

Einführung in die Astronomie I

Teil 4

Peter Hauschildt

yeti@hs.uni-hamburg.de

Hamburger Sternwarte
Gojenbergsweg 112
21029 Hamburg

20. Juni 2017

Übersicht Teil 4

- ▶ Elektromagnetische Strahlung
- ▶ Messung von Helligkeiten

Elektromagnetische Strahlung

- ▶ (praktisch) alle Information über EM Strahlung
- ▶ zeigt Interferenz → Wellencharakter
- ▶ photoelektrischer Effekt → Teilchencharakter
- ▶ *Dualität*

Elektromagnetische Strahlung

- ▶ Information über
 - ▶ Richtung
 - ▶ Helligkeit
 - ▶ Polarisation
 - ▶ Spektrum

EM Spektrum !!

- ▶ Standardrelation

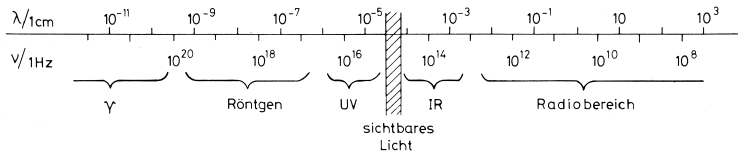
$$c = \nu\lambda$$

gilt auch für EM Strahlung

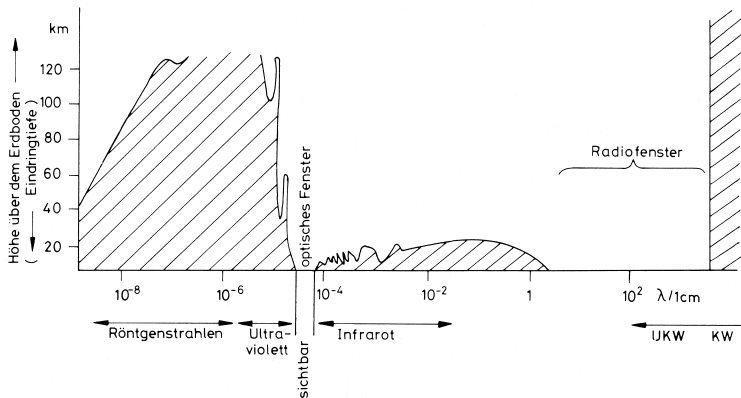
- ▶ ν in Hz
- ▶ λ in cm, nm, m, etc.
- ▶ oft auch in $10 \text{ \AA} = 1 \text{ nm}$
- ▶ verschiedene Empfänger je nach λ

EM Spektrum

► Die Bereiche des Spektrums



EM Spektrum



- ▶ Effekte der Erdatmosphäre
- ▶ Eindringtiefe der Strahlung ($1/e$)
- ▶ nur 2 Fenster

Dopplereffekt !!

- ▶ Erlaubt Messung von Radialgeschwindigkeiten
- ▶ Für $v_r \ll c$ gilt

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{\Delta\nu}{\nu} = \frac{v_r}{c}$$

- ▶ $v_r > 0 \rightarrow \lambda$ wird größer
→ Rotverschiebung
- ▶ $v_r < 0 \rightarrow \lambda$ wird kleiner
→ Blauverschiebung
- ▶ oft einzige Information über Bewegungen

Hohlraumstrahlung !!

- ▶ jedes Objekt mit $T > 0$ emittiert EMS
- ▶ im Thermodynamischen Gleichgewicht (TE):
 - ▶ hängt nur von T ab
 - ▶ folgt Stefan-Boltzmann und Wien Gesetzen
- ▶ idealisierte Situation
- ▶ Realisierung:
 - ▶ Hohlraum Ofen
 - ▶ kleine Öffnung zur Beobachtung
 - ▶ technisch schwer zu machen!

Planck'sches Gesetz !!

- ▶ TE Spektrum:

- ▶ Isotrop
- ▶ kontinuierlich

- ▶ Gesetz von Planck:

$$B_{\lambda}(\lambda, T) d\lambda = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{\exp(hc/\lambda kT) - 1} d\lambda$$

oder in ν :

$$B_{\nu}(\nu, T) d\nu = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{\exp(h\nu/kT) - 1} d\nu$$

Planck'sches Gesetz !!

