

SPECTRAALTYPES VAN STERREN EN HET HERTZSPRUNG-RUSSELL DIAGRAM

FRANK TAMSIN (VERENIGING VOOR STERRENKUNDE)

Schijnbare en absolute magnitude

De schijnbare helderheid ℓ van een ster hangt in hoofdzaak af van de hoeveelheid energie die ze uitstraalt en van haar afstand. Hipparchus (ca. 190 v. Chr. - 120 v. Chr) verdeelde de met het blote oog zichtbare sterren in zes klassen, de helderste sterren (een twintigtal) zijnde van de eerste grootte, de zwakste van de zesde grootte. Met de uitvinding van de kijker werd dit stelsel uitgebreid tot de zwakkere sterren. De nauwkeurige betrekking tussen de schijnbare helderheid en haar maat, de magnitude, volgt uit de sensatiewet van Fechner: wanneer de prikkels een meetkundige reeks vormen, zullen de sensaties een rekenkundige reeks volgen, of nog de sensatie is evenredig met de logaritme van de prikkel. Deze wet werd door Pogson (1850) toegepast ter bepaling van de magnitudeschaal, uitgaande van het feit dat het magnitude-interval tussen twee opeenvolgende klassen steeds overeenkomt met dezelfde waarde van de verhouding der schijnbare helderheden, terwijl de verhouding ℓ_1/ℓ_6 van de helderheden der sterren van eerste en zesde magnitude gelijk is aan 100 en dus dat

$$\log \frac{\ell_1}{\ell_6} = \log 100$$

Zodat

$$\log \ell_1 - \log \ell_6 = 2$$

Ieder van de vijf intervallen tussen de helderheidsklassen correspondeert dan met een verschil van $2/5 = 0.4$ in de log van de schijnbare helderheden. De lichtverhouding (verhouding der helderheden van twee sterren die precies 1 magnitude verschillen in de magnitudeschaal) is gelijk aan

$$\sqrt[5]{100} \approx 2.512$$

waarvan de log in de basis 10 gelijk is aan 0.4. Dit alles wordt door de *formule van Pogson* weergegeven:

$$\frac{\ell_n}{\ell_m} = \left(\sqrt[5]{100}\right)^{m-n}$$

of

$$\frac{\ell_n}{\ell_m} = 10^{0.4(m-n)} \quad (1)$$

of

$$m - n = 2.5 \cdot \log \frac{\ell_n}{\ell_m} \quad (2)$$

Hierbij zijn ℓ_m en ℓ_n de schijnbare helderheden van twee sterren met respectieve magnitudes m en n .

We hebben nu dus een goede definitie voor de schijnbare helderheden van sterren. Dat is een nuttig hulpmiddel, maar het zegt niets over de werkelijke eigenschappen van deze objecten. We zullen een manier moeten bedenken om verschillende sterren met elkaar te kunnen vergelijken. Daartoe is het begrip absolute magnitude bedacht.

De absolute magnitude M van een ster is gedefinieerd als de schijnbare magnitude die de ster zou hebben als deze zich op een afstand van 10 parsec (een parsec is de afstand van waarop men de halve grote baanas van de Aarde ziet onder een hoek van 1 boogseconde; deze afstand komt ongeveer overeen met 3.26 lichtjaar) van de Zon zou bevinden. Omdat er maar weinig sterren precies op 10 parsec staan, moeten we een vergelijking gebruiken waarmee we de absolute helderheden van sterren op verschillende afstanden kunnen uitrekenen: de afstandsvergelijking (die we zo dadelijk opstellen). Deze vergelijking werkt natuurlijk ook de andere kant op: met behulp van de absolute magnitude kunnen we de afstand uitrekenen.

De afstandsvergelijking

Zij thans

- ℓ = schijnbare helderheid van een ster
- L = absolute helderheid van een ster
- m = schijnbare magnitude van een ster
- M = absolute magnitude van een ster

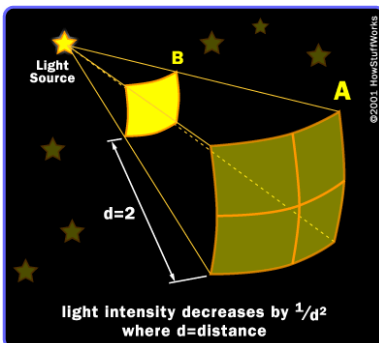
Laten we nu in formule (1) de rol van ℓ_n vertolken door L , die van ℓ_m door ℓ , die van m door m en die van n door M , dan bekommen we

$$\frac{L}{\ell} = 10^{0.4(m-M)} \quad (3)$$

Uit de fysica weten we dat de intensiteit van een lichtbron omgekeerd evenredig is met het kwadraat van de afstand tussen de lichtbron en de waarnemer, zodat

$$\frac{\ell_n}{\ell_m} = \frac{d_m^2}{d_n^2}$$

waarbij d_m en d_n de respectieve afstanden zijn van de sterren met schijnbare helderheden ℓ_m en ℓ_n .



Vervangen we opnieuw ℓ_n door L en ℓ_m door ℓ . Uit de definitie van L (de helderheid die de ster zou hebben indien ze op een afstand van 10 parsec stond) volgt dan dat $d_n = 10$ pc. We vervangen dan nog d_m door d , de afstand van de ster in parsec, en bekomen dan

$$\frac{L}{\ell} = \frac{d^2}{100}$$

In combinatie met formule (3) levert dit dan

$$10^{0.4(m-M)} = \frac{d^2}{100}$$

Nemen we de logaritme van beide leden dan bekomen we

$$0.4(m-M) \log 10 = 2 \log d - \log 100$$

Aangezien $\log 10 = 1$ en $\log 100 = 2$ bekomen we nog

$$m - M = 2.5(2 \log d - 2)$$

en dus

$$m - M = 5 \log d - 5 \tag{4}$$

Deze laatste betrekking noemt men de *afstandsvergelijking*.

