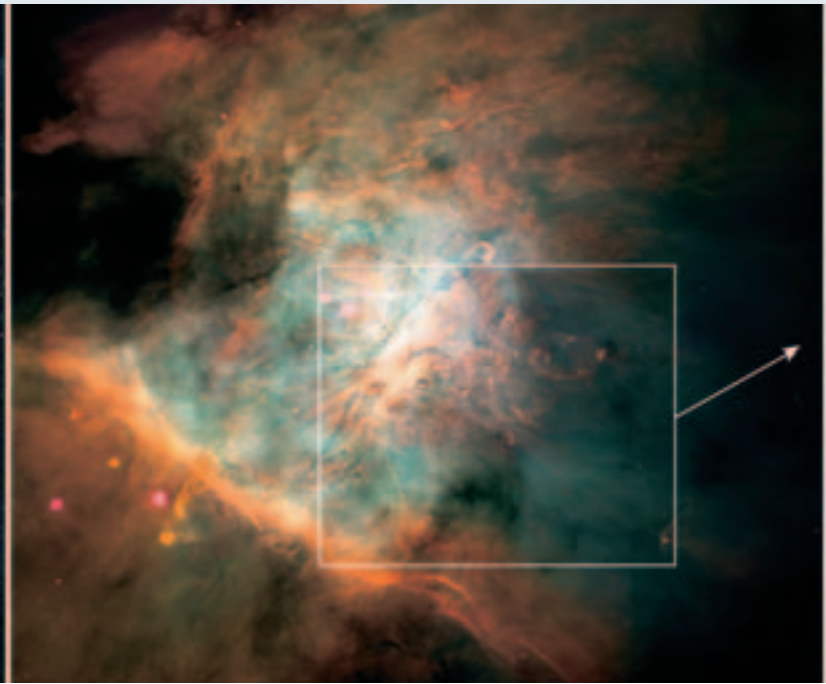




Planeten unter fremden Sonnen

Aus der Beobachtung von inzwischen über 200 fernen Welten lernen die Astronomen, wie Planetensysteme entstehen und sich entwickeln.

Von Gregory P. Laughlin

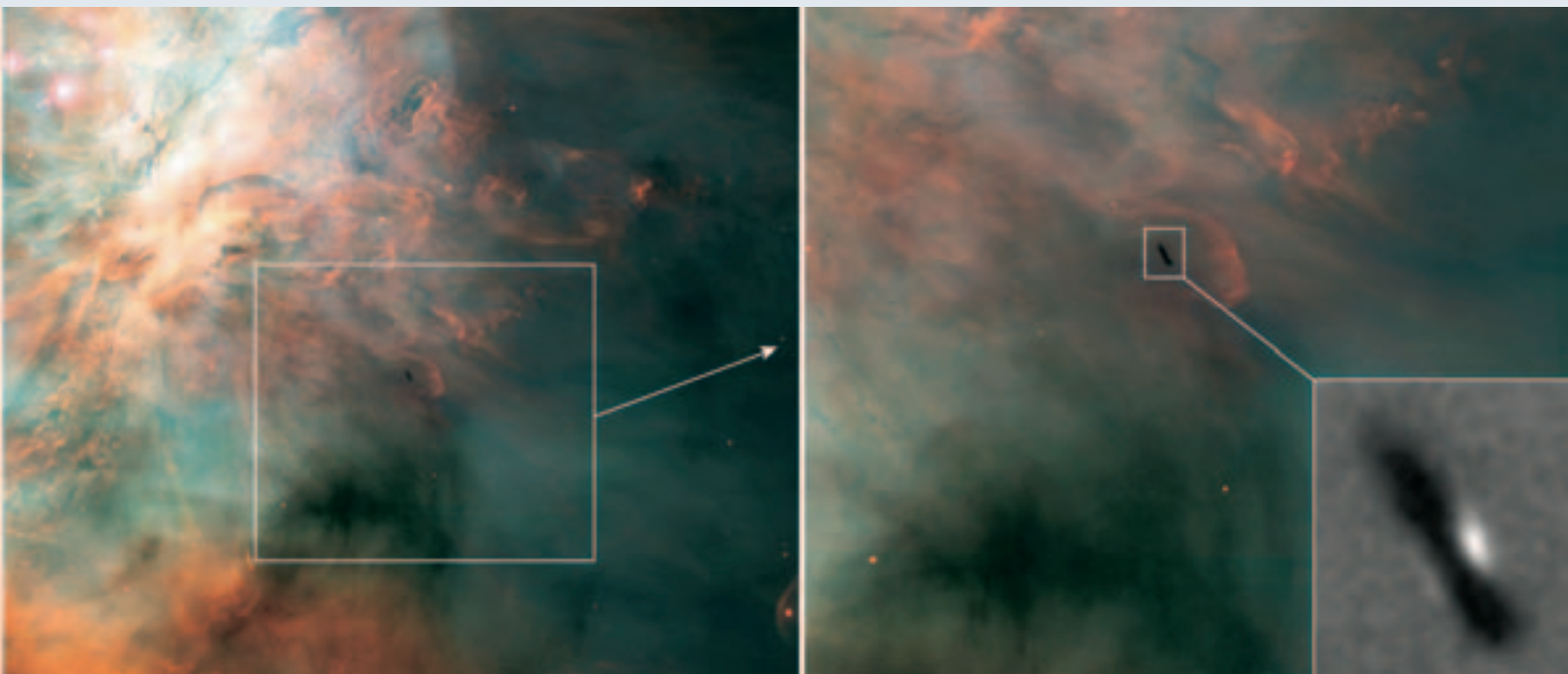
Schon im 17. Jahrhundert versuchte Christiaan Huygens, Planeten bei anderen Sternen zu entdecken. Doch drei Jahrhunderte lang lieferte die Suche nach extrasolaren Planeten nichts als Nullresultate, Falschmeldungen und zerstörte Hoffnungen. Erst 1988 zeigten sich erste zaghafte Fortschritte ab. Damals berichteten Gordon A.H. Walker und seine Kollegen von der University of British Columbia bei mehreren nahen Sternen von Hinweisen auf nicht direkt sichtbare planetare Begleiter. Die Forscher blieben extrem vorsichtig: Sie machten deutlich, dass Planeten nur eine von vielen möglichen Interpretationen für ihre Daten seien. Deshalb nahmen auch nur wenige Astronomen Notiz von ihrer Arbeit.

Ein Jahr später berichteten David W. Latham vom Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics und Kollegen von starken Indizien darauf, dass um einen unscheinbaren Stern namens HD 114762 wohl ein Planet kreist. Doch da dieser Planet mindestens die zehnfache Jupitermasse haben sollte, neigten die meisten Astronomen zu der Annahme, es handle sich um einen Braunen Zwerg oder jedenfalls einen Stern sehr geringer Masse. So sorgte auch diese Entdeckung nicht für Schlagzeilen.

Im Jahr 1992 dann spürten Alexander Wolszczan von der Penn State University und Dale A. Frail vom National Radio Astronomy Observatory mit extrem genauen Zeitmessungen zwei sehr kleine Planetenbegleiter eines Pulsars auf. Diese bizarren Welten bildeten sich offenbar in einer Scheibe aus radioaktiven

Trümmern – Überresten einer Supernova-Explosion, aus welcher der Pulsar hervorgegangen war. Deshalb wohl waren nur wenige Wissenschaftler der Ansicht, dass es sich hierbei um ein echtes Äquivalent zu unserem Sonnensystem handele. Doch diese Entdeckung lieferte uns einen ersten Hinweis darauf, dass die Entstehung von Planeten ein häufiger und robuster Prozess sein sollte.

