

Sterrenkunde Hoofdstuk 1: Afstand, tijd en licht

Marc van der Sluys

Universiteit Utrecht, Nikhef



**Universiteit
Utrecht**

<https://www.nikhef.nl/~sluys/>

sluys@nikhef.nl

Nikhef

Dienstmededelingen

Dienstmededelingen
Sterrenkunde?
Ruwe indeling

De Zon

Referentiester

Afstanden

Parallax

Helderheid

Flux, lichtkracht
Fotometrie

Spectra

Planckspectra
Spectraallijnen
Sterspectra

Spectraaltypen

Spectraaltypen
Helderheidsklassen

Metalliciteit

Metalliciteit

Groepen van
sterren

M–R–L (MS)
HRD nabije sterren
Clusters
Leeftijden
Bolhopen

- 1 Dienstmededelingen
 - Dienstmededelingen
 - Sterrenkunde?
 - Ruwe indeling

- 2 De Zon

- 3 Afstanden

- 4 Helderheid

- 5 Spectra

- 6 Spectraaltypen

- 7 Metalliciteit

- 8 Groepen van sterren

Dienstmededelingen

Dienstmededelingen

Sterrenkunde?

Ruwe indeling

De Zon

Referentiester

Afstanden

Parallax

Helderheid

Flux, lichtkracht

Fotometrie

Spectra

Planckspectra

Spectraallijnen

Sterspectra

Spectraaltypen

Spectraaltypen

Helderheidsklassen

Metalliciteit

Metalliciteit

Groepen van
sterren

M-R-L (MS)

HRD nabije sterren

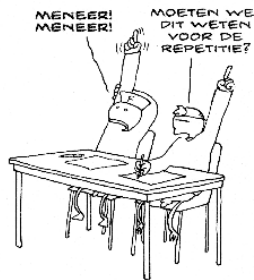
Clusters

Leeftijden

Bolhopen

- Schema (werk)colleges vergelijkbaar met optica-deel
 - 8 colleges (2 uur), 8 werkcolleges (2 of 3 uur)
- Totale inspanning half vak: $3.75 \text{ EC} \times 28 \text{ uur/EC} = 105 \text{ uur}$
 - Contacturen: $9 \text{ uur per week} \times 4 \text{ weken} + \text{tentamen} = 39 \text{ uur}$
 - $\rightarrow$ zelfstudie-uren: $66 \text{ uur/5 weken} = 13.2 \text{ uur/week}$ (63%)
- Is het voor een cijfer? — **Ja**
 - maar het is vooral om een fysicus van je te maken!
 - tentamen en cijfer zijn een **middel** (tussendoeltje), niet het **einddoel**
- Werkcolleges hebben onderwerpen (topics)
 - houd je aan de onderwerpen voor de gegeven data!
 - oefenen van de stof + verdieping
 - na het werkcollege komen de **antwoorden** beschikbaar

FOKKE & SUKKE
GINGEN BIJ DE RECINIE NAAR HET LESJE
VAN HUN OUDE LERAAR NEDERLANDS



R.G.v.T

Fokke en Sukke scheurkalender, 2025-05-29

Een verbluffende kijk in een kraamkamer van sterren, een foto met meer dan 50.000 sterrenstelsels, een enorme halo van donkere materie. Astronomen zijn

Dienstmededelingen

Dienstmededelingen

Sterrenkunde?

Ruwe indeling

De Zon

Referentiester

Afstanden

Parallax

Helderheid

Flux, lichtkracht

Fotometrie

Spectra

Planckspectra

Spectraallijnen

Sterspectra

Spectraaltypen

Spectraaltypen

Helderheidsklassen

Metalliciteit

Metalliciteit

Groepen van sterren

M–R–L (MS)

HRD nabije sterren

Clusters

Leeftijden

Bolhopen

- Wat gebeurt er in de overige $1 - (6 \times 10^{-59})$ van ons universum?
- **Extreem natuurkundelab!** Extreme:
 - afstanden
 - dichtheden
 - temperaturen
 - energieën
- Natuurkunde-experimenten met extreem weinig of oncontroleerbare data
 - gebeurtenissen worden **niet ontworpen of gepland**
 - gebeurtenissen worden **niet herhaald**
 - (te?) weinig data — **maar wat kunnen we nog wel???**
- Doel van deze cursus
 - sterrenkunde is **toegepaste fysica**: stralingsleer, gasleer, mechanica, ...
 - leren **denken als een sterrenkundige**: wat kunnen we *wel* met deze data?
→ **werkcollege**
 - plaatjes kijken? — *nauwelijks*...
 - leuk? — *hopelijk*...

Dienstmededelingen

Dienstmededelingen

Sterrenkunde?

Ruwe indeling

De Zon

Referentiester

Afstanden

Parallax

Helderheid

Flux, lichtkracht

Fotometrie

Spectra

Planckspectra

Spectraallijnen

Sterspectra

Spectraaltypen

Spectraaltypen

Helderheidsklassen

Metalliciteit

Metalliciteit

Groepen van sterren

M–R–L (MS)

HRD nabije sterren

Clusters

Leeftijden

Bolhopen

- 1 **Afstanden, licht en tijd:** helderheid, flux, spectra, HRD, ...
- 2 **Gassen en straling:** hydrostatisch evenwicht, gasdruk, stralingsdruk, convectie, degeneratie, kernfusie, ...
- 3 **Sterstructuur en sterevolutie**
- 4 **Dubbelsterren**
- 5 **Zwaartekrachtgolven** (van compacte dubbelsterren)
- 6 **(Sterrenstelsels)**
- 7 **Kosmologie**

Dienstmededelingen

Dienstmededelingen

Sterrenkunde?

Ruwe indeling

De Zon

Referentiester

Afstanden

Parallax

Helderheid

Flux, lichtkracht

Fotometrie

Spectra

Planckspectra

Spectraallijnen

Sterspectra

Spectraaltypen

Spectraaltypen

Helderheidsklassen

Metalliciteit

Metalliciteit

Groepen van sterren

M–R–L (MS)

HRD nabije sterren

Clusters

Leeftijden

Bolhopen

- Woensdag 4 juni wordt er tijdens het college gefilmd in Pangea
- UU heeft een gerechtvaardigd belang ter promotie van universiteit en onderwijs
- U heeft het recht om niet herkenbaar in beeld te komen
- U krijgt nog te horen voor welk deel van de zaal dat het geval is

Afstand, tijd en
licht

Dienstmededelingen

- Dienstmededelingen
- Sterrenkunde?
- Ruwe indeling

De Zon

- Referentiester

Afstanden

- Parallax

Helderheid

- Flux, lichtkracht
- Fotometrie

Spectra

- Planckspectra
- Spectraallijnen
- Sterspectra

Spectraaltypen

- Spectraaltypen
- Helderheidsklassen

Metalliciteit

- Metalliciteit

Groepen van
sterren

- M–R–L (MS)
- HRD nabije sterren
- Clusters
- Leeftijden
- Bolhopen

- 1 Dienstmededelingen
- 2 De Zon
 - Referentiester
- 3 Afstanden

- 4 Helderheid
- 5 Spectra
- 6 Spectraaltypen
- 7 Metalliciteit
- 8 Groepen van sterren

Dienstmededelingen

Dienstmededelingen

Sterrenkunde?

Ruwe indeling

De Zon

Referentiester

Afstanden

Parallax

Helderheid

Flux, lichtkracht

Fotometrie

Spectra

Planckspectra

Spectraallijnen

Sterspectra

Spectraaltypen

Spectraaltypen

Helderheidsklassen

Metalliciteit

Metalliciteit

Groepen van
sterren

M–R–L (MS)

HRD nabije sterren

Clusters

Leeftijden

Bolhopen

Algemeen

- We schrijven **log** voor $^{10}\log$ ($x \equiv 10^{\log x}$) (b.v. voor grootheden die meerdere orden van grootte beslaan);
- We schrijven **ln** voor $^e\log$ ($x \equiv e^{\ln x}$) (als dit al voorkomt).

Lichtkracht en flux

Lichtkracht **L**: **vermogen** (van een ster):

- $[L] = W$ of $L_{\odot}$.

Flux **f**, **F** (ook *stralingsflux*): **intensiteit** of **irradiantie**: vermogen (van straling) door een oppervlak:

- f : gemeten op Aarde; F : aan het steroppervlak;
- $[f] = [F] = W\ m^{-2}$.

Dienstmededelingen

Dienstmededelingen
Sterrenkunde?
Ruwe indeling

De Zon

Referentiester

Afstanden

Parallax

Helderheid

Flux, lichtkracht
Fotometrie

Spectra

Planckspectra
Spectraallijnen
Sterspectra

Spectraaltypen

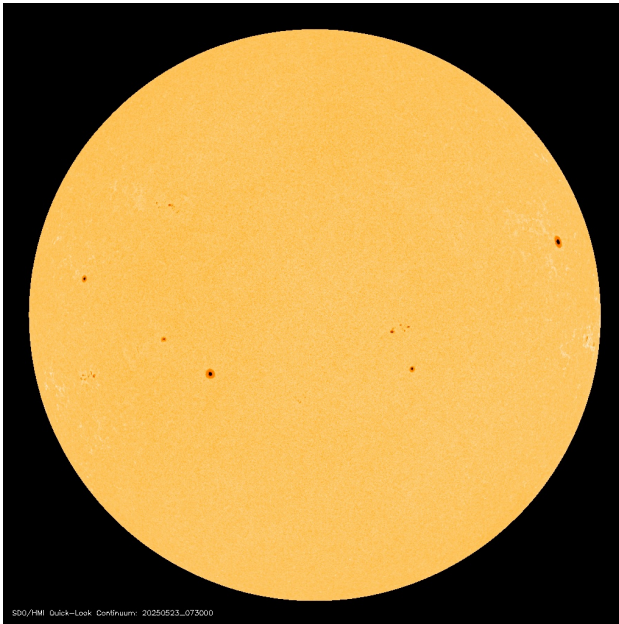
Spectraaltypen
Helderheidsklassen

Metalliciteit

Metalliciteit

Groepen van
sterren

M–R–L (MS)
HRD nabije sterren
Clusters
Leeftijden
Bolhopen

**Afstand:**

1 AU $\approx$ 150 miljoen km

***Schijnbare* straal:**

$r_{\odot} \approx 16'$ **hoek!**

Zonneconstante:

$f_{\odot} \approx 1360 \text{ W/m}^2$

Leeftijd:

$\tau_{\odot} \approx 4.5 \text{ Gyr}$

Dienstmededelingen

Dienstmededelingen

Sterrenkunde?

