

PLANETEN

Vom Staubkorn zum Planeten

Die Entdeckung von Exoplaneten fordert die Theorien zur Planetenentstehung heraus.

Wilhelm Kley

Lange Zeit galt unser Sonnensystem als das einzige bekannte Planetensystem und unsere Erde als der einzige Ort im Universum, der Leben trägt. Doch die Entdeckung von neuen „Welten“ um andere sonnenähnliche Sterne bestätigt das verallgemeinerte Kopernikanische Prinzip, dem zufolge unser Sonnensystem im Universum nicht einzigartig sein kann. Das stellt die theoretischen Astrophysiker nun vor die Herausforderung, die Theorien der Planetenentstehung dem aktuellen Beobachtungsstand anzupassen.

Blickt man auf unser Sonnensystem, so fällt auf, dass sich alle Planeten im Wesentlichen in einer Ebene (der Ekliptik) gleichsinnig auf fast kreisförmigen Bahnen um die Sonne bewegen. Diese seit langem bekannten Tatsachen legen nahe, dass die Planeten in einer scheibenförmigen Materieverteilung entstanden sein müssen, welche die junge Protosonne vor rund 4,5 Milliarden Jahren umgab. Kant und Laplace nannten diese Scheibe aus Gas und Staub „Urnebel“, heute spricht die moderne Astrophysik von der solaren Akkretionsscheibe.

Die seit 1995 entdeckten extrasolaren Planetensysteme zeigen im Vergleich zu unserem Sonnensystem neuartige und teilweise unerwartete Eigenschaften (Infokasten). Die neuen Beobachtungsdaten erfordern ein erweitertes Bild der Planetenentstehung [1, 2], auch wenn die wesentlichen Prinzipien weiterhin gültig bleiben: Im großen Maßstab betrachtet sind Planeten nur ein Nebenprodukt der Sternentstehung, die mit dem Kollaps einer gravitativ instabilen interstellaren Molekülwolke beginnt. Aufgrund der Drehimpulserhaltung gelangt das Ausgangsmaterial nicht vollständig ins Zentrum, in dem sich der junge Protostern befindet, sondern sammelt sich in der Akkretionsscheibe an, die um den zentralen neuen Stern rotiert. Noch während der Protostern weiter an Masse gewinnt, können aus dem Material der „protoplanetaren“ Scheibe die Planeten entstehen.

Solche Scheiben bestehen fast ausschließlich aus Gas – im Wesentlichen Wasserstoff und Helium – und einem massenmäßig viel geringeren Anteil an mikrometergroßen Staubteilchen. Diese stammen zum einen aus dem interstellaren Medium und bilden sich zum anderen durch Kondensationsprozesse neu in der Scheibe. Damit der Stern Materie aus der Scheibe auf sammeln kann, muss sie Drehimpuls verlieren. Dies



P. Glaschke, Heidelberg

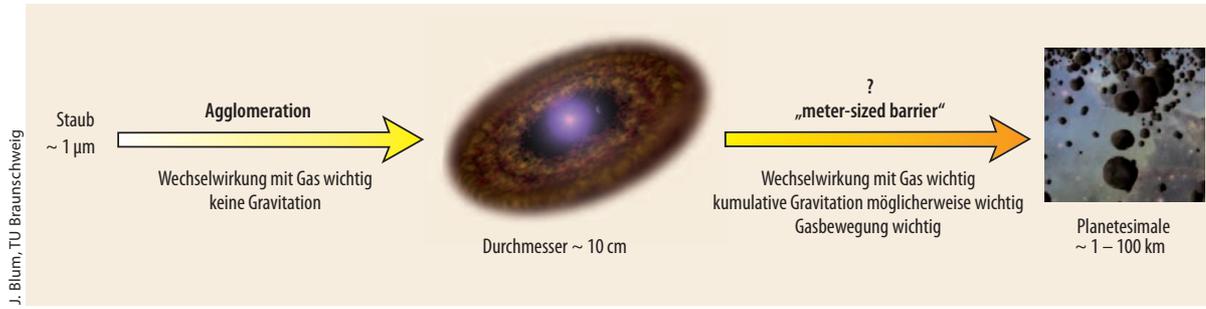
Aus dem Staub der Akkretionsscheiben von Sternen bilden sich zunächst kilometergroße Gesteinsbrocken (Planetesimale).

