

RUDOLF VON STEIGER<sup>1</sup>

## Vom Urknall bis heute – die Entstehung der Erde

### Zusammenfassung des Vortrags vom 11. Februar 2014

*Das Universum ist vor knapp 14 Milliarden Jahren in einem singulären Ereignis entstanden: dem Urknall. Diese Zeit in einen Vortrag von weniger als einer Stunde zusammenzufassen ist eine beträchtliche Herausforderung: Pro Minute wären etwa 250 Millionen Jahre, die Rotationsdauer unserer Galaxie abzudecken. In einer Tour d'Horizon durch das sichtbare Universum sollen zuerst die Beobachtungen vorgestellt werden, auf welchen die Urknalltheorie basiert: das Hubble-Gesetz, die Hintergrundstrahlung, und die Häufigkeiten der fünf leichtesten Isotope. Mit diesen lässt sich aber noch kein Sonnensystem bauen, deshalb beschreiben wir in einem zweiten Schritt die Entstehung der Elemente in Sternen. Erst danach können sich aus Gas- und Staubscheiben um neu entstehende Sterne auch Planetensysteme bilden, wie z.B. vor 4.6 Milliarden Jahren um unsere Sonne. Dass auf einem dieser Planeten Leben entstehen konnte hängt nochmals von vielen Faktoren ab, die wir aufzeigen wollen, um schliesslich die Frage zu diskutieren, ob dies auch anderswo möglich wäre.*

### Der Urknall

Wir wissen heute, dass unser Universum vor knapp 14 Milliarden Jahren in einem unvorstellbar heissen und dichten, singulären Ereignis entstanden ist: dem Urknall oder «Big Bang». Das Ereignis selber oder sogar dessen Ursache, Sinn und Zweck lassen sich mit den Methoden der Physik zwar nicht erfassen, doch über seine Folgen schon nach kürzester Zeit – ca.  $10^{-43}$  Sekunden – bis heute haben wir ein ziemlich klares Bild, das in den letzten Jahrzehnten unter anderem dank dem Hubble-Teleskop noch deutlich an Schärfe gewonnen hat. Es beruht im Wesentlichen auf drei fundamentalen Beobachtungen:

- Das Universum expandiert (Hubble-Gesetz)
- Das Universum ist erfüllt vom einer isotropen Hintergrundstrahlung
- Die Häufigkeiten der leichtesten Isotope (H, He, Li) entsprechen den Voraussetzungen

<sup>1</sup> Prof. Dr. Rudolf von Steiger, International Space Science Institute, Bern, und Physikalisches Institut, Universität Bern

Die Expansion des Universums wurde im Jahr 1929 durch Edwin Hubble entdeckt. Er hatte beobachtet, dass sich alle anderen Galaxien von unserer Milchstrasse zu entfernen scheinen, und zwar umso schneller, je weiter weg sie sich bereits befinden. Man könnte also denken, wir wären im Zentrum einer gigantischen Explosion. Dem ist aber nicht so: Wegen der direkten Proportionalität von Distanz und Geschwindigkeit sehen dies die Beobachter auf jeder anderen Galaxie ebenso. Das Universum expandiert also ähnlich wie ein Hefeteig in *Abbildung 1*.



*Abbildung 1:* Das Universum expandiert ähnlich wie ein Hefeteig aufgeht: Jede Galaxie (bzw. Rosine) entfernt sich von jeder anderen umso mehr, je weiter sie bereits auseinanderliegen. Das Bild ist aber insofern inkorrekt als dass das Universum nicht wie der Kuchen in einem bereits existierenden Raum aufgeht und auch Puderzucker hat es keinen darüber (Bild: G.A. Tammann).

Das Hubble-Gesetz lässt sich aus Albert Einsteins Feldgleichungen der Allgemeinen Relativitätstheorie von 1915 herleiten, wenn man davon ausgeht, dass das Universum auf grossen Skalen homogen und isotrop ist. Dies hatte Alexander Friedmann bereits wenige Jahre später erkannt, doch seine Lösung hatte einen Haken: Sie beschreibt ein dynamisches, expandierendes (oder kontrahierendes) Universum, während das damalige Weltbild von einem statischen, ewig gleichen Universum ausging (steady state). Dies hatte Einstein veranlasst, seine Feldgleichung um einen Term zu erweitern, der eine statische Lösung erlauben sollte: die kosmologische Konstante. Nachdem dann Hubble die Expansion des Universums beobachtet hatte strich Einstein diesen Term wieder durch und bezeichnete ihn als die «grösste Eselei» in seiner Arbeit. Dies jedoch nicht weil er inkorrekt gewesen wäre (er war es nicht), sondern vermutlich eher, weil er die Arbeit Friedmanns nicht zum Anlass genommen hatte, die Expansion des Universums vorauszusagen. Heute ist jedoch Einsteins kosmologische Konstante quasi durch die Hintertür wieder ins Standardmodell der Kosmologie aufgenommen worden: Sie beschreibt die Dunkle Energie, welche erklärt, dass sich die Expansion des Universums heute beschleunigt.

