

Sterrenkunde Hoofdstuk 3: Structuur en evolutie van sterren

Marc van der Sluys

Universiteit Utrecht, Nikhef



**Universiteit
Utrecht**

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

sluys@nikhef.nl

Nikhef

Overzicht

HRD/CFD

Eigenschappen van
hoofdreekssterren

Evolutiesporen in het
HRD

Overzicht
sterevolutie

Structuur en
evolutie van lichte
sterren

De hoofdreeks

De reuzentakken

Planetaire nevels

Structuur en
evolutie van
zware sterren

Hoofdreekssterren

Na de hoofdreeks

Supernovae

Compacte
sterren

Witte dwergen

Neutronensterren

Zwarte gaten

Overzicht

Overzicht
sterevolutie

Leeftijden

Isochronen

- 1 Overzicht
 - HRD/CFD
 - Eigenschappen van hoofdreekssterren
 - Evolutiesporen in het HRD
 - Overzicht sterevolutie
- 2 Structuur en evolutie van lichte sterren

- 3 Structuur en evolutie van zware sterren
- 4 Compacte sterren
- 5 Overzicht
- 6 Leeftijden

Overzicht

HRD/CFD

Eigenschappen van
hoofdrekssterren

Evolutiesporen in het
HRD

Overzicht
sterevolutie

Structuur en evolutie van lichte sterren

De hoofdreks

De reuzentakken

Planetaire nevels

Structuur en evolutie van zware sterren

Hoofdrekssterren

Na de hoofdreks

Supernovae

Compacte sterren

Witte dwergen

Neutronensterren

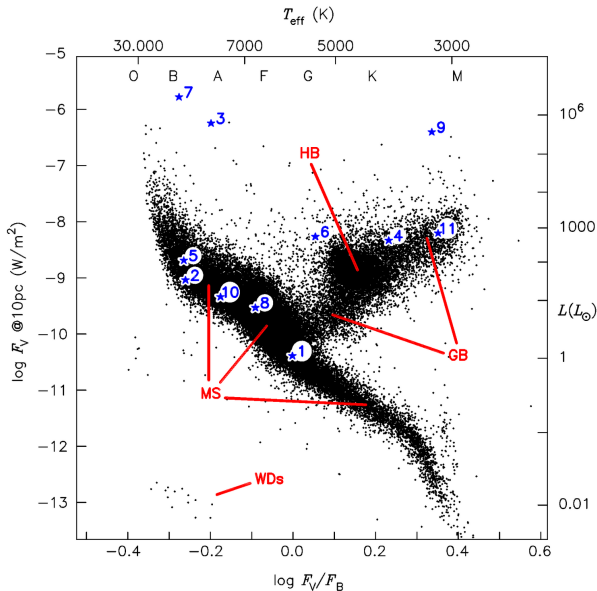
Zwarte gaten

Overzicht

Overzicht
sterevolutie

Leeftijden

Isochronen



Bron: Van der Sluys (2006); Data: Hipparcos catalogue

- 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 hoofdreks

Overzicht

HRD/CFD

Eigenschappen van
hoofdrekssterren

Evolutiesporen in het
HRD

Overzicht
sterevolutie

Structuur en
evolutie van lichte
sterren

De hoofdreks

De reuzentakken

Planetaire nevels

Structuur en
evolutie van
zwarte sterren

Hoofdrekssterren

Na de hoofdreks

Supernovae

Compacte
sterren

Witte dwergen

Neutronensterren

Zwarte gaten

Overzicht

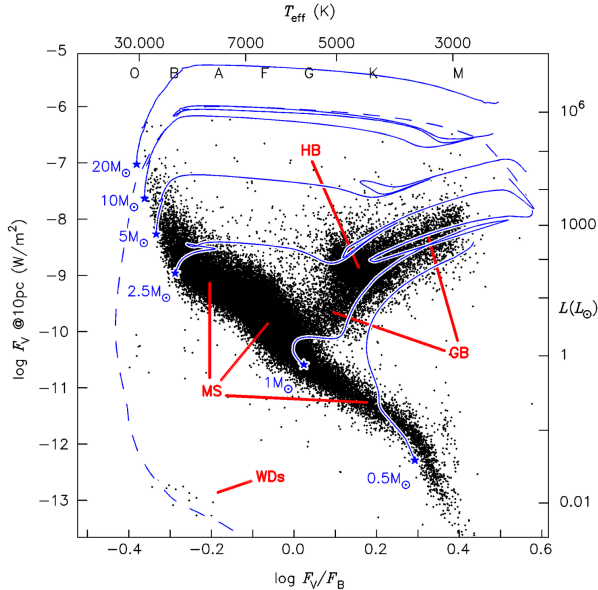
Overzicht
sterevolutie

Leeftijden

Isochronen

M ($M_{\odot}$)	t (Myr)	R ($R_{\odot}$)	L ($L_{\odot}$)	T_o (K)	T_c (10^6 K)	Aantal (t.o.v. 1 $M_{\odot}$)
0.5	52 600	0.50	0.05	4410	9.8	7.07
0.8	11 600	0.79	0.38	5650	13.4	2.34
1.0	4900	1.01	1.05	6350	15.9	1.00
1.5	1660	1.95	6.75	7200	20.9	0.131
2.0	582	2.23	20.4	8770	22.5	0.0232
2.5	405	2.80	57.8	10 100	24.1	9.59×10^{-3}
3.0	246	3.09	120	11 400	25.2	3.80×10^{-3}
5.0	70.6	4.19	895	16 000	28.6	3.27×10^{-4}
10.0	12.7	5.74	8590	23 800	32.8	1.16×10^{-5}
20.0	5.18	8.78	67 900	32 000	37.0	9.3×10^{-7}
50.0	2.41	15.9	527 000	39 600	41.4	5×10^{-8}

Eigenschappen *halverwege* de hoofdreks ($X \approx 0.35$)



- 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**

Overzicht

HRD/CFD

Eigenschappen van
hoofdreekssterren

Evolutiesporen in het
HRD

Overzicht
sterevolutie

Structuur en evolutie van lichte sterren

De hoofdreeks

De reuzentakken

Planetaire nevels

Structuur en evolutie van zware sterren

Hoofdreekssterren

Na de hoofdreeks

Supernovae

Compacte sterren

Witte dwergen

Neutronensterren

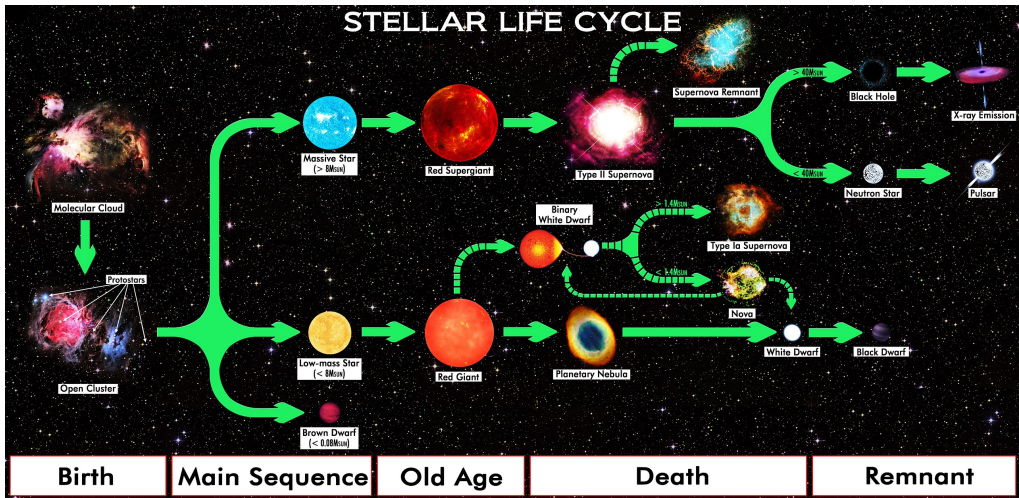
Zwarte gaten

Overzicht

Overzicht
sterevolutie

Leeftijden

Isochronen



Bron: Wikipedia, user R.N. Bailey (2017)

