

IM WELTALL

Sterne, Galaxien, Supernovae

BRÖCKELNDES MATTERHORN Wenn der Permafrost schmilzt
ES STEHT GESCHRIEBEN Wie Kinderbibeln religiöse Inhalte vermitteln
GESTÖRTE HARMONIE Reformstau im Schweizer Bildungssystem



Neurobiologische Gretchenfrage: Erlaubt der Blick ins Gehirn Rückschlüsse auf die Moral?

Grundrechtskonzeption. Ein Thema, mit dem sich Mahlmann ebenfalls auseinandersetzt.

BIOLOGIE VON WAHRHEIT UND LÜGE

Dennoch besteht die Gefahr, dass genau dies passiert. Mahlmann warnt davor, dass nicht abgesicherte Behauptungen der kognitionswissenschaftlichen Forschung gesellschaftspolitischen Schaden anrichten könnten. Nämlich dann, wenn aus ihnen rechtlich praktische Konsequenzen gezogen werden – und so nicht zuletzt elementare Persönlichkeitsrechte in Gefahr geraten. Ein mögliches Szenario könnte etwa sein, Menschen präventiv einzusperren, weil ihre Hirnstruktur allenfalls Anzeichen möglicher moralischer Unzuverlässigkeit zeigt.

Oder die routinemässige Anwendung von Maschinen, die mittels bildgebender Verfahren Hinweise auf neuronale Besonderheiten bei Menschen liefern, die durch dissoziales oder gewalttätiges Verhalten aufgefallen sind. In einzelnen Bundesstaaten der USA kamen solche Apparate, eine Art neuronale Lügendetektoren, bereits vor Gericht zum Einsatz. Der Hersteller, die Firma «No Lie MRI», verspricht, dass mit der «New Truth Verification Technology» der Nachweis erbracht werden könne, dass Wahrheit und Lüge neuronal strikt voneinander getrennt sind.

Ein Unsinn, meinen Kritiker und sagen klipp und klar, dass «nicht Gehirne Verbrechen begehen, sondern Menschen», so der Psychologe und Jurist Stephan Morse von der University of Pennsylvania. Umso mehr sind Juristen gefordert und gemäss Mahlmann ist die Stossrichtung eindeutig: «Die Rechtswissenschaft kann sich kognitionswissenschaftliche Naivität in praktisch-politischer Perspektive nicht mehr leisten. Genauso wenig, wie eine ernstzunehmende kognitionswissenschaftliche Forschung über normative Phänomene sich in Fragen der moralischen und rechtlichen Theorie unbeschlagen geben kann.»

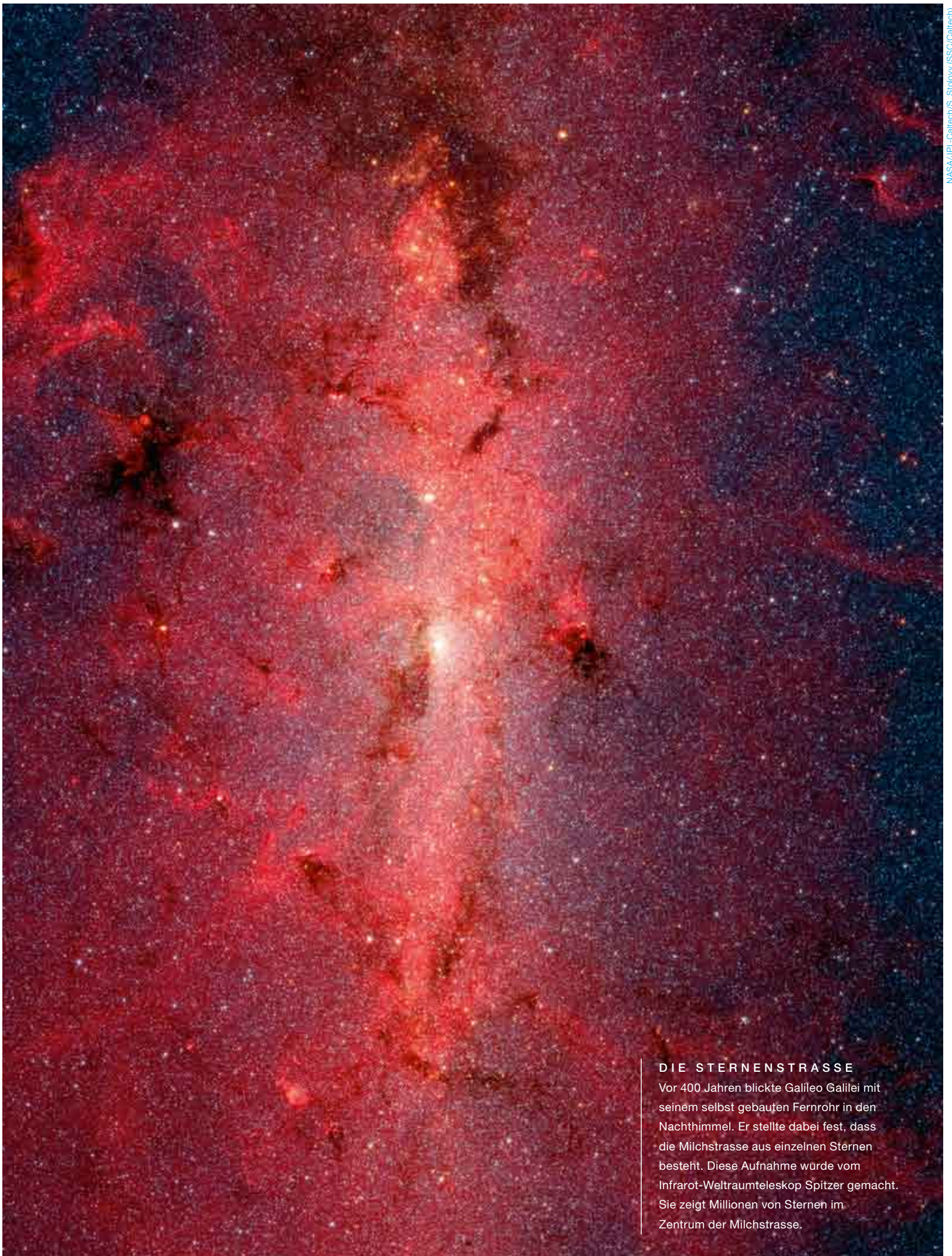
KONTAKT Prof. Matthias Mahlmann, m.mahlmann@rwi.uzh.ch, Rechtswissenschaftliches Institut der Universität Zürich

UNTERWEGS IM UNIVERSUM

1609 richtete Galileo Galilei sein Fernrohr auf den Nachthimmel. Dem italienischen Physiker und Astronomen offenbarte sich ein neues, faszinierendes Bild des Universums. Im gleichen Jahr veröffentlichte Johannes Kepler sein bahnbrechendes Buch über das Sonnensystem, «Astronomia nova». Mit den Beobachtungen und Beschreibungen Galileis und Keplers beginnt die moderne naturwissenschaftliche Erforschung des Kosmos. Das diesjährige Internationale Jahr der Astronomie erinnert an diese wissenschaftlichen Durchbrüche. In den vergangenen 400 Jahren hat die Forschung viele erstaunliche Erkenntnisse über die Entstehung und Entwicklung des Weltalls gewonnen – die Faszination für das Wunder des Universums ist damit nur noch grösser geworden. Und noch gibt es viele offene Fragen, die die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler beschäftigen. An der Universität Zürich hat Ben Moore als Direktor des Instituts für Theoretische Physik in den vergangenen Jahren einen hochkarätigen Hotspot der astrophysikalischen und kosmologischen Forschung aufgebaut. Die Artikel dieses Dossiers beschäftigen sich mit den grossen Fragen der Astrophysik, die an der Universität Zürich erforscht werden.

Die Bildstrecke dieses Dossiers bietet eine Reise durch das Universum von unserem Sonnensystem bis zurück zur Zeit nach dem Urknall. Der Astrophysiker Ben Moore hat die Bilder ausgewählt und kommentiert.

- 28 UNHEIMLICHE GIGANTEN Schwarze Löcher sind rätselhaft und «gefrässig»
- 32 «SCHRECKLICHES ENDE IM NICHTS» Astrophysiker Ben Moore im Interview
- 36 TANZ DER GALAXIEN Wie die Milchstrasse gross geworden ist
- 40 KOSMISCHER WIMPERNSCHLAG Die Erde entstand in kürzester Zeit
- 45 UNSICHTBARE SCHWÄCHLINGE Die Jagd nach der Dunklen Materie
- 49 INTERGALAKTISCHE SUPERHEFE Das Universum expandiert immer schneller
- 51 HALO, HUBBLE, SUPERNOVA Ein astrophysikalisches Glossar



DIE STERNENSTRASSE

Vor 400 Jahren blickte Galileo Galilei mit seinem selbst gebauten Fernrohr in den Nachthimmel. Er stellte dabei fest, dass die Milchstrasse aus einzelnen Sternen besteht. Diese Aufnahme wurde vom Infrarot-Weltraumteleskop Spitzer gemacht. Sie zeigt Millionen von Sternen im Zentrum der Milchstrasse.

UNHEIMLICHE GIGANTEN

Der Anziehungskraft von Schwarzen Löchern kann sich auch die Astronomie nicht erwehren. Physiker versuchen mit ihrer Hilfe die Entstehung des Universums zu erklären – und die Relativitätstheorie zu beweisen. Von Theo von Däniken

Lange Zeit galten sie lediglich als dunkler Schlusspunkt in der Entwicklung einstmal heller und funkelnder Sterne. Ausgebrannt kollabieren diese am Ende ihrer Lebenszeit und verdichten ihre Masse – bis zum Zehnfachen der Sonne – zu einer Kugel von wenigen Kilometern Durchmesser. Ein Objekt mit ungeheurer Anziehungskraft entsteht, das nichts wieder loslässt, was jemals in seinen Bann gezogen wurde, nicht einmal das Licht: Schwarze Löcher werden die unheimlichen Giganten deshalb genannt, weil sie alles verschlingen, was ihnen zu nahe kommt. Seit einigen Jahren geraten auch die Astronomen immer mehr in den Bannkreis ihrer Anziehungskraft. Denn das Bild der Schwarzen Löcher hat sich grundlegend gewandelt: Nicht mehr als vernichtendes Ende kosmologischer Entwicklungen, sondern als die treibende Kraft, die unser Universum formt und gestaltet, werden die Schwarzen Löcher nun angesehen.

Grund dafür ist eine neue Klasse von Schwarzen Löchern, die erst in den 1990er-Jahren entdeckt wurde: die sogenannten Supermassiven Schwarzen Löcher. Im Gegensatz zu Stellaren Schwarzen Löchern, die höchstens die zehnfache Sonnenmasse erreichen, können diese kosmischen Monster die Masse von mehreren Millionen bis Milliarden Sonnen umfassen. In ihren aktiven Phasen verschlingen sie Gase in ungeheureren Mengen und machen auch vor ganzen Sternen nicht halt. Wie die Materie, die dabei derart beschleunigt und erhitzt wird, dass sie in allen Wellenbereichen zu strahlen beginnt und die hellsten beobachtbaren Objekte im Universum – die Quasare – schafft, so entbrennt auch immer mehr das Interesse der Wissenschaft an diesen gewaltigen Energiezentren.

Das ist verständlich, denn nicht nur die Kosmologen erhoffen sich von ihnen Antworten

auf bisher ungelöste Fragen. Die Supermassiven Schwarzen Löcher könnten auch einen lang gehegten Wunsch der modernen Physik Wirklichkeit werden lassen: den Beweis der Allgemeinen Relativitätstheorie von Albert Einstein. Kommen sich nämlich zwei solche Giganten nahe genug oder kollidieren gar miteinander, werden Kräfte frei, die das Universum richtiggehend aus den Fugen bringen. Dies jedenfalls sagt Einsteins Theorie voraus: Die Gravitationskräfte eines solchen Ereignisses müssten die Raumzeit verkrümmen und sogenannte Gravitationswellen entstehen lassen. Bisher ist es allerdings noch nicht gelungen, diese Wellen nachzuweisen. Zu gering sind die Ver-

zerrungen in der Raumzeit, um – selbst bei stärksten Ereignissen – auf der Erde spürbar zu sein. Gibt es die Wellen aber tatsächlich, dann wären sie ein Beweis für die grundlegende Theorie der modernen Physik.

In einem gross angelegten Projekt, der Laser Interferometer Space Antenna, kurz LISA, wollen deshalb die Amerikanische und Europäische Weltraumagentur, NASA und ESA, Gravitationswellen im Weltall messen. «LISA ist eines der ambitioniertesten und mindestens von seinen Abmessungen her sicherlich das grösste je in Angriff genommene physikalische Experiment», erklärt Philippe Jetzer, Professor am Institut für Theoretische Physik an der Universität Zürich und eines von rund 50 Mitgliedern des Wissenschaftlichen Beirats von LISA. Drei Satelliten sollen im Weltraum so stationiert werden, dass sie ein gleichseitiges Dreieck mit einer Seitenlänge von fünf Millionen Kilome-

tern bilden (zum Vergleich: Der Abstand Erde Mond beträgt zwischen 360 000 und 400 000 Kilometer). Zwischen den drei Satelliten werden Laserstrahlen hin und hergeschickt. Das Lichtdreieck wird so im Schlepptau der Erde um die Sonne kreisen und sich dabei pro Orbit auch einmal um sich selber drehen. «Wenn eine Gravitationswelle auf LISA trifft, dann wird dieses Dreieck durchgerüttelt und deformiert», erklärt Jetzer. Die «Erschütterungen», die LISA messen soll, bewegen sich dabei im Bereich von Bruchteilen von Atomdurchmessern.

Die Anforderungen an die Technologie, die Satelliten zu stationieren, auszurichten und in der Bahn zu halten, sind deshalb gewaltig, der Zeitrahmen für LISA ist entsprechend gross: 2011 soll eine Pathfinder-Mission starten, in der einzelne Komponenten von LISA getestet werden. Die eigentliche Mission ist für 2018 geplant. Epo-

Supermassive Schwarze Löcher verschlingen Gase in ungeheuren Mengen und machen auch vor ganzen Sternen nicht halt.

chal sind nicht nur die Dimensionen des Projekts, epochal sind auch die Erwartungen der Wissenschaft an seine Ergebnisse: «Die Gravitationswellen», sagt Jetzer, «sind die einzigen Wellen, die wir bisher noch nicht messen können. Wenn dies möglich wird, so wird daraus eine ganz neue Astronomie entstehen. Denn die Astrophysik würde mit der Grundlagenphysik verschmelzen, wie dies in der Allgemeinen Relativitätstheorie beschrieben wird.»

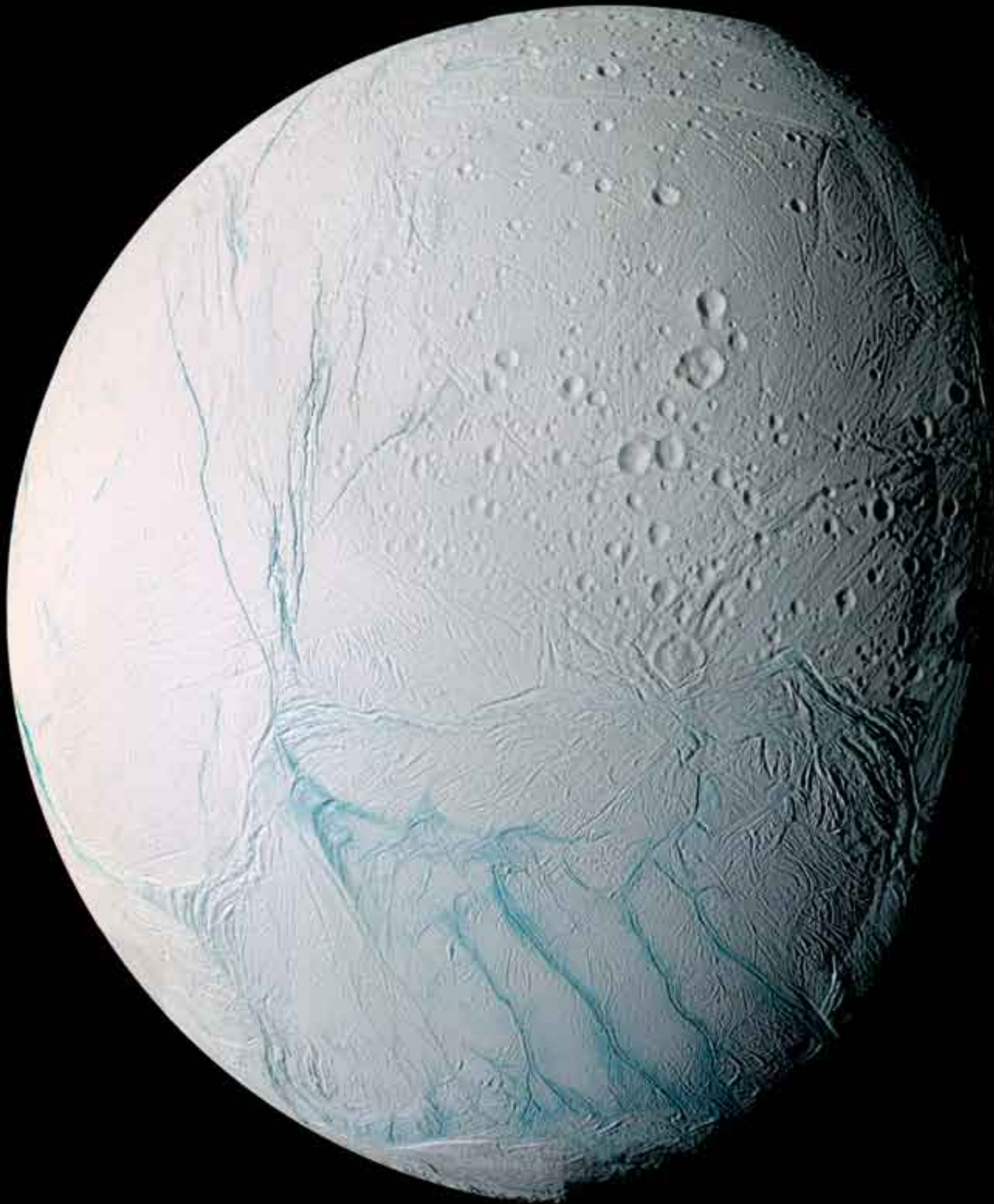
GALAKTISCHE GENERATOREN

Doch gibt es überhaupt Kollisionen zwischen Supermassiven Schwarzen Löchern, die Gravitationswellen erzeugen? Antwort auf diese Frage sucht der Kosmologe Lucio Mayer – SNF-Förderungsprofessor am Institut für Theoretische Physik der Universität Zürich – nicht am Himmel, sondern im Computer. Weil die galaktischen Zusammenstösse sich in Zeiträumen



KLEINER TITAN

Hyperion ist ein kleiner Saturn-Mond mit einem Durchmesser von rund 250 Kilometern. Seine schwammartige Struktur verdankt er den Kratern, mit denen seine Oberfläche übersät ist. Der Mond erinnert an die Bausteine grösserer Planeten, die durch die Kollision mit kleineren Himmelskörpern entstanden sind.



