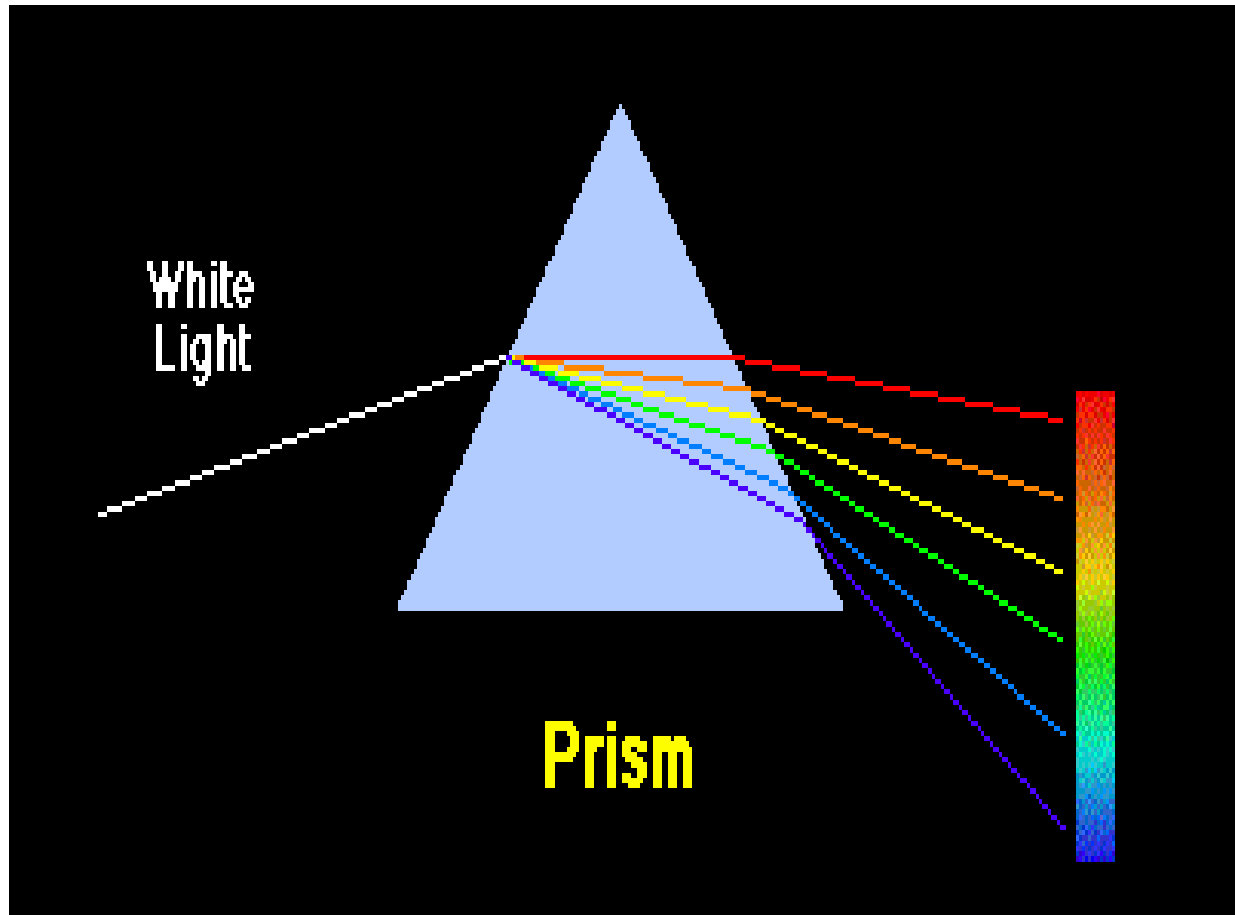


Spektralklassifikation



- Was sind die Gemeinsamkeiten in den Spektren?
- Woher kommen die Unterschiede?
- Wie lässt sich ein Bezug zur Sternentwicklung herstellen?
- Kann man die Spektralsequenz erklären?

Übersicht

- Kurzer historischer Überblick
- Physikalische Grundlagen
- Methode der Klassifikation
- Einzelheiten zu den Spektralklassen
- Erweiterungen des Systems
- Zusammenfassung und Ausblick

Es war einmal...

Eine kurze Geschichte der Spektralklassifikation

- 1802: Wollaston entdeckt Absorptionslinien im Sonnenspektrum
- 1819: Fraunhofer begründet die Spektroskopie. Beschreibung von Spektrallinien im Sonnenspektrum
- 1860: Spektralklassen nach Secchi
- 1890: Harvardsequenz mit Spektralklassen A-Q
- 1924: Henry-Draper-Katalog mit Klassifikation von 225000 Sternen nach A.J. Cannon
- 1943: Morgan, Keenan und Kellmann führen die Leuchtkraftklassen ein; Beispielspektren in „Atlas of Stellar Spectra“

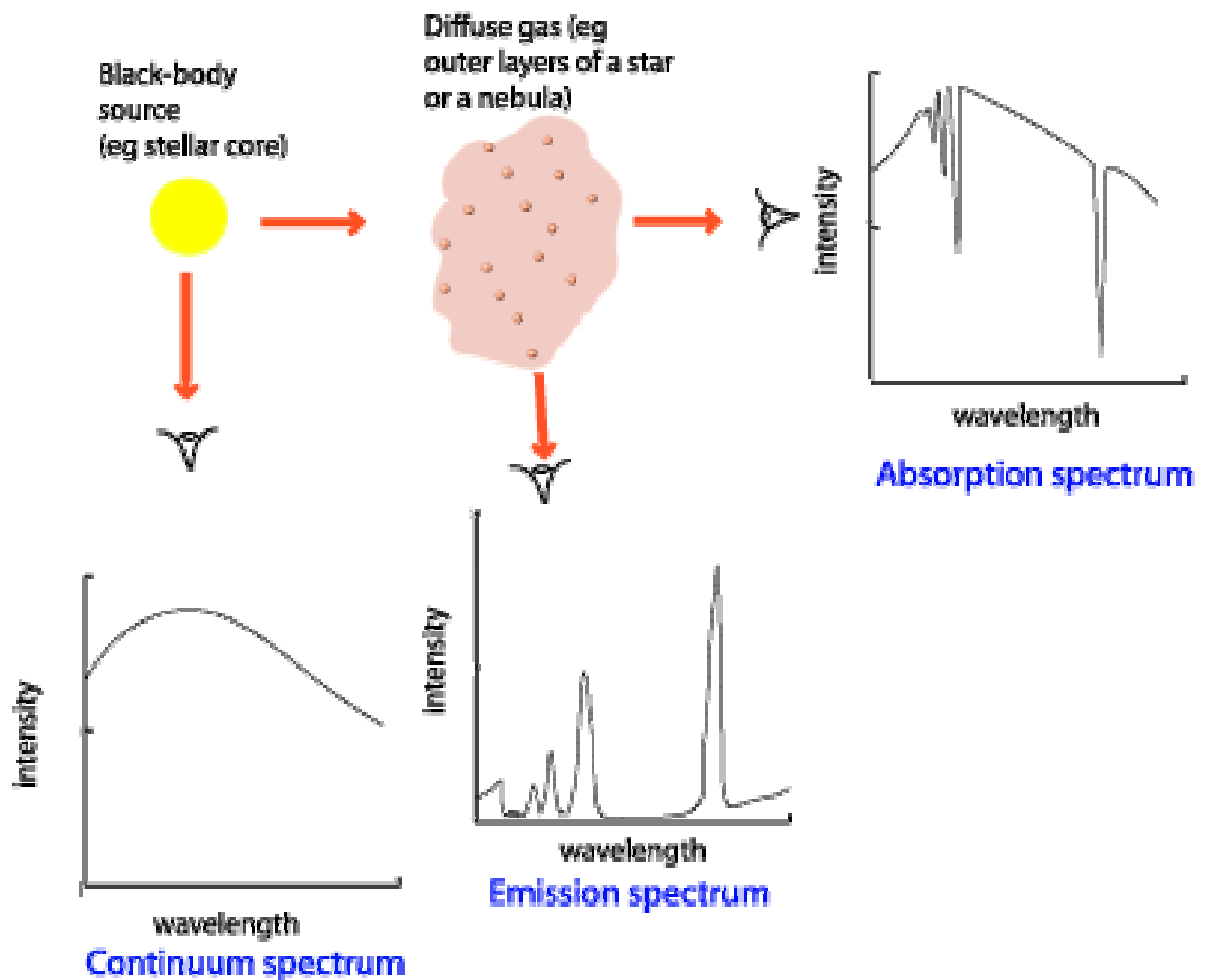


Heute: MKK-(Yerkes-)System mit Spektralklasse, Unterklasse, Leuchtkraftklasse, z.B. Sonne: G2V

Physikalische Grundlagen

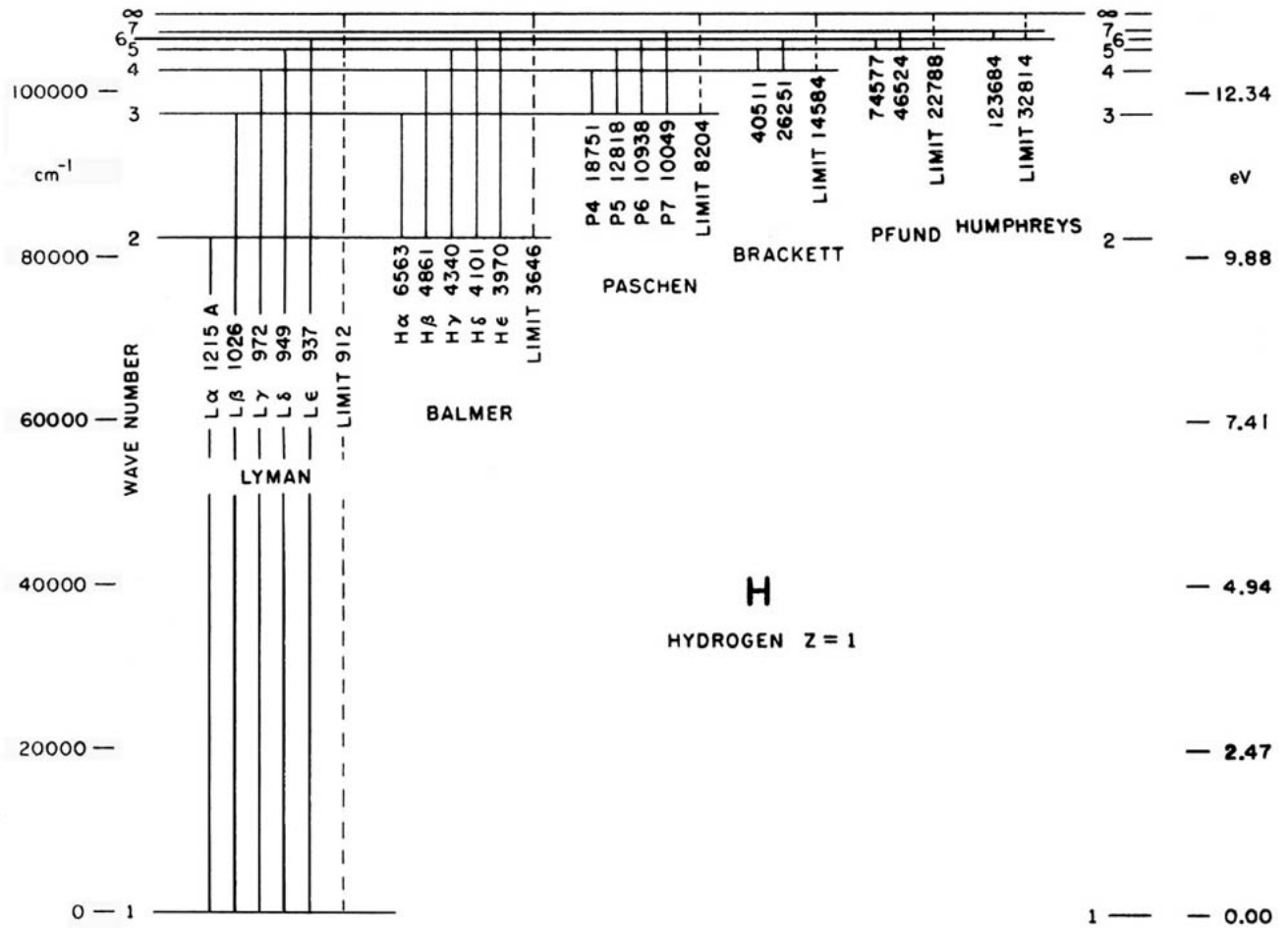
Diskrete Energien der (gebundenen) Elektronen führen zu Linienspektren durch Absorption/Emission von Photonen mit Energie

