

A. UNSÖLD

—
PHYSIK DER
STERNATMOSPHEREN

ZWEITE AUFLAGE

LI 26

INSTITUT
FÜR METEOROLOGIE U. KLIMATOLOGIE
DER TECHN. UNIVERSITÄT
HANNOVER · HERRENHAUSER STR. 2

1/1270

A. Unsöld

LI 26 Dk 52

Physik der Sternatmosphären

mit besonderer Berücksichtigung der Sonne

Berichtigter Nachdruck
der zweiten Auflage

Mit 257 Abbildungen



Springer-Verlag Berlin · Heidelberg · New York 1968

Inhaltsverzeichnis.

Erster Teil.

Die Sternatmosphäre im thermischen Gleichgewicht.

	Seite
I. Kapitel: Strahlungstheorie.	
1. Das Strahlungsfeld; Grundbegriffe und Definitionen	1
2. Emission und Absorption der Strahlung	4
3. Strahlung im thermischen Gleichgewicht. Hohlraumstrahlung. KIRCHHOFF- scher Satz	5
4. Das STEFAN-BOLTZMANNsche Gesetz	7
5. Spektrale Energieverteilung der Hohlraumstrahlung. WIENSches Verschie- bungsgesetz. Entropie eines (nahezu) monochromatischen Strahlenbündels	10
6. Energieverteilung im Spektrum der Hohlraumstrahlung. Klassische Theorie; RAYLEIGH-JEANSsche Strahlungsformel	11
7. Quantentheorie. PLANCKsches Strahlungsgesetz (1900)	14
8. Herstellung der Hohlraumstrahlung. Messung der Strahlungskonstanten σ und c_2 . Optische Temperaturmessung und Temperaturskala	22
II. Kapitel: Anwendung des PLANCKschen Gesetzes auf die Strahlung der Sonne. Strahlungsmessungen.	
9. Grundprinzipien. Absorption in der Erdatmosphäre	25
10. Messung der Gesamtstrahlung der Sonne	27
11. Messung der Energieverteilung im Spektrum der gesamten Sonnenscheibe und der Mitte der Sonnenscheibe	31
12. Reduktion der Messungen von ABBOT und WILSING. Solarkonstante und effektive Sonnentemperatur. Energieverteilung im Spektrum des Strah- lungsstromes πF_λ in absolutem Maß	35
13. Mitte-Rand-Kontrast $I_\lambda(\theta)/I_\lambda(0)$. Strahlungsintensität und -strom. $I_\lambda(0)/F_\lambda$	39
14. Verzerrung des „wahren“ kontinuierlichen Sonnenspektrums durch die FRAUNHOFER-Linien. Intensitätsverteilung im „wahren“ kontinuierlichen Spektrum; F_λ und $I_\lambda(0)$ in $\text{erg/cm}^2 \cdot \text{sec}$. Vergleich mit dem schwarzen Körper von $T_e = 5780^\circ \text{K}$	44
15. Kritische Bemerkungen über die Methodik der Sonnenstrahlungsmessungen	48
III. Kapitel: Die Strahlung der Sterne.	
16. Einführung in die Klassifikation der Sternspektren	49
17. Messung der Energieverteilung in den kontinuierlichen Spektren der Sterne. Farbtemperaturen und Gradienten. Abweichung vom PLANCKschen Strahlungsgesetz	52
18. Visuelle, photographische und bolometrische Helligkeit der Sterne. Farben- indizes und bolometrische Korrekturen	66
19. Absolute Helligkeiten. Sterndurchmesser. Riesen- und Zwergsterne. HERTZ- SPRUNG-RUSSELL-Diagramm. Die zwei Sternpopulationen	69
20. Empirische Verknüpfung von Farbtemperatur T_F , Strahlungstemperatur T_s und effektiver Temperatur T_e	74
21. Die Massen der Sterne. EDDINGTONs Masse-Leuchtkraft-Beziehung. Schwerebeschleunigung an den Sternoberflächen	76
IV. Kapitel: Thermische Ionisation und Anregung.	
22. Anregung und Ionisation der Atome bei thermischem Gleichgewicht. BOLTZMANNsche und SAHASche Formel	79
23. Zahlenmäßige Auswertung der SAHASchen Formel. Ionisations- und An- regungsspannungen. Statistische Gewichte	85
24. Experimentelle Prüfung der SAHASchen Formel. Anwendung auf Stern- atmosphären nach SAHA, FOWLER und MILNE	93
25. Ionisation von Gemischen mehrerer Elemente. Verhältnis von Elektronen- druck P_e zu Gasdruck P_g . Effektives Molekulargewicht	101

Zweiter Teil.