UNTERIRDISCHE OZEANE

Eine hoch aufgelöste Aufnahme des Saturn-Mondes Enceladus, festgehalten vom Satelliten Cassini. Es wird angenommen, dass Enceladus über riesige unterirdische Ozeane mit Salzwasser verfügt, in denen organisches Leben möglich sein könnte.

abspielen, die sich der direkten Beobachtung entziehen, simuliert Mayer solche Vorgänge in aufwendigen Berechnungen auf leistungsfähigen Supercomputern.

15 Milliarden Jahre – die Zeit 700 Millionen Jahre nach dem Urknall bis heute – laufen auf Mayers Computerbildschirm als Film in wenigen Minuten ab: Da klumpt sich eine amorphe Gasmasse zu kleinen Haufen zusammen, Nebelfetzen ziehen vorbei und werden aufgesogen. Langsam bilden sich rotierende spiralförmige Sternenhaufen, die wild durcheinanderwirbeln und immer wieder miteinander kollidieren. Dabei werden sie zunächst arg zerzaust, verbinden sich aber bald zu einem einzigen, grösseren Wirbel. Mit der Zeit bildet sich ein zentrales System, das sich immer mehr anreichert und weitere Stern- und Gasnebel in seinen Bann zieht. Am Ende präsentiert sich eine mittelgrosse Galaxie, unserer Milchstrasse nicht unähnlich.

Die treibende Energie, die dieses System entstehen und wachsen lässt, so die heute gängige Annahme, ist ein Supermassives Schwarzes Loch in dessen Zentrum. Innert weniger Jahre hat sich die Ansicht durchgesetzt, dass Supermassive Schwarze Löcher die meisten spiralförmigen und elliptischen Galaxien im innersten zusammenhalten und antreiben. Direkte Beweise dafür fehlen zwar, doch verschiedene Beobachtungen machen die Hypothese sehr wahrscheinlich. Kronzeuge dieser Theorie ist unsere eigene Galaxie, die Milchstrasse. Astronomen des Max Planck-Instituts für Extraterrestrische Physik haben aufgrund langjähriger Beobachtungen der Umlaufbahn von Sternen im Zentrum der Galaxie berechnet, dass sich dort «mit an Sicherheit grenzender Wahrscheinlichkeit» ein Schwarzes Loch mit rund vier Millionen Sonnenmassen befindet.

Die Frage, die Mayer am meisten interessiert: «Was passiert, wenn zwei kleinere Galaxien zusammenstossen und sich die beiden Supermassiven Schwarzen Löcher im Zentrum verbinden?» In diesem Zustand, einem sogenannten binären System, müssten sie gemäss der Relativitätstheorie beginnen, Gravitationswellen auszustrahlen. Vor zwei Jahren ist es Mayer gelungen, erstmals die Annäherung zweier Galaxien und ihrer zentralen Super-

massiven Schwarzen Löcher in einer Computersimulation darzustellen. Rund zwei Millionen Stunden haben mehrere Supercomputer dafür gerechnet.

GALAXIEN AUF KOLLISIONSKURS

Die Simulation zeigte, dass zwei Galaxien auf Kollisionskurs in relativ kurzer Zeit ein System bilden, in dem die beiden Schwarzen Löcher einander umkreisen. Eine immer dichter werdende Gas-Scheibe im Zentrum dieses Systems bremst die Bewegung der Schwarzen Löcher auf ihrem Orbit umeinander und bewirkt, dass die Fliehkräfte geringer werden: Die beiden Schwarzen Löcher rücken in der Folge immer näher zusammen. Wie es genau weitergeht, das konnte Mayer noch nicht detailliert darstellen; dazu muss er die Auflösung seiner Simulationen weiter verfeinern. Doch jede Verfeinerung bringt wieder neue Parameter ins Spiel, da sich die Umgebungsverhältnisse im System dynamisch verändern. Mayer muss dabei verschiedenste Bereiche der Physik berücksichtigen, etwa die Teilchenphysik, um

men, dass sie Gravitationswellen auszustrahlen beginnen, so interessiert sich Jetzer als Relativitätstheoretiker dafür, wie die Gravitationswellen beschaffen sind, die von einem solchen System ausgehen. Denn wenn LISA dereinst tatsächlich Gravitationswellen misst, dann müssen diese möglichst genau interpretiert werden können. «Man muss aus den Signalen die Informationen über ihre Quelle wieder herausfiltern können», erklärt Jetzer. Die Gravitationswellen erlauben Rückschlüsse sowohl auf die Masse als auch auf die Position, die Distanz und den Spin, also die Drehung eines Systems, das die Wellen verursacht.

Die Berechnungen zu den Wellenmustern sind jedoch sehr komplex und werden umso aufwendiger, je mehr Parameter berücksichtigt werden. Jetzer und seine beiden Mitarbeiter Antoine Klein und Mauro Sereno haben in einer jüngst publizierten Arbeit Berechnungen für verschiedene Wellenmuster durchgeführt und gezeigt, welche Auswirkungen sie auf die Präzision, beispielsweise der Distanzbestimmung, haben. Je besser man weiss, wo genau und in

Supermassive Schwarze Löcher halten die meisten spiralförmigen und elliptischen Galaxien im Innersten zusammen und treiben sie an.

die Effekte der theoretisch angenommenen «kalten dunklen Materie» einzuschliessen, oder die aktuellste Forschung über Sternbildung und Strömungslehre. Denn selbst Prozesse auf der Ebene einzelner Sterne, wie etwa Supernova-Explosionen, können ungeahnte Rückkoppelungen und Wechselwirkungen auf das ganze System haben, die Mayer in seinen Modellierungen abbilden muss. So haben er und sein Doktorand Simone Callegari in einer kürzlich veröffentlichten Arbeit über die Fusion von Schwarzen Löchern mit ungleich grossen Massen herausgefunden, dass nicht nur Dichte und Temperatur des Gases wichtig sind, sondern auch dessen Verteilung: Ist es gleichmässig verteilt, ist die Bremswirkung und damit die Wahrscheinlichkeit, dass die beiden Schwarzen Löcher fusionieren, grösser.

Während Mayer sich damit befasst, wie Supermassive Schwarze Löcher so weit kom-

welcher Distanz sich eine Fusion von Supermassiven Schwarzen Löchern ereignet, umso eher kann man diese mit anderen Beobachtungsinstrumenten, etwa mit optischen Teleskopen, ebenfalls ins Visier nehmen.

Jetzer ist gespannt, ob es mit LISA gelingt, endlich mehr Licht in die dunkelsten Objekte des Universums zu bringen, die keineswegs nur tote Giganten sind, die mit dem Licht auch jegliche Erkenntnismöglichkeit zu verschlingen drohen. Vielmehr bergen die Schwarzen Löcher möglicherweise den Schlüssel zur uralten Menschheitsfrage, wie das Universum entstanden ist. Wenn nicht das, dann könnten sie immerhin einen Beweis für Einsteins Relativitätstheorie liefern, auf der die moderne Physik beruht.

KONTAKT Prof. Philippe Jetzer, jetzer@physik.uzh.ch, Prof. Lucio Mayer, lmayer@physik.uzh.ch

«SCHRECKLICHES ENDE IM NICHTS»

Astrophysiker Ben Moore modelliert mit einem Supercomputer die Entstehung und Entwicklung des Universums. Ein Gespräch über den Urknall, das Ende des Kosmos und die Erfindung von Gott. Von Thomas Gull und Roger Nickl

Ben Moore, weshalb sind Sie Astrophysiker geworden?

BEN MOORE: Das habe ich meinem Vater, der Förster war, zu verdanken. Obwohl nur ein einfacher Arbeiter, machte er sich Gedanken über die Natur und das Universum. Er fragte mich jeweils: «Was denkst du, wie dies alles entstanden ist – das Universum, die Erde, wir?» Er selbst konnte diese Fragen nicht beantworten und ermutigte mich, an die Universität zu gehen, statt im Wald zu arbeiten wie er. Von ihm bekam ich auch interessante Bücher, etwa die des Physikers Paul Davies. So wurde mein Interesse geweckt, und ich ging an die Universität, um Physik zu studieren und die Fragen meines Vaters zu beantworten.

Vor 400 Jahren entdeckte Galileo Galilei mit seinem Teleskop die Jupiter-Monde und Johannes Kepler berechnete die Gesetze der Planetenbewegung. Wie haben sich die Astronomie und die Astrophysik seit diesen Anfängen verändert?

MOORE: Galilei war der Erste, der mit einem Teleskop unsere Galaxie, die Milchstrasse, beobachtete. Mit blossen Auge betrachtet, ist sie nichts als ein Fetzen Licht am Himmel. Er war der Erste, der die Struktur der Galaxie entdeckte, der sah, dass sie aus Millionen von Sternen besteht. Eine der grossen Fragen der heutigen Astrophysik ist, wie Galaxien überhaupt entstehen konnten. Wir machen auf diesem Gebiet momentan grosse Fortschritte. Wir sind fast so weit zu verstehen, wie die Milchstrasse entstanden ist. Dazu brauchte es 400 Jahre Forschung.

Woran arbeiten Sie zurzeit?

MOORE: Im letzten Jahrzehnt haben wir nicht nur ein Modell des Urknalls entwickelt, der am

Ursprung des Universums steht. Wir haben auch herausgefunden, wie und unter welchen Bedingungen die Strukturen des Universums entstanden sind. Wir wissen heute sehr gut, in welchem Zustand das Universum ein paar Stunden nach dem Big Bang war. Und wir wissen, woraus die Sterne, Planeten, Galaxien entstanden sind. Wir kennen aber noch nicht alle Bestandteile unseres Universums, das gilt insbesondere für die Dunkle Materie und die Dunkle Energie. Aber es gibt Modelle dafür, die wir in unsere Kalkulationen integrieren können. Mit unserem Supercomputer können wir – ausgehend von ursprünglichen Bestandteilen – die Entwicklung des Universums simulieren. Am Schluss solcher Simulationen sehen wir dann hoffentlich Sterne, Planeten und Galaxien, wie wir sie heute tatsächlich beobachten können.

Welches waren denn die ursprünglichen Bedingungen?

MOORE: Mit dem Urknall wurden Zeit und Raum geschaffen. Weshalb sich der Big Bang ereignete und was davor war, wissen wir nicht. Das sind grosse, offene Fragen. Tatsache aber ist: den Big Bang hat es gegeben. Und heute wissen wir auch, in welchem Zustand sich das Universum unmittelbar danach befand. Zu Beginn war die Materie sehr fein verteilt. Wenn wir bis zu den Anfängen des Universums zurückblicken, sehen wir eine Art Meer mit vielen ganz kleinen Wellen. Diese Wellen entstanden, weil sich dort besonders viel Materie und Partikel angehäuften. Es gab also kleine Unregelmässigkeiten bei der Verteilung der Materie im frühen Universum. Dank der Schwerkraft haben diese Materieansammlungen dann weitere Materie angezogen. So sind die ersten Strukturen des Universums entstanden, aus denen sich später Sterne, Planeten, Galaxien formierten.



Das heisst, die Gravitation ist einer der entscheidenden Faktoren für die Entstehung der sichtbaren Strukturen im Universum?

MOORE: Ohne Gravitation wären wir nicht hier. Die Gravitation sorgt dafür, dass sich die Masse an bestimmten Orten konzentriert. Eigentlich expandiert das Universum. Die Gravitation verlangsamt diese Ausdehnung jedoch. An jenen Stellen, wo sich genügend Materie angesammelt hat, wird sie vollständig gestoppt; ist die Konzentration an diesen Stellen genügend gross, kollabiert die Materie und geht in neue Strukturen über. Wir vergleichen das mit Wellen, die grösser werden, schliesslich brechen und eine neue Form annehmen.

Im Universum wirken also zwei antagonistische Kräfte – auf der einen Seite die Gravitation, die die Materie zusammenhält, auf der anderen Seite die Dunkle Energie, die sie auseinandertreibt?

MOORE: Ja, die Dunkle Energie ist eine abstossende Kraft, die der Gravitation entgegenwirkt. Heute ist sie noch nicht sehr stark, sie wird in Zukunft aber immer stärker werden. Wir wissen noch nicht, weshalb das so ist. Schlussendlich wird die Dunkle Energie aber

dominieren. Sie wird dafür sorgen, dass das Universum sich immer schneller ausdehnt und sich die Galaxien immer weiter voneinander entfernen.

Sie sind dabei zu erklären, wie das sichtbare Universum entstanden ist und wie es sich in Zukunft entwickeln wird. Doch wie sieht es mit dem Big Bang aus – gibt es Theorien zu seinem Ursprung?

MOORE: Wir verstehen die Entwicklung des Universums bis zur ersten Sekunde nach dem Urknall. Damals war die Materie des gesamten Universums auf die Grösse eines Atoms komprimiert – alles war unvorstellbar dicht und heiss. Die Kräfte, die dazu geführt haben, kennen wir aber nicht.

Wird die Frage nach dem Grund für den Big Bang überhaupt je beantwortet werden können?

MOORE: Wir können nur das sichtbare Universum erklären, das mittlerweile 13,7 Milliarden Jahre alt ist und seit seinen Anfängen Licht ausstrahlt. Mehr können wir nicht beobachten: Wir können also nicht sagen, ob unser Universum sich nur auf das beschränkt,

was wir sehen können, oder ob es letztlich unendlich gross ist. Viele Wissenschaftler glauben heute, es gebe eine Art Multiversum.

Wie muss man sich ein Multiversum vorstellen?

MOORE: Die Wissenschaft steht vor einem philosophischen Problem. Denn unser Universum wird, wie gesagt, immer stärker von der Dunklen Energie angetrieben, die dafür sorgt, dass es sich immer schneller ausdehnt. Das Universum hat also einen klar definierten Ausgangspunkt, den Urknall, und ein schreckliches Ende im Nichts – die Galaxien lösen sich auf, die Sterne sterben, alles wird dunkel und kalt. Philosophisch betrachtet ist das doch sonderbar. Wenn nun aber das Universum unendlich wäre, gäbe es folglich auch die Möglichkeit einer unendlichen Vielfalt von Erscheinungsformen. Teile dieses unendlichen Multiversums könnten über genügend Materie verfügen, um erneut zu kollabieren. Andere Teile wiederum könnten gerade jetzt neu geschaffen worden sein und sich ausdehnen wie unser Universum.

Das heisst, unser Universum könnte Teil eines viel grösseren Universums sein?



«Die Zukunft des Universums sieht finster aus: Galaxien lösen sich auf, Sterne sterben, alles wird dunkel und kalt.»

MOORE: Eines unendlichen Universums, von dem wir nichts wissen, ja.

Gibt es nicht noch eine andere Erklärung für den Big Bang – Gott, der den Urknall schuf? Weshalb beschäftigen Sie sich nicht mit einer solchen Erklärung?

MOORE: Weil es keine Erklärung ist, sondern eine Frage des Glaubens – eine Erklärung, die sich mit der Physik nicht verifizieren oder falsifizieren lässt. God and physics don't mix – Gott und Physik gehen nicht zusammen.

Welche Rolle spielt denn Ihrer Meinung nach Gott in der Ordnung des Universums?

MOORE: Keine. Gott wurde von den Menschen erfunden, um Dinge zu erklären, die sie nicht verstanden haben. Die meisten dieser Fragen sind in der Zwischenzeit durch die Wissenschaft geklärt worden. Es sind ein paar Fragen geblieben, auf die wir noch keine Antworten haben. Das bedeutet aber nicht, dass wir sie früher oder später nicht auch beantworten können. Wenn wir wissenschaftlich erklären können, wie das Universum entstanden ist, brauchen wir keine mythischen Figuren wie Gott mehr. Es ist sehr schwierig, Wissenschaft

und Religion zusammenzubringen. Wissenschaft basiert auf Experimenten und Fakten – etwas ist beweisbar oder eben nicht.

Die Griechen hatten auch ihre Götter, trotzdem waren sie ziemlich abenteuerlustig und erfolgreich in ihren wissenschaftlichen Unternehmungen. Es gibt demnach nicht unbedingt einen Widerspruch?

MOORE: Die Griechen wussten alles – sie wussten, dass wir nicht im Zentrum des Universums stehen, sie wussten, dass sich die Erde um die Sonne dreht, sie kannten die Dimensionen des Sonnensystems. Sie spekulierten sogar darüber, ob unsere Galaxie eine rotierende Scheibe von Sternen sei. Auf die Griechen folgten dann Hunderte von Jahren religiöser Verblendung. Es wurde versucht, den Menschen weis zu machen, die Erde sei flach, die Sonne bewege sich um die Erde und der Mensch stehe im Zentrum des Alls. Alles Wissen der Griechen ging verloren – bis Galileo, Kepler und Newton erneut begannen, das Universum zu erforschen und zu berechnen. Deshalb würde ich sagen: Gott hatte einen schlechten Einfluss auf die Entwicklung der Mensch-

heit. Aber auch die Griechen hatten Fragen, die sie nicht beantworten konnten. Deshalb brauchten sie ihre Götter.

Wenn Sie sich die Entwicklung des Universums anschauen – ist es ein Zufall, dass die Erde als bewohnbare Oase in einer kalten und lebensfeindlichen Umgebung existiert?