lässt sich nur durch Reibungsprozesse bewerkstelligen. Man weiß heute, dass die Reibung dafür allein durch molekulare Viskosität des Gases um viele Größenordnungen zu klein ist. Stattdessen geht man davon aus, dass turbulente Bewegungen eine effektive Viskosität erzeugen, die Drehimpuls nach außen transportieren kann. Dieser Drehimpulsverlust verursacht eine langsame Drift von Gas und Staubteilchen nach innen, auf typischen Zeitskalen von einer bis zehn Millionen

KOMPAKT

- Akkretionsscheiben aus Gas und Staub um junge Sterne sind die Voraussetzung dafür, dass Planetensysteme entstehen können.
- Bei Stößen bleiben kleinste Staubteilchen aneinander haften und bilden nach und nach bis zu tausende Kilometer große Planetenkerne.
- Ungeklärt sind derzeit vor allem die Wachstumsphase von zentimeter- zu metergroßen Partikeln und die Entstehung von großen Gasplaneten.

Prof. Dr. Wilhelm Kley, Institut für Astronomie und Astrophysik, Universität Tübingen, Auf der Morgenstelle 10, 72076 Tübingen



Jahre. Letztlich gelangt das Scheibenmaterial auf den Protostern und wird von diesem aufgesammelt (akkretiert). Die Existenz dieser Scheiben aus Gas und Staub ist mittlerweile durch Spektren und direkte Abbildungen sehr gut bestätigt (Abb. 1). Erstmals konnte das Hubble-Weltraumteleskop abgeflachte Staubscheiben im Sternbild Orion abbilden, die sich als Silhouetten vor dem hellen Hintergrund von Gebieten ionisierten Wasserstoffs abheben.

Dank adaptiver Optiken und interferometrischer Methoden ist es jedoch auch möglich, Akkretions-scheiben mit bodengebundenen Teleskopen nachzuweisen. Die Scheiben haben Durchmesser zwischen 100 und 1000 Astronomischen Einheiten¹⁾ und Massen zwischen einem Zehntausendstel und einem Hundertstel der Sonnenmasse. Weiterhin stimmen spezielle Linien in den IR-Spektren von Sternen, die umgeben sind von protoplanetaren Scheiben, mit denen von Kometen wie Hale-Bopp sehr gut überein. Dies deutet interessanterweise darauf hin, dass in den zirkumstellaren Scheiben reichlich kometenähnliches Material (bestimmte Silikate) vorhanden ist, das als der Ausgangsstoff der Planetenentstehung im Sonnensystem schlechthin gilt. Dies sind eindeutige Hinweise dafür, dass sich Planeten direkt aus dem Material der Scheiben um Sterne bilden. Das deutliche Minimum in der Massenverteilung der gefundenen Planetenkandidaten im Übergangsbereich zu Sternen sehr geringer Masse, den Braunen Zwergen, erhärtet diese Schlussfolgerung. Bei den Planeten handelt es sich also wirklich um eine eigene Population und nicht nur um Sterne mit sehr geringer Masse.

1) 1 AE entspricht dem mittlereren Abstand zwischen Erde und Sonne von 150 Millionen Kilometer.

Es gibt zwei alternative Theorien für die Entstehung massereicher Planeten ab etwa einer Saturnmasse. Im ersten Szenario verläuft diese von unten nach oben durch eine Sequenz haftender Stöße von den kleinsten Staubeilchen bis hin zu tausende Kilometer großen Planetenkernen. Auf diesen sammelt sich nach Erreichen einer Grenzmasse von einigen Erdmassen sehr rasch das Gas an (Kern-Akkretions-Modell). Dieses Modell erklärt u. a. sehr gut das Vorhandensein fester Kerne von Jupiter und Saturn im Sonnensystem, benötigt aber eine sehr lange Entstehungszeit, die oft jenseits der Lebensdauern der Scheiben von rund 10 Millionen Jahren liegt, die sich aus dem Vorhandensein des IR-Exzesses (Abb. 1) in Verknüpfung mit dem Sternalter ableiten lassen.

