Nach: Hans-Ulrich Keller: Kosmos Himmelsjahr 2018
Franckh-Kosmos Verlags-GmbH & Co. KG, Stuttgart 2017

Monatsthema November 2018

Der Planetenzoo

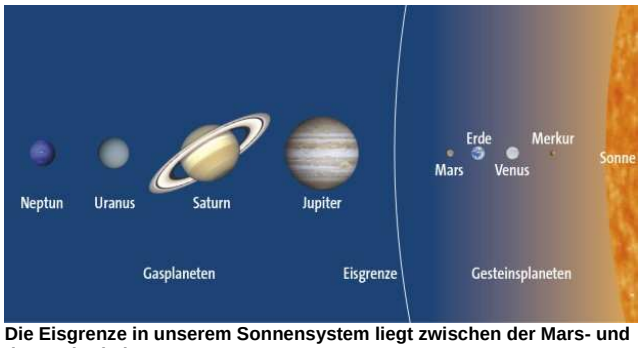
Unsere Sonne wird von acht großen Planeten umrundet. Daneben schwirren hunderttausende Zwergplaneten und Planetoiden um die Sonne. Auch Milliarden von Kometen sowie unzählige Meteoroide, Gas und Staub sind Bestandteile unseres Sonnensystems.
Die großen Planeten laufen dabei in fast kreisförmigen Bahnen um die Sonne. Auch liegen ihre Bahnen ziemlich genau in einer Ebene. Die größte Abweichung von der Kreisform zeigt die Merkurbahn (e = 0,206), deren Neigung zur Fundamentalebene (Ekliptikebene) mit 7° auch am größten ist.
Die acht Planeten lassen sich in zwei Gruppen einteilen: In die terrestrischen (erdähnlichen) oder Gesteinsplaneten und in die Riesenplaneten oder Gasplaneten. Die vier terrestrischen Planeten Merkur, Venus, Erde und Mars laufen in geringen Abständen von 0,4 bis 1,5 AE um die Sonne. Ihre Durchmesser sind relativ klein - von Merkur mit 4878 km bis zur Erde mit 12.756 km. Ihre Dichten sind groß - von 3,9 g/cm^3 (Mars) bis zu 5,5 g/cm^3 (Erde). Ihre Massen sind recht gering - von 0,06 Erdmassen bei Merkur bis zu einer Erdmasse. Sie setzen sich aus Gestein und Metallen zusammen. Sie rotieren langsam: Venus einmal (retrograd) in 243 Tagen und Merkur in 58,6 Tagen. Noch am schnellsten dreht sich die Erde - eine volle Rotation dauert nur 23h 56m. Die terrestrischen Planeten sind arm an Monden. Merkur und Venus besitzen keinen Mond, die Erde einen und Mars zwei winzige Trabanten.
Die Gasplaneten Jupiter, Saturn, Uranus und Neptun haben große Abstände von der Sonne, von 5,2 AE bis 30 AE. Ihre Durchmesser sind gewaltig, vom elffachen Erddurchmesser des Jupiter bis zum vierfachen Erddurchmesser des Neptun. Ihre Dichten sind gering - von 0,7 g/cm^3 (Saturn) bis 1,7 g/cm^3 (Neptun). Die Massen der Riesenplaneten sind erheblich. Jupiter besitzt die 318-fache Erdmasse. Am leichtesten ist noch Uranus mit 14,5-facher Erdmasse. Wasserstoff und Helium sind Hauptbestandteile der Gasplaneten mit geringen Beimengungen von Kohlenwasserstoffen wie Methan und Kohlenstoff-Stickstoff-Verbindungen wie Ammoniak. In den Zentren der Riesenplaneten vermutet man jeweils einen Kern aus Gestein und Metallen. Ob dies zutrifft, soll die Raumsonde Juno der NASA bei Jupiter erkunden.

