

# Auf einen Blick

<b>Über die Autorinnen .....</b>	<b>11</b>
<b>Einführung .....</b>	<b>27</b>
<b>Teil I: Erste Schritte in der Astrophysik .....</b>	<b>33</b>
<b>Kapitel 1: Willkommen im Universum.....</b>	<b>35</b>
<b>Kapitel 2: Die Physik von A bis Z .....</b>	<b>47</b>
<b>Kapitel 3: Astronomie kurz und bündig .....</b>	<b>75</b>
<b>Kapitel 4: Der Brückenschlag zwischen Astronomie und Physik .....</b>	<b>91</b>
<b>Teil II: Wenn Sie sich etwas wünschen ... .....</b>	<b>115</b>
<b>Kapitel 5: Die Kraft der Sterne: Wasserstoff, Helium und ein Hauch von Kernfusion .....</b>	<b>117</b>
<b>Kapitel 6: Freunde fürs Leben: Sternsysteme und Staubwolken .....</b>	<b>137</b>
<b>Kapitel 7: Exoplaneten: die Suche nach der Erde 2.0 .....</b>	<b>157</b>
<b>Kapitel 8: Weiße Zwerge, Schwarze Löcher und Neutrinos – oh je! .....</b>	<b>181</b>
<b>Teil III: Galaxien: Teamwork macht den Traum wahr .....</b>	<b>199</b>
<b>Kapitel 9: Von verschwommenen Klecksen zu stattlichen Spiralen: die Milchstraße und andere Galaxien .....</b>	<b>201</b>
<b>Kapitel 10: Die Quantifizierung des Unbekannten oder die Art, wie Galaxien funktionieren.....</b>	<b>215</b>
<b>Kapitel 11: Größer als riesig: Galaxienhaufen .....</b>	<b>233</b>
<b>Kapitel 12: Seltsame und verrückte galaktische Phänomene .....</b>	<b>257</b>
<b>Teil IV: Kosmologie: der Anfang und das Ende von allem .....</b>	<b>275</b>
<b>Kapitel 13: Der Urknall: wie alles begann.....</b>	<b>277</b>
<b>Kapitel 14: Das erste Licht im Universum oder wie ein Stern geboren wird.....</b>	<b>299</b>
<b>Kapitel 15: Jetzt wird es noch unheimlicher: Dunkle Materie, Dunkle Energie und Relativitätstheorie.....</b>	<b>315</b>
<b>Kapitel 16: Das Ende von allem .....</b>	<b>339</b>
<b>Teil V: Der Top-Ten-Teil.....</b>	<b>363</b>
<b>Kapitel 17: Zehn Wissenschaftler, die der Astrophysik den Weg ebneten .....</b>	<b>365</b>
<b>Kapitel 18: Zehn wichtige Weltraummissionen in der Astrophysik .....</b>	<b>369</b>
<b>Glossar .....</b>	<b>377</b>
<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>383</b>
<b>Stichwortverzeichnis .....</b>	<b>391</b>

# Inhaltsverzeichnis

<b>Über die Autorinnen .....</b>	<b>11</b>
Widmung .....	11
Danksagung der Autorinnen .....	12
<b>Einführung .....</b>	<b>27</b>
Über dieses Buch.....	28
Törichte Annahmen über die Leser .....	28
Wie dieses Buch aufgebaut ist.....	29
Teil I: Erste Schritte in der Astrophysik .....	29
Teil II: Wenn Sie sich etwas wünschen ... .....	29
Teil III: Galaxien: Teamwork macht den Traum wahr .....	29
Teil IV: Kosmologie: der Anfang und das Ende von allem .....	30
Teil V: Der Top-Ten-Teil .....	30
Symbole, die in diesem Buch verwendet werden.....	30
Jenseits des Buches.....	31
Wie es weitergeht .....	31
<b>TEIL I ERSTE SCHRITTE IN DER ASTROPHYSIK.....</b>	<b>33</b>
<b>Kapitel 1 Willkommen im Universum .....</b>	<b>35</b>
Die Wissenschaft der Astrophysik.....	36
Der Beginn der Astronomie .....	36
Eine wunderbare Verbindung: Physik, Astronomie und Astrophysik .....	37
Es werde Licht! Das elektromagnetische Spektrum .....	37
Wellen schlagen .....	39
Passende Werkzeuge .....	41
Das Wesentliche über Teleskope und astronomische Instrumente.....	41
Der Blick von oben: weltraumgestützte Teleskope.....	43
Sterne, Galaxien und ihre kosmologischen Freunde .....	44
<b>Kapitel 2 Die Physik von A bis Z .....</b>	<b>47</b>
Die Bausteine des Universums: Teilchen.....	48
Die großen drei: Protonen, Neutronen und Elektronen.....	48
Elemente und Moleküle .....	50
(Sie sind) elementar, Teilchen .....	52
Mit Photonen beleuchten .....	52

