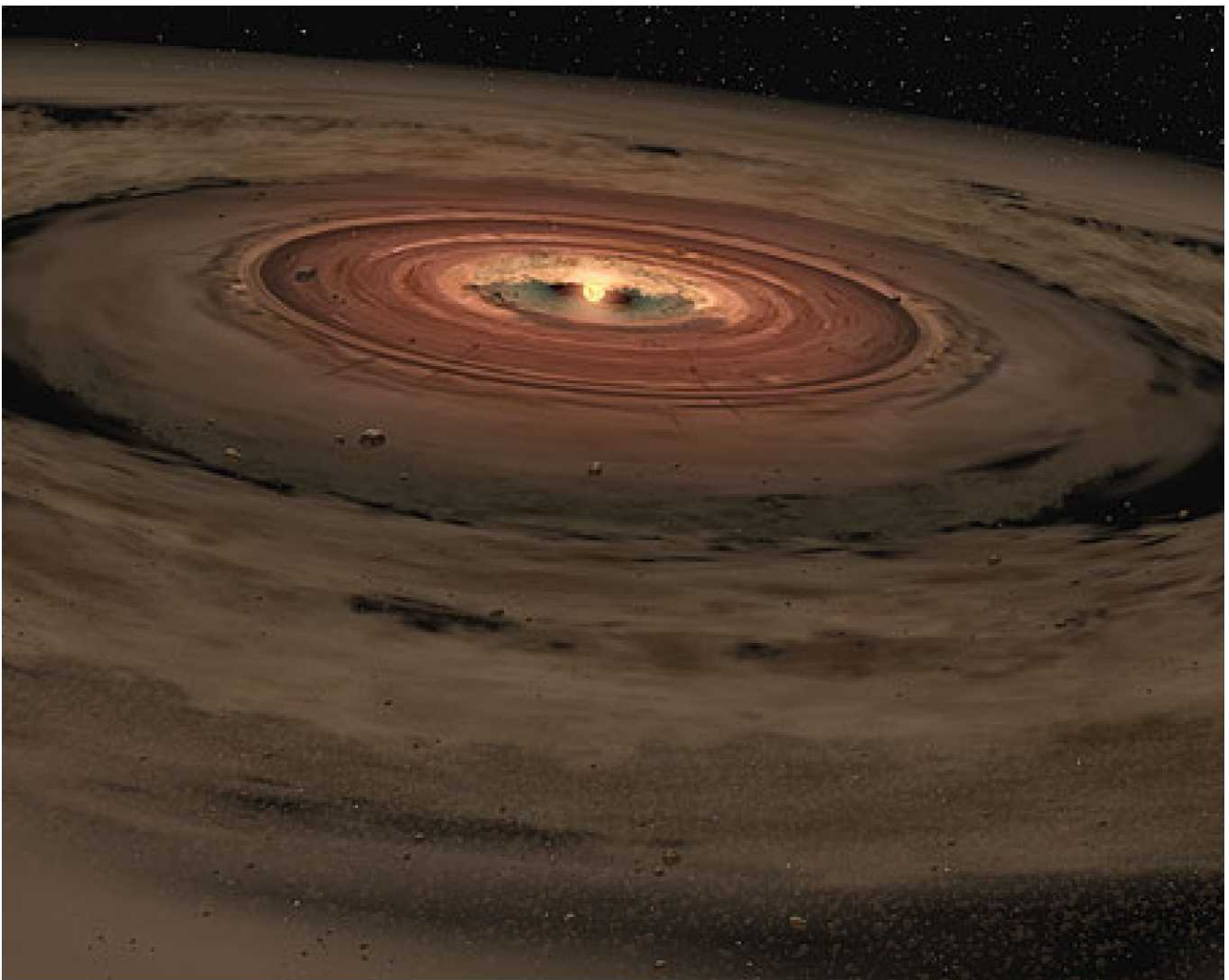


Kleines Lehrbuch der Astronomie und Astrophysik

M. Scholz

Band 10: Kosmogonie des Sonnensystems



Entstehung der Planeten in einer protoplanetaren Gas- und Staubscheibe

M.Scholz

Kleines Lehrbuch der Astronomie und Astrophysik

Band 10: Kosmogonie des Sonnensystems

Entstehung der Planeten in einer protoplanetaren Gas- und Staubscheibe

E-Book-Ausgabe 2009

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Autors unzulässig.

Bildnachweis: Wikipedia Commons, NASA, ESA, Autor

M.Scholz

Kleines Lehrbuch der Astronomie und Astrophysik

Band 10

Kosmogonie des Sonnensystems

Entstehung der Planeten in einer protoplanetaren Gas- und Staubscheibe

Ausgabe 2009

mathias.scholz@t-online.de

INHALTSVERZEICHNIS

ENTSTEHUNG DES SONNENSYSTEMS	2
Sternentstehung in Molekülwolken (massearme Sterne).....	6
Instabilitäten und Gravitationskollaps	8
Entstehung des Protosterns (langsame Kontraktionsphase)	12
Akkretionsphase.....	13
Entstehung von Planeten in der zirkumstellaren Scheibe	15
Kondensationsphase	17
Koagulationsphase	19
Agglomerationsphase	20
Akkretionsphase.....	21
Konsolidierungsphase	23

Literatur

Index

Vorwort

Das Ziel dieser mehrbändigen Lehrbuchreihe ist es, grundlegende Erkenntnisse über die Welt außerhalb unserer Erde in systematischer Weise auf einem Niveau, den man im amerikanischen als „undergraduate“ bezeichnen würde, dem Leser näher zu bringen. Dabei wurde sowohl eine gewisse Ausführlichkeit als auch Aktualität (hier etwa 2007) – soweit das bei den einzelnen Themenkomplexen überhaupt möglich ist – angestrebt. Gerade in der Astronomie und Astrophysik beobachtet man gegenwärtig innerhalb kürzester Zeiträume einen enormen Wissenszuwachs, wie man es bei anderen Wissenschaften in diesem Umfang her nur begrenzt kennt. Allein während der Arbeit an dieser Buchreihe erforschte die Raumsonde „Galilei“ das Jupitersystem, erreichte „Cassini“ den Saturn mit seinem komplexen Ringsystem und „Huygens“ die Oberfläche des Saturnmondes Titan; eine ganze Anzahl von „Transplutos“ mit „Eris“ an der Spitze wurden entdeckt, was u.a. dazu führte, daß der neue Begriff „Zwergplanet“ in die astronomische Terminologie eingeführt wurde und die bekannten Merksätze für die Planeten unseres Sonnensystems nur noch bedingt gültig waren und umformuliert werden mußten ...

Während es vor 30 Jahren nicht sonderlich schwierig war, die Anzahl und die Namen der Satelliten der Planeten unseres Sonnensystems aufzusagen, ist das heute längst nicht mehr möglich. Man hat sogar den Eindruck, daß es zunehmend schwieriger wird, für die neuentdeckten Objekte überhaupt Namen zu finden, wie die vielen noch vorläufigen Bezeichnungen der neuentdeckten Jupiter- und Saturnmonde zeigen. Und schließlich soll in diesem Zusammenhang nur noch auf den inflationären Zuwachs an Entdeckungen von Exoplaneten allein im letzten Jahrzehnt hingewiesen werden, die uns viele neue Einsichten in die Struktur und Entstehung von Planeten und Planetensystemen gewährt haben. Gerade an Planeten um weit entfernte Sterne entzündet sich unsere Phantasie, wie die vielen künstlerischen Darstellungen beweisen, die man bei der Recherche im Internet leicht auffinden kann.

Ziel dieser „Einführung“ in die Astronomie und Astrophysik ist es Leser anzusprechen, die einen nicht zu kompakten Einstieg in diese Wissenschaft in deutscher Sprache wünschen und auch daran interessiert sind, an die im Internet oder über Zeitschriften zugängliche Fachliteratur herangeführt zu werden. Angesprochen sind in erster Linie Schüler der Abiturstufe unserer Gymnasien, ihre Lehrer, Studenten der ersten Studienjahre sowie selbstverständlich auch die wachsende Zahl an Liebhaberastronomen (so wie der Autor), die mehr wissen wollen über die Objekte, die sie in ihren „Backyard“- Observatorien oder an Volks- und Schulsternwarten beobachten.

Auf Zitierungen wurde im Text – dem Charakter eines Lehrbuches entsprechend – weitgehend verzichtet. Fachaufsätze lassen sich mittlerweile leicht über Google Scholar oder über das Astrophysics Data System (ADS) recherchieren.

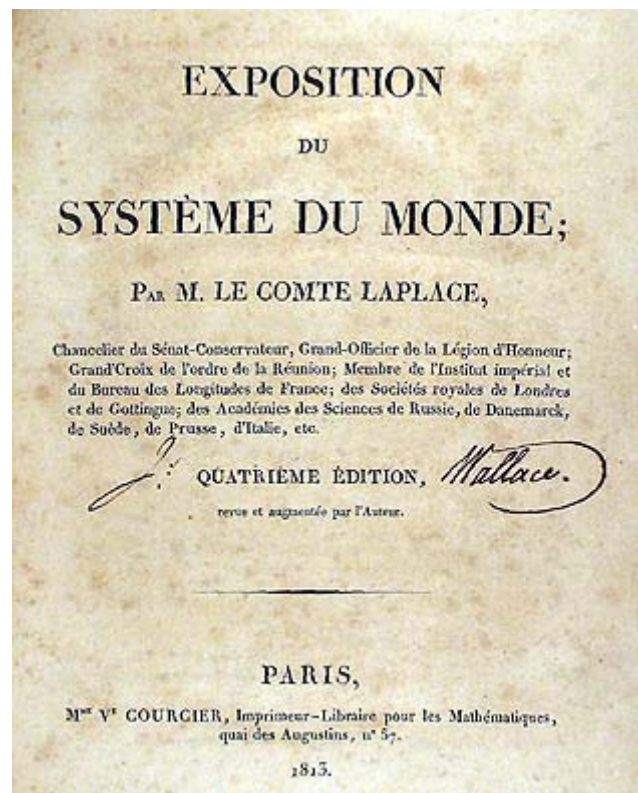
Zum Schluß möchte ich mich noch bei meinem Freunden, Bekannten und Kollegen bedanken, die mich mittelbar und unmittelbar während der Zeit der Erarbeitung dieser Buchreihe unterstützt haben.

M.Scholz

Herbst 2007

Entstehung des Sonnensystems

In den vorangegangenen Bänden sind in bedächtiger Ausführlichkeit die Objekte (mit Ausnahme der Sonne) behandelt worden, die in unserem Planetensystem zu finden sind. Bleibt nur noch zu klären, wie und woraus das alles einmal entstanden ist. Das Teilgebiet der Astronomie, welches sich u.a. mit dieser durchaus nicht uninteressanten Frage beschäftigt, ist die Kosmogonie – die Lehre von der Entstehung und Entwicklung der kosmischen Objekte. Es ist jedoch üblich, auch mythische Vorstellungen über die Entstehung der Welt, der Menschen, Pflanzen und Tiere, als „Kosmogonien“ zu bezeichnen. Im Abendland wurde über Jahrhunderte hinweg die Schöpfungsgeschichte, wie sie im Ersten Buch Mose aufgeschrieben ist (Genesis), als plausible und nicht zu hinterfragende „Kosmogonie“ anerkannt. Andere Völker und andere Zeiten hatten andere Kosmogonien. Ihnen allen ist gemeinsam, das sie überwiegend theistisch sind, meist sehr allgemeine Aussagen treffen und von irgendwelchen, mit wissenschaftlichen Methoden kaum zu fassenden Voraussetzungen ausgehen. Ihnen fehlt einfach das, was wir heute unter dem Begriff der „Wissenschaftlichkeit“ verstehen.



Der erste wirklich ernstzunehmende Versuch (die Anfänge, die mit DESCARTES (1596-1650) Wirbeltheorie (1630) begannen, einmal ausgenommen), die Entstehung des Sonnensystems auf einer streng naturwissenschaftlichen Grundlage zu erklären, geht auf eine Schrift des berühmten Königsberger Philosophen IMMANUEL KANT (1724-1804) zurück. In seinem Frühwerk „Allgemeine Naturgeschichte und Theorie des Himmels“ (erschienen 1755) entwickelt er ein qualitatives Bild der Planetenentstehung, das in manchem Detail durchaus modern anmutet. Er erkannte z.B. – um es einmal in heutiger Terminologie auszudrücken – die Bedeutung der Akkretion in Bezug auf das Wachstum zukünftiger Planeten aus kleinen „Planetenkeimen“. Ausgangspunkt für Kant's Überlegungen waren insbesondere die ihm bekannten, zuvor von RENE' DESCARTES (1596-1650) und GEORGES-LOUIS

LECLERC DE BUFFON (1707-1788) entwickelte Idee, daß unser Sonnensystem auf völlig natürlichem Wege – wie auch immer – entstanden ist und daß dieser Prozeß auch anderswo in unserer „Welteninsel“ stattfinden kann und stattgefunden hat. Er löste sich dabei von den in der damaligen Zeit sehr populären Katastrophentheorien (die in Bezug auf geologische Prozesse besonders von GEORGES CUVIER (1769-1832) erfolgreich propagiert wurden) und entwickelte völlig ohne Mathematik, aber mit durchaus profunden Kenntnissen der Newton'schen Mechanik eine graduelle Entwicklungstheorie des Planetensystems, die auch heute noch sehr modern anmutet. Das philosophisch eigentlich Interessante ist dabei, daß Kant für diese Theorie einen völlig materialistischen Ansatz wählte, in dem er entgegen dem Zeitgeist völlig auf einen göttlichen Schöpfungsakt verzichtet hat.