Furore machten schließlich 1995 die Schweizer Astronomen Michel Mayor und Didier Queloz: Sie überraschten die Welt mit der Entdeckung eines Planeten bei 51 Pegasi, einem relativ nahen, sonnenähnlichen Stern. Der Planet habe, so berichteten die beiden Forscher, etwa die 150-fache Masse der Erde und umrunde seinen Stern alle 4,2 Tage. Als Mayor und Queloz ihre Entdeckung auf einer wissenschaftlichen Tagung präsentierten,



GANZ LINKS: EUROPÄISCHE SÜDSTERNWART ESO; SONST: NASA / C. ROBERT O'DELL UND SHUI KWAN WONG, RICE UNIVERSITY; VERGRÖßERTER AUSSCHNITT RECHTS: MARK MCCAGHREAN, MPI FÜR ASTRONOMIE / O'DELL / NASA

war die allgemeine Reaktion Unglauben. Ein Planet mit einer so kurzen Umlaufzeit musste ja extrem nahe um seinen Stern kreisen – mit nur etwa fünf Prozent des Abstands Erde-Sonne. Doch 1995 galt allgemein noch der Konsens, dass sich massereiche Planeten erst in größeren Abständen von ihren Zentralsternen finden sollten. Und wie sollte die neu entdeckte Welt – die unter der Bezeichnung 51 Pegasi b geführt wird – überhaupt auf einer solchen Bahn überleben?

Doch innerhalb weniger Tage bestätigten andere Astronomen die Beobachtungen von Mayor und Queloz. Nun begannen mehrere Forscherteams, in Computermodellen »heiße Jupiter« zu untersuchen. Die Simulationen lieferten ein überraschendes Ergebnis: Ein Planet wie 51 Peg b kann tatsächlich die intensive Strahlung seines nahen Zentralsterns aushalten und würde selbst nach Jahrmilliarden erst einen winzigen Bruchteil seiner Masse verlieren.

Rot glühende Nachtseite

Bis jetzt gibt es keine Bilder, die den Planeten selbst zeigen und somit eine genauere Untersuchung erlauben würden. Doch man kann sich ausrechnen, wie ein solcher Planet aus der Nähe aussähe. Die Tagesseite von 51 Peg b dürfte etwa 400-mal heller leuchten als irdische Wüstendünen an einem Sommertag. Selbst die Nachtseite des Planeten glüht

vermutlich rot. Um überhaupt einen Blick auf die beleuchtete Seite des Planeten werfen zu können, benötigte man eine starke Sonnen- oder, besser noch, Schweißbrille. So ausgestattet könnte man vermutlich Wolkenwirbel aus Natriumsulfid-Tröpfchen erkennen. Die äußere Atmosphäre bildet wahrscheinlich ein giftiges Gebräu aus Wasserstoff, Helium, Wasserdampf, Methan, Kohlenmonoxid, Zyanid, Azetylen, Schwefelsäure, Ruß und einer Menge anderer unangenehmer Zutaten.

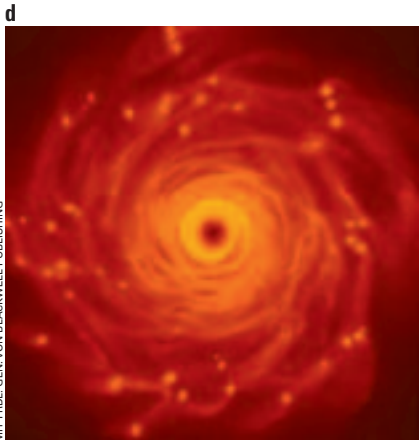
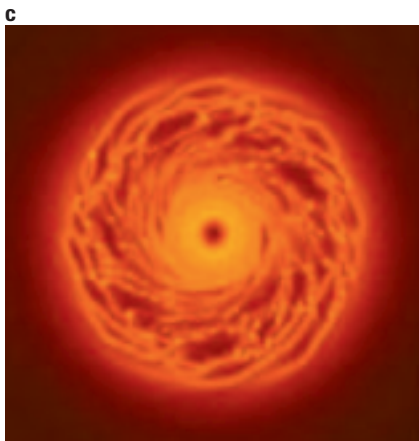
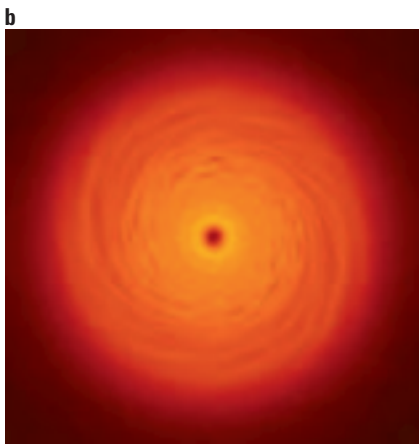
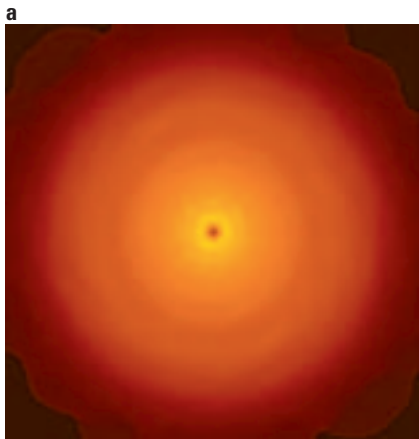
Die Entdeckung dieser bizarren, völlig unerwarteten Welt eröffnete uns ein revolutionär neues Forschungsfeld: die Untersuchung extrasolarer Planetensysteme. Seitdem haben die Astronomen über 200 dieser Welten aufgespürt, in verblüffend unterschiedlichen Systemen. Allein ihre große Anzahl beweist uns, dass ihre Entstehung ein normaler Vorgang sein muss. Die Umlaufbahnen ermöglichen es Fachleuten wie mir, die Entstehung und Entwicklung ganzer Planetensysteme zu modellieren.

Wenn wir in einer völlig dunklen Nacht zum Himmel schauen, können wir leicht die Milchstraße erkennen: unsere eigene, scheibenförmige Galaxie, gesehen von einer Position in ihrem Außenbereich. Zwischen den vielen Sternen existieren gigantische Molekülwolken aus Wasserstoff und Helium, vermischt mit Staub, dessen Partikel feiner sind als Rußpartikel im Zigarettenrauch.

▲ Der 1500 Lichtjahre von der Erde entfernte Orionnebel ist eine der bekanntesten Geburtsstätten von Sternen und Planeten. Diese Bilder im sichtbaren Licht, deren Vergrößerung von links nach rechts zunimmt, zeigen seine Position im Sternbild Orion (ganz links), brodelnde Wolken aus Gas und Staub in dieser Region (Mitte links und Mitte rechts) sowie eine der vielen dort gefundenen protostellaren Scheiben. In dem Bild mit der höchsten Auflösung verdeckt die dunkle Scheibe, die 17-mal so groß ist wie unser Sonnensystem, fast vollständig den glimmenden Stern in ihrem Zentrum (kleiner Ausschnitt ganz rechts).

Diese Dunkelwolken treiben hauptsächlich durch die Spiralarme der Milchstraße. Mit nur zehn Grad über dem absoluten Nullpunkt sind sie eiskalt. Doch könnten wir ihre Entwicklung im Zeitraffer betrachten, etwa zehn Millionen Jahre komprimiert auf eine Minute, würden wir die Wolken in brodelnder Bewegung erleben.

