPL-Caltech (USA), NASA.)

(b) Die Feuerrad-Galaxie M 101 im Sternbild des Grossen Bären mit der Supernova SN 2011fe, aufgenommen am 30.08.2011

(Quelle: Las Cumbres Observatory Global Telescope Network; image by B.J.Fulton)

steht vermutlich in unmittelbarem logischen Zusammenhang mit der Existenz eines schwarzen Lochs (engl. **black hole** BH; s. Absatz S. 1212) im Zentrum der Galaxie: Immer wenn eine Galaxie eine deutlich erkennbare Bulge aufweist, befindet sich in ihrem Zentrum auch ein *supermassereiches schwarzes Loch* (engl. **supermassiv black hole** SMBH). Ist dagegen die Bulge gar nicht oder nur schwach erkennbar, befindet sich im Zentrum dieser Galaxie aller Voraussicht nach ein BH mit mittlerer Masse.

Häufig ist die Bulge auch zigarrenförmig komprimiert, so dass sie aus gewissen Winkeln betrachtet eher wie ein Balken aussieht (s. Abb. 95 (a)).

In einer Galaxie laufen die unterschiedlichen Prozesse der Stern-Entwicklung zeitlich parallel ab. Hierüber geben uns die beiden in der Abb. 97 wiedergegebenen Aufnahmen der Andromeda-Galaxie detailliert Auskunft. So dokumentieren die im sub-mm-Strahlungs-kontrast hellen Bereiche (die orange-farbenen Bereiche in der Abb. 97 (b)) die Existenz heißer Gas- und Staubwolken, in denen sich gerade neue Sterne auf dem Wege lokaler Verdichtungsprozesse bilden. Die Bereiche intensiver Röntgenstrahlungs-Emissionen (die blau-gefärbten Bereiche in derselben Abb.) sind



Abb. 96 Scheibengalaxien mit unterschiedlich stark ausgeprägter zentraler Bulge

(a) XXX in einer Entfernung von $2,9 \cdot 10^8 \cdot LJ$

(Quelle: diese Abb. basiert auf der von der NASA/ESA erstellten Aufnahme ESA 243-49
Credit: NAS/ESA, S. Farrell (Sydney Institute of Astronomy, University of Sidney)

(b) Galaxie NGC aus dem ca. $6,5 \cdot 10^7 \cdot LJ$ entfernten Galaxienhaufen Virgo

(Quelle: diese Abb. basiert auf einer mit der Wide Field Channel on Hubble Advanced Camera am 08.11.2010 erstellten Aufnahme

Credit: ESA/Hubble/NASA)

Explosionswolken relativ junger Supernovae.

Die Abb. 98 zeigt ein weiteres Beispiel einer detaillierten Analyse der in einer Galaxie ablaufenden Prozesse.

Sie zeigt uns die sog. *Feuerrad-Galaxie* in einer Kombination von 4 Einzelbildern, die mit jeweils unterschiedlichen Techniken aufgenommen wurden. Hierdurch erhalten wir eine detaillierte Auskunft über die in den unterschiedlichen Bereichen der Galaxie jeweils dominierenden Vorgänge:

- Das Röntgenstrahlungsbild (purpur) zeigt uns die Bereiche, in denen sich entweder kürzlich explodierte Supernova-Reste befinden, oder in denen Materie von einem BH (black hole) akkretiert wird und sich dabei auf extreme Temperaturen aufheizt.
- Das UV-Strahlungsbild (blau) zeigt uns die Ansammlungen von weniger als $1 \cdot 10^6 \cdot y$ alten, aber massereichen und daher sehr heißen Sternen.
- Das VIS-Strahlungsbild (gelb) zeigt uns die Verteilung der sonnenähnlichen Sterne.
- Das IR-Strahlungsbild (gelb) schließlich zeigt uns die Bereiche mit bereits schwach erhitzten Staubwolken, aus denen sich in der Zukunft Sterne bilden werden.



Abb. 97 Aufnahme der Andromeda-Galaxie (a) im sichtbaren Licht (b) als Falschfarbenüberlagerung des sub-mm-Bildes (orange) und des Röntgenbildes (blau)
(Quelle: Die Abb. basiert auf dem Bild M31-andromeda_H der ESA Multimedia Gallery)

Die in der Abb. 95 (b) noch deutlich erkennbare Supernova SN 2011fe (s. Absatz S. 1218) ist übrigens in dieser etwa 8 Monate später erstellten Aufnahme (Abb. 98) mit einfachen Mitteln nicht mehr erkennbar.

In weitgehender Analogie zu den einzelnen Sternen kann man auch die Galaxien als ganze nach ihrer integralen atomaren Zusammensetzung in 3 Klassen aufteilen, wobei der Übergang allerdings fließend ist:

1. Junge, metallarme Galaxien. Diese enthalten nur wenige Sterne, die bereits ihren normalen Lebenszyklus hinter sich haben und dann z.T. bereits über eine Supernova explodiert sind. Daher enthalten sie nur wenig Atome mit einer Kernladung $z > 2$. In ihnen gibt es i.a. Zonen intensiver Bildung neuer Sterne. Zu diesem Typ gehörende Galaxien bezeichnet man oft auch als *aktive Galaxien*.
2. Alte, metallreichere Galaxien. Diese enthalten überwiegend Sterne, die bereits ihren normalen Lebenszyklus hinter sich haben und nun als rote Riesen eine moderate Reststrahlung abgeben. Dagegen findet man kaum Staubwolken, aus denen sich neue Sterne bilden könnten.

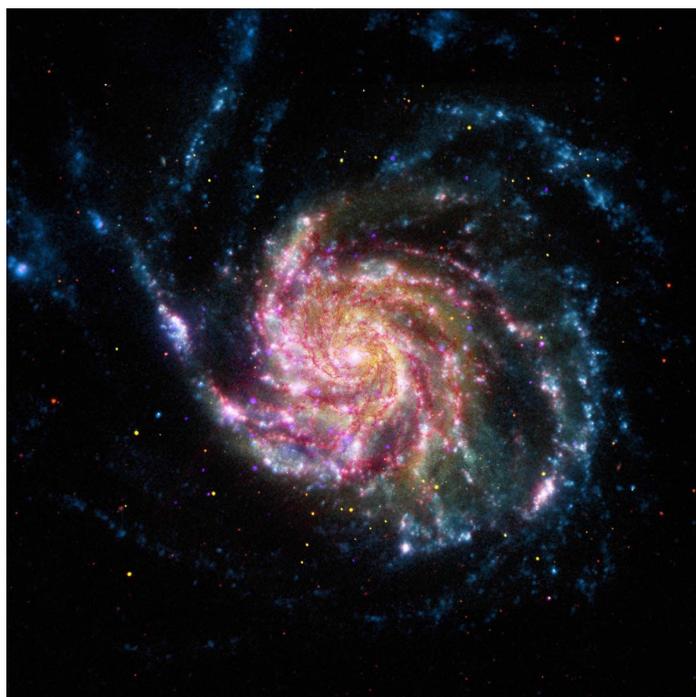


Abb. 98 4-Falschfarbendarstellung der Feuerrad-Galaxie:

(a) purpur: vom Chandra-X-Ray-Observatory erstelltes Bild im Röntgenstrahlungs-kontrast
 (b) blau: vom Galaxy Evolution Explorer erstelltes Bild im UV-Strahlungs-kontrast
 (c) gelb: vom Hubble Space Telescope erstelltes Bild im Kontrast des sichtbaren Lichts
 (d) rot: vom Spitzer Space Telescope erstelltes Bild im IR-Kontrast
 (Quelle: Diese Abb. basiert auf dem am 25.05.2012 von der NASA über [31] publizierten Image M101-2012;
 credits: X-ray: NASA/CXC/SAO; IR&UV: NASA/JPL-Caltech; optical: NASA/STScI)

3. Extrem massereiche, metallfreie Galaxien. Bei ihnen ist meistens die Sternentwicklung bereits vollständig abgeschlossen. Ihre mittlere Massendichte ist um den Faktor 10 bis 100 höher als bei den übrigen Galaxien.

Die Aufteilung der beiden erstgenannten Typen von Galaxien in den Term *jung* bzw. *alt* muss nicht in jedem Fall mit dem wirklichen Alter der Galaxie übereinstimmen. In einer massearmen Galaxie laufen alle Prozesse, der globalen Akkretion innerhalb der Galaxie ebenso wie der lokalen Akkretion einer Gaswolke zu einem Stern und auch die verschiedenen Perioden des Fusionsbrennens in einem Stern wesentlich langsamer ab als bei einem wesentlich massereicheren Objekt. Der Terminus *jung* in der o.a. Klasseneinteilung ist also besser durch die Kennzeichnung *jung und/oder massearm* zu ersetzen und entsprechend der Begriff *alt* durch *alt und/oder massereich*. Die Entwicklungsgeschichte des 3. Typs von Galaxien stellte bis vor kurzem überwiegend als ein astronomisches Rätsel dar. Durch gemeinsame Analyse von Auf-

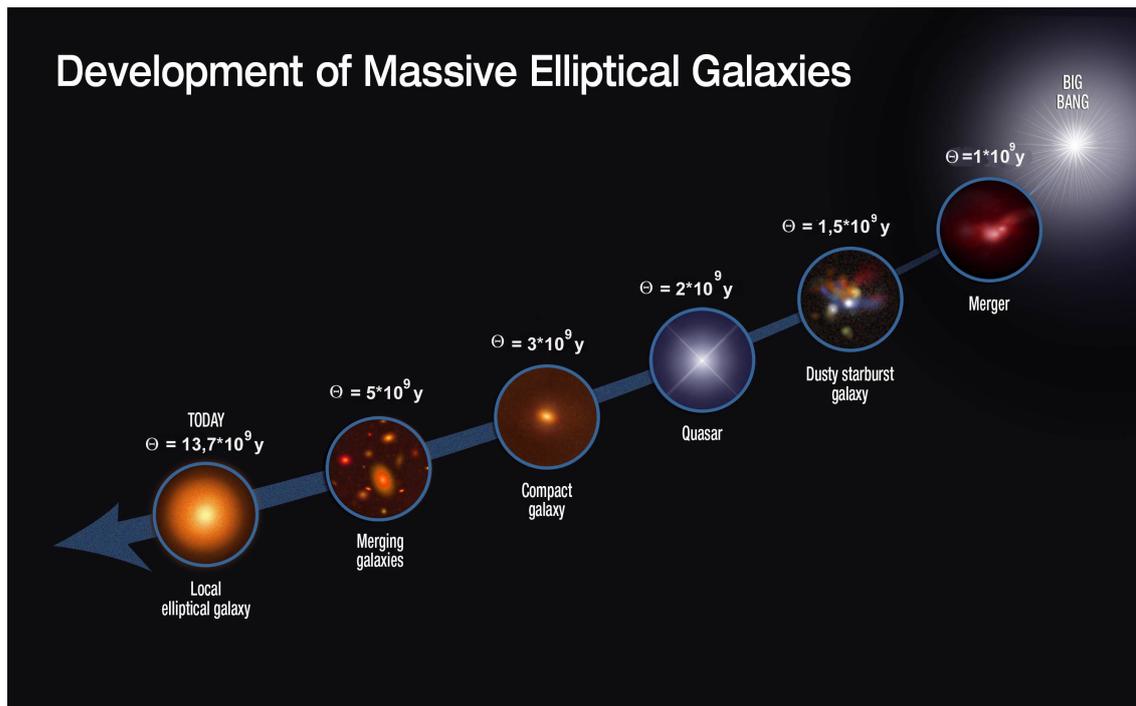


Abb. 99 Computer-Darstellung der zeitlichen Entwicklung kompakter, massereicher elliptischer Galaxien

(credit: NASA, ESA, S. Toft (Niels Bohr Institute) and A. Feild (STSci))

nahmedaten des Hubble-Teleskops und des Herschel-Teleskops sowie weiterer terrestischer Daten gelang 2013 einem internationalen Team unter Führung von S. Toft vom Dark Cosmology Center des Niels Bohr Institutes in Kopenhagen die Aufklärung des typischen Entwicklungsweges dieser frühesten Galaxien im Kosmos, s. [27].

(XXX: Der weitere Text, der diese Entwicklung beschreibt und die Abb. 99 erläutert, ist noch nicht verfügbar.)

Lange Zeit hat man die räumliche Struktur einer Galaxie für eine quasi statische Eigenschaft gehalten, die sich im Laufe der Zeit kaum verändert. Heute ist man sicher, dass die meisten Galaxien in ständiger Bewegung sind und daher auch ihre räumliche Struktur im Laufe genügend langer Zeiträume stark verändern. Primäre Antriebskraft dieser Effekte ist eine ausreichend starke Rotation der gesamten Galaxie. Dabei rotiert die Galaxie nicht etwa mit für alle Teilbereiche gleicher Winkelgeschwindigkeit, sondern es rotieren die inneren Bereiche deutlich rascher als die äußeren. So schätzt man die Winkelgeschwindigkeit der inneren Bereiche unserer Milchstraße auf gut

$$\omega_{\text{innen}} \gtrsim 2 \cdot \pi \cdot \frac{10^3}{5 \cdot 10^9 \cdot y} \quad (10.373)$$

während der Bereich um den halben Radius der Galaxie, in dem sich auch unsere

Sonne befindet, sich nur mit einer Winkelgeschwindigkeit von etwa

$$\omega_{\odot} \sim 2 \cdot \pi \cdot \frac{20}{5 \cdot 10^9 \cdot y} \quad (10.374)$$

um das Zentrum der Galaxie bewegt. Alle diese Bahnen der einzelnen Teilbereiche sind keine exakt geschlossenen Kurven. Durch die gravitative Wechselwirkung untereinander wechselwirken die Bereiche miteinander in einer Weise, die zu einer partiellen Synchronisation der Bewegungen führt. Eine wichtige Rolle spielen nun die in der Galaxie noch vorhandenen interstellaren Staubwolken. In ihnen erzeugt das Kollektiv der partiell synchronisierten Sternbewegungen fortschreitende Druckwellen, die ihrerseits auf die aktuell vorherrschende räumliche Struktur der Sterne in der Galaxie rückwirken. Die unterschiedlichen Strukturen entstehen durch unterschiedliche Phasenbeziehungen zwischen den einzelnen Bahnenpaketen. Letztlich führt dies zu einer quasi-periodischen Veränderung der Struktur der Galaxie. Innerhalb von Zeiträumen der Größenordnung $10^{10} \cdot y$ durchläuft die Galaxie so die verschiedenen Strukturen einer Spiralgalaxie ohne und mit einem zentralen Balken sowie die einer nahezu unstrukturierten Scheibengalaxie. Das hier skizzierte Modell für die zeitliche Entwicklung der Struktur einer Galaxie folgt aus der Analyse einer Vielzahl von astronomischen Beobachtungen und deren Verknüpfung mit Computersimulationen. Bzgl. der Details dieses Forschungsgebietes verweise ich auf [26] und [28].



Abb. 100 Fiktives Bild eines Teils des Nachthimmels der Erde in $3,75 \cdot 10^9 \cdot a$
 (Quelle: Diese Abb. basiert auf der Illustration Sequence of the Milky Way and Andromeda Galaxy Colliding
 credit: NASA;ESA; Z. Levey, R. van der Marel, STSci; T. Hallas, A. Mellinger)

Auch unsere Milchstraße wird im Laufe ihrer weiteren zeitlichen Entwicklung ihre Struktur verändern. Sie wird sogar eine besonders deutliche Veränderung er-

fahren und dies - in kosmischen Zeiträumen gemessen - in naher Zukunft. Aus umfangreichen Messungen mit Hilfe des Hubble-Teleskops ist heute gesichert, dass die Andromeda-Galaxie (s.u.) in etwa $4 \cdot 10^9 \cdot y$ mit unserer Milchstraße zusammenstoßen wird. Im Laufe der darauf folgenden ca. $4 \cdot 10^9 \cdot y$ werden sich diese beiden Galaxien mit einander vermischen, wobei sich für diese neue Galaxie ein deutlich niedrigerer Gesamt-Drehimpuls ergeben wird. Die neue Galaxie wird also von der Struktur einer elliptischen Galaxie sein. Die Abb. 100 zeigt ein Computer-generiertes Bild des Nachthimmels der Erde in $3,75 \cdot 10^9 \cdot y$. Es findet gerade der erste Kontakt zwischen den Außenbereichen der beiden Galaxien statt. Die Existenz der meisten bereits vorhandenen Sterne in den beiden Galaxien bleibt übrigens während dieses Prozesses ungefährdet, da ihre mittleren Abstände für eine signifikante gegenseitige Beeinflussung zu groß sind. Hingegen wird die integrale Massenverdichtung insbesondere in den Staubwolken die Entstehung neuer Sterne begünstigen.

Der (sich in astronomischen Zeiträumen vollziehende) Vorgang des Zusammenstoßes 2-er Galaxien ist keinesfalls eine kosmologische Seltenheit. Er führt zu einer gegenseitigen Durchdringung der beiden Galaxien und kann zu einer vollständigen Neuordnung der beteiligten Komponenten führen. Ein aktuell beobachtbares Beispiel eines derartigen Systems sind die beiden Galaxien NGC 4038 und NGC 4039, s. Abb. 101. Die Galaxie NGC 4038 (ihr Zentrum befindet sich in der Abb. 101 in der oberen Bildhälfte) hat von der Erde aus betrachtet eine Winkelausdehnung von $5,2' * 3,1'$. Die Galaxie NGC 4039 (ihr Zentrum befindet sich in der Abb. 101 in der unteren Bildhälfte) ist mit einer Ausdehnung von $3,1' * 1,6'$ etwas kleiner. Beide wurden 1785 durch William Herschel im Sternbild *Rabe* entdeckt. Ihre Entfernung von uns beträgt

$$d = 2,7 \cdot 10^7 \cdot pc \quad (10.375)$$

Der Vorgang der gegenseitigen Durchdringung dauert bei diesen beiden Galaxien bereits ca. $10^8 \cdot y$ an. Wegen ihrer aktuell beobachtbaren Struktur werden sie auch als die *Antennen-Galaxien* bezeichnet. Die Abb. 101 zeigt diese beiden Galaxien und zwischen ihnen einen Strom von Materie (Gaswolken und Sterne), die durch die gravitative Wechselwirkung aus ihrer quasi-stationären Bahn innerhalb ihrer Galaxie heraus gerissen worden sind und sich nun auf dem Wege in Richtung der anderen Galaxie befinden. Diese in astronomischen Zeiträumen ablaufenden Vorgänge führen zu einer starken Überhitzung der an diesem Austausch beteiligten Gaswolken, die so zu einem Zentrum für die Bildung neuer Sterne werden.

Zentral-galaktische Schwarze Löcher (-/-)

(XXX: Der Text des Absatzes Zentral-galaktische *Schwarze Löcher* ist noch nicht verfügbar. Er wird auch die nachfolgenden Abb. 102, 103 und 104 und den sie erläuternden Text enthalten:)

Im Zentrum unserer Milchstraße befindet sich ein supermassereiches schwarzes Loch (s. Absatz S. 1376), das die astronomische Kennung *Sagittarius A* erhalten hat.



Abb. 101 Die auch als Antennen-Galaxien bezeichneten Galaxien NGC 4038 und NGC 4039; Überlagerung einer Aufnahme im sichtbaren Licht und im NIR (Hubble-WFC3) mit früheren Aufnahmen der Hubble-ACS-Camera (credits: ESA/Hubble & NASA)

Seine Masse schätzt man heute (2015) auf

$$M(\text{SgrA}) \sim 4 \cdot 10^6 \cdot M_{\odot} \quad (10.376)$$

Es ist von einem dichten Torus aus molekularen Gasen und Staub umgeben.

Die Abb. 103 zeigt das Zentrum unserer Milchstraße mit dem dort vorhandenen supermassereichen BH. Dieses Objekt trägt den Namen *Sagittarius A* und die astronomische Abkürzung Sgr A*. Das Hintergrundbild zur Spezifizierung der Umgebung von Sgr A* ist eine Infrarotaufnahme, die also die Temperaturverteilung in dieser Umgebung wiedergibt. Das mittlere γ -Strahlungsbild wurde während einer Dauer von 2 Tagen aufgenommen und zeigt das Zentrum von Sgr A* deutlich heller als in den beiden Bildern, die davor bzw. danach aufgenommen worden sind. Es belegt den kurzzeitigen starken Anstieg der γ -Strahlungsintensität, sobald das BH weitere massereiche Objekte in sich aufnimmt. Galaxien, deren Zentrum

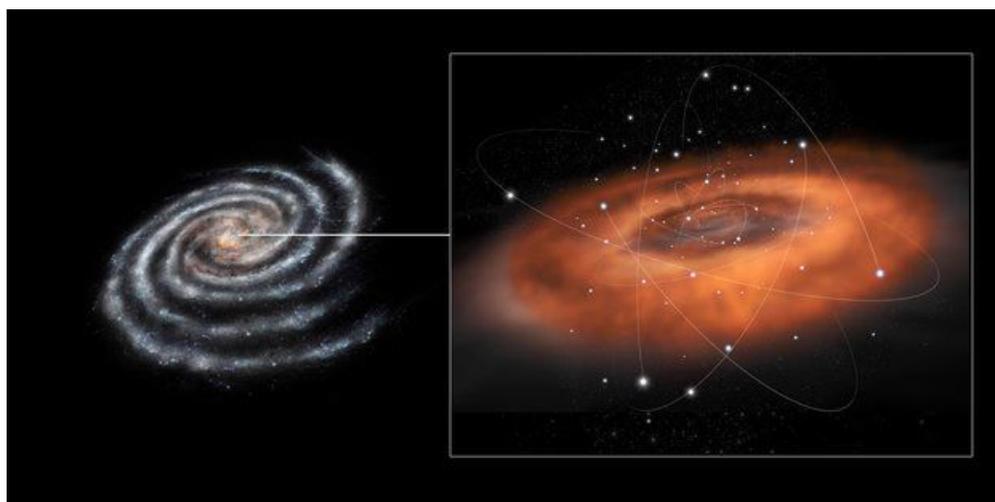


Abb. 102 Zentrum unserer Milchstrasse

(a) Übersichtsaufnahme in einer Computeranimation (b) IR-Realaufnahme des Zentrums
 (Quelle: spaceimages.esa.int/images/2013/05/Galactic-centre;
 credits: ESA-C. Carreau)

ein ausreichend massereiches BH beherbergt, um in starkem Umfang weitere Masse in sich aufzunehmen, bezeichnet man als *aktive Galaxien*. Die Abb. 104 zeigt das $12,4 \cdot 10^9 \cdot L_j$ entfernte Objekt GB 1428, ein supermassereiches BH im Zentrum einer Galaxie, das in großen Mengen massebehaftete Objekte in sich aufnimmt und daher einen intensiven sog. Jet aus hochenergetischen massebehafteten und geladenen Teilchen emittiert. Es wird dadurch zu einer intensiven Quelle von Röntgenstrahlung und von Mikrowellenstrahlung. Die übrigen, ausschließlich gelben Objekte in dieser Abb. sind Galaxien, die kein derart intensives BH beherbergen. Derartige Objekte bezeichnet man als *Quasare*. Diese Objekte entdeckte man zunächst über die von ihnen emittierte Radio- und Mikrowellenstrahlung. Als erster entdeckte der niederländische Astronom *Maarten Schmidt* (* 1929 in Groningen (Niederlande); heute em. Prof. der Caltec Astronomy in Pasadena/Cal. (USA)) am Beispiel des später als 3C273 bezeichneten Objekt, dass das von diesen Objekten ausgesendete Licht eine starke Rotverschiebung zeigt, in diesem Beispiel von 0,158. Das entfernteste bis heute (2014) entdeckte analoge Objekt hat eine Rotverschiebung von 7,1. Die Natur dieser Radioquellen war bis etwa 1980 unklar. Man nannte sie **Quasi-stellar objects** (Quasar). Sie zeichnen sich durch spektral besonders breite Emissionslinien aus. Heute sieht man als gesichert an, dass es sich um extrem weit entfernte aktive Galaxien handelt, in deren Zentrum sich jeweils ein supermassereiches BH befindet.

