

Einführung in die Astronomie I

Teil 6

Peter Hauschildt

yeti@hs.uni-hamburg.de

Hamburger Sternwarte
Gojenbergsweg 112
21029 Hamburg

20. Juni 2017

Übersicht Teil 6

- ▶ Sternatmosphären
 - ▶ Strahlungstransport
 - ▶ Absorptionskoeffizient
 - ▶ Anregung/Ionisation
 - ▶ Modellatmosphären

Sternatmosphäre

- ▶ Bereich des Sternes in dem das Spektrum erzeugt wird
- ▶ Teilweise transparent für Strahlung
- ▶ Transparenz hängt von (λ , T , P abhängiger) Opazität ab
- ▶ beobachtetes Spektrum \rightarrow physikalische Bedingungen in der Atmosphäre
- ▶ keine Energieerzeugung in der Atmosphäre!
- ▶ \rightarrow Energie muss durch die Atmosphäre transportiert werden
- ▶ \rightarrow Strahlung
- ▶ \rightarrow Konvektion

Strahlungstransport

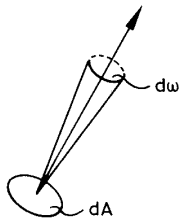
- ▶ Strahlung wird ständig absorbiert, gestreut und emittiert
- ▶ → Photonen führen einen “random walk” durch die Atmosphäre
- ▶ Oberfläche → Photonen entkommen
- ▶ tiefe Atmosphäre → Diffusion der Photonen (nach außen)
- ▶ i.A. nimmt T nach außen ab
- ▶ → heißere Schichten strahlen mehr Energie ab als kühlere
- ▶ → F zeigt nach außen

Strahlungstransport !!

- ▶ Strahlung beschrieben durch Intensität I
- ▶ \rightarrow Energie/Zeit/Fläche/Raumwinkel/Wellenlänge
- ▶ Zusammenhang mit Strahlungsenergie

$$dE_\nu = I_\nu dt dA d\omega d\nu$$

- ▶ thermisches Gleichgewicht
 $\rightarrow I_\nu = B_\nu$
- ▶ $\rightarrow I_\nu$ isotrop im TE

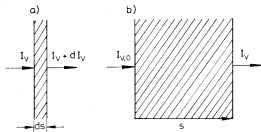


Strahlungstransport !!

- ▶ Absorption von Strahlung
- ▶ infinitesimale Schicht \rightarrow

$$dl_\nu = -I_\nu \kappa_\nu ds$$

- ▶ κ_ν : Absorptionskoeffizient
 $\rightarrow [1/\text{cm}]$
- ▶ lineare Abhängigkeit OK für
Atmosphären
- ▶ $\kappa_\nu = F(T, P, \nu, \text{Zusammensetzung})$



Strahlungstransport !!

- ▶ endliche Schicht $\rightarrow \kappa_\nu$ etc können variieren
- ▶ Integration \rightarrow

$$-\int \frac{dl_\nu}{l_\nu} = \int \kappa_\nu ds \equiv \tau_\nu$$

- ▶ τ_ν : *optische Tiefe*
- ▶ LHS:

$$-\ln l_\nu + \ln l_{\nu,0} = -\ln \left(\frac{l_\nu}{l_{\nu,0}} \right)$$

- ▶ \rightarrow Lösung

$$l_\nu = l_{\nu,0} e^{-\tau_\nu}$$

Strahlungstransport !!

$$I_\nu = I_{\nu,0} e^{-\tau_\nu}$$

- ▶ $\tau_\nu \ll 1 \rightarrow$ *optisch dünn*

$$I_\nu \approx I_{\nu,0} (1 - \tau_\nu)$$

- ▶ $\tau_\nu \gg 1 \rightarrow$ *optisch dick*
- ▶ $\tau_\nu = 1 \rightarrow I_\nu = (1/e)I_{\nu,0}$

Strahlungstransport !!

- ▶ Emission von Strahlung:

$$dl_\nu = \epsilon_\nu ds$$

- ▶ ϵ_ν : Emissionskoeffizient
- ▶ $\epsilon_\nu = F(T, P, \nu, \text{Zusammensetzung})$
- ▶ Im TE gilt der *Kirchhoffsche Satz*

$$\epsilon_\nu / \kappa_\nu = B_\nu(\nu, T)$$

Strahlungstransport

- ▶ Sternatmosphäre nicht im strikten TE!
- ▶ Obige Annahme ist *Local Thermodynamic Equilibrium (LTE)*
- ▶ d.h. das nur *lokal* TE angenommen wird, aber nicht *globales* TE!

Strahlungstransport !!

