

Unverkäufliche Leseprobe aus:

Frebel, Anna

Auf der Suche nach den ältesten Sternen

Alle Rechte vorbehalten. Die Verwendung von Text und Bildern, auch auszugsweise, ist ohne schriftliche Zustimmung des Verlags urheberrechtswidrig und strafbar. Dies gilt insbesondere für die Vervielfältigung, Übersetzung oder die Verwendung in elektronischen Systemen.

© S. Fischer Verlag GmbH, Frankfurt am Main

»Bernhard von Chartres sagte, wir seien gleichsam Zwerge, die auf den Schultern von Riesen sitzen, um mehr und Entfernteres als diese sehen zu können – freilich nicht dank eigener scharfer Sehkraft oder Körpergröße, sondern weil die Größe der Riesen uns emporhebt.«

– Johannes von Salisbury: *Metalogicon*, Buch III, Kapitel 4,
Zeile 46–50

In diesem Sinne widme ich mein Buch den Frauen, die vor mir gelebt, gearbeitet und die Welt verändert haben: den Wissenschaftlerinnen sowie meinen Großmüttern und meiner Mutter.

INHALT

Vorbemerkung	11
1. <i>Was ist Stellare Archäologie?</i>	13
1.1. Die ersten Minuten nach dem Urknall	14
1.2. Stellare Archäologie	19
2. <i>Zwei Jahrhunderte den Sternen auf der Spur</i>	24
2.1. Den Linien auf der Spur	25
2.2. Dem Licht auf der Spur	31
2.3. Dem Kosmos auf der Spur	39
2.4. Der Energiequelle auf der Spur	46
2.5. Den schweren Atomen auf der Spur	54
2.6. Der Kosmologie auf der Spur	57
2.7. Den Elementen auf der Spur	63
3. <i>Sterne, Sterne, mehr Sterne</i>	71
3.1. Der Kreislauf der Materie im Universum	71
3.2. Die Astronomen und ihre Metalle	76
3.3. Element-Nukleosynthese in der kosmischen Küche	80
3.4. Der Artenreichtum der Sterne	96
4. <i>Die Entwicklung eines Sterns – von der Geburt bis zum Tod</i>	102
4.1. Ordnung muss auch bei den Sternen sein!	102
4.2. Ein Protostern bildet sich	110
4.3. Die Entwicklung eines massearmen Sterns	113

8 Inhalt

4.4. Die Entwicklung eines massereichen Sterns	120
4.5. Supernova und Supernovaüberreste	123
4.6. Vorüberlegungen zur Arbeit mit metallarmen Sternen	132
5. <i>Neutroneneinfang-Prozesse und die schwersten Elemente</i> . .	137
5.1. Was Neonröhren mit Riesensternen zu tun haben: Die s-Prozess-Elementsynthese	139
5.2. Thorium, Uran und die r-Prozess-Elementsynthese	145
5.3. Kosmo-Chronometrie: Die ältesten Sterne	152
5.4. Nukleare Astrophysik	162
6. <i>Willkommen in unserer Milchstraße</i>	164
6.1. Eine Milchstraße über uns	164
6.2. Die Struktur der Milchstraße	168
6.3. Zwerggalaxien	175
6.4. Sternhaufen	182
6.5. Namensgebung von Sternen	189
7. <i>Geschichten, die das Licht erzählt</i>	194
7.1. Kleines Lexikon vom Licht	195
7.2. Spektroskopie: Sternlicht entschlüsselt	200
7.3. Elementhäufigkeitsanalysen von Sternen	206
7.4. Die größten Teleskope der Welt	215
7.5. Mit drei Schritten zum Erfolg	223
7.6. Beobachten mit MIKE	231
8. <i>Komm, lass uns Sterne beobachten</i>	237
8.1. Beobachten gehen	237
8.2. Das Gute-Wetter-Bier	243
8.3. Der Sonnenuntergang	245
8.4. Der Observa-thon	248
8.5. 105 Sterne pro Nacht	250
8.6. Der liebe Computer	253
8.7. Feuerprobe	255

