
Die Physik der Sterne

Mathias Scholz

Die Physik der Sterne

Aufbau, Entwicklung und Eigenschaften

Mathias Scholz
Zittau, Deutschland

ISBN 978-3-662-57800-1 ISBN 978-3-662-57801-8 (eBook)
<https://doi.org/10.1007/978-3-662-57801-8>

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

Springer Spektrum

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

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 Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

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.

Verantwortlich im Verlag: Margit Maly

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

Für Martin Franze

Vorwort

Das Thema „Sterne und ihre Entwicklung“ ist nicht nur vom didaktischen Standpunkt aus gesehen eine ausgezeichnete Möglichkeit, Mathematik, Physik und Astronomie – quasi interdisziplinär ineinander verflochten – zur Anwendung zu bringen. Denn Sterne sind genügend einfache Objekte, die sich in ihrem grundsätzlichen Aufbau relativ leicht beschreiben lassen, wobei alle physikalischen Teildisziplinen, die gewöhnlich in einer Experimentalphysikvorlesung behandelt werden, gebührend zur Geltung kommen. Man lernt dabei durch Anwendung grundlegender physikalischer Gesetzmäßigkeiten, wie Sterne im Kosmos entstehen, wie sie „funktionieren“ (s. Kap. 4 und 5) und wie sie sich im Laufe der Zeit entwickeln (s. Kap. 6) bis sie schließlich als kompaktes Objekt (d. h. je nach Masse als Weißer Zwerg, Neutronen- oder Quarkstern, Schwarzes Loch) enden, sobald ihr Kernbrennstoff vollständig aufgebraucht ist (s. Kap. 7). Das heißt, es lassen sich auf diese Weise stellare Entwicklungsprozesse nachvollziehen und verstehen, die sich aufgrund der entsprechenden Zeitskalen an individuellen Einzelsternen nie direkt beobachten lassen, die aber erklären, warum es eine so große Formenvielfalt an Sternen gibt was allein Masse, Radius und Leuchtkraft betrifft, um nur drei der wichtigsten Basisparameter eines Sterns zu nennen. Darüber hinausgehend ist die Beschäftigung mit der Physik der Sterne auch wissenschaftshistorisch durchaus nicht uninteressant (s. Kap. 1), denn es erscheint doch irgendwie erstaunlich, wie in gerade einmal mehr als einem Jahrhundert aus Vermutungen über deren Natur eine Theorie erarbeitet wurde, die, lässt man Detailprobleme und exotische Zwischen- und Endstadien der Sternentwicklung einmal außer acht, als durchaus abgeschlossen angesehen werden kann. Der Lebenslauf der Sterne in Abhängigkeit ihrer Ausgangsmasse und chemischer Zusammensetzung ist heute kein Geheimnis mehr. Er lässt sich mittels Computer in allen Einzelheiten nachvollziehen, und der Vergleich mit Beobachtungen zeigt, dass die dabei gewonnenen Erkenntnisse die Realitäten des Kosmos sehr gut widerspiegeln in der Lage sind. Auch lässt sich gerade am Beispiel der Sterne sehr schön die Wechselbeziehung zwischen Beobachtung (hier Spektralanalyse) und theoretischer Beschreibung nachvollziehen, was insbesondere in der Theorie der Sternatmosphären bedeutungsvoll zur Geltung kommt (s. Kap. 3).

Was das fachliche Niveau betrifft, so wurde beim Verfassen dieses Buches dasjenige angestrebt, welches man im englischsprachigen Raum gewöhnlich als „undergraduate“ bezeichnet. Es soll gewissermaßen die Lücke zwischen mehr

populären Darstellungen und der eigentlichen Fachliteratur schließen, wobei als Referenz für Letztere das ausgezeichnete und fast schon zeitlos zu nennende Lehrbuch von R. Kippenhahn und A. Weigert „Stellar Structure and Evolution“ genannt werden soll. Deshalb werden Sie hier auch mehr erklärende Prosa finden, als es gewöhnlich in reinen Fachbüchern zu diesem Thema der Fall ist. Der Leser soll dabei ein Verständnis über die Physik der Sterne und ihrer Evolution entwickeln in dem Sinn, dass er die grundlegenden Zusammenhänge „populär“, z. B. in Form eines Gesprächs oder Vortrags seinen Mitmenschen erklären kann (wie es viele Amateurastronomen meisterhaft beherrschen). Andererseits soll aber auch ein Verständnis dafür vermittelt werden, wie exakte Wissenschaft in der Praxis wirklich funktioniert, d. h., auf welche Weise z. B. Astronomen und Astrophysiker zu ihren Erkenntnissen gelangen – und das betrifft sowohl die beobachtende Astronomie als auch die theoretische Forschung.

