

2

Wir lassen das restliche Universum entstehen

Um bei den Olympischen Spielen eine Medaille zu gewinnen, muss man natürlich hart trainieren und an sich glauben. Wie wir heute wissen, ist es aber noch viel wichtiger, die richtigen Eltern zu haben, sprich: über die richtige genetische Veranlagung für den Leistungssport zu verfügen. Dasselbe gilt für einen Stern, der sich mit einem schönen Planetensystem – vielleicht sogar mit bewohnbaren Planeten – umgeben möchte: das Entscheidende ist, dass er in der richtigen kosmischen Wolke aus Gas und Staub geboren wird.

Welches aber sind die „richtigen“ Wolken? Gewiss nicht jene der ersten Generation, die unmittelbar aus den primordialen Gasmassen hervorgegangen sind. Vielmehr sollten nachfolgende Generationen von Sternen jenes Gas bereits mit den wertvollen Elementen angereichert haben, die für das Leben erforderlich sind. Als Kinderstube besser geeignet ist also eine kleine Wolke mittleren Alters, in der viele Sternengenerationen bereits alles angelegt haben, was wir zum Leben brauchen – und das ist Einiges.

Der Raum zwischen den Sternen

Wenn wir einmal genauer schauen, woraus unser Körper besteht, so finden wir eine regelrechte Mustersammlung des Mendelejewschen Periodensystems, wobei die chemischen Elemente in sehr unterschiedlichen Mengen vertreten sind. Um die organische Chemie des Lebens überhaupt in Gang zu bringen, ist ein Cocktail namens CHNOPS, bestehend aus den sechs Grundelementen Kohlenstoff (C), Wasserstoff (H), Stickstoff (N), Sauerstoff (O), Phosphor (P) und Schwefel (S), unverzichtbar. Natürlich gehört noch viel mehr dazu, angefangen beim Calcium für die Knochen bis hin zum Eisen für das Blut; außerdem darf man jene blaublütigen Krebse und Skorpione nicht vergessen, die für den Sauerstofftransport Kupfer verwenden. Das heißt, je mehr chemische Elemente für die Erschaffung eines schönen, bewohnbaren Planeten zur Verfügung stehen, umso besser.

Diese Anreicherung des kosmischen Gases mit anderen Elementen außer Wasserstoff und Helium wird von den Astronomen *Metallizität* genannt (dieser Begriff ist eigentlich nicht ganz präzise, denn gemeint sind nicht nur Metalle). Da alles außer ein paar wenigen leichten Kernen von den Sternen gebildet wird, ist es besser, nach dem Urknall etwas Zeit verstreichen zu lassen.

Als die erste Sternengeneration, die wir übrigens noch nie beobachtet haben, „angeknipst“ wurde, gab es im Universum noch kaum Elemente. Der erste entscheidende Schritt zu unserer Metallizität musste erst noch gemacht werden. Wie wir gesehen haben, entstanden damals kurzlebige Riesensterne: Aufgrund ihrer großen Masse war ihr

Brennstoff (hauptsächlich Wasserstoff) rasch aufgebraucht. Bei den gewaltigen Explosionen, die ihr Leben beendeten, wurde das Gas in ihrer Umgebung durch schwerere Elemente angereichert.

Dank einer immer komplexeren Nukleosynthese nahm die Metallizität der Sterne – und parallel dazu auch diejenige des interstellaren Gases – ab der zweiten Sternengeneration deutlich zu.

Aber woher wissen wir eigentlich, woraus die Sterne bestehen? Seit eineinhalb Jahrhunderten können wir mithilfe der *spektroskopischen Astronomie* das Licht eines Sterns analysieren und in seinen Farben die „Signatur“ der Elemente des Mendelejewischen Periodensystems entdecken, wie wir sie auf der Erde im Labor beobachten. Dieser große Erfolg der Astrophysik war eine herbe Niederlage für die „Salonphilosophen“ wie den Positivisten Auguste Comte, der noch 1835 über die Himmelskörper schrieb:

Wir haben die Möglichkeit, ihre Formen, Entfernungen, Größen und Bewegungen zu bestimmen, während wir niemals durch irgendein Mittel ihre chemische Zusammensetzung oder ihre mineralische Struktur und erst recht nicht das Wesen der organischen Körper, die auf ihnen leben, bestimmen können (zitiert in Comte 1994, S. 134–135).

