



**ph**  
physik

Jeffrey Bennett  
Megan Donahue  
Nicholas Schneider  
Mark Voit

# Astronomie

## Die kosmische Perspektive

5., aktualisierte Auflage

Auf CD-ROM  
Planetariumssoftware  
SkyGazer  
Educational-Edition

Herausgegeben von Harald Lesch

PEARSON  
Studium

# Inhaltsverzeichnis

<b>Vorwort</b>	xxi
<b>Kapitel 1 Unser Platz im Universum</b>	2
Lernziele	3
1.1 Unser heutiges Bild vom Universum	4
Wo ist unser Platz im Universum?	4
Wie sind wir entstanden?	8
Woher wissen wir, wie das Universum früher aussah?	10
Können wir das gesamte Universum sehen?	11
1.2 Maßstäbe im Universum	13
Wie groß ist die Erde, verglichen mit unserem Sonnensystem?	13
Wie weit sind die Sterne entfernt?	16
Wie groß ist die Milchstraße?	18
Wie groß ist das Universum?	18
Wie lässt sich unsere Lebensspanne mit dem Alter des Universums vergleichen?	19
1.3 Raumschiff Erde	19
Wie bewegt sich die Erde in unserem Sonnensystem?	19
Wie bewegt sich unser Sonnensystem durch die Milchstraße?	21
Wie bewegen sich Galaxien durch das Universum?	24
Stehen wir jemals still?	27
1.4 Das Menschheitsabenteuer Astronomie	27
Wie hat die astronomische Forschung die menschliche Geschichte beeinflusst?	27
Überblick	29
Zusammenfassung	29
Aufgaben und Übungen	31
Weitere Medien	34
<b>Kapitel 2 Entdecken Sie das Universum selbst</b>	36
Lernziele	37
2.1 Muster am Nachthimmel	38
Der Anblick des Universums von der Erde aus	38
Warum gehen Sterne auf und unter?	43
Warum hängen die sichtbaren Sternbilder von der geografischen Breite und der Jahreszeit ab?	45
2.2 Die Ursache der Jahreszeiten	48
Was verursacht die Jahreszeiten?	48
Wie legen wir den Ablauf der Jahreszeiten fest?	50
Wie verändert sich die Orientierung der Erdachse im Lauf der Zeit?	53
2.3 Der Mond: Unser ständiger Begleiter	55
Warum gibt es Mondphasen?	56
Was verursacht Finsternisse?	59

2.4	Das Planetenrätsel der Antike . . . . .	64
	Weshalb war die Planetenbewegung am Himmel einst so rätselhaft? . . . . .	65
	Warum lehnten die alten Griechen die richtige Erklärung für die Planetenbewegung ab? . . . . .	66
	Überblick . . . . .	69
	Zusammenfassung . . . . .	69
	Aufgaben und Übungen . . . . .	71
	Weitere Medien . . . . .	74
 <b>Kapitel 3    Astronomie als Wissenschaft</b>		76
	Lernziele . . . . .	77
3.1	Die historischen Wurzeln der Naturwissenschaften . . . . .	78
	Inwiefern denken alle Menschen wissenschaftlich? . . . . .	78
	Welchen Nutzen hatten astronomische Beobachtungen für die frühen Gesellschaften? . . . . .	79
	Was haben antike Kulturen in der Astronomie erreicht? . . . . .	80
3.2	Naturwissenschaft im antiken Griechenland . . . . .	88
	Warum führt die moderne Wissenschaft ihre Anfänge auf Griechenland zurück? . . . . .	89
	Wie haben die Griechen die Planetenbewegung erklärt? . . . . .	90
	Wie wurde die griechische Wissenschaft über die Jahrhunderte hinweg bewahrt? . . . . .	93
3.3	Die Kopernikanische Wende . . . . .	94
	Wie haben Kopernikus, Brahe und Kepler das geozentrische Weltbild angefochten? . . . . .	94
	Wie lauten die drei Kepler'schen Gesetze der Planetenbewegung? . . . . .	98
	Wie hat Galilei die Kopernikanische Wende untermauert? . . . . .	99
3.4	Das Wesen der Wissenschaft . . . . .	103
	Wie können wir Wissenschaft von Nichtwissenschaft unterscheiden? . . . . .	104
	Was ist eine wissenschaftliche Theorie? . . . . .	111
3.5	Astrologie . . . . .	112
	Wie unterscheiden sich Astrologie und Astronomie? . . . . .	112
	Hat die Astrologie eine naturwissenschaftliche Grundlage? . . . . .	114
	Überblick . . . . .	116
	Zusammenfassung . . . . .	116
	Aufgaben und Übungen . . . . .	118
	Weitere Medien . . . . .	121
 <b>Kapitel S1    Zeitmessung und Navigation anhand der Sterne</b>		124
	Lernziele . . . . .	125
S1.1	Astronomische Zeiträume . . . . .	126
	Wie definieren wir Tag, Monat, Jahr und planetare Umlaufzeiten? . . . . .	126
	Wie bestimmen wir die Tageszeit? . . . . .	132
	Wann und warum gibt es Schaltjahre? . . . . .	135
S1.2	Himmelskoordinaten und Bewegungen am Himmel . . . . .	135
	Wie stellen wir den Ort von Objekten an der Himmelskugel fest? . . . . .	137
	Wie bewegen sich die Sterne am Himmel über uns? . . . . .	142
	Wie bewegt sich die Sonne am Himmel über uns? . . . . .	145