Kontinuierliches Spektrum und Aufbau einer Sternatmosphäre.

V. Kapitel: Strahlungsaustausch.	Seite
26. Die Strömungsgleichung der Strahlung	106
27. Die Ergiebigkeit S_ν	107
28. Zusammenhang von Strahlungsintensität $I(x, \vartheta)$ und Ergiebigkeit $S(x)$	109
29. Analyse des kontinuierlichen Sonnenspektrums nach LUNDBLAD, CHALONGE-KOURGANOFF und BARBIER	115
30. Zusammenhang von mittlerer Strahlungsintensität $J(x) = \int I(x, \vartheta) \frac{d\omega}{4\pi}$, Strahlungsstrom $\pi F(x)$ und Ergiebigkeit $S(x)$	118
31. Zahlenmäßige Berechnung der mittleren Strahlungsintensität, des Strahlungsstromes und ähnlicher Quadraturen	120
32. Die Strömungsgleichung der Gesamtstrahlung $I = \int_0^\infty I_\nu d\nu$. Der ROSSELLANDSche Mittelwert $\bar{\kappa}$ (Opazitätskoeffizient) des Absorptionskoeffizienten κ_ν . 123	
33. S. CHANDRASEKHARS Verfahren zur Berechnung von $\bar{\kappa}$	127
VI. Kapitel: Strahlungsgleichgewicht.	
34. Die Kontinuitätsgleichung der Strahlung	128
35. Anwendung der Theorie des Strahlungsgleichgewichtes auf die Gesamtstrahlung der grauen Atmosphäre. Randverdunkelung der Sonne. Einführung des Temperaturbegriffes	129
36. Weitere Näherungsmethoden zur Lösung der Integrodifferentialgleichung des Strahlungsgleichgewichtes der grauen Atmosphäre	132
37. Die SCHWARZSCHILD-MILNESche Integralgleichung des Strahlungsgleichgewichtes. Untersuchungen von E. HOFF über deren strenge Lösung. Zweite Näherung	138
38. Das „Strom-Iterationsverfahren“	141
39. Näherungsverfahren mit vorgegebener Form der Lösung	143
40. Exakte Lösung der SCHWARZSCHILD-MILNESchen Integralgleichung. Numerischer Vergleich der verschiedenen Näherungsverfahren. Analytische Approximation nach D. LABS	144
41. Mitte-Rand-Kontrast in Abhängigkeit von λ und Energieverteilung im kontinuierlichen Sonnenspektrum	148
42. Einfluß der Absorptionslinien auf die Temperaturschichtung der Sonnenatmosphäre	154
43. Einfluß der Linien auf die Temperaturschichtung in Sternatmosphären. Näherungsverfahren zur Behandlung nichtgrauer Strahlungsgleichgewichtsprobleme	160
VII. Kapitel: Kontinuierliche Absorption und Streuung.	
44. Qualitativer Überblick: Der kontinuierliche Absorptionskoeffizient in Sternatmosphären. Historische Bemerkungen	163
45. Kontinuierliche Absorption der Wasserstoffatome	165
46. Der kontinuierliche Absorptionskoeffizient von He I und He II	171
47. Der kontinuierliche Absorptionskoeffizient der übrigen Atome bzw. positiven Ionen, insbesondere der Metalle	173
48. Das negative Wasserstoffion H^-	174
49. THOMSON-Streuung an freien Elektronen und RAYLEIGH-Streuung an Wasserstoff und Heliumatomen	177
50. Der kontinuierliche Absorptions- und Streukoeffizient $\kappa + \sigma$ und der ROSSELLANDSche Opazitätskoeffizient $\bar{\kappa}$ stellarer Materie als Funktion von Temperatur und Druck	181
VIII. Kapitel: Der Aufbau der Sternatmosphären.	
51. Druck- und Temperaturschichtung einer Atmosphäre im Strahlungsgleichgewicht. Gasdruck, Strahlungsdruck und Turbulenzdruck	199
52. Mittlere Zustandsgrößen der Sternatmosphären als Funktion der effektiven Temperatur T_e und der Schwerebeschleunigung g	202
53. Genauere Berechnung der Temperatur- und Druckschichtung „nichtgrauer“ Atmosphären im Strahlungsgleichgewicht	208
54. Konvektion und Strahlungsgleichgewicht. Stabilitätskriterium von K. SCHWARZSCHILD	215

