
Das kosmologische Standardmodell

Matthias Bartelmann

Das kosmologische Standardmodell

Grundlagen, Beobachtungen
und Grenzen

 Springer Spektrum

Matthias Bartelmann
Institut für Theoretische Physik
Universität Heidelberg
Heidelberg, Deutschland

ISBN 978-3-662-59626-5

<https://doi.org/10.1007/978-3-662-59627-2>

ISBN 978-3-662-59627-2 (eBook)

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

Springer Spektrum

© Springer-Verlag GmbH Deutschland, ein Teil von Springer Nature 2019

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von allgemein beschreibenden Bezeichnungen, Marken, Unternehmensnamen etc. in diesem Werk bedeutet nicht, dass diese frei durch jedermann benutzt werden dürfen. Die Berechtigung zur Benutzung unterliegt, auch ohne gesonderten Hinweis hierzu, den Regeln des Markenrechts. Die Rechte des jeweiligen Zeicheninhabers sind zu beachten.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Planung und Lektorat: Lisa Edelhäuser

Einbandabbildung: Collage aus 2MASS Redshift Survey (2MRS), <http://wise2.ipac.caltech.edu/staff/jarrett/2mrs/2mrs.html> (linker Teil) und Nine Year Microwave Sky, © NASA / WMAP Science Team, <https://map.gsfc.nasa.gov/media/121238/index.html> (rechter Teil)

Springer Spektrum ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer-Verlag GmbH, DE und ist ein Teil von Springer Nature.

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Heidelberger Platz 3, 14197 Berlin, Germany

Vorwort und einleitende Bemerkungen

Das kosmologische Standardmodell ist eine der großen Erfolgsgeschichten der modernen Physik. Es baut auf den drei einfachen Annahmen auf, dass die physikalische Beschreibung des Universums auf der allgemeinen Relativitätstheorie aufgebaut werden kann, dass das Universum in einem geeigneten Mittel als um uns herum isotrop angesehen werden kann und dass dies auch für jeden anderen Beobachter im Universum gilt. Diese drei Annahmen reichen aus, um ein Bild des Universums zu zeichnen, das über einen Zeitraum von spätestens einigen Minuten nach seinem Anfang bis heute in sich konsistent ist und das damit eine Zeitspanne von fast 14 Milliarden Jahren umspannt. Es gibt so gut wie keine extragalaktische oder kosmologische Beobachtung mehr, die sich nicht in dieses Bild einfügen würde.

Es ist gerade diese kleine Zahl einfacher Annahmen, die fünf unbequeme Konsequenzen des kosmologischen Standardmodells nach unserer heutigen Kenntnis unausweichlich und damit umso drängender werden lassen. Das sind erstens die Werte der kosmologischen Parameter, die wir nicht erklären können. Dazu gehören insbesondere die Dichteparameter und ihre Verhältnisse, aber auch das Zahlenverhältnis zwischen Photonen und Baryonen. Zweitens müssen wir mit einer kurzen Folge überzeugender Argumente einsehen, dass etwa 85 % der Materie im Universum aus etwas besteht, das wir nicht kennen und daher etwas hilflos als dunkle Materie bezeichnen. Drittens stellt sich heraus, dass die Ausdehnung des Universums nicht gebremst, sondern beschleunigt wird, als ob Gravitation auf großen Skalen abstoßend würde. Wir schreiben dieses Verhalten einer weiteren Substanz zu, die wir dunkle Energie nennen und die wir noch weniger verstehen als die dunkle Materie. Viertens führt die endliche Existenz des Universums dazu, dass es einen Horizont gibt, über den hinaus kein kausaler Zusammenhang bestehen sollte. Trotzdem sehen wir gerade das frühe Universum in einem Zustand, der weit jenseits dieses Horizonts im thermischen Gleichgewicht gewesen sein muss. Fünftens ist es unter den drei Annahmen des kosmologischen Standardmodells unvermeidlich, dass das Universum aus einem heißen, dichten Anfangszustand hervorgegangen sein muss, über dessen Natur und Ursprung wir nichts wissen.

