

QUELL DES LEBENS

Das Wasser legte einen weiten Weg durchs All zurück, bevor es auf unseren Planeten kam. Die Stationen dieser Reise können wir heute recht gut nachvollziehen.

VON HERMANN-MICHAEL HAHN



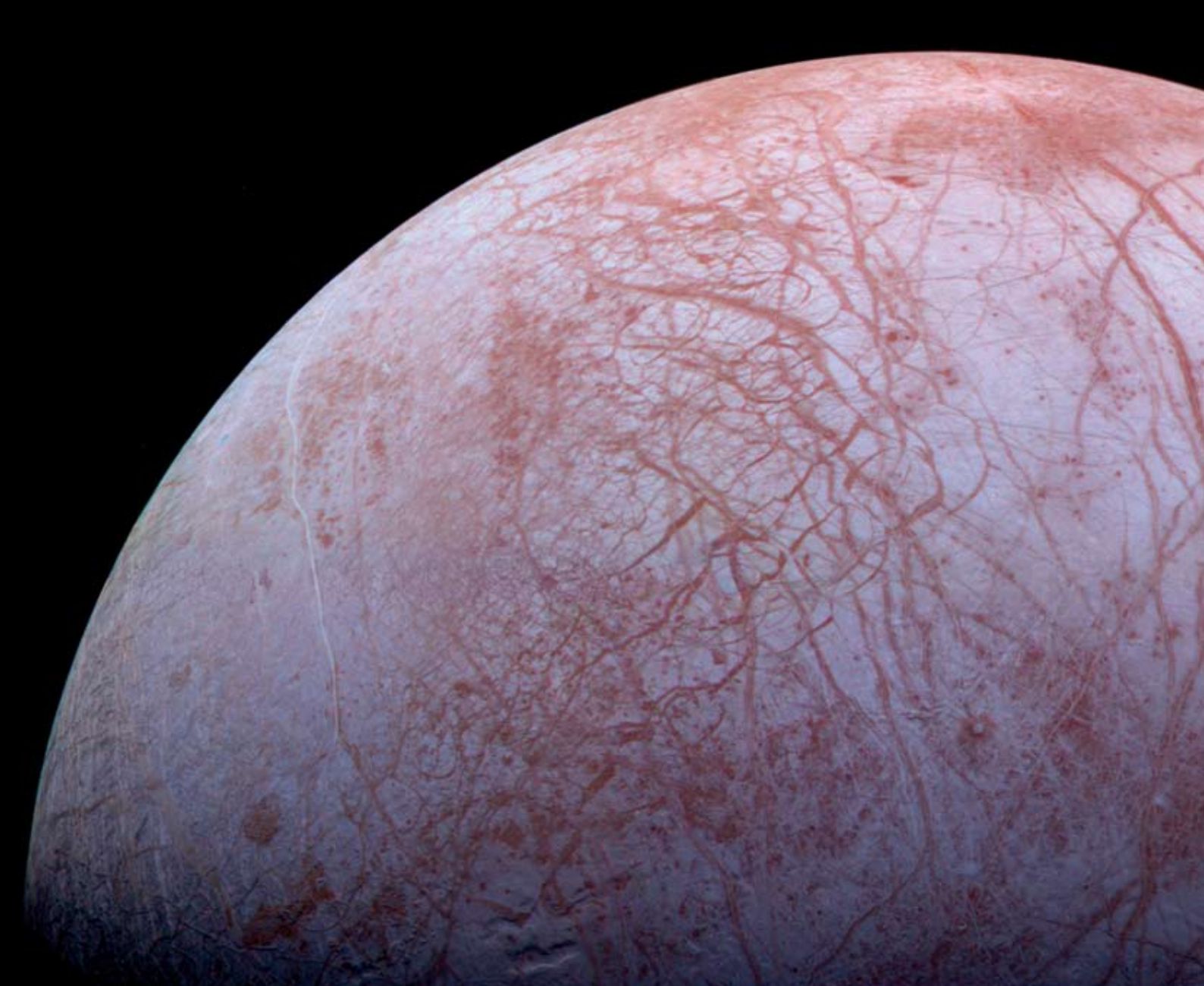
Wasser ist zum Waschen da, falleri und fallera ...«, schallte es in den 1950er Jahren aus zahllosen Radios – ein früher Blödelschläger. Damals kannte man Wasser nur von der Erde, vermutete es allenfalls noch auf dem Mars und vielleicht auf der Venus, deren extreme Umweltbedingungen zu jener Zeit unbekannt waren.

