

Jetzt mit eLearning

#besser lernen

Astronomie

Die kosmische Perspektive

9., aktualisierte Auflage

Jeffrey Bennett
Megan Donahue
Nicholas Schneider
Mark Voit

Pearson

Astronomie

Die kosmische Perspektive

9., aktualisierte Auflage

Fachlektorat dieser Auflage:
Dr. Carolin Liefke und
Dr. Gunnar Radons

Jeffrey Bennett
Megan Donahue
Nicholas Schneider
Mark Voit

Pearson

Theorie (*Abschnitt 3.4*) erhielt – die **Nebulartheorie** der Entstehung des Sonnensystems.

Überprüfen der Theorie

Wir dürfen in der Wissenschaft niemals sicher sein, dass eine Theorie vollständig ist. Sie kann jederzeit durch neue Beobachtungen oder neue experimentelle Tests herausgefordert werden. Im Fall der Theorie, welche die Entstehung unseres Sonnensystems zu erklären behauptet, besteht eine wesentliche Prüfung darin, die Eigenschaften anderer Sonnensysteme zu erläutern.

Wie wir in *Kapitel 13* erläutern werden, haben Untersuchungen anderer Planetensysteme einige Überraschungen geliefert, welche uns dazu zwangen, die Nebularhypothese zu verändern. So haben beispielsweise manche Systeme jupiterähnliche Planeten, die sich sehr nahe an ihren Sonnen befinden. Dies führte die Wissenschaftler zu dem Schluss, dass Planeten bisweilen aus den Bahnen, auf denen sie entstanden, nach Innen oder nach Außen wandern.

Allerdings bedeutet die bloße Existenz der anderen Systeme, dass die Nebularhypothese ihren wichtigsten Test bestanden hat: Da sie behauptet, Planeten seien natürliche Folgen des Sternentstehungsprozesses, sagt sie auch voraus, dass andere Planetensysteme häufig auftreten müssen. Diese Aussage wurde mittlerweile durch Beobachtungen unterstützt.

Aus diesem Grund ist die Nebularhypothese heute besser gesichert als jemals zuvor. Wir werden uns daher im restlichen Kapitel der zugrunde liegenden Theorie widmen und uns ansehen, wie es ihr gelingt, die wichtigsten Eigenschaften unseres Sonnensystems zu erklären.

Woraus ist das Sonnensystem entstanden?

Die Nebulartheorie geht davon aus, dass eine Gaswolke unter ihrer eigenen Schwerkraft zusammenfällt. Üblicherweise bezeichnen wir diese Wolke als die **solare Urwolke**. Wie wir im nächsten Abschnitt noch genauer sehen werden, entstanden im Zentrum dieser Wolke die Sonne und in der rotierenden Wolke, die sich um die Sonne formierte, bildeten sich die Planeten.

Woher stammt das Gas, aus dem sich das Sonnensystem bildete? Nach dem aktuellen Stand der Wissenschaft ist es das Ergebnis eines Milliarden Jahre andauernden galaktischen Recyclingprozesses, der schon im Gange war, bevor die Sonne und die Planeten entstanden.

Soweit wir das heute sagen können, ist das Universum im Urknall entstanden (*Abschnitt 1.2*), der im Wesentlichen nur zwei Elemente erzeugte, nämlich Wasserstoff und Helium. Alle schwereren Elemente wurden seit dieser Zeit in den Sternen hergestellt, sowohl durch Kernfusion im Sterninneren als auch während der Explosionen, die ihren Tod begleiten. Die schweren Elemente vermischten sich danach mit dem vorhandenen interstellaren Gas, aus dem sich neue Sterngenerationen bildeten (▶ Abbildung 8.1).

Obwohl der Prozess der Fusion schwerer Elemente in Sternen und ihres Recyclings in der Galaxie wohl schon fast die ganze 14 Milliarden Jahre dauernde Geschichte des Universums hindurch anhält, ist bis jetzt nur ein kleiner Teil des ursprünglich vorhandenen Wasserstoffs und Heliums in schwerere Elemente umgewandelt worden. Aus dem Studium der Zusammensetzung der Sonne, anderer Sterne desselben Alters sowie der interstellaren Gaswolken wissen wir, dass die Masse des Gases des solaren Urnebels zu 98 % aus Wasserstoff und Helium und zu 2 % aus allen anderen Elementen besteht.

Aus diesem Gas entstanden die Sonne und die Planeten, wobei die Erde und die anderen Gesteinsplaneten überwiegend aus den daruntergemischten schweren Elementen bestehen. Wie wir in *Kapitel 1* gesehen haben, sind wir „Sternenstaub“, weil wir und unser Planet aus Elementen bestehen, die in Sternen entstanden, die vor langer Zeit existierten und wieder vergangen sind.

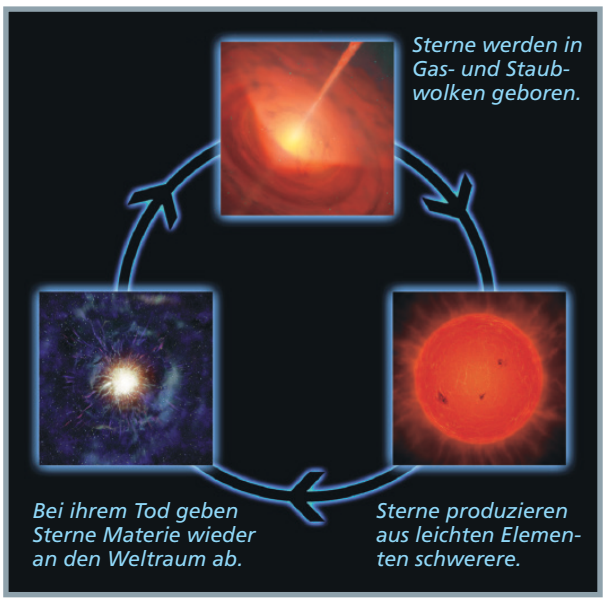


Abbildung 8.1: Diese Darstellung ist ein Teil von Abbildung 1.11. Hier ist der galaktische Recyclingprozess zusammengefasst.

Zum Nachdenken

Könnte ein Sonnensystem wie unseres in der ersten Sterngeneration nach dem Urknall entstanden sein? Erläutern Sie Ihre Ansicht.

Beobachtungen liefern deutliche Hinweise für die Richtigkeit dieses Szenarios. Spektroskopische Beobachtungen zeigen, dass ältere Sterne einen geringeren Anteil an schweren Elementen aufweisen als jüngere. Genau das würden wir erwarten, wenn sie zu einer Zeit entstanden sind, in der schwere Elemente noch gar nicht in größeren Mengen vorhanden waren. Darüber hinaus können wir mithilfe von Teleskopen für sichtbares und infrarotes Licht Sterne untersuchen, die jetzt gerade entstehen.

