

HELMUT SATZ

KOSMISCHE DÄMMERUNG



DIE WELT
VOR DEM
URKNALL

C.H.BECK

Helmut Satz

**Kosmische
Dämmerung**

Die Welt
vor dem Urknall

C. H. Beck

Mit 72 Abbildungen, davon 25 in Farbe

1. Auflage. 2016

© Verlag C.H.Beck oHG, München 2016

Umschlaggestaltung: Rothfos & Gabler, Hamburg

Umschlagabbildung: © stock-photo

ISBN Buch 978 3 406 69787 6

ISBN eBook 978 3 406 69788 3

Die gedruckte Ausgabe dieses Titels erhalten Sie im Buchhandel
sowie versandkostenfrei auf unserer Website

www.chbeck.de.

Dort finden Sie auch unser gesamtes Programm und viele weitere
Informationen.

**Erwacht! Denn die Sonne mit ihrer Macht
hat vertrieben die Sterne vom Feld der Nacht,
hat vertrieben das Dunkel; im Sonnenlicht
erstrahlt nun die Welt in all ihrer Pracht.**

Omar Khayyám, *Rubáiyát*

Inhalt

Vorwort 9

1. Vor dem Urknall 15

Raumenergie 21

Multiversum 25

2. Die ersten Teilchen 33

Materieteilchen und Kraftteilchen 35

Die Geburt der Materie 48

3. Der leere Raum 55

Das physikalische Vakuum 58

Der geringe Überschuss an Quarks 61

Die Kernfusion 63

4. Übergänge 67

Kritisches Verhalten 75

Die Geburt des Lichts 83

Der Hadron-Übergang 86

5. Das Leuchten des Urknalls 101

Raumschiff Erde 105

Das Lied des Urknalls 109

Die Form des Raums 113

Sternenaufgang 122

6. Struktur und Form	123
Der Pfeil des Geschehens	127
Entropie	131
Strukturbildung im Universum	136
7. Dunkle Ecken	149
Schwarze Löcher	150
Dunkle Materie	155
Die dunkle Energie	161
8. Das Ende der Zeit	167
Sternenuntergang	172
Die neue Schöpfungsgeschichte	175
Anhänge 1-3	177
Abbildungsnachweis	185
Personenregister	187

Vorwort

Seit die Menschen sich Gedanken machen über die Welt, in der sie leben, haben sie sich gefragt, wie diese Welt entstanden sein mag, warum sie so ist, wie sie ist, wie sie in Urzeiten war, was aus ihr werden wird und was unser Platz in ihr sein mag. Alle Kulturen der Menschheit enthalten irgendeine Aussage über das Entstehen der Welt und zu diesen Fragen. Wohin wir blicken, sehen wir Abläufe, die einen Anfang und ein Ende haben wie unser Leben. Hat auch unser Universum einen Anfang gehabt, und wird es ein Ende geben? Wenn wir nachts unter dem Sternenhimmel stehen, erscheint es uns natürlich zu fragen, wie all das entstanden ist, wie groß es ist und ob es weiter bestehen wird. Wir sind ein so winzig kleiner Teil von etwas so Großem. Anders als die anderen Lebewesen jedoch können wir fragen, und vielleicht ist es das, was uns besonders macht.

Die Suche nach Antworten auf diese Fragen hat auf Religionen geführt, auf Sagen, auf vielerlei Weltanschauungen und Philosophien – und letztendlich natürlich auf die Naturwissenschaft. Dort hat sich die Kosmologie als die für solche Fragen zuständige Wissenschaft entwickelt, und was wir in diesem Buch zu sagen haben, basiert auf den Untersuchungen dieser Wissenschaft. Selbst wenn die verschiedenen, im Laufe der Zeit auf diese Fragen gegebenen Antworten sich in vielem zu widersprechen schienen, zeigte sich doch genauso häufig, dass diese Widersprüche recht oberflächlicher Natur waren, dass die Grundgedanken stärker übereinstimmten, als man zunächst meinte. Und wir stellen heute fest, dass sich auch die Kosmologie in einen Bereich wagt, der für viele Physiker längst nicht mehr Naturwissenschaft ist – weil nicht mehr experimentell überprüfbar.