MOORE: (lacht) Das klingt poetisch. Doch die Antwort ist deprimierend: Ja, es ist nur Zufall. In unserer Galaxie gibt es rund 10 Milliarden Sterne wie unsere Sonne. Sie alle werden von Planeten umkreist. Wenn sich diese in der richtigen Distanz zu ihrer Sonne befinden und auch die anderen Bedingungen stimmen, gibt es eine Chance, dass auf vielen dieser Planeten Leben entsteht. Ich halte das für sehr wahrscheinlich.

Mit Ihrem Kollegen Lawrence Krauss beschäftigen Sie sich in einem Projekt mit der Zukunft unserer Galaxie. Was wissen Sie über die Zukunft?

MOORE: Sie wird wie bereits angetönt sehr düster sein: Denn zumindest in unserem Teil des Universums wird früher oder später alles

«Gott wurde von den Menschen erfunden, um Dinge zu erklären, die sie nicht verstanden haben.»



Leben aussterben. Alle Sterne werden erlöschen, unsere Sonne wird explodieren und das Zentrum der Galaxie kollabiert in das Schwarze Loch, das sich in der Mitte befindet – der Rest driftet auseinander. Am Schluss bleibt nur das Schwarze Loch und sonst nichts übrig. Nichts ist stabil, nichts dauert ewig. Die Galaxie wird sich ausdehnen, bis die Gravitation sie nicht mehr zusammenhalten kann und sie von der Dunklen Energie vollends auseinandergerissen wird.

Doch bevor alles auseinanderdriftet, kollidiert die Milchstrasse noch mit der Andromeda-Galaxie?

MOORE: Genau. Das passiert kosmologisch betrachtet in vergleichsweise kurzer Zeit, in zwei bis drei Milliarden Jahren.

Die Kollision wird stattfinden, trotz der expansiven Kräfte der Dunklen Energie?

MOORE: Ja. Aber nach der Kollision, in fünf bis zehn Milliarden Jahren, wird die Dunkle Energie die Oberhand gewinnen, und die anderen Galaxien werden sich mit wachsender Geschwindigkeit von uns weg bewegen.

Das heisst, Milchstrasse und Andromeda werden zuerst kollidieren und eine neue Supergalaxie bilden, die dann mit der Zeit auseinanderdriftet?

MOORE: So ist es. Die Hälfte der Galaxie wird im Schwarzen Loch verschwinden. Wir sind dabei, die entsprechenden Berechnungen zu machen. Die andere Hälfte wird ins Nichts auseinanderdriften.

In welchen Zeiträumen müssen wir uns dieses Ende im Nichts vorstellen?

MOORE: Das wird etwa eine Milliarde Mal das bisherige Alter unseres Universums dauern.

Die Menschheit wird das wohl nicht erleben?

MOORE: Der Punkt ist, dass nichts und niemand das erleben wird, ganz egal, wie intelligent das Leben ist, das das Universum hervorbringt. Denn Leben braucht irgendeine Form von Energie und diese wird nicht mehr vorhanden sein. Am Schluss wird die ganze Materie zerfallen und es wird nichts mehr übrig bleiben.

EIN BUCH VOLLER IDEEN

«An der Universität Zürich gab es seit Albert Einstein keine Kosmologie mehr», sagt Ben Moore im Verlaufe des Gesprächs mit dem «unimagazin». Das änderte sich 2001 mit seiner Berufung als Professor für Theoretische Physik. In den letzten Jahren ist es Moore als Direktor des Instituts für Theoretische Physik gelungen, einen international beachteten Hotspot für Astrophysik aufzubauen. Ihn habe die Aufgabe gereizt, eine eigene Forschungsgruppe aufzubauen, die sich mit den grossen Fragen der Kosmologie befasst, erzählt Moore: «Ich wollte mich nicht einfach einer etablierten Gruppe anschliessen. Hier in Zürich konnte ich die Mitarbeiter selber auswählen und die Forschungsziele festlegen. Als ich anfang, hatte ich ein Buch voller Ideen und nicht genug Zeit, um alle selber zu verwirklichen.»

Für seine Arbeit, die sich mit Berechnungen und Computersimulationen der Entstehung des Universums befasst, braucht Moore einen starken Computer. Den hat er zusammen mit seinem Kollegen Joachim Stadel selber entwickelt. Der Entwurf entstand in einem Pub auf einer Serviette. Stadel und Moore haben den Computer, die zBox, auch eigenhändig zusammengebaut. Der Supercomputer war deshalb unschlagbar günstig – 250 000 Franken hat der Hochleistungsrechner gekostet. «Als ich herkam, arbeiteten die Physiker an diesem Institut ausschliesslich mit Papier und Bleistift. Das genügt heute nicht mehr. Man kann beispielsweise nicht einfach in einer Gleichung festhalten, wie ein Stern entsteht und dann explodiert, weil diese Gleichungen nicht linear, sondern chaotisch sind. Das heisst, es gibt oft mehr als eine Möglichkeit. Diese muss man durchspielen», erläutert Moore seine Arbeitsweise. Er und seine Mitarbeitenden machen Modellrechnungen, die etwa die Entstehung einer Galaxie wiedergeben. Diese wird dann am Computer simuliert und mit den Galaxien verglichen, die es im Universum tatsächlich gibt. Wenn das Modell und die Realität nicht übereinstimmen, wird das Modell revidiert, bis es passt. «Dieses Vorgehen ist interessant, weil wir unsere Theorien

anhand der Realität testen können», betont Moore, räumt aber ein: «Wir können noch keine Vorhersagen machen und den Astronomen sagen, wonach sie suchen müssen.» Die Konstruktion einer Galaxie am Computer ist auch deshalb schwierig, weil es Milliarden von Galaxien mit zum Teil sehr unterschiedlichen Eigenschaften und Erscheinungsformen gibt.

Die Zürcher Gruppe um Ben Moore ist auf zwei Gebieten weltweit führend: bei der Simulation und Berechnung der Entstehung von Galaxien und bei der Entwicklung von Modellen der Dunklen Materie. So hängt in Moores Büro das Bild einer Computersimulation, das die Verteilung der Dunklen Materie in der Milchstrasse wiedergibt. Solche Vorhersagen geben wichtige Hinweise für Experimentalphysikerinnen wie Laura Baudis von der Universität Zürich, die versucht, die Teilchen, aus denen die Dunkle Materie vermutlich besteht, direkt nachzuweisen.

Was ist aus Moores Buch voller Ideen geworden? «Wir haben es etwa zu einem Drittel durchgearbeitet», sagte der Astrophysiker und lächelt, «allerdings kommen immer neue Ideen dazu. Die Fragen werden oft detaillierter und schwieriger zu lösen, wenn man sich mit ihnen beschäftigt.» Doch Moore ist zufrieden mit seiner Gruppe von rund 30 Forschern – die grösste der Welt, die sich mit Computersimulationen des Universums befasst. Der Erfolg zieht weitere interessante Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler an, die in Zürich arbeiten wollen. Moore, der ausgesprochen locker wirkt und auftritt, legt viel Wert auf eine gute Atmosphäre: Seine Türe ist immer offen, im Gang stehen Billiard- und Pingpongische für kreative Pausen und auch das Sozialleben kommt nicht zu kurz: «Heute Abend gehen wir zusammen Pizza essen und diskutieren. Doch vorher muss ich noch ein paar Projekteingaben bearbeiten», sagt Moore und lacht. *Thomas Gull*

KONTAKT Prof. Ben Moore, Direktor des Instituts für Theoretische Physik der Universität Zürich, moore@physik.uzh.ch

TANZ DER GALAXIEN

Weshalb gibt es Galaxien, die hell leuchten und glatt sind wie eine Frisbee-Scheibe, während andere klumpig und dunkel durchs Universum rotieren? Der Blick ins All und Computersimulationen liefern verblüffende Antworten. Von Thomas Gull

«So hat alles angefangen», Romain Teyssier zeigt auf den Bildschirm seines Laptops: «Das ist ein Bild des Universums im Alter von 400 000 Jahren.» Bis zu diesem Zeitpunkt war das Universum undurchsichtig, weil sich das Licht nicht ausbreiten konnte. Das änderte sich, als die Temperatur auf rund 3000 Kelvin fiel und sich stabile Atome bildeten, die mit den Photonen nur in geringer Wechselwirkung standen. Das junge Universum, das nun sichtbar wurde, war noch sehr homogen, ohne feste Strukturen, ohne Sterne und Galaxien. «Wir haben grosses Glück», freut sich Teyssier, «denn von diesem Ausgangspunkt entwickeln wir unsere Modelle der Entstehung von Galaxien.»

Die erste Aufnahme des Universums zeigt den kosmischen Mikrowellenhintergrund, der sich elipsenförmig auf dem Bildschirm ausbreitet wie ein grosser, ruhiger See, dessen Oberfläche in verschiedenen Farbtönen schimmert, die von Dunkelblau bis Rot variieren. Teyssier deutet auf die rot eingefärbten Stellen: «Da sehen wir sehr kleine Wellen auf der Oberfläche des Sees. Das sind Gebiete mit einer etwas höheren Dichte an Materie, vergleichbar mit einem Zentimeter in einer 1000 Meter hohen Welle. Das heisst, sie sind wirklich sehr klein.» Diese minimalen Ballungen von Materie sind der Ursprung. Durch die Gravitation entstanden aus ihnen zuerst Klumpen und dann die ersten Galaxien und Sterne. Bis es soweit war, dauerte es noch einmal 600 000 Jahre. Und es wurde noch einmal dunkel im Universum; die Astrophysiker sprechen von den «Dark Ages», dem Zeitalter der Finsternis, das dann nach einer Milliarde Jahren zu Ende ging, als die ersten Sterne zu strahlen begannen. Mit ihnen gingen im Universum die Lichter an, die die Astronomen und Astrophysiker noch heute beobachten können, wenn sie mit ihren hochsensitiven Teleskopen in den Nachthimmel schauen.

Eine dieser professionellen Sternenguckerinnen ist Kim-Vy Tran. Die junge SNF-Förderungsprofessorin studiert die Evolution der Galaxien, indem sie mit Hilfe von Teleskopen wie dem Hubble Space Telescope, dem Spitzer Space Telescope oder dem in Chile stationierten Teleskop der Europäischen Südsternwarte (ESO) Zeitreisen durch das Universum macht: «Ins Universum zu schauen, ist wie eine Zeitmaschine», erklärt sie lächelnd, «je weiter weg wir im Raum schauen, umso weiter blicken wir in der Zeit zurück.» Das heisst, je weiter weg die beobachteten Galaxien sind, desto älter sind sie.

Doch wie entstehen Galaxien? Während Kim-Vy Tran diese Frage durch den Blick ins Universum beantworten will, simulieren viele der Forschenden, die die Gravitationskraft von Astrophysiker Ben Moore in den letzten Jahren am Institut für Theoretische Physik versammelt hat, die Entstehung von Galaxien mit Computermodellen. Romain Teyssier, der eigentlich als Professor in Paris lehrt, aber für einen zweijährigen Forschungsurlaub nach Zürich gekommen ist und am liebsten hier bleiben möchte,

«Ins All zu blicken, ist wie eine Zeitmaschine: Je weiter weg wir sehen, umso weiter gehen wir in der Zeit zurück.» Kim-Vy Tran, Astrophysikerin

hat Filme solcher Simulationen auf dem Laptop gespeichert. Wenn er sie startet, werden im dunklen Nichts zuerst helle Punkte sichtbar – die ersten Sterne, die sich dann innerhalb von ein paar Sekunden in einer rotierenden Galaxie mit leuchtenden Spiralarmen zusammenfinden. «Alles, was wir für die Modellierung brauchen, sind die Bedingungen, wie sie am Anfang des Universums herrschten, und die Gravitation, et voilà», sagt Teyssier verschmitzt. In der am Schluss so stringent und

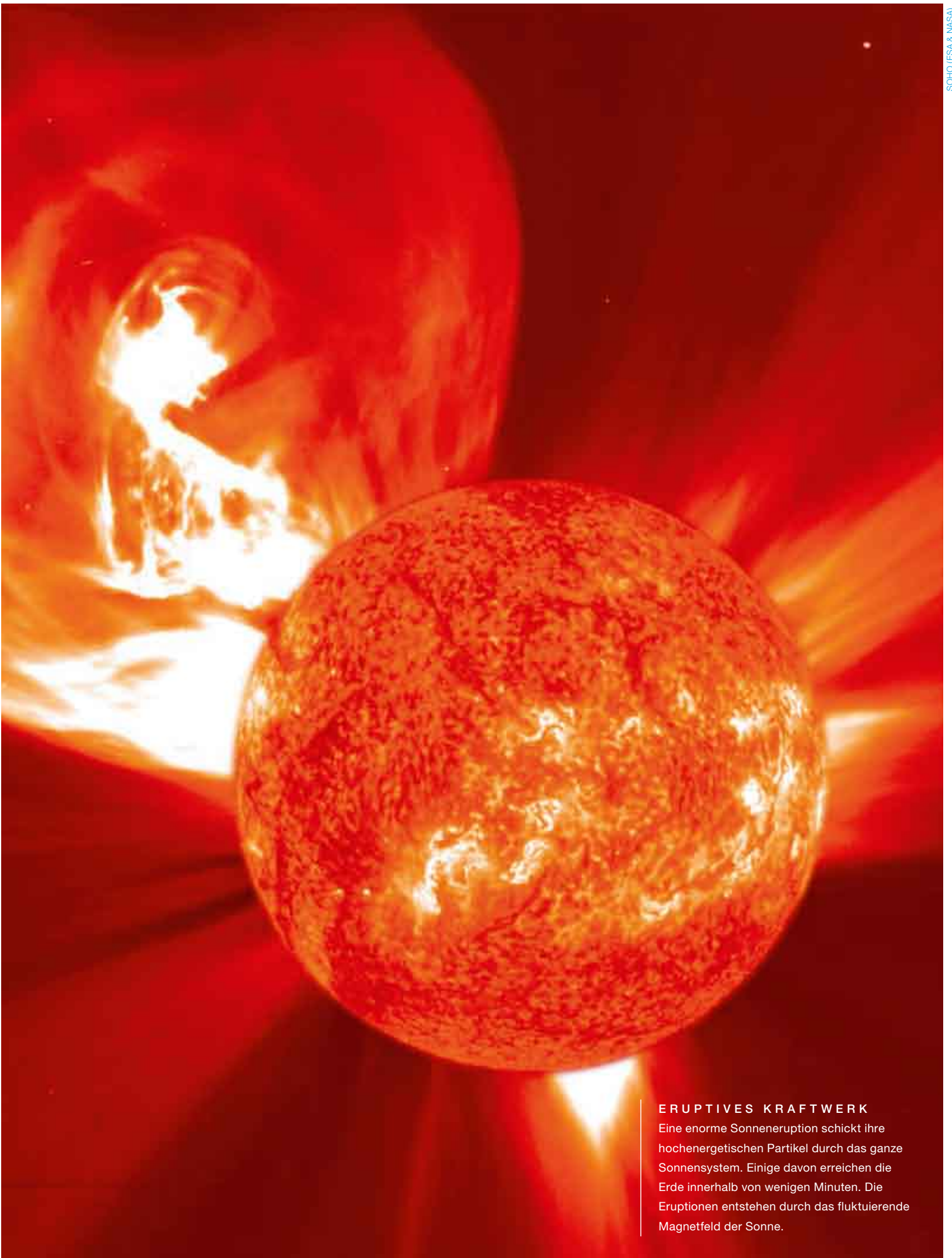
verspielt erscheinenden Simulation steckt jedoch viel Denkarbeit und die gewaltige Rechenleistung des in Zürich gebauten Supercomputers zbox. Ausserdem basieren die Modelle auf zwei Faktoren, die völlig unbekannt sind: der Dunklen Energie und der Dunklen Materie.

Was grundsätzlich vorging, als die ersten Galaxien entstanden, weiss man heute. Dunkle Materie bildet einen sogenannten Halo, in dem sich Wasserstoff sammelt und verdichtet. In diesen Materialwolken, sogenannten «Protogalaxien», entstehen die ersten Sterne. Durch die Rotation werden die kugelförmigen Protogalaxien zu flachen Galaxienscheiben mit einem kugelförmigen Kern. Galaxien leuchten umso heller, je mehr Sterne sie haben und je grösser diese sind.