Nur 30 Jahre später wurde erstmals das Spektrum eines Sterns – das der Sonne – untersucht, und diese Spektralanalyse offenbarte uns die chemische Zusammensetzung unseres Sterns.

Für die Wahl der richtigen Wolke empfiehlt es sich also, abzuwarten. Unsere Sonne hat sich klugerweise ungefähr

acht Milliarden Jahre Zeit gelassen. Mehr als die Hälfte der Geschichte des Universums verging, bevor sie vor fünf Milliarden Jahren aus einer Wolke geboren wurde, die mit vielen „Metallen“ angereichert war.

Woraus besteht das *interstellare Medium*, also jener Raum, aus dem unsere Urwolke hervorging? Astronomen teilen ihn für gewöhnlich in vier Komponenten ein, die verschiedenen Aggregationsphasen entsprechen:

A: Eine dünne und heiße Komponente (zwischen 10 000 und einer Million Grad), die gleichmäßig im Weltraum verteilt ist und hauptsächlich aus ionisiertem Wasserstoff besteht, mit einer sehr geringen Dichte: weniger als ein Teilchen pro Kubikzentimeter.

B: Eine zweite, weit verbreitete neutrale Komponente, die kälter (ungefähr 100 Kelvin) und dichter (bis zu 100 neutrale Wasserstoffatome pro Kubikzentimeter), aber für die ultraviolette Strahlung der Sterne noch durchlässig ist; hier können Moleküle entstehen, jedoch nur ganz einfache: komplexere Moleküle würden durch die UV-Strahlung zerstört.

C: Eine Komponente, die aus vielen kleinen – den gängigsten – Wolken besteht; diese sind mehr oder weniger gleichmäßig in der Galaxie verteilt. Ihre Masse beträgt ungefähr zehn Sonnenmassen. Sie werden *Molekülwolken* genannt, weil ihre Dichte die Bildung und das Überleben von Wasserstoff in Molekülform (bis zu 100 H₂-Moleküle pro Kubikzentimeter) erlaubt; aus dem Kollaps solcher Wolken entstehen Sterne wie die Sonne.

D. Schließlich die Riesenmolekülwolken, die vor allem in den Spiralarmen der Galaxie verteilt sind. Sie weisen hohe Dichten, niedrige Temperaturen (20 Kelvin) und Massen

von bis zu 10 000 Sonnenmassen auf; aus diesen Riesenvolken entstehen die massiveren Sterne. Sie sind zwar selten, aber besonders interessant, denn im dichten und gut geschützten Innern dieser Wolken können sich auch komplexe Moleküle bilden.

Interstellare Moleküle

Das häufigste Molekül unseres Universums und somit des interstellaren Raums ist das Wasserstoffmolekül (H_2). Gleich darauf folgt Kohlenstoffmonoxid (CO), und schon an dritter Stelle das dreiatomische Wasser (H_2O); das zeigt, wie wichtig Wasser im Kosmos und – vielleicht nicht ganz zufällig – auch in unserem Leben ist.

Moleküle wie CO und H_2O brauchen Atome (Kohlenstoff und Sauerstoff), die nicht in den ersten drei Minuten nach dem Urknall entstanden sind, sondern von den Sternen synthetisiert wurden. Jüngsten Beobachtungen zufolge war das CO (und vielleicht auch das Wasser) bereits vorhanden, als das Universum erst 800 Millionen Jahre alt war, kaum mehr als ein Zwanzigstel seines heutigen Alters. Die Nukleosynthese muss also schon früh begonnen haben. Denken wir nur voller Ehrfurcht an die Sterne der ersten Generation, die seit über zehn Milliarden Jahren verschwunden sind: ihnen verdanken wir die ersten grundlegenden Atomkerne, ohne die es weder unsere Welt noch uns selbst gäbe.

Aber kommen wir zurück zu den interstellaren Wolken: Sie sind „Kameradinnen“ (und zum Teil Zeitgenossinnen) jener Wolke, aus der wir vor fünf Milliarden Jahren her-

vorgegangen sind. Besonders interessant sind die großen Wolken, in denen jene komplexen organischen Moleküle entstehen können, die für das Leben erforderlich sind. Ihre chemischen Bestandteile sind im Wesentlichen molekularer Wasserstoff, atomarer Wasserstoff und ein paar Prozent reaktionsträges Helium, mit einem kleinen aber äußerst wichtigen Anteil (ein bis zwei Prozent) an schweren Elementen.

