

# Planeten als Einzelgänger

Nicht alle Planeten kreisen um einen zentralen Stern. Manche schwirren fern von ihren Sonnen frei durch den Raum. Insbesondere in Kugelsternhaufen dürfte es zahlreiche Planeten-Waisen geben.

Von Jarrod R. Hurley und Michael M. Shara

Die Frage, ob es außerhalb des Sonnensystems Planeten gebe, war jahrhundertlang brisant. So musste der Philosoph Giordano Bruno unter anderem deshalb im Jahr 1600 sein Leben auf dem Scheiterhaufen lassen, weil er behauptet hatte, im Weltall gebe es unendlich viele andere Welten. Heute wird ein Wissenschaftler nicht mehr öffentlich verbrannt, wenn er über extrasolare Planeten spricht, doch das Arbeitsgebiet ist noch immer von Kontroversen geprägt. Die Astronomen kennen mittlerweile hundert Planeten auf Bahnen um andere Sterne. Das ist an sich schon eine aufregende Erweiterung unseres Weltbildes. Noch faszinierender ist allerdings die Entdeckung, dass einige dutzend extrasolare Planeten überhaupt nicht an einen Stern gebunden sind. Diese Himmelskörper treiben also frei durchs All, ohne einen Zentralstern zu umrunden. Damit gehören sie zu den am heftigsten diskutierten Objekten, die bisher bei der Suche nach anderen Welten gefunden wurden.

Das Problem dabei ist, dass sich die Astronomen bis heute nicht einig sind, was denn eigentlich unter einem Planeten zu verstehen sei. Die meisten der neu entdeckten Trabanten fremder Sterne sind größer als Jupiter, der größte Riesenplanet in unserem eigenen Sonnensystem. Manche von ihnen haben mehr als die zehnfache Masse des Jupiters. Das reicht schon nahe an die Untergrenze eines anderen Typs substellarer Himmelskörper heran, der so genannten Braunen Zwerge. Dies sind gewissermaßen missratene Sterne: Ihre Masse ist zu klein und die Dichte in ihrem Inneren zu

gering, als dass dort Wasserstoff zu Helium verschmelzen könnte. Die Massen von Braunen Zwergen liegen zwischen denen von Planeten und wahren Sternen, doch eine genaue Abgrenzung dieser verschiedenen Himmelskörper-Typen ist noch etwas unklar. Verwirrenderweise gibt es sogar Hinweise darauf, dass Braune Zwerge selbst Planeten haben können.

Andererseits sind einige der frei treibenden Planeten kaum größer als der Jupiter. Doch ihr bloßes Vorhandensein stellt die traditionelle Vorstellung von Planeten in Frage, der zufolge es substellare Himmelskörper sind, die seit ihrer Entstehung einen Zentralstern umkreisen. Viele Astronomen sträuben sich deshalb, diese Himmelskörper planetarer Größe als »Planeten« zu bezeichnen; manche sprechen einfach von *free-floaters*, also von »frei Treibenden«.

Bislang ist völlig unklar, wie die frei treibenden Planeten entstanden sein könnten. Wenn sie sich wie Sterne durch den Gravitationskollaps einer Staub- und Gaswolke gebildet haben, dann sollte eine gewisse Anzahl von ihnen gemeinsam mit den Sternen in jungen Sternhaufen oder -assoziationen entstanden sein. Wenn sich

► Das Sternbild Orion enthält ausgedehnte Molekülwolken, in denen Tausende von Sternen entstehen. Im Orion-Nebel (M 42) und nahe dem hellen Stern Sigma Orionis haben Astronomen auch rund vierzig planetengroße Objekte gefunden, die ohne einen Zentralstern frei durch den Raum treiben.





← Sigma Orionis

M 42

die Free-Floater aber in der protoplanetaren Scheibe um einen entstehenden Stern herausbildeten, dann stellt sich die Frage, warum der verwaiste Planet nun von seinem Zentralgestirn getrennt ist.

Unsere Forschung befasst sich mit der zweiten Möglichkeit. Wir spezialisieren uns auf Kugelsternhaufen und untersuchen ihren Zustand und ihre Entwicklung, mit direkten Beobachtungen ebenso wie mit Computersimulationen. Das scheint zunächst wenig mit dem Studium extrasolarer Planeten zu tun zu haben. Doch stellt sich heraus, dass dichte Sternhaufen wegen der dynamischen Wechselwirkungen zwischen den darin befindlichen Sternen ein fruchtbares Feld für die Suche nach diesen Himmelskörpern sein können. Hier beschreiben wir die aktuellen Entdeckungen frei treibender Planeten und zeigen, dass sie vielleicht eigentlich gar nicht so überraschend sind – auf die Gefahr hin, damit eine neue Kontroverse zu entzünden.

### Neue Klasse von Himmelskörpern

Die frei treibenden Planeten sind nicht nur deswegen interessant und wichtig, weil sie eine neue Klasse von Himmelskörpern darstellen. Die Anzahl und die Typen der Körper in unserem Milchstraßensystem, die kleiner sind als ein Stern und damit weniger als 0,08 Sonnen- beziehungsweise 80 Jupitermassen haben, ist praktisch unbekannt. Man darf mehrere Größenabstufungen erwarten, von Braunen Zwergen und riesigen Gasplaneten über Gesteinsplaneten wie unsere Erde bis hin zu kleineren Körpern wie den Monden und Asteroiden in unserem Sonnensystem.

Glaubhafte Zahlen über die Häufigkeiten solcher Körper sind nicht nur für die Suche nach bewohnbaren Welten und außerirdischem Leben von Interesse: Auch fundamentale Fragen der Astrophysik und Kosmologie sind betroffen, wie die relative Zahl und Größe neu entstandener Sterne in einem Haufen (die anfängliche Massenfunktion oder *initial-mass function*) und die Natur der gewöhnlichen (baryonischen) Dunklen Materie im Universum.