Exotische Landschaft eines Exoplaneten einer fernen Sonne. (NASA/JPL-Caltech)

Umhüllt werden die Riesenplaneten von dichten und ausgedehnten Atmosphären. Sie besitzen keine festen Oberflächen und rotieren sehr schnell. Jupiter dreht sich in knapp zehn Stunden um seine Achse. Eine Neptunrotation dauert nur 16 Stunden. Zahlreiche Monde begleiten die Gasplaneten auf ihrem Weg um die Sonne. Bei Jupiter und Saturn sind jeweils über fünf Dutzend Satelliten entdeckt worden. Von Uranus kennt man inzwischen 27 Trabanten und bei Neptun sind 14 Monde aufgespürt worden. Alle Riesenplaneten werden von Ringen aus Eispartikeln und Staub umgeben, wobei Saturn das beeindruckendste Ringsystem besitzt, das schon in kleinen Amateurteleskopen zu sehen ist.
Die Gasplaneten wandern alle jenseits der Eis- oder Schneegrenze um die Sonne. Jenseits der Eisgrenze bleibt die Oberflächentemperatur sonnenbeschienener Körper stets unter dem Gefrierpunkt von Wasser.

Die Entstehung der Planeten

Unser Planetensystem bildete sich vor knapp fünf Milliarden Jahren aus einer gewaltigen, um die werdende Sonne rotierende Gas- und Staubscheibe. Dies erklärt auch, weshalb alle Planeten in nahezu einer gemeinsamen Ebene um die Sonne laufen. Der vergleichsweise geringe Staubanteil der protoplanetaren, flachen Akkretionsscheibe lieferte das Baumaterial für die zukünftigen Planeten. Der Staub setzte sich aus mikroskopisch kleinen Körnern von Silikaten und Eisen zusammen. Beim Umschwirren der Sonne dieses Materials kam es zu permanenten Kollisionen der Staubkörner, die durch Adhäsion aneinander haften blieben. Adhäsion wird durch die elektromagnetischen Kräfte zwischen Molekülen bewirkt. In wenigen Millionen Jahren wuchsen die zunächst winzigen Partikel zu immer größeren Körnern heran. Es bildeten sich Klumpen, die zu größeren Brocken und schließlich zu kilometergroßen Blöcken, sogenannten Planetesimalen, heranwuchsen. Schließlich kam die Gravitation ins Spiel. Die Planetesimale fanden zu planetengroßen Körpern zusammen, deren Schwerkraft sie zu Kugeln formte. Die Protoplaneten banden nicht nur Staub und größere Brocken an sich, sondern auch interplanetares Gas, was zu gewaltigen Atmosphären führte. Die sonnennahen terrestrischen Planeten verloren jedoch durch die Sonnenhitze und den intensiven Sonnenwind, ein Partikelstrom aus Protonen, Alpha-Teilchen und Elektronen, ihre ursprünglichen Wasserstoffatmosphären. Erst Vulkanismus lieferte die späteren, dünnen Gashüllen um die erdähnlichen inneren Planeten.



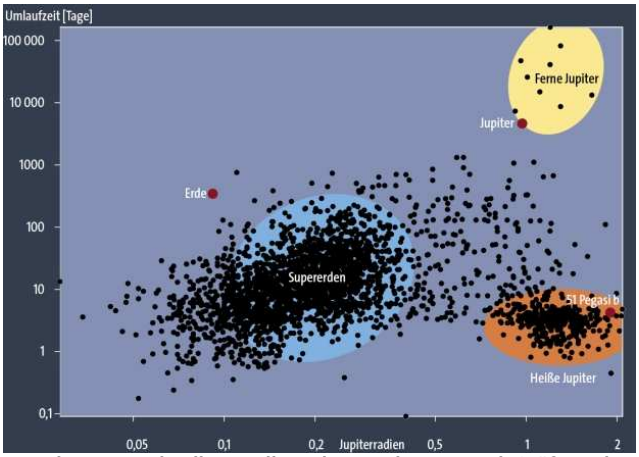
Die Eisgrenze in unserem Sonnensystem liegt zwischen der Mars- und der Jupiterbahn.

