

# KOSMISCHER WIMPERNSCHLAG

aus, indem es sich ausdehnt», erklärt George Lake. Er zeichnet ein düsteres Szenario: Das Universum, das in seinen Anfängen sehr dicht und dynamisch war, fällt in eine Art Totenstarre, weil es sich immer schneller ausdehnt, die einzelnen Teile damit immer schneller auseinanderdriften und deshalb kaum mehr interagieren können. Konkret bedeutet dies, dass es in Zukunft kaum mehr Fusionen von Galaxien geben wird. Eine der letzten wird jene unserer Milchstrasse mit der Andromeda-Galaxie sein, die in zwei Milliarden Jahren beginnen und in rund fünf Milliarden Jahren abgeschlossen sein sollte.

## LICHTERLÖSCHEN IM UNIVERSUM

Durch die Fusion wird auch unser Sonnensystem disloziert und erhält einen neuen Platz in einer neuen Riesengalaxie. Uns braucht das allerdings nicht mehr zu kümmern, denn die Erde wird zu diesem Zeitpunkt bereits unbewohnbar sein, weil die Sonne sich ausdehnt und alles verschluckt, was auf unserem Planeten kriecht und flucht. Eigentlich schade, denn der neue Nachthimmel über der Erde verspricht ein Spektakel zu werden, übersät mit Milliarden von Sternen.

Doch die Zukunft der neuen Riesengalaxie ist genauso düster wie jene des ganzen Universums: Im Laufe der Zeit werden alle Sterne verglühen und die Galaxie wird dunkel. Dann wird alles auseinanderdriften und schliesslich verschwinden. George Lake geht davon aus, dass im Laufe der Zeit nicht nur die sichtbare, die sogenannte baryonische Materie zerfällt, aus der alle Dinge im Universum gemacht sind, die wir heute sehen können, sondern auch die Dunkle Materie. «Vom Universum wird dann nichts mehr übrig bleiben als ein schwarzes Nichts», prophezeit Lake. Und anders als beim Anfang des Universums, über dessen erste sichtbare Zustände sich Forscher wie Romain Teyssier freuen können, wird niemand mehr da sein, um den finalen Untergang zu bezeugen.

KONTAKT Prof. Georg Lake, george@georgelake.org, Prof. Romain Teyssier, teyssier@physik.uzh.ch, Prof. Kim-Vy Tran, vy@physik.uzh.ch

Die Erde und die anderen Planeten unseres Sonnensystems müssen innerhalb sehr kurzer Zeit entstanden sein. Wie das möglich war und was dabei genau vorging, versuchen Joachim Stadel und Aaron C. Boley herauszufinden. Von Ruth Jahn

Das irdische Dasein von Pflanzen und Tieren verwundert den Menschen seit je. Dabei sollte uns nicht bloss erstaunen, dass auf unserem Planeten vor etwa 3,85 Milliarden Jahren erstes Leben entstanden ist, sondern vielmehr, dass es die Erde als Himmelskörper überhaupt gibt. Denn deren Entstehung ist einigen aus Menschensicht äusserst glücklichen Zufällen zu verdanken.

Niemand weiss dies besser als die Astrophysiker, die die Entstehung unseres Sonnensystems ergründen. Joachim Stadel vom Institut für Theoretische Physik der Universität Zürich ist ein solcher Forscher, den die Frage umtreibt, was in den Geburtsstunden unserer Sonne und ihrer Trabanten vorging. «Statt als Planet auf einer relativ stabilen Umlaufbahn um die Sonne zu kreisen, hätte die Erde durch gravitative Störungskräfte anderer Himmelskörper auch längst aus unserem Sonnensystem hinaus katapultiert werden können», sagt Joachim Stadel, «oder sie hätte genauso gut von der Sonne verschluckt werden können.» Statt ein blauer, bewohnter Planet könnte die Erde heute auch ein unwirtlicher Kleinplanet oder ein Gasriese sein.