- ▶ Planck'sches Wirkungsquantum

$$h = 6.63 \times 10^{-34} \text{ Js}$$

- ▶ Lichtgeschwindigkeit c
- ▶ $B_\lambda(\lambda, T)$ ist eine *Intensität*
→ Energie/Zeit/Fläche/Raumwinkel/Wellenlänge

Planck'sches Gesetz

- ▶ Einheit für $B_\lambda(\lambda, T)$:

$$\text{J m}^{-2} \text{s}^{-1} \text{sterad}^{-1} \text{m}^{-1}$$

- ▶ Einheit für $B_\nu(\nu, T)$:

$$\text{J m}^{-2} \text{s}^{-1} \text{sterad}^{-1} \text{Hz}^{-1}$$

- ▶ Beispiel: in $[\lambda, \lambda + d\lambda]$ wird in den Raumwinkel $d\omega$ die Leistung

$$B_\lambda(\lambda, T) d\lambda d\omega$$

pro Fläche dA abgestrahlt.

Grenzfälle !!

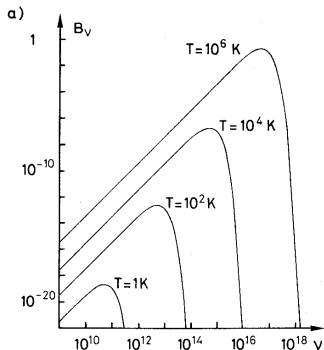
- ▶ $h\nu/kT \gg 1 \rightarrow$ Wien'sche Näherung

$$B_\nu(\nu, T) = \frac{2h\nu^3}{c^2} \exp(-h\nu/kT)$$

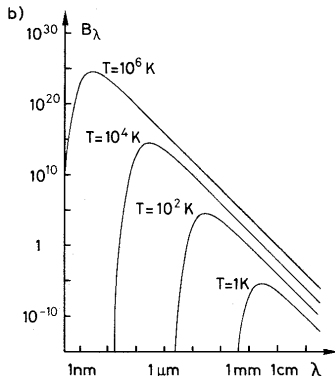
- ▶ $h\nu/kT \ll 1 \rightarrow$ Rayleigh-Jeans Näherung

$$B_\nu(\nu, T) = \frac{2\nu^2}{c^2} kT$$

Planck'sches Gesetz: Plots !!



$$B_\nu(\nu, T)$$



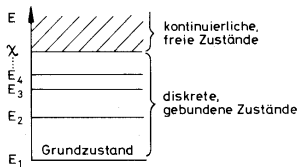
$$B_\lambda(\lambda, T)$$

Emission & Absorption !!

- ▶ Photonen “Partikel” mit Energie $h\nu$
- ▶ Photonen werden
 - ▶ erzeugt (emittiert)
 - ▶ vernichtet (absorbiert)
- ▶ Streuung: Absorption mit gleichzeitiger re-Emission in andere Richtung

EMS & Atome

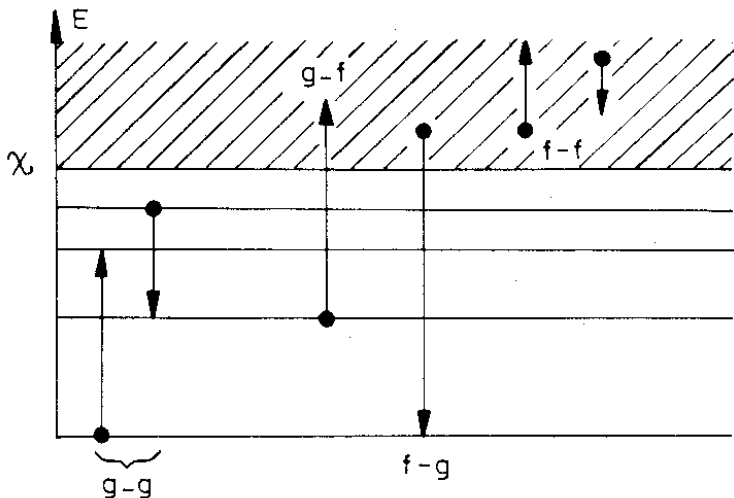
- ▶ Atome → Energieniveaus der Elektronen



- ▶ Anordnung unterschiedlich je nach Atom/Ion
- ▶ nur diskrete gebundene Level möglich
- ▶ freie Zustände Ion + Elektron kontinuierlich

EMS & Atome !!