## 16 Inhaltsverzeichnis

Was die Materie ausmacht.....	54
Das Wasser, das wir trinken, und die Luft, die wir atmen – Elemente und Moleküle.....	55
Alles dreht sich um den Zustand: die Aggregatzustände.....	55
Aber manchmal ist es einfach Antimaterie .....	56
Auf die Kraft kommt es an.....	57
Mit der Schwerkraft Schwere gewinnen.....	58
Maxwell sei Dank für die elektromagnetische Kraft.....	59
Die starke und schwache Kernkraft.....	60
Energie speichern oder verbrauchen – aber nicht verschwenden.....	61
Schneller kinetische und potenzielle Energie tanken.....	61
Wärme übertragen durch Leitung, Konvektion und Strahlung.....	62
Mehr als das Auge sehen kann: das elektromagnetische Spektrum.....	63
Die unendliche Flexibilität des Lichts: sowohl Welle als auch Teilchen .....	63
Das ist das Gesetz (der Physik)!.....	64
Die Newtonschen Bewegungsgesetze .....	65
Mit Geschwindigkeit, Beschleunigung und Impuls mehr erreichen.....	66
Eine Unterhaltung über die Erhaltung .....	67
Einstein und die Äquivalenz von Energie und Masse .....	68
Die Vereinigung von Wärme und Energie mit Thermodynamik und statistischer Mechanik .....	68
Die Gesetze der Thermodynamik kennenlernen .....	69
Wahrhaftig eins sein mit der Umgebung: die Schwarzkörperstrahlung .....	71
Elektromagnetische Wellen übernehmen die schwere Arbeit der Strahlungsübertragung .....	72
Wenn es auf die Details ankommt, zoomen Sie auf die Quantenmechanik .....	73
<b>Kapitel 3</b> <b>Astronomie kurz und bündig .....</b>	<b>75</b>
Wo beginnen ... oder: wie alles begann .....	76
Unser Sonnensystem, unsere Galaxie und das Universum kartieren.....	79
Eine Frage des Maßstabs .....	79
Eine planetarische Besichtigung .....	81
Das Lichtspiel der Natur mit Meteoren, Asteroiden und Kometen betrachten .....	84
Galaxien und mehr .....	85
Beobachtende Astronomie:	
Was sind das für Punkte am Himmel? .....	85
Sternbilder: die Kartierung der Sterne .....	86
Ekliptik: die Reise der Sonne im Verlauf eines Jahres.....	87
Wie astronomische Objekte benannt werden .....	89