Das Leben unter der Sonne steht wahrlich unter einem guten Stern. Unser Stern, die Sonne, geht neuesten Hypothesen zufolge auf zwei Supernovae zurück, das explosionsartige finale Aufleuchten und Vergehen von zwei anderen Sternen. Bei der ersten Supernova entstanden Staub und Gas. Dieses Material wurde durch die Schockwellen einer zweiten Supernova komprimiert. So entzündeten sich im Ursprungsnebel Kernprozesse und die junge Sonne begann zu leuchten. Was sie voraussichtlich noch weitere 10 Milliarden Jahre tun wird: «Die Sonne ist ein relativ stabiler Stern. Bevor sie dereinst verglüht und in sich kollabiert, wird sie uns noch lange und verlässlich

leuchten und wärmen», weiss Joachim Stadel. Im Vergleich zur Sonne sind Sterne, die mit grosser Masse geboren wurden, weit weniger stabil: «Ein Stern, der 10 Mal so massiv ist wie unsere Sonne, lebt nur gerade 30 Millionen Jahre», rechnet der Astrophysiker vor, «weil er seinen Wasserstoff in der Kernfusion viel zu schnell verbrennt.»

Auch unser «übergrosser» Mond ist gemäss Isotopenmessungen von Gesteinsproben durch den letzten grossen Crash in unserem Planetensystem entstanden, bei dem die Proto-Erde und ein anderes Objekt zusammengestossen sind. Die Grösse des Mondes sei ein Glücksfall, betont der Astrophysiker: «Es gibt einen schwerwiegenden Chaos-Effekt, der durch unseren Mond reguliert wird: Wenn die Erde nicht von einem so grossen Trabanten umkreist würde, dann würde der Winkel der Drehachse sporadisch – genau genommen innerhalb von ein paar hunderttausend Jahren – um über 90 Grad kippen.» Für das Leben auf der Erde wäre eine solche Achterbahnfahrt ziemlich sicher tödlich: «Höhere Lebewesen, die sich bei solch extrem schwankenden Bedingungen evolutiv adaptieren können, sind kaum vorstellbar», so Joachim Stadel.

## DER MOND ALS CHAOS-STABILISATOR

Dass die Erde damals, als sie noch eine Proto-Erde war, mit einem marsgrossen Objekt zusammengestossen ist, hat sich also für das Leben auf der Erde als durchaus zuträglich erwiesen. Unter anderem, weil dabei der Mond entstand, unser Chaos-Stabilisator. Auf den Zusammenprall vor rund 4,5 Milliarden Jahren, das heisst etwa 50 Millionen Jahre nach der Entstehung unseres Sonnensystems, sind zudem auch die Erdrotation und somit unser Tag-Nacht-Rhythmus zurückzuführen. Der Crash hätte aber genauso gut ins Auge gehen können: Wäre die

Wucht des Zusammenpralls stärker gewesen, hätte die Erde nicht mit Teilen des Objekts «verkleben» und dadurch wachsen können, sondern sie wäre womöglich in kleine Streusel zerborsten, die wegen ihres leichteren Gewichts entweder in die Sonne gestürzt oder zum Beispiel in den Kuipergürtel jenseits von Pluto geschleudert worden wären.

Ein Glück für uns Erdenbewohner ist auch, dass unser Planet zur Zeit der Mondentstehung mit Asteroiden oder zu einem späteren Zeitpunkt gemäss einer anderen Theorie mit Eiskometen bombardiert wurde, die Wasser auf die Erde brachten. Vieles von dem, was unser Planetensystem zu dem gemacht hat, was es ist und wie es mit ihm weitergeht, steht für die Wissenschaft allerdings noch in den Sternen: «Wir verstehen etwa die Vorgänge rund um die junge Sonne noch nicht so gut», sagt Joachim Stadel.