Ruwe indeling

De Zon

Referentiestier

Afstanden

Parallax

Helderheid

Flux, lichtkracht

Fotometrie

Spectra

Planckspectra

Spectraallijnen

Sterspectra

Spectraaltypen

Spectraaltypen

Helderheidsklassen

Metalliciteit

Metalliciteit

Groepen van sterren

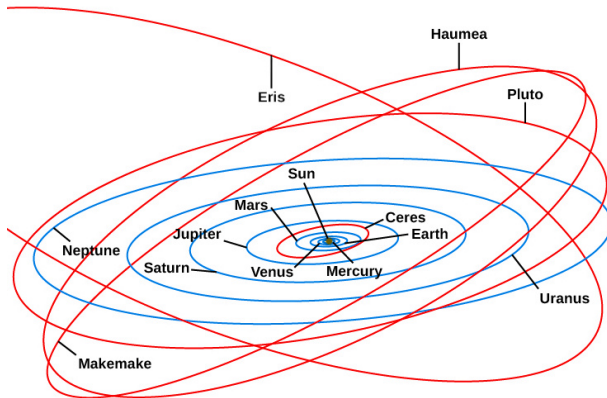
M-R-L (MS)

HRD nabije sterren

Clusters

Leeftijden

Bolhopen



Bron: Douglas College and OpenStax

Derde wet van Kepler

$$\frac{GM}{a^3} = \left(\frac{2\pi}{P}\right)^2$$

$$\left(\frac{a}{\text{A.U.}}\right)^3 = \left(\frac{P}{\text{jaar}}\right)^2$$

Astronomische eenheid
(*astronomical unit*):

1 A.U. $\approx$ 150 miljoen km

(uit baanperiodes, Kepler en radar)

- 1 Kepler geeft de **verhoudingen** binnen het Zonnestelsel
- 2 sinds ~ 1960 geven radarmetingen van de afstand tot Venus en Mars geven de **absolute schaal**

Dienstmededelingen

Dienstmededelingen

Sterrenkunde?

Ruwe indeling

De Zon

Referentiester

Afstanden

Parallax

Helderheid

Flux, lichtkracht

Fotometrie

Spectra

Planckspectra

Spectraallijnen

Sterrspectra

Spectraaltypen

Spectraaltypen

Helderheidsklassen

Metalliciteit

Metalliciteit

Groepen van sterren

M–R–L (MS)

HRD nabije sterren

Clusters

Leeftijden

Bolhopen

- $1 \text{ A.U.} \approx 150 \text{ miljoen km} (\approx 8.3 \text{ lichtminuten})$

- Schijnbare straal: $r_{\odot} \approx 16' \approx 16/60^{\circ} \approx 1/215 \text{ rad} \rightarrow$
 $R_{\odot} = 1 \text{ A.U.} \cdot \tan r_{\odot} \approx 696.000 \text{ km} \approx 109 R_{\oplus}$

- $M_{\odot} \approx \left(\frac{2\pi}{1 \text{ jaar}} \right)^2 \frac{(1 \text{ A.U.})^3}{G} \approx 1.99 \times 10^{30} \text{ kg} \approx 333.000 M_{\oplus}$

Dienstmededelingen

Dienstmededelingen
Sterrenkunde?
Ruwe indeling

De Zon

Referentiester

Afstanden

Parallax

Helderheid

Flux, lichtkracht
Fotometrie

Spectra

Planckspectra
Spectraallijnen
Sterspectra

Spectraaltypen

Spectraaltypen
Helderheidsklassen

Metalliciteit

Metalliciteit

Groepen van sterren

M–R–L (MS)
HRD nabije sterren
Clusters
Leeftijden
Bolhopen

- Zonneconstante (loodrechte flux aan top van de atmosfeer): $f_{\odot} \approx 1370 \text{ W/m}^2$
 - wat we hier **flux** noemen heet in de optica **intensiteit** (en officieel *irradiantie*)
- $L = 4\pi d^2 f \rightarrow L_{\odot} = 4\pi (1 \text{ A.U.})^2 f_{\odot} \approx 3.85 \times 10^{26} \text{ W}$
- $L_{\odot} = 4\pi R_{\odot}^2 f_{\odot}$; $F = \sigma T_{\text{eff}}^4 \rightarrow f_{\odot} = \sigma T_{\text{eff},\odot}^4 \rightarrow T_{\text{eff},\odot} \approx 5780 \text{ K}$
(Wet van Stefan-Boltzmann)
- Leeftijd: $\approx 4.5 \text{ Gyr}$ (uit meteorieten! — zie H 2.3)
- Energiebron:
 - ~~Chemisch? → 16 kyr~~
 - Nucleair: H-fusie:
 - efficiëntie H-fusie: $\sim 7.2\%$;
 - $\sim 10\%$ van de Zon dicht en heet genoeg;
 - $\sim 70\%$ is waterstof:
 - $\rightarrow E \sim 0.0072 \cdot 0.7 \cdot 0.1 M_{\odot} c^2 \rightarrow \sim 7.5 \text{ Gyr}$

Afstand, tijd en licht

Dienstmededelingen

- Dienstmededelingen
- Sterrenkunde?
- Ruwe indeling

De Zon

- Referentiester

Afstanden

- Parallax

Helderheid

- Flux, lichtkracht
- Fotometrie

Spectra

- Planckspectra
- Spectraallijnen
- Sterspectra

Spectraaltypen

- Spectraaltypen
- Helderheidsklassen

Metalliciteit

- Metalliciteit

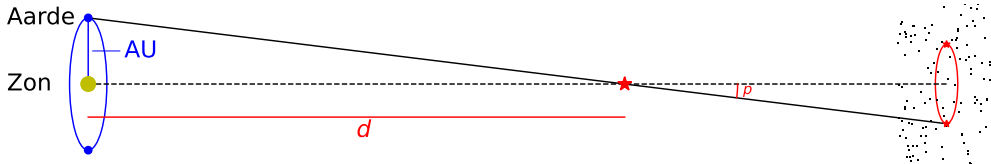
Groepen van sterren

- M–R–L (MS)
- HRD nabije sterren
- Clusters
- Leeftijden
- Bolhopen

- 1 Dienstmededelingen
- 2 De Zon
- 3 Afstanden
 - Parallax

- 4 Helderheid
- 5 Spectra
- 6 Spectraaltypen
- 7 Metalliciteit
- 8 Groepen van sterren

Trigonometrische parallax: afstanden tot nabije sterren (H 1.2)



- $\tan p = \frac{1 \text{ A.U.}}{d}$

- een **parallax** van $1''$ komt *per definitie* overeen met een afstand van **1 parsec (pc)**:

- $\frac{1 \text{ A.U.}}{1 \text{ pc}} \equiv \tan 1'' \sim 1'' \text{ (in rad)} \rightarrow$

- $1 \text{ pc} = \frac{1'' \times 3600''/^{\circ} \times 360^{\circ}}{2\pi} \text{ A.U.} \simeq 3.086 \times 10^{16} \text{ m} \sim 3.26 \text{ lichtjaar}$

- richting pool: $\sim$ cirkelvormig; lagere breedte: plattere ellips; bij ecliptica: recht lijntje
- Hipparcos (1989–1993): $\sim 118\text{k}$ sterren: $0.001''$ + 2.5M sterren “lagere precisie”
- Gaia (2013–2025): $\sim 1.8 \times 10^9$ objecten, met $20 \mu\text{as}$, $\Delta p \lesssim 10\%$ tot $d \sim 5 \text{ kpc}$