- ▶ Zusammenspiel von Absorption und Emission →

$$dl_\nu = -l_\nu \kappa_\nu ds + \epsilon_\nu ds$$

- ▶ → *Strahlungstransportgleichung*

$$dl_\nu/ds = -l_\nu \kappa_\nu + \epsilon_\nu$$

- ▶ Transformation auf optische Tiefe $d\tau_\nu = \kappa_\nu ds$ ($\tau = 0$ aussen, $\tau > 0$ nach innen ansteigend):

$$dl_\nu/d\tau_\nu = l_\nu - \epsilon_\nu/\kappa_\nu \equiv l_\nu - S_\nu$$

- ▶ S_ν : Ergiebigkeit, Quellfunktion, im LTE: $S_\nu = B_\nu$

Strahlungstransport !!

- ▶ Beitrag eines Elementes ds in Tiefe s unter Oberfläche:
 - ▶ optische Tiefe zum Element

$$\tau_\nu(s) = \int_0^s \kappa_\nu ds$$

- ▶ Emission: $\epsilon_\nu ds$
- ▶ An der Oberfläche kommt an:

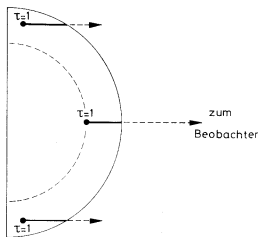
$$dl_\nu(0) = \epsilon_\nu e^{-\tau_\nu(s)} ds = \frac{\epsilon_\nu}{\kappa_\nu} e^{-\tau_\nu(s)} d\tau_\nu$$

Strahlungstransport !!

- ▶ Integration \rightarrow

$$I_\nu(0) = \int S_\nu e^{-\tau_\nu(s)} d\tau_\nu$$

- ▶ T steigt nach innen hin an
 $\rightarrow \epsilon_\nu / \kappa_\nu = B_\nu$ steigt an
- ▶ gleichzeitig wird $d\tau_\nu$ größer
 $\rightarrow e^{-\tau_\nu(s)}$ nimmt rapide ab
- ▶ Größter Beitrag $\approx \tau_\nu = 1$
- ▶ \rightarrow Randverdunkelung



Strahlungstransport !!

- ▶ Streuung:
 - ▶ Entfernt Strahlung

$$dl_\nu = -\sigma_\nu I_\nu ds$$

- ▶ “erzeugt” Strahlung

$$dl_\nu = \sigma_\nu J_\nu$$

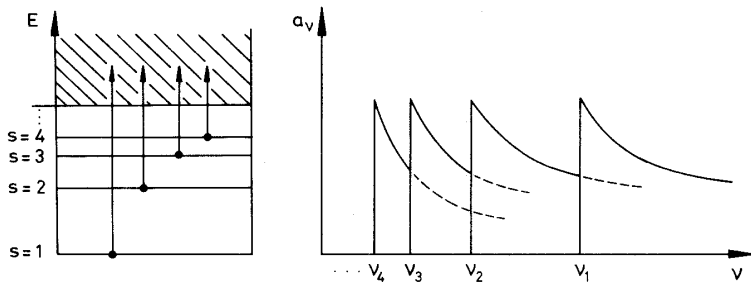
mit J_ν : mittlere Intensität

- ▶ → RTE:

$$dl_\nu/ds = -(\kappa_\nu + \sigma_\nu)I_\nu + (\kappa_\nu B_\nu + \sigma_\nu J_\nu)$$

- ▶ Extinktion: $\chi_\nu = \kappa_\nu + \sigma_\nu$

Absorptionskoeffizienten



- ▶ gebunden-frei Absorption pro Teilchen & Level
- ▶ Energieniveaus \rightarrow Absorptionskanten

Absorptionskoeffizienten

- ▶ gebunden-gebunden Absorption
- ▶ Spektrallinien
- ▶ verbreitert durch
 - ▶ natürliche Linienbreite (Heisenberg)
 - ▶ Doppler-Effekt (Gauss-Profil)
 - ▶ Druckverbreiterung (Lorentz-Profil)
 - ▶ Turbulenz (Gauss-Profil)
- ▶ enthalten Info über Druck/Temperatur
- ▶ genaue Berechnung sehr schwer!

Anregung/Ionisation

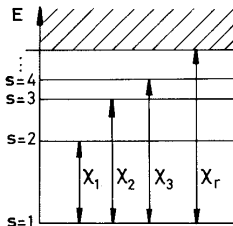
- ▶ wieviele Teilchen in jedem Niveau?
- ▶ d.h. auch Ionisationsgrad muss bekannt sein!
- ▶ → Ratengleichungen
- ▶ nicht-lokal durch Kopplung mit Strahlungsfeld!
- ▶ im Detail extrem schwer zu lösen
- ▶ einfache Approximation → LTE

Anregung im LTE !!

