

Überraschende Beute bei der Jagd nach fernen Planeten

Planetenbildungstheorien auf dem Prüfstand

Norbert Pailer, Landstr. 24, 88719 Meerburg-Stetten

Verfeinerungen der Entwicklungsvorstellungen von Planetensystemen werden seit langem verfolgt. Noch in den 50er Jahren hieß die Prämisse von H. C. UREY: „Gebt mir eine Handvoll Mondstaub, und ich erkläre euch die Planetenentstehung.“ Heute liegen rund 380 kg Mondmaterial in unseren Labors und wir sind von einem schlüssigen Planetenentstehungsmodell weiter entfernt als je zuvor. Woher kommt diese Erschütterung?

Bislang gab es neben unserem eigenen Planetensystem kein anderes, an dem bisherige Vorstellungen hätten überprüft werden können. Das hat sich mit der Entdeckung von extra-solaren Planetensystemen geändert. Damit hat sich eine Möglichkeit ergeben, die bisherigen hypothetischen Ansätze zur Kosmogonie von Planetensystemen anhand einer breiten Datenbasis zu überprüfen.

So mögen wir zwar heute extra-solare Planetensysteme entdeckt haben, gleichzeitig haben wir aber unsere Planetenentwicklungstheorie verloren. Es gibt immer noch kein unter den Fachleuten konsensfähiges Standardmodell der Planetenentstehung, dafür aber manches einleuchtende Argument für den bisherigen „Triumph der Erfolglosigkeit“ (BLUM & DORSCHNER 1996).

Kurzer Abriß der Geschichte unseres Weltbildes

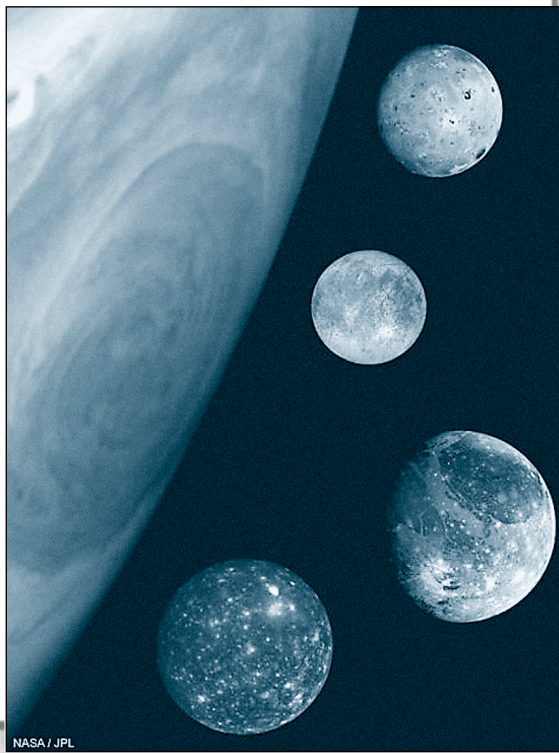
Es ist eigentlich noch nicht so lange her, da bestand unsere Welt aus einer Sonne und ihren Planeten inklusive den Kristallsphären für Fixsterne mit der Erde als Zentrum. Zur Erklärung der Bewegungen der Himmelskörper, die Generationen von Astronomen peinlich genau aufgezeichnet hatten, wurden Modelle von absolut durchsichtigen Kristallsphären abgeleitet. Dieses Bild wurde in Schulen gelehrt, fand Eingang in Sprache und Literatur. Andersdenkende wurden verurteilt, manchmal gefoltert und mit dem Tode bestraft. Es überrascht kaum, daß dieses Weltbild nur selten in Frage gestellt wurde. Über Jahrtausende hinweg vertraten Aristoteles, Plato, Augustinus und Thomas von Aquin wie fast alle großen Philosophen und Wissenschaftler aller Kulturen diese falsche Lehrmeinung, die erst im siebzehnten Jahrhundert korrigiert wurde.

