

Analyse von Sternspektren

Wie wissen wir, woraus Sterne bestehen und wie heiss sie sind?

Peter Hauschildt
yeti@hs.uni-hamburg.de

Hamburger Sternwarte
Gojenbergsweg 112
21029 Hamburg

1. Juni 2022

Übersicht

- ▶ Farben
- ▶ Chemie

Parameter von Sternen

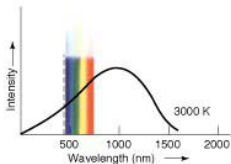
- ▶ im 19. Jahrhundert machbar/verstanden:
 - ▶ Entfernungen → Parallaxe
 - ▶ scheinbare Helligkeiten → Photometrie
- ▶ Unbekannt:
 - ▶ Temperaturen, Drücke, Radien
 - ▶ chemische Zusammensetzung

Farben von Sternen

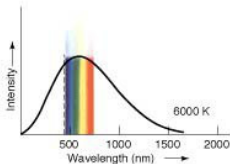


- ▶ Sagittarius Star Cloud (credit: Hubble Heritage Team (AURA/STScI/NASA))

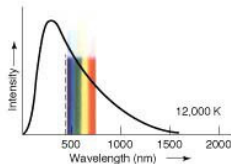
Farben



a This star looks red



b This star looks yellow-white



c This star looks blue

- ▶ hängen von der Oberflächentemperatur ab!
- ▶ rot → kühl
- ▶ blau → heiss

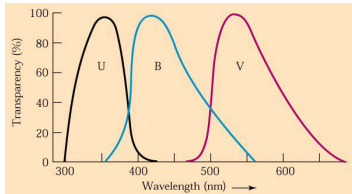
Farben

- ▶ Wien'sches Verschiebungsgesetz:

$$\frac{\lambda_{\max}}{1\text{cm}} = \frac{0.29\text{ K}}{T}$$

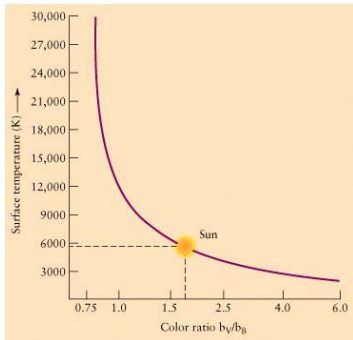
- ▶ λ_{\max} : Wellenlänge bei der der Stern am hellsten strahlt
- ▶ T : absolute Temperatur [K]

Farbfilter



- ▶ genormte Filter zur Farbmessung
- ▶ *Photometrie*
- ▶ wird zur Temperaturbestimmung verwendet

Farbfilter



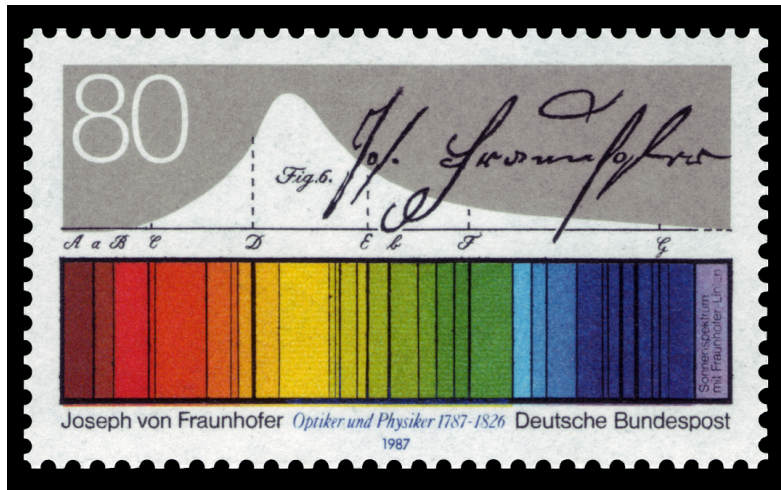
- ▶ b_V : Helligkeit im V Filter
- ▶ b_B : Helligkeit im B Filter
- ▶ Vorsicht: Farben werden durch *interstellaren Staub* verfärbt!
- ▶ → entfernte Sterne erscheinen 'röter' als sie eigentlich sind

