

---

# Astrophysik

---

Karl-Heinz Spatschek

# Astrophysik

Eine Einführung in Theorie und  
Grundlagen

3. Auflage

 **Springer** Spektrum

Karl-Heinz Spatschek  
Universität Düsseldorf  
Düsseldorf, Deutschland

ISBN 978-3-662-63625-1                      ISBN 978-3-662-63626-8 (eBook)  
<https://doi.org/10.1007/978-3-662-63626-8>

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

© Springer-Verlag GmbH Deutschland, ein Teil von Springer Nature 2003, 2018, 2021

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/Lektorat: Lisa Edelhäuser

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

Astrophysikalische Forschungsergebnisse finden in diesen Tagen erstaunlich oft den Weg an prominente Stellen in Nachrichtensendungen und Zeitungsmeldungen. Das ist sicher auch der jüngsten, dramatischen Entwicklung der Astrophysik geschuldet, die sich in der Vergabe mehrerer Physik–Nobelpreise (direkt für astrophysikalische Forschung) in den letzten Jahren widerspiegelt. Gemeint sind die Nobelpreise der Jahre 2002, 2006, 2011, 2017, 2019 und 2020. Dazu kommt der Nobelpreis 2015, der indirekt sehr viel mit Astrophysik zu tun hat, denn Neutrinonachweis, Neutrinomasse, Dunkle Materie und Dunkle Energie sind die zugehörigen Themen aus der Astrophysik. Besonders spektakulär war in jüngster Zeit der direkte Nachweis von Gravitationswellen im September 2015 (d. h. fast genau 100 Jahre nach ihrer Vorhersage durch Einstein). Der direkte Nachweis wurde 2017 – nach dem Nobelpreis 1993 an Taylor und Hulse für den indirekten Nachweis von Gravitationsstrahlung – mit dem Nobelpreis gewürdigt. Die offiziellen Statements der Schwedischen Akademie lauten:

- The Nobel Prize in Physics 2002 was divided, one half jointly to Raymond Davis Jr. and Masatoshi Koshiba „for pioneering contributions to astrophysics, in particular for the detection of cosmic neutrinos“ and the other half to Riccardo Giacconi „for pioneering contributions to astrophysics, which have led to the discovery of cosmic X-ray sources“.
- The Nobel Prize in Physics 2006 was awarded jointly to John C. Mather and George F. Smoot „for their discovery of the blackbody form and anisotropy of the cosmic microwave background radiation“.
- The 2011 Nobel Prize in Physics was divided, one half awarded to Saul Perlmutter, the other half jointly to Brian P. Schmidt and Adam G. Riess „for the discovery of the accelerating expansion of the Universe through observations of distant supernovae“ .
- The Nobel Prize in Physics 2015 was awarded jointly to Takaaki Kajita and Arthur B. McDonald „for the discovery of neutrino oscillations, which shows that neutrinos have mass“.

- The Nobel Prize in Physics 2017 was divided, one half awarded to Rainer Weiss, the other half jointly to Barry C. Barish and Kip S. Thorne „for decisive contributions to the LIGO detector and the observation of gravitational waves“.
- The Nobel Prize in Physics 2019 was awarded „for contributions to our understanding of the evolution of the universe and Earth’s place in the cosmos“ with one half to James Peebles „for theoretical discoveries in physical cosmology“, the other half jointly to Michel Mayor and Didier Queloz „for the discovery of an exoplanet orbiting a solar-type star“.
- The Nobel Prize in Physics 2020 was divided, one half awarded to Roger Penrose „for the discovery that black hole formation is a robust prediction of the general theory of relativity“, the other half jointly to Reinhard Genzel and Andrea Ghez „for the discovery of a supermassive compact object at the centre of our galaxy“.

