Hoe kunnen we zwarte gaten ‘horen’?

Marc van der Sluys
Nikhef, Universiteit Utrecht, LIGO/Virgo
hemel.waarnemen.com

Inhoud

Sterevolutie
Sterren
Lichte sterren
Zware sterren
Supernova's
Zwarte gaten
Ontsnappingssnelheid
Licht bij een zw. gat
Zwaartekrachtlenzen
Dubbelsterren
Dubbelsterren
Materie-overdracht
Hoe detecteren we zwarte gaten?
Zwaartekrachtsgolven
LIGO/Virgo
Michelson interferometer
Waarnemingen
GW 150914
GW 170817
Gammaflitsers
Meer detecties
De toekomst
Global GW-detector network
Einstein Telescope
LISA

1. Sterevolutie
   - Sterren
   - Evolutie van lichte sterren
   - Evolutie van zware sterren
   - Supernova's
2. Zwarte gaten
   - Ontsnappingssnelheid
   - Licht bij een zwart gat
   - Zwaartekrachtlenzen
3. Dubbelsterevolutie en materie-overdracht
   - Dubbelsterren
   - Materie-overdracht
4. Hoe detecteren we zwarte gaten?
   - Zwaartekrachtsgolven
   - LIGO/Virgo
   - Michelson interferometer
5. Waarnemingen
   - GW 150914
   - GW 170817
   - Gammaflitsers
   - Meer detecties
6. De toekomst
   - Global GW-detector network
   - Einstein Telescope
   - LISA

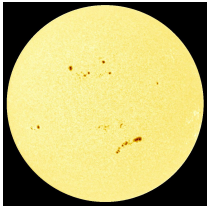
Inhoud

Sterevolutie
Sterren
Lichte sterren
Zware sterren
Supernova's
Zwarte gaten
Ontsnappingssnelheid
Licht bij een zw. gat
Zwaartekrachtlenzen
Dubbelsterren
Dubbelsterren
Materie-overdracht
Hoe detecteren we zwarte gaten?
Zwaartekrachtsgolven
LIGO/Virgo
Michelson interferometer
Waarnemingen
GW 150914
GW 170817
Gammaflitsers
Meer detecties
De toekomst
Global GW-detector network
Einstein Telescope
LISA

1. Sterevolutie
   - Sterren
   - Evolutie van lichte sterren
   - Evolutie van zware sterren
   - Supernova's
2. Zwarte gaten
   - Ontsnappingssnelheid
   - Licht bij een zwart gat
   - Zwaartekrachtlenzen
3. Dubbelsterevolutie en materie-overdracht
   - Dubbelsterren
   - Materie-overdracht
4. Hoe detecteren we zwarte gaten?
   - Zwaartekrachtsgolven
   - LIGO/Virgo
   - Michelson interferometer
5. Waarnemingen
   - GW 150914
   - GW 170817
   - Gammaflitsers
   - Meer detecties
6. De toekomst
   - Global GW-detector network
   - Einstein Telescope
   - LISA

De Zon

Sterevolutie
Sterren
Lichte sterren
Zware sterren
Supernova's
Zwarte gaten
Ontsnappingssnelheid
Licht bij een zw. gat
Zwaartekrachtlenzen
Dubbelsterren
Dubbelsterren
Materie-overdracht
Hoe detecteren we zwarte gaten?
Zwaartekrachtsgolven
LIGO/Virgo
Michelson interferometer
Waarnemingen
GW 150914
GW 170817
Gammaflitsers
Meer detecties
De toekomst
Global GW-detector network
Einstein Telescope
LISA



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^3	$0{,}26\, \bar{\rho}_\oplus$
Lichtkracht	$L_\odot$	$3{,}85 \times 10^{26}$ W	$\sim 3 \times 10^9$ "$L_\oplus$"
Temperatuur:			
Oppervlak	$T_{\mathrm{opp},\odot}$	5500°C	15°C
Centrum	$T_{\mathrm{c},\odot}$	$\sim 16 \times 10^6$ °C	~ 7000°C

Opbouw van de Zon

Sterevolutie
- **Sterren**
- Lichte sterren
- Zware sterren
- Supernova's

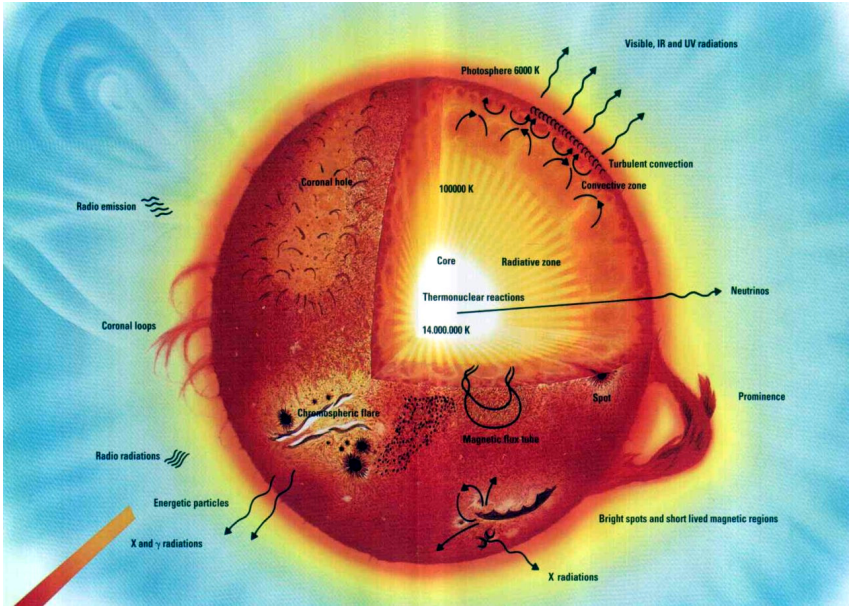
Zwarte gaten
- Ontsnappingssnelheid
- Licht bij een zw. gat
- Zwaartekrachtlenzen

Dubbelsterren
- Dubbelsterren
- Materie-overdracht

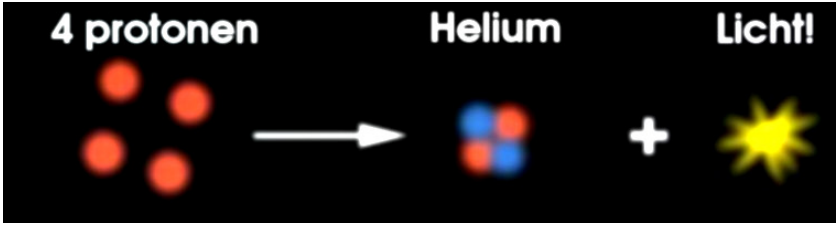
Hoe detecteren we zwarte gaten?
- Zwaartekrachtsgolven
- LIGO/Virgo
- Michelson interferometer

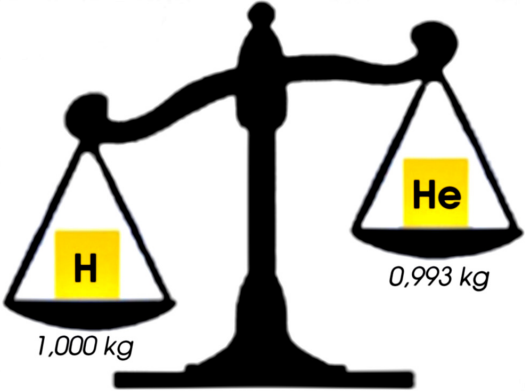
Waarnemingen
- GW 150914
- GW 170817
- Gammaflitsers
- Meer detecties

De toekomst
- Global GW-detector network
- Einstein Telescope
- LISA



Waterstoffusie





Sterevolutie
- Sterren
- Lichte sterren
- Zware sterren
- Supernova's

Zwarte gaten
- Ontsnappingssnelheid
- Licht bij een zw. gat
- Zwaartekrachtlenzen