Dieses Problem tritt im alternativen Szenario, dem Gravitationsinstabilitäts-Modell, nicht auf. Hier wird die protoplanetare Scheibe aufgrund ihrer Masse gravitativ instabil, sodass es direkt zu einem Kollaps kommt, ähnlich zu der oben erwähnten Sternentstehung aus einer Molekülwolke. Damit diese Instabilität eintritt, muss das sog. Toomre-Kriterium erfüllt sein. Dieses besagt im Wesentlichen, dass das Gas kühl genug sein muss, damit der Gasdruck der Gravitation keinen Widerstand leistet. Die Zeitskala für einen Kollaps ist in diesem Modell um einige Größenordnungen kürzer als vorher. Doch für typische Scheibenparameter ist die Kühlung des Gases wahrscheinlich nicht schnell genug, sodass es sich bei der Kompression während des Kollaps zu stark aufheizt und dieser zum Stillstand kommt. Auch das Vorhandensein eines festen Planetenkerns ist innerhalb dieses Modells nicht einfach zu

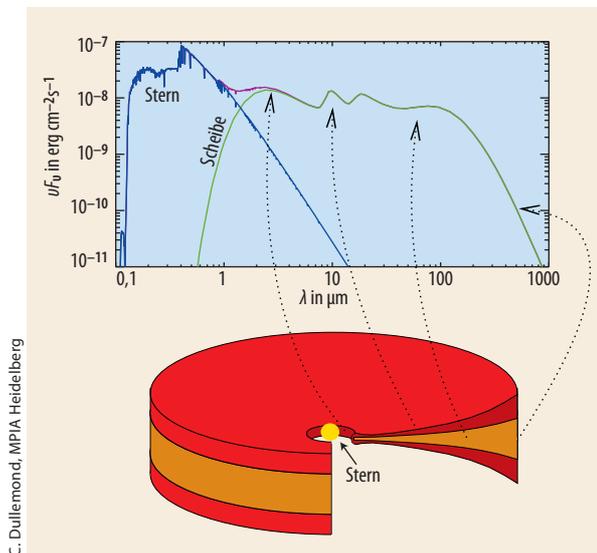


Abb. 1 Dass ein junger Stern eine Staubscheibe besitzt, zeigt sich in seiner spektralen Energieverteilung anhand des „Infrarotexzesses“, d. h. dem Anteil des Spektrums, der im langwelligen Bereich die Sternstrahlung deutlich überwiegt. Auch andere einzelne Komponenten des Spektrums lassen sich bestimmten Scheibenbereichen zuordnen: Da die Temperatur der Scheibe mit dem Abstand vom Stern nach außen hin abfällt, stammen die energiereicheren Anteile des Spektrums (d. h. bei kürzeren Wellenlängen) vor allem von den inneren Bereichen und die längerwelligen Anteile aus den äußeren. Silikate rufen die infrarote Emission („Buckel“) bei etwa 10 μm hervor. Die oberen Schichten (rot) sind aufgrund der Einstrahlung vom Stern heißer als die inneren (orange). Die Scheibe selbst ist konkav nach außen gewölbt, aufgrund der mit dem Abstand abfallenden senkrechten Komponente der Gravitation des Sterns.



Abb. 2 Die Phasen der Planetenentstehung nach dem Modell der sequenziellen Akkretion. Die Entstehung erdähnlicher Planeten ist ein Aspekt dieses Modells.

erklären. Das letzte Wort ist in dieser Auseinandersetzung noch nicht gesprochen; momentan favorisieren viele Astrophysiker das erste Szenario, weshalb wir uns im Folgenden darauf beschränken wollen (Abb. 2).

Das Wachstum von Planeten

Die Staubteilchen, deren Massenanteil etwa 1 % des Gases in der protoplanetaren Akkretionsscheibe ausmacht, sind der Ausgangsstoff für die Bildung von Planeten. Die sequenzielle Akkretion bedarf, ausgehend von etwa μm großen Teilchen bis hin zu 1000 km großen Planeten, eines Massenwachstums von über 30 Größenordnungen. Will man dieses Wachstum verstehen, muss man die verschiedenen Quellen der zu Stößen führenden Relativgeschwindigkeiten aufklären, das aerodynamische Verhalten der Teilchen und Agglomerate im Gas beschreiben sowie herausfinden, ob es bei den vorkommenden Relativgeschwindigkeiten überhaupt zu haftenden Stößen kommen kann. Zunächst haben Gas und Staubteilchen eine leicht unterschiedliche Bahngeschwindigkeit um den Stern, weil das Gas einen radialen Druckgradienten verspürt, die Teilchen aber nicht. Dadurch wirkt auf die Teilchen eine Reibungskraft, die eine radiale Drift nach innen bewirkt. Weiterhin führen Brownsche Bewegung für mikrometergroße Teilchen, gravitative Sedimentation zur Mittelebene der Scheibe, radiale und transversale Driftbewegungen und schließlich Turbulenz zu Relativgeschwindigkeiten zwischen den Staubteilchen (Abb. 3). Für ein effizientes Wachstum müssen zwei Bedingungen erfüllt sein: Die Relativgeschwindigkeiten dürfen eine bestimmte Grenze nicht übersteigen, um eine Haftung zu gewährleisten, aber sie dürfen auch nicht zu klein für Stöße sein.