55. Energietransport durch Konvektion und Strahlung. Aerodynamik stellarer Konvektionszonen. Turbulenz, Mischungsweg, Austauschgröße	Seite 216
56. Die Adiabate ionisierbarer Gase. Die Wasserstoff-Konvektionszone. Entropiediagramm der stellaren Materie. Einfluß der Strahlung	227
57. Die spezifische Wärme $c_p(P, T)$ stellarer Materie. Schallgeschwindigkeit	232
58. Die Wasserstoffkonvektionszone der Sonne.	234

Dritter Teil.

Messung der Intensitätsverteilung in den FRAUNHOFER-Linien.

IX. Kapitel: Messung der Profile und Äquivalentbreiten von FRAUNHOFER-Linien.

59. Grundbegriffe. Historisches	238
60. Die photographische Platte	239
61. Standardisierung der Platten. Schwärzungskurve	240
62. Mikrophotometer. Reduktion der Photometerkurven	243
63. Der Spektrograph: Gittergeister, Streulicht. Trennungsvermögen	246
64. Empirische Bestimmung des Apparateprofils	250
65. Ver- und Entzerrungsprobleme	252
66. Berechnung der VOIGT-Funktionen	261
67. Messung der Äquivalentbreite. Abgekürzte Methoden zur Messung schwacher Linien. Schätzungsskalen. Systematische Fehler	265

Vierter Teil.

Physikalische Grundlagen der Theorie der FRAUNHOFER-Linien.

X. Kapitel: Dämpfung (insbesondere Strahlungsdämpfung) und Dopplereffekt.

68. Einige historische Bemerkungen. Klassische Elektronentheorie (H. A. LORENTZ). Dispersion, Absorption und Emission des harmonischen Oszillators	269
69. Klassische Theorie der Strahlungsdämpfung und Resonanzfluoreszenz	274
70. Quantentheorie: Die EINSTEINSCHEN Übergangswahrscheinlichkeiten A_{nm} , B_{mn} und B_{nm} . Lebensdauer angeregter Zustände. Oszillatorenstärken	276
71. Quantentheorie der Strahlungsdämpfung. Kohärente und inkohärente Streuung. Wahre Absorption	280
72. Thermischer Dopplereffekt und Turbulenz	285
73. Dopplereffekt und Dämpfung. Wachstumskurve für exponentielle Absorption.	288
74. Streuung thermisch bewegter Teilchen	293

XI. Kapitel: Druckverbreiterung und Druckverschiebung von Spektrallinien.

75. Einleitung	297
76. Theorie der Stoßdämpfung	298
77. Statistische Theorie der Druckeffekte	307
78. Abgrenzung und Verschmelzung von Stoßdämpfungstheorie und statistischer Theorie	311
79. Quantentheoretische Begründung und Verfeinerung der Theorie der Druckeffekte	312
80. Gleichzeitige Störung durch mehrere Teilchen	318
81. Reemission druckverbreiterter Linien	318
82. Berechnung astrophysikalisch wichtiger Wechselwirkungskonstanten, Wirkungsquerschnitte, Absorptionskoeffizienten usw.	319