S1.3	Grundlagen der Navigation nach den Sternen . . . . .	149
	Wie können Sie Ihren Breitengrad bestimmen? . . . . .	149
	Wie können Sie Ihren Längengrad bestimmen? . . . . .	150
	Überblick . . . . .	153
	Zusammenfassung . . . . .	153
	Aufgaben und Übungen . . . . .	155
	Weitere Medien . . . . .	158
<b>Kapitel 4   Wie das Universum funktioniert:               Bewegung, Energie und Schwerkraft verstehen</b>		162
	Lernziele . . . . .	163
4.1	Bewegungen: Beispiele aus dem Alltag . . . . .	164
	Wie beschreiben wir Bewegungen? . . . . .	164
	Wie unterscheiden sich Masse und Gewicht? . . . . .	167
4.2	Die Newton'schen Bewegungsgesetze . . . . .	169
	Wie hat Newton unser Verständnis des Universums verändert? . . . . .	170
	Wie lauten die drei Newton'schen Bewegungsgesetze? . . . . .	171
4.3	Erhaltungssätze in der Astronomie . . . . .	174
	Warum bewegen sich Objekte mit gleichförmiger Geschwindigkeit, wenn keine Kräfte auf sie wirken? . . . . .	174
	Was lässt Planeten rotieren und um die Sonne kreisen? . . . . .	175
	Woher haben Objekte ihre Energie? . . . . .	176
4.4	Das allgemeine Gravitationsgesetz . . . . .	182
	Was bestimmt die Stärke der Schwerkraft? . . . . .	182
	Wie erweitert das Newton'sche Gravitationsgesetz die Kepler'schen Gesetze? . . . . .	183
4.5	Umlaufbahnen, Gezeiten und Gravitationsbeschleunigung . . . . .	187
	Wie können wir Umlaufbahnen anhand von Schwerkraft- und Energiegesetzen verstehen? . . . . .	187
	Wie verursacht die Schwerkraft Gezeiten? . . . . .	189
	Warum fallen alle Objekte mit derselben Geschwindigkeit? . . . . .	194
	Überblick . . . . .	196
	Zusammenfassung . . . . .	196
	Aufgaben und Übungen . . . . .	198
	Weitere Medien . . . . .	202
<b>Kapitel 5   Licht und Materie:               Die Botschaften aus dem Kosmos entschlüsseln</b>		204
	Lernziele . . . . .	205
5.1	Licht im Alltag . . . . .	206
	Wie nehmen wir Licht wahr? . . . . .	206
	Wie treten Licht und Materie in Wechselwirkung? . . . . .	207
5.2	Eigenschaften des Lichts . . . . .	209
	Was ist Licht? . . . . .	209
	Was ist das elektromagnetische Spektrum? . . . . .	213
5.3	Eigenschaften der Materie . . . . .	216
	Welche Struktur hat Materie? . . . . .	216
	Welche Aggregatzustände der Materie gibt es? . . . . .	219
	Wie wird Energie in Atomen gespeichert? . . . . .	222