Motiviert von solchen Fragen haben mehrere Astronomenteams Anfang der 1990er Jahre eine himmlische Jagd auf andere Welten begonnen. Das hat immer wieder zu neuen überraschenden Entdeckungen geführt, angefangen 1991 mit dem Fund des ersten extrasolaren Planeten überhaupt. Allerdings umkreist dieser einen besonders exotischen Stern: einen Pulsar, einen schnell rotierenden Neutronen-

AAO ROE / DAVID MALIN

▷ stern also, der intensive Radiowellen ausstrahlt. Niemand hatte erwartet, dass Pulsare Planeten haben können, weil die Supernova-Explosion, aus der Neutronensterne hervorgehen, alle umgebenden Planeten zerstört haben sollte.

Die ersten extrasolaren Planeten, die gewöhnliche Sterne umkreisen, wurden schließlich 1995 gefunden. Aber auch diese Systeme erwiesen sich als sonderbar. Unter den zuerst entdeckten Trabanten sind einige von Jupitergröße, die ihren Zentralstern auf sehr engen Bahnen in weniger als fünf Tagen Umlaufzeit umkreisen. Das passte über-

haupt nicht zu den damals gängigen Modellen für die Bildung von Planetensystemen, denen zufolge solche Gasgiganten nur in viel größeren Abständen und mit Umlaufperioden von etwa zwölf Jahren – wie unser Jupiter – um ihr jeweiliges Zentralgestirn kreisen sollten. In den letzten Jahren sind allerdings auch immer mehr »normale« Planetensysteme entdeckt worden.

Angesichts der Überraschungen, welche die fremden Planetensysteme schon erbracht haben, würde es nicht verwundern, wenn auch die frei treibenden Planeten für einiges Durcheinander sorgen sollten. Ver-

glichen mit dem heutigen Rummel war die Entdeckung der ersten Exemplare 1998 praktisch ohne Aufhebens berichtet worden. Tief versteckt in einem Artikel über junge Braune Zwerge hatten die Autoren um Motohide Tamura vom Nationalen Astronomischen Observatorium Japans angemerkt, dass einige der von ihnen beobachteten Objekte weniger als 13 Jupitermassen hatten. Damit waren diese Himmelskörper gar keine Braunen Zwerge, sondern eher Riesenplaneten. 13 Jupitermassen entspricht der Grenze, ab der in einem Himmelskörper Fusionsreaktionen von Deuterium (schwerem Wasserstoff) ablaufen können, was meist als Untergrenze für den Bereich der Braunen Zwerge gilt. Weil die japanischen Astronomen so bescheiden waren, blieb ihre Entdeckung lange unbeachtet.

### Frei treibende Planeten, Sub-Braune Zwerge oder Planetare?

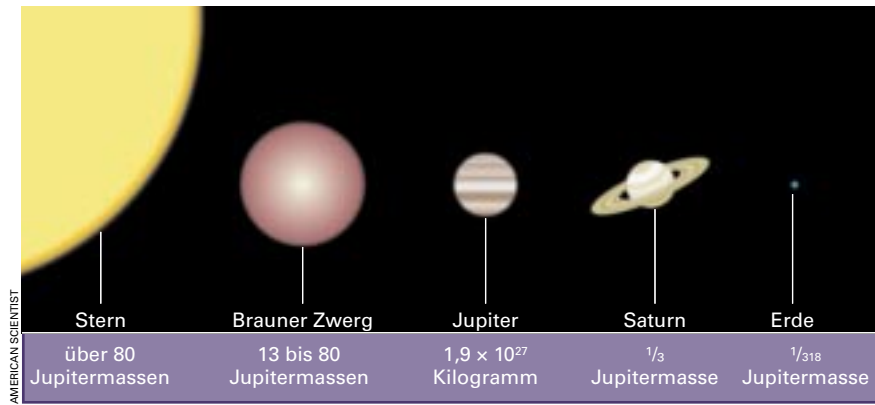
Tamuras Gruppe hatte diese planetengroßen Körper in dem Sternentstehungsgebiet Chamaeleon I gefunden, in dem sie nach jungen Sternen suchte. Im Rückblick überrascht es nicht, dass die ersten Free-Floater gerade dort gefunden wurden. Da junge Planeten noch etwas von der Wärme zurückbehalten haben, die während ihrer Bildung durch Zusammenballen von Materie entsteht, offenbart sich ihre Infrarotstrahlung denselben Detektoren, mit denen Astronomen nach Braunen Zwergen und sehr jungen Sternen fahnden.

Ähnliche Forschungsprojekte führten schließlich zu weiteren Entdeckungen. Im Frühjahr 2000 identifizierten zwei Briten, Philip Lucas von der Universität von Hertfordshire und Patrick Roche von der Universität Oxford, mehrere Kandidaten für Free-Floater inmitten des Orion-Nebels, eines 1500 Lichtjahre von der Erde entfernten Sternentstehungsgebiets. Einige dieser Objekte schienen weniger als 13 Jupitermassen zu haben. Wie auch bei Tamuras Arbeit hängt die Natur dieser Himmelskörper teilweise von ihrem Alter ab. Wenn sie sehr jung sind, vielleicht nur eine Million



AAO/DAVID WALIN

◀ Der Kugelsternhaufen 47 Tucanae enthält mehrere Millionen Sterne und eine unbekannte Anzahl von Planeten. Können Planetensysteme in dem Schwerkraftchaos einer Umwelt mit 3000 Sternen pro Kubiklichtjahr überhaupt stabil sein? Das versuchen Astronomen zu klären, indem sie das dynamische Verhalten mit Computern simulieren.



AMERICAN SCIENTIST

Was eigentlich ist ein Planet? Die Definition hängt teilweise von der Masse des Himmelskörpers ab. Oberhalb von 13 Jupitermassen ist das Objekt als Brauner Zwerg anzusehen. Die kleinsten freien Planeten, die bisher entdeckt wurden, haben rund das Fünffache der Jupitermasse.

Jahre alt, dann entspricht ihre Leuchtkraft Objekten von planetaren Ausmaßen.