Dubbelsterren
- Dubbelsterren
- Materie-overdracht

Hoe detecteren we zwarte gaten?
- Zwaartekrachtsgolven
- LIGO/Virgo
- Michelson interferometer

Waarnemingen
- GW 150914
- GW 170817
- Gammaflitsers
- Meer detecties

De toekomst
- Global GW-detector network
- Einstein Telescope
- LISA

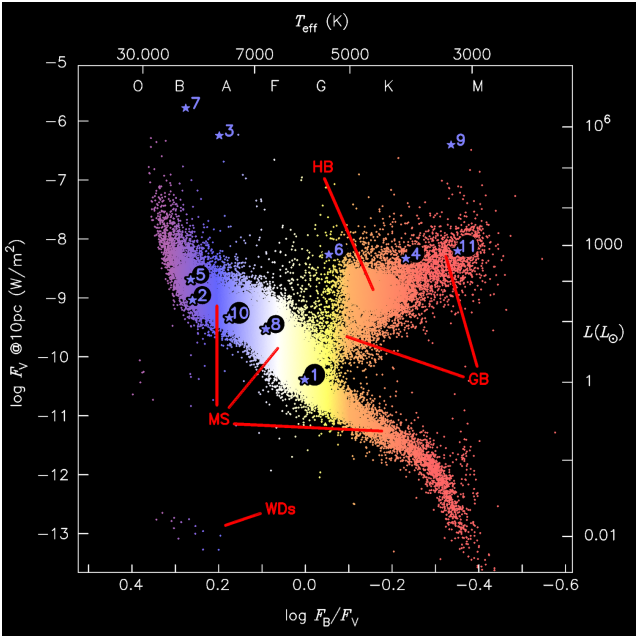
Eigenschappen van hoofdreekssterren

M ($M_\odot$)	t (Mjr)	R ($R_\odot$)	L ($L_\odot$)	T_o (°C)	T_c (miljn °C)	Aantal (t.o.v. 1 $M_\odot$)
0,5	52 600	0,50	0,05	4138	9,8	7,07
0,8	11 600	0,79	0,38	5380	13,4	2,34
1,0	4900	1,01	1,05	6080	15,9	1,00
1,5	1660	1,95	6,75	6930	20,9	0,131
2,0	582	2,23	20,4	8500	22,5	0,0232
2,5	405	2,80	57,8	9800	24,1	0,009 59
3,0	246	3,09	120	11 100	25,2	0,003 80
5,0	70,6	4,19	895	15 700	28,6	0,000 327
10,0	12,7	5,74	8590	23 500	32,8	0,000 011 6
20,0	5,18	8,78	67 900	31 700	37,0	0,000 000 93
50,0	2,41	15,9	527 000	39 300	41,4	0,000 000 05

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

Bron: Van der Sluys (2006)

Hipparcos-catalogus

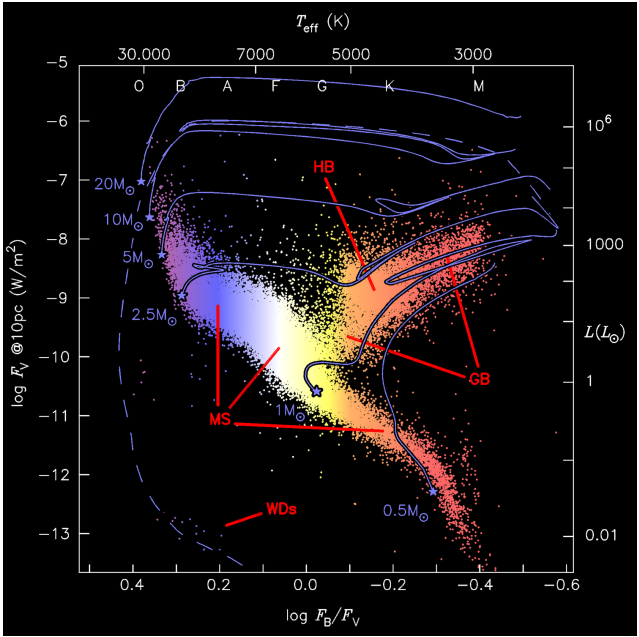


- 48 495 nabije sterren uit de Hipparcos-catalogus:
  - $\frac{\Delta d}{d} < 20\%$
  - $\Delta(F_B/F_V) < 0.1$ m

1. Zon
2. Sirius
3. Canopus
4. Arcturus
5. Wega
6. Capella
7. Rigel
8. Procyon
9. Betelgeuse
10. Altair
11. Aldebaran

Bron: Van der Sluys (2006) — Bron data: ESA

Hipparcos-catalogus



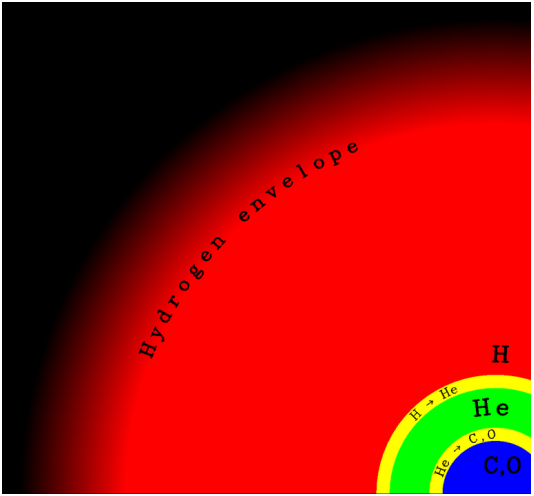
- 48 495 nabije sterren uit de Hipparcos-catalogus:
  - $\frac{\Delta d}{d} < 20\%$
  - $\Delta(F_B/F_V) < 0.1$ m

1. Evolutiesporen
2. $0.5\,M_\odot - 20\,M_\odot$

Bron: Van der Sluys (2006) — Bron data: ESA

Sterevolutie
Sterren
Lichte sterren
Zware sterren
Supernova's
Zwarte gaten
Ontsnappingssnelheid
Licht bij een zw. gat
Zwaartekrachtlenzen
Dubbelsterren
Dubbelsterren
Materie-overdracht
Hoe detecteren we zwarte gaten?
Zwaartekrachtsgolven
LIGO/Virgo
Michelson interferometer
Waarnemingen
GW 150914
GW 170817
Gammaflitsers
Meer detecties
De toekomst
Global GW-detector network
Einstein Telescope
LISA

Evolutie van een ster van 1 zonsmassa

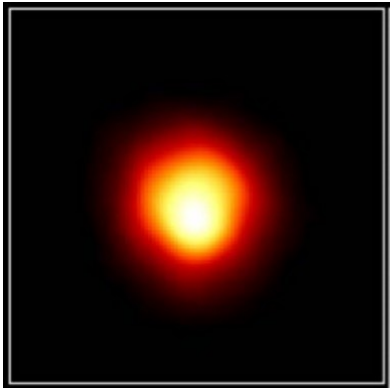


Fase:	Temperatuur:	Tijdschaal:	Reacties:
Waterstoffusie	$T \gtrsim 7$ miljoen°C,	$\tau \approx 7 + 4$ miljard jaar	$4H \rightarrow He$
Heliumfusie	$T \gtrsim 200$ miljoen°C,	$\tau \approx 200 + 25$ miljoen jaar	$3He \rightarrow C$, $C + He \rightarrow O$

Bron: Van der Sluys (2006)

Rode reuzen: Betelgeuze

Sterevolutie
Sterren
Lichte sterren
Zware sterren
Supernova's
Zwarte gaten
Ontsnappingssnelheid
Licht bij een zw. gat
Zwaartekrachtlenzen
Dubbelsterren
Dubbelsterren
Materie-overdracht
Hoe detecteren we zwarte gaten?
Zwaartekrachtsgolven
LIGO/Virgo
Michelson interferometer
Waarnemingen
GW 150914
GW 170817
Gammaflitsers
Meer detecties
De toekomst
Global GW-detector network
Einstein Telescope
LISA