(XXX: erläuternder Text zu dieser Abb. mit Erklärung, warum es ebenfalls in diesen Absatz aufgenommen wurde)

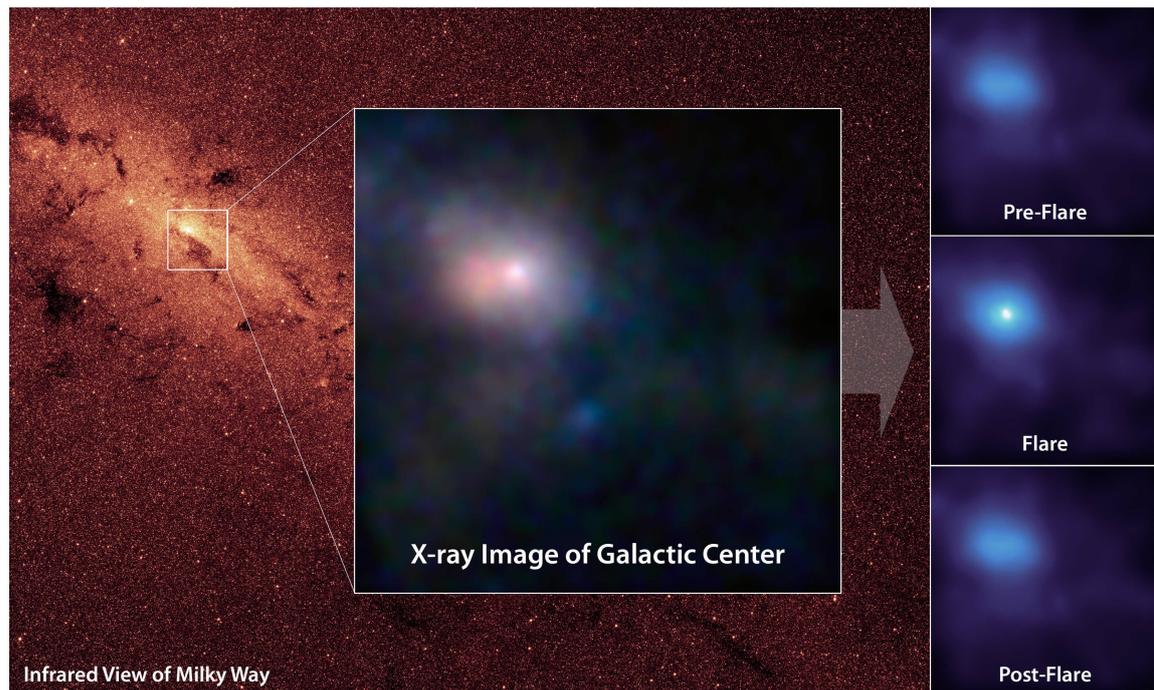


Abb. 103 Sagittarius A im γ -Strahlungskontrast, aufgenommen Juli 2012 vom Weltraumteleskop NuSTAR
(Image credit: NASA/JPL-Caltech)

Der Halo (-)

Eine Galaxie zusammen mit einer gewissen Anzahl sie umgebender Sternhaufen und mit dem Rest der Wolke aus interstellarem Staub, aus dem alle diese Objekte entstanden sind, bildet eine annähernd kugelförmige Einheit, den *Halo* (von $\alpha\lambda\omega\rho$ (griech.) der *Lichthof*) . Viele Astronomen gehen davon aus, dass zu jedem Halo auch eine Menge an dunkler Materie (s. Abschnitt 10.3.6) gehört, und dass es diese dunkle Materie ist, die das gesamte Objekt zusammenhält.

Untersuchungen aus dem Jahr 2012 zufolge hat der Halo, der unsere Milchstraße umgibt, eine Ausdehnung von

$$D(\text{Halo}) \sim 10^6 \cdot L_j \quad (10.377)$$

und besteht aus Gasen mit einer Temperatur

$$\langle T \rangle = 1 \dots 2,5 \cdot 10^6 \cdot K \quad (10.378)$$

Geschlossen wurden diese Werte aus Untersuchungen, die mit dem Röntgen-Teleskop Chandra an den Wolken interstellaren Staubs am Rande unserer Milchstraße durchgeführt wurden. Die Abb. 106 zeigt eine Computeranimation dieses Milchstraßen-Halos. Die im Zuge dieser Untersuchungen abgeschätzte Gesamtmasse dieses Halos

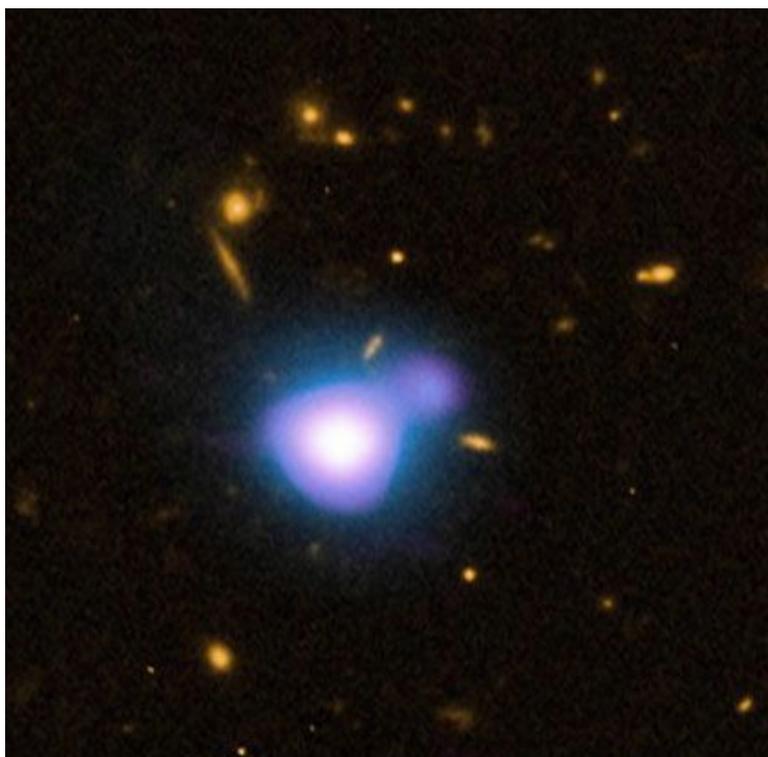


Abb. 104 Quasar GB 1428 als Überlagerung eines Röntgenbildes (blau: Chandra X-ray Observatory), eines Radiostrahlungsbildes (purpur: NSF Very Large Array) und eines Bildes im sichtbaren Licht (gelb: Hubble Space Telescope)
(credit: X-ray: NASA/CXC/NRC/C Cheung et al.; Optical: NASA/STScI; Radio: NSF/NRAO/VLA)

ergab zusätzlich zu der Gesamtmasse aller in der Milchstraße vorhandenen Sterne einen weiteren Term von derselben Größenordnung. Diese Erkenntnis, wenn sie sich denn bestätigt, hat auch einen starken Einfluss auf die offene Frage nach den sog. *missing baryons* und nach der realen Existenz der sog. *dunklen Materie* (s. Abschnitt 10.3.6).

10.2.13 Sternhaufen (-)

Neben den eigentlichen Galaxien, die meist aus $10^9 \dots 10^{13}$ Sternen bestehen, gibt es auch Agglomerationen von Sternen, die nur einige 10^3 Sterne enthalten. Diese bezeichnet man als *Sternhaufen* (engl. *star cluster*). In Orientierung an die geometrische Form dieser Sternhaufen unterscheidet man *offene Sternhaufen* und *Kugelsternhaufen*.

Offene Sternhaufen (engl. *open cluster* oder auch *galactic cluster*) sind eher lockere Ansammlungen von Sternen, die aus derselben Wolke interstellaren Staubs entstanden sind. Sie haben meistens deutlich unterschiedliche Eigenbewegungen, so



Abb. 105 ngc4438

dass sich dieser offene Sternhaufen im Laufe der Zeit von selbst auflöst. Die Sterne sind meist relativ jung, z.B. $10^8 \cdot y$. Ein bekanntes Beispiel für einen offenen Sternhaufen sind die *Plejaden* im Sternbild des Stier. Sie bestehen aus etwas mehr als 1.200 Sternen.

Kugelsternhaufen (engl. *globular cluster*) dagegen bestehen aus deutlich mehr Sternen. Typische Werte liegen im Bereich von $10^5 \dots 10^6$ Sternen. Sie bilden relativ kompakte Objekte und enthalten kaum schwerere Elemente ($z > 2$). Diese Sterne sind also relativ alt, oft $> 10^{10} \cdot y$. Da diese Kugelhaufen immer noch existieren, haben die einzelnen Sterne offenbar kaum eine signifikante Eigenbewegung gegenüber dem Schwerpunkt dieses Sternenhaufens.

Beide Arten von Sternhaufen werden, sobald sie in die Nähe einer Galaxie geraten, von dieser über die Gravitation eingefangen. Man findet Sternhaufen daher heute meist als Begleiter einer Galaxie.

Der in der Abb. 107 wiedergegebene *Kugelsternhaufen* M68 ist etwa $3,3 \cdot 10^4 \cdot L_j$ von uns entfernt und hat eine Ausdehnung von lediglich etwas mehr als $100 \cdot L_j$. Er bewegt sich, wie ca. 150 weitere Sternhaufen, auf einer Bahn um das Gravitationszentrum unserer Galaxie, der Milchstraße. Aufgrund seiner chemischen Zusammensetzung - er enthält nur sehr geringe Anteile an schwereren Elementen wie *C*, *O* oder *Fe* - schätzt man das Alter seiner Sterne auf mehr als $10^{10} \cdot y$.

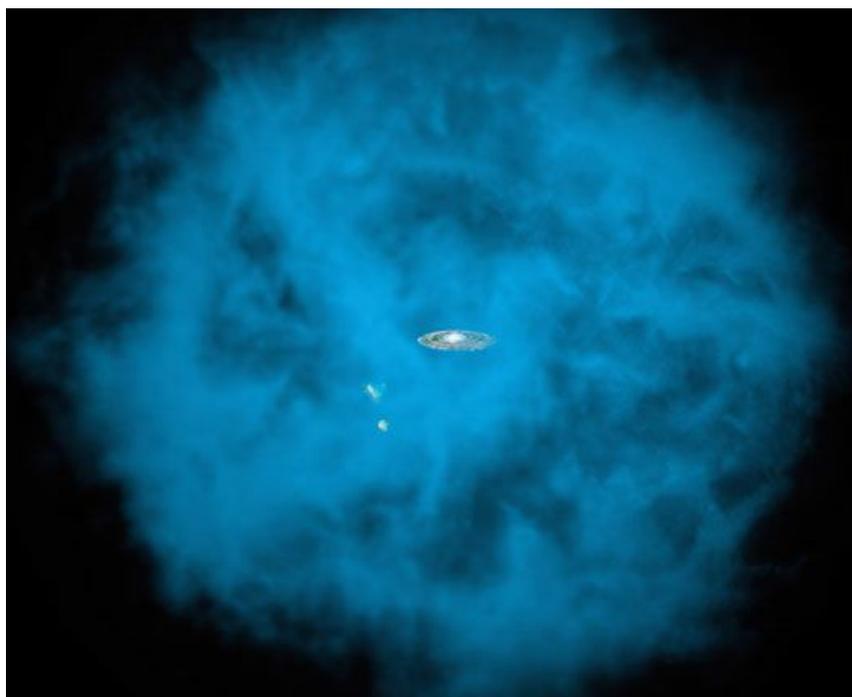


Abb. 106 Computergraphik der Halo-Struktur unserer Milchstrasse, geschlossen aus Chandra-Untersuchungen

(Quelle: chandra.si.edu/press/12-releases

credit: NASA/CXC/M.Weiss; NASA/CXC/OhioState/A.Gupta et al.

10.2.14 Astronomische Objekte / Zusammenfassung

Mit der Diskussion der Sternhaufen haben wir unseren Weg durch die heute bekannten astronomischen Objekte beendet. In dem nun folgenden Abschnitt werde ich die wichtigsten Fakten, die wir entlang dieses Weges gelernt haben, noch einmal zusammenfassend darstellen, um so die innere Systematik und Logik dieser Strukturen deutlich zu machen. Ich werde dabei geometrisch in umgekehrter Reihenfolge vorgehen und mit der am größten ausgedehnten Struktur beginnen.

Dieses ist eine Ansammlung von kosmischem Staub von annähernd kugelförmiger Gestalt und einem Durchmesser der Größenordnung $10^6 \cdot L_j$. Die Massendichte in diesem *Halo* unterliegt gewissen statistischen Schwankungen. Insbesondere aber hat sich der Staub im Zentrum dieses Halos stark verdichtet und eine als *Galaxie* bezeichnete Akkretionsscheibe gebildet, s. Abb. 108. Diese Galaxie enthält etwa die Hälfte der insgesamt im Halo enthaltenen Masse, ihre Längsausdehnung ist von der Größenordnung $10^5 \cdot L_j$. Das Zentrum dieser Galaxie wird von einem massereichen BH gebildet, dessen Masse extrem unterschiedlich sein kann. Bisher wurden Werte zwischen $10^3 \cdot M_\odot$ und $10^9 \cdot M_\odot$ beobachtet.

Die meist im sichtbaren Licht strahlenden Detailstrukturen einer Galaxie wer-



Abb. 107 Kugelsternhaufen Messier 68, aufgenommen am 02.08.2007 mit der Wide Field Camera des Hubble Space Telesopes; aufgenommener Bildwinkel $(34')^2$
(Quelle: www.esa.int; credit: ESA/Hubble & NASA)

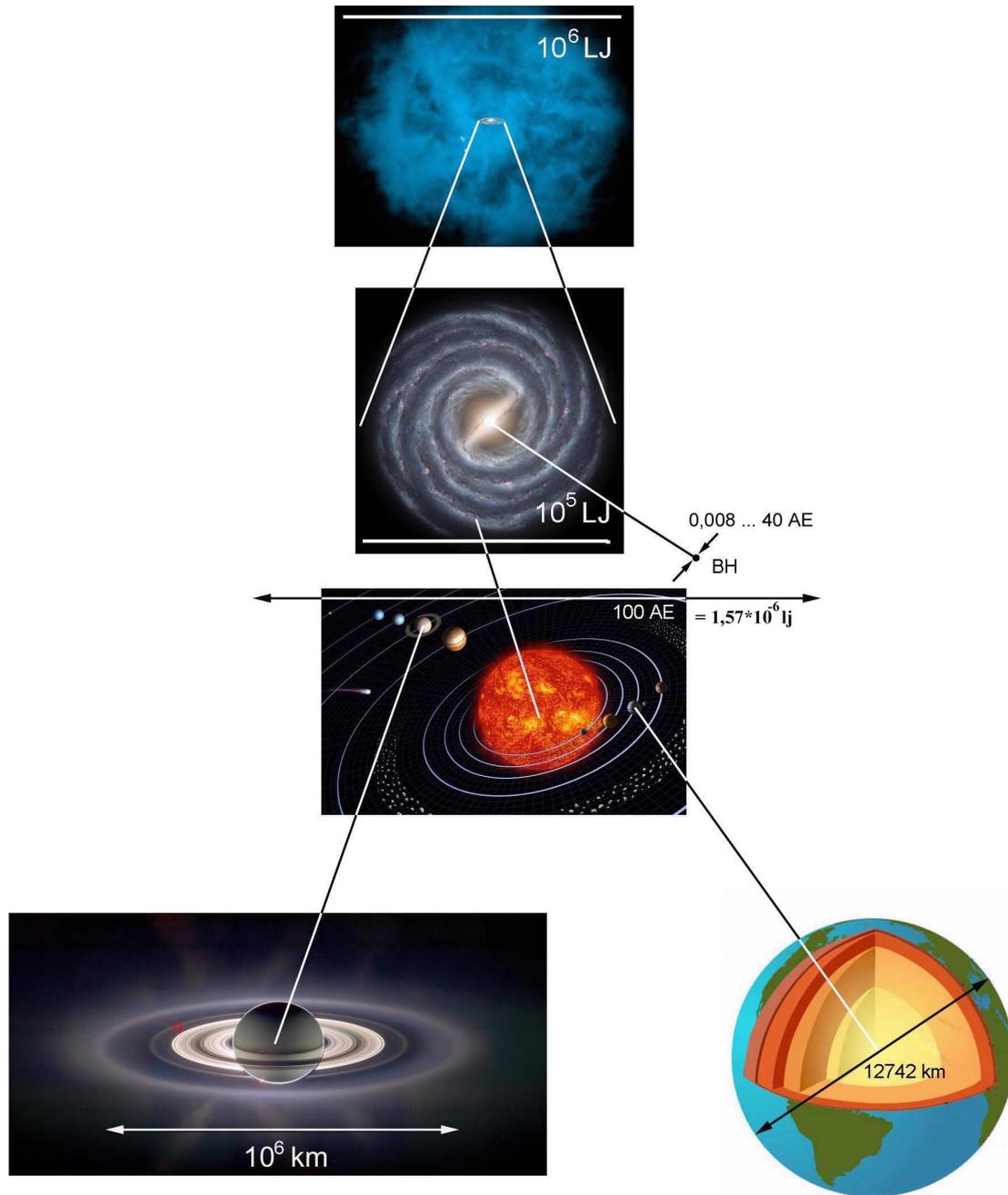


Abb. 108 Überblick und hierarchische Anordnung der wichtigsten astronomischen Objekte in einer Galaxie
(Quelle: eigene Graphik auf Basis von Bildern aus der Wikimedia Commons; die Abb. steht daher unter der GNU-Lizenz für freie Dokumentation Version 1.2 oder höher)

den durch Sterne gebildet, deren Anzahl pro Galaxie ebenfalls sehr unterschiedlich sein kann, etwa $1 \cdot 10^9$ bis $3 \cdot 10^{13}$. Der gravitative und elektromagnetische Einflussbereich eines Sterns und damit die ursprüngliche Ausdehnung der protoplanetaren Akkretionsscheibe, aus der der Stern entstanden ist, beträgt etwa $100 \cdot AE$. Im Fall unserer Sonne hat sich innerhalb dieses Bereichs ein Planetensystem aus insgesamt 8 Planeten und 3 Asteroiden-Gürteln gebildet. Dank der neuen technischen Möglichkeiten werden aktuell immer mehr Sterne gefunden, die ebenfalls von Planeten umgeben sind.

Die Erde ist - von der Sonne aus gezählt - der 3. Planet in diesem System. Wie alle anderen Planeten auch besteht sie aus einem metallischen Kern, der überwiegend aus Eisen und Nickel besteht, einem aus Gesteinen (Verbindungen aus *Si*, Alkalimetallen und *O*) gebildeten Mantel, einer festen Kruste aus Gesteinen und Sedimenten sowie einer Gashülle. Die Temperatur im Zentrum der Erde beträgt etwa $6,8 \cdot 10^3 \cdot K$. Der metallische Kern ist teilweise flüssig. Wegen der dort herrschenden extremen Drucke ist der innerste Bereich des Kerns fest. Die äußeren Planeten unseres Planetensystems haben derart große Mengen an unter N.B. gasförmigen Stoffen aus der protoplanetaren Scheibe über die Gravitation an sich gebunden, dass deren Gashülle in ihren unteren Schichten teilweise flüssig ist. Eine weitere Besonderheit der äußeren Planeten ist ihr teilweise sehr detailreich strukturiertes Ringsystem, das in der Ebene senkrecht zur Rotationsachse liegt.

Die beiden sonnen-näheren Asteroiden-Gürtel unseres Planetensystems bestehen aus Planetesimalen, Asteroiden und Zwergplaneten. In diesem Bereich der protoplanetaren Scheibe ist offensichtlich die vollständige Agglomeration des kosmischen Staubs zu Planeten nicht gelungen. Im Bereich jenseits des Kuipergürtels befindet sich, annähernd isotrop innerhalb einer Kugelschale verteilt, eine weitere, als Oortsche Wolke bezeichnete Ansammlung von Planetesimalen. Diese sind ausschließlich vom Kometen-Typ.

Innerhalb eines Halos aus kosmischem Staub läuft also eine Kaskade von Agglomerationsprozessen ab, die zu Strukturen führt, deren Linear-Abmessungen sich bei jedem Schritt der Agglomeration um mindestens 1 Größenordnung, oft um mehrere Größenordnungen vergrößern. Alle diese Prozesse werden primär über die Gravitation gesteuert.

Noch vor wenigen Jahren wurde ernsthaft diskutiert, ob die Existenz und Strukturierung unseres Planetensystems eher als eine Laune der Natur anzusehen sei, die im Rest des Universums daher vermutlich eher selten vorkommt. Mit den in den letzten Jahren gewonnenen Erkenntnissen, insbesondere auf Grund der äußerst erfolgreichen Suche nach sog. Exoplaneten kehrt sich diese Vorstellung nahezu vollständig in ihr Gegenteil. Heute geht man davon aus, dass eine große Zahl von Sternen von einem System aus Sternen und Asteroidengürteln umgeben ist, das in seiner Gesamtstruktur unserem Planetensystem sehr ähnlich ist. Die Struktur dieser Planetensysteme, also die Abfolge der Planetenmassen und der jeweiligen Bahnradien ist jedoch von System zu System sehr unterschiedlich und oft unserem Planetensystem

auch sehr unähnlich. Näheres hierzu s. Absatz S. 1422.

10.2.15 *Galaxien-Cluster* (-)

In der gerade geschilderten Hierarchie astronomischer Objekte habe ich eine Strukturebene verschwiegen, u.a. weil sie sehr oft bereits im Rahmen der Kosmologie diskutiert wird. Diese auf die Struktur der Galaxie folgenden räumlichen Verdichtungen von Massenverteilungen sind die *Galaxien-Cluster*. Sie sind relativ häufig und umfassen typisch einige 100 Galaxien. Man glaubte längere Zeit, dass sich diese Cluster erst im Zuge der weiteren Entwicklung des Kosmos langsam bildeten und daher primär in nicht zu großer Entfernung von unserer Sonne zu finden sind, also im jüngeren Teil des Universums. Ein typisches Beispiel derartiger Galaxien-Cluster ist das sog. *Bullen-Cluster* (XXX: präzisieren). Diese Hypothese ist jedoch offenbar falsch. Denn es konnten inzwischen auch im wesentlich älteren Universum zumindest vereinzelt Galaxien-Cluster nachgewiesen werden. Das größte bisher nachgewiesene sehr alte Galaxien-Cluster hat den Namen *El Gordo* (span. der Dicke) erhalten. Seine Entfernung von unserer Sonne beträgt

$$d(\text{El Gordo}) = 9,7 \cdot 10^9 \cdot L_j \quad (10.379)$$

Auf Basis des aktuell akzeptierten Modells der kosmischen Entwicklung (XXX: Bezug nennen) resultiert daraus ein Alter von etwa $7 \cdot 10^9 \cdot y$. Das ist etwa die Hälfte des Gesamtalters des Universums. Auch El Gordo besteht aus mehreren 100 Galaxien. Seine Gesamtmasse schätzt man heute (2014) auf

$$M(\text{El Gordo}) \sim 3 \cdot 10^{15} \cdot M_{\odot} \quad (10.380)$$

Vermutlich besteht ein maßgeblicher Anteil dieser Gesamtmasse aus sog. dunkler Materie.

Die Existenz derart alter Galaxien-Cluster legt die Hypothese nahe, dass diese Strukturierung bereits das Ergebnis der primären Verklumpung der Materieverteilung nach dem Urknall war, aus denen dann im Zuge der weiteren Entwicklung die eigentlichen Galaxien entstanden.

10.2.16 *Historische Entwicklung der astronomischen Forschung* (-/-)

(XXX: Der Kopftext des Abschnitts *Historie der astronomischen Forschung* ist noch nicht verfügbar.)