Die äußeren Riesenplaneten jenseits der Eisgrenze erlebten kein Striptease ihrer Atmosphären. Im Gegenteil, durch das vorhandene Eis erfolgte die Akkretion zu großen Planeten schneller. Um einen relativ kleinen, felsigen Kern formten sich gewaltige Hüllen aus Wasserstoff und Helium - im tiefen Inneren zu metallischem Wasserstoff gepresst, weiter außen dicke Atmosphären bildend.
Dieses recht plausible Szenario der Planetenentstehung wurde jedoch vor nunmehr über zwanzig Jahren in Frage gestellt, als man Planeten um fremde Sonnen entdeckte. Inzwischen sind rund 4000 Planeten um andere Sterne gefunden worden. Dieser Zoo von Planeten in über 600 Sonnensystemen gibt den Theoretikern der Planetenbildung viele Rätsel auf. Die bisherigen Vorstellungen über die Entstehung von Planeten müssen offenbar revidiert werden. Das traditionelle Modell für die Bildung von Planeten funktioniert nicht bei den Exoplaneten, wie die kalten Trabanten von Sternen genannt werden.

Exoplaneten werfen Fragen auf

Bis zum Jahr 1995 war man sich nicht sicher, ob unser Planetensystem einzigartig ist oder ob auch um andere Sterne außer unserer Sonne Planeten kreisen. Im Oktober 1995 gaben zwei Schweizer Astronomen vom Observatorium Genf die Entdeckung eines Planeten um den Stern Nr. 51 im Sternbild Pegasus bekannt: sie hatten den ersten Planeten außerhalb unseres Sonnensystems gefunden. Im Dezember 2015 hat die neu gegründete Arbeitsgruppe der IAU zur offiziellen Benennung der Sterne 51 Pegasi den Eigennamen „Helvetios" verliehen.
Der Planet 51 Pegasi b - so seine Kennung - löste bald Verwunderung aus. Mit halber Jupitermasse ausgestattet, ist er sicher ein Gasplanet. Aber er umrundet in nur vier Tagen seine Muttersonne

51 Peg, wobei er ihr viel näher ist als Merkur unserer Sonne. Somit muss er sich auch entsprechend aufheizen und vermutlich gebunden rotieren, also seiner Sonne ständig die gleiche Seite zukehren. Wie kann aber ein solch heißer Jupiter in der Nähe eines Sterns entstehen?



Das Diagramm zeigt die Verteilung der Exoplaneten nach Größe und Umlaufzeit.

Bald wurden weitere „heiße Jupiter" entdeckt, teils sogar mit mehr Masse und auch Größe als Jupiter. Man spricht von „Superjupiter". So wird beispielsweise der Stern HD 87883 von einem Planeten mit 82-facher Jupitermasse umkreist. Dies ist fast schon ein Brauner Zwerg.

Bald schien es, die meisten Exoplaneten seien vom Typ heiße Jupiter und Superjupiter. Doch dies ist auf einen Auswahleffekt bei der Suche nach Exoplaneten zurückzuführen. Die Entdeckung von Exoplaneten erfolgt durch indirekte Methoden. Sterne mit Planeten zeigen periodische Variationen ihrer Radialgeschwindigkeit, wenn man nur präzise genug misst. Denn der Mittelpunkt des Sternes kreist um den gemeinsamen Schwerpunkt des Systems Stern - Planet. Dieser Doppler-Wobble-Effekt ist ausgeprägter, je massereicher ein Planet ist und je näher er seinen Zentralstern umkreist. Liegt die Bahnebene eines Planeten in oder nahe dem Visionsradius (Sichtlinie) des Beobachters, so zieht er von Zeit zu Zeit vor seinem Mutterstern vorbei und bewirkt eine minimale Abschwächung des Sternenlichtes, die mit hochgenauen Helligkeitsmessungen erfasst werden kann. Auch mit dieser Transit-Methode werden in erster Linie große und sonnennahe Planeten erfasst.