Im Zentrum solcher Wolken bewegt sich das kalte, dichte Gas stets am Rand des gravitativen Kollapses. Der Zusammenbruch wird durch freie geladene Teilchen gebremst – Ionen und Elektronen –, obwohl dort mindestens zehnmillionenmal mehr neutrale Atome und Moleküle herumschwirren als elektrisch ►



SIMULATIONEN AUS: W. K. M. RICE ET AL., 2003. MIT FÖL. GEN. VON BLACKWELL PUBLISHING

▷ geladene Partikel. Letztere sind an magnetische Feldlinien gebunden: Bei ihrer Bewegung ziehen sie die Felder mit sich – und umgekehrt. Die Feldlinien aber setzen jeder Kompression oder Verdrehung Widerstand entgegen – stets haben sie die Tendenz, sich wieder in ihre Ausgangslage zurückzukatapultieren. Dieser Effekt verhindert, dass Ionen und Elektronen an dem gravitativen Kollaps der Wolke teilnehmen. Und weil sie ständig mit neutralen Atomen und Molekülen kollidieren, wirken sie dem nach innen gerichteten Druck der Gasmassen entgegen und halten so die Molekülwolken fast immer aufgebläht.

Deshalb werden sie zumeist eher von den Gezeitenkräften in der Galaxis auseinandergerissen, bevor sie sich unter ihrem eigenen Gewicht zusammenziehen können. Gelegentlich jedoch werden Ionen und Elektronen von dem neutralen Gas überwältigt – es schlüpft an ihnen vorbei und verdichtet sich. Wenn dieser Prozess erst einmal in Schwung gekommen ist, dann verlieren die Ionen und die Magnetfelder die Kontrolle über das Gas und große Bereiche der Wolke beginnen zu kollabieren.

Kant und Laplace hatten die Idee

Mit fortschreitendem Kollaps beginnt sich aus dem verdichteten Gas im Zentrum der Wolke ein Stern zu bilden. Nun setzt ein neuer Prozess ein: Die von weit draußen einfallende Materie stürzt nicht direkt auf den zentralen Protostern, sondern verfehlt diesen knapp – sie bildet eine wirbelnden Scheibe aus Gas und Staub. Denn die ursprüngliche Molekülwolke besaß eine – wenn auch geringe – Eigenrotation. Und so wie die Drehung eines Eiskunstläufers sich beschleunigt, wenn er die Arme anzieht, so beschleunigt sich auch die Rotation der nach innen stürzenden Materie.

◀ Planeten können durch eine so genannte gravitative Instabilität in einer protostellaren Scheibe entstehen, wenn ihre Eigenschwerkraft das Gas unregelmäßig verdichtet. Simulationen zeigen, wie sich danach eine anfangs gleichmäßig verteilte Materialscheibe (a) entwickelt: über die Ausbildung rankenartiger Strukturen (b) hin zu individuellen Massenkonzentrationen (c und d).

Die Idee, dass die Sonne und ihre Planeten aus einer rotierenden Gas- und Staubscheibe entstanden sind, hat ihren Ursprung bereits im 18. Jahrhundert. Der französische Naturforscher Georges Louis Leclerc, Comte de Buffon, schlug damals vor, ein großer Himmelskörper sei nahe an der Sonne vorbeigeflogen und hätte ihr dabei die Materie entrissen, aus der dann die Planeten kondensiert seien. Diese Theorie konnte immerhin erklären, warum alle Planeten in einer Ebene um die Sonne kreisten. Der deutsche Philosoph Immanuel Kant postulierte, die Planeten seien aus einer rotierenden Urwolke aus Gas entstanden.

Unabhängig von Kant entwickelte Pierre Simon Laplace in den 1790er Jahren eine Theorie. Der französische Mathematiker stellte sich vor, dass sich die Scheibe abkühlte und dabei zusammenzog, wobei sukzessive Materieringe zurückblieben, aus denen schließlich die Planeten entstanden. Diese Kosmogonien des 18. Jahrhunderts waren alle eher poetisch formuliert und keineswegs in allen Punkten korrekt, doch sie kamen der Wahrheit bereits erstaunlich nahe. Die heutigen Computersimulationen bestätigen die allgemeinen Vorstellungen von Kant und Laplace – und schließen deren Lücken (siehe Bilder links).

Wie entsteht aus einer protostellaren Gas- und Staubscheibe ein Gasriesen vom Format eines Jupiters? Das zentrale Element der heutigen Theorien der Planetenentstehung ist die »gravitative Instabilität«: Wenn die Dichte der Scheibe wächst, dann bilden sich durch die Eigenschwerkraft da und dort erste Verdichtungen. Gleichzeitig wirkt der Gasdruck in diesen Verdichtungen nach außen und stoppt so den Kollaps. Außerdem versucht die differenzielle Rotation der Scheibe – je näher am Stern, desto schneller rotiert die Materie – die wachsenden Fragmente wieder auseinanderzuzerren. Diese Rotationsbewegung behindert also die gravitative Ballung von Planetenkernen. Die entscheidende Frage ist, ob die Schwerkraft gewinnt – dann entsteht ein jupitergroßer Planet – oder ob Gasdruck und die so genannte Scherung dominieren und die Scheibe zur planetenfreien Zone wird.

Wir können die Situation mit einer Rockgruppe von Studenten vergleichen, die zu einem Konzert einlädt. Um ein großes Publikum anzulocken, verteilt sie überall auf dem Campus Flyer, auf de-

nen eine Party mit Musik und Freibier angekündigt wird. Diese Verlockungen wirken wie die Eigenschwerkraft in einer protostellaren Scheibe – und können entsprechend zu einer Instabilität führen. So tauchen auf der Rockparty vielleicht Dutzende von merkwürdigen Gestalten auf – es kommt zu einer Schlägerei, Verstärker werden zertrümmert, schließlich erscheint die Polizei und schickt die Band nach Hause. Dieses unschöne Ende können wir mit dem ungezügelten Kollaps einer protostellaren Scheibe in planetengroße Fragmente vergleichen.

Protostellare Scheiben verhalten sich wie Staubmäuse unterm Bett

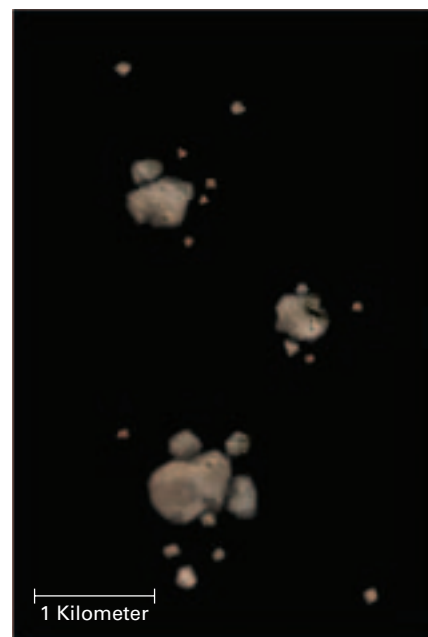
In der Praxis endet es glücklicherweise nicht immer so – im Gegenteil: Oft genug kann die Band ihr Konzert ungestört geben. Denn es gibt zwei stabilisierende Einflüsse. Im Kleinen finden wir in der protostellaren Scheibe das Gegenstück zum Gasdruck: Gedränge und Körpergeruch. Lange Schlangen am Ausschank und unangenehmer Geruch schwitzender Fans treiben die unerwünschten Gäste fort. Im Großen könnte die Band eine Art Äquivalent zur differentiellen Rotation erzeugen, indem sie darauf verzichtet, auf den Flyern die genaue Zeit ihres Auftritts anzugeben. Dann tauchen zwar hin und wieder Störenfriede auf, aber nie erreichen sie die nötige kritische Menge, um Unheil anzurichten. So braucht die Polizei nicht einzugreifen und die Band kann ungestört ihr Konzert geben.