Natürlich liegt in dieser Situation die Vermutung nahe, dass mindestens eine der Annahmen nicht stimmt, auf denen das kosmologische Standardmodell aufbaut. Welche davon könnten wir aufgeben? Die Isotropie um uns ist empirisch so gut gesichert, dass wir sie kaum infrage stellen können. Ob jeder andere Beobachter das Universum ebenso isotrop sieht wie wir, können wir nicht beantworten. Wir können aber im Rahmen der allgemeinen Relativitätstheorie fragen, ob es irgendeinen Hinweis darauf gäbe, dass das Universum zwar um uns isotrop, aber nicht homogen sein könnte. Die Antwort ist ein klares Nein: Allgemein-relativistische, um uns isotrope, aber inhomogene Modelle des Universums werden von den Beobachtungsdaten nicht gestützt. Können wir die allgemeine Relativitätstheorie durch eine weitergehende Theorie ersetzen? Reicht unser Verständnis der Gravitation gerade auf kosmologischen Skalen noch nicht aus? Das mag sein, aber viele Jahre intensiver Erforschung von Verallgemeinerungen der allgemeinen Relativitätstheorie haben vor allem gezeigt, wie robust diese Theorie ist und wie schwierig es ist, sie erfolgreich zu verallgemeinern.

So wird die Beschäftigung mit dem kosmologischen Standardmodell zu einer ständigen intellektuellen Dissonanz: Es ist ganz beeindruckend erfolgreich – und führt uns zugleich an vielen Stellen auf kurzen und direkten Wegen an die Grenzen unseres Wissens. Zugleich ist es gerade diese Dissonanz, die der Kosmologie ihre innere Spannung und ihre Faszination verleiht.

Das Ziel dieses Buches ist, das kosmologische Standardmodell so darzustellen, dass dreierlei erreicht wird: Es soll Verständnis für die Grundlagen des Modells schaffen, es soll die empirische Evidenz beschreiben, die ihm seine Überzeugungskraft verleiht, und es soll zum Weiterfragen anregen. Das kosmologische Standardmodell ist nicht fertig; es hat offene Ränder. Über diese Ränder hinaus zu denken und zu messen, ist die Aufgabe der modernen Kosmologie. Das ist nur auf einer soliden Grundlage

möglich, und diese Grundlage soll dieses Buch schaffen. Es ist genausowenig fertig und abgeschlossen, wie es die Kosmologie selbst ist. Das ist kein Mangel der Kosmologie, sondern ein Wesenszug aller naturwissenschaftlichen Forschung: Je mehr wir wissen, umso größer werden die Randgebiete unseres Wissens und umso mehr Fragen bekommen wir gestellt.

Dieses Buch hat neun Kapitel. Im ersten wird das Gebäude errichtet, im zweiten vermessen. Im dritten wird seine thermische Geschichte beschrieben, die auch eine Geschichte zweier dramatischer Übergänge ist. Kosmologische Inflation als eine Möglichkeit früher Homogenisierung kommt im vierten Kapitel an die Reihe. Im fünften Kapitel werden erst kosmische Strukturen allgemein, im sechsten dann Strukturen im kosmischen Mikrowellenhintergrund besprochen. Das siebte Kapitel wendet sich gravitativ gebundenen Objekten zu, das achte widmet sich der Lichtablenkung als wichtigem kosmologischem Diagnosewerkzeug. Im neunten Kapitel schließlich, dem unvollständigsten, werden die drei Objektklassen besprochen, von denen wir am meisten über das späte Universum lernen: Galaxienhaufen, Galaxien und interstellares Gas.

Dieses Buch ist nicht vollständig; es kann es nicht sein, und es will es auch nicht. Es ist aus Vorlesungen entstanden, die ich über Jahre hinweg erst in München, dann in Heidelberg gehalten habe. In seinem jetzigen Umfang und mit seinem Themenspektrum entspricht es ungefähr dem Heidelberger Masterkurs Cosmology, der über 13 Semesterwochen aus jeweils vier Stunden Vorlesung und zwei Stunden Übungen besteht. Allgemeine Relativitätstheorie wird (natürlich!) in einem eigenen Kurs behandelt. Sie darzustellen, kann nicht die Aufgabe dieses Buches sein, denn dafür sind beide Gegenstände viel zu umfangreich geworden.

So unvollständig wie das Buch sind auch die Literaturangaben, wofür ich vor allem diejenigen Kolleginnen und Kollegen um Verständnis und Nachsicht bitte, die sich nicht ausreichend zitiert finden. Ich habe vor allem Wert auf solche Nennungen gelegt, die entweder an den Ursprung eines Arguments zurückgehen oder moderne Messungen belegen. Sehr viel Literatur bleibt dabei unerwähnt, denn zu jedem Kapitel dieses Buches ließen sich anderenfalls mindestens einige Hundert Arbeiten allein aus etwa dem letzten Jahrzehnt angeben.