<b>Kapitel 4</b>		
<b>Der Brückenschlag zwischen Astronomie und Physik .....</b>	<b>91</b>	
Mehr als die Summe seiner Teile: das einzigartige Studium der Astrophysik .....	92	
Eine Verschiebung, zwei Verschiebungen, Rotverschiebung, Blauverschiebung.....	92	
Kommen Sie nicht zu spät zur Party, wenn die Zeit drängt.....	94	
Himmelsmechanik und Umlaufbahnen .....	96	
In die Einzelheiten der Astrophysik eintauchen .....	97	
Theoretische Astrophysik .....	98	
Beobachtende Astrophysik.....	98	
Astrophysik im Labor.....	98	
Hochenergie-Astrophysik .....	98	
Mit der Kosmologie die gesamte Bandbreite des Universums erkunden..	99	
Das Wesentliche über Teleskope und optische Instrumente .....	99	
Optische Teleskope .....	99	
Das Nachtleben in optischen Observatorien.....	101	
Andere Arten von Teleskopen .....	102	
Der Blick von oben: weltraumgestützte Teleskope.....	104	
Die Sonne, der Stern unseres Sonnensystems .....	105	
Sonneneruptionen, Sonnenwinde und andere Sonnenaktivitäten .....	105	
Heiß oder kalt? Die Besonderheiten des Wetters im Weltraum .....	107	
Die Sonne studieren .....	108	
Finsternisse oder auf wissenschaftliche Weise Schatten werfen .....	108	
Roter Mond: Mondfinsternisse .....	109	
Nicht hinschauen! Sonnenfinsternis .....	110	
Die Wissenschaft hinter den Finsternissen .....	113	
<b>TEIL II</b>		
<b>WENN SIE SICH ETWAS WÜNSCHEN ... .....</b>	<b>115</b>	
<b>Kapitel 5</b>		
<b>Die Kraft der Sterne: Wasserstoff, Helium und ein Hauch von Kernfusion.....</b>	<b>117</b>	
Herzlichen Glückwunsch: ein Stern ist geboren .....	118	
Wie werden Sterne definiert?.....	118	
Zwei sind besser als einer: Fusion.....	118	
Protosterne, Gebiete der Sternentstehung und Akkretionsscheiben .....	121	
Lernen Sie Ihre Sterne kennen: Eigenschaften, Arten und Merkmale.....	124	
Setzen Sie nicht auf das Wünschen: Verstehen Sie die Helligkeit, die Masse und andere Eigenschaften der Sterne .....	124	
Die Aufzeichnung der Helligkeit mit dem Hertzsprung-Russell-Diagramm.....	126	
Zwerge und Riesen.....	128	
Die einzige Konstante ist die Veränderung veränderlicher Sterne.....	129	

## 18 Inhaltsverzeichnis

Alle guten Dinge müssen zu einem Ende kommen .....	131
Vom Aufflackern bis zur vollständigen Explosion:	
Novae und Supernovae.....	131
Die Nukleosynthese und die Entstehung neuer Elemente .....	132
Der Lebenszyklus eines Sterns: Erhitzen, Abkühlen und alles dazwischen.....	133
Die Reinkarnation der Sterne und die nächste Phase der stellaren Existenz.....	135

## Kapitel 6 Freunde fürs Leben: Sternsysteme und Staubwolken ..... 137

Viel hilft viel: Doppel- und Mehrfachsternsysteme.....	138
Die Bande, die binden: was es bedeutet, durch die Gravitation gebunden zu sein .....	138
Umlaufbahnen und die Wissenschaft dahinter.....	140
Entstehung und Entwicklung von Mehrfachsternsystemen .....	140
Der Schritt ins Licht: Finsternisse in einem Doppelsternsystem.....	143
Umlaufbahnen von Doppelsternsystemen und die Radialgeschwindigkeit.....	144
Drei sind nicht zu viel: Mehrfachsternsysteme .....	146
Werft Euch alle auf einen Haufen, ihr Sternhaufen!.....	147
Aneinanderkleben: die Haufenbildung.....	148
Schließen Sie die Tür! Wissenswertes über offene Sternhaufen erfahren .....	148
Mit Kugelsternhaufen noch klebriger werden.....	149
Mit interstellarem Gas und Staub Vollgas geben .....	150
Das interstellare Medium .....	150
Mit dem Kopf in den (molekularen) Wolken träumen .....	151
IR-Spektroskopie und Laborastrophysik.....	151
Struktur in Gas und Staub bringen: Nebel.....	152
Diffuse Nebel und Dunkelnebel.....	153
Wer hat wen erschaffen? Planetarische Nebel und Supernova-Überreste .....	154

## Kapitel 7 Exoplaneten: die Suche nach der Erde 2.0 ..... 157

Jenseits der Erde .....	158
Die Exoplaneten erklären .....	159
Der Schlüssel zum Verständnis der Planetenentstehung .....	160
Exoplaneten gibt es in zahlreichen Formen und Farben.....	160
Eigenschaften von Exoplaneten (einschließlich Abweichungen).....	161
Was verbirgt sich hinter einem Namen?.....	162
(Nicht) brennende Riesengasbälle und neptunartige Exoplaneten .....	162
Sie sind wirklich super! Die Supererden.....	163
Schauen Sie bei der Suche nach terrestrischen Exoplaneten nicht weiter als Mutter Erde .....	163

