

# Aus Staub und Eis geboren

Von Alexander Seizinger

**Hunderte Planeten, die um fremde Sterne kreisen, wurden von Astronomen in den letzten Jahren entdeckt. Wie Planeten entstehen, ist unter Wissenschaftlern noch immer umstritten und Gegenstand intensiver Forschung, auch in Tübingen**

Wohl jeden, der in einer wolkenlosen, klaren Nacht den Blick gen Himmel richtet, überkommt beim Anblick der abertausend winzigen Lichtpunkte ein Gefühl des Staunens. Doch versetzen wir uns einmal in einen hypothetischen, außerirdischen Beobachter, der auf seinem weit entfernten Heimatplaneten wie wir staunend den Sternenhimmel betrachtet. Alles, was er von unserem Sonnensystem wahrnehmen würde, wäre der winzige Lichtpunkt unserer Sonne. In der Dunkelheit verborgen bliebe die unglaubliche Vielfalt an Planeten, Monden und Asteroiden, die in unserem Sonnensystem ihre Bahnen ziehen. Ganz zu schweigen von all dem, was sich auf diesen Körpern abspielt: Vulkanismus, Wetterphänomene und vor allem Leben in seinen mannigfaltigen Ausprägungen. Derartige Gedankenexperimente haben schon vor vielen hundert Jahren Spekulationen befeuert, ob unser Sonnensystem mit seinen Planeten eine kosmische Sonderstellung einnimmt, oder andere Sterne genauso von Planeten umkreist werden wie unsere Sonne.

## **Exoplaneten auf der Spur**

Erst im Jahre 1995 konnten die Schweizer Astrophysiker Michel Mayor und Didier Queloz den Nachweis des ersten extrasolaren Planeten, der um einen anderen sonnenähnlichen Stern kreist, verkünden. Aber warum ließ die Entdeckung trotz des Hubble- und anderer Teleskope so lange auf sich warten? Einen Lichtjahre entfernten, leuchtschwachen Exoplaneten neben einem hell strahlenden Stern zu entdecken entspricht ungefähr der Aufgabe, mit einem Fernglas aus einigen hundert Meter Entfernung ein Glühwürmchen zu erspähen, das wenige Zentimeter entfernt um einen Stadionscheinwerfer herumschwirrt. Zunächst ließen sich Exoplaneten nur indirekt über ihre gravitative Wechselwirkung mit dem Zentralstern entdecken. Dabei bringt der Planet aufgrund der gegenseitigen Anziehung durch die Schwerkraft (Gravitation) den Stern minimal zum „Taumeln“. Dieser Effekt ist umso stärker, je massereicher der Planet und je kleiner der Abstand zwischen Planet und Stern ist. Zunächst wurden daher vor allem sog. „hot jupiters“ gefunden, Planeten mit einer Masse ähnlich der des Jupiter (was ungefähr 320 Erdmassen entspricht), die aber ihren Zentralstern in kleinem Abstand umkreisen und daher deutlich heißer sind. Verfeinerte Methoden erlauben es uns heute, auch masseärmere und weiter entfernte Planeten aufzuspüren. Insgesamt wurden bisher knapp 900 Exoplaneten nachgewiesen und ständig kommen weitere hinzu (Abb. 1, nächste Seite). Noch ist unklar, ob sich darunter auch ein der Erde ähnlicher Planet befindet, dessen Oberflächentemperatur die Existenz flüssigen Wassers erlaubt. Aber wie sind all diese Planeten eigentlich entstanden?

## **Von kosmischen Wollmäusen . . .**

Leider ist es nicht möglich, den Geburtsprozess neuer Planeten direkt zu beobachten. Denn einerseits sind die kosmischen „Kreißsäle“ so weit entfernt, dass selbst die stärksten Teleskope nicht weiterhelfen. Zum anderen übersteigen die Zeitskalen, auf denen Planeten entstehen, unsere eigene Lebensdauer um ein Vielfaches. Aufgrund des rasanten technischen Fortschritts im Computerbereich bieten jedoch Simulationen einen Ausweg aus diesem Dilemma.