Blickt man weiter zurück, so findet man weitere durch Nobelpreise gewürdigte wissenschaftliche Meilensteine der Astrophysik, auf die wir im Verlauf des Buches zu sprechen kommen. Und die Zahl der Nobelpreise wäre sicher noch größer – man denke nur an Edwin Hubble, wenn nach damaliger Lesart „astronomische“ Ergebnisse nicht von der Nobelpreisvergabe ausgeschlossen gewesen wären.

Man muss allerdings nicht unbedingt die Zahl der Nobelpreise bemühen, um breite Zustimmung für die Aussage zu bekommen, dass moderne Astrophysik ein äußerst faszinierendes Gebiet ist. Wir sind seit früher Kindheit, allein schon durch die unausweichliche „Himmelsbeobachtung“, mit astronomischen Fragestellungen recht bewusst konfrontiert. Auch haben die meisten von uns sich immer wieder erkenntnistheoretische Fragen der Art „Woher kommen wir, wohin gehen wir?“ gestellt und dabei auch aus dem naturwissenschaftlichen Bereich Hilfestellungen erwartet. Diese frühe Befassung mit der Materie, ohne abschließende Antworten auf alles gefunden zu haben, lässt auch Nichtspezialisten Astronomie und Astrophysik weiterhin als äußerst spannend und wichtig bewerten.

Die Motivation für das Gebiet ist also gleichsam „gottgegeben“. Der „Preis“ für die enorme Bedeutung ist die Breite. Und diese nun seriös einem einzigen Buch gänzlich vorstellen zu wollen, ist wegen der Vielzahl der Aspekte zum Scheitern verurteilt. Also müssen wir eingrenzen, ohne die Absicht, einen Überblick zu geben, gänzlich aus den Augen zu verlieren. Es soll der Versuch unternommen werden, eine Art Leitfaden für das Erschließen des so spannenden Fachgebiets aufzustellen, zum Beispiel für Studierende im Hauptstudium Physik, die gerade den Grundkurs „Theoretische Physik“ absolviert haben. Die „Einführung in die Theoretische Astrophysik“ soll eine solide Möglichkeit bieten, ihre gerade erworbenen methodischen Fähigkeiten in einem Gebiet zu erproben, von dem sie schon viel gehört haben, dessen vielzitierte Phänomene sie aber bis dahin noch nicht quantitativ erfassen konnten. So soll dieses Buch insbesondere Hinweise liefern, wie *einige* wesentliche und bekannte astrophysikalische Erscheinungen modellmäßig beschrieben und mit den gängigen Methoden der Theoretischen Physik behandelt werden können. Das kann nur exemplarisch geschehen; jedweder Anspruch

auf Vollständigkeit muss unterbleiben. Trotzdem hoffe ich, dass die physikalischen Beispiele zu einem großen Teil Antworten auf die Fragen liefern, die auch die astrophysikalischen Laien motiviert haben, sich mit dem Gebiet etwas näher zu beschäftigen. Die gewählten Themen sollen auch aufzeigen, wie gesichert (oder spekulativ) manche Aussagen sind. Dass viele Fragen unbeantwortet bleiben, hat zwei Gründe. Erstens kann – wie bereits mehrfach betont – in dieser Einführung nur eine kleine Zahl von Problemen behandelt werden. Zweitens sind gerade in der Astrophysik noch heute viele Fragen offen. Dass Letzteres so ist, macht auch ganz sicher einen großen Teil des Reizes dieses Gebietes aus.

Gegenstand des Buches sind die Grundlagen und gesicherten Erkenntnisse der modernen Astrophysik. Da dieser Wissenschaftszweig auf astronomischen Beobachtungen aufbaut, wird auch ein – allerdings sehr kurzer – Abriss der „Werkzeuge“ der Astronomie gegeben, sofern sie für die Abhandlung der Astrophysik relevant sind.

