

Am Rande des CHAOS

Die Zahl der Planeten, die einen Stern umkreisen, ist kein Zufall. Unser Sonnensystem beispielsweise könnte früher zwar mehr Planeten besessen haben. Dann aber katapultierte es den einen oder anderen ins Weltall, um seine eigene Stabilität zu bewahren. Beobachtungen extrasolarer Planetensysteme helfen jetzt, diese Hypothese zu erhärten.

In Kürze

- ▶ **Die Himmelskörper** im Planetensystem unterliegen gegenseitigen gravitativen Wechselwirkungen, die sich aufschaukeln können. Solche Resonanzen können vor allem kleinere Objekte aus ihrer Bahn schleudern.
- ▶ **Die Bahnen der großen Planeten** sind stabil. Merkur und Venus allerdings könnten einst infolge von Resonanzen kollidieren. Daraus schlossen Forscher, dass Planetensysteme sich stets am Rand zur Instabilität befinden. Ihre langfristige Stabilität bewahren sie, indem sie im Lauf der Zeit einzelne Planeten aus dem System werfen oder ihre Zahl durch Kollisionen verringern.
- ▶ Anhand neuer Beobachtungen von **Exoplanetensystemen** um fremde Sterne lässt sich diese Hypothese überprüfen. Auch diese scheinen bis an den Rand ihrer Kapazität mit Planeten gefüllt zu sein.

Von Steven Soter

Die gleiche Schwerkraft, die Äpfel von den Bäumen fallen lässt, hält auch die Planeten auf ihren Bahnen. Isaac Newtons Erkenntnis, die er in seinen im Jahr 1686 fertig gestellten »Principia Mathematica« formulierte, bereitete dem Naturforscher aber auch Sorgen. Müsstensich die schwachen Schwerkräfte zwischen benachbarten Planeten nicht aufsummieren, sodass die Exzentrizitäten der Umlaufbahnen – deren Abweichung von der Kreisform – beständig zunehmen? Zusammenstöße zwischen den Planeten und schließlich die Zerstörung des Sonnensystems wären unvermeidlich. Da dies nicht geschah, glaubte Newton, dass Gott selbst hin und wieder eingriff, um die Bahnen der Planeten zu korrigieren und so für einen reibungslosen Ablauf am Himmel sorgte.

Um 1800 jedoch kam Pierre-Simon Laplace auf mathematischem Weg zu dem Schluss, dass sich das Sonnensystem selbst stabilisiert. Die gravitativen Wechselwirkungen führten nämlich, so der Mathematiker und Philosoph, nur zu kleinen Oszillationen der Bahnexzentrizitäten um ihre Mittelwerte herum. Warum Gott in seinem Hauptwerk über Himmelsmechanik nicht mehr vorkomme, fragte ihn daraufhin sein Freund Napoleon Bonaparte. »Dieser Hypothese, Sire«, soll er geantwortet haben, »bedurfte ich nicht!« Laplace war zudem überzeugt, dass sich der künftige Aufenthaltsort jedes Objekts im Sonnensystem aus den Bewegungsgesetzen exakt vorausberechnen

lasse, wenn nur die Positionen und Impulse aller Himmelskörper zu einem bestimmten Zeitpunkt genau genug bekannt seien.

Dann aber bewies Henri Poincaré im späten 19. Jahrhundert, dass Laplace einige seiner Gleichungen zu sehr vereinfacht hatte. Er hatte Terme weggelassen, die er als überflüssig ansah – die es aber keineswegs waren. Dadurch übersah Laplace, dass es im Sonnensystem zu chaotischen Bewegungen kommen kann. Tatsächlich wirken die Planeten bisweilen so aufeinander ein, dass schon kleinste Veränderungen der Anfangsorte zu einem völlig anderen Endzustand des Systems führen. Ein solches System bezeichnen Mathematiker und Physiker als chaotisch und man kann ihm nur mit modernen Hochgeschwindigkeitsrechnern zu Leibe rücken. Tatsächlich waren es Computer, die schließlich Belege dafür lieferten, dass das Sonnensystem insgesamt nur sehr geringe Stabilität aufweist. Laplace war widerlegt: Die Bewegungen der Himmelskörper sind über lange Zeiträume hinweg grundsätzlich nicht exakt vorhersagbar.

Kaum noch Platz im System

Heute simulieren Theoretiker die Entstehung von Planetensystemen auf immer leistungsstärkeren Rechnern, während astronomische Beobachter in schneller Folge neue Planetensysteme rund um fremde Sterne aufspüren. Die Faktenlage spricht dafür, dass Planetensysteme in der Regel bis fast an ihre Kapazitätsgrenzen mit Himmelskörpern »gefüllt« sind – (viel) mehr Planeten, so die verblüffende Fol-



ILLUSTRATION: NASA, JPL / CALTECH / TIM PYLE (SSC)

gerung, fänden darin gar keinen Platz. Die zahlreichen Beobachtungsdaten werden uns nun helfen, das fragile Gleichgewicht zwischen Ordnung und Chaos in Planetensystemen besser zu verstehen. Die Zeiten Laplaces, in denen das Sonnensystem als Musterbeispiel für uhrwerkhaft stabile Stabilität galt, sind jedenfalls vorbei.

Den ersten fundierten Beleg für Instabilitäten im Sonnensystem entdeckte der amerikanische Astronom Daniel Kirkwood im Jahr 1866, als er den Asteroidengürtel zwischen Mars und Jupiter untersuchte. Zu jener Zeit waren erst rund 90 Asteroiden bekannt, während heutige Kataloge die Bahnen von über 150 000 Exemplaren auflisten. Trotz der dürftigen Daten fand Kirkwood auffällige Lücken in der Verteilung der Zeiten, die Asteroiden für einen Umlauf um die Sonne brauchen. (Entsprechende Lücken wies auch die Verteilung der Bahndurchmesser auf, denn beide Größen hängen auf wohl definierte Weise miteinander zusammen.) So besaß keines der Objekte eine Umlaufdauer von etwa 3,9 Jahren. Dies entspricht, bemerkte Kirkwood, gerade einem Drittel der Umlaufdauer von Jupiter.