Unabhängig von KANT hat sich auch PIERRE-SIMON DE LAPLACE (1749-1827), der kurzzeitig Minister unter NAPOLEON BONAPARTE (1769-1821) war, mit diesem Themenkreis beschäftigt. In seiner „*Exposition du Systeme du Monde*“ entwickelte er Vorstellungen, nach der sich die Planeten aus sich ablösenden Ringen der Sonnenatmosphäre gebildet haben, während KANT von selbständig wachsenden Verdichtungen in einem „Urnebel“ ausging. Die progressiven Ideen beider Autoren wurden später zusammen mit weiteren Detailverbesserungen zur „Kant-Laplaceschen Nebularhypothese“ zusammengefaßt. Sie bildete die Grundlage zu weiteren Forschungen, die über viele Zwischenstufe zur heutigen modernen Planetenkosmogonie führte.

Eine wissenschaftliche Kosmogonie muß aus dem gegenwärtigen Zustand – z.B. unseres Planetensystems – auf dessen Entwicklungsgeschichte bis hinunter zu deren Anfängen schließen können. Die Schwierigkeit dabei ist, daß genügend komplexe Systeme im Laufe ihrer Entwicklung ihre Vergangenheit quasi „vergessen“ können, d.h. sie enthalten immanent in ihrem heutigen Zustand keine brauchbaren Informationen mehr, die kausal aus der Zeit ihrer Bildung herkommen. Bei den erdähnlichen Planeten handelt es sich offensichtlich um Himmelskörper, die in ihrer Frühgeschichte einmal vollständig aufgeschmolzen waren. Ihre chemischen Bestandteile haben sich entsprechend ihrer Dichte getrennt und bilden heute die deutlich unterscheidbaren Schichten Kern, Mantel und Kruste. Aus diesem differenzierten (mineralogischen) Aufbau lassen sich keine Schlüsse mehr (oder höchstens nur sehr wenige) ziehen über den „Stoff“, aus dem diese Planeten vor ihrer Aufschmelzung entstanden sind. Man kennt aber z.B. Meteorite, denen dieses Schicksal erspart geblieben ist. Anhand ihrer Struktur kann man deshalb viel besser auf die physikalischen Bedingungen zur Zeit der Planetenentstehung schließen als aus dem heutigen Erscheinungsbild eines Planeten wie z.B. der Erde. Aus diesem Grund ist die wissenschaftliche Untersuchung von meteoritischem Material eine besonders wichtige empirische Informationsquelle in der Kosmogonie des Planetensystems. Diese Informationen haben aber nur dann Wert, wenn sie im Kontext von Modellvorstellungen, die auf bekannten Naturgesetzmäßigkeiten beruhen, betrachtet werden. Oder anders ausgedrückt. Eine erfolgversprechende Methode besteht darin, plausible, mit Beobachtungstatsachen in Einklang stehende Anfangsbedingungen zu postulieren (z.B. anhand von Aufbau und Struktur galaktischer Molekülwolken), aus denen man versucht, durch mathematische Modellierung eine Ereignisabfolge zu rekonstruieren, deren Zwischenergebnisse wiederum mit Beobachtungsergebnissen verglichen werden können (z.B. Aufbau chondritischen Materials, Struktur und Eigenschaften zirkumstellarer Staubhüllen, heutige Struktur unseres und anderer Planetensysteme). Diese Herangehensweise wird im Allgemeinen als „deduktiv“ bezeichnet und wird in der kosmogonischen Forschung fast ausschließlich angewendet.

Eine andere, aber bedeutend schwierigere Methode besteht darin, aus dem heutigen Zustand quasi „zurückzurechnen“, um so an Informationen über den Anfangszustand zu kommen. Dieser als „Aktualismus“ bezeichnete Weg ist aber in der Praxis nur schwer begehbar, da – wie bereits erwähnt – im Laufe der Entwicklungsgeschichte immer nur Bruchstücke von Informationen über den vorhergehenden Zustand weitergegeben werden. Trotzdem lassen sich auf diese Weise wertvolle Erkenntnisse gewinnen, die sich wiederum zur Prüfung deduktiver Modelle eignen.

Das Hauptproblem der Kosmogonie des Sonnensystems besteht also darin, für einen faktischen Endzustand (wie er sich uns heute darstellt) einen Anfangszustand zu rekonstruieren und – was das eigentliche Problem ausmacht – zu zeigen, wie daraus über kausal aufeinanderfolgende Zwischenstufen letztendlich wieder – und zwar möglichst zwangsläufig - der Endzustand folgt. Zur Lösung dieses Problems werden mathematische Modelle entwickelt, die auf der Grundlage eines plausiblen und auch durch Analogiebetrachtungen gestützten Paradigmas diese Ereignisabfolgen zu berechnen gestatten. Das Paradigma besteht dabei darin, das man davon ausgeht, daß sowohl die Sonne als auch die Planeten (sowie alle anderen Körper des Sonnensystems) gemeinsam im Prozeß der Sternentstehung aufgrund des Gravitationskollapses einer instabil gewordenen kühlen Gas- und Staubwolke entstanden sind. Dieses Paradigma wird u.a. durch folgende Beobachtungen gestützt:

- Kühle Molekülwolken sind im Rahmen des kosmischen „Materialkreislaufs“ Ausgangspunkte für die Sternentstehung
- Beim Gravitationskollaps entstehen Protosterne, die von einer dichten Gas- und Staubhülle umgeben sind. Diese zirkumstellaren Staubscheiben können in Sternentstehungsgebieten (z.B. im Orion-Komplex) auch direkt beobachtet werden
- In Form von primitivem meteoritischem Material haben Proben aus dem solaren Nebel bis heute überdauert. Aus ihnen lassen sich durch Laboruntersuchungen die Entstehungsbedingungen rekonstruieren.
- Bei einer ganzen Anzahl von Sternen konnten Planeten nachgewiesen werden was darauf hindeutet, daß planetare Körper ein gewöhnliches Nebenprodukt der Sternentstehung sind.

Weiterhin orientieren sich die Modellvorstellungen nicht unbedingt an der Aufgabe, die Entstehung eines x-beliebigen Planetensystems zu erklären, sondern sie widmen sich vielmehr der Frage, wie unser eigenes Sonnensystem entstanden ist. Das ist auch legitim, da nur am Beispiel des Sonnensystems die Qualität eines Modells in der Konfrontation mit den Beobachtungsergebnissen beurteilt werden kann.

Aus diesem Grund sollte eine erfolgreiche Theorie u.a. eine Erklärung für folgende „Fakten“ liefern:

- Die Sonne enthält rund das 750 fache der Masse des Sonnensystems abzüglich der Sonnenmasse ($1.989 \cdot 10^{30}$ kg). Das sind mehr als 99.9% der Gesamtmasse.
- Die Planeten tragen zusammen mehr als das 200-fache des Eigendrehimpulses der Sonne
- Die Richtung des Eigendrehimpulses der Sonne (Rotationsachse) ist um $\sim 6^\circ$ gegenüber der Normalen der mittleren Bahnebene aller Planeten geneigt.
- Alle Himmelskörper mit Ausnahme der Kometen haben näherungsweise coplanare Bahnen, die zumeist eine geringe Exzentrizität aufweisen und die gleiche Drehrichtung haben wie die Drehrichtung der Sonnenrotation (prograde Bewegung)

- Die meisten Planeten besitzen eine Rotationsachse, die annähernd senkrecht auf der Bahnebene steht
- Es gibt eine klare Trennung zwischen erdähnlichen und jupiterähnlichen Planeten sowie den größeren Kuiper-Objekten
- Die terrestrischen (inneren) Planeten sind an volatilen Elementen verarmt während die äußeren (Gas-) Planeten eine Elementezusammensetzung aufweisen, die in etwa dem der Sonne entspricht.
- Es existieren verschiedene Typen undifferenzierter Meteorite aus der Zeit der Planetenentstehung. Ihr mineralogischer Aufbau, ihre Struktur und die daraus ableitbare thermische Geschichte sind zu reproduzieren.
- Die ältesten, im solaren Nebel gebildeten Minerale, sind ca. 4.56 Milliarden Jahre alt.

Diese Vorgehensweise hat aber auch ihre Schwierigkeiten. Was im Sonnensystem im Rahmen einer kosmogonischen Theorie als „logisch“ erscheinen mag – z.B. daß auf die erdähnlichen „Gesteinsplaneten“ die Gasplaneten und zuletzt die Kuiper-Objekte aus mehrheitlich gefrorenen Eis folgen – muß so nicht allgemeingültig sein. Eine große Zahl der bei anderen Sternen entdeckten Planeten (hauptsächlich Gasplaneten der „Jupiterklasse“) hält sich offensichtlich nicht an diese „Regel“. Auch ist es eine Tatsache, daß die in unserem Sonnensystem weitgehend eingehaltene „Regel“, daß Planetenbahnen nur eine geringe Exzentrizität haben (d.h. weitgehend kreisförmig sind), bei extrasolaren Planetensystemen offensichtlich so nicht gilt. Warum das so ist, muß natürlich auch eine Theorie der Planetenentstehung zu klären versuchen. Vielleicht stellt in dieser Beziehung der strukturelle Aufbau unseres eigenen Planetensystems eher eine Ausnahme als die Regel dar, wie gelegentlich angemerkt wird.

Im Folgenden kann nur eine relativ bescheidene „qualitative“ Beschreibung der Prozesse, die nach modernen Vorstellungen zur Entstehung eines Planetensystems in der Art unseres Sonnensystems geführt haben, gegeben werden. Nicht nur in Bezug auf Details sind dabei noch viele Probleme zu lösen und Kontroversen auszudiskutieren. Zu nennen ist in diesem Zusammenhang z.B. die noch unbeantwortete Frage, ob sich unser Planetensystem quasi ungestört aus einer kollabierenden Gas- und Staubwolke entwickelt hat (wie im Folgenden angenommen) oder ob bei diesem Prozeß neben der Protosonne noch ein weiterer, etwas massereicherer Protostern mit beteiligt war. Letztere Theorie wurde besonders von M.M.WOOLFSON et.al. entwickelt, wobei es ihnen durchaus gelang, damit einige Besonderheiten des Sonnensystems zu reproduzieren.

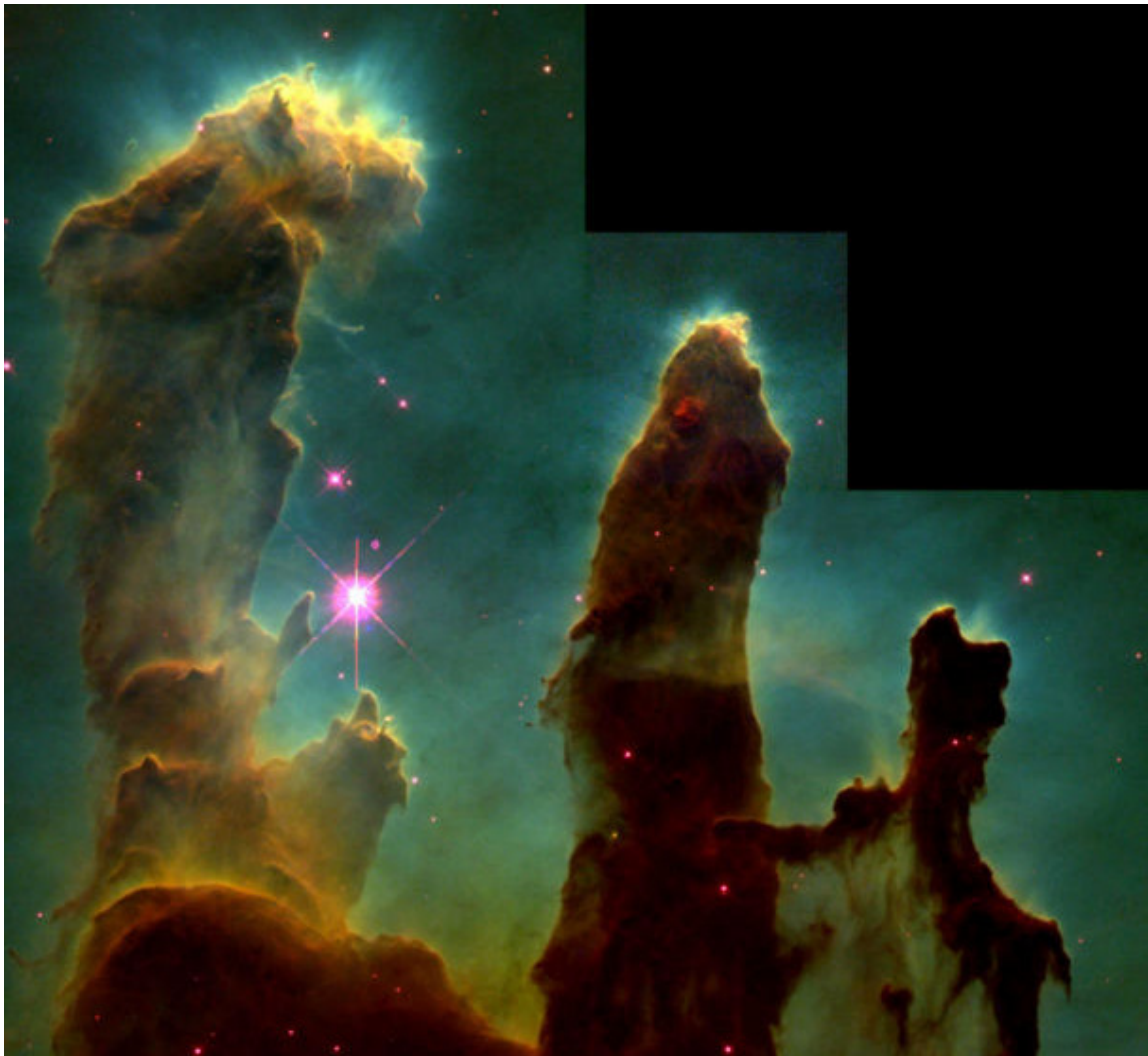
Sternentstehung in Molekülwolken (massearme Sterne)