	Ster	p ($''$)	d (pc)	μ ($''$ /jr)	$\log f_V$ (W/m ² /nm)	$\log L_V$ ($L_{V,\odot}$)	$\log f_V/f_B$	SpT	straal ($R_\odot$)
Dienstmededelingen									
Dienstmededelingen									
Sterrenkunde?									
Ruwe indeling									
De Zon	Zon				0.30	$\equiv 0$	0.004	G2V	$\equiv 1$
Referentiester	Proxima Cen	0.7716	1.296	3.853	−14.81	−4.26	0.46	M5Ve	0.146(11)
Afstanden	α^2 Centauri	0.7424	1.347	3.724	−10.95	−0.36	0.10	K1V	0.865(5)
Parallax	α^1 Centauri	0.7424	1.347	3.710	−10.40	0.19	0.02	G2V	1.224(3)
Helderheid	Barnards ster	0.5482	1.824	10.359	−14.22	−3.37	0.36	sdM4	
Flux, lichtkracht	CN Leonis	0.4255	2.35	4.696	−15.82	−4.75	0.54	M5.5	
Fotometrie									
Spectra	Lalande 21185	0.3926	2.547	4.801	−13.40	−2.26	0.34	M2V	
Planckspectra	UV Ceti	0.3817	2.62	3.328	−15.42	−4.25	0.48	M5.5e	
Spectraallijnen									
Sterspectra	Sirius	0.3792	2.637	1.339	−9.83	1.34	−0.26	A0m...	1.703(9)
Spectraaltypen	Ross 154	0.3367	2.970	0.665	−14.56	−3.28	0.34	M3.5Ve	
Spectraaltypen	HH And	0.3155	3.17	1.588	−15.32	−3.99	0.50	M5	
Helderheidsklassen									
Metalliciteit	ϵ Eridani	0.3109	3.216	0.975	−11.90	−0.55	0.09	K2V	0.744(11)
Metalliciteit									
Groepen van sterren	1HD 217987	0.3053	3.276	6.897	−13.35	−1.98	0.33	M2V	
Groepen van sterren	EZ Aquarii	0.3003	3.33	3.254	−15.28	−3.90	0.52	M5.5	
M–R–L (MS)	FI Virginis	0.2981	3.355	1.361	−14.86	−3.48	0.43	M4.5V	
HRD nabije sterren									
Clusters	161 Cygni A	0.2868	3.487	5.297	−12.49	−1.07	0.16	K5V	
Leeftijden	Procyon	0.2846	3.514	1.259	−10.57	0.85	−0.09	F5IV-V	2.060(20)
Bolhopen									

Afstand, tijd en licht

Dienstmededelingen

Dienstmededelingen
Sterrenkunde?
Ruwe indeling

De Zon

Referentiester

Afstanden

Parallax

Helderheid

Flux, lichtkracht
Fotometrie

Spectra

Planckspectra
Spectraallijnen
Sterspectra

Spectraaltypen

Spectraaltypen
Helderheidsklassen

Metalliciteit

Metalliciteit

Groepen van sterren

M–R–L (MS)
HRD nabije sterren
Clusters
Leeftijden
Bolhopen

1 Dienstmededelingen

2 De Zon

3 Afstanden

4 Helderheid
• Flux, lichtkracht

• Fotometrie

5 Spectra

6 Spectraaltypen

7 Metalliciteit

8 Groepen van sterren

Dienstmededelingen

Dienstmededelingen

Sterrenkunde?

Ruwe indeling

De Zon

Referentiester

Afstanden

Parallax

Helderheid

Flux, lichtkracht

Fotometrie

Spectra

Planckspectra

Spectraallijnen

Sterspectra

Spectraaltypen

Spectraaltypen

Helderheidsklassen

Metalliciteit

Metalliciteit

Groepen van sterren

M–R–L (MS)

HRD nabije sterren

Clusters

Leeftijden

Bolhopen

Flux f , F (ook *stralingsflux*): **intensiteit** of **irradiantie**: vermogen (van straling) door een oppervlak:

- f : gemeten op Aarde; F : aan het steroppervlak;
- $[f] = [F] = \text{W m}^{-2}$.

Lichtkracht L : **vermogen** (van een ster):

- $[L] = \text{W}$ of $L_{\odot}$.

Frequentie ν : symbool: ν (i.p.v. f):

- $[\nu] = \text{Hz}$.

monochromatisch: **bij gegeven golflengte(bandje)**:

- subscript λ : $f_{\lambda}, F_{\lambda}, L_{\lambda}$; subscript b.v. V,(B,U,R,I): f_V, F_V, L_V
- $[X_{\lambda}] = [X] \text{ nm}^{-1}$; $[X_V] = [X] \text{ of } [X] \text{ nm}^{-1}$.

bolometrisch: geïntegreerd **over het gehele spectrum**:

- geen subscript: f, F, L .

Magnitude: Griekse empirische “omgekeerde grootten” 1–6 ($-10 \gtrsim \log f \gtrsim -13$):

- helderste ster na de Zon: Sirius: $m \approx -1.4$ ($\log f \approx -9.8$)
- zwakste sterren met blote oog: $m \sim +6$ ($\log f \approx -12.8$)
- het oog blijkt *logaritmisch* te werken: $m \propto -\log f$

Dienstmededelingen

Dienstmededelingen

Sterrenkunde?

Ruwe indeling

De Zon

Referentiester

Afstanden

Parallax

Helderheid

Flux, lichtkracht

Fotometrie

Spectra

Planckspectra

Spectraallijnen

Sterrspectra

Spectraaltypen

Spectraaltypen

Helderheidsklassen

Metalliciteit

Metalliciteit

Groepen van sterren

M–R–L (MS)

HRD nabije sterren

Clusters

Leeftijden

Bolhopen

- Bolometrische flux: $f \equiv \int_0^\infty f_\lambda d\lambda$; $F \equiv \int_0^\infty F_\lambda d\lambda$

- (Bolometrische) lichtkracht: $L = 4\pi R^2 F = 4\pi d^2 f$

- f en L spannen vele ordes van grootte $\rightarrow$ vaak worden $\log f$ en $\log L$ gebruikt

- f_λ, L_λ : monochromatisch; f, L : bolometrisch $\rightarrow$ **werkcollege**

De twaalf helderste en andere bekende sterren (H 1.3.1)

Afstand, tijd en
licht

Dienstmededelingen

Dienstmededelingen

Sterrenkunde?

Ruwe indeling

De Zon

Referentiester

Afstanden

Parallax

Helderheid

Flux, lichtkracht

Fotometrie

Spectra

Planckspectra

Spectraalijnen

Sterspectra

Spectraaltypen

Spectraaltypen

Helderheidsklassen

Metalliciteit

Metalliciteit

Groepen van
sterren

M–R–L (MS)

HRD nabije sterren

Clusters

Leeftijden

Bolhopen

Ster	code	$\log f_V$ (W/m ² /nm)	$\log L_V$ ($L_{V,\odot}$)	$\log f_V/f_B$	SpT	d (pc)
Sirius	α Canis Majoris	−9.83	1.34	−0.26	A0m...	2.637(11)
Canopus	α Carinae	−10.16	4.14	−0.20	F0Ib	95(5)
Arcturus	α Bootis	−10.39	2.05	0.23	K2IIIp	11.26(7)
	α^1 Centauri	−10.40	0.19	0.02	G2V	1.347(3)
Wega	α Lyrae	−10.42	1.69	−0.26	A0Vvar	7.78(2)
Capella	α Aurigae	−10.44	2.12	0.05	G5IIIe	13.12(8)
Rigel	β Orionis	−10.48	4.60	−0.28	B8Ia	265(24)
Procyon	α Canis Minoris	−10.57	0.85	−0.09	F5IV-V	3.514(16)
Achernar	α Eridani	−10.59	3.03	−0.33	B3Vp	42.8(10)
Betelgeuze	α Orionis	−10.59	3.98	0.34	M2Ib	153(19)
	β Centauri	−10.65	4.09	−0.36	B1III	120(7)
Altair	α Aquilae	−10.71	1.04	−0.18	A7IV-V	5.130(15)
Aldebaran	α Tauri	−10.76	2.18	0.35	K5III	20.43(32)
Antares	α Scorpii	−10.83	4.04	0.48	M1Ib+B2.5V	170(29)
Deneb	α Cygni	−10.91	5.42	−0.23	A2Ia	433(60)
Mira Ceti ¹	α Ceti	−11.32	1.55	0.30	M5e-M9e	91(10)
Bellatrix	γ Orionis	−11.06	3.01	−0.35	B2III	77.4(31)

¹ bij maximale helderheid

Afstand, tijd en licht

Het elektromagnetische spectrum

Dienstmededelingen

- Dienstmededelingen
- Sterrenkunde?
- Ruwe indeling

De Zon

- Referentiester

Afstanden

- Parallax

Helderheid

- Flux, lichtkracht

Fotometrie

Spectra

- Planckspectra
- Spectraallijnen
- Sterspectra

Spectraaltypen

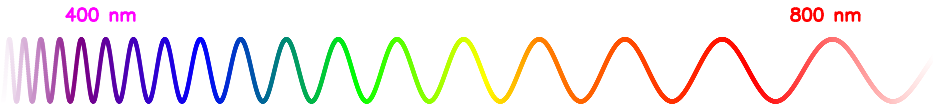
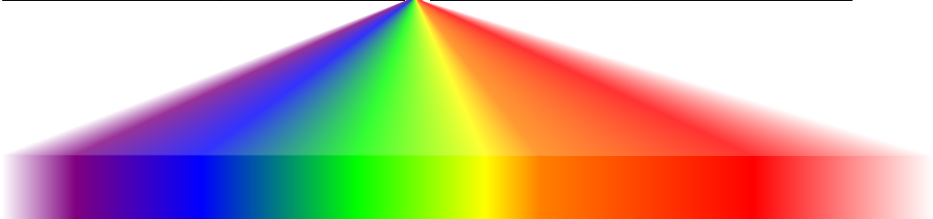
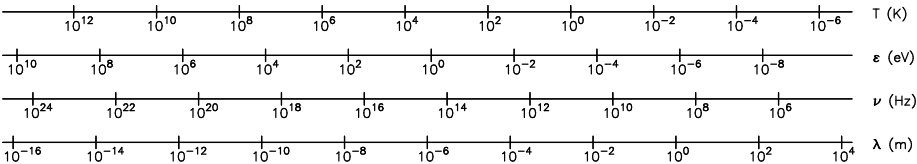
- Spectraaltypen
- Helderheidsklassen