► Abbildung 8.2 zeigt den Orionnebel, der viele Sterne in unterschiedlichen Stadien ihrer Enstehung enthält. Genau wie von unserem Szenario vorhergesagt, sind die neu entstehenden Sterne in eine Gaswolke eingebettet, ähnlich dem solaren Urnebel. Die Eigenschaften dieser Wolken, die sich aufgrund ihrer Schwerkraft zusammenziehen, entsprechen unseren Erwartungen.



Abbildung 8.2: Der Orionnebel ist eine Gaswolke, in der sich neue Sternsysteme bilden. Die Insets zeigen Detailansichten von sechs jungen Sternen, die von Gas- und Staubscheiben umgeben sind, in denen sich Planeten bilden könnten. Aus dem Orionnebel werden innerhalb der nächsten Millionen Jahre Tausende Sterne und Planetensysteme entstehen. Die Aufnahmen stammen vom Hubble-Weltraumteleskop.

Wie die wichtigsten Eigenschaften des Sonnensystems zustande kamen 8.2

Wir können uns nun detaillierter mit der Nebulartheorie befassen. Dabei werden wir erfahren, dass sie alle vier Haupteigenschaften unseres Sonnensystems erfolgreich erklären kann.

Weshalb gibt es regelmäßige Bewegungsmuster in unserem Sonnensystem?

Der solare Urnebel begann vermutlich als große, etwa kugelförmige Wolke aus sehr kaltem Gas geringer Dichte. Anfänglich war dieses Gas so weit ausgedehnt – möglicherweise über einen Bereich von mehreren Lichtjahren –, dass die Gravitation allein den Kollaps nicht in Gang bringen konnte. Vermutlich wurde der Kollaps durch ein einschneidendes Ereignis ausgelöst, etwa die Einwirkung der Stoßwelle einer Explosion eines nahe gelegenen Sterns (einer Supernova).

Sobald der Kollaps begonnen hatte, stellte das Gravitationsgesetz sicher, dass er von selbst weiterlief. Erinnern Sie sich daran, dass die Stärke der Gravitation umgekehrt proportional zum Quadrat des Abstandes ist (*Abschnitt 4.4*). Je mehr sich die Materie aus den Außenbereichen also dem Zentrum der Wolke annäherte, während sich die Wolke zusammenzog, desto stärker wirkte auf sie die Schwerkraft der Wolke als Ganzes, deren Masse beim Kollaps gleich blieb.

Weil die Schwerkraft aus allen Richtungen zum Zentrum gerichtet ist, könnte man zunächst annehmen, dass der solare Nebel seine sphärische Form bei der Kontraktion beibehalten haben sollte – immerhin erklärt die zum Zentrum gerichtete Schwerkraft auch, warum die Sonne und die Planeten kugelförmig sind. Allerdings ist die Schwerkraft nicht das einzige physikalische Gesetz, das den Wolkenkollaps beeinflusst.

Aufheizung, Rotation und Abflachung

Wie der Kollaps einer sternbildenden Wolke aufgrund ihrer Eigengravitation im Detail abläuft, ist mitunter unerwartet kompliziert (*Abschnitt 16.1*). Für unsere Zwecke genügt es, wenn wir uns auf die Schlüsselprozesse konzentrieren, die Dichte, Temperatur und Form der Wolke während des Zusammenziehens verändert haben (► Abbildung 8.3).

- **Aufheizung.** Die Temperatur des solaren Urnebels stieg während des Kollapses als Folge der Energieerhaltung (*Abschnitt 4.3*). Bei der Kontraktion der Wolke wandelte sich ihre potenzielle Energie in kinetische Energie der einzelnen, sich auf dem Weg nach innen befindlichen Gasteilchen um. Diese Teilchen stießen miteinander zusammen und wandelten so die kinetische Energie des Einfalls in thermische Energie um, also die zufällige Bewegung der Teilchen (▶ Abbildung 4.15b). Die Sonne bildete sich im Zentrum, wo Temperatur und Dichte am höchsten waren.
- **Rotation.** Wie eine Eisläuferin, die ihre Arme während einer Pirouette anzieht, rotierte der solare Urnebel während der Kontraktion als eine Folge der Drehimpulserhaltung immer schneller (*Abschnitt 4.3*). Die Rotation der Wolke war vor dem Kollaps vermutlich unmerklich gering, doch durch die Kontraktion war eine schnelle Rotation unausweichlich. Durch die Rotation war auch sichergestellt, dass nicht die ganze Materie des solaren Urnebels ins Zentrum gelangte: Je größer der Drehimpuls einer rotierenden Wolke ist, desto ausgedehnter ist sie.
- **Abflachung.** Der solare Urnebel flachte sich zu einer Scheibe ab. Diese Abflachung war eine natürliche Folge der Kollisionen zwischen den Teilchen in der rotierenden Wolke. Zu Beginn kann eine Wolke jede Größe oder Form aufweisen und unterschiedliche Bereiche innerhalb der Wolke können sich mit zufälliger Geschwindigkeit in verschiedene Richtungen bewegen. Diese Bereiche kollidieren und verschmelzen während des Kollapses der Wolke und jeder neue Bereich hat dann die mittlere Geschwindigkeit der Wolkenbereiche, aus denen er sich gebildet hat. Dadurch werden die zufälligen Bewegungen in der ursprünglichen Wolke während des Kollapses immer mehr geordnet und die ursprüngliche klumpige Form verändert sich zu einer rotierenden abgeflachten Scheibe. Auf dieselbe Weise führen Kollisionen zwischen Materieklumpen auf extremen elliptischen Bahnen dazu, dass einzelne Gebiete ihre Exzentrizitäten verringern und ihre Umlaufbahnen immer kreisförmiger werden.