XII. Kapitel: Quantenmechanische Berechnung von Linienstärken, Übergangswahrscheinlichkeiten und Oszillatorenstärken.

83. Grundbegriffe	334
84. Linienstärken in Multipletts mit RUSSELL-SAUNDERS-Kopplung. BURGER-DORGELOSCHES SUMMENREGEL	338
85. Linienstärken in Supermultipletts und Übergangsschemata, insbesondere mit RUSSELL-SAUNDERS-Kopplung	341
86. Absolute Linienstärken, Übergangswahrscheinlichkeiten und Oszillatorenstärken für Wasserstoff	344
87. Quantenmechanische Berechnung absoluter Linienstärken in komplizierteren Atomen	348
88. Der f -Summensatz von KUHN-THOMAS-REICHE: seine Verallgemeinerungen und seine Gültigkeitsgrenzen	350

XIII. Kapitel: Experimentelle Bestimmung von Oszillatorenstärken. Laboratoriums-Untersuchungen über Strahlungsdämpfung sowie Druckverbreiterung und -verschiebung von Spektrallinien.	Seite
89. Astrophysik und Laboratoriumsphysik	351
90. Messung von Oszillatorenstärken mit Hilfe der Dispersion in der Nähe der Linien	352
91. Bestimmung der Oszillatorenstärke f aus der Absorption optisch dünner Schichten	353
92. Thermische Emission optisch dünner Schichten. Selbstabsorption	355
93. Experimentelle Untersuchungen über Strahlungsdämpfung	357
94. Verbreiterung und Verschiebung von Spektrallinien durch Stöße	359
95. Statistische Druckeffekte. Die Verbreiterung der Wasserstoff- und Heliumlinien	360
96. Experimentelle Untersuchungen über kontinuierliche Spektren	363
XIV. Kapitel: Literatur über astrophysikalisch wichtige Linienstärken, Übergangswahrscheinlichkeiten und Oszillatorenstärken einzelner Elemente	
97. Einleitung. Neuere Zusammenfassungen	365
98. Literaturverzeichnis	366
Fünfter Teil.	
Die Entstehung der FRAUNHOFER-Linien.	
XV. Kapitel: Strahlungsaustausch und FRAUNHOFER-Linien.	
99. Atomtheoretische Grundlagen: Kohärente und inkohärente Streuung, wahre Absorption, Extinktion	371
100. Die SCHWARZSCHILDsche Integrodifferentialgleichung des Strahlungsaustausches	374
101. FRAUNHOFER-Linien mit wahrer Absorption (und evtl. Extinktion)	377
102. FRAUNHOFER-Linien mit kohärenter Streuung	391
103. Abhängigkeit der FRAUNHOFER-Linien von der Art des Strahlungsaustausches (wahre Absorption, kohärente Streuung ...) sowie der Variation von κ_p/κ bzw. σ_p/κ ... und $B(\tau)$ als Funktionen der Tiefe. Berechnung von Linienprofilen	400
104. Inkohärente Streuung ι_p	407
105. Polarisation und Dopplereffekt der Streustrahlung in Sternatmosphären	408
XVI. Kapitel: Theorie der Wachstumskurven.	
106. Grundlagen der Theorie	412
107. Berechnung der Äquivalentbreiten von FRAUNHOFER-Linien mit Dopplereffekt und Dämpfung	414
108. Verallgemeinerung und Umkehrung des Wachstumskurven-Problems	419
109. J. C. PECKERS Verallgemeinerung der Gewichtsfunktionen-Methode	421
XVII. Kapitel: Quantitative Deutung der FRAUNHOFER-Linien in den Spektren der Sonne und „normaler“ Sterne.	
110. „Grobanalyse“ der Sternatmosphären unter Annahme konstanter Mittelwerte von Druck, Temperatur, wirksamer Schichtdicke usw. Häufigkeitsverteilung der chemischen Elemente	423
111. „Feinanalyse“ der Sonnenatmosphäre unter Berücksichtigung der Tiefenabhängigkeit von Temperatur, Elektronendruck usw.	438
112. Empirische Wachstumskurven. Auswertung der stärkeren FRAUNHOFER-Linien	443
113. Mitte-Rand-Variation der FRAUNHOFER-Linien auf der Sonnenscheibe	446
114. „Feinanalyse“ von Sternspektren. Bestimmung von T_e und g	452
115. Thermischer Dopplereffekt und Turbulenz	456
116. Hyperfeinstruktur und ZEEMAN-Effekt	463
117. Stoßdämpfung und Strahlungsdämpfung	466
118. Verbreiterung der Wasserstofflinien durch den Starkeffekt von Ionen und evtl. Elektronen	471
119. Druckverbreiterung und verbotene Linien im Heliumspektrum	485
120. Die Intensität in der Mitte der FRAUNHOFER-Linien. (Zentralintensität oder Restintensität.)	491
121. Verkettung mehrerer Linien (Interlocking). Selektive Energieübertragung (sensibilisierte Fluoreszenz)	499
122. Gegenseitige Störung zweier Linien (Blends)	501