De grootheid $m-M$ noemen we de *afstandsmodulus* van de ster (of van een ander hemellichaam); het is immers een directe maat voor de afstand d van de ster, die dan berekend kan worden uit

$$d = 10^{\frac{m-M+5}{5}} \tag{5}$$

Parallax

De aarde draait in één jaar om de zon. Door deze beweging van de aarde lijken alle sterren in de loop van een jaar een kleine ellips aan de hemel te beschrijven.

De straal (dat is de halve middellijn) van dit ellipsje is precies gelijk aan het hoekje waaronder je vanaf die ster de straal van de aardbaan zou zien. Dit hoekje wordt parallax genoemd.

De straal van de aardbaan is de gemiddelde afstand aarde-zon. De gemiddelde afstand aarde-zon noemen we een astronomische eenheid.

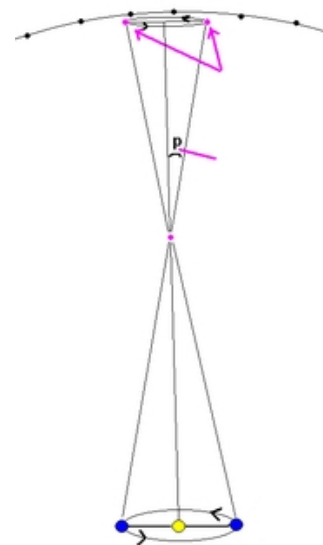
Als de parallax van een ster bekend is kunnen we zijn afstand berekenen. Er geldt immers dat:

$$d^{(pc)} = \frac{1}{p^{(")}} \tag{6}$$

Daarmee valt formule (4) ook nog te herschrijven als

$$M = m + 5 - 5 \log p \tag{7}$$

waarbij de parallax p uitgedrukt is in boogseconden.



Parallax (de hoek p) van een ster (roze, in het midden) als gevolg van de beweging van de aarde om de zon. De wisselende positie van de ster ten opzichte van veel verder verwijderde achtergrond sterren (zwart) is bovenaan aangegeven.

Het Hertzsprung-Russell diagram



In het begin van de twintigste eeuw maakten de sterrenkundigen Einar Hertzsprung (1873-1967) en Henry Norris Russell (1877-1957) een diagram om de waarnemingen van sterren te kunnen rangschikken. Op de horizontale as (abscis) van dit diagram vindt men de effectieve temperatuur (oppervlakte-temperatuur) of het spectraaltype van de ster. De ‘koude’ sterren bevinden zich rechtsop dit diagram, de ‘hete’ sterren links.

De effectieve temperatuur van een ster staat in relatie met zijn kleur. Een ster met een effectieve temperatuur van 3000 graden is rood. Bij 6000 graden, zoals

onze zon, is de ster geel, bij 15000 graden is ze wit, en wanneer het oppervlak nog warmer is, wordt de ster blauw.

Het verband tussen spectraaltypes, temperatuur en kleur, is opgenomen in de tabel hieronder. Elk van de spectraaltypes wordt dan nog verder onderverdeeld in tien subklassen, genummerd van 0 tot 9, bijvoorbeeld F0, F1, F2, ..., F9, G0, G1, In de literatuur treft men vaak de benamingen ‘vroeg stertype’ en ‘laat stertype’ aan. Hiermee wordt dan bedoeld respectievelijk hete sterren en koude sterren.

De volgorde van de spectraaltypes kan men gemakkelijk onthouden met volgend zinnetje: “Oh Be A Fine Girl, Kiss Me”.

De indeling van sterren in spectraalklassen, wordt meestal de Harvard-classificatie genoemd.

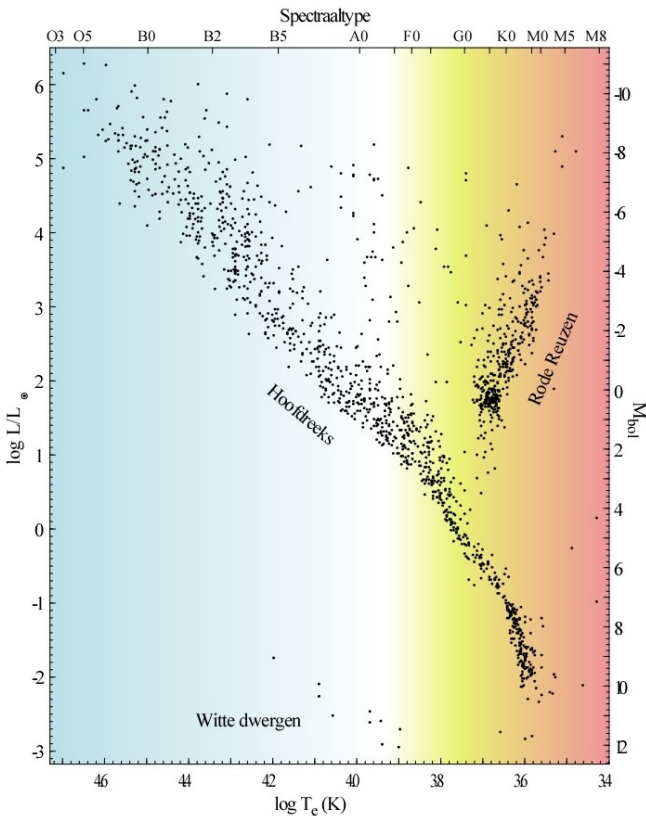
Het spectraaltype van een ster valt ook af te leiden uit de spectrale lijnen die in het spectrum aanwezig zijn.