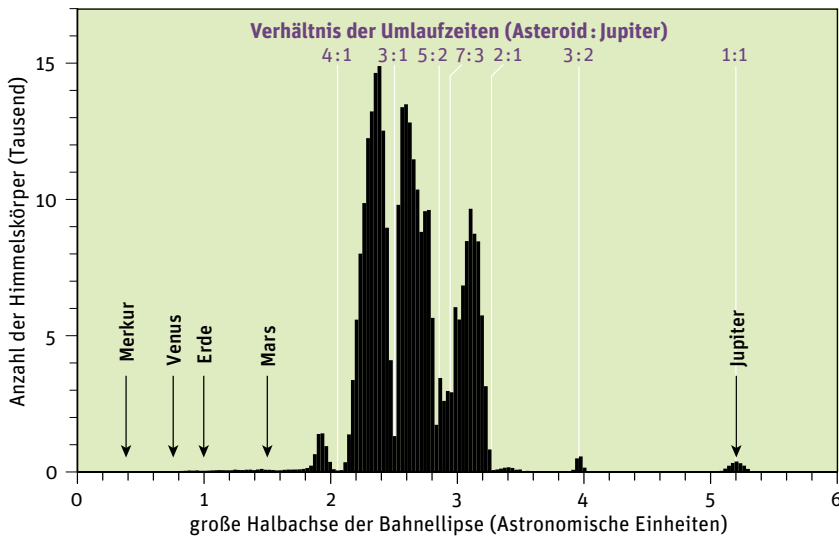
Das ist kein Zufall. Umkreist ein Asteroid unser Zentralgestirn exakt dreimal, während Jupiter genau einen Umlauf vollzieht, dann nähern sich beide Himmelskörper stets am gleichen Punkt ihrer Umlaufbahn am stärksten an. Dort erhält der Asteroid durch die Schwerkraft seines massereichen Nachbarn jedesmal einen kleinen Impuls. Mit der Zeit summieren oder schaukeln sich diese Störungen auf, sodass die Astronomen von einer

3:1-Resonanz der mittleren Bahnbewegung sprechen. Im Asteroidengürtel sind zudem weitere Lücken bekannt, die etwa durch die 5:2- oder 7:3-Resonanzen mit Jupiter entstehen.

Das Beispiel einer Kinderschaukel veranschaulicht, was dabei geschieht. Stößt man die Schaukel an zufällig ausgewählten, jeweils unterschiedlichen Orten ihrer Bahn an, so beeinflusst dies ihr Verhalten nicht allzu sehr. Stößt man sie aber immer dann an, wenn sie den höchsten Punkt ihrer Bahn erreicht, summieren sich die Stöße auf, die Schaukel schwingt höher und höher. Selbst wenn man sie nur jedes zweite oder dritte Mal am höchsten Punkt anstößt, verstärkt sich die Schwingung. Dann allerdings dauert das Aufschaukeln länger, die Resonanz ist schwächer.

Befindet sich ein Asteroid auf einer Umlaufbahn, auf der es zu Resonanzen kommt, kann seine Exzentrizität daher so weit anwachsen, dass er schließlich in die Sonne stürzt oder mit einem Planeten kollidiert. Möglich ist auch, dass er so nahe an einem Planeten vorbeizieht, dass ihn dessen Anziehungskraft in eine andere Region des Sonnensystems schleudert. Selbst Asteroiden auf stabilen Umlaufbahnen werden mitunter in eine der Kirkwood-Lücken gestoßen. Hier bekommen sie es dann mit Jupiter zu tun und werden aus dem Asteroidengürtel hinausgeschleudert. Viele der Meteoriten, die auf die Erde treffen, sind ebenfalls Bruchstücke aus dem Gürtel, die sich in eine der Resonanzlücken verirrt hatten. Die Riesenplaneten zerran aber auch an den kleinen Eiswelten, die den jenseits der

Vor 4,6 Milliarden Jahren, noch bevor die Erde existierte, war die Sonne von einer Scheibe aus Gas und Staub umgeben (Illustration), aus der sich schließlich die acht Planeten unseres Sonnensystems bildeten. Aber warum gerade acht? Computersimulationen deuten darauf hin, dass es früher mehr waren. Dann aber warf das Sonnensystem, um seine Stabilität zu bewahren, einige davon hinaus ins All.



AMERICAN SCIENTIST; BARBARA AUCTIONO WACH; JAU, MINOR PLANET CENTER

Deutliche Lücken durch Resonanzeffekte veranschaulicht dieses Diagramm. Die waagerechte Achse zeigt die Entfernung der untersuchten Asteroiden von der Sonne (genauer: die Länge der großen Halbachse der Bahnellipse), gemessen in Astronomischen Einheiten (1 AE entspricht der mittleren Entfernung zwischen Erde und Sonne). In der Senkrechten ist die Zahl der in der jeweiligen Entfernung bekannten Asteroiden aufgetragen. Destabilisierende Resonanzen führen zu Minima in der Verteilung (Kirkwood-Lücken). Der Asteroidengürtel zwischen Mars und Jupiter wird durch 4:1- und 2:1-Resonanzen mit Jupiter eingegrenzt. Auch stabile Resonanzen existieren, etwa die 3:2- (Hilda-Asteroiden) und 1:1-Resonanz (Jupiter-Trojaner).

Will man **säkulare Resonanzen** in Planetensysteme um fremde Sterne untersuchen, muss auch ein weiterer Effekt berücksichtigt werden. Die Auswirkungen der Raumzeitkrümmung können nämlich ähnlich groß wie die der Resonanz werden. Dies haben Fred C. Adams von der Universität Michigan und Gregory Laughlin von der Universität von Kalifornien in Santa Cruz jüngst am Beispiel der Sterne Ypsilon Andromedae und HD160691 nachgewiesen. Deren Planeten sind näher an ihrem Zentralgestirn als die Erde an der Sonne und der Gravitation ihrer Sterne daher besonders stark ausgesetzt.

Neptunbahn liegenden Kuipergürtel bevölkern. So sorgen sie für Nachschub an kurzperiodischen Kometen, wie sie regelmäßig auch ins innere Sonnensystem vordringen. Doch auch schon im jungen Sonnensystem übten sie Einfluss aus: Damals füllten kleine Eiskörper, die zu eng an den wachsenden Riesen vorbeiflogen, die Oortsche Wolke (die der Sonne noch ferner ist als der Kuipergürtel) mit vielen hundert Milliarden Kometenkernen.

Die folgenreichen Begegnungen verändern sogar die Umlaufbahnen der großen Planeten. Weil die wachsenden Planeten Saturn, Uranus und Neptun mehr kleine Körper nach innen in Richtung Jupiter schleuderten als nach außen, wanderten sie selbst auf Grund der Drehimpulserhaltung nach außen. Bei Jupiter war das Gegenteil der Fall: Der sehr massereiche Planet schleuderte die meisten kleinen Körper in das äußere Sonnensystem oder sogar noch weiter hinaus, weshalb er selbst nach innen wanderte.