Einige Astronomen stellten die Entdeckungen von Lucas und Roche sogleich in Frage: Vielleicht strahlen diese Objekte in Wirklichkeit viel heller, und sie stehen hinter dem Orion-Nebel, dessen Staub ihr Licht dämpft und die Planetennatur vortäuscht? Dann wären es in Wahrheit Braune Zwerge. Andere sprachen sich prinzipiell gegen die Bezeichnung »Planet« für solche Objekte aus. Alan Boss von der Carnegie-Institution in Washington hält nicht die Masse, sondern den Entstehungsmechanismus für entscheidend: Nur was sich in einer protoplanetaren Scheibe um einen jungen Stern gebildet habe, sei Planet zu nennen. Boss hat einen Mechanismus vorgeschlagen, bei dem sich Objekte von Planetengröße auf praktisch dieselbe Weise bilden wie Sterne: Das seien dann keine Planeten, sondern »Sub-Braune Zwerge«.

Kurz nach den Entdeckungen von Lucas und Roche meldete eine zweite Gruppe von Astronomen Free-Floater in einem anderen Teil des Sternbilds Orion. Maria Rosa Zapatero Osorio, damals am Astrophysikalischen Institut der Kanaren auf Teneriffa, und ihre Koautoren aus Spanien, Deutschland und den USA hatten 18 lichtschwache Vertreter dieser Objektklasse nahe des Sterns Sigma Orionis entdeckt. Die betreffende Region ist tausend Lichtjahre von der Erde entfernt und enthält ein Nest von Sternen, die nur etwa ein bis fünf Millionen

Jahre alt sind. Unter diesen jungen Sternen findet sich eine Anzahl von Objekten, deren Oberflächentemperatur nur 1700 bis 2200 Kelvin beträgt. (Zum Vergleich: Die Oberfläche unserer Sonne ist mit 5800 Kelvin viel heißer.) Aus ihrem geringen Alter und der niedrigen Temperatur berechneten die Astronomen Massen vom nur 5- bis 15fachen der des Jupiters. Zurückhaltend sprachen sie in ihrer Veröffentlichung von »jungen, isolierten Objekten mit planetarer Masse«. Im Frühjahr 2002 sollte sich dann herausstellen, dass eines dieser Objekte, S Orionis 70, sogar nur das Dreifache der Jupitermasse zu haben scheint.

Inzwischen hatte die Gruppe um Lucas und Roche im Herbst 2001 weitere Indizien vorgelegt, wonach ihre Funde tatsächlich im Orion-Nebel liegen und darum nur planetengroß sein können. Ihre spektroskopischen Untersuchungen der Free-Floater zeigen die Anwesenheit von Wasser, was auf ein geringes Alter von etwa einer Milli-

on Jahre und auf eine geringe Masse hinweist. Jetzt sprechen die Entdecker von 15 Free-Floatern mit Planeten-Massen – und benutzen gleich noch einen neuen Ausdruck für planetengroße Objekte, die nicht um einen Stern kreisen: Planetare.

In allen diesen Forschungsprojekten wurden die frei treibenden Planeten innerhalb von Gruppen neugeborener Sterne gefunden. Die Mitglieder solcher Gruppen verteilen sich im Laufe der Zeit im Raum – entweder, weil sie nur in losen Assoziationen versammelt und deshalb nie gravitativ aneinander gebunden waren, oder weil sie sich in kleinen, offenen Sternhaufen befinden, die über die Jahrtausende hinweg von galaktischen Gezeitenkräften aufgerieben werden. Als so genannte Feldsterne wandern sie schließlich – einzeln oder auch mit einigen wenigen Partnern als Mehrfachsystem – einsam durch die Galaxis, genau wie unsere Sonne. Alle planetengroßen Free-Floater, die innerhalb offener Haufen

Der Computer Grape-6 (Gravity Pipe) wurde speziell für die Modellierung dynamischer Wechselwirkungen in Sternhaufen entwickelt. Ein Teil der Rechenalgorithmen ist fest verdrahtet. Dieser Prototyp hat eine Rechenleistung von 0,5 Teraflops (0,5 Billionen Gleitkomma-Operationen pro Sekunde) und wurde für die hier beschriebenen Arbeiten benutzt.



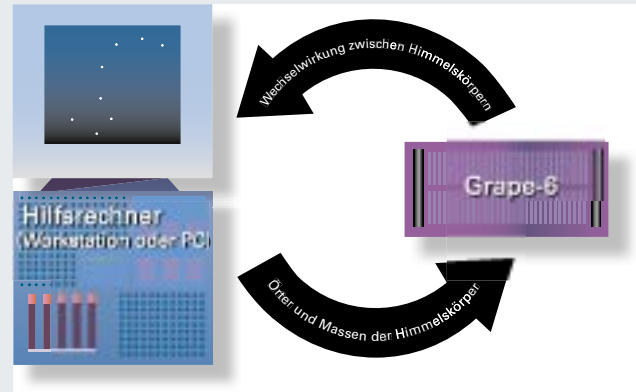
JARROD R. HURLEY, MICHAEL M. SHARA

# Wie ein Kugelsternhaufen simuliert wird

An der **N-Körper-Simulation eines Kugelsternhaufens** sind zwei Computer beteiligt: Ein Hilfsrechner speichert Orte und Massen der Himmelskörper; Grape-6, ein Spezialcomputer, berechnet die Wechselwirkungen zwischen ihnen. Zunächst werden Anfangsbedingungen festgelegt: relative Größe und Anzahl der Sterne (die Anfangsmassenfunktion), Anzahl der Doppelsysteme und Planeten, anfängliche Orte und Geschwindigkeiten der Sterne und ihre Dichten, ihre räumliche Verteilung sowie das viriale Gleichgewicht (das die Gesamtenergie des Systems definiert).