Farben einiger Sterne

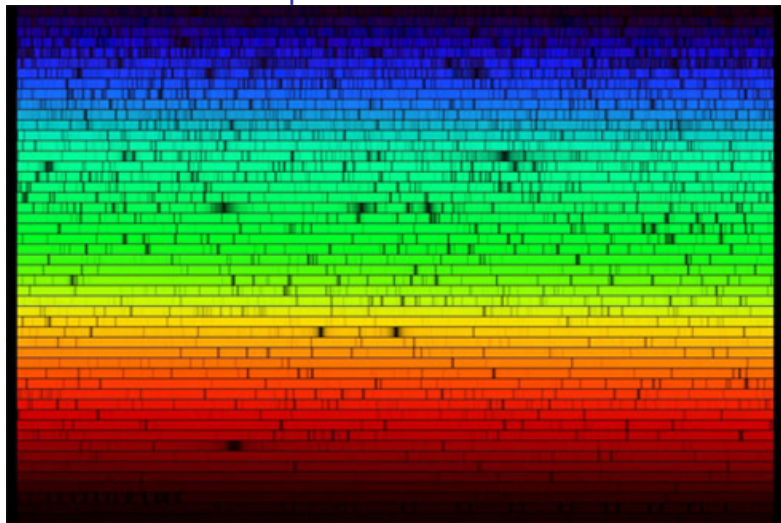
Table 19-1 Colors of Selected Stars

Star	Surface temperature (K)	b_V/b_B	b_B/b_U	Apparent color
Bellatrix (γ Orionis)	28,000	0.82	0.45	Blue
Regulus (α Leonis)	22,000	0.90	0.72	Blue-white
Sirius (α Canis Majoris)	10,000	1.00	0.95	Blue-white
Megrez (δ Ursae Majoris)	8800	1.08	1.07	White
Altair (α Aquilae)	7400	1.22	1.08	Yellow-white
Sun	5800	1.77	1.10	Yellow-white
Aldebaran (α Tauri)	3700	4.13	5.75	Orange
Betelgeuse (α Orionis)	2400	5.50	6.67	Red

Fraunhofer Linien (1814)

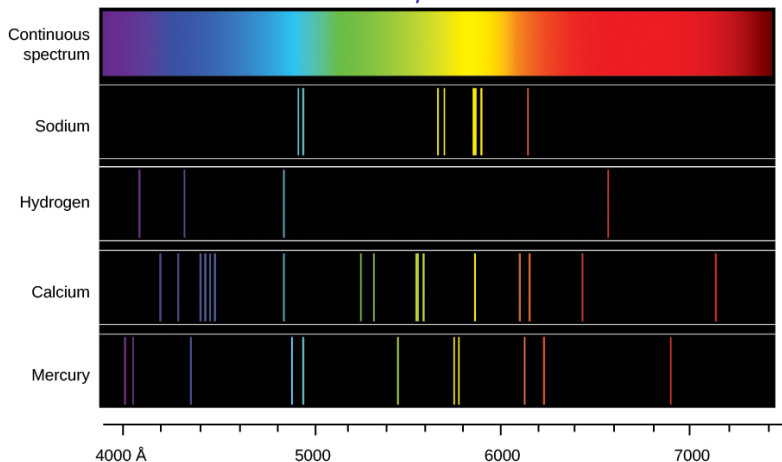


modernes Sonnenspektrum



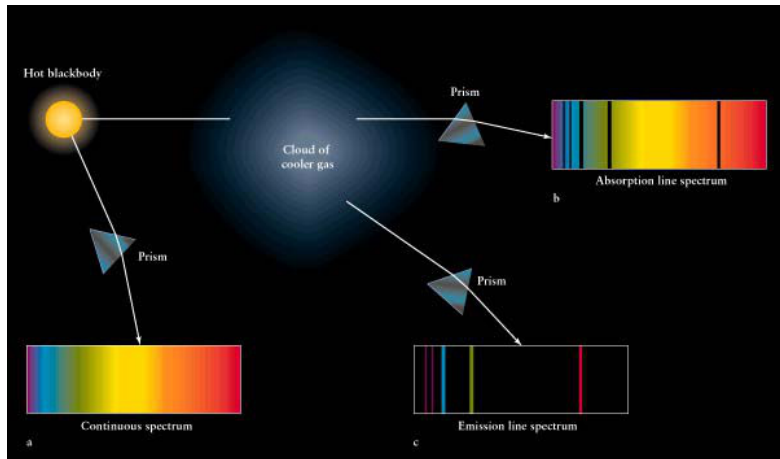
- ▶ NASA
<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=27972>