Op de verticale as van het Hertzsprung-Russell-diagram vindt men de absolute (bolometrische) magnitude of ook de lichtkracht van de ster (dit is de totale hoeveelheid energie die de ster per seconde uitstraalt).

De sterren zijn niet homogeen verdeeld over het Hertzsprung-Russell-diagram (of HR-diagram). De meeste sterren bevinden zich in een band die het diagram doorkruist van linksboven naar rechtsonder, en die men de hoofdreeks noemt. Rechts in het diagram ziet men een groepering sterren die men de reuzentak noemt, en links beneden ziet men een groep zwakke

sterren, die witte dwergen genoemd worden.

Merken we ook op dat er een verband bestaat tussen de lichtkracht, de effectieve temperatuur en de straal van een ster: de lichtkracht (L) is evenredig met het kwadraat van de straal (R) en met de vierde macht van de effectieve temperatuur (T):



Spectraal-klasse	Spectraallijnen	Temperatuur (K)	Voorbeeld
O	HeII (emissie) geïoniseerde metalen: SiIV, OIII, NIII, CIII	28000 - 60000	ζ Orionis
B	HeI (emissie) MgII, SiII	10000 - 28000	Rigel, Spica
A	H (Balmer) FeII, MgII, SiII	7500 - 10000	Sirius, Deneb
F	H neutrale metalen: FeI, CrI	6000 - 7500	Procyon, Canopus
G	CaII	5000 - 6000	Zon, Capella
K	CaII, CaI, MnI, FeI, SiI moleculen: CH, CN	3500 - 5000	Aldebaran, Arcturus
M	moleculen	< 3500	Antares, Betelgeuse

$$L = 4\pi\sigma R^2 T^4 \quad (8)$$

Hierin is σ de constante van Stefan-Boltzmann ($\sigma = 5.66956 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$). Dit impliceert dat de straal van een ster toeneemt als de lichtkracht toeneemt of als de effectieve temperatuur daalt. Deze relatie bepaalt de staal van de sterren over het ganse HR-diagram. De grootste sterren bevinden zich bovenaan rechts, de kleinste sterren vinden we onderaan links, waar de lichtkracht klein is en de effectieve temperatuur hoog.

Opgave

De ster Rigel heeft een absolute magnitude $M = -7.4$ en is van spectraaltype B8.

- Schets een Hertzsprung-Russell-diagram en duid de positie van Rigel aan.
- Welke kleur heeft Rigel? Verklaar.
- Maak een behoorlijke schatting voor de temperatuur van Rigel en verklaar deze schatting.
- De afstand van Rigel is niet helemaal nauwkeurig bepaald. Hierdoor wordt de positie van Rigel in het Hertzsprung-Russell-diagram een beetje onzeker. In welke richting zal Rigel in het diagram dus eventueel moeten verplaatst worden, horizontaal of verticaal? Verklaar.

Lichtkrachtklassen van Morgan en Keenan

In de klassering die ingevoerd werd door Morgan en Keenan (op Yerkes Observatory) worden de sterren schematisch onderverdeeld in het HR-diagram:

Ia	extreme superreuzen
Ib	superreuzen
II	heldere reuzen
III	reuzen
IV	subreuzen
V	hoofdrekssterren
VI	subdwergen
VII	witte dwergen

Men spreekt van de lichtkrachtklassen. Onze zon bijvoorbeeld heeft spectraalklasse G2 en lichtkrachtklasse V.

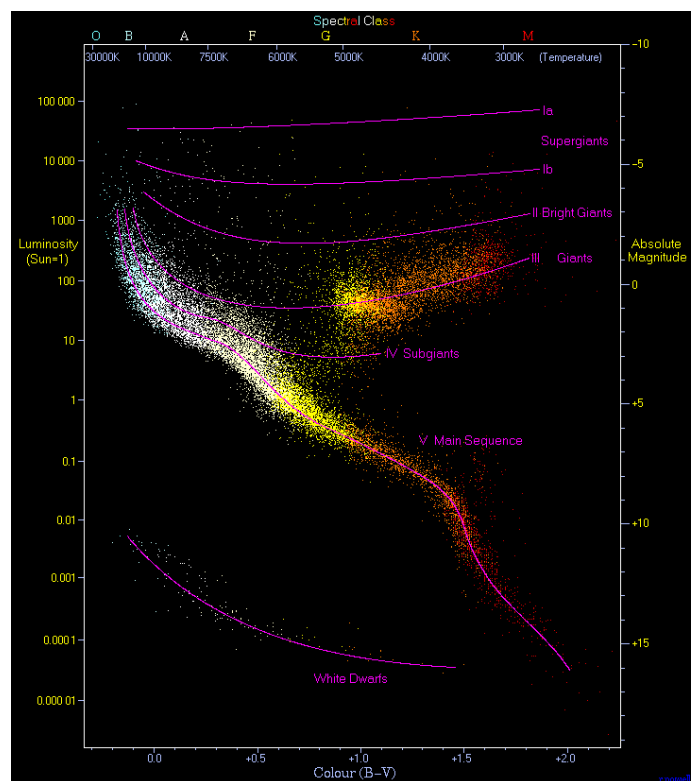
Opgave

Gegeven zijn spectraaltype (Harvard classificatie), lichtkrachtklasse (Morgan-Keenan classificatie) en schijnbare visuele magnitude voor vijf sterren:

ster 1:	M0	I	$m = 22$
ster 2:	B7	V	$m = 15$
ster 3:	A0	V	$m = 5$
ster 4:	G0	V	$m = 5$
ster 5:	M0	V	$m = 5$