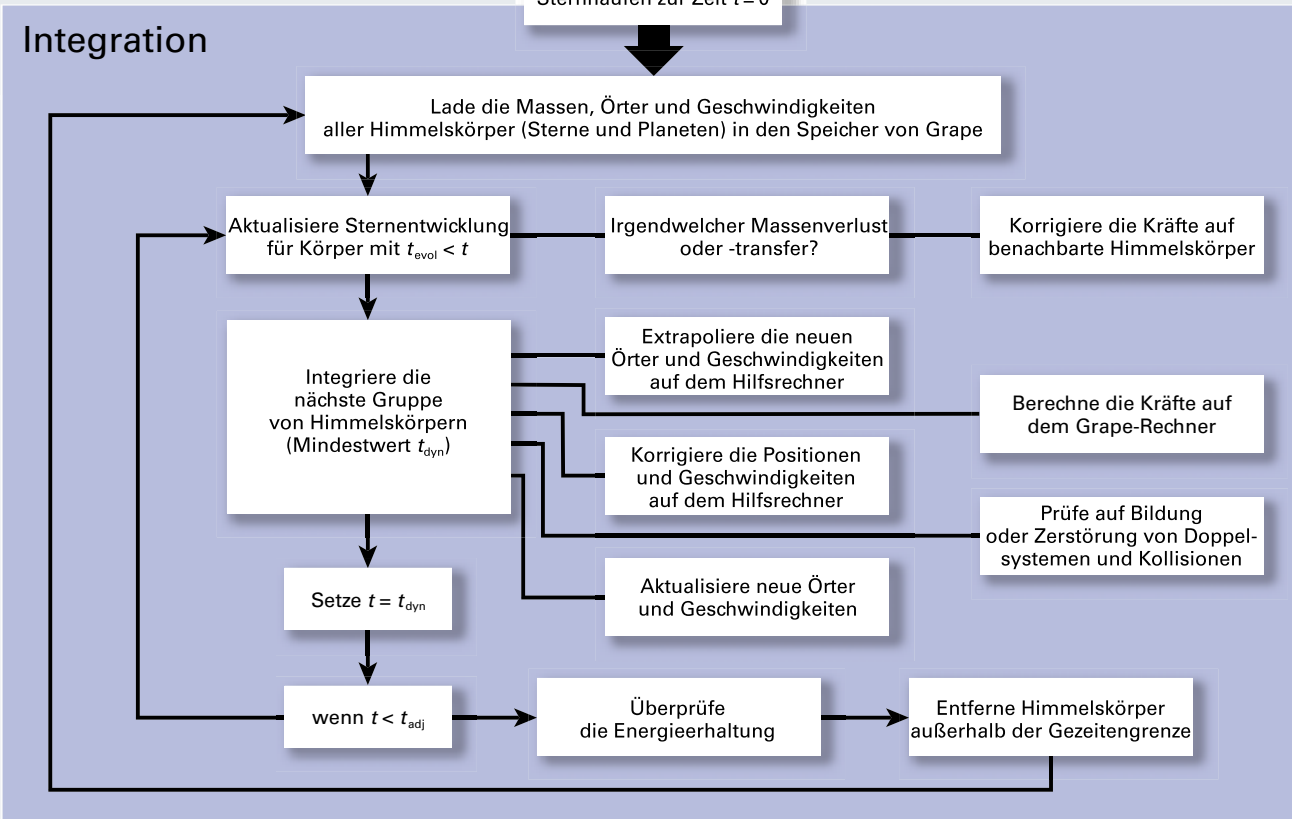
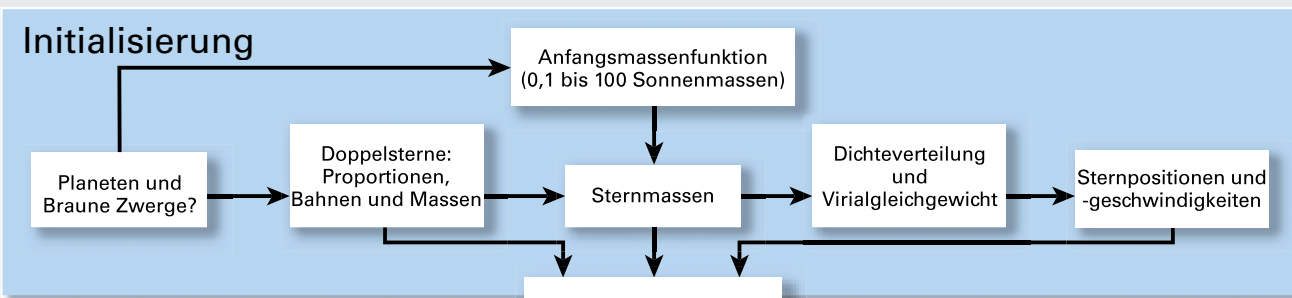
Während der Integration wird jeder Stern in zwei Zeitschritten verfolgt: einem für seine physikalische Entwicklung ( $t_{evol}$ ) und einem für seine dynamischen Wechselwirkungen ( $t_{dyn}$ ). Die Zeitschritte sind für jeden Stern anders: Massereiche Sterne entwickeln sich schnell und haben kurze  $t_{evol}$ -Schritte, während sich massearme langsamer entwickeln und längere  $t_{evol}$ -Zeitschritte haben. Analog haben schnelle Sterne im dichten Haufenzentrum kurze, die langsameren außen im Haufen lange  $t_{dyn}$ -Zeitschritte.

Aktualisiert wird das System in Gruppen von Himmelskörpern mit ähnlichen  $t_{dyn}$ -Schritten. Die physikalische Entwicklung eines Sterns kann mehr als einmal aktualisiert werden, bevor ein neu-



GRAPHIKEN DIESEER DOPPELSEITE: AMERICAN SCIENTIST

er  $t_{dyn}$ -Zeitschritt beginnt (wenn  $t_{evol} < t_{dyn}$ ). Nach einer gewissen Zeit ( $t_{adj}$ ) wird das System auf physikalische Konsistenz geprüft. Himmelskörper, die an den Rand des Kugelhaufens gewandert sind, können aus dem System entfernt werden, was dem »Verdampfen« des Haufens durch Gezeitenkräfte der Galaxis entspricht. Auch andere astrophysikalische Prozesse werden während der Integration berücksichtigt (siehe Kasten rechts).