5.4	Vom Licht lernen . . . . .	224
	Was sind die drei Grundarten von Spektren? . . . . .	225
	Wie erkennen wir anhand von Licht, woraus die Dinge bestehen? . . . . .	226
	Wie kann uns Licht etwas über die Temperaturen der Planeten und Sterne sagen? . . . . .	229
	Wie interpretieren wir ein reales Spektrum? . . . . .	231
5.5	Die Doppler-Verschiebung . . . . .	234
	Wie kann uns Licht etwas über die Geschwindigkeit eines fernen Objekts sagen? . . . . .	234
	Wie kann uns Licht etwas über die Rotationsgeschwindigkeit eines fernen Objekts sagen? . . . . .	236
	Überblick . . . . .	238
	Zusammenfassung . . . . .	238
	Aufgaben und Übungen . . . . .	240
	Weitere Medien . . . . .	245
<b>Kapitel 6 Teleskope: Tore der Entdeckung</b>		246
	Lernziele . . . . .	247
6.1	Augen und Kameras: Lichtsensoren des Alltags . . . . .	248
	Wie sieht das Auge? . . . . .	248
	Wie zeichnen wir Bilder auf? . . . . .	250
6.2	Riesige Augen: Teleskope . . . . .	251
	Was sind die beiden wichtigsten Merkmale eines Teleskops? . . . . .	251
	Was sind die beiden wichtigsten Teleskoparten? . . . . .	253
	Wie nutzen Astronomen ihre Teleskope? . . . . .	257
6.3	Teleskope und die Atmosphäre . . . . .	260
	Wie beeinflusst die Erdatmosphäre bodengestützte Beobachtungen? . . . . .	261
	Warum bringen wir Teleskope in den Weltraum? . . . . .	264
6.4	Teleskope und Technik . . . . .	265
	Wie beobachten wir unsichtbares Licht? . . . . .	266
	Wie arbeiten mehrere Teleskope zusammen? . . . . .	270
	Überblick . . . . .	273
	Zusammenfassung . . . . .	273
	Aufgaben und Übungen . . . . .	274
	Weitere Medien . . . . .	278
<b>Kapitel 7 Unser Sonnensystem</b>		282
	Lernziele . . . . .	283
7.1	Die Untersuchung des Sonnensystems . . . . .	284
	Wie sieht das Sonnensystem aus? . . . . .	284
	Was lehrt uns der Vergleich der Planeten miteinander? . . . . .	285
	Welche sind die wichtigsten Eigenschaften der Sonne und der Planeten? . . . . .	288
7.2	Gesetzmäßigkeiten im Sonnensystem . . . . .	303
	Welche Merkmale des Sonnensystems bieten Hinweise auf seine Entstehung? . . . . .	303
7.3	Die Erkundung des Sonnensystems mit Raumsonden . . . . .	307
	Wie arbeiten Robotersonden? . . . . .	307

Überblick . . . . .	313
Zusammenfassung. . . . .	313
Aufgaben und Übungen . . . . .	314
Weitere Medien . . . . .	317
<b>Kapitel 8 Die Entstehung des Sonnensystems</b>	<b>320</b>
Lernziele . . . . .	321
8.1 Auf der Suche nach dem Anfang . . . . .	322
Welche Eigenschaften unseres Sonnensystems muss eine Theorie seiner Entstehung erklären können? . . . . .	322
Welche Theorie erklärt die Eigenschaften unseres Sonnensystems am besten? . . . . .	323
8.2 Die Geburt des Sonnensystems . . . . .	324
Woher stammt das Sonnensystem? . . . . .	324
Weshalb gibt es regelmäßige Bewegungsmuster in unserem Sonnensystem? . . . . .	325
8.3 Die Entstehung der Planeten . . . . .	328
Warum gibt es zwei Hauptgruppen der Planeten? . . . . .	328
Wie sind die terrestrischen Planeten entstanden? . . . . .	329
Wie sind die jovianischen Planeten entstanden? . . . . .	331
Was hat die Ära der Planetenentstehung beendet? . . . . .	332
8.4 Nach der Planetenentstehung . . . . .	333
Woher stammen Asteroiden und Kometen? . . . . .	334
Wie können wir die Ausnahmen von den Regeln erklären? . . . . .	335
Wie können wir die Existenz unseres Mondes erklären? . . . . .	336
Konnte nur unser Sonnensystem entstehen? . . . . .	338
8.5 Das Alter des Sonnensystems . . . . .	338
Wie zeigt Radioaktivität das Alter eines Objekts an? . . . . .	338
Wann sind die Planeten entstanden? . . . . .	342
Überblick . . . . .	343
Zusammenfassung. . . . .	343
Aufgaben und Übungen . . . . .	345
Weitere Medien . . . . .	348
<b>Kapitel 9 Planetare Geologie: Die Erde und die anderen terrestrischen Planeten</b>	<b>350</b>
Lernziele . . . . .	351
9.1 Der Zusammenhang zwischen dem Planeteninneren und der Oberfläche . . . . .	352
Wie sehen terrestrische Planeten im Inneren aus? . . . . .	354
Was verursacht geologische Aktivität? . . . . .	357
Warum erzeugt das Innere mancher Planeten ein Magnetfeld? . . . . .	360
9.2 Die Struktur von Planetenoberflächen . . . . .	363
Welche Prozesse bestimmen die Oberflächeneigenschaften eines Planeten? . . . . .	363
Warum haben die terrestrischen Planeten eine unterschiedliche geologische Geschichte? . . . . .	368
Wie zeigen Einschlagskrater das geologische Alter einer Oberfläche an? . . . . .	370
9.3 Die Geologie von Mond und Merkur . . . . .	372
Welche geologischen Prozesse haben den Mond geformt? . . . . .	372