Overzicht

HRD/CFD

Eigenschappen van
hoofdreekssterren

Evolutiesporen in het
HRD

Overzicht
sterevolutie

**Structuur en
evolutie van lichte
sterren**

De hoofdreeks

De reuzentakken

Planetaire nevels

**Structuur en
evolutie van
zware sterren**

Hoofdreekssterren

Na de hoofdreeks

Supernovae

**Compacte
sterren**

Witte dwergen

Neutronensterren

Zwarte gaten

Overzicht

Overzicht
sterevolutie

Leeftijden

Isochronen

1 Overzicht

2 Structuur en evolutie van lichte sterren

- De hoofdreeks
- De reuzentakken
- Planetaire nevels

3 Structuur en evolutie van zware sterren

4 Compacte sterren

5 Overzicht

6 Leeftijden

Overzicht

HRD/CFD

Eigenschappen van
hoofdrekssterren

Evolutiesporen in het
HRD

Overzicht
sterevolutie

Structuur en evolutie van lichte sterren

De hoofdreks

De reuzentakken

Planetaire nevels

Structuur en evolutie van zware sterren

Hoofdrekssterren

Na de hoofdreks

Supernovae

Compacte sterren

Witte dwergen

Neutronensterren

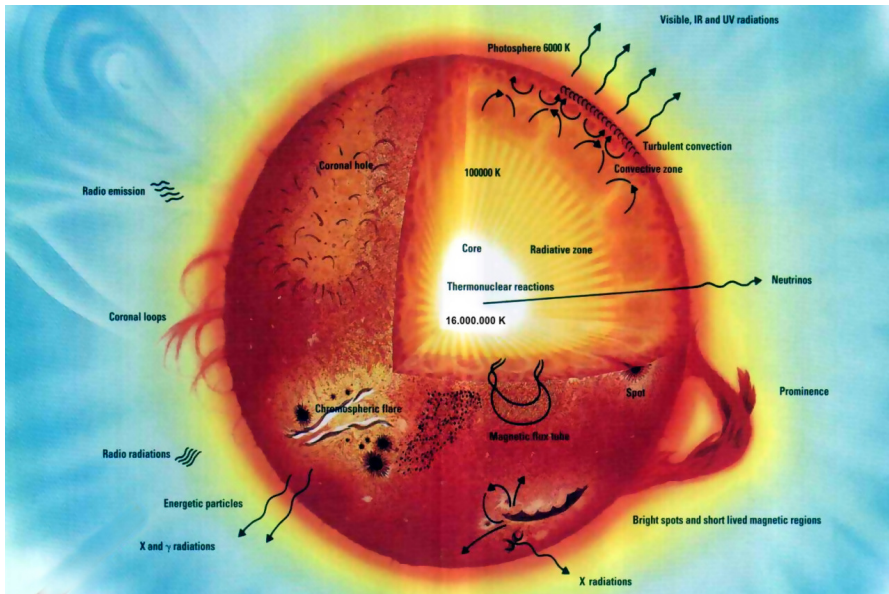
Zwarte gaten

Overzicht

Overzicht
sterevolutie

Leeftijden

Isochronen



Overzicht

HRD/CFD

Eigenschappen van
hoofdreekssterren

Evolutiesporen in het
HRD

Overzicht
sterevolutie

Structuur en evolutie van lichte sterren

De hoofdreeks

De reuzentakken

Planetaire nevels

Structuur en evolutie van zware sterren

Hoofdreekssterren

Na de hoofdreeks

Supernovae

Compacte sterren

Witte dwergen

Neutronensterren

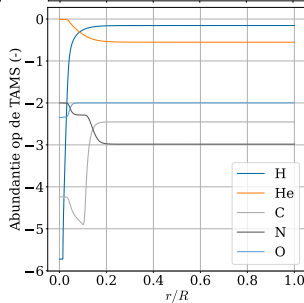
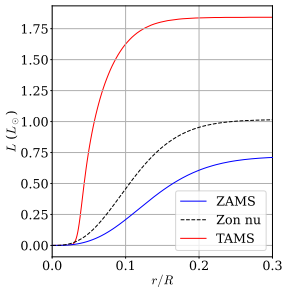
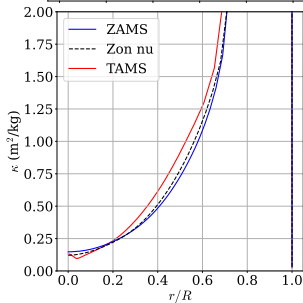
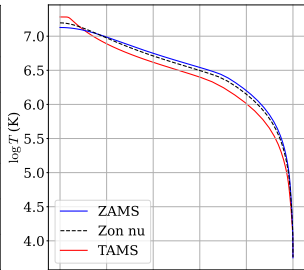
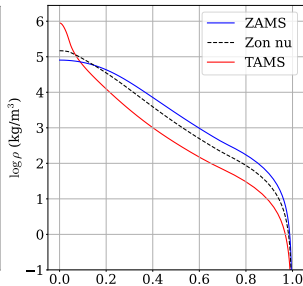
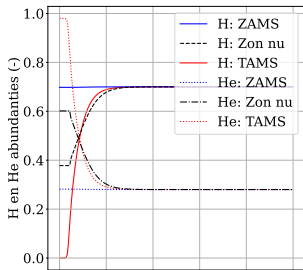
Zwarte gaten

Overzicht

Overzicht
sterevolutie

Leeftijden

Isochronen



ZAMS: zero-age main sequence; **TAMS:** terminal-age main sequence

Overzicht

HRD/CFD

Eigenschappen van
hoofdreekssterren

Evolutiesporen in het
HRD

Overzicht
sterevolutie

Structuur en evolutie van lichte sterren

De hoofdreeks

De reuzentakken

Planetaire nevels

Structuur en evolutie van zware sterren

Hoofdreekssterren

Na de hoofdreeks

Supernovae

Compacte sterren

Witte dwergen

Neutronensterren

Zwarte gaten

Overzicht

Overzicht
sterevolutie

Leeftijden

Isochronen

- De hoeveelheid **waterstof in de kern** neemt af;
 - $X_{\text{ZAMS}} \approx 0.7$, $X_{\text{TAMS}} \approx 0$
- De hoeveelheid **helium in de kern** neemt toe;
 - $Y_{\text{ZAMS}} \approx 0.28$, $Y_{\text{TAMS}} \approx 0.98$
- **C,N,O in de kern** vinden een nieuw evenwicht in geval van de CNO-cyclus;
- De **centrale dichtheid** neemt toe;
- De **centrale temperatuur** neemt toe;
- Het profiel van de **lichtkracht** wordt steiler.

Overzicht

HRD/CFD

Eigenschappen van
hoofdreekssterren

Evolutiesporen in het
HRD

Overzicht
sterevolutie

Structuur en evolutie van lichte sterren

De hoofdreeks

De reuzentakken

Planetaire nevels

Structuur en evolutie van zware sterren

Hoofdreekssterren

Na de hoofdreeks

Supernovae

Compacte sterren

Witte dwergen

Neutronensterren

Zwarte gaten

Overzicht

Overzicht
sterevolutie

Leeftijden

Isochronen

A-B: **MS: H-fusie kern**

B-C: **Hertzsprung Gap
(HG) = subreus:
H-fusie in schil**

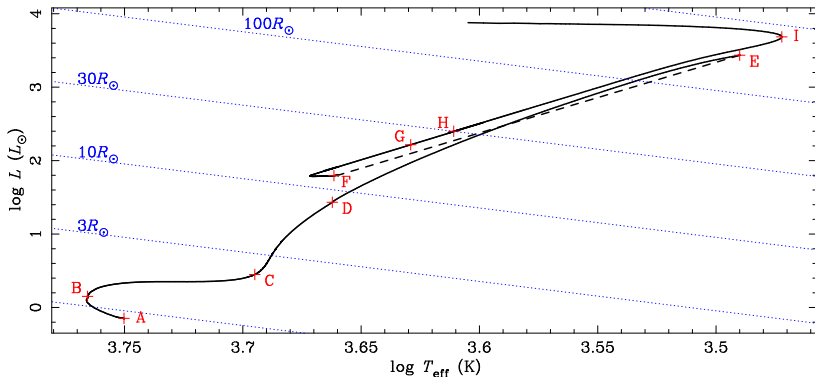
C-E: **RGB: hele mantel
convectief, sterke
wind $\rightarrow \dot{M}$**

E: **He ontbrandt;
ster krimpt**

F-G: **HB: He-fusie in
kern**

H-I: **AGB: He-fusie in
schil; wind
blaast mantel
weg**

I+: **Planetaire nevel
(PN) $\rightarrow$
 $\sim 0.6 M_{\odot}$ WD
(He, CO, ONe)**



Overzicht

HRD/CFD

Eigenschappen van
hoofdrekssterren

Evolutiesporen in het
HRD

Overzicht
sterevolutie

Structuur en evolutie van lichte sterren

De hoofdreks

De reuzentakken

Planetaire nevels

Structuur en evolutie van zware sterren

Hoofdrekssterren

Na de hoofdreks

Supernovae

Compacte sterren

Witte dwergen

Neutronensterren

Zwarte gaten

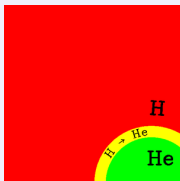
Overzicht

Overzicht
sterevolutie

Leeftijden

Isochronen

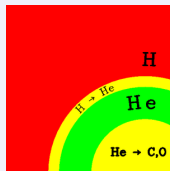
Rodereuzentak (C–E)
(*red-giant branch*; RGB)



Van binnen naar buiten:

- 1 inerte helium**kern**
- 2 waterstoffusies**schil**
- 3 waterstof**mantel**

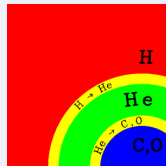
Horizontale tak (F–G)
(*horizontal branch*; HB)



Van binnen naar buiten:

- 1 heliumfusie in de **kern**
- 2 inerte helium**schil**
- 3 waterstoffusies**schil**
- 4 waterstof**mantel**

Asymptotische
reuzentak (AGB; H–I)



Van binnen naar buiten:

- 1 inerte CO-**kern**
- 2 heliumfusies**schil**
- 3 inerte helium**schil**
- 4 waterstoffusies**schil**
- 5 waterstof**mantel**

Let op: kern $\neq$ schil $\neq$ mantel!