Wenn man ein expandierendes Universum gedanklich in die Vergangenheit zurückverfolgt, führt dies sofort zur Erkenntnis, dass es früher kleiner gewesen sein muss. Diese scheinbar triviale Folgerung bedeutet aber sogleich, dass es auch wärmer gewesen sein muss, denn wenn alle Bestandteile weniger Platz zur Verfügung hatten bewegten sie sich dafür umso schneller. Dies führt zu einer höhe-

ren Temperatur, genau wie bei der Luft in einer Velopumpe, die heiss wird wenn man sie komprimiert. Konsequenz zu Ende (bzw. Anfang) gedacht führt dies unweigerlich zum Big Bang-Modell und führte 1948 George Gamov dazu, eine isotrope, auf einige wenige Grad Kelvin abgekühlte Hintergrundstrahlung als Überrest dieses heissen Anfangszustands zu postulieren (der Name «Big Bang» wurde zwar erst später durch Fred Hoyle geprägt, einem lebenslangen Anhänger des Steady State-Modells, und war durchaus despektierlich gemeint). Diese Strahlung wurde 1964 tatsächlich durch Penzias und Wilson bei einer Temperatur von ungefähr 3 K gefunden. Als sie mit einer riesigen Mikrowellenantenne experimentierten, empfingen sie ein ständiges Störgeräusch, das zu jeder Tages- und Nachtzeit und aus allen Richtungen zu kommen schien und das sie auch durch sorgfältigste Kühlung des Detektors und Entfernung von Taubendreck in der Antenne einfach nicht loswerden konnten. Schliesslich reifte in Diskussionen mit Kollegen in Princeton die Erkenntnis, dass das Signal real und das postulierte Echo des Urknalls sein musste. Heute ist diese Strahlung von mehreren Weltraummissionen exakt vermessen: Ihr Spektrum entspricht mit hoher Präzision dem eines Schwarzen Körpers einer Temperatur von 2.7260 K. Zudem ist sie fast isotrop, mit nur winzigen Fluktuationen von einigen Tausendstel Prozent (*Abbildung 2*). Diese sind der Fingerabdruck von Quantenfluktuationen im frühesten Universum, welche durch stetiges Anwachsen Strukturen bildeten, von riesigen Materiewolken zu Galaxien bis hin zu einzelnen Sternen und Planeten. Handkehrum verrät uns eine genaue Analyse dieser Temperaturfluktuationen, in Kombination mit aufwendigen Modellrechnungen der Strukturbildung im expandierenden Universum, vieles über seinen heutigen Zustand, darunter alle kosmologischen Parameter wie die Hubble-Konstante, die Dichte, das Alter usw.

Das dritte Standbein des heutigen Standardmodells der Kosmologie ist etwas weniger anschaulich. Es handelt sich um die Häufigkeiten der fünf leichtesten Isotope im Universum: Wasserstoff, Deuterium (d.h. schwerer Wasserstoff), Helium-3, Helium-4 und Lithium-7. Diese sind in den ersten Minuten nach dem Big Bang in der primordialen Nukleosynthese entstanden. Ganz kurz nach dem Big Bang ist es zwar viel zu heiss, als dass zusammengesetzte Atomkerne existieren könnten, denn sie würden durch die Strahlung sofort wieder zerstört. Schon etwa 10 Millisekunden nach dem Big Bang ist es aber kühl genug ( $< 10^{11}$  K), dass alle schweren, exotischen Teilchen mit ihren Antiteilchen paarweise vernichtet werden. Übrig bleibt nebst der Strahlung nur noch ein kleiner Überschuss aus Protonen und Neutronen (dazu viele Elektronen und Positronen, die hier aber keine Rolle spielen). Diese beginnen nun, in Fusionsreaktionen zusammengesetzte Kerne aufzubauen, wobei die dabei anfallende Bindungsenergie frei wird. Man könnte deshalb erwarten, dass dieser Prozess hauptsächlich Eisen-56 (26 Protonen und 30 Neutronen) erzeugt, weil dies der am stärksten gebundene Kern ist, d.h. auf diese Weise am meisten Bindungsenergie freigesetzt wird. Dem ist aber nicht so, denn die Dichte der Protonen und Neutronen ist dann schon zu gering, als dass

