

Kosmologie für alle, die mehr wissen wollen

Delia Perlov · Alex Vilenkin

Kosmologie für alle, die mehr wissen wollen

 Springer

Delia Perlov
Tufts University
Medford, MA, USA

Alex Vilenkin
Physics and Astronomy
Tufts University
Medford, MA, USA

ISBN 978-3-030-63358-5 ISBN 978-3-030-63359-2 (eBook)
<https://doi.org/10.1007/978-3-030-63359-2>

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

© Springer Nature Switzerland AG 2021

Die Übersetzung wurde mit Hilfe von künstlicher Intelligenz (maschinelle Übersetzung durch den Service DeepL.com) angefertigt. Eine anschließende menschliche Überarbeitung mit Blick auf Inhalt und Sprache wurde durchgeführt von Lothar Seidler.

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.

Einbandabbildung: Fred Fokkelman, Shutterstock

Verantwortlich im Verlag: Margit Maly

Springer ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer Nature Switzerland AG und ist ein Teil von Springer Nature.

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Gewerbestrasse 11, 6330 Cham, Switzerland

Zum Gedenken an Allen Everett und Leonard Schwartz

Danksagung

Wir möchten dem Springer-Verlagsteam, insbesondere Angela Lahee, unseren aufrichtigen Dank aussprechen. Angela Lahee war äußerst hilfsbereit, entgegenkommend und geduldig bei jedem Schritt des Weges. Wir möchten den folgenden Personen dafür danken, dass sie das Manuskript ganz oder teilweise gelesen und nützliches Feedback gegeben haben: Jose Blanco-Pillado, Peter Jackson, Jim Kernohan, Levon Pogosian, Michael Schneider und Brian Sinskie. Ein besonderer Dank gilt Ken Olum für seine ausführlichen Kommentare. Dank auch an Natalie Perlov für das Zeichnen mehrerer Abbildungen in dem Buch und an Gayle Grant und Caroline Merighi von der Tufts University für ihre administrative Hilfe. DP: Ich möchte meinem Ehemann Larry, meinen Kindern Natalie, Alexa und Chloe, meiner Mutter Glenda, meiner Schwester Heidi und meinem verstorbenen Vater Leonard für ihre anhaltende Unterstützung und ihr Interesse an diesem Projekt danken. AV: Ohne die Unterstützung meiner Frau Inna wäre es schwierig gewesen, dieses Projekt zu Ende zu führen. Ich danke ihr für ihre Geduld, ihren Rat und für die wunderbare Küche, die mich bei Laune gehalten hat.

Inhaltsverzeichnis

Teil I Der Urknall und das beobachtbare Universum

1	Historischer Überblick	3
1.1	Die großen kosmischen Fragen	3
1.2	Ursprünge der wissenschaftlichen Kosmologie	4
1.3	Kosmologie heute	8
2	Newtons Universum	15
2.1	Die Newton'schen Bewegungsgesetze	15
2.2	Die Newton'sche Schwerkraft	19
2.3	Beschleunigung des freien Falls	22
2.4	Kreisbewegung und planetarische Bahnen	23
2.5	Energieerhaltung und Fluchtgeschwindigkeit	25
2.6	Die Newton'sche Kosmologie	30
2.7	Olbers' Paradoxon	31
3	Die Spezielle Relativitätstheorie	35
3.1	Das Prinzip der Relativität	35
3.2	Lichtgeschwindigkeit und Elektromagnetismus	39
3.3	Einsteins Postulate	43
3.4	Gleichzeitigkeit	45
3.5	Zeitdilatation	46
3.6	Längenkontraktion	49
3.7	$E = mc^2$	51

X Inhaltsverzeichnis

3.8	Von Raum und Zeit zur Raumzeit	52
3.9	Kausalität in der Raumzeit	56
4	Die Struktur von Raum und Zeit	65
4.1	Die erstaunliche Hypothese	66
4.2	Die Geometrie des Raums	69
4.3	Gekrümmter Raum	74
4.4	Die Allgemeine Relativitätstheorie	79
4.5	Vorhersagen und Überprüfung der Allgemeinen Relativitätstheorie	82
5	Ein expandierendes Universum	91
5.1	Einsteins statisches Universum	91
5.2	Probleme mit einem statischen Universum	95
5.3	Friedmanns expandierendes Universum	98
6	Beobachtende Kosmologie	107
6.1	Fingerabdrücke der Elemente	108
6.2	Messen von Geschwindigkeiten	110
6.3	Messen von Entfernungen	112
6.4	Die Anfänge der extragalaktischen Astronomie	117
7	Das Hubble-Gesetz und das expandierende Universum	121
7.1	Ein expandierendes Universum	122
7.2	Ein Anfang des Universums?	125
7.3	Die Steady-State-Theorie	126
7.4	Der Skalenfaktor	128
7.5	Kosmische Rotverschiebung	129
7.6	Das Alter des Universums	130
7.7	Die Hubble-Entfernung und der kosmische Horizont	131
7.8	Nicht alles expandiert	134
8	Das Schicksal des Universums	139
8.1	Die Kritische Dichte	139
8.2	Der Dichteparameter	142

