

# Sterren en sterevolutie

Marc van der Sluys



Nikhef, Universiteit Utrecht

[hemel.waarnemen.com](http://hemel.waarnemen.com)



Universiteit  
Utrecht

## De Zon

## Stervorming

De Orionnevel

Protoplanetaire  
schijvenHet leven van  
sterrenHydrostatisch  
evenwichtEigenschappen van  
sterren

Sterren in groepen

Het kleur-  
magnitudediagram

Evoluerende sterren

Het einde van  
sterrenHet einde van lichte  
sterrenHet einde van zware  
sterren

Supernovae

## Dubbelsterren

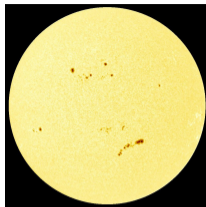
Materie-overdracht

Witte dwergen

Zwarte gaten

Gravitatiegolven

## Sterrenstof!



Grootheid		Eenheid	Aarde
Massa	$M_{\odot}$	$1,99 \times 10^{30}$ kg	$333\,000 M_{\oplus}$
Straal	$R_{\odot}$	696 000 km	$109 R_{\oplus}$
Dichtheid	$\bar{\rho}_{\odot}$	$1,4$ g/cm <sup>3</sup>	$0,26 \bar{\rho}_{\oplus}$
Lichtkracht	$L_{\odot}$	$3,85 \times 10^{26}$ W	$\sim 3 \times 10^9$ “ $L_{\oplus}$ ”
Temperatuur:			
Oppervlak	$T_{\text{opp},\odot}$	$5500^{\circ}\text{C}$	$15^{\circ}\text{C}$
Centrum	$T_{\text{c},\odot}$	$\sim 16 \times 10^6$ °C	$\sim 7000^{\circ}\text{C}$

## Sterren en stervoluitie

### De Zon

### Stervorming

De Orionnevel  
Protoplanetaire schijven

### Het leven van sterren

Hydrostatisch evenwicht  
Eigenschappen van sterren  
Sterren in groepen  
Het kleur-magnitudediagram  
Evoluerende sterren

### Het einde van sterren

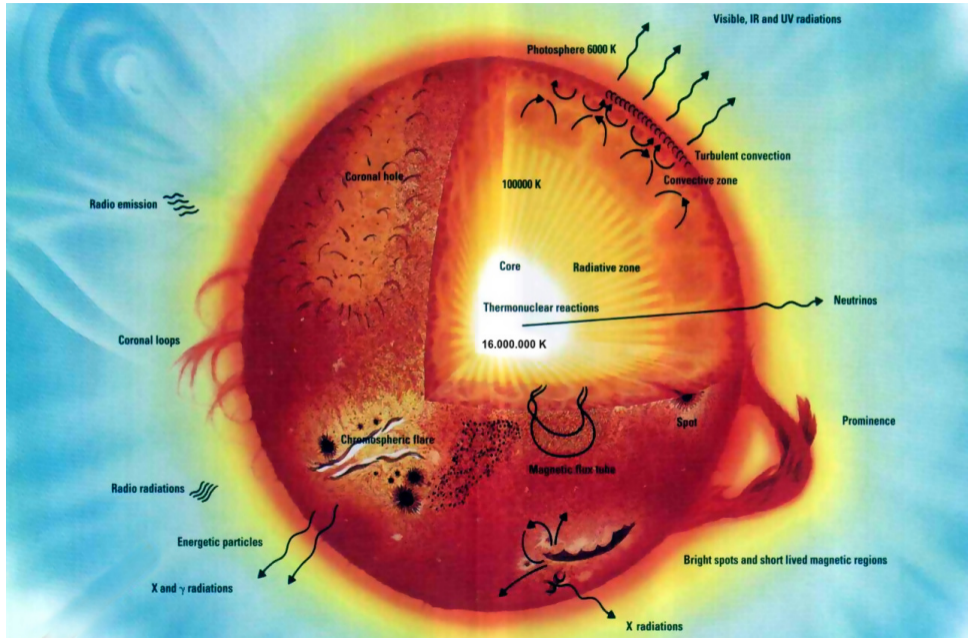
Het einde van lichte sterren  
Het einde van zware sterren  
Supernovae

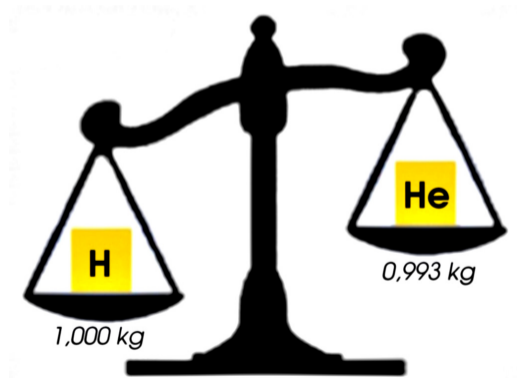
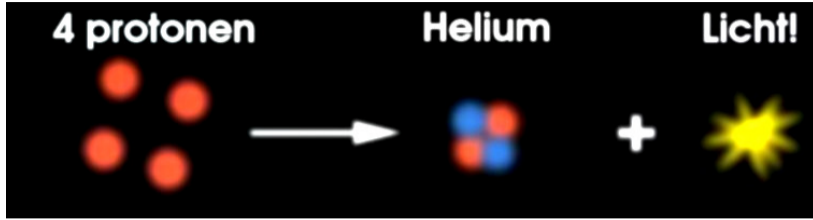
### Dubbelsterren

Materie-overdracht  
Witte dwergen  
Zwarte gaten  
Gravitatiegolven

### Sterrenstof

# Structuur van de Zon





De Zon

Stervorming

De Orionnevel

Protoplanetaire  
schijven

Het leven van  
sterren

Hydrostatisch  
evenwicht

Eigenschappen van  
sterren

Sterren in groepen

Het kleur-  
magnitudediagram

Evoluerende sterren

Het einde van  
sterren

Het einde van lichte  
sterren

Het einde van zware  
sterren

Supernovae

Dubbelsterren

Materie-overdracht

Witte dwergen

Zwarte gaten

Gravitatiegolven

Sterrenstof!

## Sterren en sterevolutie

### De Zon

### Stervorming

#### De Orionnevel

Protoplanetaire  
schijven

### Het leven van sterren

Hydrostatisch  
evenwicht

Eigenschappen van  
sterren

Sterren in groepen

Het kleur-  
magnitudediagram

Evoluerende sterren

### Het einde van sterren

Het einde van lichte  
sterren

Het einde van zware  
sterren

Supernovae

### Dubbelsterren

Materie-overdracht

Witte dwergen

Zwarte gaten

Gravitatiegolven

### Sterrenstof!

# Het wintersterrenbeeld Orion



# Het wintersterrenbeeld Orion

## Sterren en sterevolutie

### De Zon

### Stervorming

#### De Orionnevel

Protoplanetaire schijven

### Het leven van sterren

Hydrostatisch evenwicht

Eigenschappen van sterren

Sterren in groepen

Het kleur-magnitudediagram

Evoluerende sterren

### Het einde van sterren

Het einde van lichte sterren

Het einde van zware sterren

Supernovae

### Dubbelsterren

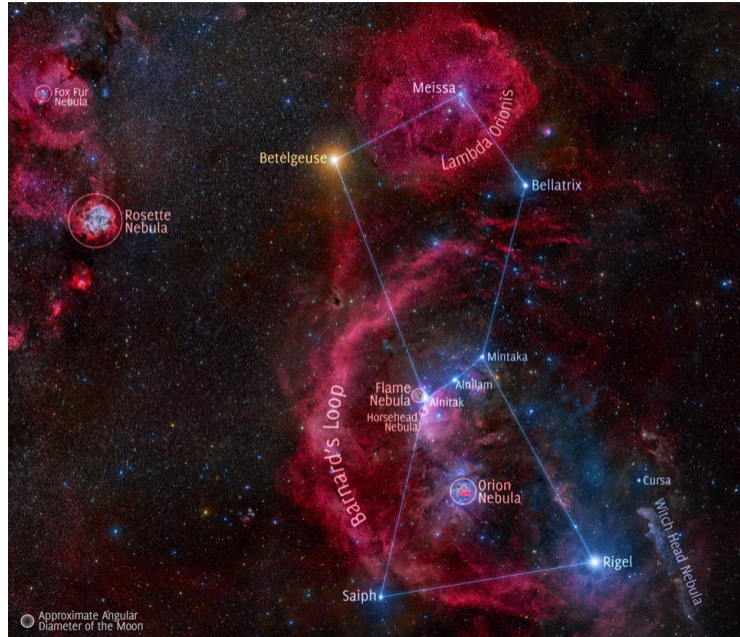
Materie-overdracht

Witte dwergen

Zwarte gaten

Gravitatiegolven

### Sterrenstof



## De Zon

## Stervorming

### De Orionnevel

Protoplanetaire  
schijven

## Het leven van sterren

Hydrostatisch  
evenwicht

Eigenschappen van  
sterren

Sterren in groepen

Het kleur-  
magnitudediagram

Evoluerende sterren

## Het einde van sterren

Het einde van lichte  
sterren

Het einde van zware  
sterren

Supernovae

## Dubbelsterren

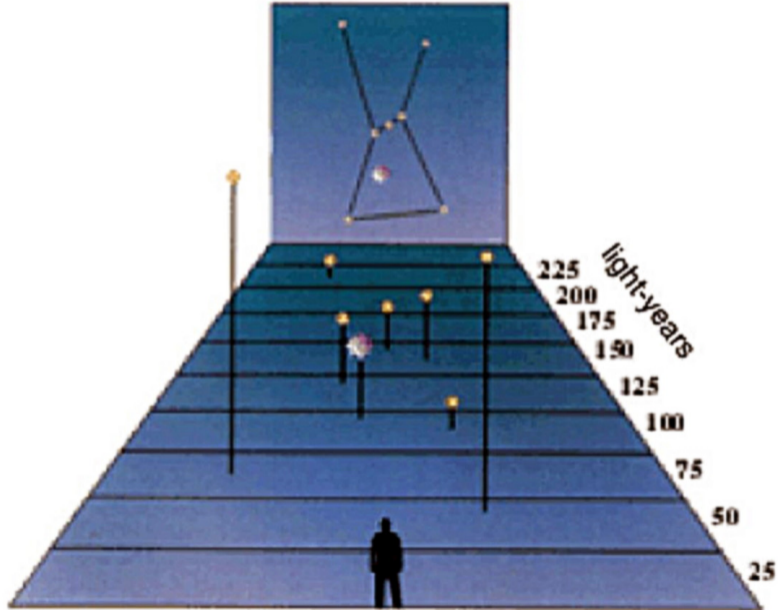
Materie-overdracht

Witte dwergen

Zwarte gaten

Gravitatiegolven

## Sterrenstof!



## Sterren en sterevolutie

# De Orionnevel

### De Zon

### Stervorming

#### De Orionnevel

Protoplanetaire  
schijven

### Het leven van sterren

Hydrostatisch  
evenwicht

Eigenschappen van  
sterren

Sterren in groepen

Het kleur-  
magnitudediagram

Evoluerende sterren

### Het einde van sterren

Het einde van lichte  
sterren

Het einde van zware  
sterren

Supernovae

### Dubbelsterren

Materie-overdracht

Witte dwergen

Zwarte gaten

Gravitatiegolven

### Sterrenstof!



Bron: HST (NASA/ESA)



# Orionnevel: zonnestelsels in wording

## Sterren en sterevolutie

### De Zon

### Stervorming

De Orionnevel

Protoplanetaire schijven

### Het leven van sterren

Hydrostatisch evenwicht

Eigenschappen van sterren

Sterren in groepen

Het kleur-magnitudediagram

Evoluerende sterren

### Het einde van sterren

Het einde van lichte sterren

Het einde van zware sterren

Supernovae

### Dubbelsterren

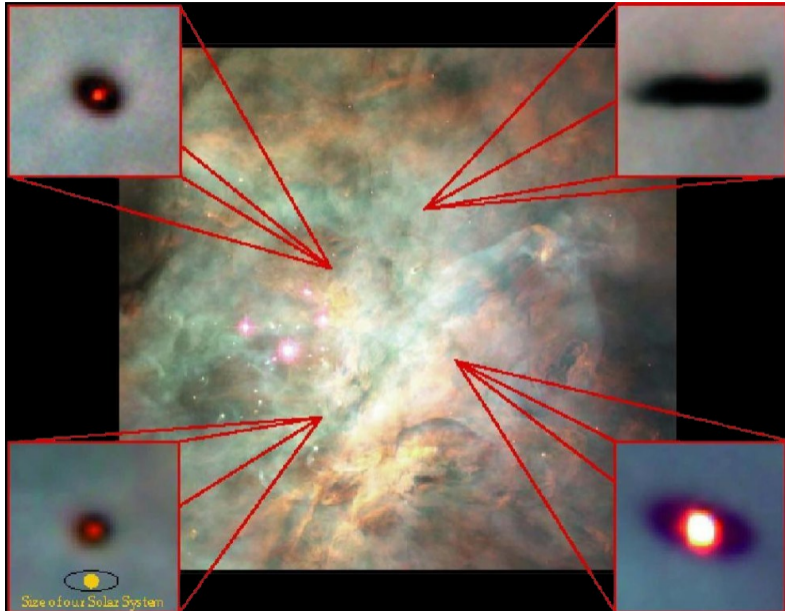
Materie-overdracht

Witte dwergen

Zwarte gaten

Gravitatiegolven

### Sterrenstof



Bron: HST (NASA/ESA)

## Sterren en sterevolutie

# Protosterren met protoplanetaire schijven

### De Zon

### Stervorming

De Orionnevel

Protoplanetaire  
schijven

### Het leven van sterren

Hydrostatisch  
evenwicht

Eigenschappen van  
sterren

Sterren in groepen

Het kleur-  
magnitudediagram

Evoluerende sterren

### Het einde van sterren

Het einde van lichte  
sterren

Het einde van zware  
sterren

Supernovae

### Dubbelsterren

Materie-overdracht

Witte dwergen

Zwarte gaten

Gravitatiegolven

### Sterrenstof!



Bron: HST (NASA/ESA)

De Zon

Stervorming

De Orionnevel

Protoplanetaire  
schijven

Het leven van  
sterren

Hydrostatisch  
evenwicht

Eigenschappen van  
sterren

Sterren in groepen

Het kleur-  
magnitudediagram

Evoluerende sterren

Het einde van  
sterren

Het einde van lichte  
sterren

Het einde van zware  
sterren

Supernovae

Dubbelsterren

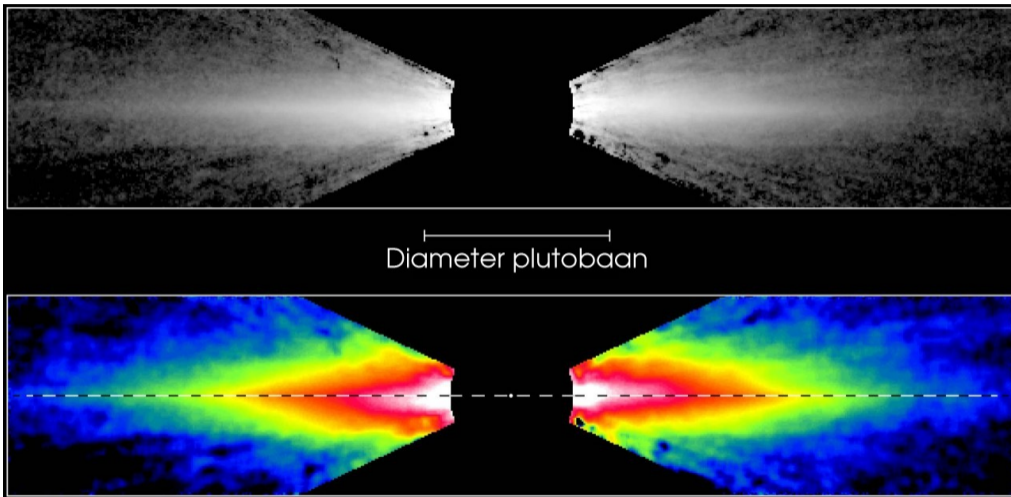
Materie-overdracht

Witte dwergen

Zwarte gaten

Gravitatiegolven

Sterrenstof!