Planetaire nevels

Sterevolutie
- Sterren
- **Lichte sterren**
- Zware sterren
- Supernova's

Zwarte gaten
- Ontsnappingssnelheid
- Licht bij een zw. gat
- Zwaartekrachtlenzen

Dubbelsterren
- Dubbelsterren
- Materie-overdracht

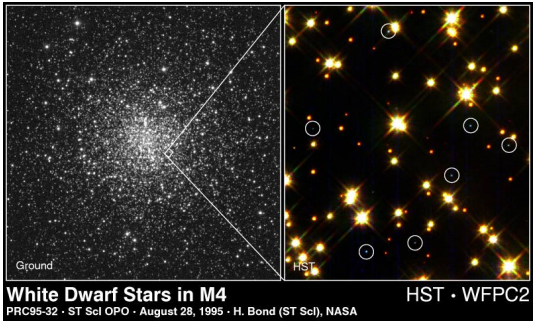
Hoe detecteren we zwarte gaten?
- Zwaartekrachtsgolven
- LIGO/Virgo
- Michelson interferometer

Waarnemingen
- GW 150914
- GW 170817
- Gammaflitsers
- Meer detecties

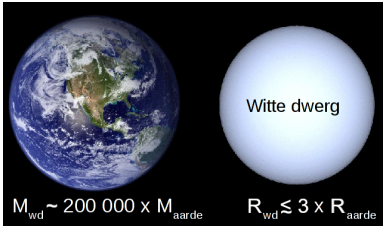
De toekomst
- Global GW-detector network
- Einstein Telescope
- LISA

Butterfly nebula (HST/NASA)

Witte dwergen



Bron: HST/NASA (1995)



- Sterren met $M \lesssim 8 - 10\, M_\odot$ — $>$ 90% van alle sterren — worden WD-en
- WD-en bestaan meestal uit He of C+O
- Dichtheid van een WD $\sim$ 1 miljoen keer die van water
- $M_{\rm wd} \lesssim 1.4\, M_\odot$; $\langle M_{\rm wd} \rangle \approx 0.6\, M_\odot$
- $L_{\rm wd} \lesssim 0.001\, L_\odot$

Evoluerende zware sterren

Sterevolutie
- Sterren
- Lichte sterren
- **Zware sterren**
- Supernova's

Zwarte gaten
- Ontsnappingssnelheid
- Licht bij een zw. gat
- Zwaartekrachtlenzen

Dubbelsterren
- Dubbelsterren
- Materie-overdracht

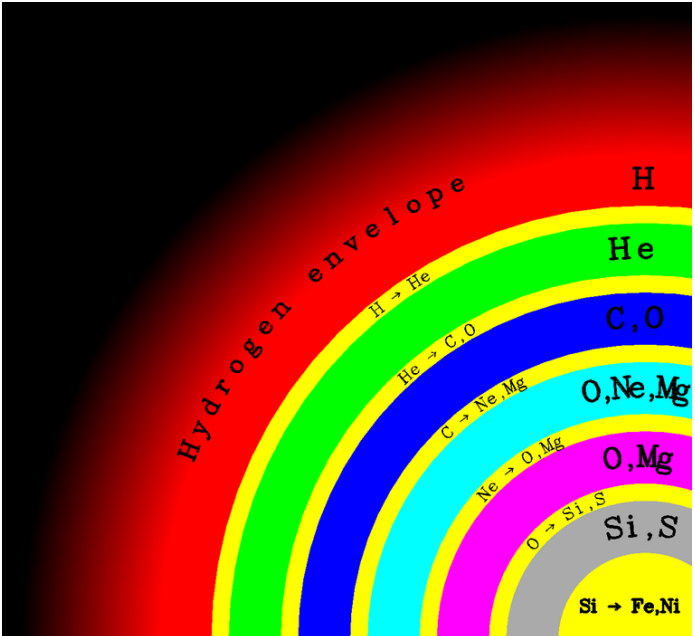
Hoe detecteren we zwarte gaten?
- Zwaartekrachtsgolven
- LIGO/Virgo
- Michelson interferometer

Waarnemingen
- GW 150914
- GW 170817
- Gammaflitsers
- Meer detecties

De toekomst
- Global GW-detector network
- Einstein Telescope
- LISA

Bron: JWST: NASA/ESA/CSA

Uienschil-structuur voor zware sterren



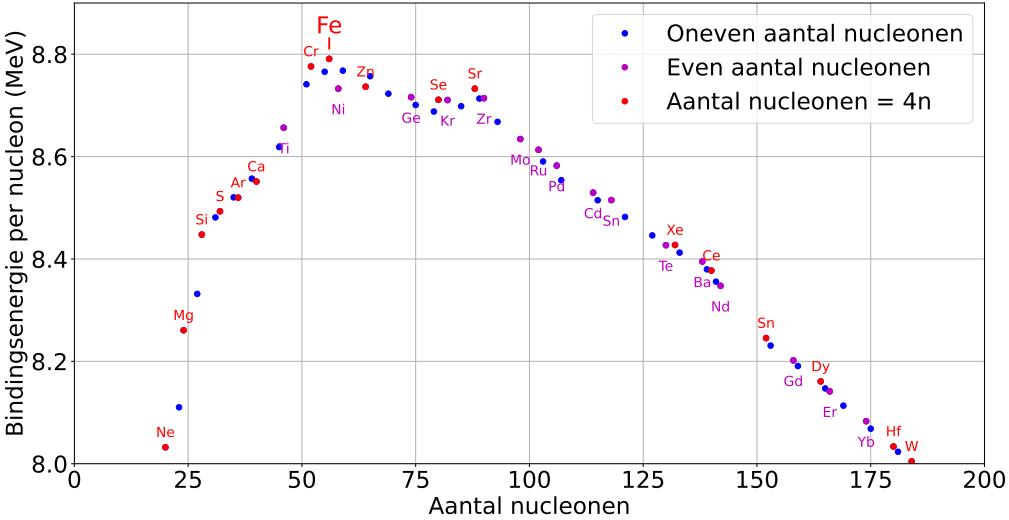
Bron: Van der Sluys (2006)

Fusiestadia voor een 10 $M_\odot$-ster

Sterevolutie
Sterren
Lichte sterren
Zware sterren
Supernova's
Zwarte gaten
Ontsnappingssnelheid
Licht bij een zw. gat
Zwaartekrachtlenzen
Dubbelsterren
Dubbelsterren
Materie-overdracht
Hoe detecteren we zwarte gaten?
Zwaartekrachtsgolven
LIGO/Virgo
Michelson interferometer
Waarnemingen
GW 150914
GW 170817
Gammaflitsers
Meer detecties
De toekomst
Global GW-detector network
Einstein Telescope
LISA

Fase	Nettoreacties	T (K)	τ
Waterstoffusie	$H \rightarrow He$	$> 7 \times 10^6$	10 Mjr
Heliumfusie	$He \rightarrow C,O$	$> 2 \times 10^8$	1 Mjr
Koolstoffusie	$C \rightarrow Ne,Mg$	$> 8 \times 10^8$	1 kjr
Neonfusie	$Ne \rightarrow O,Mg$	$> 1.5 \times 10^9$	1 maand
Zuurstoffusie	$O \rightarrow Si,S$	$> 2 \times 10^9$	2 jaar
Siliciumfusie	$Si \rightarrow Fe,Ni$	$> 3.3 \times 10^9$	3 dagen