Die genannten Wechselwirkungsprozesse zwischen Gas und Staub bestimmen die Relativgeschwindigkeiten zwischen den Staubteilchen. Relevant für die Effizienz, mit der das Gas die Bewegung von Staubteilchen beeinflussen kann, ist die sog. charakteristische Ankoppelzeit, die beschreibt, auf welcher Zeitskala die Staubteilchen der Bewegung des Gases folgen. Im Regime großer Knudsen-Zahlen (freie Weglänge der Gasmoleküle weit größer als der Teilchenradius), das für das anfängliche Wachstum relevant ist, ist die Ankoppelzeit durch das Verhältnis von Masse und Fläche der Teilchen gegeben. Das Wachstum in dieser Anfangsphase wird auch experimentell untersucht, momentan in Deutschland hauptsächlich in Arbeits-

gruppen in Braunschweig und Münster [3]. Dabei ließ sich nachweisen, dass es bei den vorkommenden Relativgeschwindigkeiten von einigen mm/s bis zu einigen cm/s bei Stößen zwischen mikrometergroßen Teilchen bzw. Aggregaten immer zur Haftung kommt. Nun steigt die Relativgeschwindigkeit zwischen den einzelnen Teilchen in der Akkretionsscheibe aufgrund größenabhängiger Reibung zwischen Gas und Teilchen in der ersten Wachstumsphase stark an. Damit wirken die Stöße von Teilchen mit Größen im Bereich von Dezimetern ab Relativgeschwindigkeiten von einigen m/s vor allem destruktiv, was weiteres Wachstum erschwert. Gleichzeitig wird die radiale Driftgeschwindigkeit der Teilchen im selben Größenbereich maximal, sodass sie schnell in den Protostern schwimmen können. Ein großes „Bottleneck“ in der Planetenbildung liegt somit überraschenderweise schon bei einer überschaubaren Teilchengröße von Dezimetern bis Metern.

Ein Ausweg wären poröse Agglomerate, in denen mehr kinetische Energie dissipiert und so eine Verschmelzung der Körper erleichtert wird. Die anfängliche Wachstumsphase der Planetenentstehung ist ein wesentliches Forschungsgebiet einer durch die DFG geförderten Gruppe mit Forschern aus Braunschweig, Heidelberg, Münster und Tübingen.²⁾ Insbesondere sollen Experimente (in Münster, Braunschweig) und numerische Rechnungen (in Tübingen und Heidelberg) gangbare Wege durch das Bottleneck aufzeigen.

In diesem Zusammenhang ist wiederum eine Gravitationsinstabilität der in die Scheibenmitte sedimentierten Staubschicht aktuell geworden. Forscher des

2) DFG-Forschergruppe 759 „The Formation of Planets: The Critical First Growth Phase“, www.tat.physik.uni-tuebingen.de/%7Efgrp/

SONNENSYSTEM UND EXOPLANETENSYSTEME

Die wesentlichen Unterscheidungsmerkmale der Planetensysteme um andere Sterne im Vergleich zu unserem Sonnensystem (vgl. den Artikel von J. Wambsganß):

- Ein großer Anteil der neu entdeckten Planeten hat eine deutlich größere Masse als Jupiter, der massereichste Planet im Sonnensystem. Dabei ist allerdings zu berücksichtigen, dass die momentane Beobachtungstechnik die Detektion von massearmen Planeten ($m \approx M_{\text{Erde}}$) noch nicht erlaubt.
- Die Exzentrizitäten e der Bahnen reichen von 0 bis 0,97 und haben einen Mittelwert von etwa 0,3, also viel höher als z. B. bei Merkur, welcher mit

- $e = 0,2$, den höchsten Wert der Planeten im Sonnensystem erreicht. Die massereichen äußeren Planeten (Jupiter bis Neptun) erreichen nur $e = 0,05$.
- Viele der extrasolaren Planeten (auch sehr massereiche) befinden sich in unmittelbarer Nähe ihres Zentralsterns, teilweise in einem Abstand kleiner als 1/20 der großen Halbachse des Merkurs (0,39 AE).
- In extrasolaren Mehrfachsystemen befindet sich ein relativ großer Anteil in „Resonanz“, d. h. die Umlaufzeiten der Planeten stehen in einem ganzzahligen Verhältnis zueinander.
- Es wurden viele Planeten in Doppelsystemen entdeckt.