Bron: HST (NASA/ESA)

## Sterren en sterevolutie

### De Zon

### Stervorming

De Orionnevel

Protoplanetaire  
schijven

### Het leven van sterren

Hydrostatisch  
evenwicht

Eigenschappen van  
sterren

Sterren in groepen

Het kleur-  
magnitudediagram

Evoluerende sterren

### Het einde van sterren

Het einde van lichte  
sterren

Het einde van zware  
sterren

Supernovae

### Dubbelsterren

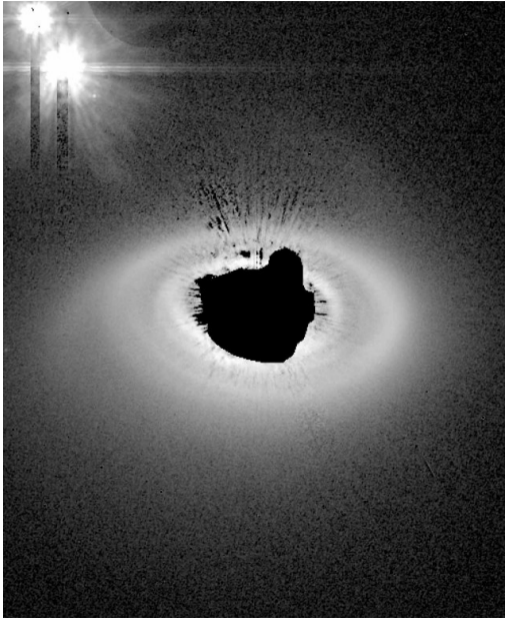
Materie-overdracht

Witte dwergen

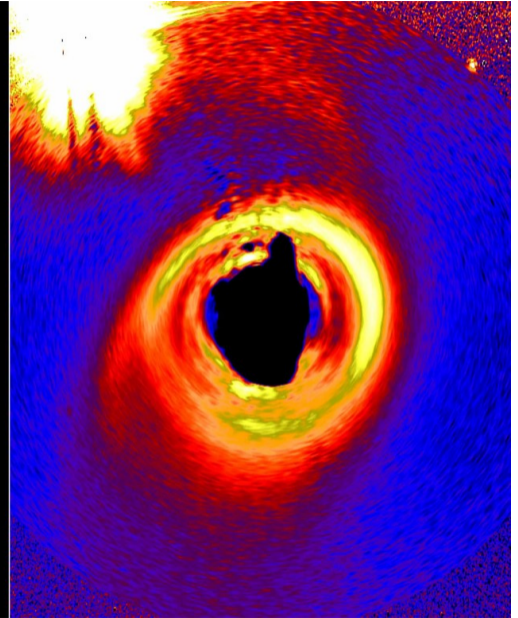
Zwarte gaten

Gravitatiegolven

### Sterrenstof!



# Planeetvorming



De Zon

Stervorming

De Orionnevel

Protoplanetaire  
schijven

Het leven van  
sterren

Hydrostatisch  
evenwicht

Eigenschappen van  
sterren

Sterren in groepen

Het kleur-  
magnitudediagram

Evoluerende sterren

Het einde van  
sterren

Het einde van lichte  
sterren

Het einde van zware  
sterren

Supernovae

Dubbelsterren

Materie-overdracht

Witte dwergen

Zwarte gaten

Gravitatiegolven

Sterrenstof!



Bron: VLT (ESO)

## Sterren en sterevolutie

### De Zon

### Stervorming

De Orionnevel  
Protoplanetaire  
schijven

### Het leven van sterren

#### Hydrostatisch evenwicht

Eigenschappen van  
sterren  
Sterren in groepen  
Het kleur-  
magnitudediagram  
Evoluerende sterren

### Het einde van sterren

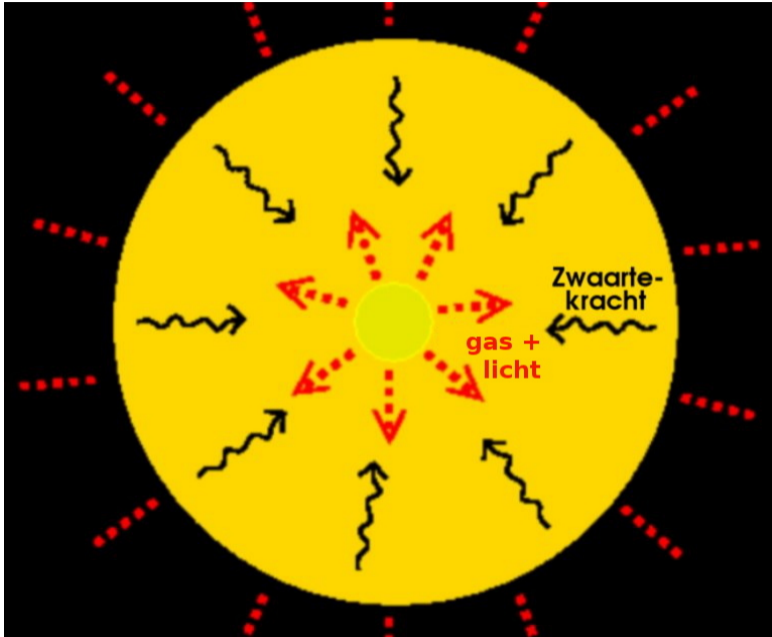
Het einde van lichte  
sterren  
Het einde van zware  
sterren  
Supernovae

### Dubbelsterren

Materie-overdracht  
Witte dwergen  
Zwarte gaten  
Gravitatiegolven

### Sterrenstof!

# Hydrostatisch evenwicht



	$M$ ( $M_{\odot}$ )	$t$ (Mjr)	$R$ ( $R_{\odot}$ )	$L$ ( $L_{\odot}$ )	$T_o$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	$T_c$ (miljn $^{\circ}\text{C}$ )	Aantal (t.o.v. $1 M_{\odot}$ )
De Zon							
<b>Stervorming</b>							
De Orionnevel							
Protoplanetaire schijven	0,5	52 600	0,50	0,05	4138	9,8	7,07
<b>Het leven van sterren</b>							
Het leven van sterren	0,8	11 600	0,79	0,38	5380	13,4	2,34
Hydrostatisch evenwicht	1,0	4900	1,01	1,05	6080	15,9	1,00
<b>Eigenschappen van sterren</b>							
Sterren in groepen	1,5	1660	1,95	6,75	6930	20,9	0,131
Het kleur- magnitudediagram	2,0	582	2,23	20,4	8500	22,5	0,0232
Evoluerende sterren	2,5	405	2,80	57,8	9800	24,1	0,00959
<b>Het einde van sterren</b>							
Het einde van lichte sterren	3,0	246	3,09	120	11 100	25,2	0,00380
Het einde van zware sterren	5,0	70,6	4,19	895	15 700	28,6	0,000327
Supernovae	10,0	12,7	5,74	8590	23 500	32,8	0,0000116
<b>Dubbelsterren</b>							
Materie-overdracht	20,0	5,18	8,78	67 900	31 700	37,0	0,0000093
Witte dwergen	50,0	2,41	15,9	527 000	39 300	41,4	0,0000005
Zwarte gaten							
Gravitatiegolven							

Eigenschappen *halverwege* de hoofdreeks (de helft van het waterstof verbruikt).

## De Zon

## Stervorming

De Orionnevel  
Protoplanetaire  
schijven

## Het leven van sterren

Hydrostatisch  
evenwicht

## Eigenschappen van sterren

Sterren in groepen  
Het kleur-  
magnitudediagram  
Evoluerende sterren

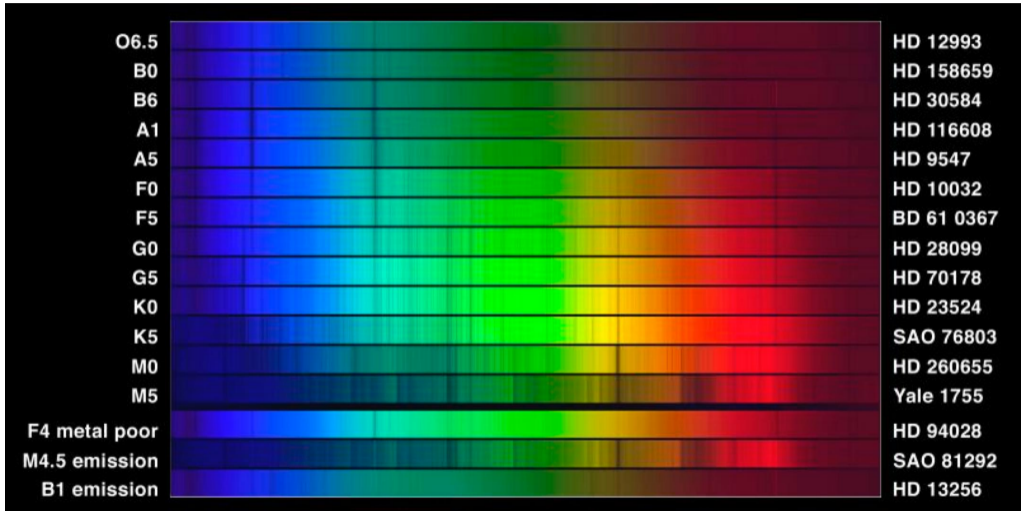
## Het einde van sterren

Het einde van lichte  
sterren  
Het einde van zware  
sterren  
Supernovae

## Dubbelsterren

Materie-overdracht  
Witte dwergen  
Zwarte gaten  
Gravitatiegolven

## Sterrenstof!





## De Zon

## Stervorming

De Orionnevel

Protoplanetaire  
schijvenHet leven van  
sterrenHydrostatisch  
evenwichtEigenschappen van  
sterren

Sterren in groepen

Het kleur-  
magnitudediagram

Evoluerende sterren

Het einde van  
sterrenHet einde van lichte  
sterrenHet einde van zware  
sterren

Supernovae

## Dubbelsterren

Materie-overdracht

Witte dwergen

Zwarte gaten

Gravitatiegolven

## Sterrenstof!

Spectraaltypen	Temperatuur (K)	Kleur	Massa ( $M_{\odot}$ )	Levensverwachting (jaren)
<b>O</b>	30.000 – 60.000	Blauwachtig	20 – 120	$10^5 - 10^6$
<b>B</b>	10.000 – 30.000	Blauw-wit	3 – 20	$10^8$
<b>A</b>	7.500 – 10.000	Wit-blauw	1,5 – 3	paar keer $10^9$
<b>F</b>	6.000 – 7.500	Wit	1,0 – 1,5	$10^{10}$
<b>G</b>	5.000 – 6.000	Geel-wit	0,8 – 1,0	paar keer $10^{10}$
<b>K</b>	3.500 – 5.000	Oranjeachtig	0,5 – 0,8	$> 10^{10}$
<b>M</b>	2.000? – 3.500	Roodachtig	0,08 – 0,5	$> 10^{11}$
<b>Bruine Dwergen</b>	$< 2.000?$	Bruinig?	$< 0,08$	$\gg 10^{11}$

Het spectraaltypen wordt vaak onderverdeeld met een cijfer 0–9. De Zon is bijvoorbeeld een G2 ster. De reeks van F, via G naar K is: ... F8, F9, G0, G1, G2, ..., G8, G9, K0, K1, ...

Helderheidsklasse	Betekenis
I	superreuzen
III	reuzen
IV	sub-reuzen
V	hoofdreekssterren (dwergen)
VI	(witte dwergen)

De waarden in de eerste tabel gelden voor hoofdreekssterren, dus helderheidsklasse V; alleen de temperaturen en kleuren gelden ook voor andere helderheidsklassen.

## De Zon

## Stervorming

De Orionnevel  
Protoplanetaire  
schijven

## Het leven van sterren

Hydrostatisch  
evenwicht  
Eigenschappen van  
sterren

## Sterren in groepen

Het kleur-  
magnitudediagram  
Evoluerende sterren

## Het einde van sterren

Het einde van lichte  
sterren  
Het einde van zware  
sterren  
Supernovae

## Dubbelsterren

Materie-overdracht  
Witte dwergen  
Zwarte gaten  
Gravitatiegolven

## Sterrenstof!



## De Zon

## Stervorming

De Orionnevel  
Protoplanetaire  
schijven

## Het leven van sterren

Hydrostatisch  
evenwicht  
Eigenschappen van  
sterren

## Sterren in groepen

Het kleur-  
magnitudediagram  
Evoluerende sterren

## Het einde van sterren

Het einde van lichte  
sterren  
Het einde van zware  
sterren  
Supernovae

## Dubbelsterren

Materie-overdracht  
Witte dwergen  
Zwarte gaten  
Gravitatiegolven

## Sterrenstof!



De Zon

Stervorming

De Orionnevel  
Protoplanetaire  
schijven

Het leven van  
sterren

Hydrostatisch  
evenwicht  
Eigenschappen van  
sterren

Sterren in groepen

Het kleur-  
magnitudediagram  
Evoluerende sterren

Het einde van  
sterren

Het einde van lichte  
sterren  
Het einde van zware  
sterren  
Supernovae

Dubbelsterren

Materie-overdracht  
Witte dwergen  
Zwarte gaten  
Gravitatiegolven

Sterrenstof!



## De Zon

## Stervorming

De Orionnevel  
Protoplanetaire  
schijven

## Het leven van sterren

Hydrostatisch  
evenwicht  
Eigenschappen van  
sterren  
**Sterren in groepen**  
Het kleur-  
magnitudediagram  
Evoluerende sterren

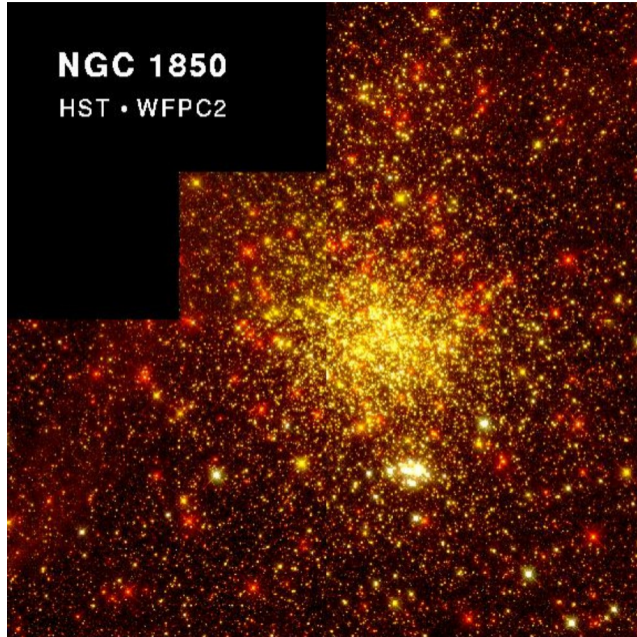
## Het einde van sterren

Het einde van lichte  
sterren  
Het einde van zware  
sterren  
Supernovae

## Dubbelsterren

Materie-overdracht  
Witte dwergen  
Zwarte gaten  
Gravitatiegolven

## Sterrenstof!



## De Zon

## Stervorming

De Orionnevel  
Protoplanetaire  
schijven

## Het leven van sterren

Hydrostatisch  
evenwicht  
Eigenschappen van  
sterren

## Sterren in groepen

Het kleur-  
magnitudediagram  
Evoluerende sterren

## Het einde van sterren

Het einde van lichte  
sterren  
Het einde van zware  
sterren  
Supernovae

## Dubbelsterren

Materie-overdracht  
Witte dwergen  
Zwarte gaten  
Gravitatiegolven

## Sterrenstof!



## De Zon

## Stervorming

De Orionnevel

Protoplanetaire  
schijven

## Het leven van sterren

Hydrostatisch  
evenwicht

Eigenschappen van  
sterren

## Sterren in groepen

Het kleur-  
magnitudediagram

Evoluerende sterren

## Het einde van sterren

Het einde van lichte  
sterren

Het einde van zware  
sterren

Supernovae

## Dubbelsterren

Materie-overdracht

Witte dwergen

Zwarte gaten

Gravitatiegolven

## Sterrenstof!

## Waterstoffusie:

$$T > 7 \text{ miljoen K}$$

$$\tau \approx 7 \text{ miljard jr}$$



H

H → He

## De Zon

## Stervorming

De Orionnevel  
Protoplanetaire  
schijven

## Het leven van sterren

Hydrostatisch  
evenwicht  
Eigenschappen van  
sterren  
Sterren in groepen

## Het kleur- magnitudediagram

Evoluerende sterren

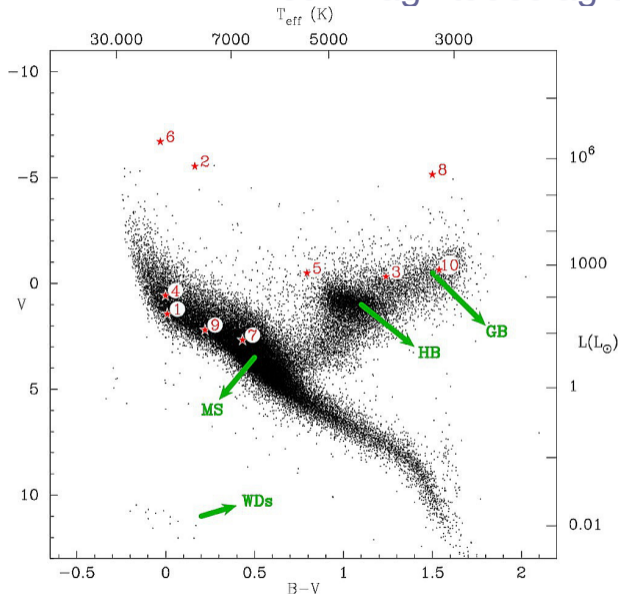
## Het einde van sterren

Het einde van lichte  
sterren  
Het einde van zware  
sterren  
Supernovae

## Dubbelsterren

Materie-overdracht  
Witte dwergen  
Zwarte gaten  
Gravitatiegolven

## Sterrenstof



● 48 495 sterren

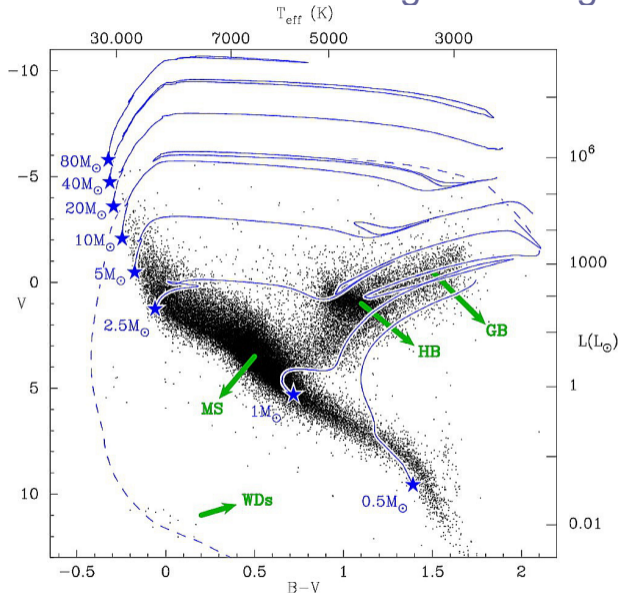
●  $\frac{\Delta d}{d} < 20\%$

●  $\Delta(B-V) < 0.1$  m

- ① Sirius
- ② Canopus
- ③ Arcturus
- ④ Vega
- ⑤ Capella
- ⑥ Rigel
- ⑦ Procyon
- ⑧ Betelgeuse
- ⑨ Altair
- ⑩ Aldebaran