Bindingsenergie van nucleonen in een atoomkern

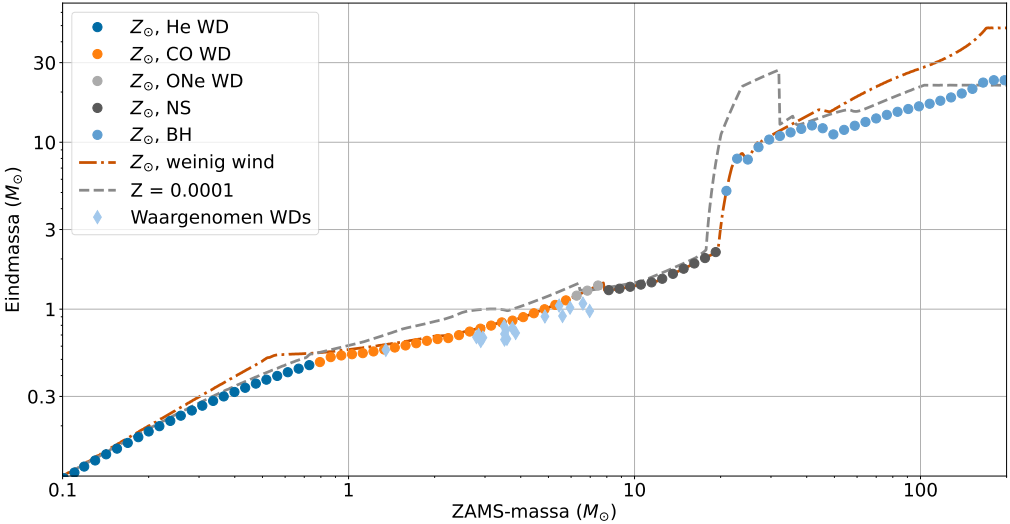


- IJzer (^{56}Fe) heeft de grootste bindingsenergie per nucleon
- Verdere fusie **kost** energie

Supernova

VLT/ESO

Relatie tussen ZAMS-massa en eindmassa (H 8.4)



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

Inhoud

Sterevolutie
Sterren
Lichte sterren
Zware sterren
Supernova's
Zwarte gaten
Ontsnappingssnelheid
Licht bij een zw. gat
Zwaartekrachtlenzen
Dubbelsterren
Dubbelsterren
Materie-overdracht
Hoe detecteren we zwarte gaten?
Zwaartekrachtsgolven
LIGO/Virgo
Michelson interferometer
Waarnemingen
GW 150914
GW 170817
Gammaflitsers
Meer detecties
De toekomst
Global GW-detector network
Einstein Telescope
LISA

1 Sterevolutie
- Sterren
- Evolutie van lichte sterren
- Evolutie van zware sterren
- Supernova's

2 Zwarte gaten
- Ontsnappingssnelheid
- Licht bij een zwart gat
- Zwaartekrachtlenzen

3 Dubbelsterevolutie en materie-overdracht
- Dubbelsterren
- Materie-overdracht

4 Hoe detecteren we zwarte gaten?
- Zwaartekrachtsgolven
- LIGO/Virgo
- Michelson interferometer

5 Waarnemingen
- GW 150914
- GW 170817
- Gammaflitsers
- Meer detecties

6 De toekomst
- Global GW-detector network
- Einstein Telescope
- LISA

Ontsnappingssnelheid op Aarde

Hoe kunnen we zwarte gaten 'horen'?

Sterevolutie
- Sterren
- Lichte sterren
- Zware sterren
- Supernova's

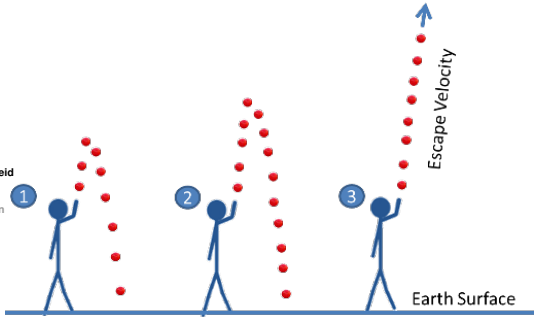
Zwarte gaten
- **Ontsnappingssnelheid**
- Licht bij een zw. gat
- Zwaartekrachtlenzen

Dubbelsterren
- Dubbelsterren
- Materie-overdracht

Hoe detecteren we zwarte gaten?
- Zwaartekrachtsgolven
- LIGO/Virgo
- Michelson interferometer

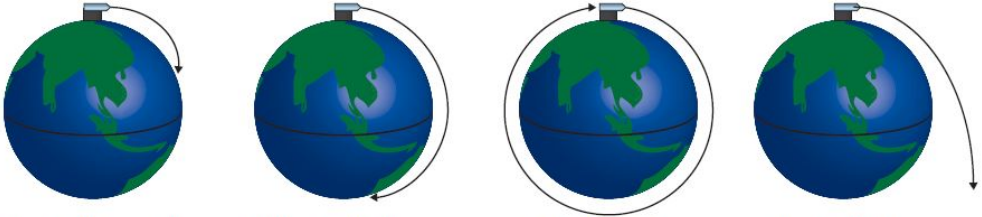
Waarnemingen
- GW 150914
- GW 170817
- Gammaflitsers
- Meer detecties

De toekomst
- Global GW-detector network
- Einstein Telescope
- LISA



$$v_{esc} \approx 40.300 \text{ km/u}$$

$$11{,}2 \text{ km/s}$$



Hoe kunnen we zwarte gaten 'horen'?

Sterevolutie
- Sterren
- Lichte sterren
- Zware sterren
- Supernova's

Zwarte gaten
- **Ontsnappingssnelheid**
- Licht bij een zw. gat
- Zwaartekrachtlenzen

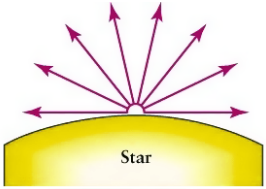
Dubbelsterren
- Dubbelsterren
- Materie-overdracht

Hoe detecteren we zwarte gaten?
- Zwaartekrachtsgolven
- LIGO/Virgo
- Michelson interferometer

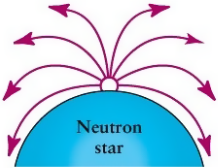
Waarnemingen
- GW 150914
- GW 170817
- Gammaflitsers
- Meer detecties

De toekomst
- Global GW-detector network
- Einstein Telescope
- LISA

Ontsnappingssnelheid op sterren



Zon: $R \sim 700\,000\,\mathrm{km}$;
$v_{\mathrm{esc}} \approx 618\,\mathrm{km/s}$
$R_{\mathrm{s}} \sim 3\,\mathrm{km}$



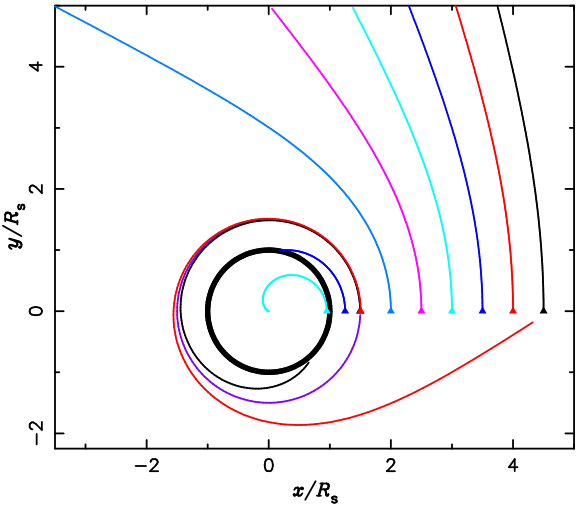
Neutronenster: $R \sim 12\,\mathrm{km}$; $v_{\mathrm{esc}} \sim 100.000\,\mathrm{km/s}$

Zwart gat: $v_{\mathrm{esc}} > 300.000\,\mathrm{km/s}$
$\rightarrow$ meer dan de lichtsnelheid!

$$R_{\mathrm{s}} = \frac{2GM}{c^2}$$

Sterevolutie
Sterren
Lichte sterren
Zware sterren
Supernova's
Zwarte gaten
Ontsnappingssnelheid
Licht bij een zw. gat
Zwaartekrachtlenzen
Dubbelsterren
Dubbelsterren
Materie-overdracht
Hoe detecteren we zwarte gaten?
Zwaartekrachtsgolven
LIGO/Virgo
Michelson interferometer
Waarnemingen
GW 150914
GW 170817
Gammaflitsers
Meer detecties
De toekomst
Global GW-detector network
Einstein Telescope
LISA

Licht in de buurt van een zwart gat



Bron: Verbunt: Het leven van sterren

- **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.