Natürlich wusste man schon in der Mitte des vergangenen Jahrhunderts, dass Wasser nicht nur »zum Zähneputzen zu benutzen« oder von der Feuerwehr zu verwenden ist. 1953 hatte der US-amerikanische Biologe und Chemiker Stanley Miller mit seinem Kollegen Harold Urey ein Aufsehen erregendes Experiment durchgeführt. Darin zeigten die beiden, dass Wasser, Methan, Ammoniak und Wasserstoff sich unter Einwirkung elektrischer Entladungen zu wichtigen Lebensbausteinen zusammenfügen – und zwar auf rein chemischem Weg. Das Miller-Urey-Experiment schlug hohe Wellen, weil es belegte, dass in der frühen Erdatmosphäre aus toter Materie organische Moleküle entstehen konnten.

Überall Geplätscher

Die Rolle des Wassers auf der Erde beschränkt sich aber nicht nur auf biologische Aspekte. Das flüssige Nass formt Landschaften, beeinflusst Wetter und Klima und spielt bei der Entstehung vieler Minerale eine wichtige Rolle. Da liegt die Frage nahe, woher dieser Stoff eigentlich stammt – immerhin gibt es auf der Erde rund anderthalb Trillionen Tonnen davon.

Etwa zur gleichen Zeit, da der oben zitierte Schläger produziert wurde, suchten die Astronomen nach einer Erklärung dafür, wie die chemischen Elemente entstanden. Damals steckte die Urknalltheorie noch in den Anfängen. Allerdings zeichnete sich bereits ab, dass das Universum aus einer Urexplosion hervorgegangen sein musste – eine These, die ursprünglich der belgische Priester und Physiker Georges Lemaître vorgetragen hatte. Der britische Astronom Fred Hoyle hielt nicht viel von die-



ser Idee und bezeichnete die hypothetische Urexplosion abwertend als »Big Bang« – großer Knall. Dieser Begriff wurde später ironischerweise von den Befürwortern der Urknalltheorie übernommen.

Schon in den 1950er Jahren vermuteten die Forscher, dass der Urknall die Elemente Wasserstoff und Helium – und in viel geringerem Ausmaß auch Lithium und Beryllium – hervorgebracht hatte. Der russische Physiker George Gamow und sein amerikanischer Kollege Ralph Alpher spekulierten sogar, dass alle übrigen Elemente ebenfalls in dieser heißen Anfangsphase des Universums entstanden seien – eine These, die sich später als unhaltbar erwies. Hier sollten Fred Hoyle und andere Astronomen Recht behalten, die die Entstehung der schweren Elemente in das Innere der Sterne und damit in eine spätere Zeit verlegten.

