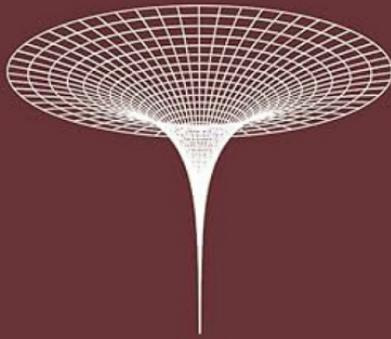


*Das*  
KLEINE BUCH  
*der*  
KOSMOLOGIE



LYMAN PAGE

*»Es gibt keine bessere Einführung in unsere moderne Sicht der Kosmologie.«*  
Avi Loeb, Harvard University

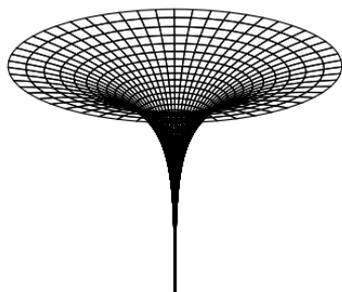


LYMAN PAGE

DAS KLEINE BUCH DER KOSMOLOGIE



*Das*  
KLEINE BUCH  
*der*  
KOSMOLOGIE



LYMAN PAGE

Aus dem Englischen von Karsten Petersen

*»Es gibt keine bessere Einführung in unsere moderne Sicht der Kosmologie.«*  
Avi Loeb, Harvard University

**Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:**

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://d-nb.de> abrufbar.

**Für Fragen und Anregungen**

[info@m-vg.de](mailto:info@m-vg.de)

**Wichtiger Hinweis**

Ausschließlich zum Zweck der besseren Lesbarkeit wurde auf eine genderspezifische Schreibweise sowie eine Mehrfachbezeichnung verzichtet. Alle personenbezogenen Bezeichnungen sind somit geschlechtsneutral zu verstehen.

1. Auflage 2024

© 2024 by Finanzbuch Verlag, ein Imprint der Münchner Verlagsgruppe GmbH

Türkenstraße 89

80799 München

Tel.: 089 651285-0

Die amerikanische Originalausgabe erschien 2020 bei Princeton University Press unter dem Titel *The little book of cosmology*. © 2020 by Princeton University Press. All rights reserved.

Alle Rechte, insbesondere das Recht der Vervielfältigung und Verbreitung sowie der Übersetzung, vorbehalten. Kein Teil des Werkes darf in irgendeiner Form (durch Fotokopie, Mikrofilm oder ein anderes Verfahren) ohne schriftliche Genehmigung des Verlages reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme gespeichert, verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden. Wir behalten uns die Nutzung unserer Inhalte für Text und Data Mining im Sinne von § 44b UrhG ausdrücklich vor.

Übersetzung: Karsten Petersen

Redaktion: Redaktionsbüro Diana Napolitano, Augsburg

Korrektur: Manuela Kahle

Umschlaggestaltung: Marc-Torben Fischer, in Anlehnung an das Original von Jessica Massabrook

Satz: abavo GmbH, Buchloe

Druck: GGP Media GmbH, Pößneck

Printed in Germany

ISBN Print 978-3-95972-774-7

ISBN E-Book (PDF) 978-3-98609-509-3

ISBN E-Book (EPUB, Mobi) 978-3-98609-510-9



Weitere Informationen zum Verlag finden Sie unter:

**[www.finanzbuchverlag.de](http://www.finanzbuchverlag.de)**

Beachten Sie auch unsere weiteren Verlage unter [www.m-vg.de](http://www.m-vg.de)

# INHALT

---

Vorwort . . . . .	9
<b>KAPITEL 1</b>	
<b>GRUNDLAGEN</b>	
Die Größe des Universums . . . . .	17
Das expandierende Universum . . . . .	29
Das Alter des Universums . . . . .	39
Das beobachtbare Universum . . . . .	46
Ist das Universum unendlich? . . . . .	48
Wie wir in der Zeit zurückblicken . . . . .	50
<b>KAPITEL 2</b>	
<b>ZUSAMMENSETZUNG UND ENTWICKLUNGSGESCHICHTE DES UNIVERSUMS</b>	
Die kosmische Mikrowellenhintergrundstrahlung . . . . .	58
Materie und Dunkle Materie . . . . .	71
Dunkle Materie . . . . .	75
Die kosmologische Konstante . . . . .	83
Strukturbildung und die Entwicklung des Universums . . . . .	91
<b>KAPITEL 3</b>	
<b>VERMESSUNG DER KOSMISCHEN MIKROWELLENHINTERGRUNDSTRAHLUNG</b>	
Vermessung der CMB . . . . .	109
Die CMB-Anisotropie . . . . .	120
Quantifizierung der CMB . . . . .	127