XVIII. Kapitel: Beeinflussung der Linienprofile durch Rotation und Expansion der Sterne. Seite

123. Berechnung der Linienprofile rotierender Sterne 508

124. Spektroskopische Bestimmung der Rotationsgeschwindigkeit $v \sin i$ von Sternen 512

125. Beobachtung von Rotationseffekten bei spektroskopischen Doppelsternen und Bedeckungsveränderlichen 513

126. Beobachtung der Rotation einzelner Sterne 515

127. Linienprofile pulsierender Sterne 518

XIX. Kapitel: Klassifikation der Sternspektren.

128. Spektralklassifikation und spektroskopische Parallaxenbestimmung; ältere Systeme bis 1932 520

129. Die Yerkes-Klassifikation von W. W. MORGAN, P. C. KEENAN und E. KELLMAN (MKK-System) 522

130. Die Pariser Klassifikation von D. CHALONGE und L. DIVAN 526

131. Klassifikation und Theorie der Sternspektren. Spektralanalyse individueller Sterne mit großer Dispersion. Messung oder Schätzung spektraler Kriterien? 528

Sechster Teil.

Physik der Sonne.

XX. Kapitel: Die Struktur der äußeren Schichten der Sonne.

132. Übersicht über die beobachteten Erscheinungen: Beobachtungsmethoden und Apparate. Zyklus der Sonnenaktivität. Rotation der Sonne 531

133. Die Granulation 553

134. Die Sonnenflecke 558

135. Die Sonnenfackeln 577

136. Das Problem eines allgemeinen Magnetfeldes der Sonne 580

137. Bemerkungen zur Theorie der Konvektion und der Magnetfelder auf der Sonne. Magneto-Hydrodynamik 581

138. Chromosphärische Sonneneruptionen (Flares) 598

139. Anhang: „Aktivität“ der Sterne. Flecke, Fackeln und Eruptionen auf Sternen 606

XXI. Kapitel: Der Sonnenrand. Chromosphäre, Korona und Protuberanzen.

140. Finsternisbeobachtungen 609

141. Der Helligkeitsabfall am äußersten Sonnenrand 613

142. Chromosphäre 617

143. Korona 635

144. Protuberanzen 673

145. Interpretation von Spektroheliogrammen 703

Siebenter Teil.

Radiofrequenzstrahlung und kosmische Ultrastrahlung.

XXII. Kapitel: Radioastronomie.

146. Einleitung. Historisches 714

147. Grundbegriffe und Maßeinheiten 715

148. Die Radiofrequenzstrahlung der ruhigen Sonne 723

149. Die Radiofrequenzstrahlung der gestörten Sonne 737

150. Die Radiofrequenzstrahlung der Milchstraße und kosmischer Quellen . . 751

151. Die 21 cm-Linie des interstellaren Wasserstoffes 772

XXIII. Kapitel: Kosmische Ultrastrahlung und Radiofrequenzstrahlung.

152. Problemstellung 773

153. Die solare Komponente der Ultrastrahlung 773

154. Die kosmische Ultrastrahlung und die galaktische Radiofrequenzstrahlung 777

Anhang.

A. Naturkonstanten und Zahlenwerte 782

B. Klassifikation der Linienspektren 784

C. Über die Integralexponentialfunktionen 788

Literaturverzeichnis 793

Namen- und Sachverzeichnis 849