Die Entstehung einer rotierenden Scheibe erklärt die heutigen regelmäßigen Bewegungen in unserem Sonnensystem. Die Planeten umkreisen alle die Sonne in nahezu derselben Ebene, weil sie in einer flachen Scheibe entstanden sind. Die Richtung, in der die Wolke rotiert hatte, wurde zu der Richtung der Sonnenrota-

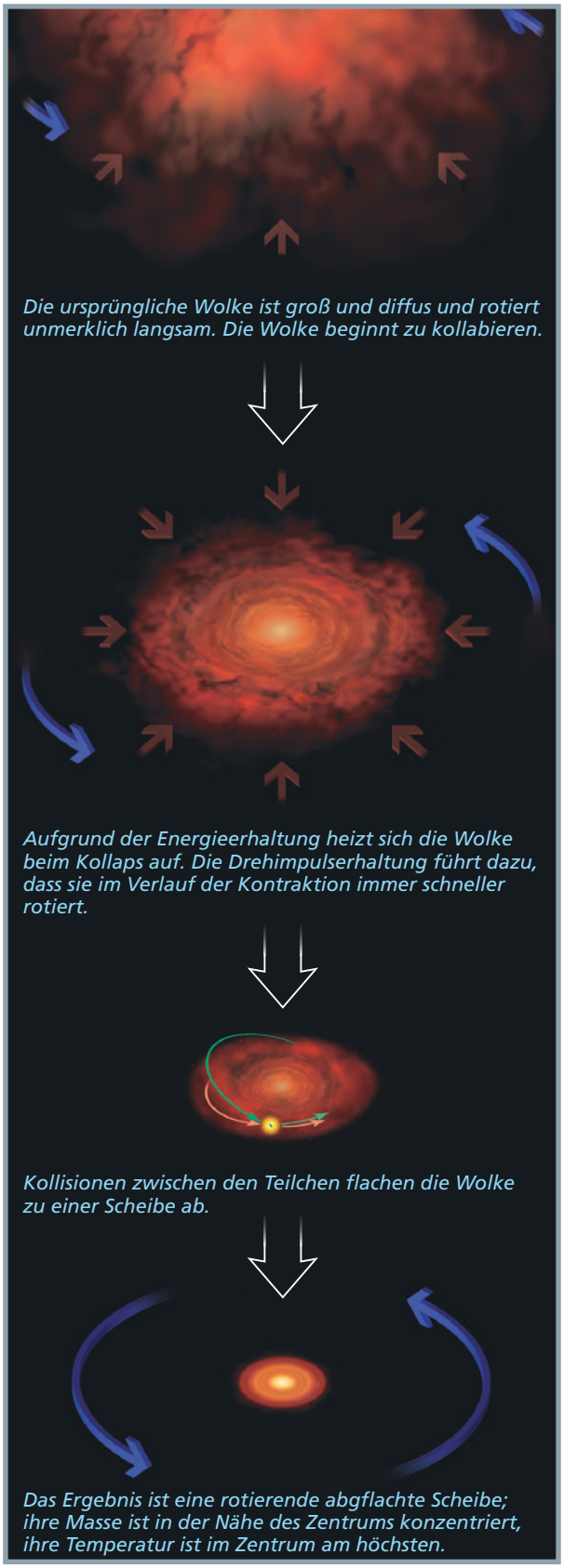


Abbildung 8.3: Diese Abfolge von Zeichnungen zeigt, wie durch den Gravitationskollaps einer großen Gaswolke eine rotierende Materiescheibe entsteht. Aus der heißen, zentralen Verdichtung wird ein Stern, in der ihn umgebenden Scheibe können sich Planeten bilden.

tion und der Umlaufbahnen der Planeten. Computersimulationen haben gezeigt, dass die Planeten bei ihrer Entstehung ebenfalls in diese Richtung rotiert haben – deshalb rotieren heute noch die meisten Planeten in derselben Richtung –, obwohl aufgrund der im Vergleich zur gesamten Scheibe kleinen Ausmaße der Planeten einige Ausnahmen auftreten konnten. Da die Kollisionen in der Scheibe zu eher kreisförmigen Umlaufbahnen führen, bewegen sich die meisten Planeten unseres Sonnensystems auf nahezu kreisförmigen Bahnen.

Überprüfung des Modells

Weil dieselben Prozesse auch andere kollabierende Gaswolken betreffen sollten, können wir zur Überprüfung unseres Modells nach Scheiben suchen, welche neu entstehende Sterne umgeben. Die Beobachtungshinweise stützen unser Modell der Rotation, Aufheizung und Abflachung.

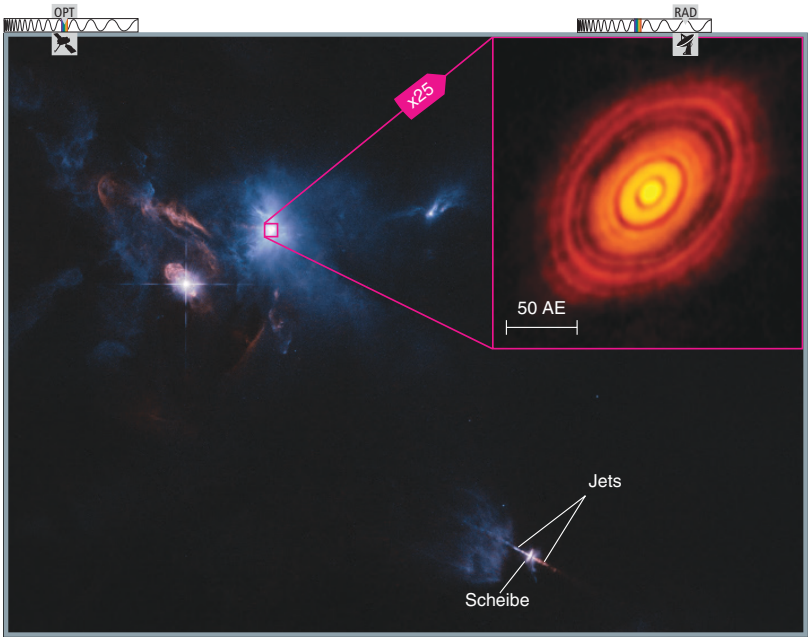
Die Aufheizung einer kollabierenden Gaswolke bedeutet, dass die Wolke thermische Strahlung – zum größten Teil im Infraroten – emittieren sollte (*Abschnitt 5.4*). Wir haben Infrarotstrahlung von vielen Nebeln gemessen, in denen sich heute Sternsysteme bilden. Noch deutlichere Hinweise bieten abgeflachte rotierende Scheiben um andere Sterne (▶ Abbildung 8.4). Viele dieser jungen Sterne scheinen auch in sogenannten Jets („Strahlen“) Materie senkrecht zu ihren Scheiben herauszuschleudern (*Abschnitt 16.2*). Diese Jets beruhen