Doch zurück zu den resonanten Umlaufbahnen. Meist sind sie hochgradig instabil, aber es gibt einige Ausnahmen. Dafür verant-

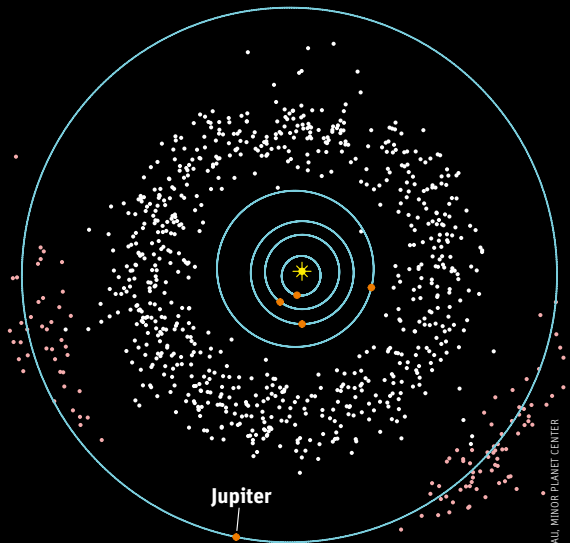
wortlich sind kleine Unterschiede in der Konfiguration der beteiligten Himmelskörper. Viele Objekte im Kuipergürtel sind in einer stabilen 2:3-Resonanz mit Neptun gefangen. Sie umkreisen die Sonne also zweimal, während der Planet drei Umläufe vollzieht. Nach Pluto, dem ersten entdeckten Objekt dieser Art, werden sie Plutinos genannt. Die Bahnen einiger dieser Plutinos und auch die Bahn von Pluto selbst kreuzen sogar die Neptunbahn. Die Geometrie ihrer Resonanzbahn verhindert aber, dass sie dem Planeten zu nahe kommen, und sichert so ihr Überleben.

Ein weiteres Beispiel für recht stabile Umlaufbahnen stellen die Trojaner dar. Diese Schar Tausender von Asteroiden bewegt sich auf derselben Bahn wie Jupiter um die Sonne. Manche laufen ihm voraus, andere hinterher, in einem Abstand von jeweils 60 Grad. Weil solche »koorbitalen« Objekte die gleiche Umlaufdauer wie der Planet selbst haben, sind die Trojaner in einer 1:1-Resonanz gefangen. Auch in diesem Fall bleiben nahe Vorbeiflüge an Jupiter aus, die Trojaner sind also ungefährdet. Ähnliche Asteroidenfamilien begleiten auch

Der Asteroidengürtel zwischen Mars und Jupiter enthält unzählige felsige Himmelskörper (weiße Punkte). Die Trojaner (rosa) außerhalb des Asteroidengürtels sind auf ihren Bahnen sicher, weil sie in einer 1:1-Resonanz mit Jupiter gefangen sind. Eingezeichnet sind nur Asteroiden mit einer Größe von über 50 Kilometer. Die meisten dieser Himmelskörper sehen vermutlich aus wie Eros. Der Asteroid ist mit seinen 33 Kilometern Längsdurchmesser viel zu klein, als dass ihn seine eigene Schwerkraft in Kugelform bringen könnte.



Eros



Jupiter

JAU, MINOR PLANET CENTER

die Planeten Mars und Neptun um die Sonne. Die gegenseitige Anziehung der Planeten führt auch zu zyklischen Prozessen, bei denen sich die räumliche Orientierung ihrer Umlaufbahnen ändert. Es kommt zu einem Effekt analog der Präzession der Rotationsachse der Erde, zudem rotiert die Hauptachse der Ellipse innerhalb der Ebene der Umlaufbahn. Dies führt zu säkularen, also langfristigen Resonanzen, denn die Drehung der Orientierung einer elliptischen Bahn dauert um ein Vielfaches länger als die Umlaufzeit. Säkulare Resonanzen wiederum können starke Störungen der Bahnen kleinerer Himmelskörper bewirken. Das Sonnensystem ist also eine tückische Region: Auf einer Unzahl möglicher Bahnen wären Himmelskörper säkularen Resonanzen oder Resonanzen der mittleren Bahnbewegung ausgesetzt. Besonders störungsanfällig können zudem Bahnen sein, auf denen sich Resonanzorbits überlappen.

Erde auf stark elliptischen Abwegen?

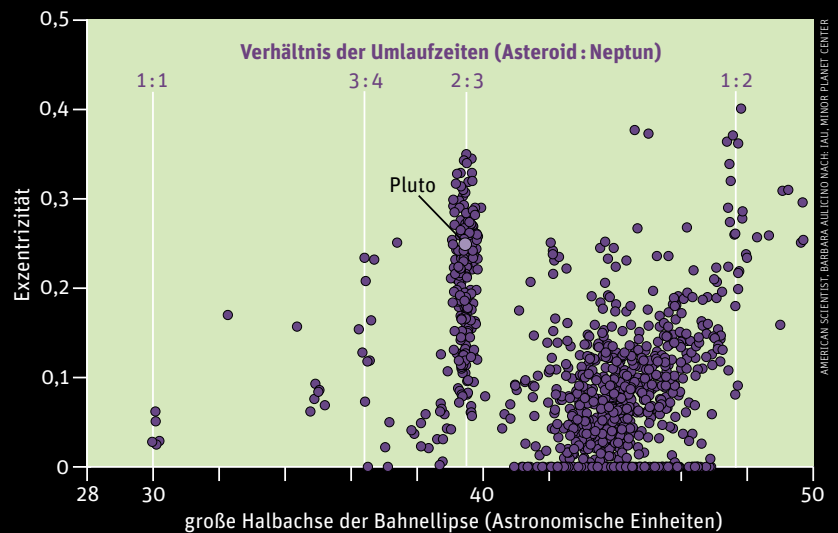
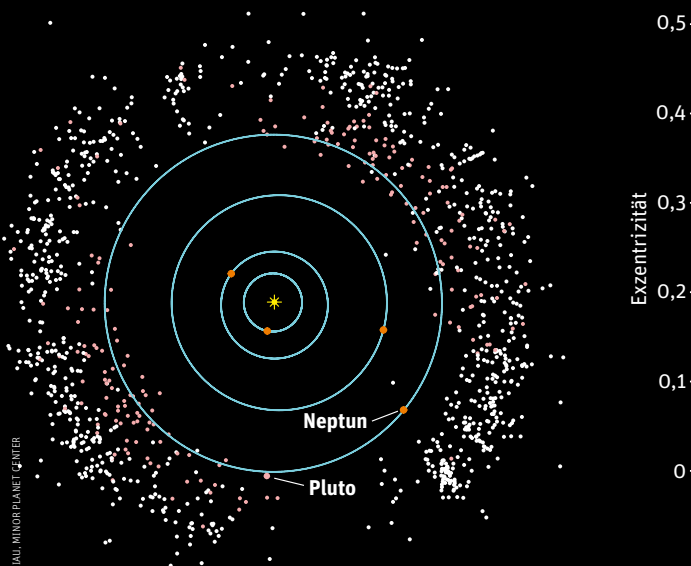
Obwohl das Sonnensystem einen so geordneten Eindruck macht, enthält es doch viele chaotische Elemente. Eine grundlegende Eigenschaft des mathematischen Chaos ist die extreme Abhängigkeit eines Systems von seinen Anfangsbedingungen. Schon eine scheinbar unbedeutende winzige Störung kann zu wesentlichen Änderungen seiner großräumigen Konfiguration zu einem späteren Zeitpunkt führen. Ein vertrautes Beispiel ist das Billardspiel: Mikroskopische Änderungen in der Bahn einer Billardkugel können, insbesondere nach vielen Kollisionen, das ursprünglich beabsichtigte Ergebnis eines Stoßes völlig verändern. Deterministisch sind chaotische Systeme gleichwohl, sie folgen also präzise den Gesetzen der klassischen Physik. Weil aber die möglichen minimalen Störungen nicht präzise erfasst werden können, bleibt ihre Entwicklung grundsätzlich unvorhersagbar.