Schließlich noch eine Bemerkung zu geschlechtsneutralen Formulierungen: Wegen der besseren Lesbarkeit verwenden wir in diesem Buch überwiegend das generische Maskulinum. Dies impliziert hier immer beide Formen, schließt also die weibliche Form mit ein.

Dank

Meine erste Begegnung mit der Kosmologie liegt etwa 30 Jahre zurück. Langweilig wurde sie mir in diesen Jahren nie, und das verdanke ich den zahllosen, lebhaften, manchmal ratlosen, oft begeisterten Diskussionen mit vielen Kolleginnen und Kollegen. Ich kann sie unmöglich alle hier nennen. Viele Jahre war ich im Planck-Satellitenprojekt beschäftigt; allein dieses Konsortium bestand aus über 600 Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern. Viele haben mich beeindruckt und geprägt. Aber besonders erwähnen möchte ich diejenigen, von denen ich am meisten gelernt habe. In die Kosmologie eingeführt haben mich Gerhard Börner, Jürgen Ehlers und Peter Schneider. Was ich bei ihnen gelernt habe, hat mein Freund und Kollege Achim Weiß immer wieder auf die konstruktivste Weise infrage gestellt. Meine Arbeitsgruppen, zuerst in Garching, dann in Heidelberg, haben durch kritische Fragen und unsere gemeinsame Arbeit entscheidend dazu beigetragen, Argumente zu verbessern und zu verschärfen, Gedanken zu vertiefen und Fehler auszuräumen. Zahlreiche Studentinnen und Studenten haben meine Vorlesungen kritisch begleitet und die Darstellung damit wesentlich beeinflusst und verbessert. Christian Angrick, Ivan Kostyuk und Christoph Pfrommer haben die Mühe auf sich genommen, das ganze Buch oder große Teile davon kritisch und genau zu lesen und zu korrigieren. Ihnen allen, auch den vielen nicht namentlich Genannten, gilt mein herzlichster Dank.

Ohne die stetige, neugierige, fachkundige und geduldige Begleitung durch Dr. Lisa Edelhäuser aus dem Springer-Verlag wäre dieses Buch nicht entstanden, und es hat in seinem Aussehen durch Bianca Alton wesentlich gewonnen. Auch ihnen beiden danke ich herzlich für die jahrelange Begleitung und tatkräftige Unterstützung.

Und schließlich gibt es da eine kleine, feine Gruppe wunderbarer Freunde. Für Euren Rat, Eure Unterstützung, Eure Begleitung weit über alles Fachliche hinaus, für großartige gemeinsame Stunden in schwierigen und schönen Zeiten danke ich Euch ganz besonders!

Heidelberg, April 2019

Matthias Bartelmann

Größen und Einheiten

Wo nicht anders angegeben, verwenden wir Gauß'sche cgs-Einheiten. Aus ihnen abgeleitet ist die Einheit der Energie, das erg, das in Joule und eV ausgedrückt die Zahlenwerte

$$\begin{aligned} 1 \text{ erg} &= 10^{-7} \text{ J} = 6.2414 \cdot 10^{11} \text{ eV} , \\ 1 \text{ eV} &= 1.6022 \cdot 10^{-12} \text{ erg} \end{aligned} \quad (1)$$

annimmt. Die in unserem Zusammenhang wichtigsten Naturkonstanten und ihre Zahlenwerte in diesem Einheitensystem sind in Tab. 1 zusammengestellt.

Häufig tritt das Produkt $\hbar c$ auf, das die Dimension (erg cm) hat. Sein Zahlenwert ist

$$\hbar c = 3.1616 \cdot 10^{-17} \text{ erg cm} = 1.9733 \cdot 10^{-5} \text{ eV cm} . \quad (2)$$

Die Temperatur des kosmischen Mikrowellenhintergrundes, $T_{\text{CMB}} = (2.725 \pm 0.001) \text{ K}$ [1], legt durch

$$k_{\text{B}} T_{\text{CMB}} = 3.76 \cdot 10^{-16} \text{ erg} = 0.23 \text{ meV} \quad (3)$$

eine Energieskala und durch

$$\frac{k_{\text{B}} T_{\text{CMB}}}{h} = 56.78 \text{ GHz} \quad (4)$$

eine charakteristische Frequenz fest. Ferner ist das Verhältnis $k_{\text{B}} T_{\text{CMB}}/(\hbar c)$ die inverse Länge

$$\frac{k_{\text{B}} T_{\text{CMB}}}{\hbar c} = 11.89 \text{ cm}^{-1} . \quad (5)$$

Aus den Naturkonstanten \hbar , c , G und k_{B} können natürliche Einheiten der Länge, Masse, Zeit und Temperatur konstruiert werden, die *Planck-Einheiten* [2]. Sie sind in Tab. 2 aufgeführt.