SEHEN SIE SELBST

Eine einfache Analogie zu den regelmäßigen Bewegungen im Sonnensystem können Sie mit einfachsten Mitteln selbst erzeugen: Streuen Sie ein wenig Pfeffer in eine Schüssel mit Wasser und rühren Sie schnell und in zufälligen Richtungen um. Die Wassermoleküle kollidieren ständig miteinander, dadurch verändert sich die Bewegung des Pfeffers zu einer langsamen Rotation, die den Mittelwert der ursprünglichen zufälligen Geschwindigkeiten darstellt. Führen Sie dieses Experiment mehrfach aus und rühren Sie das Wasser immer unterschiedlich um. Heben sich die Zufallsbewegungen irgendwann auf, sodass gar keine Rotation auftritt? Beschreiben Sie die Ereignisse und erläutern Sie die Ähnlichkeit zu den Abläufen im solaren Urnebel.



a Diese Aufnahme vom Very Large Telescope (VLT) in Chile zeigt die abgeflachte, rotierende Scheibe um den Stern HD 135344 B. Das Spiralmuster deutet auf die Anwesenheit eines oder mehrerer größerer Planeten hin, die sich in der Scheibe bilden. Der Zentralstern wurde bei den Beobachtungen ausgeblendet.



b Diese Aufnahme des Hubble-Weltraumteleskops zeigt eine Sternentstehungsregion im Sternbild Stier, in der sich der Stern HL Tauri befindet. Das Inset stammt vom Atacama Large Millimeter/Submillimeter Array (ALMA) und zeigt die Scheibe um HL Tauri. Die konzentrischen Lücken in der Scheibe sind Bereiche, in denen die Materie ausgedünnt wurde, sie entstehen mit ziemlicher Sicherheit während der Planetenbildung. Der Scheibendurchmesser ist etwa dreimal so groß wie die Umlaufbahn des Neptuns um die Sonne. Rechts unten im Bild ist eine weitere Scheibe mit senkrecht nach außen gerichteten Jets zu erkennen, die wir von der Seite sehen.

Abbildung 8.4: Diese Bilder zeigen abgeflachte rotierende Materiescheiben um andere Sterne, in denen sich mit großer Wahrscheinlichkeit Planeten bilden.

vermutlich auf einem Materiefluss aus der Scheibe auf den jungen Stern und beeinflussen die Entstehungsprozesse in Sonnensystemen.

Auch Computersimulationen der Entstehungsprozesse unterstützen das Modell. Eine Simulation beginnt mit einem Satz an Daten, welche die in interstellaren Wolken beobachteten Bedingungen wiedergeben. Mithilfe eines Computers wenden wir die physikalischen Gesetze auf dieses Anfangssystem an und sagen so voraus, welche Veränderungen im Lauf der Zeit eintreten sollten. Solche Computersimulationen können die meisten allgemeinen Bewegungsmuster unseres Sonnensystems richtig wiedergeben, woraus wir schließen dürfen, dass die Nebulartheorie nicht völlig falsch ist.

Dass unsere Vermutungen über die Entstehung abgeflachter Scheiben richtig sind, bestätigen uns auch viele andere Strukturen im Universum. Wir erwarten Abflachung überall dort, wo Teilchen auf Umlaufbahnen miteinander kollidieren können. Deshalb finden wir so viele Beispiele für abgeflachte Scheiben, beispielsweise die Scheiben von Spiralgalaxien wie der Milchstraße, die Scheiben planetarer Ringe sowie *Akkretionsscheiben*, die viele Neutronensterne und Schwarze Löcher umgeben (*Abschnitt 18.3*).

Warum gibt es zwei Hauptgruppen der Planeten?

Die Entstehung der Planeten nahm ihren Anfang, nachdem der solare Urnebel zu einer abgeflachten Scheibe von etwa 200 AE Durchmesser (etwa das Doppelte des heutigen Durchmessers der Pluto-Umlaufbahn) kollabiert war. Die Durchmischung des Gases im solaren Urnebel dürfte sichergestellt haben, dass in der Wolke überall dieselbe Zusammensetzung herrschte. Weshalb unterschieden sich dann die kleinen terrestrischen Planeten so sehr von den großen gasreichen jovianischen Planeten? Den wichtigsten Hinweis gibt ihre Lage im Sonnensystem: Die Gesteinsplaneten haben sich in dem warmen inneren Bereichen der rotierenden Scheibe gebildet, die Gasplaneten entstanden in den kalten äußeren Regionen.

Kondensation: die Saat der Planetenkeime

Im Zentrum des kollabierenden solaren Urnebels zog die Gravitation genug Materie zusammen, um die Sonne zu bilden. In der umgebenden Scheibe war die Materie jedoch zu fein verteilt, als dass sie sich durch die Gravitation allein zusammenballen konnte. Stattdessen begann das Material, sich auf andere Weise zusammenzuklumpen, zum Beispiel durch die Einwirkung von Magnetfeldern oder durch Verwirbelungen, sogenannte Turbulenzen. Diese Klumpen wuchsen dann weiter, bis die Gravitation sie zu Planeten zusammenziehen konnte. Im Wesentlichen erforderte die Planetenentstehung die Anwesenheit von „Keimen" – festen Materiestückchen, aus denen die Schwerkraft schließlich Planeten formen konnte.

Der grundlegende Prozess bei der Bildung der Keime entsprach vermutlich demjenigen bei der Bildung von Schneeflocken in irdischen Wolken: Ist die Temperatur niedrig genug, dann binden sich einige Atome oder Moleküle aneinander und verfestigen sich. Der Prozess, mit dem sich feste (oder flüssige) Teilchen aus einem Gas bilden, heißt **Kondensation** – wir sagen, dass sich die Teilchen aus dem Gas *kondensieren*. (Der Druck im solaren Urnebel war im Allgemeinen zu gering, um die Kondensation von flüssigen Tropfen zu ermöglichen.) Die Teilchen, die sich anfänglich aus einem Gas bilden, sind mikroskopisch klein, können aber im Lauf der Zeit weiter anwachsen.

Verschiedene Materialien kondensieren bei verschiedenen Temperaturen. Auf Basis ihrer Kondensationseigenschaften lassen sich die Bestandteile des solaren Urnebels in vier Gruppen einteilen, die in ▶ Tabelle 8.1 zusammengefasst sind:

- **Wasserstoff- und Heliumgas (98 % des Urnebels)**. Diese Gase kondensieren bei den Bedingungen im Nebel nie.
- **Wasserstoffverbindungen (1,4 % des Urnebels)**. Substanzen wie Wasser (H_2O), Methan (CH_4) und Ammoniak (NH_3) können sich bei geringen Temperaturen (bei dem geringen Druck im solaren Urnebel unterhalb von 150 K) zu **Eis** verfestigen.
- **Gestein (0,4 % des solaren Urnebels)**. Gestein ist bei hohen Temperaturen gasförmig, kondensiert aber – je nach Art des Gesteins – bei Temperaturen zwischen 500 K und 1300 K zu festen Mineralteilchen.
- **Metalle (0,2 % des solaren Urnebels)**. Metalle wie Eisen, Nickel und Aluminium sind bei hohen Temperaturen ebenfalls gasförmig, kondensieren aber bei höheren Temperaturen, je nach Metall, zu einer festen Form – üblicherweise im Bereich von 1000 bis 1600 K.