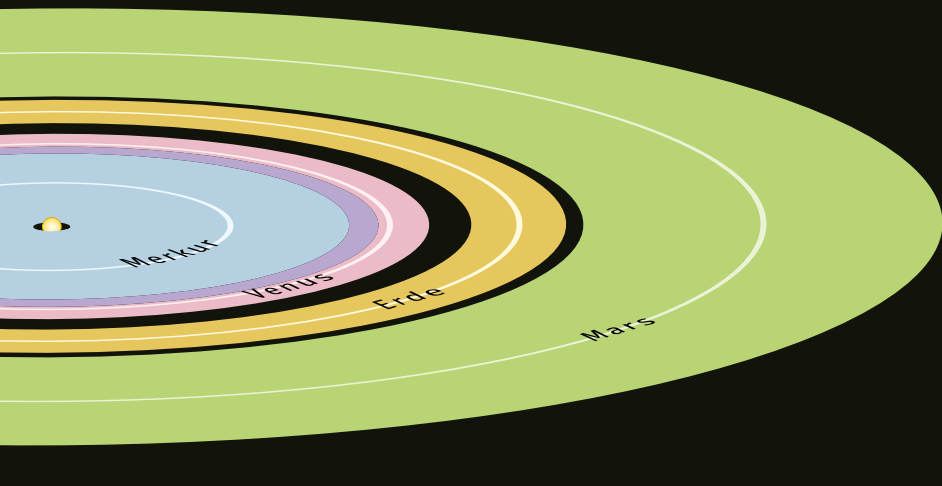
Erst in jüngerer Zeit gelang es Wissenschaftlern, chaotische Systeme mit Hilfe von Computern in hoher Auflösung zu simulieren und so besser zu verstehen. Die bislang umfangreichsten Rechnungen zur langfristigen Stabilität des Sonnensystems stammen von Jacques Laskar vom Bureau des Longitudes, einem astronomischen Institut in Paris. Laskar simulierte die gravitativen Wechselwirkungen zwischen den acht Planeten unseres Sonnensystems über einen Zeitraum von 25 Milliarden Jahren (das Sonnensystem ist nur fünf Milliarden Jahre alt). Dabei fand er heraus, dass die Exzentrizitäten und andere Parameter der Umlaufbahnen chaotische Veränderungen durchlaufen. Schon eine Prognose der Positionen, die die Planeten in nur 100 Millionen Jahren einnehmen, ist daher unmöglich.

Könnte sich also auch die Erde eines Tages auf einer stark elliptischen Bahn wiederfinden? Dann würden sich auch unsere Lebensbedingungen ändern, weil ihre Abstände von der Sonne viel stärker variieren würden als heute. Oder könnte das Sonnensystem einst sogar einen Planeten verlieren? Nein. Denn auch für das Chaos gibt es physikalische Grenzen. Ein Beispiel dafür ist das ebenfalls chaotische System Wetter. Obwohl Meteorologen nicht voraussagen können, wie das Wetter in einem Monat sein wird, können sie doch mit großer Sicherheit einen Bereich angeben, in dem die Wetterbedingungen dann liegen werden. Denn externe Faktoren wie die Helligkeit der Sonne oder die Länge der Tage schränken die Spielräume des Systems Wetter ein.

Wie Laskar herausfand, sind die Umlaufbahnen der Planeten über Milliarden Jahre hinweg relativ stabil, obwohl das Chaos ihre Positionen beeinflusst. Einerseits ist also die Konfiguration der Planeten langfristig im Detail völlig unvorhersehbar, andererseits aber verändern sich die Umlaufbahnen nicht so stark, dass Kollisionen zwischen den Planeten

In der Verteilung kleiner Körper im äußeren Sonnensystem sind Bereiche stabiler Resonanzen deutlich zu erkennen (unten). In 30 Astronomischen Einheiten (AE) Entfernung sind die Trojaner von Neptun zu finden. Dann folgen in Entfernungen zwischen 40 und 50 AE die Kuipergürtel-Objekte, einschließlich Plutos und der nach ihm benannten Plutinos. Hinzu kommen Objekte, die in 3:4- und 1:2-Resonanzen mit Neptun gefangen sind. Das Bild links zeigt, dass sich die meisten Plutinos (rosa Punkte) und anderen Kuipergürtel-Objekte (weiß) jenseits der Neptunbahn befinden. Durchziehende Kometen und aus dem Kuipergürtel hinausgeworfene Objekte sind zu Zwecken der Übersichtlichkeit nicht dargestellt.





STEPHANIE FRESE, NACH JACQUES LASKAR, 1996

Die maximalen Exzentrizitäten der Bahnen der inneren Planeten verändern sich im Lauf der Zeit erheblich, wie numerische Simulationen von Jacques Laskar zeigen. Im Verlauf von Milliarden Jahren kann die Bahn eines Planeten daher innerhalb einer breiten (farbig eingezeichneten) Region verlaufen. Die weißen Linien markieren seine gemittelte Umlaufbahn. Für Merkur besteht sogar die Möglichkeit einer Kollision mit der Venus (violetter Bereich).