# Kleur-magnitudediagram: Hipparcos-catalogus



- 48 495 sterren
- $\frac{\Delta d}{d} < 20\%$
- $\Delta(B-V) < 0.1$  m

- Evolutiesporen
- $0.5 M_{\odot} - 80 M_{\odot}$

- MS: Hoofdreeks
- GB: Reuzentak (+AGB)
- HB: Horizontale tak
- WD: Witte dwergen

De Zon

Stervorming

De Orionnevel  
Protoplanetaire  
schijven

Het leven van  
sterren

Hydrostatisch  
evenwicht  
Eigenschappen van  
sterren  
Sterren in groepen  
Het kleur-  
magnitudediagram  
Evoluerende sterren

Het einde van  
sterren

Het einde van lichte  
sterren  
Het einde van zware  
sterren  
Supernovae

Dubbelsterren

Materie-overdracht  
Witte dwergen  
Zwarte gaten  
Gravitatiegolven

Sterrenstof

## De Zon

## Stervorming

De Orionnevel

Protoplanetaire  
schijven

## Het leven van sterren

Hydrostatisch  
evenwicht

Eigenschappen van  
sterren

Sterren in groepen

Het kleur-  
magnitudediagram

## Evoluerende sterren

## Het einde van sterren

Het einde van lichte  
sterren

Het einde van zware  
sterren

Supernovae

## Dubbelsterren

Materie-overdracht

Witte dwergen

Zwarte gaten

Gravitatiegolven

## Sterrenstof!

# Waterstoffusie:

$$T > 7 \text{ miljoen K}$$

$$\tau \approx 4 \text{ miljard jr}$$



# Evolutie van een ster als de Zon: Horizontale tak

## Sterren en sterevolutie

### De Zon

### Stervorming

De Orionnevel  
Protoplanetaire  
schijven

### Het leven van sterren

Hydrostatisch  
evenwicht  
Eigenschappen van  
sterren  
Sterren in groepen  
Het kleur-  
magnitudediagram

### Evoluerende sterren

### Het einde van sterren

Het einde van lichte  
sterren  
Het einde van zware  
sterren  
Supernovae

### Dubbelsterren

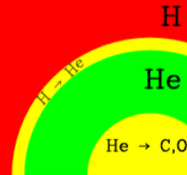
Materie-overdracht  
Witte dwergen  
Zwarte gaten  
Gravitatiegolven

### Sterrenstof!

## Heliumfusie:

$$T > 200 \text{ miljoen K}$$

$$\tau \approx 100 \text{ miljoen jr}$$



# Evolutie van een ster als de Zon: Asymptotische reuzentak

## Sterren en stervolutie

### De Zon

### Stervorming

De Orionnevel

Protoplanetaire schijven

### Het leven van sterren

Hydrostatisch evenwicht

Eigenschappen van sterren

Sterren in groepen

Het kleur-magnitudediagram

### Evoluerende sterren

### Het einde van sterren

Het einde van lichte sterren

Het einde van zware sterren

Supernovae

### Dubbelsterren

Materie-overdracht

Witte dwergen

Zwarte gaten

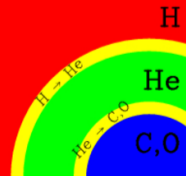
Gravitatiegolven

### Sterrenstof!

## Heliumfusie:

$T > 200$  miljoen K

$\tau \approx 25$  miljoen jr



## Sterren en sterevolutie

### De Zon

### Stervorming

De Orionnevel  
Protoplanetaire  
schijven

### Het leven van sterren

Hydrostatisch  
evenwicht  
Eigenschappen van  
sterren  
Sterren in groepen  
Het kleur-  
magnitudediagram

### Evoluerende sterren

### Het einde van sterren

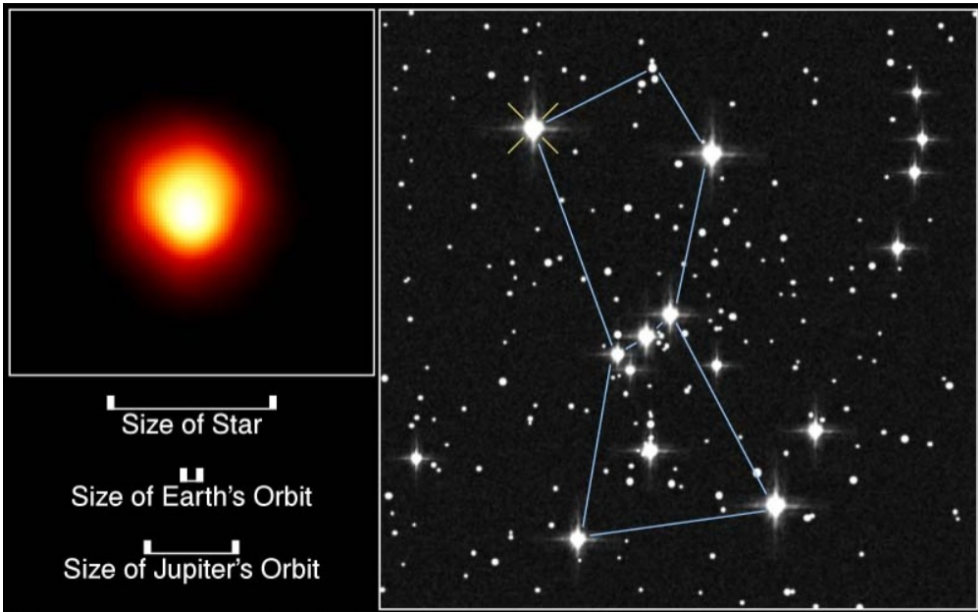
Het einde van lichte  
sterren  
Het einde van zware  
sterren  
Supernovae

### Dubbelsterren

Materie-overdracht  
Witte dwergen  
Zwarte gaten  
Gravitatiegolven

### Sterrenstof!

# Rode reus: Betelgeuze



Bron: HST (NASA/ESA)

## Sterren en sterevolutie

# Wolf-Rayetster WR 124 en nevel M 1-67 ( $\sim 20 M_{\odot}$ )

### De Zon

### Stervorming

De Orionnevel  
Protoplanetaire  
schijven

### Het leven van sterren

Hydrostatisch  
evenwicht  
Eigenschappen van  
sterren  
Sterren in groepen  
Het kleur-  
magnitudediagram

### Evoluerende sterren

### Het einde van sterren

Het einde van lichte  
sterren  
Het einde van zware  
sterren  
Supernovae

### Dubbelsterren

Materie-overdracht  
Witte dwergen  
Zwarte gaten  
Gravitatiegolven

### Sterrenstof!



Bron: [James Webb telescope \(NASA/ESA\)](#)

## De Zon

## Stervorming

De Orionnevel  
Protoplanetaire  
schijven

## Het leven van sterren

Hydrostatisch  
evenwicht  
Eigenschappen van  
sterren  
Sterren in groepen  
Het kleur-  
magnitudediagram

## Evoluerende sterren

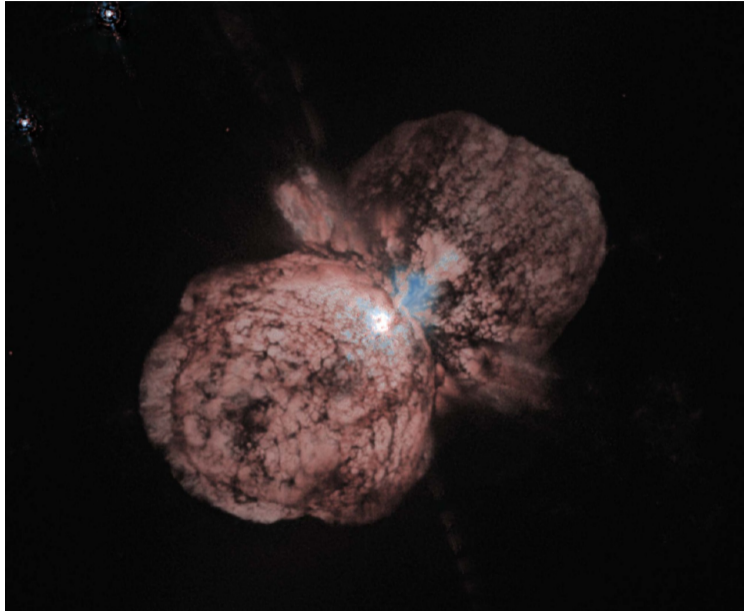
## Het einde van sterren

Het einde van lichte  
sterren  
Het einde van zware  
sterren  
Supernovae

## Dubbelsterren

Materie-overdracht  
Witte dwergen  
Zwarte gaten  
Gravitatiegolven

## Sterrenstof!



## Sterren en sterevolutie

### De Zon

### Stervorming

De Orionnevel  
Protoplanetaire  
schijven

### Het leven van sterren

Hydrostatisch  
evenwicht  
Eigenschappen van  
sterren  
Sterren in groepen  
Het kleur-  
magnitudediagram

### Evoluerende sterren

### Het einde van sterren

Het einde van lichte  
sterren  
Het einde van zware  
sterren  
Supernovae

### Dubbelsterren

Materie-overdracht  
Witte dwergen  
Zwarte gaten  
Gravitatiegolven

### Sterrenstof!

# Levenscyclus van sterren



Bron: HST (NASA/ESA)



## Sterren en sterevolutie

### De Zon

### Stervorming

De Orionnevel

Protoplanetaire  
schijven

### Het leven van sterren

Hydrostatisch  
evenwicht

Eigenschappen van  
sterren

Sterren in groepen

Het kleur-  
magnitudediagram

Evoluerende sterren

### Het einde van sterren

Het einde van lichte  
sterren

Het einde van zware  
sterren

Supernovae

### Dubbelsterren

Materie-overdracht

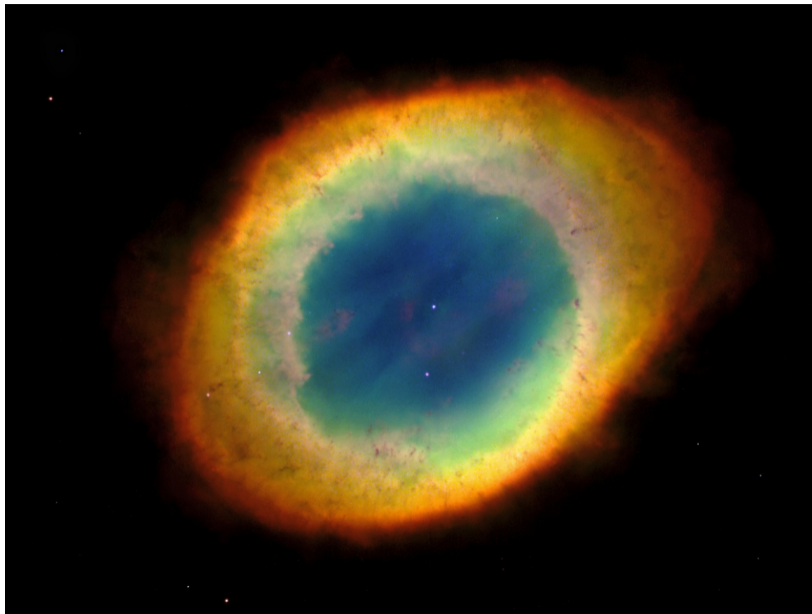
Witte dwergen

Zwarte gaten

Gravitatiegolven

### Sterrenstof!

# Planetaire nevel: de Ringnevel



Bron: HST (NASA/ESA)

## De Zon

## Stervorming

De Orionnevel  
Protoplanetaire  
schijven

## Het leven van sterren

Hydrostatisch  
evenwicht  
Eigenschappen van  
sterren  
Sterren in groepen  
Het kleur-  
magnitudediagram  
Evoluerende sterren

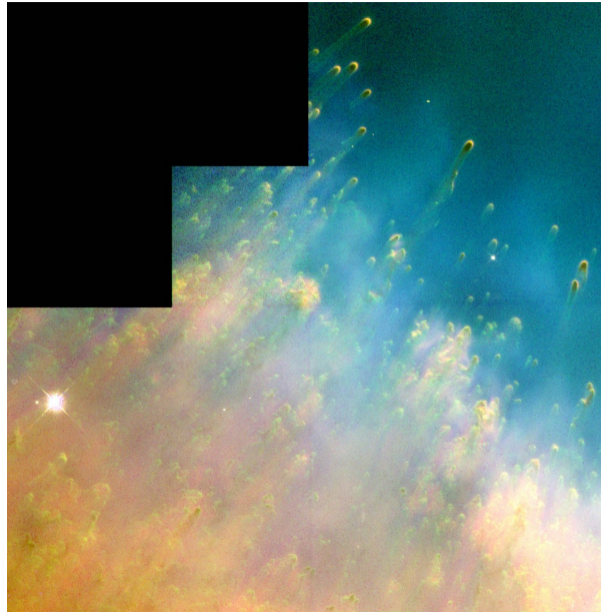
## Het einde van sterren

Het einde van lichte  
sterren  
Het einde van zware  
sterren  
Supernovae

## Dubbelsterren

Materie-overdracht  
Witte dwergen  
Zwarte gaten  
Gravitatiegolven

## Sterrenstof!



## De Zon

## Stervorming

De Orionnevel  
Protoplanetaire  
schijven

## Het leven van sterren

Hydrostatisch  
evenwicht  
Eigenschappen van  
sterren  
Sterren in groepen  
Het kleur-  
magnitudediagram  
Evoluerende sterren

## Het einde van sterren

Het einde van lichte  
sterren  
Het einde van zware  
sterren  
Supernovae

## Dubbelsterren

Materie-overdracht  
Witte dwergen  
Zwarte gaten  
Gravitatiegolven

## Sterrenstof!



## De Zon

## Stervorming

De Orionnevel

Protoplanetaire  
schijven

## Het leven van sterren

Hydrostatisch  
evenwicht

Eigenschappen van  
sterren

Sterren in groepen

Het kleur-  
magnitudediagram

Evoluerende sterren

## Het einde van sterren

Het einde van lichte  
sterren

Het einde van zware  
sterren

Supernovae

## Dubbelsterren

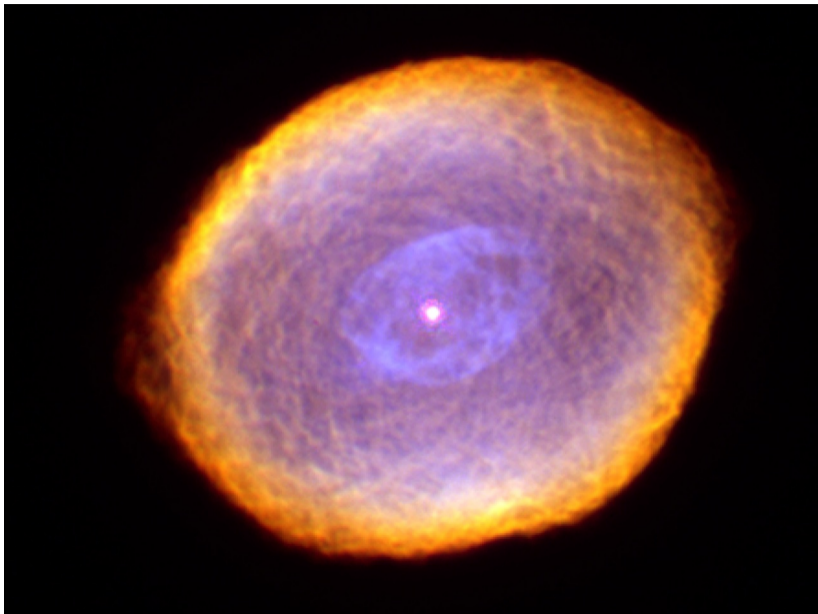
Materie-overdracht

Witte dwergen

Zwarte gaten

Gravitatiegolven

## Sterrenstof!



## Sterren en sterevolutie

### De Zon

### Stervorming

De Orionnevel  
Protoplanetaire  
schijven

### Het leven van sterren

Hydrostatisch  
evenwicht  
Eigenschappen van  
sterren  
Sterren in groepen  
Het kleur-  
magnitudediagram  
Evoluerende sterren

### Het einde van sterren

Het einde van lichte  
sterren  
Het einde van zware  
sterren  
Supernovae

### Dubbelsterren

Materie-overdracht  
Witte dwergen  
Zwarte gaten  
Gravitatiegolven

### Sterrenstof!

# Planetaire nevel: de Halternevel



Bron: VLT (ESO)

## Sterren en sterevolutie

### De Zon

### Stervorming

De Orionnevel  
Protoplanetaire  
schijven

### Het leven van sterren

Hydrostatisch  
evenwicht  
Eigenschappen van  
sterren  
Sterren in groepen  
Het kleur-  
magnitudediagram  
Evoluerende sterren