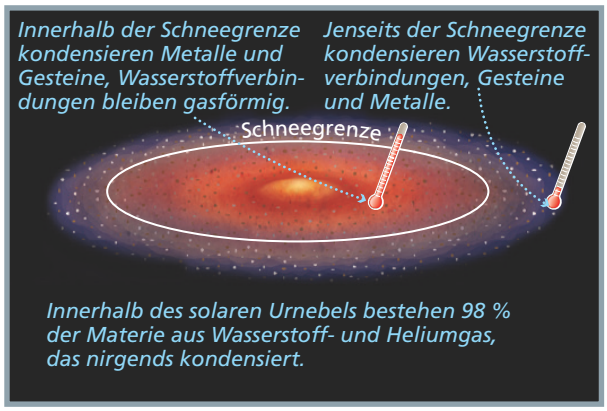


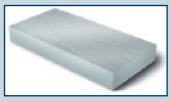
Abbildung 8.5: Temperaturunterschiede im solaren Urnebel haben zu unterschiedlichen Arten kondensierter Materie geführt; dadurch wurde die Grundlage für die beiden Gruppen von Planeten gelegt.

Weil Wasserstoff und Helium 98 % des solaren Urnebels ausmachten und nie kondensiert sind, blieb der größte Teil des Nebels immer gasförmig. Allerdings konnten andere Substanzen überall dort auskondensieren, wo die Temperaturen es zuließen (▶ Abbildung 8.5). In der Nähe der sich bildenden Sonne war es zu heiß, als dass irgendwelche Materie auskondensieren konnte. In der Nähe der heutigen Merkurbahn waren die Temperaturen weit genug abgesunken, dass Metalle und einige Gesteinsarten zu winzigen festen Teilchen auskondensieren konnten, doch andere Gesteine und alle Wasserstoffverbindungen blieben gasförmig. Mehr Mineralien sowie alle Metalle konnten im Bereich der Umlaufbahnen auskondensieren, auf denen sich Venus, Erde und Mars gebildet haben. In der Region, in der der Asteroidengürtel entstehen sollte, waren die Temperaturen so niedrig, dass dunkle, kohlenstoffreiche Mineralien sowie Mineralien, die geringe Mengen Wasser enthielten, kondensieren konnten. (Ein *Mineral* ist ein Teil eines Gesteins mit einer bestimmten chemischen Zusammensetzung und Struktur.) Wasserstoffverbindungen konnten nur jenseits der sogenannten **Schneegrenze** zu Eis kondensieren. Sie liegt zwischen den heutigen Umlaufbahnen von Mars und Jupiter.

Die Schneegrenze kennzeichnet den wichtigen Übergang zwischen den warmen inneren Regionen des

Tabelle 8.1: Materie im solaren Urnebel

Zusammenfassung der vier Arten von Materie im solaren Urnebel. Die Quadrate veranschaulichen den relativen (Massen-)Anteil jeder Materieart (siehe auch Periodensystem im Anhang D).

	Beispiele	Typische Kondensationstemperatur	Relative Häufigkeit (nach Masse)
Wasserstoff- und Heliumgas 	Wasserstoff, Helium	Kondensieren nicht im Nebel	 98 %
Wasserstoffverbindungen 	Wasser (H_2O), Methan (CH_4), Ammoniak (NH_3)	< 150 K	 1,4 %
Gestein 	Verschiedene Mineralien	500 – 1300 K	0,4 %
Metalle 	Eisen, Nickel, Aluminium	1000 – 1600 K	0,2 %

Zum Nachdenken

Betrachten Sie ein Gebiet des solaren Urnebels, in dem eine Temperatur von etwa 1300 K herrschte. Welcher Anteil der Materie in dieser Region war aufgrund der Daten in ▶ Tabelle 8.1 gasförmig? Woraus bestehen die festen Teilchen in diesem Gebiet? Beantworten Sie nun dieselben Fragen für ein Gebiet mit 100 K. Liegt die 100-K-Region näher an der Sonne oder ist sie weiter davon entfernt? Erläutern Sie Ihre Antworten.

Sonnensystems, in denen sich die Gesteinsplaneten gebildet haben, und den kühlen äußeren Regionen, wo sich die Gasplaneten bildeten. Bis zur Schneegrenze konnten nur Metalle und Gesteine kondensieren und „Keime" bilden. Jenseits der Schneegrenze bestanden diese festen Keime aus Eis, vermischt mit Metall und Gestein. Weil außerdem Wasserstoffverbindungen im Nebel dreimal häufiger vorkamen als Metalle und Gesteine zusammen (▶ Tabelle 8.1), war die Gesamtmenge festen Materials jenseits der Schneegrenze viel größer als innerhalb. Damit war die Bühne für zwei planetare Gruppen bereitet: Planeten, die aus Keimen von Metall und Gestein im inneren Sonnensystem entstanden, sowie Planeten, die aus Saatkörnern aus Eis (sowie eingelagertem Metall und Gestein) im äußeren Sonnensystem entstanden.

Wie sind die Gesteinsplaneten entstanden?

Von diesem Punkt an scheint die Geschichte der terrestrischen Planeten recht geradlinig verlaufen zu sein: Die festen Keime aus Metall und Gestein wuchsen zu den Gesteinsplaneten, die wir heute kennen. Weil Gesteine und Metalle im solaren Urnebel einen so geringen Anteil hatten, sind die terrestrischen Planeten nur relativ klein.