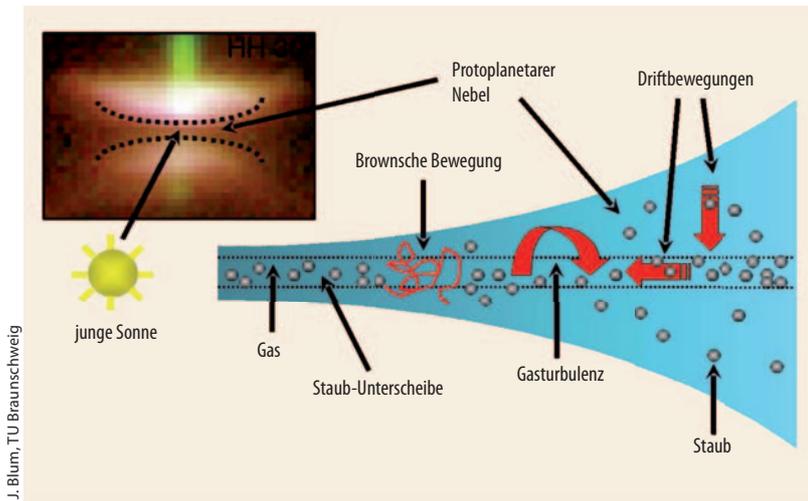


Abb. 3 Die Bewegung von Staubteilchen in protoplanetaren Scheiben (links oben das real beobachtete System HH 30) setzt sich aus verschiedenen Beiträgen zusammen. Wichtig sind vor allem die Konzen-

tration der Partikel in der Mittelebene der Scheibe, eine radiale Drift nach innen und eine durch Turbulenz erzeugte Relativgeschwindigkeit der Teilchen.

Max-Planck-Instituts für Astronomie in Heidelberg konnten zeigen, dass sich metergroße Körper in turbulenten Wirbeln ansammeln und bei genügender Konzentration tatsächlich in sehr kurzer Zeit zu Objekten von mehreren Kilometern Größe (Planetesimale) anwachsen können. Dieses Szenario entspricht der oben erwähnten Gravitationsinstabilität, die jedoch in diesem Fall nur auf die Staubschicht eingeschränkt ist [4].

Haben die Körper km-Größe erreicht, so kommt es aufgrund der gegenseitigen Gravitationsanziehung zu einem exponentiell schnellen Wachstum. Da sich hierbei die wachsenden Planetesimale gegenseitig zu stören beginnen, halten sich diese bei weiterem Wachstum auf Abstand, und ein „oligarchisches“ Wachstum von mehreren, etwa ähnlich großen Körpern stellt sich ein [5]. In einem Abstandsbereich etwa innerhalb der Marsbahn ist das Wachstum mit Erreichen einer Mondmasse beendet, weil alle erreichbaren kleineren Körper aufgesammelt wurden und die nähere Umgebung des Protoplaneten leergefegt ist.

Das abschließende Wachstum bis zu erdgroßen (terrestrischen) Planeten vollzieht sich auf längeren Zeitskalen bis 100 Millionen Jahren vor allem durch Kollisionen. Die unzähligen Krater auf dem Mond und auch Merkur geben noch heute ein Zeugnis dieser frühen Phase des Sonnensystems, in der nicht zuletzt auch der Mond bei dem Einschlag eines Körpers von der Größe des Mars auf die Erde entstanden ist. Für die inneren, terrestrischen Planeten des Sonnensystems ist damit deren Entstehung abgeschlossen.

Für die Entstehung größerer Planeten spielt die sog. Schneegrenze eine besondere Rolle. Darunter versteht man den Abstandsbereich von einem Stern (im Sonnensystem ab rund 3 AE), bei dem die Temperatur in der Scheibe unter diejenige des Kondensationspunktes von Wasser gefallen ist. Erst jenseits der Schneegrenze gibt es ausreichend feste Materie, um Protoplaneten mit einigen Erdmassen entstehen zu lassen, auf die sich dann Gas gravitativ anlagern kann.

In einer langsamen, ruhigen Phase wächst der Planet nun durch Akkretion von Gas aus seiner Umgebung weiter, bis schließlich nach einigen Millionen Jahren ein abschließendes sehr schnelles Aufsammeln von Gas durch gravitative Anziehung eintritt („runaway“). Dieses Kern-Akkretions-Modell erklärt das Vorhandensein von festen Kernen in massereichen Gasplaneten wie Jupiter und Saturn, die möglicherweise auch in vielen extrasolaren Planeten vorhanden sind, wie sich aus Transitbeobachtungen ableiten lässt [6]. Ein Problem dieses Szenarios ist allerdings die recht lange Zeit, die bis zum Einsetzen des runaways vergeht. Doch wie im Folgenden zu sehen ist, lässt sich diese Dauer durch die Berücksichtigung eines bislang eher unbeachteten Effekts verkürzen.