	Welche geologischen Prozesse haben Merkur geformt? . . . . .	375
9.4	Die Geologie des Mars . . . . .	377
	Warum sind Marsianer so populär? . . . . .	377
	Welche sind die wichtigsten geologischen Merkmale des Mars? . . . . .	378
	Aufgrund welcher geologischen Belege wissen wir, dass es früher Wasser auf dem Mars gab? . . . . .	380
9.5	Die Geologie der Venus . . . . .	384
	Welche sind die wichtigsten geologischen Merkmale der Venus? . . . . .	384
	Hat die Venus Plattentektonik? . . . . .	386
9.6	Die einzigartige Geologie der Erde . . . . .	386
	Woher wissen wir, dass sich die Erdoberfläche bewegt? . . . . .	387
	Wie wird die Erdoberfläche durch die Plattentektonik verändert? . . . . .	389
	War die Geologie der Erde bei ihrer Entstehung bereits festgelegt? . . . . .	394
	Überblick . . . . .	396
	Zusammenfassung . . . . .	396
	Aufgaben und Übungen . . . . .	399
	Weitere Medien . . . . .	403
 <b>Kapitel 10 Planetare Atmosphären: Die Erde und die anderen terrestrischen Himmelskörper</b>		406
	Lernziele . . . . .	407
10.1	Grundlagen der Atmosphärenphysik . . . . .	408
	Was ist eine Atmosphäre? . . . . .	410
	Wie heizt der Treibhauseffekt einen Planeten auf? . . . . .	413
	Warum verändern sich die Eigenschaften der Atmosphäre mit der Höhe? . . . . .	417
10.2	Wetter und Klima . . . . .	423
	Was verursacht Wind und Wetter? . . . . .	423
	Welche Faktoren können langfristige Klimaänderungen verursachen? . . . . .	427
	Wie gewinnt oder verliert ein Planet atmosphärische Gase? . . . . .	429
10.3	Die Atmosphären von Mond und Merkur . . . . .	433
	Haben Mond und Merkur überhaupt eine Atmosphäre? . . . . .	433
10.4	Die Marsatmosphäre und ihre Geschichte . . . . .	434
	Wie sieht der Mars heute aus? . . . . .	435
	Warum hat sich der Mars verändert? . . . . .	438
10.5	Die Venusatmosphäre und ihre Geschichte . . . . .	440
	Wie sieht die Venus heute aus? . . . . .	440
	Warum wurde die Venus so heiß? . . . . .	441
10.6	Die einzigartige Atmosphäre der Erde . . . . .	444
	Was macht die Erdatmosphäre so außergewöhnlich? . . . . .	444
	Warum ist die Erdatmosphäre relativ stabil? . . . . .	446
	Wie verändern menschliche Aktivitäten unseren Planeten? . . . . .	450
	Überblick . . . . .	455
	Zusammenfassung . . . . .	455
	Aufgaben und Übungen . . . . .	457
	Weitere Medien . . . . .	462

<b>Kapitel 11 Jovianische Planeten</b>	464
Lernziele	465
11.1 Eine andere Art von Planet	466
Sind alle jovianischen Planeten gleich?	467
Wie sieht das Innere jovianischer Planeten aus?	471
Welches Wetter herrscht auf den jovianischen Planeten?	474
Haben jovianische Planeten Magnetosphären wie die Erde?	480
11.2 Eine Fülle an Welten: Satelliten aus Eis und Fels	482
Welche Arten von Monden umkreisen die jovianischen Planeten?	482
Warum sind die Galilei'schen Monde des Jupiters geologisch so aktiv?	484
Was ist an Titan und anderen großen Monden des äußeren Sonnensystems so bemerkenswert?	490
Warum sind kleine Eismonde geologisch aktiver als kleine Planeten aus Gestein?	495
11.3 Die Ringe der jovianischen Planeten	496
Wie sehen die Saturnringe aus?	496
Wie sehen die Ringsysteme anderer jovianischer Planeten im Vergleich zu den Saturnringen aus?	498
Warum haben die jovianischen Planeten Ringe?	499
Überblick	501
Zusammenfassung	501
Aufgaben und Übungen	503
Weitere Medien	507
<b>Kapitel 12 Asteroiden, Kometen und Zwergplaneten: Ihre Eigenschaften, Umlaufbahnen und Einschläge</b>	508
Lernziele	509
12.1 Asteroiden und Meteorite	510
Was sind Asteroiden?	510
Warum gibt es einen Asteroidengürtel?	514
Woher kommen Meteorite?	516
12.2 Kometen	519
Was sind Kometen?	520
Woher kommen Kometen?	526
12.3 Pluto: Kein Außenseiter mehr	527
Wie groß kann ein Komet werden?	528
Was kennzeichnet die großen Objekte des Kuiper-Gürtels?	529
Sind Pluto und Eris Planeten?	532
12.4 Kosmische Kollisionen: Kleine Körper kontra Planeten	533
Haben wir jemals einen großen Einschlag beobachtet?	533
Hat ein Einschlag die Dinosaurier ausgerottet?	534
Ist das Einschlagsrisiko eine echte Gefahr oder wird es nur von den Medien aufgebauscht?	537
Wie beeinflussen die jovianischen Planeten Einschlagsraten und das Leben auf der Erde?	539
Überblick	541