9.	<i>Das frühe Universum</i>	259
9.1.	Die ersten Sterne im Universum	259
9.2.	Die Familie der metallarmen Sterne	267
9.3.	Die eisenärmsten Sterne	273
9.4.	Die chemische Entwicklung des Universums	277
10.	<i>Die ältesten Sterne finden</i>	294
10.1.	Auf der Spur der metallarmen Sterne	294
10.2.	Helle metallarme Sterne	302
10.3.	Mt. Stromlo fällt Buschfeuern zum Opfer	307
10.4.	Die Entdeckung des eisenärmsten Sterns	313
10.5.	Die Vernetzung der Astronomen	319
11.	<i>Am Ende einer kosmischen Reise</i>	323
11.1.	Kosmologische Simulationen	323
11.2.	Wo kommen metallarme Sterne denn nun her?	331
11.3.	Was wir von den nächsten Durchmusterungen erwarten	337
11.4.	Die nächste Generation von Riesenteleskopen	341
11.5.	Die Diamanten des Himmels	345
	<i>Danksagung</i>	347
	<i>Verzeichnis der Tabellen und Abbildungen</i>	348
	<i>Weiterführende Literatur</i>	351

VORBEMERKUNG

So begann meine eigene Reise

Ich wurde oft danach gefragt, warum ich mich so intensiv gerade für die Sterne und das Universum interessiere. Die Frage, warum das so ist, kann ich genauso wenig beantworten wie die, warum Blau meine Lieblingsfarbe ist: Es war einfach schon immer so.

Seit ich denken kann, übten die Sterne auf mich eine unbeschreibliche Faszination aus. Und als ich 14 Jahre alt war, beschloss ich deshalb, Astronomin zu werden. Ich wollte mehr über die Sterne erfahren, um herauszufinden, woher sie kommen und was in ihrem Inneren vorgeht. Der Weg dahin war mir natürlich noch unklar. Dennoch war es mein Traum, etwas Neues zu entdecken, etwas, das außerhalb unserer Erde im Universum existiert und noch nie zuvor bekannt gewesen ist. Auch ich wollte also herausfinden, was die Welt im Innersten zusammenhält.

Dieser Wunsch gab mir einen enormen Antrieb, und so war ich überglücklich, dass ich mit 15 Jahren mehrere Praktika bei den Astronomen der Universität Basel absolvieren durfte. Dort lernte ich direkt von den Wissenschaftlern, welche Tätigkeiten den Alltag eines Astrophysikers ausmachen. Mit Hilfe der Studentenversuche zur einführenden Astronomie konnte ich dort schon viele Konzepte und theoretische Grundlagen zur Arbeit mit Sternen, Galaxien und der Kosmologie kennenlernen.

Mit diesen Kenntnissen ausgestattet, konnte ich dann auch, inzwischen 17 Jahre alt, meine fünfundfünfzigseitige Facharbeit »Auswertung von Farben-Helligkeitsdiagrammen ausgewählter Sternhaufen unter dem Gesichtspunkt der Sternentwicklung« für die Schule schreiben.

12 Vorbemerkung

So war ich schon vor Beginn meines Physikstudiums meinem Traum, als Astronomin die Sterne und das Universum zu studieren, ein Stückchen näher gekommen. Heutzutage fliege ich mehrmals im Jahr um den Erdball zu den größten Teleskopen der Welt, um nach den ältesten Sternen zu suchen.

1. WAS IST STELLARE ARCHÄOLOGIE?

Um die vielen Details und die im Universum vorherrschenden chemischen und physikalischen Prozesse verstehen zu können, müssen wir uns nun auf eine kosmische Zeitreise begeben. Sie beginnt direkt mit dem Urknall und wird uns von dort aus bis in unsere Zeit führen. Wie in Abbildung 1.1 zu sehen ist, werden wir die kosmische Herkunft eines Apfels und damit auch die der Elemente kennenlernen. Dabei sind uns die ältesten Sterne aus der Zeit kurz nach dem Urknall behilflich. Sie lehren uns, dass wir Menschen alle Kinder des Kosmos sind. Denn aus Sternenstaub gemacht, tragen wir sogar kleine Mengen des Urknalls in uns.

Der US-amerikanische Astronom Carl Sagan sagte einst: »Wenn du einen Apfelkuchen von Grund auf selbstbacken möchtest, musst du zunächst das Universum erfinden.« Denn tatsächlich sind die Elemente, aus denen ein Apfel besteht, das Ergebnis eines kosmischen Herstellungsverfahrens, das Jahrmilliarden dauerte und das die Astronomen als chemische Entwicklung des Universums bezeichnen. Denn die Atome, aus denen der Apfel besteht, wurden erstmalig durch Kernfusionsprozesse in den heißen Zentren von Sternen vor sehr langer Zeit erzeugt. Mit dem Backen des Apfelkuchens verändern wir zwar die Anordnung der Atome in den verschiedenen Molekülen, aus denen der Apfel besteht, aber die Atome selbst bleiben unverändert. Um ein Atom in ein anderes zu verwandeln, fehlen uns in unseren Küchen Kernreaktoren – die gibt es nur im Universum.