Gevraagd (met verantwoording):

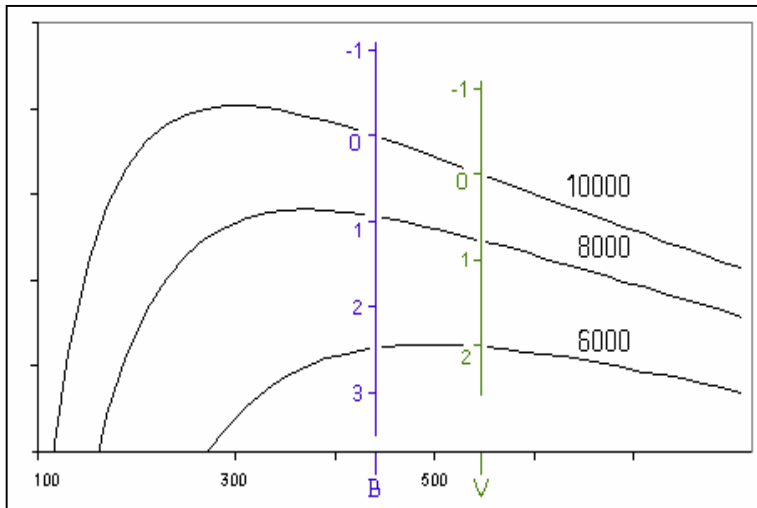
- Welke ster heeft de hoogste temperatuur?
- Welke ster is de koelste ster?
- Welke is de witte ster?
- Welke is de visueel zwakste ster?
- Welke ster heeft de grootste intrinsieke helderheid?
- Welke ster heeft de grootste straal?
- Welke ster lijkt het meest op de zon?
- Welke ster is het dichtst bij ons gelegen?
- Welke ster is het verst van ons verwijderd?



Kleurmagnitudes

De magnitudes m en M zijn bepaald door de totale hoeveelheid energie die een ster uitzendt, dus over alle golflengtes. Het is echter gebruikelijk om met magnitudes te werken die de straling in een kleiner golflengtegebied meten. Dit noemt men *kleurmagnitudes*. Er worden door de beroepsastronomen verschillende nauwkeurig omschreven systemen gebruikt. Het eenvoudigste is het UBV-systeem en bestaat uit drie kleurmagnitudes: U, B en V, gemeten bij 367, 436 en 545 nanometer.

Door naar de verschillen tussen twee zo'n magnitudes te kijken, kan men de temperatuur van een ster afleiden! Een verschil van twee van deze kleurmagnitudes noemt men een *kleurindex*. Belangrijk is hier op te merken dat een kleurindex vrijwel *niet* afhankelijk is van de afstand van de ster. De fout ten gevolge van de afstand is immers even groot voor de twee gebruikte magnitudes, en omdat we het verschil maken worden de twee fouten van elkaar afgetrokken en blijft er geen fout meer over. In werkelijkheid kan er toch een kleine fout van enkele tienden van een magnitude optreden omdat interstellair wolken niet alle golflengtes op gelijke manier absorberen.



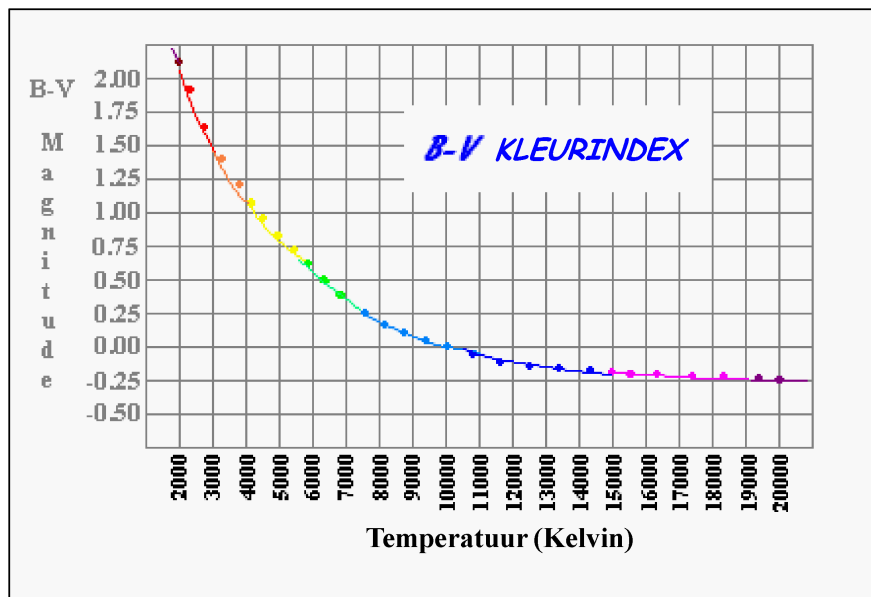
Hoe koeler een ster, hoe groter het verschil $B-V$, want een koelere ster zendt dan meer en meer licht uit in het groen (V) en minder en minder in het blauw (B). $B-V$ wordt dus een groter getal.

Uit de figuur hiernaast kunnen we volgende informatie aflezen:

T	B	V	$B-V$
6000	2.5	2.0	0.5
8000	1.0	0.8	0.2
10000	0.0	0.0	0.0

Dit geeft het verband weer tussen T en $B-V$.

