

Physik der Sterne und der Sonne

von

Prof. Dr. Helmut Scheffler

Landessternwarte Heidelberg-Königsstuhl

und Universität Heidelberg

und

Prof. Dr. Hans Elsässer

Max-Planck-Institut für Astronomie Heidelberg

und Universität Heidelberg

2., überarbeitete und erweiterte Auflage 1990



Wissenschaftsverlag
Mannheim/Wien/Zürich

Inhalt

| | |
|---|-----|
| Einleitender Überblick | 13 |
| I Zustandsgrößen der Sonne und normaler Sterne | |
| 1 Die Sonne | 31 |
| 1.1 Entfernung | 31 |
| 1.2 Radius | 32 |
| 1.3 Masse | 33 |
| 1.4 Rotation, heliographische Koordinaten | 33 |
| 1.5 Die Strahlung der ungestörten Sonne – Überblick | 35 |
| 1.6 Fraunhoferlinien und qualitative Analyse | 39 |
| 1.7 Strahlungsflußdichte und Intensität – Temperaturbegriffe – Absolute Spektralphotometrie der Sonne | 43 |
| 1.8 Mitte-Rand-Variation der optischen Strahlung über die Sonnenscheibe | 48 |
| 1.9 Ultraviolett- und Röntgenstrahlung | 52 |
| 1.10 Radiostrahlung | 54 |
| 1.11 Gesamtstrahlung, Leuchtkraft und effektive Temperatur der Sonne | 56 |
| | |
| 2 Die Sterne | 58 |
| 2.1 Linienspektren, Harvard-Spektralklassen | 59 |
| 2.2 Energieverteilung | 66 |
| 2.3 Ultraviolett- und Röntgenstrahlung | 69 |
| 2.4 Infrarotstrahlung | 75 |
| 2.5 Scheinbare Helligkeiten | 78 |
| 2.6 Helligkeitssysteme, Farbindices | 80 |
| 2.7 Absolute Helligkeiten und Leuchtkräfte | 85 |
| 2.8 Radien, Temperaturen | 88 |
| 2.9 Hertzsprung-Russell-Diagramm; Zustandsdiagramm | 94 |
| 2.10 Zweidimensionale Spektralklassifikation | 101 |
| 2.11 Photometrische Spektralklassifikation | 107 |
| 2.12 Leuchtkraftbestimmung durch Messung von Äquivalentbreiten | 111 |
| 2.13 Masse, Dichte, Schwerebeschleunigung | 112 |
| 2.14 Rotation | 119 |
| 2.15 Zusammenstellung der Zustandsgrößen | 122 |

II Veränderliche und andere Sondertypen

| | | |
|-----|---|-----|
| 1 | Klassen von Veränderlichen | 124 |
| 1.1 | Optische und physische Veränderliche | 124 |
| 1.2 | Benennung und Verzeichnisse | 124 |
| 1.3 | Klassifikation | 125 |
| 1.4 | Veränderliche im HRD | 127 |
| 2 | Pulsierende Veränderliche | 135 |
| 2.1 | RR Lyrae-Sterne | 135 |
| 2.2 | Cepheiden | 136 |
| 2.3 | Mira-Sterne, OH/IR-Sterne | 140 |
| 3 | Enge Doppelsternsysteme | 145 |
| 3.1 | Konfigurationen enger Sternpaare | 145 |
| 3.2 | Bedeckungsveränderliche mit Massenaustausch | 150 |
| 3.3 | Kataklysmische Veränderliche: Novae, Zwergnovae und ähnliche Sterne | 152 |
| 3.4 | Röntgen-Doppelsterne | 159 |
| 4 | Supernovae und ihre Überreste | 165 |
| 4.1 | Supernovae | 165 |
| 4.2 | Überreste von Supernovae und Pulsare | 168 |
| 5 | Sterne mit ausgedehnten Atmosphären, Gas- und Staubhüllen | 179 |
| 5.1 | Of-Sterne, Wolf-Rayet-Sterne und späte Überriesen | 179 |
| 5.2 | Be-Sterne | 187 |
| 5.3 | Planetarische Nebel | 189 |
| 5.4 | Infrarotsterne, Staubhüllen | 197 |
| 6 | Sterne in frühen Entwicklungsphasen | 201 |
| 6.1 | T Tauri-Sterne, Herbig Ae/Be-Sterne und verwandte Objekte | 202 |
| 6.2 | Infrarote Protosterne | 207 |
| 6.3 | Bipolarer Massenausfluß, Jets und zirkumstellare Scheiben | 210 |
| 7 | Magnetische Sterne, chemische Anomalien | 214 |
| 7.1 | Ap-Sterne | 215 |
| 7.2 | Metallliniensterne | 219 |