9	Dunkle Materie und dunkle Energie	147
9.1	Die mittlere Massendichte des Universums und die dunkle Materie	148
9.2	Dunkle Energie	154
9.3	Das Schicksal des Universums – noch einmal von vorn	157
10	Die Quantenwelt	161
10.1	Quanten als diskrete Objekte	161
10.2	Nichtdeterminiertheit von Quanten	163
10.3	Die Wellenfunktion	166
10.4	Die Viele-Welten-Interpretation	170
11	Der heiÙe Urknall	175
11.1	Nach der Expansion in der Zeit zur¼ckgehen	175
11.2	Wärmestrahlung	178
11.3	Das Modell vom heißen Urknall	181
11.4	Die Entdeckung des heißen Urzustands	183
11.5	Bilder des sehr jungen Universums	186
11.6	CMB heute und in früheren Zeitphasen	189
11.7	Die drei kosmischen Phasen	191
12	Strukturbildung	197
12.1	Kosmische Struktur	197
12.2	Aufbau der Struktur	201
12.3	Beobachtung der Entwicklung kosmischer Strukturen	203
12.4	Primordiale Dichtefluktuationen	205
12.5	Supermassereiche Schwarze Löcher und aktive Galaxien	206
13	Häufigkeit der Elemente	209
13.1	Warum Alchemisten nicht erfolgreich waren	209
13.2	Urknall-Nukleosynthese	211
13.3	Die Nukleosynthese in den Sternen	215
13.4	Entstehung von Planetensystemen	217
13.5	Leben im Universum	219

14	Das sehr frühe Universum	225
14.1	Teilchenphysik und der Urknall	225
14.2	Das Standardmodell der Teilchenphysik	229
14.3	Symmetriebrechungen	233
14.4	Die Zeitachse des frühen Universums	236
14.5	Physik jenseits des Standardmodells	237
14.6	Vakuundefekte	241
14.7	Baryogenese	246
Teil II Jenseits des Urknalls		
15	Probleme mit dem Urknall	253
15.1	Das Flachheitsproblem: Warum ist die Geometrie des Universums flach?	253
15.2	Das Horizontproblem: Warum ist das Universum so homogen?	255
15.3	Das Strukturproblem: Was ist der Ursprung der kleinen Dichtefluktuationen?	258
15.4	Das Monopolproblem: Wo sind sie?	258
16	Die Theorie der kosmischen Inflation	261
16.1	Lösung des Flachheits- und des Horizontproblems	261
16.2	Die kosmische Inflation	262
16.3	Lösungen für die Probleme des Urknalls	267
16.4	Zerfall des Vakuums	270
16.5	Ursprung der kleinen Dichtefluktuationen	274
16.6	Weiteres zur Inflation	277
17	Tests für die Inflation: Vorhersagen und Beobachtungen	283
17.1	Flachheit	283
17.2	Dichtefluktuationen	284
17.3	Gravitationswellen	288
17.4	Offene Fragen	293
18	Die ewige Inflation	297
18.1	Volumenzunahme und -zerfall	297
18.2	Random Walk des Inflaton-Feldes	300
18.3	Ewige Inflation durch Blasennukleation	302
18.4	Raumzeiten der Blasen	304

18.5	Kosmische Klone	308
18.6	Das Multiversum	311
18.7	Überprüfen des Multiversums	314
19	Stringtheorie und Multiversum	321
19.1	Was ist die Stringtheorie?	322
19.2	Extradimensionen	324
19.3	Die Energielandschaft	325
19.4	Multiversum der Stringtheorie	327
19.5	Das Schicksal unseres Universums neu betrachtet	328
20	Anthropische Selektion	331
20.1	Die Feinabstimmung der Naturkonstanten	332
20.2	Das Problem der kosmologischen Konstante	334
20.3	Das anthropische Prinzip	338
20.4	Was für und gegen anthropische Erklärungen spricht	340
21	Das Prinzip der Mittelmäßigkeit	345
21.1	Die Glockenkurve	345
21.2	Das Prinzip der Mittelmäßigkeit	347
21.3	Ermittlung der Verteilung durch Zählung der Beobachter	348
21.4	Vorhersage der kosmologischen Konstante	349
21.5	Das Messproblem	352
21.6	Das Weltuntergangsargument und die Zukunft unserer Zivilisation	354
22	Hatte das Universum einen Anfang?	361
22.1	Ein Universum, das schon immer existiert?	361
22.2	Der BGV-Satz	363
23	Die Erschaffung von Universen aus dem Nichts	369
23.1	Das Universum als Quantenfluktuation	369
23.2	Quantentunnelung aus dem „Nichts“	372
23.3	Das Multiversum der Quantenkosmologie	375
23.4	Die Bedeutung des „Nichts“	377

XIV Inhaltsverzeichnis

24	Das Gesamtbild	381
24.1	Das beobachtbare Universum	381
24.2	Das Multiversum	383
24.3	Antworten auf die „Großen Fragen“	390
24.4	Unser Platz im Universum	390
25	Anhang	393
26	Weiterführende Literatur	403
	Stichwortverzeichnis	407