## **KAPITEL 4**

### **DAS STANDARDMODELL DER KOSMOLOGIE**

Die Geometrie des Universums . . . . .	139
Die Keime der Strukturbildung . . . . .	144
Das Gesamtbild . . . . .	150

## **KAPITEL 5**

### **GRENZBEREICHE DER KOSMOLOGISCHEN FORSCHUNG**

CMB-Lensing . . . . .	166
Neutrinos . . . . .	168
Gravitationswellen . . . . .	171
Strukturbildung und grundlegende physikalische Zusammenhänge . . .	175
Der Sunjajew-Seldowitsch-Effekt (SZ-Effekt) und Galaxienhaufen . . .	176
Das Temperaturspektrum . . . . .	179
Zusammenfassung und Schlussfolgerungen . . . . .	181
Danksagung . . . . .	187
Anhänge . . . . .	189
Anhang A.1: Das elektromagnetische Spektrum . . . . .	189
Anhang A.2: Expandierender Raum . . . . .	191
Anhang A.3: Tabelle der Entwicklungsgeschichte des Universums . . . . .	194
Anhang A.4: Das beobachtbare Universum im Lauf der Zeit . . . . .	196
Anmerkungen . . . . .	200
Register . . . . .	206

Für Lisa und die Jungs



## VORWORT

---

Dieses kleine Buch bietet eine kurze Einführung in die moderne Kosmologie, die Wissenschaft vom Universum in den extremsten Dimensionen von Raum, Energie und Zeit. Ich hoffe, dass es einige wesentliche Aspekte vermitteln kann, was wir über das Universum wissen – einschließlich seiner Zusammensetzung, seiner Geometrie, seiner Entwicklung und der Gesetze der Physik, die es beschreiben – und wie wir es erfahren haben. Das Thema »Universum« ist reif für wilde Theorien und Spekulationen, die aber seinen vielleicht erstaunlichsten Aspekt vernebeln: Durch Messungen können wir das Universum in seinen gewaltigsten Dimensionen mit prozentualer Genauigkeit verstehen.

Wie wir sehen werden, ist das Universum in seinen größten Dimensionen und in seinen Anfangszeiten bemerkenswert einfach und kann mit nur wenigen Parametern charakterisiert werden. Es ist wesentlich einfacher zu verstehen als etwa die faszinierend komplexe Erde mit ihrer Atmosphäre, den Ozeanen, den sich verschiebenden Kontinenten und dem Magnetfeld, um nur einige ihrer Attribute zu

nennen. In diesem Buch werde ich versuchen, nicht nur aktuelle Beobachtungen und Messungen zu erklären, sondern auch, wie diese durch Erklärungen, die auf den Gesetzen der Physik aufbauen, zu einem einheitlichen Gesamtbild des Kosmos verwoben werden können. Das Modell, das ich beschreiben werde, ist keineswegs das einzig mögliche, aber es erklärt die empirischen Daten mit der geringsten Zahl an Prämissen. Weitere Forschungen werden zeigen, ob dieses Modell zutrifft.

Unser Wissen über das Universum ist im sogenannten Standardmodell der Kosmologie zusammengefasst, das bemerkenswert gut zu den vorliegenden Beobachtungen passt. Es ist vorhersagbar, überprüfbar und kann leicht falsifiziert oder ergänzt werden, falls das notwendig werden sollte. Das Modell besagt unter anderem, dass das Universum zu etwa 5 Prozent aus atomarer Materie besteht – dem Stoff, aus dem wir gemacht sind –, zu etwa 25 Prozent aus »Dunkler Materie« und zu 70 Prozent aus »Dunkler Energie«. Auf der Grundlage der von Albert Einstein formulierten Gravitationstheorie beschreibt das Standardmodell, wie die verschiedenen Komponenten des Universums sich seit den frühesten Anfängen der Zeit bis in die Gegenwart hinein entwickeln. Anders ausgedrückt: Wir übernehmen aus der allgemeinen Relativitätstheorie eine Denkweise über Raum und nutzen sie als Grundlage, um zu beschreiben, wie die Komponenten des Universums – Strahlung, Atome, Dunkle

Materie und Dunkle Energie – ineinandergreifen, um das von uns beobachtete Universum zu bilden. Dies vorausgeschickt, haben wir zwar ein hervorragendes Modell des Universums, aber noch kein grundlegendes Verständnis seiner dominierenden Bestandteile. In der Kosmologie gibt es spannende offene Fragen, die von Wissenschaftlern in aller Welt weiterhin erforscht werden, und auf einige davon werden wir am Ende dieses Buches zurückkommen.