- ▶ Mögliche Übergänge:



EMS & Atome

- ▶ Mögliche Übergänge:
 - ▶ g–g: Zwischen 2 diskreten Niveaus →
diskretes $\Delta E = h\nu!$
→ Absorptions/Emissionslinie
 - ▶ g–f: Ionisation →
Restenergie $h\nu - h\nu_0$ als E_{kin} des Elektrons
 - ▶ f–g: Rekombination →
 $E_{\text{kin}} = h\nu$
 - ▶ f–f: Bremsstrahlung →
Elektron beschleunigt im Coulomb-Feld des Atoms

EMS & Atome

- ▶ *verboten*: Übergangswahrscheinlichkeit sehr klein
- ▶ *metastabiles Niveau*: Nur verbotene Übergänge “nach unten”

Synchrotron Strahlung

- ▶ Elektron im Magnetfeld \rightarrow
Lorentz Kraft

$$\mathbf{F} = e\mathbf{v} \times \mathbf{B}$$

- ▶ Elektron beschleunigt
- ▶ \mathbf{v} senkrecht zu $\mathbf{B} \rightarrow$ Kreisbahn
- ▶ sonst Spirale

Synchrotron Strahlung

- ▶ Bewegung um B-Feld mit *Larmor Frequenz*

$$\omega = \frac{eB}{m}$$

und *Larmor Radius*

$$r = \frac{v}{\omega} = \frac{vm}{eB}$$

Synchrotron Strahlung

- ▶ Elektronen beschleunigt (Kreisbahn!) → Abstrahlung von Energie
- ▶ → *Synchrotronstrahlung!*
- ▶ $v \approx c$ → scharf gebündelt, linear polarisiert
- ▶ kann Radio bis X-rays abdecken
- ▶ Maximale Intensität bei Frequenz

$$\nu_{\max} = 4.6 \times 10^{-10} B E^2$$

- ▶ ν_{\max} : in Hz
- ▶ B : Magnetfeldstärke in Tesla
- ▶ E kinet. Energie der Elektronen in eV

Synchrotron Strahlung

- ▶ dichter Wald von Linien
- ▶ → verschmiert zu Kontinuum
- ▶ Elektronen haben Energieverteilung, z.B.

$$dN_e \propto E^{-\gamma} dE$$

- ▶ → großer Frequenzbereich!

Helligkeiten !!

- ▶ Definitionen:
 - ▶ *Scheinbare Helligkeit*
Helligkeit wie gemessen am Himmel
 - ▶ *Absolute Helligkeit*
auf Entfernung korrigierte Helligkeit, gibt Maß für Leuchtkraft
- ▶ hängt von Empfindlichkeit des Empfängers und/oder Filtern ab!

Helligkeiten !!

- ▶ Im Prinzip sollten Helligkeiten in physikalischen Standardeinheiten gemessen werden
- ▶ z.B. Strahlungsfluss F_λ
- ▶ Astronomie historisch →
 - ▶ Scheinbare Helligkeit m
 - ▶ Absolute Helligkeit M
- ▶ Einheit: 1^m
 - ▶ Größenklasse
 - ▶ *magnitudo*
 - ▶ z.B. *Stern 2ter Größe*

Helligkeiten

- ▶ Ursprung: Antike!
 - ▶ Sterne in 6 Größenklassen unterteilt
 - ▶ 1. Klasse → hellste Sterne
 - ▶ 6. Klasse → schwächste (sichtbare) Sterne
 - ▶ bei Beobachtung mit Auge →
visuelle Helligkeit

Helligkeiten !!

- ▶ Skala der Größenklassen:
 - ▶ logarithmisch (wie Auge!)
 - ▶ Strahlungsflüsse s_1 und $s_2 \rightarrow$
Differenz der Größenklassen

$$m_1 - m_2 = -2.5^m \log_{10}(s_1/s_2)$$

- ▶ bei bekanntem m_1, m_2 :

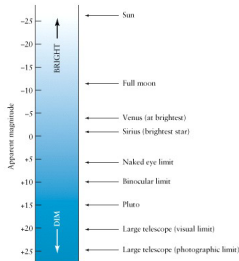
$$s_1/s_2 = 10^{-(m_1-m_2)/2.5^m}$$

Helligkeiten

- ▶ $\Delta m = 1^m \rightarrow s_1/s_2 = 10^{0.4} \approx 2.512$
- ▶ $\Delta m = 5^m \rightarrow s_1/s_2 \approx 100$
- ▶ Sonne/schwächster Stern \rightarrow
 $\Delta m = 55^m \rightarrow$ Faktor 10^{22} in den Flüssen!