In diesem Buch möchte ich die wesentlichen Stufen in der Entstehung unseres Universums beschreiben, so wie sie sich nach der

Vorstellung der heutigen Kosmologie und Physik ergeben haben könnten. Wir werden sehen, dass vieles davon durchaus mit früheren, weniger wissenschaftlichen Bildern im Einklang ist. Vieles, was heute als letzte wissenschaftliche Erkenntnis gilt, wurde bereits vor über zweitausend Jahren als Ergebnis logischen Denkens postuliert. Hinzugekommen ist seitdem ganz zweifelsohne die Forderung, dass die so gewonnenen Ergebnisse nur durch Experimente bestätigt oder widerlegt werden können. Nur das macht ja aus Metaphysik eigentlich Physik. Gerade in letzter Zeit tauchen jedoch, wie schon erwähnt, wieder viele interessante Ideen auf, vom Multiversum bis zu Wurmlöchern durch Raum und Zeit, die in einer Welt angesiedelt sind, welche zumindest heute für uns kaum experimentell erreichbar scheint. Die Welt des Vorstellbaren bleibt sehr viel größer als die des Überprüfbareren, und so werden auch in der Naturwissenschaft in Zukunft viele Gedanken weiterleben, die nach unserem heutigen Wissen kaum eine Chance haben, wirklich bestätigt oder widerlegt zu werden.

Die Grundfragen, die wir hier ansprechen wollen, lassen sich im Wesentlichen in drei Bereiche aufteilen:

- Wie und woraus ist unser Universum entstanden, unsere Welt in Raum und Zeit, was war vorher? Und was kommt danach?
- Was sind die Grundbausteine der Materie in unserer Welt, und welche Kräfte bestimmen ihre Bindung?
- Wie ist aus einer strukturlosen frühen Welt die heutige Vielfalt in Form und Struktur entstanden?

Die Antworten, die man heute auf diese Fragen geben kann, sind durchaus spekulativer Natur und stoßen noch vielerorts auf Widerspruch. Aber sie sind, denke ich, interessant genug, um sie weiter zu verfolgen. Das ist das Ziel dieses Buches.

Noch vor dreißig Jahren wurde die erste dieser Fragen für unzulässig erklärt. Der Anfang, das war der Urknall, und «vorher» machte keinen Sinn. Es gab kein Vorher. Heute stellen sich viele Kosmologen und Physiker die Geburt unseres Universums als eine expandierende Blase in einer heißen Urwelt vor, eine Blase unter vielen anderen. Wir erleben zurzeit eine zweite kopernikanische Revolution: Weder unser

Sonnensystem noch unsere Galaxie, noch unser Kosmos sind das Ende aller Dinge. Es gibt darüber hinaus viele andere, ähnliche oder auch der unseren unähnliche Welten – Welten, die wir wohl nie erreichen können, die aber trotzdem existieren sollten. Dadurch wird der Urknall ein physikalischer Vorgang wie andere auch – er ist kein einmaliges Ereignis mehr, und er kann auch auf ein Ende hinführen.

Die Frage nach den Grundbausteinen unserer heutigen Welt und nach ihren Vorgängern in früheren Entwicklungsstufen lässt sich dank der Fortschritte der Teilchenphysik immer besser beantworten. Der Traum der Theoretiker, über eine Theorie zu verfügen, in der alle Elementarteilchen und alle elementaren Wechselwirkungen von der starken bis zur schwachen Kernkraft zu einer Form vereinigt sind, ist formal zwar immer noch nicht realisiert, aber man kann sich so etwas jetzt zumindest vorstellen. Eine solche «Theorie der großen Vereinigung» muss auf eine Urwelt hoher Symmetrie führen, in der alle Teilchen gleich behandelt werden. Die Abkühlung des Universums bewirkt dann Symmetriebrechungen und damit verschiedene Wechselwirkungen. Wie die Schwerkraft dort hineinpasst, bleibt allerdings weiterhin ein Rätsel.

Auch für die Entwicklung der Vielfalt unserer Welt gibt es recht verschiedene, vielleicht sogar einander widersprechende Modelle. Grundlegend ist in diesem Zusammenhang der berühmte zweite Hauptsatz der Thermodynamik, der eine Entwicklung in Richtung auf eine immer größere Unordnung vorschreibt und damit der Zeit eine Richtung gibt. Heißt das, es entsteht auch im Universum immer mehr Unordnung und damit ein strukturloses Ende? Hier ergeben sich gleich zwei Einwände: Die fortschreitende Ausdehnung des Universums verhindert auf lange Sicht ein Erreichen eines thermodynamischen Gleichgewichts. Und die Rolle der Gravitation als dominierender Kraft bewirkt, dass ein immer kälter werdendes Gas mit einer Gleichverteilung der Materie nicht auf einen stabilen Zustand des Universums führt. Solange die Schwerkraft eine Rolle spielt, ist eine Welt von Galaxien im leeren Raum thermodynamisch günstiger als ein gleichförmiges Gas von Teilchen.