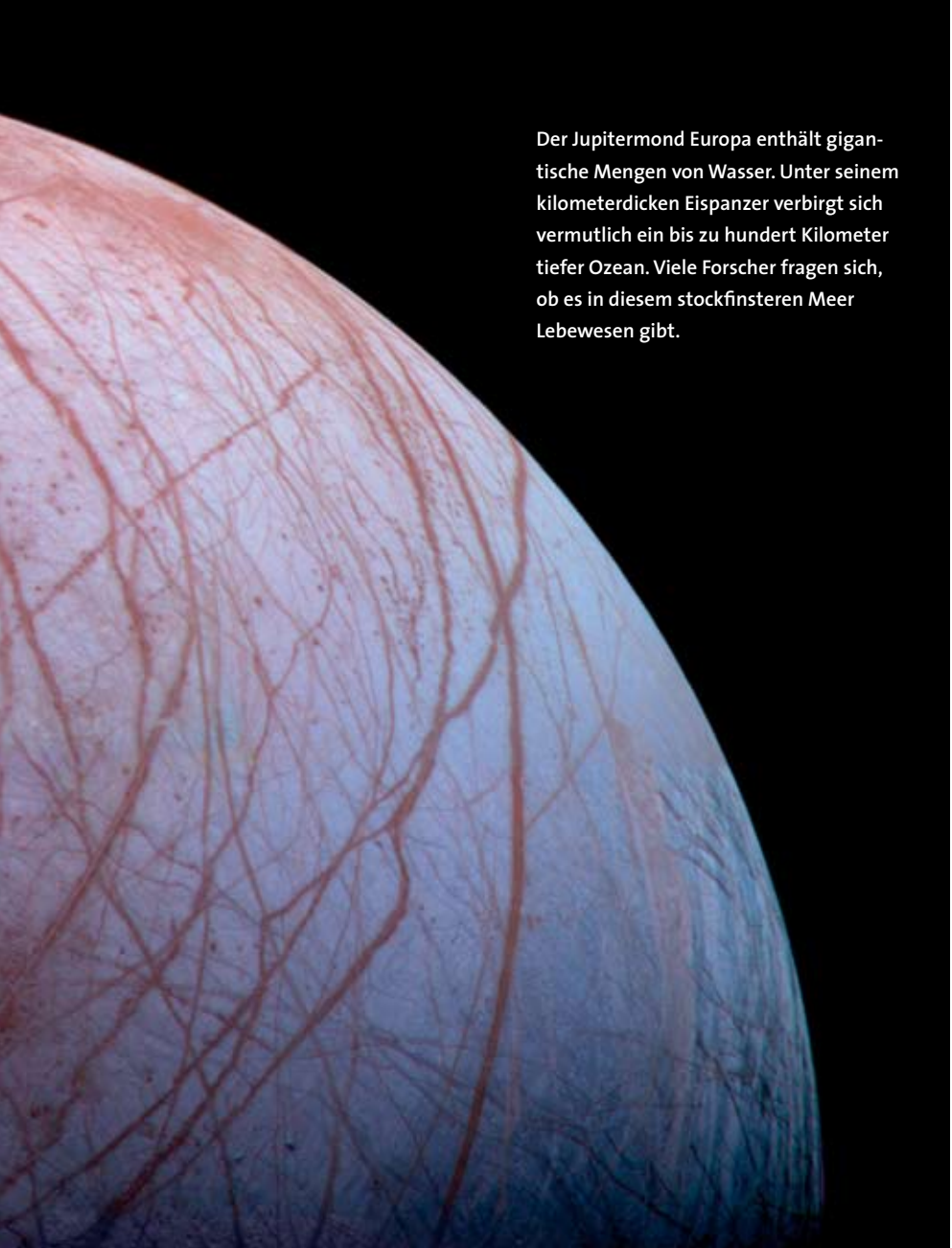
Am Ende der »ersten drei Minuten« (so ein Buchtitel von Steven Weinberg aus dem Jahr 1977) bestand die gewöhnliche Materie zu 92 Prozent aus freien Protonen und Elektronen, also ionisierten Wasserstoffatomen. Dies regte den deutschen Wissenschaftspublizisten Hoimar von Ditfurth bereits 1972 zu dem Buchtitel »Im Anfang war der Wasserstoff« an.

Eine Vernichtungsgorgie

Was aber passierte innerhalb der ersten drei Minuten? Nach den derzeit gängigen Modellen vollzog sich in dieser Zeit eine gewaltige Materialschlacht, bei der sich die Teilchen-Antiteilchen-Paare, die aus dem anfänglichen Energieblitz entstanden waren, zum allergrößten Teil gegenseitig auslöschten und im Strahlungshintergrund aufgingen.

Rund eine Millionstelsekunde nach dem Urknall war die Temperatur des expandierenden Kosmos auf eine Billion Grad gesunken. Jetzt konnten sich Quarks und Antiquarks in Dreiergruppen zusammenschließen, um Protonen und Neutronen sowie deren Antiteilchen – zusammenfassend als Baryonen bezeichnet – zu bilden. Aus bisher unbekannten Gründen kamen damals auf eine Milliarde Antiteilchen genau eine Milliarde plus ein Teilchen, sodass am Ende der massenhaften Auslöschung von Materie und Antimaterie ein winziger Bruchteil, nämlich ein Zweimilliardstel, der ursprünglichen baryonischen Materie übrig blieb. Aus diesen Protonen und Neutronen entstanden später die heutigen Atomkerne.

Für die Materie im frühen Kosmos war es nicht leicht, sich zu Sonnen zu verdich-



Der Jupitermond Europa enthält gigantische Mengen von Wasser. Unter seinem kilometerdicken Eisanter verbirgt sich vermutlich ein bis zu hundert Kilometer tiefer Ozean. Viele Forscher fragen sich, ob es in diesem stockfinsternen Meer Lebewesen gibt.