Der Prozess, in dem kleine „Keime" zu Planeten wachsen, wird nach dem lateinischen Wort für „Anwachsen" als **Akkretion** bezeichnet (▶ Abbildung 8.6). Die Akkretion begann mit den mikroskopisch kleinen Staubkörnern, die aus dem Gas des solaren Urnebels auskondensiert waren. Diese Teilchen umkreisten die Ursonne in derselben geordneten Weise wie das Gas, aus dem sie entstanden waren. Einzelne Partikel bewegten sich daher mit nahezu derselben Geschwindigkeit wie ihre Nachbarn, daher bestanden „Kollisionen" zwischen ihnen eher aus einer sanften Berührung. Obwohl die Teilchen zu diesem Zeitpunkt viel zu klein waren, um sich durch ihre Schwerkraft anzuziehen, blieben sie aufgrund elektrostatischer Kräfte aneinanderhaften – dieselbe statische Elektrizität, durch die Haare beim Kämmen zu Berge stehen können. Kleine Teilchen wuchsen so zu größeren zusammen. Während ihre Masse stieg, nahm auch ihre Schwerkraft zu und beschleunigte ihr Wachstum zu Gesteinsbrocken, die groß genug waren, um als **Planetesimale** („Teil eines Planeten") zu gelten. Einige Modelle deuten darauf hin, dass in diesem Stadium der Akkretion Reibung mit dem Gas des solaren Urnebels das Zusammenwachsen von kieselsteingroßen Objekten beschleunigt hat.

Planetesimale wuchsen zu Beginn schnell. Je größer ein Planetesimal wurde, desto mehr Oberfläche hatte es, über die es zu anderen Planetesimalen Kontakt auf-

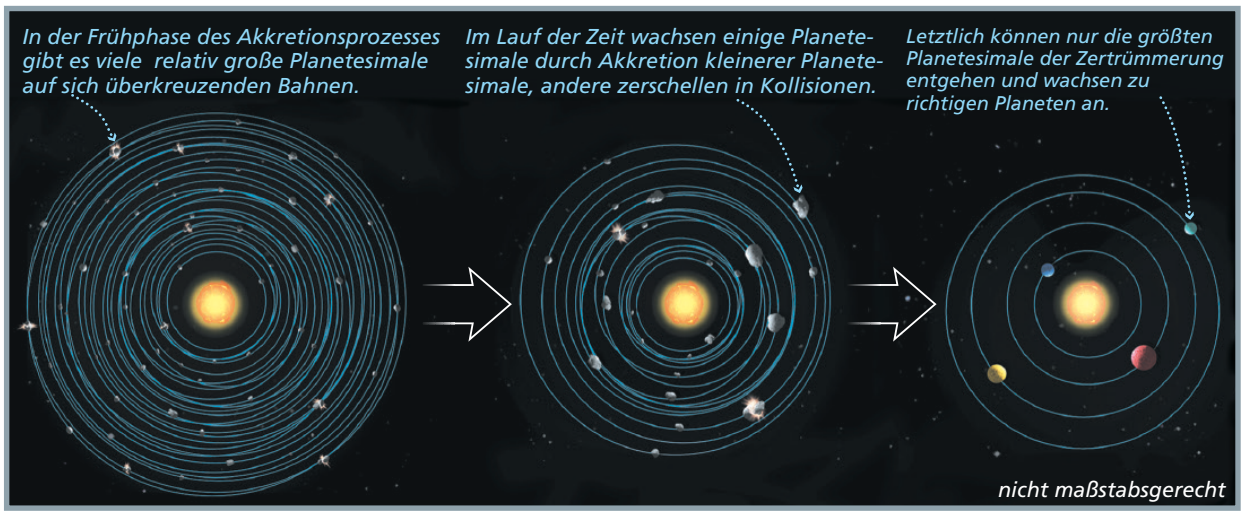


Abbildung 8.6: Diese Zeichnungen zeigen, wie Planetesimale allmählich zu terrestrischen Planeten zusammenwachsen.

nehmen konnte, und mehr Schwerkraft, um andere anzuziehen. Einige Planetesimale erreichten vermutlich innerhalb von nur wenigen Millionen Jahren eine Größe von einigen Hundert Kilometern – nach menschlichen Maßstäben eine lange Zeit, doch nur ein Tausendstel des heutigen Alters des Sonnensystems. Hatten die Planetesimale diese verhältnismäßig großen Abmessungen erreicht, dann wurde das weitere Wachstum jedoch schwierig.

Gravitative Störungen (*Abschnitt 4.5*) zwischen Planetesimalen veränderten ihre Umlaufbahnen, insbesondere die der kleineren Planetesimale. Da sich nun verschiedene Umlaufbahnen kreuzten, stieg die Geschwindigkeit der Kollisionen. Solche Kollisionen führten eher zu einer Zerstörung der beteiligten Körper, als dass sie dazu beitragen konnten, dass sich Planetisimale miteinander verbinden. Nur die größten Planetesimale konnten der Zerstörung entgehen und wuchsen zu vollständigen terrestrischen Planeten heran.

Dieses Modell wird auf theoretischer Seite durch Computersimulationen des Akkretionsprozesses gestützt. Beobachtungen von **Meteoriten**, also Gesteinsbrocken, die aus dem All auf die Erde gefallen sind, liefern weitere Hinweise (*Abschnitt 12.1*). Meteorite, die Überreste der frühen Periode der Kondensation sein könnten, enthalten metallische Körner, die in Gesteinsmineralien eingebettet sind (► Abbildung 8.7). Das entspricht genau dem, was wir von Planetesimalen des inneren Sonnensystems erwarten würden. Meteoriten aus dem Randbereich des Asteroidengürtels enthalten kohlenstoffreiche Materialien und einige enthalten Wasser – auch das entspricht dem, was wir von Planetesimalen aus diesem Gebiet erwarten.



Abbildung 8.7: Dieser Schnitt durch einen Meteoriten (von einigen Zentimetern Größe) zeigt deutlich schimmernde Metallpartikel, die in Gestein eingebettet sind. Solche Metallpartikel entsprechen genau unseren Erwartungen, wenn die Kondensation im solaren Urnebel so abgelaufen ist, wie es die Nebulartheorie der Planetenentstehung darlegt.

Häufige Irrtümer

Die Gravitation der Sonne und die Dichte der Planeten

Steine sinken aufgrund der Erdanziehungskraft in Wasser nach unten zum Grund. Weil Gestein eine höhere Dichte als Wasser hat, könnte man anhand dieser Alltagserfahrung annehmen, dass die Trennung der verschiedenen Substanzen im solaren Urnebel durch die Anziehungskraft der Sonne verursacht werde. Demnach solle die Sonne die dichteren steinigen und metallischen Mineralien nach innen ziehen, während die leichteren Gase sich nach außen bewegen, da sie von der Anziehungskraft nicht so gut festgehalten werden konnten. Das war im solaren Urnebel aber nicht der Fall. Dort kreisten von Anfang an alle Bestandteile gemeinsam aufgrund der solaren Anziehungskraft um die Sonne. Die Bahn eines Teilchens oder eines Planeten hängt nicht von seiner Größe oder seiner Dichte ab. Daher kann die Anziehungskraft der Sonne nicht die Ursache der unterschiedlichen Arten von Planeten sein. Vielmehr liegt der Grund dafür in den unterschiedlichen Temperaturen bei unterschiedlichen Abständen zum Zentrum des solaren Urnebels.