Die Entstehung eines neuen Sonnensystems beginnt mit dem Kollaps einer gigantischen, interstellaren Wolke aus Gas und Staub. Die gegenseitige gravitative Anziehung ihrer Bestandteile lässt sie auf einen Bruchteil ihrer ursprünglichen Größe schrumpfen. Da hierbei der anfängliche Drehimpuls erhalten bleiben muss, rotiert das Material immer

schneller um das Zentrum, wie eine Eiskunstläuferin, die beim Drehen ihrer Pirouetten ihre Arme anzieht. Analog zu einem Lehmklumpen auf einer Töpferscheibe plattet die Wolke durch die Rotation ab. Währenddessen wächst die Dichte und damit auch Druck und Temperatur im Zentrum so lange an, bis die Kernfusion von Wasserstoff zu Helium einsetzt. Voilà, ein neuer Stern ist geboren! Das ihn umkreisende Gas bildet eine grob 100 Astronomische Einheiten (mittlerer Abstand der Erde zur Sonne) ausgedehnte, flache Scheibe, in der sich mikrometergroße Staub- und Eisteilchen befinden: Da diese winzigen Teilchen von dem sie umgebenden Gas mitgerissen werden, ist ihre relative Geschwindigkeit zueinander sehr gering, doch von Zeit zu Zeit berühren sich zwei solche Teilchen und haften aneinander. Dieser Prozess führt zur Bildung hochporöser Staub- und Eisaggregate (Abb. 2, rechts oben) und kann experimentell zu Hause leicht nachgestellt werden: Einen staubsaugergeschützten Ort und einige Wochen bis Monate Zeit vorausgesetzt, wird der geneigte Experimentator mit Wollmäusen in großer Zahl belohnt, deren Struktur ihren kosmischen Kollegen ähnelt.

Das Wachstum solcher Staubaggregate zu untersuchen ist Teil meiner Doktorarbeit. Dazu habe ich ein Computerprogramm entwickelt, mit dem das Verhalten der einzelnen Teilchen, aus denen ein größeres Aggregat aufgebaut ist, simuliert wird. Für hunderttausend und mehr Teilchen ist dies sehr rechenaufwendig, so dass eine einzelne Simulation auf einem handelsüblichen PC mehrere Monate dauern würde. Schneller geht es durch die Auslagerung der Berechnungen auf eine Grafikkarte (GPU). Im Unterschied zum Hauptprozessor (CPU) kann die GPU viele Rechenoperationen parallel ausführen, zum Beispiel gleichzeitig die neue Position von tausenden Teilchen berechnen. Durch die Verwendung der GPU lassen sich meine Simulationen um den Faktor 30 beschleunigen. Eine Wartezeit von einem Monat reduziert sich damit auf einen Tag - das klingt immer noch ziemlich lange, ist im High Performance Computing aber eher kurz. Beim Wachstum der Aggregate ist insbesondere deren geometrische Struktur von Bedeutung, denn diese bestimmt die „Windschnittigkeit“ und damit, wie sehr die Staub- und Eisaggregate in ihrem Wachstumsprozess vom Gas umhergewirbelt werden. Je heftiger, umso häufiger kommt es zum Zusammenstoß zweier Aggregate. Warum ist das so wichtig? Während ihrer Bewegung um den Zentralstern werden die Staub-/Eisteilchen vom Gas abgebremst und verlieren so kontinuierlich an Bewegungsenergie. Dadurch driften sie auf einer Spiralbahn in Richtung Zentrum bis sie schließlich vom Stern verschluckt werden. Computersimulationen zeigen, dass dieser Prozess grob 10 000 Jahre benötigt. Klingt nach viel Zeit, tatsächlich ist unter Astrophysikern bis heute aber heftig umstritten, ob innerhalb dieser Zeitspanne durch sukzessive, haftende Kollisionen ein Wachstum auf Planetengröße möglich ist. Also ohne Turbulenz keine Planeten! Der geneigte Hobby-Planetenzüchter mit großem Bett und viel Zeit sollte daher beim nächsten Sturm das Fenster geöffnet lassen.

### . . . über Planetenembryos . . .

Nicht nur der Wettlauf mit der Zeit ist ein Problem. Um Staubkörnchen aufzuwirbeln genügt bereits eine leichte Brise, doch selbst der stärkste Orkan lässt (zum Glück für uns) keine Felsbrocken umherfliegen. Wachsen Wollmäuse zu metergroßen, kompakteren Brocken heran, ist ihre Bewegung zunehmend unabhängig von der des sie umgebenden Gases. Je größer zwei kollidierende Objekte sind, umso stärker unterscheiden sich im Mittel ihre Flugbahnen, die Kollisionsgeschwindigkeit erhöht sich also. Im Gegensatz zu den oben beschriebenen Wollmäusen ist einiger Optimismus nötig, um zwei mit 50 km/h aufeinanderprallende Felsbrocken zu einem größeren Objekt zu vereinen (künstlerisch illustriert auf der vorherigen Doppelseite). Dummerweise sind nach aktuellem Wissensstand bei makroskopischen Objekten aber Kollisionsgeschwindigkeiten zwischen 10-50 km/h die Regel und nicht die Ausnahme.