▷ entstanden, sollten dieses Schicksal teilen. Damit wäre es praktisch unmöglich, diese sehr kalten, dunklen und einsamen Welten nachzuweisen.

Es gibt aber noch einen weiteren Platz, wo Free-Floater gefunden werden könnten: in den sehr dichten Kugelsternhaufen. Im Gegensatz zu den jungen Assoziationen in einer stellaren Kinderstube sind die Sterne in Kugelhaufen gravitativ aneinander gebunden. Und diese Haufen sind auch nicht wenige Millionen, sondern über zehn Milliarden Jahre alt. Angesichts ihrer völlig unterschiedlichen Eigenschaften mag es seltsam erscheinen, dass offene wie kugelförmige Sternhaufen gleichermaßen viel versprechende Jagdgründe für Free-Floater sein sollen – aber das könnte tatsächlich der Fall sein.

### Planeten-Suche in 47 Tucanae

Die erste Suche nach Planeten in einem Kugelsternhaufen kümmerte sich gar nicht um Free-Floater. Im Juli 1999 beobachteten Ronald Gilliland und seine Kollegen mit der Wide Field Planetary Camera 2 des Hubble-Weltraumteleskops fast 34 000 Sterne in dem Kugelhaufen 47 Tucanae. Dieser ist einer der größten und dichtesten Kugelhaufen unseres Milchstraßensystems (Bild auf Seite 40). Er enthält mehrere Millionen Sterne, und in jedem Kubiklichtjahr seines Zentralbereichs drängen sich fast 3000 von ihnen. (Zum Vergleich: In einem Kubiklichtjahr rund um die Sonne befindet sich kein einziger weiterer Stern; der nächste ist über vier Lichtjahre entfernt.) Weil 47 Tucanae sehr alt ist, hoffte Gillilands Team auf Erkenntnisse über Planetensysteme alter Sterne.

Das Hubble-Weltraumteleskop sollte diese Planeten durch so genannte Transits nachweisen: Die Helligkeit eines Sterns würde geringfügig abnehmen, sollte ein Planet vom Teleskop aus gesehen vor ihm vorbeiziehen. Wenn es in 47 Tucanae so viele Planeten gäbe wie in der Nachbarschaft der Sonne, dann sollten rund zwanzig Riesenplaneten mit engen Umlaufbahnen entdeckt werden. Also sollte es bei jedem 1700sten Stern im Kugelhaufen messbare Transits geben. Wieder und wieder maß das Hubble-Weltraumteleskop die Helligkeiten der 34 000 Sterne. Doch am Ende der Beoberkungskampagne stand fest: Es gab keinen einzigen Helligkeitseinbruch, der auf einen Planetentransit hinweisen würde.

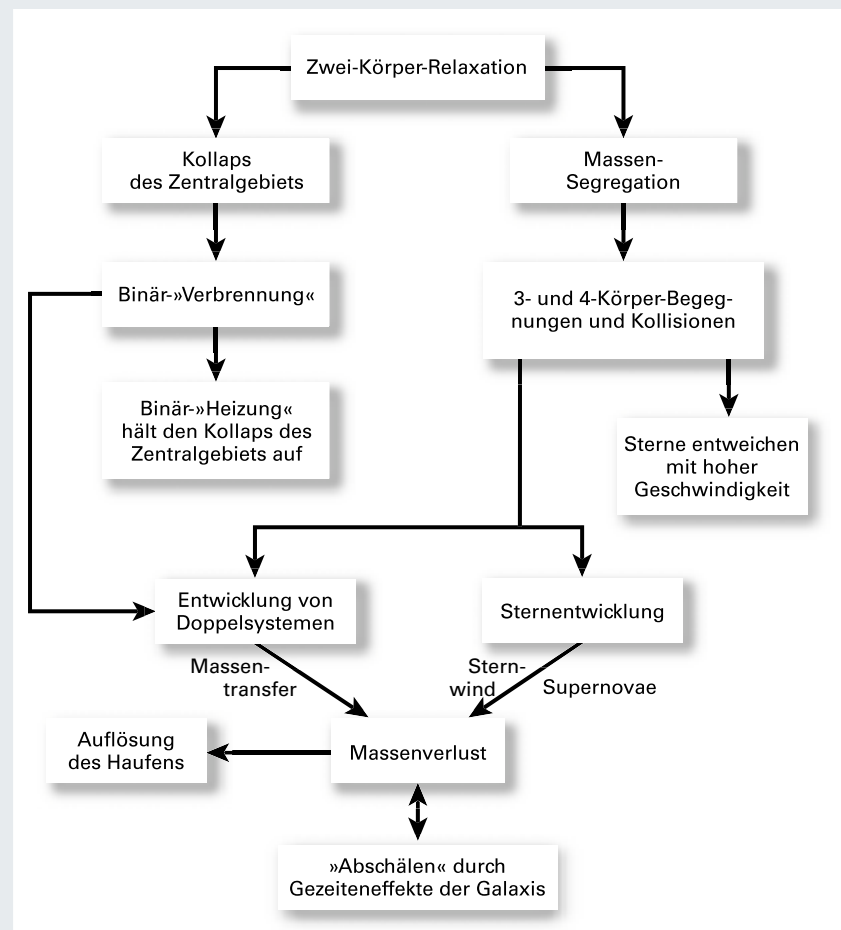
Wie ist dieser negative Befund zu erklären? Womöglich hängt das Auftreten von Riesenplaneten in engen Umlauf- ▷