Zusammenfassung . . . . .	541
Aufgaben und Übungen . . . . .	543
Weitere Medien . . . . .	546
<b>Kapitel 13   Andere Planetensysteme:                   Die neuen Erkenntnisse über ferne Planeten</b>	<b>548</b>
Lernziele . . . . .	549
13.1   Extrasolare Planeten entdecken . . . . .	550
Warum ist das Entdecken von Planeten bei anderen Sternen so schwierig? . . . . .	551
Wie entdecken wir Planeten bei anderen Sternen? . . . . .	551
13.2   Eigenschaften extrasolarer Planeten . . . . .	565
Was wissen wir über extrasolare Planeten? . . . . .	565
Der Vergleich extrasolarer Planeten mit den Planeten unseres Sonnensystems . . . . .	571
13.3   Die Entstehung anderer Sonnensysteme . . . . .	573
Wie lassen sich die überraschenden Umlaufbahnen vieler extrasolarer Planeten erklären? . . . . .	574
Müssen wir die Theorie der Entstehung unseres Sonnensystems überdenken? . . . . .	575
13.4   Auf der Suche nach neuen Welten . . . . .	576
Wie suchen wir nach erdähnlichen Planeten? . . . . .	576
Überblick . . . . .	579
Zusammenfassung . . . . .	580
Aufgaben und Übungen . . . . .	581
Weitere Medien . . . . .	586
<b>S2               Raum und Zeit</b>	<b>590</b>
Lernziele . . . . .	591
S2.1   Einsteins Revolution . . . . .	592
Was sind die Grundelemente der speziellen Relativitätstheorie? . . . . .	593
Was ist an der Relativitätstheorie „relativ“? . . . . .	594
S2.2   Relative Bewegung . . . . .	596
Wie hat Einstein über Bewegung gedacht? . . . . .	596
Warum ist die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit so überraschend? . . . . .	597
Warum können wir die Lichtgeschwindigkeit niemals erreichen? . . . . .	600
S2.3   Die Realität von Raum und Zeit . . . . .	602
Wie beeinflusst die Relativitätstheorie unsere Vorstellung von Raum und Zeit? . . . . .	602
Treten die von der Relativitätstheorie vorhergesagten Effekte wirklich auf? . . . . .	609
S2.4   Eine neue Betrachtungsweise . . . . .	614
Wie können wir die Relativitätstheorie verstehen? . . . . .	614
Ermöglicht die Relativitätstheorie Reisen zu den Sternen? . . . . .	615
Überblick . . . . .	618
Zusammenfassung . . . . .	618
Aufgaben und Übungen . . . . .	620
Weitere Medien . . . . .	625
<b>Kapitel S3   Raumzeit und Gravitation</b>	<b>626</b>
Lernziele . . . . .	627
S3.1   Einsteins zweite Revolution . . . . .	628
Was sind die wichtigsten Aussagen der allgemeinen Relativitätstheorie? . . . . .	629

Ist jede Bewegung relativ? . . . . .	629
S3.2 Die Raumzeit verstehen . . . . .	632
Was ist Raumzeit? . . . . .	632
Was versteht man unter gekrümmter Raumzeit? . . . . .	636
S3.3 Ein neues Bild der Gravitation . . . . .	640
Was ist Gravitation? . . . . .	640
Was ist ein Schwarzes Loch? . . . . .	642
Wie beeinflusst die Gravitation die Zeit? . . . . .	644
S3.4 Prüfen der allgemeinen Relativitätstheorie . . . . .	645
Wie können wir die Vorhersagen der allgemeinen Relativitätstheorie prüfen? . . . . .	645
Was sind Gravitationswellen? . . . . .	649
S3.5 Hyperspace, Wurmlöcher und Warp-Antrieb. . . . .	650
Wo hört Wissenschaft auf und wo beginnt Science-Fiction? . . . . .	650
S3.6 Ein letztes Wort . . . . .	652
Wie hat die Relativitätstheorie unsere Vorstellung von Raum und Zeit verändert? . . . . .	652
Überblick . . . . .	653
Zusammenfassung. . . . .	653
Aufgaben und Übungen . . . . .	655
Weitere Medien . . . . .	660
<b>Kapitel S4 Bausteine des Universums</b> . . . . .	662
Lernziele . . . . .	663
S4.1 Die Quantenrevolution . . . . .	664
Wie hat die Quantenrevolution unsere Welt verändert? . . . . .	664
S4.2 Elementare Teilchen und Kräfte . . . . .	665
Welche wichtigen Eigenschaften haben subatomare Teilchen? . . . . .	666
Welche elementaren Bausteine der Materie gibt es? . . . . .	667
Welche fundamentalen Kräfte gibt es in der Natur? . . . . .	669
S4.3 Unschärfe und Verbote im Bereich der Quanten . . . . .	671
Was besagt die Unschärferelation? . . . . .	673
Was besagt das Ausschlussprinzip? . . . . .	676
S4.4 Wichtige Quanteneffekte in der Astronomie . . . . .	678
Welchen Einfluss haben Teilcheneffekte auf besondere Sternarten? . . . . .	678
Weshalb ist das Tunneln von Teilchen für das Leben auf der Erde so wichtig? . . . . .	681
Wie leer ist der leere Raum? . . . . .	682
Leben Schwarze Löcher ewig? . . . . .	683
Überblick . . . . .	685
Zusammenfassung. . . . .	685
Aufgaben und Übungen . . . . .	687
Weitere Medien . . . . .	691
<b>Kapitel 14 Unser Stern – die Sonne</b> . . . . .	694
Lernziele . . . . .	695
14.1 Ein genauerer Blick auf die Sonne . . . . .	696
Warum war die Energiequelle der Sonne solch ein großes Rätsel? . . . . .	696
Warum scheint die Sonne? . . . . .	697