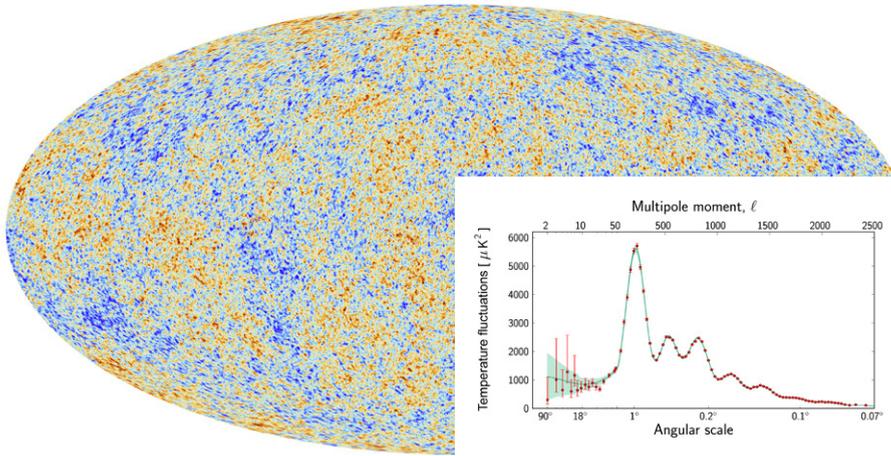


Abbildung 2: Himmelskarte der Hintergrundstrahlung, gemessen 2013 von der Weltraummission Planck der ESA. Sie hat eine Temperatur von 2.7260 Grad K über dem absoluten Nullpunkt und ist fast exakt isotrop. Die genaue Analyse der winzigen Schwankungen von einigen tausendstel Prozent (Einschub) liefert zusammen mit aufwendigen Modellrechnungen sämtliche kosmologischen Parameter (Bild: ESA, Planck Collaboration).

schwere Kerne wie Fe-56 aufgebaut werden könnten. Die Nukleosynthese findet vielmehr in einer Kette von Zweikörperreaktionen statt, und deren erste ist die Fusion von einem Proton und einem Neutron zu einem Deuteriumkern. Weil D aber einer der am schwächsten gebundenen aller Kerne ist, stellt diese Reaktion einen eigentlichen Flaschenhals dar. Es bleibt nämlich nicht viel Zeit, denn die Neutronen zerfallen mit einer Halbwertszeit von einer Viertelstunde und wären schon bald alle verschwunden. Sobald aber D in genügender Menge vorliegt reagiert es durch Fusion mit je einem weiteren Proton und Neutron via Helium-3 oder Tritium weiter zu Helium-4 (Abbildung 3). Dieser Kern ist schon wesentlich besser gebunden, so dass nach etwa drei Minuten praktisch alle freien Neutronen dort enden. Nun kommt aber die Nukleosynthese wegen eines zweiten Flaschenhalses plötzlich wieder zum Erliegen: Aus Helium-4 und freien Nukleonen (p oder n) lassen sich Kerne mit Massenzahlen von 5 (He+p oder He+n) oder 8 (He+He) fusionieren. Dies sind aber gerade die einzigen Massenzahlen, von denen es keine stabilen Isotope gibt, weshalb im Big Bang keine schwereren Elemente gebildet werden können. So kann höchstens noch ein bisschen Lithium-7 entstehen; die beobachteten Häufigkeiten dieser fünf leichten Isotope stimmen mit den Berechnungen gut überein (Abbildung 3). Das junge Universum expandiert nun mit etwa  $\frac{3}{4}$  Protonen (d.h. Wasserstoffkernen),  $\frac{1}{4}$  Helium-4 und kleinen Spuren von D, He-3 und Li-7 einfach weiter, es kühlt sich ab und wird dunkel.