Junge Planeten auf Wanderschaft

Die Kerne von Planeten entstehen innerhalb einer Scheibe, die vor allem aus Gas besteht. Die Anwesenheit des wachsenden Planeten beeinflusst nun die Bewegung des Gases um den Stern derart, dass die Dichte in der Scheibe ausgehend vom Planeten spiralförmig gestört wird (Abb. 4a). Diese Spiralen entstehen dadurch, dass sich die vom Planeten induzierten Störungen als Schallwellen in der Scheibe ausbreiten, welche sich dann spiralförmig konstruktiv überlagern und quasi die Bugwelle des Planeten in der Scheibe bilden. Die Dichteerhöhungen wirken gravitativ auf den Planeten und üben Drehmomente auf ihn aus, wodurch sich sein Abstand vom Stern ändern kann. Der Nettodrehimpuls, welcher auf den Planeten wirkt, ergibt sich zunächst vor allem aus der Differenz der Wirkungen der inneren und äußeren Spirale.

Analytische Rechnungen, zunächst zu dem verwandten Problem von Satelliten, eingebettet in den Saturnringen, haben gezeigt, dass die induzierte radiale Bewegung (Migration) des Planeten einwärts zum Stern hin gerichtet ist. Damit wäre eine ganz natürliche Erklärung der sehr sternnahen Bahnen vieler massereicher Planeten gefunden. Diese sind außen in der Scheibe jenseits der Schneelinie entstanden und durch radiale Migration nach innen bis in Sternnähe gewandert. Neuere Rechnungen dieser Art und intensive numerische Simulationen haben allerdings gezeigt, dass die Geschwindigkeit einer solchen Wanderung sehr hoch sein kann und somit viele Planeten in den Stern fallen könnten, noch bevor sie eine Jupitermasse erreichen. Das Problem der zu schnellen Migration nach innen hat die Astrophysiker eine längere Zeit sehr beschäftigt, aber gerade in den letzten Jahren beginnt sich heraus zu kristallisieren, dass die Lösung des Problems (Abb. 4b) in dem Strömungsverhalten in der unmittelbaren Nähe des Planeten liegt. Ko-rotierende Teilchen, die sich im gleichen Abstand wie der Planet vom Stern befinden, bewegen sich in einem Koordinatensystem, in dem der Planet ruht, auf Bahnen, die einem Hufeisen ähneln (Abb. 4b). Somit nähern sich die Massenelemente periodisch dem Planeten und können

mit diesem Drehimpuls austauschen. Wie numerische Rechnungen an der Uni Tübingen gezeigt haben, ergibt die Summe dieser Beiträge in Anwesenheit von turbulenter Viskosität und bei Berücksichtigung der korrekten Thermodynamik einen positiven Beitrag zum Drehmoment, der die radiale Bewegung verhindern oder in einem gewissen Massenbereich sogar umkehren kann [7]. Damit lässt sich das Problem der zu schnellen Migration nach innen lösen.