Wie ist die Sonne aufgebaut? . . . . .	699
14.2 Der kosmische Schmelztiegel . . . . .	701
Wie läuft die Kernfusion in der Sonne ab? . . . . .	702
Wie kommt die Fusionsenergie aus der Sonne heraus? . . . . .	706
Woher kennen wir die Abläufe in der Sonne? . . . . .	709
14.3 Die Verbindung zwischen Sonne und Erde . . . . .	712
Was ist die Ursache der Sonnenaktivität? . . . . .	712
Wie beeinflusst die Sonnenaktivität das menschliche Leben? . . . . .	716
Wie verändert sich die Sonnenaktivität mit der Zeit? . . . . .	717
Überblick . . . . .	721
Zusammenfassung . . . . .	721
Aufgaben und Übungen . . . . .	723
Weitere Medien . . . . .	727
<b>Kapitel 15 Ein genauer Blick auf die Sterne</b> . . . . .	<b>728</b>
Lernziele . . . . .	729
15.1 Eigenschaften der Sterne . . . . .	730
Wie messen wir die Leuchtkraft von Sternen? . . . . .	730
Wie messen wir die Temperatur von Sternen? . . . . .	737
Wie messen wir die Masse von Sternen? . . . . .	741
15.2 Systematik von Sternen . . . . .	745
Was ist ein Hertzsprung-Russell-Diagramm? . . . . .	745
Welche Bedeutung hat die Hauptreihe? . . . . .	748
Was sind Riesen, Überriesen und Weiße Zwerge? . . . . .	751
Warum verändern sich die Eigenschaften mancher Sterne? . . . . .	752
15.3 Sternhaufen . . . . .	753
Welche zwei Arten von Sternhaufen gibt es? . . . . .	753
Wie messen wir das Alter von Sternhaufen? . . . . .	754
Überblick . . . . .	756
Zusammenfassung . . . . .	756
Aufgaben und Übungen . . . . .	758
Weitere Medien . . . . .	762
<b>Kapitel 16 Sternentstehung</b> . . . . .	<b>764</b>
Lernziele . . . . .	765
16.1 Die Geburtsorte der Sterne . . . . .	766
Wo entstehen die Sterne? . . . . .	766
Warum entstehen Sterne? . . . . .	770
16.2 Stadien der Sternentstehung . . . . .	777
Wodurch wird die Kontraktion einer Wolke, in der ein Stern entsteht, gebremst? . . . . .	777
Welche Rolle spielt die Rotation bei der Sternentstehung? . . . . .	778
Wie setzt in einem neu entstandenen Stern die Kernfusion ein? . . . . .	780
16.3 Massen neu entstandener Sterne . . . . .	783
Welche Minimalmasse kann ein neu entstandener Stern haben? . . . . .	783
Welche Maximalmasse kann ein neu entstandener Stern haben? . . . . .	785
Welche Massen haben neu entstandene Sterne üblicherweise? . . . . .	786