De relatie tussen de kleurindex $B-V$ en de effectieve temperatuur T van een ster. Deze grafiek is goed te gebruiken voor sterren tot circa 10000 K. Voor hetere sterren is de kleurindex $U-B$ beter geschikt.



Een Hertzsprung-Russell-diagram van nabije sterren

In onderstaande tabel vind je voor de meest nabije tien sterren (op de zon na) de parallax p , de schijnbare visuele magnitude m_v , en het spectrale type Sp .

Ster	p (")	m_v	Sp	$\log T_e$	BC	M_{bol}
Proxima Cen	0.762	10.68	M5 e			
α Cen A	0.751	0.03	G2 V			
α Cen B	0.751	1.35	K5 V			
Barnard star	0.545	9.54	M5 V			
Wolf 359	0.427	13.66	M6 e			
BD+36°2147	0.396	7.47	M2 V			
α CMa A	0.375	-1.47	A1 V			
α CMa B	0.375	8.67	dA (A5)			
L 726-8 A	0.371	12.45	M6 e			
L 726-8 B	0.371	12.95	M6 e			

Verder is hiernaast een tabelletje gegeven dat het verband geeft tussen het spectraaltype, de logaritme van de effectieve temperatuur T_e , en de bolometrische correctie BC . Dit is een vereenvoudigde versie van de tabellen die we verderop nog zullen gebruiken.

Bepaal met behulp van deze informatie voor de meest nabije tien sterren de logaritme van de effectieve temperatuur T_e , en de bolometrische correctie BC ; voor tussenliggende spectrale types mag lineair geïnterpoleerd worden. Vul de resultaten aan op bovenstaande tabel.

Het is ook mogelijk om voor de tien meest nabije sterren de absolute visuele magnitude M_v , te bepalen. Maak hiervoor gebruik van formule (7).

Deze absolute visuele magnitude M_v moet nu nog gecorrigeerd worden tot M_{bol} , de absolute bolometrische magnitude. Deze laatste is niet gebaseerd op de helderheid van de ster bij een bepaalde golflengte, maar op de volledige energie-uitstraling van de ster. Bereken dus voor de tien sterren:

$$M_{bol} = M_v + BC \quad (9)$$

en vul dit ook aan op bovenstaande tabel.

Waarom is BC het grootst voor de heetste en de koelste sterren?

Je hebt nu voor de meest nabije tien sterren $\log T_e$ en M_{bol} bepaald.

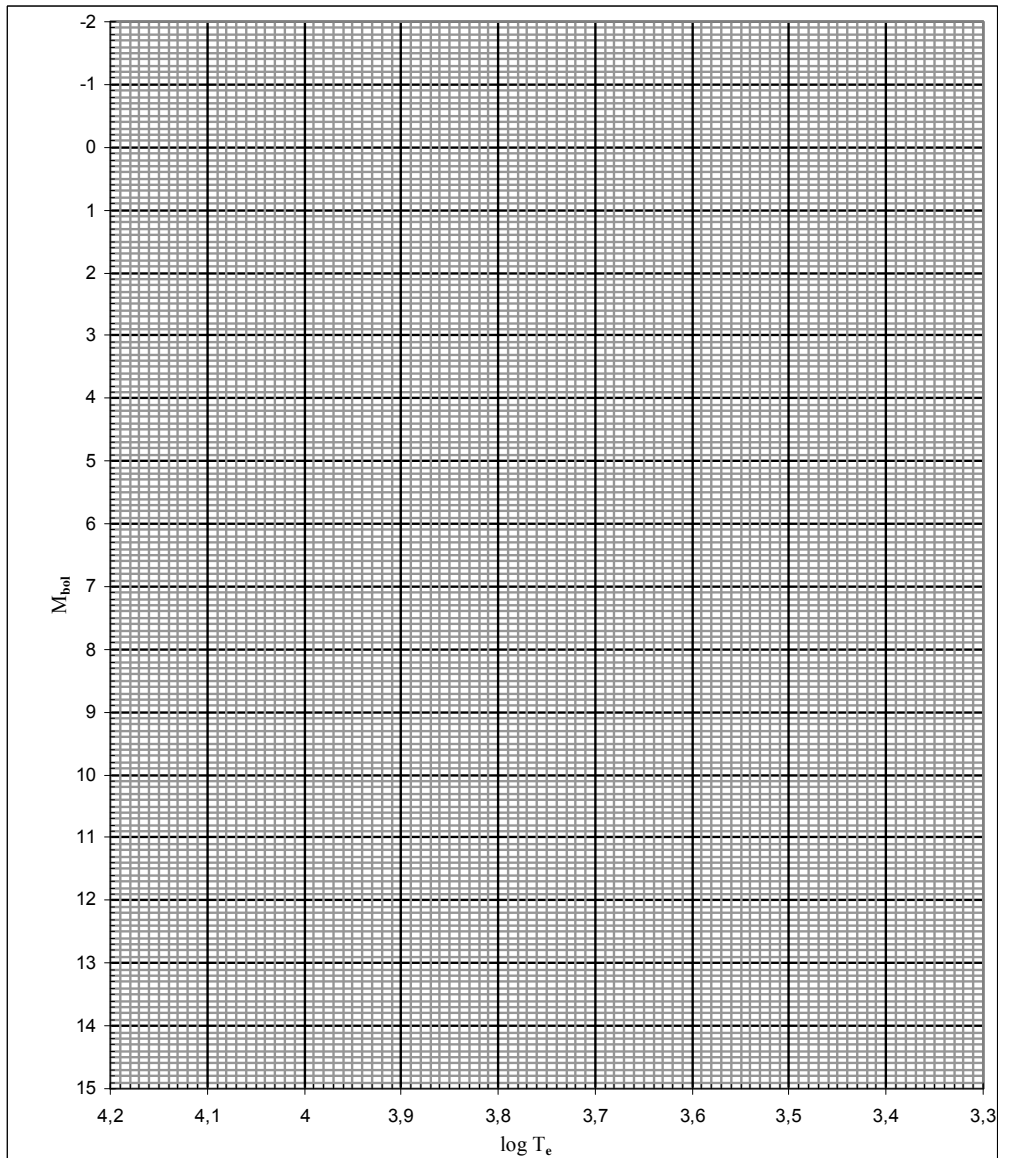
Teken deze sterren in op de figuur op de volgende bladzijde.