Dieses Buch folgt meinem eigenen Weg, mir die Kosmologie zu erschließen, und konzentriert sich darauf, das Universum anhand von Vermessungen der kosmischen Mikrowellenhintergrundstrahlung («Cosmic Microwave Background», CMB) zu verstehen – dem schwachen thermischen Nachglühen der Geburt unseres Universums. Die empirische Evidenz (Gesamtheit der durch Beobachtung und Experimente gewonnenen wissenschaftlichen Belege), die für diese Interpretation spricht, ist überwältigend. Obwohl die CMB im Prinzip der Wärmestrahlung der Sonne oder einer elektrischen Herdplatte entspricht, so zeigt sie doch eine wesentlich kältere Temperatur. Ein Hinweis auf ihren urzeitlichen Ursprung ist, dass sie gerade einmal 2,725 Grad Celsius über dem absoluten Nullpunkt liegt, also bei 2,725 Kelvin.<sup>1</sup> Doch hinter der CMB steckt viel mehr als nur ihre Temperatur. Die meisten Erkenntnisse, die sie uns liefert, stammen aus den winzigen Unterschieden ihrer Temperatur an verschiedenen Positionen

des Himmels, der sogenannten Temperaturvarianz. Zum Beispiel unterscheiden sich die CMB-Temperaturen am nördlichen und am südlichen Himmelspol (um zwei willkürliche Richtungen zu wählen) um einen winzigen Betrag. Da die CMB so extrem detailliert vermessen werden kann, ist unser Wissen über die kosmische Hintergrundstrahlung das Fundament unseres kosmologischen Modells, des Standardmodells. Doch bevor wir auf die verschiedenen Charakteristika der CMB und ihre Bedeutung näher eingehen, müssen wir zunächst einige grundlegende Konzepte zu der Frage entwickeln, wie wir uns das Universum als Ganzes vorzustellen haben.

In Kapitel 1 werden wir das Fundament legen und uns mit einigen grundlegenden Eigenschaften des Kosmos beschäftigen, wobei wir uns von zwei Beobachtungen leiten lassen, nämlich, dass die Lichtgeschwindigkeit endlich ist und dass das Universum expandiert. Das Ineinandergreifen dieser beiden Fakten schafft einen Rahmen, auf den wir uns in den nachfolgenden Kapiteln stützen können. In Kapitel 2 werden wir uns mit der Zusammensetzung des Universums befassen, und zwar nicht im kleinsten Detail, sondern vielmehr mit Blick auf die Komponenten, die in verschiedenen Epochen der kosmischen Geschichte dominierten. Die Zusammensetzung des Universums bestimmt, wie es sich entwickelt. Wir werden auch darauf eingehen, wie die Elemente des Universums zusammenkommen, um Sterne,

Galaxien und Galaxienhaufen zu bilden. In der Kosmologie werden solche Objekte einfach als »Struktur« bezeichnet. Der gesamte Prozess der Strukturbildung hat seine Wurzeln im Urknall (»Big Bang«) und führte schließlich dazu, dass die Erde entstand – und am Ende der Mensch. In Kapitel 3 werden wir die winzigen Temperaturvarianzen der CMB erklären, die in Tafel 1 (siehe Bildteil) zu sehen sind. Indem wir dieses Bild verstehen lernen, können wir uns eine enorme Menge an Wissen über das Universum erschließen. In Kapitel 4 werden wir dann die einzelnen Elemente zusammenfügen und das Standardmodell der Kosmologie einführen. Obwohl dieses Modell erstaunlich vorhersagbar ist, bleibt doch vieles noch im Dunkeln. Und schließlich werden wir in Kapitel 5 einige Grenzbereiche der theoretischen und experimentellen Forschungsarbeit in der Kosmologie beschreiben.