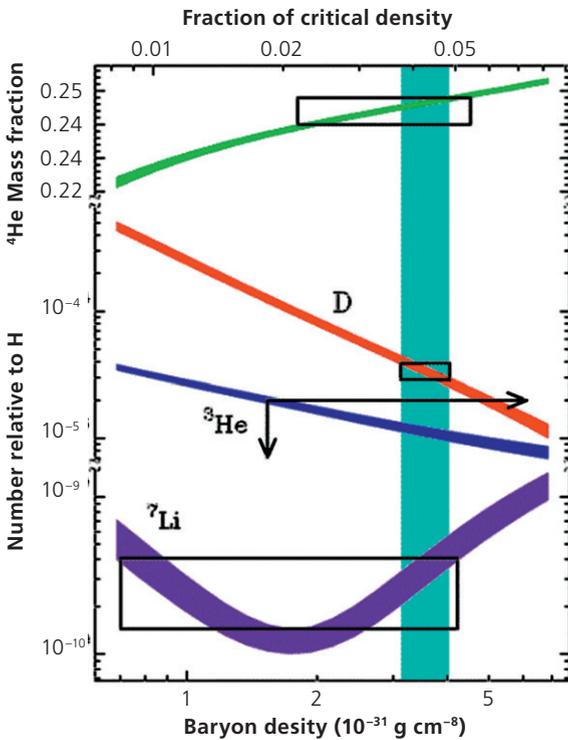
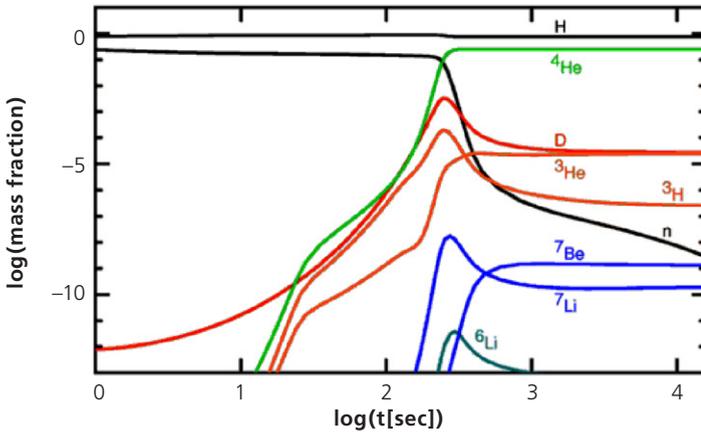
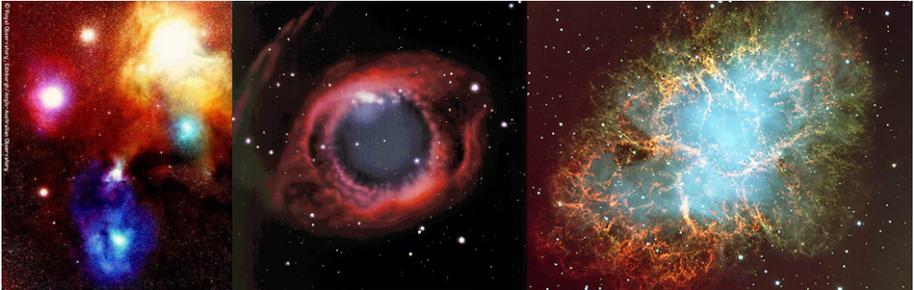


Abbildung 3: Produktion der leichten Kerne in den ersten Minuten nach dem Big Bang (oben) sowie deren produzierte Menge in Abhängigkeit von der Dichte der gewöhnlichen Materie (Baryonen) des Universums (unten). Die Tatsache, dass sich alle beobachteten Häufigkeiten mit einer Dichte von  $3\text{--}4 \times 10^{-31} \text{ g/cm}^3$  erklären lassen (hellblauer Bereich) ist ein starkes Indiz für das Big Bang-Modell (Grafik: E. L. White).

## Die Entstehung der Elemente

Mit den Produkten der primordialen Nukleosynthese lässt sich natürlich noch keine Erde bauen, es bedarf dazu schwererer Elemente mit komplexen chemischen Eigenschaften. Diese entstehen aber erst viel später in mehreren Schritten in den Sternen. Doch auch Sterne gab es noch keine; die ersten entstanden erst eine knappe Milliarde Jahre nach dem Urknall, nachdem die ursprünglich winzigen Quantenfluktuationen genügend Zeit zum Wachsen hatten und daraus die ersten Galaxien entstanden. Diese fragmentierten in einzelne Protosterne, die sich unter dem Einfluss der Schwerkraft immer weiter kontrahierten und damit aufheizten, bis in deren Zentrum eine thermonukleare Fusion einsetzte und sie dadurch zu Sternen wurden. Ganz ähnlich der primordialen Nukleosynthese wurde darin Wasserstoff zu Helium verbrannt – die ersten Sterne brachten also nichts Neues. Die massivsten unter ihnen brannten aber sehr hell und hatten ihren Wasserstoffvorrat schon nach etwa 50 Millionen Jahren verbraucht; und dann beginnt es interessant zu werden.