Die Elemente Wasserstoff und Helium wurden direkt nach dem Urknall gebildet und liefern das stoffliche Grundgerüst des Universums. Die kosmische Kocherei weiterer Elemente begann bald danach. So wurden alle Elemente erzeugt, auf denen die Entstehung und Entwick-

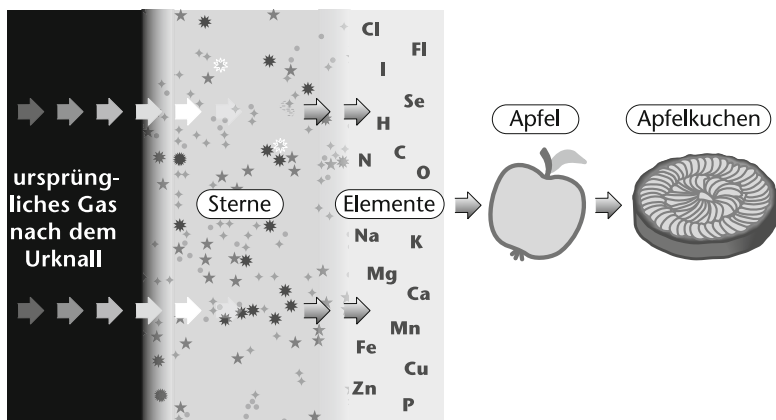


Abb. 1.1: Die kosmische Herkunft eines Apfels.

lung von Leben und damit auch des Menschen basiert. Für Menschen und organisches Material spielt Kohlenstoff dabei die Hauptrolle. Unsere Existenz hängt also von jenen Sternen ab, die den Kohlenstoff synthetisiert haben. Dadurch sind wir Menschen so eng mit der Entwicklungsgeschichte der chemischen Elemente verbunden.

Mit der Erforschung der diversen chemischen und physikalischen Prozesse, die an dieser Entwicklung beteiligt sind, können sich Astronomen tatsächlich Stück für Stück dem annähern, was das Universum als Ganzes ausmacht. Abbildung 1.A im Farbbildteil zeigt eine Zusammenfassung dieser Entwicklung. Aber beginnen wir die Geschichte von vorne.

1.1. Die ersten Minuten nach dem Urknall

Begriffe wie Raum und Zeit, Temperatur oder Dichte benutzen wir heutzutage oft, ohne weiter darüber nachzudenken, ob es auch ein »Vor« dem Raum oder »Vor« der Zeit gab. Unser physikalisches Verständnis für das Universum beginnt nämlich erst winzige Sekundenbruchteile nach dem Urknall, den man sich als Beginn von Raum und Zeit vorstellen kann. Was wirklich am Anfang des Universums

stand, ist und bleibt ein Rätsel. Der Begriff »Urknall« benennt somit diesen eigentlich unbeschreiblichen Anfangszustand.

Wir wissen aber, dass die ersten Minuten nach dem Urknall extrem heiß waren und das Universum lediglich aus einer dichten Suppe aus den verschiedensten kleinsten Teilchen bestand. In den folgenden Minuten bildeten sich daraus Protonen, Neutronen und Elektronen, die Bausteine der Atome. Das Universum dehnte sich nun rapide aus und kühlte dabei schnell ab. An chemischen Elementen existierte bisher nur Wasserstoff (Ordnungszahl 1), genauer gesagt existierten nur Wasserstoffkerne, eben die Protonen. Als die Temperatur nach zwei bis drei Minuten auf eine Milliarde Grad gesunken war, entstanden die ersten gegenüber Wassertoffschwereren Atomkerne wie z. B. Deuterium. Deuterium wird auch »schwerer Wasserstoff« genannt, denn es besteht aus einem Proton und einem Neutron und hat somit die gleiche Ladungszahl wie Wasserstoff, nämlich 1.