$$\Delta E = E_j - E_i$$

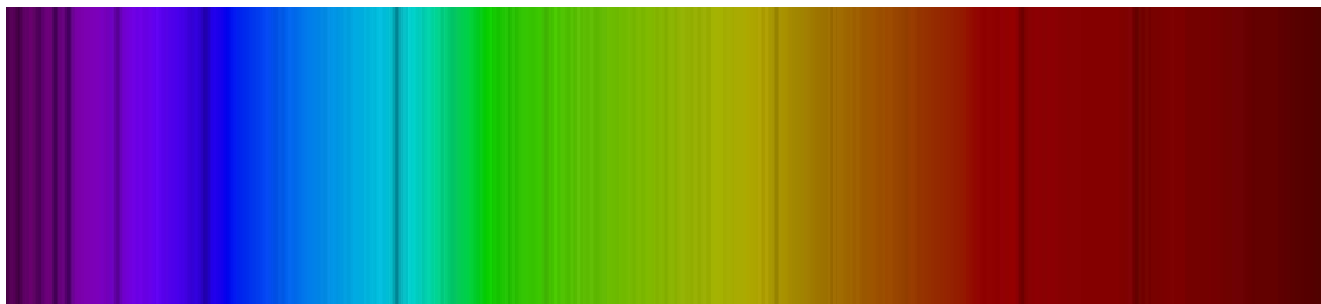
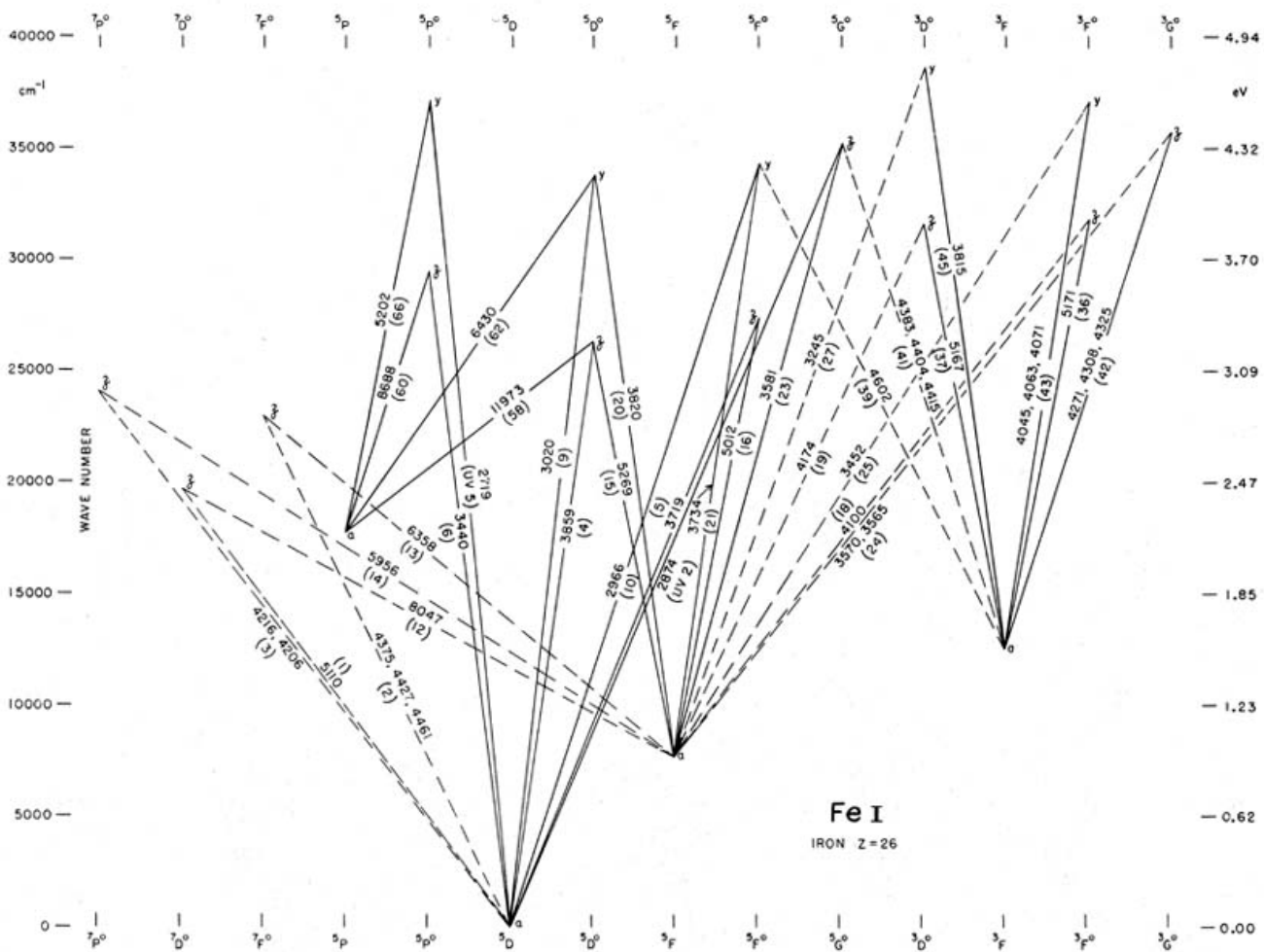


Bsp: H und H-ähnliche Ionen (einfach ionisiert)

$$E_n = -\frac{Z^2 e^2}{2a_0} \frac{1}{n^2} \approx -2.18 \cdot 10^{-11} \frac{Z^2}{n^2} \text{ erg}$$



Bsp: Fe I



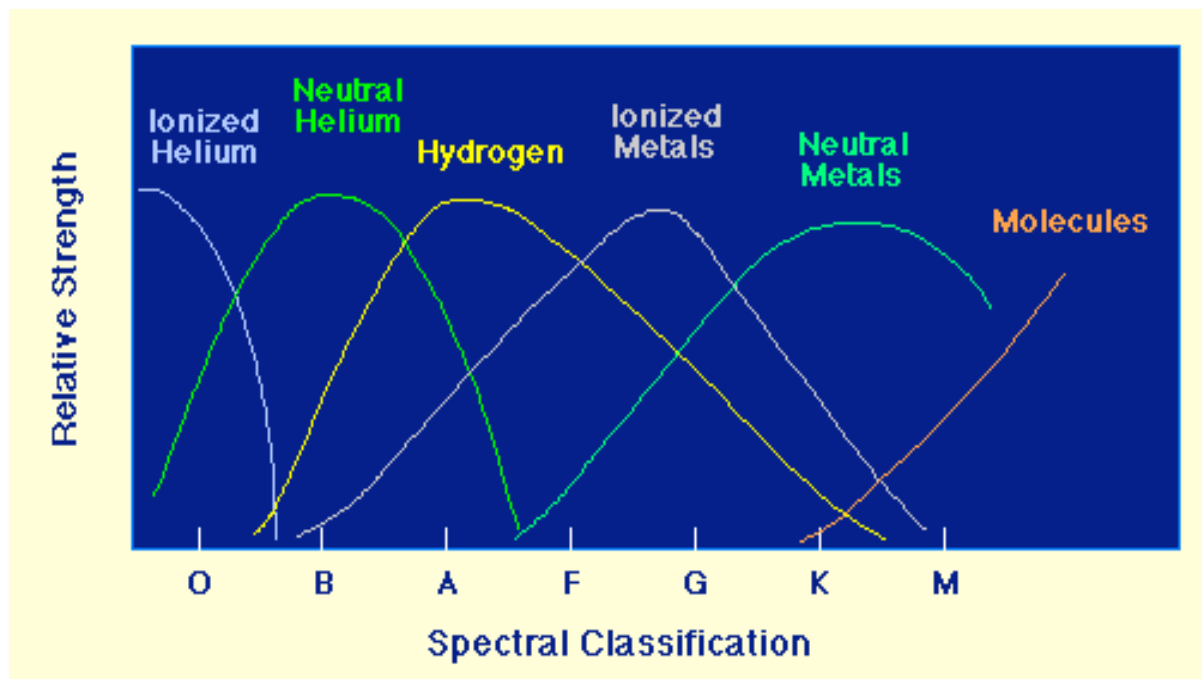
Statistische Mechanik

Boltzmann:

$$\frac{n_j}{n_i} = \frac{g_j}{g_i} \exp\left(-\frac{E_j - E_i}{kT}\right)$$

Saha:

$$\frac{n_I n_e}{n_A} = \frac{2g_I}{g_A} \frac{(2\pi m_e kT)^{3/2}}{h^3} \exp\left(-\frac{E_{ion}}{kT}\right)$$



Atomphysik

Übergangswahrscheinlichkeit $l \rightarrow u$:

$$dW_{lu}(\nu) = \sigma_{lu} c n_\nu(\nu) d\nu$$

Wirkungsquerschnitt:

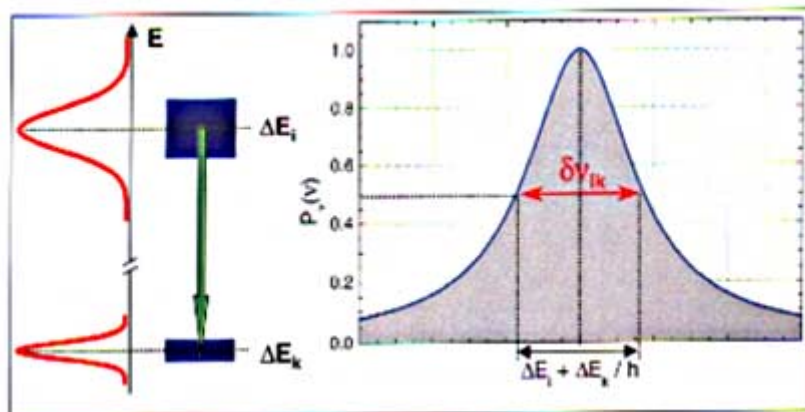
$$\sigma_{lu} = \frac{h\nu}{4\pi} B_{lu} \varphi(\nu)$$

Einsteinkoeffizient der Absorption:

$$B_{lu} = \frac{4\pi^2 e^2}{h\nu_{lu} mc} f_{lu} = B_{lu, \text{classical}} f_{lu}$$

Lorentzprofil:

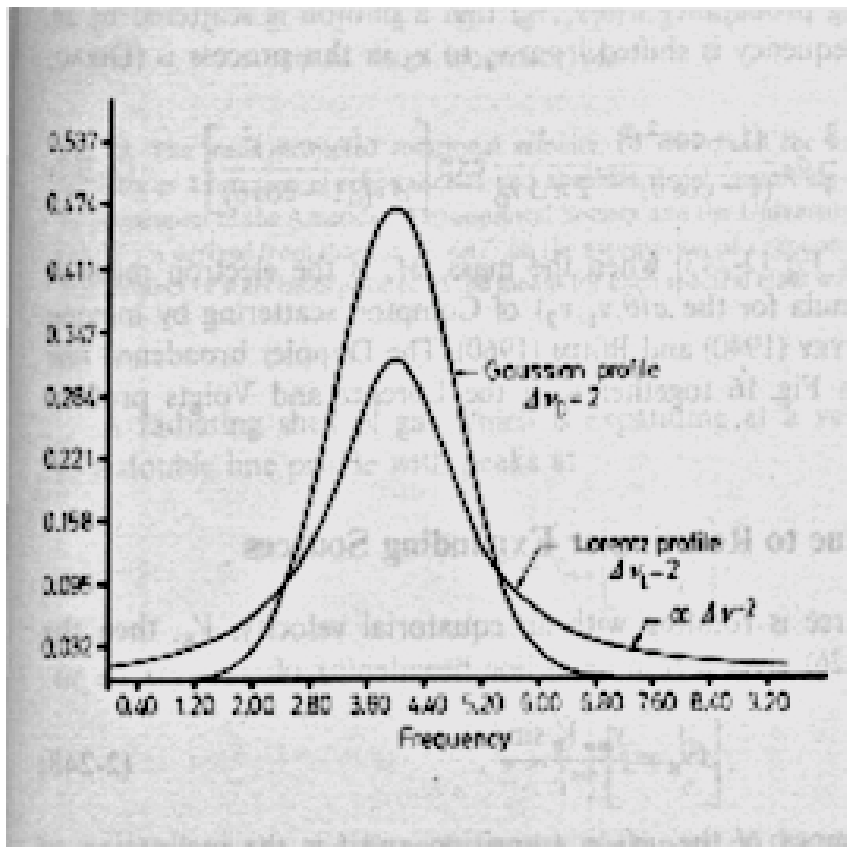
$$\varphi(\nu) = \frac{\gamma}{4\pi^2} \frac{1}{(\nu - \nu_0)^2 + (\gamma / 4\pi)^2}$$



Gaußprofil:

$$\varphi(\nu) = \frac{1}{\nu_D \sqrt{\pi}} \exp \left(- \frac{(\nu - \nu_0)^2}{\nu_D^2} \right)$$

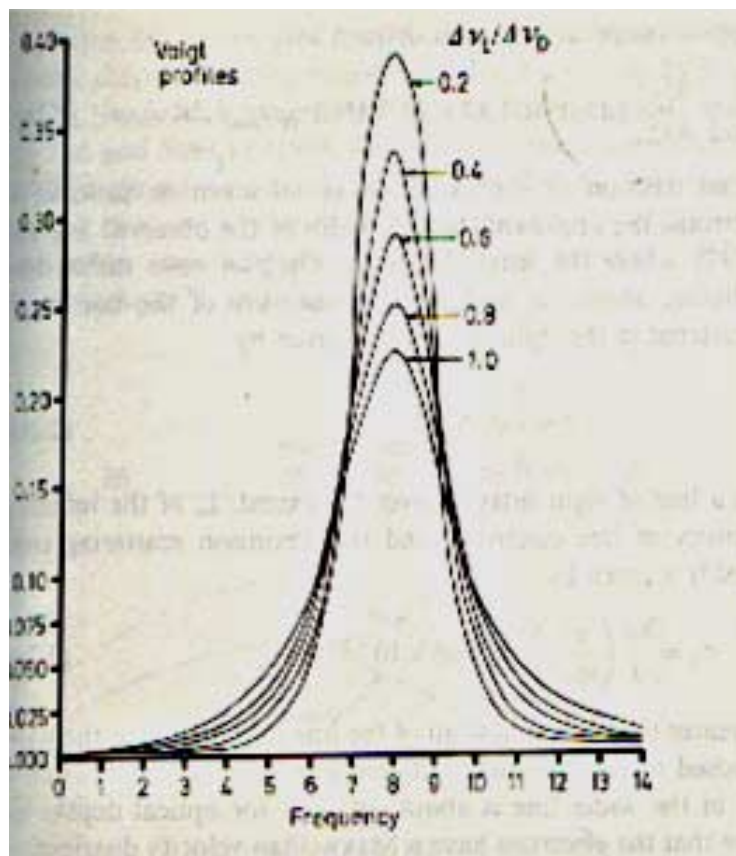
$$\nu_D = \frac{\nu_0}{c} \sqrt{\frac{2kT}{m}}$$