GALAKTISCHER KANNIBALISMUS

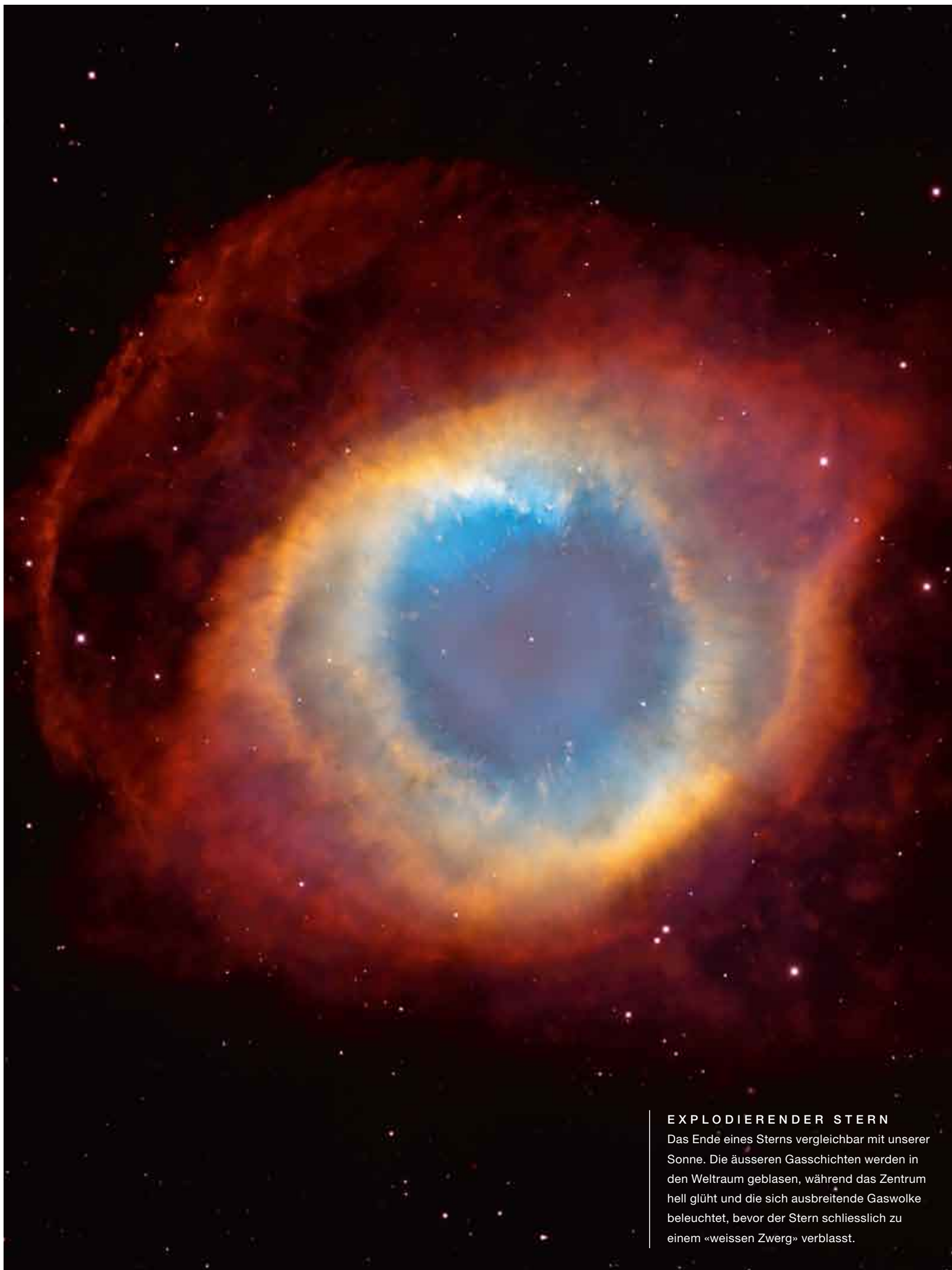
Die Frage, die die Astrophysik heute beschäftigt, ist, wie die grossen Galaxien und die Galaxienhaufen entstanden sind und wie sich ihre verschiedenen Formen erklären lassen. Dazu dienen die Modelle, wie sie die Zürcher Astrophysikprofessoren Romain Teyssier oder George Lake entwerfen. Lake hat auf diesem Gebiet Ende der 1990er-Jahre Bahnbrechendes geleistet, als es seiner Gruppe in Seattle gelang, Gala-

xienhaufen zu simulieren. Die bis zu diesem Zeitpunkt gängige Theorie zu Entstehung und Entwicklung von Galaxien ging davon aus, dass diese fusionieren und so immer grösser werden. Deshalb sollte es im Universum heute eigentlich nur noch grosse Galaxien geben, die die kleinen um sich herum geschluckt haben. Die Wissenschaft bezeichnet diese Prozesse als «hierarchische Formation» und «galaktischen Kannibalismus». Vor dem Hintergrund der gängigen Theorien zur Entstehung von



ERUPTIVES KRAFTWERK

Eine enorme Sonneneruption schickt ihre hochenergetischen Partikel durch das ganze Sonnensystem. Einige davon erreichen die Erde innerhalb von wenigen Minuten. Die Eruptionen entstehen durch das fluktuierende Magnetfeld der Sonne.



EXPLODIERENDER STERN

Das Ende eines Sterns vergleichbar mit unserer Sonne. Die äusseren Gasschichten werden in den Weltraum geblasen, während das Zentrum hell glüht und die sich ausbreitende Gaswolke beleuchtet, bevor der Stern schliesslich zu einem «weissen Zwerg» verblasst.

Galaxien war das Vorhandensein von Galaxienhaufen, in denen sich Tausende von Galaxien auf einem Raum versammeln, der nicht grösser ist als der Abstand zwischen der Milchstrasse und der Andromeda-Galaxie, ein Rätsel für die Wissenschaft. George Lake konnte zeigen, wie solche Strukturen entstehen und sich verändern. «Es gibt auch in den Galaxienhaufen Fusionen», erläutert Lake, «aber in der Regel sind die einzelnen Galaxien zu schnell, um von den anderen erwischt zu werden.» Einzig die grösste Galaxie im Zentrum des Haufens wächst, indem sie kleinere «frisst».

Lake sagte damals aufgrund seiner Computersimulationen voraus, dass eine grosse Zahl von Zwerggalaxien überlebt, wenn eine Galaxie entsteht. Diese Theorie war anfänglich umstritten, weil kaum solche Galaxien beobachtet werden konnten. Die Wissenschaft spricht deshalb vom «Missing Satellite»-Problem. Mittlerweile wurden zahlreiche solcher Strukturen entdeckt, die um die Milchstrasse kreisen. Vorher hat man diese «Zwerge» übersehen, weil sie «dunkel» sind, das heisst, keine oder nur sehr wenige Sterne haben, die leuchten. Lake, der nach einem Abstecher in die Privatwirtschaft heute an der Universität Zürich lehrt und forscht, scheint also Recht zu bekommen.

Lakes Simulation von Galaxienhaufen ist ein Beispiel dafür, wie sich bei der Lüftung galaktischer Geheimnisse Beobachtung und Computersimulation ergänzen können. Ein weiteres ungelöstes Rätsel ist die Entstehung sehr alter und gleichzeitig massiver elliptischer Galaxien. Diese unterscheiden sich von Galaxien wie der Milchstrasse, die glänzenden, rotierenden Scheiben gleichen, deren zahllose Sterne hell leuchten. Die alten Galaxien haben den Wasserstoff, den sie für die Bildung neuer Sterne benötigen würden, schon lange aufgebraucht. Deshalb bestehen sie nur noch aus alten Sternen, von denen viele schon verglüht sind.

Auch die Beobachtung, dass es bereits in der Frühzeit des Universums sehr grosse Galaxien gab, stellt die Theorie der «hierarchischen Formation» in Frage. «Die hierarchische Erklärung funktioniert sehr gut für unsere Milchstrasse und für kleinere Galaxien», erklärt Kim-Vy Tran, «die grossen alten Galaxien hingegen haben Charakteristika, die darauf hin-

deuten, dass sie monolithisch entstanden sein könnten, das heisst, sie wurden einmal gebildet und haben sich dann nicht mehr verändert.» Aufgrund ihrer Beobachtungen konnte Kim-Vy Tran nun zeigen, dass auch die alten Galaxien durch Fusionen entstanden sind. Dazu brauchte es auch etwa Glück, wie sie einräumt, denn wenn sich zwei Galaxien vereinigen, gibt es kosmisch betrachtet nur einen sehr kurzen Augenblick, während dem sie sehr nahe beieinander sind, aber noch als einzelne Galaxien erkannt werden können. Kim-Vy Tran hat einen solchen Moment erwischt und daraus die richtigen Schlüsse gezogen.

STERNE AUS KALTEN STRÖMEN

Während Kim-Vy Tran durch ihre Beobachtungen nachweisen konnte, dass auch alte, sogenannte «Redshift»-Galaxien durch Fusionen gewachsen sind, hat Romain Teyssier aufgrund seiner Computersimulationen eine andere bahnbrechende Entdeckung gemacht: die «cold streams», die «Kalten Ströme». Diese müssen den Redshift-Galaxien einen Teil des Wasserstoffs zugeführt haben, den sie für die Bildung von Sternen brauchten. «Bis vor ein paar Jahren glaubten wir, grosse Galaxien entstünden nur durch die Fusion mit anderen Galaxien», erklärt Teyssier. Der Wasserstoff, den es für die Bildung der neuen Sterne braucht, umgibt in diesem Modell die Galaxie. Er kühlt sich ab, fliesst langsam in die Galaxie und ermöglicht so die Bildung von Sternen. Teys-

bisherigen Modells. Die frühen Klumpengalaxien und Teyssiers Cold Streams gehören zusammen: Die Kalten Ströme gaben den Klumpengalaxien die Energie, die sie brauchten, um Sterne zu bilden. Interessant ist, dass die Kalten Ströme bisher empirisch noch nicht nachgewiesen werden konnten. Das Beispiel zeigt auf, wie die Modellierungen von Teyssier und die Beobachtungen von Kim-Vy Tran sich ergänzen. Teyssier: «Während die Astronomen die Klumpengalaxien entdeckten, bevor wir davon eine theoretische Vorstellung hatten, hat die theoretische Astrophysik das Konzept der Kalten Ströme beigesteuert. Diese müssen jetzt noch empirisch nachgewiesen werden.»

Wie wirkt sich der «galaktische Kannibalismus» aus – was passiert, wenn eine Galaxie die andere «frisst» – kommt es zu einem grossen Crash der Sterne? Kim-Vy Tran findet dafür ein anderes Bild: «Die Fusion von zwei Galaxien ist wie ein Tanz unter dem Einfluss der Gravitation.» Die Galaxien gehen ineinander über, die Sterne erhalten einen neuen Platz in der neuen, grösseren Galaxie, ohne dass es zu Kollisionen kommt. Und wenn noch genügend Wasserstoff vorhanden ist, entstehen viele neue Sterne, die bis zu zwanzigmal grösser sein können als unsere Sonne. Sie sorgen dafür, dass die neue Galaxie viel heller leuchtet als ihre Vorgängerinnen. «Die grossen Sonnen sind wie Scheinwerfer, die das Licht der anderen Sterne überstrahlen», erklärt Kim-Vy Tran mit einem Glänzen in den Augen. Doch die Herrlichkeit

Eine der letzten Fusionen im Universum wird jene unserer Milchstrasse mit der Andromeda-Galaxie in rund drei Milliarden Jahren sein.

siers Berechnungen haben diese Vorstellung verändert, wie er erläutert: «Heute glauben wir, dass die Galaxien am Anfang nicht ausschliesslich durch die Fusion von kleinen Galaxien gewachsen sind, sondern auch durch die Kalten Ströme.»

Teyssier geht davon aus, dass etwa die Hälfte der Masse einer Galaxie durch diese Kalten Ströme entstanden sein muss, die den Wasserstoff direkt ins Zentrum der Galaxie führen. Das ist eine fundamentale Veränderung des

ist schnell wieder vorbei, die neuen Sterne haben nur eine Lebensdauer von 10 Millionen Jahren. «Das ist so kurz», sagt Kim-Vy Tran und schnippt mit den Fingern. Wenn die neuen Sonnen verglüht sind, wird die Galaxie wieder dunkler – wie bei einer Party, wenn die Lichter gelöscht werden, nachdem sich die letzten Gäste auf den Heimweg gemacht haben.

Die Lichter gehen nicht nur in den einzelnen Galaxien aus, sondern nach und nach im ganzen Universum. «Das Universum kühlt langsam

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 kreucht und fleucht. 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 Staubeilchen. 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 Bremseffekten 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.

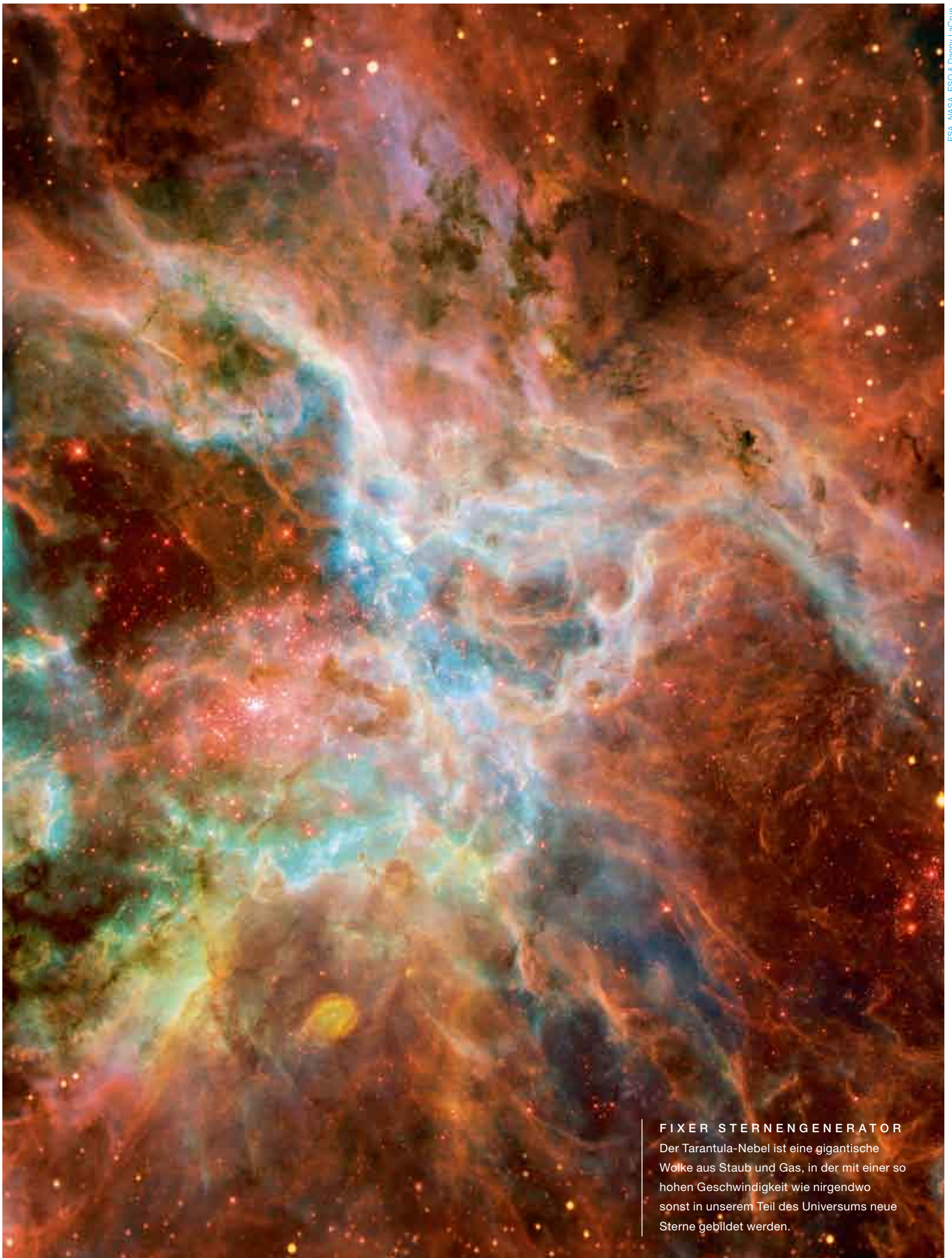
Joachim Stadel zeigt das Ergebnis einer Simulation am Computerbildschirm: Eine Grafik offenbart die Verteilung von mehreren Planeten und anderen terrestrischen Objekten wie etwa Asteroiden 150 Millionen Jahre nach der Geburt der Sonne. «Ausgangspunkt für diese Simulation waren 2000 Einzelbruchstückchen,

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

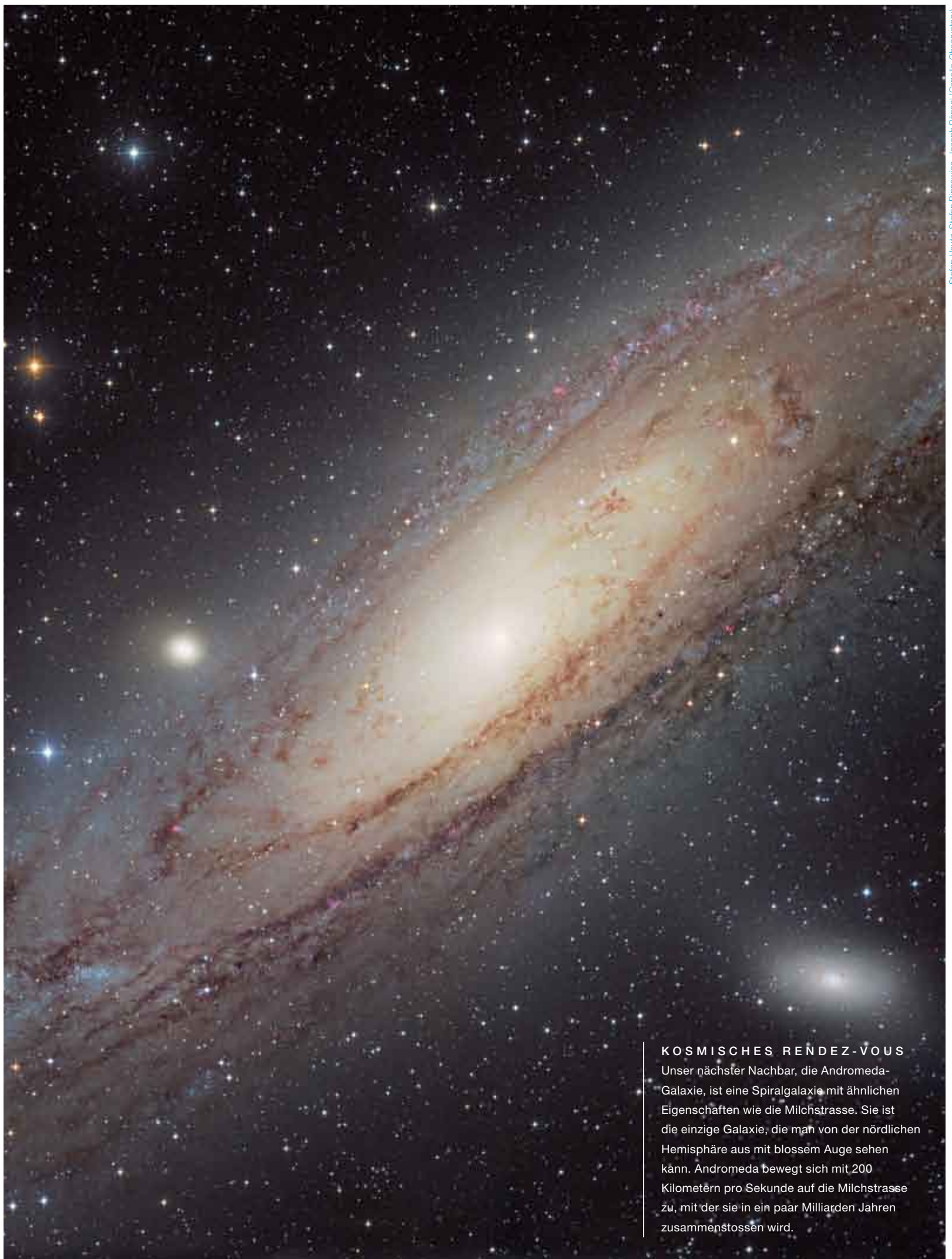
Bei der Entstehung von Planetensystemen spielt nämlich auch das Chaos eine Rolle. Denn die Himmelskörper unterliegen gegenseitigen Wechselwirkungen. Und diese können sich aufschaukeln. Dass sich zum Beispiel die Exzentrizitäten von Planeten – also die Abweichung von der kreisförmigen Umlaufbahn – mit 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 vorauszusagen, 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 vorauszusagen, wie das Wetter wird.»