NASA

ten. Um einen Stern zu bilden, muss eine Gaswolke schrumpfen. Dabei erhitzt sie sich, weil eine Kontraktion zu einem Anstieg der Temperatur führt. Mit fortschreitender Verdichtung steigt die Temperatur und damit der Innendruck der Wolke, was die weitere Kontraktion immer stärker behindert und schließlich unmöglich macht. Die Gaswolke muss also Wärme abgeben, um so weit zu kollabieren, dass aus ihr ein Stern hervorgeht.

Im heutigen Universum übernehmen vor allem Kohlenstoff- und Sauerstoffatome sowie Wassermoleküle die Aufgabe, überschüssige Wärme aus der schrumpfenden Gaswolke an die Umgebung abzuleiten (siehe Kasten rechts). Im frühen Universum, als diese Elemente oder Moleküle noch nicht existierten, musste die Abkühlung über den Wasserstoff erfolgen – und

dieses Kühlsystem funktioniert wesentlich schlechter. Deshalb konnten damals nur sehr große Wasserstoffwolken kollabieren; die dabei entstehenden ersten Sterne enthielten vermutlich mehrere hundert Sonnenmassen (AH 10/2006, S. 14).

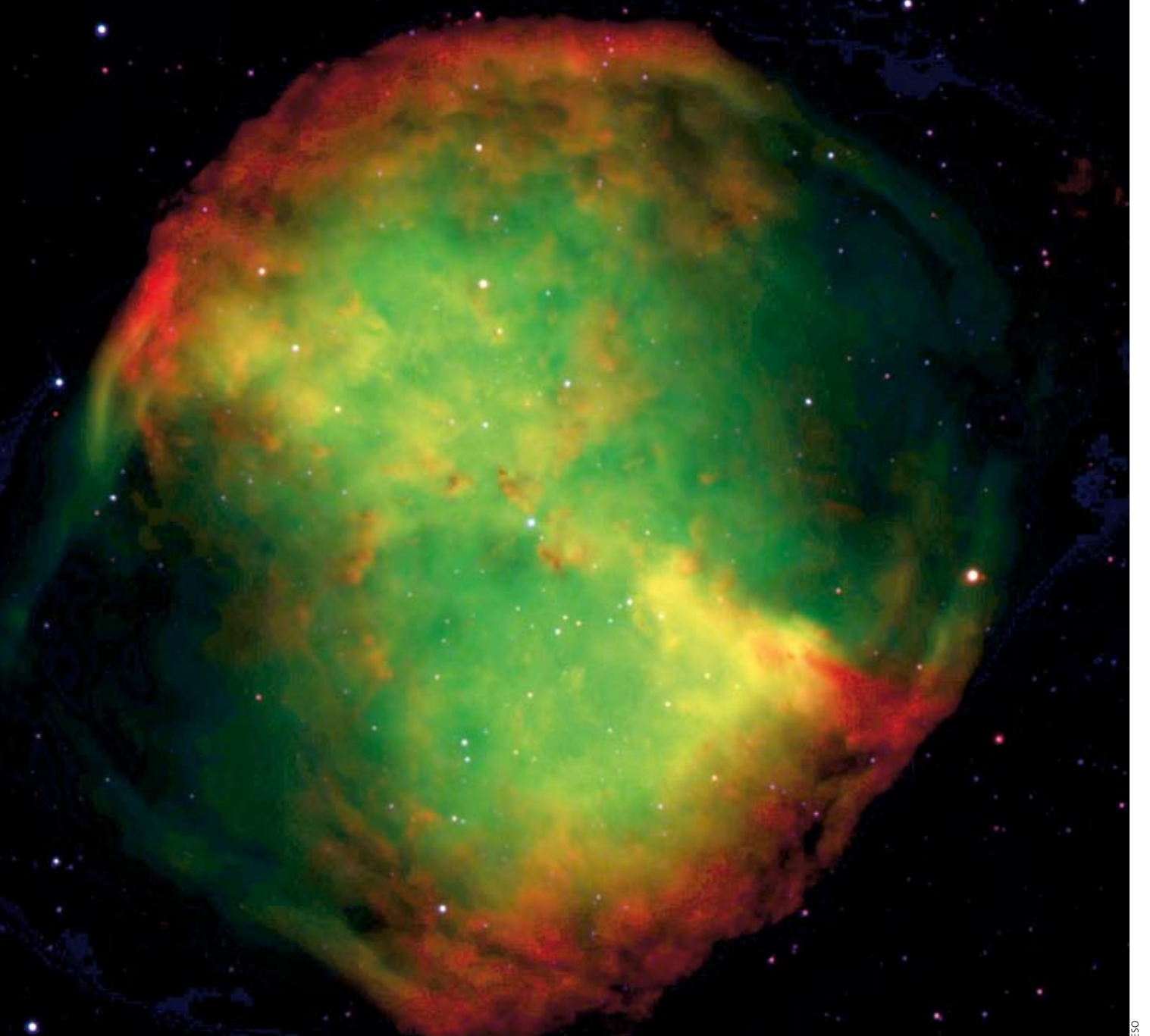
Leuchtende Monster

Diese stellaren Giganten müssen extrem heiß gewesen sein und damit äußerst stark gestrahlt haben. Ihre Ultraviolettstrahlung ionisierte die interstellare Materie in weitem Umkreis – ein Prozess, den wir heute als Reionisation bezeichnen (die kosmische Materie war zuvor schon einmal ionisiert gewesen, während der ersten 300 000 Jahre des Universums nämlich, als Materie und Strahlung noch miteinander gekoppelt waren). Außerdem können die ersten Sterne nicht lange existiert haben: Mons-

KÜHLMITTEL IM KOSMOS

Wasserstoff und Helium werden in kosmischen Molekülwolken energetisch nicht angeregt. Daher können sie die Wärme aus solchen Wolken nur schlecht ableiten. Wesentlich bessere Kühlmittel sind neben Staub vor allem Sauerstoff, Kohlenstoff und chemische Verbindungen dieser Elemente – etwa Wasser oder Kohlenmonoxid (CO).