Kirchhoff & Bunsen 1860/61

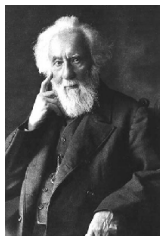


- ▶ Chemische Elemente produzieren charakteristische & eindeutige Emissionslinien
- ▶ Cs und Rb in Wasser der Maxquelle in Dürkheim entdeckt

Entstehung des Sonnenspektrums



Linien in Sternspektren (1860s)



- ▶ Englische Astronomen Lady Margaret Huggins & Sir William Huggins
- ▶ konnten bekannte Elemente in Sternspektren identifizieren

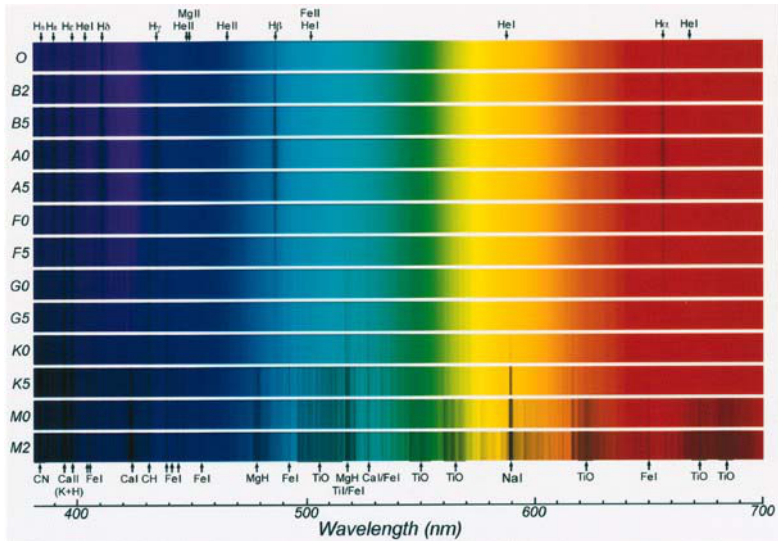
Sternspektren

- ▶ Sternspektren sehen dem der Sonne generell ähnlich
- ▶ um die Menge der Spektren zu ordnen
- ▶ → *Spektralklassen*
- ▶ spätes 19. Jahrhundert: Klassen A-P
- ▶ Beziehung zu Temperatur etc waren unbekannt

Sternspektren

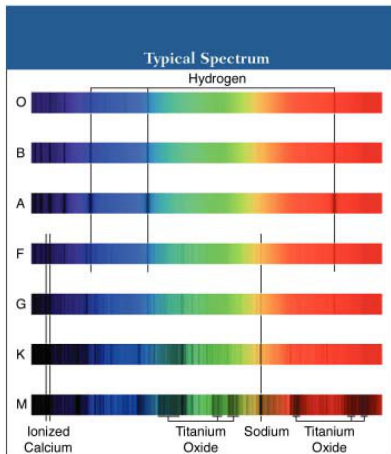
- ▶ Harvard Klassifikation:
- ▶ von Edward Pickering, Williamina Fleming, Annie Jump Cannon
- ▶ alte Klassen um- oder aussortiert
- ▶ neues Schema: *OBAFGKM(LT)*
- ▶ neu: Unterteilung 0–9
- ▶ Anordnung so dass Spektrallinien sich systematisch ändern:

Spektralklassen



Spektralklassen

Table 13.1(b)
The Spectral
Sequence

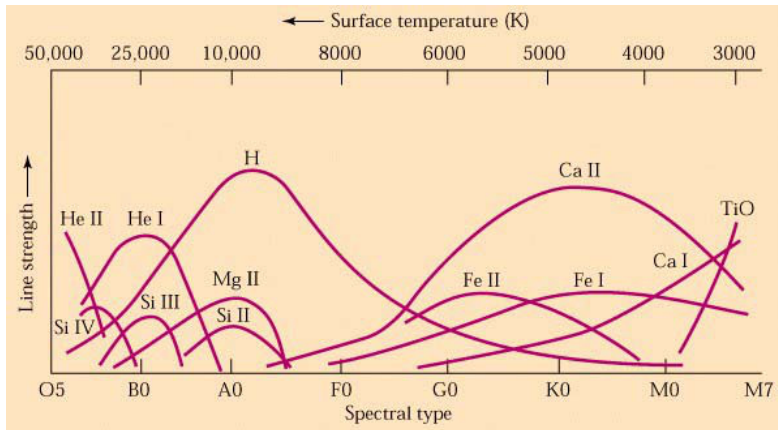


Copyright © Addison Wesley

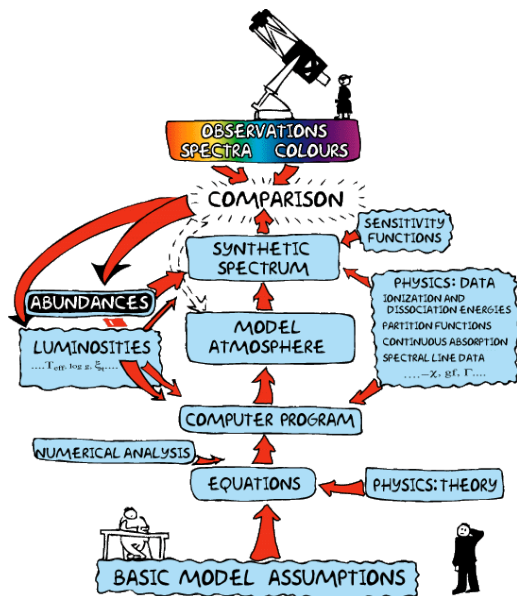
Sternspektren

- ▶ woher kommen die systematischen Änderungen?
- ▶ Temperaturvariationen!
- ▶ z.B. Wasserstoff
- ▶ niedrige Temperaturen
- ▶ → Linien nicht angeregt
- ▶ höhere Temperaturen:
- ▶ → Stöße regen Atome an → Linien stärker
- ▶ ganz hohe Temperaturen:
- ▶ → Wasserstoff ionisiert → Linien weg!

Linienstärken



Analyse von Sternspektren



Einfachste Annahmen

- ▶ Kugelförmiger Stern
- ▶ mechanisches Gleichgewicht
- ▶ Thermonuklearer Reaktor liefert Energie
- ▶ → Atmosphäre nur "Ventil"
- ▶ keine Magnetfelder etc
- ▶ einzelnes Objekt

Einfachste Annahmen

- ▶ Energieerhaltung \rightarrow Temperaturverlauf
- ▶ Impulserhaltung \rightarrow Druckverlauf

Energietransport

- ▶ Strahlung (Licht aller Wellenlängen)
- ▶ Konvektion
- ▶ Wärmeleitung (in Atmosphären vernachlässigbar)

Energietransport durch Strahlung

- ▶ numerische Lösung der Strahlungstransportgleichung
- ▶ “alle” Möglichkeiten der Wechselwirkung Gas–Licht müssen berücksichtigt werden
- ▶ → 851 Millionen Spektrallinien von Atomen/Ionen
- ▶ → 144 Milliarden Spektrallinien von Molekülen
- ▶ oft: Berücksichtigung von nicht-Gleichgewichtsprozessen notwendig

Erstellung von Modellatmosphären

- ▶ Analytisch nur mit extremen Einschränkungen
- ▶ numerische Modelle müssen iterativ berechnet werden
- ▶ dazu werden aufwendige Computersimulationen verwendet