### Het einde van sterren

Het einde van lichte  
sterren  
Het einde van zware  
sterren  
Supernovae

### Dubbelsterren

Materie-overdracht  
Witte dwergen  
Zwarte gaten  
Gravitatiegolven

### Sterrenstof!

# Planetaire nevel: the Cat's Eye nebula



Bron: HST (NASA/ESA)

## De Zon

## Stervorming

De Orionnevel  
Protoplanetaire  
schijven

## Het leven van sterren

Hydrostatisch  
evenwicht  
Eigenschappen van  
sterren  
Sterren in groepen  
Het kleur-  
magnitudediagram  
Evoluerende sterren

## Het einde van sterren

Het einde van lichte  
sterren  
Het einde van zware  
sterren  
Supernovae

## Dubbelsterren

Materie-overdracht  
Witte dwergen  
Zwarte gaten  
Gravitatiegolven

## Sterrenstof!



De Zon

Stervorming

De Orionnevel  
Protoplanetaire  
schijven

Het leven van  
sterren

Hydrostatisch  
evenwicht  
Eigenschappen van  
sterren  
Sterren in groepen  
Het kleur-  
magnitudediagram  
Evoluerende sterren

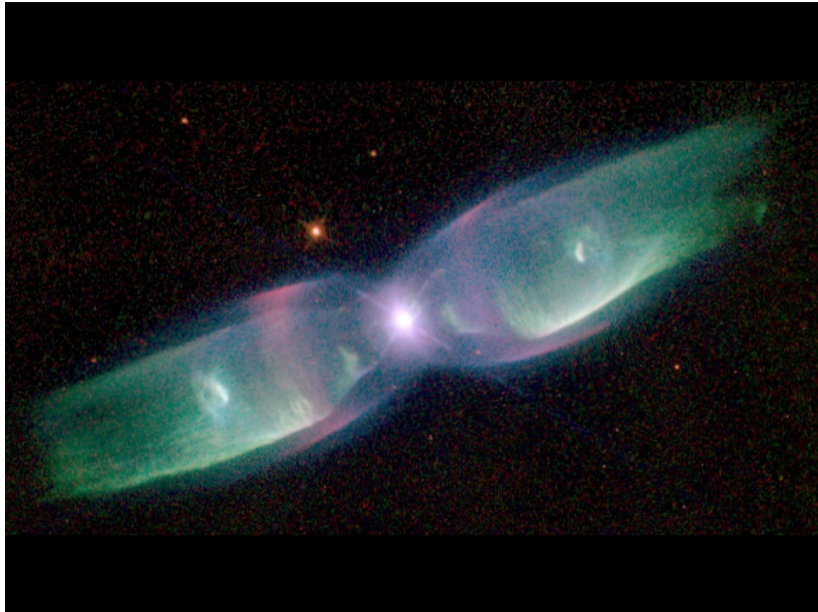
Het einde van  
sterren

Het einde van lichte  
sterren  
Het einde van zware  
sterren  
Supernovae

Dubbelsterren

Materie-overdracht  
Witte dwergen  
Zwarte gaten  
Gravitatiegolven

Sterrenstof!





## Sterren en sterevolutie

### De Zon

### Stervorming

De Orionnevel  
Protoplanetaire  
schijven

### Het leven van sterren

Hydrostatisch  
evenwicht  
Eigenschappen van  
sterren  
Sterren in groepen  
Het kleur-  
magnitudediagram  
Evoluerende sterren

### Het einde van sterren

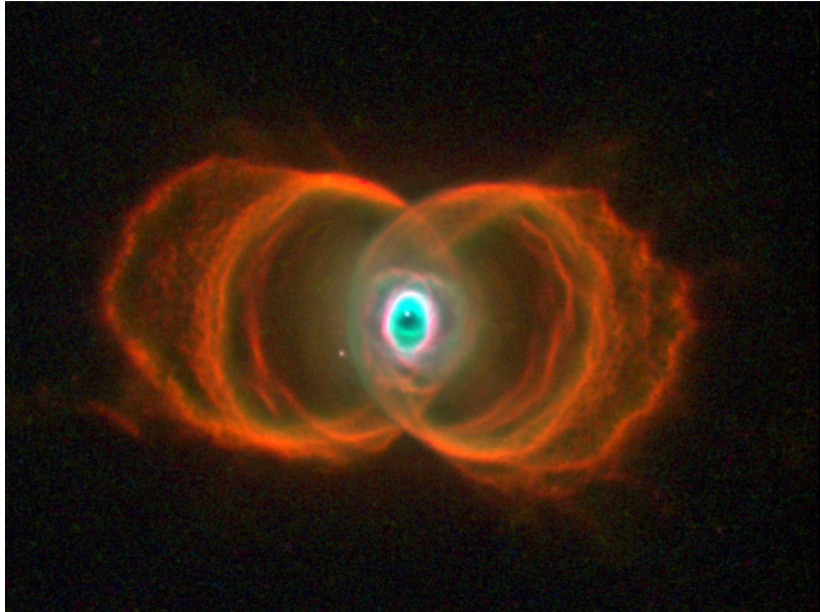
Het einde van lichte  
sterren  
Het einde van zware  
sterren  
Supernovae

### Dubbelsterren

Materie-overdracht  
Witte dwergen  
Zwarte gaten  
Gravitatiegolven

### Sterrenstof!

# Planetaire nevel: the Hourglass nebula



Bron: HST (NASA/ESA)

## De Zon

## Stervorming

De Orionnevel  
Protoplanetaire  
schijven

## Het leven van sterren

Hydrostatisch  
evenwicht  
Eigenschappen van  
sterren  
Sterren in groepen  
Het kleur-  
magnitudediagram  
Evoluerende sterren

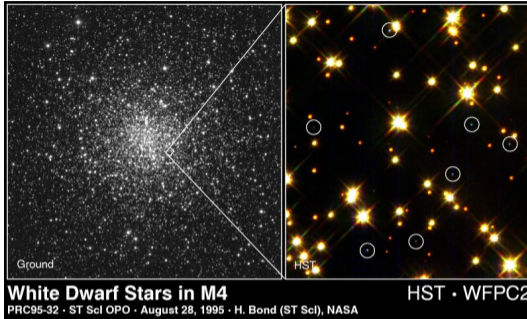
## Het einde van sterren

Het einde van lichte  
sterren  
Het einde van zware  
sterren  
Supernovae

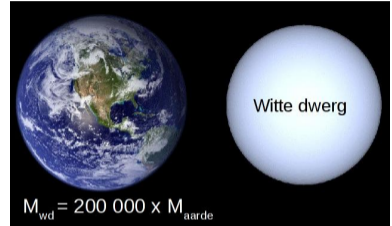
## Dubbelsterren

Materie-overdracht  
Witte dwergen  
Zwarte gaten  
Gravitatiegolven

## Sterrenstof!



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  $\sim 1$  miljoen keer die van water
- $M_{\text{wd}} \lesssim 1.4 M_{\odot}$ ;  $\langle M_{\text{wd}} \rangle \approx 0.6 M_{\odot}$
- $L_{\text{wd}} \lesssim 0.001 L_{\odot}$

## De Zon

## Stervorming

De Orionnevel  
Protoplanetaire  
schijven

## Het leven van sterren

Hydrostatisch  
evenwicht  
Eigenschappen van  
sterren  
Sterren in groepen  
Het kleur-  
magnitudediagram  
Evoluerende sterren

## Het einde van sterren

Het einde van lichte  
sterren

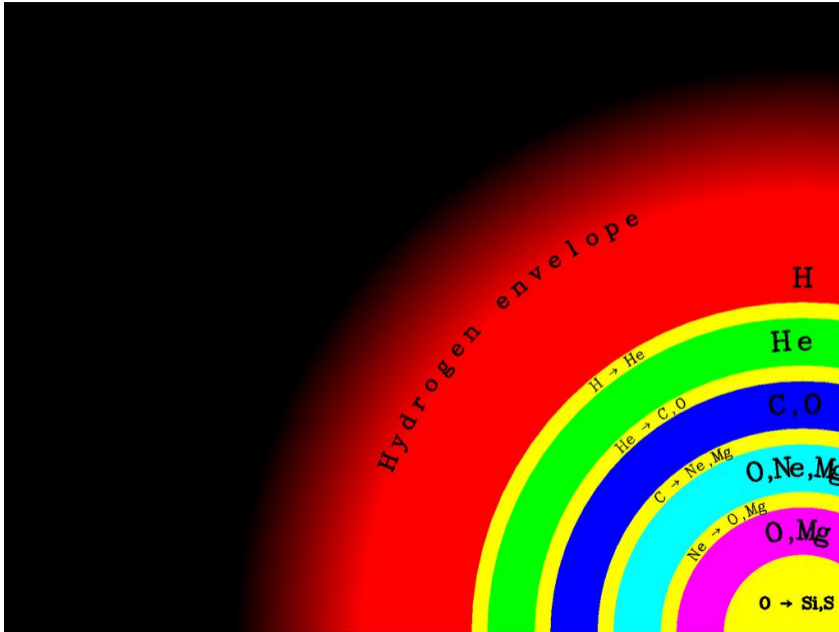
## Het einde van zware sterren

Supernovae

## Dubbelsterren

Materie-overdracht  
Witte dwergen  
Zwarte gaten  
Gravitatiegolven

## Sterrenstof!



# Eindstadia van een zware ster: siliciumfusie

## Sterren en stervolutie

### De Zon

### Stervorming

De Orionnevel

Protoplanetaire schijven

### Het leven van sterren

Hydrostatisch evenwicht

Eigenschappen van sterren

Sterren in groepen

Het kleur-magnitudediagram

Evoluerende sterren

### Het einde van sterren

Het einde van lichte sterren

Het einde van zware sterren

Supernovae

### Dubbelsterren

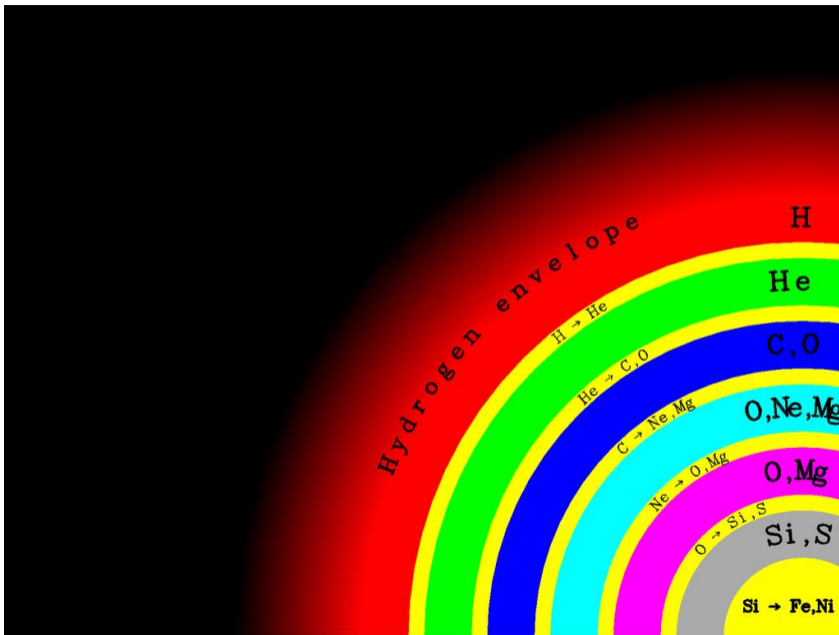
Materie-overdracht

Witte dwergen

Zwarte gaten

Gravitatiegolven

### Sterrenstof!



## De Zon

## Stervorming

De Orionnevel  
Protoplanetaire  
schijven

## Het leven van sterren

Hydrostatisch  
evenwicht  
Eigenschappen van  
sterren  
Sterren in groepen  
Het kleur-  
magnitudediagram  
Evoluerende sterren

## Het einde van sterren

Het einde van lichte  
sterren

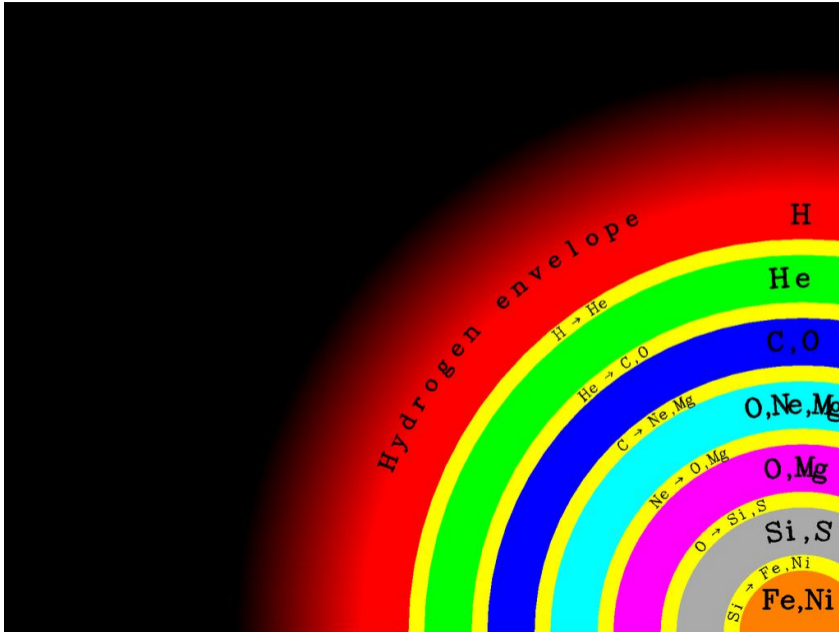
## Het einde van zware sterren

Supernovae

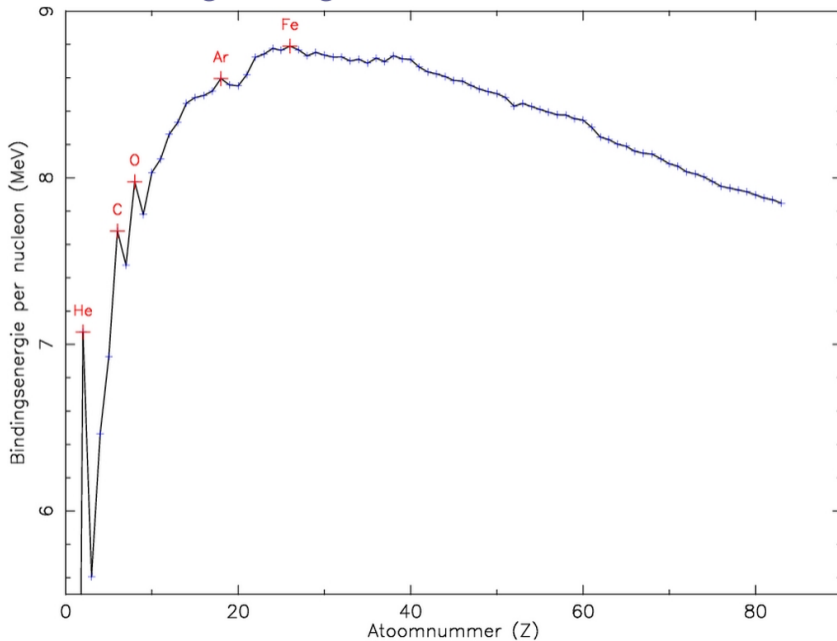
## Dubbelsterren

Materie-overdracht  
Witte dwergen  
Zwarte gaten  
Gravitatiegolven

## Sterrenstof!



# Bindingsenergie van nucleonen in een atoomkern



## Sterren en stervolutie

### De Zon

### Stervorming

De Orionnevel  
Protoplanetaire schijven

### Het leven van sterren

Hydrostatisch evenwicht  
Eigenschappen van sterren  
Sterren in groepen  
Het kleur-magnitudediagram  
Evoluerende sterren

### Het einde van sterren

Het einde van lichte sterren  
Het einde van zware sterren

Supernovae

### Dubbelsterren

Materie-overdracht  
Witte dwergen  
Zwarte gaten  
Gravitatiegolven

### Sterrenstof!

De Zon

Stervorming

De Orionnevel  
Protoplanetaire  
schijven

Het leven van  
sterren

Hydrostatisch  
evenwicht  
Eigenschappen van  
sterren  
Sterren in groepen  
Het kleur-  
magnitudediagram  
Evoluerende sterren

Het einde van  
sterren

Het einde van lichte  
sterren  
Het einde van zware  
sterren  
Supernovae

Dubbelsterren

Materie-overdracht  
Witte dwergen  
Zwarte gaten  
Gravitatiegolven

Sterrenstof!