#### KANTS SPEKULATION

Der Auftakt indes ist unbestritten: Schon der Philosoph Immanuel Kant tippte 1755 auf eine scheibenförmige Ansammlung von Gas und Staub, die die neugeborene Sonne umkreiste. Modernste Teleskoptechnik, etwa das Weltraumteleskop Hubble, bestätigt nun Kants Vorstellung: Astronomen entdecken unterdessen immer wieder sogenannte protoplanetare Scheiben rund um ferne, junge Sterne. Die erste solche Scheibe wurde 1993 im Orion-Nebel ausgemacht. Andere berühmte Beispiele sind die 1996 entdeckte Staubwolke um den Stern HH-30 oder der 2005 aufgespürte Staubring um den sehr hellen Stern Formalhaut. Für den Nachweis machen die Astronomen das Leuchten des Staubs in der Scheibe, die den Stern umgibt, durch Infrarotmessung sichtbar.

Protoplanetare Scheiben stellen die Vorstufe von Planeten dar. Diejenige unserer Sonne enthielt wohl nur einen Bruchteil der Masse der Sonne, versammelte aber mehrere Jupitermassen Gas und Tonnen von Staubteilchen. Bei der Entstehung von Planeten sei der Faktor Zeit wahrscheinlich kritischer als das vorhan-

dene Material, betont Joachim Stadel. Will heissen: In der Geburtsphase der Planeten unseres Sonnensystems war Eile angesagt. Aus Beobachtungen in anderen Sonnensystemen schliesst man nämlich, dass sich protoplanetare Scheiben innerhalb weniger Millionen Jahre wieder auflösen. «Die Erde und ihre Planetengeschwister hatten wohl nur gerade 10 Millionen Jahre Zeit, sich zu formen – nach astronomischen Massstäben ein Wimpernschlag», erklärt Stadel.

Steinige Planeten wie die Erde mussten sich sputen, um genügend rasch zu wachsen: Staub verklebt mit der Zeit zu Felsbrocken, diese kollidieren sanft untereinander und verfestigen sich weiter, zunächst zu kilometergrossen sogenannten «Planetesimalen», den Vorläufern von Planeten. Diese verdichten sich unter dem Einfluss der Gravitation weiter zu grösseren sogenannten «Embryonen» – Planetenkeimen. Gleichzeitig wird die junge protoplanetare Scheibe aber von kleinen Teilchen geräumt: Alles, was ungefähr einen Meter Durchmesser hat, verliert aufgrund von Bremsseffekten durch das umgebende Gas an Geschwindigkeit, wird deshalb näher zur Sonne gebracht und stürzt schliesslich in die Sonne. «Nur was zu dem Zeitpunkt genügend gross war, konnte sich halten», beschreibt Joachim Stadel den Vorgang.

---

*«Statt um die Sonne zu kreisen, hätte die Erde auch aus dem Sonnensystem hinauskatapultiert werden können.»* Joachim Stadel, Astrophysiker

---

Auch den eben erst entstandenen Gasplaneten Jupiter, Saturn, Uranus und Neptun blies bald ein rauer Wind entgegen: Durch die Kernfusionsprozesse im jungen Stern bildeten sich starke Sternwinde – in diesem Fall Sonnenwinde, die alles Gas in der Scheibe ins Weltall wegpusteten. So entzogen sie den Gasplaneten, die gerade entstanden, quasi das «Futter».

Wie sich die Planeten und die anderen Himmelskörper unseres Sonnensystems in diesem

knapp bemessenen Zeitfenster trotzdem formen konnten, ist eines der Rätsel, an dem sich die weltweite Forschergemeinde der Astrophysiker derzeit die Zähne ausbeisst. Ein weiteres Rätsel, das die Forscher beschäftigt: Wie sammelt sich Gas auf den Planeten an? Also etwa Wasserstoff und Helium oder die Spuren von Methan und Ammoniak, aus denen planetare Gasriesen wie Jupiter oder Saturn, aber auch die kleineren Gasplaneten Uranus und Neptun grösstenteils bestehen?