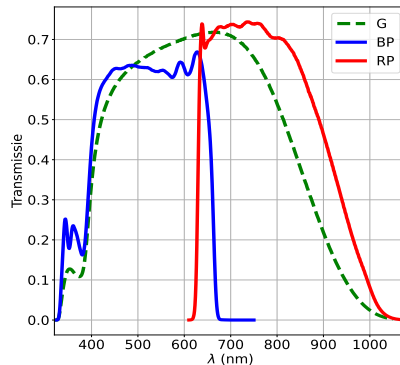
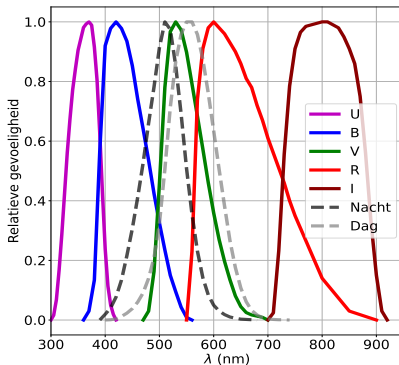
Metalliciteit

- Metalliciteit

Groepen van sterren

- M–R–L (MS)
- HRD nabije sterren
- Clusters
- Leeftijden
- Bolhopen





- fotometrie: “goedkope spectroscopie”
- flux altijd gemeten bij een **eindige bandbreedte**
- standaardsysteem (Johnson): **UV**, **B**lue, **V**isible (groen; ~ 550 nm), **R**ed, **I**nfrared
 - f_B , f_V , (m_V) etc.
- **Kleur** $\equiv$ ratio van fluxen:
 - $f_V/f_B \equiv$ verhouding **blauw** over **groen**
 - lage f_V/f_B : veel blauw $\rightarrow$ blauwer
 - hoge f_V/f_B : weinig blauw $\rightarrow$ roder

Dienstmededelingen

Dienstmededelingen
Sterrenkunde?
Ruwe indeling

De Zon

Referentiester

Afstanden

Parallax

Helderheid

Flux, lichtkracht

Fotometrie

Spectra

Planckspectra
Spectraallijnen
Sterspectra

Spectraaltypen

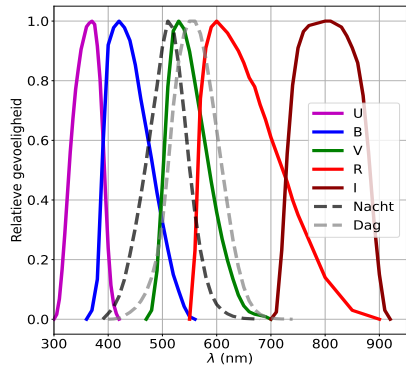
Spectraaltypen
Helderheidsklassen

Metalliciteit

Metalliciteit

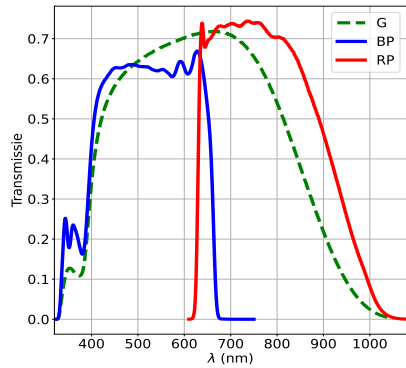
Groepen van sterren

M–R–L (MS)
HRD nabije sterren
Clusters
Leeftijden
Bolhopen



Johnson:

	λ_{eff}	$\Delta\lambda$
U	366 nm	64 nm
B	438 nm	96 nm
V	545 nm	89 nm
R	641 nm	159 nm
I	798 nm	150 nm



Gaia:

	λ_{eff}	$\Delta\lambda$
G	623 nm	418 nm
BP	505 nm	235 nm
RP	773 nm	276 nm

Oog: dag, nacht

Dienstmededelingen

Dienstmededelingen
Sterrenkunde?
Ruwe indeling

De Zon

Referentiester

Afstanden

Parallax

Helderheid

Flux, lichtkracht
Fotometrie

Spectra

Planckspectra
Spectraallijnen
Sterspectra

Spectraaltypen

Spectraaltypen
Helderheidsklassen

Metalliciteit

Metalliciteit

Groepen van
sterren

M–R–L (MS)
HRD nabije sterren
Clusters
Leeftijden
Bolhopen

1 Dienstmededelingen

2 De Zon

3 Afstanden

4 Helderheid

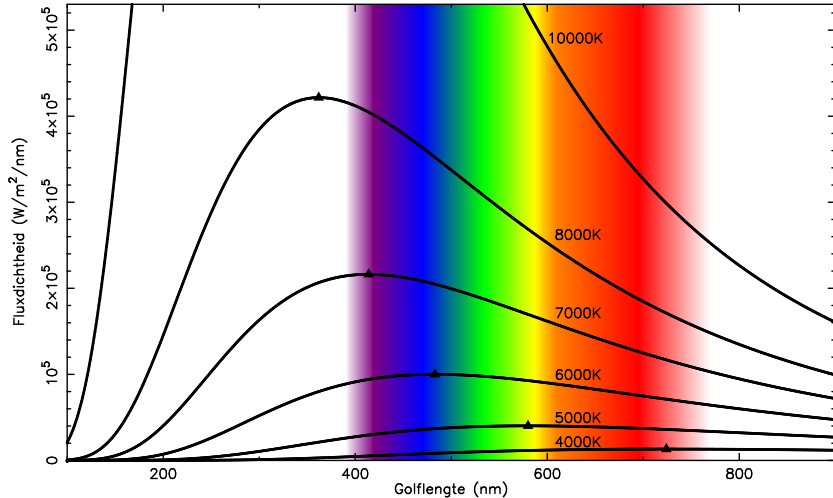
5 Spectra

- Planckspectra
- Spectraallijnen
- Sterspectra

6 Spectraaltypen

7 Metalliciteit

8 Groepen van sterren



- Hogere T_{eff} :

- ① bolometrische flux neemt toe (**wet van Stefan-Boltzmann**)

- flux neemt toe voor *alle* golflengten!

- ② ▲: maximum (λ_{max}) verschuift naar *kortere* golflengten (**verschuivingswet van Wien**)

Dienstmededelingen

Dienstmededelingen

Sterrenkunde?

Ruwe indeling

De Zon

Referentiester

Afstanden

Parallax

Helderheid

Flux, lichtkracht

Fotometrie

Spectra

Planckspectra

Spectraallijnen

Sterspectra

Spectraaltypen

Spectraaltypen

Helderheidsklassen

Metalliciteit

Metalliciteit

Groepen van sterren

M–R–L (MS)

HRD nabije sterren

Clusters

Leeftijden

Bolhopen

- **Planckfunctie:** $B_{\lambda} d\lambda = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{hc/\lambda kT} - 1} d\lambda$
 - flux tussen λ en $\lambda + d\lambda$ $[B_{\lambda}] = \text{W m}^{-2} \text{ nm}^{-1}$

- **Wet van Stefan-Boltzmann:** $B \equiv \int_0^{\infty} B_{\lambda} d\lambda \equiv \sigma T_{\text{eff}}^4$

$$\boxed{F = \sigma T_{\text{eff}}^4} \rightarrow \boxed{L = 4\pi R^2 \sigma T_{\text{eff}}^4}$$

- Constante van Stefan-Boltzmann: $\sigma = \frac{2\pi^5 k^4}{15c^2 h^3} \approx 5.67 \times 10^{-8} \text{ kg K}^{-4} \text{ s}^{-3}$

- **Verschuivingswet van Wien:** $\lambda_{\text{max}} T_{\text{eff}} = \text{constant} \simeq 0.29 \text{ cm K}$
 ● Zon: $T_{\text{eff}, \odot} \approx 5780 \text{ K} \rightarrow \lambda_{\text{max}} \approx 502 \text{ nm}$

Dienstmededelingen

Dienstmededelingen
Sterrenkunde?
Ruwe indeling

De Zon

Referentiester

Afstanden

Parallax

Helderheid

Flux, lichtkracht
Fotometrie

Spectra

Planckspectra
Spectraallijnen
Sterspectra

Spectraaltypen

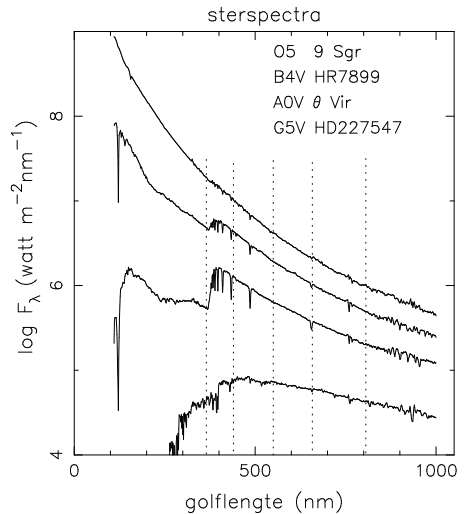
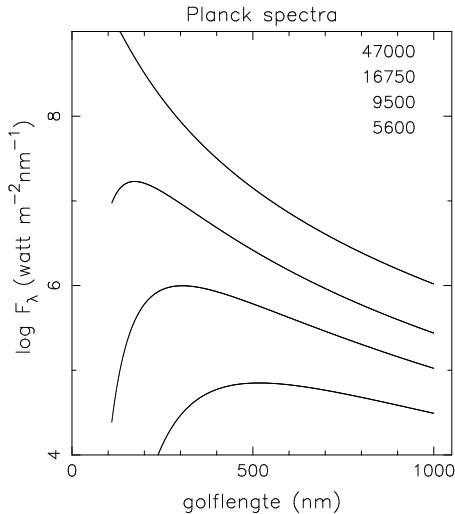
Spectraaltypen
Helderheidsklassen