Voeg hierbij ook de sterren van de tabel naast de figuur.

Alle sterren op minder dan 5.1 parsec staan nu op je Hertzsprung-Russell-diagram, behalve de zon.

Sp	$\log T_e$	BC
O5	4.54	-4.6
B0	4.32	-3.0
B5	4.13	-1.6
A0	3.99	-0.68
A5	3.91	-0.30
F0	3.86	-0.10
F5	3.81	-0.00
G0	3.78	-0.03
G5	3.73	-0.10
K0	3.67	-0.20
K5	3.60	-0.58
M0	3.52	-1.20
M5	3.41	-2.1

Ster	$\log T_e$	M_{bol}
Ross 154	3.44	13.26
Ross 248	3.38	12.46
ϵ Eri	3.65	5.79
Ross 128	3.41	11.4
L 789-6	3.39	12.67
61 Cyg A	3.60	6.94
61 Cyg B	3.57	7.62
α CMi A	3.81	2.63
α CM1 B	3.86	12.90
ϵ Ind	3.60	6.42
BD+43°44 A	3.50	8.91
BD+43°44 B	3.39	10.98
BD+59°1915 A	3.40	9.2
BD+59°1915 B	3.41	9.81
τ Cet	3.70	5.56
CD-39°14192	3.52	7.55
CD-45°1841	3.52	9.6
Krüger 60 A	3.50	9.88
Krüger 60 B	3.39	11.1
Ross 614 A	3.44	11.25
Ross 614 B	—	—
BD-12°4523	3.44	10.15
Van Maanen star	3.78	14.19
Wolf 424 A	3.37	12.03
Wolf 424 B	3.37	12.03
BD+50°1725	3.52	7.12
CD-37°15492	3.50	8.56
BD+20°2465	3.44	9.15
CD-46°11540	3.44	9.07
CD-44°11909	3.41	10.7
CD-49°13515	3.50	8.76
BD+68°946	3.44	8.79
σ Eri A	3.66	5.73
σ Eri B	3.99	10.34
BD+15°2620	3.44	8.08
a Aql	3.87	2.11
BD+43°4305	3.41	9.42
AC+79°3888	3.44	10.44



Het spectraaltype van de zon is G2 V, haar schijnbare visuele magnitude is -26.86 , en haar afstand tot de aarde is 1 AE. Bepaal $\log T_e$ en M_{bol} voor de zon en teken ook de zon op je HRD.

Na het tekenen van het diagram, kan men zich nog volgende vragen stellen:

- Welke sterren komen voor op het getekende diagram? Roze reuzen? Superreuzen? Hoofdreekssterren? Witte dwergen?
- Wat is de schijnbare visuele magnitude van de zon gezien vanaf
 - α Cen A:
 - α CMa A:
- De meest verwijderde ster uit de lijst staat op 5.1 parsec. Bereken het volume van een bol met die straal:

$$V = \frac{4}{3}\pi r^3$$

Hoeveel sterren staan er per kubieke parsec in de buurt van de zon?

..... sterren/pc³.

De helderste twintig sterren

In de tabel hiernaast vind je voor de (visueel) helderste twintig sterren (op de zon na) de schijnbare visuele magnitude m_v , het spectraaltype Sp (Harvard classificatie) en de lichtkrachtklasse (MK-classificatie).

Gevraagd (met verantwoording):

- Welke is de heetste ster?
- Welke is de koelste ster?
- Welke sterren zijn wit?
- Welke is de visueel zwakste ster?
- Welke is de visueel helderste ster?
- Welke ster heeft de helderst in absolute magnitude?
- Welke ster heeft de zwakst in absolute magnitude?
- Welke ster heeft de grootste straal?
- Welke ster heeft de kleinste straal?
- Welke ster lijkt het meest op de zon?
- Welke ster is het dichtst bij ons gelegen?
- Welke ster is het verst van ons verwijderd?

Voor het beantwoorden van deze vragen mag geen gebruik gemaakt worden van gegevens die verderop in dit practicum worden verstrekt of berekend; deze gegevens kunnen achteraf eventueel wel aangewend worden ter controle van de bekomen resultaten.