Wenn Wasserstoffmoleküle mit CO-Molekülen zusammenstoßen, übertragen sie einen Teil ihrer Bewegungsenergie auf diese. Die CO-Moleküle geben die zusätzliche Energie in Form von Wärmestrahlung in den Weltraum ab. Dadurch wird die Molekülwolke gekühlt.



Der Planetarische Nebel M27 enthält große Mengen Sauerstoff (hier: grün dargestellt). Im Zentrum des Nebels stirbt ein Stern und stößt dabei seine Hüllen ab, sodass eine gewaltige Gaswolke entsteht.

tersonnen wie sie verbrauchen ihren nuklearen Brennstoff in wahnwitzigem Tempo und gehen schon nach kurzer Zeit in äußerst heftigen Explosionen unter. Bei den unvorstellbaren Drücken und Temperaturen in ihrem Innern entstehen mittels Kernfusion viele schwere Elemente, darunter Kohlenstoff und Sauerstoff. Als die ersten Sterne schließlich nach kurzem und intensivem Dasein explodierten, verteilten sie ihr Erbe – darunter Sauerstoffkerne – großzügig im Weltraum.

Blick in die Vergangenheit

Leider sind die stellaren Himmelskörper der ersten Generation bislang noch nicht aufgespürt worden, dazu reichen die heutigen Teleskope nicht aus. Allerdings ha-

ben die Astronomen extrem lichtstarke Sternexplosionen am Rand des sichtbaren Universums beobachtet – vermutlich die finalen Detonationen solcher Monstersterne. Bei diesen so genannten Hypernovae breiteten sich Stoßwellen fast lichtschnell vom Explosionsort aus und heizten das umgebende Gas nicht nur auf, sondern schoben es auch wie ein Schneepflug zusammen.

Das löste den Kollaps vieler Gaswolken und damit die Entstehung neuer Sonnen aus. Die Sterne der zweiten Generation fielen deutlich kleiner und masseärmer aus als ihre Vorgänger. Denn sie gingen aus Wolken hervor, die bereits von schweren Elementen durchsetzt waren und dadurch viel wirksamer gekühlt wurden.

Ein Blick in unsere nähere Umgebung zeigt, dass das Erbe der Sterne – die schweren Elemente – stetig zunimmt und gewissermaßen mit Zins und Zinseszins an kommende Sternengenerationen weitergegeben wird. Planetarische Nebel zum Beispiel leuchten oft in einem charakteristischen Licht, das von doppelt ionisierten Sauerstoffatomen ausgesendet wird (siehe Abbildung links).