Historie der Galaxien-Forschung (-)

Die Erkenntnis, dass die Gesamtanzahl der existierenden Sterne nicht gleichmäßig über das Universum verteilt sind, sondern dass diese in von einander separierten Untermengen, den *Galaxien* stark aufkonzentriert sind, ist ein Ergebnis der astronomischen Forschung des 20. Jahrhunderts. Daher bezeichneten die frühen Astronomen die mit den technischen Mitteln ihrer Zeit bereits erkennbaren Galaxien

auch nur unspezifisch als *Nebel*. Als erstem gelang 1914 A. S. Eddington eine Geschwindigkeitsabschätzung von zum Andromeda-Nebel gehörenden Sternen. Aus dem abgeschätzten Wert folgte zwingend, dass diese Objekte **nicht** zu unserer eigenen Milchstraße gehören konnten, sondern zu einer anderen, deutlich weiter entfernten Galaxie gehören mussten. Hubble bestimmte diesen Wert 1923 zu

$$\Delta r(\text{Andromeda}) \geq 5 \cdot D(\text{Milchstraße}) \quad (10.381)$$

Der heute akzeptierte Wert beträgt

$$\Delta r(\text{Andromeda}) = 2,54 \cdot 10^6 \cdot L_j \approx 23 \cdot D(\text{Milchstraße}) \quad (10.382)$$

(XXX: Der weitere Text des Absatzes *Historie der Galaxienforschung* ist noch nicht verfügbar.)

10.3 Kosmologie (-)

(XXX: Der Kopftext des Kapitels *Kosmologie* ist noch nicht verfügbar.)

10.3.1 Die Unsymmetrie von Materie und Antimaterie (-)

In diesem Abschnitt werden wir die Frage diskutieren, die man, leicht philosophisch verpackt, auch so formulieren kann:

Warum existiert überhaupt etwas und nicht vielmehr nichts?

Bei der Behandlung der Theorie der Elementarteilchen haben wir gelernt, dass eine Reihe von Teilchen, insbesondere die Baryonen, einen Erhaltungssatz erfüllen. Aus einem baryonenfreien Zustand lässt sich daher nur ein Zustand erzeugen, der gleich viel Baryonen und Antibaryonen enthält. Wenn also der Kosmos unmittelbar nach dem sog. *big bang* noch keine Baryonen enthielt, sondern insbesondere Energie in einer uns noch nicht näher bekannten Form und Energiedichte, warum sind dann danach nicht eine exakt identische Anzahl von Baryonen und Antibaryonen entstanden? Offensichtlich besteht das heutige Universum fast ausschließlich aus Materie und nicht etwa zu gleichen Anteilen aus Materie und Antimaterie. Wenn wir uns bei der Erklärung dieses Faktums damit heraus reden, dass wir diese Materie als den Rest interpretieren, der nach den erneut einsetzenden Zerstrahlungsreaktionen zwischen Materie und Antimaterie übrig geblieben ist, dann müssen wir dennoch annehmen, dass in der frühen Phase der Entwicklung des Kosmos sich die Baryonen und die ihnen entsprechenden Antibaryonen zu leicht ungleichen Anteilen gebildet haben. Gibt es hierfür eine schlüssige Theorie?

Mit dieser Frage hat sich u.a. Andrej Sacharow bereits in den 1960-er Jahren auseinandergesetzt. Er formulierte 3 notwendige Bedingungen für die Bildung ungleicher Anteile von Materie und Antimaterie ([43]):

1. Kurz nach dem Urknall befand sich die Materie in einem Zustand extremen thermodynamischen Nicht-Gleichgewichts;
2. Es gilt die sog. CP-Verletzung(XXX: Bezug nennen);
3. Es gilt die Verletzung der Baryonenzahl-Erhaltung.

(XXX: Der weitere, eigentliche Text des Abschnitts *Die Unsymmetrie von Materie und Antimaterie* ist noch nicht verfügbar. In ihm wird auch die nachfolgende Textpassage aufgehen:)

Die Schlussfolgerung aus diesen Überlegungen lautet:

Die 3. Sacharov-sche Forderung nach einer (ausreichend wirksamen) Verletzung der Baryonenzahl-Erhaltung ist im Rahmen des aktuell (2014) akzeptierten sog. Standardmodells der Elementarteilchenphysik **nicht erfüllbar**. Es ist also b.a.w. nicht geklärt, warum unser Kosmos ganz überwiegend aus Materie besteht.

10.3.2 Die kosmologische Rotverschiebung (-/-)

(XXX: Der Text des Abschnitts Die Rotverschiebung ist noch nicht verfügbar.)

10.3.3 Die 3 · K-Hintergrundstrahlung (-)

Eine für die Kosmologie fundamentale und (trotzdem) messbare Größe ist die sog. 3 · K-Hintergrundstrahlung: Außer durch die elektromagnetische Strahlung unterschiedlichster Wellenlänge, deren Quellen mit den beobachtbaren Objekten (s. Kapitel 10.2 *Astronomie*) identisch sind, ist das gesamte Weltall mit einer quasithermischen elektromagnetischen Strahlung erfüllt, als deren zugeordnete mittlere Temperatur heute der Wert

$$T_{bg} = (2,728 \pm 0,002) \cdot K \quad (10.383)$$

als korrekt angesehen wird. (Der Index *bg* steht für **background** (engl.) der Hintergrund.) Die zum Intensitätsmaximum dieser Strahlung gehörende Wellenlänge beträgt (s. Gl.-en 8.468 und 8.469)

$$\lambda_{\max} = \frac{2,8979 \cdot mm \cdot K}{T} = 1,06 \cdot mm \quad (10.384)$$

Sie liegt also im Bereich der *Mikrowellenstrahlung* (s. Absatz S. 614). Bei genauerer Betrachtung ist diese Strahlung nicht vollständig gleichmäßig über die räumlichen Winkel gleichverteilt. Die Struktur ihrer Temperaturverteilung zeigt die Abb. 109. Diese Abb. ist das Ergebnis der Datenaufnahme durch die Raumsonde Planck während der ersten 15,5 Monate ihres regulären Messbetriebs. Bei der graphischen Gestaltung der Abb. 109 wurde eine 2-stufige Projektion des primären Datensatzes angewendet, die den gesamten Kosmos in die in der Abb. 109 wiedergegebene Ellipse abbildet. In einem 1. Schritt wurden alle Messpunkte auf die sog. Himmelskugel projiziert (s. Absatz S. 210). Danach wurde diese Himmelskugel durch eine flächentreue

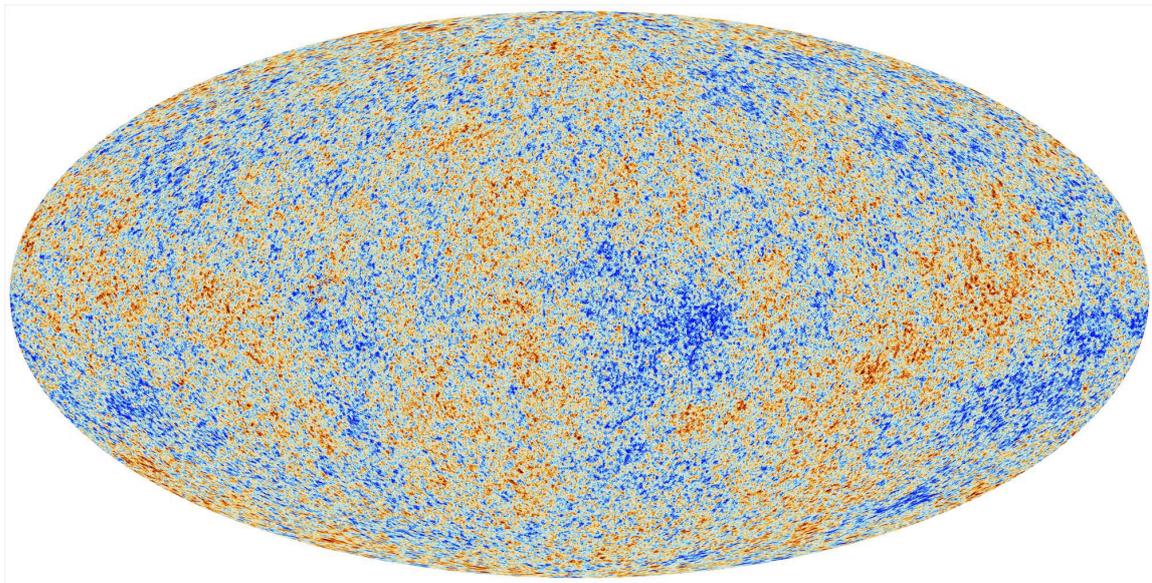


Abb. 109 Farbcodierte Temperaturverteilung der kosmischen Hintergrundstrahlung, aufgenommen 2013 von der ESA-Sonde Planck
(Credit: ESA/Planck Colaboration)

und lokal winkeltreue Transformation in die o.a. Ellipse projiziert. Äquator und Mittelmeridian sind maßstabsgerecht. Die übrigen Meridiane sind dagegen zum Rand hin zunehmend verzerrt. Breitenkreise werden als Geraden, Meridiane als Ellipsen wiedergegeben. Diese Transformation wird als *Mollweide-Projektion* bezeichnet, in einer noch besser winkeltreuen Variante als *Hammer-Aitov-Transformation*. In der Abb. 109 entspricht die Horizontalachse der Ebene unserer Milchstraße. Die Signale von näher gelegenen Sternen und Galaxien (insbesondere die unserer Milchstraße) wurden über eine Multifrequenzanalyse rechnerisch eliminiert. Diese Raumwinkelverteilung der Strahlungstemperatur gibt, wie wir heute wissen, Auskünfte über die Struktur des Kosmos zu einer sehr frühen Phase seiner Entwicklung.

Entdeckt wurde diese Strahlung eher zufällig durch den deutsch-amerikanischen Astrophysiker *Arno Allan Penzias* (* 1933 in München; heute Holmdel/NJ(USA)) und den amerikanischen Astrophysiker *Robert Woodrow Wilson* (* 1936 in Houston/Tex(USA); heute ebenda) 1964 an den Bell Laboratories in Crawford Hill/NJ (USA) während der Kalibrierung von Antennen der Radio-Astronomie (s. auch Abschnitt 10.2.4). Diese Arbeiten wurden durch "Störsignale" beeinträchtigt, die sich nicht beseitigen ließen, und die bei genauerer Analyse eine wohl definierte Abhängigkeit von den kosmischen Raumrichtungen zeigten. Für diese Entdeckung erhielten sie 1978 2/3 des Nobelpreises für Physik.

Die kosmologische Forschung deutet dieses Messergebnis wie folgt: Nach Abschluss der ersten Phase der Entwicklung des Kosmos bestand dieser aus einem extrem

heißen Plasma aus vollständig ionisierten Atomkernen (ganz überwiegend Wasserstoff H_1^1 , H_1^2 sowie Spuren von Li) und einem die elektrische Neutralität herstellenden Elektronengas. Ein derartiges Plasma ist für einen extrem weiten Bereich der elektromagnetischen Strahlung stark absorbierend, so dass es sich bereits auf kleinen Abmessungen im lokalen thermodynamischen Gleichgewicht befand. Sobald nun im Zuge der weiteren Expansion des Kosmos die mittlere Temperatur dieses Plasmas unter $3 \cdot 10^3 \cdot K$ sank, bildeten sich neutrale Wasserstoffatome, das Plasma brach in sich zusammen und der Kosmos wurde für sichtbare und Infrarotstrahlung transparent. Die kosmologische Forschung datiert heute (2013) diesen Übergang auf den Zeitpunkt

$$\Theta_{\text{neutral}} = 3,8 \cdot 10^5 \cdot y \quad (10.385)$$

nach dem Nullpunkt der kosmologischen Zeitskala, dem *big bang* (s. Absatz S. 1395). Wir benötigen an dieser Stelle eine Kennzeichnung der *absoluten kosmologischen Zeitskala*, die mit dem Ereignis des sog. *Urknalls* beginnt und danach vorzugsweise dieselbe Skalierung aufweist wie die Zeit, die wir für die Beschreibung eines beliebigen anderen dynamischen Prozesses verwenden. Nach meiner Kenntnis gibt es hierfür in der Literatur bisher keine einheitliche Art der Kennzeichnung. Ich habe mich entschieden, für diese absolute kosmologische Zeit den Buchstaben Θ zu verwenden. Falls es angebracht erscheint zu präzisieren, dass diese Zeit von dem Urknall ab zu zählen ist, werde ich den Index *kosmo* ergänzen und diese Zeit als $\Theta^{(\text{kosmo})}$ schreiben. Andere absolute Zeitskalen lassen sich analog definieren und kennzeichnen. Zur Beschreibung der Vorgänge in unserem Planetensystem ist es z.B. hilfreich, eine absolute Zeitskala $\Theta^{(\odot)}$ einzuführen, als deren Nullpunkt ein bestimmter, wohl definierter Zustand während der Bildung unserer Sonne gewählt wird.

Von diesem kosmologischen Zeitpunkt Θ_{neutral} an konnte sich die Temperaturstrahlung, die von den im Kosmos vorhandenen Materieansammlungen ausging, ungehindert in alle Richtungen des (frühen) Kosmos ausbreiten. Der heute an unseren Messsystemen ankommende Anteil dieser Strahlung hat daher einen Weg zurückgelegt, der in guter Näherung dem heutigen Durchmesser des (von uns beobachtbaren) Weltalls entspricht. Entsprechend groß ist die Rotverschiebung, die das Licht auf diesem Weg erleidet. Der auf der Basis des Messergebnisses (Gl. 10.383) resultierende Wert (XXX: präzisieren) kann als Referenzpunkt dienen für die Prüfung von Theorien der zeitlichen Entwicklung des frühen Kosmos.

Die gemessenen lokalen Unterschiede in der Temperatur des CMB entsprechen einer Temperaturverteilung in der Materie des frühen Kosmos mit entsprechend höheren Absolutwerten und lokalen Schwankungen. Zum in der Gl. 10.385 angegeben Zeitpunkt lagen diese Werte in der Größenordnung $3000 \cdot K$. Da zu dieser Phase der Entwicklung die chemische Struktur der Materie im Kosmos weitgehend einheitlich war (s.o.), können wir die gemessene Temperaturverteilung qualitativ mit der Massendichteverteilung gleichsetzen. Wir dürfen daher davon ausgehen, dass die hierin erkennbaren Bereiche stark erhöhter Massendichte identisch sind mit den Bereichen, in denen im weiteren Verlauf der kosmologischen Entwicklung die ersten

Galaxien und Sterne entstanden. Es lassen sich nun eine Reihe von Effekten benennen, die zu lokalen Temperaturschwankungen führen. Deren Amplitude und Ortsfrequenz wiederum ist mit anderen physikalischen Kenndaten verknüpft. So führt z.B. jede erhöhte Massendichte zu einer gravitativ bedingten Rotverschiebung des von dieser Region ausgesandten Lichtes. Auf diese Weise lässt sich ein Modell der zeitlichen Entwicklung des Kosmos erstellen, für dessen Berechnung die Zahlenwerte einer endlichen Anzahl von physikalischen Parametern des Kosmos benötigt werden. Wenn man nun diese Parameter dahin gehend variiert, dass die Modellrechnung die gemessene CMB-Strahlung optimal reproduziert, kann man dieses Ergebnis als eine "Messung" der kosmologischen Modellparameter interpretieren. Dieses Konzept entspricht der aktuellen Vorgehensweise bei der Interpretation der CMB-Messdaten. Ein aktuell bevorzugtes Modell ist das sog. Λ CDM-Modell (**L**ambda-**C**old-**D**ark-**M**atter). In ihm wird die Entwicklung des frühen Universums durch 6 Zahlen beschrieben. Unter Verwendung der aktuell besten CMB-Daten führte das zu folgenden Ergebnissen: Der integrale relative Anteil der verschiedenen Arten von Masse(Energie) im Kosmos beträgt

Anteil an dunkler Energie:	0,683	(10.386)
Anteil an dunkler Materie:	0,268	(10.387)
Anteil an baryonischer Materie:	0,049	(10.388)

Die enorme wissenschaftliche Bedeutung, die einer präziseren Kenntnis dieser kosmischen Hintergrundstrahlung beigemessen wurde, führte dazu, dass insgesamt 3 Raumsonden speziell für diese Aufgabe konzipiert und erfolgreich auf ihre vorgesehene Bahn im Weltraum gebracht wurden, nämlich:

1. Die NASA-Sonde COBE (**c**osmic **b**ackground **e**xplorer), die in den Jahren 1989 bis 1993 erfolgreich ihre Aufgabe erfüllte. Für die wissenschaftliche Betreuung dieses Projektes erhielten *John Cromwell Mather* (* 1946 in Roanoke/Virg. (USA); zuletzt Goddard Space Flight Center der NASA in Greenbelt/Maryland (USA)) und *George Fitzgerald Smoot* (* 1945 in Ykon/Florida (USA); zuletzt Lawrence Berkeley Lab.) den Nobelpreis für Physik 2006.
2. Die NASA-Sonde WMAP (**W**ilkinson **M**icrowave **A**nisotropy **P**robe), deren Entwicklung maßgeblich auf den mit COBE gewonnenen Erfahrungen aufbaute. Als ihre stationäre Bahn wurde der Lagrangepunkt L_2 (s. Absatz S. 465) des Systems Sonne/Erde ausgewählt. Sie führte in den Jahren 2001 bis 2010 ihre Messungen durch. Ihren Namen erhielt sie zu Ehren von *David Todd Wilkinson* (* 1935 in Hillsdale/Mich.; † 2002 in Princetown/NJ als em. Prof. der Princetown University). Das Messsystem dieser Sonde erreichte einer Auflösung von

$$\delta T \sim 10^{-6} \cdot K \quad (10.389)$$

3. Die ESA-Sonde *Planck*, die eine nochmals gesteigerte Genauigkeit und Winkelauflösung bei der Messung des CMB erreicht. Sie startete im Mai 2009, erreichte den Lagrangepunkt L_2 des Systems Sonne/Erde im Juli 2009 und begann ihre Messungen im Februar 2010. Zusätzlich zur Messung des CMB führt diese Sonde noch eine Reihe weiterer astronomischer und kosmologischer (XXX: präzisieren) Messungen durch. Wegen Erschöpfung des Treibstoffs wurde sie am 23.10.2013 abgeschaltet.

Die Abb. 109 stellt somit die aktuell (03.2013) genaueste und am höchsten aufgelöste Aufnahme des CMB dar. Bei einer sorgfältigen Analyse dieser Daten, die insbesondere die Störungen durch näher gelegene Strahlungsquellen optimal berücksichtigte, erhärtete sich die Existenz 2-er Auffälligkeiten:

1. Es lässt sich eine Einteilung des Kosmos in 2 Hemisphären finden, in der diese beiden Hemisphären offensichtlich nicht statistisch identisch sind.
2. Es lässt sich ein *dunkler Fleck* angeben, also ein Bereich lokal reduzierter Strahlungsintensität.

Für beide Auffälligkeiten gibt es aktuell (2013) und im Rahmen heutiger Theorien und Simulationsrechnungen keine plausible Erklärung.

(XXX: Der weitere Text des Abschnitts *Die 3 · K-Hintergrundstrahlung* ist noch nicht verfügbar.)

10.3.4 Die Raum-Zeit-Entwicklung des Kosmos (-)

Wie schon des öfteren in diesem Buch beginne ich auch diesen Abschnitt mit einer Frage, die zunächst trivial klingt, bei weiterem Nachdenken aber ihrer Trivialität vollständig beraubt wird. Im hier behandelten Fall führt sie unmittelbar zu der Erkenntnis, dass wir unser intuitiv in uns vorhandenes Modell von der *Welt als ganzem* von Grund auf überdenken müssen. Die Frage lautet:

Warum ist es nachts dunkel?

Zur Beantwortung dieser Frage verwenden wir ein einfaches, aber sehr plausibel klingendes *kosmologisches Modell*:

Der Kosmos ist über ausreichend große Volumina gemittelt isotrop.

Also ist auch die Stern-Volumenkonzentration im gesamten Kosmos annähernd konstant und ebenso die mittlere spezifische Ausstrahlungsdichte L dieses Sternkollektivs, also die Energieabstrahlung pro Raumwinkel und Senderfläche. (Zur Definition der an dieser Stelle benutzten strahlungsphysikalischen Größen s. Kapitel 11.7). Wir wollen nun den aus einem Raumwinkelbereich $\Delta\Omega$ auf die Erde fallenden Gesamtstrahlungsenergiestrom aller Sterne berechnen. Ohne besondere Vorsicht

kommt man zu folgendem Ansatz für den Beitrag des in einem Abstand r von Erde befindlichen Volumenelementes:

$$\Delta I = \Delta\Omega \cdot r^2 \cdot dr \cdot \frac{L}{r^2} = \Delta\Omega \cdot L \cdot dr \quad (10.390)$$

Dieser Ansatz ist jedoch offensichtlich falsch, denn er führt bereits bei der Integration über den Abstand r zu einem divergierenden Wert für den Strahlungsbeitrag von $\Delta\Omega$. Daher berücksichtigen wir nun in einem verbesserten Ansatz die gegenseitige Abschattung der Sterne aus der Sicht der Erde. Dann aber sehen wir die Hemisphäre flächendeckend mit Sternen gefüllt, wobei die spezifische Einstrahlungsdichte, also der auf der Erdoberfläche pro Flächeneinheit und Raumwinkel eintreffende Strahlungsstrom, für alle Einstrahlungswinkel die gleiche ist. Und der Zahlenwert entspricht in etwa dem unserer Sonne. M.a.W. auf Basis unseres sehr plausiblen kosmologischen Modells folgern wir, dass die gesamte Hemisphäre (also sowohl der Taghimmel als auch der Nachthimmel !) mit derselben Helligkeit strahlt wie die Sonne, eine Aussage, die offensichtlich nicht unserer Erfahrung entspricht! Vielmehr ist die von der Erdoberfläche aus detektierte Leuchtdichte der Sonne etwa um den Faktor 10^{10} größer als die des mondlosen klaren Nachthimmels. Also **muss** das oben definierte kosmologische Modell **falsch** sein, und zwar von Grund auf.

Ich werde auf die Beantwortung der Frage, warum es nachts dennoch dunkel ist, am Ende dieses Abschnitts zurückkommen.

Die Expansion des Weltalls (-)

Den wichtigsten Anstoß zur Entwicklung der modernen Kosmologie gab der bereits im Absatz 3.2.9 diskutierte Effekt der *Rotverschiebung* von schmalbandigen Absorptionslinien, die auch im Sonnenlicht enthalten ist, das wir von unserer Sonne empfangen: Bereits 1917 entdeckte der Astronom *Vesto Melvin Slipher* (* 1875 in Mulburry/In.(USA); † 1969 in Flagstaff/Ar.(USA)) ([10]), dass bei allen Galaxien die in ihrer optischen Strahlung enthaltenen Absorptionslinien eine Rotverschiebung zeigen. Durch Verknüpfung dieses Ergebnisses mit einer Abschätzung der jeweiligen Entfernung dieser Objekte von unserem Sonnensystem kam der Astronom *Edwin Powell Hubble* (* 1889 in Marshfield/Montana(USA); † 1953 in San Marino/Cal.(USA)) im Jahr 1929 zu der wichtigen Erkenntnis, dass diese Rotverschiebung mit der Entfernung der Galaxie linear ansteigt. Hieraus folgt zwangsläufig eine linear mit der Entfernung wachsende Fluchtgeschwindigkeit **sämtlicher Galaxien relativ zur Erde**. Wenn wir nun von unserem am Anfang dieses Abschnitts formulierten kosmologischen Modell wenigstens die Annahme übernehmen, dass die Position unserer Sonne innerhalb des Kosmos als in keiner Weise ausgezeichnet anzusehen ist, schließen wir daraus, dass von **jedem beliebigen Punkt** im Kosmos aus betrachtet sich **sämtliche Galaxien** von diesem Bezugspunkt mit linear mit der Entfernung zu diesem Punkt wachsender Geschwindigkeit entfernen. Dies ist das Konzept des **expandierenden Weltalls**. Diese Hypothese des expandierenden Weltalls stellte 1927 der belgische Physiker und

Priester *Georges Lemaître* (* 1894 in Charleroi/Belgien; † 1966 in Louvain (fläm. Leuven)/Belgien) auf ([32] aus dem Heft 3).