Overzicht

HRD/CFD

Eigenschappen van
hoofdreekssterren

Evolutiesporen in het
HRD

Overzicht
sterevolutie

Structuur en evolutie van lichte sterren

De hoofdreeks

De reuzentakken

Planetaire nevels

Structuur en evolutie van zware sterren

Hoofdreekssterren

Na de hoofdreeks

Supernovae

Compacte sterren

Witte dwergen

Neutronensterren

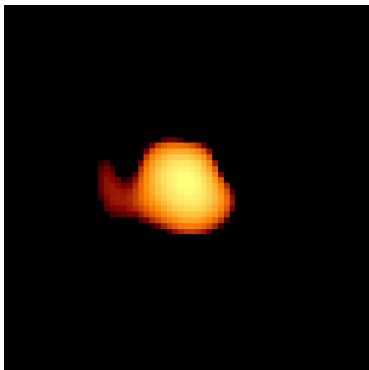
Zwarte gaten

Overzicht

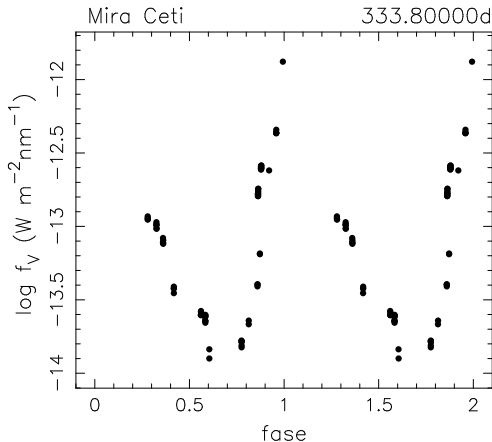
Overzicht
sterevolutie

Leeftijden

Isochronen



Bron: HST (NASA/ESA)



- Pulserende AGB-ster
→ variabel, instabiel

- $M \sim 1.18 M_{\odot}$
- $R \sim 350 R_{\odot}$

- $L \sim 9000 L_{\odot}$
- $T_{\text{eff}} \sim 3000 \text{ K}$

Sterke sterrenwind → veel massaverlies

Overzicht

HRD/CFD

Eigenschappen van
hoofdrekssterren

Evolutiesporen in het
HRD

Overzicht
sterevolutie

Structuur en evolutie van lichte sterren

De hoofdreks

De reuzentakken

Planetaire nevels

Structuur en evolutie van zware sterren

Hoofdrekssterren

Na de hoofdreks

Supernovae

Compacte sterren

Witte dwergen

Neutronensterren

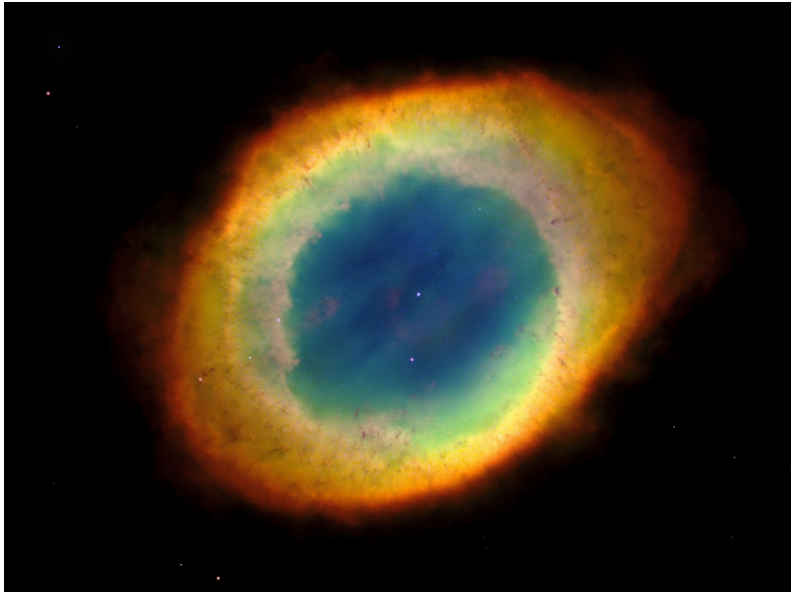
Zwarte gaten

Overzicht

Overzicht
sterevolutie

Leeftijden

Isochronen



Bron: HST (NASA/ESA)

Overzicht

HRD/CFD

Eigenschappen van
hoofdreekssterren

Evolutiesporen in het
HRD

Overzicht
sterevolutie

Structuur en evolutie van lichte sterren

De hoofdreeks

De reuzentakken

Planetaire nevels

Structuur en evolutie van zware sterren

Hoofdreekssterren

Na de hoofdreeks

Supernovae

Compacte sterren

Witte dwergen

Neutronensterren

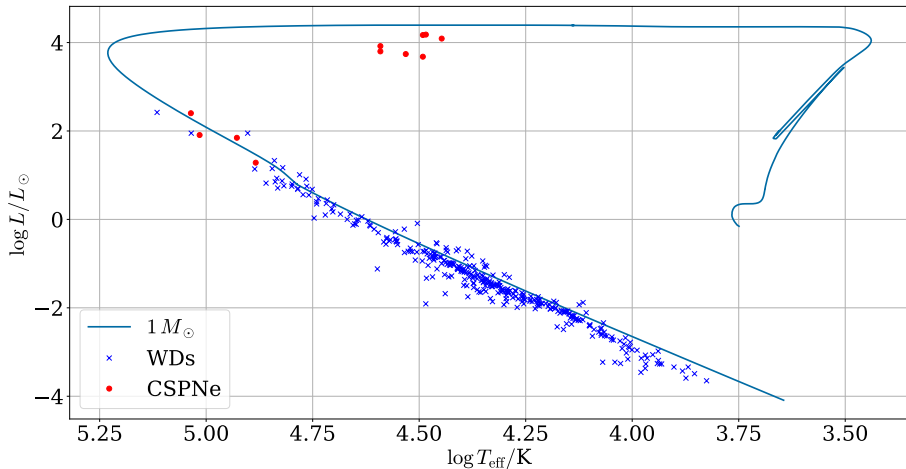
Zwarte gaten

Overzicht

Overzicht
sterevolutie

Leeftijden

Isochronen



- 1 post-AGB-ster “steekt het HRD” over naar links als centrale ster van een **planetaire nevel** (CSPN)
- 2 ster koelt af tot **witte dwerg** (→ zwarte dwerg)

Structuur en evolutie van sterren

Overzicht

HRD/CFD

Eigenschappen van
hoofdreekssterren

Evolutiesporen in het
HRD

Overzicht
sterevolutie

Structuur en evolutie van lichte sterren

De hoofdreeks

De reuzentakken

Planetaire nevels

Structuur en evolutie van zware sterren

Hoofdreekssterren

Na de hoofdreeks

Supernovae

Compacte sterren

Witte dwergen

Neutronensterren

Zwarte gaten

Overzicht

Overzicht
sterevolutie

Leeftijden

Isochronen

1 Overzicht

2 Structuur en evolutie van lichte sterren

3 Structuur en evolutie van zware sterren

- Hoofdreekssterren

- Na de hoofdreeks
- Supernovae

4 Compacte sterren

5 Overzicht

6 Leeftijden

Overzicht

HRD/CFD

Eigenschappen van
hoofdreekssterren

Evolutiesporen in het
HRD

Overzicht
sterevolutie

Structuur en evolutie van lichte sterren

De hoofdreeks

De reuzentakken

Planetaire nevels

Structuur en evolutie van zware sterren

Hoofdreekssterren

Na de hoofdreeks

Supernovae

Compacte sterren

Witte dwergen

Neutronensterren

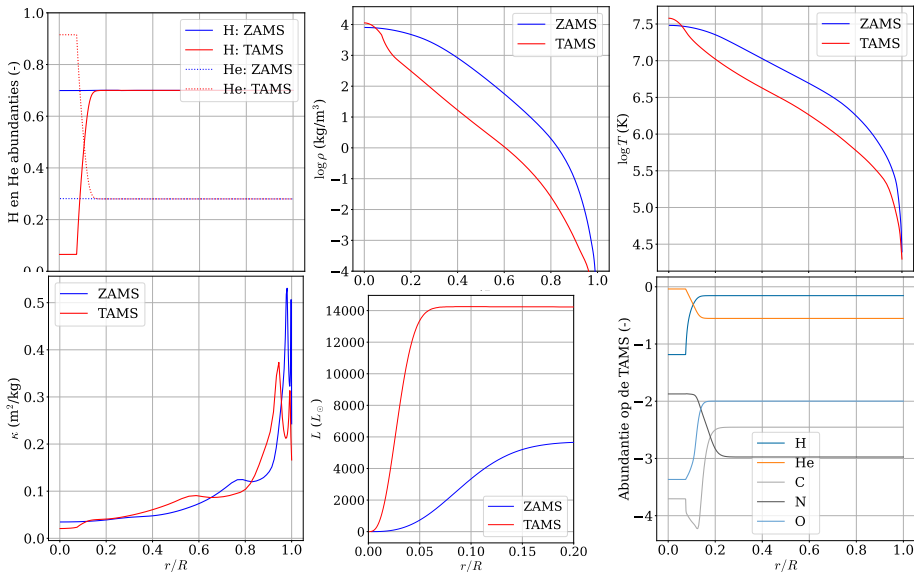
Zwarte gaten

Overzicht

Overzicht
sterevolutie

Leeftijden

Isochronen



ZAMS: zero-age main sequence;