In allen drei Bereichen hat sich in den letzten dreißig Jahren viel getan, und unsere Vorstellungen sind dabei grundlegend verändert

worden. So scheinen zwei fundamentale Arbeitsweisen der Naturwissenschaft an ihre Grenzen gekommen zu sein. Reduktion (Was sind die kleinsten Bausteine der Materie?) hört auf bei den untrennbaren Quarks, und Extension (Erde, Sonnensystem, Galaxie, Universum) endet mit dem Multiversum. Andererseits ist ein neuer Begriff aufgetaucht: Emergenz. Wir unterscheiden heute fundamentale Größen und Kräfte (Ladungen, Bindung eines Wasserstoffatoms) von emergenten Größen und Kräften (Temperatur, Druck), die erst durch das Zusammenspiel vieler Einzelteilchen entstehen. Vielleicht wirkt sich diese Entwicklung auch auf andere Bereiche menschlichen Denkens aus – es wäre in der Geschichte der Physik nicht das erste Mal. Auf jeden Fall möchte ich allen Interessierten zeigen, dass hier und heute in der Naturwissenschaft Entwicklungen stattfinden, die begrifflich sehr viel wichtiger erscheinen als technologisch. Ob sie irgendwann zu neuen Technologien führen werden, bleibt abzuwarten. Aber sie haben bereits heute unser Bild der Welt, in der wir leben, grundlegend verändert. Aus *dem* Universum wurde *ein* Universum im Multiversum, eines unter vielen in einer Urwelt. Und so möchte ich meine Darstellung abschließen mit einer «neuen» Schöpfungsgeschichte, so wie sie aus der heutigen Kosmologie folgen könnte.

Beim Schreiben des vorliegenden Buches habe ich festgestellt, dass es eine wohldefinierte und allgemein akzeptierte Vorstellung der Entwicklung unseres Universums seitens der heutigen Kosmologie überhaupt nicht gibt. Zum Leitmotiv wurde mir daher die Sicht des legendären amerikanischen Baseball-Schiedsrichters, der meinte: «I call them the way I see them.» Andere mögen es anders sehen.

Mein Dank geht an verschiedene Kollegen hier in Bielefeld, mit denen ich viele Aspekte diskutieren konnte; ich danke besonders Frithjof Karsch, der das Manuskript durchgesehen und vieles verbessert hat. Besonderer Dank geht auch an meinen Freund und Kollegen Paolo Castorina aus Sizilien, der mich stets und mit Begeisterung begleitet hat, selbst auf Pfaden, die aus Sicht der offiziellen Physik erst einmal abwegig anmuteten. An Suzette von Reder, die wie immer meine technischen Probleme mit der Textverarbeitung gelöst hat. An Stefan Bollmann vom Verlag C.H.Beck, der gleich einem neuen Buch zugestimmt hat und auch diesmal wieder das Manuskript sorgfältig

korrigiert und verbessert hat. Last but not least geht natürlich ein ganz herzlicher Dank an meine Frau, die es gelassen und hilfreich ertragen hat, dass schon wieder einmal ein Buch so wichtig war.

Bielefeld, Mai 2016

Helmut Satz

Am Anfang schuf Gott Himmel und Erde.

Genesis 1.1

1. Vor dem Urknall

gab es keine Zeit und daher auch noch keinen Anfang. In sechs Tagen, so sagt die Bibel, hat Gott die Welt geschaffen. Obwohl allmächtig, hat er das Werk nicht mit einem Schlag vollbracht, sondern die Schöpfung über sechs Tage verteilt. Licht erschien schon am ersten Tag, Land und Wasser am zweiten, ihre klare Trennung fand erst am dritten statt, und so fort. Die Theologen früherer Zeiten sprachen deshalb vom *Sechstageswerk*, dem *Hexaemeron*. Warum hat die Schöpfung so lange gedauert, und warum hat sie verschiedene Stadien durchlaufen? Es wäre wohl zu einfach, das auf einen vermenschlichten Gott zurückzuführen, der abends müde wurde – da er doch gerade erst Abend und Morgen geschaffen hatte – oder der einfach mehr Zeit brauchte, um das Weitere zu planen. Eher vielleicht erscheint es im menschlichen Denken natürlich, dass so etwas Ausgedehntes und Vielfältiges wie unsere heutige Welt nicht schlagartig entstehen konnte, sondern dass selbst Gott sie erst «im Laufe der Zeit» aus etwas Einfacherem hat hervorgehen lassen.