KONTAKT Dr. Joachim Stadel, stadel@physik.uzh.ch, Dr. Aaron C. Boley, 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.



KOSMISCHES RENDEZ-VOUS

Unser nächster Nachbar, die Andromeda-Galaxie, ist eine Spiralgalaxie mit ähnlichen Eigenschaften wie die Milchstrasse. Sie ist die einzige Galaxie, die man von der nördlichen Hemisphäre aus mit blosssem Auge sehen kann. Andromeda bewegt sich mit 200 Kilometern pro Sekunde auf die Milchstrasse zu, mit der sie in ein paar Milliarden Jahren zusammenstossen wird.

UNSICHTBARE SCHWÄCHLINGE

Nur ein Bruchteil der Materie im Universum ist sichtbar. Ein viel grösserer Teil besteht vermutlich aus Dunkler Materie. Darüber, wie diese beschaffen sein könnte, zerbrechen sich Astrophysiker noch heute den Kopf. Von Roger Nickl

Ein gigantisches Heer von Schwächlingen könnte massgeblich daran beteiligt sein, dass das Universum so beschaffen ist, wie wir es heute beobachten. WIMPs (englisch für «Schwächlinge») nennen Astrophysiker nämlich Teilchen, aus denen die bis heute rätselhafte Dunkle Materie vermutlich besteht – die Abkürzung steht für «Weakly Interacting Massive Particle». Denn die sichtbare Materie – die Atome und Moleküle, aus denen auch wir geschaffen sind – macht nur einen kleinen Teil der gesamten im ganzen Universum vorhandenen Materie aus. Heute schätzen Wissenschaftler deren Anteil auf rund 4 Prozent. Der Rest, vermuten sie, besteht zu zirka 22 Prozent aus dunkler, unsichtbarer Materie und etwa zu 74 Prozent aus einer nach wie vor sagenumwobenen Dunklen Energie. Noch sind dies aber alles Spekulationen. Weder konnte die Dunkle Materie bislang direkt nachgewiesen werden, noch gibt es konkrete Hinweise, worum es sich bei der Dunklen Energie handeln könnte. Doch verschiedene Beobachtungen von Astrophysikern und Astronomen lassen das Netz der Indizien immer dichter werden, das für deren Existenz spricht.

Als «Vater» der Dunklen Materie gilt der geniale Schweizer Astrophysiker Fritz Zwicky: In einer bahnbrechenden Arbeit, die er bereits 1933 in der Zeitschrift *Helvetica Physica Acta* publizierte, legte er seine Beobachtungen des Coma-Galaxienhaufens dar. Zwicky schätzte aus den Bewegungen der über 1000 Galaxien des Haufens dessen Gesamtmasse. Und er leitete daraus einen erstaunlichen Schluss ab: Die Galaxien bewegten sich im Mittel zu schnell, sodass die Masse der sichtbaren Materie – die Physiker sprechen auch von baryonischer Materie – allein nicht ausreichte, um den Haufen mittels Gravitation zusammenzuhalten. Es musste also noch mehr – unsichtbare – Masse vorhanden sein, die verhinderte, dass die Gala-

xien auseinanderdrifteten. Zwicky nannte diese unsichtbare Masse Dunkle Materie.* Der Schweizer Astrophysiker war damals, in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts, noch ein einsamer Rufer in der Wüste. Doch seither tragen Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler weltweit Belege zusammen, die Zwickys Hypothese stützen. Ohne Dunkle Materie, dies zeigen auch kosmologische Computersimulationen der Astrophysiker des Instituts für Theoretische Physik der Universität Zürich, hätten sich die Strukturen im Universum nicht so entwickelt, wie wir sie heute beobachten können.

KUGELN AUS DUNKLER MATERIE

Heute haben Wissenschaftler immer klarere Vorstellungen davon, wie sich nach dem Urknall vor 13,7 Milliarden Jahren erste kosmische Strukturen gebildet haben. Der theoretische Astrophysiker Ben Moore erforscht solche Prozesse der Strukturbildung. Auf einem selbstgebaute Supercomputer, der «zBox», modelliert und testet er die neuesten astrophysikalischen Hypothesen und Erkenntnisse. Die so entste-

sich verdichten. Ganz im Gegensatz zur Dunklen Materie, die nicht mit den Photonen wechselwirkte und die sich deshalb unter dem Einfluss der Gravitation zu formieren begann. Regionen, die eine hohe Dichte an Dunkler Materie aufwiesen, wurden dichter, lichtere Gebiete wurden lichter. So bildeten sich allmählich kugelförmigere Gebilde, sogenannte Halos aus Dunkler Materie. Nach 400 000 Jahren hatte sich das Universum dann so weit abgekühlt, dass sich die Photonen von der baryonischen Materie entkoppeln konnten. Das Weltall wurde allmählich durchsichtig und nun konnte sich auch der für uns sichtbare Teil der Materie verklumpen. Sie tat dies in den Gravitationsfeldern, die die Dunkle Materie bereits aufgebaut hatte. «Von der Gravitation angezogen, fiel die baryonische Materie genau ins Zentrum der Dunkle-Materie-Halos, wo sie sich sehr stark verdichtete», erklärt Ben Moore, «dadurch wurde letztlich die Bildung von Sternen und der ersten Galaxien möglich.» Wie leuchtende Inseln sind die Galaxien, so gesehen, aus einem riesigen Meer von Dunkler Materie entstanden.

Trotz all der schon weit entwickelten Modelle über die Entstehung des Universums bleibt das Wesen der Dunklen Materie für die Wissen-

«Es wird uns früher oder später gelingen, Dunkle Materie direkt nachweisen zu können.» Laura Baudis, Experimentalphysikerin

henden Simulationen zeigen ein immer differenzierteres Bild der Entstehung des Universums und auch der Rolle, die die Dunkle Materie damals und heute im Kosmos spielt.

Nach dem Urknall war das Universum zunächst undurchsichtig und unvorstellbar heiss. In dieser Phase, die rund 400 000 Jahre lang dauerte, wurde das Licht – genauer gesagt die Photonen – immer wieder von der baryonischen Materie absorbiert. In diesem Gleichgewichtszustand konnte sie keine Klumpen bilden und

schaft auch heute noch ein Rätsel. Astrophysikerinnen und Astrophysiker gehen davon aus, dass sie aus neuen Teilchen – eben den WIMPs – besteht, die eine relativ grosse Masse haben (100 bis 1000 Mal die Masse eine Protons), elektrisch neutral sind und nur sehr schwach mit dem Rest der Materie wechselwirken. Weil sie so schwach mit der herkömmlichen Materie interagieren, ist es äusserst schwierig, solche Teilchen direkt nachzuweisen und sie so aus dem Reich der Hypothesen in das der Realität

zu befördern. Jedenfalls konnte bislang noch kein WIMP dingfest gemacht werden. Dies könnte sich aber schon bald ändern. Astroteilchenphysikerin und Dunkle-Materie-Forscherin Laura Baudis vom Physik-Institut der Universität Zürich zeigt sich jedenfalls zuversichtlich: «Ich denke, es wird uns früher oder später gelingen, Dunkle Materie nachzuweisen.» Revolutionär wäre dagegen, wenn sich die Annahmen der Forscher als falsch erweisen würden und etwas ganz anderes am Werk wäre.

Bei der weltweiten Jagd auf die Dunkle-Materie-Teilchen sind Laura Baudis und ihr Team ganz vorne mit dabei. Die Forscherin versucht, die WIMPs aus dem Dunkle-Materie-Halo, in den die Milchstrasse eingebettet ist, mit einem eigens dafür entwickelten, hochsensiblen Detektor nachzuweisen. Mittlerweile steht das empfindliche Messgerät, dessen Kern aus 100 Kilogramm flüssigem Xenon besteht, in den Tiefen des Gran-Sasso-Labors in den italienischen Abruzzen – darüber ruhen 1400 Meter massiver Fels. Hier unten, abgeschirmt von der störenden kosmischen Strahlung an der Erdoberfläche, hofft die Physikerin, WIMPs direkt nachweisen zu können. Denn obwohl diese Teilchen nur schwach mit der sichtbaren Materie wechselwirken, kommt es in sehr seltenen Fällen dazu, dass sie mit einem Atomkern kollidieren. Darauf spekuliert Laura Baudis: Sollte ein WIMP in ihrem Detektor tatsächlich auf ein vermutlich etwa gleich schweres Xenon-Atom stossen, würden dadurch Elektronen und etwas UV-Licht abgestrahlt. Diese wiederum lassen sich mit hochempfindlichen Sensoren des Detektors messen.

Momentan ist die Astrophysikerin im Gran-Sasso-Labor mit den Vorbereitungen zur eigentlichen Messphase beschäftigt. Der Detektor und das darin enthaltene Xenon etwa müssen ultrarein sein, denn bereits kleinste Verunreinigungen würden die Signale, die bei einem Zusammenstoss eines WIMPs mit einem Xenon-Atom entstehen, absorbieren und die Messung so verunmöglichen. Zudem wird das Messgerät auf Neutronen geeicht. Diese wechselwirken ähnlich wie die vermuteten Dunkle-Materie-Teilchen durch Kernrückstoss. Im Gegensatz zu den WIMPs sind Neutronen jedoch stark wechselwirkend, das heisst, sie kollidieren nicht

nur einmal, sondern mehrfach mit den Atomen im Detektor. Ist das Messgerät darauf eingestellt, lassen sich Neutronen und Dunkle-Materie-Teilchen so unterscheiden.

Erst wenn alle diese Vorarbeiten abgeschlossen sind, kann Laura Baudis mit der Datenaufnahme beginnen. Sie hofft, dass sie dann innerhalb eines Jahres wenigstens zehn WIMPs nachweisen kann. Damit wäre bereits viel erreicht, weil so die Existenz der Dunklen Materie erstmals bestätigt werden könnte. Baudis denkt aber schon einen Schritt weiter. «Die aktuellen Experimente sind Prototypen für viel grössere Versuchsanordnungen in der

genauer einzustellen und damit die Chance zu erhöhen, tatsächlich eines WIMPs habhaft zu werden.

Ein für den Nachweis der Dunklen Materie wichtiges Forschungsergebnis hat kürzlich Justin Read von der Universität Zürich präsentiert. Er und sein Team haben mittels Computersimulation festgestellt, dass die Milchstrasse möglicherweise nicht nur, wie bislang angenommen, in ein riesiges, kugelförmiges Halo aus Dunkler Materie eingebettet, sondern zusätzlich von einer weniger dichten Scheibe aus Dunkler Materie umgeben ist, die sich wie ein Mantel um die Galaxie legt. Sollte diese

Wie leuchtende Inseln sind die Galaxien aus einem riesigen Meer von Dunkler Materie entstanden.

Zukunft», sagt sie. Denn um die Eigenschaften der Dunkle-Materie-Teilchen zu erforschen, müssen die Astrophysiker Hunderte, wenn nicht Tausende Kollisionsereignisse messen können. Dafür braucht es viel grössere Instrumente, deren Detektionsmedium aus mehreren Tonnen flüssigen Gases besteht. Um ein solches Projekt künftig auf die Beine zu stellen, hat sich Baudis nun mit verschiedenen europäischen Forschergruppen zusammengesetzt. Ihr Ziel ist es, bis 2013 ein solches Multitonnen-Experiment aufzubauen.

NADEL IM KOSMISCHEN HEUHAUFEN

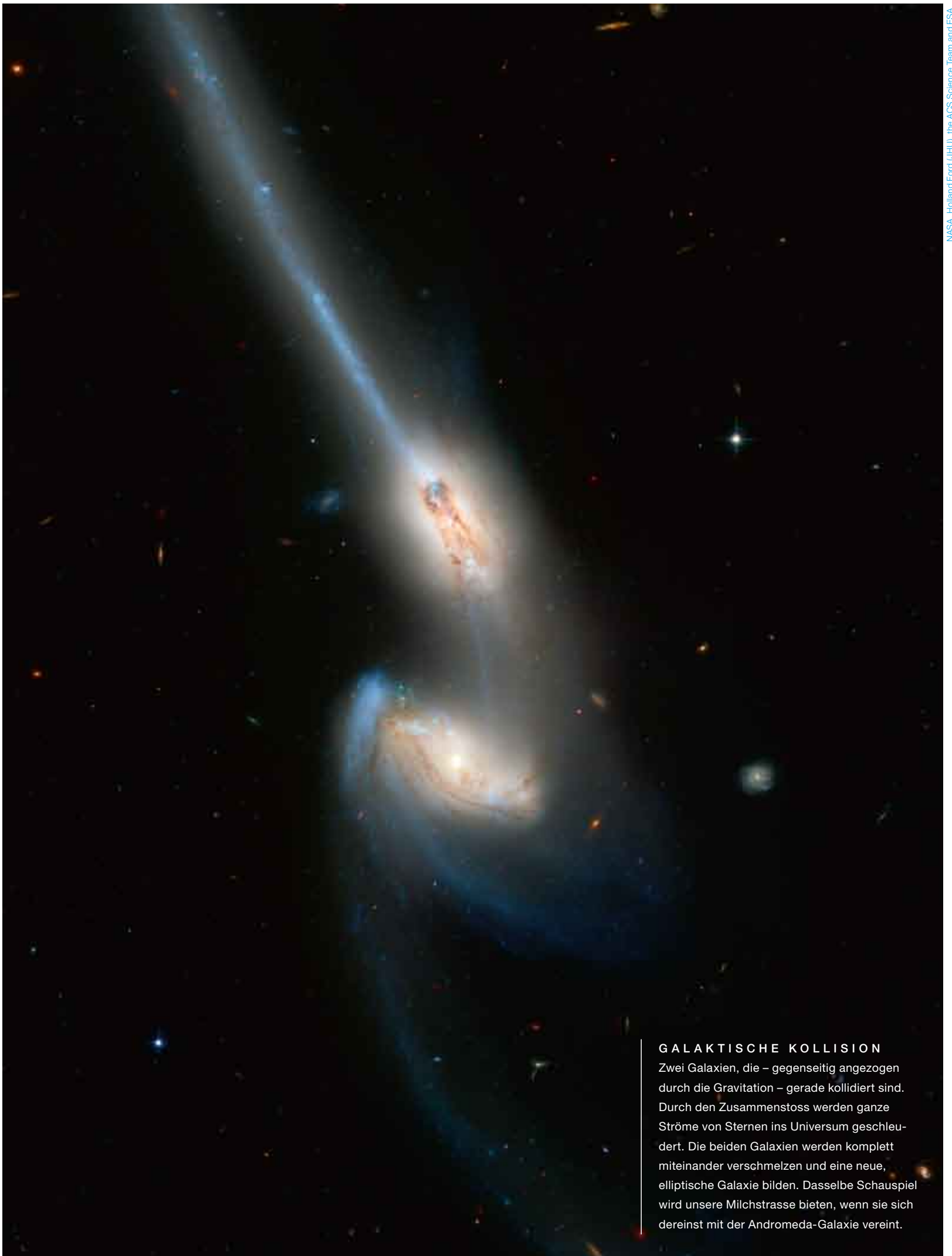
Der Versuch, Dunkle Materie aufzuspüren, gleicht der Suche nach der Nadel im kosmischen Heuhaufen. Um dabei erfolgreich zu sein, müssen Forscherinnen und Forscher aus ganz verschiedenen Gebieten der Astrophysik zusammenarbeiten. So können die Zürcher Physikertheoretiker Ben Moore und George Lake mit ihren Computersimulationen etwa modellieren, wie die Dunkle Materie im Kosmos verteilt ist. Oder sie können mit ihrem Hochleistungsrechner verschiedene hypothetische Teilchen testen, die als WIMP-Kandidaten in Frage kommen, und so mögliche Eigenschaften vorherzusagen. Solche Prognosen ermöglichen es Experimentalphysikerinnen wie Laura Baudis wiederum, den Fokus ihres Detektors immer punkt-

Annahme stimmen, hätte das weitreichende Konsequenzen für das Aufspüren der WIMPs.

Denn Erde und Sonne drehen sich mit einer Geschwindigkeit von 220 Kilometern pro Sekunde um das Zentrum der Milchstrasse. Weil das Halo aus Dunkler Materie dagegen stillsteht, ist unser Planet im Prinzip einem ständigen Wind aus schnellen Dunkle-Materie-Teilchen ausgesetzt, der diesen durchdringt. Die von den Forschern der Universität Zürich vermutete Scheibe aus Dunkler Materie dreht sich dagegen mit der Galaxie mit, weshalb diese Teilchen von der Erde aus betrachtet wesentlich langsamer sind und damit einfacher im Detektor nachgewiesen werden können. Sollte sich dieses Ergebnis bestätigen, könnte es also durchaus sein, dass schon bald einer der unsichtbaren «Schwächlinge» aufgespürt werden kann. Damit würde die Astrophysik der Lösung eines der grossen Rätsel des Universums einen Schritt näher kommen.