TAMS: terminal-age main sequence

Overzicht

HRD/CFD

Eigenschappen van
hoofdreekssterren

Evolutiesporen in het
HRD

Overzicht
sterevolutie

Structuur en evolutie van lichte sterren

De hoofdreeks

De reuzentakken

Planetaire nevels

Structuur en evolutie van zware sterren

Hoofdreekssterren

Na de hoofdreeks

Supernovae

Compacte sterren

Witte dwergen

Neutronensterren

Zwarte gaten

Overzicht

Overzicht
sterevolutie

Leeftijden

Isochronen

- $1 M_{\odot}$: hogere **centrale dichtheid**;
- $10 M_{\odot}$: hogere **centrale temperatuur**;
- $10 M_{\odot}$: veel steiler **lichtkrachtprofiel**;
- $1 M_{\odot}$: lage temperatuur in de mantel $\rightarrow$ hoge **opaciteit** $\rightarrow$ **convectie**;
 - **convectiezone** beslaat de buitenste $0.3 R_{\odot}$, maar slechts $0.03 M_{\odot}$
- $10 M_{\odot}$: **hoge lichtkracht/flux** $L(r)/4\pi r^2$ in de kern $\rightarrow$ **convectie**;
- $10 M_{\odot}$: vlak **abundantieprofiel** kern door **convectie** $\rightarrow$ mixing.

Convectie in hoofdreekssterren (H3.2.1)

- Hoofdreekssterren met $M \lesssim 0.35 M_{\odot}$: **volledig convectief**;
- Hoofdreekssterren met $0.35 M_{\odot} \lesssim M \lesssim 1.3 M_{\odot}$: **convectieve mantel**;
 - oorzaak: lage $T \rightarrow$ veel gebonden elektronen $\rightarrow$ hoge opaciteit
- Hoofdreekssterren met $M \gtrsim 1.2 M_{\odot}$: **convectieve kern**.
 - oorzaak: CNO-cyclus $\rightarrow$ sterke T -afhankelijkheid $\rightarrow$ grote flux in klein volume

Overzicht

HRD/CFD

Eigenschappen van
hoofdrekssterren

Evolutiesporen in het
HRD

Overzicht
sterevolutie

Structuur en evolutie van lichte sterren

De hoofdreks

De reuzentakken

Planetaire nevels

Structuur en evolutie van zware sterren

Hoofdrekssterren

Na de hoofdreks

Supernovae

Compacte sterren

Witte dwergen

Neutronensterren

Zwarte gaten

Overzicht

Overzicht
sterevolutie

Leeftijden

Isochronen

**A: MS: H-fusie
in kern**

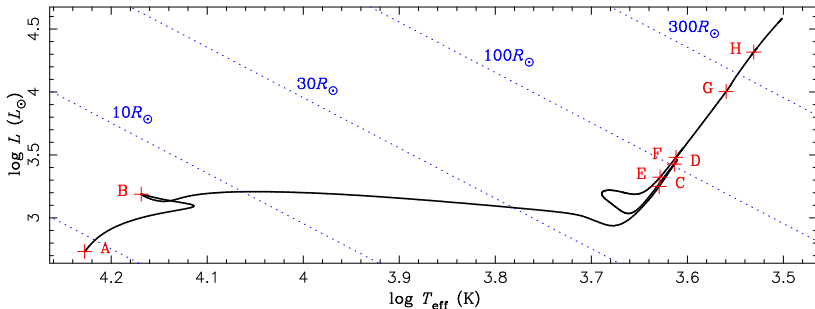
B: TAMS

**B-D: HG +
reuzentak:
H-fusie in
schil**

**D: He ontbrandt
in kern →
HB**

E: Einde HB

**F-H: AGB:
He-fusie in
schil**



Bron: [Van der Sluys \(2006\)](#)

Overzicht

HRD/CFD

Eigenschappen van
hoofdrekssterren

Evolutiesporen in het
HRD

Overzicht
sterevolutie

Structuur en evolutie van lichte sterren

De hoofdreks

De reuzentakken

Planetaire nevels

Structuur en evolutie van zware sterren

Hoofdrekssterren

Na de hoofdreks

Supernovae

Compacte sterren

Witte dwergen

Neutronensterren

Zwarte gaten

Overzicht

Overzicht
sterevolutie

Leeftijden

Isochronen

1 Hoofdreks

- de sterren hebben een **convectieve kern**, waardoor H in de *hele kern* ineens opraakt
- de *hele kern* krimpt, en de ster maakt rond de TAMS een ruk naar links in het HRD

2 Reuzenstadium

- de hetere ster beweegt veel **verder naar rechts in het HRD** dan een lage-massaster: grotere **Hertzsprung Gap**
- tijdens heliumfusie in de kern (HB) vertonen sterren tussen ~ 4 en $\sim 10 M_{\odot}$ een lus naar links
- zeer zware sterren ($\gtrsim 11 M_{\odot}$) evolueren bij vrijwel **constante lichtkracht** en vertonen nauwelijks een reuzentak
- **sterrenwinden** zijn erg **onzeker** en het massaverlies speelt een grote rol bij de evolutie en eindmassa van de ster
- zeer zware sterren verliezen mogelijk hun **hele waterstofmantel**, worden hierdoor weer **heter en blauwer** en gaan verder als **heliumsterren**, ook wel *Wolf-Rayetsterren* genoemd

Overzicht

HRD/CFD

Eigenschappen van
hoofdreekssterren

Evolutiesporen in het
HRD

Overzicht
sterevolutie

Structuur en evolutie van lichte sterren

De hoofdreeks

De reuzentakken

Planetaire nevels

Structuur en evolutie van zware sterren

Hoofdreekssterren

Na de hoofdreeks

Supernovae

Compacte sterren

Witte dwergen

Neutronensterren

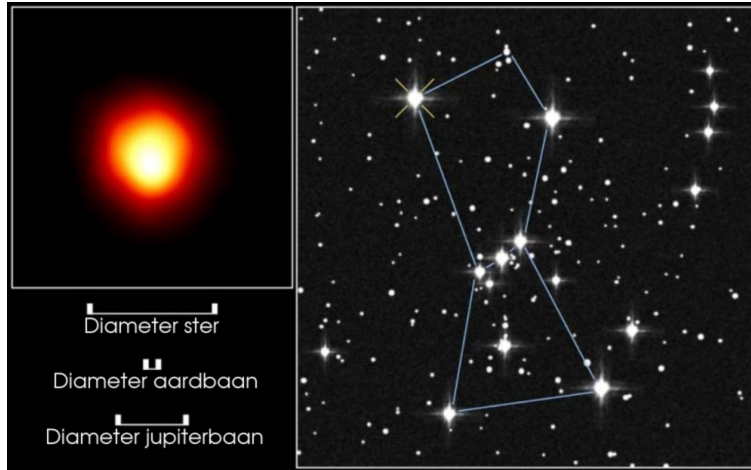
Zwarte gaten

Overzicht

Overzicht
sterevolutie

Leeftijden

Isochronen



Bron: HST (NASA/ESA)

- $M \sim 18 M_{\odot}$
- $R \sim 700 - 1000 R_{\odot}$
- $L \sim 87\,100 L_{\odot}$

Overzicht

HRD/CFD

Eigenschappen van
hoofdreekssterren

Evolutiesporen in het
HRD

Overzicht
sterevolutie

Structuur en evolutie van lichte sterren

De hoofdreeks

De reuzentakken

Planetaire nevels

Structuur en evolutie van zware sterren

Hoofdreekssterren

Na de hoofdreeks

Supernovae

Compacte sterren

Witte dwergen

Neutronensterren

Zwarte gaten

Overzicht

Overzicht
sterevolutie

Leeftijden

Isochronen



$$M \sim 20 M_{\odot}$$

Bron: James Webb telescope (NASA/ESA)