#### WIE GASRIESEN ENTSTEHEN

Die Astronomengilde wälzt zur Zeit zwei Hypothesen, die die Entstehung von Gasplaneten, aber auch jene der Planeten mit fester Oberfläche wie Merkur, Venus, Erde und Mars erklären: Die Kern-Akkretions-Hypothese geht davon aus, dass sich die Staub- und Gaspartikel in der protoplanetaren Scheibe nach und nach zu grösseren Objekten verbinden. Von Felsbrocken zu Planetesimalen – mit einem Durchmesser von einigen Kilometern – zu Planetenembryonen. Embryonen, die sich zu Gasplaneten entwickeln, binden durch Gravitationskräfte das umgebende Gas zum Teil auch in flüssiger oder fester Form an sich. Das Problem des Kern-Akkretions-Modells: Diese Prozesse können nur mit einem gewissen Abstand von

der Sonne ablaufen. Denn zu nahe bei der Sonne ist es zu heiss; deshalb werden Flüssigkeiten und Gase nicht fest. Zu weit entfernt von der Sonne wiederum laufen die Kern-Akkretionsprozesse viel zu langsam ab: Die Entstehung des vor kurzem entdeckten Gasplaneten Formalhaut b, der etwa 100 Mal so weit entfernt von seinem Stern ist wie die Erde von der Sonne, würde laut Computerrechnungen durch Akkretion bis zu mehreren hundert Millionen Jahre

dauern. Doch die bereits nach zehn Millionen Jahren einsetzenden Sonnenwinde drohen dem Prozess ein viel früheres Ende zu bereiten. Auch die zweite Hypothese ist nicht ganz ohne Widersprüche. Sie geht davon aus, dass kleinste Gravitationsinstabilitäten zu grösseren Störungen anwachsen und sich dadurch Gas an einigen Punkten der Scheibe ansammelt. Dieser Vorgang würde nur einige tausend Jahre dauern. Nebulös ist aber, wie sich die Anhäufungen von Gas zur Dichte eines Gasriesen komprimieren, ohne dass ein solider Kern vor-

die um die Sonne kreisen, die sich allein durch die verschiedenen im Weltall herrschenden Kräfte teilweise zu Planeten geformt haben.» Die berechnete Verteilung von Himmelskörpern in der Grafik macht staunen. Die Verteilung gleicht unserem Sonnensystem viel stärker als vermutet: Es sind sieben grössere Planeten zu sehen sowie kleinere Bruchstücke, die dem Asteroidengürtel unseres Sonnensystems entsprechen. Doch Joachim Stadel ist noch nicht zufrieden: Der «Mars» sei etwas arg gross und ausserdem würde der Forscher gerne mit

Seit einigen Jahren geben unter Theoretikern auch die Bahnen der beiden grossen Aussenplaneten Jupiter und Saturn zu reden und zu rechnen: Gemäss dem Nizza-Modell von 2005 der Forschergruppe um Alessandro Morbidelli vom Observatoire de la Côte d'Azur in Nizza könnten Jupiter und Saturn nämlich ihre Position getauscht haben. «Diese Rochade hätte sicher alle kleineren Objekte und Planeten regelrecht aufgewirbelt!», illustriert Aaron C. Boley, der sich intensiv mit dem Jupiter beschäftigt. Auch bei Uranus und Neptun könnte ein solcher Orbit-Tausch stattgefunden haben. Und somit hätte der gute alte Schülermerksatz, um sich die Reihenfolge der Planeten Merkur-Venus-Erde-Mars-Jupiter-Saturn-Uranus-Neptun-Pluto einzuprägen, vor diesen Rochaden vor 4,5 Milliarden Jahren nicht «Mein Vater erklärt mir jeden Sonntag unsere neun Planeten» heissen sollen. – Die ja eigentlich auch nur acht sind, seit Pluto nicht mehr als eigener Planet gilt, sondern viel eher: «Mein Vater erklärt uns sonntags jeweils neuen Unsinn», wie ein deutscher Astronom einmal spöttelte.