Die geschilderte Situation erinnert an die auf der Oberfläche einer *expandierenden Kugel*: Jeder Punkt auf der Kugeloberfläche ist gleichwertig, und jeder andere Punkt entfernt sich von diesem mit einer Geschwindigkeit, die linear mit der Entfernung zwischen den beiden Punkten zunimmt. Zur Definition der Entfernung 2-er auf der Kugeloberfläche liegender Punkte P_1 und P_2 bestimmt man den durch diese beiden Punkte gehenden (und eindeutig definierten) Großkreis. Den durch die Punkte P_1 und P_2 und den Mittelpunkt der Kugel gebildeten Winkel bezeichnen wir mit α . Die gesuchte Entfernung ist dann die Länge des dabei gebildeten, die beiden Punkte verbindenden Bogens,

$$d(P_1; P_2) = R \cdot \alpha \quad (10.391)$$

wenn R der Kugelradius ist. Sobald sich nun der Radius dieser Kugel mit der Zeit ändert, ändert sich $d(P_1; P_2)$ gemäss

$$\frac{\partial}{\partial t} (d(P_1; P_2)) = \frac{\partial R}{\partial t} \cdot \alpha = \frac{\partial R}{\partial t} \cdot \frac{d(P_1; P_2)}{R} \quad (10.392)$$

Die sog. Fluchtgeschwindigkeit des Punktes P_2 von dem Bezugspunkt P_1 ist also proportional zur aktuellen Entfernung des Objektes P_2 von P_1 .

Sobald man nun diese aus experimentellen Fakten geschlossene Deutung akzeptiert hatte, stand man vor einigen neuen fundamentalen Fragen:

1. Ist diese Expansionsgeschwindigkeit $\frac{\partial R}{\partial t}$ des Weltalls zeitlich konstant ?
2. Falls diese Expansionsgeschwindigkeit zumindest annähernd konstant ist, insbesondere nicht ihr Vorzeichen wechseln kann, gab es dann einen Zeitpunkt t_0 , bei dem galt:

$$R(t_0) \approx 0 \quad (10.393)$$

In einem derartigen Zustand wäre die im Kosmos enthaltene Energie auf ein endliches, vergleichsweise kleines Volumen konzentriert, die Energiedichte würde daher extreme Werte annehmen, so dass der dann vorliegende Zustand in keiner Weise vergleichbar wäre mit **allen** bisher diskutierten physikalischen Zuständen. Diese Fragestellung ist der Ausgangspunkt gewesen zur Formulierung der sog. *Urknall-Hypothese*.

3. (XXX: Der die weiteren fundamentalen Fragen aufwerfende Text ist noch nicht verfügbar.)

(XXX: Der weitere, eigentliche Text des Abschnitts *Die Raum-Zeit-Entwicklung des Kosmos* ist noch nicht verfügbar. In ihm werden auch die nachfolgend aufgeführten Textpassagen aufgehen:)

Ein bei der Diskussion kosmologischer Fragestellungen häufig benutzter Begriff ist der des (von uns) *beobachtbaren* oder (für uns) *sichtbaren Universums*. Dahinter

verbirgt sich absolut nichts neues: Damit wir ein Objekt sehen, also auf Grund der von ihm emittierten elektromagnetischen Strahlung als existent feststellen können, muss diese Strahlung (aus unserer Sichtweise) zu einem Zeitpunkt Θ_1 emittiert worden sein, der von der aktuellen Zeit aus gesehen noch **vor** dem Nullpunkt der absoluten kosmologischen Zeitskala liegt, s. Abschnitt 10.3.3:

$$\Theta_1 > 0 \quad (10.394)$$

Dann steht der Strahlung eine Zeit von

$$\Delta t = \mathbb{A}_{\text{Kosmos}} - \Theta_1 \quad (10.395)$$

zur Verfügung, um von seiner Quelle bis zu uns zu gelangen. Während dieser Zeit legt sie die Strecke

$$\Delta r = \Delta t \cdot c_0 = (\mathbb{A}_{\text{Kosmos}} - \Theta_1) \cdot c_0 < \mathbb{A}_{\text{Kosmos}} \cdot c_0 \quad (10.396)$$

zurück. Der Radius des beobachtbaren Universums beträgt also

$$R = \mathbb{A}_{\text{Kosmos}} \cdot c_0 \quad (10.397)$$

Einen experimentell gesicherten Fixpunkt für die Kalibrierung der zeitlichen Entwicklung des Kosmos liefert die Entdeckung einer extrem fernen Galaxie durch das HST. Ihre Entfernung wurde zu

$$\Delta r = 1,3 \cdot 10^{10} \cdot L_j$$

Hieraus ergibt sich (auf Basis der ART) ein Alter der Galaxie von

$$\mathbb{A} = 5 \cdot 10^8 \cdot y$$

Historisch betrachtet findet man die Idee von der unendlichen Ausdehnung des Weltalls erstmals in den Schriften des italienischen Priesters, Philosophen und Astronomen *Giordano* (eigtl. Filippo) *Bruno* (* 1548 in Nola/Kampanien (Italien); † 1600 in Rom). Er begründete diese Idee allerdings ausschließlich religions-philosophisch. Wegen dieser Thesen wurde er als Ketzler verbrannt.

Das Konzept eines periodischen Universums wird heute dem amerikanischen theoretischen Physiker *Richard Chase Tolman* (1881 - 1848) zugeschrieben.

Der Urknall (-/-)

Die Hypothese eines nicht stationären, sondern seine räumliche Ausdehnung zeitlich verändernden Universums ist eine unmittelbare Folge der *Allgemeinen Relativitätstheorie (ART)*, s. Absatz S. 288. Die Lösungen der Friedmann-Gleichungen lassen sich in 2 grundsätzlich verschiedene Klassen aufteilen, wobei die Zugehörigkeit zu

Physik ganz klein / ganz gross (-)

einer dieser Klassen durch die Gesamtmasse M_{Kosmos} des Universums festgelegt ist. Gilt

$$M_{\text{Kosmos}} < M_{\text{grenz}} \approx 10^{52} \dots^{54} \cdot kg \quad (10.398)$$

so ergibt sich das sog. *periodische Weltmodell*: Das Universum dehnt sich im Anschluss an seine Startphase (den Urknall) zunächst aus, erreicht ein gewisses Maximalvolumen und kontrahiert danach wieder bis auf ein (im Rahmen dieses einfachen Ansatzes) beliebig kleines Volumen.

Wenn dagegen

$$M_{\text{Kosmos}} > M_{\text{grenz}} \quad (10.399)$$

ergibt sich das sog. *nichtperiodische Weltmodell*: Im Anschluss an den Urknall dehnt sich das Universum ständig und für eine beliebig lange Zeit aus. Jetzt sind aber wieder 3 verschiedene Szenarien denkbar:

1. Die Geschwindigkeit der Ausdehnung des Kosmos ist zeitlich konstant. Diese Annahme stellt einen Grenzfall dar, der wohl nur unter speziellen Gegebenheiten, insbesondere bei einem ganz bestimmten Wert für M_{Kosmos} erfüllt sein kann.
2. Das *asymptotische* Weltmodell: die Geschwindigkeit der Ausdehnung nimmt mit zunehmendem Alter des Kosmos wieder ab. Diese Annahme wurde lange Zeit von den Kosmologen favorisiert.
3. Die Ausdehnung des Kosmos beschleunigt sich mit zunehmendem Alter ständig.

Eine sorgfältige Analyse von Entfernungsmessungen weit entfernter Supernova-Explosionen (s. Absatz S. 1415) in Verbindung mit Messungen der Rotverschiebungen dieser Objekte führte zu dem Schluss, dass nur die obige 3. Annahme mit diesem Messdaten verträglich ist. Das Universum befindet sich demnach in einem Zustand der **ständig beschleunigten Ausdehnung**. Dieses Ergebnis stellt eines der wichtigsten kosmologischen Erkenntnisse der letzten Jahrzehnte dar. Hierfür erhielten die US-amerikanischen Astronomen *Saul Perlmutter* (* 1959 in Champaign-Urbana/Ill; heute Senior Scientist am Lawrence Berkley Lab./Cal.), *Brian Paul Schmidt* (* 14967 in Missoula/Mt; heute Australia Nat. Univ.) und *Adam Guy Riess* (* 1969 in Washington D.C.; heute Prof. der John Hopkins Univ. Baltimore) den Nobelpreis für Physik 2011.

(XXX: Der weitere Text des Absatzes *Der Urknall* ist noch nicht verfügbar. In ihm werden auch die nachfolgende Abb.-en 111 und 110 sowie deren Erläuterungen aufgehen:)

Die thermische Strahlung im Mikrowellenbereich kennzeichnet den seit dem Urknall noch unberührten Bereich in diesem Ausschnitt des Universums. Dieses Supercluster mit der Kennzeichnung SCI 124 bildet die größte kosmische Struktur im für uns erkennbaren Teil des Universums. Es wurde in den 1930-er Jahren von dem

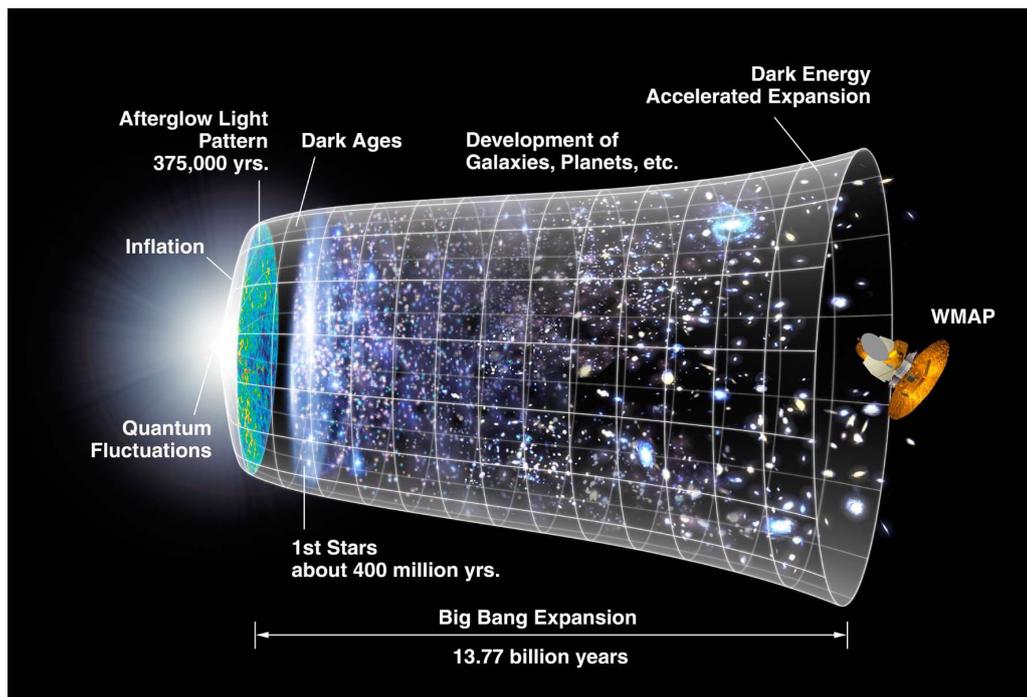


Abb. 110 Darstellung der Entwicklung des Kosmos im Verlauf von $1,377 \cdot 10^{10} \cdot y$ (credit: NASA/WMAP Science Team)

US-amerikanischen Astronomen Harlow Shapley (* 1885 in Nahsville/Ten.; † 1972 in Boulder/Cal.) in der Centaurus-Region entdeckt und später nach ihm benannt. Es ist von uns etwa

$$d(\text{Shapleycluster}) \approx 6,5 \cdot 10^8 \cdot Lj \quad (10.400)$$

entfernt. Man schätzt die Anzahl der in ihm enthaltenen Galaxien auf

$$N_{\text{Galaxien}}(\text{Shapleycluster}) > 8 \cdot 10^3 \quad (10.401)$$

mit einer Gesamtmasse von

$$M(\text{Shapleycluster}) > 10^{16} \cdot M_{\odot} \quad (10.402)$$

10.3.5 Die Bildung der Elemente (-)

(XXX:Der eigentliche Text des Abschnitts *Die Bildung der Elemente* ist noch nicht verfügbar. Er wird auch die nachfolgende Abb. 112 enthalten:) Hiernach bildete sich der Hauptanteil des heute im Kosmos vorhandenen Wasserstoffs und Heliums bereits während der frühen Phase des kosmischen Entwicklung unmittelbar nach dem big bang. Die der Kernladungszahl nach darauf folgenden leichteren Elemente, etwa

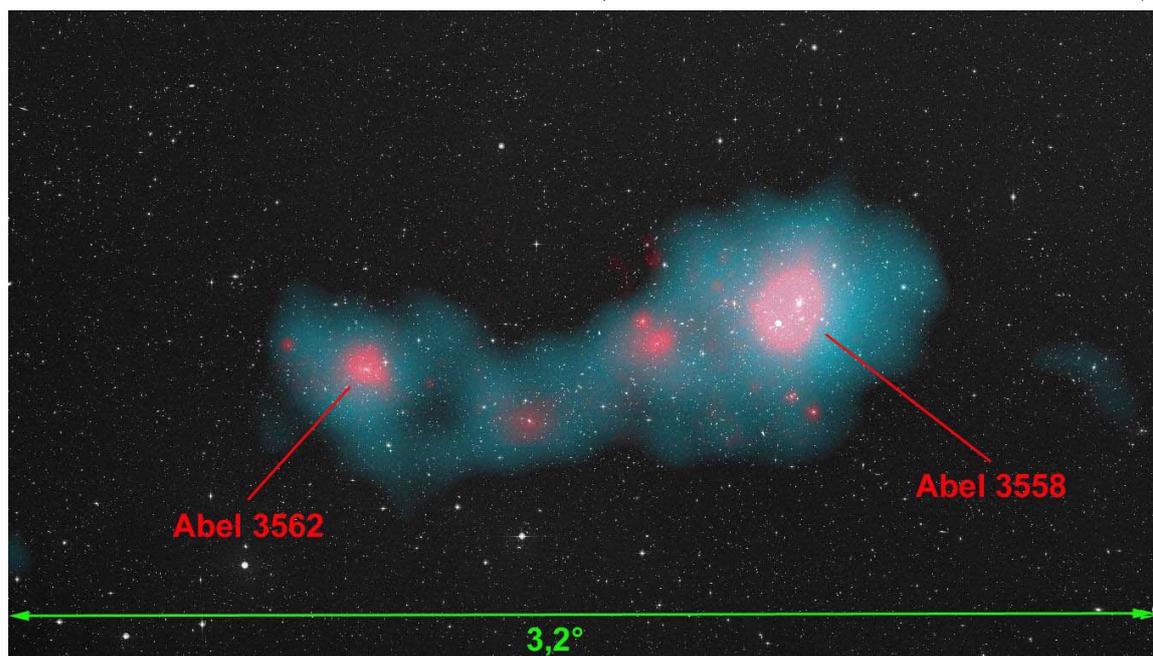


Abb. 111 Zentralbereich des Shapley-Superclusters, darstellt als Überlagerung
 (a) des von der Sonde PLANCK aufgenommenen Mikrowellen-Signals (blau)
 (b) des von der Sonde ROSAT detektierten Röntgenstrahlung (purpur)
 (c) der im sichtbaren Spektrum von der Sonde Digitised Sky Survey detektierten
 Strahlung.
 (credit: ESA & Planck Cooperation / Rosat / Digitized Sky Survey)

bis zum Eisen, bildeten (und bilden sich noch heute) primär (und zu etwas unterschiedlichen Anteilen) in den kleineren und größeren Sternen. Die noch schwereren Elemente entstehen überwiegend während der Supernova-Explosionen. Die dabei auch entstehenden Elemente jenseits von Blei sind alle radioaktiv mit Halbwertszeiten klein gegen das Alter des Universums, so dass sie heute ganz überwiegend bereits wieder zerfallen sind. Man sagt, sie kommen heute nicht natürlich vor.

Eine gewisse Sonderrolle spielen die Elemente *Li*, *Be* und *B*. Sobald sich ein ausreichend intensiver Strom an hochenergetischer sog. *kosmischer Strahlung* gebildet hatte, setzten im gesamten Universum sog. *Spallationsprozesse* ein, durch die eine Vielzahl zusätzlicher Isotope gebildet wurden und weiterhin gebildet werden. Für die oben genannten Elemente *Li*, *Be* und *B* ist die hierfür geltende Bildungsrate derart hoch, dass ein signifikanter Anteil der heute existierenden Menge an diesen Elementen auf diese Weise entstanden ist.

10.3.6 Dunkle Materie und dunkle Energie (-/-)

(XXX: Der eigentliche Text des Abschnitts *Dunkle Materie und dunkle Energie* ist noch nicht verfügbar. Er wird auch die Abb. 113 und den sie erläuternden Text

H																		He						
B																		B						
Li	Be																	C	C	N	O	F	Ne	
C	C																	C	S	S	S	L	S	L
Na	Mg																	Al	Si	P	S	Cl	Ar	
L	L																	L	L	L	S	L	L	
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr							
L	L	L	\$	\$	L	L	\$	\$	\$	L	L	\$	\$	L	\$	\$	\$							
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe							
\$	L	L	L	L	\$	L	\$	\$	\$	\$	\$	\$	\$	\$	\$	\$	\$							
Cs	Ba		Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn							
\$	L		\$	\$	\$	\$	\$	\$	\$	\$	\$	\$	\$	\$	\$	\$	\$							
Fr	Ra																							
\$	\$																							
		La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu								
		L	L	\$	\$	\$	\$	\$	\$	\$	\$	\$	\$	\$	\$	\$								
		Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr								
		\$	\$	\$	\$	\$	\$	M	M	M	M	M	M	M	M	M								

Abb. 112 Hauptquellen für die Bildung der Elemente (Atomkerne)

(Quelle: diese Abb. entstammt der freien Enzyklopädie Wikipedia und unterliegt der Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 Unported; der Autor ist Cmglee)

enthalten. Dann folgt der abschließende Kommentar:)

Man könnte nun versucht sein, dieses Konzept der dunklen Materie lediglich als eine intellektuell umschriebene Formulierung anzusehen für das Unter-den-Teppich-kehren von b.a.w. nicht auflösbaren Widersprüchen. Vielleicht ist es jedoch wesentlich mehr als das. Denn es vervollständigt das Gebäude der Physik in beeindruckender Konsequenz und Systematik: Den bekannten Wechselwirkungen:

- der durch die Gluonen vermittelten *starken* Wechselwirkung;
- der durch die W^{+-} , W^{-} und Z^0 -Bosonen vermittelten *schwachen* Wechselwirkung;
- der durch die Photonen vermittelten *elektromagnetischen* Wechselwirkung;
- der durch die Gravitonen vermittelten *gravitativen* Wechselwirkung

sind jeweils Objekte (Teilchen) zugeordnet, auf die eine oder mehrere dieser Wechselwirkungen einwirken:

- Teilchen mit endlicher *Farbladung* (Quarks) unterliegen der starken Wechselwirkung.
- Teilchen mit endlicher schwacher Ladung unterliegen der schwachen Wechselwirkung.

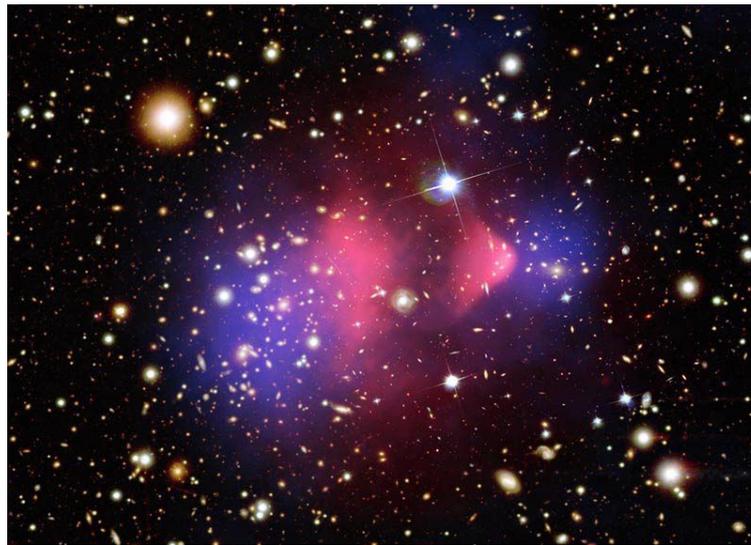


Abb. 113 Überlagerungsaufnahme des Galaxi-Clusters 1E 0657-556
(a) durch Durchdringung der Galaxien im Bereich der normalen Materie entstehende heisse Gase (violett)
(b) optische Aufnahme des Clusters mit dem Hubble-Teleskope (orange/weiss)
(c) aus dem Gravitationslinseneffekt geschlossene Konzentration an dunkler Materie (blau)
(Quelle: <http://hubblesite.org/newscenter>)

- Teilchen mit endlicher *elektrischer Ladung* unterliegen der elektromagnetischen Wechselwirkung.
- Teilchen mit endlicher Energie, also auch endlicher *Masse*, unterliegen der gravitativen Wechselwirkung. Hierzu gehören also insbesondere alle bisher zitierten Teilchen mit endlicher Farbladung und/oder schwacher Ladung und/oder elektrischer Ladung.
- In Fortsetzung dieser Aufzählung unterliegen also Teilchen mit verschwindender Farbladung, schwacher und elektrischer Ladung, aber trotzdem endlicher Masse **nur** der Gravitation. Sie sind hierdurch im Experiment äußerst schwierig nachzuweisen. Wir dürfen sie als mit der dunklen Materie identisch ansehen!

Die Forderung nach einer Form von dunkler Energie impliziert schließlich, dass die Äquivalenz von Energie und Masse nicht in jedem Fall gilt, sondern dass es Objekte (Teilchen) gibt, die wohl eine Energie, aber keine Masse besitzen, also nicht der gravitativen Wechselwirkung unterliegen. Damit stellt sich zumindest nach meiner Einschätzung auch die Frage nach der Äquivalenz von träger und schwerer Masse neu! Diese besondere Form von Energie äußert sich ausschließlich in den aus

der allgemeinen Relativitätstheorie geschlossenen Bewegungsgleichungen des Kosmos. Es liegt auf der Hand anzunehmen, dass diese Teilchen, wenn sie denn überhaupt keiner Wechselwirkung zugänglich sind, sich wie ein ideales Gas verhalten, also im Kosmos gleichmäßig verteilt sind.

10.3.7 Offene Fragen der Kosmologie (-/-)

(XXX: Der Text des Abschnitts *Offene Fragen der Kosmologie* ist noch nicht verfügbar.)

10.4 Elementarteilchenphysik und Kosmologie des täglichen Lebens

(XXX: Der Kopftext des Kapitels *Elementarteilchentheorie und Kosmologie des täglichen Lebens* ist noch nicht verfügbar)

10.4.1 Die kosmische Strahlung und der Sonnenwind (-)

Auf unsere Erde trifft ständig ein aus den Tiefen des Weltalls kommender Teilchenstrom, der allgemein als *kosmische Strahlung* bezeichnet wird. Die Primärteilchen dieser Strahlung sind hochenergetische einfache Teilchen, zu etwa 87% Protonen und zu 12% He_2^4 -Teilchen. Die Energie dieser Teilchen ist über einen extrem weiten Bereich kontinuierlich verteilt. Es wurden schon Teilchen mit einer Energie von $10^{20} \cdot eV$ detektiert. Die energiebezogene Teilchendichte gehorcht etwa einem Exponentialgesetz,

$$n_E \sim E^{-\gamma}; \quad \gamma \sim 3 \quad (10.403)$$

Insgesamt beträgt dieser Teilchenstrom in Erdnähe etwa

$$n \approx 10^3 \cdot \frac{\text{Teilchen}}{m^2 \cdot s} \quad (10.404)$$

Den aktuellen Kenntnisstand über diese Verteilung zeigt die Abb. 114. Hierzu wurden die primären Messdaten mit dem Faktor $E^{2,5}$ multipliziert, d.h. die Abb. zeigt die Abweichung von einem Gesetz gem. der Gl. 10.403 und einem Exponenten von $\gamma = 2,5$. Die verschiedenen experimentellen Anordnungen zur Bestimmung dieser Energieverteilung sind in dieser Abb. mit angegeben. Zur Orientierung über die hierbei auftretenden Teilchenenergien sind auch die von einigen technischen Teilchenbeschleunigern erreichten Teilchenenergien in diese Abb. eingezeichnet.