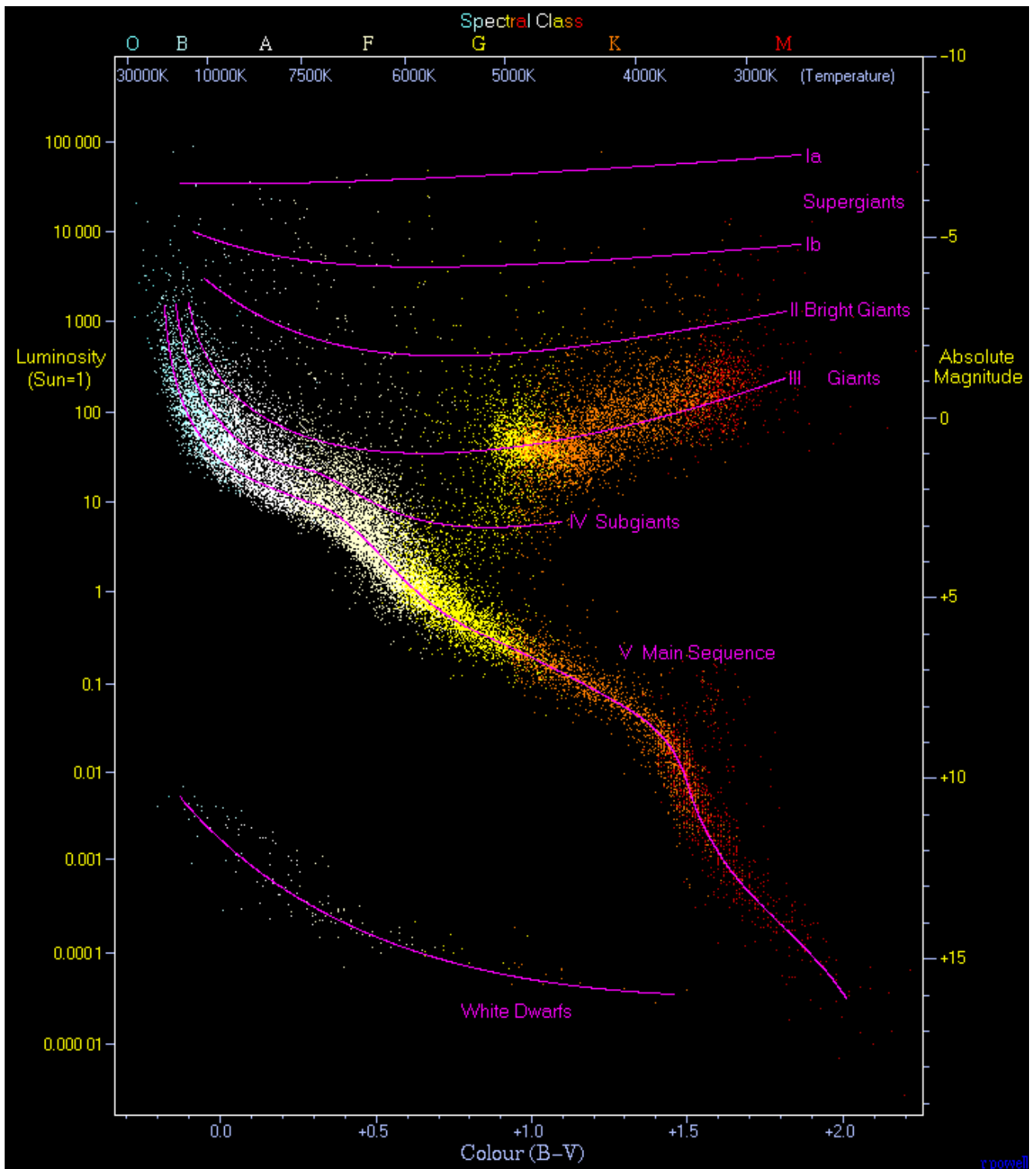
Voigtprofil:

$$\varphi(\nu) = \frac{1}{\nu_D \sqrt{\pi}} \frac{\alpha}{\pi} \int dy \frac{\exp(-y)^2}{\alpha^2 + (x - y)^2}$$

$$\alpha = \frac{1}{4\pi} \frac{\gamma}{\nu_D}, x = \frac{\nu - \nu_0}{\nu_D}$$



Spektraltypen

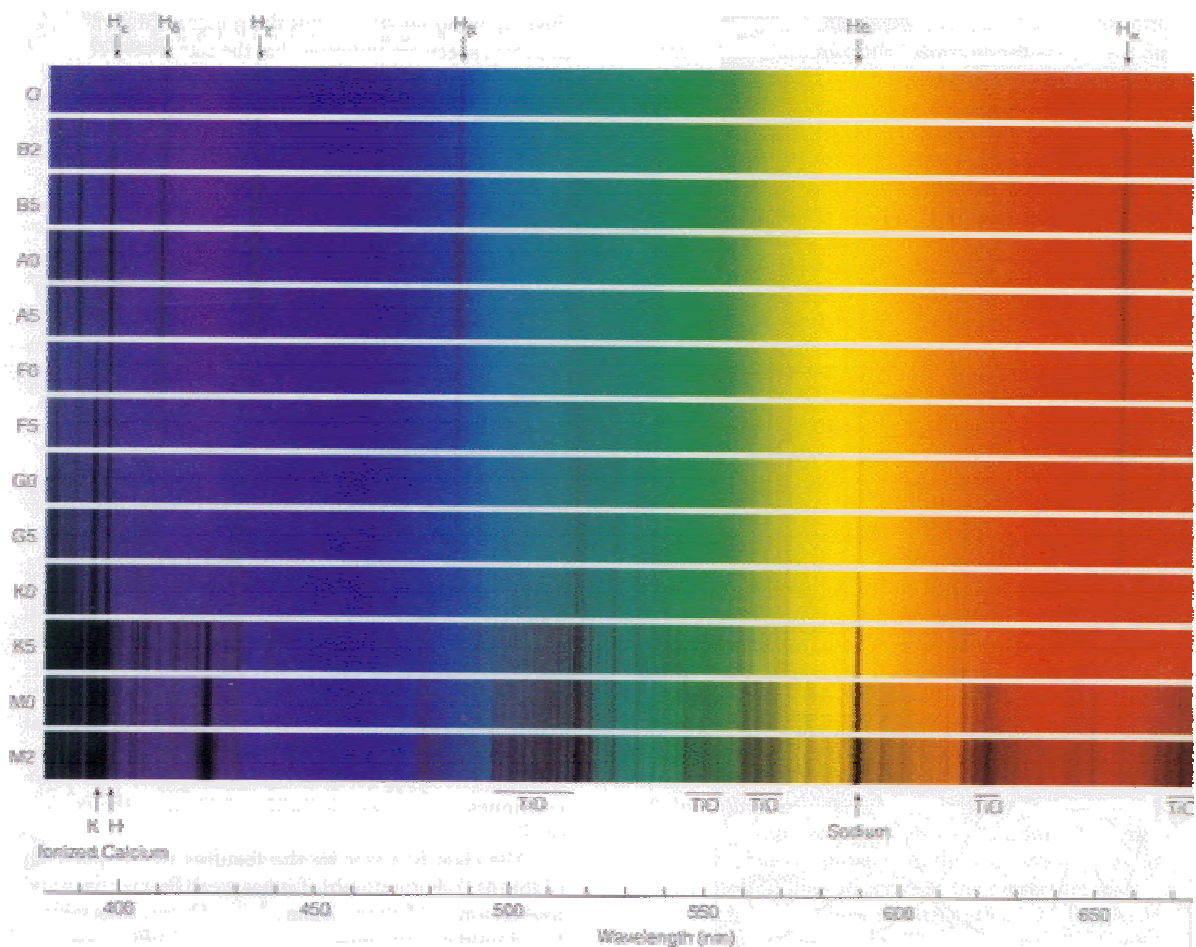


Prinzip der Klassifikation

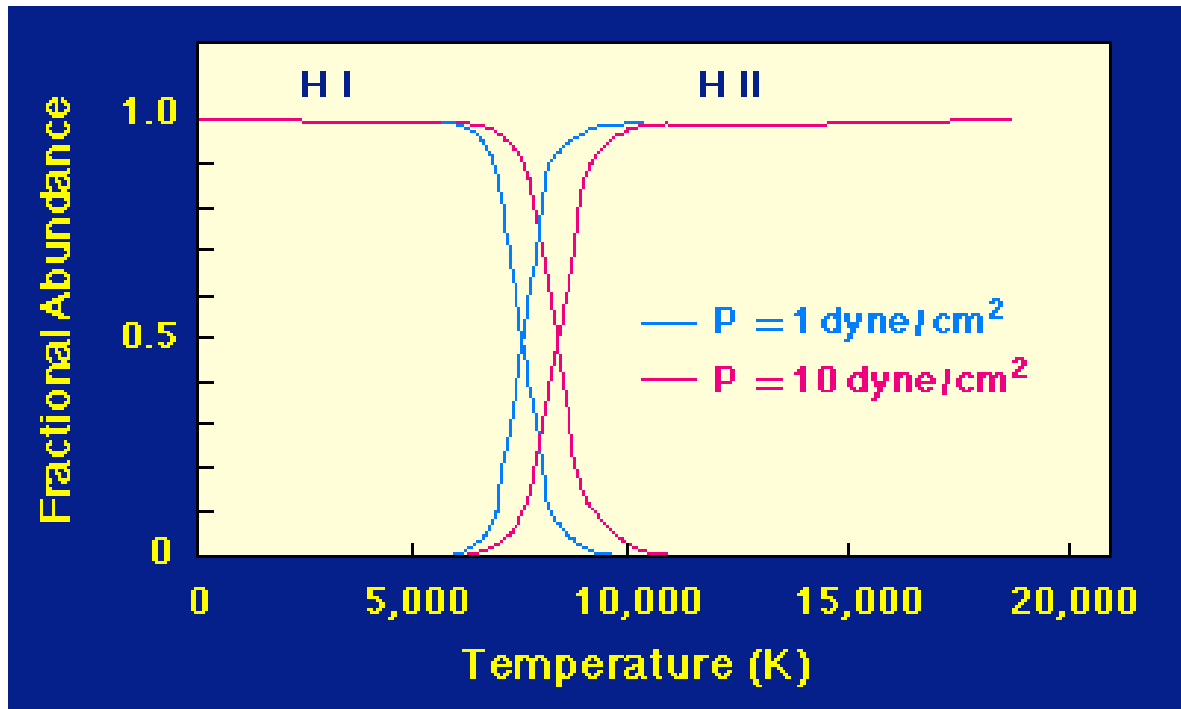
- Einordnung durch visuellen Vergleich mit Standardspektren
- Spektren mit $R \approx 3000$ bei etwa 300-900 nm
- Spektralklasse: Ordnung nach Effektivtemperatur

$$\begin{array}{c}
 S \\
 / \\
 O - B - A - F - G - K - M - L - T \\
 \backslash \\
 C
 \end{array}$$

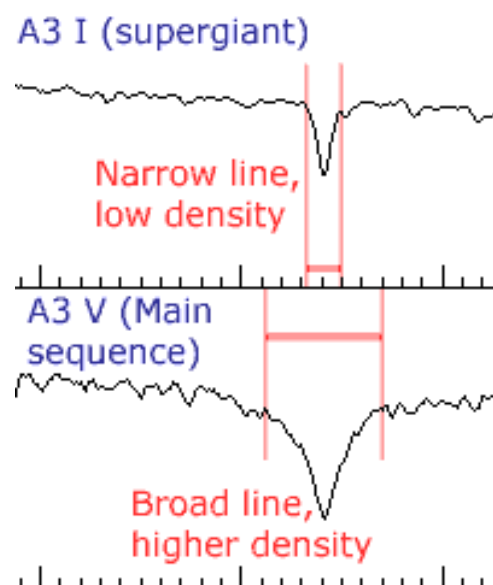
- Unterklasse A0,A1,...,A9,F0,..., auch 0.5 möglich



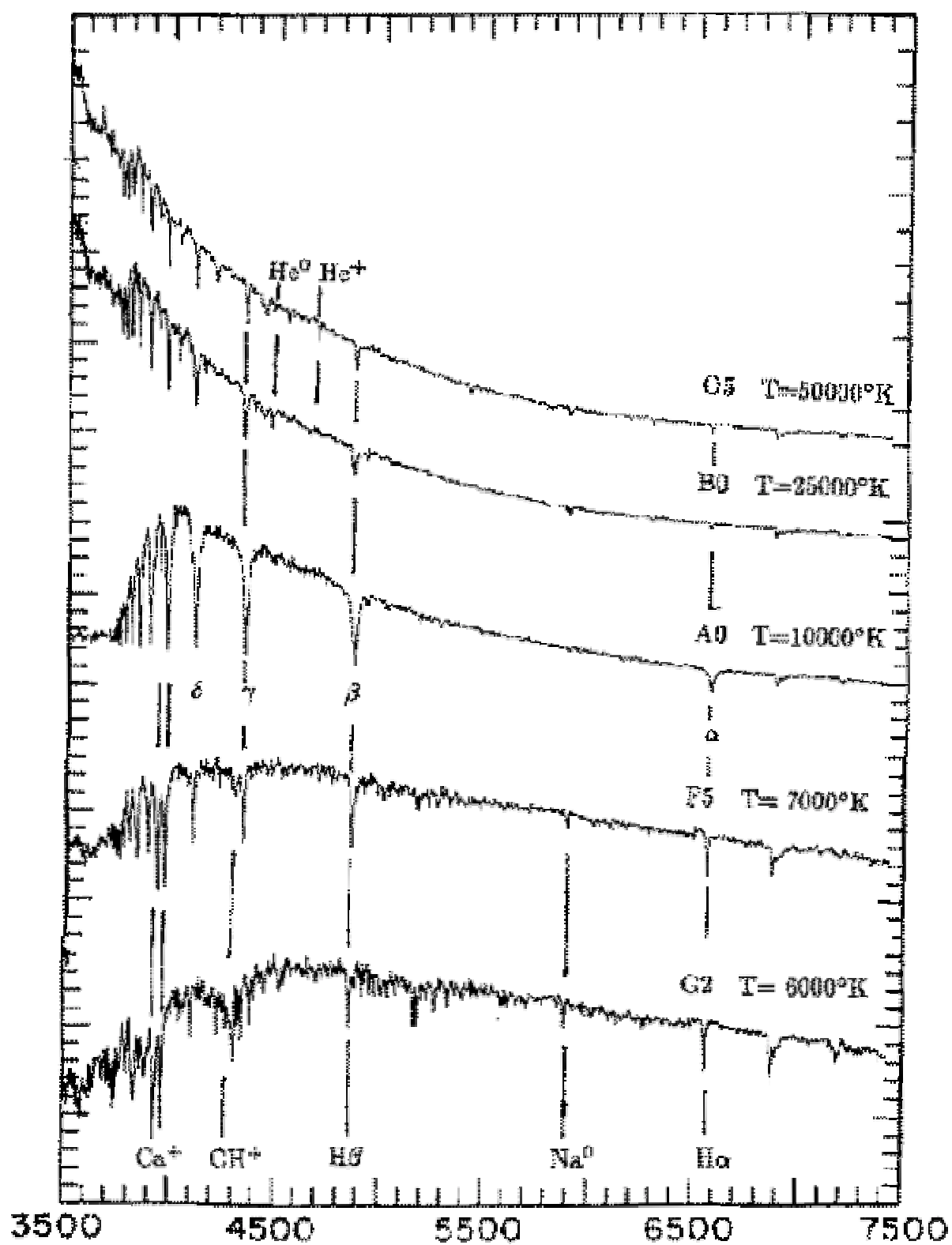
- Leuchtkraftklasse: Bei gleicher Temperatur bedeutet höhere Leuchtkraft größeren Radius und damit geringere Dichte bzw. niedrigeren Druck. Nach Saha stärkere Ionisation.