Zum Abschluss möchte ich noch kurz meinen Dank an Herrn Martin Franze für dessen Unterstützung bei der Anfertigung des doch sehr umfangreichen Manuskriptes aussprechen. Weiterhin gilt mein Dank natürlich dem Springer Verlag, der es mir zum wiederholten Male ermöglichte, ein astronomisches Fachbuch zu veröffentlichen. Insbesondere möchte ich mich an dieser Stelle bei Frau Stefanie Adam und Frau Margit Maly für die Betreuung dieses Buchprojektes und natürlich bei Frau Tatjana Strasser für die sorgfältige Korrektur des Manuskriptes bedanken (was übrigens auch dem Autor so manchen Erkenntnisgewinn bezüglich der Tücken der neuen deutschen Rechtschreibung einbrachte;-).

Zittau
Juli 2018

Mathias Scholz

Inhaltsverzeichnis

1	Eine kurze Geschichte der Erforschung der Sterne	1
2	Was kann man an Sternen beobachten?	53
2.1	Sternhelligkeiten	56
2.1.1	Intensitäten und Strahlungsströme	58
2.1.2	Einfluss der Erdatmosphäre auf die scheinbare Helligkeit	67
2.1.3	Interstellare Extinktion und Verfärbung	73
2.1.4	Fotometrie und Schwarzkörperstrahlung	75
2.2	Sterndurchmesser	81
2.2.1	Durchmesserbestimmung mittels optischer Interferometrie	82
2.2.2	Intensitätsinterferometrie nach R. Hanbury-Brown und R. Q. Twiss	87
2.2.3	Speckle-Interferometrie	90
2.2.4	Sternbedeckungen durch den Mond	96
2.2.5	Microensing-Ereignisse	97
2.2.6	Direkte Abbildung von Sternoberflächen	98
2.2.7	Lichtkurven bedeckungsveränderlicher Sterne	99
2.2.8	Baade-Wesselink-Verfahren	103
2.2.9	Fotometrische Sterndurchmesser	105
2.2.10	Die größten bekannten Sterne	106
2.3	Sternmassen	108
2.3.1	Doppelsternbeobachtungen	109
2.3.2	Astroseismologie	115
2.3.3	Ableitung von Massen durch Anpassung von Sternmodellen an Beobachtungsparameter	119
2.3.4	Massebestimmung von binären Radiopulsaren, Röntgenpulsaren und Schwarzen Löchern	120
2.3.5	Die massereichsten Sterne der Milchstraße	122
2.4	Sternspektren	125
2.4.1	Klassifikation der Sternspektren	127
2.4.2	Leuchtkraftklassen	133

2.4.3	Populationszugehörigkeit	137
2.4.4	Spektralklassen.	141
2.5	Korrelationen	175
2.5.1	Farben-Helligkeits-Diagramme	176
2.5.2	Masse-Leuchtkraft-Beziehung	182
2.5.3	Masse-Radius-Beziehung.	185
2.5.4	Hertzsprung-Russell-Diagramm	186
2.6	Analyse des Schwingungsverhalten von Sonne und Sternen.	196
2.6.1	Dopplergramme	197
2.6.2	Solare Oszillationen.	199
2.6.3	Modelle	201
2.6.4	Direkte und inverse Methode.	205
3	Sternspektren und Sternatmosphären	207
3.1	Physikalische Grundlagen der Spektroskopie	209
3.1.1	Strahlungsprozesse im Bohr-Sommerfeld'schen Atommodell	210
3.1.2	Das Wasserstoffatom und sein Spektrum.	219
3.1.3	Spektren der Alkalimetalle.	229
3.1.4	Elektronenkonfiguration von Ionen	232
3.1.5	Atome mit mehreren Elektronen	233
3.1.6	Das Heliumspektrum und die Spektren heliumartiger Ionen.	245
3.1.7	Spektren der Wasserstoffionen.	250
3.1.8	Molekülspektren.	251
3.1.9	Identifikation von Spektrallinien in Sternspektren.	271
3.1.10	Linienprofile und Linienbreiten	273
3.1.11	Linienaufspaltung durch den Zeeman-Effekt.	293
3.2	Strahlungstransport in Spektrallinien.	299
3.2.1	Lokales thermodynamisches Gleichgewicht (LTE) und Kirchhoff'scher Satz	304
3.2.2	Formale Lösung der Strahlungstransportgleichung	310
3.2.3	Eddington-Barbier-Beziehung	312
3.2.4	Strahlungsprozesse und Absorptionskoeffizienten.	315
3.2.5	Boltzmann-Verteilung	326
3.2.6	Saha-Gleichung	328
3.3	Quantitative Spektralanalyse	340
3.3.1	Wachstumskurven	341
3.3.2	Synthetische Spektren	348
3.4	Photosphärenmodelle.	351
3.4.1	Grundlegende Physik einer Sternphotosphäre	352
3.4.2	Modellatmosphären und Bestimmung der fundamentalen Sternparameter	359