Fase	Nettoreacties	T (K)	$\tau$
<b>Waterstoffusie</b>	<b>H <math>\rightarrow</math> He</b>	<b><math>&gt; 7 \times 10^6</math></b>	<b>10 Myr</b>
<b>Heliumfusie</b>	<b>He <math>\rightarrow</math> C,O</b>	<b><math>&gt; 2 \times 10^8</math></b>	<b>1 Myr</b>
<b>Koolstoffusie</b>	<b>C <math>\rightarrow</math> Ne,Mg</b>	<b><math>&gt; 8 \times 10^8</math></b>	<b>1 kyr</b>
<b>Neonfusie</b>	<b>Ne <math>\rightarrow</math> O,Mg</b>	<b><math>&gt; 1.5 \times 10^9</math></b>	<b>1 maand</b>
<b>Zuurstoffusie</b>	<b>O <math>\rightarrow</math> Si,S</b>	<b><math>&gt; 2 \times 10^9</math></b>	<b>2 jaar</b>
<b>Siliciumfusie</b>	<b>Si <math>\rightarrow</math> Fe,Ni</b>	<b><math>&gt; 3.3 \times 10^9</math></b>	<b>3 dagen</b>

## Sterren en sterevolutie

### De Zon

### Stervorming

De Orionnevel  
Protoplanetaire  
schijven

### Het leven van sterren

Hydrostatisch  
evenwicht  
Eigenschappen van  
sterren  
Sterren in groepen  
Het kleur-  
magnitudediagram  
Evoluerende sterren

### Het einde van sterren

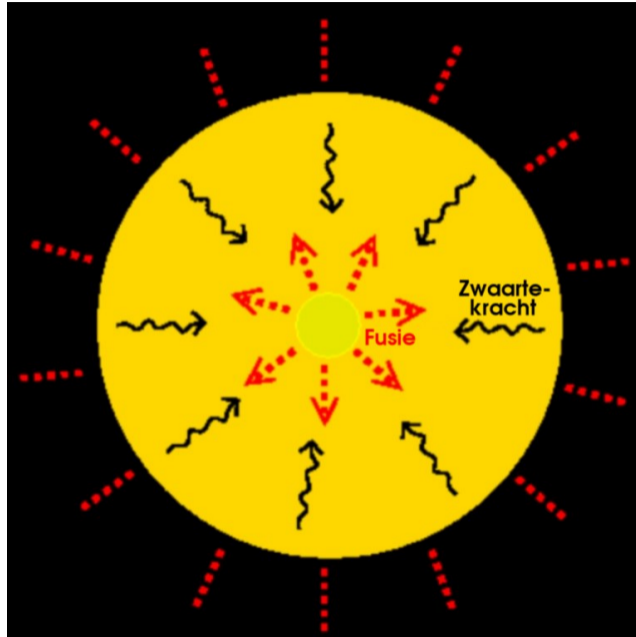
Het einde van lichte  
sterren  
Het einde van zware  
sterren  
Supernovae

### Dubbelsterren

Materie-overdracht  
Witte dwergen  
Zwarte gaten  
Gravitatiegolven

### Sterrenstof!

# Hydrostatisch evenwicht. . .





# Sterren en sterevolutie

... verloren!

## De Zon

## Stervorming

De Orionnevel  
Protoplanetaire  
schijven

## Het leven van sterren

Hydrostatisch  
evenwicht  
Eigenschappen van  
sterren  
Sterren in groepen  
Het kleur-  
magnitudediagram  
Evoluerende sterren

## Het einde van sterren

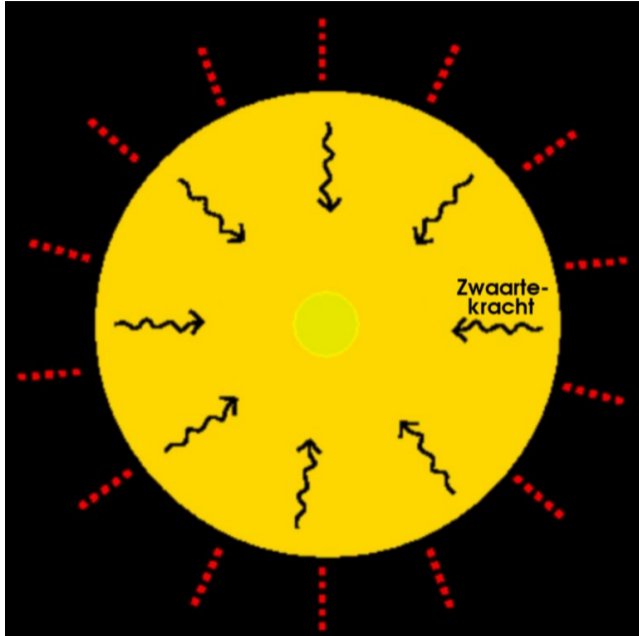
Het einde van lichte  
sterren  
Het einde van zware  
sterren

Supernovae

## Dubbelsterren

Materie-overdracht  
Witte dwergen  
Zwarte gaten  
Gravitatiegolven

## Sterrenstof!



## De Zon

## Sterrvorming

De Orionnevel  
Protoplanetaire  
schijven

## Het leven van sterren

Hydrostatisch  
evenwicht  
Eigenschappen van  
sterren  
Sterren in groepen  
Het kleur-  
magnitudediagram  
Evoluerende sterren

## Het einde van sterren

Het einde van lichte  
sterren  
Het einde van zware  
sterren

## Supernovae

## Dubbelsterren

Materie-overdracht  
Witte dwergen  
Zwarte gaten  
Gravitatiegolven

## Sterrenstof!



## De Zon

## Stervorming

De Orionnevel  
Protoplanetaire  
schijven

## Het leven van sterren

Hydrostatisch  
evenwicht  
Eigenschappen van  
sterren  
Sterren in groepen  
Het kleur-  
magnitudediagram  
Evoluerende sterren

## Het einde van sterren

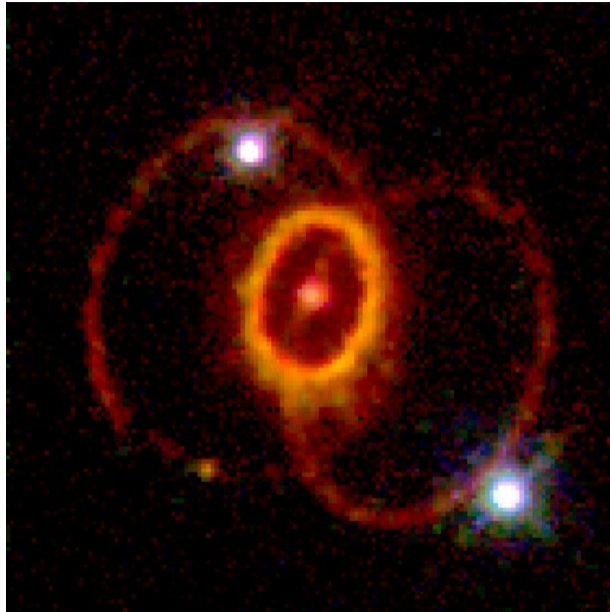
Het einde van lichte  
sterren  
Het einde van zware  
sterren

## Supernovae

## Dubbelsterren

Materie-overdracht  
Witte dwergen  
Zwarte gaten  
Gravitatiegolven

## Sterrenstof!



Bron: HST (NASA/ESA)

## De Zon

## Stervorming

De Orionnevel

Protoplanetaire  
schijven

## Het leven van sterren

Hydrostatisch  
evenwicht

Eigenschappen van  
sterren

Sterren in groepen

Het kleur-  
magnitudediagram

Evoluerende sterren

## Het einde van sterren

Het einde van lichte  
sterren

Het einde van zware  
sterren

**Supernovae**

## Dubbelsterren

Materie-overdracht

Witte dwergen

Zwarte gaten

Gravitatiegolven

## Sterrenstof!



Bron: VLT, ESO

## Sterren en sterevolutie

### De Zon

### Stervorming

De Orionnevel  
Protoplanetaire  
schijven

### Het leven van sterren

Hydrostatisch  
evenwicht  
Eigenschappen van  
sterren  
Sterren in groepen  
Het kleur-  
magnitudediagram  
Evoluerende sterren

### Het einde van sterren

Het einde van lichte  
sterren  
Het einde van zware  
sterren

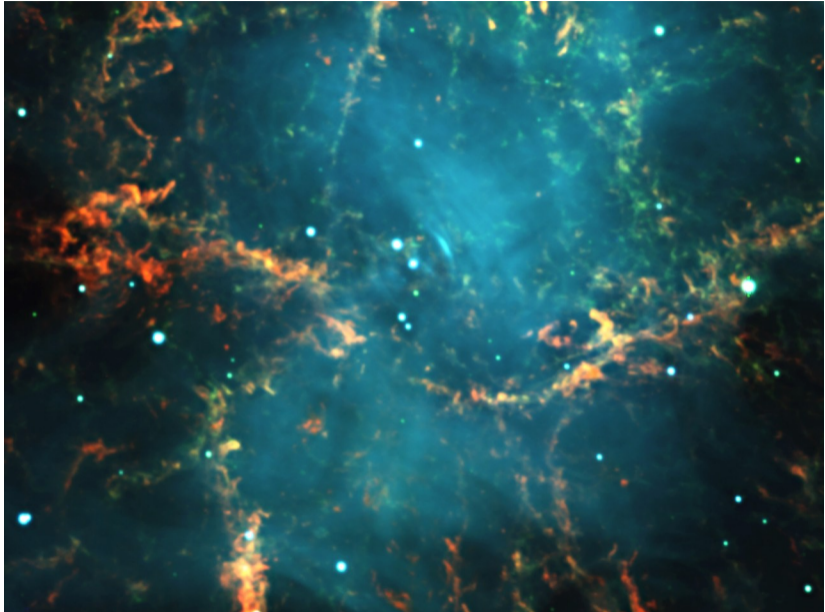
### Supernovae

### Dubbelsterren

Materie-overdracht  
Witte dwergen  
Zwarte gaten  
Gravitatiegolven

### Sterrenstof!

# De Krabnevel (zoom)



Bron: VLT, ESO

# De Krabpulsar: een roterende neutronenster ( $\sim 20$ km)

Sterren en  
sterevolutie

De Zon

Stervorming

De Orionnevel  
Protoplanetaire  
schijven

Het leven van  
sterren

Hydrostatisch  
evenwicht  
Eigenschappen van  
sterren  
Sterren in groepen  
Het kleur-  
magnitudediagram  
Evoluerende sterren

Het einde van  
sterren

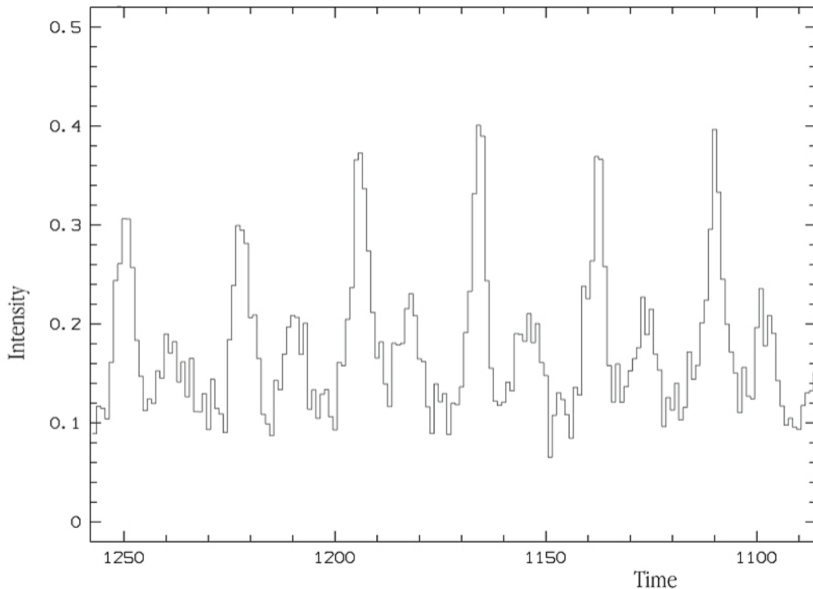
Het einde van lichte  
sterren  
Het einde van zware  
sterren

Supernovae

Dubbelsterren

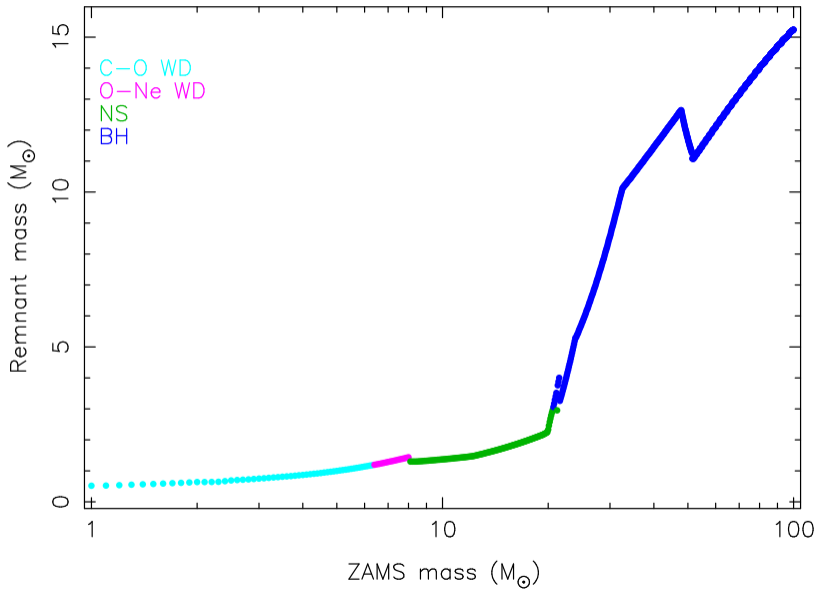
Materie-overdracht  
Witte dwergen  
Zwarte gaten  
Gravitatiegolven

Sterrenstof!



$\sim 30$  pulsen per seconde

# Relatie tussen ZAMS-massa en eindmassa



ZAMS: Zero-Age Main Sequence: begin van de hoofdreeks

Sterren en stervolutie

De Zon

Sterrvorming

De Orionnevel  
Protoplanetaire schijven

Het leven van sterren

Hydrostatisch evenwicht  
Eigenschappen van sterren  
Sterren in groepen  
Het kleur-magnitudediagram  
Evoluerende sterren

Het einde van sterren

Het einde van lichte sterren  
Het einde van zware sterren

Supernovae

Dubbelsterren

Materie-overdracht  
Witte dwergen  
Zwarte gaten  
Gravitatiegolven

Sterrenstof!

## Sterren en sterevolutie

### De Zon

### Stervorming

- De Orionnevel
- Protoplanetaire schijven

### Het leven van sterren

- Hydrostatisch evenwicht
- Eigenschappen van sterren
- Sterren in groepen
- Het kleur-magnitudediagram
- Evoluerende sterren

### Het einde van sterren

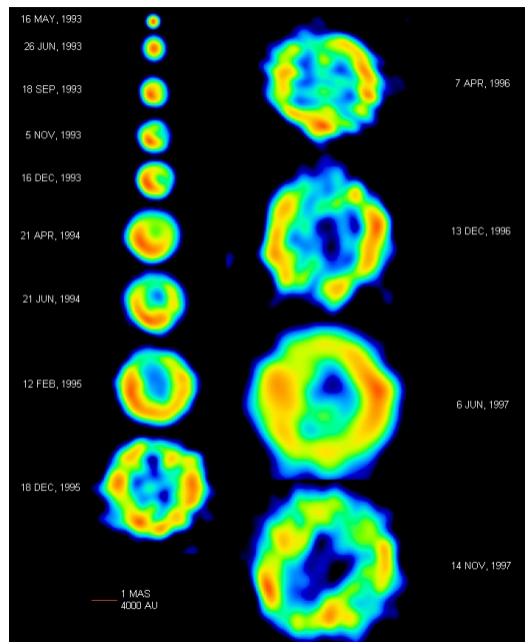
- Het einde van lichte sterren
- Het einde van zware sterren

### Supernovae

### Dubbelsterren

- Materie-overdracht
- Witte dwergen
- Zwarte gaten
- Gravitatiegolven

### Sterrenstof!





## Sterren en sterevolutie

### De Zon

### Stervorming

De Orionnevel  
Protoplanetaire  
schijven

### Het leven van sterren

Hydrostatisch  
evenwicht  
Eigenschappen van  
sterren  
Sterren in groepen  
Het kleur-  
magnitudediagram  
Evoluerende sterren

### Het einde van sterren

Het einde van lichte  
sterren  
Het einde van zware  
sterren

### Supernovae

### Dubbelsterren

Materie-overdracht  
Witte dwergen  
Zwarte gaten  
Gravitatiegolven

### Sterrenstof!



## Cygnus loop



# Eclipserende dubbelster

## Sterren en stervolutie

### De Zon

### Stervorming

De Orionnevel  
Protoplanetaire schijven

### Het leven van sterren

Hydrostatisch evenwicht  
Eigenschappen van sterren  
Sterren in groepen  
Het kleur-magnitudediagram  
Evoluerende sterren

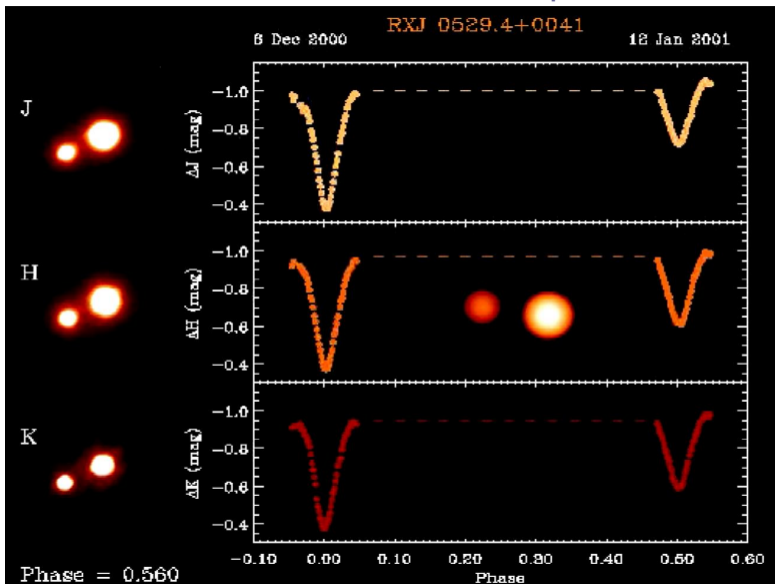
### Het einde van sterren

Het einde van lichte sterren  
Het einde van zware sterren  
Supernovae

### Dubbelsterren

Materie-overdracht  
Witte dwergen  
Zwarte gaten  
Gravitatiegolven

### Sterrenstof



## De Zon

## Stervorming

De Orionnevel  
Protoplanetaire  
schijven

## Het leven van sterren

Hydrostatisch  
evenwicht  
Eigenschappen van  
sterren  
Sterren in groepen  
Het kleur-  
magnitudediagram  
Evoluerende sterren

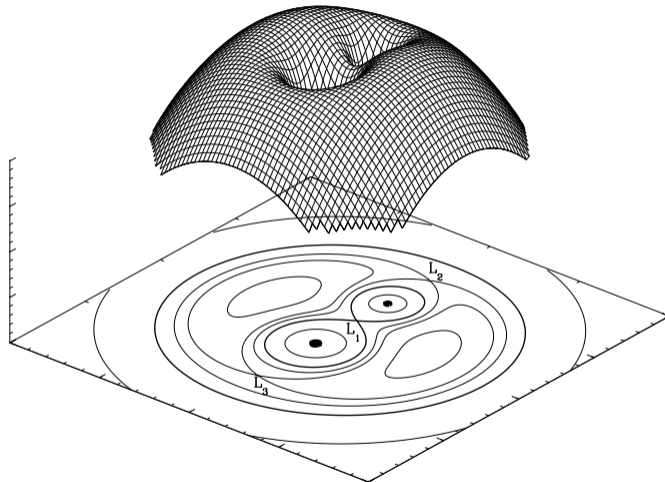
## Het einde van sterren

Het einde van lichte  
sterren  
Het einde van zware  
sterren  
Supernovae

## Dubbelsterren

Materie-overdracht  
Witte dwergen  
Zwarte gaten  
Gravitatiegolven

## Sterrenstof!



Bron: Van der Sluys (2006)

$$\frac{R_{\text{RL},i}}{a} \approx \frac{2}{3^{4/3}} \left( \frac{M_{(3-i)}}{M_{\text{T}}} \right)^{1/3}$$

accurate within 1% for  $q_i < 0.05$   
(Paczynski, 1967).

$$\frac{R_{\text{RL},i}}{a} \approx \frac{0.49 q_i^{2/3}}{0.6 q_i^{2/3} + \ln(1 + q_i^{1/3})}$$

accurate within 1% for  $0 < q_i < \infty$   
(Eggleton, 1983).