Zwar mag dieser Vergleich zunächst einleuchten; doch Computersimulationen und Beobachtungen sprechen inzwischen mehr und mehr gegen die gravitative Instabilität und zeigen, dass sich eine Scheibe extrem effizient abkühlen muss, um in kleinere Teilstücke zu zerbrechen, aus denen Planeten hervorgehen können. Eine schnelle Abkühlung nimmt jungen Massenkonzentrationen die Fähigkeit, Druck aufzubauen, und unterstützt so die Fragmentation durch die Eigenschwerkraft. Außerdem zeigen die Simulationen, dass in der Scheibe Wellen angeregt werden sollten. Solche »Dichtewellen« würden das Gas aus gerade jenen Regionen heraustreiben, in denen die Planeten entstehen könnten – und zwar lange bevor die Scheibe überhaupt genügend Masse für eine gravitative Instabilität aufgesammelt hat.

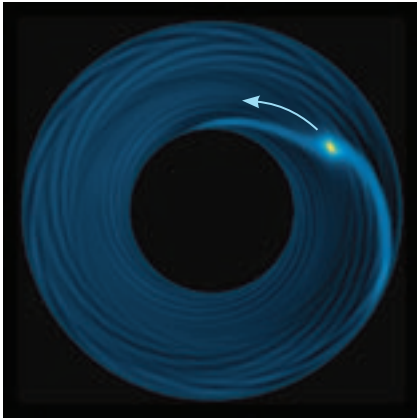
Wenn sich aber Riesenplaneten nicht direkt aus Scheiben durch gravitative Instabilitäten bilden können, wie sonst? Die Forscher favorisieren derzeit die so genannte Kernakkretions-Theorie. Ihre grundlegende Idee ist, dass sich zunächst kleinere Planetenkerne bilden, die Staub auf sammeln und so langsam anwachsen. Wenn Sie in einem Haus mit Holzfußboden leben, können Sie leicht einen ganz ähnlichen Vorgang beobachten: Sie brauchen nur eine Weile unter dem Bett nicht Staub zu saugen. Der Staub lagert sich dort dann keineswegs zu einer gleichmäßigen Schicht ab. Zufällige Luftströmungen wirbeln ihn umher und führen zur Bildung kleiner »Staubmäuse«. Diese enthalten außer Staub auch Haare, Schuppen und andere unidentifizierbare Beimischungen und sind von extrem luftiger Struktur: viel Volumen bei kleiner Masse. Dadurch können die Staubmäuse sehr effektiv weiteres Material aufnehmen und rasch größer werden. Ganz ähnlich verläuft in den protostellaren Scheiben die Kernakkretion (siehe Bilder rechts).

Trotzdem bleibt das Wachstum dieser staubigen, eisigen Objekte für Theoretiker vorläufig noch reichlich mysteriös. Das Problem: Den Staubklumpen bläst vom Gas der Scheibe eine Art Wind entgegen. Dieser würde die Staubverdichtungen auf Spiralbahnen näher an den Stern treiben, wo sie verdampfen. Irgendein Mechanismus sollte also die Staubklumpen schnell genug anwachsen lassen, damit sie nicht dabei zerstört werden. Eine Möglichkeit könnten Wirbel in der Scheibe sein: Numerische Simulationen zeigen, dass solche Wirbel, wenn ihre Lebensdauer nur lang genug ist, feste Partikel einfangen und im Wirbel- ➤

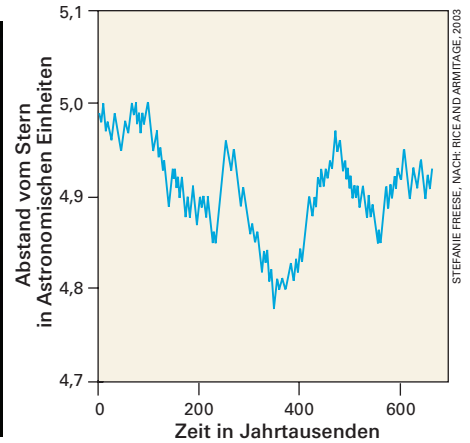
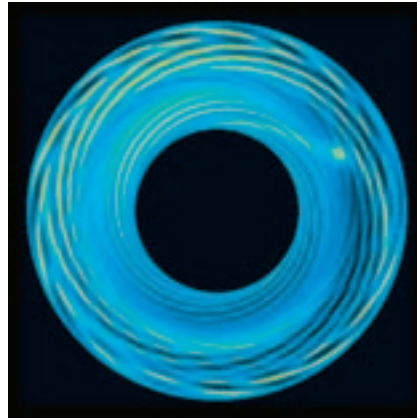
➤ Nach der Kernakkretions-Theorie entstehen Planeten in einer protostellaren Scheibe durch Kollisionen und Verklumpungen kleiner Staubpartikel. So bilden sich zuerst kleine Klumpen fester Materie (oben). Einige dieser Gebilde werden schließlich so groß, dass man sie als »Planetesimale« betrachten kann (Mitte), ähnlich den heutigen Asteroiden. Sobald diese Objekte hinreichend schwergewichtig sind, beginnen sie, das Gas aus ihrer Umgebung anzuziehen (unten). So können sie ziemlich schnell weiter anwachsen.



ILLUSTRATIONEN: STEFANIE FRIESE



BEIDE SIMULATIONEN: GREGORY P. LAUGHLIN



▷ zentrum zusammenballen können. Möglich wäre aber auch, dass sich die festen Teilchen in einer dünnen Schicht in der Mittelebene der Scheibe anhäufen.

Hat diese Schicht eine bestimmte Dicke und Dichte erreicht, kann die gravitative Instabilität einsetzen. Dadurch würden dann Staub, Eispartikel und feste Körnchen rasch zu immer größeren Objekten anwachsen. Sind diese Körper mehrere Kilometer groß geworden, kann sie der Gegenwind aus der Gasscheibe