Overzicht

HRD/CFD

Eigenschappen van
hoofdrekssterren

Evolutiesporen in het
HRD

Overzicht
sterevolutie

Structuur en evolutie van lichte sterren

De hoofdreks

De reuzentakken

Planetaire nevels

Structuur en evolutie van zware sterren

Hoofdrekssterren

Na de hoofdreks

Supernovae

Compacte sterren

Witte dwergen

Neutronensterren

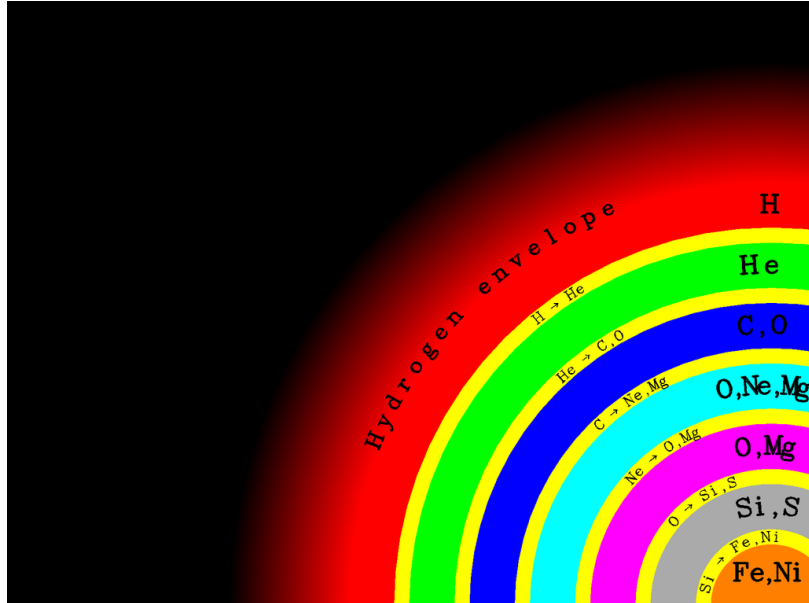
Zwarte gaten

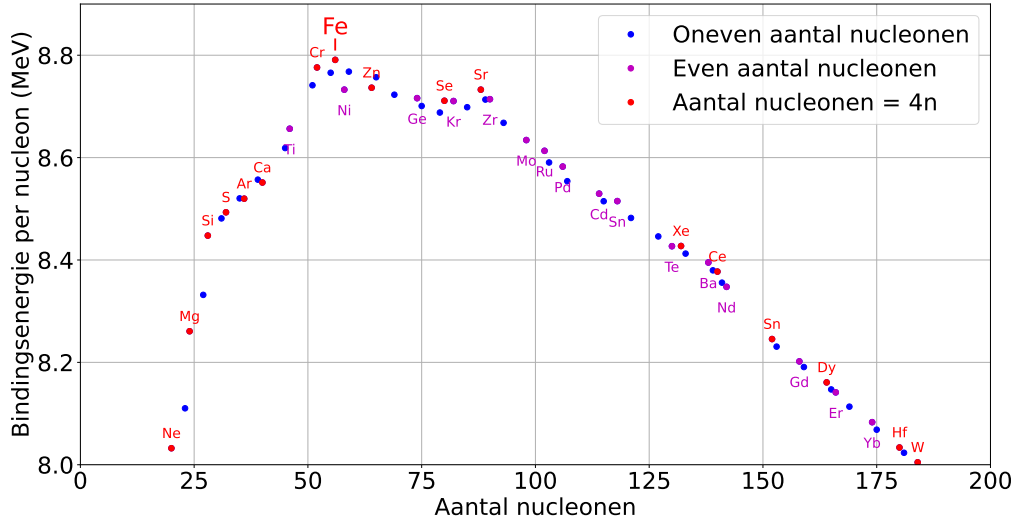
Overzicht

Overzicht
sterevolutie

Leeftijden

Isochronen





- IJzer (^{56}Fe) heeft de grootste bindingsenergie per nucleon
- Verdere fusie **kost** energie

Overzicht

HRD/CFD

Eigenschappen van
hoofdreekssterren

Evolutiesporen in het
HRD

Overzicht
sterevolutie

Structuur en evolutie van lichte sterren

De hoofdreeks

De reuzentakken

Planetaire nevels

Structuur en evolutie van zware sterren

Hoofdreekssterren

Na de hoofdreeks

Supernovae

Compacte sterren

Witte dwergen

Neutronensterren

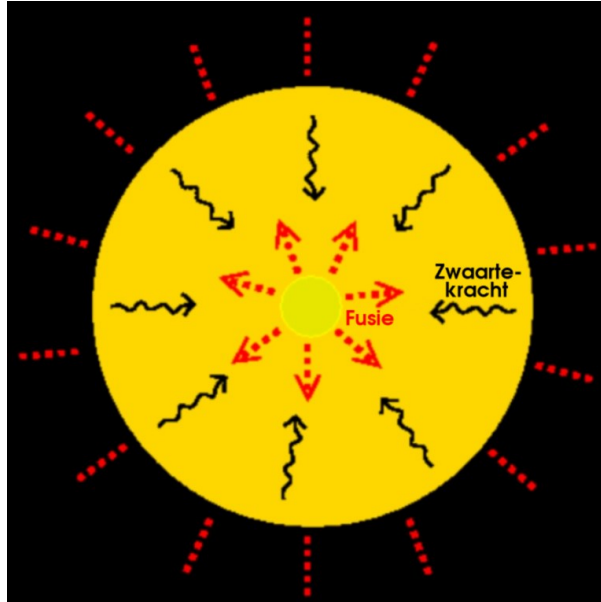
Zwarte gaten

Overzicht

Overzicht
sterevolutie

Leeftijden

Isochronen



Overzicht

HRD/CFD

Eigenschappen van
hoofdrekssterren

Evolutiesporen in het
HRD

Overzicht
sterevolutie

Structuur en evolutie van lichte sterren

De hoofdreks

De reuzentakken

Planetaire nevels

Structuur en evolutie van zware sterren

Hoofdrekssterren

Na de hoofdreks

Supernovae

Compacte sterren

Witte dwergen

Neutronensterren

Zwarte gaten

Overzicht

Overzicht
sterevolutie

Leeftijden

Isochronen



Overzicht

HRD/CFD

Eigenschappen van
hoofdrekssterren

Evolutiesporen in het
HRD

Overzicht
sterevolutie

Structuur en evolutie van lichte sterren

De hoofdreks

De reuzentakken

Planetaire nevels

Structuur en evolutie van zware sterren

Hoofdrekssterren

Na de hoofdreks

Supernovae

Compacte sterren

Witte dwergen

Neutronensterren

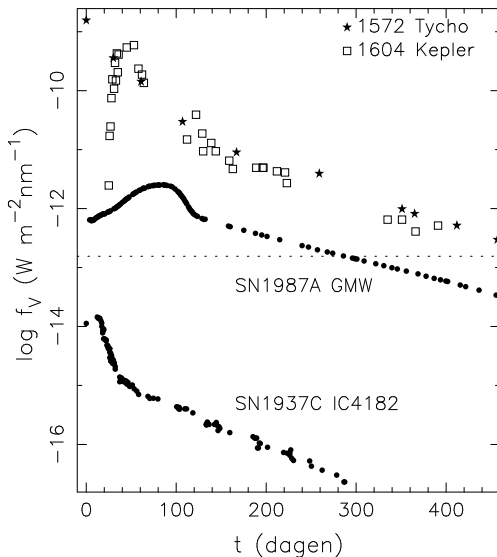
Zwarte gaten

Overzicht

Overzicht
sterevolutie

Leeftijden

Isochronen



- type II: waterstoflijnen
- blote oog: 185, 1006, 1054, 1572, 1604
- $\Delta E_{\text{tot}} \sim \frac{3GM^2}{10R_{\text{ns}}} \sim \frac{3G(1.4 M_{\odot})^2}{10(10 \text{ km})} \sim 2 \times 10^{46} \text{ J}$
 - in ~ 1 jaar: $L \sim 10^{12} L_{\odot} \sim L_{\text{galaxy}}(!)$
 - $E_{\text{kin}} \sim \frac{1}{2} 10 M_{\odot} (10^4 \text{ km/s})^2 \sim 10^{45} \text{ J}$
- **kern stort in tot NS:**
 - $p + e^- \rightarrow n + \nu_e$
 - neutrino's deels geabsorbeerd in instortende mantel $\rightarrow$ **explosie**
 - 25 neutrino's gedetecteerd voor SN 1987a in LMC
 - elementen zwaarder dan ijzer geproduceerd door n -vangst
 - **supernovaresten bevatten vaak NS**

Overzicht

HRD/CFD

Eigenschappen van
hoofdrekssterren

Evolutiesporen in het
HRD

Overzicht
sterevolutie

Structuur en evolutie van lichte sterren

De hoofdreks

De reuzentakken

Planetaire nevels

Structuur en evolutie van zware sterren

Hoofdrekssterren

Na de hoofdreks

Supernovae

Compacte sterren

Witte dwergen

Neutronensterren

Zwarte gaten

Overzicht

Overzicht
sterevolutie

Leeftijden

Isochronen



Bron: JWST (NASA/ESA/CSA)

Overzicht

HRD/CFD

Eigenschappen van
hoofdreekssterren

Evolutiesporen in het
HRD

Overzicht
sterevolutie

Structuur en evolutie van lichte sterren

De hoofdreeks

De reuzentakken

Planetaire nevels

Structuur en evolutie van zware sterren

Hoofdreekssterren

Na de hoofdreeks

Supernovae

Compacte sterren

Witte dwergen

Neutronensterren

Zwarte gaten

Overzicht

Overzicht
sterevolutie

Leeftijden

Isochronen



~ 10 000 jaar oud

Bron: [Karol Novotny/star-watcher.ch](http://karol.novotny/star-watcher.ch)