# Stabiele (conservative) materie-overdracht

## Sterren en sterevolutie

### De Zon

### Stervorming

De Orionnevel

Protoplanetaire  
schijven

### Het leven van sterren

Hydrostatisch  
evenwicht

Eigenschappen van  
sterren

Sterren in groepen

Het kleur-  
magnitudediagram

Evoluerende sterren

### Het einde van sterren

Het einde van lichte  
sterren

Het einde van zware  
sterren

Supernovae

### Dubbelsterren

Materie-overdracht

Witte dwergen

Zwarte gaten

Gravitatiegolven

### Sterrenstof!



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

## Sterren en sterevolutie

# Cataclysmische variabele (CV): accretor is WD

### De Zon

### Stervorming

De Orionnevel  
Protoplanetaire  
schijven

### Het leven van sterren

Hydrostatisch  
evenwicht  
Eigenschappen van  
sterren  
Sterren in groepen  
Het kleur-  
magnitudediagram  
Evoluerende sterren

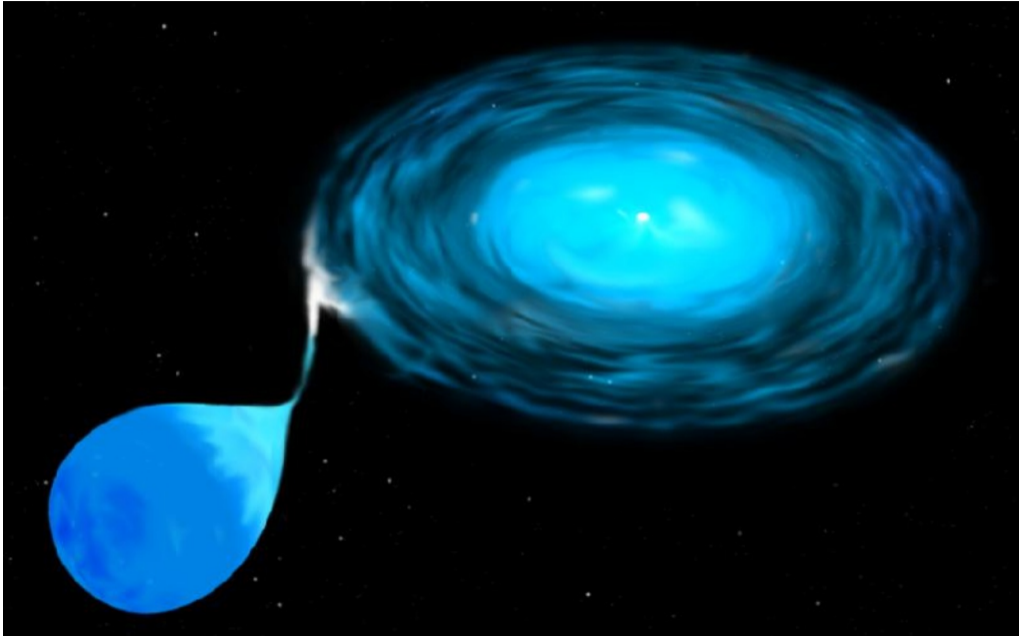
### Het einde van sterren

Het einde van lichte  
sterren  
Het einde van zware  
sterren  
Supernovae

### Dubbelsterren

Materie-overdracht  
Witte dwergen  
Zwarte gaten  
Gravitatiegolven

### Sterrenstof!



# Novae: V838 Monocerotis: ontploffing op accreterende WD

## Sterren en stervolutie

### De Zon

### Stervorming

De Orionnevel  
Protoplanetaire  
schijven

### Het leven van sterren

Hydrostatisch  
evenwicht  
Eigenschappen van  
sterren  
Sterren in groepen  
Het kleur-  
magnitudediagram  
Evoluerende sterren

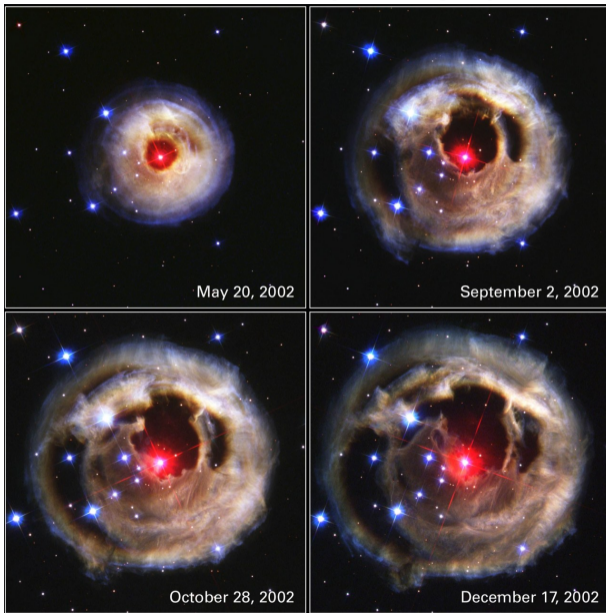
### Het einde van sterren

Het einde van lichte  
sterren  
Het einde van zware  
sterren  
Supernovae

### Dubbelsterren

Materie-overdracht  
Witte dwergen  
Zwarte gaten  
Gravitatiegolven

### Sterrenstof!



Bron: HST (NASA/ESA)

## De Zon

## Stervorming

De Orionnevel

Protoplanetaire  
schijven

## Het leven van sterren

Hydrostatisch  
evenwicht

Eigenschappen van  
sterren

Sterren in groepen

Het kleur-  
magnitudediagram

Evoluerende sterren

## Het einde van sterren

Het einde van lichte  
sterren

Het einde van zware  
sterren

Supernovae

## Dubbelsterren

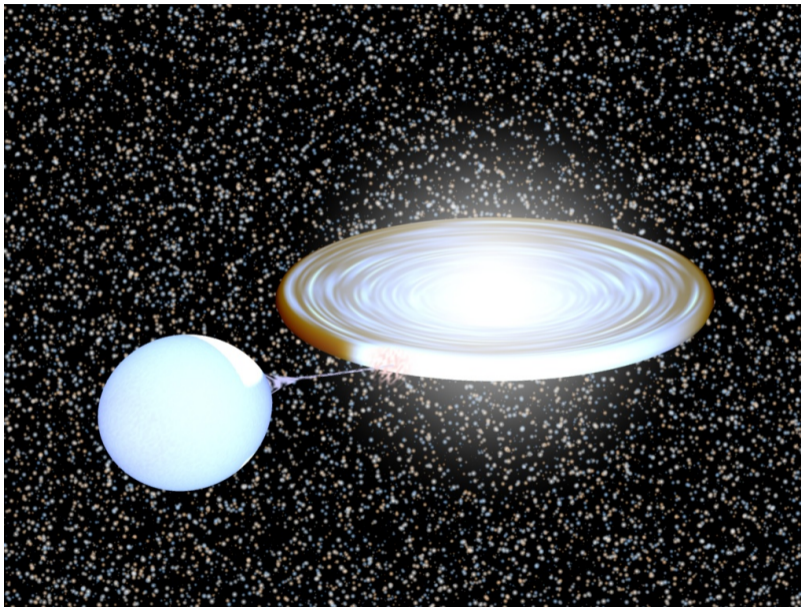
Materie-overdracht

Witte dwergen

Zwarte gaten

Gravitatiegolven

## Sterrenstof!



## De Zon

## Stervorming

De Orionnevel  
Protoplanetaire  
schijven

## Het leven van sterren

Hydrostatisch  
evenwicht  
Eigenschappen van  
sterren  
Sterren in groepen  
Het kleur-  
magnitudediagram  
Evoluerende sterren

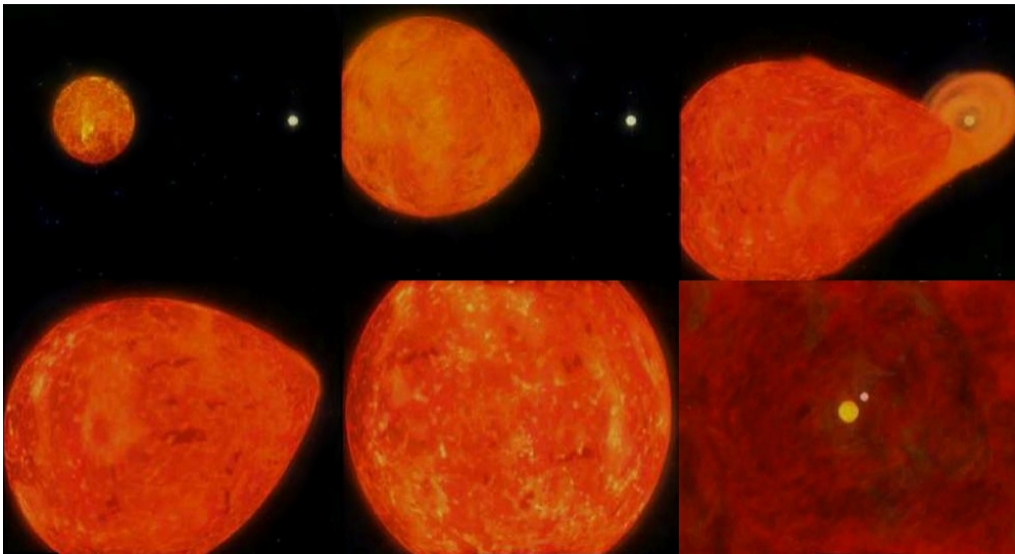
## Het einde van sterren

Het einde van lichte  
sterren  
Het einde van zware  
sterren  
Supernovae

## Dubbelsterren

Materie-overdracht  
Witte dwergen  
Zwarte gaten  
Gravitatiegolven

## Sterrenstof!



- Kern en begeleider spiraliseren in,  $E_{\text{orb}}$  verhit mantel en blaast die weg  
-  $\leq 1000$  jaar - componenten veranderen niet of nauwelijks



## De Zon

## Stervorming

De Orionnevel  
Protoplanetaire  
schijven

## Het leven van sterren

Hydrostatisch  
evenwicht  
Eigenschappen van  
sterren  
Sterren in groepen  
Het kleur-  
magnitudediagram  
Evoluerende sterren

## Het einde van sterren

Het einde van lichte  
sterren  
Het einde van zware  
sterren  
Supernovae

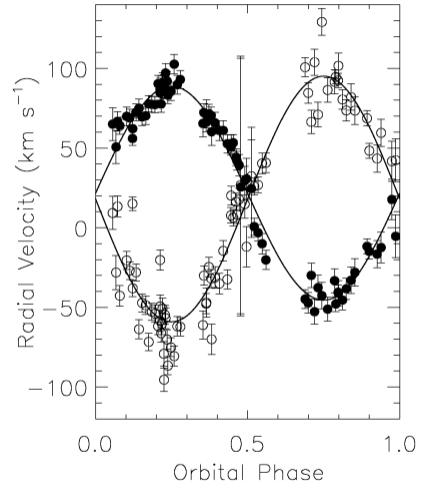
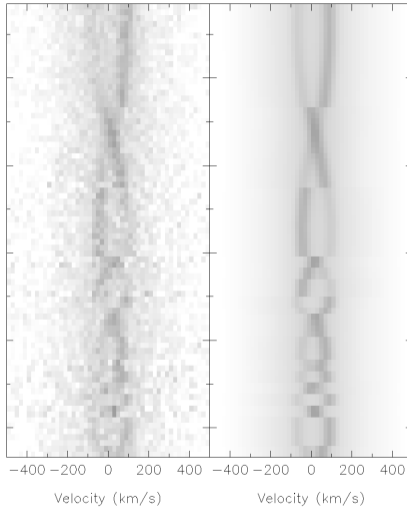
## Dubbelsterren

Materie-overdracht

## Witte dwergen

Zwarte gaten  
Gravitatiegolven

## Sterrenstof!



## De Zon

## Stervorming

De Orionnevel  
Protoplanetaire  
schijven

## Het leven van sterren

Hydrostatisch  
evenwicht  
Eigenschappen van  
sterren  
Sterren in groepen  
Het kleur-  
magnitudediagram  
Evoluerende sterren

## Het einde van sterren

Het einde van lichte  
sterren  
Het einde van zware  
sterren  
Supernovae

## Dubbelsterren

Materie-overdracht

## Witte dwergen

Zwarte gaten  
Gravitatiegolven

## Sterrenstof!



Bron: Van der Sluys (2006)

- Gemiddelde grootte WD-WD baan:

- $\sim 7 R_{\odot}$

- Typische rode-reusvoorganger:

- $R_* \sim 100 R_{\odot}$

- $M_c \gtrsim 0.3 M_{\odot}$

- Conclusies:

- 1 reus paste nooit in huidige baan van WD-WD dubbelster;
- 2 Common Envelope nodig voor verklaring.