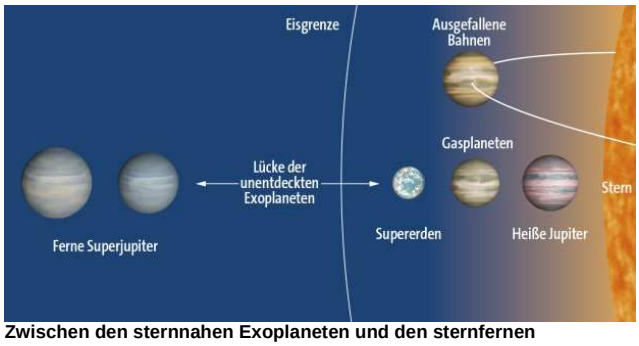
Nur wenige Exoplaneten hat man mit den größten, erdgebundenen Teleskopen direkt gesehen. Denn ein Exoplanet leuchtet Milliarden Mal schwächer als sein Zentralstern, der mit seinem Glanz die ihn umkreisenden Planeten überstrahlt. Um überhaupt eine Chance zu erhalten, einen Exoplaneten direkt zu beobachten, muss man das Licht des Zentralsterns mit einer Art Koronograf ausblenden (Gemini Planet Imager - GPI). Etwas Ähnliches macht die ESO mit dem Instrument **S**pectro-**P**olarimetric **H**igh-contrast **E**xoplanet **RE**search (SPHERE).

Um nicht nur heiße Jupiter und Superjupiter zu finden, sondern auch Planeten mit Massen und Durchmesser ähnlich denen unserer Erde, hat die NASA die Mission Kepler entworfen. Die Kepler-Raumsonde wurde im März 2009 gestartet. Sie hat ein relativ kleines Areal von 105 Quadratgrad in den Sternbildern Schwan , Leier und Drache nach Sternen mit erdähnlichen Planeten abgesucht. Zur Überraschung der Planetenjäger wurden mit Kepler zahlreiche Exoplaneten entdeckt, deren Größen und Massen zwischen den Werten von Erde und Neptun liegen. Solche „Supererden" sind in unserem Sonnensystem unbekannt.

Mit Kepler stieg die Anzahl der aufgefundenen Exoplaneten sprunghaft an. Bis Anfang 2017 war die Zahl der definitiv nachgewiesenen Exoplaneten auf 3535 angestiegen, die in 595 Planetensystemen ihre Muttersterne umrunden. Neben der großen Menge an Supererden und „Neptuns" zeigt der Planetenzoo noch weitere verwunderliche Eigenschaften, die einer Erklärung bedürfen. Etliche Planetenbahnen sind langestreckt wie die Kometenbahnen in unserem Sonnensystem. Ferner variieren die Bahnneigungen stark und weichen von der Äquatorebene des Muttersterns erheblich ab. Auch gibt es retrograd laufende Planeten, die ihre Zentralsonne entgegen zu deren Rotationsrichtung umkreisen. Dies ist eine höchst merkwürdige Erscheinung, wenn man davon ausgeht, dass Planeten aus rotierenden Akkretionsscheiben gebildet werden. Zudem wurden Riesenplaneten entdeckt, die in sehr großen Abständen um ihre Muttersonne wandern. So beträgt der Abstand eines vier Jupitermassen schweren Planeten von seinem Muttersten HD 131399A immerhin 82 AE, das sind 12,3 Milliarden Kilometer. Das System ist 320 Lichtjahre von uns entfernt.

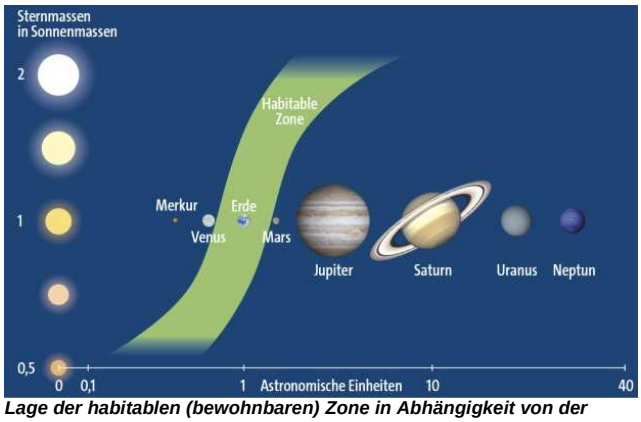
Nach den inzwischen vorliegenden statistischen Daten ist davon auszugehen, dass die Zahl der Exoplaneten die Anzahl der Sterne in der Galaxis bei weitem übertrifft. Hinzu kommen die Planeten, die ungebunden ohne Muttersonne durch das Milchstraßensystem driften. Diese herumtreibenden Planeten (engl.: free floating planets) wurden mit Hilfe des Gravitationslinseneffektes aufgespürt.