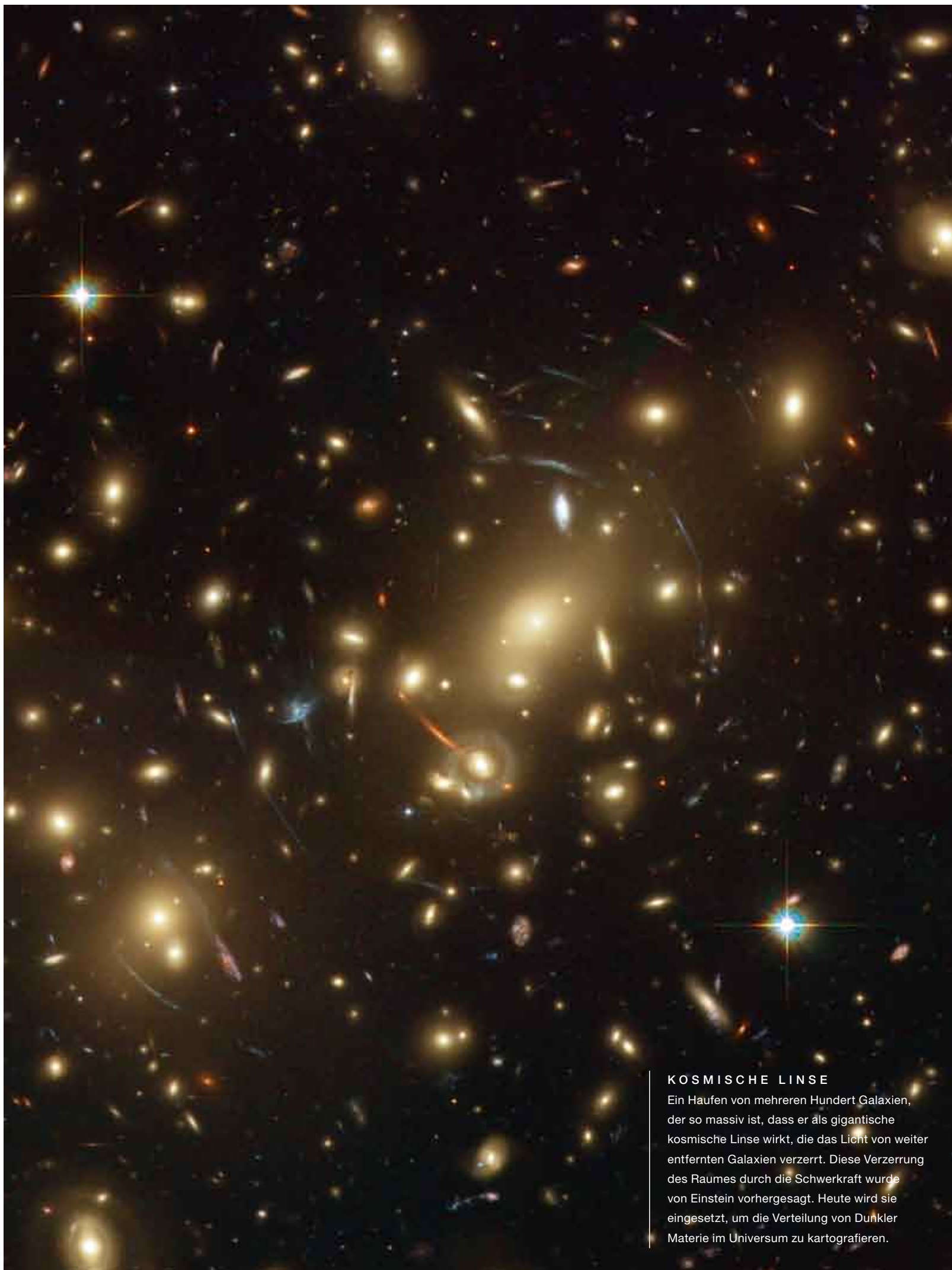
KONTAKT Prof. Laura Baudis, laura.baudis@physik.uzh.ch; Prof. Ben Moore, moore@physik.uzh.ch; Dr. Justin Read, justin@physik.uzh.ch

*Literatur: Alfred Stöckli, Roland Müller: *Fritz Zwicky, Astrophysiker. Ein Genie mit Ecken und Kanten*, Verlag Neue Zürcher Zeitung 2008



GALAKTISCHE KOLLISION

Zwei Galaxien, die – gegenseitig angezogen durch die Gravitation – gerade kollidiert sind. Durch den Zusammenstoß werden ganze Ströme von Sternen ins Universum geschleudert. Die beiden Galaxien werden komplett miteinander verschmelzen und eine neue, elliptische Galaxie bilden. Dasselbe Schauspiel wird unsere Milchstraße bieten, wenn sie sich dereinst mit der Andromeda-Galaxie vereint.



KOSMISCHE LINSE

Ein Haufen von mehreren Hundert Galaxien, der so massiv ist, dass er als gigantische kosmische Linse wirkt, die das Licht von weiter entfernten Galaxien verzerrt. Diese Verzerrung des Raumes durch die Schwerkraft wurde von Einstein vorhergesagt. Heute wird sie eingesetzt, um die Verteilung von Dunkler Materie im Universum zu kartografieren.

INTERGALAKTISCHE SUPERHEFE

Die Dunkle Energie zwingt das Universum zu immer rascherer Expansion. Seit ihrer Entdeckung vor zwölf Jahren ringen Astrophysiker um eine Antwort, was diese rätselhafte Dunkle Energie sein könnte. Von Thomas Müller

«Tief in unseren Herzen wissen wir doch, dass das nicht stimmen kann», seufzte Robert Kirshner im Dezember 1997. Der weitherum respektierte Astronom an der Harvard-Universität sprach von den damals heiss gehandelten Gerüchten, dass sich die Expansion des Universums beschleunigte. Jahrzehntlang hatten theoretische und beobachtende Astronomen diskutiert, ob das Universum dereinst wieder in sich zusammenfallen würde oder ob die «Explosionsenergie» des Urknalls ausreichen würde, die Galaxien auf alle Zeiten weiter auseinanderzutreiben. Doch nun behaupteten zwei voneinander unabhängige Forschungs-Konsortien um Saul Perlmutter (Universität von Kalifornien, Berkeley) und den damaligen Harvard-Astronomen Brian P. Schmidt, das Universum gebe Gas, anstatt auf die Bremse zu gehen oder ewig weiterzuwachsen.

SIEGREICHER GEGENSPIELER DER GRAVITATION

Gemessen hatten die beiden Konsortien die Beschleunigung anhand eines bestimmten Typs von Supernovae (SN1a), von denen man annimmt, dass sie immer mit der gleichen Energie explodieren und deshalb auch immer gleich hell aufleuchten. Astronomen sprechen deshalb von «Standardkerzen», mit denen sich Distanzen im Universum vermessen lassen, ähnlich wie sich die Entfernung einer Strassenlampe bestimmen lässt, wenn ihre Leuchtkraft bekannt ist. Kombiniert mit der «Fluchtgeschwindigkeit» einer Galaxie, die sich aus der Verschiebung des Lichtspektrums in den roten Bereich ergibt (Rotverschiebung), lässt sich die Hubble-Konstante bestimmen, die ein Mass für die Expansionsgeschwindigkeit des Universums darstellt. Verblüfft hatten die beiden Konsortien festgestellt, dass die fernsten noch messbaren Supernovae weiter weg sind als erwartet. Das heisst, die Expansion des Universums musste

eine Beschleunigung erfahren haben, von der bislang niemand etwas wusste.

Auch Philippe Jetzer und Uros Seljak, beide auf Kosmologie spezialisierte Professoren am Institut für Theoretische Physik, waren ob der Neuigkeiten überrascht und blieben eine Weile lang skeptisch. Die Resultate wurden jedoch durch eine komplett andere Messmethode ergänzt. Messungen des Echos des Urknalls, der sogenannten kosmischen Hintergrundstrahlung, hatten im Lauf der 1990er-Jahre ergeben, dass wir in einem «flachen» Universum leben, das der (euklidischen) Geometrie unserer Alltagswelt gehorcht. Das bedeutet, dass Licht auf «geradem» Weg zu uns gelangt und das Universum nicht gekrümmt ist.

Diese Feststellung zieht eine irritierende Konsequenz nach sich. Denn der bei weitem grösste Anteil der gesamten im Universum vorhande-

So kurz, so schleierhaft, denn die Natur der Dunklen Energie ist damit nicht erklärt. Auch Seljak und Jetzer ringen um Worte, sollen sie beschreiben, wie Dunkle Energie wirkt. Jetzer zieht einen Vergleich mit dem Verhalten von unterkühltem Wasser heran. Das ist Wasser, das ganz langsam unter den Gefrierpunkt von 0 Grad Celsius abgekühlt wird, sodass es flüssig bleibt. Dann genügt eine winzige Störung, ein Hauch oder ein leichtes Schütteln, und das Wasser gefriert schlagartig und setzt dabei Energie frei. So ähnlich könnte auch der Urknall abgelaufen sein. Das Universum befand sich in einer Art «überspanntem» Energiezustand, bis durch eine winzige (quantenphysikalische) Fluktuation der Knall ausgelöst wurde. Dabei wurde Dunkle Energie frei, die das Universum auseinandertreibt. Auch heute noch.

In den Anfängen des Universums war der Anteil der Dunklen Energie an der Gesamtenergie kleiner als heute; dunkle und helle Materie vermochten deshalb die Expansion zu bremsen. Vor etwa fünf Milliarden Jahren jedoch

Die Dunkle Energie stellt 74 Prozent der Gesamtenergie im Universum – sie durchdringt den Raum gleichförmig und bläht ihn unablässig auf.

nen Energie kann nicht in der hellen, sogenannte baryonischen Materie stecken, aus der wir, die Sterne und das intergalaktische Gas gemacht sind. Angesichts der beobachteten beschleunigten Expansion steuern nur etwa vier Prozent an die Gesamtenergie des Universums bei. Und die rätselhafte Dunkle Materie schlägt nur mit etwa 22 Prozent zu Buche. «Also muss da noch etwas sein, und dieses Etwas ist die Dunkle Energie», erklärt Uros Seljak. Sie stellt 74 Prozent der Gesamtenergie, durchdringt den Raum gleichförmig und bläht ihn unablässig auf. Sie ist somit der siegreiche Gegenspieler der (dunklen und hellen) Materie, die die Gravitation dazu treibt, sich in Form von Galaxien-Filamenten und -Clustern zu verklumpen.

nahm die Dunkle Energie überhand und die Beschleunigung setzte ein. Seither wirkt sie wie eine Superhefe, die einen Kuchen im Ofen immer schneller aufgehen lässt.

OCKHAMS RASIERMESSER

Die pragmatischste Lösung ist, die Dunkle Energie einfach als kosmologische Konstante zu deuten. Albert Einstein hatte sie 1915 erfunden, um seine Allgemeine Relativitätstheorie mit der damals herrschenden Vorstellung eines gleichförmigen, unendlichen und unveränderlichen Universums in Einklang zu bringen. Als der US-Astronom Edwin Hubble Ende der 1920er-Jahre die Expansion des Weltalls beobachtete, strich Einstein die Konstante wieder

und bezeichnete den Fehler als «meine grösste Eselei». Nun erlebt Lambda, wie Astronomen die kosmologische Konstante nennen, eine Renaissance. Diesmal jedoch soll sie in den Modellen der theoretischen Physiker aber kein statisches Universum hervorzaubern, sondern im Gegenteil eines, dass immer schneller expandiert. Die kosmologische Konstante ist Teil der sogenannten Zustandsgleichung des Universums und bewirkt eine stetige Bildung von «Raum» zwischen der Materie, gegen die die Gravitation in ihrem steten Bemühen, alles einander zu näherzubringen, nicht mehr ankommt. Aber eben, eine Erklärung der Natur der Dunklen Energie ist auch das nicht, nur eine Beschreibung ihrer Effekte.

Ein zweiter Erklärungsversuch der Dunklen Energie ist die Quintessenz. In der Astronomie steht sie für eine fünfte, noch unentdeckte Kraft und ihr zugehöriges Feld, die die bekannten vier Kräfte Gravitation, Elektromagnetismus und die beiden Kernkräfte ergänzen. Der Vorteil der Quintessenz aus Sicht der Theoretiker ist ihre Flexibilität. Sie ist keine Konstante, sondern dynamisch, kann sich im Lauf der Zeit verändern und könnte somit eine andere Erklärung dafür liefern, warum die Beschleunigung erst vor fünf Milliarden Jahren einsetzte.

«Aber es gibt keinen wirklich guten Grund, auf die Quintessenz oder andere, exotischere Theorien zu setzen», sagt Seljak und zitiert «Ockhams Rasiermesser», eine bei Astronomen beliebte Maxime, nach der bei einer Auswahl von Theorien diejenige weiterverfolgt werden sollte, die die beobachteten Umstände am einfachsten, aber dennoch richtig beschreibt – und das ist die Interpretation der Dunklen Energie als kosmologische Konstante. Da jedoch eine dingfestere Erklärung der Dunklen Energie bis auf Weiteres buchstäblich in den Sternen steht, bleibt vorderhand nichts anderes übrig, als deren Effekte noch genauer auszumessen.

Sowohl Jetzer wie auch Seljak sind an Forschungen beteiligt, die dazu einen Beitrag leisten können. Seljak versucht, die Verklumpung von dunkler und heller Materie und damit die grossräumigen Strukturen des Universums sowohl theoretisch als auch beobachtend zu erfassen. Er ist am Sloan Digital Sky Survey beteiligt, bei dem 100 Millionen Galaxien be-

obachtet werden. Sie sind nicht etwa gleichmässig über den Raum verteilt, sondern ballen sich in Clustern und reihen sich in Filamenten auf, die das Universum durchziehen wie die Anden, der Himalaya oder die Alpen unsere Kontinente. Zwischen den Galaxienhaufen und Filamenten weiten sich ozeanische Leeren, in denen es nichts gibt ausser Dunkle Energie, die die Expansion des Raumes unablässig vorantreibt.

Seljak und seine Mitstreiter verwenden bei dieser Vermessung des Universums den Gravitationslinseneffekt. Stehen zwei Galaxien von der Erde aus betrachtet hintereinander, wirkt die vordere wie eine Linse und lenkt das Licht der hinteren ab. Mit dieser Technik lässt sich ableiten, wie die Verklumpung des Universums in naher Vergangenheit vonstatten ging. Das lässt wiederum Rückschlüsse zu, wie sich die «Potenz» der Dunklen Energie, die der Verklumpung entgegenwirkt, entwickelte, und ob allenfalls doch regionale Unterschiede auftreten.

Um weiter zurück in die Vergangenheit zu blicken, sind kräftigere Lichtquellen nötig als Galaxien. Quasare sind hier das Objekt der Begierde, weil sie zu den strahlungskräftigsten Lichtquellen im Universum gehören. Sie sitzen im Zentrum von Galaxien und senden ähnlich wie ein Richtsender ein ungeheuer kräftiges Radiosignal aus, das, sofern man sich in dessen Abstrahlungskegel befindet, weit herum zu empfangen ist. «Noch ist es zu früh, um zwischen der kosmologischen Konstante und Quintessenz-Theorien zu unterscheiden, nicht zu-

Effekt verschiedener Ursachen, die in ihrer Summe bewirken, dass der sonnennächste Punkt der Planeten im Lauf der Zeit um das Zentralgestirn herum wandert. Auch die Krümmung des Raumes, wie sie von Einsteins Allgemeiner Relativitätstheorie beschrieben wird, trägt zur Periheldrehung bei. Die korrekte Berechnung der Periheldrehung der Merkurlaufbahn war einer der ersten Triumphe von Einsteins Relativitätstheorie.

Jetzer hat nun aus heute zur Verfügung stehenden, wesentlich präziseren Daten über die Bewegungen der Planeten eine obere Grenze für die Grösse der kosmologischen Konstante abgeleitet. Da die Dunkle Energie wie eine Abstossungskraft wirkt, die proportional zum Abstand zwischen zwei Körpern – in diesem Fall zwischen Sonne und Planet – wächst, trägt sie einen kleinen Teil zur Periheldrehung bei. «Damit betreiben wir eine Art Hochpräzisionskosmologie, die es dereinst erlauben könnte, unsere «lokale» kosmologische Konstante mit derjenigen zu vergleichen, die sich durch Messungen der grossräumigen Strukturen des Universums ergeben hat.» Treten dabei Differenzen zutage, würde das bedeuten, dass die kosmologische Konstante nicht überall im Universum gleich gross ist.

Das wäre in der Tat spannend, aber ob es weiterhelfen würde, um die Natur der Dunklen Energie zu klären, erscheint fraglich. Tatsache ist: Zwölf Jahre nach ihrer Entdeckung weiss niemand, was hinter der Dunklen Energie

Zwischen den Galaxienhaufen und Filamenten weiten sich ozeanische Leeren, in denen es nichts gibt ausser Dunkle Energie.

letzt deshalb, weil es sich bei den Quintessenz-Theorien um eine ganze Familie von Theorien handelt, die alle unterschiedliche Ergebnisse prognostizieren», erklärt Seljak.

SUCHE IM ASTRONOMISCHEN HINTERHOF

Jetzer hingegen hat die kosmologische Konstante gewissermassen in unserem astronomischen Hinterhof bestimmt, und zwar anhand der Periheldrehung von Planeten in unserem Sonnensystem. Dabei handelt es sich um einen

steckt. Die Komponente, die drei Viertel der Energie im Universum ausmacht, ist zum neuen Mysterium der Kosmologie geworden. «Dass ich erkenne, was die Welt im Innersten zusammenhält», war Fausts Antrieb, sich der Magie zu ergeben. Jetzer und Seljak werden das nicht tun, doch wird sie die Frage, was die Welt im Äussersten auseinandertreibt, noch lange beschäftigen.

KONTAKT Prof. Phillipe Jetzer, jetzer@physik.uzh.ch; Prof. Uros Seljak, seljak@physik.uzh.ch

HALO, HUBBLE, SUPERNOVA

Astronomie und Astrophysik haben im Lauf ihrer Forschungsgeschichte ein kleines Universum von teils sehr bildhaften Fachbegriffen geschaffen.

DUNKLE ENERGIE Als Dunkle Energie wird eine besondere Form der Energie bezeichnet, die lange Zeit als hypothetisch galt. Die Dunkle Energie wurde als eine Verallgemeinerung der kosmologischen Konstante eingeführt, um die beobachtete beschleunigte Expansion des Universums zu erklären. Der Begriff wurde 1998 von Michael S. Turner geprägt.