Wenn im Inneren eines Sterns der Wasserstoff zur Neige geht wird das thermonukleare Feuer schwächer und er kann dem steten Druck der Schwerkraft immer weniger standhalten. Er kontrahiert deshalb weiter, wodurch die Temperatur in seinem Inneren weiter ansteigt, bis plötzlich mit einem Blitz eine neue Reaktion zündet: das Heliumbrennen. Der Stern bläht sich dabei zu gigantischen Dimensionen auf, wobei seine Oberfläche kühler wird – er wird zum Roten Riesen (*Abbildung 4*). Nun haben wir zwar im vorigen Abschnitt gesehen, dass Helium im frühen Universum eben gerade nicht weiter reagieren konnte, dies wegen der Lücken in der Nuklidkarte bei den Massenzahlen 5 und 8. Im Sterninneren ist aber die Dichte sehr viel höher als im Universum zur Zeit der Nukleosynthese, weshalb dort die Dreikörperreaktion von drei Helium-4-Kernen zu einem Kohlenstoff-12-Kern möglich wird. Zwei weitere Umstände begünstigen diese Dreikörperreaktion zusätzlich: Zum einen ist das Zwischenprodukt von zwei He-4, Beryllium-8, nicht völlig instabil, sondern hat eine Lebensdauer von immerhin  $10^{-16}$  s. Während dieser Zeit ist es dank der hohen Dichte nicht unwahrscheinlich, dass ein drittes He-4 hinzukommt und damit zu C-12 reagiert. (Die Situation gleicht der einer wild durcheinander laufenden Menschenmenge, wo es doch sehr unwahrscheinlich ist, dass drei genau gleichzeitig zusammentreffen. Wenn aber zwei eine Zeitlang miteinander gehen um zu schwatzen erhöht das die Wahrscheinlichkeit ganz erheblich, dass in dieser Zeit ein Dritter dazukommt.) Zum anderen ist es wesentlich, dass der Kohlenstoffkern einen angeregten Zustand besitzt, dessen Energie fast genau derjenigen von drei He-4 entspricht. Sie können daher in diesen Zustand übergehen, der erst danach unter Abgabe der Bindungsenergie in den Grundzustand übergeht. (Man kann sich vorstellen, dass C-12 genau auf der richtigen Höhe ein Trittbrett anbietet.) Dieser Zustand wurde von Fred Hoyle auf Grund des Anthropischen Prinzips vorausgesagt, lange bevor er im Labor gemessen werden konnte: Weil wir existieren und unsere Existenz ohne Kohlenstoff



*Abbildung 4:* Antares (links, gelbe Wolke) ist ein Roter Überriese, worin u.a. Helium zu Kohlenstoff fusioniert wird. Der Helixnebel (Mitte) ist die abgestossene Hülle eines Roten Riesen, wodurch die Produkte des s-Prozesses wieder ins Weltall gelangen. Der Krebsnebel (rechts) ist der Überrest einer Supernova, womit die Produkte des r-Prozesses verteilt werden (Bilder: Anglo-Australian Observatory (a, b), NASA/ESA Hubble Space Telescope (c)).

undenkbar wäre, muss es eine Möglichkeit geben diesen zu erzeugen, und diese Möglichkeit existiert nur wenn er eben diesen angeregten Zustand besitzt. So kann also in einem zweiten Schritt (nach der primordialen Nukleosynthese) aus Helium Kohlenstoff entstehen. Daraus kann durch Fusion mit einem weiteren He-4 Sauerstoff-16 (und mit noch einem mehr sogar Neon-20) entstehen, aber dieser hat eben gerade keinen geeigneten angeregten Zustand, und somit bleibt C-12 das Hauptprodukt des Heliumbrennens.