Bei der Entdeckung von Exoplaneten unter (oder um) versteckte Felsen blicken . . . . .	164
Beobachtungsmethoden und ihre Ausrichtung . . . . .	164
Die Bestimmung der Entfernung zwischen zwei Punkten mit der Radialgeschwindigkeit . . . . .	165
Transit, TTV und Gravitationslinseneffekt . . . . .	166
Ignorieren Sie den Müll, aber achten Sie auf Ihre Trümmerscheibe . . . . .	168
Machen Sie ein Foto! Die Zukunft der Entdeckung von Exoplaneten . . . . .	168
Die Grundzüge der Entstehung von Exoplaneten . . . . .	169
Planetarische Geburtsrechte: protoplanetare Scheiben . . . . .	169
Bewegen Sie sich! Die Dynamik von Exoplanetensystemen . . . . .	171
Atmosphären von Exoplaneten . . . . .	173
Kann auf Exoplaneten Leben gefunden werden? . . . . .	174
Goldlöckchen hatte recht: die »habitable Zone« oder Bedingungen für Leben, wie wir es kennen . . . . .	175
Zwillinge: Warum haben wir die Erde 2.0 noch nicht gefunden? . . . . .	176
Riecht nach Leben: die Suche nach Biosignaturen in Atmosphären von Exoplaneten . . . . .	178
Die Drake-Gleichung und die Suche nach intelligenten Leben . . . . .	178

## **Kapitel 8**

### **Weiße Zwerge, Schwarze Löcher und Neutrinos – oh je! . . . . . 181**

Schneewittchen und die sieben . . . . .	182
Weiß wie Schnee: Weiße Zwerge . . . . .	182
So cool und (rot)glühend: Rote Zwerge . . . . .	184
Riesensterne . . . . .	185
Entwickelte Riesen . . . . .	185
Es gibt kein Entkommen: Schwarze Löcher . . . . .	186
Was reingeht, kommt nicht wieder raus: wie Schwarze Löcher funktionieren . . . . .	186
Der Ereignishorizont: die Linie, die Licht nicht überschreiten kann . . . . .	188
Das Unsichtbare sehen oder die Kunst, Schwarze Löcher aufzuspüren . . . . .	189
Hohe Brandung! Gravitationswellen . . . . .	190
Das Kräuseln in der Raumzeit . . . . .	191
Wie man ein Wellendetektiv wird . . . . .	192
Neutronensterne oder der totale Kernkollaps . . . . .	192
Die Wissenschaft vom Kollaps der Sterne . . . . .	193
Pulsierende Strahlung von Pulsaren . . . . .	193
Quasare und Blazare . . . . .	194
Das XYZ der AGN: Quasare . . . . .	195
Blazare halten die Schwarzen Löcher im Geschäft . . . . .	195
Explosionen in der Ferne: Gammablitze . . . . .	197

## 20 Inhaltsverzeichnis

<b>TEIL III</b>	
<b>GALAXIEN: TEAMWORK MACHT DEN TRAUM WAHR .....</b>	<b>199</b>
<b>Kapitel 9</b>	
<b>Von verschwommenen Klecksen zu stattlichen Spiralen: die Milchstraße und andere Galaxien.....</b>	<b>201</b>
Wo in der Welt sind wir?.....	202
Die Untersuchung der Galaxie.....	203
Eine Reise durch die Milchstraße.....	203
Das Geheimnis lüften .....	205
Galaxien und andere unscharfe Objekte werden zu Messier-Objekten.....	205
Das Hubble-Rätsel .....	205
Standardkerze und Rotverschiebung .....	206
Klassifizierung von Galaxien .....	208
Sterne und Gase von ungewöhnlicher Schönheit: Spiralgalaxien .....	210
Niemals Brennpunkte verlieren: elliptische Galaxien.....	211
Linsenförmige Galaxien sind geformt wie ... raten Sie mal!.....	213
Die Reste der letzten Nacht in einem universellen Maßstab: irreguläre Galaxien.....	214
<b>Kapitel 10</b>	
<b>Die Quantifizierung des Unbekannten oder die Art, wie Galaxien funktionieren .....</b>	<b>215</b>
Mit dem Verständnis der Entwicklung von Galaxien das Universum enträtselfn .....	216
Das galaktische Ausgangsmaterial: keine EM-Strahlung für Sie! .....	216
Die Dreifaltigkeit: Dominanz, Instabilität und Kollaps der Gravitation .....	217
Der letzte Schub: die Rolle von Drehmoment und Drehimpuls bei der Gravitation .....	218
Mechanik eines Sternsystems .....	219
Die galaktische Struktur .....	220
Eine Bestandsaufnahme der Teile.....	222
Der stellare Inhalt von Galaxien.....	223
Emissionen von aktiven und inaktiven Galaxien.....	224
Zwei große und aktive: Seyfert- und Radiogalaxien .....	226
Schwarze Löcher und ihre Rolle in Galaxien .....	228
Schwarze Löcher, die Donut-Löcher der Galaxie.....	228
Dynamik und Beobachtung .....	229
Das Hubble-Tiefenfeld .....	230
<b>Kapitel 11</b>	
<b>Größer als riesig: Galaxienhaufen .....</b>	<b>233</b>
Freunde finden: Die Grundlagen von Galaxienhaufen .....	234
Schätzung der Masse: Der Virialsatz, der Sunyaev-Zel'dovich-Effekt und anderes .....	236