Helligkeiten

- ▶ Nullpunkt (und Faktor 2.5!)
→
≈ kompatibel mit antiker Skala!
- ▶ Polaris → 2.12^m
- ▶ Sirius → -1.6^m
- ▶ Sonne → -26.8^m
- ▶ Grenze des Auges → 6^m
- ▶ Grenze Teleskope → 24^m



Helligkeiten

- ▶ Verbindung zu physikalischen Einheiten:

- ▶ $\lambda = 550 \text{ nm}$, $\Delta\lambda = 0.1 \text{ nm}$, oberhalb Erdatmosphäre

$$s = 10^{-9-0.4m} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1} = 10^{-12-0.4m} \text{ J m}^{-2} \text{ s}^{-1}$$

- ▶ Photonenfluss:

- ▶ $500 \text{ nm} \leq \lambda \leq 600 \text{ nm}$
 - ▶ $m = 0^m \rightarrow 10^6 \text{ Photonen/cm}^2/\text{s}$
 - ▶ $m = 20^m \rightarrow 10^{-2} \text{ Photonen/cm}^2/\text{s}$

Helligkeiten

- ▶ Größenklassen verwendet in optischer Astronomie
- ▶ Radio/IR:
 - ▶ Strahlungsfluss direkt verwendet
 - ▶ Einheit: *Jansky* [Jy]

$$1 \text{ Jy} = 10^{-26} \text{ W m}^{-2} \text{ Hz}^{-1}$$

- ▶ γ /Röntgen:
 - ▶ Fluss in $\text{erg/cm}^2/\text{s/cm}$
 - ▶ Photonenfluss in $\text{Photonen/cm}^2/\text{s/keV}$

Helligkeitssysteme !!

- ▶ Auge/Empfänger nur empfindlich über λ Bereiche
- ▶ \rightarrow Filterfunktion $P(\lambda)$
- ▶ auch: Empfängerfunktion, Empfindlichkeitsfunktion
- ▶ schließt auch Filter der Erdatmosphäre ein

Helligkeitssysteme !!

- ▶ ankommender Fluss $S(\lambda) \rightarrow$

$$s = \int_0^{\infty} S(\lambda)P(\lambda) d\lambda$$

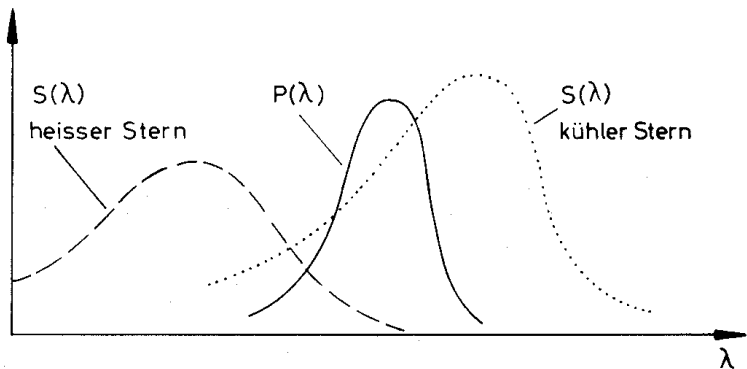
- ▶ in Größenklassen:

$$m = -2.5^m \log_{10} \left(\int_0^{\infty} S(\lambda)P(\lambda) d\lambda \right) + \text{const.}$$

- ▶ const. legt Nullpunkt fest!

Helligkeitssysteme !!

- ▶ Ergebnis hängt stark von $S(\lambda)$ ab

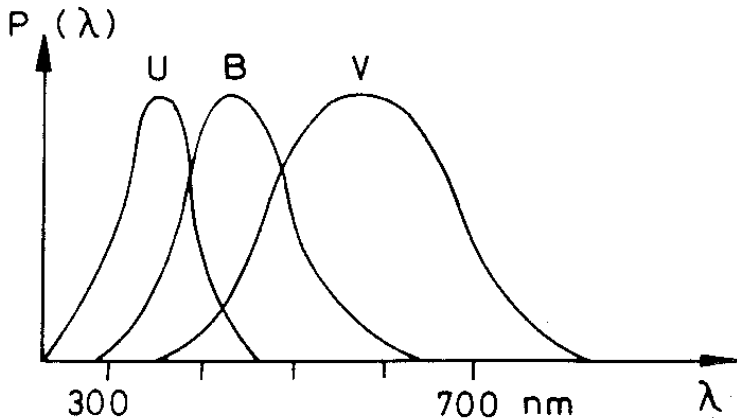


Helligkeitssysteme

- ▶ Ergebnis hängt auch von $P(\lambda)$ ab
- ▶ Jeder Satz von $P(\lambda)$ definiert System von Helligkeiten
 - ▶ *visuelle Helligkeit* $m_{\text{vis}} \rightarrow P(\lambda)$ wie Auge
 - ▶ *photographische Helligkeit* $m_{\text{pg}} \rightarrow P(\lambda)$ wie Standard Photoplatte (blauempfindlich)