Was gefehlt hätte, wenn die Welt mit einem Schlag entstanden wäre, ist die *Zeit*: Die Welt wäre zeitlos gewesen. Erst die nacheinander eintretenden Phasen der Schöpfung führen den Begriff einer Zeit ein, einen Ablauf mit Ereignissen und Intervallen und somit eine Skala; durch das Fortschreiten des Geschehens ergibt sich auch eine Zeitrichtung. Und das erste Ereignis dieser Kette definiert nun den Anfang.



Hildegard von Bingen
(1098–1179):
Das Hexaemeron

Ganz ähnlich tritt der Raum in Erscheinung. Erst die Trennung von Himmel und Erde, von Licht und Dunkel, von Land und Wasser definieren einen Raum, in dem bestimmte Dinge hier, andere dort sind, diese oben und jene unten. Die Bühne für das kommende Schauspiel, der Raum, musste also auch zunächst erst erschaffen werden. In der heutigen Denkweise könnte deshalb der Eröffnungssatz der Bibel durchaus lauten: «Am Anfang schuf Gott Zeit und Raum.»

Diese Vorstellungen führen recht natürlich zu der Frage, was denn «vorher» war, wie und woraus Raum und Zeit entstanden sind. Wie wir wissen, geht die heutige Kosmologie von einem Urknall als Anfang unseres Universums aus. Lange Zeit wurden jedoch Fragen nach dem Zustand der Welt *vor* dem Urknall und nach dessen Auslöser als nicht zulässig erklärt. Der bekannte englische Astrophysiker Stephen Hawking meinte noch vor einiger Zeit, das sei so ähnlich wie die Frage, was denn nördlich vom Nordpol wäre. In den letzten dreißig Jahren hat jedoch ein Vorstellungswandel stattgefunden hin zu einem neuen Weltbild, in dem die Frage, wie und woraus unser Universum entstanden ist, durchaus einen Sinn macht. Es gibt heute

einen Rahmen, wenn auch in vielerlei Hinsicht spekulativ und längst nicht von allen Wissenschaftlern akzeptiert, in dem man recht allgemein die Entstehung unseres Universums diskutieren kann.

Die Entwicklung unseres Weltbildes begann mit der Erde als Mittelpunkt. Im nächsten Schritt trat die Sonne an diese Stelle, die Erde war nur einer der die Sonne umkreisenden Planeten. Es stellte sich dann heraus, dass die Sonne ihrerseits nur einer von Millionen Sternen ist, aus denen unsere Galaxie, die Milchstraße, besteht. Und es gibt wiederum viele Millionen ähnlicher Galaxien, die sich von uns durch die Ausdehnung des Raums immer weiter entfernen. Unsere Welt wurde also Schritt um Schritt ein immer kleinerer Teil eines immer größer werdenden Universums. Der Urknall definierte den Anfang unseres Universums und schuf damit auch die Vorstellung, dass das alles ist, was es gibt: eben *das* Universum. Aber so, wie sich ein Giordano Bruno vor vierhundert Jahren eine endlose Aneinanderreihung von Sonnensystemen vorstellen konnte, so können sich heute Kosmologen eine unendliche Zahl von Universen vorstellen, Universen wie das unsere oder auch andere, mit anderen Naturgesetzen. Wie, wann und woraus könnten diese entstanden sein und weiter entstehen?

Die Welt vor unserer Zeit ist die Urwelt. Es ist eine Welt ohne Zeit in unserem Sinne, denn ein Ablauf erfordert eine Reihung von verschiedenen Ereignissen, die es gestatten, von «vorher» und «nachher» zu sprechen. Die Urwelt ist eine Welt ohne Anfang und Ende, ohne Vorher und Nachher, ohne Früher und Später, ohne Hier und Dort, ohne Oben und Unten, ohne Form und Struktur, ohne Groß und Klein. Bereits zweitausend Jahre vor Christus hieß es im Rigveda, dem frühesten indischen Schöpfungsmythos,

*Zu jener Zeit gab es kein Nicht-Sein und kein Sein,
nur Dunkel war, verhüllt von Dunkel,
und unerkennbar wogte dieses alles.*

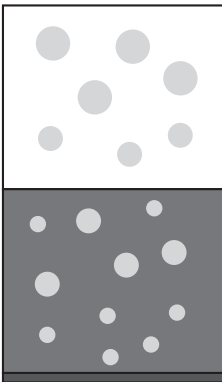
Aus jener Urwelt ist, als eine zufällige Fluktuation, wie eine Blase in heißer Lava, unser Universum entstanden, mit unserem Raum und unserer Zeit. Der Rigveda meint,

das Eine ward durch Macht der Glut geboren,

und so sind sicherlich auch noch viele weitere Blasen, viele andere Universen entstanden. Es ist nicht leicht, sich ein Bild von einer solchen Urwelt zu machen. Wir können es aber versuchen, indem wir mit einem Entwurf anfangen und diesen dann fortlaufend immer wieder korrigieren.