Gemäß der Allgemeinen Relativitätstheorie (ART) bündelt ein dunkler Körper - beispielsweise ein Planet - durch seine Schwerkraft das Licht des fernen Sternes wie eine optische Linse, wenn er vor dem Stern vorbeiläuft. Denn nach der ART werden die Lichtstrahlen durch das Schwerefeld des Planeten abgelenkt. Kurzfristig erscheint der Stern etwas heller. Da die Masse eines Planeten vergleichsweise gering ist, so ist es auch der Effekt, was als „Microlensing" bezeichnet wird. Man vermutet, dass es ebenso viele ungebundene Planeten wie Sterne in unserer Milchstraße gibt.



Zwischen den sternnahen Exoplaneten und den sternfernen Superjupiters klafft eine Lücke.

Die Suche nach Exoplaneten bleibt spannend. Unter den Planetenjägern macht sich Goldgräberstimmung breit. Fast ständig gibt es neue Überraschungen. So wurde Anfang 2017 die Entdeckung eines 40 Lichtjahre entfernten Systems mit sieben erdgroßen Planeten bekannt gegeben, die um eine rote Zwergsonne kreisen. Die Durchmesser dieser Exoplaneten liegen zwischen 0,77 und 1,13 Erddurchmessern. Die Bahnen dieses Trappist-1 benannten Systems sind alle kleiner als die Merkurbahn. Drei von sieben Trappist-1-Planeten laufen innerhalb der habitablen Zone um ihren Zentralstern, was Spekulationen über mögliche Lebensformen auf ihnen nährt.



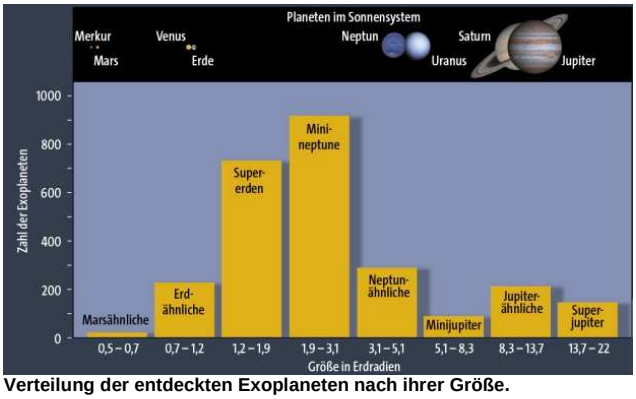
Lage der habitablen (bewohnbaren) Zone in Abhängigkeit von der Masse des Muttersterns.

Neue Ideen zur Planetenentstehung

Die vielen sehr unterschiedlichen Planetensysteme bereiten den Theoretikern Kopfzerbrechen. Wie ist die Vielfalt des Planetenzoos zu erklären? Wie sind die heißen Jupiter in unmittelbarer Nähe von Sternen entstanden? Wieso sind über 60 Prozent der Exoplaneten Supererden? Woher kommen die driftenden, muttersternlosen Planeten? Wie sind die exzentrischen und stark geneigten Bahnen zustande gekommen? Heiße Jupiter und Superjupiter sind sicher nicht in unmittelbarer Nähe ihrer Sonne gebildet worden. Vielmehr kann es sein, dass nach ihrer Bildung durch ihre Gravitationswirkung dichtere Zonen in der Akkretionsscheibe entstanden sind. Der erhöhte Strömungswiderstand ließ die Planeten nach innen zum Mutterstern driften. Man nennt dies Migration.