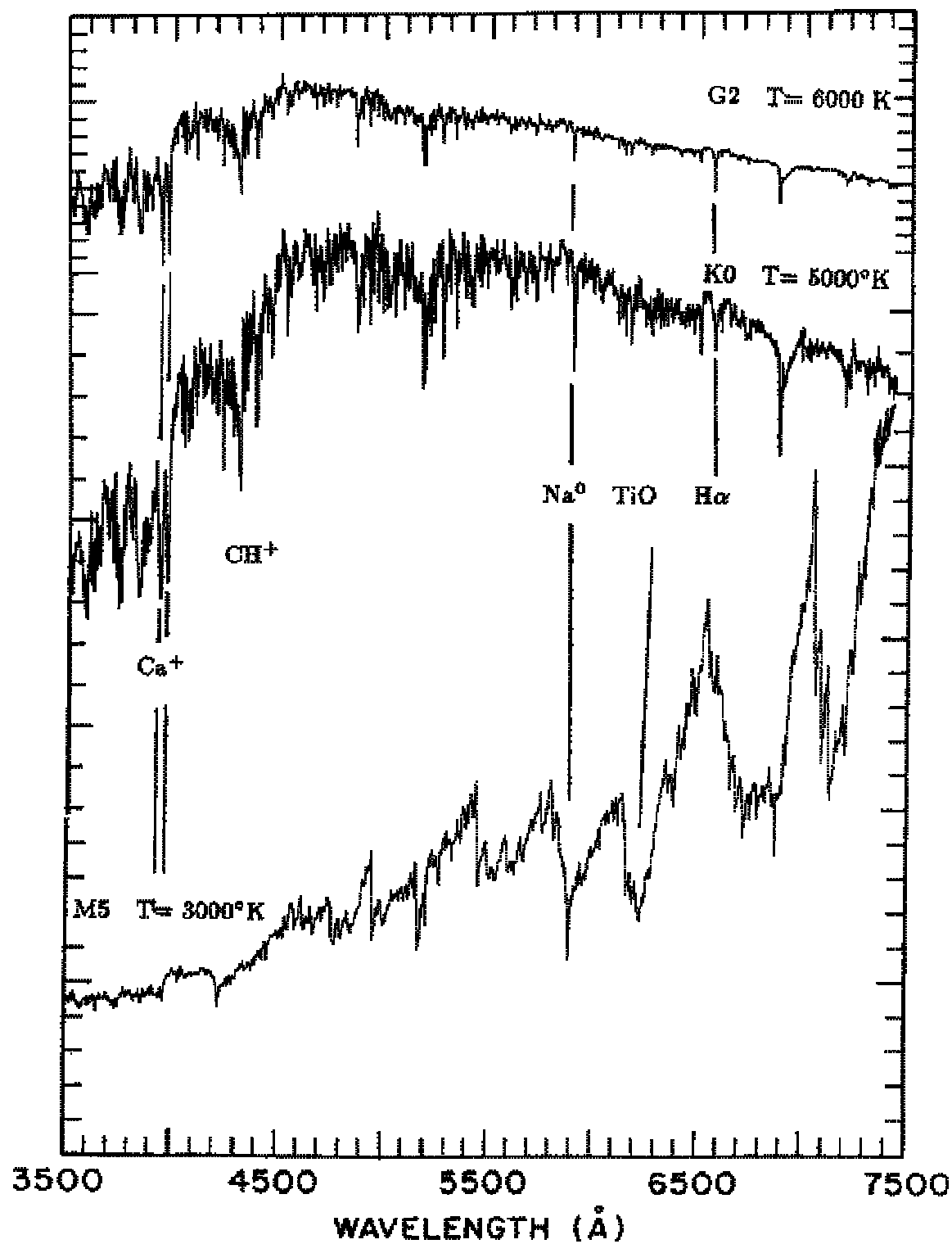


Gleichzeitig werden aufgrund der Druckverbreiterung die Spektrallinien bei abnehmender Dichte schmäler.



Spektren

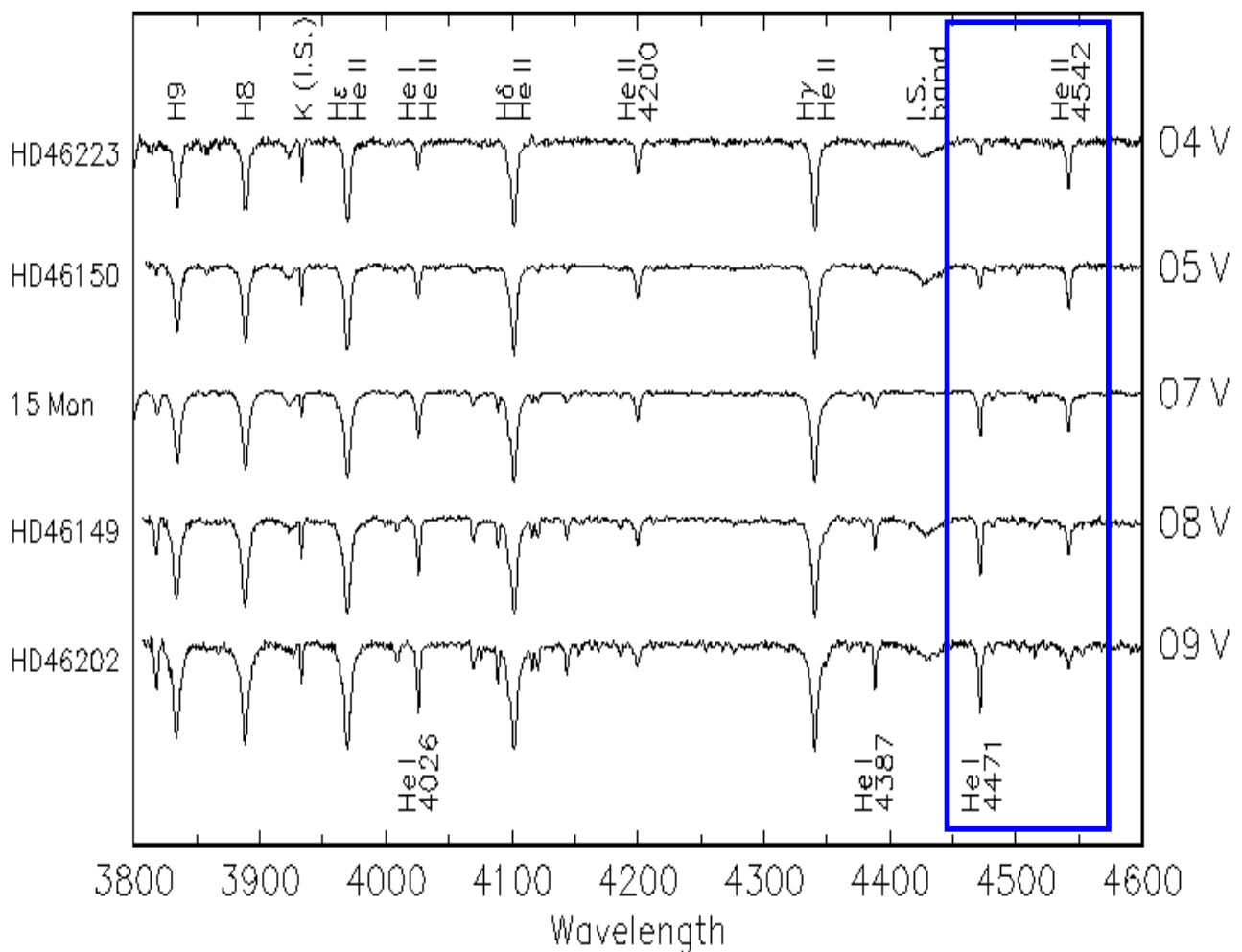




O-Sterne

- He I, He II bestimmen das Spektrum
- Mit abnehmender Effektivtemperatur wird He I stärker, He II schwächer
- Typischer Indikator ist [He I 4471/He II 4542](#)

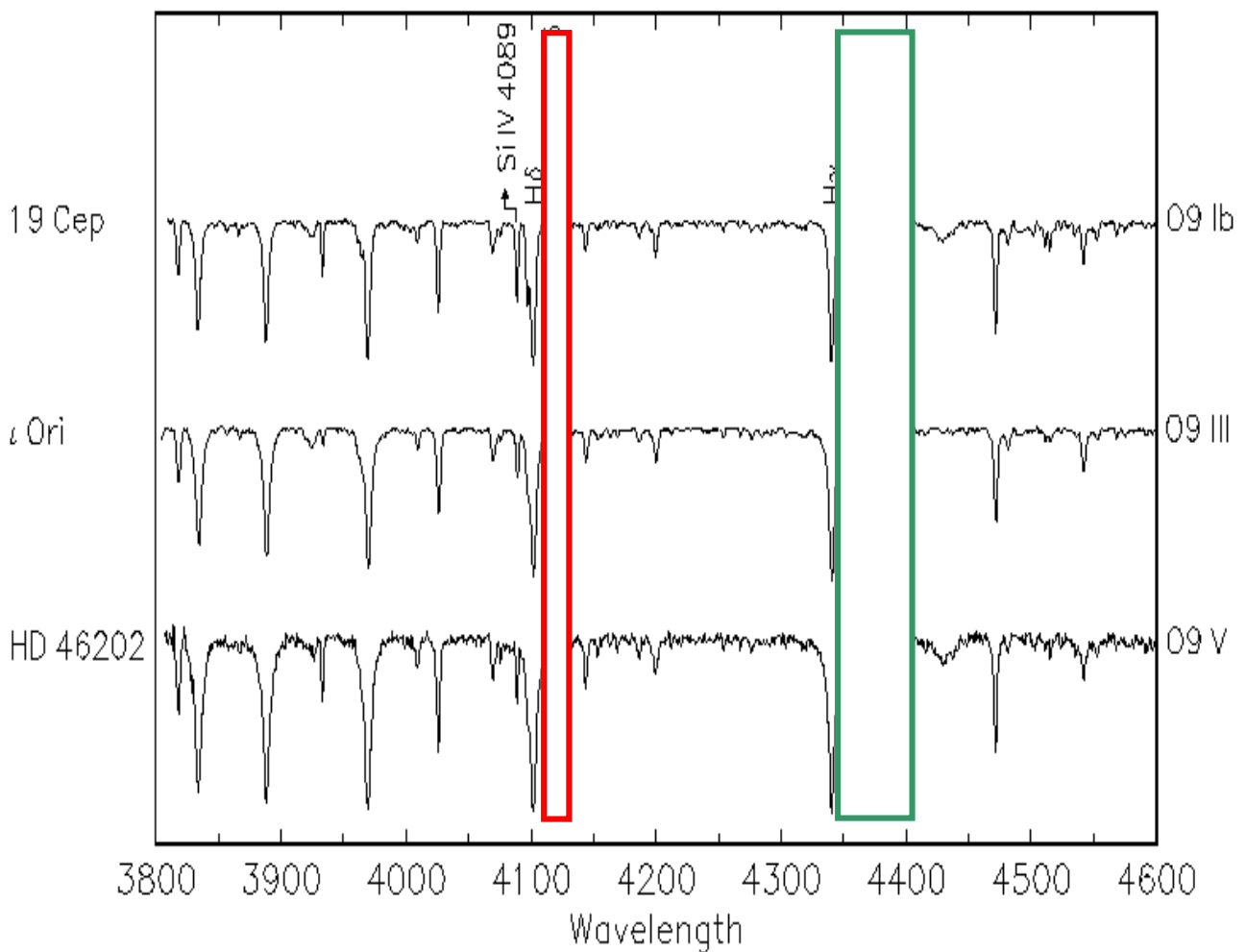
Main Sequence O4 – O9



Leuchtkrafteffekte

- H wird schmäler mit zunehmender Leuchtkraft
- Typische Indikatoren: **Si IV 4116/He I 4121** und **N III 4379/He I 4387**