Wie sind die Gasplaneten entstanden?

Die Akkretion sollte auf ähnliche Weise auch im äußeren Sonnensystem abgelaufen sein, aber die Kondensation von Eis bedeutet, dass dort mehr festes Material zur Verfügung gestanden hat. Deshalb enthielten die Planetesimale, die sich im äußeren Sonnensystem gebildet haben, neben Gestein und Metall auch große Mengen an Eis. Die festen Objekte, die sich heute im äußeren Sonnensystem befinden, etwa die Kometen und Monde der Gasplaneten, weisen noch immer diese eishaltige Zusammensetzung auf. Allerdings kann das Wachstum von Planetesimalen auf Basis von Eis nicht die ganze Wahrheit bei der Entstehung der Gasplaneten sein, denn die Gasplaneten enthalten große Mengen an Wasserstoff- und Heliumgas.

Im vorherrschenden Modell wuchsen die größten der eishaltigen Planetesimale des äußeren Sonnensystems so sehr, dass sie einen Teil des Wasserstoff- und Heliumgases, das den größten Teil des sie umgebenden solaren Urnebels ausmachte, einfangen und festhalten konnten. Durch dieses zusätzliche Gas vergrößerte sich ihre Schwerkraft noch mehr und sie konnten noch mehr

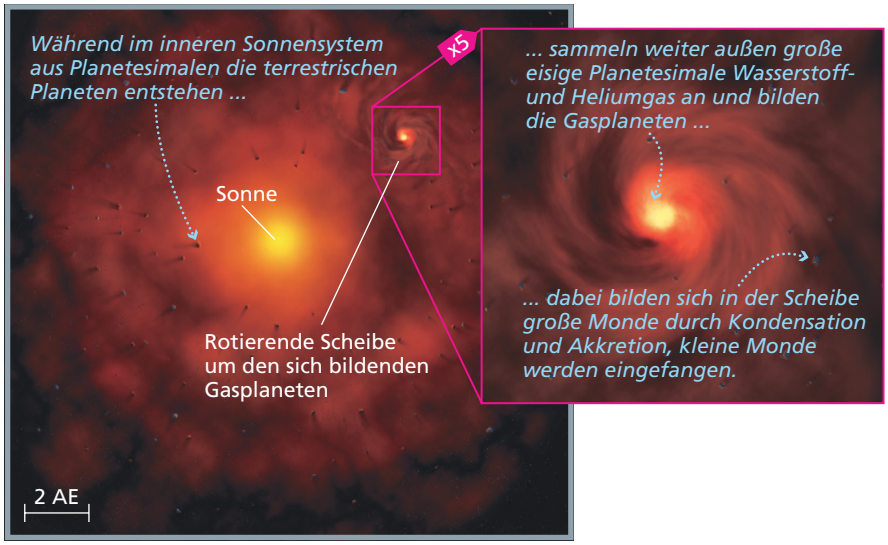


Abbildung 8.8: Die jungen Gasplaneten waren von Gasscheiben umgeben – genau wie die Scheibe des solaren Urnebels, wenn auch kleiner. Entsprechend dem aktuellen Modell wuchsen diese Planeten aus großen eishaltigen Planetesimalen, die Wasserstoff- und Heliumgas aus dem solaren Urnebel angezogen hatten. Die künstlerische Darstellung zeigt das Gas und die Planetesimale, die einen Gasplaneten im größeren solaren Urnebel umgeben.

Gas anziehen. Letztendlich wuchsen die Gasplaneten dadurch so sehr, dass sie keine Ähnlichkeit mehr mit den kleinen eishaltigen „Keimen" aus ihrer Frühphase hatten.

Dieses Modell erklärt auch die Existenz der meisten großen Monde der Gasplaneten. Dieselben Prozesse der Aufheizung, des Rotierens und der Abflachung, welche die solare Urwolke beeinflusst hatten, wirkten auch in dem Gas, das durch die Schwerkraft der jungen Gasplaneten angezogen worden war. Jeder Gasplanet war daher von seiner eigenen Gasscheibe umgeben, die in derselben Richtung rotierte wie der Planet (▶ Abbildung 8.8). Monde, die aus eishaltigen Planetesimalen in diesen Scheiben akkretiert wurden, weisen daher nahezu kreisförmige Umlaufbahnen auf, die in derselben Richtung verlaufen wie die planetare Rotation und in der Nähe der Äquatorebene des Planeten liegen.

Die Auflösung des Nebels

Der größte Teil des Wasserstoff- und Heliumgases im solaren Urnebel wurde nie Teil eines Planeten. Was ist damit geschehen? Dem Anschein nach wurde es in den interstellaren Raum gefegt, vermutlich durch eine Kombination aus der hochenergetischen Strahlung (die ultraviolette und Röntgenstrahlung) der jungen Sonne und dem **Sonnenwind** – einem Strom geladener Teilchen (wie Protonen und Elektronen), der ständig von der Sonne aus in alle Richtungen abströmt. Obwohl der Sonnenwind heute recht schwach ist, sind Beobachtungen anderer Sterne zufolge die Winde bei jungen Sternen viel stärker und sie senden viel mehr hochenergetische Strahlung aus. Daher sollte auch die junge Sonne eine Kombination aus Strahlung und Wind aufgewiesen haben, die stark genug war, um das verbleibende Gas aus dem Sonnensystem zu fegen.

Das Verschwinden des Gases aus der Umgebung der entstehenden Planeten besiegelte deren Schicksal, soweit es deren Zusammensetzung betrifft. Wäre es länger dort gewesen, hätte es abkühlen können, bis selbst im inneren Sonnensystem Wasserstoffverbindungen zu Eis hätten kondensieren können. In diesem Fall hätten die Gesteinsplaneten das vorhandene Eis akkretieren können, vielleicht sogar auch Wasserstoff- und Heliumgas, und hätten damit völlig andere Eigenschaften. Wäre andererseits das Gas zu früh aus dem Sonnensystem entschwunden, dann wäre der Ausgangsstoff der Planeten weggefegt worden, bevor sich die Planeten vollständig hätten gebildet haben können. Obwohl diese extremen Szenarien in unserem Sonnensystem nicht eingetreten sind, können sie manchmal bei anderen Sternen eintreten. Die Planetenentstehung kann bisweilen auch unterbrochen werden, wenn Strahlung eines heißen benachbarten Sterns das Material eines solaren Nebels wegbläst.