Zwart gat als zwaartekrachtlens

Sterevolutie
- Sterren
- Lichte sterren
- Zware sterren
- Supernova's

Zwarte gaten
- Ontsnappingssnelheid
- Licht bij een zw. gat
- **Zwaartekrachtlenzen**

Dubbelsterren
- Dubbelsterren
- Materie-overdracht

Hoe detecteren we zwarte gaten?
- Zwaartekrachtsgolven
- LIGO/Virgo
- Michelson interferometer

Waarnemingen
- GW 150914
- GW 170817
- Gammaflitsers
- Meer detecties

De toekomst
- Global GW-detector network
- Einstein Telescope
- LISA

Bron: Nick Priore (2011)

Inhoud

Sterevolutie
Sterren
Lichte sterren
Zware sterren
Supernova's
Zwarte gaten
Ontsnappingssnelheid
Licht bij een zw. gat
Zwaartekrachtlenzen
Dubbelsterren
Dubbelsterren
Materie-overdracht
Hoe detecteren we zwarte gaten?
Zwaartekrachtsgolven
LIGO/Virgo
Michelson interferometer
Waarnemingen
GW 150914
GW 170817
Gammaflitsers
Meer detecties
De toekomst
Global GW-detector network
Einstein Telescope
LISA

1 Sterevolutie
- Sterren
- Evolutie van lichte sterren
- Evolutie van zware sterren
- Supernova's

2 Zwarte gaten
- Ontsnappingssnelheid
- Licht bij een zwart gat
- Zwaartekrachtlenzen

3 Dubbelsterevolutie en materie-overdracht
- Dubbelsterren
- Materie-overdracht

4 Hoe detecteren we zwarte gaten?
- Zwaartekrachtsgolven
- LIGO/Virgo
- Michelson interferometer

5 Waarnemingen
- GW 150914
- GW 170817
- Gammaflitsers
- Meer detecties

6 De toekomst
- Global GW-detector network
- Einstein Telescope
- LISA

Overzicht sterevolutie

Sterevolutie
- Sterren
- Lichte sterren
- Zware sterren
- Supernova's

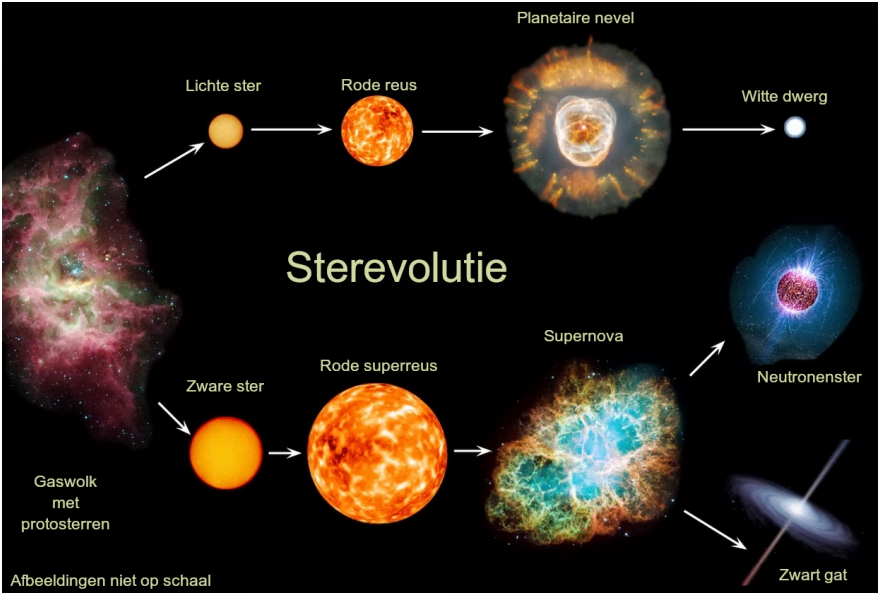
Zwarte gaten
- Ontsnappingssnelheid
- Licht bij een zw. gat
- Zwaartekrachtlenzen

Dubbelsterren
- **Dubbelsterren**
- Materie-overdracht

Hoe detecteren we zwarte gaten?
- Zwaartekrachtsgolven
- LIGO/Virgo
- Michelson interferometer

Waarnemingen
- GW 150914
- GW 170817
- Gammaflitsers
- Meer detecties

De toekomst
- Global GW-detector network
- Einstein Telescope
- LISA



Dubbelsterren: Albireo

Sterevolutie
- Sterren
- Lichte sterren
- Zware sterren
- Supernova's

Zwarte gaten
- Ontsnappingssnelheid
- Licht bij een zw. gat
- Zwaartekrachtlenzen

Dubbelsterren
- **Dubbelsterren**
- Materie-overdracht

Hoe detecteren we zwarte gaten?
- Zwaartekrachtsgolven
- LIGO/Virgo
- Michelson interferometer

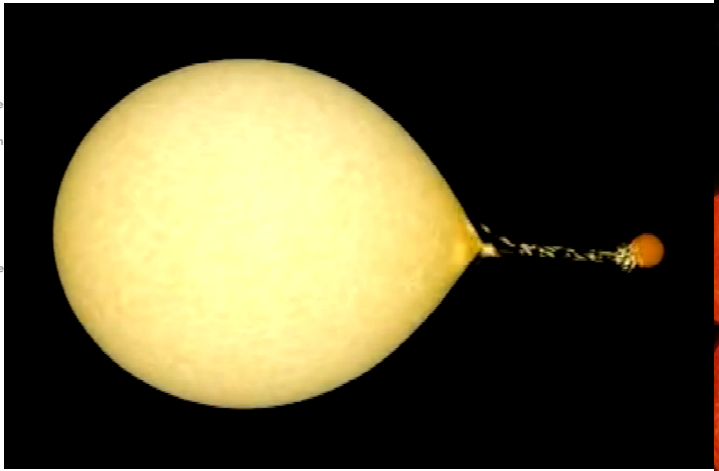
Waarnemingen
- GW 150914
- GW 170817
- Gammaflitsers
- Meer detecties

De toekomst
- Global GW-detector network
- Einstein Telescope
- LISA

Materie-overdracht

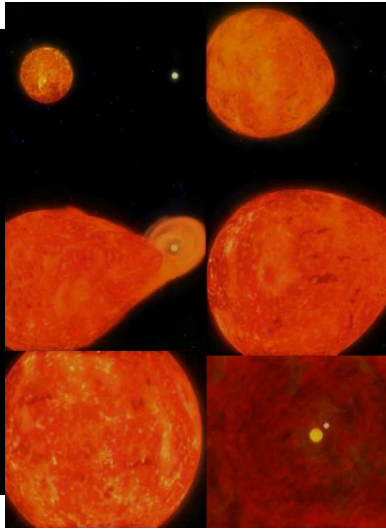
Sterevolutie
Sterren
Lichte sterren
Zware sterren
Supernova's
Zwarte gaten
Ontsnappingssnelhe
Licht bij een zw. gat
Zwaartekrachtlenzen
Dubbelsterren
Dubbelsterren
Materie-overdracht
Hoe detecteren we zwarte gaten?
Zwaartekrachtsgolve
LIGO/Virgo
Michelson interferometer
Waarnemingen
GW 150914
GW 170817
Gammaflitsers
Meer detecties
De toekomst
Global GW-detector network
Einstein Telescope
LISA

Stabiele materie-overdracht



Bron: Van der Sluys (2006)

Common envelope



Hoe kunnen we zwarte gaten 'horen'?