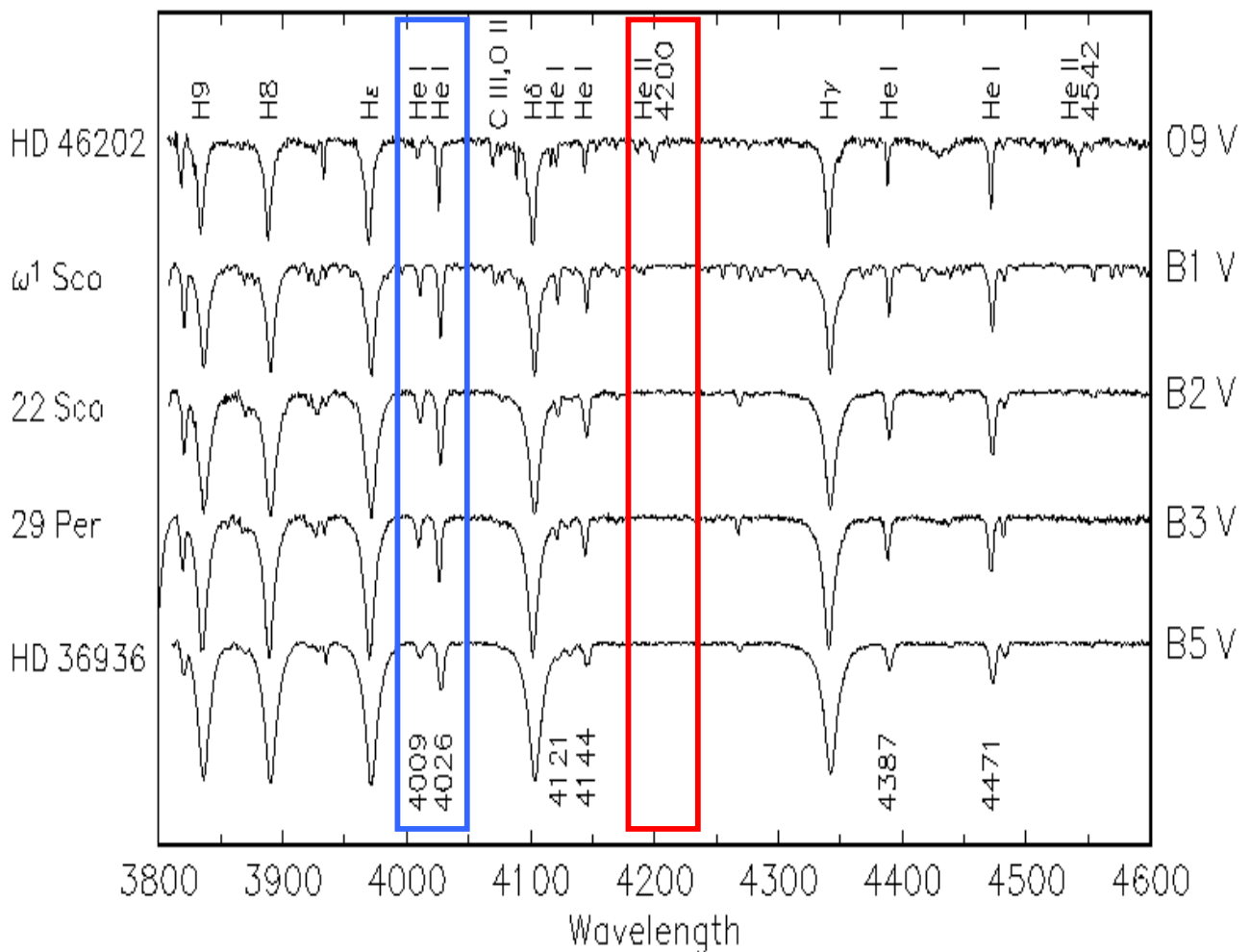
Luminosity Effects at O9



B-Sterne

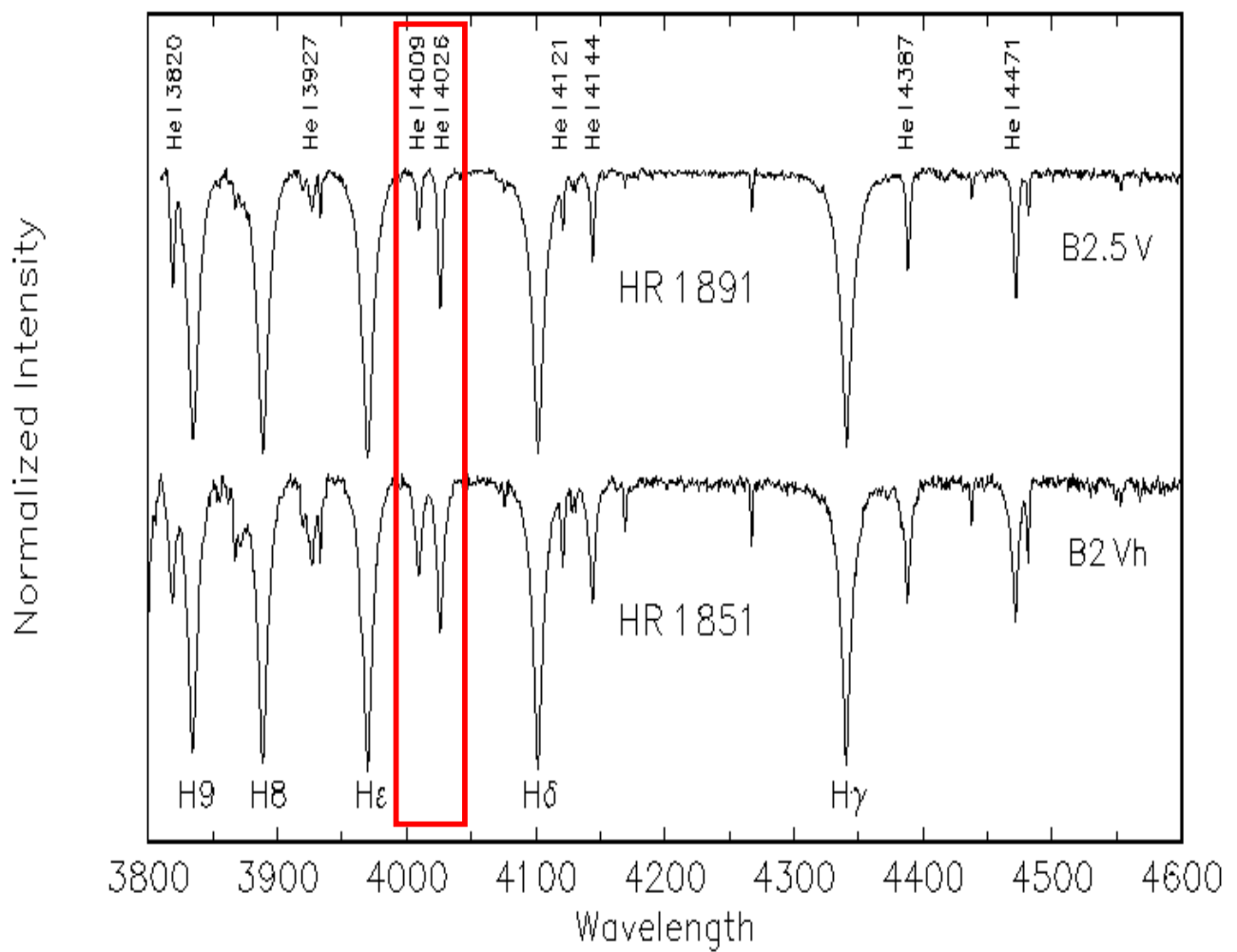
- Übergang O-B: **He II Linien** verschwinden
- **He I** erreicht Maximum etwa bei B2
- H wird stärker

Main Sequence O9 – B5

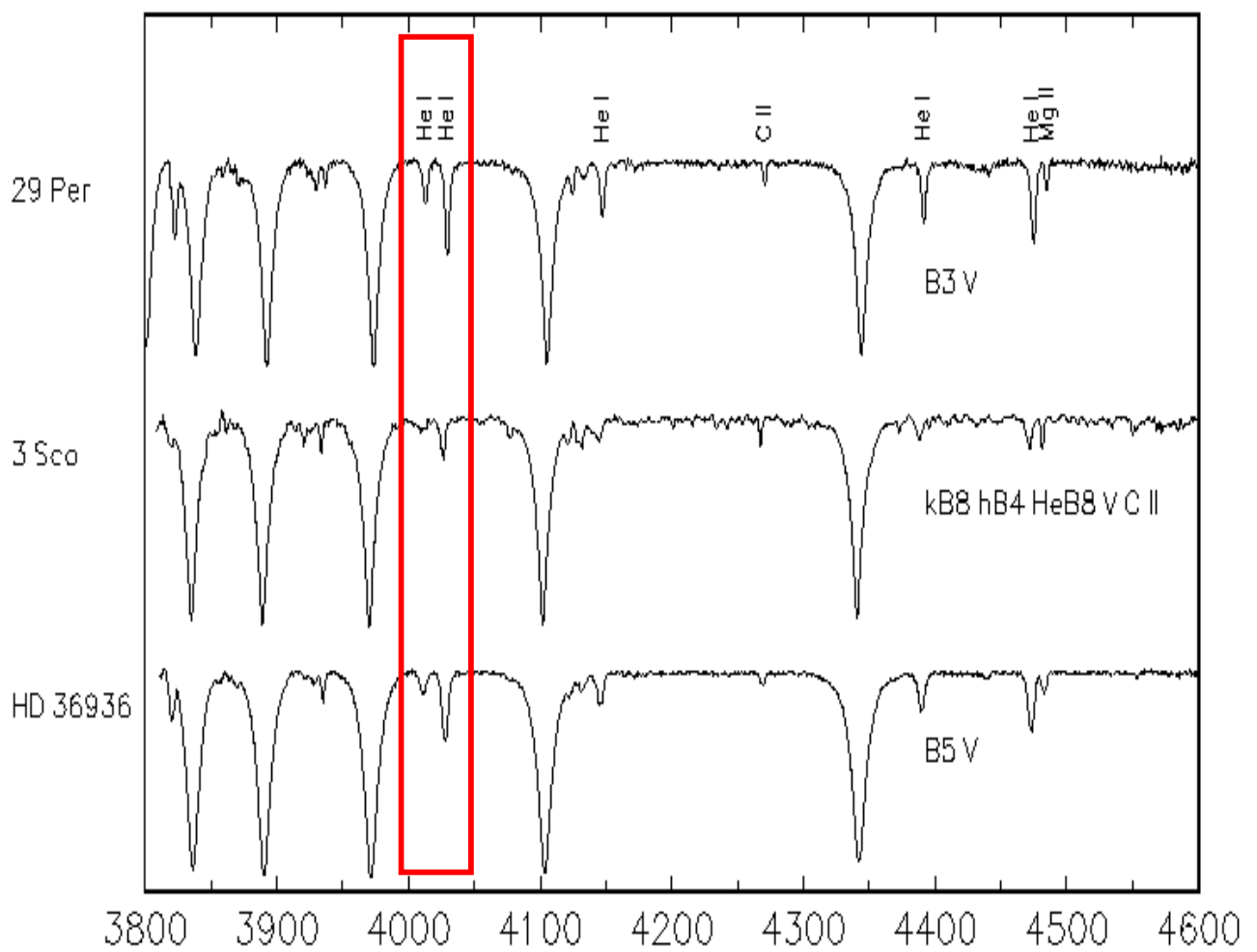


He-Variationen

A Helium–strong Star in the
Orion Association



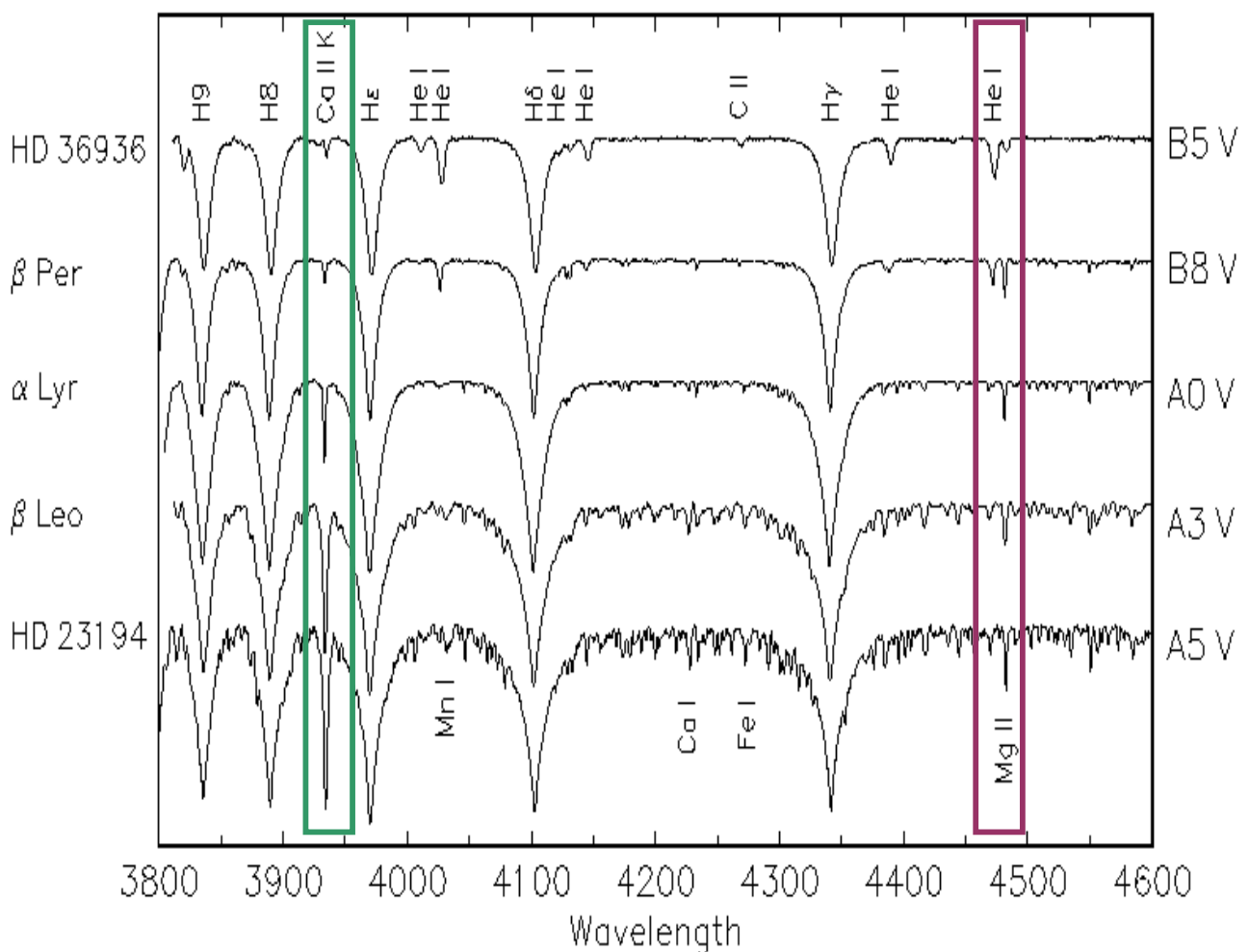
3 Sco, A Helium-weak Star



Wer B sagt muss auch A sagen...

- He Linien verschwinden langsam
- Balmer-Linien erreichen ihr Maximum
- **Ca II H&K** wachsen stark an (aber Ca II H verschwindet in der H ϵ Linie)
- Metalllinien werden stärker, z.B. **Mg II**

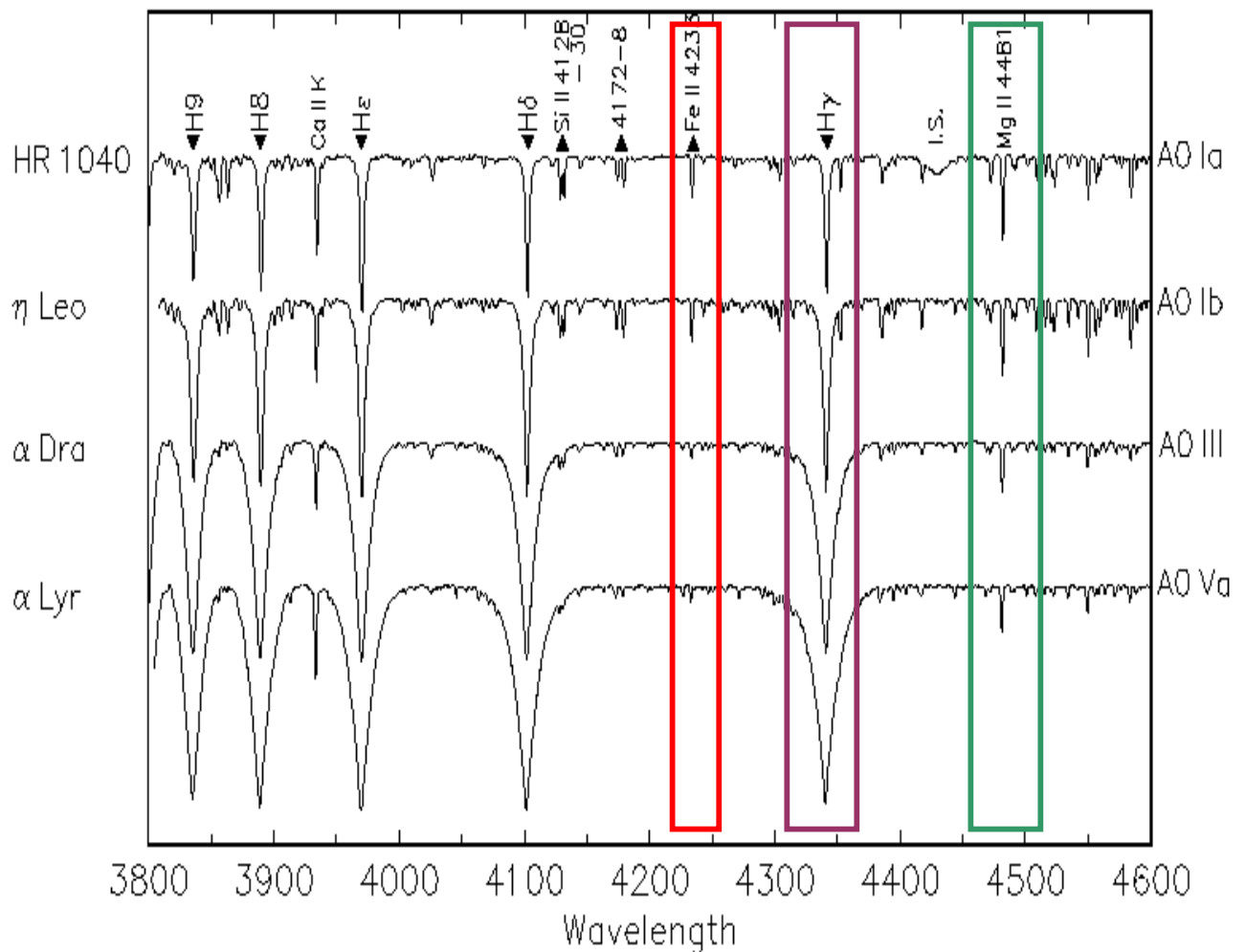
Main Sequence B5 – A5



Noch mal Leuchtkraft...