<i>Ster</i>	m_v	Sp	MK
Sirius (α CMa)	-1.45	A1	V
Canopus (α Car)	-0.73	F0	Ib
α Centauri	-0.1	G2	V
Arcturus (α Boo)	-0.06	K2	III
Wega (α Lyr)	0.04	A0	V
Capella (α Aur)	0.08	G2	III
Rigel (β Ori)	0.11	B8	Ia
Procyon (α CMi)	0.35	F5	IV
Betelgeuse (α Ori)	0.8	M2	I
Archemar (α Eri)	0.48	B5	IV-V
β Centauri	0.60	B1	II
Altair (α Aql)	0.77	A7	V
α Crucis	0.9	B2	IV
Aldebaran (α Tau)	0.85	K5	III
Spica (α Vir)	0.96	B1	V
Antares (α Sco)	1.0	M1	Ib
Pollux (β Gem)	1.15	K0	III
Fomalhaut (α PsA)	1.16	A3	V
Deneb (α Cyg)	1.25	A2	Ia
β Crucis	1.26	B0	II

Een Hertzsprung-Russell-diagram voor de helderste twintig sterren

Onderstaande tabel geeft voor de helderste twintig sterren de afstand d (in parsec) en herneemt verder de hoger vermelde schijnbare visuele magnitude m_v , het spectraaltype Sp (Harvard classificatie) en de lichtkrachtklasse (MK-classificatie).

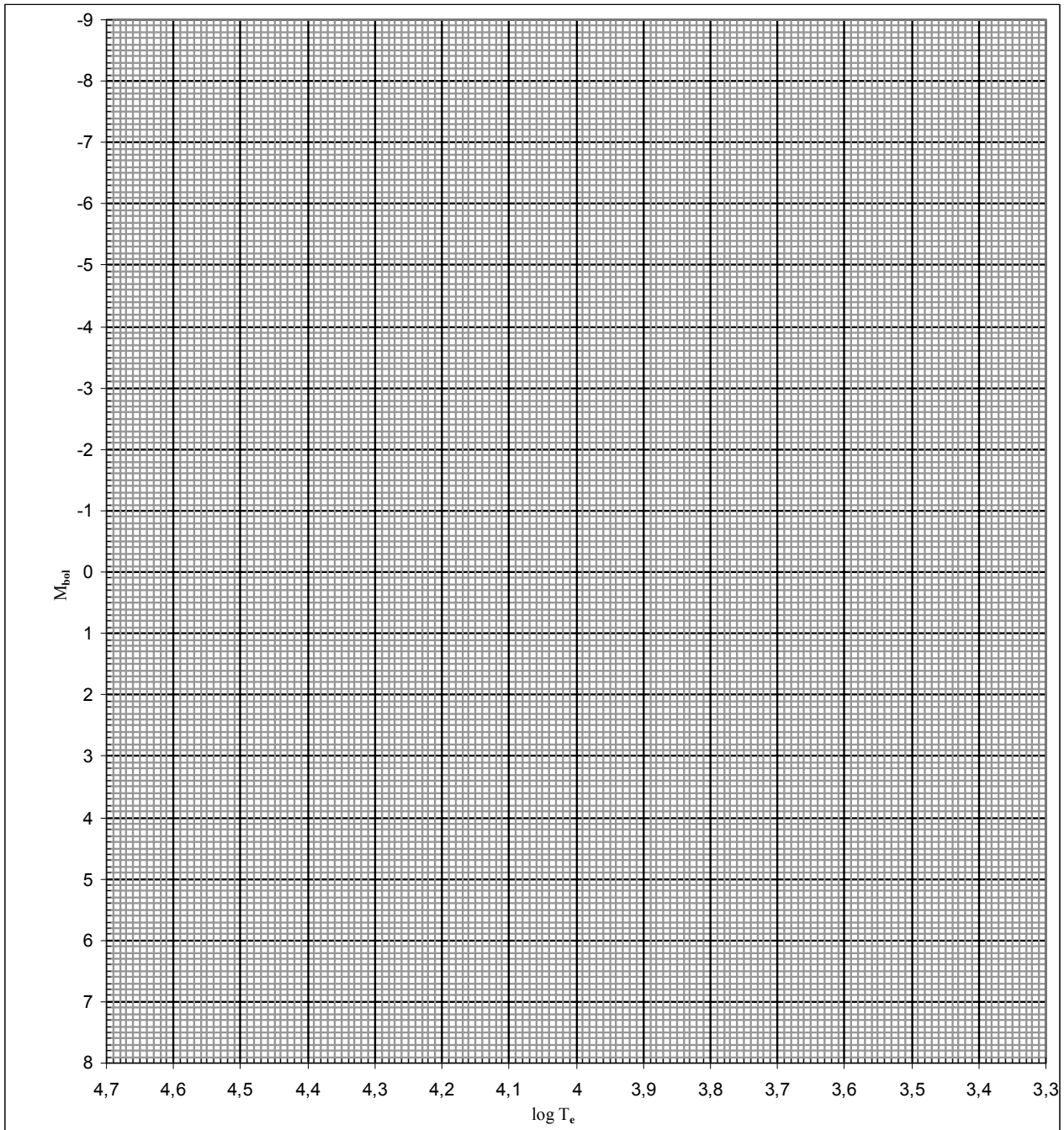
<i>Ster</i>	d (pc)	m_v	Sp	MK	M_v	$\log 7_e$	BC	M_{bol}
Sirius	2.7	-1.45	A1	V				
Canopus	60	-0.73	F0	Ib				
α Centauri	1.3	-0.1	G2	V				
Arcturus	11	-0.06	K2	III				
Wega	8.1	0.04	A0	V				
Capella	14	0.08	G2	III				
Rigel	250	0.11	B8	Ia				
Procyon	3.5	0.35	F5	IV				
Betelgeuse	200	0.8	M2	I				
Archemar	39	0.48	B5	IV-V				
β Centauri	120	0.60	B1	II				
Altair	50	0.77	A7	V				
α Crucis	80	0.9	B2	IV				
Aldebaran	21	0.85	K5	III				
Spica	80	0.96	B1	V				
Antares	130	1.0	M1	Ib				
Pollux	11	1.15	K0	III				
Fomalhaut	7	1.16	A3	V				
Deneb	500	1.25	A2	Ia				
β Crucis	150	1.26	B0	II				

Bepaal nu vooreerst de absolute visuele magnitude M_v voor de helderste twintig sterren. Maak hiervoor gebruik van formule (4). Vul de gegevens aan op de tabel op de vorige bladzijde.