Mittlerweile weiß man, dass alternde Sterne auch schon vor ihrem Untergang Wolken aus Wasserdampf ausstoßen, die eine Temperatur von etwa 700 Grad haben und sich mit hoher Geschwindigkeit ins All entfernen. Dies zeigten unter anderem Beobachtungen mit europäischen Radioteleskopen (Bild rechts). Aus der Stärke der gemessenen Radiostrahlung leiteten Forscher auch die Dichte der Wolken ab, sie ist rund 50-mal höher als die Dichte des gewöhnlichen Sternwinds. Möglicherweise werden solche Gebilde durch starke Magnetfelder zusammengehalten.

Rhythmische Grüße aus dem All

Die Wasserwolken in der Umgebung der roten Überriesen waren nur deshalb nachweisbar, weil sie starke, eng gebündelte und im Gleichtakt schwingende Radiowellen aussenden – ein Phänomen, das in Anlehnung an die »Lichtverstärkung durch stimulierte Emission« (Laser) als »Mikrowellenverstärkung durch stimulierte Emission« (Maser) bezeichnet wird.

An dieser Stelle verliert sich die Spur des Wassers vorübergehend, es versickert gleichsam in den Tiefen des interstellaren Raums und tritt erst in dichteren Molekülwolken wieder als Beimengung in Erscheinung. Solche meist recht kalten Wolken, die hauptsächlich aus molekularem Wasserstoff bestehen, treten vor allem im Umfeld von Sternentstehungsgebieten auf. Innerhalb großer Wolken sind die Gasmassen von äußeren Strahlungseinflüssen weit gehend abgeschirmt und können so weit abkühlen, dass ihre Schwerkraft schließlich ausreicht, um eine Kontraktion einzuleiten. Wird dabei ein kritischer Punkt überschritten, gibt es kein Zurück mehr: Ein protostellarer Kern ist entstanden, der silizium- und kohlenstoffhaltige Staubpartikel enthält. An diesen Partikeln frieren die Gasmoleküle an, wodurch sie »ortsfest«

werden und sehr viel häufiger mit anderen Gasteilchen reagieren. Spätestens hier können aus Wasserstoff- und Sauerstoffteilchen Wassermoleküle entstehen.

Alternde Sterne stoßen Wolken aus Wasserdampf aus, die ins Weltall davonrasen

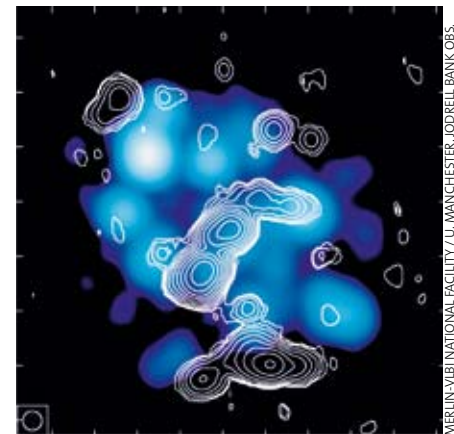
Unterdessen setzt sich der Kollaps des Protosterns fort. Die Dichte und die Temperatur in seinem Innern steigen, bis sie Werte erreichen, die die Verschmelzung von Wasserstoff zu Helium ermöglichen. Eine neue Sonne flammt auf, bleibt aber vorerst unsichtbar, weil die umgebenden dichten Staubwolken sie verbergen.

Im Lauf der Zeit verformen sich diese Staubwolken zu einer mehr oder minder flachen Scheibe, wobei sie, weil ihr Drehimpuls erhalten bleiben muss, immer schneller rotieren. Innerhalb der Scheibe verklumpen Gas- und Staubeilchen und bilden immer größere Brocken. In der Nähe des Sterns ist die Strahlung intensiv genug, um die festgefrorenen Gasmoleküle wieder von den Staubpartikeln zu lösen, in Ionen zu zerlegen und nach außen zu blasen. Dadurch verschwinden die Wassermoleküle aus der sternnahen protoplanetaren Scheibe, dieser Bereich wird also »trockengelegt«.

Ab einer bestimmten Entfernung vom Stern, die von seiner Temperatur und damit von seiner Masse abhängt, bleiben die gefrorenen Gase jedoch an die Staubpartikel gebunden, sodass das Eis dort überdauert und in die langsam größer werdenden planetaren Himmelskörper eingebaut wird. Man nennt diese Entfernung Frostgrenze.

Wie wurde die Erde zur Oase?