Wasserstoff ist das häufigste Element im Kosmos. Während man es auf der Erde hauptsächlich als Oxid kennt, ist es als dünnes Gas in der Galaxis überall präsent. Man findet es in Form einer dünnen, ungefähr 100 pc dicken Schicht über die gesamte galaktische Ebene verteilt. In der Nähe heißer Sterne wird es ionisiert und bildet sogenannte HII-Regionen, die sich in Form von schwachleuchtenden Emissionsnebeln bemerkbar machen. Neutraler Wasserstoff ist dagegen nicht sichtbar, kann aber aufgrund einer speziellen Linienemission bei einer Wellenlänge von 21 cm radioastronomisch sehr gut beobachtet werden. In sehr kalten Regionen und weitab von intensiver ionisierender UV-Strahlung, also besonders in kosmischen Dunkelwolken, können sich aus dem atomaren Wasserstoffgas (man vermutet in Wechselwirkung mit dem Staub) Wasserstoffmoleküle bilden. Da Staubteilchen die UV-Strahlung der Sterne sehr gut absorbieren, ist es nicht mehr in der Lage, die schwachen Molekülbindungen aufzubrechen. Wolken, die hauptsächlich aus Wasserstoffmolekülen (neben vielen anderen Molekülarten, die im Vergleich dazu jedoch nur in Spuren vorkommen) bestehen, bezeichnet man als Molekülwolken. Sie lassen sich mit den modernen Methoden der Molekülspektroskopie beobachten, in dem man die mit dem Wasserstoff assoziierten Moleküle wie CO, CS, H₂O und H₂CO nachweist. Wasserstoffmoleküle besitzen selbst keine Emissionslinien im Radio- und im Infrarotbereich (zumindest bei den geringen Temperaturen, wie sie in den Dunkelwolken herrschen), die sie verraten könnten. Ihre Abstrahlung im UV ist nur schwer zu beobachten, da UV-Licht im interstellaren Medium stark absorbiert wird. Auch die Strahlung, die sich aus dem Rotations-Schwingungsspektrum des Wasserstoffmoleküls ergibt und im Infraroten liegt ($\lambda = 77 \mu\text{m}$), ist aufgrund der relativ hohen Anregungsenergien ($T \sim 185 \text{ K}$) zur Untersuchung der kühlen molekularen Wasserstoffwolken nur bedingt geeignet (man findet sie z.B. in Sternentstehungsregionen, wo es Gebiete mit deutlich erhöhten Temperaturen gibt). Am wirkungsvollsten hat sich die Beobachtung eines „Stellvertretermoleküls“ des molekularen Wasserstoffs und zwar des Kohlenmonoxids (CO), erwiesen. Dieses Molekül ist sehr häufig ($\text{CO}/\text{H}_2 \gg 10^{-4}$) und tritt mit den Wasserstoffmolekülen in Wechselwirkung (Stoßanregung), so daß man aus deren Emissionsverhalten auf die Eigenschaften des umgebenden Wasserstoffgases schließen kann. Insbesondere läßt sich aus der Linienbreite der CO-Linie auf die Dichte der Wasserstoffmoleküle und damit letztendlich auf die Masse der Molekülwolke schließen.

Molekülwolken sind in der galaktischen Scheibe weit verbreitet. Man erkennt das deutlich an den Dunkelwolken, die man durchaus als Indikatoren für Molekülwolken ansehen kann. Sie bilden z.T. riesige Wolkenkomplexe mit einer Ausdehnung von teilweise über 100 pc (Riesenmolekülwolken, GMC -> *Giant Molecular Clouds*). Die Gasdichte liegt dabei im Durchschnitt bei wenigen 100 (diffuse Molekülwolken) bis zu 10^6 Molekülen pro Kubikzentimeter (GMCs). Die meisten Molekülwolken sind kleiner (0.5 .. 50 pc), im Bereich der Spiralarme angeordnet und voneinander durch ein dünneres und heißes ($T \sim 8000 \text{ K}$) atomares „Zwischenwolkengas“ getrennt. Ihre Massen liegen im Bereich zwischen 10 und 10^6 Sonnenmassen, wobei man ab einer Masse von $10^4 M_{\odot}$ bereits von Riesenmolekülwolken spricht. Beispiele für besonders gut erforschte Molekülwolkenkomplexe sind die Orion-Riesenmolekülwolke und die Rho Ophiuchus-Molekülwolke. In Letzterer hat man beispielsweise die Entstehung massearmer Sterne beobachten können.

Sternentstehung in Molekülwolken

Die Molekülwolken sind nicht gleichmäßig mit Gas gefüllt, sondern bilden fraktalähnliche Strukturen in Form von Verklumpungen und Filamenten, die sich durch eine jeweils leicht unterschiedliche Gasdichte auszeichnen. In dieses kühle Gas (die Temperatur beträgt lediglich 10 bis max. 50 K) sind mikrometergroße Staubteilchen eingelagert, deren Masse aber höchstens 1/100 der Gasmasse pro Volumeneinheit ausmacht. Sie stammen aus Supernovaexplosionen oder wurden durch intensive „Sternwinde“ von kühlen Riesensternen abgeblasen. Diese Staubteilchen („interstellarer Staub“) haben die Eigenschaft, daß sich auf ihrer Oberfläche Atome und Moleküle des interstellaren Mediums niederschlagen. Man kann auch sagen, daß sie als Kondensationskeime für z.T. recht komplexe Moleküle dienen, die darauf durch katalytische Reaktionen entstehen. Man vermutet deshalb, daß interstellare Staubpartikel einen „Eismantel“ besitzen, in dem beispielsweise auch organische Moleküle eingelagert sind. Das erklärt den überraschenden Befund, daß in manchen Molekülwolken bestimmte Elemente (z.B. C, Al, Na, Ca) scheinbar seltener auftreten als erwartet. Diese Gas- und Staubwolken bilden das Ausgangsmaterial für neue Sternengenerationen.



Hubble-Aufnahme einer Sternentstehungsregion im Bereich von M 16 („Adlernebel“). Die hohe Opazität des Nebels wird durch fein verteilte Silikat- und Kohlenstoffpartikel hervorgerufen während die groteske Form der „Staubsäulen“ durch die Erosion der Molekülwolke durch die UV-Strahlung junger Sterne entstanden ist. Das Alter der jüngsten Sterne in diesem Wolkenkomplex wird auf 50000 Jahre geschätzt.

Im Folgenden soll weitgehend qualitativ die Frage erörtert werden, wie aus solch einer Wolke Sterne von der Art unserer Sonne entstehen. Bei massereichen Sternen (mit $M \gg 3 M_{\odot}$) sieht das Szenario jedoch etwas anders aus und soll deshalb an dieser Stelle nicht weiter behandelt werden.

Instabilitäten und Gravitationskollaps

Es gibt mehrere Möglichkeiten, daß in einer Gaswolke Instabilitäten entstehen. Eine lokale Temperaturenniedrigung kann z.B. bereits zu einer lokalen Dichteerhöhung führen die ausreicht, daß die davon ausgehende Gravitationsanziehung den Gasdruck in der Umgebung überwiegt und es zu einem sich selbst verstärkenden Kollaps kommt, der die gesamte Gaswolke mitreißt. Auch die Stoßwelle, die von einer Supernovaexplosion ausgeht, kann entlang ihrer Stoßfront – wenn sie auf eine Molekülwolke trifft – zu derartigen Instabilitäten führen, die sich rasch zu kollabierenden Teilwolken entwickeln. Aus bestimmten mineralogischen Eigenheiten von Meteoritenbestandteilen (z.B. den in den CAI's im Allende-Meteoriten enthaltenen Mikrodiamanten) schließt man übrigens, daß auch die Entstehung unseres Sonnensystems vor 4.6 Milliarden Jahren wahrscheinlich durch eine Supernovaexplosion ausgelöst oder zumindest beeinflußt worden ist (R.CHEVALIER, 2000).

Eine weitere Ursache für Instabilitäten können auch starke Sternwinde benachbarter Riesensterne sein. Im Bereich des Orionnebels gibt es z.B. dafür Anzeichen.

Damit eine Instabilität in einer Gas- und Staubwolke auch wirklich zu einem Gravitationskollaps führt, muß sie dem sogenannten Jeans'schen Kriterium (JAMES HOPWOOD JEANS, 1877-1946) genügen. Es läßt sich relativ leicht plausibel machen.

Angenommen, eine Gaswolke geringer Dichte $\rho = n \mu m_g$ (n Teilchenzahl pro Volumenelement, μ mittleres Molekulargewicht, m Atom- bzw. Molekülmasse) und der gleichmäßigen Temperatur T befindet sich im thermodynamischen Gleichgewicht. Bei einer lokalen Dichteerhöhung vergrößert sich die Masseanziehung in diesem Gebiet was sich in einer Vergrößerung des Gasdrucks äußert. Die Frage ist nun, unter welchen Bedingungen eine allgemeine Kontraktion der Gaswolke einsetzt. Das ist offensichtlich dann der Fall, wenn der Gasdruck (in Form der thermischen Energie E_{therm}) die Eigengravitation (E_{grav}) nicht mehr ausgleichen kann. Nach dem Virialsatz läßt sich diese Bedingung vereinfacht wie folgt formulieren (d.h. unter Vernachlässigung der Eigenrotation der Gaswolke,):

$$2 E_{therm} + E_{grav} < 0 \quad [1.1]$$

Die Ungleichung (1.1) wird als Jeans-Kriterium bezeichnet.

Rechnet man die Energieanteile aus, dann kann bei gegebener Masse M der Radius einer Gaswolke abgeschätzt werden, bei der sie zwangsläufig instabil wird:

$$R_{Jeans} = \frac{\alpha \mu G M}{3 RT} \quad [1.2]$$

(R Gaskonstante = $8.31 \cdot 10^3 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$)

Dieser Radius ist der Jeans-Radius. α ist eine Konstante der Größenordnung 1, die gewisse Interna der Gaswolke beschreibt.

Für die „Jeans-Masse“ erhält man

$$M_{Jeans} = \left(\frac{5kT}{Gm} \right)^{\frac{3}{2}} \left(\frac{3}{4\pi\rho} \right)^{\frac{1}{2}} \quad [1.3]$$

wobei m die Teilchenmasse und ρ die Gasdichte ist. Eine nichtrotierende Gaswolke wird demnach instabil, wenn

$$M > M_{Jeans}$$

gilt. Im Verlauf der Kontraktion nimmt die Gasdichte zu, was nach (1.3) mit einer Verkleinerung der Jeans-Masse verbunden ist. Das bewirkt, daß gravitativ wirksame Wolkenbereiche, deren Massen ursprünglich unter der Jeans-Masse lagen, nun ebenfalls instabil werden und kollabieren. Aus Dichteinhomogenitäten können demnach in den interstellaren Molekülwolken Wolkenkerne entstehen, die weiter zerfallen (Fragmentation) bis in ihnen die Teilchenzahldichte einige 10^5 Wasserstoffmoleküle pro Kubikzentimeter erreicht. Auf diese Weise entstehen zahlreiche Teilfragmente mit Massen zwischen 0.1 und 100 Sonnenmassen. Dabei erwartet man, daß während der Kontraktion der Gasdruck ansteigt und irgendwann den Kollaps stoppt. Da das nicht der Fall ist, muß es effektive Kühlungsmechanismen geben die gewährleisten, daß ein großer Teil der Kontraktion überwiegend isotherm erfolgt. Die entscheidende Rolle, um diese „Thermische Instabilität“ während des Kollapses beizubehalten, spielen die eingelagerten Staubpartikel sowie eine Anzahl von bestimmten Molekülen. Im Prozeß der Kühlung wird die kinetische Energie der Gasteilchen in „innere“ Energiefreiheitsgrade der Stoßpartner überführt (z.B. in Schwingungs- und Rotationszustände von Molekülen), welche die ehemals thermische Energie kurzzeitig speichern um sie danach in Form von elektromagnetischer Strahlung wieder abzugeben. In dem optisch dünnen Gas können die Photonen ungehindert in den interstellaren Raum entweichen wobei sie diese Energie mitnehmen und damit aus dem System entfernen. Neben den Staubteilchen (die kontinuierliche Infrarotstrahlung abgeben) haben sich Kohlenmonoxidmoleküle, Wassermoleküle sowie molekularer Sauerstoff als sehr effektive Kühlgase erwiesen.