Insbesondere wegen der in der kosmischen Strahlung - wenn auch in sehr geringer relativer Häufigkeit - auftretenden Teilchen mit extrem hoher Energie ist diese bis heute ein wichtiges Experimentierfeld der Elementarteilchenforscher geblieben.

Diese Primärteilchen erzeugen dann in den oberen Schichten der Erdatmosphäre durch Reaktions-Schauer eine Vielzahl unterschiedlicher hochenergetischer Sekundärteilchen, insbesondere Myonen. Es sind diese Sekundärteilchen, die von den o.a. verschiedenen Messsystemen detektiert werden.

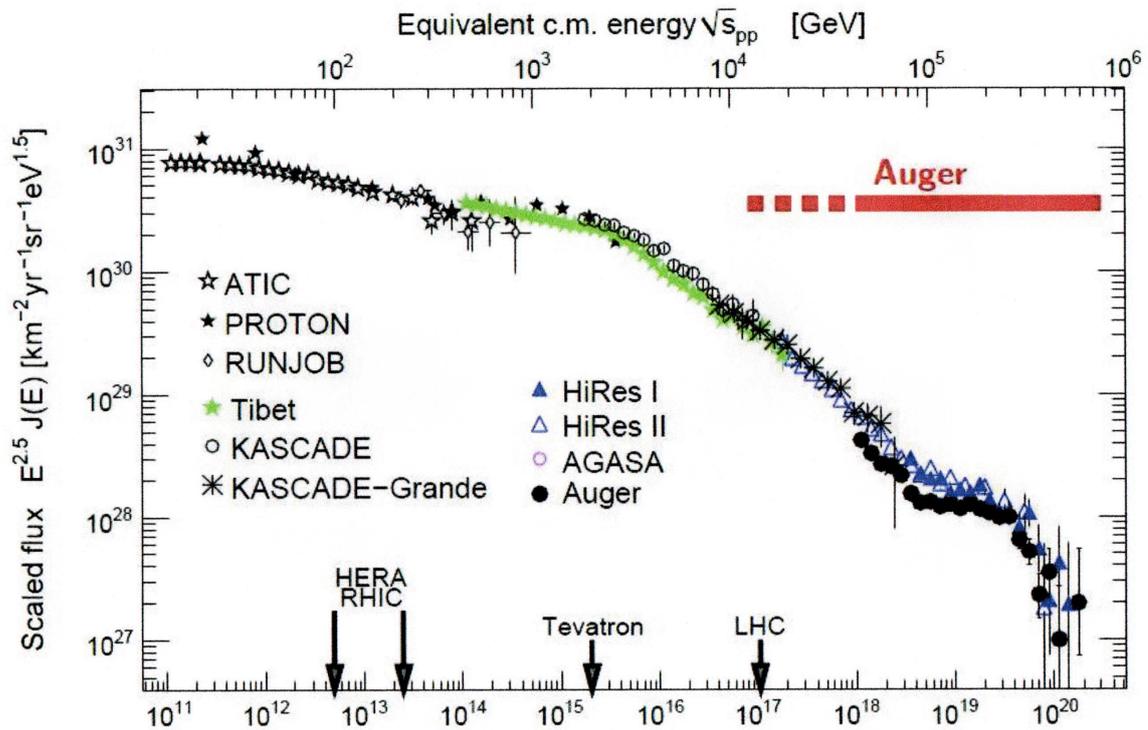


Abb. 114 Experimentell bestimmte Energieverteilung des die Erde erreichenden primären kosmischen Strahlungsstroms (aus [39])

Zu den von der kosmischen Strahlung erzeugten Sekundärteilchen gehören auch Neutronen. Diese entstehen durch Spallationsprozesse mit den Atomen der oberen Erdatmosphäre. Diese hochenergetischen Neutronen sind auch der wichtigste Reaktionspartner für die Bildung des Kohlenstoff-Isotops C^{14} . Bei einem Stoßprozess mit dem in der Erdatmosphäre häufigsten Atomkern N^{14} kommt es mit signifikanter Wahrscheinlichkeit zu dem Prozess



Dieses Isotop C_6^{14} ist instabil. Es zerfällt über die Reaktion



mit einer Halbwertszeit

$$\tau_{1/2} = 5,730 \cdot y \quad (10.407)$$

Über diese beiden Reaktionsmechanismen stellt sich in der Atmosphäre eine Gleichgewichtskonzentration an C_6^{14} ein, die jedoch zeitlich nicht konstant ist, sondern

über erdgeschichtlich längere Zeiträume deutlichen Veränderungen unterliegt. Ursache hierfür sind u.a. Änderungen in der Intensität der kosmischen Strahlung hervorgerufen durch Änderungen des Erd-Magnetfeldes.

(XXX: Der weitere Text des Abschnitts *Die kosmische Strahlung und der Sonnenwind* ist noch nicht verfügbar. In ihn werden auch die folgenden Textpassagen aufgehen:)

Lange Zeit war es völlig unklar, auf welche Weise es der Natur gelingt, Teilchen mit einer derart riesigen Energie bis in die Nähe von $10^{20} \cdot eV$ zu erzeugen. Man spekulierte u.a. über riesige magnetische Strukturen, die auf geladene Teilchen, insbesondere Protonen, die an anderer Stelle mit deutlich niedrigerer Energie erzeugt worden sind, ähnlich wie ein technischer Teilchenbeschleuniger wirken und diese Teilchen nachträglich auf diese Energien anheben. Heute mehren sich die Anzeichen, dass beide Strukturen, die Quelle für die primäre Erzeugung hochenergetischer Protonen und die magnetische Struktur, die diese Teilchen auf nochmals deutliche höhere Energien beschleunigt, in der unmittelbaren Umgebung eines Supernova-Restes (s. Absatz 10.2.5) zu suchen ist. Die primäre Quelle der hochenergetischen Protonen ist danach die Supernova-Explosion selbst. Und die vermutlich magnetischen Strukturen, durch die die Nachbeschleunigung erfolgt, wird durch die Materiewolken gebildet, die durch das Vordringen des Explosionsmaterials in die unmittelbare und weitere Nachbarschaft des explodierten Sterns geformt werden. Der experimentelle Nachweis dieses Ablaufs gelingt auf dem Umweg über die Folgeprozesse, die die hochenergetischen Protonen in diesen Materiewolken erleiden:

Beim Stoß eines hochenergetischen Protons mit einem schwereren Kern (aus der den explodierten Stern umgebenden Molekülwolke, s. Abschnitt 10.2.1) entsteht gelegentlich auch ein ungeladenes Pion, z.B. durch die sog. *Photopionenerzeugung*



Dieses neutrale Pion zerfällt mit einer Halbwertszeit von

$$\tau = 8,5 \cdot 10^{-17} \cdot s \quad (10.409)$$

in ein Photonpaar,



Diese γ -Strahlung liegt in einem typischen Energiebereich

$$50 \cdot MeV < E_\gamma < 10 \cdot GeV \quad (10.411)$$

und breitet sich geradlinig aus. Mit einem geeigneten γ -Spektrometer(XXX: präzisieren) lässt sich diese Strahlung nachweisen und die Richtung angeben, aus der die detektierte Strahlung stammt. Bisher gelang es bei 2 unterschiedlichen Experimenten, eine derartige γ -Strahlung nachzuweisen und zu zeigen, dass als wahrscheinlichste Quelle dieser Strahlung ein bestimmter Supernova-Rest anzusehen ist.

Nicht verwechseln mit der kosmischen Strahlung sollte man den sog. *Sonnenwind*, einen von unserer Sonne ausgehenden Teilchenstrom, der überwiegend aus Protonen, Elektronen und α -Teilchen besteht. Die mittlere Geschwindigkeit dieser Teilchen beträgt

$$300 \cdot \frac{km}{h} < v < 900 \cdot \frac{km}{h} \quad (10.412)$$

und die Gesamt-Teilchendichte beträgt etwa

$$n \approx 5 \cdot 10^6 \cdot \frac{\text{Teilchen}}{m^3} \quad (10.413)$$

Die Protonen in diesem Teilchenstrom haben also eine kinetische Energie der Größenordnung

$$0,3 \cdot 10^{-8} \cdot eV < E_{\text{kin}} < 3 \cdot 10^{-8} \cdot eV \quad (10.414)$$

also eine Energie, die extrem klein ist gegenüber allen Energien, die in den Prozessen der Kern- und Elementarteilchenphysik auftreten. Dieser Teilchenstrom ist keineswegs konstant, sondern eng mit den in der äußeren Schicht der Sonne, der *Korona*, vorherrschenden hochturbulenten Masseströmungen verknüpft, s. Abschnitt 10.2.3. Hierbei

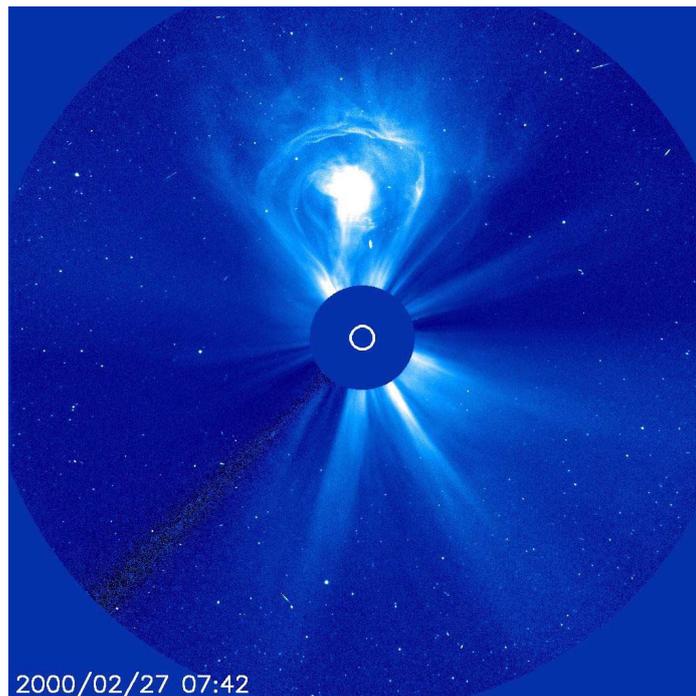


Abb. 115 Eruption von Masseteilchen aus der Korona der Sonne, aufgenommen von der Raumsonde SOHO am 27.02.2000

(Quelle: ESA Space Science; credit: SOHO/LASCO (ESA & NASA))

kommt es immer wieder zu mehr oder weniger starken Eruptionen (engl. *coronal*

mass ejection CME). Die Abb. 115 zeigt eine von der Raumsonde SOHO (**S**olar and **H**eliospheric **O**bservatory) am 27.02.2000 aufgenommene besonders intensive CME. Die Scheibe im Zentrum dieser Abb. ergab sich aus der mechanischen Abdeckung des eigentlichen Sonnenbildes. Diese Vorgehensweise war erforderlich, um eine Überstrahlung des Bilddetektors in diesem Bereich zu verhindern.

Besonders günstige Bedingungen, diesen solaren Teilchenstrom von der Erde aus zu beobachten, bieten sich während einer totalen Sonnenfinsternis (s. Abschnitt 3.5.4).

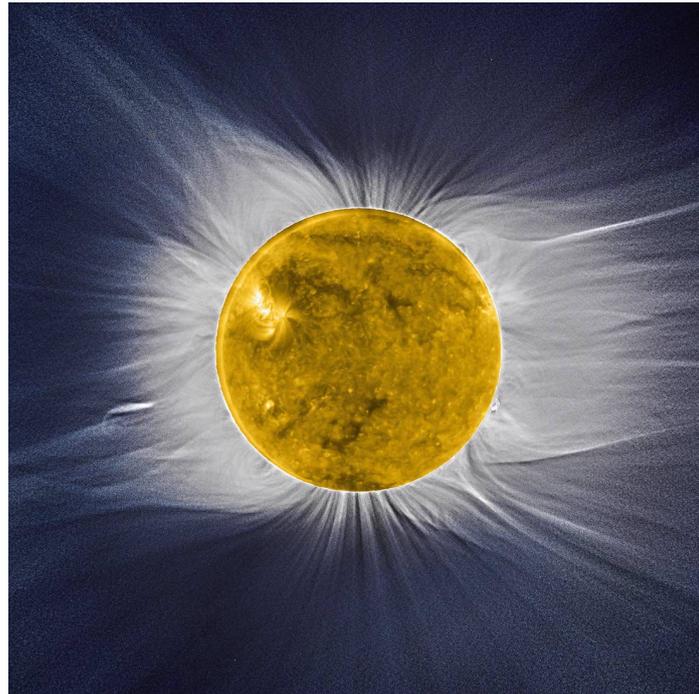


Abb. 116 Helligkeitsverteilung der Sonne, am 18.02.2014 aufgenommen von der ESA-Sonde *Proba-2*, überlagert mit der sonnennahen Verteilung des Sonnenwindes, aufgenommen am 14.01.2005 von der NASA-Sonde *Ulysses* (credit: ESA/NASA/JPL/University of Arizona)

Die Abb. 116 zeigt eine Überlagerung zweier während der Sonnenfinsternis vom Juli 2010 zeitgleich aufgenommener Aufnahmen: Die Aufnahme der Sonnenscheibe mit den aktuellen Details der oberflächennahen Masseströmungen erfolgte durch den ESA-Satelliten *Proba-2* aus einer Erd-Umlaufbahn, die Koronaströmungen wurden aus terrestrischen Aufnahmen übernommen.

Dieser von der Sonne kommende Teilchenstrom wird von dem Erdmagnetfeld stark abgelenkt, so dass er überwiegend die Erdoberfläche nicht erreicht, sondern in der Erdatmosphäre neutralisiert wird. In den Pol-Regionen kann man während der Polarnächte bei geeigneter Wetterlage die Auswirkungen dieser Wechselwirkung als

Leuchterscheinungen beobachten. Diese bezeichnet man als *Polarlichter*, s. Abb.-en 117 und 118.



Abb. 117 Polarlicht über dem Yukon-River nahe Circle/Alaska (USA) (aufgenommen am 15.08.1995 von Dick Hutchinson; Wiedergabe mit freundlicher Genehmigung des Eigentümers; Copyright[®] Dick Hutchinson)

Auf diese Weise ionisierte O_2 -Moleküle erzeugen ein grünliches Leuchten, N_2 -Moleküle ein rotes.

Einen wesentlichen Anteil der heute bekannten Fakten über die Struktur und Zusammensetzung dieses Sonnenwindes verdanken wir der ESA/NASA-Sonde *Ulysses*. Sie wurde am 06.10.1990 gestartet und vollführte einen Vorbeiflug am Jupiter, der so berechnet war, dass die Sonde hierdurch auf eine Umlaufbahn um die Sonne abgelenkt wurde. Diese verläuft über die Pole der Sonne und ist stark elliptisch. Aphel und Perihel dieser Bahn betragen etwa

$$Ah \approx 5,4 \cdot AE ; Ph \approx 1,3 \cdot AE \quad (10.415)$$

Diese Sonde wurde am 30.06.2009 nach 9 Jahren erfolgreicher Forschungsarbeit wegen Treibstoffmangels aufgegeben. Sie erforschte während dieser Zeit die Korona, das Magnetfeld und die Plasmawellen der Sonne, die kosmische Strahlung und den Sonnenwind und zwar jeweils insbesondere im Bereich **über** den Polen der Sonne. Der von der Sonne ausgehende Teilchenstrom wird auch das Ziel sein des von den Aufsichtsgremien der ESA bereits genehmigten *Solar Orbiter* Projektes. Dieser Forschungssatellit wird die Sonne in einer Entfernung von ca. $0,25 \cdot AE$ umkreisen. Der Start ist für Januar 2017 geplant.

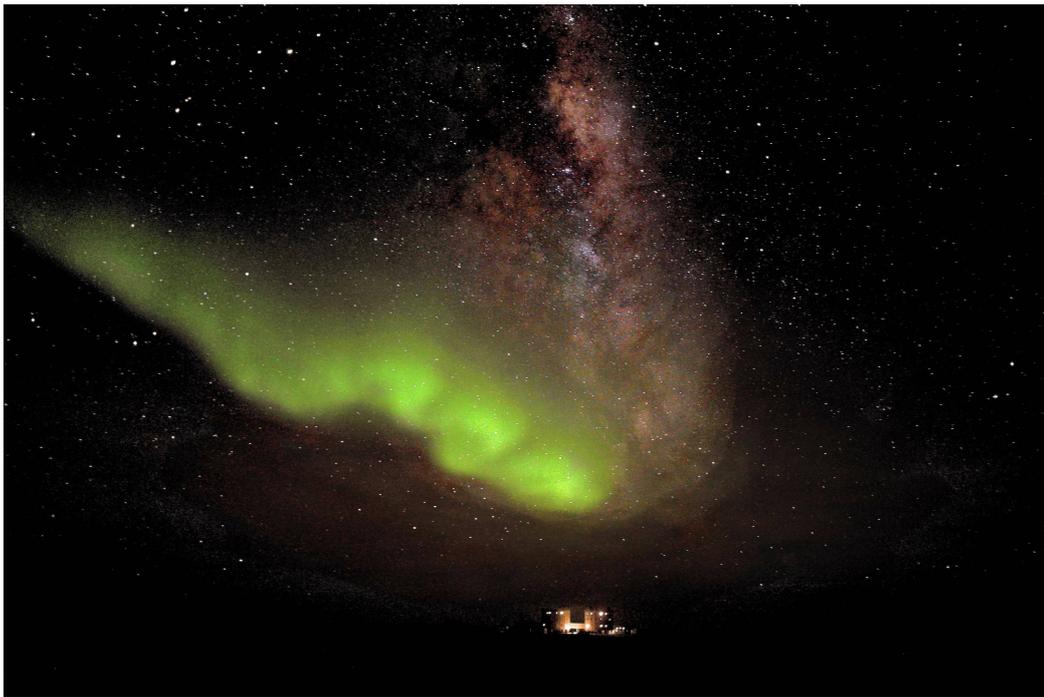


Abb. 118 Polarlicht über dem antarktischen Himmel, aufgenommen am 18.07.2012 nahe der Forschungsstation Concordia (75° S)

(Quelle: www.esa.int; Copyright[®] ESA; Autoren sind Alexander Kuma u. Erick Bondoux)

(XXX: Der weitere Text des Kapitels *Elementarteilchen und Kosmologie des täglichen Lebens* ist noch nicht verfügbar.)

10.5 Messung von Kenndaten der Elementarteilchen (-/-)

(XXX: Der Kopftext zum Kapitel *Messung von Kenndaten der Elementarteilchen* ist noch nicht verfügbar.)

10.5.1 Kanalstrahl-Experimente (-/-)

(XXX: Der Text des Absatzes Kanalstrahl-Experimente ist noch nicht verfügbar.)

10.5.2 Teilchenbeschleuniger (-/-)

(XXX: Der Text des Abschnitts *Teilchenbeschleuniger* ist noch nicht verfügbar. Er wird auch die nachfolgende Abb. XXX und den sie erläuternden Text enthalten.)

10.5.3 Teilchendetektoren (-/-)

(XXX: Der Text des Abschnitts *Teilchendetektoren* ist noch nicht verfügbar.)

(XXX: Der weitere Text des Kapitels *Messung von Kenndaten der Elementarteilchen* ist noch nicht verfügbar.)

10.6 Messung astronomischer und kosmologischer Größen (-/-)

(XXX: Der Kopftext zum Kapitel *Messung astronomischer und kosmologischer Größen* ist noch nicht verfügbar. Er wird auch die nachfolgende Textpassage enthalten:)

Bereits im Kopftext zum Kapitel 10.2 (Astronomie) habe ich die fundamentale Bedeutung herausgestellt, die seit einigen Jahren den verschiedenen Raumsonden zukommt, insbesondere wenn es um die Messung astrophysikalischer Daten von Himmelskörpern unserer näheren Nachbarschaft geht. Wegen der großen Zahl an Raumsonden, die ihre Mission schon beendet haben, oder sich gerade in ihrer aktiven Phase befinden oder in naher Zukunft in diese eintreten werden, habe ich mich entschlossen, diese nicht innerhalb dieses Kapitels 10.6 zu behandeln sondern jeweils innerhalb des Abschnitts oder Absatzes, der das hauptsächliche Ziel der jeweiligen Sonde behandelt.

10.6.1 Terrestische Teleskope (-/-)

(XXX: Der Text des Abschnitts *Terrestische Teleskope* ist noch nicht verfügbar. In ihm wird auch der nachfolgende Text aufgehen:)

Diese Anordnung wird den Namen **E**uropean **E**xtrmly **L**arge **T**elescope (E-ELT) erhalten und auf dem Gipfel des 3064·m hohen Berges Cerro Armazones in der Atacamawüste in Chile aufgebaut werden. Die besondere Eignung dieses Gebietes für im sichtbaren Licht arbeitende Teleskope unterstreicht die ohne zusätzliche Hilfsmittel erstellte, in der Abb. 119 wiedergegebene photographische Aufnahme. Auf ihr ist im Zentrum des aufgenommenen Himmelausschnitts die Milchstraße wiedergegeben und man kann in ihr sogar einige der interstellaren Nebel erkennen. Die einzelnen, sehr feinen hellen Punkte am Nachthimmel sind keine photographischen Artefakte, sondern die Sterne der südlichen Hemisphäre.

Radio-Teleskope (-/-)

(XXX: Der Text des Absatzes *Radio-Teleskope* ist noch nicht verfügbar.)

10.6.2 Weltraum-Teleskope (-)

Einen entscheidenden Beitrag zu der Fülle an neuen experimentellen Befunden, die die astronomische Forschung seit einigen Jahrzehnten überschwemmen, leisten die Weltraum-Teleskope, die die Erde als Satelliten umkreisen. Da bei ihnen alle durch die Erdatmosphäre bedingten Störungen ausgeschaltet sind, erlauben sie nicht nur Aufnahmen im sichtbaren Licht, aber mit deutlich gesteigerter Auflösung. Sie bieten auch die Möglichkeit, in Spektralbereiche vorzudringen, die wegen ihrer starken Wechselwirkung mit der Erdatmosphäre terrestrischen Systemen nicht zugänglich sind.



Abb. 119 Nachtaufnahme des $3064 \cdot m$ hohen Berges Cerro Armazones in der Atacama-Wüste in Chile v. 26.04.2010
(Quelle: diese Abb. basiert auf dem Bild cerro-armazones aus der freien Enzyklopädie Wikipedia und unterliegt den Creative Commons Attributs 3.0; Urheber ist das European Southern Observatory)

Das gilt sowohl für den NIR- und IR-Strahlungsbereich als auch für den Bereich der Röntgenstrahlung.

Ich werde in diesem Abschnitt die bereits arbeitenden Weltraum-Teleskope sowie die für die nahe Zukunft geplanten Systeme stichwortartig beschreiben. Dabei liegt mir primär daran, ihre für die astronomische Forschung entscheidenden messtechnischen Möglichkeiten darzulegen.