Verteilung der Galaxien im Weltraum.....	238
Unser eigener Galaxienhaufen: Die Lokale Gruppe.....	239
Lokal, lokal, lokal .....	239
Einzelne Galaxien.....	240
Die Struktur und Bildung von Galaxienhaufen.....	241
Der Dauerbrenner: Die Rolle der Gravitation .....	242
Röntgenstrahlen und das Intracluster-Medium (ICM) .....	243
Die Physik der Galaxienhaufen .....	245
Die einzigartige Wechselwirkung der Dunklen Materie mit Baryonen .....	245
Sie bringen Leben in die Bude: Gravitationsstörungen und Stoßwellen .....	247
Immer unter Druck: thermische Strahlung in Gasen .....	248
Die Fusion von Galaxien und Haufen .....	249
Eine unfreiwillige Geschichte der Übernahme: LMC und SMC .....	249
Die Vorhersage durch Computermodellierung.....	251
Kollisionen von Galaxienhaufen .....	251
Was Galaxienhaufen über das Universum erzählen .....	252
Größer kann besser sein.....	253
Chemische Emissionen als Wahrsager .....	254
Veränderung ist schwer: langsame Veränderungen in Galaxienhaufen .....	255

<b>Kapitel 12</b>	
<b>Seltsame und verrückte galaktische Phänomene .....</b>	<b>257</b>
Nicht gerade Dinosaurier: galaktische Archäologie .....	258
Woraus kleine Sterne gemacht sind .....	259
Sternenalter und Astroseismologie.....	259
Galaktische Verschmelzungen aufspüren .....	260
Hochenergie-Astrophysik .....	261
Triple E: extreme energetische Ereignisse .....	262
Woher wissen wir das? ALMA, Hubble, JWST, Chandra und andere .....	263
Erstklassige Beispiele: aktive galaktische Kerne, Gammablitze, Supernovae.....	265
Der Gravitationslinseneffekt .....	266
Die Beugung des Lichts.....	267
Starker, schwacher und Mikrolinseneffekt.....	270
Auf dem Weg ins Wurmloch.....	271
Ein Wurmloch mit einem anderen Namen ... die Einstein-Rosen-Brücke.....	272
Die Verbindung zwischen Wurmlöchern und der Stringtheorie herstellen .....	273