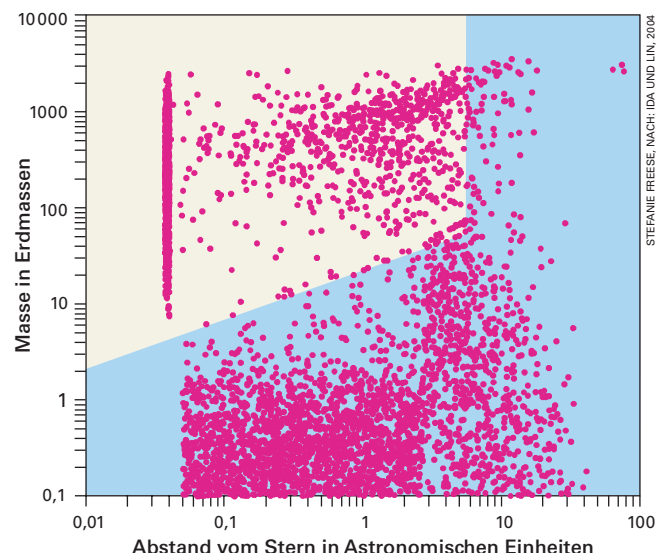
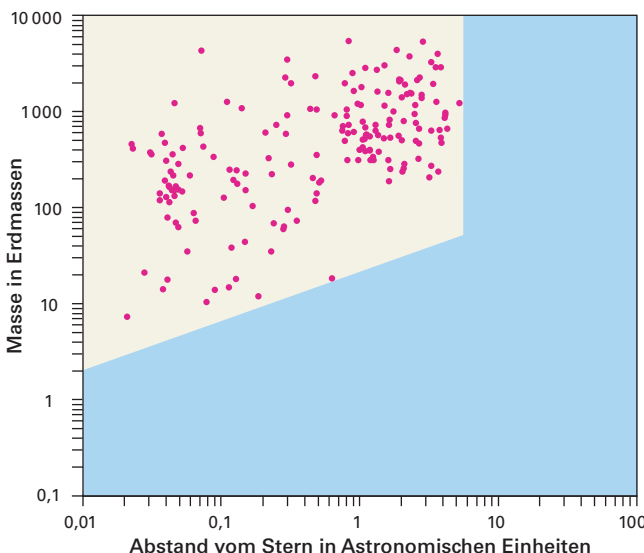
nicht mehr aus der Bahn werfen – sie behalten ihren Abstand zum Stern bei.

So würden innerhalb von rund hunderttausend Jahren Billionen von kilometergroßen Planetesimalen entstehen, die den Stern umkreisen. Das klingt zwar nach einer Menge, doch die Scheibe wäre damit noch keineswegs überbevölkert. Die Dichte des Gases wäre immer noch millionenfach geringer als die Luftdichte auf Höhe des Meeresspiegels und die Planetesimale wären im Mittel immer noch Tausende von Kilometern voneinander entfernt.

In einem solchen Ur-Planetensystem würde sich überall dort, wo die Temperatur unter 150 Kelvin fällt, aus Wasserdampf Eis bilden. Diese Temperaturgrenze – von Astronomen gerne auch als »Schneegrenze« bezeichnet – liegt in einer protostellaren Scheibe etwa beim heutigen Sonnenabstand des Planeten Jupiter. Jenseits der Schneegrenze ist die Temperatur niedrig genug für die stabile Existenz von Eis – aber der Abstand vom Scheibenzentrum ist noch immer so ge-

Ein wachsender Protoplanet hinterlässt in der protostellaren Scheibe eine Art Bugwelle von verdichtetem Gas. Die differentielle Rotation der Scheibe deformiert sie zu einer zweiarmligen Spirale. Die Computersimulation (links) zeigt, wie sich der rechte Arm der Spirale hinter dem Planeten herschleppt und der andere ihm vorausleitet. Diese Spirale treibt den Planeten je nach Umständen nach innen oder nach außen.

Die über 200 bekannten Exoplaneten haben relativ große Massen und enge Umlaufbahnen (links), vermutlich ein Auswahlereffekt. Neuere numerische Simulationen deuten darauf hin, dass außerhalb der Region, die bisher für Beobachtungen zugänglich ist, noch viele Planeten zu erwarten sind (gelb), und zwar sowohl erdähnliche Planeten mit engen Bahnen als auch große Eisplaneten mit großen Abständen (blau).



profitieren von ihrer damit stärker anwachsenden Schwerkraft: Sie ziehen weitere Körper an sich, kollidieren noch häufiger mit anderen Objekten und wachsen so noch schneller. Schließlich beherrschen nur mehr wenige große Gewinner die Szene – mehrere tausend Kilometer groß und massereich genug, um selbst verbliebene kilometergroße Brocken aus ihrer Umgebung einzufangen. Und je größer ihre Masse, desto unersättlicher werden sie – und desto mehr wächst auch der Einflussbereich ihres Schwerefelds.

Sobald ein solcher Protoplanet das Sieben- bis Zehnfache der Erdmasse erreicht, beginnt er Gas in erheblichen Mengen an sich zu ziehen. Dadurch erhitzt sich seine Atmosphäre und schwillt bis zu einer Dicke von hunderten oder gar tausenden Kilometern an. Sie glüht rot auf und emittiert Infrarotstrahlung. Durch diese Abstrahlung kühlen die unteren Schichten der Atmosphäre wieder ab, verdichten sich und machen so Platz für den Zustrom von neuem Gas. Doch bald endet das rasante Wachstum. Zwar gäbe es in der Umgebung immer noch mehr Gas. Doch die Schwerkraft reicht nicht, um weiteres Gas an den aufgeblähten Planeten zu binden. Aus diesem Grund wächst der Planet innerhalb der nächsten rund eine Million Jahre nur langsam.

Die neue Welt, obwohl nun groß und robust, ist gleichwohl in ihrer Bahn gefährdet: durch eine Migration nach innen. Dabei ist es nur ein äußerst schwaches Phänomen, das diese Bewegung verursacht. Wenn der Planet mehr und mehr Masse aufnimmt, zieht er mit seiner Schwerkraft zugleich auch das Gas in der Scheibe immer stärker an, sodass er bei seiner Bewegung durch die Scheibe eine Spur aus verdichtetem Gas hinter sich her zieht.

Ein Boot, das sich durch ein stehendes Gewässer bewegt, erzeugt eine v-förmige Bugwelle. Die Schwerkraft eines Planeten, der sich durch eine ruhende Gaswolke bewegt, hat einen ähnlichen Effekt. Doch die differenzielle Rotation der protostellaren Scheibe beeinflusst die Gestalt der Bugwelle erheblich. Während der äußere, sternabgewandte Teil des aufgestauten Gases dem Planeten folgt, schiebt sich ihre innere, dem Stern zugewandte Seite vor dem Planeten her. Im Ergebnis erzeugt der Planet eine gasförmige Spiralwelle. Das löst zwei Effekte

aus: Die zusätzliche Masse, die sich wie bei einem Schneeflug vor dem Planeten her schiebt, beschleunigt mit ihrer Schwerkraft den Planeten auf seiner Bahn, was den Körper nach außen lenkt. Der dem Planeten nachfolgende Teil der Spiralwelle wirkt genau entgegengesetzt: Er entzieht dem Planeten Bahnenergie und drängt ihn nach innen (siehe Bilder links oben).

Verhindern Gasscheiben Planeten?

Im Allgemeinen scheint dabei der nach innen gerichtete Effekt zu dominieren. Die Astronomen nennen diese Tendenz junger Planeten, auf einer Spiralbahn nach innen ihrer Zerstörung entgegenzuwandern, das »Migrationsproblem vom Typ I«. Derzeit wissen wir noch nicht, wie die Natur diese Klippe umschiffet. Es könnte sein, dass durch die Migration viele protoplanetarische Kerne tatsächlich zerstört werden. Wahrscheinlicher ist jedoch, dass die Scheibe mit ausgleichenden Kräften auf die Planetenembryos einwirkt. Gemeinsam mit Adriane Steinacker vom Ames Research Center der Nasa und Fred C. Adams von der Universität von Michigan in Ann Arbor gelang es mir nämlich kürzlich zu zeigen, dass Turbulenzen in der Scheibe dazu führen können, dass der wachsende Planet abwechselnd mal nach innen, mal nach außen wandert. Vielleicht ist es gar nicht so schwierig, Migration und Planetenwachstum miteinander in Einklang zu bringen.