DUNKLE MATERIE Dunkle Materie bezeichnet eine hypothetische Form von Materie, die zu wenig sichtbares Licht oder andere elektromagnetische Strahlung aussendet oder reflektiert, um direkt beobachtbar zu sein. Diese Eigenschaft teilt die Dunkle Materie mit der Dunklen Energie. Dunkle Materie macht sich durch gravitative Wechselwirkung mit sichtbarer Materie bemerkbar.

FILAMENTE Als Filamente (lat. «Faden, Faser») bezeichnet man die fadenförmigen Verbindungen im Universum zwischen Galaxienhaufen und Superhaufen.

GALAXIENHAUFEN (CLUSTER) Galaxiengruppen und Galaxienhaufen sind Ansammlungen von Galaxien im Universum. Galaxien sind nicht gleichförmig im Raum verteilt, sondern treten gehäuft in Strukturen auf, die sich seit Beginn der Expansion des Universums unter dem Einfluss der Schwerkraft gebildet haben und von dieser zusammengehalten werden. Galaxiengruppen und Galaxienhaufen bilden noch grössere Objekte, die Galaxiensuperhaufen. Galaxien, die nicht offensichtlich Teil einer Gruppe oder eines Haufens sind, heissen Feldgalaxien. Nach heutiger Vorstellung sind alle diese Strukturen Teile einer grossräumigen schaumartigen Verteilung von Haufen und verbindenden Filamenten, die sich um Hohlräume mit geringer Galaxiendichte gruppieren.

GRAVITATIONSLENSENEFFEKT Als Gravitationslinseneffekt wird die Ablenkung von Licht durch schwere Massen bezeichnet. Der Name rührt von der Analogie zu optischen Linsen und der wirkenden Kraft, der Gravitation, her. Grundsätzlich wird dabei das Licht einer entfernten Quelle wie eines Sterns, einer Galaxie oder eines anderen astronomischen Objekts durch ein, vom Betrachter aus gesehen, davorliegendes Objekt, die Gravitationslinse, beeinflusst. In deren Gravitationsfeld ändert sich die Ausbreitungsrichtung des Lichts, sodass die Position der Quelle am Himmel verschoben erscheint. Auch kann ihr Bild dabei verstärkt, verzerrt oder sogar vervielfältigt werden.

GRAVITATIONSWELLEN Gravitationswellen werden von der allgemeinen Relativitätstheorie vorhergesagt. Sie entstehen immer, wenn ein massebehaftetes Objekt eine Beschleunigung erfährt und breiten sich mit Lichtgeschwindigkeit aus. Dabei verändern sie die Struktur der Raumzeit, die sie durchlaufen; man kann sich anschaulich eine Streckung und Stauchung des Raumes vorstellen. In der klassischen Newtonschen Gravitationstheorie existieren sie nicht. Gravitationswellen wurden bislang noch nie direkt, jedoch indirekt durch ihre Wirkungen auf astronomische Objekte nachgewiesen.

HALO Der Halo (von griechisch hálos «Lichthof») einer Galaxie ist ein annähernd kugelförmiger Bereich, der grösser als die Galaxie ist und in dessen Zentrum diese eingebettet ist. Im Halo befinden sich Kugelsternhaufen und wenige, meistens alte Einzelsterne, die das Zentrum der Galaxie ausserhalb ihrer Rotationsebene, meistens auf exzentrischen Umlaufbahnen, umkreisen. Ausserdem findet man dort interstellare Gaswolken und Dunkle Materie, deren Gravitation die Galaxien zusammenhalten und deren Zusammensetzung noch unbekannt ist. Der Halo der Milchstrasse hat einen geschätzten Radius von 165 000 Lichtjahren.

HUBBLE-KONSTANTE Die Hubble-Konstante, benannt nach dem US-Astronomen Edwin Hubble, ist eine der fundamentalen Grössen der Kosmologie. Sie beschreibt die Rate der Expansion des Universums zum heutigen Zeitpunkt. Der zurzeit (Mai 2009) genaueste Wert für die Hubble-Konstante wurde durch Beobachtungen mit dem Hubble-Weltraumteleskop ermittelt und beträgt 74,2 Kilometer pro Sekunde pro Megaparsec.

KOSMISCHE HINTERGRUNDSTRAHLUNG Bei der Hintergrundstrahlung handelt es sich um elektromagnetische Strahlung, die aus jedem Bereich des Himmels nachgewiesen werden kann. Strahlung, die nicht konkreten singularen Quellen zuzuordnen ist, wird dabei der Hintergrundstrahlung zugerechnet. Die Strahlung im Mikrowellenbereich wird wegen ihrer herausragenden Bedeutung für die physikalische Kosmologie häufig kosmische Hintergrundstrahlung – auch Drei-Kelvin-Strahlung (wegen derer niedrigen Temperatur bzw. Energiedichte), engl. cosmic microwave background (CMB) – genannt.

PLANET Ein Planet, im engeren astronomischen Sinn auch «solarer Planet» genannt, ist ein Himmelskörper, der (a) sich auf einer keplerschen Umlaufbahn um die Sonne bewegt, (b) dessen Masse gross genug ist, dass sich das Objekt im hydrostatischen Gleichgewicht befindet – und somit eine näherungsweise kugelhähnliche Gestalt besitzt – und der (c) das dominierende Objekt seiner Umlaufbahn ist, das heisst, der diese von weiteren Objekten «geräumt» hat. Im weiteren Sinn der Planeten versteht man darunter auch einen entsprechenden Körper, der einen anderen Stern als die Sonne umläuft. Diese Objekte wer-

den daher auch «Extrasolare Planeten» oder kurz «Exoplaneten» genannt. Zudem existieren auch Planeten ausserhalb der Schwerkraftfelder von Sternen, die daher auch als «Objekt planetarer Masse» oder kurz «Planemo» bezeichnet werden.

ROTVERSCHIEBUNG Als Rotverschiebung elektromagnetischer Wellen wird die Verlängerung der gemessenen Wellenlänge gegenüber der ursprünglich emittierten Strahlung bezeichnet. Der Effekt ist aus der Astronomie bekannt, wo das Licht weit entfernter Galaxien zum Roten verschoben erscheint.

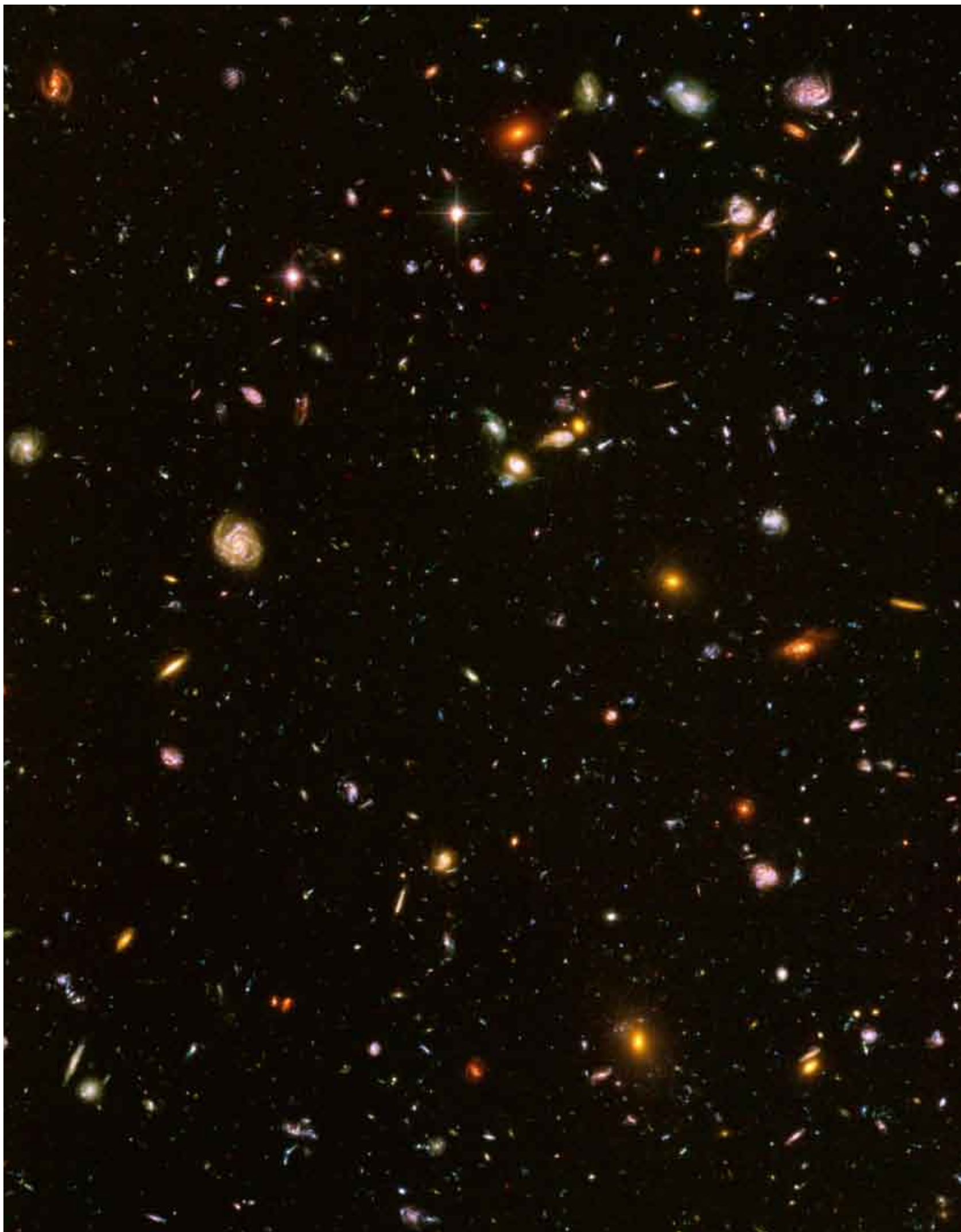
SCHWARZES LOCH Als Schwarzes Loch bezeichnet man ein astronomisches Objekt, dessen Gravitation so hoch ist, dass die Fluchtgeschwindigkeit für dieses Objekt ab einer gewissen Grenze, dem Ereignishorizont, höher liegt als die Lichtgeschwindigkeit. Der Ausdruck «Schwarzes Loch» wurde 1967 von John Archibald Wheeler geprägt und verweist auf den Umstand, dass auch elektromagnetische Wellen, wie etwa sichtbares Licht, den Ereignishorizont nicht verlassen können und es einem menschlichen Auge daher vollkommen schwarz erscheint.

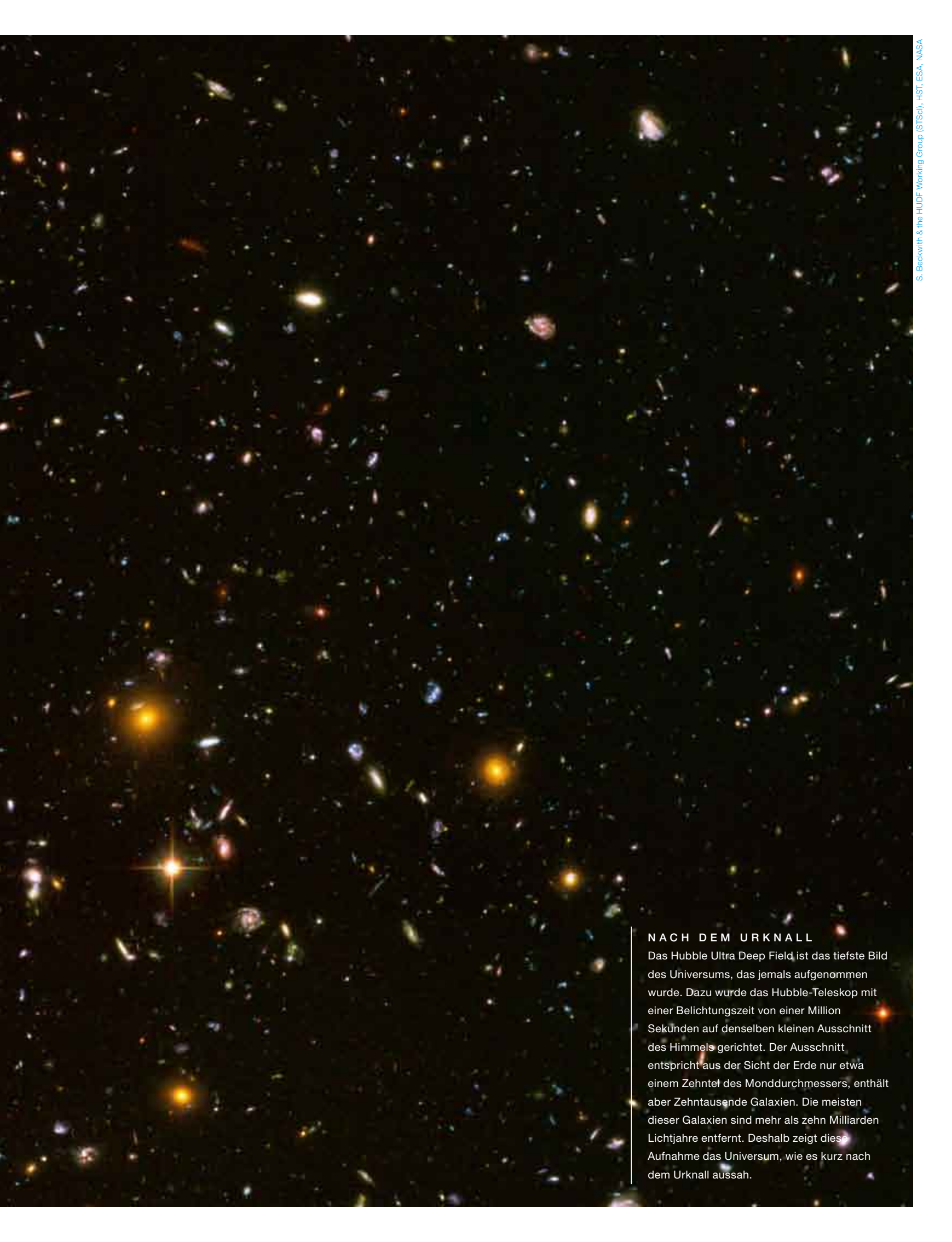
STERN Als Stern (lat. stella, ahd. sterno) wird in der Astronomie eine massereiche, selbstleuchtende Gaskugel bezeichnet, in der Alltagssprache hingegen jeder Himmelskörper, der dem blossen Auge punktförmig erscheint. Dass fast alle diese Lichtpunkte am Nachthimmel weit entfernte Sterne sind, ist eine der wichtigsten Erkenntnisse der modernen Astronomie.

SUPERNOVA Eine Supernova (Plural: Supernovae) ist das schnell eintretende, helle Aufleuchten eines Sterns am Ende seiner Lebenszeit durch eine Explosion, bei der der Stern selbst vernichtet wird. Die Leuchtkraft des Sterns nimmt dabei millionen- bis milliardenfach zu, er wird für kurze Zeit so hell wie eine ganze Galaxie, bei einer Hypernova sogar das Billiardenfache, also so hell wie ein Galaxienhaufen.

URKNALL Der Urknall ist nach dem Standardmodell der Kosmologie der Beginn des Universums. Im Rahmen der Urknalltheorie wird auch das frühe Universum beschrieben, das heisst die zeitliche Entwicklung des Universums nach dem Urknall. Der Urknall bezeichnet keine «Explosion» in einem bestehenden Raum, sondern die gemeinsame Entstehung von Materie, Raum und Zeit aus einer ursprünglichen Singularität. Als Begründer der Theorie gilt der Theologe und Physiker Georges Lemaître, der 1951 für den heissen Anfangszustand des Universums den Begriff «primordiales Atom» oder «Uratom» verwendete. Der Begriff Urknall (engl. Big Bang, wörtlich also grosser Knall) wurde von Sir Fred Hoyle geprägt, der als Kritiker diese Theorie unglaubwürdig erscheinen lassen wollte. Der deutschen Übersetzung fehlt dieser ironische Unterton.

Quelle: Wikipedia





NACH DEM URKNALL

Das Hubble Ultra Deep Field ist das tiefste Bild des Universums, das jemals aufgenommen wurde. Dazu wurde das Hubble-Teleskop mit einer Belichtungszeit von einer Million Sekunden auf denselben kleinen Ausschnitt des Himmels gerichtet. Der Ausschnitt entspricht aus der Sicht der Erde nur etwa einem Zehntel des Monddurchmessers, enthält aber Zehntausende Galaxien. Die meisten dieser Galaxien sind mehr als zehn Milliarden Lichtjahre entfernt. Deshalb zeigt diese Aufnahme das Universum, wie es kurz nach dem Urknall aussah.

DER TEUFEL ALS LATINIST

In welcher Sprache spricht der Teufel? Es ist nicht einfach, anhand mittelalterlicher Texte eine Antwort auf diese Frage zu geben, denn der gefallene Engel und die kleinen Teufelchen in seinem Gefolge irrlichtern in unterschiedlichen Gestalten durch die Literatur. Nur selten finden sich Szenen, in denen ein Teufel direkt und offen zu den Menschen spricht. Die Verfasser lassen uns allerdings häufig über den konkreten Wortlaut oder die benutzte Sprache im Dunkeln; wenn sie aber sagen, wie der Teufel spricht, zeigt sich, dass er auch darin wandelbar ist: Er kann wie ein Tier grunzen, in den Volkssprachen sprechen, eine geheimnisvolle besondere Sprache verwenden oder sich eben auch als Latinist erweisen. Einige Autoren aus dem 13. und 14. Jh. bewerten sogar die Lateinleistungen des Teufels und geben uns dadurch Einblick in ihre eigene Einstellung zur lateinischen Sprache und zu deren Verwendung.