## 22 Inhaltsverzeichnis

### TEIL IV KOSMOLOGIE: DER ANFANG UND DAS ENDE VON ALLEM .... 275

#### Kapitel 13 Der Urknall: wie alles begann ..... 277

Was soll das? Ein Leitfaden zur Kosmologie .....	278
Zur Sache kommen: der Urknall .....	278
Die Ausdehnung des Universums, nicht Ihre Lebensmittelrechnung: die kosmische Inflation .....	280
Entstehung der fundamentalen Teilchen.....	280
Zu früh zum Glänzen und Funkeln .....	281
Wissenschaftliche Beweise: Warum glauben wir, dass es einen Urknall gab? .....	281
Das Hubble-Gesetz und die Ausdehnung des Universums.....	282
Nicht für Popcorn: die kosmische Mikrowellenhintergrundstrahlung .....	283
Die Ära der primordialen Nukleosynthese (BBN) .....	284
Widerlegung der Steady-State-Theorie.....	285
Mit der kosmologischen Inflation dem Unvorstellbaren einen Sinn geben .....	286
Das Flachheitsproblem .....	286
CMB und eine einheitliche Temperatur .....	287
Was die Verteilung der Galaxienhaufen besagt.....	288
Die Dominanz der Strahlung in der Strahlungs-Ära.....	288
Nichts ist so wichtig wie die Materie in der Materie-Ära .....	292
Metrische Expansion des Universums: das kosmologische Prinzip.....	294
Wir sind nichts Besonderes: das kopernikanische Prinzip.....	294
Hubble und die Ausdehnung des Universums in alle Richtungen .....	295
Der Urknall: Strahlung und Temperaturfluktuationen.....	296
Eine konstante Ausdehnung, aber mit ungleichmäßiger Geschwindigkeit .....	297
Die Zukunft der direkten Messung .....	297

#### Kapitel 14 Das erste Licht im Universum oder wie ein Stern geboren wird ..... 299

Das dunkle Zeitalter der Kosmologie .....	300
Der Urknall kühlte die Hitze .....	300
Die Bildung von neutralen Wasserstoffatomen und der kosmischen Hintergrundstrahlung .....	300
Das Kräuseln im Universum oder die Bildung von Galaxien.....	302
Das Ende einer Ära: die kosmische Morgendämmerung.....	302
Die frühe Sternentstehung.....	303
Der Ursprung im primordialen Gas.....	303
Die Kernfusion als Retter in der Not .....	303
Klassifikation der Sterne: Population III .....	304
Kein Platz für Diäten: sehr frühe Sterne = massereich + geringer Metallgehalt. ....	305

Eine Folge der Supernovae: die Entstehung schwerer Elemente . . . . .	306
Mehr Metalle für die Sterne der nächsten Generation: Kohlenstoff, Sauerstoff, Eisen und schwerere Elemente . . . . .	306
Die Klassifikation der Sterne: die Populationen I und II. . . . .	307
Die Population II: die ältesten beobachteten Sterne, die vor 1 bis 15 Milliarden Jahren entstanden . . . . .	308
Die Population I: die jungen Sterne, die vor 1 Million bis 10 Milliarden Jahren entstanden . . . . .	309
Die Epoche der Reionisierung . . . . .	310
Energieblasen und die Ionisierung . . . . .	311
Es werde Licht. . . . .	312
Die Entstehung der ersten Galaxien . . . . .	313
Gegensätze ziehen sich an (oder auch nicht)! . . . . .	313
Die Fortsetzung der Entwicklung und die Entstehung neuer Galaxien . . . . .	314

## Kapitel 15

### **Jetzt wird es noch unheimlicher: Dunkle Materie, Dunkle Energie und Relativitätstheorie . . . . .**

**315**

Allgemeine Fakten zur allgemeinen Relativitätstheorie . . . . .	316
Speziell halten. . . . .	316
Einsteins Erklärung der Wechselwirkung der Gravitation mit der Raumzeit . . . . .	317
Die Krümmung der Raumzeit und die Gesamtkräfte . . . . .	319
Die drei Tests für die allgemeine Relativitätstheorie . . . . .	320
Fortschrittliche Theorien erfordern fortschrittliche Modelle . . . . .	322
Löcher und Wellen . . . . .	322
Erste Modelle der allgemeinen Relativitätstheorie: ein stabiles Universum und seine Herausforderer . . . . .	323
Einsteins »größter Fehler« und seine Neuinterpretation . . . . .	323
Galaktischer Klebstoff: Dunkle Materie . . . . .	325
Die Dunkelheit aufspüren . . . . .	326
Seien Sie kein Schwächling: schwach wechselwirkende massereiche Teilchen – WIMPs . . . . .	327
Manche mögen's heiß, manche mögen's kalt . . . . .	329
Die Dunkle Energie im Überblick . . . . .	330
Warum braucht man Dunkle Energie? . . . . .	330
Eine Geschichte der beschleunigten Expansion . . . . .	331
Woher kommt die Dunkle Energie? . . . . .	332
Ursprünge der Dunklen Energie 1: (wieder) Einstein und die kosmologische Konstante . . . . .	333
Ursprünge der Dunklen Energie 2: die Quantentheorie . . . . .	334
Ursprünge der Dunklen Energie 3: die Quintessenz . . . . .	335
Die Ursprünge der Dunklen Energie 4: Tachyonen bewegen sich schneller als das Licht . . . . .	335
Die Ursprünge der Dunklen Energie 5: Einstein und die Gravitation infrage stellen . . . . .	336
Der Standard der Kosmologie: das Lambda-CDM-Modell ( $\Lambda$ CDM) . . . . .	336