- Starke Verbreiterung der **Balmerlinien** mit abnehmender Leuchtkraft (linearer Starkeffekt)
- Zusätzlich **Fe II**, **Mg II** als Indikatoren möglich

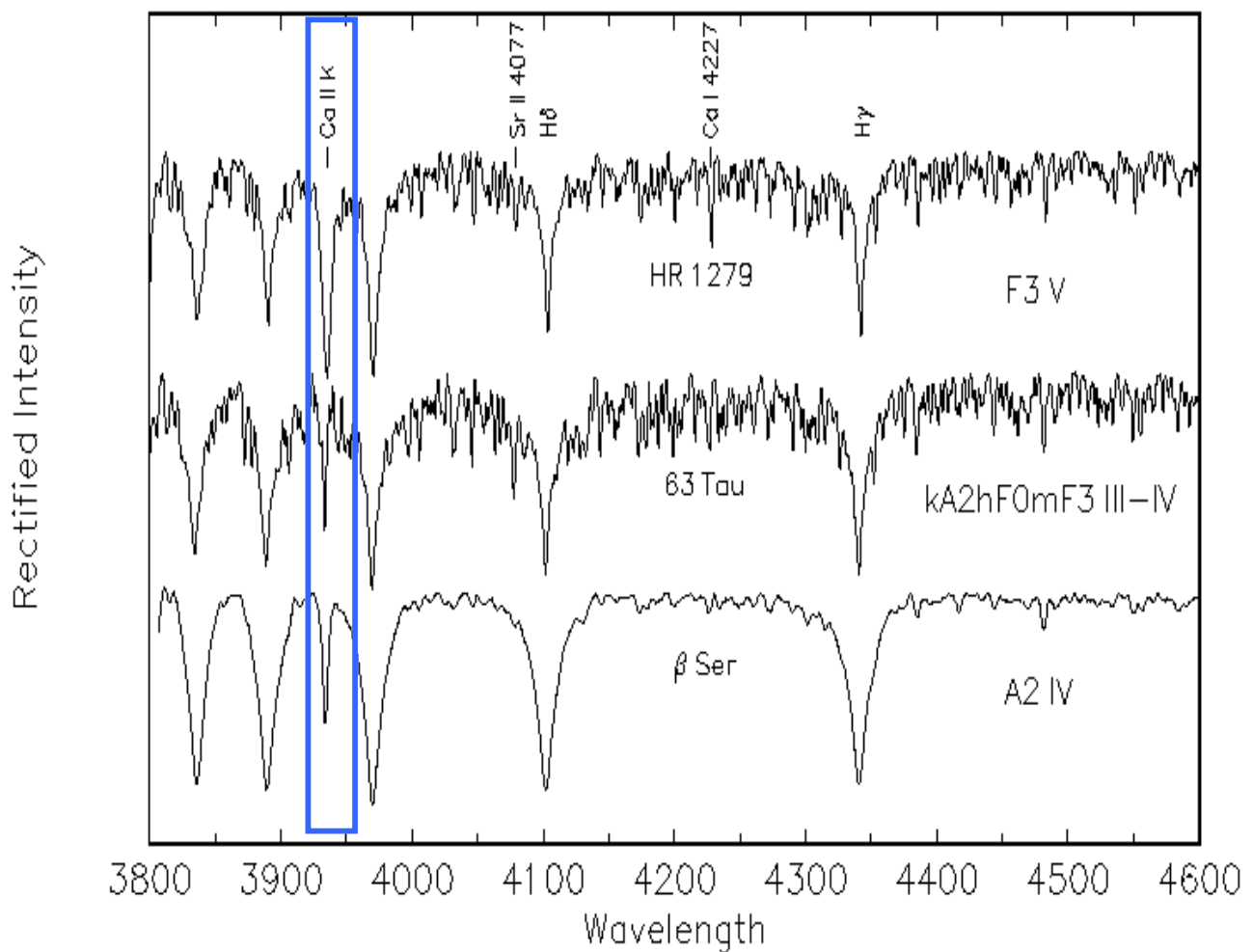
Luminosity Effects at A0



Seltsame A-Sterne

Am-Sterne: Starke metallische Linien im Vergleich mit Ca II K

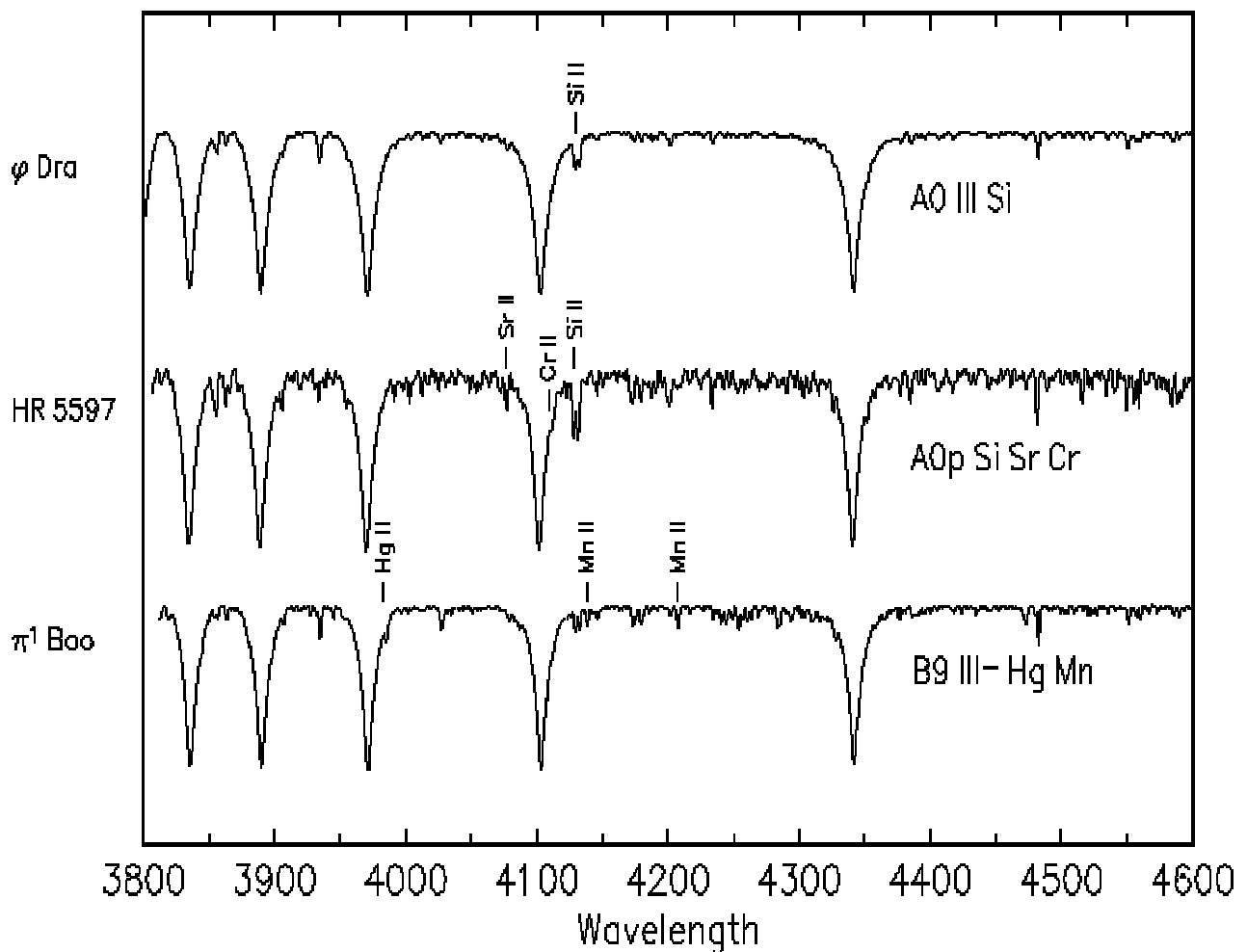
63 Tau: A Classical Am Star



Magnetische Sterne

Ap-Sterne: Überhäufigkeiten von Metallen, häufig mit starken Magnetfeldern (Zeeman-Effekt in Spektren höherer Auflösung)

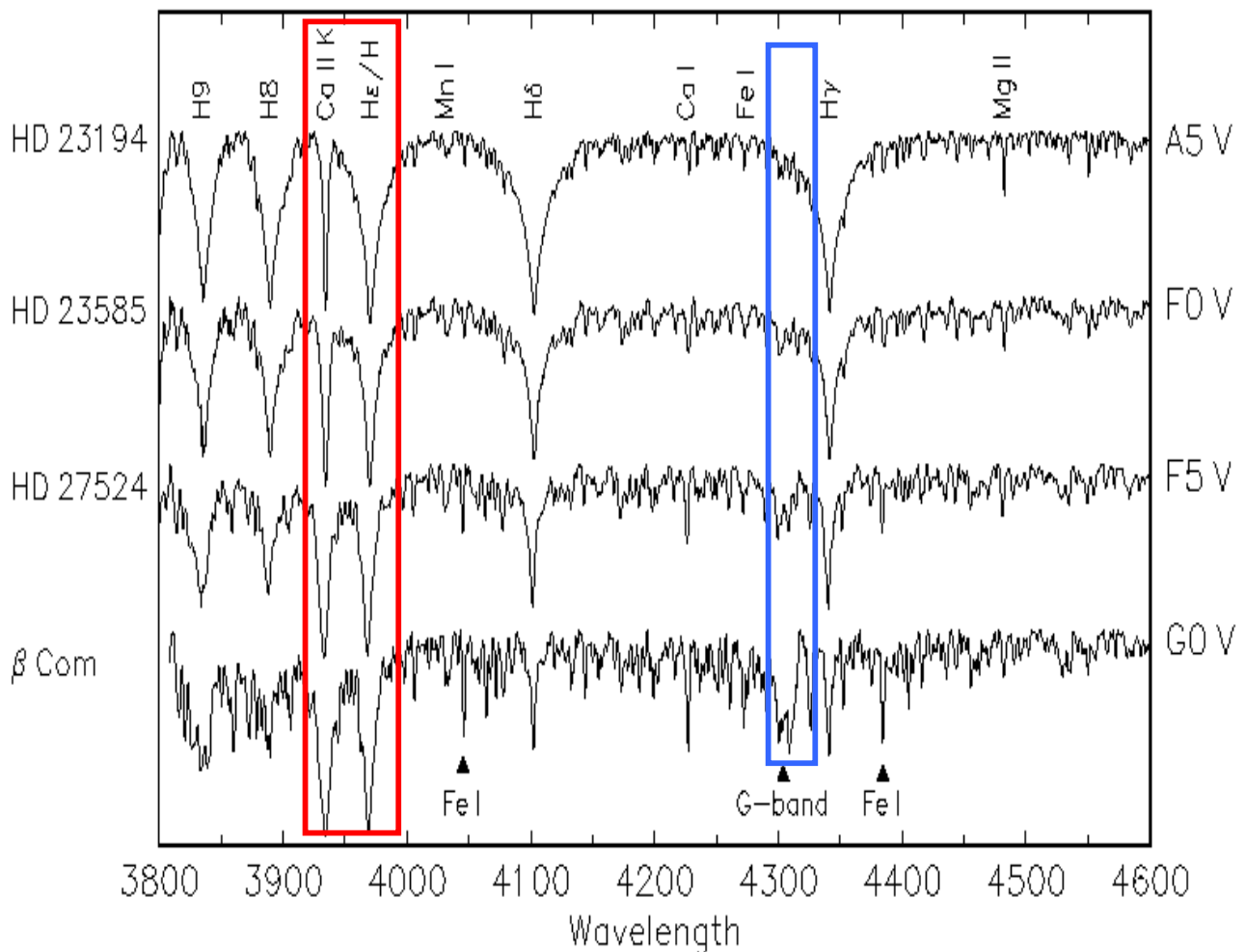
Peculiar Stars near A0



A Fine Girl

- Balmer-Linien werden wieder schwächer
- **Ca II K** nimmt zu bis zur Sättigung
- Erste Molekül-Banden (**G-Band**, **CH-Molekül**)
- Metallische Linien werden stärker