Später wurde unsere Milchstraße mit ihren 100 Milliarden Sternen zum Universum erklärt. In den letzten Jahrzehnten wurde das Konzept unseres Universums erneut dramatisch erweitert: Moderne Aufnahmen zeigten mehr Galaxien jenseits unserer Milchstraße als Sterne innerhalb der Milchstraße. Der gelehrte Jurist Edwin HUBBLE wies erstmals Anfang des 20. Jahrhunderts nach, daß die leuchtenden Lichtinseln am Himmel Abbilder ferner, eigenständiger Milchstraßensysteme sind. Wir füllen seither den Kosmos mit rund 100 Milliarden Galaxien – ähnlich unserer Milchstraße. Die Galaxien sollen nach Urknallvorstellungen von uns wegfliegen, ähnlich wie die Splitter einer gigantischen Explosion. Die Splitter verteilen sich allerdings nicht einfach in einem bestehenden Raum, sondern der Raum spannt sich erst durch die Expansion auf. Das ist zugegebenermaßen ein sehr abstrakter Vorgang.

Wissenschaftler sind sich noch nicht einig, ob sich das Universum für immer ausdehnt oder ob die Expansion eines fernen Tages zum Stillstand kommt. Es könnte auch sein, daß der Kosmos in einem „Endknall“ wieder in sich zusammenfällt. Eine Antwort auf diese Frage hängt unter anderem davon ab, welche Gesamtmasse im Weltall vorhanden ist. Es wird z. B. davon ausgegangen, daß das gewaltige (sichtbare) Reservoir von rund 100 Milliarden Galaxien nur einen kleinen Anteil von 5-10% der existierenden Materie ausmacht; der große Rest von über 90% bildet danach die sogenannte Dunkle Materie. Auf dem Weg zu einer Lösung obiger Frage haben Wissenschaftler aus der Beobachtung von Supernovae Hinweise (COWEN 2001) erhalten, daß sich der Kosmos möglicherweise beschleunigt ausdehnt, wofür man die Dunkle Energie verantwortlich macht.

In den vergangenen Jahrhunderten hat sich das Bild vom Universum also dramatisch gewandelt. Aber auch unsere heutigen Vorstellungen sind nicht endgültig und haben ihre Lücken und Ungeheimheiten. Sicher ist wohl nur, daß unser Bild des Universums mit den neuesten Messungen nicht seine letzte Inkarnation erfahren hat. E. R. HARRISON hat das im Vorwort zu seinem Buch „Kosmologie“ so ausgedrückt (HARRISON 1983): „Kosmologie (ist) die Erforschung der Entstehung des Unter-

Abb. 1: Die Welt der vier großen Jupitermonde von der Vulkan-aktiven Io über die global vereiste Europa-Oberfläche bis hin zu der bis zur Sättigung bekrateren Kallisto-Oberfläche. (NASA)

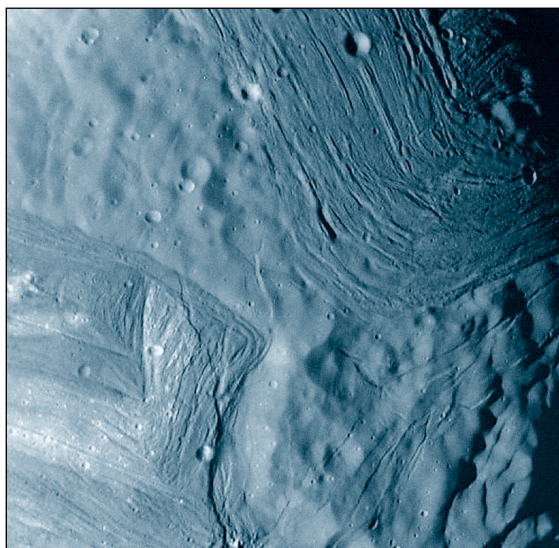


gangs kosmischer Glaubenssysteme ... Kosmologie ist das Studium der Universa, die erdacht wurden, um menschliche Erfahrung verstehbar zu machen. Für jede Gesellschaft ... gibt es ein Universum und zu jedem Universum gehört eine Gesellschaft; ... eines existiert nicht ohne das andere.“