Structuur en evolutie van sterren

Overzicht

HRD/CFD

Eigenschappen van
hoofdreekssterren

Evolutiesporen in het
HRD

Overzicht
sterevolutie

Structuur en evolutie van lichte sterren

De hoofdreeks

De reuzentakken

Planetaire nevels

Structuur en evolutie van zware sterren

Hoofdreekssterren

Na de hoofdreeks

Supernovae

Compacte sterren

Witte dwergen

Neutronensterren

Zwarte gaten

Overzicht

Overzicht
sterevolutie

Leeftijden

Isochronen

1 Overzicht

2 Structuur en evolutie van lichte sterren

3 Structuur en evolutie van zware sterren

4 Compacte sterren

- Witte dwergen
- Neutronensterren
- Zwarte gaten

5 Overzicht

6 Leeftijden

Overzicht

HRD/CFD

Eigenschappen van
hoofdreekssterren

Evolutiesporen in het
HRD

Overzicht
sterevolutie

Structuur en evolutie van lichte sterren

De hoofdreeks

De reuzentakken

Planetaire nevels

Structuur en evolutie van zware sterren

Hoofdreekssterren

Na de hoofdreeks

Supernovae

Compacte sterren

Witte dwergen

Neutronensterren

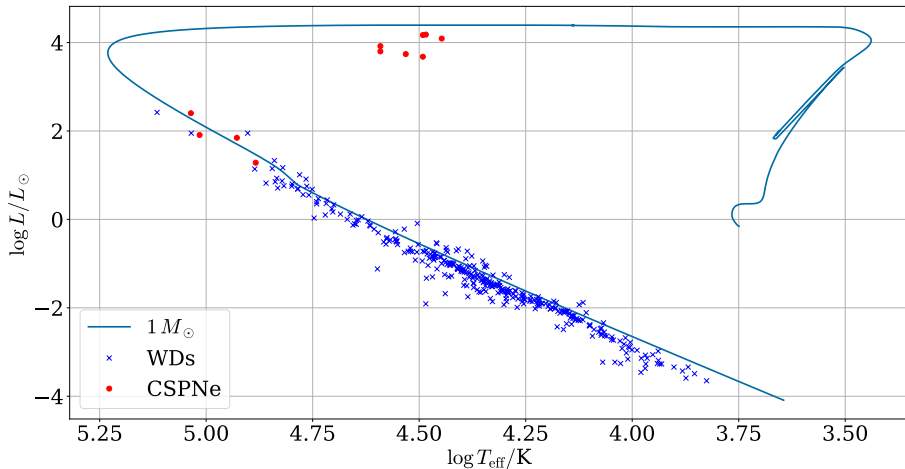
Zwarte gaten

Overzicht

Overzicht
sterevolutie

Leeftijden

Isochronen



- 1 post-AGB-ster “steekt het HRD” over naar links als centrale ster van een **planetaire nevel (CSPN)**
- 2 ster koelt af tot **witte dwerg**

Overzicht

HRD/CFD

Eigenschappen van
hoofdrekssterren

Evolutiesporen in het
HRD

Overzicht
sterevolutie

Structuur en evolutie van lichte sterren

De hoofdreks

De reuzentakken

Planetaire nevels

Structuur en evolutie van zware sterren

Hoofdrekssterren

Na de hoofdreks

Supernovae

Compacte sterren

Witte dwergen

Neutronensterren

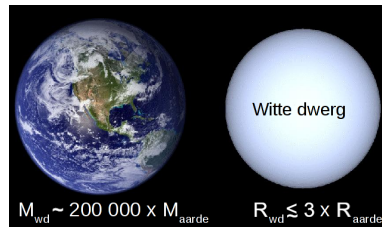
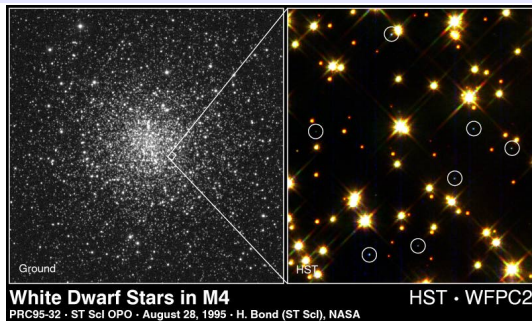
Zwarte gaten

Overzicht

Overzicht
sterevolutie

Leeftijden

Isochronen



Bron: [HST \(NASA/ESA\)](#)

- Sterren met $M \lesssim 8 - 10 M_{\odot}$, $> 90\%$ van alle sterren, worden WDs
- WDs bestaan meestal uit He of C+O
- Dichtheid van een WD ~ 1 miljoen keer die van water
- $M_{wd} \lesssim 1.4 M_{\odot}$; $\langle M_{wd} \rangle \approx 0.6 M_{\odot}$
- $R_{wd} \lesssim 0.03 R_{\odot}$; ($R_{\oplus} \approx 0.009 R_{\odot}$)
- $L_{wd} \lesssim 0.001 L_{\odot}$

Overzicht

HRD/CFD

Eigenschappen van
hoofdrekssterren

Evolutiesporen in het
HRD

Overzicht
sterevolutie

Structuur en evolutie van lichte sterren

De hoofdreks

De reuzentakken

Planetaire nevels

Structuur en evolutie van zware sterren

Hoofdrekssterren

Na de hoofdreks

Supernovae

Compacte sterren

Witte dwergen

Neutronensterren

Zwarte gaten

Overzicht

Overzicht
sterevolutie

Leeftijden

Isochronen

Massa-straalrelatie voor lichte witte dwergen

$$1 \quad \text{Hoofdstuk 2: } P_c \sim P_{d,c} \rightarrow \frac{3GM^2}{4\pi R^4} \sim \frac{K_d}{m_e} \left(\frac{\rho_c}{\mu_e m_H} \right)^{5/3} \sim \frac{K_d}{m_e} \left(\frac{f M}{\mu_e m_H R^3} \right)^{5/3}$$

$$2 \quad \rightarrow R \sim \frac{4\pi K_d}{3G} f^{5/3} M^{-1/3} \rightarrow \boxed{R_{wd} \propto M_{wd}^{-1/3}} \quad (f \sim 1)$$

$$3 \quad R_{wd} \approx 0.012 R_{\odot} \left(\frac{M}{M_{\odot}} \right)^{-1/3} \quad (\mu_e \approx 2, f \sim 0.7; \text{ geldig voor } M_{wd} \lesssim 0.6 M_{\odot})$$

$$4 \quad \rightarrow \text{links-onder in HRD, bij } R \sim 0.01 R_{\odot} \text{ zijn inderdaad WDs!}$$

Overzicht

HRD/CFD

Eigenschappen van
hoofdrekssterren

Evolutiesporen in het
HRD

Overzicht
sterevolutie

Structuur en evolutie van lichte sterren

De hoofdreks

De reuzentakken

Planetaire nevels

Structuur en evolutie van zware sterren

Hoofdrekssterren

Na de hoofdreks

Supernovae

Compacte sterren

Witte dwergen

Neutronensterren

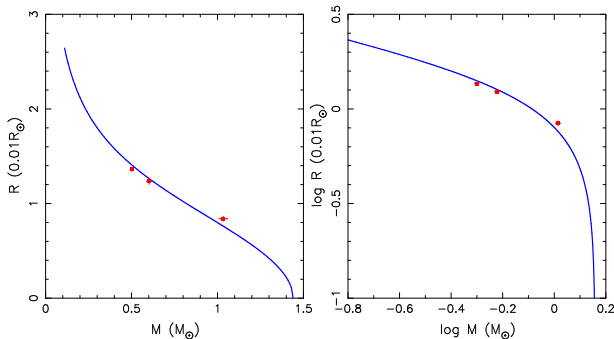
Zwarte gaten

Overzicht

Overzicht
sterevolutie

Leeftijden

Isochronen



$$\left(\frac{R_{\text{wd}}}{R_{\odot}}\right) \approx 0.01125 \left[\left(\frac{M_{\text{wd}}}{1.454 M_{\odot}}\right)^{-2/3} - \left(\frac{M_{\text{wd}}}{1.454 M_{\odot}}\right)^{2/3} \right]^{1/2} \quad (\text{Nauenberg, 1972})$$

- voor $M_{\text{wd}} \sim 1.44 M_{\odot}$, $R_{\text{wd}} \sim 0 \rightarrow$ **Chandrasekharlimiet**
- zwaardere WD stort in en explodeert: **type-Ia-supernova** (geen waterstof)