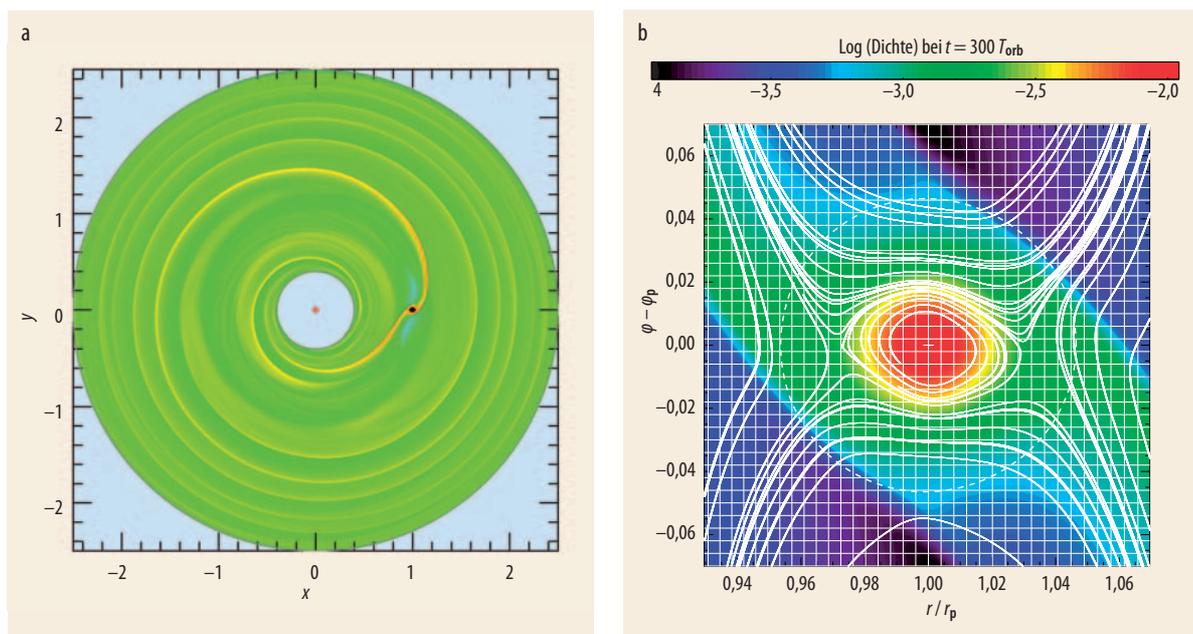
Bei Massen oberhalb von etwa einer Saturnmasse bildet sich an der Umlaufbahn des Planeten eine ringförmige Lücke mit niedrigerer Dichte, welche allerdings nicht primär dadurch entsteht, dass der Planet Material aus seiner Umgebung aufammelt. Stattdessen ist der Mechanismus wiederum analog zu demjenigen, durch den die Satelliten des Saturn Lücken in dessen Ringsystem bilden. Die von dem Planeten induzierten Spiralwellen bewegen sich mit dem Planeten und haben somit im Verhältnis zum Gas der Scheibe innen eine niedrigere und außen eine höhere Geschwindigkeit, somit einmal einen niedrigeren bzw. höheren Drehimpuls. Bei anwachsender Planetenmasse entwickeln sich diese Spiralwellen zu Stoßwellen, die durch Dissipation Drehimpuls an die Scheibe abgeben, womit sich diese vom Orbit des Planeten entfernt. Falls die Lücke in der Scheibe eine größere Tiefe erreicht hat, verringert sich die Akkretionsrate auf den Planeten, weil kein Massenreservoir mehr vorhanden ist. Bei allen früheren Überlegungen zur Planetenmasse im Sonnensystem ging man aufgrund dieses Effektes immer davon aus, dass eine Jupitermasse die größte erreichbare Masse wäre. Durch hydrodynamische Rechnungen zu Planeten, die in Scheiben eingebettet sind, hat sich gezeigt, dass sich bei etwa einer Saturnmasse das Gas am schnellsten auf dem Planeten ansammelt und erst bei fünf Jupitermas-

sen die Massenakkretion auf den Planeten so gut wie beendet ist. Somit lassen sich mit diesem Mechanismus die großen Massen der entdeckten extrasolaren Planeten anschaulich verstehen. Gleichzeitig wandern Planeten mit einer Jupitermasse auf einer typischen Zeitskala von $a/\dot{a} \approx 10^5$ Jahren nach innen. Das Zusammenwirken von Migration und Massenwachstum erklärt also auch die Existenz der heißen Jupiter in Sternnähe.

In den beschriebenen Entstehungsmodellen wachsen die Planeten, während sie im Wesentlichen (abgesehen von der sehr langsamen Migration) auf kreisförmigen Bahnen ihre Heimatsterne umlaufen. Nun zeigt die Exzentrizitätsverteilung der extrasolaren Planeten keinerlei Unterschied zu derjenigen von Begleitsternen kleiner Masse trotz eines sehr unterschiedlichen Entstehungsmechanismus. Die mittlere Exzentrizität der extrasolaren Planeten liegt bei $\bar{e} \approx 0,3$. Zur Erklärung der großen Exzentrizitäten werden vor allem zwei Mechanismen herangezogen:

- Eine Stern-Scheibe-Wechselwirkung, wobei zusätzlich zu einer Migration auch die Exzentrizität des Planeten geändert wird. Dieser Mechanismus soll zunächst nur für einen bestimmten, mittleren Massenbereich des Planeten wirken, wurde aber bisher nicht in hydrodynamischen Rechnungen gefunden.
- Bei höheren Planetenmassen ab etwa zwei bis drei Jupitermassen beeinflusst ein Planet die Scheibe sehr stark, sodass diese selbst exzentrisch wird und auf den Planeten ebenso exzentrizitätssteigernd zurückwirken kann.