---

*«Die Erde hatte wohl nur 10 Millionen Jahre Zeit, sich zu formen – ein astronomischer Wimpernschlag.»* Joachim Stadel, Astrophysiker

---

handen ist. «Zudem sagen Computermodelle bei so entstandenen Planeten elliptische Umlaufbahnen voraus, heutige Gasriesen aber haben eher konzentrische Umlaufbahnen», so Joachim Stadel. In anderen Sonnensystemen wurden solche anwachsenden Instabilitäten immerhin schon beobachtet: Gas häuft sich dort zuweilen in Spiralen an.

#### DIE GEBURT DES SONNENSYSTEMS SIMULIEREN

Um die Vorgänge bei der Entstehung von Planetensystemen zu untersuchen, arbeiten theoretische Astrophysiker wie Joachim Stadel oder sein Zürcher Institutskollege Aaron C. Boley mit Computermodellen. Die Forscher variieren hierzu verschiedenste Anfangsbedingungen in den Geburtsstunden des Sonnensystems, um diese dann später auf die plausibelsten einzuschränken: Etwa die Verteilung und die Masse der in der protoplanetaren Scheibe vorhandenen Teilchen oder den Zeitpunkt, zu dem das Gas weggeblasen wird. Modelle wie die Kern-Akkretions- oder die Gravitationsinstabilitäten-Hypothese fliessen in die Rechnungen ein.

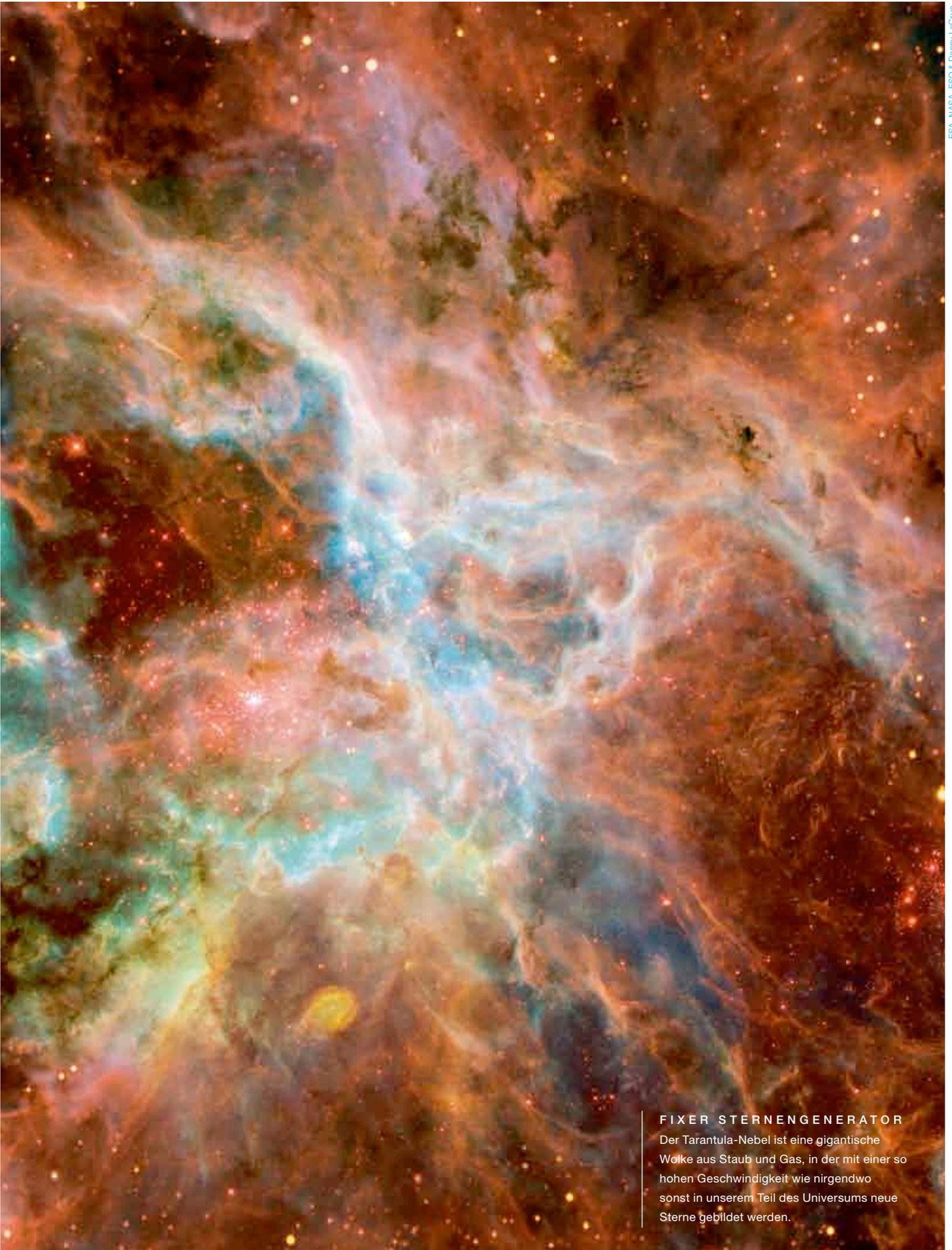
Joachim Stadel zeigt das Ergebnis einer Simulation am Computerbildschirm: Eine Grafik offenbart die Verteilung von mehreren Planeten und anderen terrestrischen Objekten wie etwa Asteroiden 150 Millionen Jahre nach der Geburt der Sonne. «Ausgangspunkt für diese Simulation waren 2000 Einzelbruchstückchen,