Sterevolutie
- Sterren
- Lichte sterren
- Zware sterren
- Supernova's

Zwarte gaten
- Ontsnappingssnelheid
- Licht bij een zw. gat
- Zwaartekrachtlenzen

Dubbelsterren
- Dubbelsterren
- **Materie-overdracht**

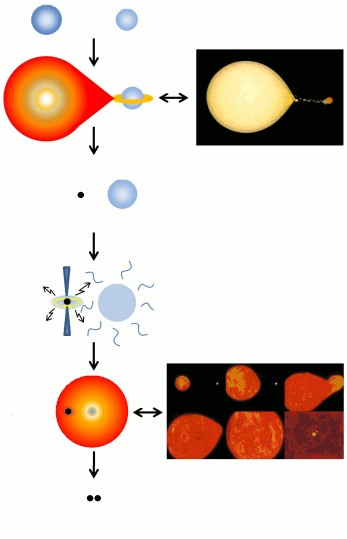
Hoe detecteren we zwarte gaten?
- Zwaartekrachtsgolven
- LIGO/Virgo
- Michelson interferometer

Waarnemingen
- GW 150914
- GW 170817
- Gammaflitsers
- Meer detecties

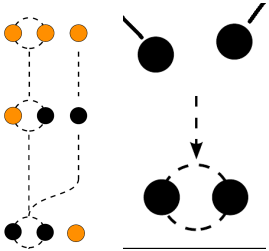
De toekomst
- Global GW-detector network
- Einstein Telescope
- LISA

Dubbele neurtronensterren/zwarte gaten

Uit dubbelster



Cluster: uit dubbelster en ster



Sterevolutie
- Sterren
- Lichte sterren
- Zware sterren
- Supernova's

Zwarte gaten
- Ontsnappingssnelheid
- Licht bij een zw. gat
- Zwaartekrachtlenzen

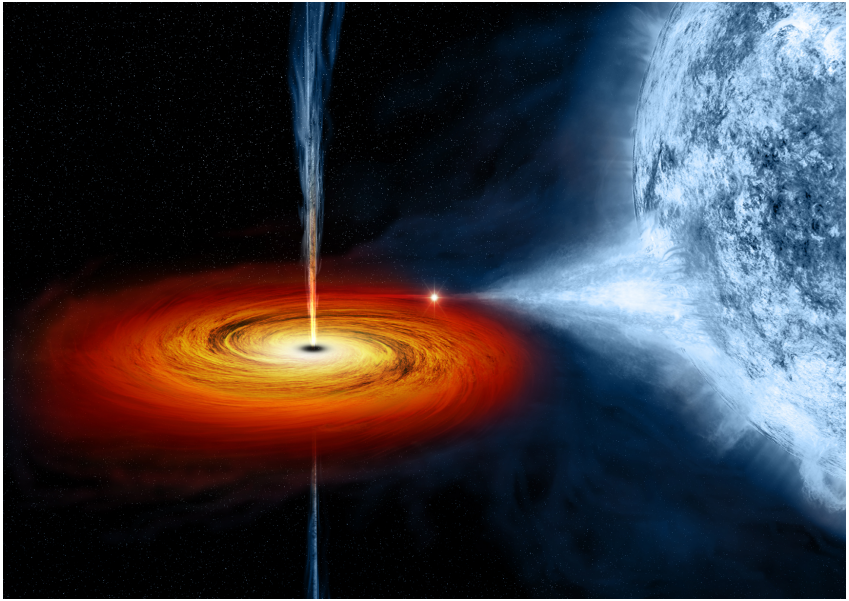
Dubbelsterren
- Dubbelsterren
- **Materie-overdracht**

Hoe detecteren we zwarte gaten?
- Zwaartekrachtsgolven
- LIGO/Virgo
- Michelson interferometer

Waarnemingen
- GW 150914
- GW 170817
- Gammaflitsers
- Meer detecties

De toekomst
- Global GW-detector network
- Einstein Telescope
- LISA

Indirecte waarneming van een zwart gat: Cygnus X-1



Bron: NASA/CXC/M.Weiss, 2011

Inhoud

Sterevolutie
Sterren
Lichte sterren
Zware sterren
Supernova's
Zwarte gaten
Ontsnappingssnelheid
Licht bij een zw. gat
Zwaartekrachtlenzen
Dubbelsterren
Dubbelsterren
Materie-overdracht
Hoe detecteren we zwarte gaten?
Zwaartekrachtsgolven
LIGO/Virgo
Michelson interferometer
Waarnemingen
GW 150914
GW 170817
Gammaflitsers
Meer detecties
De toekomst
Global GW-detector network
Einstein Telescope
LISA

1 Sterevolutie
- Sterren
- Evolutie van lichte sterren
- Evolutie van zware sterren
- Supernova's

2 Zwarte gaten
- Ontsnappingssnelheid
- Licht bij een zwart gat
- Zwaartekrachtlenzen

3 Dubbelsterevolutie en materie-overdracht
- Dubbelsterren
- Materie-overdracht

4 Hoe detecteren we zwarte gaten?
- Zwaartekrachtsgolven
- LIGO/Virgo
- Michelson interferometer

5 Waarnemingen
- GW 150914
- GW 170817
- Gammaflitsers
- Meer detecties

6 De toekomst
- Global GW-detector network
- Einstein Telescope
- LISA

Zwaartekrachtsgolven

Sterevolutie
- Sterren
- Lichte sterren
- Zware sterren
- Supernova's

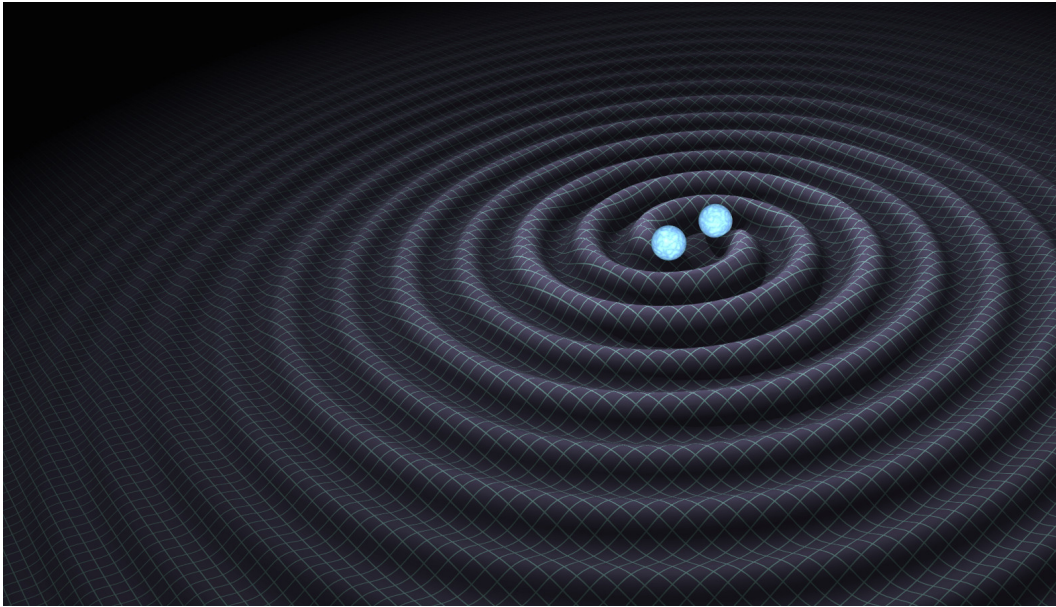
Zwarte gaten
- Ontsnappingssnelheid
- Licht bij een zw. gat
- Zwaartekrachtlenzen