Die Ursprungswolken besitzen gemittelt über alle Teilchen einen effektiven Drehimpuls, der im Verlauf der Kontraktionsphase immer mehr an Bedeutung gewinnt. Da der Drehimpuls erhalten bleibt, setzt ab einer gewissen Größe der Wolkenkerne eine Rotation ein, die den Kollaps normalerweise beendet, sobald die Zentrifugalkräfte die Gravitation ausgleichen.

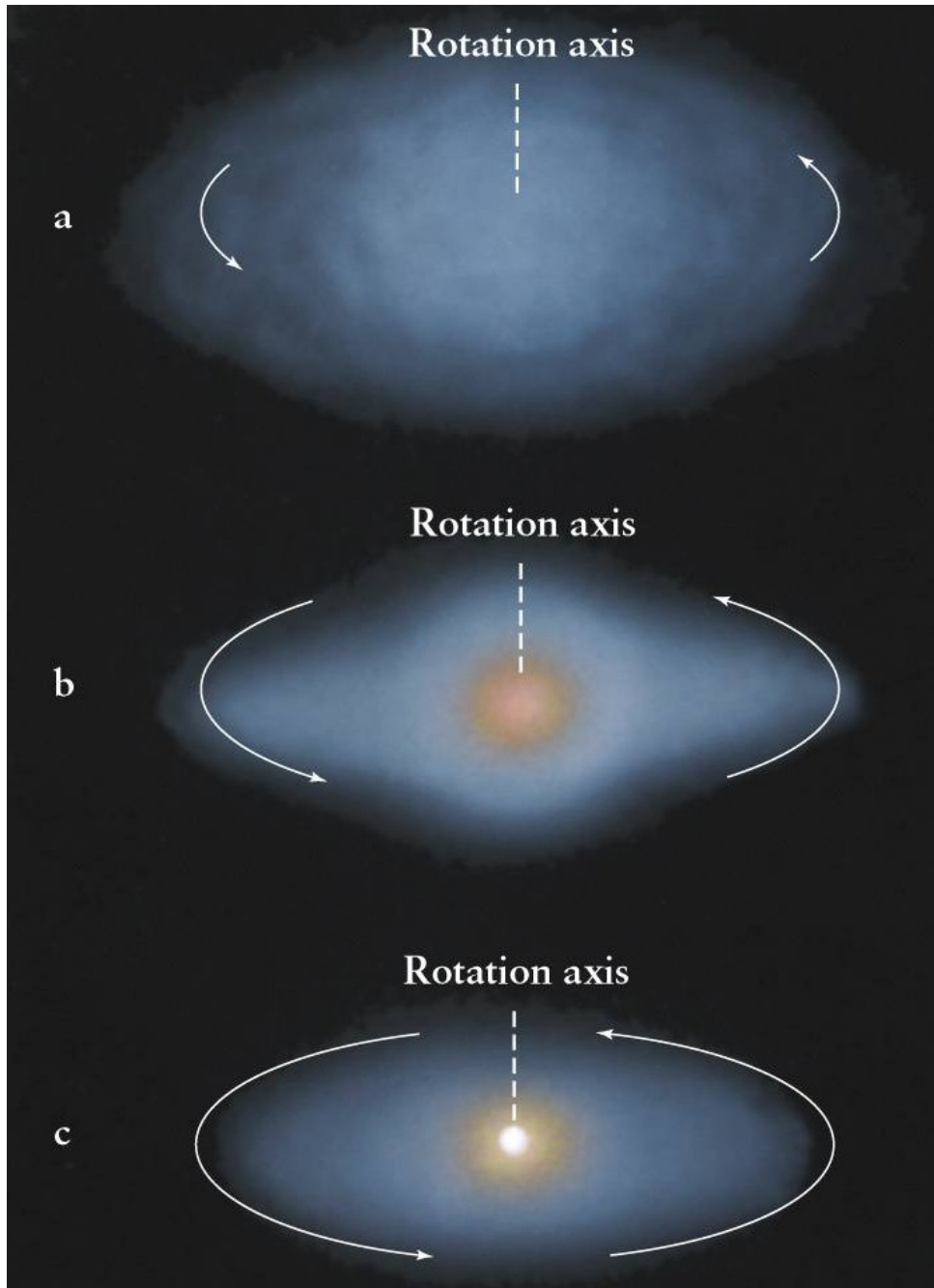
In diesem Fall muß (1.1) modifiziert werden:

$$2(E_{therm} + E_{rotation}) + E_{grav} < 0 \quad [1.4]$$

woraus

$$M_{\text{jeans}} = \left(\frac{5kT}{Gm} + \frac{R^2 \omega^2}{G} \right)^{\frac{3}{2}} \left(\frac{3}{4\pi\rho} \right)^{\frac{1}{2}} \quad [1.5]$$

folgt. Hieraus erkennt man, daß die Rotation einer Gaswolke den Kollaps erschwert und sogar ganz verhindern kann.



- a) eine langsam rotierende Wolke aus interstellarem Gas- und Staub beginnt zu kontrahieren
b) durch die Rotation flacht sich die Wolke zu einer Scheibe ab
c) im Zentrum der Scheibe bildet sich ein Protostern (Grafik nach Kaufmann, Universe, 2000)

Gelingt es jedoch der Wolke auf irgendeine Art und Weise Drehimpuls abzuführen oder umzuverteilen, dann setzt sich der Gravitationskollaps fort. Das geschieht z.B. durch die Wechselwirkung mit dem interstellaren Magnetfeld, durch eine Fragmentation in Einzelwolken oder durch die Ausbildung eines Kerns („*Bulk*“) mit rotierender, abgeflachter Gasscheibe. Im letzteren Fall konzentriert sich der Drehimpuls auf die rotierende Scheibe, während der Kern ungehindert weiter kollabieren kann. Die Ursache für die Scheibenbildung liegt u.a. darin, daß die Zentrifugalkraft nur senkrecht zur Rotationsachse wirkt. Das bedingt, daß der Materieeinfall parallel zur Rotationsachse nicht beeinflußt wird, während der Materieeinfall senkrecht zur Rotationsachse erschwert ist. Dieses Szenario führt übrigens im Zuge der Planetenentstehung zu der erwarteten Drehimpulsverteilung, wie man sie auch im Sonnensystem vorfindet.



Hubble-Aufnahmen von protoplanetaren Scheiben im Orionnebel

Ein weiteres stabilisierendes Element das verhindert, daß große Molekülwolken bei einer geringfügigen Störung sofort in sich zusammenfallen, sind die sie durchsetzenden interstellaren Magnetfelder. Durch die Beobachtung von Synchrotronstrahlung weiß man, daß das Milchstraßensystem mit einem schwachen Magnetfeld durchsetzt ist, wobei in der galaktischen Scheibe die Magnetfeldlinien in etwa der Spiralstruktur folgen. Anhand von Messungen der Faraday-Rotation (Polarisation) der Radiostrahlung, die von galaktischen und extragalaktischen Radioquellen stammt und die galaktische Scheibe durchqueren, sowie der Linienaufspaltung, die durch den Zeeman-Effekt verursacht wird (z.B. an der 21-cm Linie des neutralen Wasserstoffs), läßt sich die Stärke \mathbf{B} dieses Magnetfeldes abschätzen. Man erhält aus diesen Beobachtungen Werte zwischen 0.1 und 1 nT. In dichten Gaswolken erhöht sich dieser Wert sogar auf bis zu 5 μT . Das ist ein Zeichen dafür, daß das Magnetfeld mit dem Gas in Wechselwirkung tritt. Da Magnetfelder nur geladene Teilchen in ihrer Bewegung beeinflussen, koppelt es in den Molekülwolken an die wenigen darin enthaltenen Ionen und legt deren Bahn fest. Indem diese Ionen gegen die reichlich vorhandenen Moleküle stoßen, überträgt sich ein Teil ihrer kinetischen Energie auf diese neutrale Gaskomponente. Das ist auch der Grund, warum Molekülwolken kaum unter 10 K abkühlen. Dieses Magnetfeld ist, genauso wie eine Rotation,

in der Lage, einen Gravitationskollaps zu stabilisieren bzw. den Kollaps zu verzögern. Mehr noch, von dessen Größe kann es abhängen (und sie nimmt zu, wenn eine Molekülwolke kontrahiert), ob aus Wolkenkernen massereiche- oder massearme Sterne entstehen.

Die Zeitdauer, in der eine Gaswolke ungehindert – quasi im freien Fall – kontrahiert, nennt man die Frei-Fall-Zeitskala. Für den sphärisch-symmetrischen Fall kann man aus der Bewegungsgleichung für ein Teilchen, daß sich in radialer Richtung auf das Massezentrum zu bewegt, folgende Beziehung ableiten:

$$t_{ff} = \left(\frac{3\pi}{32 \rho_0 G} \right)^{\frac{1}{2}} \quad [1.6]$$

Interessant ist, daß in diese Beziehung als Variable nur die Ausgangsdichte ρ_0 eingeht. Wenn der Kollaps nicht aufgehalten wird, würden alle Gasmoleküle und Staubteilchen zur gleichen Zeit im Zentrum ankommen...

Wie man sieht, geht – in kosmischen Maßstäben gemessen – ein Kollaps fast augenblicklich vonstatten. Man rechnet, daß die Frei-Fall-Phase des Gravitationskollapses nur einige $10^4 - 10^5$ Jahre dauert. Deshalb ist es auch außerordentlich schwierig, Wolken, die sich in diesem Stadium befinden, zu beobachten. Es gibt gegenwärtig in der Milchstraße einfach nicht genug davon...

Wie bereits erwähnt, erfolgt der Kollaps in dieser Phase weitgehend isotherm, da es eine ganze Anzahl effektiver Kühlmechanismen gibt, welche die dabei freigesetzte potentielle Gravitationsenergie in elektromagnetische Strahlung umwandeln. Erst wenn das Medium „undurchsichtig“, also optisch dick wird, erfolgt in den inneren Regionen der Gas- und Staubwolke ein merklicher Temperaturanstieg. Ab diesem Moment beginnt die Bildung des Protosterns.

Entstehung des Protosterns (langsame Kontraktionsphase)

Durch die eingelagerten Staubpartikel wird die Temperaturerhöhung am Ende der Frei-Fall-Phase noch eine zeitlang effektiv begrenzt, indem sie die thermische Energie in Infrarotstrahlung konvertieren. Erst wenn die Staubdichte im Bulk-Bereich so groß wird, daß die Abstrahlung aufgrund der ansteigenden Opazität merklich blockiert, kommt es zwangsläufig zu einem Wärmestau. Die thermische Energie kann nicht mehr in den freien Weltraum abgestrahlt werden. Es beginnt die adiabatische Phase der Protosternbildung. Temperatur und Dichte nehmen schlagartig zu. Als Ergebnis entsteht im Bulk ein Gleichgewichtszustand, bei dem der Gasdruck die Gravitationsanziehung ausgleicht. Dadurch, daß der Kernbereich in den Zustand des hydrodynamischen Gleichgewichts gelangt, wird der Kollaps in diesem Bereich weitgehend gestoppt. Natürlich geht auch in diesem Zustand der Materieeinfall weiter. Die Oberfläche des Kerns heizt sich auf, was bei einer Temperatur von über 2000 K zur Dissoziation der Wasserstoffmoleküle führt. Diese Reaktion ist endotherm, da zur Trennung der beiden Wasserstoffatome Energie aufgewendet werden muß. Das entspricht einer Kühlung und führt zu einer Verringerung des Gasdrucks, der den Kern weiter schrumpfen läßt. Da Temperatur und Dichte weiter ansteigen, werden die Bedingungen für die Ionisation der Wasserstoffatome laufend besser. Bei diesem Vorgang wird dem kollabierenden Kern weiter Energie entzogen und zwar solange, bis das gesamte

Wasserstoffgas ionisiert ist. Erst wenn das der Fall ist, gelangt der Kern wieder in den Zustand des hydrodynamischen Gleichgewichts. Im Kernbereich erreicht die Temperatur einen Wert von ca. $2 \cdot 10^4$ K und die Dichte von $\sim 1 \cdot 10 \text{ kg/m}^3$. Er ist jetzt zu dem geworden, was man als einen Protostern bezeichnet.

Akkretionsphase

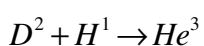
Der Protostern als gravitatives Zentrum der aus dem Kollaps der Molekülwolke hervorgegangenen zirkumstellaren Scheibe bzw. Hülle nimmt weiter Material auf, das radial mit Überschallgeschwindigkeit auf seine „Oberfläche“ aufprallt. Diesen Vorgang bezeichnet man als Masseakkretion und die Menge an Masse, die pro Zeiteinheit auftrifft, als Akkretionsrate. An der Stelle, wo das einfallende Gas auf Unterschallgeschwindigkeit abgebremst wird, entsteht eine Stoßfront („*accretion shock*“), die sich aufgrund der Konversion der kinetischen Energie des einströmenden Gases in thermische Energie stark aufheizt. Die Akkretionsstoßfront ist für rund 10^5 Jahre eine Quelle von intensiver Infrarotstrahlung und bestimmt die Leuchtkraft des Protosterns. Danach ist entweder die gesamte Hülle akkretiert oder die im Protostern gezündeten Kernfusionsprozesse liefern genügend Strahlung, um die Staubhülle relativ schnell von Innen her aufzulösen.