Doch auch das Helium ist als Brennstoff nicht unerschöpflich und geht im Inneren eines Roten Riesen zur Neige, dies bereits nach etwa einem Zehntel der Zeit des vorangehenden Wasserstoffbrennens. Das Schicksal des Sterns hängt nun stark von seiner ursprünglichen Masse ab. Waren es weniger als etwa vier Sonnenmassen (von denen ein guter Teil durch Sternwinde verloren gegangen ist) kontrahiert er zwar unter dem Einfluss der Schwerkraft, aber bevor eine weitere Reaktion zünden kann wird die Kontraktion plötzlich durch den sogenannten Entartungsdruck der Elektronen aufgehalten. Der Stern endet dann nach Abstoßen seiner Hülle als Weisses Zwerg von etwa einer Sonnenmasse, der ohne inneres Feuer einfach still und leise verglüht. Bei massiveren Sternen steigt die Temperatur im Zentrum nach dem Heliumbrennen soweit an, dass sich der Kohlenstoff entzündet und zwei C-12 zu Magnesium-24 fusionieren können. Dieses Kohlenstoffbrennen dauert wiederum viel kürzer als das vorangehende Heliumbrennen, vielleicht ein paar hundert Jahre, und nun wiederholt sich dasselbe Spiel in immer rascherer Folge, weil es bei jedem Schritt immer weniger Bindungsenergie zu gewinnen gibt. Wenn der aktuelle Brennstoff zur Neige geht kontrahiert der Stern weiter, die Zentrumstemperatur steigt und es wird die nächste Reaktion gezündet: Sauerstoff-, Neon-, und weitere -brennen, und schliesslich setzt, ausgehend von der Gruppe um Silizium-28, ein Strom von Gleichgewichtsreaktionen ein, der die Elemente bis hin zur Gruppe um Eisen-56 erzeugt. Dieser letzte Schritt dauert

nur noch Tage oder gar Stunden, und dann gibt es kein Halten mehr. Weil Eisen der Kern mit der höchsten Bindungsenergie pro Nukleon darstellt lässt sich daraus auf keine Art und Weise mehr Energie gewinnen. Das thermonukleare Feuer erlischt im Zentrum des Sterns und er implodiert vollständig. Durch den Rückschlag wird der grösste Teil der Materie in die Umgebung geschleudert und leuchtet hell auf: eine Supernova, wie sie z.B. im Jahr 1054 stattfand und während Wochen sogar am Taghimmel sichtbar war. Heute sehen wir dort ihren expandierenden Überrest, den Krebsnebel (*Abbildung 4*), in dessen Zentrum als Rest des Roten Riesen ein Neutronenstern sitzt. Wenn der Ursprungstern noch massiver war kann er auf diese Weise sogar zum Schwarzen Loch werden. Insgesamt entstehen in diesem dritten Schritt der Nukleosynthese alle Elemente von Kohlenstoff bis Eisen, dies auch weil anders als in der primordialen Nukleosynthese keine Maslücken den Aufbau behindern.

Nun existieren aber im Periodensystem (und auf der Erde) viele schwerere Elemente als Eisen. Insgesamt gibt es 80 stabile Elemente (plus Bismut–83, Thorium–90 und Uran–92 mit sehr langen Zerfallszeiten), wovon durch die bisher diskutierten Prozesse erst die etwa 26 leichtesten entstanden sind. Das Problem ist, dass für die Erzeugung der schwereren Elemente Energie aufgewendet werden muss. Allein schon deshalb sind sie viel seltener als die leichten von Wasserstoff bis Eisen. Es gibt aber nun in Sternen zwei Möglichkeiten die dort vorhandene Energie zu nutzen, um schwerere Elemente zu erzeugen. In beiden Fällen spielen Neutronen die entscheidende Rolle, denn sie haben den Vorteil, dass sie von den positiv geladenen Kernen nicht abgestossen werden. Reaktionen von Kernen aus 14 Protonen (Silizium) oder mehr mit einem Proton oder gar untereinander sind demgegenüber wegen der gegenseitigen Abstossung fast unmöglich. Doch woher kommen freie Neutronen, die ja mit ihrer Halbwertszeit von nur 15 Minuten sehr zerbrechlich sind? Sie stammen zum einen aus Nebenreaktionen in Roten Riesen und können dort rechtzeitig von leichteren Elementen absorbiert werden. Der Prozess ist sehr langsam (s-Prozess für «slow»), ein Kern erhält etwa alle tausend Jahre ein Neutron dazu. Wenn dadurch ein radioaktives Isotop entsteht wird daraus nach dessen Zerfall ein Kern der nächst höheren Ordnungszahl. So füllt der s-Prozess, ausgehend von Eisen, langsam das Periodensystem bis hinauf zum Blei und Bismut. Diese Produkte gelangen wieder in den Weltraum, weil ein Roter Riese gelegentlich seine Hülle abstösst, was dann als planetarischer Nebel beobachtet werden kann (*Abbildung 4*). Zum anderen werden in einer Supernova sehr viele Neutronen erzeugt, die dann vom herausgeschleuderten Material absorbiert werden können. Dieser Prozess geht sehr schnell (r-Prozess für «rapid»), die vorhandenen Elemente erhalten so viele Neutronen wie sie überhaupt halten können und werden dadurch hoch radioaktiv. Danach haben sie alle Zeit, um zuerst schnell und dann langsamer zu zerfallen, bis sie schliesslich zu stabilen Isotopen werden. Für die ganz schweren Elemente wie Thorium und Uran ist dies der einzige mögliche Produktionsprozess (ebenso für einige Isotope von leichteren