Aus Deuterium konnten dann die ersten Heliumkerne (Ordnungszahl 2) gebildet werden, die aus zwei Protonen und zwei Neutronen bestehen. Schon in den ersten zwei Minuten war bei den noch höheren Temperaturen Helium direkt aus vier Protonen gebildet worden. Allerdings war es zu dieser Zeit so heiß, dass diese Heliumkerne immer sofort wieder durch die ebenfalls vorhandenen hochenergetischen Gammastrahlen zerschlagen wurden. Erst der Umweg über die Deuteriumkerne bei den kühleren Temperaturen von etwa einer Milliarde Grad führte dann schließlich zur Bildung großer Mengen von Helium.

Durch die Zusammenstöße von mehreren Heliumkernen bildete sich als das drittschwerste Element noch eine ganz, ganz winzige Menge an Lithium (Ordnungszahl 3). Das Universum bestand also zu jener Zeit aus diesen drei Elementen: Wasserstoff, Helium und Lithium. Rund 75 % der Gesamtmasse bestand dabei aus Wasserstoff und ca. 25 % aus Helium. Der Lithium-Massenanteil lag nur bei 0,000000002 %. Wenn man zum Vergleich diese Massenverteilung in Anzahlen von Wasserstoff- und Heliumatomen ausdrückt, gibt es 92 % Wasserstoffatome und nur ca. 8 % Heliumatome, da Helium viermal schwerer als Wasserstoff ist. Lithium ist wiederum nur als ein winziger Bruchteil vertreten.

Schon drei Minuten nach dem Urknall war die erste Phase der Elementsynthese abgeschlossen. Das Universum war nun schon zu weit abgekühlt, um weiterhin nukleare Fusion mit Wasserstoff und Helium betreiben zu können. Um später Leben im Universum und somit auch den Menschen hervorbringen zu können, reichten die in den wenigen Minuten nach dem Urknall entstandenen chemischen Elemente Wasserstoff, Helium und Lithium jedoch nicht aus. Die hierzu notwendigen Elemente wie Kohlenstoff, Stickstoff, Sauerstoff, Eisen sowie alle anderen Elemente des Periodensystems fehlten noch. Diese wurden erst nach und nach in Sternen synthetisiert. Nur dort konnten aus den vorhandenen leichten Elementen wie Wasserstoff und Helium schwerere erzeugt werden. Denn nur im Inneren von Sternen ist es heiß genug, um alle weiteren Elemente des chemischen Periodensystems zu synthetisieren.

Damit diese Sterne und auch die Galaxien überhaupt entstehen konnten, mussten sich aus den ersten, elektronenlosen und nackten Atomkernen sowie den frei im Universum herumschwirrenden Elektronen erst einmal vollständige und elektrisch neutrale Atome bilden. Für lange Zeit nach dem Urknall sind Atomkerne, Elektronen und Photonen, also die Lichtteilchen, wild durcheinandergerast. Diese Teilchen- und Strahlensuppe war somit ziemlich undurchsichtig, etwa so, wie wenn man durch das Gewimmel der Wassertröpfchen bei strömendem Regen oder Nebel die andere Seite der Straße nicht mehr sehen kann. Denn die Energie und die Richtung der Photonen werden immer wieder durch freie Elektronen verändert. Man sagt auch, sie werden gestreut.

Etwa 380 000 Jahre nach dem Urknall war das Universum in seiner Größe nun so weit angewachsen und dabei auf 2700 Grad Celsius abgekühlt, dass es zu einer grundlegenden Veränderung kam. Die Atomkerne und die Elektronen bewegten sich nun so langsam, dass die positiv geladenen Atomkerne die negativ geladenen Elektronen einfangen und dauerhaft an sich binden konnten. Die seit dem Urknall umherfliegenden Photonen hatten somit viel weniger Möglichkeiten, von Elektronen gestreut zu werden. Das bedeutete die endgültige Trennung von Materie und Strahlung, das bis dahin undurchsichtige Universum wurde dadurch erstmals durchsichtig.

Die Photonen wurden somit endlich aus dem Labyrinth der Elektronen befreit und konnten ungestört über weite Distanzen fliegen. Das tun sie auch heute noch. Die Photonen aus dem frühen Universum fliegen nach wie vor – sie werden die kosmische Hintergrundstrahlung genannt. Sie ist so etwas wie das schwache Restglimmen des Urknalls von vor fast 14 Milliarden Jahren, die letzte Glut eines gigantischen kosmischen Feuerwerks.