Planeten und Monde als individuelle Welten

Die Erde und ihre Umgebung wurde bislang als Basis für die Ableitung einer Planeten-Evolutionslinie zugrundegelegt, woraus sich die Disziplin der vergleichenden Planetologie entwickelt hat. Messungen vor Ort mit Hilfe von Raumsonden haben uns allerdings die fernen Planeten als ausgespro-

Abb. 2: Die Struktur des Saturnmondes Miranda mit ihren wie von Giganten gepflügten Oberfläche. (NASA)



chen individuelle Welten plastisch vor Augen geführt. Daraufhin war die Erwartung, daß zumindest benachbarte Monde einander ähneln sollten. Die direkten Untersuchungen von Mondwelten hat aber auch hier ein Umdenken nahegelegt:

- Das System der vier großen Jupitermonde zeigt Kontraste, wie sie größer nicht hätten ausfallen können. Abb. 1 gibt eine Übersicht. Neben der vulkan-aktiven Io befindet sich die mit einem Eispanzer versehene Europa. Ganymed zeigt mit seinen globalen Gräben Spuren geologischer Aktivitäten, und nur Kallisto mit seiner bis zur Sättigung getriebenen Bekraterung entspricht den Erwartungen einer alten Mondoberfläche fernab der Sonne. Alle anderen Monde müssen gemäß bisheriger Vorstellungen über die Entstehung des Planetensystems als Ausnahme gelten.

- Der Uranusmond Miranda: Die Oberfläche ist ein wilder Reigen von tiefen Gräben, parallelen Gebirgszügen, Steilfelsen, flacheren Hügeln, Einschlagskratern und erstarrten Fluten von einst geschmolzener Oberflächenmaterie, was aus Abb. 2 eindrucklich hervorgeht. Eine derart wilde Landschaft ist für eine so kleine, kalte, eisige Welt in so großer Sonnenentfernung recht ungewöhnlich und in jedem Fall unerwartet.

- Der ferne Neptunmond Triton läuft nicht nur als planetarer Geisterfahrer in umgekehrter Richtung um Neptun, sondern betreibt überdies noch eine Art „Eisvulkanismus“. Wenn man für den Vulkanismus auf Io das gewaltige Gravitationsfeld des Jupiter und die Wechselwirkung mit großen Monden verantwortlich macht, so entfallen für Triton all diese Argumente. Trotzdem sind Spuren von Vulkanismus nicht zu übersehen. „Triton ist das irrwitzigste Objekt, das wir je sahen“ (L. SODERBLOM).

Hintergrund für die Jagd nach extra-solaren Planetensystemen

Bei der Rasterfahndung nach fernen Planeten im Weltall geht es nicht nur um ein Verständnis von deren Natur, sondern ganz zentral um Aufklärung von Entwicklungsprozessen, auch wenn diese wegen vorausgesetzter langer Zeitskalen i. a. nicht direkt beobachtbar sind. Die Rezeptur heißt deshalb:

- Setze Einzelbeobachtungen von Entwicklungsstadien (oder dem, was man dafür hält) unterschiedlicher Objekte zu einem Film zusammen und definiere dies als Entwicklung. Das Ergebnis ist ein Film aus Einzelaufnahmen unterschiedlicher Szenen.

Die bisherigen hypothetischen Ansätze zur Kosmogonie von Planetensystemen können nun anhand realer Daten – man geht heute von rund 80 extra-solaren Planeten aus – überprüft und im positiven Fall weiter entwickelt werden:

- Die Suche nach extra-solarem Leben erfährt hiermit seine erste sachliche Rechtfertigung.

- Es gibt (noch) keine Bilder extra-solarer Planeten: Die Hinweise stammen aus der Spektroskopie von Sternen und deren Astrometrie (genaueste Vermessung der Sternposition).
- Planetenentstehung war bisher an sonnenähnliche Sterne gekoppelt, was heute deutlich weiter gesehen wird.