Die astronomische Längeneinheit *Megaparsec* beträgt schließlich

$$1 \text{ Mpc} = 3.0857 \cdot 10^{24} \text{ cm} . \quad (6)$$

Tab. 1 Zahlenwerte einiger wichtiger Naturkonstanten im Gauß'schen cgs-System

Größe	Symbol	Wert
Lichtgeschwindigkeit	c	$2.9979 \cdot 10^{10}$
reduziertes Planck'sches Wirkungsquantum	\hbar	$1.0546 \cdot 10^{-27}$
Boltzmann-Konstante	k_{B}	$1.3806 \cdot 10^{-16}$
Gravitationskonstante	G	$6.6741 \cdot 10^{-8}$
Masse des Protons	m_{p}	$1.6726 \cdot 10^{-24}$

Tab. 2 Planck-Einheiten

Größe	Symbol	Formel	Wert
Planck-Länge	λ_{Pl}	$\sqrt{\frac{\hbar G}{c^3}}$	$1.62 \cdot 10^{-33} \text{ cm}$
Planck-Masse	m_{Pl}	$\sqrt{\frac{\hbar c}{G}}$	$2.18 \cdot 10^{-5} \text{ g}$
Planck-Zeit	t_{Pl}	$\sqrt{\frac{\hbar G}{c^5}}$	$5.39 \cdot 10^{-44} \text{ s}$
Planck-Temperatur	T_{Pl}	$\sqrt{\frac{\hbar c}{G k_{\text{B}}^2}}$	$1.42 \cdot 10^{32} \text{ K}$

Literatur

1. D.J. Fixsen, J.C. Mather, ApJ **581**, 817 (2002). <https://doi.org/10.1086/344402>
2. M. Planck, Annalen der Physik **306**, 69 (1900). <https://doi.org/10.1002/andp.19003060105>

Inhaltsverzeichnis

1	Homogene, isotrope Weltmodelle	1
1.1	Symmetrieanahmen und Metrik	2
1.2	Rotverschiebung und Dynamik	9
1.3	Kosmologische Parameter	14
1.4	Alter, Ausdehnung und Entfernungsmaße	20
	Literatur	29
2	Alter und Ausdehnung der Welt	31
2.1	Nukleare Kosmochronologie	32
2.2	Altersbestimmungen aus der Sternentwicklung	37
2.3	Messungen der Hubble-Konstante	43
2.4	Ausdehnungsgeschichte des Universums	54
	Literatur	63
3	Thermische Entwicklung	65
3.1	Thermodynamik im Universum	66
3.2	Teilchen in Wechselwirkung	73
3.3	Nukleosynthese	85
3.4	Elementhäufigkeiten	90
	Literatur	93
4	Inflation und Dunkle Energie	95
4.1	Die Idee der Inflation	96
4.2	Antrieb der Inflation	103
4.3	Entstehung kosmischer Strukturen	108
4.4	Dunkle Energie	114
	Literatur	121
5	Strukturen im Universum	123
5.1	Das Wachstum von Störungen	124
5.2	Das Leistungsspektrum und seine Entwicklung	135
5.3	Quantitative Beschreibung	145
5.4	Weitere Effekte und Ergebnisse	151
	Literatur	157

6	Der kosmische Mikrowellenhintergrund	159
6.1	Vereinfachte Beschreibung	160
6.2	Statistische Analyse des CMB	170
6.3	Messungen des CMB am Beispiel von Planck	177
6.4	Normierung des Leistungsspektrums	186
	Literatur	189
7	Halos und ihre Massenfunktion	191
7.1	Sphärischer Kollaps	192
7.2	Die Massenfunktion von Press und Schechter	198
7.3	Erweiterte Press-Schechter-Theorie	202
7.4	Dichteprofile dunkler Halos	204
	Literatur	208
8	Gravitationslinsen	209
8.1	Lichtausbreitung im Universum	210
8.2	Dünne Gravitationslinsen	219
8.3	Leistungsspektren und Korrelationsfunktionen	227
8.4	Messungen der kosmischen Scherung	232
	Literatur	237
9	Galaxienhaufen, Galaxien und Gas	239
9.1	Beobachtbare Größen	240
9.2	Kosmologische Bedeutung der Galaxienhaufen	251
9.3	Galaxien	256
9.4	Intergalaktisches Gas	265
	Literatur	269
	Abschluss und Ausblick	271
	Stichwortverzeichnis	273