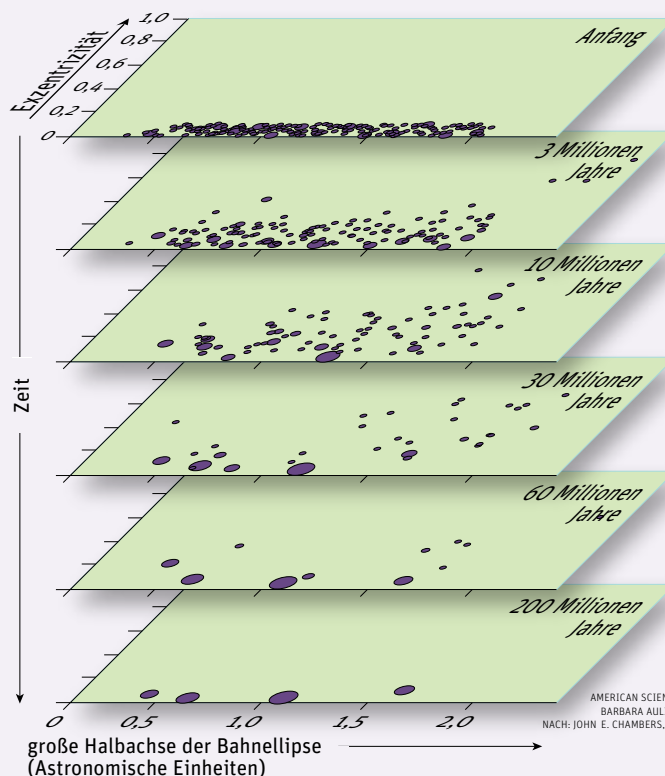
möglich wären. Beispielsweise sorgt die Erhaltung des Gesamtdrehimpulses im Planetensystem dafür, dass die Exzentrizitäten der Planetenbahnen bestimmte Grenzwerte nicht überschreiten. Am stabilsten sind die Umlaufbahnen der äußeren Riesenplaneten. Die kleineren terrestrischen Planeten, insbesondere Mars und Merkur, werden heftiger umhergeworfen. Ihre Exzentrizitäten schwanken im Verlauf von Jahrtausenden ganz erheblich, wie die Simulationen zeigen. Diese Schwankungen sind einerseits groß genug, dass sie den zwischen ihren Bahnen liegenden Bereich von allen kleineren Körpern säubern, andererseits aber nicht so groß, dass sie zusammenstoßen könnten. Eine mögliche Ausnahme fand Laskar allerdings: Für Merkur, den masseärmsten Planeten, errechnete er eine immerhin kleine Wahrscheinlichkeit, dass dieser in einigen Mil-

liarden Jahren mit der Venus kollidiert. Das Sonnensystem, schloss Laskar, befindet sich genau an der Grenze zur Instabilität. Dieser Gedanke wiederum führte ihn zu der Idee, dass das Sonnensystem »dynamisch voll« oder zumindest fast voll ist. Versuchte man, die vorhandenen Planeten um einen weiteren zu ergänzen, würden die gravitativen Störungen das System in Aufruhr versetzen. Erst nach einer Kollision käme es wieder zur Ruhe – oder nachdem es einen Planeten hinausgeworfen hat.

Laskar vermutete, dass das Sonnensystem sich auch im Verlauf seiner Entwicklung stets genau an dieser Grenze befand. Dazu aber muss es nach und nach Objekte hinausgeworfen haben. Die Zeitskala, auf der dies stattfand, entsprach dabei jeweils seinem Alter: War es beispielsweise eine Milliarde Jahre alt, benötigte es etwa diesen Zeitraum, um ein großes Objekt hinauszuwerfen.

Mittlerweile ist es fünfmal älter, sodass es bis zu einem weiteren solchen Ereignis nun noch länger dauern wird. Im Sonnensystem könnte es vor Milliarden von Jahren folglich mehr Planeten gegeben haben als heute. Das Sonnensystem immunisierte sich also gegen ein Chaos auf großen Skalen, indem es die Zahl der Planeten allmählich verringerte und so die Abstände zwischen ihnen vergrößerte. Ihre gegenwärtige Zahl muss daher gerade so groß (und der Abstand zwischen ihnen so klein) sein, wie es ein Zustand langfristiger

Simulationen zeigen die Entwicklung der inneren Staub- und Gasscheibe um einen jungen Stern. Anfangs existieren dort zahlreiche Planetesimale auf fast kreisförmigen Umlaufbahnen (oben). Binnen weniger Millionen Jahre wachsen die Exzentrizitäten der meisten kleinen Körper stark an. Aus der Verschmelzung kleiner Objekte entstehen währenddessen Planetenembryos. Im Lauf der Zeit kollidieren kleinere Körper mit größeren oder werden aus dem System geschleudert. Zurück bleiben einige wenige Planeten mit niedriger Bahnexzentrizität (unten). Der Wert der Exzentrizität reicht von 0 (kreisförmig) bis 1 (parabelförmig).



AMERICAN SCIENTIST, BARBARA AULICINO NACH JOHN E. CHAMBERS, 2001

Jedes Planetensystem ist anders (rechts): Planetesimale in einer Staub- und Gasscheibe um einen Stern können eine Vielzahl verschiedener Planetensysteme hervorbringen. In Simulationen müssen neben ihrer Anfangszahl und räumlichen Verteilung auch chaotische Wechselwirkungen berücksichtigt werden. Grafik stellt das äußere Sonnensystem dar. Zum Vergleich sind elf (äußere) Planetensysteme gezeigt, die alle aus derselben Simulation hervorgingen. Sie besitzen zwischen einem (b) und sieben (f) äußeren Planeten unterschiedlichster Masse. Die Zahlen geben die jeweilige Planetenmasse als Vielfaches der Erdmasse an.

Stabilität erfordert. Ein solcher Prozess der dynamischen Relaxation ist nicht nur in Planetensystemen am Werk, sondern auch in Sternhaufen und ganzen Galaxien. Durch den Hinauswurf der am wenigsten stabilen Mitglieder nähern sich die Bahnen der zurückbleibenden Objekte aneinander an und ihre Exzentrizitäten nehmen ab.

Bemerkenswert leerer Raum

Computersimulationen mit »Testkörpern«, die in das virtuelle Planetensystem eingefügt werden, zeigen, dass die acht Planeten recht dominant sind. Nahezu überall im Sonnensystem stören sie die sich auf Kreisbahnen bewegenden Testkörper ganz erheblich. Schon innerhalb weniger Millionen Jahre kommt es jeweils zu nahen Begegnungen mit einem Planeten, infolge derer sie aus ihren Bahnen geschleudert werden. Offenbar gibt es aber auch zahlreiche Regionen, in denen sich Objekte erheblich länger aufhalten können. Eine dieser Regionen liegt zwischen den Bahnen von Mars und Jupiter – es ist also kein Zufall, dass sich genau dort der Asteroidengürtel befindet.

Simulationen von Jack Lissauer und seine Kollegen am Ames Research Center der US-Weltraumbehörde Nasa und an der Queen's-Universität in der kanadischen Provinz Ontario belegen, dass ein erdgroßer Planet, wäre er denn dort entstanden, über Jahrmilliarden hinweg auf einer stabilen Bahn liefe. Allzu

überraschend ist dieses Ergebnis natürlich nicht: Der Asteroidengürtel ist dicht bevölkert und muss aus diesem Grund relativ immun gegen Störungen sein. Andererseits zeigte dieselbe Untersuchung, dass die Bahn eines Riesenplaneten dort schnell instabil würde.