Overzicht

HRD/CFD

Eigenschappen van
hoofdreekssterren

Evolutiesporen in het
HRD

Overzicht
sterevolutie

Structuur en evolutie van lichte sterren

De hoofdreeks

De reuzentakken

Planetaire nevels

Structuur en evolutie van zware sterren

Hoofdreekssterren

Na de hoofdreeks

Supernovae

Compacte sterren

Witte dwergen

Neutronensterren

Zwarte gaten

Overzicht

Overzicht
sterevolutie

Leeftijden

Isochronen

Chandrasekhar massalimiet M_{Ch} : bovenlimiet voor M_{wd}

Wanneer is een WD **volledig** *relativistisch* gedegenereerd?

$$\textcircled{1} \text{ Hoofdstuk 2: } P_{\text{c}} \sim P_{\text{d,r,c}} \rightarrow \frac{3GM^2}{4\pi R^4} \sim K_{\text{d,r}} \left(\frac{\rho_{\text{c}}}{\mu_{\text{e}} m_{\text{H}}} \right)^{4/3} \sim K_{\text{d,r}} \left(\frac{f M}{\mu_{\text{e}} m_{\text{H}} R^3} \right)^{4/3}$$

$$\textcircled{2} \rightarrow M_{\text{Ch}} \sim \left(\frac{4\pi K_{\text{d,r}}}{3G} \right)^{3/2} \left(\frac{f}{\mu_{\text{e}} m_{\text{H}}} \right)^2 = \textbf{constant!}$$

$$\textcircled{3} M_{\text{Ch}} \sim 1.44 M_{\odot} \quad (\mu_{\text{e}} \approx 2, f \sim 0.73): \textbf{Chandrasekhar massa}$$

$$\textcircled{4} \textbf{alle elektronen relativistisch} \rightarrow \textbf{zwaartekracht wint van druk} \rightarrow \textbf{ster stort in}$$

Overzicht

HRD/CFD

Eigenschappen van
hoofdrekssterren

Evolutiesporen in het
HRD

Overzicht
sterevolutie

Structuur en evolutie van lichte sterren

De hoofdreks

De reuzentakken

Planetaire nevels

Structuur en evolutie van zware sterren

Hoofdrekssterren

Na de hoofdreks

Supernovae

Compacte sterren

Witte dwergen

Neutronensterren

Zwarte gaten

Overzicht

Overzicht
sterevolutie

Leeftijden

Isochronen



970 jaar oud (SN 1054)!

Bron: [VLT](#), [ESO](#)

Overzicht

HRD/CFD

Eigenschappen van
hoofdrekssterren

Evolutiesporen in het
HRD

Overzicht
sterevolutie

Structuur en evolutie van lichte sterren

De hoofdreks

De reuzentakken

Planetaire nevels

Structuur en evolutie van zware sterren

Hoofdrekssterren

Na de hoofdreks

Supernovae

Compacte sterren

Witte dwergen

Neutronensterren

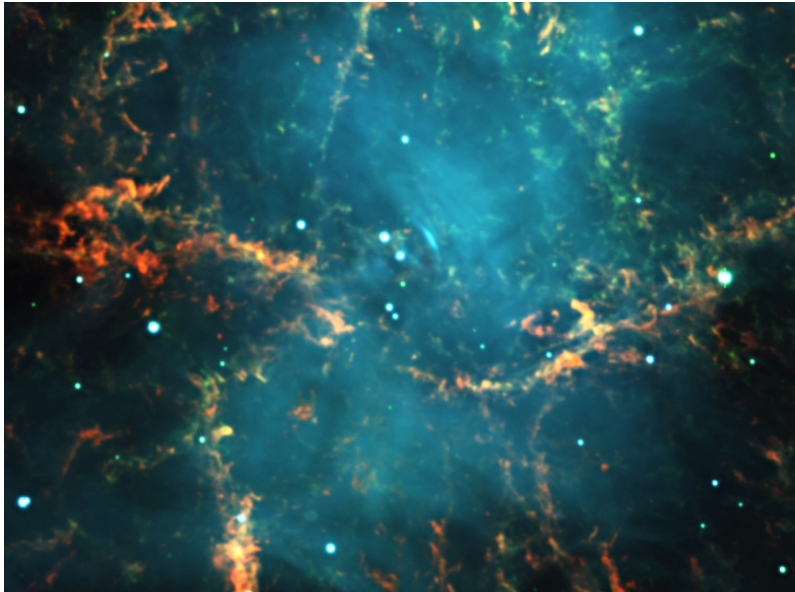
Zwarte gaten

Overzicht

Overzicht
sterevolutie

Leeftijden

Isochronen



Overzicht

HRD/CFD

Eigenschappen van
hoofdreekssterren

Evolutiesporen in het
HRD

Overzicht
sterevolutie

Structuur en evolutie van lichte sterren

De hoofdreeks

De reuzentakken

Planetaire nevels

Structuur en evolutie van zware sterren

Hoofdreekssterren

Na de hoofdreeks

Supernovae

Compacte sterren

Witte dwergen

Neutronensterren

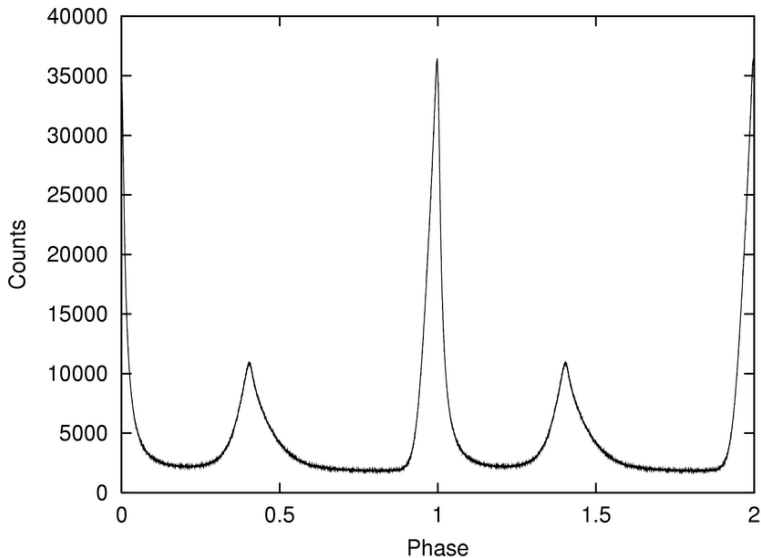
Zwarte gaten

Overzicht

Overzicht
sterevolutie

Leeftijden

Isochronen



~ 30 Hz

Bron: [Buckton et al. \(2003\)](#)

Overzicht

HRD/CFD

Eigenschappen van
hoofdreekssterren

Evolutiesporen in het
HRD

Overzicht
sterevolutie

Structuur en evolutie van lichte sterren

De hoofdreeks

De reuzentakken

Planetaire nevels

Structuur en evolutie van zware sterren

Hoofdreekssterren

Na de hoofdreeks

Supernovae

Compacte sterren

Witte dwergen

Neutronensterren

Zwarte gaten

Overzicht

Overzicht
sterevolutie

Leeftijden

Isochronen

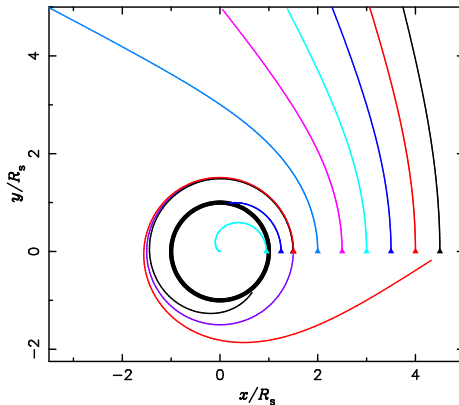
$$1 \quad \frac{P_{d,n}}{P_{d,e}} \sim \frac{m_e}{m_n} \left(\frac{\mu_e}{\mu_n} \right)^{5/3} \sim \frac{1}{579} \quad (\text{voor gegeven } \rho)$$

$$2 \quad \frac{R_{ns}}{R_{wd}} \sim \frac{m_e}{m_n} \left(\frac{\mu_e}{\mu_n} \right)^{5/3} \rightarrow R_{ns} \sim \frac{R_{wd}}{579} \quad \boxed{R_{ns} \sim 12 \text{ km}} \quad (\sim 7-15 \text{ km})$$

$$3 \quad \frac{M_{Ch,ns}}{M_{Ch,wd}} \sim \left(\frac{\mu_e}{\mu_n} \right)^2 \rightarrow M_{Ch,ns} \sim 4 M_{Ch,wd} \sim 5.8 M_{\odot} \quad \boxed{M_{NS,max} \sim 2.5 - 3 M_{\odot}} :$$

- Tolman-Oppenheimer-Volkoff-limiet (TOV-limiet)

- Klassiek: $v_{\text{esc}} = \sqrt{\frac{2GM}{R}} = c$ (“donkere ster”; Michell 1784, Laplace 1795)
- → Schwarzschildstraal: $R_s = \frac{2GM}{c^2}$