## Viele Sterne sind des Haufens Tod

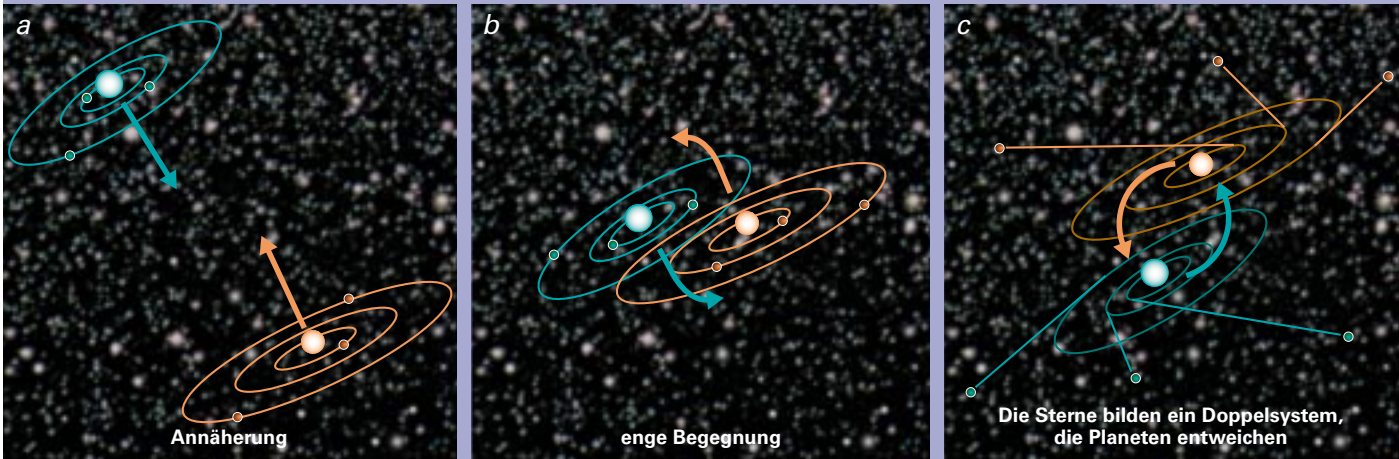
**Mehrere astrophysikalische Prozesse** müssen die Astronomen in der Simulation berücksichtigen, um die Entwicklung eines Kugelsternhaufens korrekt zu modellieren. Durch Zwei-Körper-Relaxation tauschen Sterne Energie aus, bis letztlich jeder in etwa dieselbe Menge davon hat. Massereiche Sterne werden dadurch langsamer und driften in Richtung Zentrum; masseärmere hingegen werden schneller und wandern in die Außenbereiche des Haufens. Diese so genannte Massen-Segregation beeinflusst die Häufigkeit, mit der sich Sterne begegnen, und erhöht die Anzahl derjenigen, die aus dem Haufen herausgeschleudert werden. Durch das Absinken der massereichen Sterne in das Zentralgebiet nimmt dort die Dichte zu, wodurch die Zahl der Begegnungen und Kollisionen (Binär-»Heizung«) ansteigt und der Kollaps des Zentralgebiets verzögert wird. Durch Binär-»Verbrennung« rücken enge Doppelsysteme noch näher

zusammen, während lockere Paare (einschließlich Planetensystemen) aufgebrochen werden.

**Diese Prozesse beeinflussen wiederum** die Entwicklung von Doppelsystemen und einzelnen Sternen. Der ineffiziente Massenaustausch zwischen Doppelsternen führt dazu, dass Masse aus dem System verloren geht. Auch Einzelsterne können Masse verlieren: Massereiche Sterne explodieren als Supernovae, masseärmere geben beständig Masse über ihren Sternwind ab. Gezeiteneffekte durch die Gravitation des Milchstraßensystems schälen allmählich Masse vom Haufen ab, zusammen mit den leichten Sternen, die in dessen Außenbereich gewandert sind. Irgendwann sind so viele Sterne herausgeschleudert oder herausgezogen worden, dass sich der Haufen vollends auflöst. Durch solche Prozesse könnten viele Planeten ihrem Zentralgestirn entrissen werden.



**Szenario 1: Frei treibende Planeten entstehen durch Begegnungen von Planetensystemen in dichten Sternhaufen**



▲ Zwei Szenarien, durch die Himmelskörper von Planetengröße entstehen könnten. In einem dichten Sternhaufen (a) kann eine Begegnung zwischen zwei Planetensystemen (b) einige der Trabanten dem Zentralstern entreißen (c). Hier hat sich durch die Begegnung ein Doppelsystem gebildet, ein sehr seltener Vorgang. In den meisten Fällen genügt bereits der sanfte Schwerkraftzug durch einen vorbeiziehenden Stern, um einige Planeten freizusetzen. Es ist ebenfalls möglich, dass sich Objekte von Planetengröße in einer Molekülwolke (d) genauso bilden wie ein gewöhnlicher Stern. Wenn diese Objekte in einem dynamisch instabilen System (e) entstehen, können sie entweichen (f), anstatt an einen Stern gebunden zu bleiben.

▷ bahnen von der chemischen Zusammensetzung des Zentralsterns ab. Die Suche nach extrasolaren Planeten in der Nachbarschaft der Sonne hat nämlich ergeben, dass metallreiche Sterne – im Sprachgebrauch der Astronomen sind das Sterne mit einem relativ hohen Anteil an Elementen schwerer als Helium – mindestens zehnmalfrequenter Planeten mit kurzen Bahnperioden besitzen als metallarme Sterne. Der Grund für diesen Zusammenhang wird noch diskutiert, aber hier genügt es festzustellen, dass die alten Sterne in 47 Tucanae generell sehr metallarm sind: Der Anteil schwerer Elemente in ihnen beträgt nur etwa ein Fünftel des solaren Wertes. Die Sterne in diesem Haufen entstanden so früh in der Geschichte des Milchstraßensystems, dass es noch kaum schwerere Elemente gab. Kurioserweise wurde aber ein extrasolarer Planet im Orbit um einen Pulsar im metallarmen Kugelhaufen M 4 gefunden.