Warum bilden sich dann Planeten und nicht nur zahllose Trümmerstücke? Vermutlich liegt der Schlüssel in der Porosität. Filme oder künstlerische Darstellungen verleiten zu der Vorstellung, dass die im Sonnensystem umherfliegenden Eis- und Gesteinsbrocken kompakte, feste Objekte sind. Bestimmt man jedoch ihre Masse und vergleicht sie mit dem Volumen, stellt man fest, dass diese Objekte in Wirklichkeit ziemlich porös sind. Im Verlauf

einer Kollision kann ein Teil der kinetischen Einschlagsenergie durch Zusammendrücken des Materials abgeführt werden. Doch wie effizient ist diese „Knautschzone“?

In Zeiten knapper Forschungsetats ist es illusorisch, in der Schwerelosigkeit mit meter- bis kilometergroßen, porösen Gesteinsbrocken zu experimentieren. Also kommt Computersimulationen wieder eine tragende Rolle zu. Für derartige Simulationen ist jedoch ein anderer Ansatz notwendig als für die oben erwähnten Wollmäuse, bei denen das Verhalten jedes einzelnen mikrometergroßen Teilchens simuliert wurde. Die riesige Teilchenzahl, die zur Modellierung eines solchen Objekts notwendig wäre, würde selbst die leistungsfähigsten Supercomputer in die Knie zwingen.

Glücklicherweise ist dies aber auch gar nicht nötig. Simuliert ein Ingenieur die Festigkeit einer Tragfläche, muss er schließlich auch nicht das individuelle Verhalten jedes ihrer Atome kennen. Stattdessen wird bei der Simulation ein metergroßer Brocken in zentimetergroße Untereinheiten aufgeteilt. Allerdings werden dazu einige Materialparameter benötigt, die z. B. das Verhalten unter Druck- oder Zugbeanspruchung beschreiben. Für Materialien, die in Industrie und Technik verwendet werden, lassen sich diese Parameter oft in umfangreichen Tabellen nachschlagen. Für viele der nötigen Parameter leider unbekannt. Teilweise können Laborexperimente die nötigen Daten liefern. Allerdings stellen hochporöse Staubaggregate aufgrund der niedrigen Festigkeit die Fertigkeiten und Geduld des Experimentators auf eine harte Probe. Die Aufgabe, einen Kraftmesser zerstörungsfrei an einer Wollmaus oder Zuckerwatte zu befestigen, birgt ein hohes Frustrationspotential.

Um derartige Probleme zu umgehen bestimme ich in meiner Doktorarbeit solche Materialparameter durch Simulationen. Ein Vergleich mit den verfügbaren Labordaten zeigt, dass schon vergleichsweise winzige Proben von 50 Mikrometer Durchmesser groß genug sind, um Kontinuumseigenschaften wie die Druck- oder Zugfestigkeit zu messen. Mit dem so vervollständigten Parametersatz kann dann genauer untersucht werden, auf welche Weise metergroße Objekte zu „Planetenenbryos“ (sog. Planetesimalen) heranwachsen.

Ab einer Größe von rund einem Kilometer spricht man von Planetesimalen. Deren Masse ist groß genug, um sich gegenseitig anzuziehen. Die Größten sammeln dabei einem Staubsauger gleich kleinere Objekte in ihrer Umgebung auf und wachsen zu Planeten an. Auf Planeten oder Asteroiden, die keine geologisch aktive Oberfläche besitzen, zeugen noch heute Einschlagskrater von der Endphase dieses Prozesses.

### **. . . zum fertigen Planetensystem**

Ungefähr zehn Millionen Jahre dauert es, bis das Gas aus der Scheibe ins Universum entwichen ist. Innerhalb dieser Zeitspanne müssen einzelne Planetenkerne auf grob zehn Erdmassen anwachsen. Deren Gravitation ist stark genug, um das sie umgebende Gas „aufzusaugen“ und so Gasriesen wie Jupiter und Saturn zu formen. Aber nicht alles Material wurde beim Planetenbau verbraucht: Hunderttausende Asteroiden, Meteoroiden und Kometen sind stumme Zeugen der turbulenten Geburt der Planeten. Die Details ihrer Entstehungsgeschichte zu verstehen wird die Wissenschaftler noch viele Jahre beschäftigen.