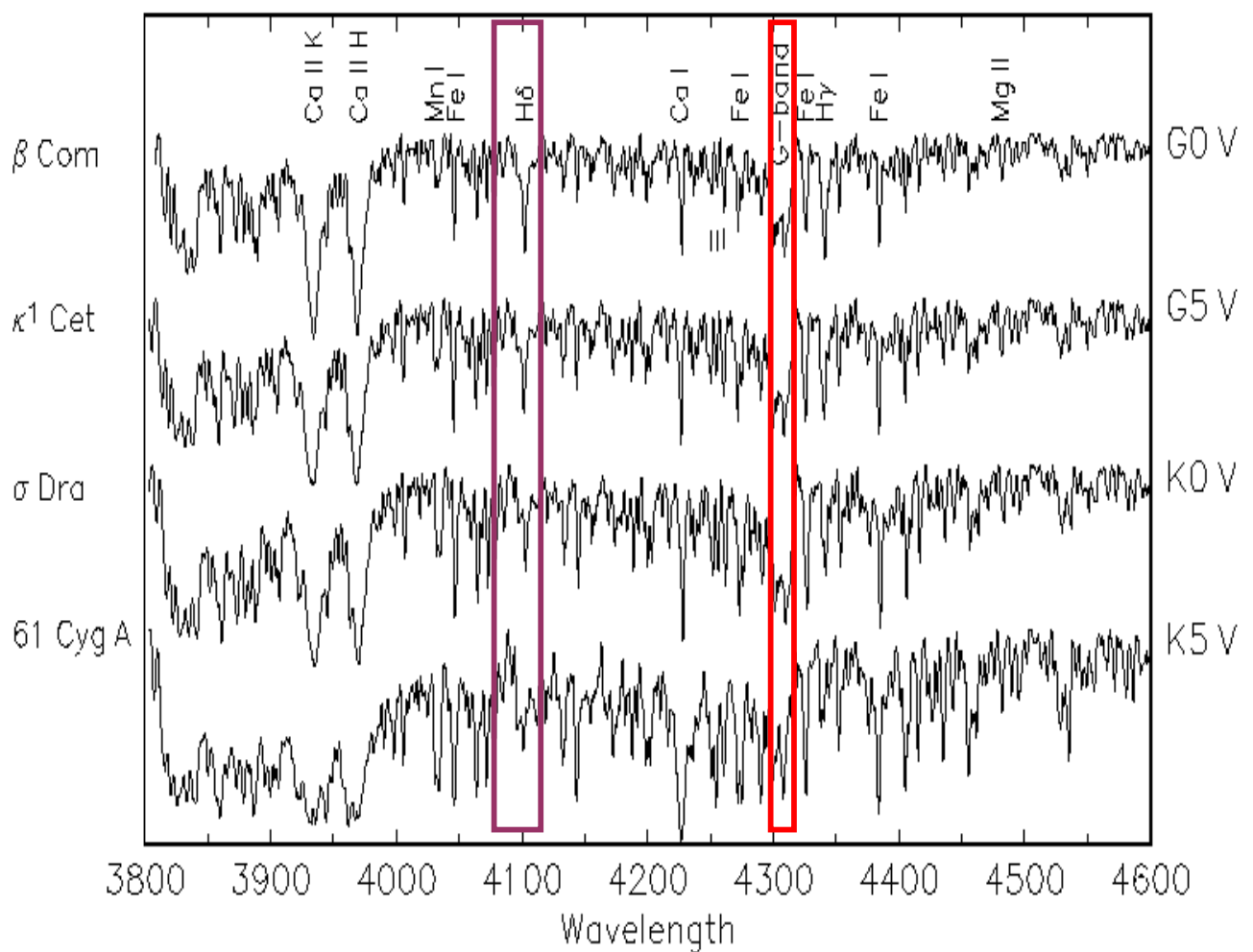
Main Sequence A5 – G0



G- und K-Sterne

- H nimmt weiter ab
- G-Band im Maximum bei K2

Main Sequence G0 – K5



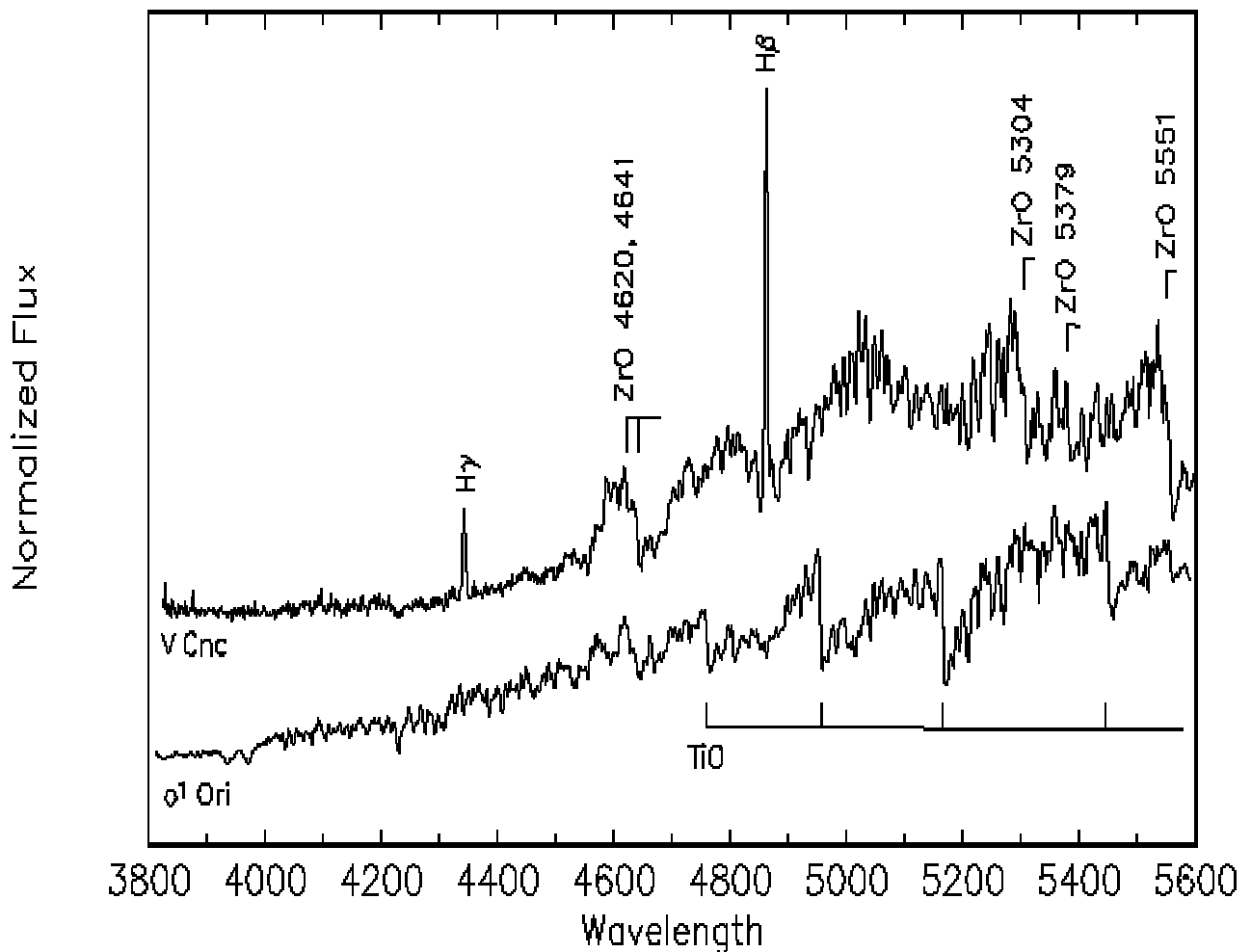
Nebenzweige

S
/
- G - K - M -

S-Sterne: ZrO Linien in kühlen Riesen (AGB)

H in Emission durch atmosphärische Schockwellen

Two S-type Stars



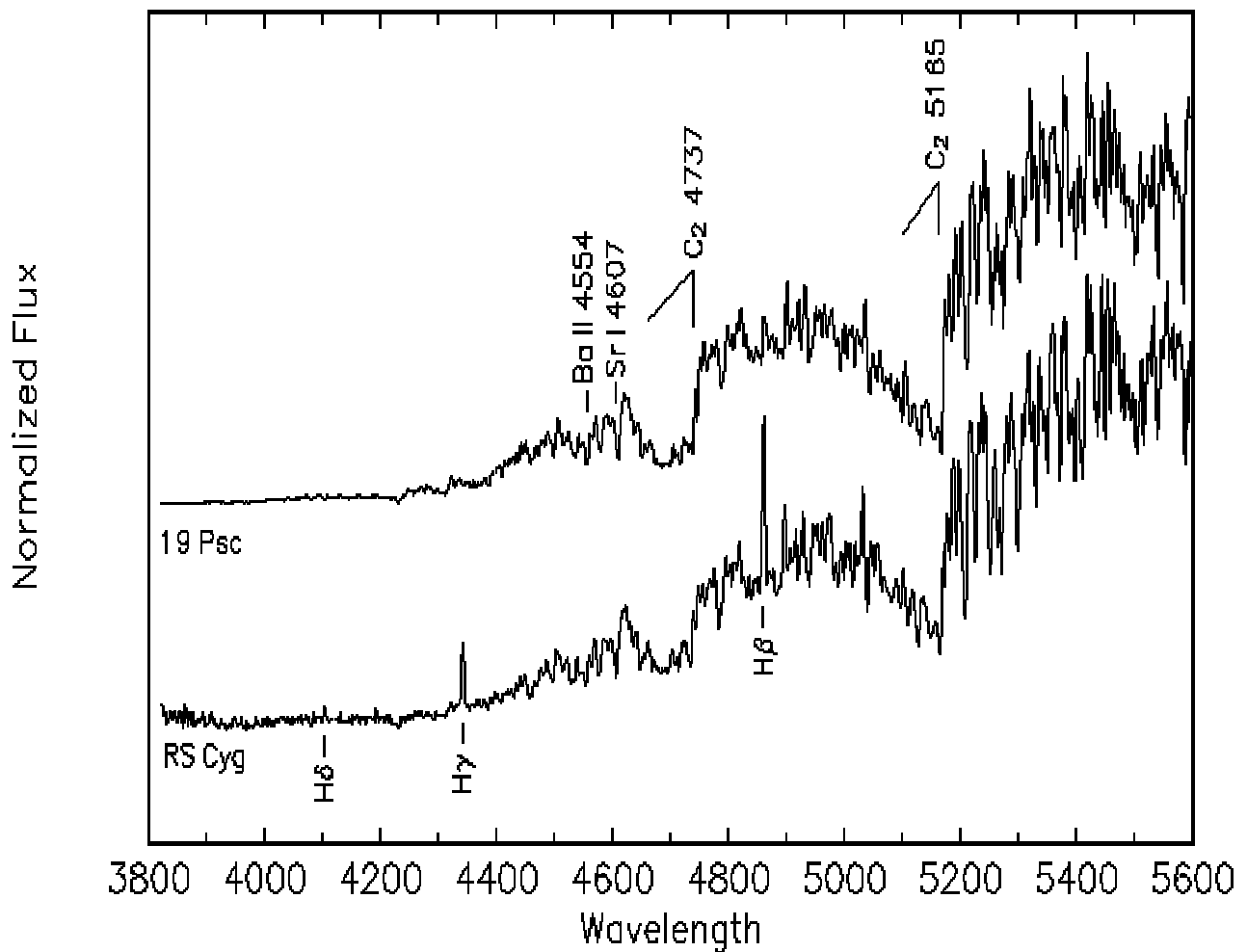
Kohlenstoffsterne

- F - G - K -

\
C

- Linien von Kohlenstoffverbindungen
- Ba, Sr durch Konvektion?

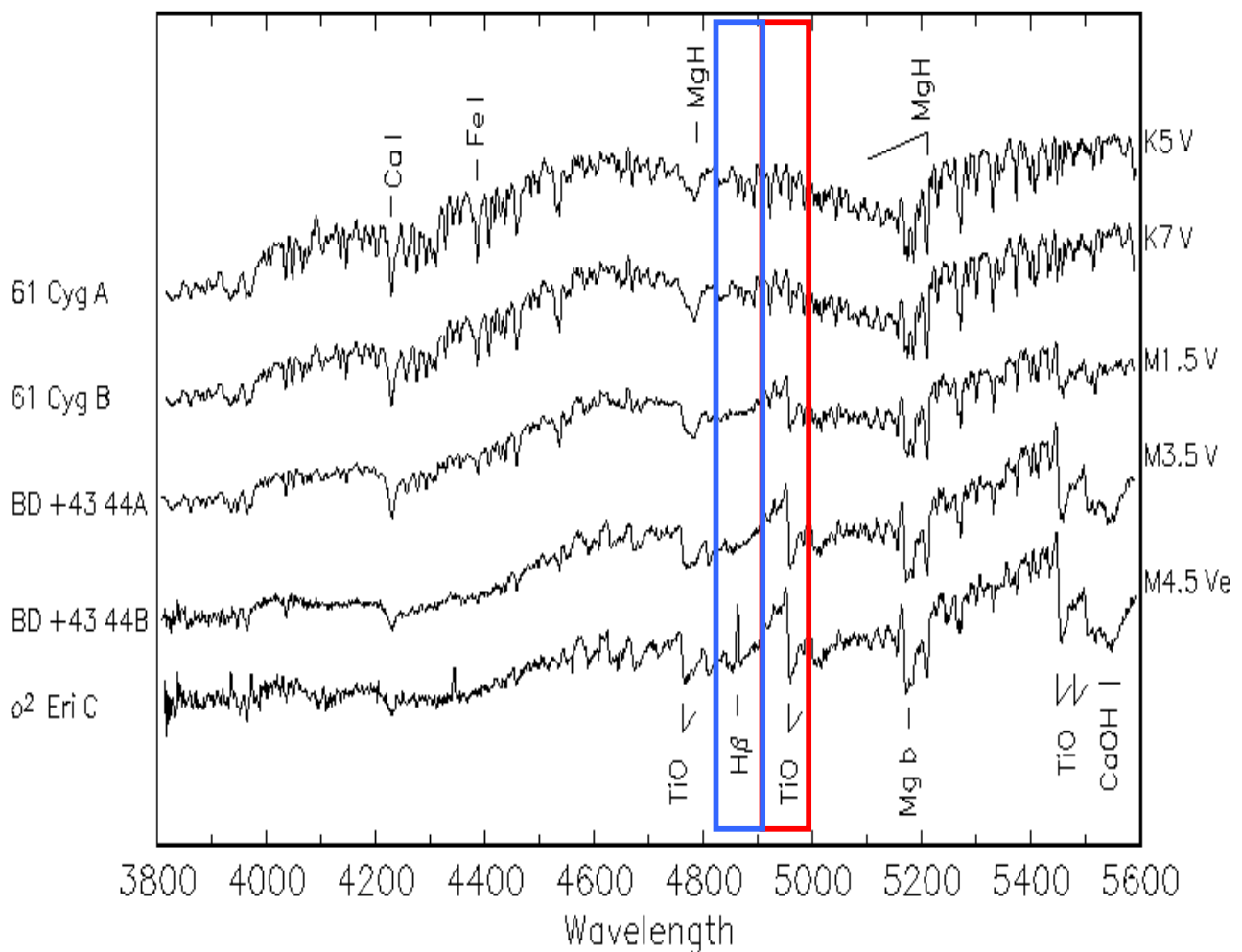
Two Carbon Stars



Cooler Stars

- **TiO-Banden** dominieren zunehmend
- Allgemein verstärkte Molekülbanden
- **H in Emission**: Aktive Chromosphären bei M-Dwarfs