Metalliciteit

Metalliciteit

Groepen van sterren

M–R–L (MS)
HRD nabije sterren
Clusters
Leeftijden
Bolhopen



Bron: Verbunt: Het leven van sterren

→ Planckspectra met spectraallijnen → **werkcollege**

Dienstmededelingen

Dienstmededelingen
Sterrenkunde?
Ruwe indeling

De Zon

Referentiester

Afstanden

Parallax

Helderheid

Flux, lichtkracht
Fotometrie

Spectra

Planckspectra

Spectraallijnen

Sterspectra

Spectraaltypen

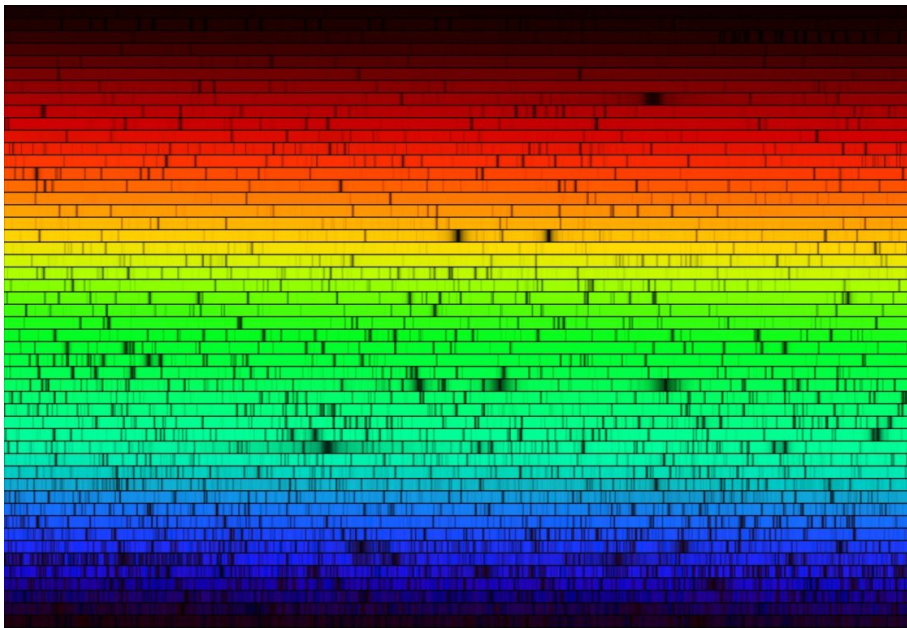
Spectraaltypen
Helderheidsklassen

Metalliciteit

Metalliciteit

Groepen van sterren

M–R–L (MS)
HRD nabije sterren
Clusters
Leeftijden
Bolhopen



Dienstmededelingen

Dienstmededelingen
Sterrenkunde?
Ruwe indeling

De Zon

Referentiester

Afstanden

Parallax

Helderheid

Flux, lichtkracht
Fotometrie

Spectra

Planckspectra
Spectraallijnen
Sterspectra

Spectraaltypen

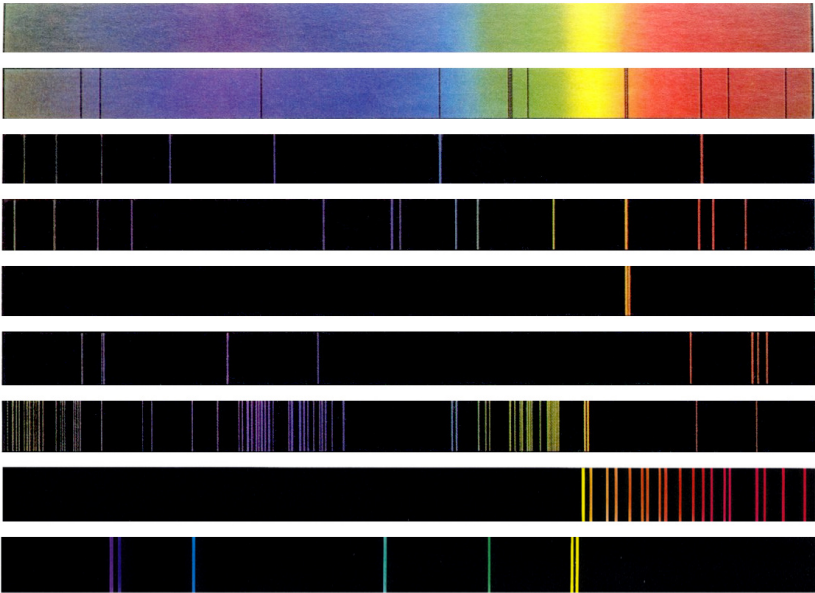
Spectraaltypen
Helderheidsklassen

Metalliciteit

Metalliciteit

Groepen van
sterren

M–R–L (MS)
HRD nabije sterren
Clusters
Leeftijden
Bolhopen



Continu

Zon

Waterstof

Helium

Natrium

Calcium

Ijzer

Neon

Kwik

Dienstmededelingen

Dienstmededelingen
Sterrenkunde?
Ruwe indeling

De Zon

Referentiester

Afstanden

Parallax

Helderheid

Flux, lichtkracht
Fotometrie

Spectra

Planckspectra

Spectraallijnen

Sterspectra

Spectraaltypen

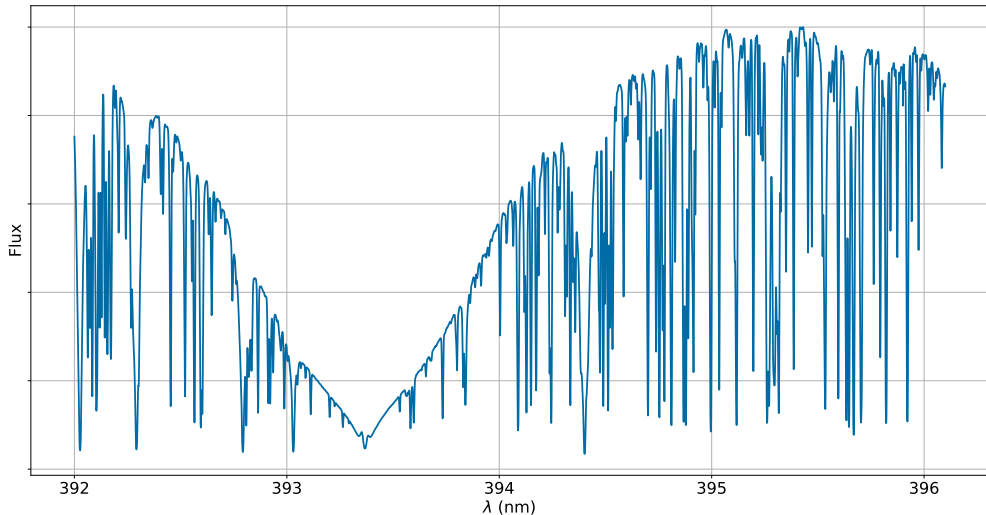
Spectraaltypen
Helderheidsklassen

Metalliciteit

Metalliciteit

Groepen van sterren

M–R–L (MS)
HRD nabije sterren
Clusters
Leeftijden
Bolhopen



- Sterkte lijn vooral bepaald door **temperatuur** en **ionisatiegraad**
 - → niet alleen door **abundantie** (hoeveelheid stof)