Seitdem das Universum durchsichtig wurde, ist es auch 1100 Mal größer geworden. Da die Energiedichte der kosmischen Hintergrundstrahlung mit zunehmendem Volumen des Universums abnimmt, ist die Temperatur der Hintergrundstrahlung, die heute bei uns ankommt, aber nicht mehr 2700 Grad C heiß, sondern inzwischen nur noch -270 Grad C. Das entspricht ungefähr $2,7$ Grad Kelvin. Das Universum hat sich also ausgehend vom Urknall bis heute dem absoluten Temperaturnullpunkt bei 0 Grad Kelvin oder -273 Grad C schon sehr weit angenähert. Mit einer weiteren Ausdehnung des Universums wird in sehr ferner Zukunft der absolute Temperaturnullpunkt irgendwann erreicht werden.

Diese Hintergrundstrahlung wurde 1964 von den amerikanischen Radioastronomen Arno Penzias und Robert Wilson nach diversen Vorhersagen tatsächlich zufällig entdeckt. Die beiden Wissenschaftler erhielten 1978 den Nobelpreis für ihre Arbeiten. 2006 folgte ein weiterer Nobelpreis für die amerikanischen Astrophysiker George Smoot und John Mather. Mit Hilfe des Weltraumsatelliten COBE (»Cosmic Microwave Background Explorer«) hatten sie mit ihrem Team die ersten präzisen Messungen der kosmischen Hintergrundstrahlung vorgenommen und so deren räumliche Struktur und Ausdehnung bestimmen können. Diese und weitere Messungen durch den Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP)-Satelliten, der in Abbildung 1.B im Farbbildteil gezeigt ist, sind eine großartige Bestätigung dafür, dass das Universum eine extrem heiße Phase auf kleinstem Raum durchgemacht hat – also den Urknall.

Schon in der 380 000 Jahre nach dem Urknall entstandenen kosmischen Hintergrundstrahlung konnten Smoot und Mather erste Anzeichen einer ganz leichten Klumpung der Materie im Universum

nachweisen. Sie sind die »Kondensationskeime« aller späteren kosmischen Strukturen, also letztendlich auch der Sterne.

Aber erst einige hundert Millionen Jahre nach dem Urknall war es dann so weit, dass sich der Charakter des Universums wieder vollständig veränderte. Das »dunkle« Zeitalter, das bestanden hatte, seit die Atomkerne die Elektronen eingefangen hatten, ging nun zu Ende. Aus den immer stärker verklumpenden riesigen Gaswolken bildeten sich die ersten Sterne des Universums, die nur aus dem Wasserstoff, Helium und Lithium bestanden, die aus der ursprünglichen, primordialen Urknallsuppe hervorgegangen waren. Diese Sterne erhellten das Universum zum allerersten Mal. Das von ihnen ausgehende UV-Licht führte zur Ionisierung der neutralen Atome in den interstellaren Gaswolken. Die Elektronen wurden dabei durch die intensive Bestrahlung des jungen Sternenlichts aus ihren Atomen herausgeschlagen. So veränderte die Existenz der ersten Sterne die Entstehungsbedingungen für weitere neue Sterne. Die Sternentstehung konnte dadurch effizienter vorangetrieben werden. So entstanden immer mehr Sterne, die sich in riesigen Sternenwolken, den Galaxien, organisierten.

In ihrem heißen Inneren synthetisierten diese Sterne dabei alle chemischen Elemente, die schwerer als Wasserstoff und Helium sind. Diese Elementproduktion führte wiederum zu größeren Veränderungen im Universum. Unzählige Sterne reicherten in ihren Galaxien ihre Materie mit immer größeren Mengen der Elemente an. Nach einigen Milliarden Jahren reichten diese Mengen aus, dass sich in der Galaxie, die wir Milchstraße nennen, unsere Sonne und ihre Planeten bilden konnten. Denn unser Planet Erde besteht zu einem erheblichen Teil aus Eisen und anderen Elementen, die aber erst in Sternen geschaffen werden mussten.

Jetzt, nach 13,7 Milliarden Jahren kosmischer Entwicklung, steht der Massenanteil der Elemente von Lithium bis Uran bei ca. 4 %. Vor 4,5 Milliarden Jahren, als die Sonne geboren wurde, waren es noch weniger als 2 %. Denn bis auf das wenige Lithium ist dieses gesamte Material in Sternen produziert worden. Sterne, insbesondere die ältesten, sind deshalb der Schlüssel zum Verständnis dafür, wie sich die heutige chemische Vielfalt des Kosmos im Laufe der Zeit im Detail entwickelt hat.