Die in der Stoßfront emittierte Strahlung wird durch den Staub in den weiter außen liegenden Scheibenbereichen weitgehend absorbiert. Das führt zur Ausbildung eines radialen Temperaturgradienten, der im Wesentlichen die physikalischen und chemischen Eigenschaften der zirkumstellaren Scheibe bzw. Staubhülle bestimmt.

Bei der Akkretion erhöht sich zwangsläufig der Drehimpuls des Protosterns. Man erwartet, daß sich seine Rotationsgeschwindigkeit immer weiter erhöht bis er quasi irgendwann einmal auseinanderfliegt. Da das nicht geschieht, muß es auch hier effektive Mechanismen geben, die den Eigendrehimpuls des Protosterns wirksam begrenzen indem kontinuierlich Eigendrehimpuls in den Bahndrehimpuls der Scheibe überführt wird. Zur Lösung dieses Drehimpulsproblems gibt es verschiedene Ansätze, die z.T. sehr komplex sind. Zu nennen ist z.B. die Wechselwirkung von Magnetfeldern mit den leitfähigen Plasmen in der Nähe des Protosterns sowie turbulente Reibungsprozesse (Viskosität).

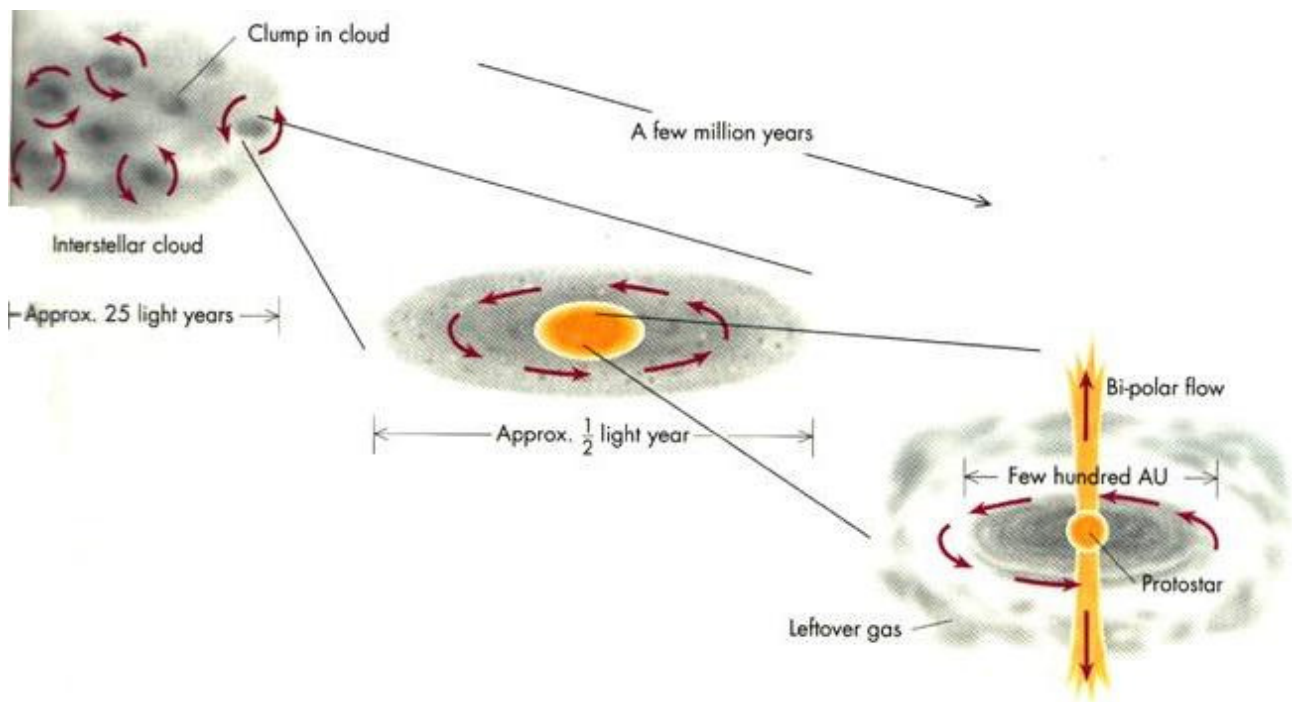
In diesem Zusammenhang müssen unbedingt die bipolaren Ausflüsse erwähnt werden, die bei manchen zirkumstellaren Scheiben auftreten. Darunter versteht man Jet-artige Materieströme in Richtung der Rotationsachse (nach „oben“ und nach „unten“ in Bezug auf die Scheibenebene – deshalb „bipolar“), die Geschwindigkeiten bis zu 300 km/s erreichen. Ihre Entstehung und wie sie im Detail funktionieren, ist noch Gegenstand intensiver Forschung.

Infolge der Akkretion nimmt die Masse des Protosterns weiter zu und nach einer gewissen Zeit werden im Zentralbereich Temperaturen von ca. 10^6 K erreicht. Das ist gerade die Temperatur, wo das sogenannte „Deuterium-Brennen“ einsetzt:



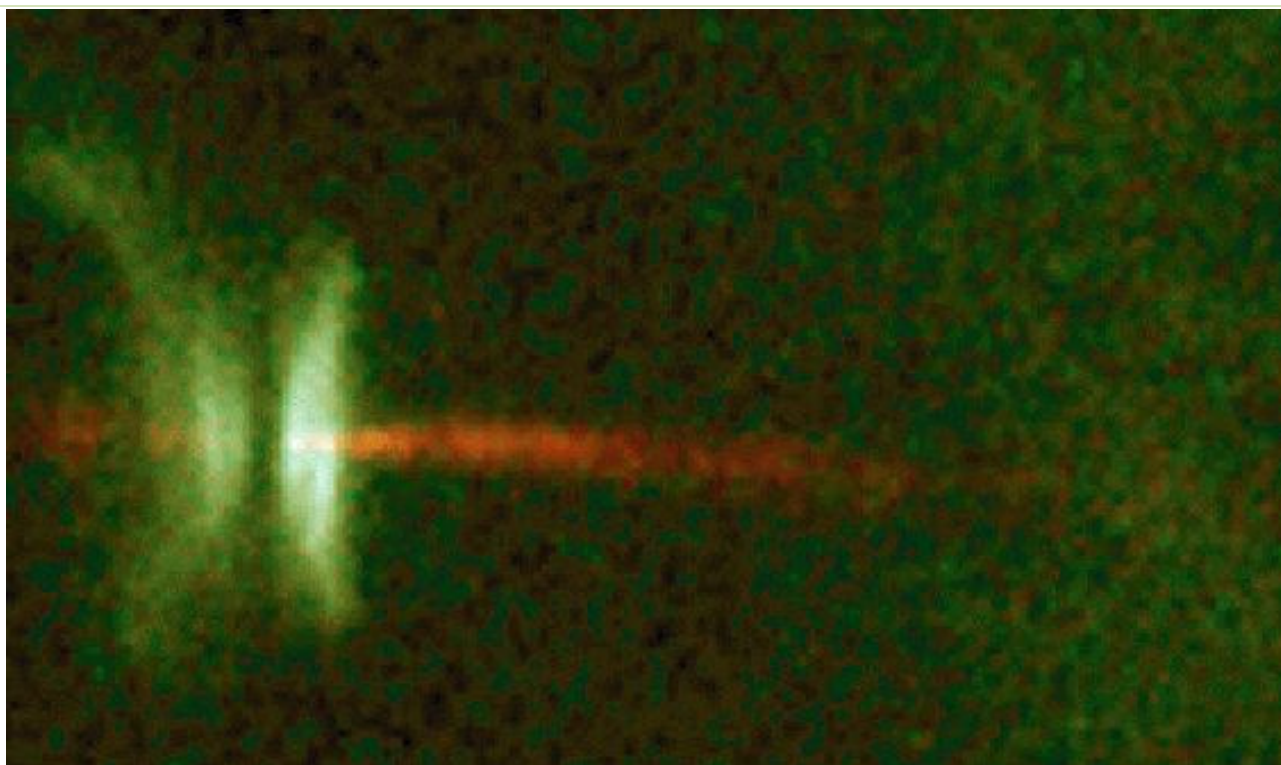
Entstehung des Sonnensystems

Die dabei freiwerdende Energie kann jedoch nicht mehr allein durch Strahlung nach außen transportiert werden. Es setzt vielmehr Konvektion ein, die den gesamten Stern ($M < M_{\odot}$) oder zumindest eine ausgedehnte Hülle ($M > M_{\odot}$) permanent umwälzt. Auf diese Weise wird das im Kern verbrauchte Deuterium immer wieder durch das in die Oberfläche durch Akkretion eingetragene Deuterium ersetzt und damit eine kontinuierliche Energieproduktion gewährleistet. Protosterne, die sich in diesem Stadium befinden, bezeichnet man als T-Tauri-Sterne. Sie zeichnen sich durch eine schnelle Rotation und durch starke Magnetfelder aus. Letztere sind – in Wechselwirkung mit der Scheibe – die Ursache für die bereits erwähnten bipolaren Ausflüsse. Auch vermutet man, daß durch diese Magnetfelder verursachten „Sternflecke“ mit ein Grund für ihren unregelmäßigen Lichtwechsel (zu beobachten, wenn sie in T-Assoziationen „frei“, also außerhalb einer Staubhülle, im Raum stehen) sind. Außerdem zeigen T-Tauri-Sterne einen ausgeprägten UV-Exzeß. Er äußert sich darin, daß der Energiefluß unterhalb einer Wellenlänge von 200 nm bis zu 10000-mal größer ist als bei der heutigen Sonne.



Schematische Darstellung der Entwicklung einer bipolaren Gas- und Staubscheibe

Nachdem im Zentralbereich des Protosterns 10 Millionen Grad erreicht sind, setzt schließlich das „Wasserstoffbrennen“ ein. Innerhalb einer Stabilisierungsphase von einigen 10 Millionen Jahren entwickelt sich ab diesem Moment der Protostern (soweit seine Masse $> 0.08 M_{\odot}$ ist) zu einem normalen Hauptreihenstern. Das ist auch das endgültige Ende der Gas- und Staubscheibe.



HH 30 ist eine Staubscheibe in der Taurus-Auriga-Region. Deutlich ist der bipolare Ausfluß dieser zirkumstellaren Staubscheibe zu erkennen. Die Scheibe selbst (das innere dunkle Band) hat einen Radius von nur 150 AU, dem 4-fachen unseres Planetensystems.

Entstehung von Planeten in der zirkumstellaren Scheibe

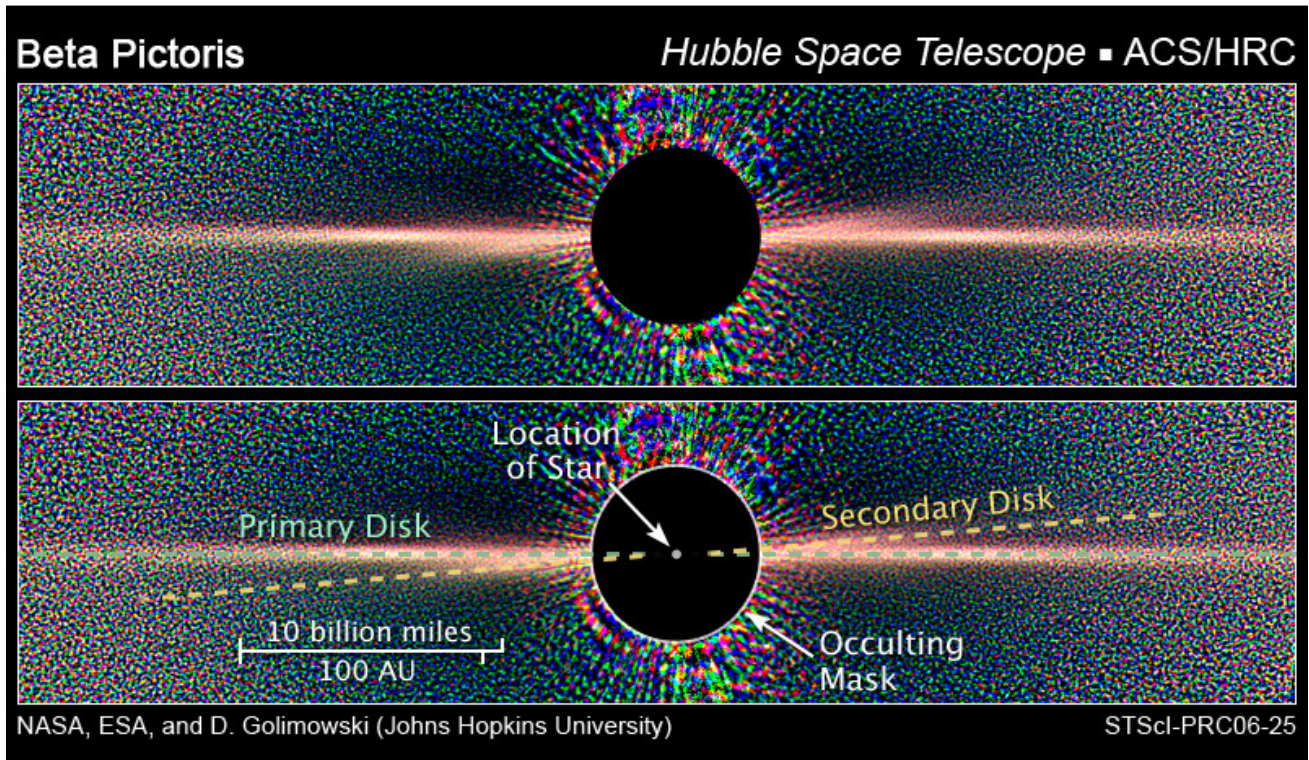
Der Schlüssel zur Beantwortung der Frage, wie Planeten um massearme, sonnenähnliche Sterne entstehen, liegt bei den zirkumstellaren Scheiben. Sternbildung und Planetenentstehung gehören nach allem, was wir heute wissen, zusammen. Die spannende (und schwierige) Frage ist, wie aus dem Gas und dem 1% Staub darin (anfänglich in der Konsistenz, wie er etwa in Zigarettenrauch enthalten ist) innerhalb der relativ kurzen Zeitspanne, in der eine zirkumstellare Gas- und Staubscheibe existiert, so was wie die Erde entstehen konnte.