Elementen) weil sie vom s-Prozess nicht erreicht werden können (*Abbildung 4*). Schliesslich bleiben noch ein paar leichte Isotope, die weder vom r- noch vom s-Prozess erzeugt werden können. Diese müssen durch die Reaktion mit einem Proton entstehen (p-Prozess), der ja wegen der gegenseitigen Abstossung sehr unwahrscheinlich ist, und sind daher sehr selten. Insgesamt erzeugt also dieser vierte Schritt der Nukleosynthese via p-, s- und r-Prozess sämtliche bekannten Elemente und Isotope.

## Die Entstehung der Erde

Da nun alle Elemente aus Sternen gekocht zur Verfügung stehen und durch weitere Sternenerationen noch angereichert werden, können wir uns der Entstehung der Erde zuwenden. Bis dahin ist es aber noch ein weiter Weg (der sich zudem immer weiter vom Wissensgebiet des Autors entfernt).

Zwar besteht unsere Erde aus nichts als den gut 80 Elementen, deren Entstehung wir nun verstehen. Entscheidend für uns sind aber Verbindungen dieser Elemente zu Staub, Mineralien und Molekülen bis hin zur DNA und Proteinen. Solche Verbindungen können aber nicht in Sternen entstehen, weil sie dort wegen der hohen Temperatur sofort wieder aufgelöst würden, aber auch nicht zu weit weg davon, weil dort wegen der Kälte die Reaktionsraten viel zu langsam wären. Nachdem aber in einer ersten Generation von Sternen genügend schwere Elemente entstanden sind, bleibt bei der Bildung von neuen Sternen der zweiten Generation immer etwas Material übrig, das in einer Scheibe um den jungen Stern rotiert. Dieses Material kann dank der vorhandenen Elemente wie Sauerstoff und Silizium Moleküle und Staubkörner bilden, die dann resublimieren, kondensieren oder durch Kollisionen wachsen können. So entstehen erste Aggregate, die weiter wachsen und sich bei genügender Grösse unter der eigenen Schwerkraft zu Planeten formen. Eine wichtige Rolle spielt dabei die Schneelinie, welche den Abstand vom Stern markiert ausserhalb welchem das Wasser zu Eis gefriert. Planeten ausserhalb der Schneelinie bestehen hauptsächlich aus flüchtigem Material, während innerhalb die sesshaften Materialien dominieren. Unser Sonnensystem, das sich vor 4.6 Milliarden Jahren gebildet hat (*Abbildung 5*), liefert ein gutes Beispiel: Die vier inneren Planeten samt der Erde bestehen zur Hauptsache aus Silikaten und Metallen, während die vier äusseren Gasriesen sind.

Die Erde befindet sich zu unserem Vorteil in der habitablen Zone um die Sonne, d.h. innerhalb der Schnee-, aber ausserhalb der Dampflinie, wo also Wasser in flüssiger Form existieren kann. Doch auf der jungen Erde gibt es kein Wasser; praktisch alles liegt in gefrorener Form auf Kleinplaneten und Kometen ausserhalb der Schneelinie. Die Bedingungen im jungen Sonnensystem sind aber noch ziemlich chaotisch und so kommt es häufig zu Kollisionen, wodurch immer wieder solche Kleinkörper auf die Erde gelangen und Wasser anliefern. In einer gewaltigen Kollision nach etwa 200 Millionen Jahren zwischen der Erde und einem Ob-



*Abbildung 5:* Die noch junge Sonne war von einer rotierenden Scheibe aus Gas und Staub umgeben, aus welcher die Planeten entstanden sind (Bild: W. K. Hartmann).

jekt der Grösse des Mars ist ferner der Mond entstanden. Dann aber beruhigte sich unser Planetensystem nach etwa einer Milliarde Jahre in seiner heutigen Form.