Noch vor einem Dutzend Jahren konnten die Astronomen nur spekulieren, ob Bedingungen wie bei der Geburt unseres Sonnensystems im Universum eher häufig oder selten auftreten. Seither hat sich dieses Unwissen verflüchtigt. Heute kennen die Forscher eine Vielfalt anderer Planetensysteme, die sie mit unserem eigenen vergleichen können – so viele, dass man diese in Klassen einteilen und allgemeine Aussagen über ihre Statistik machen kann.

Die meisten der über 200 bislang entdeckten Exoplaneten umkreisen normale, sonnenähnliche Sterne in unserer galaktischen Nachbarschaft. Eine gute Möglichkeit, eine Übersicht über diese Planetenschar zu bekommen, ist ein so genanntes Masse-Umlaufzeit-Diagramm. In dieser Darstellung ist die Umlaufzeit entlang der x-Achse aufgetragen und die mutmaßliche Masse entlang der y-Achse. Eine Variante dieser Kurve ergibt ▷

Ein Präsent mit Botschaft ...



... ist unsere Armbanduhr »Pioneer«, die den berühmten Gruß der gleichnamigen Raumsonde an intelligente Wesen im All zeigt. Echtes Lederarmband; Preis: € 19,80 (zzgl. Versand).

Diese und weitere Geschenkideen – wie z. B. den »Rubik's Cube« im Spektrum-Design oder unsere T-Shirts mit wissenschaftlichen Motiven – finden Sie unter

www.spektrum.de/lesershop



▷ sich, wenn man statt der Umlaufzeit den daraus errechneten Abstand vom Zentralstern aufträgt (Bilder S. 76 unten).

In solchen Messkurven lassen sich unterschiedliche Populationen von Planeten ausmachen. Die erste Gruppe, die »heißen Jupiter«, ähneln 51 Pegb. Ihre Umlaufzeiten variieren zwischen 29 Stunden und etwa einer Woche. Durch ihre geringen Abstände vom jeweiligen Zentralstern leiden diese Planeten unter enormen Gezeitenkräften, die unausweichlich zu einer »gebundenen Rotation« führen. Das heißt: Der Planet wendet seinem Stern stets die gleiche Seite zu – so wie der Mond der Erde stets das gleiche Gesicht zeigt. Die starken Gezeitenkräfte führen dazu, dass diese Exoplaneten auf energetisch bevorzugten Kreisbahnen laufen.

Transits verraten die wahre Größe

Ein typischer heißer Jupiter umkreist seinen Stern in einem Abstand vom Zehnfachen des Sternradius. Das bedeutet: Etwa jeder zehnte Planet wird von der Erde aus gesehen direkt vor dem Stern vorbeiziehen. Solche Planetentransits sind von besonderem wissenschaftlichen Wert, denn aus der Abschwächung des Sternlichts bei jeder Bedeckung können die Astronomen die Größe des Planeten bestimmen. Kombiniert mit seiner Masse errechnet sich daraus die mittlere Dichte, was wiederum Rückschlüsse auf die Zusammensetzung des Planeten erlaubt. Bislang haben die Astronomen zehn Exoplaneten auf Transitbahnen entdeckt.

Im Mittel sind diese Planeten etwas größer als Jupiter. Beobachtungen belegen, dass es sich auch bei diesen Welten um Gasriesen handelt, die überwiegend aus Wasserstoff und Helium bestehen.

Wären die Planeten aus Gestein und Metallen wie die Erde, müssten sie bei gleicher Masse viel kleiner sein. Wie genauere Modelle zeigen, passen die Dimensionen der Transitplaneten am besten zu der Annahme, sie enthielten relativ große Kerne aus schweren Elementen. Dass sich unter den Transitplaneten vermutlich solche Objekte befinden, spricht für die Kernakkretions-Theorie.

Der Transitplanet HD 149026 b scheint ein solcher Fall mit einem besonders großen Kern zu sein (siehe Bilder rechts oben). Aus seinem Radius lässt sich auf ungefähr 70 Erdmassen aus festem Material schließen, um die herum 40 bis 50 Erdmassen aus flüssigem und gasförmigem Wasserstoff und Helium liegen. Eine solche Zusammensetzung steht in erheblichem Widerspruch zur Theorie der gravitativen Instabilität. Aber es ist auch schwierig, die Existenz dieses Planeten noch im Rahmen der Kernakkretions-Theorie zu erklären. Offenbar füttert ein geheimnisvoller, noch unbekannter Prozess HD 149026 b stetig weiter mit Felsen, Metallen und möglicherweise auch mit Eis, während zugleich der weitere Zustrom von Gas verhindert wird.

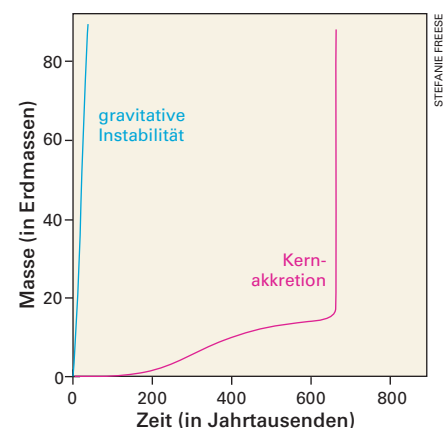
Die zweite Hauptklasse der Exoplaneten bezeichne ich als »exzentrische Riesen«. Sie umrunden ihre Sterne in Wochen bis zu Jahrzehnten und haben zumeist erheblich größere Massen als die heißen Jupiter. Sie sind so weit von ihren Muttersternen entfernt, dass die Gezeitenkräfte zu schwach sind, um sie auf Kreisbahnen zu zwingen. Deshalb umlaufen diese Planeten ihre Muttersterne häufig auf stark exzentrischen Ellipsen.

Da es in unserem Sonnensystem weder heiße Jupiter noch exzentrische Rie-

sen gibt, könnte man folgern, dass wir in einem ungewöhnlichen System leben. Das mag durchaus so sein – bleibt aber im Augenblick reine Spekulation. Das liegt am Auswahlereffekt: Bis jetzt sehen wir bevorzugt jene Exoplaneten, die am leichtesten aufzufinden sind. Die wichtigste Methode zur Entdeckung von Exoplaneten ist die Suche nach periodischen Dopplerverschiebungen im Licht von Sternen, verursacht durch die Taumelbewegung, die von der Schwerkraft eines Planeten ausgelöst wird. Das bevorzugt Planeten mit großen Massen und kurzen Umlaufzeiten. Denn solche Planeten führen zu den größten Dopplerverschiebungen. Und schließlich sind Verschiebungen mit kurzen Perioden auch schneller nachzuweisen.