Zirkumstellare Scheiben sind keine statischen Gebilde. Sie machen während der rund 20 Millionen Jahre ihrer Existenz eine Entwicklung durch, die mit der Entwicklung des Protosterns in ihrem Zentrum eng verbunden ist. Mit Beginn der adiabatischen Kontraktionsphase baut sich ein Temperaturgradient entlang der Scheibenachse auf, der die physikalischen Bedingungen innerhalb der Scheibe bestimmt. Im Folgenden – da es um die Kosmogonie des Sonnensystems geht – soll diese zirkumstellare Gas- und Staubwolke in Anlehnung an KANT als „Sonnennebel“ bezeichnet werden.

Die Erforschung der Entstehung von Planeten ruht auf mehreren Säulen. Der Nachweis von mittlerweile über 200 Sternen, die (meist sehr massereiche) Exoplaneten besitzen, zeigt, daß Planetensysteme im Milchstraßensystem gar nicht so selten sind. Das wirft die noch unbeantwortete Frage auf, ob Planeten nicht immer im Prozeß der Sternbildung anfallen, wenn die Eigenschaften der zirkumstellaren Scheibe in einem bestimmten Parameterbereich liegen. Auf jeden Fall läßt sich aus der Statistik der Exoplaneten bereits ableiten, daß die Wahrscheinlichkeit, daß ein Stern Planeten besitzt,

mit dessen „Metallgehalt“ zunimmt. Danach sollten Sterne, die sehr alten Sternenerationen angehören – wie z.B. in Kugelsternhaufen – keine oder nur selten Planeten besitzen.

Staubscheiben um Sterne werden seit einigen Jahrzehnten mit den Methoden der optischen Astronomie (Hubble-Teleskop), der Infrarotastronomie und der Mikrowellenastronomie (Molekülspektroskopie) eingehend untersucht. Auf diese Weise haben die Astronomen wertvolles Beobachtungsmaterial gesammelt, das für die Bewertung theoretischer Modelle unumgänglich ist. Besonders hervorzuheben ist hier die Entdeckung von bipolaren Ausflüssen bei Herbig-Haro-Objekten und die Staubscheiben um T-Tauri-Sterne sowie um junge Hauptreihensterne wie β -Pictoris und α -Lyrae.



Gas- und Staubscheibe um den Stern Beta Pictoris. Ihr Durchmesser beträgt ~800 AU

Die komplexe Frage, wie aus mikrometergroßen Staubteilchen Planetesimale (dem Ausgangsmaterial für Planeten) entstehen, wird zunehmend experimentell angegangen. Dazu versucht man z.B. in speziellen Experimentieranordnungen die Bedingungen in dichten Staubscheiben zu simulieren, um zu sehen, wie aus einzelnen Staubteilchen Staubagglomerationen entstehen, wie sie mit dem umgebenden Gas wechselwirken und auf welche Weise sie zu makroskopischer Größe anwachsen. Auf diese Weise gewinnt man Daten, mit denen sich theoretische Modelle sukzessive verbessern lassen, in dem man realistische Parametrisierungen (z.B. für die Haftwahrscheinlichkeit von Staubpartikeln) vorgeben kann die auf anderen Wegen kaum zu erschließen sind. Um den Einfluß der irdischen Schwerkraft auszuschalten, wurden derartige Experimente z.B. auch bei Shuttle-Missionen durchgeführt (z.B. CODAG – „Cosmic Dust Aggregation Experiment“ der Universität Jena, 1998).

Informationen über die thermische Geschichte und den chemischen Aufbau im Sonnennebel sowie über die zeitliche Rangordnung verschiedener Kondensationsprozesse erhält man aus der Analyse von Meteoriten. Stichpunkte sind hier Altersbestimmung, Isotopenzusammensetzung, Verhältnis von

refraktiven zu volatilen Elementen, Kondensationsbedingungen verschiedener Minerale, Chondrenbildung etc. Da insbesondere primitive Chondrite ohne nennenswerte Veränderungen den Zustand, in dem sie entstanden sind, bis heute konserviert haben, sind sie ein wichtiges Untersuchungsobjekt in Bezug auf die Entstehung der Körper unseres Planetensystems. Im Abschnitt über den kosmogonischer Ursprung der Meteorite ist bereits ausführlich darüber berichtet worden.

Im Folgenden sollen die einzelnen Phasen der Planetenentstehung kurz beschrieben werden. Dabei ist zu bedenken, daß viele Details noch nicht geklärt sind und man erst am Anfang steht, die dabei auftretenden komplexen Vorgänge adäquat beschreiben zu können.

Kondensationsphase

Man kann davon ausgehen, daß die Verteilung der Elementhäufigkeiten im Sonnennebel weitgehend dem der heutigen Sonne entsprochen hat. Wasserstoff mit einem Anteil von 76% und Helium mit 22% bildeten die Hauptbestandteile. Alle anderen Elemente, die man in der Astrophysik gemeinhin als „Metalle“ bezeichnet, machen die restlichen 2% aus. Die Scheibenmaterie bestand also ursprünglich aus einem großen Gasanteil, dessen Bewegung die darin eingebetteten Staubpartikel (im Verhältnis $m_{\text{staub}} / m_{\text{gas}} \approx 1/100$) vollständig determinierte. Die Staubpartikel stammten entweder aus dem interstellaren Gas oder kondensierten zusammen mit verschiedenen Makromolekülen im dichten Gas der zirkumstellaren Scheiben aus. Da sich entlang der Scheibenachse ein Temperatur- und Druckgradient im Zuge der Protosternentstehung ausbildete, sind auch die Kondensationsbedingungen eine Funktion der Entfernung vom Scheibenzentrum. Es gab jedoch keine Unterschiede in der elementemäßigen Zusammensetzung in der zirkumstellaren Scheibe. Alle Elemente waren überall gleich gut durchmischt. In der Chemie ist jedoch eine deutliche Differenzierung zu erwarten, da es innerhalb des Sonnennebels stark unterschiedliche Umgebungsbedingungen in Bezug auf Temperatur und Druck gab. Während der adiabatischen Phase und insbesondere während der Akkretionsphase der protostellaren Wolke bildete sich eine radiale Struktur aus, die sich während dieser Zeit im Mittel kaum veränderte. In den äußersten Bereich herrschten noch weitgehend die Bedingungen, wie sie in dichten Molekülwolken üblich sind. Bewegt man sich weiter nach innen, dann nimmt die Gas- und Staubbichte zu und die Temperaturen steigen auf über 100 K. Der Staub, der in dieser Zone vorhanden ist, emittiert verstärkt Infrarotstrahlung, weshalb man diese Zone auch als „Staubphotosphäre“ bezeichnet. Bewegt man sich weiter in Richtung Protostern, dann steigen die Temperaturen weiter an bis sie an der „Staubzerfallsfront“ 2000 K übersteigen. Ab dieser Temperatur verdampfen alle Staubpartikel und es entsteht eine schmale Zone geringer Opazität, die man deshalb auch „Zone der Durchsichtigkeit“ nennt. Sie geht in die quasi undurchsichtige Gasphotosphäre und noch weiter innen in die Akkretionsstoßfront über, welche wiederum den Protostern abschirmt.

Die Planetenbildung ist im Bereich zwischen der Staubphotosphäre und der Staubzerfallsfront anzusetzen. Da sich der Temperaturgradient allmählich aufbaut, kondensieren in den einzelnen Zonen unterschiedliche Stoffe aus. Die Grenzfläche, wo auf der kühleren Seite das Auskondensieren volatiler Stoffe und auf der anderen Seite das der refraktären Stoffe überwiegt, wird manchmal auch als „Frostlinie“ bezeichnet. Sie wird nach Abschluß der Planetenbildung das innere vom äußeren Sonnensystem trennen. Unter „Kondensation“ soll in diesem Zusammenhang nicht nur eine Änderung

Entstehung des Sonnensystems

des Aggregatzustandes verstanden werden. Die Bildung von Molekülen wie Wasser (H_2O), Methan (CH_4) oder Ammoniak (NH_3) ist in diesem Sinne auch eine „Kondensation“ genauso wie die Bildung von Mineralkörnchen und Mineralaggregationen in den heißeren Gebieten des inneren Sonnennebels. Es ist klar, daß aufgrund der unterschiedlichen Kondensationstemperaturen verschiedener Stoffe eine chemische Differenzierung innerhalb der Staubscheibe eintreten muß. Man kann das noch heute an den verschiedenen Typen chondrischer Meteorite nachvollziehen.

Die kondensierten Stoffe liegen in Form von feinsten Staubteilchen oder kleinen Tröpfchen vor. Diese Teilchen müssen sich letztendlich zu makroskopischen Aggregaten zusammenschließen um als Planetesimal (zusammengesetzt aus Planet und infinitesimal) das Baumaterial zu liefern, aus dem sich die eigentlichen Planeten entwickeln. Da sich dieser Vorgang weitgehend der Beobachtung entzieht, muß man die entsprechenden Elementarvorgänge theoretisch oder durch Laborexperimente erschließen.

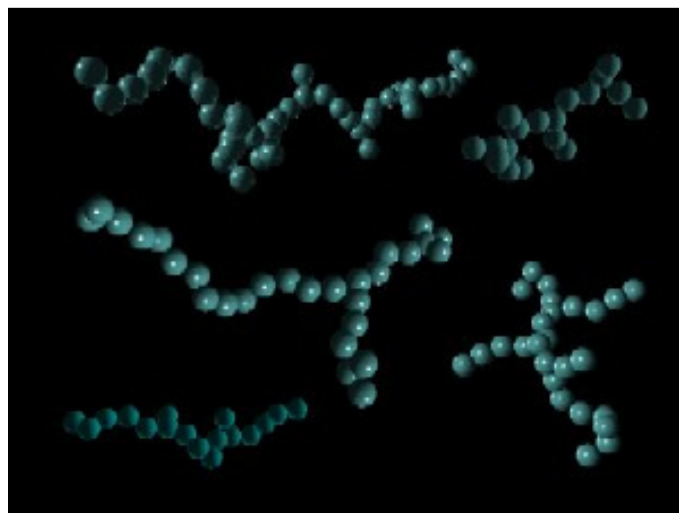
Kondensationstemperaturen einiger häufig in Meteoriten zu findender Minerale (Umgebungsdruck 100 Pa). Die Werte in den Klammern stellen die Temperatur dar, bei der sich das entsprechende Mineral in ein anderes umwandelt (nach J.A. WOOD, 1998).

Mineral	Summenformel	Kondensations- Temperatur [K]
Korund	Al_2O_3	1758 (1513)
Perovskit	CaTiO_3	1647 (1393)
Melilit	$\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7 - \text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7$	1625 (1450)
Spinell	MgAl_2O_4	1513 (1362)
Eisen, Nickel	Fe, Ni	1471
Diopsid (Pyroxen)	$\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$	1450
Forsterit	Mg_2SiO_4	1444
Anorthit	$\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$	1362
Enstatit	MgSiO_3	1349
Alkalifeldspate	$(\text{Na,K})\text{AlSi}_3\text{O}_8 - \text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$	< 1000
Fe-haltige Olivine, Pyroxene	$(\text{Mg,Fe})_2\text{SiO}_4, (\text{Mg,Fe})\text{SiO}_3$	< 1000
Troilit	FeS	700
Magnetit	Fe_3O_4	405

Koagulationsphase

Wie neuere Beobachtungen an zirkumstellaren Scheiben ergeben haben, bildet das um den Protostern rotierende Gas einer in Bezug auf die Scheibenebene geschichtete Struktur mit einer in beide vertikale Richtungen abnehmenden Dichte. Das Dichteprofil entspricht dabei einer weitgehend hydrostatischen Schichtung. Für die Staubteilchen bedeutet das, daß sie innerhalb der rotierenden Scheibe einer Absetzbewegung in Richtung der Scheibenebene ausgesetzt sind, wobei die schwereren Partikel schneller sedimentieren als die Kleineren und Leichtereren. Dabei tritt ein Effekt auf, der aus der Meteorologie her gut bekannt ist und als Koagulation bezeichnet wird. Aufgrund der höheren Sinkgeschwindigkeit größerer Wassertropfen in einer Regenwolke kommt es immer wieder mit kleineren und deshalb langsamer absinkenden Tröpfchen zu Kollisionen und anschließender Verschmelzung. Auf diese Weise vergrößern sich die Tropfen während des Falls durch die Wolke. In einer rotierenden und näherungsweise hydrostatisch geschichteten Staubscheibe kommt es zu einem ähnlichen Prozeß. Bei ihrer Absetzbewegung sammeln größere Staubpartikel kleinere (bis hin zu Molekülen) auf, indem diese auf Grund der schwachen van-der-Waals-Kräfte aneinander haften bleiben und lockere fraktalähnliche Agglomerate bilden. Da auch in radialer Richtung ein Druckgradient besteht, rotiert das Gas ein klein wenig langsamer, als es der Keplergeschwindigkeit in der jeweiligen Entfernung entsprechen würde. Kleine Staubteilchen werden dabei vollständig mit dem Gas mitgeführt. Da sie sich dabei zwangsläufig auch langsamer bewegen, als nach Kepler „erlaubt“ ist, spüren sie eine Kraftkomponente, die sie in radialer Richtung nach innen spiralen lassen. Auch hier holen größere Teilchen die Kleineren ein und können dabei Agglomerate bilden.