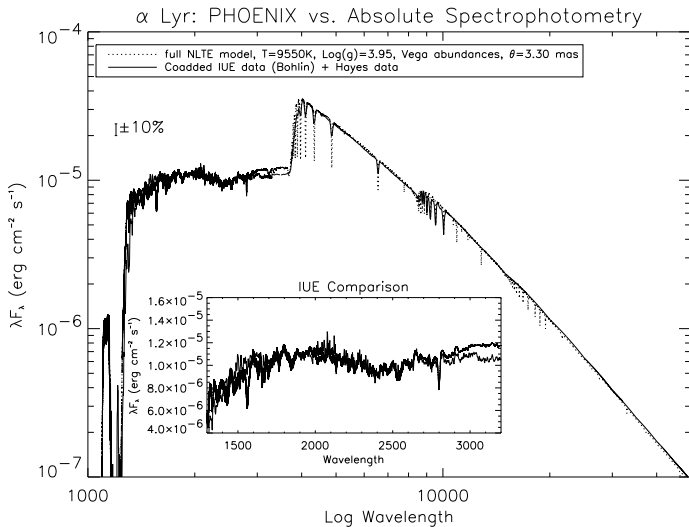
PHOENIX version 19

- ▶ integrierte 1D und 3D Versionen
- ▶ identische mikro-physik von 1D zu 3D
- ▶ detaillierte, validierte Zustandsgleichung
- ▶ massiv Parallel (MPI, OpenMP, OpenACC, vector)
- ▶ 1.75M Zeilen Programmcode (FORTRAN/C/C++)
- ▶ 33k MPI, 4k OpenMP, 1k OpenACC
- ▶ Parallel I/O (HDF5)
- ▶ weak & strong Skalierung getestet to 2.5M Prozesse
- ▶ Anwendung auf:
 - ▶ Alle Typen von Sternen
 - ▶ Gasriesen und Erdähnliche Planeten
 - ▶ Novae, Supernovae, Hypernovae

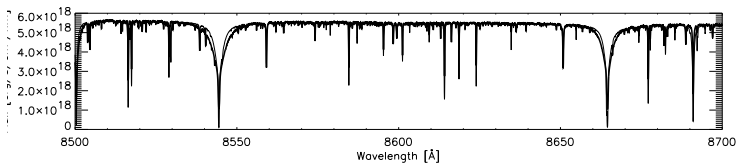
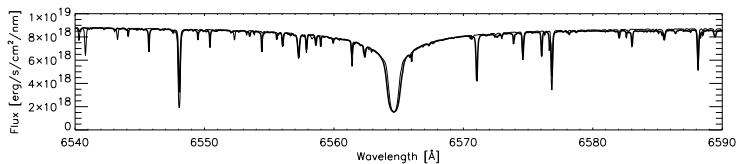
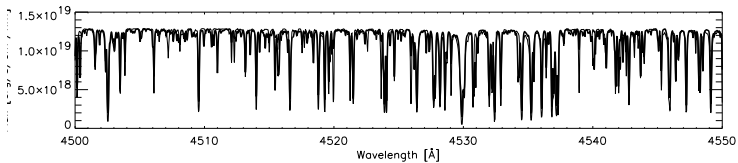
PHOENIX Design

- ▶ Programm Lebensdauer: >30 Jahre
- ▶ Projekt Zeiten: >20 Jahre
- ▶ sehr flexibles und allgemeines Programm
- ▶ wiederverwendbare, erweiterbare & austauschbare Module
- ▶ striktes Einhalten von Standards (Programmiersprachen) notwendig

Beispiel: A Sterne

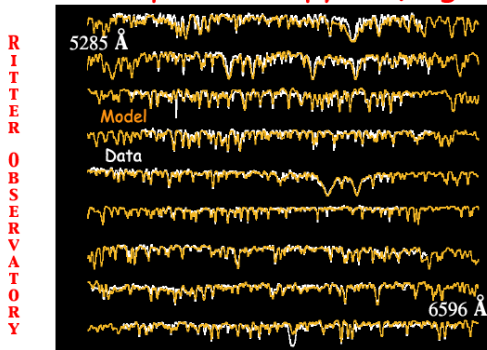


Beispiel: die Sonne



Beispiel: γ Sge

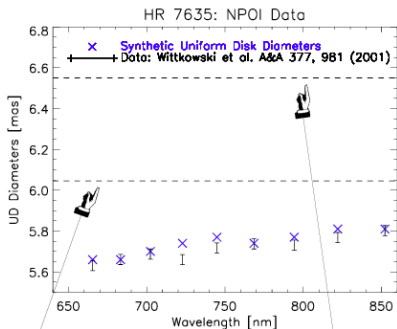
Echelle Spectroscopy of γ Sge



- PHOENIX Model (Aufdenberg et al)