Klassische Theorie der Planetenentstehung

Gestern glaubten wir noch: Ein Planet entsteht in dichter Scheibe aus Gas und Staub, die einen neu geborenen Stern umgibt; Staubkörner bleiben aneinander haften, ziehen bald Gasmassen auf sich. Für das Wachstum von Staub bis hin zu Planetesimalen (Planeten-Vorstufen) spielen nach theoretischen Vorstellungen zwei physikalische Prozesse eine wichtige Rolle: Stöße zwischen den Partikeln und die Haftung aneinander. Abb. 3 zeigt einige mit dem Hubble-Weltraumteleskop entdeckten Planetesimale im Gebiet des Orion-Nebels, deren aerodynamische Form aus der hochenergetischen Strahlung der hellsten Sterne der Umgebung resultiert. Innerhalb weniger Millionen Jahre sollen sich so Planeten bilden, deren Masse größer als die von Jupiter sein können. Dachten die Astronomen – und begaben sich auf die äußerst schwierige Suche nach solchen lauwarmen Winzlingen in unmittelbarer Umgebung von heißen, gleißend hellen Zentralsternen. Noch hat kein Mensch wirklich auch nur einen dieser extra-solaren Planeten gesehen. Zu nah kleben sie an ihrer Muttersonne und werden von dessen gleißendem Licht überstrahlt. Das ergibt etwa Verhältnisse, als müßten die Astronomen nach einem 80 Kilometer entfernten Staubkorn suchen, das zehn Zentimeter neben einer 100 Watt-Glühlampe schwebt.

Eine Skizze von einer Planetenentstehung in der zirkumstellaren Scheibe eines sonnenähnlichen Sterns vom kleinsten Teilchen bis hin zu planetengroßen Körpern läßt sich – etwas detaillierter – wie folgt darstellen (PFAU 2001):

Phase 1: Kondensation. Im dichten Gas einer zirkumstellaren Scheibe bilden sich Makromoleküle und Festkörperteilchen aus, die in Richtung Scheibenebene sedimentieren. Prozesse sind stark dichte- und temperaturabhängig und werden somit vom Abstand zum Zentralgestirn kontrolliert.

Phase 2: Koagulation. Brownsche Bewegung führt Teilchen zusammen, die wegen der kleinen Relativgeschwindigkeiten von maximal Zentimetern pro Sekunde aneinander haften. Aufbau von 100 µm-Staubteilchen in wenigen Jahren. Dieser Prozeß läßt sich in Experimenten nachvollziehen.

Phase 3: Agglomeration. Hier geht es um Zusammenbacken von sub-mm-Teilchen zu 100-1000 m großen Planetesimalen in ca. 10^5 Jahren; die Kenntnisse über den Agglomerationsprozeß sind noch wenig fundiert.

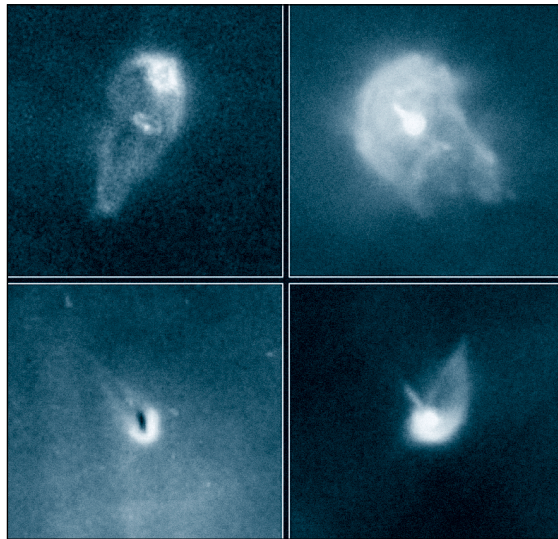


Abb. 3: Protoplanetare Scheiben im Orion-Nebel, wie sie vom Hubble-Weltraumteleskop gesehen wurden. (NASA)

Phase 4: Akkretion. Die in Phase 3 gebildeten Planetesimale sind in der Lage, unter gravitativer Wirkung weiteres Material aufzusammeln und so zu Planetengröße zu wachsen.