## 24 Inhaltsverzeichnis

<b>Kapitel 16</b>		
<b>Das Ende von allem .....</b>		<b>339</b>
Keine Rückerstattung: Was passiert, wenn die Sonne explodiert?.....	339	
Das (Wasserstoff-)Gas geht zur Neige.....	340	
Tschüss, Leben auf der Erde.....	340	
Der Dichteparameter des Universums.....	342	
Es wird kritisch: die kritische Dichte .....	344	
Die Berechnung von Omega.....	345	
WMAP- und Planck-Missionen .....	346	
Künftige Arbeiten zur kritischen Dichte .....	347	
Das große Einfrieren: ein Ende der Theorie des Universums.....	349	
Die letzten Sterne erlöschen .....	349	
Hinter dem Horizont: Galaxien jenseits der Sichtweite .....	351	
Eine entartete Ära .....	352	
Wärmetod des Universums .....	352	
Das große Zerreißen: ein anderes Ende des Universums.....	353	
Die Dynamik: die Dunkle Energie verändert sich mit der Zeit.....	354	
Das Phantom Dunkle Energie .....	354	
Das große Zusammenkrachen: ein weiteres Ende in der Theorie des Universums.....	355	
Erst ausdehnen, dann schrumpfen.....	356	
Spielverderber: die Dunkle Energie könnte dazwischenkommen .....	356	
Vor dem Nichts: Gab es irgendetwas vor dem Urknall?.....	357	
Das anthropische Prinzip: Warum erlauben die Gesetze der Physik überhaupt die Materie und das Leben?.....	357	
Vorher und nachher: die Theorie des zyklischen Universums .....	359	
Am Ende angekommen – aber wie wird es enden? .....	359	
Die Higgs-Welt: der Vakuumzerfall, das Higgs-Boson und das Higgs-Feld.....	360	
Künftige Beobachtungen der kosmischen Mikrowellenhintergrundstrahlung und der Dunklen Energie.....	361	
Hinweise vom JWST und den frühesten Galaxien .....	362	
<b>TEIL V</b>		
<b>DER TOP-TEN-TEIL .....</b>		<b>363</b>
<b>Kapitel 17</b>		
<b>Zehn Wissenschaftler, die der Astrophysik den Weg ebneten .....</b>		<b>365</b>
Albert Einstein: 1879–1955.....	365	
Edwin Hubble: 1889–1953 .....	365	
Cecelia Payne-Gaposchkin: 1900–1979 .....	366	
Karl Jansky: 1905–1950 .....	366	
Subrahmanyan Chandrasekhar: 1910–1995 .....	366	
Vera Rubin: 1928–2016 .....	367	
Kip Thorne: geb. 1940 .....	367	

Stephen Hawking: 1942–2018 .....	367
Jocelyn Bell Burnell: geb. 1943.....	368
Alan Guth: geb. 1947.....	368
<b>Kapitel 18</b>	
<b>Zehn wichtige Weltraummissionen in der Astrophysik.....</b>	<b>369</b>
Hubble-Weltraumteleskop (1990 bis heute) .....	369
James-Webb-Weltraumteleskop (2021 bis heute).....	370
Kepler (2009–2018) und TESS (2018 bis heute).....	371
SOFIA (2010–2022). ....	371
Chandra-Röntgenteleskop (1999 bis heute) .....	372
Spitzer-Weltraumteleskop (2003–2020).....	373
Compton-Gammastrahlen-Observatorium (1991–2000).....	373
Fermi-Gammastrahlen-Weltraumteleskop (2008 bis heute).....	374
Herschel-Weltraumobservatorium (2009–2013).....	375
Nancy-Grace-Roman-Weltraumteleskop (geplanter Start 2027) .....	375
<b>Glossar .....</b>	<b>377</b>
<b>Abbildungsverzeichnis.....</b>	<b>383</b>
<b>Stichwortverzeichnis .....</b>	<b>391</b>