Überblick . . . . .	787
Zusammenfassung. . . . .	787
Aufgaben und Übungen . . . . .	789
Weitere Medien . . . . .	793
<b>Kapitel 17 Sternenstaub</b>	794
Lernziele . . . . .	795
17.1 Entwicklung im Gleichgewicht . . . . .	796
Wie beeinflusst die Masse eines Sterns seine Kernfusion? . . . . .	796
17.2 Die Entwicklung eines massearmen Sterns . . . . .	798
Welche Entwicklungsstadien durchläuft ein massearmer Stern? . . . . .	798
Wie stirbt ein massearmer Stern? . . . . .	803
17.3 Die Entwicklung eines massereichen Sterns . . . . .	806
Welche Entwicklungsstadien durchläuft ein massereicher Stern? . . . . .	807
Wie erzeugen massereiche Sterne die für das Leben notwendigen Elemente? . . . . .	809
Wie stirbt ein massereicher Stern? . . . . .	812
17.4 Die Rolle von Masse und Massenaustausch . . . . .	816
Wie bestimmt die Masse eines Sterns seine Entwicklungsgeschichte? . . . . .	816
Wie unterscheidet sich das Leben von Sternen mit engen Begleitern von dem alleinstehender Sterne? . . . . .	817
Überblick . . . . .	820
Zusammenfassung. . . . .	820
Aufgaben und Übungen . . . . .	822
Weitere Medien . . . . .	824
<b>Kapitel 18 Der Friedhof der Sterne</b>	826
Lernziele . . . . .	827
18.1 Weiße Zwerge. . . . .	828
Was ist ein Weißer Zwerg? . . . . .	828
Was geschieht mit einem Weißen Zwerg in einem engen Doppelsternsystem? . . . . .	830
18.2 Neutronensterne. . . . .	833
Was ist ein Neutronenstern? . . . . .	833
Wie wurden Neutronensterne entdeckt? . . . . .	835
Was geschieht mit einem Neutronenstern in einem engen Doppelsternsystem? . . . . .	837
18.3 Schwarze Löcher: Der endgültige Sieg der Schwerkraft . . . . .	838
Was ist ein Schwarzes Loch? . . . . .	839
Wie wäre es, wenn wir ein Schwarzes Loch besuchen könnten? . . . . .	841
Gibt es Schwarze Löcher wirklich? . . . . .	844
18.4 Der Ursprung der Gammabursts . . . . .	847
Woher kommen Gammabursts? . . . . .	847
Was verursacht Gammabursts? . . . . .	848
Überblick . . . . .	850
Zusammenfassung. . . . .	850
Aufgaben und Übungen . . . . .	852
Weitere Medien . . . . .	857

<b>Kapitel 19</b>	<b>Unsere Galaxis, die Milchstraße</b>	860
Lernziele	.....	861
19.1	Der Blick auf die Milchstraße	862
	Wie sieht unsere Galaxis aus?	862
	Wie bewegen sich die Sterne in unserer Galaxis?	864
19.2	Galaktisches Recycling	868
	Wie wird Gas in unserer Galaxis recycelt?	869
	Wo bilden sich üblicherweise Sterne in unserer Galaxis?	877
19.3	Die Geschichte unserer Milchstraße	881
	Welche Hinweise auf die Geschichte der Galaxis bieten die Sterne des Halos?	881
	Wie ist unsere Galaxis entstanden?	882
19.4	Das geheimnisvolle galaktische Zentrum	884
	Was befindet sich im Zentrum unserer Galaxis?	885
	Überblick	887
	Zusammenfassung	887
	Aufgaben und Übungen	888
	Weitere Medien	892
<b>Kapitel 20</b>	<b>Galaxien und die Grundlagen der modernen Kosmologie</b>	894
Lernziele	.....	895
20.1	Sterneninseln	896
	Wie hängt die Galaxienentwicklung mit der Geschichte des Universums zusammen?	896
	Welche drei Arten von Galaxien gibt es?	898
	Welche Gruppen bilden Galaxien?	902
20.2	Messung der Galaxienentfernung	902
	Wie messen wir die Entfernung von Galaxien?	903
20.3	Das Hubble'sche Gesetz	908
	Wie konnte Hubble beweisen, dass Galaxien weit außerhalb der Milchstraße liegen?	908
	Was ist das Hubble'sche Gesetz?	911
	Was sagen Entfernungsmessungen über das Alter des Universums aus?	914
	Wie beeinflusst die Expansion des Universums unsere Entfernungsmessungen?	917
	Überblick	920
	Zusammenfassung	920
	Aufgaben und Übungen	922
	Weitere Medien	926
<b>Kapitel 21</b>	<b>Galaxienentwicklung</b>	928
Lernziele	.....	929
21.1	Der Blick zurück durch die Zeit	930
	Wie können wir die Entwicklungsgeschichten von Galaxien beobachten?	930
	Wie sind Galaxien entstanden?	932
21.2	Die Entwicklung von Galaxien	933
	Warum unterscheiden sich Galaxien voneinander?	933
	Was sind Starbursts?	938