Die Auflösung des Nebels erklärt auch, was einst ein überraschender Aspekt der solaren Rotation war: Wegen der Drehimpulserhaltung hätte die rotierende Scheibe des solaren Urnebels in der Nähe des Zentrums am schnellsten rotieren sollen, also dort, wo auch die meiste Masse konzentriert ist. Daher hätte die junge Sonne sehr schnell rotieren müssen. Heute rotiert die Sonne jedoch sehr langsam – eine volle Umdrehung dauert fast einen Monat. Wenn die junge Sonne tatsächlich so schnell rotierte, wie die Theorie es zu verlangen

scheint, wodurch hat sich die Rotation dann so sehr verlangsamt?

Drehimpuls kann zwar nicht einfach verschwinden, allerdings ist es möglich, Drehimpuls von einem Objekt auf ein anderes zu übertragen – und danach kann das zweite Objekt entfernt werden. Eine sich drehende Eisläuferin kann ihre Drehung verlangsamen, indem sie ihren Partner fasst und ihn dann wegstößt. Die Sonne hat wahrscheinlich Drehimpuls auf ähnliche Weise verloren.

Die schnelle Rotation der jungen Sonne erzeugte ein Magnetfeld, das viel stärker war als das heutige. Dieses starke Magnetfeld war eine Ursache des starken Sonnenwinds und intensiver Oberflächenaktivität (z. B. große Sonnenflecken und häufige Sonnenflares (siehe *Abschnitt 14.3*). Dies erklärt die intensive Ultraviolett- und Röntgenstrahlung der Sonne. Diese hochenergetische Strahlung der jungen Sonne ionisierte das Gas im solaren Urnebel und erzeugte viele geladene Teilchen, die aufgrund der schnellen Rotation der Sonne mit dem Magnetfeld durch den Nebel fegten. Weil sich geladene Teilchen und Magnetfelder üblicherweise gemeinsam bewegen, wurden die geladenen Teilchen vom Magnetfeld schneller mitgezogen als der Rest des Nebels. Dadurch wurde letztendlich die Rotation der Sonne abgebremst und ein Teil des Drehimpulses der Sonne auf den Nebel übertragen. Während sich der Nebel auflöste, trug das Gas den Drehimpuls in den interstellaren Raum davon und hinterließ die Sonne mit dem heutigen deutlich verringerten Drehimpuls und der geringen Rotationsgeschwindigkeit (▶ Abbildung 8.9).

Obwohl wir nicht beweisen können, dass die junge Sonne tatsächlich auf diese Weise Drehimpuls verlor, wird dieser Gedanke durch Beobachtungen anderer Sterne gestützt. So zeigen Beobachtungen junger Sterne, die sich vor Kurzem in interstellaren Wolken gebildet haben, dass sie fast alle schnell rotieren und starke Magnetfelder sowie starke Winde aufweisen (*Abschnitt 16.2*). Im Gegensatz dazu rotieren alte Sterne, so wie unsere Sonne, fast immer langsam. Dies deutet darauf hin, dass nahezu alle Sterne ihre ursprüngliche schnelle Rotation abbremsen, indem sie Drehimpuls auf geladene Teilchen in ihren Scheiben übertragen – Teilchen, die später weggeweht werden –, wie dies laut unserer Theorie bei der Sonne geschehen sein soll.



Abbildung 8.9: Die junge Sonne muss einst schnell rotiert haben; heute rotiert sie jedoch ziemlich langsam. Wie diese Zeichnung zeigt, hat die Sonne Drehimpuls verloren – vermutlich aufgrund der Zugkräfte zwischen sich langsam bewegenden geladenen Teilchen im solaren Urnebel und dem rotierenden Magnetfeld der Sonne (durch purpurfarbene Bögen dargestellt).

Woher stammen Asteroiden und Kometen?

Der Prozess der Planetenentstehung erklärt auch den Ursprung der vielen Asteroiden und Kometen unseres Sonnensystems (einschließlich derjenigen, die groß genug sind, um als Zwergplaneten zu gelten): Sie sind Überreste der Ära der Planetenentstehung. Asteroiden sind die übrig gebliebenen Planetesimale mit hohem Gesteinsanteil aus dem inneren Sonnensystem, während Kometen die übrig gebliebenen Planetesimale mit hohem Eisanteil aus den Außenbereichen des Sonnensystems sind. Wir werden erst in *Kapitel 12* diskutieren, warum die meisten Asteroiden sich im Asteroidengürtel wiederfanden, während die meisten Kometen sich entweder im Kuiper-Gürtel oder der Oortsche Wolke aufhalten.

Hinweise darauf, dass Asteroiden und Kometen wirklich die verbliebenen Planetesimale sind, geben Analysen von Meteoriten, Besuche von Raumfahrzeugen bei Kometen und Asteroiden sowie Computersimulationen der Entstehung des Sonnensystems. Tatsächlich ermöglichte die Nebulartheorie der Planetenentstehung schon Jahrzehnte vor ihrer Entdeckung die Vorhersage der Existenz von Kometen im Kuiper-Gürtel.

Copyright

Daten, Texte, Design und Grafiken dieses eBooks, sowie die eventuell angebotenen eBook-Zusatzdaten sind urheberrechtlich geschützt. Dieses eBook stellen wir lediglich als **persönliche Einzelplatz-Lizenz** zur Verfügung!

Jede andere Verwendung dieses eBooks oder zugehöriger Materialien und Informationen, einschließlich

- der Reproduktion,
- der Weitergabe,
- des Weitervertriebs,
- der Platzierung im Internet, in Intranets, in Extranets,
- der Veränderung,
- des Weiterverkaufs und
- der Veröffentlichung

bedarf der **schriftlichen Genehmigung** des Verlags. Insbesondere ist die Entfernung oder Änderung des vom Verlag vergebenen Passwort- und DRM-Schutzes ausdrücklich untersagt!
Bei Fragen zu diesem Thema wenden Sie sich bitte an: **info@pearson.de**

Zusatzdaten
Möglicherweise liegt dem gedruckten Buch eine CD-ROM mit Zusatzdaten oder ein Zugangscode zu einer eLearning Plattform bei. Die Zurverfügungstellung dieser Daten auf unseren Websites ist eine freiwillige Leistung des Verlags. **Der Rechtsweg ist ausgeschlossen**. Zugangscodes können Sie darüberhinaus auf unserer Website käuflich erwerben.

Hinweis
Dieses und viele weitere eBooks können Sie rund um die Uhr und legal auf unserer Website herunterladen:

https://www.pearson-studium.de

Pearson