Die Temperatur im Innern der Riesenmolekülwolken beträgt nur kaum ein Dutzend Grad über dem absoluten Nullpunkt, also zu wenig für uns Normalsterbliche, aber ideal für einen ungestörten Molekülbildungsprozess. Die Dichte dieser Wolken liegt zwischen 1 000 und einer Million Teilchen pro Kubikzentimeter; das ist im Vergleich zur Erdatmosphäre zwar sehr dünn, für interstellare Verhältnisse jedoch sehr dicht.

Die Jagd nach den verschiedenen Molekülarten dieser Wolken begann vor mehreren Jahrzehnten, als die Radioastronomie so genannte „Moleküllinien“ entdeckte, also charakteristische elektromagnetische Emissionen, die von der Struktur und von der Zusammensetzung der jeweiligen Molekülart abhängig sind. Wenn die Wolke nachweislich die gleichen Strahlungen abgibt wie die, die von einem bekannten Molekül im Labor erzeugt werden, ist das der Beweis dafür, dass es jenes Molekül auch da oben zwischen den Sternen gibt.⁸

⁸ Diese Moleküle finden sich sowohl im Inneren der dichten interstellaren Wolken, als auch in der Materie um die Roten Riesen, die fast am Ende ihres Lebens angelangt sind und reichlich „Metalle“ enthalten, welche sie über ihren stellaren Wind abgeben.

Diese Art der Beobachtung ist dank der Teleskope, die unsere Erde umkreisen, noch effektiver geworden, denn Wellenlängen wie Infrarot, welche für viele Molekulararten kennzeichnend sind, können die Erdatmosphäre nur schwer durchdringen; daher ist es von Vorteil, dass die Astronomie diese Strahlung heute direkt im Weltraum messen kann.

Auf diese Weise wurden in den interstellaren Wolken unzählige Molekulararten entdeckt. Ihre zunehmende Komplexität beweist, dass zwischen den Sternen ein gigantisches Chemielabor mit optimalen Herstellungsbedingungen am Werke ist: Hier gibt es nicht nur die gesamte Bandbreite an Temperaturen, die ein Chemiker sich nur wünschen kann, sondern praktisch auch unendlich viel Zeit und Energie für die Verarbeitung der chemischen Zutaten. Kein Wunder also, dass dieses Labor aufregende Ergebnisse im Bereich der Molekülsynthese hervorgebracht hat.

Bis heute wurden mehr als 120 Molekulararten im Kosmos entdeckt, angefangen beim CO, bis hin zu Molekülen mit 15 bis 20 Atomen. Diese Moleküle – vom Ammoniak (NH_3), über die Blausäure (HCN) und Essigsäure ($\text{CH}_3\text{CO}-\text{OH}$), bis zum Diethylether ($\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OCH}_2\text{CH}_3$) und so weiter – überleben nur im Innern der dichten Molekülwolken, wo sie vor der ultravioletten Strahlung der Sterne geschützt sind. Wie wir gesehen haben, vertragen komplexe Moleküle keine „Sonnenbräune“: Sie werden von eher schwachen chemischen Bindungen zusammengehalten, und die UV-Strahlung hat genügend Energie, um sie zu zerstören.

Bausteine des Lebens und Sternenstaub

Nach und nach entstehen in den richtigen interstellaren Wolken auch die Aminosäuren, die „Bausteine des Lebens“: 20 davon bilden die Proteine, aus denen wir bestehen. Wie sie genau entstehen, ist noch unklar. Bestenfalls wissen wir etwas über die chemische Bildung der einfachsten biologischen Aminosäure Glycin ($\text{NH}_2\text{CH}_2\text{COOH}$), die durch das zufällige Zusammentreffen von organischen Molekülen wie Essigsäure und Stickstoffmolekülen wie Ammoniak entsteht (aber nur unter den richtigen Bedingungen).

Es ist sehr schwierig, die Moleküle der interstellaren Aminosäuren zu beobachten: Zum einen, weil sie sich in sehr dichten und undurchsichtigen Wolken befinden, wo sie vor UV-Strahlung geschützt sind; zum anderen, weil man sich im „Wald“ der Moleküllinien, die von den verschiedenen komplexen Molekülarten erzeugt werden, selbst mit den besten Radioteleskopen verirren kann.

Zum Glück liefert uns nicht nur die Beobachtung aus der Ferne Beweise für die Existenz der Bausteine des Lebens im Weltraum. Wie wir in den nächsten Kapiteln sehen werden, gelangen die Aminosäuren auch an Bord der Meteoriten zu uns auf die Erde; oder wir reisen ihnen entgegen und gewinnen sie aus den Kometenschweifchen.