Dubbelsterren
- Dubbelsterren
- Materie-overdracht

Hoe detecteren we zwarte gaten?
- **Zwaartekrachtsgolven**
- LIGO/Virgo
- Michelson interferometer

Waarnemingen
- GW 150914
- GW 170817
- Gammaflitsers
- Meer detecties

De toekomst
- Global GW-detector network
- Einstein Telescope
- LISA

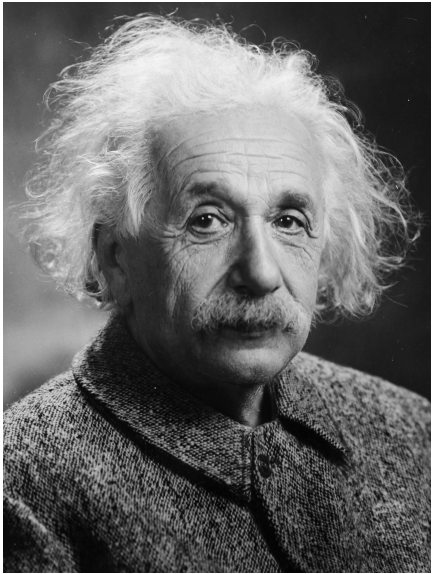


Zwaartekrachtsgolven

Sterevolutie
Sterren
Lichte sterren
Zware sterren
Supernova's
Zwarte gaten
Ontsnappingssnelheid
Licht bij een zw. gat
Zwaartekrachtlenzen
Dubbelsterren
Dubbelsterren
Materie-overdracht
Hoe detecteren we zwarte gaten?
Zwaartekrachtsgolven
LIGO/Virgo
Michelson interferometer
Waarnemingen
GW 150914
GW 170817
Gammaflitsers
Meer detecties
De toekomst
Global GW-detector network
Einstein Telescope
LISA

Zwaartekrachtsgolven:

- "Rimpels/trillingen/golven in de lege ruimte"
- Voorspeld door Einstein's Algemene Relativiteitstheorie



Bron: Wikipedia

Waarom zwaartekrachtsgolven detecteren?

Sterevolutie
Sterren
Lichte sterren
Zware sterren
Supernova's
Zwarte gaten
Ontsnappingssnelheid
Licht bij een zw. gat
Zwaartekrachtlenzen
Dubbelsterren
Dubbelsterren
Materie-overdracht
Hoe detecteren we zwarte gaten?
Zwaartekrachtsgolven
LIGO/Virgo
Michelson interferometer
Waarnemingen
GW 150914
GW 170817
Gammaflitsers
Meer detecties
De toekomst
Global GW-detector network
Einstein Telescope
LISA

Nieuwe sterrenkunde:

- Geheel nieuw venster op het heelal!
- Waarnemen hoe neutronensterren uiteengetrokken worden;
- Neutronensterren waarnemen die imploderen tot zwart gat;
- Zwarte gaten die neutronensterren 'opeten', zwart-gat–zwart-gat botsingen.

- De instorting van de kernen van zware sterren (core-collapse supernovae);
- 'Heuvels' op sneldraaiende neutronensterren;
- Oer-zwarte gaten om de Oerknal direct te bestuderen;
- Big Bang echo?
- Kosmische strings?

- *The unexpected* . . .

Eigenschappen van gravitatiegolven

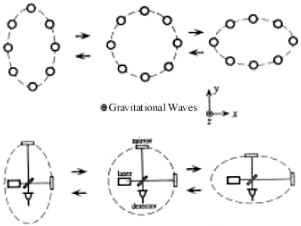
Sterevolutie
Sterren
Lichte sterren
Zware sterren
Supernova's
Zwarte gaten
Ontsnappingssnelheid
Licht bij een zw. gat
Zwaartekrachtlenzen
Dubbelsterren
Dubbelsterren
Materie-overdracht
Hoe detecteren we zwarte gaten?
Zwaartekrachtsgolven
LIGO/Virgo
Michelson interferometer
Waarnemingen
GW 150914
GW 170817
Gammaflitsers
Meer detecties
De toekomst
Global GW-detector network
Einstein Telescope
LISA

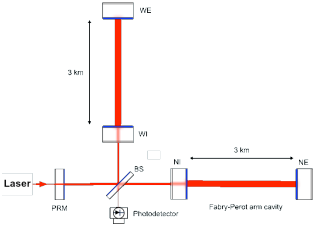
Gravitatiegolven...

- 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: $h(t) = h_+(t)F_+(t) + h_\times(t)F_\times(t) = \frac{\delta L(t)}{L} \sim 10^{-22}$
- voor een detector met $L \sim 3$–$4\,\mathrm{km}$: 5–$6 \times 10^{-18}\,\mathrm{m}$
  - vgl.: "ladingsdiameter" van een proton: $d_p \approx 1.7 \times 10^{-15}\,\mathrm{m}$
  - een glaasje water t.o.v. alle oceanen op Aarde!
  - 1/10 waterdruppel in het IJsselmeer

De Virgo-detector (Italië)





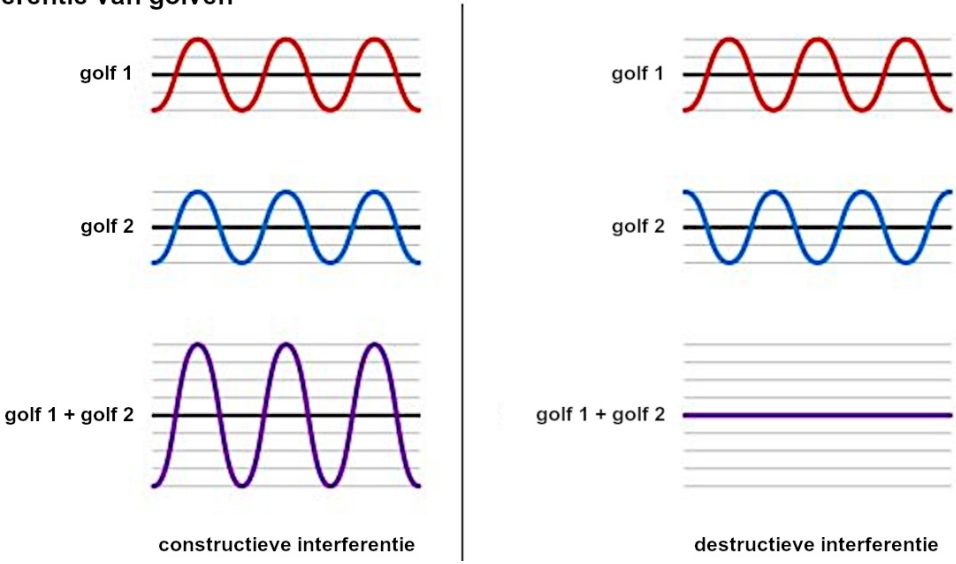
- LIGO Livingston, Louisiana (L1: 4 km)
- LIGO Hanford, Washington (H1: 4 km)
- Virgo: Pisa, Italië (V: 3 km)

- KAGRA: Japan (2023, 3 km)
- Indigo: India (2025+?, 4 km)

Interferentie van lichtgolven in een laser

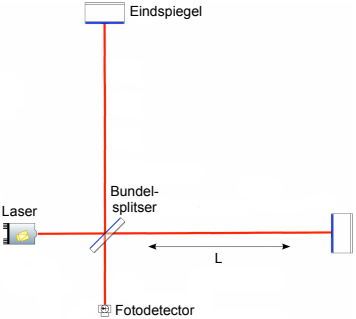
Sterevolutie
Sterren
Lichte sterren
Zware sterren
Supernova's
Zwarte gaten
Ontsnappingssnelheid
Licht bij een zw. gat
Zwaartekrachtlenzen
Dubbelsterren
Dubbelsterren
Materie-overdracht
Hoe detecteren we zwarte gaten?
Zwaartekrachtsgolven
LIGO/Virgo
Michelson interferometer
Waarnemingen
GW 150914
GW 170817
Gammaflitsers
Meer detecties
De toekomst
Global GW-detector network
Einstein Telescope
LISA