III Phänomene der Sonnenatmosphäre

| | | |
|-----|---|-----|
| 1 | Phänomene der ruhigen Sonne | 221 |
| 1.1 | Granulation und Oszillation der Photosphäre | 221 |
| 1.2 | Die Chromosphäre am Sonnenrand | 229 |
| 1.3 | Die Chromosphäre vor der Sonnenscheibe | 233 |
| 1.4 | Die Sonnenkorona | 237 |

| | | |
|-----|---|-----|
| 2 | Sonnenaktivität | 245 |
| 2.1 | Sonnenflecken | 245 |
| 2.2 | Solare Magnetfelder | 250 |
| 2.3 | Fackeln | 260 |
| 2.4 | Chromosphärische Eruptionen oder Flares | 263 |
| 2.5 | Protuberanzen | 271 |
| 2.6 | Gestörte solare Radiostrahlung | 276 |
| 2.7 | Entwicklung einer Aktiven Region | 283 |
| 2.8 | Magnetischer Zyklus, Entstehung der Flecken | 286 |

IV Strahlung, Energie und Zustand stellarer Materie

| | | |
|------|---|-----|
| 1 | Strahlung in stellarer Materie | 291 |
| 1.1 | Begriffe aus der Strahlungstheorie | 291 |
| 1.2 | Grundgleichungen des Strahlungstransports | 293 |
| 1.3 | Strahlungsaustausch im Sterninneren | 295 |
| 1.4 | Strahlungsaustausch in Sternatmosphären | 297 |
| 1.5 | Beziehungen zwischen Intensität, Strahlungsstrom und Ergiebigkeit | 301 |
| 1.6 | Thermische Strahlung einer Schicht konstanter Temperatur | 305 |
| 1.7 | Linienabsorptionskoeffizient, Streuprozesse | 306 |
| 1.8 | Verbreiterung von Spektrallinien | 313 |
| 1.9 | Energiezustände, thermische Anregung und Ionisation von Atomen | 323 |
| 1.10 | Kontinuierliche Absorption, Opazität | 331 |
| 2 | Konvektion im Stern | 339 |
| 2.1 | Konvektives Gleichgewicht | 339 |
| 2.2 | Konvektiver Energietransport | 344 |
| 2.3 | Charakter der Konvektion | 345 |
| 3 | Zustandsgleichung der Materie im Sterninneren | 347 |
| 3.1 | Ideales Gas | 347 |
| 3.2 | Entartetes Gas | 348 |
| 4 | Kernreaktionen im Sterninneren | 351 |
| 4.1 | Thermische Kernreaktionen | 351 |
| 4.2 | Energieerzeugungsraten | 359 |