Dienstmededelingen

- Dienstmededelingen
- Sterrenkunde?
- Ruwe indeling

De Zon

- Referentiester

Afstanden

- Parallax

Helderheid

- Flux, lichtkracht
- Fotometrie

Spectra

- Planckspectra
- Spectraallijnen

Sterspectra

Spectraaltypen

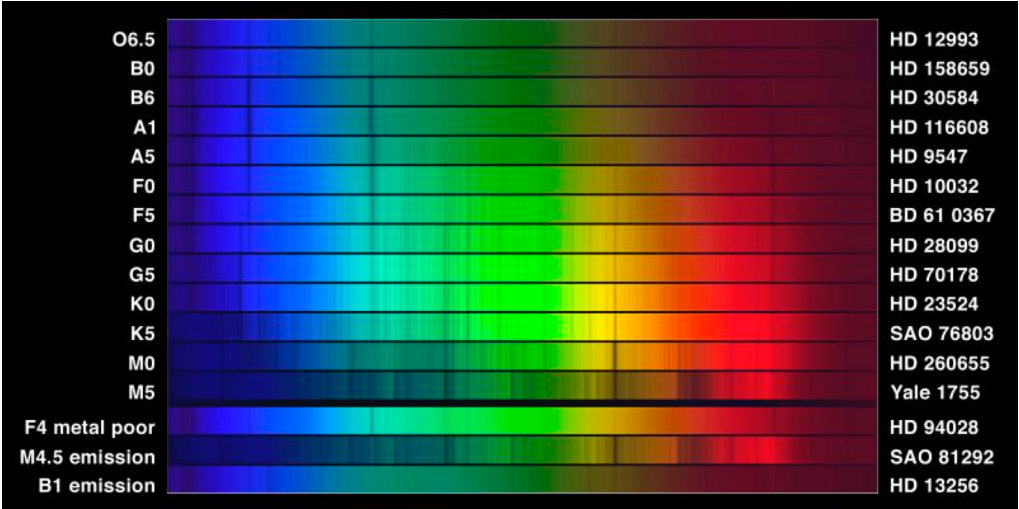
- Spectraaltypen
- Helderheidsklassen

Metalliciteit

- Metalliciteit

Groepen van
sterren

- M–R–L (MS)
- HRD nabije sterren
- Clusters
- Leeftijden
- Bolhopen



Dienstmededelingen

Dienstmededelingen
Sterrenkunde?
Ruwe indeling

De Zon

Referentiester

Afstanden

Parallax

Helderheid

Flux, lichtkracht
Fotometrie

Spectra

Planckspectra
Spectraallijnen

Sterspectra

Spectraaltypen

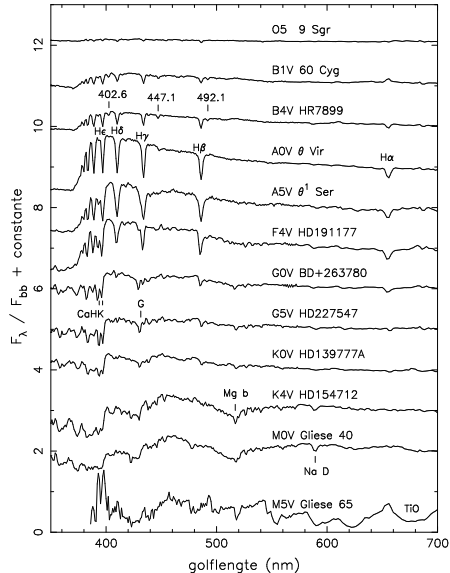
Spectraaltypen
Helderheidsklassen

Metalliciteit

Metalliciteit

Groepen van sterren

M–R–L (MS)
HRD nabije sterren
Clusters
Leeftijden
Bolhopen



**Afstand, tijd en
licht**

Dienstmededelingen

Dienstmededelingen
Sterrenkunde?
Ruwe indeling

De Zon

Referentiester

Afstanden

Parallax

Helderheid

Flux, lichtkracht
Fotometrie

Spectra

Planckspectra
Spectraallijnen
Sterspectra

Spectraaltypen

Spectraaltypen
Helderheidsklassen

Metalliciteit

Metalliciteit

**Groepen van
sterren**

M–R–L (MS)
HRD nabije sterren
Clusters
Leeftijden
Bolhopen

1 Dienstmededelingen

2 De Zon

3 Afstanden

4 Helderheid

5 Spectra

6 Spectraaltypen

- Spectraaltypen
- Helderheidsklassen

7 Metalliciteit

8 Groepen van sterren

Dienstmededelingen

Dienstmededelingen

Sterrenkunde?

Ruwe indeling

De Zon

Referentiester

Afstanden

Parallax

Helderheid

Flux, lichtkracht

Fotometrie

Spectra

Planckspectra

Spectraallijnen

Sterspectra

Spectraaltypen

Spectraaltypen

Helderheidsklassen

Metalliciteit

Metalliciteit

Groepen van
sterren

M–R–L (MS)

HRD nabije sterren

Clusters

Leeftijden

Bolhopen

Eigenschappen voor **hoofdrekssterren** (MS):

SpT	T_{eff}	Kleur	MS M	MS R	MS L	H-lijnen	Frac. van MS
	(kK)	—	($M_{\odot}$)	($R_{\odot}$)	($L_{\odot}$)	—	(%)
O	$\gtrsim 33$	blauw	$\gtrsim 16$	$\gtrsim 6.6$	$\gtrsim 30k$	zwak	0.00003
B	10 – 33	blauw-wit	2.1 – 16	1.8 – 6.6	25 – 30k	medium	0.12
A	7.3 – 10	wit	1.4 – 2.1	1.4 – 1.8	5 – 25	sterk	0.61
F	6 – 7.3	geel-wit	1.04 – 1.4	1.15 – 1.4	1.5 – 5	medium	3.0
G	5.3 – 6	geel	0.8 – 1.04	0.96 – 1.15	0.6 – 1.5	zwak	7.6
K	3.9 – 5.3	licht oranje	0.45 – 0.8	0.7 – 0.96	0.08 – 0.6	zeer zwak	12
M	2.3 – 3.9	oranje-rood	0.08 – 0.45	$\lesssim 0.7$	$\lesssim 0.08$	zeer zwak	76

Bron: [Wikipedia: Stellar classification](#)

- Hoofdverdeling: O–M: **Oh Be A Fine Guy/Girl, Kiss Me**
- Onderverdeling: 0–9
- Totaal: O0,O1, ..., O8,O9,B0,B1, ..., ..., M9
- **Zon: G2V**

Dienstmededelingen

Dienstmededelingen
Sterrenkunde?
Ruwe indeling

De Zon

Referentiester

Afstanden

Parallax

Helderheid

Flux, lichtkracht
Fotometrie

Spectra

Planckspectra
Spectraallijnen
Sterspectra

Spectraaltypen

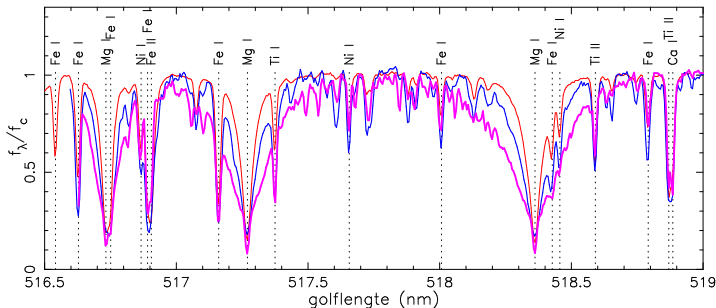
Spectraaltypen
Helderheidsklassen

Metalliciteit

Metalliciteit

Groepen van sterren

M–R–L (MS)
HRD nabije sterren
Clusters
Leeftijden
Bolhopen



- I:** superreuzen (smalle lijnen)
- II:** heldere reuzen
- III:** reuzen
- IV:** subreuzen
- V:** dwergen/hoofdreekssterren (brede lijnen)

grotere straal → lagere oppervlaktezwaartekracht
→ lagere druk → smallere spectraallijnen

Dienstmededelingen

Dienstmededelingen
Sterrenkunde?
Ruwe indeling

De Zon

Referentiester

Afstanden

Parallax

Helderheid

Flux, lichtkracht
Fotometrie

Spectra

Planckspectra
Spectraallijnen
Sterspectra

Spectraaltypen

Spectraaltypen
Helderheidsklassen

Metalliciteit

Metalliciteit

Groepen van sterren

M–R–L (MS)
HRD nabije sterren
Clusters
Leeftijden
Bolhopen

SpTp	M ($M_{\odot}$)	R ($R_{\odot}$)	$\log L$ ($L_{\odot}$)	T_{eff} (K)	$\log L_V$ ($L_{V,\odot}$)	$\log f_B/f_U$	$\log f_V/f_B$	$\log f_I/f_V$
Hoofdreeks:								
O8V	22.0	7.90	5.10	38 900	3.71	−0.68	−0.38	−0.66
B2V	9.0	4.30	3.63	22 400	2.77	−0.57	−0.35	−0.63
B5V	5.0	2.90	2.66	15 600	2.16	−0.46	−0.33	−0.60
A0V	2.5	1.80	1.51	10 200	1.42	−0.25	−0.27	−0.56
A5V	1.9	1.50	1.06	8 590	1.08	−0.19	−0.22	−0.50
F0V	1.5	1.30	0.67	7 420	0.71	−0.22	−0.15	−0.41
F5V	1.3	1.20	0.43	6 800	0.46	−0.23	−0.10	−0.35
G0V	1.2	1.10	0.30	6 470	0.33	−0.22	−0.07	−0.32
G5V	1.0	1.00	0.00	5 780	0.00	−0.15	0.01	−0.25
K0V	0.9	0.85	−0.33	5 180	−0.39	−0.01	0.08	−0.18
M1V	0.6	0.55	−1.22	3 860	−1.64	0.28	0.29	0.12
M4V	0.4	0.40	−1.87	3 110	−2.80	0.29	0.35	0.56
Subreuzen:								
G0 III	2.5	6.0	1.50	5 600	1.49	−0.09	0.03	−0.24
K0 III	4.0	16.0	1.97	4 500	1.79	0.22	0.21	−0.07
M0 III	6.3	65.0	2.60	3 200	0.99		−0.02	0.99
Superreuzen:								
B7 I	15.0	30.0	4.72	16 000	4.21	−0.52	−0.33	−0.59
A3 I	15.0	75.0	4.70	10 000	4.62	−0.31	−0.29	−0.54
F5 I	15.0	180.0	4.66	6 300	4.71	−0.07	−0.08	−0.34
K1 I	15.0	375.0	4.51	4 000	4.14	0.66	0.38	0.06

Bron: [Verbunt: Het leven van sterren](#)

Afstand, tijd en licht

Dienstmededelingen

- Dienstmededelingen
- Sterrenkunde?
- Ruwe indeling

De Zon

- Referentiester

Afstanden

- Parallax

Helderheid

- Flux, lichtkracht
- Fotometrie

Spectra

- Planckspectra
- Spectraallijnen
- Sterspectra

Spectraaltypen

- Spectraaltypen
- Helderheidsklassen

Metalliciteit

- Metalliciteit

Groepen van sterren

- M–R–L (MS)
- HRD nabije sterren
- Clusters
- Leeftijden
- Bolhopen

- 1 Dienstmededelingen
- 2 De Zon
- 3 Afstanden
- 4 Helderheid

- 5 Spectra
- 6 Spectraaltypen
- 7 Metalliciteit
 - **Metalliciteit**
- 8 Groepen van sterren