## Sterren en sterevolutie

### De Zon

### Stervorming

De Orionnevel  
Protoplanetaire  
schijven

### Het leven van sterren

Hydrostatisch  
evenwicht  
Eigenschappen van  
sterren  
Sterren in groepen  
Het kleur-  
magnitudediagram  
Evoluerende sterren

### Het einde van sterren

Het einde van lichte  
sterren  
Het einde van zware  
sterren  
Supernovae

### Dubbelsterren

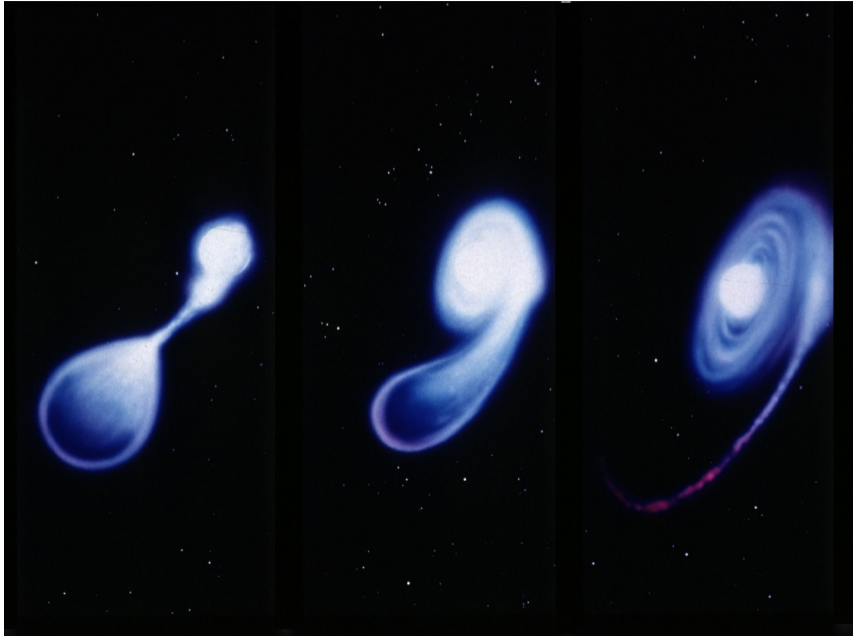
Materie-overdracht

### Witte dwergen

Zwarte gaten  
Gravitatiegolven

### Sterrenstof!

# Samensmelten van twee witte dwergen



## De Zon

## Stervorming

De Orionnevel  
Protoplanetaire  
schijven

## Het leven van sterren

Hydrostatisch  
evenwicht  
Eigenschappen van  
sterren  
Sterren in groepen  
Het kleur-  
magnitudediagram  
Evoluerende sterren

## Het einde van sterren

Het einde van lichte  
sterren  
Het einde van zware  
sterren  
Supernovae

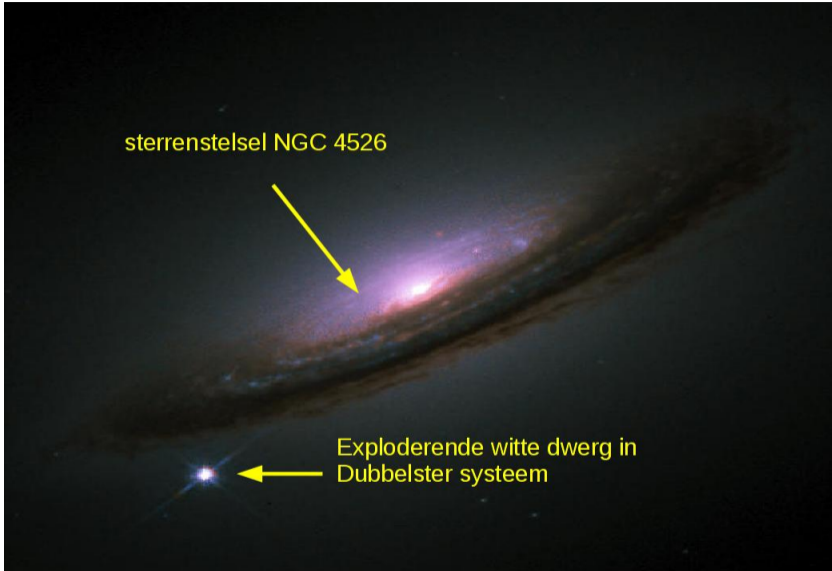
## Dubbelsterren

Materie-overdracht

## Witte dwergen

Zwarte gaten  
Gravitatiegolven

## Sterrenstof!



Bron: HST (NASA/ESA)

- Zeldzaam maar helder: zichtbaar van verre — *standaardkaarsen*

## De Zon

## Stervorming

De Orionnevel  
Protoplanetaire  
schijven

## Het leven van sterren

Hydrostatisch  
evenwicht  
Eigenschappen van  
sterren  
Sterren in groepen  
Het kleur-  
magnitudediagram  
Evoluerende sterren

## Het einde van sterren

Het einde van lichte  
sterren  
Het einde van zware  
sterren  
Supernovae

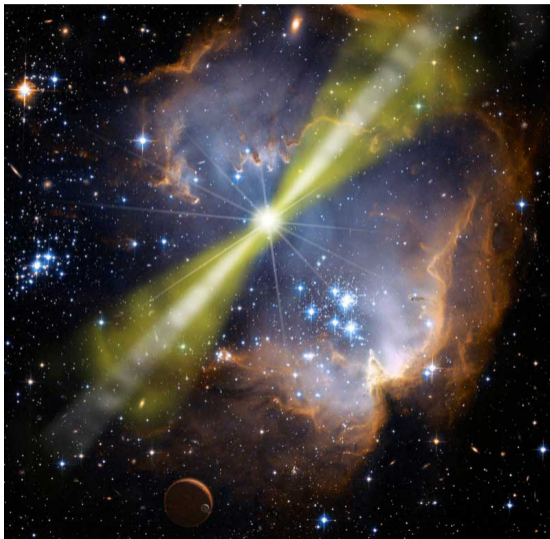
## Dubbelsterren

Materie-overdracht

## Witte dwergen

Zwarte gaten  
Gravitatiegolven

## Sterrenstof!



Artist's impression van een GRB Bron: NASA

## Gammaflitsers:

- $\sim 2$  per dag
- $\sim 25\%$  short GRB
- duur:  $\sim 10$  ms – 10 s
- $\sim 10^{44}$  W, circa 1 miljoen sterrenstelsels
- straling *gebeamed* door emissie in *jets*
- long GRBs gerelateerd aan supernovae
- short GRBs veroorzaakt door NS-NS en NS-BH mergers?
  - oude sterpopulaties
  - energie
  - frequentie

## Sterren en stervolutie

### De Zon

### Stervorming

De Orionnevel  
Protoplanetaire  
schijven

### Het leven van sterren

Hydrostatisch  
evenwicht  
Eigenschappen van  
sterren  
Sterren in groepen  
Het kleur-  
magnitudediagram  
Evoluerende sterren

### Het einde van sterren

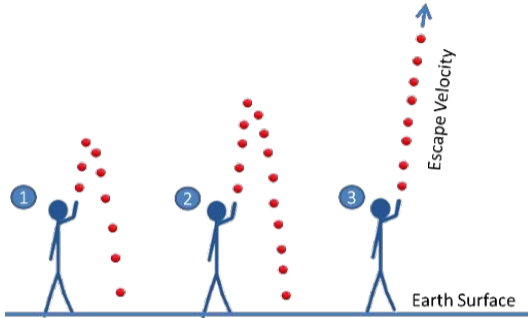
Het einde van lichte  
sterren  
Het einde van zware  
sterren  
Supernovae

### Dubbelsterren

Materie-overdracht  
Witte dwergen  
Zwarte gaten  
Gravitatiegolven

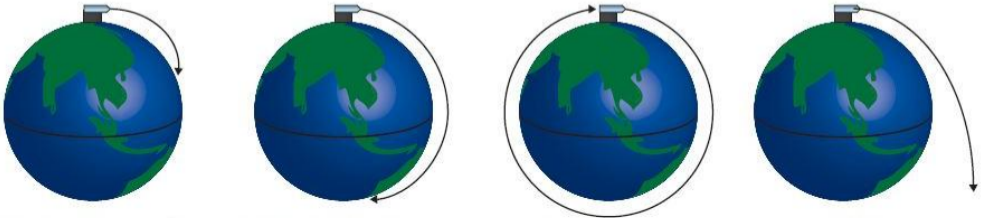
### Sterrenstof!

# Ontsnappingsnelheid op Aarde



40.300 km/u

11,2 km/s



De Zon

Stervorming

De Orionnevel

Protoplanetaire  
schijven

Het leven van  
sterren

Hydrostatisch  
evenwicht

Eigenschappen van  
sterren

Sterren in groepen

Het kleur-  
magnitudediagram

Evoluerende sterren

Het einde van  
sterren

Het einde van lichte  
sterren

Het einde van zware  
sterren

Supernovae

Dubbelsterren

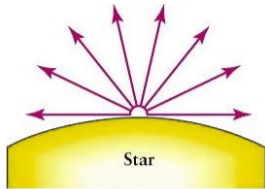
Materie-overdracht

Witte dwergen

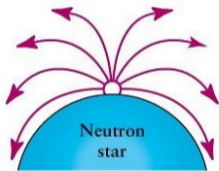
Zwarte gaten

Gravitatiegolven

Sterrenstof!



Zon: 618 km/s



Neutronenster: ~  
100.000 km/s



Zwart gat:  $> 300.000$  km/s  
→ meer dan de lichtsnelheid!

# Recept voor een zwart gat

Elk object dat voldoende wordt gecomprimeerd, wordt een zwart gat!



**Sun**



**Collapse to Black Hole  
3 kilometers across**



**Earth**



**Collapse to Black Hole  
1.5 centimeters across**

Sterren en  
sterevolutie

De Zon

Stervorming

De Orionnevel

Protoplanetaire  
schijven

Het leven van  
sterren

Hydrostatisch  
evenwicht

Eigenschappen van  
sterren

Sterren in groepen

Het kleur-  
magnitudediagram

Evoluerende sterren

Het einde van  
sterren

Het einde van lichte  
sterren

Het einde van zware  
sterren

Supernovae

Dubbelsterren

Materie-overdracht

Witte dwergen

Zwarte gaten

Gravitatiegolven

Sterrenstof!



# Licht in de buurt van een zwart gat

## Sterren en sterevolutie

### De Zon

### Stervorming

De Orionnevel  
Protoplanetaire  
schijven

### Het leven van sterren

Hydrostatisch  
evenwicht  
Eigenschappen van  
sterren  
Sterren in groepen  
Het kleur-  
magnitudediagram  
Evoluerende sterren

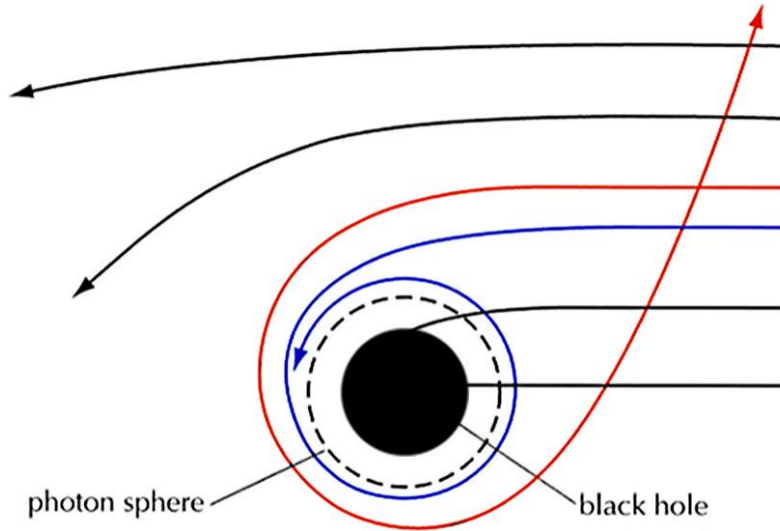
### Het einde van sterren

Het einde van lichte  
sterren  
Het einde van zware  
sterren  
Supernovae

### Dubbelsterren

Materie-overdracht  
Witte dwergen  
Zwarte gaten  
Gravitatiegolven

### Sterrenstof!



- **Niet waar:** een zwart gat zuigt *alles* in z'n omgeving op!
- **Wel waar:** materie dat in een zwart gat valt, komt er niet meer (in die vorm) uit.

## De Zon

## Stervorming

De Orionnevel  
Protoplanetaire  
schijven

## Het leven van sterren

Hydrostatisch  
evenwicht  
Eigenschappen van  
sterren  
Sterren in groepen  
Het kleur-  
magnitudediagram  
Evoluerende sterren

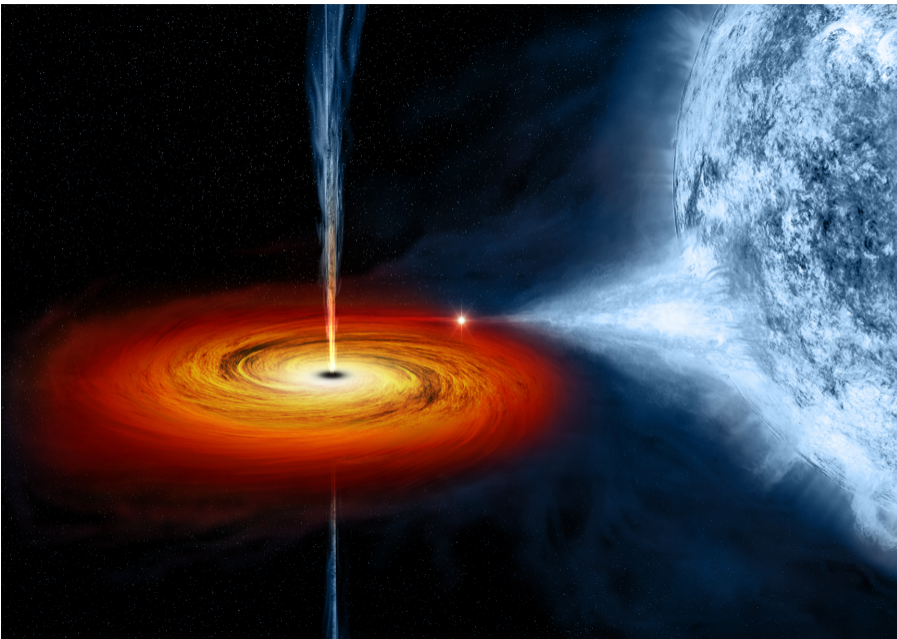
## Het einde van sterren

Het einde van lichte  
sterren  
Het einde van zware  
sterren  
Supernovae

## Dubbelsterren

Materie-overdracht  
Witte dwergen  
Zwarte gaten  
Gravitatiegolven

## Sterrenstof!



## De Zon

## Stervorming

De Orionnevel  
Protoplanetaire  
schijven

## Het leven van sterren

Hydrostatisch  
evenwicht  
Eigenschappen van  
sterren  
Sterren in groepen  
Het kleur-  
magnitudediagram  
Evoluerende sterren

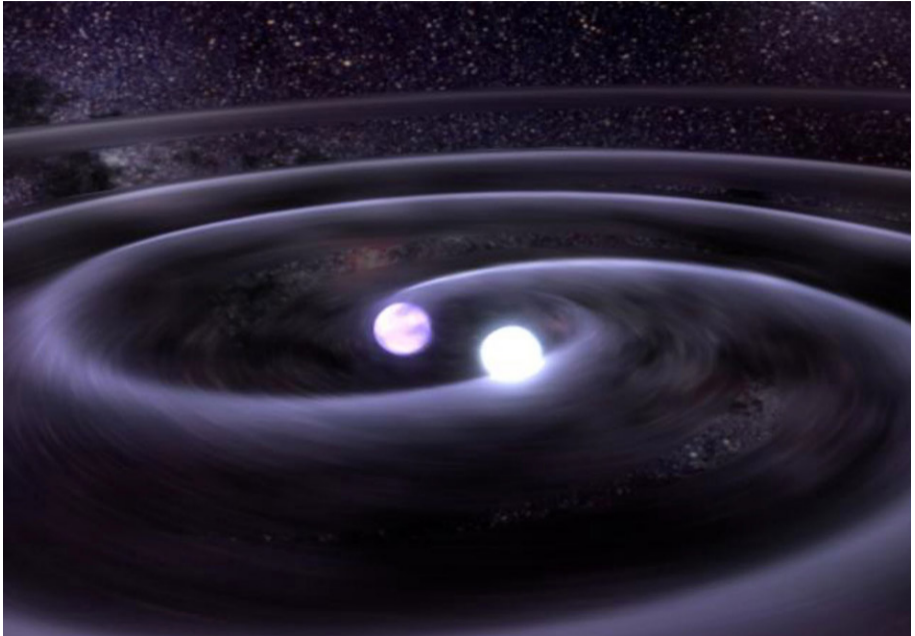
## Het einde van sterren

Het einde van lichte  
sterren  
Het einde van zware  
sterren  
Supernovae

## Dubbelsterren

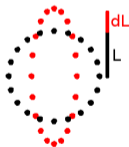
Materie-overdracht  
Witte dwergen  
Zwarte gaten  
Gravitatiegolven

## Sterrenstof!



## Gravitatiegolven...

- propageren transversaal met de lichtsnelheid
- zijn quadrupoolstraling in de eerste orde
- rekken en drukken de ruimte-tijd in twee polarisaties
- laten ons hun amplitude meten



- Strain:  $h(t) = h_+(t)F_+(t) + h_\times(t)F_\times(t) = \frac{\delta L(t)}{L} \sim 10^{-22}$

De Zon

Stervorming

De Orionnevel

Protoplanetaire  
schijven

Het leven van  
sterren

Hydrostatisch  
evenwicht

Eigenschappen van  
sterren

Sterren in groepen

Het kleur-  
magnitudediagram

Evoluerende sterren

Het einde van  
sterren

Het einde van lichte  
sterren

Het einde van zware  
sterren

Supernovae

Dubbelsterren

Materie-overdracht

Witte dwergen

Zwarte gaten

Gravitatiegolven

Sterrenstof!

## Sterren en sterevolutie

### De Zon

### Stervorming

De Orionnevel

Protoplanetaire schijven

### Het leven van sterren

Hydrostatisch evenwicht

Eigenschappen van sterren

Sterren in groepen

Het kleur-magnitudediagram

Evoluerende sterren

### Het einde van sterren

Het einde van lichte sterren

Het einde van zware sterren

Supernovae

### Dubbelsterren

Materie-overdracht

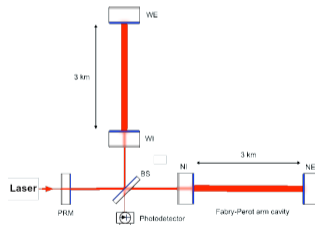
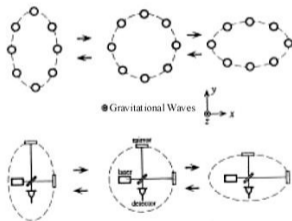
Witte dwergen

Zwarte gaten

Gravitationegolven

### Sterrenstof

# De Virgo-detector (Italië)



- LIGO Livingston, Louisiana (L1: 4 km)
- LIGO Hanford, Washington (H1: 4 km)
- Virgo: Pisa, Italië (V: 3 km)
- KAGRA: Japan (2023, 3 km)
- Indigo: India (2025+?, 4 km)

- Gevoeligheid  $\sim 10^{-22} = 0,000.000.000.000.001$  mm (1/1000e atoomkern) over 3–4 km = een glaasje water t.o.v. alle oceanen op Aarde!