Beispiel: γ Sge

NPOI Wavelength Dependent Uniform Disk Sizes for γ Sagittae Measurements versus Model

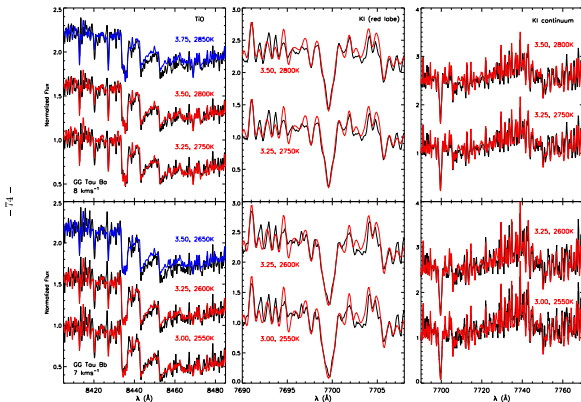


Spherical Model
Rosseland Diameter
(Optical Depth $\cong 1$)

Spherical Model
Physical Diameter
(Zero Intensity)

► PHOENIX Model (Aufdenberg et al)

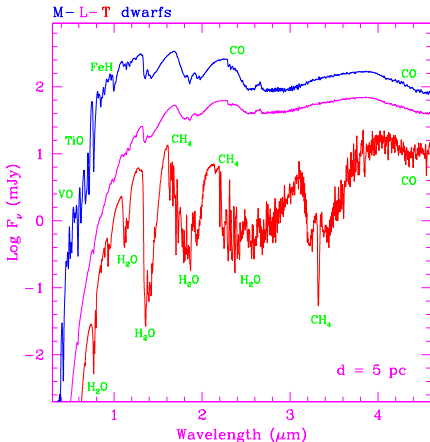
Beispiel: GG Tau



Mohanty et al, ApJ

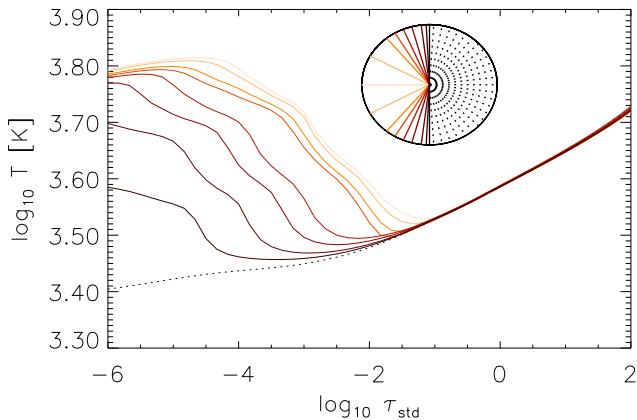
Sterne → Gasriesen

- ▶ Trends (Allard et al, 2001)
 - ▶ $T_{\text{eff}} = 2500, 1800, 1000 \text{ K}$
 - ▶ age 5Gy (Chabrier et al, 2000)



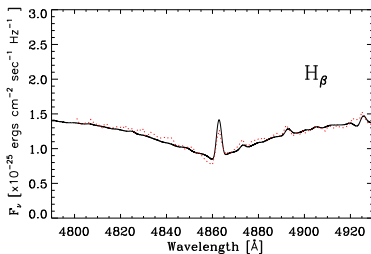
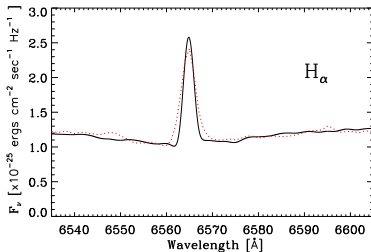
Beispiel: Pre-CVs

- ▶ Pre-CV: Doppelsternsystem aus WD+dM
- ▶ Model dM bestrahlt durch WD
(Barman et al)



Beispiel: GD 245

- ▶ → Emissionslinien vom dM Stern beobachtbar



- ▶ Modelle können beobachtete Spektren gut reproduzieren
- ▶ Parameter können bestimmt werden
- ▶ detaillierte Analyse → Schätzungen der Elementhäufigkeiten