V Sternatmosphären

| | | |
|-----|---|-----|
| 1 | Problemstellung | 363 |
| 2 | Grobe Theorie der Linienspektren der Sterne | 365 |
| 2.1 | Qualitative Interpretation der Spektralklassifikation | 365 |
| 2.2 | Äquivalentbreiten und Wachstumskurven | 366 |

| | | |
|---|---|-----|
| 2.3 | Grobanalyse früher Spektraltypen | 372 |
| 2.4 | Grobanalyse des Sonnenspektrums | 374 |
| 3 | Modelle von Sternatmosphären im Strahlungsgleichgewicht | 375 |
| 3.1 | Graue Atmosphären | 375 |
| 3.2 | Nichtgraue Atmosphären, Abweichungen vom lokalen thermodynamischen Gleichgewicht (NLTE) | 383 |
| 3.3 | Ergebnisse von Modellrechnungen und Vergleich mit Beobachtungen | 389 |
| 4 | Halbempirisches Modell der Sonnenphotosphäre | 395 |
| 4.1 | Temperaturschichtung und kontinuierliche Absorption | 395 |
| 4.2 | Photosphärenmodell | 398 |
| 5 | Konvektive Schichten in Sternatmosphären | 399 |
| 5.1 | Modell der Wasserstoffkonvektionszone der Sonne | 399 |
| 5.2 | Modelle konvektiver Schichten für die Atmosphären mittlerer und später Spektraltypen | 403 |
| 6 | Verfeinerte Theorie der Linienspektren normaler Sterne und der Sonne | 406 |
| 6.1 | Berechnung von Linienkonturen und Äquivalentbreiten | 406 |
| 6.2 | Feinanalysen, Elementhäufigkeiten | 414 |
| 7 | Physik der Chromosphäre und Korona der Sonne | 419 |
| 7.1 | Dichtegradienten der Chromosphäre | 419 |
| 7.2 | Halbempirisches Modell der Chromosphäre | 421 |
| 7.3 | Dichtemodell der Korona | 424 |
| 7.4 | Temperatur der Korona, Ionisationsgleichgewicht | 426 |
| 7.5 | Röntgen- und Radioemission der Korona | 429 |
| 7.6 | Heizung und Dynamik von Chromosphäre und Korona | 433 |
| 8 | Theorie ausgedehnter expandierender Atmosphären | 441 |
| 8.1 | Linienstrahlung einer sphärisch expandierenden (kontrahierenden) Hülle | 441 |
| 8.2 | Sternwinde | 447 |
| VI Innerer Aufbau und Entwicklung der Sterne | | |
| 1 | Problemstellung | 451 |
| 2 | Grundgleichungen des Sternaufbaus | 452 |
| 2.1 | Mechanisches Gleichgewicht | 452 |
| 2.2 | Energieerhaltung und Energietransport | 457 |
| 2.3 | Das System der Grundgleichungen; Folgerungen | 460 |
| 3 | Sternmodelle und Sternentwicklung | 465 |
| 3.1 | Berechnung von Sternmodellen | 465 |
| 3.2 | Modelle für das Hauptreihen-Stadium | 469 |

| | | |
|--|---|-----|
| 3.3 | Nach-Hauptreihen-Entwicklung | 476 |
| 3.4 | Pulsationsphase der Sternentwicklung | 492 |
| 3.5 | Rotierende Sterne | 496 |
| 3.6 | Endstadien der Sternentwicklung | 503 |
| 3.7 | Sternentwicklung und Entstehung der Elemente | 513 |
| 4 | Sternentstehung und Vor-Hauptreihen-Entwicklung | 515 |
| 4.1 | Bildung von Sternen aus interstellarer Materie | 515 |
| 4.2 | Frühe Entwicklungsphasen | 521 |
| Astronomische und physikalische Konstanten im Gaußschen cgs-System . . | | 534 |
| Beziehungen zwischen Gaußschen cgs-Einheiten und Einheiten des SI-Sy- stems | | 535 |
| Durch den Übergang zu SI-Einheiten geänderte Gleichungen | | 535 |
| Absolute Strahlungsflüsse für den A0V-Stern | | 536 |
| Ergänzende und weiterführende Literatur | | 537 |
| Quellennachweis der Tabellen | | 555 |
| Abbildungsnachweis | | 557 |
| Register | | 565 |