Main Sequence K5 – M4.5
Normalized Flux

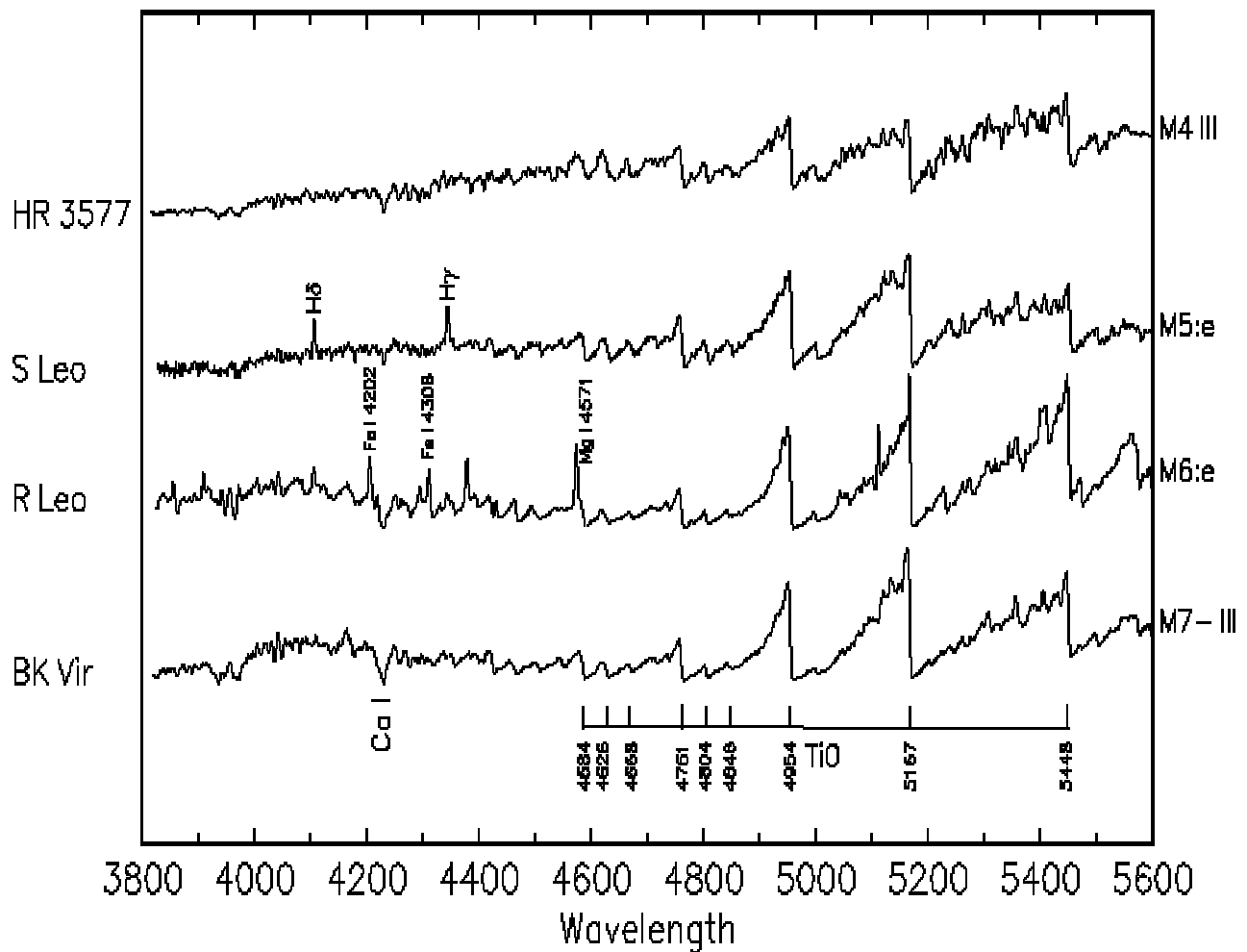


Veränderliche M-Sterne

Mira: Variabel mit Perioden von 80-1000 d

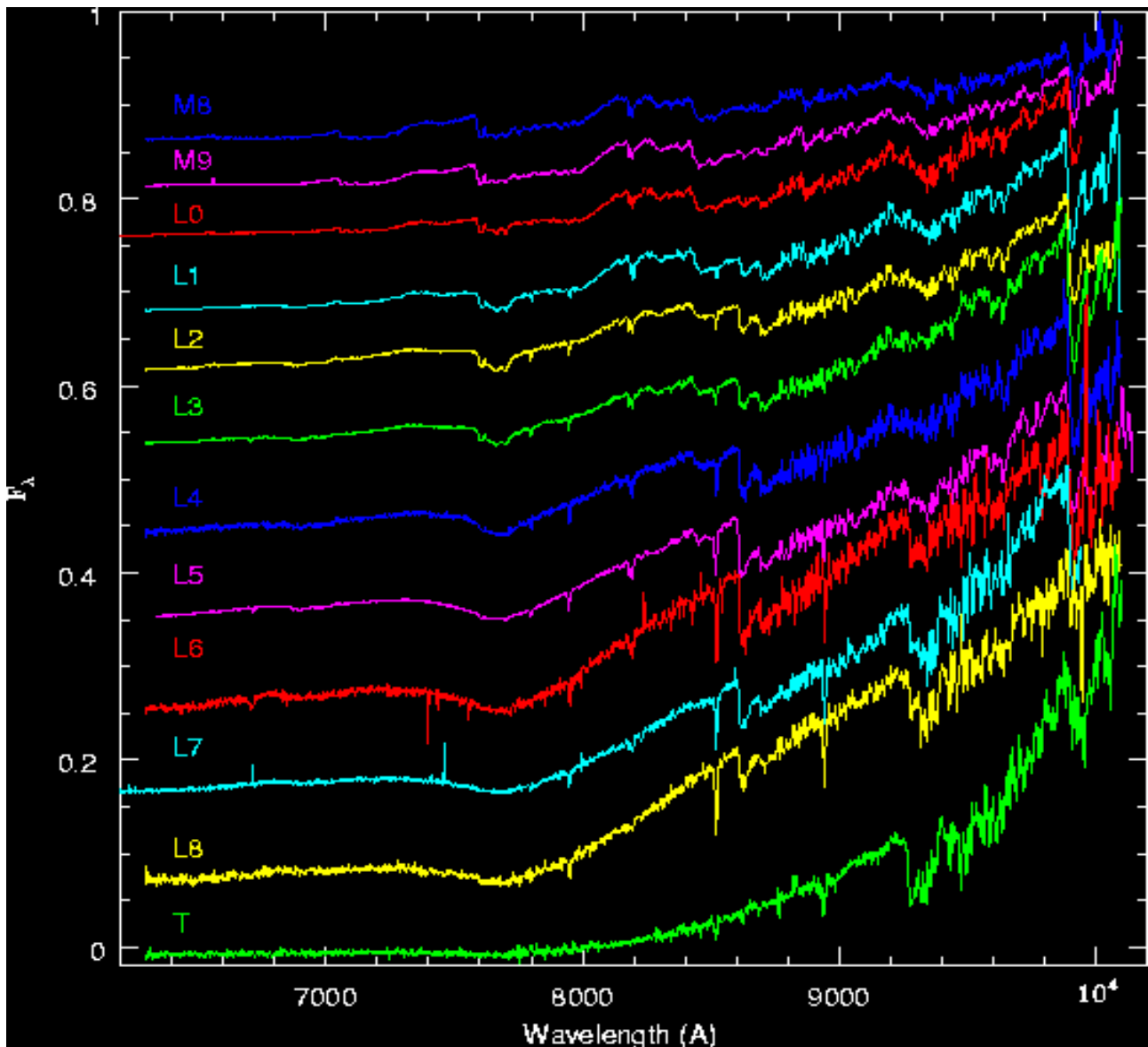
Emissionslinien durch atmosphärische Schockwellen

Emission Lines in Mira Variable Stars



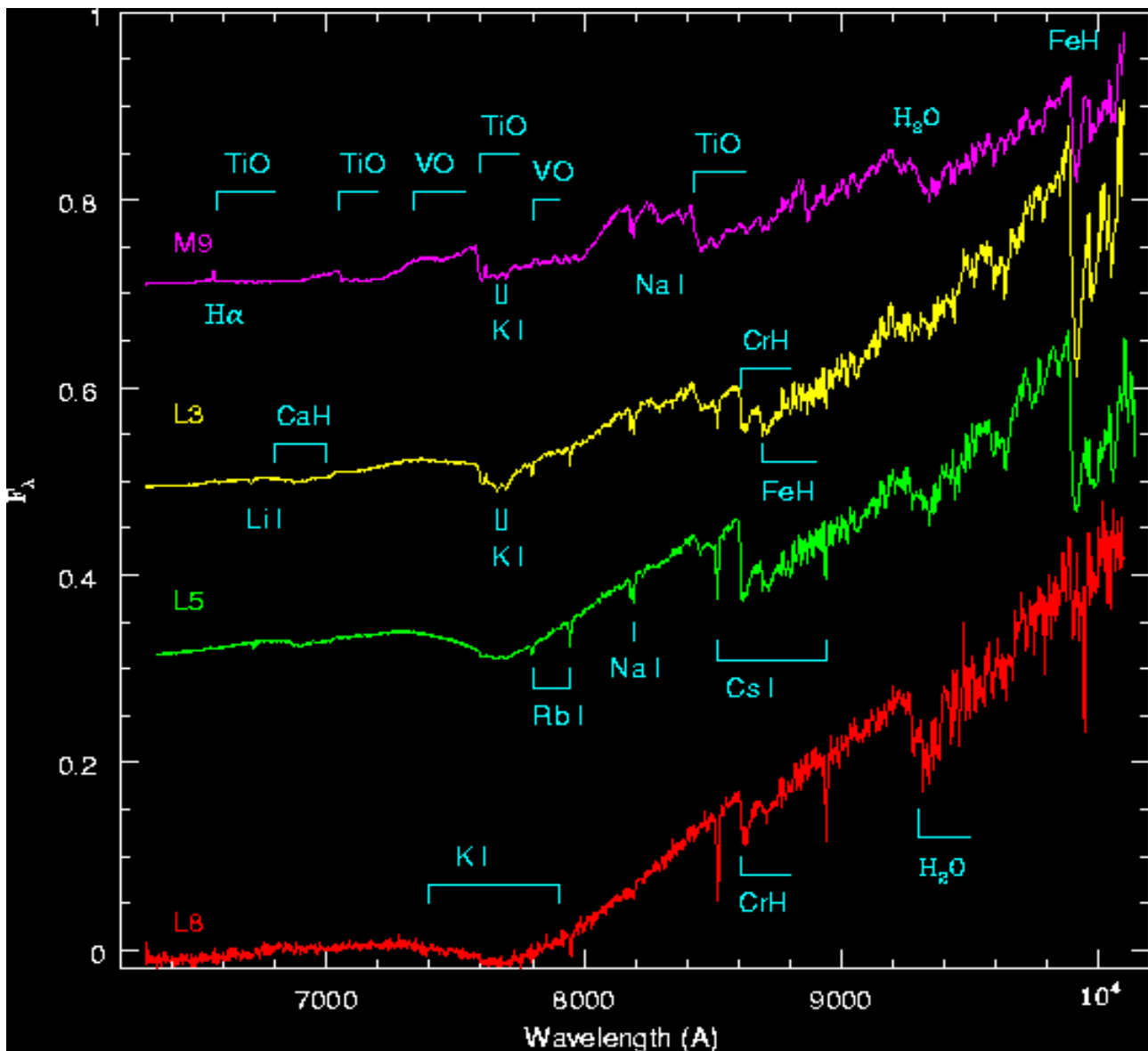
Jetzt wird's richtig kalt...

- Sehr leuchtschwache Objekte durch verbesserte Beobachtungstechnik
- Maximum der Abstrahlung im nahen IR
- Klassifikationsspektren bei 1-5 μm



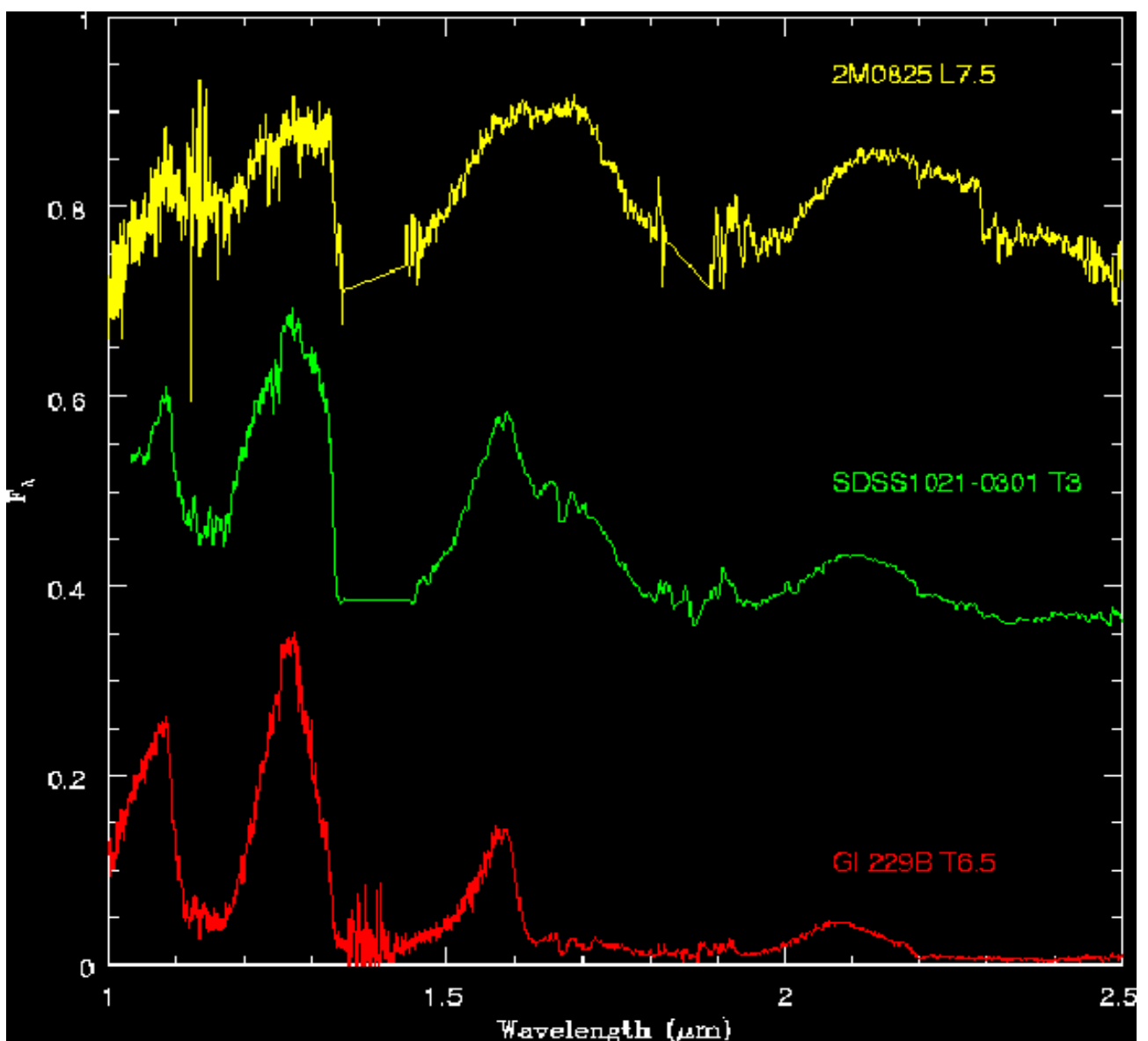
Spektraltyp L

- Abkühlende Braune Zwerge
- Temperatur $T_{\text{eff}} \approx 2000\text{-}1500\text{ K}$
- Bildung von Festkörpern! Bsp.: $\text{TiO} \rightarrow \text{CaTiO}_3$, außerdem Silikate, Wasserdampf,...



Sterne? Spektraltyp T

- Temperatur um 1000 K und niedriger
- 2MASS 0415-0935: $T_{\text{eff}} \approx 700 \text{ K}$, $L \approx 10^{-6} L_{\odot}$
- Planetenähnliche Atmosphäre: H_2O , CH_4
- Schlechtes Wetter, d.h. Wolkenbildung bzw. Aufklärung trägt zum Spektrum bei



Zusammenfassung

- MKK ist empirisch: Klassifikation durch Vergleich mit direkt beobachtbaren Größen
- MKK ist modellunabhängig: Definition von Standardsternen statt physikalischer Parameter
- MKK ist erweiterbar: Neue Spektralklassen durch neue Standardsternen

ENDE