Teil I („Einführung in die moderne Astrophysik“) beinhaltet den seitenmäßig umfangreichsten Teil des Buches. In ihm stehen grundsätzliche Aspekte der Astrophysik, wie z. B. Gravitationskollaps, stellare Nukleosynthese, Zustandsgleichungen in dichter Materie, Materie-Strahlung-Wechselwirkung, Wärmetransport, thermonukleare Fusion, (einfache) Sternmodelle, im Vordergrund, wobei dem Überblick gegenüber der Detailerarbeitung der Vorzug gegeben wird. Die Theorie der Sternentwicklung nimmt einen wesentlichen Teil der Darstellung ein. Weißen Zwergen, Neutronensternen, Pulsaren, Schwarzen Löchern sind jeweils eigene Kapitel gewidmet, soweit sie noch ohne fundierte Kenntnisse der Allgemeinen Relativitätstheorie auskommen. Teil II („Einführung in die Allgemeine Relativitätstheorie“) trägt der Tatsache Rechnung, dass viele astrophysikalische Aspekte Grundkenntnisse der Allgemeinen Relativitätstheorie (ART) erfordern. Die ART ist eine der elegantesten Theorien der Physik. In ihrer ganzen Komplexität lässt sie sich keinesfalls auf wenigen Seiten darstellen. Wenn man sie allerdings für einige grundsätzliche Probleme „nur anwenden“ will, dann ist eine Vermittlung einiger technischer Vorschriften“ ausreichend. Genau das geschieht in einem Crash-Kurs in Teil II, wobei auch gleich einige ART-Phänomene berechnet werden. Es besteht die Hoffnung, dass nach einem kurzen und erfolgreichen Umgang mit der ART die Scheu vor ihr genommen ist. Das soll die Motivation steigern, sich auch einmal ausführlicher mit der ART zu beschäftigen (wozu dringend geraten wird). In Teil III („Einführung in die Kosmologie“) nutzen wir die ART zur Entwicklung kosmologischer Modelle. Auch wenn nur die bekanntesten diskutiert werden, zeigt die einfache Theorie bereits den Zusammenhang mit den aktuellen Fragen nach Dunkler Materie, Dunkler Energie und Inflation, um nur einige zu nennen, auf. In der dritten Auflage wurden insbesondere die Kapitel „Inflation“ und „Inhomogene Kosmologie“ wesentlich erweitert und auf den neuesten Stand gebracht. Es gibt weitere interessante kosmologische Ansätze, die dieses Buch trotz seiner dritten Auflage nicht aufzeigt. Manche davon sind noch nicht hinreichend begründet. Sie trotz ihrer Attraktivität hier nicht vorzustellen, geschieht auch vor dem Hintergrund eines Bonmots, das dem berühmten Theoretischen Physiker Landau

zugeschrieben wird: „Cosmologists are often in error, but never in doubt.“ Wahrscheinlich wird sich bei manchen Erklärungsversuchen erst in den nächsten Jahren „die Spreu vom Weizen trennen“.

Abschließend noch ein Wort zur Darstellung. Bewusst sind in diesem „Leitfaden“ die meisten Abbildungen recht plakativ gestaltet. Dementsprechend findet man nicht allzu viele Reproduktionen aus Originalpublikationen mit all den wichtigen Details, die für eine seriöse wissenschaftliche Weiterarbeit nötig sind. Wir leben im Zeitalter des Internets mit schnellem Zugang zu einer unermesslichen Zahl von wissenschaftlichen Publikationen und Daten. Wenn man weiß, was man suchen soll, wird man in der Regel schnell in allen Details fündig. Die entscheidende Frage ist dabei: Was ist wichtig, und wie ordne ich es ein? Zur Beantwortung dieser Fragen soll das Buch Hilfestellung leisten.

Die Abfassung des Buches hat viel Zeit und Geduld gekostet. Ich bin meiner Frau Gertrud für ihr Verständnis sehr dankbar. Dem Fach Physik an der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf danke ich für die zahlreichen Hilfestellungen und Möglichkeiten, den Inhalt immer wieder Studierenden vermitteln zu können. Im Springer-Verlag haben Frau Dr. Lisa Edelhäuser und Frau Anja Groth die Entwicklung des Buches konstruktiv kritisch und stets motivierend begleitet. Für ihre zahlreichen und äußerst wertvollen Anregungen bin ich sehr dankbar. Viel Positives ist mit fremder Hilfe eingeflossen – für das verbliebene Negative übernehme ich die alleinige Verantwortung.