Das Hubble-Teleskop (-)

Das Hubble-Teleskop (engl. **Hubble Space Telescope HST**) umkreist die Erde auf einer nahezu kreisförmigen Bahn mit einem Durchmesser von $529 \cdot km$. Die Bahnebene ist gegen den Erd-Äquator um $28,5^\circ$ geneigt. Die Sonde hat eine Masse von $11,1 \cdot t$, der Start erfolgte am 24.04.1990. Das optische System des HST besteht aus 2 hyperbolisch gekrümmten Spiegeln mit den Durchmessern

$$D_1 = 2,4 \cdot m \quad ; \quad D_2 = 0,30 \cdot m \quad (10.416)$$

in einer Ritchey-Chrétien-Cassegrain-Konstruktion (s. Absatz S. 1594). Es hat die Werte

$$f = 57,6 \cdot m \quad ; \quad \frac{f}{D_{eff}} = 22 \quad (10.417)$$



Abb. 120 Das Hubble-Weltraumteleskop HST, aufgenommen am XXX von XXX
(credit: NASA/XXX)

Die mittlere geometrische Abweichung der Spiegeloberflächen von ihrer jeweiligen Sollfläche beträgt

$$\langle \delta z \rangle \approx 0,3 \cdot \mu m \quad (10.418)$$

Die 1. Aufnahme eines astronomischen Objektes gelang am 20.05.1990. Das hierfür ausgewählte Objekt war die Galaxie M 100 / NGC 3532. Sie befindet sich in einer Entfernung von einigen $10^7 \cdot Lj$. Dabei zeigte sich, dass die für das Teleskop vorausberechnete Winkelauflösung bei weitem nicht erreicht wurde, s. Abb. 121. Die Nachforschungen ergaben, dass der Hauptspiegel in Folge eines Produktionsfehlers einen deutlichen Astigmatismus (s. Abschnitt 11.6.2) aufwies. Die Ursache für diesen Produktionsfehler war eine falsche Justierung der für die Kontrolle dieser Spiegeloberflächen eingesetzten Messvorrichtung. Zur Kompensation dieses Fehlers wurde eine Korrekturereinheit mit dem Namen COSTAR (**c**orrective **o**ptics for **s**pace **t**elescope **a**xial **r**eplacement) entwickelt und in der Zeit von 2. bis 13.12.1993 von der Mannschaft des Space-Shuttels *Endeavour* eingebaut. Seitdem liefert das Hubble-Teleskope ständig neue hochaufgelöste Aufnahmen von den unterschiedlichsten Bereichen des Kosmos und von oft atemberaubender Schönheit, s. z.B. die Abb. 11.

Nachfolger des Hubble Telekops wird das *James Webb Space Telescope* (JWST) werden, das von den Organisationen NASA, ESA und Canadian Space Agency gemeinsam finanziert und entwickelt wird. Sein Hauptspiegel hat einen Durchmesser von $6,5 \cdot m$, das optische System ist für Aufnahmen im NIR-Spektralbereich optimiert.

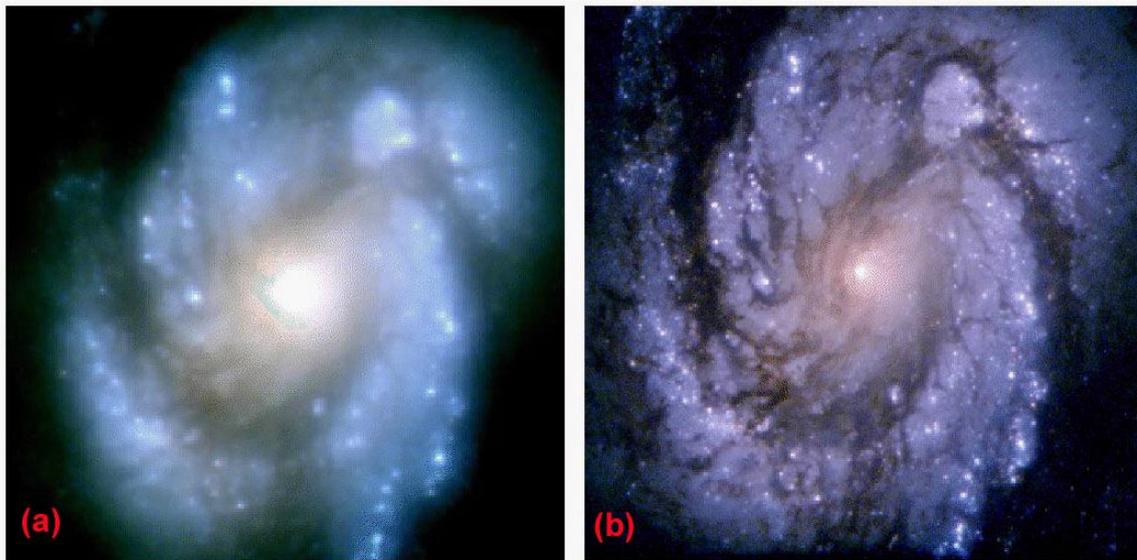


Abb. 121 Aufnahme der Galaxie M 100 / NGC 3532) mit der Wild Field Camera des Hubble Telescopes
 (a) Aufnahme v. 27.11.1993 mit der Ausgangsoptik; (b) Aufnahme v. 31.12.1993 nach Einbau der Korrektur-Einheit
 (credit: NASA/HST)

Der Instrumentenblock besteht aus 4 Instrumenten. Der Start in die Erdumlaufbahn ist für das Jahr 2018 geplant.

Das Herschel-Teleskop (-/-)

(XXX: Der Text des Absatzes *Das Herschel-Teleskop* ist noch nicht verfügbar.)

Das Chandra-Teleskop (-/-)

(XXX: Der Text des Absatzes *Das Chandra-Teleskop* ist noch nicht verfügbar.)

Das Spitzer-Teleskop (-/-)

. - Stichworte -

(XXX: Der Text des Absatzes *Das Spitzer-Teleskop* ist noch nicht verfügbar.)

(XXX: Der weitere Text des Abschnitts *Weltraum-Teleskope* ist noch nicht verfügbar.)

10.6.3 Radio-Astronomie (-/-)

(XXX: Der Text des Abschnitts *Radio-Astronomie* ist noch nicht verfügbar.)

Auf die von Bessel 1838 nach diesem Konzept durchgeführte Messung des Abstandes des Sterns 61-Cygni von unserer Sonne bin ich ebenfalls bereits im Abschnitt 3.4.1 eingegangen.

(XXX: nachfolgenden Text bereinigen)

Nachdem mit diesen grundlegenden Erfolgen in der Längenmesstechnik die Größenordnungen der für unser Planetensystem relevanten Linearabmessungen bekannt waren, bestand die nächste historische Aufgabe in der Messung eines typischen Abstandes zwischen 2 verschiedenen Planetensystemen bzw. zwischen deren Sonnen. Diese Aufgabe gelang erstmals 1838 dem Astronom, Mathematiker und Geodät *Friedrich Wilhelm Bessel* (* 1784 in Minden/Westfalen; † 1846 in Königsberg/Ostpreußen) auf Basis des Parallaxenverfahrens. Er bestimmte mit einem von ihm konzipierten und von der Glaswerkstatt Fraunhofer gefertigten Teleskop die den übrigen Bewegungen des Messobjektes überlagerte jährliche Parallaxenbewegung des Doppelsterns *61 Cygni* im Sternbild Schwan und berechnete daraus die Entfernung dieses Objektes von unserer Sonne zu $10,28 \cdot L_j$. Der aktuell als verlässlich angesehene Wert dieser Entfernung beträgt

$$\Delta r(61\text{Cygni} - \text{Erdsonne}) = 11,4 \cdot L_j \quad (10.420)$$

Mit den Möglichkeiten der Weltraumtechnik wurde es möglich, den Abstand von Sternen mit einer deutlich höheren Genauigkeit zu vermessen, da nun alle von der Erdatmosphäre generierten störenden Effekte ausgeschaltet sind. Die bei der Parallaxenmessung benutzte Basis ist weiterhin von der Größenordnung $2 \cdot AE$. Die erste zu diesem Zweck entwickelte Raumsonde war die ESA-Sonde *Hipparcos*. Dieser Name steht für **H**igh **P**recision **P**arallax **C**ollecting **S**atellite und erinnert an den griechischen Astronomen Hipparcos, der im Zuge seiner wissenschaftlichen Arbeit einen Sternen-Katalog erstellte, in dem die Positionen von 850 Sternen mit einer Genauigkeit von $\pm 1^\circ$ angegeben sind. Die Sonde wurde am 08.08.1989 gestartet und in eine provisorische, noch stark elliptische geostationäre Umlaufbahn um die Erde gebracht. Wegen eines technischen Fehlers gelang es danach nicht, diese Bahn zu einer annähernd kreisförmigen Umlaufbahn zu optimieren. Nach Änderung der Software für die Messdatenerfassung konnte der Messbetrieb trotzdem aufgenommen werden. Die Basislänge dieser Messung war wieder der Durchmesser der Erdbahn um die Sonne von $2 \cdot AE$. Bis zu ihrer Abschaltung 1993 vermaß Hipparcos die Position von

$$1,187 \cdot 10^5 \text{ Sternen mit einer Messgenauigkeit von } \pm 1 \cdot 10^{-3} \text{ ''} \quad (10.421)$$

$$\text{und } 1 \cdot 10^6 \text{ Sternen mit einer Messgenauigkeit von } \pm 0,02 \text{ ''} \quad (10.422)$$

sowie Betrag und Richtung ihrer Eigenbewegung. Alle diese Sterne befinden sich innerhalb unserer Milchstraße und in einer Entfernung von unserer Sonne von

$$d_{\text{Stern}-\odot}^{(\text{Hipp})} < XXX \quad (10.423)$$

1414 Elementarteilchen, Kosmologie:
 Physik ganz klein / ganz gross (-)

Als Nachfolger dieser Sonde wurde am 19.12.2013 die ESA-Sonde GAIA (nach der ursprünglich gewählten Bezeichnung **G**lobal **A**stronomic **I**nterferometer for **A**strophysics) gestartet. Der Name GAIA erinnert an die griechische Göttin Γαία, die Göttin der Erde. Das messtechnische Konzept dieser Sonde wurde im Zuge der Planung verändert, so dass sie jetzt gar kein Interferometer mehr enthält. Den Namen hat man jedoch der Einfachheit halber beibehalten. GAIA befindet sich seit dem 08.01.2014 auf einer stationären Bahn im L2-Punkt des Systems Sonne/Erde (s. Absatz S. 465). Sie soll innerhalb von 5 Jahren die Position und die Eigenbewegung von $\gtrsim 10^9$ Sternen, darunter $\gtrsim 5 \cdot 10^5$ Quasare, aus unserer Milchstraße nach dem Parallaxenverfahren vermessen. Die Basislänge dieses Messsystems wird nur etwa 1% größer sein als die der Hipparcos-Sonde. Der Vorteil dieser ausgewählten Bahn liegt darin, dass nur sporadisch geringfügige Manöver der Kurskorrektur erforderlich sein werden, um die Sonde auf dieser Bahn stabil zu halten. Außerdem befinden sich Erde und Sonne von dieser Bahn aus immer auf sehr nahe bei einander liegenden Winkelpositionen, so dass auch für die Ausrichtung der Solarflügel und der Sendeantenne nur sporadisch geringe Korrekturen nötig sein werden.

GAIA enthält 2 identische abbildende Teleskope, 2 Photometer unterschiedlicher Filterung (blau/rot) und ein Spektrometer zur Messung der Radialgeschwindigkeit der Sterne. Sie soll innerhalb von 5 Jahren von ca.

$$1 \cdot 10^9 \text{ Sterne mit einer Messgenauigkeit von } \pm 24 \cdot 10^{-6} \quad (10.424)$$

die Winkelposition vermessen und von

$$10^9 \text{ Sterne in einem Umkreis von } d_{\text{Stern}-\odot}^{(GAIA)} < 3,3 \cdot 10^4 \cdot Lj \quad (10.425)$$

die Kenndaten Position, Geschwindigkeit, Helligkeit, Farbe und Temperatur bestimmen. Diese Anzahl entspricht etwa 1% der in unserer Milchstrasse enthaltenen Sterne. Wegen der extremen Anforderungen an die Genauigkeit der Winkelmessung muss das Grundgerüst der Sonde eine extreme mechanische Steifigkeit und eine minimale thermische Ausdehnung haben. Es ist komplett aus dem keramischen Werkstoff *SiC* (s. Unterabsatz S. 1758) gefertigt.

Die Tatsache, dass das Parallaxenverfahren schon sehr früh die Grundlage bildete für die Messung astronomischer Entfernungen, ist wohl auch der Grund dafür, dass eine in der Astronomie oft genutzte Längeneinheit auf der Basis dieses Verfahrens definiert ist, nämlich die Einheit parsec:

Definition 187 Die Entfernung, in der ein Objekt der Ausdehnung $1 \cdot AE$ unter einem Winkel von $1''$ erscheint, bezeichnet man als $1 \cdot pc$ (gesprochen Parsec)

Es gilt

$$1 \cdot pc = 3,261 \cdot Lj \quad (10.426)$$

Ich halte diese Begriffsbildung heute für überflüssig, da sie von derselben Größenordnung ist wie das Lichtjahr, und werde sie daher möglichst selten verwenden.

(XXX: Der weitere Text des Abschnitts *Entfernungen* ist noch nicht verfügbar.)

Helligkeitsverfahren (-)

Für Entfernungen, die über den mit dem Parallaxenverfahren erfassbaren Bereich hinausgehen, wird nach Möglichkeit das Helligkeitsverfahren eingesetzt: Man misst die scheinbare Helligkeit eines Sterns, dessen absolute Helligkeit bekannt ist und bestimmt daraus die Entfernung gem.

$$\Delta r = \frac{H_{\text{abs}}}{H_{\text{sch}}} \cdot 10 \cdot pc \quad (10.427)$$

Bei diesem sehr einfachen Konzept stellt sich unmittelbar die Frage:

Wie gelangt der Astronom an einen Satz von Sternen, deren absolute Helligkeit bekannt ist?

Diese Frage beantwortet sich auf Basis der Kenntnisse über die im Absatz S. 1218 behandelten Supernova-Explosionen vom Typ 1a. Auf Grund der physikalischen Besonderheiten dieses Explosionsprozesses zeigt jeder Stern, der diesen Prozess durchläuft, in erster Näherung denselben zeitlichen Verlauf seiner absoluten Helligkeit. Sternexplosionen von diesem Typ können also als sog. *Standardkerzen* der astronomischen Messtechnik dienen.

Damit nun ein möglichst genauer Anschluss dieses Messverfahrens an die mit der Parallaxenmethode bestimmten Entfernungen gelingt, benötigt man Messdaten von Supernova-Explosionen aus möglichst kurzer Entfernung von uns. Derartige Ereignisse sind aber äußerst selten, da dieser Ausschnitt des Universums einem relativ kleinen Volumen entspricht. Die 1572 von Tycho Brahe beobachtete Supernova-Explosion ist vermutlich vom Typ 1a, aber es fehlen natürlich präzise Messwerte seiner maximalen scheinbaren Helligkeit. Nun gelang es aber 2008 einer internationalen Arbeitsgruppe um Oliver Krause vom MPI für Astronomie in Heidelberg, von diesem Ereignis das Echosignal zu detektieren, das von der Staub- und Gaswolke reflektiert wurde, die das Zentrum dieser Supernova-Explosion umgibt ([46]). Durch die spektroskopische Analyse dieses Signals wurde bestätigt, dass es sich bei SN1572 aller Wahrscheinlichkeit nach tatsächlich um eine Supernova vom Typ 1a gehandelt hat.

Insbesondere wegen dieser messtechnischen Notwendigkeit der Verfügbarkeit von Standardkerzen ist das frühzeitige Erkennen und Vermessen möglichst vieler Supernova-Explosionen zu einer wichtigen und aktuellen Aufgabenstellung der astronomischen Forschung geworden. Eine einfache und erfolgreiche Technik zum Auffinden weit entfernter Supernova-Ereignisse besteht in folgendem: Man registriert einen bestimmten Himmelsabschnitt, der so groß gewählt ist, dass er bereits eine Vielzahl von

Galaxien enthält, kurz nach Neumond (wegen des dann reduzierten Streulichtes) und wiederholt dies kurz vor dem nächsten Neumond (≈ 3 Wochen später). Jeder Lichtpunkt im Differenzbild ist dann ein Hinweis darauf, dass an dieser Stelle evtl. gerade eine Supernova entsteht. Bereits 1998 initiierte Saul Perlmutter eine unter dem Namen *Supernova Cosmology Project* gebildete internationale Kooperation, die sich zum Ziel setzte, einige -zig rechtzeitig erkannte Supernova-Explosionen in ihrem zeitlichen Strahlungsverhalten aufzuzeichnen. Später bildeten sich weitere Arbeitsgruppen für dieselbe Zielsetzung, so das *High-Redshift-Supernova-Search Project* unter der Leitung von Brian Schmidt und Adam Riess. Bereits bis Ende 2011 konnten so mehr als 1000 Supernova vermessen werden.

Die mit dieser Methode erzielten Messdaten in Verbindung mit der Messung der Rotverschiebungen gaben den entscheidenden Hinweis auf die Existenz einer Zeitperiode mit einer beschleunigten Ausdehnung des Kosmos.

(XXX: Der weitere Text des Absatzes *Helligkeitsverfahren* ist noch nicht verfügbar.)

10.6.5 Geschwindigkeiten (-/-)

Bei nicht zu weit entfernten Objekten, deren Entfernung noch nach dem Parallaxenverfahren bestimmt werden können, ist auch die Geschwindigkeit dieser Objekte nach demselben Verfahren messbar, einfach indem man unmittelbar die zeitliche Änderung dieser Entfernung bestimmt.

Bei weiter entfernten Objekten bestimmt man deren Geschwindigkeiten unter Ausnutzung des Doppler-Effektes (s. Absatz S. 247). Man analysiert das Spektrum der von diesen Objekten emittierten elektromagnetischen Strahlung und bestimmt die Wellenlängen bestimmter charakteristischer Emissionslinien, z.B. XXX.

(XXX: Der weitere Text des Abschnitts *Geschwindigkeiten* ist noch nicht verfügbar.)

10.6.6 Massenbestimmungen (-/-)

(XXX: Der Text des Abschnitts *Massenbestimmungen* ist noch nicht verfügbar.)

10.6.7 Geometrische Abmessungen (-)

In diesem Abschnitt werden wir Methoden zur Bestimmung der geometrischen Abmessungen eines astronomischen Objektes behandeln, also z.B. seines Volumens oder mittleren Durchmessers. Bei gewissen Objekten kann es zusätzlich von Interesse sein, eine Kenngröße für die Abweichung des Objektes von der Kugelgestalt zu bestimmen.

Um aber überhaupt von der geometrischen Ausdehnung eines astronomischen Objektes sprechen zu können, bedarf es zunächst einer Festlegung bzw. Definition seiner Begrenzung, einer Antwort auf die Frage:

Welche Teile des Universums gehören zu dem betrachteten astronomischen Objekt?

Bei einem sog. Gesteinsplaneten wie der Erde oder dem Mars lautet die allgemein akzeptierte Antwort:

Definition 188 *Das Volumen eines Gesteinsplaneten ist identisch mit dem Volumen, das von seinen festen oder flüssigen Bestandteilen eingenommen wird.*

M.a.W. das von der Atmosphäre eingenommene Volumen wird nicht mehr als zu dem Volumen des Planeten zugehörig gezählt. Damit hat man sich aus der Schwierigkeit befreit zu definieren, bei welcher Höhe über der Erdoberfläche die Atmosphäre per Definition aufhört.

Bei den sog. Gasplaneten wie dem Jupiter oder dem Saturn kann diese Volumen-Definition nicht übernommen werden. Man ist sich wohl heute sicher, dass auch diese Planeten einen Kern aus metallischem Material besitzen sowie einen Mantel aus siliziumhaltigen Gesteinen. Es ist aber offensichtlich wenig sinnvoll, als seine geometrische Ausdehnung lediglich diesen inneren Teil des Planeten zu definieren. Man hat sich weitgehend auf folgende Definition geeinigt:

Definition 189 *Die Oberfläche eines Gasplaneten ist diejenige Kugeloberfläche im Inneren des Planeten, auf der der mittlere Druck $1 \cdot \text{bar}$ beträgt.*

Für diese Definition gibt es letztlich keine aus Naturgesetzen ableitbare Begründung. Sie hat zunächst einmal den Vorteil, dass sie bei Anwendung auf die Erde denselben Wert ergibt wie die 1. Definition. Schon bei der Venus ergibt sich jedoch eine signifikante Verschiebung, sobald man von der einen Definition auf die andere übergeht. Bei den sog. Gasplaneten kann man sicher sein, dass man bei Anwendung dieser Definition bereits den überwiegenden Massenanteil der (unter NB) gasförmigen Bestandteile des Planeten erfasst hat.

Bei selbstleuchtenden Objekten, bei den Sternen also, benutzt man die Eigenschaft der Emission von elektromagnetischer Strahlung zur Definition ihrer Oberfläche:

Definition 190 *Die Oberfläche eines selbst leuchtenden Sterns ist die sog. strahlende Oberfläche, die Fläche also, von der aus der Sicht eines externen Beobachters die Strahlung emittiert wird.*

Diese thermodynamisch wohl definierte Oberfläche lässt sich leicht aus strahlungsoptischen Messdaten abschätzen.

(XXX: Der weitere, eigentliche Text des Abschnitts *Geometrische Abmessungen* ist noch nicht verfügbar.)

10.6.8 Altersbestimmungen (-)

Um überhaupt von dem *Alter* eines Objektes sprechen zu können und von den messtechnischen Möglichkeiten seiner Bestimmung, muss zunächst einmal das Kriterium festgelegt werden, das den Zeitpunkt definiert, ab dem dieses Objekt begann zu *existieren*. Bei nahezu allen Lebewesen gibt es i.a. ein herausragendes Ereignis im Laufe ihrer Existenz, das als deren *Lebensbeginn* definiert werden kann. Bei lebendgebärenden Tieren ist dies die Geburt, bei eierlegenden Tieren das Schlüpfen aus dem Ei. Bei vielen Pflanzen ist diese Festlegung schon etwas schwieriger und damit mit einer gewissen Willkür behaftet. Bei den übrigen Objekten der realen Welt, also z.B. den mineralischen Gesteinen auf der Erde oder auf den anderen Planeten, bei der Erde oder unserem Sonnensystem als ganzem oder gar dem Kosmos insgesamt, ist diese Festlegung meist noch deutlich schwieriger.

Das Alter von selbst leuchtenden Sternen zählt man i.a. ab dem ersten Einsetzen einer Kernfusion. Die daran vorgeschaltete Phase der Akkretion und gravitationsgesteuerten Kontraktion wird demnach noch nicht dem Alter des späteren Sterns zugeschlagen. Allerdings ist sie mit insgesamt etwa $(10^4 \dots 10^5) \cdot y$ bei einer Lebensdauer von $10^7 \cdot y$ für einen massereichen Stern und $10^{10} \cdot y$ für einen unserer Sonne verwandten Stern auch von untergeordneter Bedeutung.

Eine explizite Definition für die Geburtsstunde einer Galaxie habe ich bisher noch nicht in der Literatur gefunden. Naheliegender scheint mir, hierfür das Einsetzen der Kernfusion in einem signifikanten Bruchteil aller Sterne dieser Galaxie zu nehmen.

Terrestische Mineralien, also feste Gesteinsbrocken, wie sie insbesondere in der Erdkruste gefunden werden, sind durch Erstarren von bis dahin noch flüssigem Material aus dem Erdmantel entstanden. Oft hatte das flüssige Material auch eine etwas andere chemische Zusammensetzung als das spätere Gestein. Meist definiert man diesen jüngsten Zeitpunkt, an dem diese Einheit an Gesteinsmaterial vom flüssigen in den festen Aggregatzustand erstarrte, als den Beginn seiner Existenz. Wenn also ein Geologe an einem bestimmten Fundort eine bestimmte Gesteinsschicht untersucht und ihr danach ein Alter von $N \cdot 10^n \cdot y$ zuordnet, meint er experimentelle Beweise dafür gefunden zu haben, dass diese Gesteinsschicht zu dieser Zeit von $N \cdot 10^n \cdot y$ vor der Jetztzeit erstarrte und seitdem nicht mehr erneut aufgeschmolzen gewesen ist.