Die Kosmologie ist ein dynamisches und spannendes Forschungsgebiet. Das Streben nach immer profunderem Wissen sowohl an der theoretischen als auch an der experimentellen Front ist ungebrochen. Für Menschen wie mich, die den Kosmos erforschen, bietet die CMB nach wie vor neue Erkenntnisse – und wenn wir unsere Messungen fortsetzen, wird uns das vielleicht dazu führen, über kurz oder lang bestimmte Elemente des Standardmodells in einem neuen Licht zu sehen. Und es könnte uns auch zu neuen Entdeckungen führen.

Bevor wir beginnen, möchte ich eine kurze Anmerkung zum Niveau dieses Buches machen. Eine der Schwierigkeiten beim Vermitteln aktueller wissenschaftlicher Entwicklungen besteht darin, die betreffenden Inhalte auf einem für die Leserschaft passenden Niveau darzustellen. Obwohl ich einige Begriffe und Konzepte mit wissenschaftlicher Genauigkeit definiere, gehe ich davon aus, dass ein gewisses Basiswissen und ein immanentes Interesse vorhanden sind. Trotzdem habe ich einige Anhänge angefügt, die bei Bedarf etwas ausführlichere Informationen zu bestimmten Themen liefern können. Zum Beispiel setze ich das Wissen voraus, dass Licht eine Welle mit einer bestimmten Wellenlänge ist, die Energie überträgt; dessen ungeachtet bietet Anhang A.1 unter der Überschrift »Das elektromagnetische Spektrum« einen kurzen Überblick zu verschiedenen Strahlungsquellen<sup>2</sup> und deren Wellenlängen, falls weitere Informationen zu diesem Thema gewünscht werden. Und ich setze voraus, dass die meisten Leser wissen werden, dass die Lichtgeschwindigkeit endlich ist und eine fundamentale Naturkonstante darstellt. Weniger bekannt aber wohl ist die Tatsache, dass man unabhängig davon, wo im Universum man sich befindet oder wie schnell man sich fortbewegt, man messen kann, dass die Lichtgeschwindigkeit in einem Vakuum knapp 300.000 Kilometer pro Sekunde (km/s) beträgt. Dies ist eine der Grundlagen von Einsteins spezieller Relativitätstheorie. Um dieses Buch kurz zu hal-

ten, werde ich nicht allzu tief in die Relativitätstheorie einsteigen (es gibt viele Bücher, die das bereits sehr schön tun), und auch nicht in andere, ähnlich komplexe Themen; doch in späteren Kapiteln werde ich physikalische Konzepte, die mit unserem Wissen über den Kosmos zusammenhängen, etwas detaillierter erklären, als sie Ihnen womöglich bislang geläufig waren. Um einige quantitative Werte werden wir nicht herumkommen, aber Sie können sich darauf verlassen, dass die erforderlichen mathematischen Kenntnisse sich auf dem Niveau von Entfernung = Geschwindigkeit  $\times$  Zeit bewegen werden; und in den meisten Fällen werden wir gerundete Zahlen verwenden, da sie leichter zu erfassen sind.

Ein erschwerender Aspekt der Kosmologie ist, dass die Entfernungen und Zeitmaßstäbe so riesig sind, dass sie sich dem menschlichen Vorstellungsvermögen entziehen. Um sie leichter verständlich zu machen, werden wir viele Dinge in »Milliarden« zählen. Um diese Zahl in einen gewissen Kontext zu stellen: Es leben etwas mehr als sieben Milliarden Menschen auf der Erde; die Spitze eines kleinen Fingers enthält etwa eine Milliarde Zellen; und eine Milliarde M&Ms würden beinahe in einen Würfel mit einer Kantenlänge von etwa sechs Metern hineinpassen. Da dies ein populärwissenschaftliches Buch ist (und ich hoffe, dass meine Kollegen es mir verzeihen werden), gibt es keine wissenschaftlichen Quellenangaben, und die Zuschreibung spezifischer Ideen

und Erkenntnisse auf ihre Urheber beschränkt sich auf ein Minimum.

Wir haben eine Menge abzuhandeln in diesem kurzen Buch, ein ganzes Universum – fangen wir an!