Spectraaltipe	Hoofdreeks (V)		Reuzen (II, III, IV)		Superreuzen (I)	
	$\log T_e$	BC	$\log T_e$	BC	$\log T_e$	BC
O4	4.65	-4.1	4.65	-4.1	4.65	-4.1
O5	4.62	-3.9	4.62	-3.9	4.62	-3.9
O6	4.58	-3.5	4.58	-3.5	4.58	-3.5
O7	4.56	-3.4	4.56	-3.4	4.56	-3.4
O8	4.55	-3.3	4.55	-3.3	4.54	-3.2
O9	4.53	-3.2	4.53	-3.2	4.52	-3.1
O9.5	4.50	-3.0	4.50	-3.0	4.48	-2.9
B0	4.49	-2.97	—	—	—	—
B0.5	4.42	-2.60	—	—	—	—
B1	4.35	-2.28	4.29	-1.80	4.30	-1.62
B2	4.31	-2.07	—	—	—	—
B3	4.25	-1.77	4.22	-1.34	4.21	-1.16
B4	—	—	—	—	4.19	-1.05
B5	4.19	-1.45	—	—	4.14	-0.82
B6	4.16	-1.26	—	—	—	—
B7	4.13	-1.04	4.12	-1.07	4.08	-0.64
B8	4.08	-0.68	4.10	-0.72	4.04	-0.51
B9	4.03	-0.43	4.06	-0.46	4.01	-0.38
B9.5	4.00	-0.28	4.02	-0.32	—	—
A0	3.98	-0.20	4.00	-0.24	—	—
A1	3.97	-0.15	3.98	-0.19	—	—
A2	3.96	-0.10	3.95	-0.07	3.96	-0.17
A3	3.95	-0.06	3.93	-0.03	—	—
A4	3.94	-0.04	—	—	3.94	-0.10
A5	3.93	-0.02	3.90	-0.01	3.93	-0.00
A7	3.91	0.00	—	—	—	—
A8	—	—	—	—	3.91	+0.09
F0	3.88	+0.01	—	—	3.89	+0.14
F1	—	—	3.85	+0.01	—	—
F2	3.86	+0.01	—	—	—	—
F3	3.84	+0.01	—	—	—	—
F5	3.83	0.00	3.79	-0.03	3.84	+0.13
F6	3.81	-0.04	—	—	—	—
F7	3.80	-0.04	—	—	—	—
F8	3.79	-0.05	—	—	3.77	+0.04
G0	3.77	-0.06	—	—	—	—
G2	3.76	-0.07	3.73	-0.14	3.71	-0.12
G3	—	—	—	—	3.70	-0.14
G5	3.75	-0.10	3.70	-0.22	—	—
G6	—	—	3.69	-0.32	3.68	-0.22
G8	3.74	-0.15	—	—	—	—
G9	—	—	—	—	3.66	-0.35
K0	3.72	-0.19	—	—	—	—
K2	3.68	-0.25	3.63	-0.58	3.63	-0.46
K3	3.66	-0.35	—	—	3.61	-0.67
K4	—	—	3.59	-0.92	3.59	-0.82
K5	3.64	-0.65	—	—	—	—
K7	3.62	-0.90	—	—	3.54	-1.43
K8	—	—	3.56	-1.43	—	—
M0	3.59	-1.20	—	—	—	—

De effectieve temperatuur van een ster wordt bepaald op indirecte wijze. Men gebruikt namelijk eerst het spectrum van de ster om het spectraaltype en de lichtkrachtklasse vast te stellen. Men beschikt dan over tabellen, de zogenaamde kalibratietabellen, om uit het spectraaltype en de lichtkrachtklasse van de ster, de effectieve temperatuur te berekenen. Ook de bolometrische correctie BC wordt met kalibratietabellen bepaald. De tabel op de vorige bladzijde is een voorbeeld van zo'n kalibratietabel.

Bepaal met behulp van deze kalibratietabel voor elke ster de logaritme van de effectieve temperatuur T_e , en de bolometrische correctie BC . Voor spectrale types waarvoor geen waarden zijn opgegeven, mag er lineair geïnterpoleerd worden. Vul de resultaten aan op de tabel van de helderste twintig sterren.



De absolute visuele magnitude moet nu nog gecorrigeerd worden tot M_{bol} , de absolute bolometrische magnitude. Maak hiervoor gebruik van formule (9) en vul dit ook aan op de tabel.

Je hebt nu voor de helderste twintig sterren $\log T_e$ en M_{bol} bepaald. Teken deze sterren in op de figuur op de vorige bladzijde.

Het spectraaltype van de zon is G2 V, haar schijnbare visuele magnitude is -26.86 , en haar afstand tot de aarde is 1 AE. Bepaal $\log T_e$ en M_{bol} voor de zon en teken ook de zon op je HRD.

Welke sterren komen voor op het getekende diagram? Roze reuzen? Superreuzen? Hoofdreekssterren? Witte dwergen?

Vergelijk dit met het HRD van de meest nabije tien sterren en verklaar de gelijkenissen en/of verschillen.

Is het HRD van de helderste twintig sterren representatief voor de algemene structuur van het Hertzsprung-Russell-diagram? Waarom of waarom niet?