- ▶ Boltzmann-Formel

$$\frac{N_s}{N_1} = \frac{g_s}{g_1} \exp(-\chi_s/kT)$$

- ▶ N_s : Teilchendichte [$1/\text{cm}^3$]
- ▶ g_s : statistisches Gewicht
- ▶ χ_s : Anregungsenergie
- ▶ exp-Faktor ("Boltzmann-Faktor") →
sehr starke T Abhängigkeit
- ▶ hohe Niveaus schwächer besetzt als niedrige!
- ▶ Beachte: g Abhängigkeit!



Ionisation im LTE !!

- ▶ im LTE beschrieben durch
Saha Formel

$$\frac{N_{r+1}}{N_r} = \frac{2}{N_e} \frac{u_{r+1}}{u_r} \frac{(2\pi m_e kT)^{3/2}}{h^3} \exp(-\chi_r/kT)$$

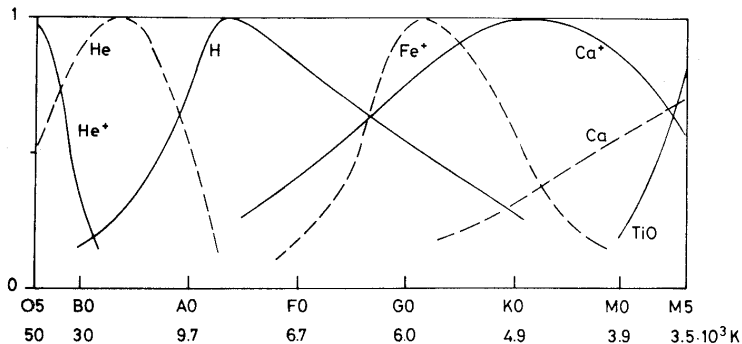
- ▶ N_r : Dichte [1/cm³] aller Teilchen im Ionisationszustand r
 - ▶ χ_r : Ionisationsenergie $r \rightarrow r + 1$
 - ▶ $u_r = \sum g_i \exp(-\chi_i/kT)$: Zustandssumme
 - ▶ N_e : Elektronendichte [1/cm³]
- ▶ Note: Abhängigkeit von N_e !

Ionisation im LTE

- ▶ Wenn N_e bekannt \rightarrow Lösung einfach
- ▶ Problem: N_e hängt von Ionisation ab . . .
- ▶ \rightarrow eine nicht-lineare Gleichung für N_e

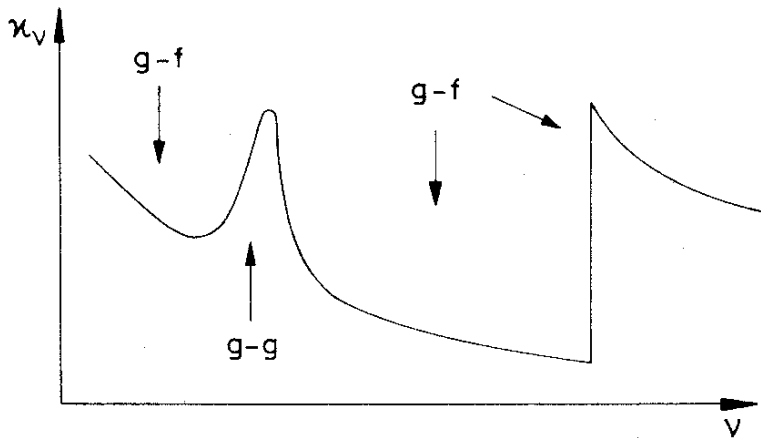
Anregung/Ionisation

- ▶ Zusammenspiel von Boltzmann-Formel und Saha-Formel
→
- ▶ Erklärung der Spektralsequenz als T_{eff} Effekt
- ▶ Erklärung der LC's als $\log(g)$ Effekt



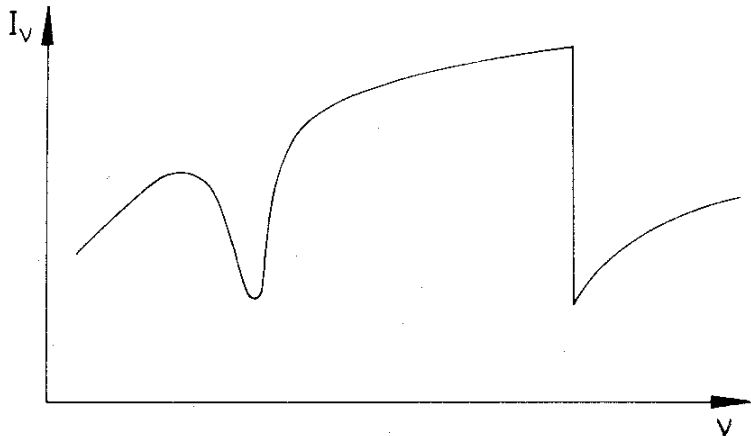
Absorptionskoeffizient

- ▶ Schematischer Verlauf



Spektrum

- ▶ Schematischer Verlauf



Energieerhaltung !!