Abgesehen von weiteren Horten der Stabilität wie dem Kuipergürtel, der fern der Planeten liegt, und den Trojanern von Mars, Jupiter und Neptun ist der interplanetarische Raum aber bemerkenswert leer. Dies ist keine Nebensächlichkeit. Ein Planet muss sogar, so fordert es seit August die Neudefinition dieses Begriffs, seine orbitale Nachbarschaft von anderem Material befreit haben. Die meisten der kleinen Objekte, die ihre Bahnen zwischen den Planeten ziehen, sind denn auch nur vorübergehende Eindringlinge. Sie gelangen erst vor kurzer Zeit in die Nachbarschaft der Planeten und werden schon bald mit einem von ihnen kollidieren oder aber aus dem Sonnensystem hinausgeschleudert.

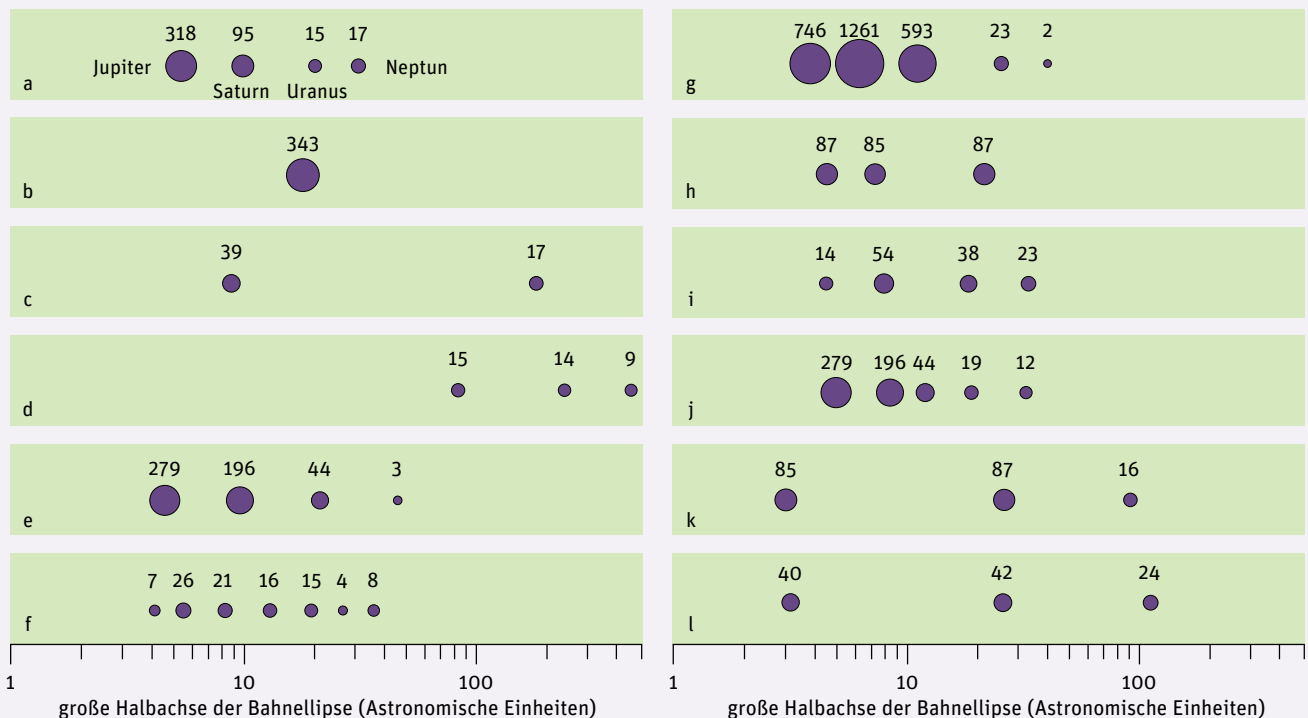
In die vorherrschende Theorie zur Entstehung des Sonnensystems, die erstmals im Jahr 1755 von dem Philosophen Immanuel Kant formuliert wurde, fügen sich die neuen Ideen auf ganz natürliche Weise ein. Nach Kants Theorie der Nebelakkretion entstanden das Sonnensystem und auch andere Planetensysteme durch die Kondensation und Ansammlung von Staub und Gas in einer abgeplatteten Scheibe um einen jungen Stern. Moderne

NEUESTE FUNDE I

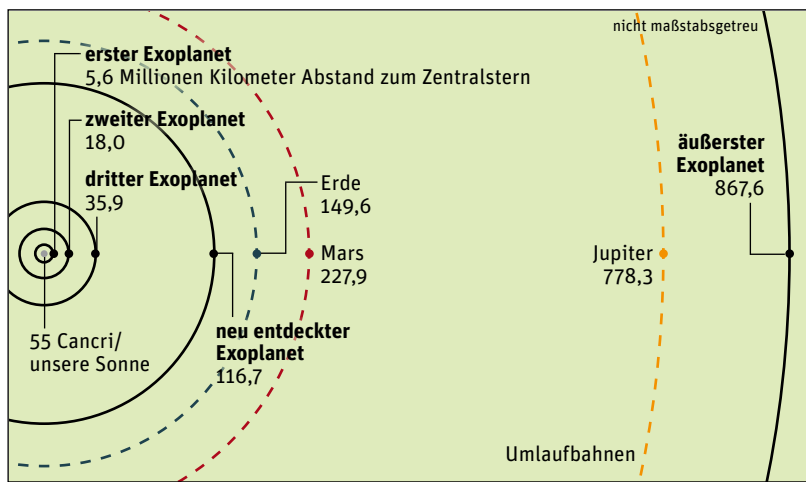
Jüngst fand die Hypothese der bis an den »Rand« gefüllten Planetensysteme weitere Bestätigungen. Jacob L. Bean nämlich, jetzt an der Universität Göttingen, und ein Team an der Universität Texas in Austin entdeckten im September 2007 einen riesigen Gasplaneten nahe dem Stern HD 74156.

Unmittelbar danach erhielt Bean eine E-Mail von Rory Barnes und Sean N. Raymond. Diese nämlich hatten aus ihrer Hypothese schon drei Jahre zuvor, als sie Computersimulationen zur Stabilität von Planetensystemen durchführten, die Existenz dieses Planeten prognostiziert.

Die letzte erfolgreiche Voraussage dieser Art liegt über 150 Jahre zurück: 1846 hatten Astronomen auf Grund von Unregelmäßigkeiten des Uranus-Orbits auf die Existenz von Neptun geschlossen.