4	Innerer Aufbau der Sterne	365
4.1	Sterne im hydrostatischen Gleichgewicht und Virialtheorem	368
4.2	Energiehaushalt und Leuchtkraft	373
4.3	Energietransport	375
4.3.1	Strahlungstransport	375
4.3.2	Konvektiver Wärmetransport	378
4.4	Zustandsgleichungen	383
4.4.1	Ideales Gas und Photonengas	385
4.4.2	Entartete Materie	389
4.4.3	Innere Energie	394
4.5	Statische Sternmodelle	396
4.5.1	Numerische Lösung von Sternstrukturmodellen	400
4.5.2	Polytrope Lösungen	404
4.5.3	Homologe Sternmodelle	425
5	Nukleare Energieerzeugungsprozesse und Elementesynthese	431
5.1	Bindungsenergie und Massendefekt	432
5.2	Nukleare Reaktionsraten	434
5.2.1	Energieabhängigkeit nuklearer Reaktionsraten	438
5.2.2	Resonanzen in den nuklearen Reaktionsraten	447
5.3	Wichtige nukleare Brennphasen im Laufe der Sternentwicklung	450
5.3.1	Deuterium- und Lithiumbrennen	451
5.3.2	Wasserstoffbrennen	452
5.3.3	Heliumbrennen – der Triple-Alpha-Prozess	478
5.3.4	Fortgeschrittene thermonukleare Brennphasen	492
5.3.5	s-, r- und p-Nukleosynthese	511
6	Evolution der Sterne	521
6.1	Evolutionäre Sternmodelle	523
6.1.1	Visualisierung von Entwicklungsprozessen	525
6.1.2	Stellare Zeitskalen	527
6.2	Sternentstehung	530
6.2.1	Interstellares Medium (ISM) und Molekülwolken	532
6.2.2	Gravitationskollaps einer Molekülwolke und Sternbildung	538
6.3	Hauptreihen- und Nach-Hauptreihenentwicklung	558
6.3.1	Evolution Roter Zwergsterne	564
6.3.2	Evolution massearmer Sterne	568
6.3.3	Evolution von Sternen im mittleren Massenbereich	580
6.3.4	Evolution von Sternen im oberen Massenbereich	605
7	Endstadien der Sternentwicklung	615
7.1	Weißer Zwerge	619
7.1.1	Spektrum	622
7.1.2	Physische Eigenschaften	624

7.1.3	Atmosphäre	628
7.1.4	Innere Struktur	630
7.1.5	Abkühlung	632
7.2	Neutronensterne	641
7.2.1	Radiopulsare	646
7.2.2	Röntgenpulsare	660
7.2.3	Physische Eigenschaften	678
7.2.4	Protonen-Neutronensterne	689
7.2.5	Innerer Aufbau	692
7.3	Quarkmaterie und (mehr oder weniger seltsame) Quarksterne	717
7.3.1	Quark-Gluon-Plasma	718
7.3.2	Seltsame Materie	719
7.4	Stellare Schwarze Löcher	730
7.4.1	Einteilung Schwarzer Löcher nach Entstehung und Masse	737
7.4.2	Röntgendoppelsterne mit Black Hole-Komponente	738
8	Anhang	745
	Literatur	747
	Sachverzeichnis	757