Helligkeitssysteme

- ▶ Systematische Systeme mit festen Filtern $P(\lambda)$
- ▶ Beispiel UBV System



Helligkeitssysteme !!

- ▶ UBV System
 - ▶ U → Ultraviolett (360 nm)
 - ▶ B → Blau (420 nm)
 - ▶ V → Visuell (540 nm)
 - ▶ $m_{U, B, V} = U, B, V$
- ▶ Nullpunkte →
 $U = B = V$ für Standardspektrum (A0V Stern)
- ▶ daher verschiedene const. für U, B, & V!

Helligkeitssysteme

- ▶ Bolometrische Helligkeit m_{bol}

- ▶ $P(\lambda) = \text{const.} \rightarrow$

$$m_{\text{bol}} = -2.5^{\text{m}} \log_{10} \left(\int_0^{\infty} S(\lambda) d\lambda \right) + \text{const.}$$

- ▶ const. so das $m_{\text{bol}} = V$ für Sterne wie die Sonne (G2V)
- ▶ Bolometrische Korrektur

$$\text{BC} = m_V - m_{\text{bol}}$$

- ▶ $\text{BC} = 0$ für Sonne et al.
 - ▶ Sonne: $\lambda_{\text{max}} \approx V\text{-band!}$
 - ▶ daher i.A. $\text{BC} > 0$ (einige Ausnahmen)

Farben !!

- ▶ Farbe eines Sterns hängt von $S(\lambda)$ ab
- ▶ Definition messbarer Farben \rightarrow Farbindex

$$FI = m_{\text{kurzwellig}} - m_{\text{langwellig}}$$

- ▶ z.B. $U - B$, $B - V$ etc.
- ▶ $FI \equiv 0$ für A0V
- ▶ $B - V < 0 \rightarrow s_B > s_V \rightarrow$ blauer
- ▶ $B - V > 0 \rightarrow s_B < s_V \rightarrow$ rötler

Farben !!

- ▶ Interstellare Materie → verfälscht intrinsische Farben
- ▶ Farbexzess

$$E_{ij} = (m_i - m_j) - (m_i - m_j)_0$$

- ▶ $(m_i - m_j)$: gemessener FI
- ▶ $(m_i - m_j)_0$: intrinsischer (wahrer) FI
- ▶ i, j : U, B, V etc.

absolute Helligkeit !!

- ▶ Helligkeit nimmt mit Entfernung r wie $1/r^2$ ab
- ▶ um Sterne zu vergleichen muss dafür korrigiert werden
- ▶ Definition: Absolute Helligkeit M :
gemessene Helligkeit wenn Stern in $r_0 = 10$ pc Entfernung
- ▶ Für 2 Sterne in je 10 pc Abstand von der Sonne gilt

$$M_1 - M_2 = -2.5^m \log_{10}(S_1/S_2)$$

Entfernungsmodul !!

- ▶ $m - M$ hängt von Entfernung des Sterns ab
- ▶ $S/s = (r/r_0)^2$
- ▶ daher

$$m - M = -2.5^m \log_{10}(s/S) = 5^m \log_{10}(r/r_0)$$

oder

$$m - M = 5^m \log_{10}(r/10 \text{ pc}) = 5^m \log_{10}(r/1 \text{ pc}) - 5^m$$

- ▶ $r = 1 \text{ pc} \rightarrow m - M = -5^m$
- ▶ $r = 100 \text{ pc} \rightarrow m - M = 5^m$ etc.
- ▶ gilt entsprechend für jedes Helligkeitssystem

Entfernungsmodul !!

- ▶ absolute bolometrische Helligkeit der Sonne:

$$M_{\text{bol},\odot} = 4.72^{\text{m}}$$

- ▶ daher

$$M_{\text{bol}} = 4.72^{\text{m}} - 2.5^{\text{m}} \log_{10}(L/L_{\odot})$$