Eine analoge Vorgehensweise gilt für feste Proben extraterrestrischen Ursprungs, also für Meteorite und Proben von anderen Planeten oder Monden.

Eine in der Literatur weitgehend einheitliche **Kennzeichnung** dieser Messgröße *Alter* ist mir nicht bekannt. Ich habe mich für die Kennzeichnung \mathbb{A} entschieden. Der Leser kann hierbei an das deutsche Wort *Alter* denken, an das englische Wort *age* oder auch an *aetas* (lat.), das *Lebensalter*.

Radiometrische Verfahren der Altersbestimmung (-)

Das Alter von Gesteinen, wie es durch die im Kopftext dieses Abschnitts erläuterte Festlegung wohl definiert ist, bestimmt man heute überwiegend durch *radiometrische*

Verfahren, also durch die Bestimmung des Gehaltes an bestimmten radioaktiven Isotopen in dieser Gesteinsprobe. Voraussetzung für alle diese Verfahren ist, dass in dem Gestein ein chemisches Element (ein Tracer-Element) enthalten ist mit einer Isotopenzusammensetzung, die auch ein radioaktives Isotop einschließt. Um durch die Messung des Konzentrationsverhältnisses dieses Isotops zur Konzentration eines Referenzobjektes auf das Alter des Minerals schließen zu können, muss der Teilchenaustausch zwischen dem Messobjekt und seiner Umgebung bzgl. des Tracer-Elementes (und seiner Isotope) in geeigneter Weise unterstützt bzw. behindert sein. Anstelle einer allgemeinen Erläuterung dieses Konzeptes, für das viele Varianten denkbar sind, schildere ich der Einfachheit halber in den nachfolgenden Unterabsätzen einige heute bereits intensiv genutzte Methoden.

Die Uran–Blei-Methode (-) Einige wenige mineralische Kristalle, z.B. Zirkon ($ZrSiO_4$), sind auf Grund der chemischen und sterischen Besonderheiten der Kristallstruktur in der Lage, während des Erstarrungsprozesses in merklichem Umfang auch Uranatome in das Kristallgitter einzubauen, während der Anteil von eingebauten Bleiatomen wesentlich geringer ist. Im Beispiel $ZrSiO_4$ wird gelegentlich das Zr -Atom alternativ durch ein U -Atom oder (wesentlich seltener) durch ein Pb -Atom ersetzt. Zirkon ist überdies ein besonders hartes und beständiges Gestein und daher auch aus diesem Grund für diesen Typ von Untersuchung gut geeignet. Nach der Erstarrung findet in jedem Fall kein Austausch von Atomen über die Kristallgrenzen hinweg mehr statt. Findet man also zu einem späteren Zeitpunkt einen gewissen Anteil an Blei in den $ZrSiO_4$ -Kristalliten des Gesteins, so handelt es sich überwiegend um das Endprodukt der Zerfallsreihen von U_{92}^{235} . Aus dem z.B. mit einem Massenspektrometer bestimmten Atomverhältnis Pb/U in den $ZrSiO_4$ -Kristalliten kann dann unmittelbar das Alter des Gesteins berechnet werden.

Dieses unter dem Namen *Uran-Blei-Methode* bekannt gewordene Verfahren der Altersbestimmung von Gesteinen wurde bereits 1905 von Rutherford vorgeschlagen. Der Geochemiker *Clair Cameron Patterson* (* 1922 in Mitchelville/Iowa (USA); † 1995 in The Sea Ranch/Cal. (USA)) arbeitete dieses Konzept zu einem quantitativen Messverfahren aus und setzte es als erster 1955 zur Altersbestimmung von Gesteinsproben ein ([19]). U.a. datierte er so das Alter der Erde auf den noch heute als korrekt angesehenen Wert

$$\mathbb{A}(\text{Erde}) = 4,55 \cdot 10^9 \cdot y \quad (10.428)$$

Die C^{14} -Methode (-) Diese für die Altersbestimmung von Fossilien aus organischem Material entwickelte radiometrische Methode macht sich zu Nutze, dass das in der Atmosphäre vorhandene CO_2 nicht nur die stabilen Isotope C_6^{12} (zu 98,9 %) und

1420 Elementarteilchen, Kosmologie:
 Physik ganz klein / ganz gross (-)

und C_6^{13} (zu 1,1 %) als Molekül-Baustein enthält, sondern auch das instabile Isotop C_6^{14} , wenn auch nur in Spuren der Größenordnung

$$\frac{N_{C_6^{14}}}{N_{C_6^{12}}} \approx 1 \cdot 10^{-12} \quad (10.429)$$

Dieses zerfällt spontan über die Reaktion



Das bei diesem Prozess emittierte Elektron hat - zusammen mit dem Antielektron-Neutrino $\bar{\nu}_e$ (s. Absatz ab S. 774) - eine wohl bestimmte kinetische Energie von $158 \cdot keV$ und dient als primäre Messgröße bei dieser Methode der Altersbestimmung. Gebildet wird das unter erdgeschichtlichen Zeiträumen gesehen kurzlebige Kohlenstoff-Isotop in den oberen Bereichen der Atmosphäre unter dem Einwirken der kosmischen Strahlung, s. Absatz S. 1401. Dieses wird dann von jedem Objekt, das ständig Stoffwechselprozesse mit Hilfe des atmosphärischen CO_2 durchführt, aufgenommen und in die von ihm aufgebauten chemischen Strukturen eingelagert. Sobald nun bei einem bestimmten dieser Objekte der Stoffwechsel abgeschaltet wird (das Objekt *abstirbt*), wird auch die Zufuhr von C_6^{14} abgeschaltet, und die Menge des in diesem Objekt gespeicherten C_6^{14} nimmt von nun an entsprechend der Halbwertszeit von $5,7 \cdot 10^3 \cdot y$ ab. Diese Ausgangsmenge an C_6^{14} ergibt sich aus

- dem Stoffwechselverhalten des Objektes,
- der während der Lebenszeit dieses Objektes in der Atmosphäre vorhanden gewesenen Konzentration an CO_2 und
- dem relativen Anteil an C_6^{14} , wie er während dieser Zeit in der Atmosphäre vorherrschte.

Bestimmt man nun während einer Messzeit Δt die Anzahl der von der Messprobe emittierten Elektronen (mit $E_{kin} \leq 158 \cdot keV$), so ergibt sich daraus (XXX: präzisieren) unmittelbar die aktuelle Konzentration an C_6^{14} . Dieser Messwert ist ein Maß für das *Alter* dieser Probe, genauer für die Zeit, die seit dem Absterben dieser Probe vergangen ist. Die Kalibrierung dieser Methode, also die Vorschrift für die Umrechnung von C_6^{14} -Konzentration in Probenalter, ist jedoch ein alles andere als einfacher Prozess. Insbesondere gilt es, die über längere Zeiten keineswegs konstante C_6^{14} -Konzentration des atmosphärischen CO_2 zu berücksichtigen. Dieser Wert wird insbesondere durch die Schwankungen der kosmischen Strahlung selbst und durch die zeitlichen Veränderungen des Magnetfeldes der Erde beeinflusst. Dazu kommen die Auswirkungen des Vulkanismus und seit neuestem die antropogenen Effekte (Kernwaffentests, Aufbereitung von kerntechnischen Brennelementen etc.).

Wegen der Halbwertszeit des Zerfalls von C_6^{14} von rund $6 \cdot 10^3 \cdot y$ ist die C_6^{14} -Methode der Altersbestimmung auf biologische Objekte beschränkt, die nicht wesentlich älter sind als

$$A_{\max} \sim 6 \cdot 10^4 \cdot y \quad (10.431)$$

Für die Ausarbeitung dieses Konzeptes zu einer verlässlichen Methode der Altersbestimmung von Objekten, die durch biologische Prozesse erzeugte Kohlenstoffverbindungen enthalten, erhielt der amerikanische Chemiker *William F. Libby* (* 1908 in Grand Valley/CO (USA); † 1980 in Los Angeles/Cal. (USA)) 1960 den Nobelpreis für Chemie.

Die Al_{13}^{26}/Be_4^{10} -Methode (-/-) Sowohl Aluminium als auch Beryllium kommen in Spuren in natürlichem Quarzgestein vor. Andererseits entstehen ständig in den oberen Schichten der Atmosphäre u.a. auch die Isotope Al_{13}^{26} bzw. Be_4^{10} durch sog. *Spallation* (s. Absatz XXX) als Folge des Beschusses mit der kosmischen Höhenstrahlung (s. Abschnitt 10.4.1). Für die Spallationsprozesse sind insbesondere die hochenergetischen Protonen verantwortlich.

Spallationsprozesse, also die Reaktion von Atomkernen mit den in der kosmischen Strahlung enthaltenen hochenergetischen Protonen, waren nicht nur ein wichtiger Prozessschritt zur Entstehung vieler Elemente (s. Abschnitt XXX), sie finden auch bis heute ständig in der Erdatmosphäre statt und auch noch in den obersten Schichten der Erdkruste, etwa bis zu einer Tiefe von $10 \cdot m$. Für die an dieser Stelle zu diskutierende Methode der Altersbestimmung relevant ist die Bildung von Al_{13}^{26} insbesondere aus dem in der Erdatmosphäre in Spuren enthaltenen Ar_{18} und die Bildung von Be_4^{10} insbesondere aus O_8 . Beide genannten Isotope sind radioaktiv mit einer relativ großen Zerfalls-Halbwertszeit:



$$\tau_{1/2} = 7,17 \cdot 10^5 \cdot y \quad (10.434)$$

(XXX: Der weitere Text des Unterabsatzes *Die Be_4^{10} -Methode* ist noch nicht verfügbar.)

(XXX: Der weitere Text des Abschnitts *Altersbestimmungen* ist noch nicht verfügbar.)

10.6.9 Spezielle Verfahren zur Bestimmung weiterer Kenndaten (-)

(XXX: Der Text des Abschnitts *Spezielle Verfahren zur Bestimmung weiterer Konstanten* ist noch nicht verfügbar.)

10.6.10 *Der Seismograph (-)*

Als Seismographen bezeichnet man ein Messgerät zur Detektion von impulsartigen Körperschallsignalen, die von der Grundplatte, auf der der Seismograph fixiert ist, auf das Messgerät übertragen werden. Ursprünglich diente dieses Gerät zur Erkennung und Quantifizierung von sog. Erdbeben. Die ein Erdbeben auslösenden impulsartigen Ausgleichsbewegungen von Teilen der Erdkruste (s. Absatz S. 1250) sind mit intensiven Körperschallsignalen verbunden, die große Teile des Erdmantels durchdringen und daher auch noch an Stellen der Erdoberfläche detektiert werden können, die von dem eigentlichen Zentrum dieser Ausgleichsbewegung weit entfernt sind. Diese impulsartigen Schallsignale werden beim Durchdringen der Erdvolumens an jeder Grenzfläche, an der eine nahezu sprungartige Veränderung des Schall-Wellenwiderstandes auftritt, in für diese Grenzzone typischer Weise modifiziert: Sie werden zu einem gewissen Anteil reflektiert, und der die Grenzschicht durchdringende Anteil wird in seiner Ausbreitungsrichtung abgelenkt, also gebrochen. Eine genaue Analyse der bei einem derartigen Ereignis an verschiedenen Stellen der Erdoberfläche detektierten seismographischen Signale gibt daher detaillierte Informationen über den inneren Aufbau der Erde als einem System unterschiedlicher Schichten.

(XXX: Der weitere Text des Abschnitts *Der Seismograph* ist noch nicht verfügbar.)

10.6.11 *Der Nachweis exosolarer Planeten (-/-)*

(XXX: Der Text des Abschnitts *Der Nachweis exosolarer Planeten* ist noch nicht verfügbar. Er wird auch die nachfolgenden Abb.-en 122 und 124 und die sie erläuternden Texte enthalten:)

(XXX: Der diese Abb. erläuternde Text ist noch nicht verfügbar.)

Im Oktober 2014 war bereits die Existenz von 1832 Exoplaneten sicher nachgewiesen, und es gab weitere mehr als 2000 sog. Exoplaneten-Kandidaten, die noch auf die Absicherung ihrer Existenz warteten. Die 1. Messperiode der Keplersonde, heute als K1 bezeichnet, endete Ende 2012. Während dieser Kampagne wurden über 5000 Exoplaneten entdeckt, die überwiegend noch auf ihre nähere Analyse und Vermessung warten.

Mehr als $3/4$ der von Kepler entdeckten Planeten-Kandidaten haben einen Durchmesser, der zwischen dem Erd-Radius und dem Planetensystem unserer Sonne kommt ein solcher Planet überraschenderweise nicht vor.

Dieser Planet gehört zu dem Planetensystem eines Sterns aus dem Sternbild Schwan. Die Entfernung von unserem Planetensystem beträgt etwa $120 \cdot ly$. Die Umlaufzeit der Bahnbewegung von HAT-P-11b um seinen Stern beträgt lediglich ca. $5 \cdot d$. Seine Gesamtmasse liegt in der Größenordnung des Neptun. Durch Kombination von Messdaten der 3 Weltraum-Teleskope Hubble, Spitzer und Kepler gelang es nun, ein Transmissionsspektrum der Atmosphäre dieses Planeten zu bestimmen, s. Abb. 124. In diese Abb. sind zum Vergleich auch die Spektren eingezeichnet, die bei dem eingesetzten Messverfahren von einer komplett mit Wasser-Wolken bedeckten Pla-

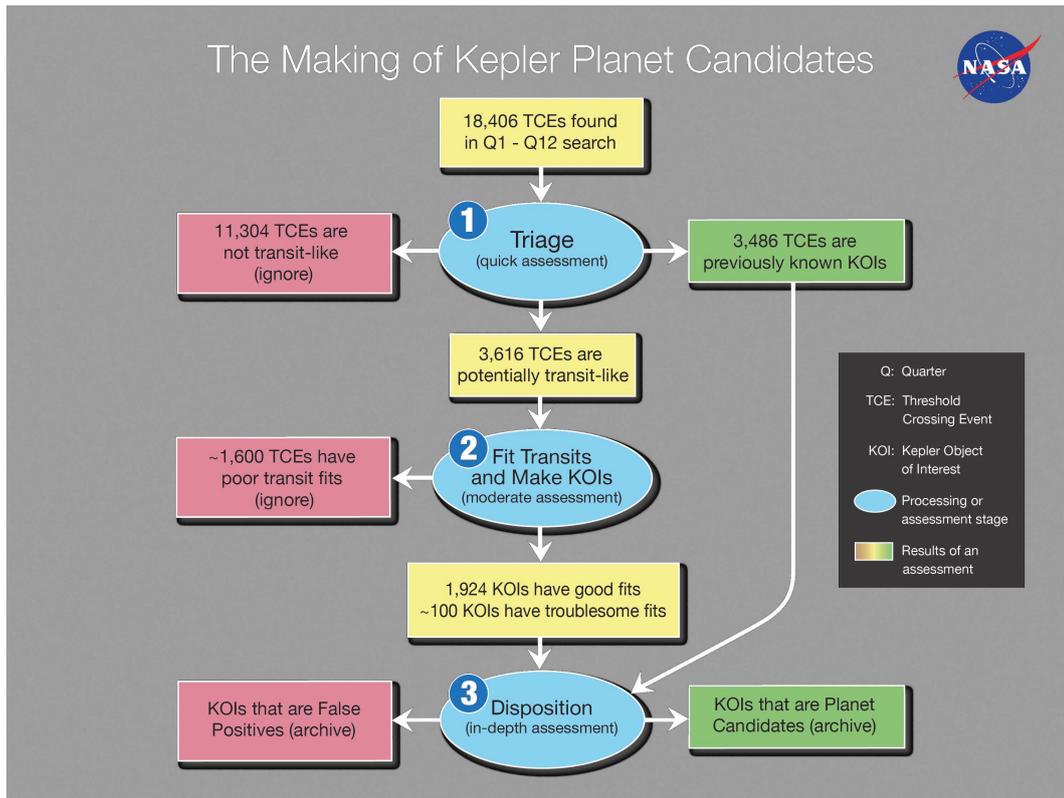


Abb. 122 während der Messzeit Mai 2009 bis März 2012
 (credit: NASA Ames/W. Stenzel)

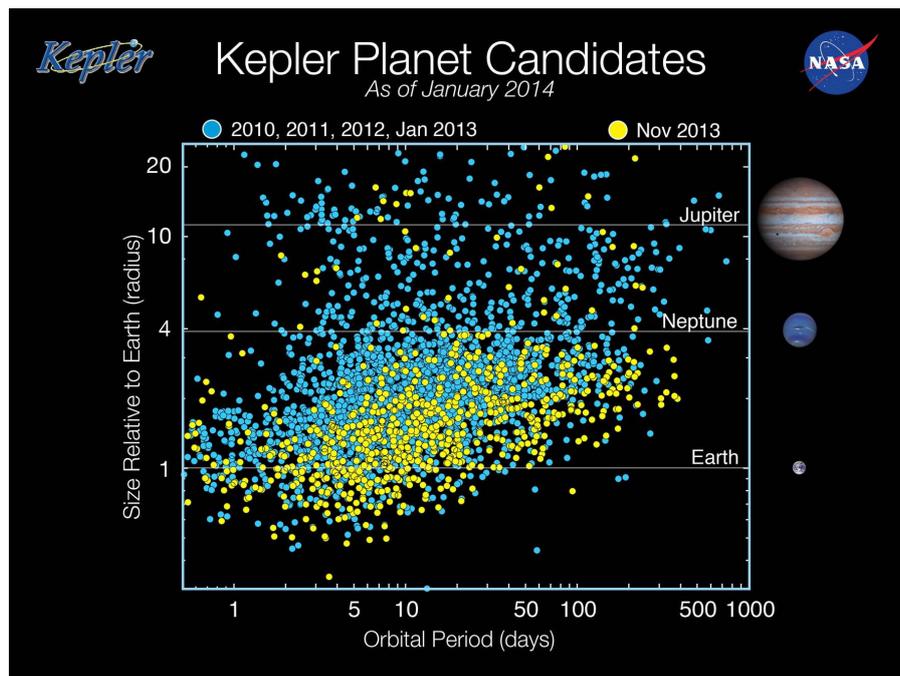


Abb. 123 (credit: NASA Ames/W. Stenzel)

neten-Oberfläche bzw. von einer wolken-freien Oberfläche erwarten würden. Dieses Messergebnis ist ein starkes Indiz für die Annahme, dass dieses Planet, ebenso wie unsere Erde, eine Atmosphäre besitzt, die in signifikantem Umfang Wasser enthält, und dass sich dieses Wasser in Wolken ansammelt, die den Planeten aber nur teilweise bedecken und damit auch nur teilweise gegenüber der direkten solaren Einstrahlung abschatten. Damit aber sollten eine ganze Reihe weiterer Klimadaten dieses Planeten mit denen der Erde vergleichbar sein.

Im Zuge der intensiven Auswertung von Messdaten, die während der Kepler-Kampagne aufgezeichnet wurden, gelang 2015 der Nachweis eines erdähnlichen Exoplaneten im Sternsystem Kepler-452, dessen geometrische Daten sehr erd-ähnlich sind (s. nachfolgende Tabelle), und der sich etwa im Zentrum der sog. habitablen Zonen seines Sterns befindet, s. Abb. 125.

Sterndaten

Entfernung	$1,4 \cdot 10^4 \cdot L_j$
Strahlungstemperatur	$5,76 \cdot 10^3 \cdot K$
Alter	$6 \cdot 10^9 \cdot y$

Planetendaten

gr. Halbachse d. Bahn	$1,046 \cdot AE$
Planeten-Durchmesser D	$1,63 \cdot D_{\oplus}$
Bahnumlaufzeit T	$384,8 \cdot d_{\oplus}$
Masse	$1,6 \cdot M_{\oplus}$

Aktuell (2016) hat die NASA in Zusammenarbeit mit der NSF mit der Planung eines *next generation planet hunters* begonnen. Im Zuge dieses *Exoplanet Observation Re-*

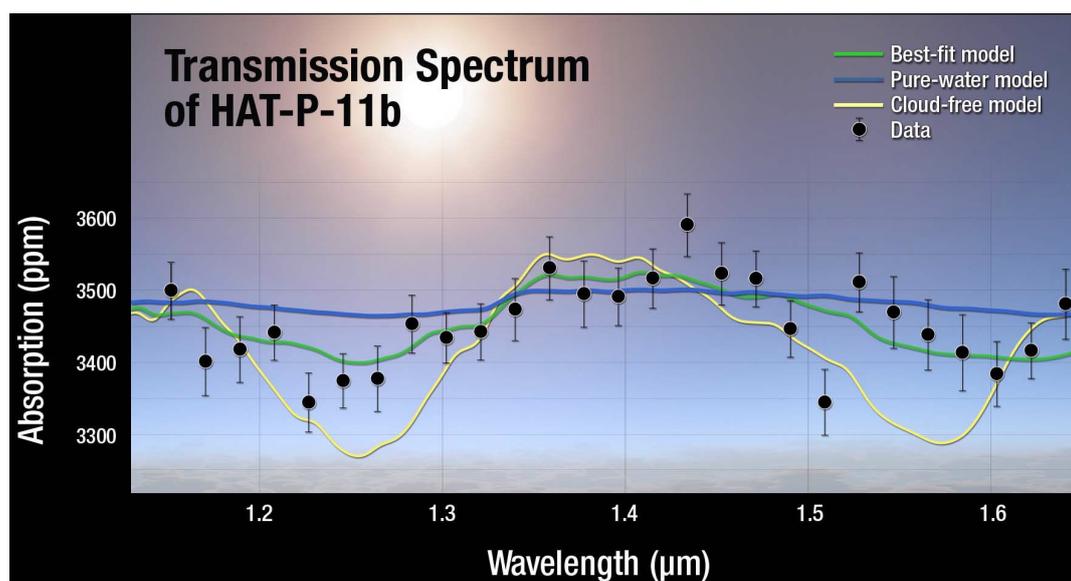


Abb. 124 Absorptionsspektrum der Atmosphäre des Exo-Planeten HAT-P-11b (credit: NASA/JPL-Caltech)

search Program soll eine Sonde entwickelt werden, die die Existenz von Exoplaneten über die minimalen Wobbel-Oszillationen des jeweiligen Muttersterns erkennt.

10.6.12 Die Internationale Raumstation (-)

Die ersten Planungen für eine sog. *Weltraumstation*, einen von Menschen bewohnten Erdsatelliten, der in einer geeigneten Umlaufbahn die Erde umkreist und auf Dauer betrieben werden soll, begannen bereits Anfang der Jahre 1980. Arbeitstitel dieses Projektes waren zu dieser Zeit *Freedom* bzw. *Alpha*. Letztlich kam es zu einer Kooperation der Organisationen NASA, Roskosmos (Russland), ESA, CSA (Kanada) und JAXA (Japan), die die Entwicklung einer derartigen *International Space Station* ISS auf Basis einer gemeinsamen Finanzierung beschloss und in Angriff nahm.