Ein wichtiger Mechanismus zur Bildung von Agglomeraten ist noch zu erwähnen. In das Scheibengas eingebettete Staubteilchen unterliegen der bekannten Brown'schen Bewegung. Das führt dazu, daß manchmal Staubpartikel mit Relativgeschwindigkeiten von mehreren mm/s aneinanderstoßen, wobei sie dabei häufig „zusammenkleben“. Auf diese Weise können unter den Bedingungen des Sonnennebels sehr schnell Staubagglomerate mit Größen um die 100 μm entstehen.



Mit der Experimentieranordnung CODAG (cosmic dust aggregation experiment) konnte während einer Space-Shuttle-Mission im Jahre 1998 die Bildung von Agglomerationen (in diesem Fall von kleinen SiO_2 -Kügelchen mit einem Durchmesser von 0.95 μm) untersucht werden. © J.Blum

Den Vorgang der Koagulation bzw. (s.u.) Agglomeration versucht man heute unter möglichst realistischen Bedingungen im Labor nachzuvollziehen. Es geht dabei um die Bestimmung von wichtigen Wachstumsparametern von Staubpartikeln wie Stoßquerschnitt σ , die Stoßgeschwindigkeit $v_{\text{stoß}}$ und die Haftwahrscheinlichkeit w . Diese Parameter hängen auf komplexe Weise voneinander ab. Es ist sowohl theoretisch als auch experimentell sehr schwierig, realistische Parameterkonfigurationen bei gegebenen Umgebungsbedingungen (Temperatur, Gasdruck, turbulente Strömungen) zu bestimmen, bei denen eine effektive Koagulation auftritt.

Der nächste Schritt beinhaltet die Frage, wie die Koagulate, deren Größe im Submillimeterbereich liegen, zu dem eigentlichen Ausgangsmaterial der Planeten, der „Planetesimale“ zusammenwachsen. Das geschieht während der Agglomerationsphase.

Agglomerationsphase

In dieser Phase treffen die locker aufgebauten Koagulate aufeinander wobei sie – wenn die Auftreffgeschwindigkeiten in einem günstigen Bereich liegen – aneinander haften bleiben. Auf diese Weise entstehen in einer ersten Stufe zentimetergroße, sehr locker aufgebaute Staubbrocken. Die Kollisionsgeschwindigkeiten müssen dafür deutlich unter 1 m/s liegen. Turbulenzen im Trägergas können dabei das Wachstum der Agglomerate begünstigen. Mit dem Größenwachstum nimmt auch die Stoßenergie zu, so daß es ab einer bestimmten Größe zu einer Verdichtung der Staubklumpen kommt. Experimente zeigen z.B., daß die Komprimierung am effektivsten ist, wenn zentimetergroße Staubklumpen mit Geschwindigkeiten knapp unterhalb 1 m/s zusammenstoßen. Liegt die Kollisionsgeschwindigkeit jedoch oberhalb von 1 m/s, dann nimmt schnell die Tendenz zur Fragmentation zu. Wenn das so ist, dann ist schwer zu erklären, wie aus den zentimetergroßen Staubbrocken Klumpen von Meter bis Kilometergröße werden können. Die Lösung dieser Ungereimtheit liegt wahrscheinlich in den Strömungsverhältnissen des Scheibengases – insbesondere in Form von kleinskaligen Turbulenzen. Theoretische Untersuchungen belegen übrigens, daß die Staubagglomeration ohne Turbulenzen viel zu langsam verläuft als daß in der kurzen Lebenszeit einer zirkumstellaren Scheibe daraus Planeten entstehen können. Auch muß man in realistischen Modellen elektromagnetische Kräfte wie z.B. die Lorentzkraft berücksichtigen, obwohl das Gas in den dichten Staubscheiben wahrscheinlich überwiegend neutral ist. Ein weiteres Problem ist, daß Staubbrocken ab Metergröße verstärkt radial in Richtung des Protosterns abdriften, wo sie sich an der Staubzerfallszone auflösen. Erst wenn sie soweit gewachsen sind, daß sie vom umgebenden Gas abkoppeln und sich relativ unbeeinflusst von der Gasströmung auf Keplerbahnen bewegen, entgehen sie diesem Schicksal. Daraus folgt, daß die Wachstumsphase bis zum Erreichen kilometergroßer Protokörper sehr schnell und zwar innerhalb einiger Jahrzehnte, abgeschlossen sein muß.

Qualitativ kann man sich für den Wachstumsvorgang folgendes Szenario vorstellen (nach J. BLUM et.al.):

Kleinere Partikel bewegen sich mit der gleichen Geschwindigkeit wie das um den Protostern rotierende Gas, in dem sie eingelagert sind. Größere und bereits kompaktierte Staubaggregationen, bewegen sich dagegen unter dem Einfluß des Zentralkraftfeldes etwas schneller, so daß sie quasi einen „Gegenwind“ spüren, der um so stärker ist, je weniger sie selbst an das Gas gebunden sind. Prallen die kleinen und

locker aufgebauten Partikel auf den größeren Körper, dann zerbrechen sie in einzelne Teilchen wodurch die kinetische Energie auf die Fragmente verteilt wird und sie dadurch an Geschwindigkeit verlieren. Die Teilchen, die in Bewegungsrichtung des größeren Körpers abgedrängt werden, verlieren relativ dazu an Geschwindigkeit und werden durch den Gegenstrom des Gases wieder zu dem größeren Stoßpartner zurückgeblasen. Dabei nimmt die Haftwahrscheinlichkeit aufgrund der geringeren gewordenen Relativgeschwindigkeit zu und es besteht eine größere Chance, daß sie durch die Adhäsions- und Reibungskräfte an der Oberfläche des größeren Körpers festgehalten werden. Dieser Vorgang kann durchaus mehrstufig ablaufen. Als Ergebnis erwartet man tendenziell ein Anwachsen des größeren Staubklumpens auf Kosten vieler kleiner („*Runaway*-Wachstum“).

Auch in langlebigen Wirbeln können Staubklumpen im Laufe der Zeit wachsen, bis sie eine Masse agglomeriert haben, wo die Gravitationswirkung auf die Umgebung wesentlich wird und die Massenakkretion das weitere Wachstum und die weitere Verdichtung bestimmt. Die Dauer der Agglomerationsphase wird auf maximal $10^4 - 10^5$ Jahre geschätzt. Das ist eine für kosmische Verhältnisse sehr kurze Zeitspanne. An ihrem Ende setzt die Auflösung der Gasscheibe ein, da der Protostern in die T-Tauri-Phase übergeht. Bis dahin müssen die festen protoplanetaren Konglomerate soviel Masse eingesammelt haben, daß sie die langsame Zerstörung der Gasscheibe durch die wachsende Leuchtkraft des Vorhauptreihensterns unbeschadet überstehen.

Die Vorgänge, die hier nur angedeutet werden können, sind äußerst komplex und theoretisch nur schwer zu modellieren (siehe auch den Abschnitt: „Kosmogonischer Ursprung der Meteorite“, Bd. 9). Deshalb muß man konstatieren, daß man von einer geschlossenen Theorie, welche die Entstehung und das Wachstum von Planetesimalen – dem Baumaterial der Protoplaneten – beschreibt, noch weit entfernt ist. Aber gerade in der Zusammenarbeit mit der experimentellen Staubforschung ergeben sich z.T. verblüffende Einblicke, welche die Elementarvorgänge in zirkumstellaren Scheiben erhellen und die Bedingungen herausarbeiten, die für die Planetenbildung unumgänglich sind.

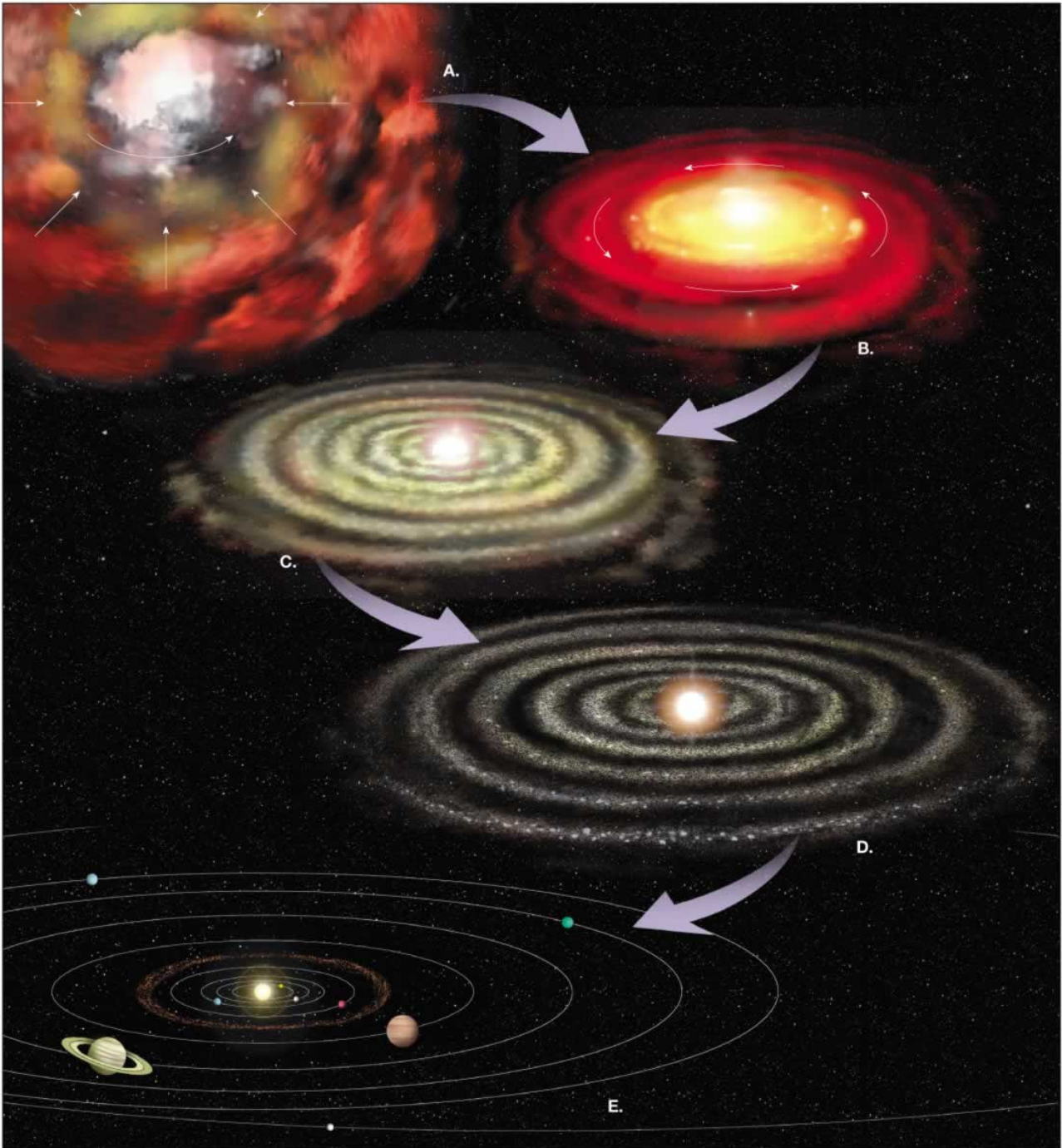
Akkretionsphase

In der Akkretionsphase sind die protoplanetaren Körper soweit angewachsen (Größenordnung 10^4 m), daß sie durch ihre Gravitationswirkung Material aus der Umgebung aufsammeln können. Dieser Vorgang ist sehr effektiv, da der Wirkungsquerschnitt wegen der gravitativen Anziehung mit wachsender Masse des Protoplaneten immer mehr den geometrischen Wirkungsquerschnitt übersteigt. Auf diese Weise erreichen einzelne protoplanetare Körper innerhalb von 10^7 bis maximal 10^8 Jahren die Größe von Planeten, wobei die Planetenkerne, die außerhalb der „Frostgrenze“ liegen, verstärkt volatiles Material (u.a. Wasserstoff- und Helium) akkretieren und sich so – zumindest in unserem Sonnensystem – zu Riesenplaneten entwickeln. Dazu muß der Planetenkern, der als Akkretionszentrum dient, jedoch schwerer als 10 bis 15 Erdmassen sein. Wie neuere Computersimulationen zeigen (MAYER, QUINN, 2002), erfolgt die Bildung von Riesenplaneten außerordentlich schnell. Die Zeitskalen liegen dabei zwischen ein paar Hundert und wenigen Tausend Jahren. Ob das wirklich zutrifft, müssen weitere Untersuchungen zeigen.