Stellen wir uns einen beliebig großen Behälter Wasser vor, ein Meer bei fester Temperatur und ohne irgendwelche äußeren Einwirkungen, und tauchen tief in das Innere, weit entfernt von allen Begrenzungen. Hier gibt es nur gleichförmiges Wasser, gestern, heute und morgen; Zeit ist bedeutungslos. Die Vorstellung von Raum ist es in gewisser Weise auch, da eine Verschiebung unserer Position, egal in welcher Richtung, zu keiner Änderung der uns umgebenden Welt führt. Und wenn sich dieses Wasser auch noch im interstellaren Raum befinden würde, also ohne irgendwelche Effekte von Schwerkraft, gäbe es auch kein Oben oder Unten.

Sobald die gewählte Temperatur des Wassers in die Nähe des Siedepunkts gerät, bilden sich im Allgemeinen kleine Dampfblasen, Regionen geringerer Dichte als die des sie umgebenden Wassers. In einer irdischen Umgebung steigen diese Blasen auf, entkommen in die Luft über der Wasseroberfläche und dehnen sich dann weiter aus. Das wäre schon ein ganz einfaches Bild, mit dem wir versuchen könnten, das Entstehen einer Welt zu beschreiben. Das heiße Wasser wäre das Urmedium, und jede der Blasen bildet später ein Universum irgendwelcher Art.



Siedendes Wasser

Aber es gibt noch eine interessantere Variante. Wenn das Wasser sehr rein und die Wände des Behälters sehr glatt sind, kann man die Temperatur über den Siedepunkt hinaus anheben, bis etwa 110 Grad Celsius, ohne dass etwas geschieht. Die Techniker sprechen dann von einem *Siedeverzug*. Das Wasser ist jetzt in einem metastabilen Zustand: Jede kleinste Erschütterung oder Unebenheit führt nun dazu, dass sich explosionsartig eine große Blase bildet, die den verhinderten Wasserdampf entstehen und entkommen lässt. Nach dem Entkommen verringert sich die Dichte des Mediums in der Blase mehr und mehr, es gibt eine Zeit und eine Zeitrichtung. Vorher, im Wasser, war das nicht der Fall. Wasser ist Wasser, heute oder morgen, da stellt sich keine Frage von Zeit. Die Zeit entsteht erst durch das Entkommen der Blase, nach der dann Abläufe stattfinden, sich die Wassermoleküle «im Laufe der Zeit» immer weiter voneinander trennen und in immer fernere Regionen in der Luft begeben. Unser Urknall, so meinen die heutigen Experten, war in gewisser Weise ein vergleichbarer Vorgang.

Doch betrachten wir die Situation noch etwas genauer. Wasser hat unter festgelegten Bedingungen einen *Normalzustand*: Am Meeresspiegel ist das unterhalb von null Grad Celsius Eis, von null bis hundert Grad Flüssigkeit, und über hundert Grad Dampf. Die Übergänge von einem Normalzustand in einen anderen, wie Schmelzen oder Verdampfen, bezeichnet man als *Phasenübergänge*. Wenn wir vorsichtig genug vorgehen, können wir aber, wie gerade betrachtet, das Wasser bis zu zehn Grad über den Siedepunkt erhitzen, ohne dass es verdampft. Es ist also noch Flüssigkeit in einem Temperaturbereich, in dem es eigentlich schon Dampf sein sollte. Es befindet sich, so die Physikterminologie, in einem *falschen Normalzustand*, und jede kleinste Störung bringt es dann in den richtigen, nämlich Wasserdampf. Beim überhitzten Wasser befindet sich das System in einem instabilen Zustand künstlich überhöhter Energie, eben in dem falschen Normalzustand; der wahre Normalzustand entspricht niedrigerer Energie, sodass beim Übergang vom falschen in den richtigen Zustand Energie freigesetzt wird, alles spritzt auseinander.

Es gibt in unserer täglichen Welt viele Beispiele für derartige Situationen. Ein recht bekanntes Beispiel ist der Ball auf dem Berg;