Phase 3 fällt mit dem Versiegen des Materiestroms aus der interstellaren Molekülwolke und dem Eintritt des Sterns in das aktive T-Tauri-Stadium mit seinen starken Sternwinden zusammen. Deshalb müssen die Konglomerate bereits soweit entwickelt sein, daß sie den Prozess des Aufklarens (Entfernen von Gas und Staub zwischen den Objekten) unbeschadet überstehen.

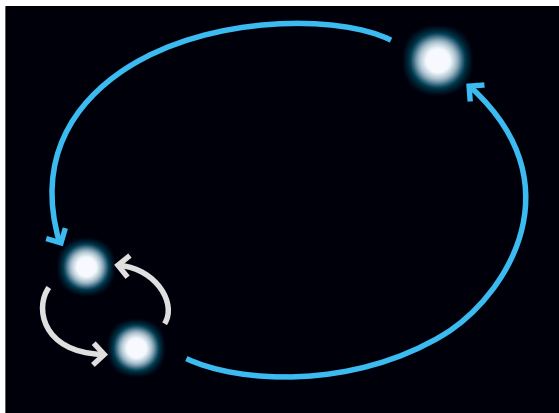
Aufgrund neuer Untersuchungen (s. u.) ermittelte zahlreiche Ausnahmen müssen gesondert behandelt werden.

Ergebnisse von Beobachtungen extra-solarer Planeten

Planeten in extremer Umgebung. Die Jagd nach extra-solaren Planeten war zunächst auf sonnenähnliche Objekte beschränkt. Ohne Erfolg. Der erste starke Hinweis auf ferne Planeten kam dann von fernen Pulsaren, bekannt unter der Bezeichnung PSR 1257+12 (WOLSCZAN 1994) bzw. PSR 1829-10. Pulsare waren jedoch als die letzten Orte für Planetenentstehung angesehen worden. Der erstgenannte Pulsar rotiert mit 162 Umdrehungen pro Sekunde extrem schnell und wird deshalb Millisekunden-Pulsar genannt. Diese Gattung von Pulsar wird für sehr alt gehalten. Lange Zeiträume sind nach Aussage der meisten Theoretiker in der Umgebung energiereicher elektromagnetischer Strahlung tödlich für planetenähnliche Objekte; sie sollten sich längst aufgelöst haben (COREY 1992).

Der Pulsar 1829-10 rotiert relativ langsam, weshalb auch hier eine Planetenentstehungstheorie trickreich sein muß, denn ein solcher Pulsar soll relativ jung sein, sodaß zur Planetenbildung eigentlich zu wenig Zeit blieb.

Abb. 4: Schematische Darstellung eines Dreifach-Sternsystems, dessen Staubscheiben sich gegenseitig stören können und damit Planetenbildung behindern. (Nach Chris KORESKE)



Planeten in freiem Flug. Obwohl das Hubble-Weltraumteleskop nicht speziell für die Suche nach fremden Planeten ausgelegt ist, gelang damit auf einen Schlag die Entdeckung 18 neugeborener „Planeten“, die vereinzelt und fernab von jedem Zentralstern in der vertrauten Umgebung des Pferdekopfnebels stehen (BÜHRKE 2000).

Dabei war die Entdeckung nicht so schwierig wie eine Erklärung derselben: Können solche Winzlinge direkt aus dem Kollaps riesiger interstellarer Molekülwolken entstehen? Wurden sie in zirkumstellaren Scheiben gebacken und dann weit hinaus in die interstellare Umgebung geschleudert? Aber über welche Mechanismen? Sind diese Objekte nicht zu groß, um sie als Planeten bezeichnen zu können? Aber für Sterne sind sie auch zu klein.