Da die Theoretiker die Frostgrenze unseres Sonnensystems zwischen Mars- und Jupiterbahn ansiedeln, stellt sich die Frage, ob das Wasser unseres Heimatplaneten schon während seiner Entstehung in ihn eingelagert und später von Vulkanen freigesetzt wurde oder ob es nachträglich mit Asteroiden und Kometen zur Erde gelangte. So könnten poröse Planetenvorstufen einst auf stark elliptischen Bahnen gekreist sein, wobei sie regelmäßig in die Frostzone der



MERLIN-VIBI NATIONAL FACILITY / U. MANCHESTER, JODRELL BANK OBS.

KOSMISCHER NEBELWERFER

Um den veränderlichen Stern S Persei wurden wasserdampf- (blau) und sauerstoffhaltige Wolken (weiße Konturen) nachgewiesen. Messungen von 1994 und 1999 zeigten die Lage der Wasserwolken: Sie sind annähernd gleichmäßig um den Stern herum verteilt und entfernen sich von ihm.



Die Erdoberfläche (hier: Asien, Ostafrika und Indischer Ozean) ist zu mehr als zwei Dritteln von Meeren bedeckt. In flüssigem Wasser entstanden vermutlich die ersten Lebewesen.

protoplanetaren Scheibe eintauchten und sich dabei wie ein Schwamm vollzogen. Anschließend könnten sie das Wasser in die innere Zone und damit zur Erde befördert haben. Aber auch eine nachträgliche »Bewässerung« aus dem äußeren Asteroidengürtel ist denkbar, zumal das Wasserstoff-Deuterium-Verhältnis von irdischem Wasser mit dem des Wassers von kohligen Chondriten (einer besonderen Meteoritenart, die vermutlich aus dem äußeren Asteroidengürtel stammt) übereinstimmt. Natürlich ist es auch möglich, dass beide Prozesse parallel stattfanden.

Die Antwort weiß der Mond

Die Lösung des Rätsels, woher das Wasser auf der Erde kam, sollte sich aus einem besseren Verständnis der Planetenentstehung ergeben. Aber auch die weitere Erforschung des Mondes könnte wichtige Hinweise liefern. Seit Jahrzehnten gibt es Hinweise darauf, dass an den lunaren Polen, die permanent im Schatten liegen, Wassereis im Staub verborgen sein könnte (siehe »Was wäre, wenn«, S. 34). Weil der Mond wahrscheinlich bei einem sehr heftigen und heißen Zusammenprall der jungen Erde mit einem marsgroßen Protoplaneten entstand, muss dieses Eis, wenn es existiert, nachträglich dort abgelagert worden sein.

Es könnte unter anderem von Asteroiden- und Kometeneinschlägen stammen, die Wasserdampf freisetzen, der dann in eine vorübergehend existierende Mondatmosphäre gelangte und sich anschließend an den Polen als Eis niederschlug.

Sollte es auf unserem Trabanten Wasser geben, das aus dem Kosmos stammt, wäre es kaum plausibel anzunehmen, dass die Erde diesbezüglich leer ausgegangen ist. Denn auch sie war in der Frühzeit des Sonnensystems einem heftigen Bombardement aus dem Weltall ausgesetzt. Das Gesamtvolumen des Wassers auf der Erde beträgt etwa 1,4 Milliarden Kubikkilometer; ein zehn Kilometer großer Kometenkern enthält hundert bis zweihundert Kubikkilometer davon. Es bedurfte also lediglich zehn Millionen solcher Kometenkerne, um die Erde mit ihrem Wasservorrat auszustatten.

Doch ganz gleich, ob ursprünglich »eingekellert« oder später geliefert: Unser Wasser ist kosmischen Ursprungs und damit nicht nur für Durstige ein Stück Himmel auf Erden. <<

HERMANN-MICHAEL HAHN arbeitet als Wissenschaftsjournalist und Buchautor in Köln. Links zum Thema finden Sie unter astronomie-heute.de/artikel/914126.

LEBENSELIXIER

Wasser ist die Grundlage allen Lebens, wie wir es kennen. Und das hat seinen Grund. Denn Wasser

- > ist ein sehr gutes Lösungsmittel und eignet sich daher als universelles Medium für chemische Reaktionen,
- > ist bei Temperaturen flüssig, bei denen organische Moleküle stabil sind,
- > hat bei vier Grad Celsius seine größte Dichte, was verhindert, dass Gewässer von unten zufrieren.