21.3	Quasare und andere aktive galaktische Kerne . . . . .	940
	Was sind Quasare? . . . . .	941
	Welche Energiequelle haben Quasare und andere aktive galaktische Kerne? . . . . .	945
	Gibt es supermassereiche Schwarze Löcher wirklich? . . . . .	947
	Wie können wir mittels Quasaren das Gas zwischen den Galaxien beobachten? . . . . .	950
	Überblick . . . . .	952
	Zusammenfassung . . . . .	952
	Aufgaben und Übungen . . . . .	953
	Weitere Medien . . . . .	957
<b>Kapitel 22 Dunkle Materie, Dunkle Energie und das Schicksal des Universums</b>		958
	Lernziele . . . . .	959
22.1	Unsichtbare Einflüsse im Kosmos . . . . .	960
	Was verstehen wir unter Dunkler Materie und Dunkler Energie? . . . . .	961
22.2	Hinweise auf die Dunkle Materie . . . . .	962
	Welche Hinweise gibt es auf Dunkle Materie in Galaxien? . . . . .	962
	Welche Hinweise auf Dunkle Materie gibt es in Galaxienhaufen? . . . . .	966
	Gibt es Dunkle Materie wirklich? . . . . .	971
	Woraus könnte die Dunkle Materie bestehen? . . . . .	973
22.3	Die Entstehung von Strukturen . . . . .	975
	Welche Rolle spielt die Dunkle Materie bei der Galaxienentstehung? . . . . .	975
	Wie sehen die größten Strukturen im Universum aus? . . . . .	977
22.4	Das Schicksal des Universums . . . . .	980
	Wird die Expansion des Universums ewig weitergehen? . . . . .	980
	Beschleunigt sich die Expansion des Universums? . . . . .	981
	Überblick . . . . .	985
	Zusammenfassung . . . . .	988
	Aufgaben und Übungen . . . . .	989
	Weitere Medien . . . . .	992
<b>Kapitel 23 Der Anbeginn der Zeit</b>		994
	Lernziele . . . . .	995
23.1	Der Urknall . . . . .	996
	Welche Bedingungen herrschten im frühen Universum? . . . . .	996
	Wie verlief der Urknalltheorie zufolge die Geschichte des Universums? . . . . .	999
23.2	Belege für den Urknall . . . . .	1006
	Wie beobachten wir die vom Urknall zurückgebliebene Strahlung? . . . . .	1006
	Wie belegen die Elementhäufigkeiten die Urknalltheorie? . . . . .	1010
23.3	Der Urknall und die Inflation . . . . .	1013
	Welche Eigenschaften des Universums konnte die Urknalltheorie ursprünglich nicht erklären? . . . . .	1013
	Wie erklärt die Inflation diese Eigenschaften des Universums? . . . . .	1013
	Wie können wir die Inflation überprüfen? . . . . .	1017
23.4	Den Urknall selbst beobachten . . . . .	1019
	Warum ist die Schwärze des Nachthimmels ein Beleg für den Urknall? . . . . .	1019

Überblick . . . . .	1022
Zusammenfassung . . . . .	1022
Aufgaben und Übungen . . . . .	1024
Weitere Medien . . . . .	1029
<b>Kapitel 24 Leben im Universum</b>	<b>1032</b>
Lernziele . . . . .	1033
24.1 Leben auf der Erde . . . . .	1034
Wann entstand das Leben auf der Erde? . . . . .	1035
Wie entstand das Leben auf der Erde? . . . . .	1038
Was sind die Grundvoraussetzungen des Lebens? . . . . .	1044
24.2 Leben im Sonnensystem . . . . .	1045
Gibt es Leben auf dem Mars? . . . . .	1045
Gibt es Leben auf Europa oder anderen Jupitermonden? . . . . .	1048
24.3 Leben bei anderen Sternen . . . . .	1049
Wie wahrscheinlich sind bewohnbare Planeten? . . . . .	1049
Sind erdähnliche Planeten eher selten oder häufig? . . . . .	1051
24.4 Die Suche nach außerirdischer Intelligenz . . . . .	1054
Wie viele Zivilisationen gibt es da draußen? . . . . .	1054
Wie funktioniert SETI? . . . . .	1058
24.5 Interstellare Flüge und ihre Auswirkungen auf die Zivilisation . . . . .	1059
Wie schwierig sind interstellare Flüge? . . . . .	1059
Wo stecken die Außerirdischen? . . . . .	1062
Überblick . . . . .	1065
Zusammenfassung . . . . .	1065
Aufgaben und Übungen . . . . .	1067
Weitere Medien . . . . .	1071
<b>Anhang</b>	<b>1075</b>
A Häufig benötigte Konstanten . . . . .	1076
B Nützliche Formeln . . . . .	1077
C Ein wenig Mathematik . . . . .	1078
D Das Periodensystem . . . . .	1085
E Planetendaten . . . . .	1086
F Sterndaten . . . . .	1092
G Galaxiendaten . . . . .	1094
H Ausgewählte astronomische Websites . . . . .	1098
I Sternbildnamen . . . . .	1101
J Sternkarten . . . . .	1103
K Piktogramme . . . . .	1108
L Glossar . . . . .	1110
M Index . . . . .	1135
N Abbildungsnachweis . . . . .	1159