Eine andere Möglichkeit ist, dass die hohe Sterndichte in einem Kugelsternhaufen auf irgendeine Weise die Bildung von Planeten unterdrückt oder es verhindert, dass Riesenplaneten bis in enge Umlaufbahnen um ihre Sonnen wandern. Möglicherweise wurden auch Trabanten bald nach ihrer Entstehung wegen des nahen Vorübergangs eines der vielen Nachbarsterne ihrem ursprünglichen Zentralstern entrissen und in den Kugelhaufen hinausgeschleudert. Da sich Gillilands Team auf Transits von Planeten in engen Umlaufbahnen konzentrierte, wären ihm Free-Floater entgangen.

Im Sommer 2001 war in einer Veröffentlichung von mehreren Kandidaten für frei treibende Planeten im Kugelsternhaufen M 22 die Rede. Es stellte sich jedoch heraus, dass Treffer kosmischer Strahlungsteilchen in der Kamera des Hubble-Weltraumteleskops die Planeten-Effekte nur vorgetäuscht hatten: Die Entdeckungsmeldung wurde wieder zurückgezogen.

**Rechnermodell eines Kugelhaufens**

Aus dem missglückten Nachweis irgendwelcher extrasolarer Planeten in 47 Tucanae müssen wir wohl folgern, dass das Schicksal eines Planeten innerhalb eines Kugelsternhaufens sich sehr von dem eines Planeten in weniger dichter Umgebung unterscheidet. Die engen Begegnungen und gar Kollisionen zwischen den Sternen in diesen dicht bevölkerten Regionen müssen tiefgreifende Folgen für den Bestand von Planetensystemen haben. Mehrere Astrophysiker, darunter auch wir, haben versucht, deren Schicksal zu modellieren.

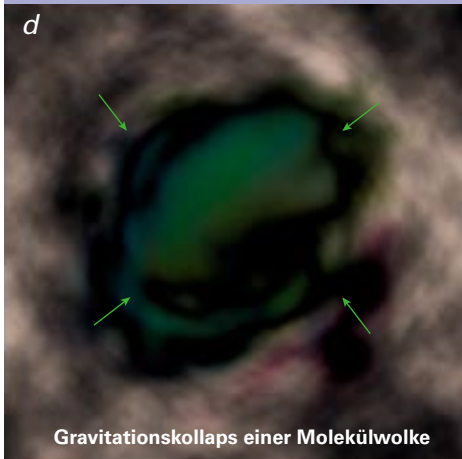
Dazu müssen wir zunächst einmal ein vernünftiges Computermodell eines Kugelsternhaufens erstellen – und das ist nicht leicht. Zwar gibt es dafür eine Reihe

von Verfahren, aber um das dynamische Verhalten jedes Sterns zu verfolgen, verwenden wir eine so genannte N-Körper-Simulation. Wegen der enormen Zahl von Sternen in einem Kugelhaufen stellt das eine große Herausforderung an die Rechenkunst. Es ist schlicht unmöglich, die Wechselwirkungen von Millionen von Sternen zu berücksichtigen – wir müssen uns in unseren gegenwärtigen Simulationen mit rund 10 000 Sternen begnügen. Selbst das geht nur mit speziell für diese Aufgabe entwickelter Hardware. Die jüngste Inkarnation dieses Computer ist Grape-6 (Gravity Pipe), eine Maschine für eine Billion Gleitkomma-Operationen pro Sekunde (Teraflops), die Jun Makino und sein Team an der Universität von Tokio entwickelten (Bild auf Seite 41).

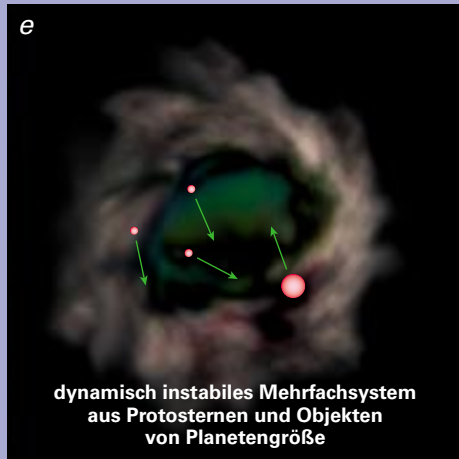
Des Weiteren ist ausgeklügelte Software vonnöten, um die Prozesse in einem Sternhaufen modellieren zu können. In den vergangenen dreißig Jahren haben Sverre Aarseth vom Astronomischen Institut in Cambridge (England) und seine Kollegen immer bessere N-Körper-Programme erstellt. Aarseths NBODY4-Code, auf dem unsere Simulationen basieren, wurde speziell für die Grape-Maschinen geschrieben (siehe das Flussdiagramm auf Seite 42).

Im ersten Schritt müssen die Anfangsbedingungen im Kugelhaufen aufgestellt werden. Dazu zählen solche Variablen wie die anfängliche Massenfunktion, der Anteil schwerer Elemente in den Sternen, die Anzahl der Doppelsterne und ihre Bahndaten, die Anzahl der Planeten und die räumliche Verteilung der Sterne. Massen, Örter und Geschwindigkeiten der Haufensterne werden auch dadurch eingeschränkt, dass der Haufen in virialem Gleichgewicht beginnt – eine generelle Eigenschaft von

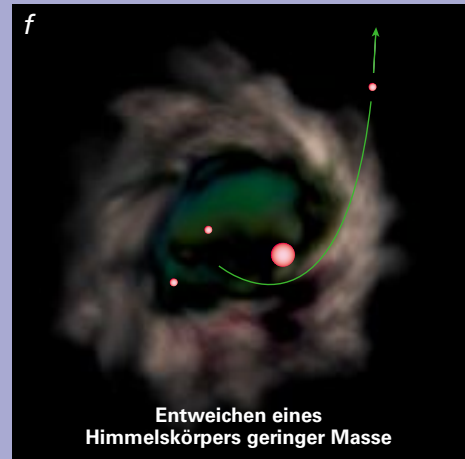
## Szenario 2: Frei treibende Himmelskörper von Planetengröße entstehen wie Sterne



Gravitationskollaps einer Molekülwolke



dynamisch instabiles Mehrfachsystem aus Protosternen und Objekten von Planetengröße



Entweichen eines Himmelskörpers geringer Masse

AMERICAN SCIENTIST

gravitativ gebundenen Systemen, die besagt, dass der Absolutbetrag der potenziellen Energie das Doppelte der kinetischen Energie innerhalb des Systems ist. All diese Angaben definieren einen Kugelhaufen des »Alters null«, in dem es kein Gas mehr gibt und keine Sterne mehr entstehen.