Die Erde war zu dieser Zeit zwar immer noch ziemlich unwirtlich: Vulkanismus, gelegentliche Asteroideneinschläge, wohl auch globale Eiszeiten bewirkten Klima- veränderungen von ungeheuren Ausmassen. Trotzdem entwickelten sich schon damals erste Lebewesen, wovon sogenannte Stromatolithe zeugen (*Abbildung 6*). Dies sind Sedimentgesteine, welche wahrscheinlich in warmen Lagunen an den Rändern der Ozeane von Mikrobenteppichen schichtweise aufgebaut wurden; die ältesten von ihnen sind 3.5 Milliarden Jahre alt. Aus den Mikroben wurden durch die Evolution zuerst sehr langsam, seit dem Kambrium vor etwa 500 Millionen Jahren dann immer schneller immer komplexere Lebewesen. Wichtig für unsere Existenz ist wohl auch die Tatsache, dass vor 65 Millionen Jahren ein grosser Asteroideneinschlag bei der Halbinsel von Yucatan mithalf, die Dinosaurier auszurotten, welche damals die Welt beherrschten. Dies ermöglichte erst den Aufstieg der Säugetiere einschliesslich der Menschen, deren erste Exemplare, wie z.B. Lucy, vor ein paar Millionen Jahren die afrikanischen Steppen durchwanderten. Seither hat sich unsere Kultur durch die Erfindung der Schrift vor ein paar tausend Jahren stetig beschleunigt, und das gesamte hier zusammengefasste Wissen ist kaum mehr als 100 Jahre alt.

Zum Schluss bleibt die Frage, ob sich die Geschichte der Entstehung der Erde und des Lebens vielleicht auch anderswo im Universum so oder ähnlich abgespielt haben könnte. Diese wird oft mit der Drake-Formel beantwortet, die nichts anderes ist als das Produkt aller Wahrscheinlichkeiten der dafür notwendigen Bedingungen. Diese sind aber grösstenteils völlig unbekannt, was die Formel eigentlich unbrauchbar macht. Immerhin wissen wir seit 20 Jahren, seit der Entdeckung des ersten Planeten bei einem anderen Stern durch die Genfer Astronomen Didier Queloz und Michel Mayor, dass Planetensysteme wohl eher die Regel als die Ausnahme darstellen, denn seither sind fast 2000 weitere gefolgt. Ausgehend

von der ungeheuren Anzahl Sterne in unserer Galaxie und der etwa gleich grossen Anzahl von Galaxien im sichtbaren Universum (je etwa 100 Milliarden), scheint es mir vermessen zu denken, die Erde sei etwas Besonderes. Offensichtlich sind wir allein in unserem Sonnensystem, aber über weiter Entferntes wissen wir eigentlich noch sehr wenig. Immerhin ist dies gegenwärtig eines der am intensivsten bewirtschafteten Forschungsgebiete, und ich denke, dass es in den nächsten Jahrzehnten gelingen könnte, einen erdähnlichen Planeten mit biogenen Spuren wie z.B. Sauerstoff in der Atmosphäre spektroskopisch zu identifizieren. Doch wird es sich dort mit grösster Wahrscheinlichkeit um Mikroben handeln, mit denen zu kommunizieren schwierig sein dürfte. Ohnehin wäre die für eine Kommunikation benötigte Zeit viel zu lange, denn die universelle Beschränkung auf Lichtgeschwindigkeit ist prohibitiv. Somit komme ich zum (persönlichen) Fazit: Die Erde, das Leben, vielleicht sogar die menschliche oder noch höhere Intelligenz, sind nichts Besonderes und könnten im Universum vielfach vorkommen. Es scheint mir aber unsinnig damit in Kommunikation treten zu wollen, weil das Licht auf kosmische Distanzen so unglaublich langsam unterwegs ist.



*Abbildung 6:* Stromatolithen werden von Mikrobenteppichen in warmen Lagunen gebildet. Ihre Sedimente versteinern und können bis zu einem Alter von 3.5 Milliarden Jahren nachgewiesen werden. Die ältesten Lebewesen haben sich also schon eine Milliarde Jahre nach Entstehung des Sonnensystems gebildet (Bild: D. E. Buchert).

*Lesetipp:* Wer sich eingehender mit dem Thema befassen möchte, findet gut aufbereitete und spannende Artikel dazu in der Zeitschrift SPATIUM, welche auch kostenlos heruntergeladen werden kann (<http://www.issibern.ch/publications/spatium.html>). Insbesondere die Nummern 1, 3, 6, 7, 13, 16, 20, 26, 30 betreffen das Thema des Vortrags.