Dienstmededelingen

Dienstmededelingen
Sterrenkunde?
Ruwe indeling

De Zon

Referentiester

Afstanden

Parallax

Helderheid

Flux, lichtkracht
Fotometrie

Spectra

Planckspectra
Spectraallijnen
Sterspectra

Spectraaltypen

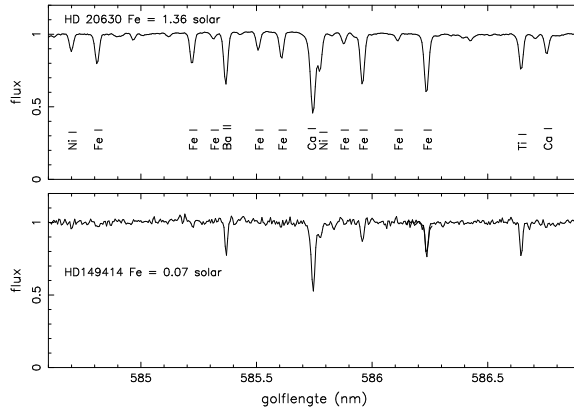
Spectraaltypen
Helderheidsklassen

Metalliciteit

Metalliciteit

Groepen van sterren

M–R–L (MS)
HRD nabije sterren
Clusters
Leeftijden
Bolhopen



- Metalliciteit: $Z = 1 - X - Y$; $10^{-4} \lesssim Z \lesssim 0.03$;
 - $Z_{\odot} \approx 0.0134$ (tot voor kort: $X_{\odot} = 0.70$, $Y_{\odot} = 0.28$, $Z_{\odot} = 0.02$)
- **Oude** sterren zijn vaak **metaalarm**
 - metaalarme sterren zijn blauwer dan metaalrijke sterren met verder dezelfde eigenschappen

Afstand, tijd en licht

Dienstmededelingen

Dienstmededelingen
Sterrenkunde?
Ruwe indeling

De Zon

Referentiester

Afstanden

Parallax

Helderheid

Flux, lichtkracht
Fotometrie

Spectra

Planckspectra
Spectraallijnen
Sterspectra

Spectraaltypen

Spectraaltypen
Helderheidsklassen

Metalliciteit

Metalliciteit

Groepen van sterren

M–R–L (MS)
HRD nabije sterren
Clusters
Leeftijden
Bolhopen

1 Dienstmededelingen

2 De Zon

3 Afstanden

4 Helderheid

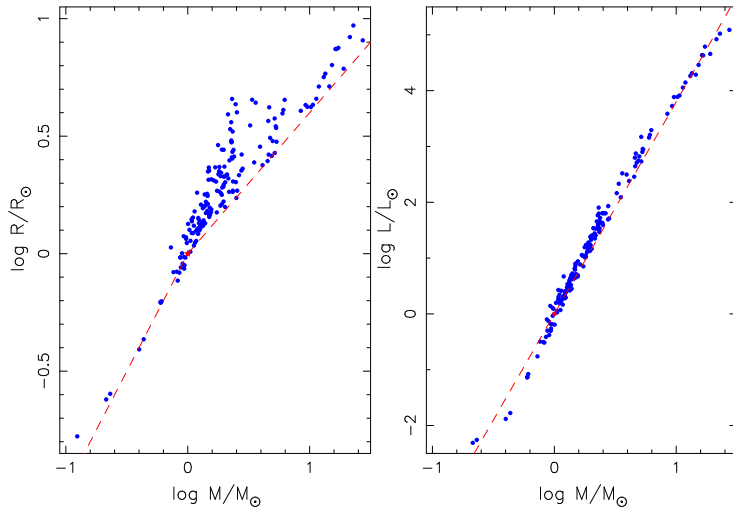
5 Spectra

6 Spectraaltypen

7 Metalliciteit

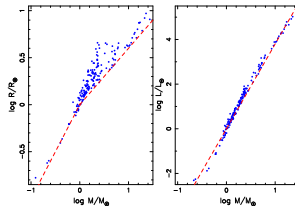
8 Groepen van sterren

- M–R–L (MS)
- HRD nabije sterren
- Clusters
- Leeftijden
- Bolhopen



Afgeleid uit sterren in eclipserende spectroscopische dubbelsterren en de Zon:

- Zwaardere hoofdreekssterren zijn *iets* **groter** dan lichtere
- Zwaardere hoofdreekssterren zijn **veel helderder** dan lichtere!



- $\frac{R}{R_{\odot}} \sim \left(\frac{M}{M_{\odot}}\right)^n$
 - $n \approx 1$ voor $M \leq M_{\odot}$; $n \approx 0.6$ voor $M \geq M_{\odot}$
 - spreiding: straal neemt langzaam toe op hoofdreeks

- $\frac{L}{L_{\odot}} \sim \left(\frac{M}{M_{\odot}}\right)^{3.8}$

- $\tau_{n,MS} \sim \frac{M}{M_{\odot}} \frac{L_{\odot}}{L} \tau_{n,\odot} \approx \left(\frac{M}{M_{\odot}}\right)^{-2.8} \cdot 10^{10} \text{ jaar}$
 - O-ster, $15M_{\odot}$: $\tau_n \approx 5 \text{ Myr}$
 - M-dwerg, $0.5M_{\odot}$: $\tau_n \approx 70 \text{ Gyr} \gg t_H!$

- Zware sterren bestaan **veel korter** dan lichte sterren!

Dienstmededelingen

Dienstmededelingen

Sterrenkunde?

Ruwe indeling

De Zon

Referentiester

Afstanden

Parallax

Helderheid

Flux, lichtkracht

Fotometrie

Spectra

Planckspectra

Spectraallijnen

Sterspectra

Spectraaltypen

Spectraaltypen

Helderheidsklassen

Metalliciteit

Metalliciteit

Groepen van sterren

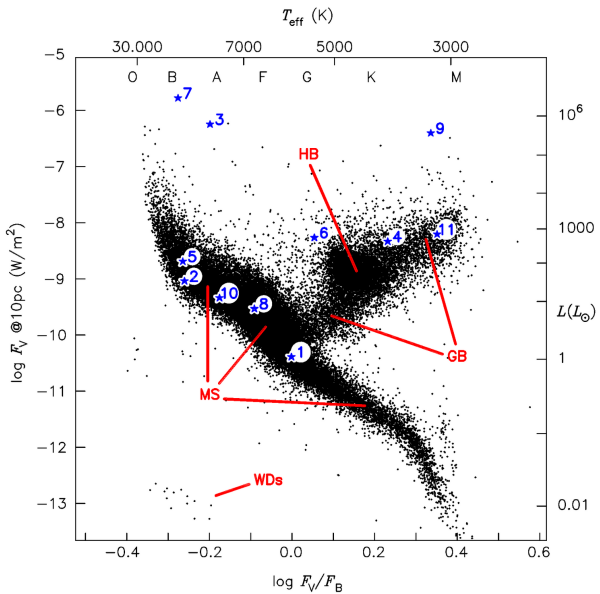
M-R-L (MS)

HRD nabije sterren

Clusters

Leeftijden

Bolhopen



- 48 495 nabije sterren uit de Hipparcos-catalogus:
 - $\frac{\Delta d}{d} < 20\%$
 - $\Delta(F_B/F_V) < 10\%$
- Blauw: heldere sterren:
 - 1 Zon
 - 2 Sirius
 - 3 Canopus
 - 4 Arcturus
 - 5 Wega
 - 6 Capella
 - 7 Rigel
 - 8 Procyon
 - 9 Betelgeuze
 - 10 Altair
 - 11 Aldebaran
- L, T_{eff} gelden alleen voor de **hoofdreeks**

Kleur-fluxdiagram (CFD) voor nabije sterren (H 1.6.2)

Afstand, tijd en
licht

Dienstmededelingen

Dienstmededelingen

Sterrenkunde?

Ruwe indeling

De Zon

Referentiester

Afstanden

Parallax

Helderheid

Flux, lichtkracht

Fotometrie

Spectra

Planckspectra

Spectraallijnen

Sterspectra

Spectraaltypen

Spectraaltypen

Helderheidsklassen

Metalliciteit

Metalliciteit

Groepen van sterren

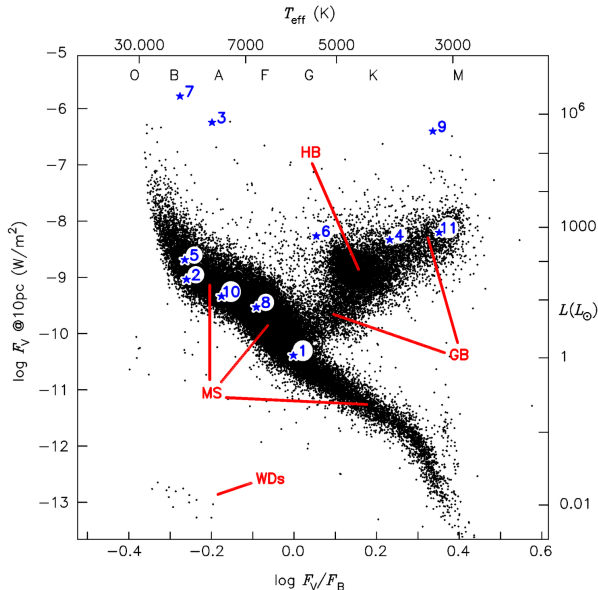
M-R-L (MS)