Der eigentliche Aufbau der ISS (s. Abb. 126) begann 1998 mit der Positionierung des 1. Moduls in die vorgesehene Umlaufbahn. Dieser von Russland gefertigte Modul trägt den Namen *Saryia* (russ. die Morgenröte). 3 Wochen später folgte das US-Modul *Unity* (engl. die Einigkeit). Das 2. russische Modul mit dem Namen *Svesda* (russ. der Stern) wurde 2000 montiert. Noch in demselben Jahr wurden 2 Trassen montiert, die später als Haltestützen dienten für die großen Solarpanel des Labors *Destiny* (engl. das Schicksal), das 2001 montiert wurde. Im Laufe der Jahre 2002 bis 2007 wurden die *solar wings* montiert sowie die Verbindungs-Nodes und docking ports zum Andocken der Versorgungs-Transporter, insbesondere der NASA-Modul *Harmony* mit seinen 6 *Common Berthing Mechanism* CBM. Letztere werden seitdem für alle nicht-russischen Transporter als Dock-Station genutzt. 2008 folgten das ESA-Labor *Columbus* und das japanische Labor *Kibo* und im Jahr 2010 das

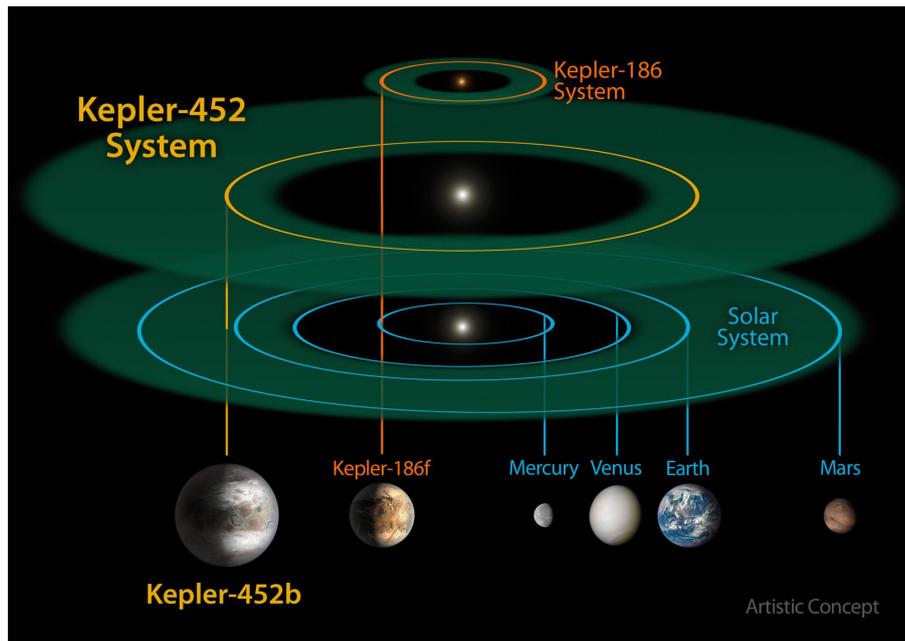


Abb. 125 Geometrischer Vergleich der Systeme Kepler-186 und Kepler-452 mit unserem Planetensystem
(Credits: NASA/JPL-CalTech/R.Hurt)

Cupola Observatorium der ESA, ein Beobachtungsmodul mit insgesamt 7 Fenstern. Das größte dieser Fenster ist mit einem Durchmesser von $80 \cdot cm$ das größte bisher unter Weltraumbedingungen eingesetzte Fenster. Hiermit war der b.a.w. geplante Ausbau der ISS abgeschlossen. Sie besteht nun aus 3 Forschungslabors und einem Observatorium. Die nachfolgende Tabelle umfasst die wichtigsten technischen Daten der ISS:

Höhe der Umlaufbahn über der Erdoberfläche:	$416 \cdot km$
geometrische Ausdehnung ü.a. :	$110 \cdot m / 100 \cdot m / 30 \cdot m$
Gesamtmasse:	$455 \cdot t$
Gesamtfläche aller Solarpanel :	$4,5 \cdot 10^3 \cdot m^2$
Nennleistung dieser Panel	$120 \cdot kW$

Der Transport dieser Module und der übrigen Nutzlasten ebenso wie der Hin- und Rücktransport der jeweiligen ISS-Mannschaften erfolgte zunächst mit den NASA-Space-Shuttel-Fahrzeugen, später dann auch mit den russischen Sojus-Raketen(XXX: präzisieren).

Seit 2008 erfolgt der Transport von Nutzlast (Nahrungsversorgung der Mannschaft, technisches Gerät für wissenschaftliche Experimente, Treibstoff etc.) überwiegend mit unbemannten Transportsystemen. Das ist zum einen das *Automated*

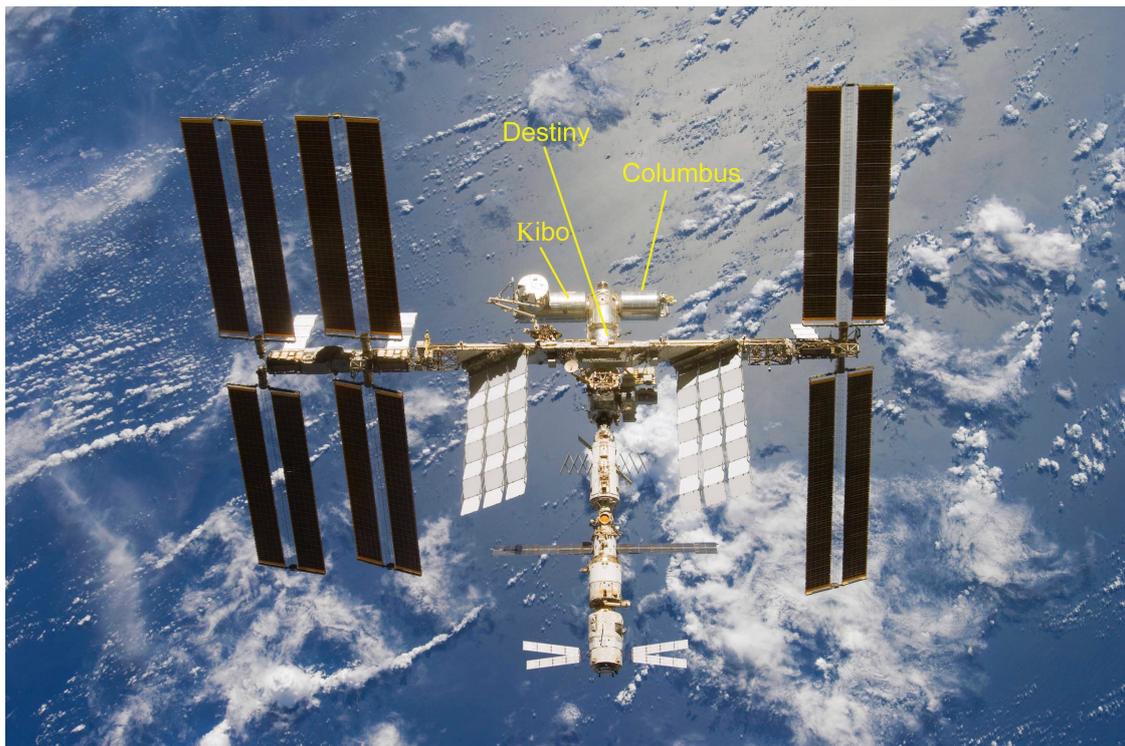


Abb. 126 Die **International Space Station ISS**, aufgenommen am 11.06.2008 vom Space-Shuttel Discovery kurz nach seinem Ablegen von der ISS (credit: NASA)

Transfer Vehicle ATV der ESA, s. Abb. 127. Es kann jeweils bis ca. $7,7 \cdot t$ Nutzlast zur ISS transportieren. Zum anderen wird das Fracht-Transportsystem *Progress* der russischen Raumfahrt-Organisation Cosmos eingesetzt. Seit 2012 wird auch das Transportsystem eines US-amerikanischen Privatunternehmens genutzt, der Transporter *Dragon* der SpaceX Company in Hawthorne/Cal., s. auch Abb. 128. Dieser Transporter kann $6 \cdot t$ Nutzlast zur ISS bringen und $3 \cdot t$ Last (Abfälle, aus Experimenten entstandene Produkte etc.) wieder zurück auf die Erde transportieren. Die bisherigen Einsätze dienen ausschließlich dem unbemannten Last-Transport. Später soll dieser Transporter auch Personen zur ISS bringen und auch wieder von dort zurück zur Erde.

(XXX: Der weitere Text des Kapitels *Messung astronomischer und kosmologischer Größen* ist noch nicht verfügbar.)

10.7 Tipps, Tricks und Spezialitäten (-/-)

(XXX: Der Text des Kapitels *Tipps, Tricks und Spezialitäten* ist noch nicht verfügbar.)



Abb. 127 Das Innere des ATV während der Beladung am Erdboden
(credit: ESA/CNES/ARIANESPACE-Optique Video du CSG, P. Baudon)

10.8 Aufgaben (-)

(XXX: Der Kopftext des Kapitels *Aufgaben* ist noch nicht verfügbar.)

1. Die in der Sonne ablaufenden Prozesse der Kernfusion erzeugen auch einen Neutrinostrom. Im Gegensatz zu der elektromagnetischen Strahlung verlässt der Neutrinostrom nahezu ungeschwächt und ohne Verzögerung die Sonne. Schätze den relativen Anteil an der Fusionsenergie ab, die der Neutrinostrom transportiert.
2. Berechne den Zusammenhang zwischen Energie und Geschwindigkeit für Neutrinos der Ruhemasse $0,2 \cdot eV$.
3. Der im Jahr 2012 von Amateur-Astronomen entdeckte Asteroid 2012 DA14 passierte die Erde am 15.02.2013 um 19:27 GMT in einer minimalen Entfernung von $2,8 \cdot 10^4 \cdot km$. Er besitzt eine Masse von ca. $1 \cdot 10^5 \cdot t$. An demselben Tag um 03:20 GMT, also innerhalb einer Zeitspanne von nur $16 \cdot h$ trat ein Meteoroid in der Nähe der Stadt Chelyabinsk in Sibirien in die Atmosphäre und



Abb. 128 Roboterarm der ISS während des Andock-Manövers eines Dragon-Nutzlast-Transporters, aufgenommen von S. Cristoforetti am 17.04.2015 (credit: ESA/NASA; ID 338960)

explodierte in einer Höhe von knapp $20 \cdot km$ (s. Abb. 129) mit einer Sprengkraft der Größenordnung $500 \cdot kT - TNT$ (s. Absatz S. 780). Man schätzt seine Masse auf $7 \dots 10 \cdot 10^3 \cdot t$, also knapp $1/10$ der Masse von 2012 DA14. Nach aktueller (02.2013) Meinung der astronomischen Experten stehen diese beiden Ereignisse in keinem logischen Zusammenhang zu einander. Meteorite dieser Größenordnung treffen im Durchschnitt etwa alle $100 \cdot y$ die Erde.

Schätze die mittlere Häufigkeit ab, mit der es zu einem derartigen Doppelergebnis kommt, wenn die beiden Einzelereignisse statistisch unabhängig von einander sind.

4. Ein sog. Hauptreihenstern schöpft seine Energie aus folgenden heute bekannten Zyklen von Kernfusionsprozessen : dem pp-Zyklus bzw. dem CNO-Zyklus, s. Absatz 10.2.2. Schätze auf Basis dieser Kenntnis ab, welchen Anteil des insgesamt erzeugten Energiestroms der bei diesen Prozessen erzeugte Neutrinostrom ausmacht.

(XXX: Der weitere Text des Kapitels *Aufgaben* ist noch nicht verfügbar.)



Abb. 129 Asteroideneinschlag nahe Chelyabinsk am 15.02.2013

(Quelle: diese Abb. steht unter der Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 Licence;

© Alex Alishevskikh

10.9 Zahlenwerte (-)

(XXX: Der Text des Kapitels *Zahlenwerte* ist noch nicht verfügbar. In ihm werden die nachfolgenden Zahlenwerte und Tabellen aufgehen.)

Dichte der dunklen Energie: $e = 10^{-26} \cdot \frac{kg}{m^3}$ (XXX: SdW 04 (2007) S. 33)

Mittlere Dichte der Materie (einschließlich dunkler Materie): $e = 10^{-26} \cdot \frac{kg}{m^3}$ (XXX: SdW 04 (2007) S. 34; beide Werte gleich ?)

Alter des Kosmos: $\mathbb{A}_{\text{Kosmos}} = 1,37 \cdot 10^{10} \cdot y$

Astronomische Längeneinheit: $1 \cdot AE = 1,49597870691 \cdot 10^{11} \cdot m$ (XXX: Wikipedia)

Astronomische Masseneinheit: $M_{\odot} = (1,98892 \pm 0,00025) \cdot 10^{30} \cdot kg$ (XXX: Wikipedia)

Dieser Zahlenwert entspricht in guter Näherung der (aktuell gegebenen) Masse unserer Sonne.

mittlere Massendichte der Sonne: $\langle m_{\odot} \rangle = 1,408 \cdot 10^3 \cdot \frac{kg}{m^3}$ Gesamt-Energiestrom der Sonne: $J_{\odot} = 3,845 \cdot 10^{26} \cdot W$

Sonnendurchmesser: $D_{\odot} = 1,3927 \cdot 10^9 \cdot m$

Elementzusammensetzung unserer Sonne:

Element	z	$\frac{N(z=i)}{N_{\text{ges.}}}$	Quelle
H	1	0,909	Uni Köln
He	2	$8,96 \cdot 10^{-2}$	
O	8	$7,82 \cdot 10^{-4}$	
C	6	$3,65 \cdot 10^{-4}$	
Ne	10	$1,13 \cdot 10^{-4}$	
N	7	$9,15 \cdot 10^{-5}$	
Mg	12	$3,49 \cdot 10^{-5}$	
Si	14	$3,26 \cdot 10^{-5}$	
Fe	26	$2,90 \cdot 10^{-5}$	
S	16	$1,49 \cdot 10^{-5}$	
Ar	18	$3,32 \cdot 10^{-6}$	
Al	13	$2,71 \cdot 10^{-6}$	
Ca	20	$2,10 \cdot 10^{-6}$	

(XXX: Uni Köln: www.uni-koeln.de/mat-nat-fak/mineral/museum/2-Meteorite)

(XXX: Zahlenwerte werden in der Literatur uneinheitlich angegeben - z.B. meint Dieter Ortner (Luzern) Sonne hat 73·M-% H, 25·M-% He und 2·M-% an schwereren Elementen.

Alter der Erde: $4,55 \cdot 10^9 \cdot y$ (XXX: Quelle Originalpublikation von Cameron)

Elementzusammensetzung der Erde: (XXX: Zahlenwerte ab Mg genauer)

1432 Physik	ganz	klein	Elementarteilchen, Kosmologie:		ganz	gross	(-)
Element	z	$\frac{M(z=i)}{M_{ges.}}$	/	$\frac{N(z=i)}{N_{ges.}}$	Quelle		
Eisen	26	0,398		0,212	W. Schranz SS2005		
Sauerstoff	8	0,277		0,515			
Silizium	14	0,145		0,154			
Magnesium	12	0,087		0,047			
Nickel	28	0,032		0,016			
Calcium	20	0,025		0,019			
Aluminium	13	0,018		0,020			
Schwefel	16	$6,4 \cdot 10^{-3}$		$6,8 \cdot 10^{-3}$			
Natrium	11	$3,9 \cdot 10^{-3}$		$5,0 \cdot 10^{-3}$			
Kobalt	27	$2,3 \cdot 10^{-3}$		$1,2 \cdot 10^{-3}$			
Chrom	24	$2,0 \cdot 10^{-3}$		$6 \cdot 10^{-4}$			
Kalium	19	$1,4 \cdot 10^{-3}$		$1,0 \cdot 10^{-3}$			
Phosphor	15	$1,1 \cdot 10^{-3}$		$1,1 \cdot 10^{-3}$			
Mangan	25	$7 \cdot 10^{-4}$		$4 \cdot 10^{-4}$			
Kohlenstoff	6	$4 \cdot 10^{-4}$		$1,0 \cdot 10^{-3}$			
Titan	22	$2 \cdot 10^{-4}$		$1 \cdot 10^{-4}$			

dynamische Viskosität: obere Mantelschicht (Asthenosphäre) $10^{16} \dots 10^{18} \cdot Pa \cdot s$;
 Kruste $> 10^{20} \cdot Pa \cdot s$

Elementzusammensetzung des Erd-Mondes:

Element	z	$\frac{M(z=i)}{M_{ges.}}$	$\frac{N(z=i)}{N_{ges.}}$	Quelle
				XXX
Eisen	26	0,35		
Sauerstoff	8	0,30		
Silizium	14	0,15		
Magnesium	12	0,13		
Nickel	28	0,024		
Calcium	20	0,011		
Aluminium	13	0,011		
Schwefel	16	0,019		
Natrium	11	XXX		
Kobalt	27	XXX		
Chrom	24	XXX		
Kalium	19	XXX		
Phosphor	15	$XXX \cdot 10^{-3}$		
Mangan	25	$XXX \cdot 10^{-4}$		
Kohlenstoff	6	$XXX \cdot 10^{-4}$		
Titan	22	$XXX \cdot 10^{-4}$		

Uran	92
Thorium	90

Hubble-Konstante $(H_0)^{-1} = 67,15 \cdot \frac{km}{s \cdot Mpc} = 1,4 \cdot 10^{10} \cdot y$ (Quelle: Auswertungen der Planck-Messdaten)

Mittlere Temperatur des kosmischen Hintergrundstrahlung $T = (2,728 \pm 0,002) \cdot K$
(XXX: Physik J. 02 (2005) S.21-27)

10.10 Literatur (-)

1. W.M. Yao et al. (particle data group) *Journal of Physics G33* (2006), 1
<http://pdg.lbl.gov>
2. <http://planet-wissen.de>
3. Richard A. Taylor, *Deep Inelastic Scattering: The Early Years*, Nobel Lecture December 8, 1990
4. S. Kraus, K.H. Hoffmann et al. , A hot compact dust disk around a massive young stellar object, *Nature* 466, p. 339-342
5. C. F. von Weizsäcker, Über Elementumwandlungen im Innern der Sterne I, *Physikalische Zeitschrift* 38 (1937) S. 176–191
6. C. F. von Weizsäcker, Über Elementumwandlungen im Innern der Sterne II, *Physikalische Zeitschrift* 39 (1938) S. 633–646
7. H. A. Bethe, Energy Production in Stars, *Phys. Rev.* 55 (1939) p. 434–456
8. J.R. Oppenheimer, G.B. Volkov, On massive neutron cores, *Phys. Rev.* 56 (1939) p. 374-381
9. P.E. Nugent et al., Supernova SN 2011fe from an exploding carbon-oxygen white dwarf star, *Nature* 480 (2011) p. 344-347
10. V.M. Slipher, Radial Velocity Observations of Spiral Nebulae, *The Observatory* 40 (1917), p. 304-306
11. J. Farihi, B.T. Gänsicke, D. Koester, Evidence for Water in the Rocky Debris of a disrupted Extrasolar Minor Planet, *Science* 342 no. 6155, p. 218-220
12. M.J. Jackson, H.N. Pollack, On the sensitivity of parametrized convection to the rate of decay of internal heat sources, *J. Geophys. Res.*; 89 (1984), p. 10103-10108
13. National Space Science Data Center, <http://nssdc.gsfc.nasa.gov>
14. <http://www.atlasoftheuniverse.com>
15. G. Faure, *Principles of Isotope Geology*, 2nd ed. NY John Wiley and Sons, p. 589 ff.
16. Ch. Lyell, *Principles of Geology*, 9. Edition New York 1865
17. The EXO Collaboration, Search for Majorana neutrinos with the first two years of EXO-200 data, *Nature* 510 (2014) p. 229-234
18. A. Wegener, Die Entstehung der Kontinente und Ozeane, *International Journal of Earth Science* 3 (1912), no. 4, p. 276-292 sowie in *Sammlung Vieweg: Tagesfragen aus den Gebieten der Naturwissenschaften und der Technik*, 1915
19. C. Patterson, G. Tilton, M. Ingham, The Age of the Earth, *Science* 121, p. 69-75
20. A.G.W. Cameron, Abundances of the elements in the solar system, *Space Science Reviews* 1970 (15) p. 121-146
21. Claude Allègre, Gerard Manhès, Eric Lewin, Chemical composition of the Earth and the volatility control of planetary genetics, *Earth and Planetary Science Letters* 2001 (185) p. 49-69
22. R.C. Weber, R. Garcia, C.L. Johnson, M. Knapmeyer, P. Lognorme, Y. Nakamura,

- N.C. Schmerr, The use of deep moonquake for constraining the internal structure of the Moon, American Geophysical Union, Fall Meeting 2010, abstract #U51B-0037
23. E.W. Shalygin et al., Active volcanism on Venus in the Ganiki Chasma riftzone, *Geophysical Research Letters*, June 2015
 24. M.S.Turner et al., Connecting Quarks with the Cosmos: Eleven Science Questions for the New Century, Report to the National Academy of Science (2002)
 25. M.D. Lehnert et al., Spectroscopic confirmation of a galaxy at redshift $z = 8.6$, *Nature* 467 (21.10.2010) p. 940-942
 26. F. Combes et al., *Galaxies and Cosmology*, Springer Verlag 2004
 27. S. Toft et al. , *The Astrophysical Journal*, 29 online
 28. Proceedings of the "Galaxy Evolution: Emerging Insights and Future Challenges" Conference Nov. 11-14 2008 at the University of Texas in Austin, ASP Conference Series
 29. A. Hewish, S.J. Bell, J.D.H. Pilkington, P.F.Scott, R.A. Collins, Observation of a Rapidly Pulsating Radio Source, *Nature* 217 (Febr. 1968) p. 709-713
 30. <http://hubblesite.org/newscenter/newsdesk/archive/releases/2000/05/image/a>
 31. <http://www.nasa.gov/mission-pages/chandra/multimedia/m101-2012.htm>
 32. H.N. Russel, H. Shepley, Relations Between the Spectra and Other Characteristics of the Stars, *Nature* 93 (1914) p. 227-230, 252-258, 281-286
 33. C.D. Anderson, E.W. Cowan, R.B. Leighton, V.A.J. van Lint, Cascade Decay of V Particles I, *Physical Review* 92 (1953) p. 1089 (XXX: präzisieren) (XXX: in Nature-onlinearchiv nicht vorh.)
 34. A. Weiss, Nukleosynthese, 02.074.2008, www.mpa-garching.mpg.de/_weiss/Nukleosynthese_04/Nukleosynthese.pdf
 35. Woojin Kwon, Lesdi W. Looney, Lee G. Mundy, Resolving the circumstellar disk of HL Tauri at Millimeter Wavelength, *The Astrophysical Journal* 741, no. 1, p. 3
 36. R. Murthy, Experimental evidence that potassium is a substantial radioactive heat source in planetary cores, *Nature* 423 may 2003 p. 163-165
 37. Anjali Gupta, Smita Matur, A huge Reservoir of Ionized Gas around the Milky Way: Accounting for the Missing Mass? *Astronomical Journal Letters* 756 (1) (2012)
 38. C.L.Cowan Jr., F.Reines, F.B.Harrison, H.W.Kruse, A.D.McGuire, Detection of the Free Neutrino: a Confirmation, *Science* 124 (1956) 3212, p. 103-104
 39. A. Steiner, J. Lattimer, E. Brown, The Neutron Star Mass-Radius Relation and the Equation of State of Dense Matter, *Astrophysical Journal Letters* 03 2013 (XXX: präzisieren) (arXiv:1205.6871 [nucl-th])
 40. A. Etchegoyen, U. Fröhlich, A. Lucero, I. Sidelnik, B. Wundheiler, The Pierre Auger Project and Enhancements, arXiv:1004.2537v1 (astro-ph.HE) v. 15. Apr 2010
 41. E. Roche, La figure d'une masse fluide soumise à l'attraction d'un point éloigné, *Academie des Sciences de Montpellier* 1 (1847-1850) p. 243
 42. Galileo Galileo, Sidereus Nuncius magna longaque admirabilia spectacula pandens,

Venedig 1610; verfügbar über <http://e-rara.ch>

43. (XXX: Diese Literaturangabe ist noch nicht verfügbar.)
44. www.esa.int/Our_Archives/Space_Sciency/Fly_through_a_Canyon_on_Mars
45. F. Mignard, Astronomic Properties of the Hipparcos Catalogue, www.rssd.esa.int/hipparcos/venice-proc/oral01_02.pdf
46. O. Krause, M. Tanaka, T. Usuda, T. Hattori, M. Goto, S. Birkmann, K. Nomoto, Tycho Brake's 1592 supernova as a standard typ 1a as revealed by its light-echo spectrum, Nature vol. 456 No. 7222 p. 617-619; doi: 10.1038/nature07608
47. J.R.Gott III, M. Juric, D. Schlegel, F. Hoyle, M. Vogeley, M. Tegmark, N. Bahcall, J. Brinkmann, A Map of the Univers, Astrophysical Journal 2005 vol. 624 p. 463-484