Entdeckung von Tripletten. Stellare Dreifachsysteme waren schon bisher bekannt. Nun hat sich auf der Suche nach extra-solaren Planeten ergeben, daß von 15 als Doppelsterne bekannte Systeme in einer Entfernung von etwa 500 Lichtjahren sieben davon Triplette sind (ein Verhältnis, das nicht für unsere ganze Galaxis repräsentativ sein muß), die schematisch in Abb. 4 gezeigt sind. Jedenfalls meint Chris KORESKE, der davon auf der diesjährigen American Astronomical Society-Konferenz berichtete, daß jegliches Zusammenballen von Materie in diesen Systemen sicher nicht einfach sein wird: Die Staubscheiben der Sterne werden periodisch zusammenstoßen, wobei Staub von den Sternen selbst aufgesammelt und/oder in den Weltraum geschleudert wird, weshalb solche Systeme – obwohl relativ häufig – kein heißer Tip für Planetengeburtstätten sind.

Folgerungen

- Bisher wurden nur Konzeptionen, also keine schlüssige Theorie, für Planetenentstehung entwickelt, die Fundament moderner Theorien bilden.
 - Bereits die ersten 80 entdeckten extra-solaren Planeten geben Anlaß, den Begriff des Planeten zu revidieren.

- Bisherige Vorstellungen erinnerten an einen eher gemütlichen Prozeß mit Aggregations- und Akkretionsphase (wobei Gravitation dominiert) um einen sonnenähnlichen Stern. Heute muß man sich Planetenbildung wie den Bau eines Wolkenkratzers im Auge eines Hurrikans vorstellen. WUCHTERL (2001) fragt deshalb, warum die berechnete Migrationsrate (das Verschwinden von Planeten in deren Sonnen) für Planeten so hoch ist, daß manche Theorie der Planetenentstehung eher einem Massaker als einer Geburt ähnelt, weil ganze Generationen von Planeten gleich wieder im Mutterstern verschwinden sollen.

- Es überrascht nicht, daß bevorzugt große Planeten entdeckt wurden; dies mag wegen der schwierigen Beobachtungsverhältnisse ein Auswahlereffekt sein. Aber unsere bisherigen Vorstellungen lassen es nicht zu, daß mehrfach Jupiter-große Planeten sich in einem erdähnlichen Abstand um die Sonne befinden.

Mit der Entdeckung erster extra-solarer Planetensysteme kam die Bewährungsprobe für unsere Modellvorstellungen für Planetenentstehung, die aber fürs erste scheiterte. Die Tatsache, daß wir uns mit der grundsätzlichen Frage „Was ist ein Planet?“ beschäftigen müssen, zeigt die Tiefe der Erschütterung. Wir haben extra-solare Planetensysteme entdeckt und gleichzeitig unsere Planetenentstehungstheorie verloren. Nach den zahlreichen Beobachtungen unterschiedlichster und meist überraschender Planeten-Verhältnisse haben nun die Theoretiker ihre Hausaufgaben zu machen, um die große Spanne der beobachteten Eigenschaften, den Massen von bis zu 15 und mehr Jupitermassen und die exzentrischen und resonanten Bahnen zu erklären.

Literatur

- BLUM J & DORSCHNER J (1996) Vom Staubkorn zum Planeten. Physik in unserer Zeit 27, 264-270.
- BÜHRKE T (2000) Planeten im freien Flug. Sterne und Weltraum 12/2000, 1032-1033.
- COREY S (1992) Unlikely Places; planets show up where nobody expected to see them. Scientific American.
- COWEN R (2001) A Dark Force in the Universe. Science News 159, No 14, 218.
- HARRISON ER (1983) Kosmologie. Die Wissenschaft vom Universum. Darmstadt.
- KORESKE C (2002) Search for Planets Instead Yields Bevy of Stellar Triplets, American Astronomical Society Conference; Quelle: http://www.space.com/scienceastronomy/astronomy/triple_stars_020110.html.
- PFAU W (2001) Fremde Planetensysteme im All. Sterne und Weltraum 1/2001, 20-27.
- WUCHTERL G (2001) Was ist ein Planet? Sterne und Weltraum 2/2001, 130-140.
- WOLSZCZAN A (1994) Confirmation of Earth-Mass Planets Orbiting the Millisecond Pulsar 1257 + 12. Science 246, 538.