HRD nabije sterren

Clusters

Leeftijden

Bolhopen



- 48 495 nabije sterren uit de Hipparcos-catalogus:

- $\frac{\Delta d}{d} < 20\%$
- $\Delta(F_B/F_V) < 10\%$

- Rood: evolutiefasen:

MS: Hoofdreeks

GB: Reuzentak
(+AGB)

HB: Horizontale tak

WDs: Witte dwergen

- L, T_{eff} gelden alleen voor de **hoofdreeks**

Dienstmededelingen

- Dienstmededelingen
- Sterrenkunde?
- Ruwe indeling

De Zon

- Referentiester

Afstanden

- Parallax

Helderheid

- Flux, lichtkracht
- Fotometrie

Spectra

- Planckspectra
- Spectraallijnen
- Sterspectra

Spectraaltypen

- Spectraaltypen
- Helderheidsklassen

Metalliciteit

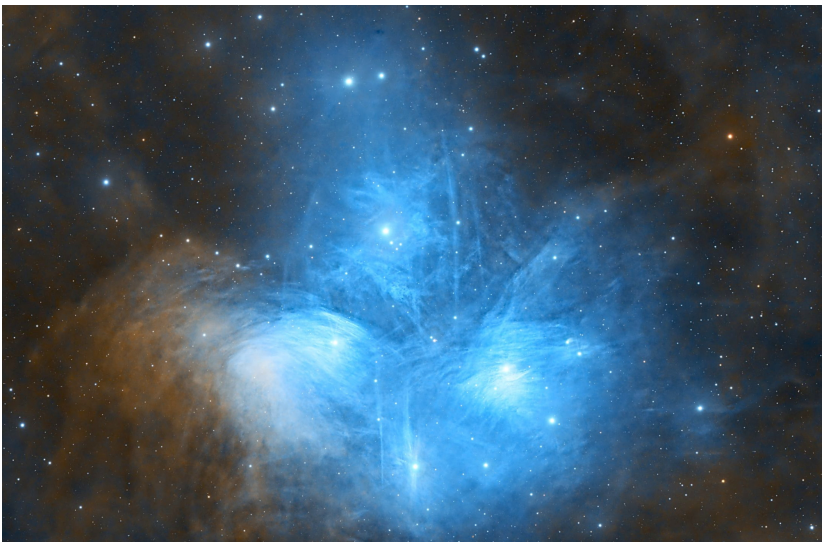
- Metalliciteit

Groepen van
sterren

- M–R–L (MS)
- HRD nabije sterren

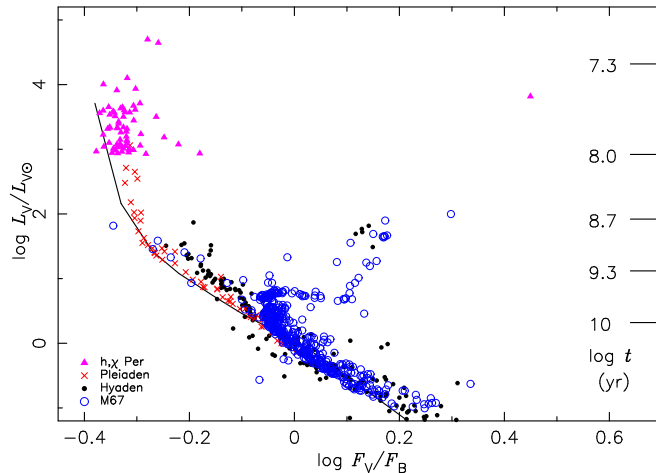
Clusters

- Leeftijden
- Bolhopen



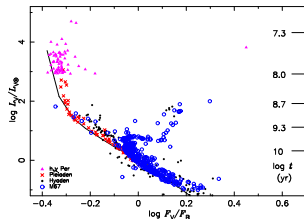
Bron: [Shawn Nielsen](#)

● Fysieke groep → dezelfde **afstand**, dezelfde **leeftijd**



Bron: Verbunt: Het leven van sterren

- 1 **Zwaardere** sterren zijn **helderder** en zijn een **kortere tijd** op de hoofdreeks
- 2 De **helderste sterren** op de hoofdreeks tonen dus de **leeftijd** van de cluster



→ werkcollege

- Hoofdreeks stopt bij verschillende kleuren/helderheden → **afbeelding**
- Rode reuzen hebben $\sim L$ van afbeelding
 - meer rode reuzen bij lager afbeelding
 - gat tussen MS en reuzen: **Hertzsprung gap** (HG)
- Sterren $\log L_V \sim 0.3$ boven MS: dubbelsterren

Cluster	Afbeelding $\log L_V/L_{V,\odot}$	Massa (Tabel 1.6; sl. 35)	Leeftijd (Vgl. 1.20; sl. 40)
h & χ Per	4	$> 22 M_\odot$	~ 2 Myr
Pleiaden	???	$?? M_\odot$	???
Hyaden	1.8	$4 M_\odot$	~ 200 Myr
M67	0.7	$1.5 M_\odot$	~ 3.2 Gyr

Dienstmededelingen

Dienstmededelingen
Sterrenkunde?
Ruwe indeling

De Zon

Referentiester

Afstanden

Parallax

Helderheid

Flux, lichtkracht
Fotometrie

Spectra

Planckspectra
Spectraallijnen
Sterspectra

Spectraaltypen

Spectraaltypen
Helderheidsklassen

Metalliciteit

Metalliciteit

Groepen van sterren

M–R–L (MS)
HRD nabije sterren
Clusters
Leeftijden
Bolhopen



Dienstmededelingen

Dienstmededelingen
Sterrenkunde?
Ruwe indeling

De Zon

Referentiester

Afstanden

Parallax

Helderheid

Flux, lichtkracht
Fotometrie

Spectra

Planckspectra
Spectraallijnen
Sterspectra

Spectraaltypen

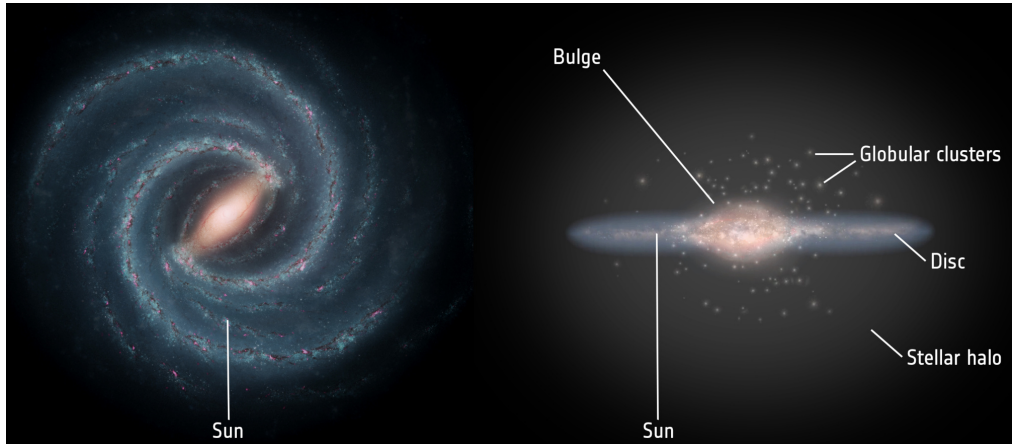
Spectraaltypen
Helderheidsklassen

Metalliciteit

Metalliciteit

Groepen van sterren

M–R–L (MS)
HRD nabije sterren
Clusters
Leeftijden
Bolhopen



- Open sterhopen: **in** het vlak
- Bolvormige sterhopen: vooral **rond** het vlak

Dienstmededelingen

Dienstmededelingen
Sterrenkunde?
Ruwe indeling

De Zon

Referentiester

Afstanden

Parallax

Helderheid

Flux, lichtkracht
Fotometrie

Spectra

Planckspectra
Spectraallijnen
Sterspectra

Spectraaltypen

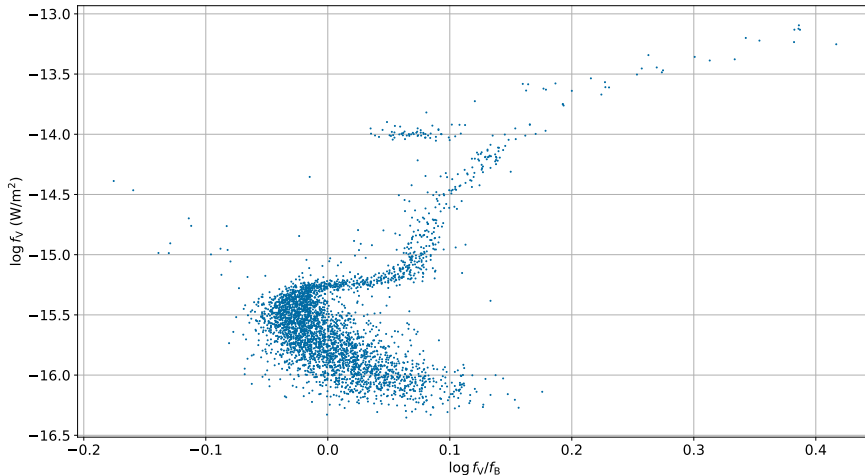
Spectraaltypen
Helderheidsklassen

Metalliciteit

Metalliciteit

Groepen van sterren

M–R–L (MS)
HRD nabije sterren
Clusters
Leeftijden
Bolhopen



- **Korte hoofdreeks** → **oud!** ~ 13 Gyr!
- Spectra vaak **metaalarm** → **oud!**