Für die Migrationshypothese spricht auch die Resonanzstabilisierung von Bahnen, die eintritt, wenn Planeten in Bahnen laufen,

deren Umlaufzeiten zueinander in kleinen ganzzahligen Verhältnissen stehen. Ein schönes Beispiel dafür sind Neptun und Pluto. Drei Neptunumläufe (495 Jahre) entsprechen zwei Plutoumläufen (496 Jahre). Vermutlich hat Jupiter auch einen Migrationshintergrund. Nach seiner Entstehung im Gebiet des heutigen Planetoidengürtels driftete er nach innen bis in die Nähe der Marsbahn und wanderte anschließend wieder nach außen in seine gegenwärtige Bahn, wobei er die Bildung eines weiteren Planeten aus dem Material des Planetoidengürtels verhinderte.
Auch ist anzunehmen, dass in der frühen Phase der Akkretion manche frisch gebackene Planeten die Plätze, besser die Bahnen tauschten. Grund dafür dürfte das Gedränge sein, wenn größere Planetesimale nahe beieinander entstanden und sich gravitativ beeinflussten. Dabei könnte es auch zu den exzentrischen und stark geneigten Bahnen mancher Exoplaneten gekommen sein. Die Dichteverteilung in den Akkretionsscheiben spielt ebenfalls eine entscheidende Rolle. Mit Hilfe der gigantischen Radioteleskopanlage ALMA der ESO in Chile erhofft man sich, mehr über die Akkretionsscheiben neu entstehender Sterne zu erfahren. Unklar ist bisher noch, ob die Supererden Gesteins- oder Gasplaneten sind. Wenn sie aber Gasplaneten sind, was verhinderte ein weiteres Wachstum zu Jupiter- oder gar Superjupitergröße?



Verteilung der entdeckten Exoplaneten nach ihrer Größe.

Ein interessantes System ist HR 8799: Vier Planeten von mindestens fünffacher Jupitermasse umrunden den Stern in Entfernungen jenseits der Distanz Sonne - Saturn, zwei davon sogar in mehr als Neptunentfernung, also in über 30 AE. Ihre nahezu kreisförmigen Bahnen lassen vermuten, dass sie nicht von innen nach außen gewandert sind. Sie können sich kaum durch Akkretion nach der traditionellen Theorie gebildet haben. In diesen vom Stern aus gesehen fernen Bezirken bewegen sich Planetesimale äußerst träge, weshalb die Massenzunahme von Protoplaneten zu langsam erfolgt, um einen massereichen Planeten zu bilden, bevor die protoplanetare Scheibe zerfallen ist. Eine Hypothese geht davon aus, dass es zu einem Gravitationskollaps kommen kann, wenn der äußere Rand der Akkretionsscheibe eine entsprechend hohe Dichte von Gas und Staub aufweist und vor allem recht kalt ist. Beim Kollaps muss außerdem die auftretende Wärme effizient abgeführt werden.
Eine Erkenntnis ist sicher: Bei der Bildung von Planetensystemen aus rotierenden Akkretionsscheiben um junge Sonnen muss es chaotisch zugegangen sein. Anders ist die Vielfalt im Planetenzoo nicht zu verstehen. Bald werden weitere Daten zur Verfügung stehen, um Licht in das Dunkel der Planetenbildung zu bringen. Die NASA will in Kürze die Raumsonde **T**ransiting **E**xoplanet **S**urvey **S**atellite (TESS) ins All schießen, gefolgt vom ESA-Projekt **CH**aracterising-**E**x**O**Planet **S**atellite (CHEOPS). Sowohl TESS als auch CHEOPS sollen bei hellen, sonnenähnlichen Sternen gezielt nach Exoplaneten suchen, die weder besonders nah noch weit weg ihren Mutterplaneten umrunden. Denn es sollte auch Planeten in mittleren Abständen vom Zentralstern geben.
Viel verspricht man sich auch von den Beobachtungsmöglichkeiten, die das **J**ames **W**ebb **S**pace **T**elescope (JWST) bietet. Mit ihm hofft man, selbst die chemische Zusammensetzung der Atmosphären von Exoplaneten zu ergründen und auch festzustellen, ob es sich um eine felsige Oberfläche eines Gesteinsplaneten handelt oder ob der Kandidat ein Gasplanet ist.
Sicher sind noch überraschende Entdeckungen im Planetenzoo zu erwarten. Wie meinte kürzlich ein Astronom? Zitat: „Die Natur ist cleverer als all unsere Theorien."