*

Wir beginnen mit einem kurzen Bericht des Zisterziensers Caesarius von Heisterbach. Caesarius setzt einen erfahrenen Mönch in Szene, der einen Novizen anhand von lehrhaften Erzählungen in das monastische Leben und in Fragen des Glaubens einweist. In einer von ihnen verfolgt der Teufel ein tugendhaftes, jungfräuliches Mädchen und will sie verführen. Sie widersteht ihm standhaft, was ihn in Rage bringt. In einem Haus, in dem sie sich aufhält, tobt der Plagegeist und wird von allen Anwesenden gehört. Ich übersetze nun Caesarius' Erzählung:

«Manche sagten zu ihm: ‹Teufel, kennst Du das Vaterunser?› Weil er antwortete, ‹kenne ich bestens›, baten sie ihn, es aufzusagen. Und er sagte: ‹Pater noster, qui es in coelum, nomen tuum, fiat voluntas et in terra, panem nostrum quotidianes da nobis hodie, sed libera nos a malo› [In etwa: Vater unser im Himmel, Dein Name, Dein Wille geschehe so in Erden, unser täglich

chem Brot gib uns heute, sondern befreie uns von dem Bösen]. Und nachdem er in diesem Gebet mehrere Sprünge und Fehler gemacht hatte, fügte er laut auflachend hinzu: ‹So sagt ihr Laien euer Gebet.› Als er über das Credo gefragt wurde, sagte er, er kenne es gut und bestens und begann so: ‹Credo Deum Patrem omnipotentem.› (Ich glaube, dass Gott Vater allmächtig ist). Und als einige sagten: ‹Du musst sagen, credo in Deum› (ich glaube an Gott), und er antwortete: ‹Credo Deo› (ich glaube Gott), drängten ihn einige gebildete Männer, die anwesend waren, die Wortwahl des Teufels beobachteten und die besondere Bedeutung des Akkusativs verstanden, zu sagen: ‹Credo in Deum.› Aber sie konnten ihn nicht dazu bringen.»

Der Teufel führt mit seinem Vaterunser die Gläubigen vor, die ihr Gebet nachlässig sprechen und verunstalten. Ähnliche Geschichten finden sich in anderen Sammlungen erbaulicher Erzählungen für Mönche oder für die Predigt. Namentlich bekannt ist der Teufel Titivillus, der die beim Gebet verschluckten Silben einsammelt; manchmal wird er im Chor gesehen, manchmal erscheint er dem Abt als ein Bettler, der mit einem schweren Sack unterwegs ist. Eng mit diesen Geschichten verwandt ist die Vision eines Klerikers, der in der Hölle eine grosse Zahl von Priestern sah, die unter riesigen Lasten gequält wurden; was sie erdrückte, waren alle Silben, die sie beim Psaltergebet ausgelassen hatten. Hinter diesen Geschichten verbirgt sich nicht etwa ein Glaube an die magische Kraft der Sprache und die damit einhergehende Furcht, dass ein verändertes Gebet seine Wirkung verlieren könnte. Die Prediger wollen mit diesen Erzählungen zur Aufmerksamkeit beim Gebet ermahnen, denn die Nachlässigkeit beim Gebet zeigt, dass der Betende sich nicht innerlich beteiligt. Es ist diese mangelnde Hingabe, die hier kritisiert wird, und nicht das schlechte Latein an sich.

Anders verhält es sich mit dem zweiten Teil der Geschichte, der Weigerung des Teufels, die Wendung ‹credo in Deum› zu verwenden. In Caesarius' Text erklärt dies der erfahrene Mönch inhaltlich: Der Teufel glaubt, dass es Gott gibt und dass er mächtig ist; er glaubt aber nicht an Gott, denn er wandelt nicht in der Gottesliebe. Für diese Weigerung könnte es aber einen anderen Grund geben, der als bekannt vorausgesetzt und deshalb von Caesarius nicht erwähnt wurde. ‹Credere in Deum› ist nämlich eine Wendung, die es in der Literatursprache der klassischen Latinität nicht gibt und deshalb von einem Puristen abgelehnt werden könnte.

Nun wird der Teufel, wenn er in anderen Texten dieser Zeit Latein spricht, zuweilen als Verfechter grammatikalischer Korrektheit dargestellt. Dies sieht man zum Beispiel bei den Geschichten von ungebildeten Besessenen, die auf einmal korrekt Latein sprechen. In der Chronik des Franziskaners Salimbene wird geschildert, wie sich ein Franziskaner, zu dem ein scheinbar besessener Bauer gebracht wird, vergewissert, ob sich wirklich ein Teufel seines Gegenübers bemächtigt hat, indem er den ungebildeten Mann auffordert, Latein zu reden. Allerdings zeigt sich in dieser Geschichte, dass auch der Teufel auf unüberwindbare Schwierigkeiten stossen kann. Der Bauer – oder soll man eher sagen, der Teufel in ihm – antwortet auf Latein, macht aber einen Fehler und wird vom Mönch wegen seiner schlechten Grammatik ausgelacht. Der Teufel verteidigt sich: ‹Ich kann so gut Latein reden wie du, aber die Zunge dieses Bauern ist so grob, dass ich sie kaum führen kann.›

Noch klarer erscheint diese Besorgnis um die grammatikalische Korrektheit im Text eines Zisterziensers, der den Abt Richalm von Schöntal seine Visionen in kleinen dialogischen Szenen schildern lässt. Richalm hat eine seltene und beunruhigende Gabe: Er kann die Teufel hören und verstehen, weshalb er über ihre Umtriebe im Kloster bestens informiert ist. Einmal erwähnt er einen lateinischen Satz, den die Teufel gesagt haben. Sein Gesprächspartner fragt nach, ob die Teufel wirklich Latein gesprochen hätten, und Richalm antwortet: ‹So ist es. Denn sie sprechen Latein und kümmern

sich eifrig um eine wohlgeordnete, nicht fehlerhafte Rede. Und wenn einer von ihnen es vermeidet, einen Fehler zu machen, freut er sich sehr darüber und prahlt damit. Nicht einmal Schüler, die sich vor der Rute fürchten, meiden Fehler so sorgfältig wie sie.»

*

Warum präsentieren diese Autoren die Teufel als gute, um Korrektheit bemühte Lateinsprecher? Darin spiegeln sich Spannungen, die tiefe Wurzeln haben. Sie gehen zurück auf das dritte Jahrhundert, als das Christentum die kultivierten Schichten der Bevölkerung erreichte. In dieser Zeit entstanden die ersten lateinischen Übersetzungen der Septuaginta (einer griechischen Übersetzung des hebräischen Kanons) und des Neuen Testaments, die heute mit dem Sammelbegriff «Vetus Latina» bezeichnet werden. Sie weisen eine eigentümliche Sprache auf, denn der Respekt vor dem heiligen Wort hat sie geprägt: Die Übersetzer folgten ihrer Vorlage wörtlich und passten sogar manche griechische Ausdrücke dem Lateinischen an, ohne sie zu übersetzen; auch Hebraismen finden sich darin, ferner Lehnwörter und Lehnprägungen, ungewöhnliche oder sogar ganz und gar unlateinische Konstruktionen und Wendungen.

Gleichzeitig steht die Vetus Latina dem gesprochenen Latein nahe und nimmt Wörter, Formen und Strukturen daraus auf, die der Literatursprache fremd waren. Die Heiden griffen dieses seltsame sprachliche Gebilde an. Im Gegenzug verteidigten die Christen die niedrige Sprache der Bibel: Die piscatores (Fischer) hatten eine Botschaft vorgetragen, die sich ohne Rekurs auf die Kunstgriffe der Rhetorik behaupten konnte und die sie über die oratores (Redner) siegen liess. Aber diese Verteidigungen der niedrigen Sprache bedeuteten nicht, dass die Christen die Pflege eines korrekten Lateins aufgegeben hätten. In ihrer Praxis orientierten sie sich an den antiken Stilmustern und bedienten sich der etablierten literarischen Gattungen. Diese etwas widersprüchliche Haltung findet sich auch im ganzen Mittelalter: Die niedrige, schlichte, demütige Sprache wird in einem gepflegten Stil verteidigt. Das eigentümliche Latein der Bibel – das durch die Redak-

tionsarbeit des Hieronymus in den meistbenutzten Bibelabschnitten kaum verändert wurde – wurde respektiert, es wurde aber auch als eine Besonderheit gesehen. Die lateinische Bibel wurde nie ein Stilmuster.

Besonders folgenreich für die lateinische Literatursprache im Mittelalter waren die Überlegungen des Kirchenvaters Augustinus über die Sprache der Predigt in seinem Traktat *De doctrina christiana*. Augustinus orientiert sich weitgehend an den Vorschriften der antiken Rhetorik, die er den Bedürfnissen der Predigt anpasst, doch muss er eine wichtige Verschiebung vornehmen. Die antiken Redelehren sehen die Latinitas (die sprachliche Korrektheit) und die Perspicuitas (die Klarheit und Verständlichkeit) als zwei Sprachtugenden des Redners. Beide gehen Hand in Hand, denn veraltete, fremdsprachige und erfundene Wörter erschweren das Verständnis.

Die Ausgangssituation war für Augustinus aber eine andere. Viele christliche Inhalte konnten nicht mit den vorhandenen sprachlichen Mitteln der Bildungssprache ausgedrückt werden: Neuschöpfungen und Gräzismen waren notwendig. Ausserdem orientierte sich das Latein der Gebildeten an den grossen Werken der klassischen Zeit und wich deshalb von der Umgangssprache ab; Augustinus wollte aber, dass die christliche Botschaft alle, auch die Ungebildeten, erreiche. Deshalb kann in seinen Augen die Latinitas in Widerspruch zur Perspicuitas stehen. Der christliche Redner – sagt Augustinus – muss sich vor allem verständlich ausdrücken. Er soll zwar auch korrekt reden, aber im Zweifelsfall muss er der Verständlichkeit den Vorzug vor der Korrektheit geben.

*

Diese Spannung zwischen Verständlichkeit und Korrektheit wurde im Laufe der Zeit immer stärker: In der Romania verwandelte sich die Sprache zutiefst, ausserdem erreichte das Christentum Völker, die kein Latein sprachen. Die Kirche hätte das Lateinische aufgeben müssen, um dem Gebot der Perspicuitas zu genügen, aber Augustinus' gleichzeitige Forderung nach einer korrekten Sprache wirkte dem entgegen. Auch das Prestige der antiken Literatursprache, das Vorbild der spätantiken

Kirchenlehrer und Kirchenväter wogen schwer. Latein blieb die Sprache der Liturgie und der kirchlichen Schriften; nur sehr langsam erschienen die Volkssprachen in Werken für die private Frömmigkeit; sogar die lateinische Predigt hielt sich bis in die Neuzeit, wenn auch mit einem immer eingeschränkteren Wirkungsbereich. Man sieht es gut am Beispiel der Hildegard von Bingen, die als Prophetin ihre Autorität von Gott selbst bezog. Obwohl sie als Sprachrohr Gottes fungierte, liess sie ihre Schriften auf grammatikalische Korrektheit überprüfen und verbessern.

Die Latinität hatte aber ihre moralischen Fallstricke. Man konnte auch zu viel Wert auf das Äussere legen, die Grammatik und den eleganten Stil mehr schätzen als die Inhalte, die sie vermitteln. Eine elegante Sprache konnte zu Stolz und Hochmut verführen. Autoren, die spöttisch auf die weniger Begabten herabblicken, finden sich immer wieder – mancher beichtet sogar diese Verfehlung. Die Verfasser der Erzählungen, die den Teufel als vollkommenen Latinisten inszenieren, gehören alle religiösen Orden an, die die Demut und die Einfachheit hochhielten und die Innerlichkeit beim Gebet forderten. Diese Autoren wollten mit ihren Geschichten auch die Ungebildeten erreichen und bedienten sich dafür einer schlichten, gut verständlichen und nach den Massstäben der klassischen Latinität häufig inkorrekten Sprache. Wie mir scheint, verteidigten sie ihre Sprache, auf die die Gelehrten herabblickten, indem sie den Teufel zu einem Verfechter grammatikalischer Korrektheit stilisierten.

Carmen Cardelle de Hartmann ist Ausserordentliche Professorin für Lateinische Philologie des Mittelalters und der Neuzeit am Mittellateinischen Seminar der Universität Zürich.

KONTAKT cardelle@access.uzh.ch

DURCH EUROPA REITEN

Brigitte von Rechenberg erforscht die Heilung von Frakturen, Knorpel- und Knochendefekten bei Schafen. Die Veterinärmedizinerin ist Vegetarierin, Tierschützerin und hat gelernt, mit Paradoxen zu leben. Von Paula Lanfranchi

Ein regnerischer Morgen. Auf dem Areal des Tierspitals fährt ein Transporter vor. Brigitte von Rechenberg begrüsst den Fahrer mit einem freundlichen Handschlag, man ist per Du. Der Transporter hat zwei Schafe gebracht. Sie stammen aus der 400-köpfigen Versuchstierherde des Tierspitals, untergebracht irgendwo im Aargau. «An einem wunderschönen Ort», betont die Forscherin in ihrem bodenständigen Bündnerdialekt. Die beiden Schafe gesellen sich blökend zu ihren zwei Artgenossen in der Stallbox. Ab heute müssen sie hungern, denn schon bald wird ihnen die Chirurgin und ihr Team einen knochenbildenden Knochenersatz injizieren. Gelingt das Projekt, wird diese Substanz irgendwann als Stimulans für osteoporotische menschliche Wirbel dienen.

«Unser wichtigstes Forschungsgebiet», sagt die feingliedrige Mittfünfzigerin, «ist die Heilung von Frakturen, Knorpel- und Knochendefekten.» Nach Tumorentfernungen beim Menschen etwa gelte es, den entstandenen Defekt rasch mit knocheninduzierendem Material zu füllen. Dazu verwendet man heute Knochen-späne, die man dem Patienten entnimmt – eine schmerzhaft und komplikationsanfällige Prozedur. Die Forschung sucht deshalb weltweit nach biologischen Ersatzstoffen. Dabei arbeitet man hauptsächlich mit Schafmodellen, da Schafe den gleichen Knochenmetabolismus und eine ähnliche Knochenstruktur aufweisen wie der Mensch. Brigitte von Rechenbergs Team hat bereits einen Knochenzement mitentwickelt, den die Unfallchirurgen bei Knochendefekten verwenden, und die Abteilung für Knochenhistologie der Musculoskeletal Research Unit (MSRU), die sie an der Vetsuisse-Fakultät aufgebaut hat, hat sich inzwischen als Referenzlabor etabliert – schöne Erfolge für die 1993 von Brigitte von Rechenberg gegründete Gruppe. «Meine Passion für Tiere»,

erklärt sie, «ist der Antrieb für die Forschung.» Und praxisbezogen wählt sie ihre Themen. Immer wieder war die Chirurgin auf die sogenannte subchondrale Knochenzyste gestossen, eine entzündliche Erkrankung beim Pferd. «Die Heilungsrate ist gering – wegen der gerade mal nussgrossen Zyste beim Sprunggelenk müssen 60 Prozent der betroffenen Pferde im Alter von drei bis vier Jahren abgetan werden.» Von Rechenbergs Gruppe fand den Mechanismus der Entstehung und arbeitet nun an biotechnologischen Therapiemethoden.

Als Forscherin ist die heute 56-Jährige eine Quereinsteigerin. Ursprünglich hatte sie zwar in die klinische Forschung gehen wollen, ent-

nicht alle Fachkollegen klar. Sie hat gelernt, mit Paradoxen zu leben. Einerseits engagiert sie sich aktiv im Tierschutz und ist Vegetarierin, andererseits führt sie Tierversuche durch und räumt ein, man mache sich schuldig, wenn man ein solches Tier töte. «Als Mitglied der kantonalen Tierversuchskommission versuche ich, die beiden Gegensätze zu verbinden.»

«PATRIARCHALES GEHABE»

Von Selbstdarstellungen auf Kongressen, «diesem patriarchalischen Gehabe», hält Brigitte von Rechenberg wenig. Viel wichtiger ist ihr, ihre Mitarbeitenden so zu fördern, dass sie «geseichte Forschung betreiben und publizieren können». Inzwischen arbeiten 20 Personen am MSRU. Ihre Gruppe, bemerkt sie mit einer Prise Mutterstolz, veröffentliche zusammen mit ihren Forschungspartnern acht bis zehn Originalpublikationen im Jahr; die Abgänger kommen oft zu Traumstellen.

Brigitte von Rechenberg ist beliebt, das sieht man an der herzlichen Art, mit der ihr die Mitarbeitenden begegnen. Und das liegt nicht an

«Statt Gehorsam zu fordern, versuche ich, meinen Leuten Wahlmöglichkeiten und ein Sicherheitsgefühl in der ›Herde‹ zu geben.»

schied sich dann aber für die Chirurgie. 1993 dann ergriff sie die Chance, in Zürich eine Forschungsgruppe aufzubauen. «Damals», bekennt sie mit ihrer typischen Offenheit, «hatte ich keine Ahnung von den Möglichkeiten der Molekularbiologie; zu meiner Zeit wurde das im Studium noch nicht gelehrt.» Also tat sie das, was sie schon als angehende Chirurgin gemacht hatte: Sie besuchte führende Wissenschaftler in den USA und Kanada und Kongresse. Im Jahr 2000 habilitierte sie sich an der Universität Zürich.

Brigitte von Rechenberg, geboren als Tochter eines in der Kindheit aus Deutschland eingewanderten Ökonomen mit jüdischem Hintergrund und einer in Indonesien aufgewachsenen holländischen Mutter, strahlt die Souveränität einer intellektuell, aber auch materiell unabhängigen Persönlichkeit aus. Wissenschaftliche Tabus gibt es für sie nicht. Damit kommen

Kolma, dem herzigen Labradorbaby, das sie seit ein paar Wochen begleitet, sondern an der Art, wie sie ihre Gruppe leitet. «Ich nehme mir», betont sie, «die Mühe, meine Leute bewusst als Frau zu führen und – noch wichtiger – mir selbst entsprechend: Authentizität ist das oberste Gebot.» Von Rechenbergs Führungsstil orientiert sich an der Join-up-Methode. Monty Roberts, der «Pferdeflüsterer», hatte diese zum Zähmen von Pferden entwickelt. Ihr gefällt die Methode, weil sie aus dem Verhalten der Leitstute abgeleitet ist: «Statt Gehorsam zu fordern, versuche ich, meinen Leuten Wahlmöglichkeiten und ein Sicherheitsgefühl in der ›Herde‹ zu geben.»

Frauenförderung ist Brigitte von Rechenberg wichtig. Deshalb hat sie das Vet Net gegründet, eine Gruppe zur Unterstützung von Wiedereinsteigerinnen. Denn trotz der Feminisierung der Tiermedizin, gibt sie zu bedenken, sei das Kader noch immer männlich. Auch sie selber