In dieser dritten Auflage wurden alle Kapitel überarbeitet, mit deutlichen Erweiterungen in Teil III. Aber auch die beiden ersten Teile erfuhren Verbesserungen, die über die Korrektur von Schreibfehlern deutlich hinaus gehen. Allen, die mit ihren Anregungen dazu beigetragen haben, sage ich herzlichen Dank.

Düsseldorf  
im Januar 2021

Karl-Heinz Spatschek

---

# Inhaltsverzeichnis

## Teil I Einführung in die moderne Astrophysik

<b>1</b>	<b>Einige wichtige physikalische Grundlagen</b>	3
1.1	Überblick	3
1.2	Größenordnungen und Modellbereiche	16
1.2.1	Orts- und Zeitskalen	16
1.2.2	Kräfte und Energieskalen	23
1.2.3	Gravitation	27
1.2.4	Modellbildung	31
1.3	Astrophysikalische Strukturen	35
1.3.1	Das Universum insgesamt	36
1.3.2	Virialtheorem	45
1.3.3	Größe von Strukturen	46
1.4	Strahlung und Helligkeit	58
1.4.1	Photonen im Gleichgewicht	60
1.4.2	Helligkeit und Größenklassen	67
1.4.3	Hertzsprung-Russell-Diagramm	75
1.5	Strahlungs- und Energietransport	76
1.5.1	Strahlungstransportgleichung	77
1.5.2	Diffusionsmodelle für den Transport	86
1.5.3	Konvektiver Transport	90
<b>2</b>	<b>Beobachtungsmöglichkeiten</b>	95
2.1	Klassische Verfahren	95
2.1.1	Methoden der Abstandsbestimmung	96
2.1.2	Stark vereinfachte Modelle für Cepheiden	108
2.1.3	Massenbestimmung	114
2.1.4	Radiusbestimmung	115
2.1.5	Oberflächentemperatur	116
2.1.6	Geschwindigkeitsbestimmung	117
2.2	Beobachtungsinstrumente	121



<b>3</b>	<b>Kosmische Strahlung</b> .....	139
3.1	Überblick .....	139
3.2	Beschleunigungsmechanismen .....	148
3.2.1	Beschleunigung durch magnetische Spiegel .....	149
3.2.2	Fermi-Beschleunigung .....	156
<b>4</b>	<b>Sternaufbau und Sternentwicklung</b> .....	163
4.1	Grundgleichungen für leuchtende Sterne .....	164
4.1.1	Sternaufbaugleichungen .....	166
4.1.2	Zustandsgleichungen .....	170
4.1.3	Sternaufbaugleichungen und Virialtheorem .....	175
4.2	Stellare Energiequellen .....	176
4.2.1	Grundsätzliches .....	177
4.2.2	Fusionsprozesse in Sternen .....	189
4.3	Unsere Sonne .....	193
4.3.1	Sonnenparameter .....	194
4.3.2	Transport und Stabilität .....	197
4.3.3	Sonnenatmosphäre .....	199
4.3.4	Helioseismologie .....	206
4.3.5	Prototyp eines Standardsonnenmodells .....	207
4.3.6	Solare Neutrinos .....	210
4.3.7	Ausblick .....	211
4.4	Zustandsgleichungen und Chandrasekhar-Masse .....	214
4.4.1	Ideales klassisches Gas .....	214
4.4.2	Ideale Quantengase .....	218
4.4.3	Weißer Zwerge .....	226
4.4.4	Polytrope Zustandsgleichungen .....	228
4.4.5	Chandrasekhar-Masse .....	231
4.4.6	Dichte Coulomb-Systeme .....	240
4.4.7	Neutronen kommen ins Spiel .....	249
4.5	Strukturbildung .....	253
4.5.1	Qualitative Aussagen .....	254
4.5.2	Jeans-Instabilität .....	257
4.6	Sternentwicklung: Anfänge .....	264
4.6.1	Entwicklung der Protosterne .....	265
4.6.2	Hertzsprung-Russell-Diagramm .....	271
4.6.3	Lösung der Sternaufbaugleichungen .....	275
4.6.4	Massengrenzen .....	285