AMERICAN SCIENTIST, BARBARA AULENDO MACH, HAROLD F. LEVISON ET AL., 1998



SPKTRUM DER WISSENSCHAFT, NACH DATEN DER NASA

NEUESTE FUNDE II

Im November 2007 wuchs die Zahl der bekannten Planeten, die den **Stern 55 Cancri** umkreisen, von vier auf fünf an. Diesen Fund hatten Rory Barnes und Sean N. Raymond ebenfalls bereits vorhergesagt. Das Bild oben zeigt einen Vergleich unseres Sonnensystems mit dem 55-Cancri-System.

Die drei innersten Planeten des Systems laufen auf Bahnen, die enger sind als die des Merkur. Weit außen im System befindet sich ein Riesenplanet. In der Region zwischen ihnen, so hatten Berechnungen ergeben, könnte **ein weiterer Planet eine stabile Umlaufbahn** verfolgen. Entdeckt wurde er nun von einem Team um Debra Fischer von der San Francisco State University: »Dieses System scheint mit Planeten vollgepackt zu sein«, sagte sie und bestätigte damit die in diesem Beitrag vorgestellte Hypothese.

Der neu entdeckte Planet befindet sich in der »bewohnbaren Zone« des Systems. Seine starke Gravitation dürfte die Entstehung von Leben zwar verhindert haben, auf möglichen Monden jedoch könnte die Umwelt freundlicher sein. Teammitglied Geoff Marcy von der Universität von Kalifornien in Berkeley ergänzte: »Wir wissen nun auch, dass **ein Planetensystem wie das unsrige im Universum keineswegs ungewöhnlich** ist.«

Beobachtungen liefern starke Argumente für diese Theorie, denn Astronomen entdecken mittlerweile routinemäßig solche Scheiben um neugeborene fremde Sterne.

Die staubkorngroßen Partikel in diesen Scheiben verbinden sich zunächst zu Billionen felsiger Asteroiden und eisiger Kometen mit wenigen Kilometer Durchmesser, den Planetesimalen. Diese Objekte stoßen relativ sanft zusammen und formen auf diese Weise Hunderte von mond- bis marsgroßen Planeten-»Embryos«, die ihre Bahnen inmitten der verbliebenen Planetesimale ziehen. Einige Embryos (der Begriff ist in der Fachwelt üblich, Anm. d. Red.) in den äußeren Bereichen der Scheibe wachsen so stark, dass sie durch ihre Schwerkraft das in der Scheibe reichlich vorhandene Gas an sich ziehen – aus ihnen entstehen schließlich die Riesenplaneten.

Solange die Planetesimale den Hauptanteil der Scheibenmasse ausmachen, übt ihre Schwerkraft einen lokalen Dämpfungseffekt, die »dynamische Reibung«, auf die Bewegung der Embryos aus. Dadurch verhält sich das ganze System weit gehend stabil. Die Embryos wachsen unterdessen an, indem sie Materie aus den so genannten Fütterungszonen der Scheibe aufnehmen, und verteilen sich relativ gleichmäßig auf verschiedene Umlaufbahnen. Haben die Embryos aber den größten Teil der Materie aus der Scheibe aufgenommen, wird der Dämpfungseffekt zu schwach, als dass er das System weiter unter Kontrolle halten könnte. Die gravitativen Störungen, denen die Embryos gegenseitig ausgesetzt sind, können die Exzentrizitäten ihrer Umlaufbahnen jetzt praktisch unbegrenzt vergrößern. Darum bricht im entstehenden Sonnensystem zu diesem Zeitpunkt eine Epoche der Anarchie an. In der Schlussphase der Planetenentstehung beginnen die Bahnen der Embryos, sich zu überschneiden, und es kommt zu gewaltigen Zusammenstößen und

Verschmelzungen. Einige Embryos werden auch in die Galaxis hinauskatapultiert, wo sie seither zwischen den Sternen umhertreiben.

Die kraterübersäten Oberflächen der Himmelskörper, die sich im jungen Sonnensystem bildeten, insbesondere einige Monde und Asteroiden, zeugen noch heute von dem damaligen Bombardement. Auch die Entstehung des irdischen Mondes fällt in diese Zeit. Ein marsgroßer Embryo kollidierte mit der Proto-Erde, wodurch eine gewaltige Menge an Trümmern ins All geschleudert wurde. Aus einem Teil dieser Trümmer wiederum bildete sich schließlich der Mond.

Mittels Computermodellen können Theoretiker heute die Entwicklung von Planetensystemen mit unterschiedlichen Anfangsbedingungen, also unterschiedlichen Gas- und Staubscheiben verfolgen. Einige dieser Simulationen führen zu Systemen, deren Massen und Umlaufbahnen denen unseres Sonnensystems ähneln. Andere produzieren Systeme mit Riesenplaneten in exzentrischen Umlaufbahnen. In solchen Fällen reduzieren Zusammenstöße und Hinauswürfe die Zahl der Planeten und vergrößern die durchschnittlichen Abstände zwischen ihnen. Die Planeten stehen gewissermaßen miteinander im Wettstreit um die Nutzung des Raums und verschaffen sich mit ihren gravitativen Ellbögen Platz. Die Bildung der Planeten hängt dabei extrem stark von den Anfangsbedingungen ab, wie die Simulationen zeigen. Wenn zu Beginn der Rechnungen nur ein einziger von hundert Embryos um einen Meter verschoben wird, kann dies darüber entscheiden, ob am Ende drei oder fünf terrestrische Planeten entstehen.

Die Existenz unserer Erde, so legen Ergebnisse wie diese nahe, verdankt sich also dem reinen Zufall. Mittlerweile können die Forscher sogar überprüfen, ob ihre Simulationen der Realität entsprechen. Denn seit mehr als einem Jahrzehnt entdecken astronomische Beobachter Planetensysteme um andere Sterne und kartografieren deren Konfigurationen. Weit über 250 Exoplaneten haben die Planetenjäger bereits aufgespürt, mehr als sechzig davon in Systemen, die über mehr als einen Planeten verfügen.

Zu ihrer Überraschung mussten die Astronomen in dieser Zeit lernen, dass die meisten extrasolaren Planeten weitaus exzentrischere Umlaufbahnen als die Riesenplaneten unseres Sonnensystems besitzen. Früher war man ganz selbstverständlich davon ausgegangen, dass fremde Planetensysteme unserem eigenen mit seinen nahezu kreisförmigen Bahnen ähneln würden. Vielleicht, so argumentierten einige Forscher daraufhin, ist das Sonnensystem also eine Ausnahme und die meisten Planetensys-

teme sind auf andere Weise entstanden. Doch das erscheint inzwischen als unwahrscheinlich.