Aber komplexe Moleküle allein reichen nicht aus, um eine Welt mit Leben zu füllen. Um zu überleben und vielleicht sogar noch komplexer zu werden, brauchen die Moleküle etwas Solideres und Massiveres, an dem sie sich festhalten können.

Abgesehen von dem Gas in unterschiedlichen Aggregationsphasen gibt es zwischen den Sternen auch interstellara-

re Staubteilchen. Sie sind winzig, nur etwa ein Zehntel bis wenige Dutzend Mikrometer groß, und bestehen aus einer feuerfesten Substanz, zum Beispiel einem Kern aus amorphen Silikaten, einer darüber liegenden Schicht aus kohlenstoffhaltigen Verbindungen und einer Außenschicht aus Eiswasser, Kohlendioxid oder Methan. Einige sind sogar Kohlenstoffkristalle, winzige Diamanten, die nur ein Tausendstel Millimeter messen. Sie sind zwar lupenrein, aber ein wenig zu klein für einen Ring oder einen Ohrstecker.

Woher kommt dieser äußerst kostbare Sternenstaub, durch den die allmähliche Bildung von festen, viel größeren Himmelskörpern überhaupt erst möglich wird?

Möglicherweise sind seine Körnchen direkt in den expandierenden Atmosphären bestimmter Sterne oder bei den Supernova-Explosionen entstanden. Niemand weiß das genau. Aber glücklicherweise gibt es die Körnchen und sie bewegen sich im interstellaren Raum, weil sie durch den Strahlungsdruck der Sterne angetrieben werden. Wenn sie zusammenstoßen, können sie auseinander brechen. Manchmal verschmelzen sie jedoch und werden allmählich zu immer größeren Aggregationszentren. Schließlich dringen sie auch in große und kleine Molekülwolken ein.

Von der Wolke zur Kinderstube der Sterne

Sterne werden fast nie allein geboren: Meist bilden sie ein System, beziehungsweise eine regelrechte Kinderstube, in der alle Sterne derselben Generation angehören.

Die Bildung eines Sternensystems beginnt mit dem Kollaps der dichteren Teile einer Molekülwolke. Die Rede ist von jenen inneren Teilen, die vor schädlicher Strahlung geschützt sind, und in denen die komplexen und interessantesten Moleküle sowie die interstellaren Staubkörner enthalten sind. Wie bereits erwähnt, bedeutet „Kollaps“ schlichtweg, dass die Materie, aus der die Wolke besteht, in sich selbst, also in Richtung ihres Kerns, zusammenfällt. Sobald die Masse der Wolke eine kritische Grenze (die so genannte *Jean-Masse*) überschreitet, ist dies unvermeidbar; ein Kollaps kann aber auch durch die Druckwelle einer nahen Supernova-Explosion ausgelöst werden, wenn also ein Riesenstern einer früheren Generation auf spektakuläre Weise stirbt.

Eine solche gewaltige Supernova, bei der in einer einzigen Sekunde mehr Energie freigesetzt wird, als unsere Sonne in ihrem gesamten Leben abstrahlt, breitet sich mit einer Druckwelle aus, die das Gas und die Wolken in ihrem Wirkungsbereich erfasst. Die von der Welle verursachte Kompression kann eine höhere lokale Dichte erzeugen, die ausreichend ist, um den Kollaps der bereits reifen, aber noch etwas unentschlossenen interstellaren Wolken in Gang zu setzen. Auch aus diesem Grund werden die Sterne meist in großen Verbänden geboren, und zwar dort, wo die Sterne der früheren Generation – die die Wolke bereits mit wertvollen Metallen angereichert haben – gerade sterben.

Durch den beginnenden Kollaps verdichtet sich die Zentralregion der Wolke, und die Kompression verursacht außerdem eine Temperaturerhöhung. Während die noch sternenlose Gasmaterie der Wolke allmählich kondensiert, erhöht sich ihre natürliche Rotationsgeschwindigkeit (die interstellaren Wolken stehen nie still – das könnten sie auch



<http://www.springer.com/978-3-8274-2954-4>

Wir sind die Marsmenschen
Unsere Reise vom Urknall bis zum Leben
Bignami, G.F.
2012, 220 S. 25 Abb., Softcover
ISBN: 978-3-8274-2954-4