<b>5</b>	<b>Endstadien leuchtender Sterne</b> .....	291
5.1	Sterbende Sterne .....	292
5.1.1	Weiße Zwerge .....	292
5.1.2	Neutronensterne .....	305
5.1.3	Quellen hochintensiver Strahlung .....	316
5.2	Schwarze Löcher .....	324
<b>6</b>	<b>Galaxien</b> .....	333
6.1	Die Milchstraße .....	333
6.2	Allgemeine Eigenschaften von Galaxien .....	339
6.2.1	Galaxienbeobachtung .....	339
6.2.2	Olbers'sches Paradoxon .....	346
6.2.3	Materiehaushalt .....	350
6.3	Modellierung .....	355
<b>Teil II Einführung in die Allgemeine Relativitätstheorie</b>		
<b>7</b>	<b>Rechenregeln der ART</b> .....	361
7.1	Mathematische Terminologie der SRT .....	361
7.1.1	Lorentz-Transformation .....	362
7.1.2	Beschleunigte Bezugssysteme .....	370
7.2	Einstein'sche Feldgleichungen .....	372
7.2.1	Prinzipien .....	373
7.2.2	Die Feldgleichungen „fallen vom Himmel“ .....	378
7.3	Newton'scher Grenzfall .....	384
7.3.1	Bewegungsgleichung .....	385
7.3.2	Bestimmungsgleichung für das Potenzial .....	386
7.4	Struktur der Einstein'schen Feldgleichungen .....	389
7.4.1	Mathematischer Hintergrund .....	391
7.4.2	Der Quellterm .....	398
7.4.3	Kovarianz der Bewegungsgleichung .....	401
7.5	Feldgleichungen und Variationsprinzip .....	404
7.5.1	Metrische Determinante .....	404
7.5.2	Homogene Einstein-Gleichungen .....	406
7.5.3	Energie-Impuls-Tensor .....	407
7.5.4	Kosmologische Konstante .....	408
7.5.5	Notationen im Vergleich .....	409

<b>8</b>	<b>ART-Effekte</b>	411
8.1	Äußere Schwarzschild-Metrik	411
8.1.1	Metrische Koeffizienten	411
8.1.2	Teilchen im Schwarzschild-Feld	414
8.2	Periheldrehung des Merkurs	421
8.3	Licht im Schwerefeld	424
8.3.1	Lichtablenkung im Schwerefeld	424
8.3.2	Frequenzverschiebung	430
8.3.3	Laufzeitverzögerung	431
8.4	Gravitationswellen	433
8.4.1	Wellengleichung im materiefreien Raum	434
8.4.2	Eichung, Polarisation und Erzeugung	436
8.4.3	Nachweismethoden	446
<b>9</b>	<b>Relativistische Sterndynamik</b>	457
9.1	Relativistische Sternleichgewichte	457
9.1.1	Innere Schwarzschild-Metrik	458
9.1.2	Relativistische Gleichgewichte	464
9.1.3	Stabilität	468
9.2	Gravitationskollaps	478
9.2.1	Zeitabhängige Metriken	478
9.2.2	Zeitabhängige Lösungen	484
9.3	Rotierende Schwarze Löcher	490
9.3.1	Grundsätzliches	491
9.3.2	Kerr-Metrik	493
9.3.3	Aktuelle Forschung zu Schwarzen Löchern	494
<b>Teil III Einführung in die Kosmologie</b>		
<b>10</b>	<b>Homogene Kosmologie</b>	501
10.1	Ausgangslage für kosmologische Ansätze	501
10.2	Friedmann-Lemaître-Gleichungen	504
10.2.1	Robertson-Walker-Metrik	504
10.2.2	Friedmann-Lemaître-Gleichungen	508
10.2.3	Historische Rückschau	510
10.2.4	Friedmann-Gleichung für $P = 0$	512
10.2.5	Friedmann-Gleichung mit drei Komponenten	519
10.2.6	Universum mit Strahlungsdominanz	523
10.2.7	Dominanz von Materie	525
10.2.8	Von Strahlungs- zu Materiedominanz	526
10.2.9	Kosmografie	528