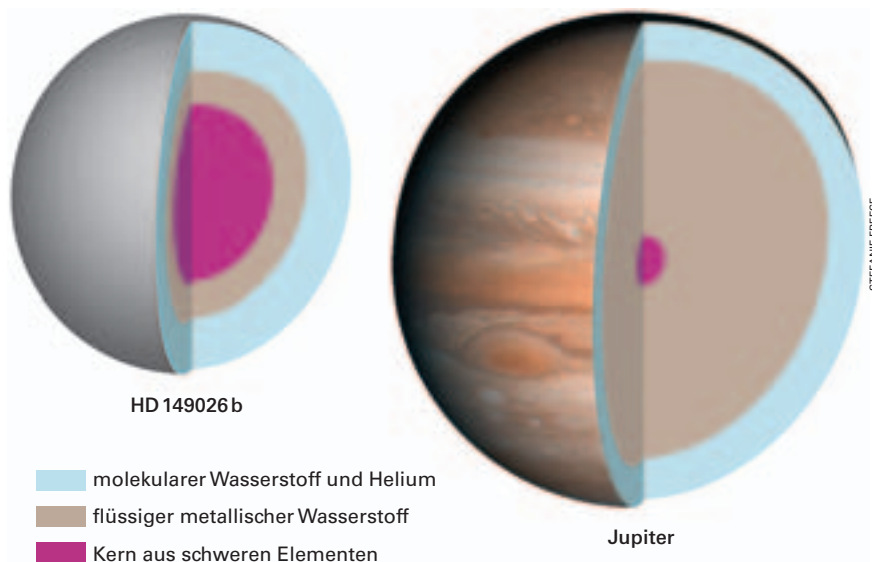
Die Ergebnisse der bisherigen Durchmusterungen zeigen, dass knapp 10 Prozent der Sterne in unserer solaren Nachbarschaft von zumindest einem heißen Jupiter oder exzentrischen Riesen begleitet werden. Die große Frage ist: Was ist mit den anderen 90 Prozent? Besitzen auch sie jupiterähnliche Planeten mit langen Umlaufzeiten und kleine felsige Planeten auf sternnahen Bahnen? Oder haben sie gar keine Planeten?

Eins ist jedoch schon sicher: Wir werden Geduld brauchen, um die Antwort darauf zu finden. Derzeit überwachen die Astronomen fast fünftausend Sterne. Die meisten dieser Himmelskörper wurden erst vor wenigen Jahren in



▲ Gravitative Instabilität oder Kernakkretion? Erstere kann Planeten innerhalb weniger Jahrtausende aufbauen (blaue Linie), Letztere benötigt hunderttausende bis zu Millionen Jahre, bis ein fester Planetenkern genügend Schwerkraft entwickelt, um Gas an sich zu binden (rote Linie).

Je mehr schwere Elemente (wie etwa Eisen) ein Stern enthält, desto eher wird er von Planeten umkreist (Diagramm unten). Für manche dieser Planeten lassen sich aus Transits Massen und Größen der festen Kerne abschätzen. Derjenige des Planeten HD 149026 b, dessen Mutterstern den 2,3-fachen Eisenanteil der Sonne aufweist, ist vermutlich größer als der Kern Jupiters und wird von Schichten aus flüssigem Wasserstoff und Helium umhüllt.



die Programme einbezogen, viele von ihnen wurden erst wenige Male beobachtet. Es kann also noch bis zu zehn Jahre dauern, bis die Astronomen entscheiden können, ob unser Sonnensystem statistisch etwas Ungewöhnliches darstellt.

Theoretiker wie ich haben also noch eine Menge Spielraum. Wir haben weder heiße Jupiter noch exzentrische Riesen vorhergesagt. Doch vielleicht sind wir jetzt in der Lage, Vorhersagen zu machen, die nicht so weit von der Wirklichkeit entfernt sind.

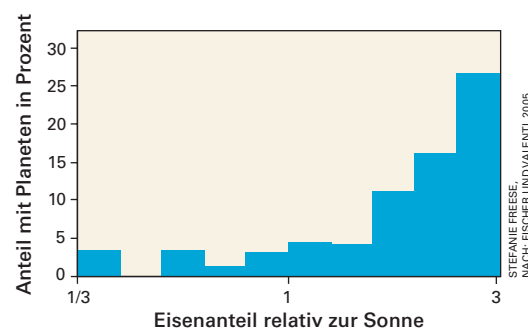
Eine entscheidende Einsicht in den Prozess der Planetenentstehung stammt nicht von den Exoplaneten selbst, sondern von den Eigenschaften ihrer Zentralgestirne. Ein Team von amerikanischen und portugiesischen Astronomen konnte zeigen, dass die Wahrscheinlichkeit, einen Planeten bei einem Stern zu entdecken, davon abhängt, wie reich dieser Stern an schweren Elementen ist. Unsere Sonne enthält beispielsweise etwas weniger als zwei Prozent schwere Elemente. Sterne mit ähnlichen Anteilen haben eine Wahrscheinlichkeit von fünf Prozent für einen heißen Jupiter oder exzentrischen Riesen. Erreicht dieser Anteil aber das Doppelte, so steigt die Wahrscheinlichkeit für eine Planetenentdeckung um das Fünffache. Sinkt der Anteil an schweren Elementen auf weniger als die Hälfte des solaren Werts, so fällt die Wahrscheinlichkeit für Planeten auf unter ein Prozent.

Dieser Zusammenhang lieferte uns den wichtigen Hinweis, dass Kernakkretion für die Entstehung der meisten bislang entdeckten Exoplaneten verantwortlich sein muss. Denn bei Sternen, die sich aus Scheiben mit einem hohen Anteil an schweren Elementen bilden, sollte der Kernakkretions-Prozess relativ schnell in Gang kommen, da es in die-

sen Scheiben neben Gas auch viel Staub gibt. Und wenn sich die Planetenkerne schnell bilden, dann ist noch genug Gas vorhanden, um die Planeten rasch anwachsen zu lassen. Zieht sich die Kernakkretion jedoch zu lange hin, würde das Gas aus der Scheibe verschwunden sein, bevor sich ein Gasriese bilden kann. Eine langsame Akkretion würde aber die Bildung neptungroßer Kerne erlauben, auch wenn diese nicht mehr viel Gas anziehen könnten. Sterne mit einem geringeren Anteil an schweren Elementen als unsere Sonne sollten also »verhinderte Jupiter« besitzen.

Das Sonnensystem als Sonderfall

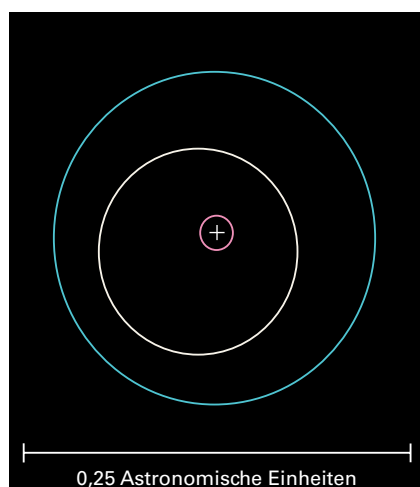
Gut möglich, dass unser Sonnensystem etwas ungewöhnlich dastehen wird: In ihm ist zwar ein Jupiter entstanden, aber kaum nach innen gewandert. Die häufigste planetarische Anordnung könnte eine Konfiguration sein, mit terrestrischen Planeten innerhalb einiger weniger Astronomischen Einheiten (eine Astronomische Einheit ist der mittlere Abstand Erde-Sonne, also 150 Millionen Kilometer) sowie neptungroßen Planeten weiter außen. Diese Hypothese stützt sich auf Computersimulationen, die ich gemeinsam mit F.C. Adams und Peter H. Bodenheimer durchgeführt habe. Unsere Simulationen liefern starke Hinweise darauf, dass Sterne mit 40 Prozent der Sonnenmasse deutlich länger als 10 Millionen Jahre zur Bildung eines jupitergroßen Planeten benötigen. Doch nach dieser Zeit ist das Gas der meisten protostellaren Scheiben schon lange verschwunden. Die Kernakkretions-Theorie sagt somit voraus, dass Rote Zwergsterne



(mit jeweils etwa halber Sonnenmasse der häufigste Sternentyp in der Galaxis) sehr häufig neptungroße, aber so gut wie nie jupitergroße Begleiter besitzen sollten.