LIGO en Virgo detecteren de laatste minuten of seconden van een dubbelster:

De Zon

Stervorming

De Orionnevel  
Protoplanetaire  
schijven

Het leven van  
sterren

Hydrostatisch  
evenwicht  
Eigenschappen van  
sterren  
Sterren in groepen  
Het kleur-  
magnitudediagram  
Evoluerende sterren

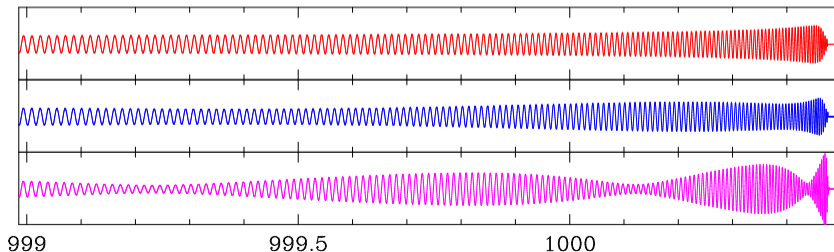
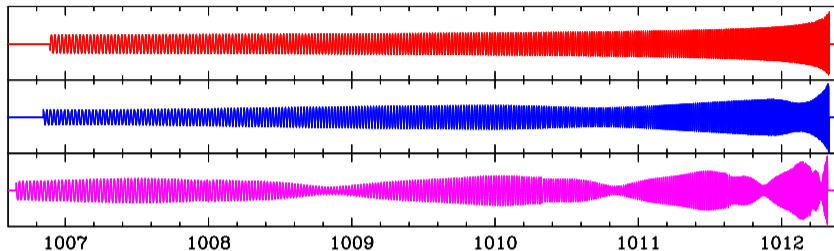
Het einde van  
sterren

Het einde van lichte  
sterren  
Het einde van zware  
sterren  
Supernovae

Dubbelsterren

Materie-overdracht  
Witte dwergen  
Zwarte gaten  
Gravitatiegolven

Sterrenstof!



$$a_{\text{spin}} \equiv S/M^2 = 0.0, 0.1 \text{ and } 0.5$$

# De eerste detectie: GW 150914

Sterren en  
sterevolutie

De Zon

Stervorming

De Orionnevel  
Protoplanetaire  
schijven

Het leven van  
sterren

Hydrostatisch  
evenwicht  
Eigenschappen van  
sterren  
Sterren in groepen  
Het kleur-  
magnitudediagram  
Evoluerende sterren

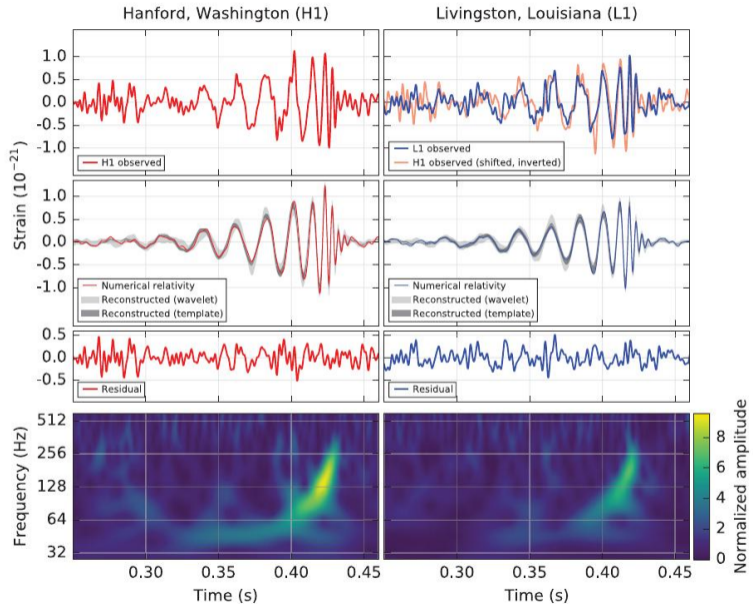
Het einde van  
sterren

Het einde van lichte  
sterren  
Het einde van zware  
sterren  
Supernovae

Dubbelsterren

Materie-overdracht  
Witte dwergen  
Zwarte gaten  
Gravitatiegolven

Sterrenstof!



Bron: [ligo.org](http://ligo.org)

## De Zon

## Stervorming

De Orionnevel  
Protoplanetaire  
schijven

## Het leven van sterren

Hydrostatisch  
evenwicht  
Eigenschappen van  
sterren  
Sterren in groepen  
Het kleur-  
magnitudediagram  
Evoluerende sterren

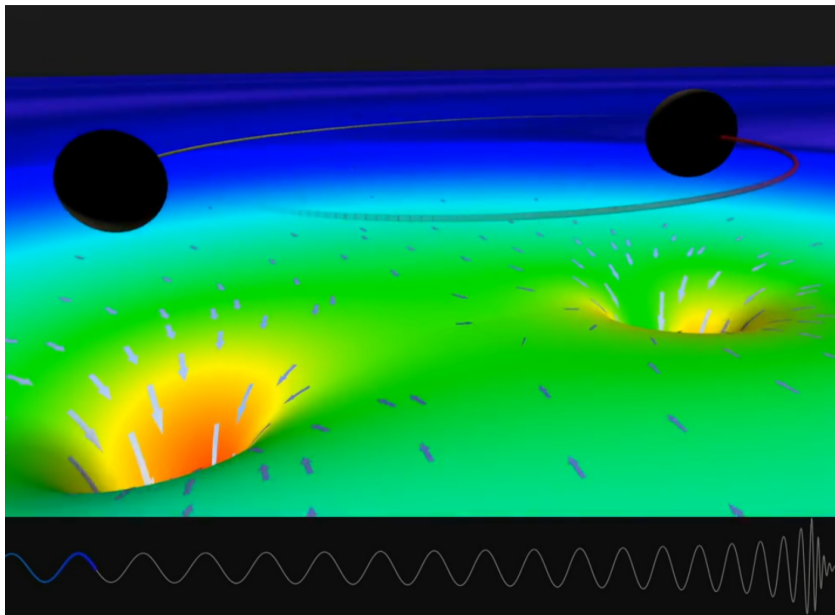
## Het einde van sterren

Het einde van lichte  
sterren  
Het einde van zware  
sterren  
Supernovae

## Dubbelsterren

Materie-overdracht  
Witte dwergen  
Zwarte gaten  
Gravitatiegolven

## Sterrenstof!





# Waargenomen kosmische signalen

## Sterren en sterevolutie

### De Zon

### Stervorming

De Orionnevel  
Protoplanetaire  
schijven

### Het leven van sterren

Hydrostatisch  
evenwicht  
Eigenschappen van  
sterren  
Sterren in groepen  
Het kleur-  
magnitudediagram  
Evoluerende sterren

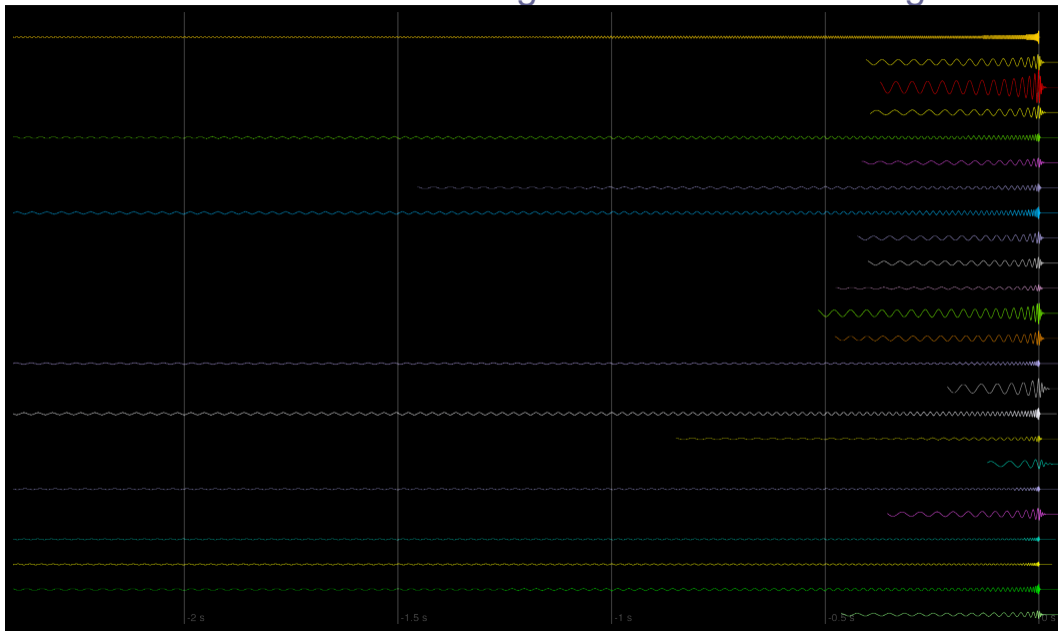
### Het einde van sterren

Het einde van lichte  
sterren  
Het einde van zware  
sterren  
Supernovae

### Dubbelsterren

Materie-overdracht  
Witte dwergen  
Zwarte gaten  
Gravitatiegolven

### Sterrenstof!



## Sterren en sterrevolutie

### De Zon

### Stervorming

### De Orionnevel

### Protoplanetaire schijven

### Het leven van sterren

### Hydrostatisch evenwicht

### Eigenschappen van sterren

### Sterren in groepen

### Het kleur-magnitudediagram

### Evoluerende sterren

### Het einde van sterren

### Het einde van lichte sterren

### Het einde van zware sterren

### Supernovae

### Dubbelsterren

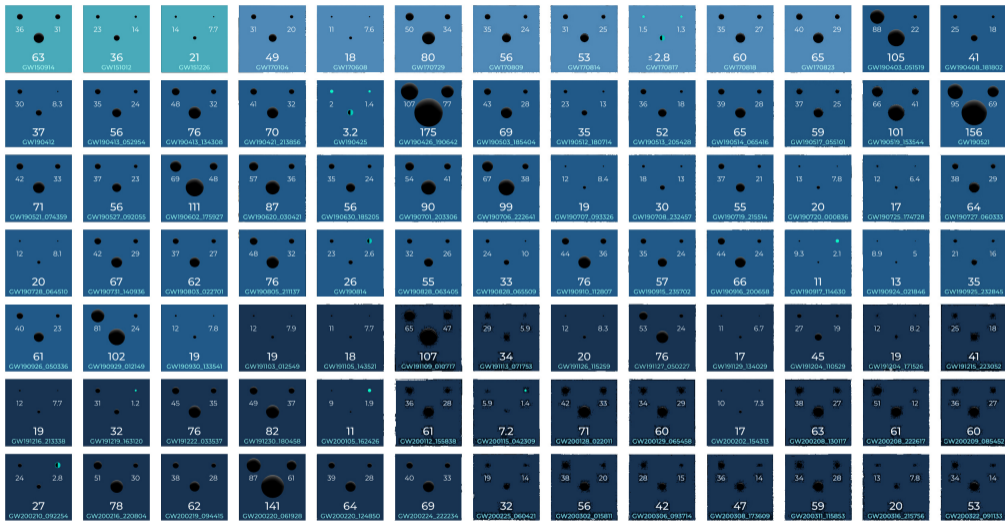
### Materie-overdracht

### Witte dwergen

### Zwarte gaten

### Gravitielgolven

### Sterrenstof



Bron: [www.ligo.caltech.edu](http://www.ligo.caltech.edu)

## Sterren en sterevolutie

### De Zon

### Sterrvorming

De Orionnevel  
Protoplanetaire  
schijven

### Het leven van sterren

Hydrostatisch  
evenwicht  
Eigenschappen van  
sterren  
Sterren in groepen  
Het kleur-  
magnitudediagram  
Evoluerende sterren

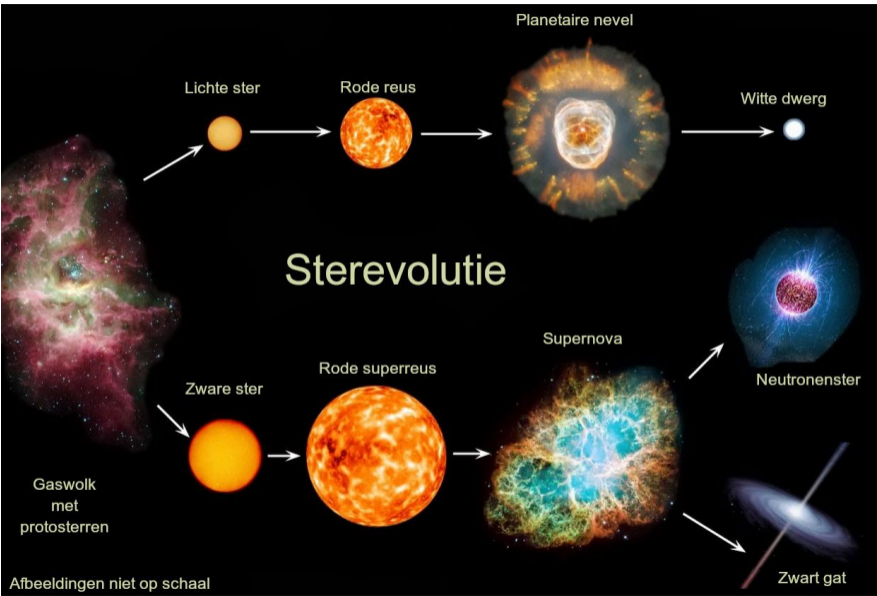
### Het einde van sterren

Het einde van lichte  
sterren  
Het einde van zware  
sterren  
Supernovae

### Dubbelsterren

Materie-overdracht  
Witte dwergen  
Zwarte gaten  
Gravitatiegolven

### Sterrenstof!



# Wij zijn gemaakt uit sterrenstof!

## Sterren en stervolutie

### De Zon

### Stervorming

De Orionnevel  
Protoplanetaire  
schijven

### Het leven van sterren

Hydrostatisch  
evenwicht  
Eigenschappen van  
sterren  
Sterren in groepen  
Het kleur-  
magnitudediagram  
Evoluerende sterren

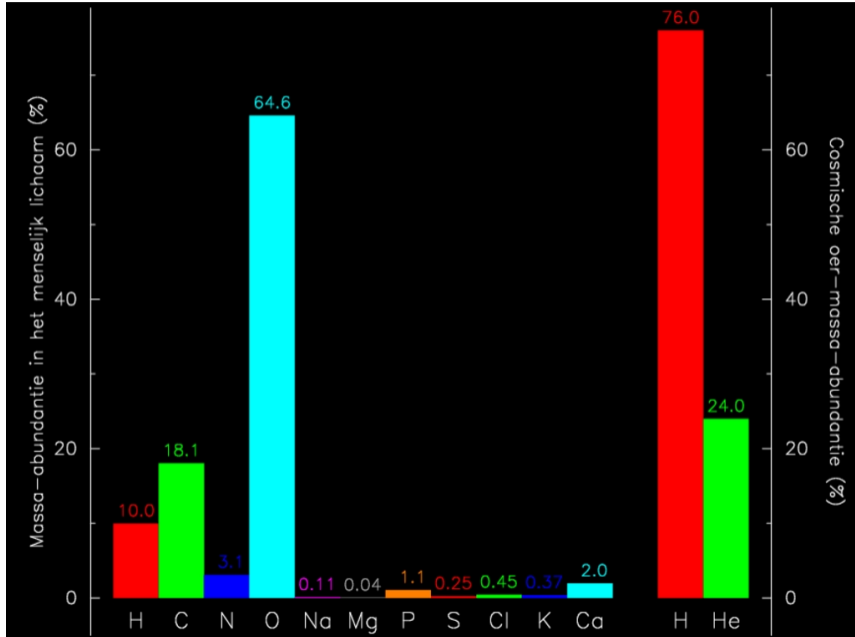
### Het einde van sterren

Het einde van lichte  
sterren  
Het einde van zware  
sterren  
Supernovae

### Dubbelsterren

Materie-overdracht  
Witte dwergen  
Zwarte gaten  
Gravitatiegolven

### Sterrenstof!



De Zon

Stervorming

De Orionnevel

Protoplanetaire  
schijven

Het leven van  
sterren

Hydrostatisch  
evenwicht

Eigenschappen van  
sterren

Sterren in groepen

Het kleur-  
magnitudediagram

Evoluerende sterren

Het einde van  
sterren

Het einde van lichte  
sterren

Het einde van zware  
sterren

Supernovae

Dubbelsterren

Materie-overdracht

Witte dwergen

Zwarte gaten

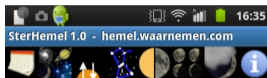
Gravitatiegolven

Sterrenstof!



<https://hemel.waarnemen.com>

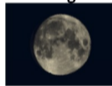
- Actuele, eenvoudig en lastiger waar te nemen hemelverschijnselen
- Zichtbaarheid van Zon, Maan, planeten, meteoren, kometen, deepsky, ISS, ...
- Astrokalenders, hemelkaarten, maanfasen, hemel vannacht, waarneemweer, tabellen
- Apps (Android/Apple), Facebook, Twitter
- ~ **10 000 pagina's**; **Geen reclame**
- ~ **1–2 miljoen** bezoekers per jaar



hemel.waarnemen.com  
astrokalender

*Tijdstippen zijn in Midden-Europese  
zomertijd (MEZT)*

**maandag 19 augustus**



**03.26: De Maan** is in het punt van zijn baan dat het dichtst bij de Aarde ligt: het **perigeum**. De afstand tussen de Aarde en de Maan bedraagt 362264 km. De **schijnbare diameter** van de Maan is groter dan gemiddeld (32'59,1"), door de kleinere afstand. De Maan is op dit moment **wassend**, voor 94% verlicht en hij is vrijwel de gehele nacht zichtbaar; 's avonds in het (zuid)oosten en tegen de ochtend in het westen of

Deze lezing en links op <https://hemel.waarnemen.com/cursus>