10.3	Weltmodelle	530
10.3.1	Kosmologische Konstante	530
10.3.2	Schwarzschild-deSitter-Raum	533
10.3.3	Lösungen der Friedmann-Lemaître-Gleichungen	533
<b>11</b>	<b>Primordiale Nukleosynthese</b>	<b>545</b>
11.1	Grundlagen	546
11.1.1	Bausteine des Universums	546
11.1.2	Freiheitsgrade	549
11.2	Thermische Entwicklung des jungen Universums	552
11.2.1	Die ersten Bruchteile von Sekunden	553
11.2.2	Ausfrieren von Freiheitsgraden	563
11.3	Das Universum wird „erwachsen“	568
<b>12</b>	<b>Supernovae Surveys</b>	<b>571</b>
12.1	Entfernungsmaße	571
12.2	Beobachtungslängen	579
12.3	Auswertungen	584
12.3.1	Leuchtkraftentfernung und Rotverschiebung	584
12.3.2	Beobachtungen	587
<b>13</b>	<b>Kosmische Mikrowellenhintergrundstrahlung</b>	<b>589</b>
13.1	Beobachtungen	589
13.2	Erste Analysen	597
13.2.1	Temperatur und Skalenfaktor	597
13.2.2	Entkopplungsmodell	599
13.2.3	Horizontproblem der CMB	601
<b>14</b>	<b>Inflation</b>	<b>603</b>
14.1	Ansätze	603
14.1.1	Konforme Zeit	605
14.1.2	Phänomenologie der Inflation	609
14.2	Inflatonfeld in klassischer Beschreibung	616
14.2.1	Normierungen und Konventionen	616
14.2.2	Modell	619
14.2.3	Approximative Lösung	622
14.2.4	Auflösung wichtiger kosmologischer Probleme	626
14.2.5	Flachheitsproblem	627
14.2.6	Monopolproblem	628

<b>15</b>	<b>Inhomogene Kosmologie</b>	629
15.1	Newton'sche Subhorizontstörungen	630
15.1.1	Jeans-Rechnung mit expandierendem Hintergrund	630
15.1.2	Jeans-Masse	632
15.1.3	Verhalten Dunkler Materie	638
15.2	Grundlagen der inhomogenen Kosmologie	639
15.2.1	Gestörte metrische Koeffizienten	639
15.2.2	Freiheit der Eichung	642
15.2.3	Gestörter Energie-Impuls-Tensor	647
15.2.4	Gestörte Einstein-Gleichungen	653
15.3	Informationsübertrag aus der Frühphase	659
15.3.1	Entwicklung der Krümmungsstörung	659
15.3.2	Eintritt in den Horizont	664
15.3.3	Spektrale Verteilungen	673
15.4	Quantenfluktuationen	680
15.4.1	Zusammenhang zwischen $\mathcal{R}$ und $\delta\phi$	680
15.4.2	Subhorizontartige Feldfluktuationen	681
15.4.3	Krümmungsskalar	684
15.5	Phänomenologie	686
15.5.1	Dichte- und Massenansammlungen	687
15.5.2	Vermessung von Galaxien	689
15.5.3	Fluktuationen in der CMB	694
15.5.4	Polarisation in der CMB	701
	<b>Literatur</b>	707
	<b>Stichwortverzeichnis</b>	711