### Wo sind all die Planeten geblieben?

Nun kann das dynamische Verhalten aller Himmelskörper (Sterne wie Planeten) im Haufen simuliert werden. Die klassische Physik gibt vor, welche Kraft auf jeden Körper wirkt, wo er sich nach dem nächsten Zeitschritt befindet und welche Geschwindigkeit er dann hat. Zugleich entwickeln sich die Sterne und Sternpaare aber auch weiter, und eine Reihe zusätzlicher astrophysikalischer Effekte muss ebenfalls berücksichtigt werden (Kasten auf Seite 43). So verändert sich der Sternhaufen auch selbst, indem seine zentrale Dichte immer weiter ansteigt, während er im Außenbereich durch Gezeitenwirkung des Milchstraßensystems Sterne verliert. Unserer Meinung nach liefert dieses Integrationsverfahren einen guten Eindruck davon, wie sich richtige Kugelsternhaufen mit hunderttausenden oder Millionen Sternen verhalten.

Wir haben drei Simulationen durchgeführt, wobei wir jeweils 22 000 Haufensterne (ein Zehntel davon Doppelsysteme) sowie 2000 bis 3000 Riesenplaneten von Jupitergröße berücksichtigten. Diese Simulationen unterschieden sich durch den Gehalt an schweren Elementen in den Sternen und durch die Abstände der Planeten von ihren Zentralsternen. Jede Simulation umfasste 4,5 Milliarden Jahre, entsprechend dem Alter des Sonnensystems.

Die Planeten, die anfangs alle um einen Stern kreisten, erlitten dabei unterschiedliche Schicksale. Nach vier Milliar-

den Jahren, als nur noch ein Viertel der ursprünglichen Haufenmasse vorhanden war, hatte sich ein Zehntel der Planeten von ihren Zentralgestirnen gelöst und trieb frei umher; 13 Prozent davon befanden sich noch im Haufen. Zwei Drittel der Planeten hatten den Haufen zusammen mit ihren Sonnen verlassen, um die sie noch immer kreisten. Jeder Hundertste war von seinem Zentralstern verschluckt worden, und fast vier Prozent fanden sich im Orbit um einen anderen Stern wieder.

Die Simulationen haben auch gezeigt, dass Planeten, die rund das Fünffache des Abstandes Erde–Sonne von ihrem Zentralstern entfernt sind, zehnmal wahrscheinlicher von ihren Sonnen getrennt werden als solche, die eine erdähnliche Umlaufbahn beschreiben. Wenngleich Planeten vor allem im dichten Zentralgebiet des Haufens freigesetzt werden, erreicht weniger als die Hälfte von ihnen eine Geschwindigkeit, die ausreichen würde, den Haufen zu verlassen. Die meisten Free-Floater werden also tief im Inneren des Haufens zu Waisen und wandern langsam in die Außenbezirke. Innerhalb des Haufens findet man einen Free-Floater typischerweise knapp außerhalb einer Zone, welche die halbe Masse des Haufens umschließt. Und um vom Zentralbereich bis dorthin zu gelangen, brauchen die Free-Floater rund 200 Millionen Jahre.

Die meisten Planetensysteme, die den Haufen verlassen, verdanken dies einem permanenten »Abschälen« der äußeren Sterne durch das Gezeitenfeld der Galaxis. Eine geringere Zahl von Sternen und Planeten wird aus dem Haufen geschleudert, nachdem sie durch enge Begegnungen mit anderen Haufensternen auf Fluchtgeschwindigkeit beschleunigt wurden. Die meisten Begegnungen haben aber eher die

Befreiung eines Planeten zur Folge als einen Rauswurf aus dem Haufen.

Diese Resultate sind faszinierend, denn sie legen nahe, dass es in einem typischen Kugelsternhaufen auch heute noch eine größere Zahl von Jupiter-großen, frei treibenden Himmelskörpern geben sollte, selbst nach Jahrmilliarden eines stellaren Billardspiels. Warum die Suche in 47 Tucanae nichts ergeben hat, ist noch unklar – es kann ebenso gut an seiner Metallarmut wie an seinem dynamischen Innenleben liegen. Vielleicht sollte sich eine künftige Suche nach Exoplaneten auf einen weniger dichten und metallreicheren offenen Sternhaufen konzentrieren. ◀



**Jarrod R. Hurley** ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am American Museum of Natural History in New York City. Er untersucht die Entwicklung von Sternhaufen mittels Computersimulationen. Seine Modelle haben geholfen, die Entstehung der »Blauen Vagabunden« im offenen Sternhaufen M 67 zu erklären. **Michael M. Shara** leitet die Abteilung für Astrophysik des Museums. Seine Forschungsgebiete umfassen die Struktur und Entwicklung von Novae und Supernovae, Kollisionen von Sternen und die Natur der Sternpopulationen in Sternhaufen und Galaxien.



© American Scientist Magazine (siehe [www.americanscientist.org](http://www.americanscientist.org))

### Literaturhinweise

Free-Floating Planets: Not so Surprising. Von J. R. Hurley und M. M. Shara in: *The Astrophysical Journal*, Bd. 565, S.1251 (1. Februar 2002).

Discovery of Young, Isolated Planetary Mass Objects in the Sigma Orionis Star Cluster. Von M. R. Zapatero Osorio et al. in: *Science*, Bd. 290, S. 103 (2000).

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei [www.spektrum.de](http://www.spektrum.de) unter »Inhaltsverzeichnis«.

AUTOREN UND LITERATURHINWEISE