Overzicht

HRD/CFD

Eigenschappen van
hoofdrekssterren

Evolutiesporen in het
HRD

Overzicht
sterevolutie

Structuur en evolutie van lichte sterren

De hoofdreks

De reuzentakken

Planetaire nevels

Structuur en evolutie van zware sterren

Hoofdrekssterren

Na de hoofdreks

Supernovae

Compacte sterren

Witte dwergen

Neutronensterren

Zwarte gaten

Overzicht

Overzicht
sterevolutie

Leeftijden

Isochronen

Overzicht

HRD/CFD

Eigenschappen van
hoofdrekssterren

Evolutiesporen in het
HRD

Overzicht
sterevolutie

Structuur en evolutie van lichte sterren

De hoofdreks

De reuzentakken

Planetaire nevels

Structuur en evolutie van zware sterren

Hoofdrekssterren

Na de hoofdreks

Supernovae

Compacte sterren

Witte dwergen

Neutronensterren

Zwarte gaten

Overzicht

Overzicht
sterevolutie

Leeftijden

Isochronen

- $M_{\text{ZAMS}} \lesssim 0.01 M_{\odot}$ ($13 M_{\text{J}}$):
 - geen kernfusie → **planeet**
- $0.01 M_{\odot} \lesssim M_{\text{ZAMS}} \lesssim 0.08 M_{\odot}$:
 - geen waterstoffusie (maar deuterium, lithium) → **bruine dwerg**
- $0.08 M_{\odot} \lesssim M_{\text{ZAMS}} \lesssim 0.5 M_{\odot}$:
 - geen heliumfusie → **He-witte dwerg** ($\tau \gg t_{\text{H}}!!!$)
- $0.5 M_{\odot} \lesssim M_{\text{ZAMS}} \lesssim 6 M_{\odot}$:
 - geen koolstoffusie → **CO-witte dwerg**
- $6 M_{\odot} \lesssim M_{\text{ZAMS}} \lesssim 8 M_{\odot}$:
 - **enkele sterren:** C-fusie in gedeeltelijk gedegenerende kern → **ONe(Mg)-WD**
 - **dubbelsterren:** C-fusie in gedegenerende kern als $M \gtrsim M_{\text{Ch}}$ → **ontploft geheel?**
- $8 M_{\odot} \lesssim M_{\text{ZAMS}} \lesssim 10 M_{\odot}$:
 - ONeMg-kern bereikt M_{Ch} : **type-II-supernova** → **neutronenster**
- $M_{\text{ZAMS}} \gtrsim 10 M_{\odot}$:
 - stabiele C-fusie → O, Ne, Mg → Si, S → **Fe, Ni**
 - core-collapse supernova = **type-II-supernova**
 - restant: **neutronenster, zwart gat of niets?**

Relatie tussen ZAMS-massa en eindmassa (H3.5.4)

Structuur en
evolutie van
sterren

Overzicht

HRD/CFD

Eigenschappen van
hoofdrekssterren

Evolutiesporen in het
HRD

Overzicht
sterevolutie

Structuur en
evolutie van lichte
sterren

De hoofdreks

De reuzentakken

Planetaire nevels

Structuur en
evolutie van
zware sterren

Hoofdrekssterren

Na de hoofdreks

Supernovae

Compacte
sterren

Witte dwergen

Neutronensterren

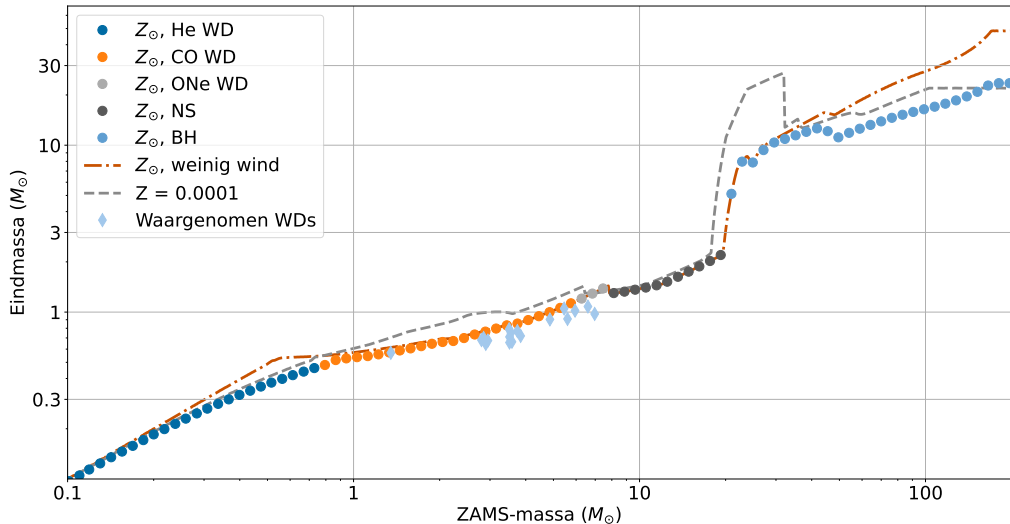
Zwarte gaten

Overzicht

Overzicht
sterevolutie

Leeftijden

Isochronen



Structuur en evolutie van sterren

Overzicht

HRD/CFD

Eigenschappen van
hoofdreekssterren

Evolutiesporen in het
HRD

Overzicht
sterevolutie

Structuur en evolutie van lichte sterren

De hoofdreeks

De reuzentakken

Planetaire nevels

Structuur en evolutie van zware sterren

Hoofdreekssterren

Na de hoofdreeks

Supernovae

Compacte sterren

Witte dwergen

Neutronensterren

Zwarte gaten

Overzicht

Overzicht
sterevolutie

Leeftijden

Isochronen

1 Overzicht

2 Structuur en evolutie van lichte sterren

3 Structuur en evolutie van zware
sterren

4 Compacte sterren

5 Overzicht

- Overzicht sterevolutie

6 Leeftijden

Overzicht

HRD/CFD

Eigenschappen van
hoofdreekssterren

Evolutiesporen in het
HRD

Overzicht
sterevolutie

Structuur en evolutie van lichte sterren

De hoofdreeks

De reuzentakken

Planetaire nevels

Structuur en evolutie van zware sterren

Hoofdreekssterren

Na de hoofdreeks

Supernovae

Compacte sterren

Witte dwergen

Neutronensterren

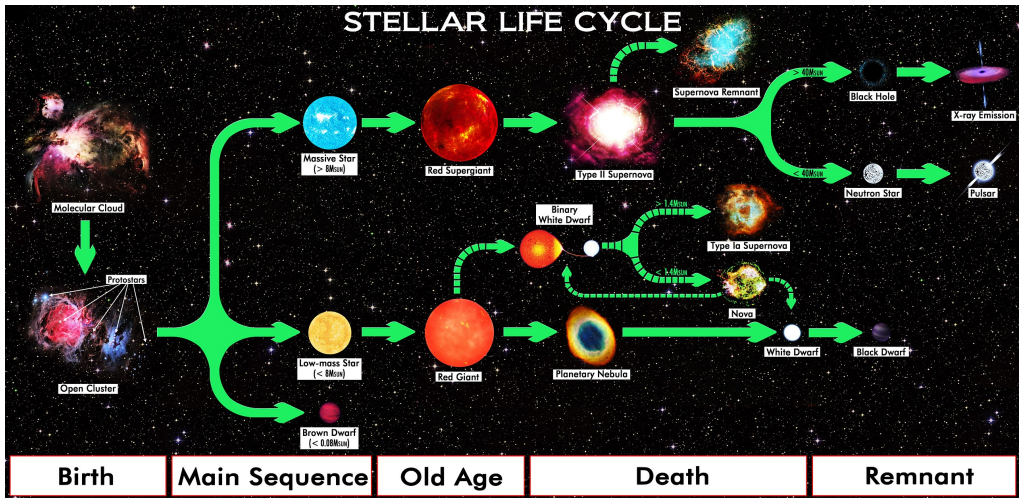
Zwarte gaten

Overzicht

Overzicht
sterevolutie

Leeftijden

Isochronen



Bron: Wikipedia, user R.N. Bailey (2017)

Overzicht

HRD/CFD

Eigenschappen van
hoofdreekssterren

Evolutiesporen in het
HRD

Overzicht
sterevolutie

Structuur en
evolutie van lichte
sterren

De hoofdreeks

De reuzentakken

Planetaire nevels

Structuur en
evolutie van
zware sterren

Hoofdreekssterren

Na de hoofdreeks

Supernovae

Compacte
sterren

Witte dwergen

Neutronensterren

Zwarte gaten

Overzicht

Overzicht
sterevolutie

Leeftijden

Isochronen

1 Overzicht

2 Structuur en evolutie van lichte sterren

3 Structuur en evolutie van zware
sterren

4 Compacte sterren

5 Overzicht

6 Leeftijden
• Isochronen

Overzicht

HRD/CFD

Eigenschappen van
hoofdrekssterren

Evolutiesporen in het
HRD

Overzicht
sterevolutie

Structuur en evolutie van lichte sterren

De hoofdreks

De reuzentakken

Planetaire nevels

Structuur en evolutie van zware sterren

Hoofdrekssterren

Na de hoofdreks

Supernovae

Compacte sterren

Witte dwergen

Neutronensterren

Zwarte gaten

Overzicht

Overzicht
sterevolutie

Leeftijden

Isochronen