einer grösseren Anzahl Bruchstückchen rechnen, um eine noch genauere Simulation vom Computer errechnen zu lassen. In einer nächsten Simulation will der Forscher zudem auch chaotischen Effekten noch mehr Beachtung schenken.

#### ROCHADE IM ALL

Bei der Entstehung von Planetensystemen spielt nämlich auch das Chaos eine Rolle. Denn die Himmelskörper unterliegen gegenseitigen Wechselwirkungen. Und diese können sich aufschaukeln. Dass sich zum Beispiel die Exzentrizitäten von Planeten – also die Abweichung von der kreisförmigen Umlaufbahn – mit der Zeit verändern, dass also die Umlaufbahnen zum Beispiel immer weniger elliptisch, dafür kreisförmig werden, interessiert Joachim Stadel: «Die Entwicklung der Exzentrizität und der Bahnen im Sonnensystem verläuft chaotisch, nicht unbedingt instabil.» Und so könnte unser Sonnensystem ursprünglich durchaus ein paar Planeten mehr besessen haben, die entweder durch Kollisionen verschmolzen oder aus dem System herauskatapultiert wurden. Es sei eben äusserst schwierig, für einen Zeitraum von 50 Millionen Jahren vorzusagen, wo sich ein bestimmter Planet exakt befinde, so Stadel: «Es ist wie beim Wetter: Wenn man nicht bedeutend genauer messen kann, ist es auch nicht möglich, weiter in die Zukunft vorzusagen, wie das Wetter wird.»

KONTAKT Dr. Joachim Stadel, [stadel@physik.uzh.ch](mailto:stadel@physik.uzh.ch), Dr. Aaron C. Boley, [boley@physik.uzh.ch](mailto:boley@physik.uzh.ch)



#### FIXER STERNENGULATOR

Der Tarantula-Nebel ist eine gigantische Wolke aus Staub und Gas, in der mit einer so hohen Geschwindigkeit wie nirgendwo sonst in unserem Teil des Universums neue Sterne gebildet werden.