Bislang scheint diese These zuzutreffen. Bei einer Durchmusterung der rund 150 Roten Zwerge, die nah und damit hell genug sind für die Suche nach Schwankungen in der Sternbewegung durch Planeten, konnten eine ganze Reihe von Planeten mit etwa Neptunmasse entdeckt werden. Und mit Hilfe des so genannten Gravitationslinseneffekts konnten weitere Objekte dieses Typs aufgespürt werden. Insgesamt haben die Beobachtungen aber nur ein System geliefert, das einen Planeten mit Jupitermasse beherbergt.

Der betreffende Stern namens Gliese 876 ist nur 15 Lichtjahre von der Erde entfernt. Trotz dieser geringen Entfernung ist er für das bloße Auge noch um den Faktor 100 zu schwach. Gliese 876 ist einer von etwa zehn Sternen mit mehreren Planeten. Er wird von zwei Riesenplaneten mit Umlaufzeiten von 30 und 60 Tagen umkreist sowie von einem Planeten mit der 7,5-fachen Erdmasse und einer Umlaufzeit von zwei Tagen (siehe Grafik S. 80).



STEFANIE FRIESE NACH: LAUGHLIN, BODENHEIMER UND ADAMS, 2004

Die Beobachtungen des Sterns Gliese 876 stellen die Planetenforscher vor Rätsel. Denn dieser Rote Zwerg wird von zwei Gasriesen (Umlaufbahnen blau und weiß) sowie einem kleineren Planeten (pink) umrundet. Noch ist unklar, wie um einen so massearmen Stern – Gliese 876 weist nur ein Drittel der Sonnenmasse auf – ein oder sogar zwei Riesenplaneten entstehen konnten.

▷ Dieses System liefert uns eine Fülle neuer Einsichten. Die beiden großen äußeren Planeten sind in einer Resonanz der Bahnbewegungen gefangen: Im Mittel braucht der äußere Planet für einen Umlauf um den Stern genauso lange wie der mittlere Planet für zwei Umläufe. Diese Konfiguration wird durch die gegenseitige Anziehung der beiden Planeten aufrechterhalten. Es scheint, als sei der äußere Planet durch die ursprüngliche Scheibe nach innen gewandert und habe sich dabei an den mittleren Planeten bis zum Erreichen der Resonanz angenähert. Anschließend bewegten sich beide Planeten offenbar im Gleichtakt weiter nach innen. Es bleibt dennoch schwer zu verstehen, wie während der kurzen Lebensdauer der vermutlich massearmen protostellaren Scheibe von Gliese 876 überhaupt ein Gasriese entstehen konnte – zwei Gasriesen stellen uns vor ein noch größeres Rätsel.

Gliese 876 warnt uns: Heutige Theorien der Planetenentstehung weisen wesentliche Lücken auf. Vermutlich beeinflusst das rapide Wachstum eines jupiterähnlichen Planeten die Struktur der Scheibe in einer Weise, welche die schnelle Bildung weiterer Riesenplaneten för-

dert. In unserem Sonnensystem könnte etwa die Anwesenheit von Jupiter Saturns Wachstum gesteuert haben. Solche Mechanismen zu untersuchen ist ein wichtiges Gebiet der aktuellen Forschung.

Sie kann uns vielleicht auch eine Erklärung dafür liefern, warum exzentrische Riesen zumeist mehr Masse besitzen als Jupiter. Womöglich deutet diese Beobachtung darauf hin, dass Systeme mit exzentrischen Riesen ursprünglich mehrere massive Planeten enthielten. Wie die Simulationen zeigen, führen gravitative Wechselwirkungen zwischen den Planeten im Verlauf der Zeit häufig dazu, dass kleinere Planeten aus dem System herausgeworfen werden, während die zurückbleibenden massiven Planeten exzentrischen Umlaufbahnen folgen.

Die Beobachtungen der letzten zehn Jahre haben uns Theoretikern enorm geholfen. Doch vielleicht führen sie uns manchmal auch in die Irre. Wenn ein fernes System mehr als einen Planeten enthält, können die Astronomen die Taumelbewegung des Sterns einfach in mehrere Komponenten zerlegen und diese Anteile individuellen Umlaufbahnen von Planeten zuordnen. Viele solcher Beobachtungen – wie etwa bei dem Stern 55 Cancri, der mindestens vier Planeten besitzt – sind aber ziemlich schwierig zu analysieren. Manchmal artet es in einen numerischen Albtraum aus, für die Umlaufbahnen ein akzeptables Modell aufzustellen.

Bei der Planetensuche kann jeder mitmachen – auch Amateure

Solche Probleme können die Analyse der Taumelbewegung erschweren. Es ist durchaus denkbar, dass die daraus gezogenen statistischen Schlüsse voreilig oder gar falsch sind. Gemeinsam mit Kollegen von der Universität von Kalifornien in Santa Cruz und dem Naval Observatory habe ich deshalb ein Experiment gestartet, um dieses Problem zu untersuchen. Wir haben dafür eine Galaxie aus 100 000 Sternen simuliert, von denen manche Planetensysteme besitzen. Die statistische Verteilung dieser Systeme stimmt dabei mit jener der bislang bekannten Systeme überein. Aus den Größen und Umlaufbahnen der Modellplaneten können wir nun die Taumelbewegungen ihrer Sterne und damit die Dopplerverschiebungen berechnen, wie sie von der Erde aus beobachtbar wären.

Unser Ziel ist es, Beobachtungen zu simulieren und diese mit den üblichen Methoden zu analysieren. Durch den Vergleich mit den Konfigurationen der Planeten in unserer virtuellen Galaxie sollten wir dann Fehler bei der Interpretation aufspüren können.

Da in den Prozess der Planetensuche immer auch ein gewisses Maß an Subjektivität und Intuition einfließt, wollen wir so viele Personen wie nur möglich an dem Experiment beteiligen – und zwar sowohl Fach- als auch Amateurastronomen. Aus diesem Grund haben wir eine benutzerfreundliche Software zur Analyse der Daten – seien sie real oder virtuell – entwickelt, mit der sich die Planeten aufspüren lassen. Das Java-Applet namens »Systemic Console« steht auf der Website www.oklo.org zum Download bereit. Mit Hilfe dieses Projekts wollen wir Messdaten in Zukunft besser verstehen.

Vielleicht müssen wir danach umdenken. Wir erwarten aber keine Änderung der fundamentalen Erkenntnis, dass unsere Galaxie viele Milliarden Planeten enthält. Ähneln einige dieser Welten unserem Blauen Planeten? Bislang wissen die Astronomen es nicht. Aber alles, was wir in letzter Zeit gelernt haben, spricht dafür, dass erdähnliche Planeten leicht entstehen und häufig vorkommen. Und einige davon sollten dann auch lebensfreundlich sein. Noch zu unseren Lebzeiten könnten neue Weltraumteleskope – beginnend mit Corot und Kepler, die in den nächsten Jahren starten – eine Antwort auf diese Frage liefern. ◀



Gregory P. Laughlin promovierte 1994 in Astronomie an der Universität von Kalifornien, Santa Cruz – gerade ein Jahr, bevor der erste extrasolare Planet entdeckt wurde. Nach einigen Wanderjahren als Forscher arbeitet er dort seit 2001 auch als Professor.

© American Scientist 2006
www.americanscientist.org

Die Enzyklopädie der extrasolaren Planeten: <http://exoplanet.eu/>; siehe auch: Catalog of nearby exoplanets. Von R. P. Butler et al. in: Astrophysical Journal, Bd. 646, S. 505, 2006

Planet Quest: The Epic Discovery of Alien Solar Systems. Von Ken Crosswell. Free Press, New York 1997

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/855963.