Mario Jurić und Scott Tremaine von der Universität Princeton haben unlängst Tausende von Computersimulationen durchgeführt, um die dynamische Entwicklung von zehn oder mehr Riesenplaneten in einer Scheibe zu verfolgen, die Kollisionen, Verschmelzungen und Hinauswürfen ausgesetzt sind. In Simulationen, die mit relativ eng beieinander stehenden Planeten beginnen, ähnelt die Verteilung der Bahnexzentrizitäten am Ende zu meist aufs Schönste der bei Exoplaneten beobachteten Verteilung. Beginnen die Simulationen jedoch mit Planeten, die weiter voneinander entfernt sind, und kommt es daher zu weniger Wechselwirkungen, so sind die Bahnexzentrizitäten der überlebenden Planeten kleiner, ähnlich wie es in unserem Sonnensystem der Fall ist.

Die meisten Simulationen enden mit zwei oder drei Riesenplaneten, nachdem mindestens die Hälfte der ursprünglichen Population aus dem System hinausgeworfen wurde. In der Galaxis könnte es also viele Planeten geben, die frei umhertreiben. Auch andere Untersuchungen bestätigen, dass viele – wenn nicht die meisten – der Welten, die ursprünglich um einen Stern entstehen, in den interstellaren Raum hinausgeworfen werden.

Wir haben sie nur noch nicht gefunden!

Die meisten der bekannten extrasolaren Planeten sind massereicher als die Planeten im Sonnensystem und besitzen kürzere Umlaufzeiten und exzentrischere Bahnen. Das bedeutet allerdings nicht unbedingt, dass unser System ungewöhnlich ist. Denn gegenwärtige Beobachtungsmethoden erlauben vor allem die Entdeckung von Riesenplaneten mit mindestens zehnfacher Erdmasse und Umlaufzeiten von einigen Jahren oder weniger. Selbst wenn es ganz in der Nähe ein Sternsystem gäbe, das identisch mit dem unsrigen ist, würden wir dessen Riesenplaneten mit ihren langen Umlaufzeiten nur mit einiger Mühe entdecken. Zweifellos existieren in vielen der uns mittlerweile bekannten Systeme auch kleinere, terrestrische Planeten – wir haben sie nur noch nicht gefunden.

Vor einigen Jahren untersuchten Rory Barnes und Thomas Quinn von der Universität Washington, wie stabil extrasolare Planetensysteme mit zwei oder mehr Planeten sind. Mit Hilfe von Computersimulationen fanden sie heraus, dass nahezu alle Systeme mit Planeten, die eng genug benachbart sind, um sich gegenseitig durch ihre Schwerkraft zu beeinflussen – einschließlich unseres eigenen – nahe

an der Grenze zur Instabilität liegen. Schon kleine Änderungen der Planetenbahnen hätten katastrophale Folgen für sie. Auf den ersten Blick erscheint dieser Befund überraschend, doch die Häufigkeit solcher Systeme an der Stabilitätsgrenze lässt sich Barnes und Quinn zufolge gut begründen. Sie ist nämlich genau dann zu erwarten, wenn sich ursprünglich instabile Systeme durch das Hinauswerfen massereicher Körper allmählich selbst stabilisieren.

Auch Barnes, jetzt an der Universität von Arizona tätig, und Sean N. Raymond von der Universität von Colorado stellten deshalb wie zuvor schon Laskar die Hypothese auf, dass alle Planetensysteme bis fast an ihre Kapazitätsgrenzen mit Planeten gefüllt sind. Als sie in einigen der beobachteten Systeme auf scheinbar leere Stabilitätsregionen um den Zentralstern herum stießen, sagten sie daher voraus, dass sich in diesen Regionen weitere Planeten befinden, die bislang nur auf Grund ihrer geringen Größe nicht aufgespürt wurden. Die ersten Erfolge stellten sich sogar bereits ein (siehe Kasten auf S. 31 und 32).

Diese Hypothese ist faszinierend: Das Sonnensystem und andere ihrer stürmischen Jugend entwachsene Systeme sind gewissermaßen bis nahe an den Rand ihrer Kapazität mit Planeten gefüllt. Die gegenwärtige Konfiguration der Systeme umfasst also so viele Himmelskörper wie nur möglich. Und ihre Bahnen liegen so eng beieinander, wie es die Stabilität gerade eben erlaubt. Genau das erwartet man als Ergebnis eines chaotischen Prozesses. Eine Familie aus Planetenembryos wächst, weil sie durch den großen Schwarm kleinerer Objekte in der Staubscheibe »gefüttert« wird, so lange, bis es zu einer globalen Instabilität in der Scheibe kommt. Die umherschwirrenden Himmelskörper kollidieren dann mit den größeren Welten und verschmelzen mit diesen, oder sie werden aus dem System hinausgeworfen, bis das System einen reifen Zustand am Rand der Stabilität erreicht hat. Letztlich erhöht das Sonnensystem durch diesen Prozess der Selbstorganisation seine innere Ordnung, indem es Unordnung, »Entropie«, in Form von überzähligen Planeten an die Galaxis abgibt.

Wie jede gute wissenschaftliche Hypothese macht auch diese überprüfbare Vorhersagen. In den Stabilitätsregionen der Systeme suchen die Astronomen daher nun nach weiteren Planeten. Weil kleinere Planeten schwerer zu entdecken sind, kann dies allerdings einige Zeit dauern. Gleichzeitig jedoch werden die Beobachtungstechniken immer besser. Es ist also nur eine Frage der Zeit, bis wir wissen, ob die Idee der bis zum Rand gefüllten Planetensysteme der kritischen Überprüfung standhält. <



Steven Soter ist wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Abteilung für Astrophysik des Amerikanischen Museums für Naturgeschichte in New York City und Gastwissenschaftler an der Universität New York. Das Spektrum seiner Lehrveranstaltungen reicht von Astrobiologie über Geologie bis hin zur antiken Geschichte des Mittelmeerraums. Zu seinen Forschungsinteressen zählen Planetenastronomie und Geoarchäologie.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/912784.

What is a planet? Von Steven Soter in: *The Astronomical Journal*, Bd. 132, S. 2513, 2006. Online: <http://arxiv.org/pdf/astro-ph/0608359v3>

Predicting planets in known extrasolar planetary systems. II. Testing for Saturn mass planets. Von S. N. Raymond und R. Barnes in: *The Astrophysical Journal*, Bd. 619, S. 549, 2005. Online: <http://arxiv.org/abs/astro-ph/0404211>

The role of chaotic resonances in the solar system. Von N. Murray und M. Holman in: *Nature*, Bd. 410, S. 773, 2001

Terrestrial planet formation around individual stars within binary star systems. Von E. V. Quintana et al. in: *The Astrophysical Journal*, Bd. 660, S. 807, 2007. Online: <http://arxiv.org/pdf/astro-ph/0701266>