Aber diese beiden, durch Wechselwirkung zwischen Planet und Scheibe verursachten Effekte lassen eine sehr hohe Exzentrizität als sehr unwahrscheinlich erwarten. Außerdem weisen Beobachtungen und Rech-



A. Crida u. W. Kley, Uni Tübingen

Abb. 4 Planeten verursachen Dichtestörungen in Akkretionsscheiben. In der globalen Ansicht (a) ist zu erkennen, wie der Planet spiralförmige Störungen induziert, deren Stärke von seiner Masse

abhängt. Der Öffnungswinkel der Spiralen ist durch die Temperatur in der Scheibe gegeben. Dichteverteilung und Strömungsfeld in der direkten Umgebung eines Planeten mit einer Saturn-

masse zeigen die Ausdehnung des gravitativen Einflussbereichs (Hill-Sphäre, gestrichelte Linie) des anwachsenden Protoplaneten (b).

3) Dies ist wie u. a. bei den Sternen ν Andromedae oder 55 Canri der Fall.

nungen zu resonanten Planetensystemen darauf hin, dass die Planet-Scheibe-Wechselwirkung die Exzentrizität eher dämpft als anregt [8]. Somit geht man heute davon aus, dass die Gravitationswechselwirkung zwischen den Planeten die hohe mittlere Exzentrizität hervorruft. Nimmt man an, dass sich anfänglich mehrere – auch massereiche – Planeten in der Scheibe gebildet haben³⁾, so können diese sich z. B. aufgrund einer unterschiedlich schnellen radialen Migration annähern. Bei schrumpfenden Abständen nehmen die gegenseitigen gravitativen Störungen zu, wodurch die Exzentrizitäten e anwachsen. Wird e zu groß, so kann durch eine nahe Begegnung zweier Planeten ein Planet letztlich aus dem System geworfen werden, während der andere auf einer hochexzentrischen Bahn zurückbleibt.

Die verbesserten Theorien zur Planetenentstehung können einige der neuentdeckten Eigenschaften der extrasolaren Planetensysteme gut wiedergeben. Doch natürlich haben sich wieder neue Fragestellungen eröffnet: Was bringt die einwärts wandernden Planeten letztlich in Sternnähe zum Anhalten? Warum sind anscheinend in unserem Sonnensystem die Planeten nur begrenzt gewandert? Ist die Architektur des Sonnensystems einzigartig oder häufiger zu erwarten? Wie hängt das Auftreten von Planetensystemen vom Sterntyp (dessen Masse) ab? Und last but not least: Wie häufig sind erdähnliche Planeten mit lebensfreundlichen Bedingungen?

Literatur

- [1] S. Wolf und H. Klahr, *Sterne und Weltraum*, Februar 2006, S. 22
- [2] D. N. C. Lin, *Spektrum der Wissenschaft*, Juni 2008, S. 24
- [3] J. Blum und G. Wurm, *Ann. Rev. Astr. Astrophys.* **46**, 21 (2008)
- [4] A. Johansen et al., *Nature* **448**, 1022 (2007)
- [5] E. Kokubo und S. Ida, *Icarus* **131**, 171 (1998)
- [6] G. Torres, J. N. Winn und M. J. Holman, *Astrophys. J.* **677**, 1324 (2008)
- [7] W. Kley und A. Crida, *Astr. Astrophys.* **487**, L9 (2008)
- [8] W. Kley und S. Sándor, in: R. Dvorak (Hrsg.), *Extrasolar Planets*, Wiley-VCH, Weinheim (2007), S. 99

DER AUTOR

Wilhelm Kley (FV Gravitation und Relativitätstheorie) beschäftigte sich schon in seiner Jugend mit der Astronomie. Nach Abschluss seines Physik- und Astrophysikstudiums in Bochum, Sussex und München folgte ein mehrjähriger Forschungsaufenthalt an der University of California in Santa Cruz und am Queen Mary College in London. Danach arbeitete er in der Arbeitsgruppe Gravitationstheorie an der Universität Jena, wo er sich 1997 habilitierte. Seit 2000 ist er Professor für Computational Physics am Institut für Astronomie und Astrophysik der Universität Tübingen. Seine Hauptarbeitsgebiete sind die Stern- und Planetenentstehung. Er ist Sprecher der DFG-Forscherguppe „The Formation of Planets: The Critical First Growth Phase.“