- ▶ Keine Energiequellen in der Atmosphäre
- ▶ →

$$F = \text{const.} = \sigma T_{\text{eff}}^4$$

- ▶ Fluss aus Integration von I_ν über ν und $d\Omega$:

$$F = \int \int \mathbf{n} I_\nu d\Omega d\nu = \int F_\nu d\nu$$

- ▶ F_ν ist *nicht* konstant als Funktion der Tiefe

Energieerhaltung !!

- ▶ in kühlen Atmosphären (Sonne) → Konvektion!
 - ▶ analog: kochendes Wasser!
 - ▶ keine ab initio physikalische Theorie!
 - ▶ einfache heuristische Methoden verwendet
- ▶ obige RTE gilt längs Sehstrahlen
- ▶ aber Energieerhaltung hängt von $\int d\Omega$ ab!
- ▶ RTE muss für viele Sehstrahlen gelöst werden

Modellatmosphären !!

- ▶ Energieerhaltung \rightarrow Temperaturstruktur
- ▶ κ_ν , σ_ν etc. hängen auch von P ab!
- ▶ Impulserhaltung \rightarrow Druckstruktur
- ▶ meiste Atmosphären \rightarrow
hydrostatisches Gleichgewicht
- ▶ daher

$$\frac{dP}{dr} = -g\rho$$

mit $g = GM/R^2$

- ▶ oft $\Delta R/R \ll 1$ in Atmosphären \rightarrow
 $g \approx \text{const.}$

Modellatmosphären

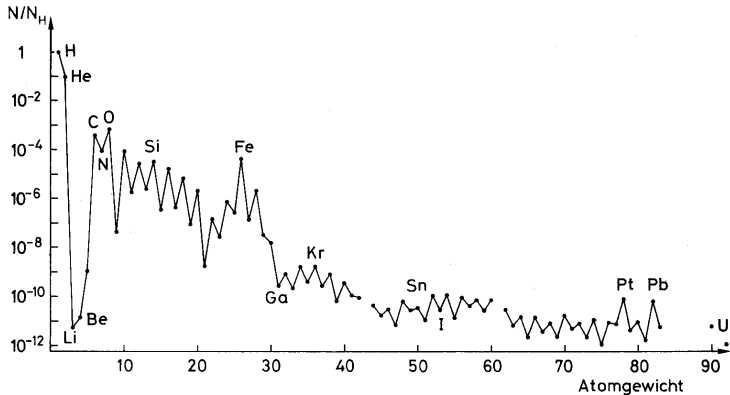
- ▶ dazu:
 - ▶ Randbedingungen
 - ▶ Materialfunktionen
- ▶ Ergebnis: Modellatmosphäre
- ▶ (T, P) Struktur
- ▶ Strahlungsfeld
- ▶ synthetisches Spektrum

Spektralanalyse

- ▶ Vergleich Gitter von Modellatmosphären mit Beobachtungen
- ▶ → Bestimme T_{eff} und $\log(g)$
- ▶ Linienprofile → chemische Zusammensetzung
- ▶ in der Praxis nicht einfach

Häufigkeiten in Sternen

- ▶ Oft sehr vergleichbar zur Sonne



Häufigkeiten in Sternen

- ▶ einige Elemente sehr schwer zu bestimmen (He, Li)
- ▶ andere einfacher (C, N, O)
- ▶ Änderungen des 'patterns' kommen vor!
- ▶ H am häufigsten ($\sim 60\text{--}70\%$ Masse, $\sim 90\%$ Teilchen)
- ▶ He ($\sim 40\text{--}30\%$ Masse, $\sim 10\%$ Teilchen)
- ▶ Rest ("Metalle") $\sim 2\text{--}4\%$ Masse
- ▶ junge Sterne \rightarrow höhere Metallhäufigkeiten
- ▶ alte Sterne \rightarrow geringere Metallhäufigkeiten
- ▶ Eisenhäufigkeit $< 10^{-5}$ der Sonne möglich (in HH entdeckt!)