## KAPITEL 1

---

# GRUNDLAGEN

### *Die Größe des Universums*

Wie groß ist das Universum? Es ist sehr, sehr groß! Aber jetzt mal im Ernst: Das ist eine ausgesprochen tiefgründige Frage. Die Suche nach der Antwort wird uns bis ins Herz der Kosmologie führen. Doch bevor wir überlegen, was diese Frage überhaupt bedeutet, wollen wir uns zunächst einige typische Entfernungen ansehen. In der Kosmologie sind die Entfernungen wirklich extrem groß. Um den Maßstab festzulegen, fangen wir in unserer unmittelbaren Umgebung an und arbeiten uns dann in immer größere Entfernungen nach außen vor. Der Mond ist etwa 384.400 Kilometer von der Erde entfernt, was als »nah« betrachtet wird. Das entspricht etwa der Kilometerleistung eines Autos, bevor es kaputtgeht. Mit einem sehr guten Auto könnte man also bis zum Mond fahren und es vielleicht sogar wieder zurück schaffen. Doch jenseits des Mondes wird es mühsam, Entfernungen

immer noch in Kilometern zu messen. Da das Universum so riesig ist, messen wir solche Entfernungen typischerweise anders – nämlich mit Licht. Wir können uns fragen, wie lange Licht braucht, um von einem Objekt im Welt- raum zu uns zu kommen. Da die Lichtgeschwindigkeit eine Naturkonstante ist, eignet sie sich gut als Maßeinheit. Anders ausgedrückt: Eine Lichtsekunde ist die Entfernung, die Licht in einer Sekunde zurücklegt (also etwa 300.000 Kilo- meter). Entsprechend legt Licht in 1,3 Sekunden eine Ent- fernung von 390.000 Kilometern zurück. Also können wir, anstatt die Entfernung in Kilometern anzugeben, einfach sagen, dass der Mond 1,3 Lichtsekunden entfernt ist. Bitte beachten Sie, dass wir hier einen auf Zeit beruhenden Be- griff – nämlich die Lichtsekunde – verwenden, um eine Ent- fernung anzugeben.

Die Sonne ist im Durchschnitt etwa 150 Millionen Kilo- meter von uns entfernt, also etwas über acht Lichtminu- ten.<sup>3</sup> Da die schnellste Geschwindigkeit, mit der Informatio- nen sich fortbewegen können, die Lichtgeschwindigkeit ist, müssen wir, wenn auf der Oberfläche der Sonne etwas pas- siert, etwa acht Minuten warten, bis das Licht dieses Ereig- nisses unsere Augen erreicht. Wir werden später noch auf dieses Konzept zurückkommen, um es auf den kosmischen Maßstab anzuwenden. Vorerst werden wir uns aber auf Entfernungen konzentrieren und nicht auf die Zeit, die es braucht, um diese Entfernung zurückzulegen.

Wenn Sie das nächste Mal in einer Neumondnacht abseits der Lichter einer Stadt sind und den Nachthimmel betrachten, werden Sie einen Streifen sehen, der heller ist als alles andere. Dieses sanfte Leuchten kommt von vielen Milliarden Sternen, welche die Milchstraße bilden – unsere Galaxie, in der unsere Sonne ein ziemlich typischer Stern ist. Eine typische Galaxie besteht aus etwa hundert Milliarden Sternen. Eine Möglichkeit, sich die Bedeutung dieser Zahl zu erschließen, besteht darin, dass unser Gehirn etwa hundert Milliarden Neuronen enthält – für jeden Stern in unserer Galaxie gibt es also in Ihrem Gehirn ein Neuron.

Die Sterne der Milchstraße bilden eine Art Scheibe mit einem Durchmesser von etwa 100.000 Lichtjahren und einer Ausbuchtung in der Mitte. Abbildung 1.1 zeigt eine Skizze, wie die Milchstraße aussehen würde, wenn wir sie aus einiger Entfernung betrachten könnten. Die galaktische Ebene (»galactic plane«) ist eine gedachte Fläche, die diese Scheibe in zwei Hälften teilt, als würde man ein flaches Brötchen aufschneiden. Unser Sonnensystem ist etwa auf halber Strecke vom Mittelpunkt der Scheibe entfernt. Wenn wir in Richtung Mitte der Scheibe blicken, sehen wir viel mehr Sterne, als wenn wir abseits der Mitte auf eine Seite der Scheibe schauen. Es ist ungefähr so, als würde man am Stadtrand leben: Obwohl man sich innerhalb des Stadtgebiets befindet, sieht man alle hohen Gebäude des Stadtzentrums nur in einer Richtung.