Der heutige Aufbau des Sonnensystems zeigt noch recht deutlich, daß die Planetesimalen im inneren Bereich hauptsächlich aus Silikaten und im äußeren Bereich aus „Eis“ bestanden haben müssen (das in

Entstehung des Sonnensystems

Form von Kometenkernen bis heute in der Oortschen Wolke überlebt hat). Sie sind somit ein Abbild der thermischen Bedingungen im Sonnennebel während der Kondensationsphase.



Die einzelnen Phasen der Entstehung des Sonnensystems

Diese Planetesimale bewegen sich innerhalb der Scheibe nahezu in dessen Ebene und in gleicher Richtung um den Protostern. Da sie aufgrund ihrer Masse völlig vom Gas abgekoppelt sind und auch die Gasdichte durch die Wechselwirkung mit der Strahlung des neuentstandenen Sterns langsam abnimmt, sind ihre Bahnen fast kreisförmige Keplerbahnen, wobei die Relativgeschwindigkeit zwischen den einzelnen Körpern bei einem Zusammenstoß zwischen einigen 10 und einigen 100 m/s

liegen dürfte. Das ist ein Geschwindigkeitsbereich, wo auch größere Körper bei einem Zusammenstoß aneinander haften bleiben und die irregulären Bereiche zwischen ihnen durch einfallende kleinere Teilchen rasch aufgefüllt werden. Auf diese Weise nimmt die Masse einzelner Protoplaneten schnell zu. Die Temperaturen im Inneren steigen durch die Kompression und durch den Zerfall radioaktiver Isotope an, wodurch es zu Aufschmelzvorgängen und dadurch zu einer chemischen Differenzierung kommt.

Am Ende überlebt in einem bestimmten Scheibenbereich nur der jeweils Größte und massivste Protoplanet. Durch seine Masse verursacht er Störungen und Resonanzen in der Staubscheibe, so daß Lücken entstehen (wie z.B. im Saturnring) oder es zur Anregung von wellenartigen Störungen kommt. Insbesondere die Riesenplaneten Jupiter und Saturn sorgen dafür, daß nach und nach das innere Sonnensystem von Resten der Planetenentstehung freigeräumt wird.

Konsolidierungsphase

Nachdem sich die großen Planeten gebildet haben und sich der Sonnennebel immer mehr lichtet, setzt eine gewisse Konsolidierungsphase ein. Durch die Wärme, die beim Zerfall radioaktiver Isotope in der noch undifferenzierten Gesteinsmasse der erdähnlichen Planeten freigesetzt wird, beginnt dieses Gestein zu schmelzen, wobei die spezifisch dichteren Stoffe (also Fe und Ni) in Richtung Kern wandern. Die Oberfläche bleibt noch mehrere Millionen Jahre einem starken Bombardement ausgesetzt, das man z.T. noch heute an den Oberflächenstrukturen von Merkur, Mond und Mars nachvollziehen kann. Erst als dieses „Bombardement“ von Gesteinsbrocken langsam abklang, konnten sich feste Oberflächen, also Krusten, ausbilden. Ungefähr in dieser Zeit knallt die Urerde seitlich mit einem noch übriggebliebenen ungefähr marsgroßen Himmelskörper zusammen, was uns unseren Mond bescherte. Auch die extreme Achsenlage von Uranus führt man auf eine Kollision des Planetenkerns mit einem anderen Himmelskörper zurück. Später entstand auf der Erde eine Hydrosphäre wobei noch darüber gestritten wird, ob das Wasser von der sich bildenden Erde „ausgeschwitzt“ wurde oder erst durch den Eintrag von Kometenkernen auf die Erde gelangte. Die letztere Hypothese wird mittlerweile von vielen Wissenschaftlern favorisiert. Und noch etwas, auch heute noch zutiefst Rätselhaftes geschah: irgendwo in den Urmeeren oder in den Klüften des Gesteinsmantels unter der Tiefsee organisierten sich Moleküle in einer Art und Weise um etwas entstehen zu lassen, daß einige Jahrtausende später Nachkommen davon als „Leben“ bezeichnet werden ...

Interessant in diesem Zusammenhang ist, daß die Planeten in unserem Sonnensystem geradezu „ideal“ angeordnet sind, wenn man ihre gravitativen Einflußbereiche (die Hill-Sphären) betrachtet. Sieht man sich dagegen die Planetensysteme anderer Sterne an – soweit sie bis heute bekannt und vermessen sind – dann scheint es eine große Strukturvielfalt was die Anordnung - insbesondere großer Planeten (zumeist größer als Jupiter) - betrifft, zu geben. Das schöne Bild, daß die „erdartigen“ Planeten ein inneres System und die Riesenplaneten ein äußeres System bilden, scheint doch nicht so allgemeingültig zu sein, wie es das Beispiel des Sonnensystems und unsere Modellrechnungen uns vorgaukeln wollen. Hier ist noch viel Forschungsarbeit zu leisten, um die großen und kleinen Details der Planetenbildung aufzuklären. Aber eins wissen wir schon heute mit Sicherheit: Im Grunde hatte der große Königsberger Philosoph recht, unsere Hochachtung...

Literatur zum Thema

K. Lindner: **Taschenbuch der Astronomie**, Fachbuchverlag Leipzig, 1997

H. Bernhard, K.Lindner, M.Schukowski: **Wissensspeicher Astronomie**, Volk und Wissen 1995

A.Unsöld, B.Baschek: **Der neue Kosmos**, Springer-Verlag 2004

A.Weigert, H.J. Wendker: **Astronomie und Astrophysik**. Ein Grundkurs, Wiley-VCH 2004

H. Karttunen et.al.: **Fundamental Astronomy**, Springer-Verlag 2000

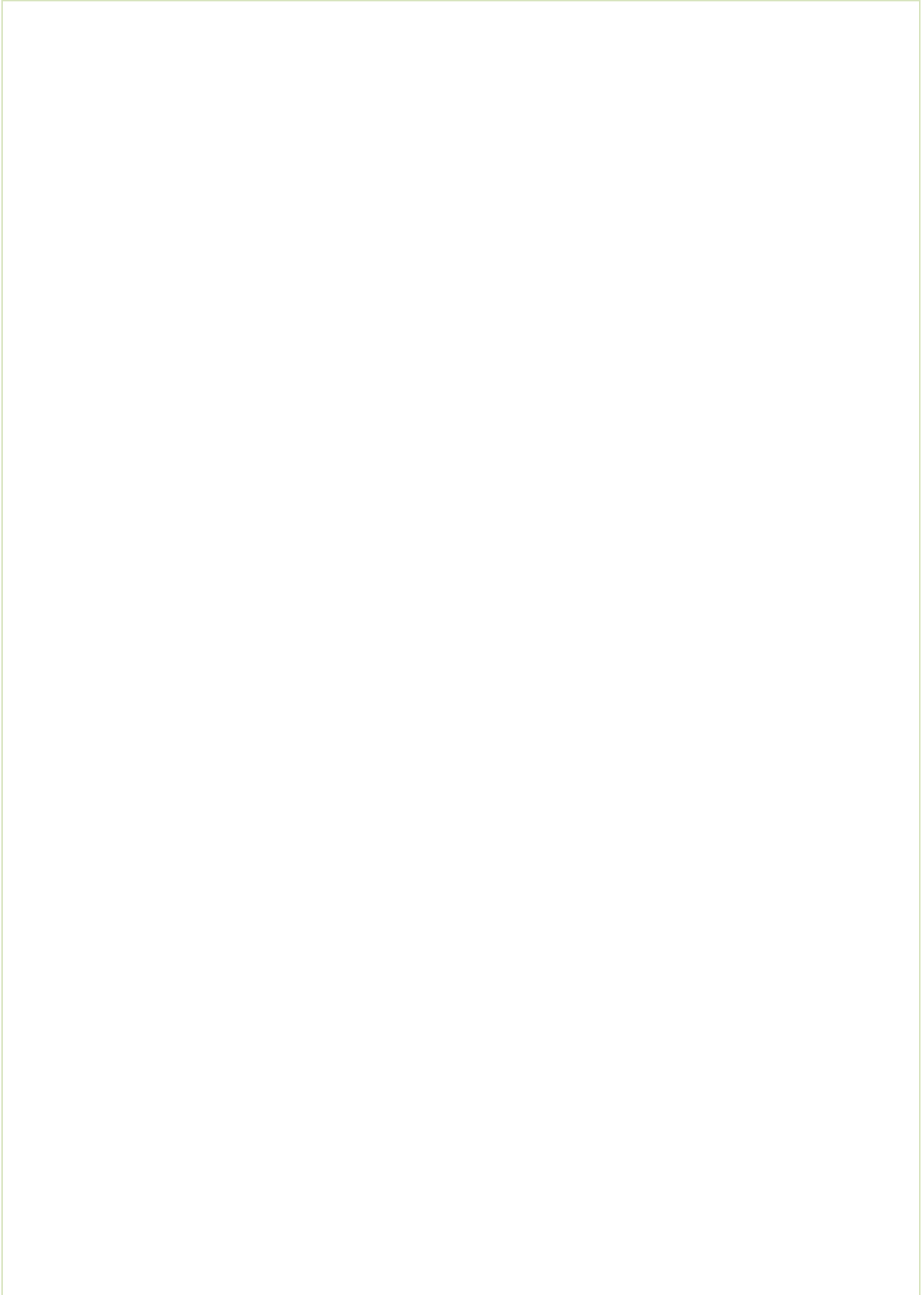
B.W. Jones: **Discovering the Solar System**, Wiley 2000

McBride, Gilmour: **Introduction to the Solar System**, Cambridge University Press 2004

McNab, Younger: **Die Planeten**, RM Buch- und Medienvertrieb 1999

H.J. Fahr, E.A.Willerding: **Die Entstehung von Sonnensystemen**, Spektrum-Verlag 1998

S.R. Taylor: **Solar System Evolution, A New Perspective**, Cambridge University Press 2001



Index

A

Agglomeration 19, 20
Agglomerationsphase 20
Akkretionsphase 13, 17, 21
Allende-Meteorit 8

B

Bonaparte, Napoleon 3
Brown'schen Bewegung 19
Buffon, Georg Louis L. Comte de 3

C

CAI 8
Cassini 5
Chondrite 17
CODAG 16, 19
Cuvier, Georges 3

D

Descartes, Rene 2
Deuterium-Brennen 13
Dunkelwolken 6

E

Emissionsnebel 6

F

Faraday-Rotation 11
Fragmentation 9, 11
Frei-Fall-Zeitskala 12
Frostgrenze 17, 21

G

galaktischen Scheibe 6
Gasphotosphäre 17
Gasplaneten 5
Gravitationskollaps 4, 8, 11, 12

H

Hauptreihenstern 14
Herbig-Haro-Objekte 16
HII-Regionen 6
Hill-Sphäre 23
hydrodynamisches Gleichgewicht 13

I

interstellaren Magnetfelder 11
interstellarer Staub 7

J

Jeans, James Hopwood 8
Jeans-Kriterium 8
Jeans-Masse 9

K

Kant, Immanuel 2, 3
Kant-Laplaceschen Nebularhypothese 3
Kernfusionsprozesse 13
Koagulation 19, 20
Koagulationsphase 19
Kondensationsphase 17, 22
Kondensationsprozesse 16
Konsolidierungsphase 23
Kontraktionsphase 12, 15
Konvektion 14
Kosmogonie 2, 4
Kuiper-Objekte 5

L

Laplace, Pierre Simon de 3
Leuchtkraft 13

M

Masseakkretion 13
Mayer 21
Metallgehalt 16

Meteorite 16
Mikrodiamanten 8
Molekülspektroskopie 6
Molekülwolken 3, 4, 6, 7, 9, 11, 13

O

Oortschen Wolke 22
Opazität 17

P

Planetesimale 16, 20, 21, 22
Protoplanet 21, 23
Protostern 12, 13, 14, 17, 20, 22
Protosternbildung 12
Protosterne 4

Q

Quinn 21

R

Riesenmolekülwolken 6
Riesenplaneten 21

S

Scheibenbildung 11
Sonnennebel 15, 16, 19
Sonnensystem 11
Staubagglomerationen 16
Staubhüllen 3
Staubphotosphäre 17
Staubzerfallsfront 17
Sternentstehung 4
Sternwinde 7
Stoßfront 13
Supernovaexplosion 7, 8

T

T-Assoziationen 14
Thermische Instabilität 9
T-Tauri-Phase 21
T-Tauri-Sterne 14

U

Urnebel 3

V

van-der-Waals-Kräfte 19

W

Wasserstoffbrennen 14
Woolfson, M.M. 5

Z

Zeeman-Effekt 11
zirkumstellare Scheibe 13, 15
zirkumstellaren Scheibe 13