Interferentie van golven



Sterevolutie
Sterren
Lichte sterren
Zware sterren
Supernova's
Zwarte gaten
Ontsnappingssnelheid
Licht bij een zw. gat
Zwaartekrachtlenzen
Dubbelsterren
Dubbelsterren
Materie-overdracht
Hoe detecteren we zwarte gaten?
Zwaartekrachtsgolven
LIGO/Virgo
Michelson interferometer
Waarnemingen
GW 150914
GW 170817
Gammaflitsers
Meer detecties
De toekomst
Global GW-detector network
Einstein Telescope
LISA

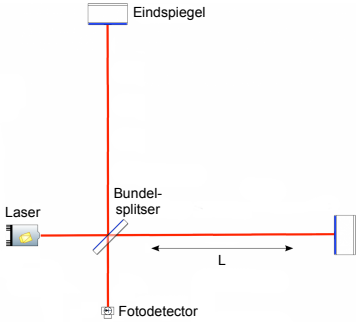
Een zwaartekrachtgolfdetector (H 12.6)

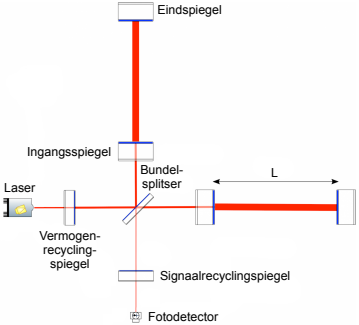


- $\Delta L(t) = \Delta L_x(t) - \Delta L_y(t) = \frac{L_x}{2} h(t) - \frac{-L_y}{2} h(t) \approx L h(t) \;\rightarrow\; h \equiv \frac{\Delta L}{L}$
- **Shot noise:** $S_n^{1/2}(f) = h_{\min}(f) = \frac{\Delta L_{\min}(f)}{L} = \frac{1}{2\pi L}\sqrt{\frac{hc\lambda_L}{\eta_{PD} P_L}}$ in $\frac{1}{\sqrt{\text{Hz}}}$!
  - λ_L, P_L: golflengte en vermogen laser
  - η_{PD}: efficiency fotodiode
- $L \approx 4\,\text{km}$, $\lambda_L \approx 1064\,\text{nm}$ en $P_L \approx 100\,\text{W}$, $\eta_{PD} = 0.93$: $h_{\min}(f) \approx 2 \times 10^{-21}/\sqrt{\text{Hz}}$
- @100 Hz: $h_{\min} \approx h_{\min}(f) \cdot \sqrt{100} \approx 2 \times 10^{-20} > 1.5 \times 10^{-21}$ $\rightarrow$ **niet genoeg!**

Een zwaartekrachtgolfdetector (H 12.6)

Sterevolutie
Sterren
Lichte sterren
Zware sterren
Supernova's
Zwarte gaten
Ontsnappingssnelheid
Licht bij een zw. gat
Zwaartekrachtlenzen
Dubbelsterren
Dubbelsterren
Materie-overdracht
Hoe detecteren we zwarte gaten?
Zwaartekrachtsgolven
LIGO/Virgo
Michelson interferometer
Waarnemingen
GW 150914
GW 170817
Gammaflitsers
Meer detecties
De toekomst
Global GW-detector network
Einstein Telescope
LISA



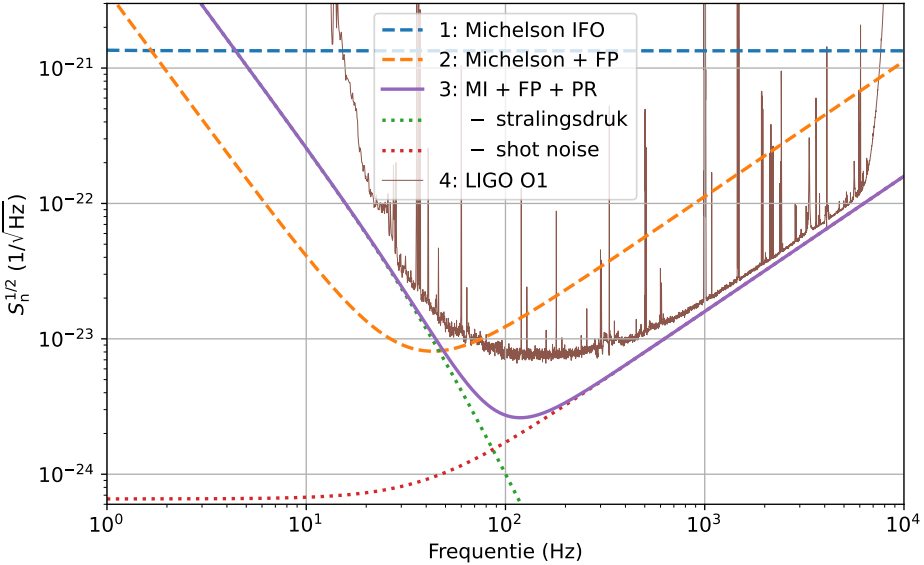


1. **Twee ingangsspiegels** in de armen $\rightarrow$ **Fabry-Pérot-holtes**: $L' \sim 250$–$300\,L$
   - minder shot noise, maar meer **ruis door stralingsdruk** bij lage frequentie
   - $\rightarrow\ h_{\rm min} \rightarrow \sim h_{\rm min}/250$
2. **Vermogenrecyclingspiegel** bij laser: $P'_{\rm L} \sim 50\,P_{\rm L}\ \rightarrow\ h_{\rm min} \rightarrow \sim h_{\rm min}/3$
3. **Signaalrecyclingspiegel** bij fotodiode: kies optimale $f_{\rm gw}$

$$\rightarrow\ S_{\rm n}^{1/2}(f) \sim 3\times10^{-24}/\sqrt{\rm Hz}\ \propto\ h_{\rm min} \sim 3\times10^{-23}\ (@100\,{\rm Hz})\ \rightarrow\ \textbf{genoeg!}$$

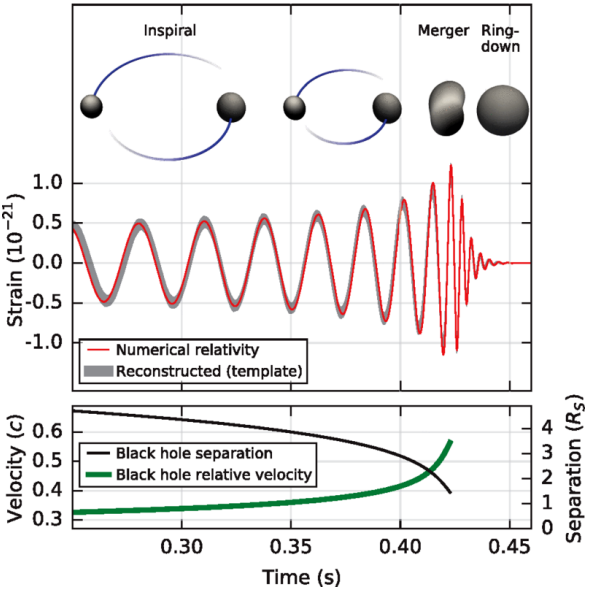
Sterevolutie
Sterren
Lichte sterren
Zware sterren
Supernova's
Zwarte gaten
Ontsnappingssnelheid
Licht bij een zw. gat
Zwaartekrachtlenzen
Dubbelsterren
Dubbelsterren
Materie-overdracht
Hoe detecteren we zwarte gaten?
Zwaartekrachtsgolven
LIGO/Virgo
Michelson interferometer
Waarnemingen
GW 150914
GW 170817
Gammaflitsers
Meer detecties
De toekomst
Global GW-detector network
Einstein Telescope
LISA

Een zwaartekrachtgolfdetector (H 12.6)



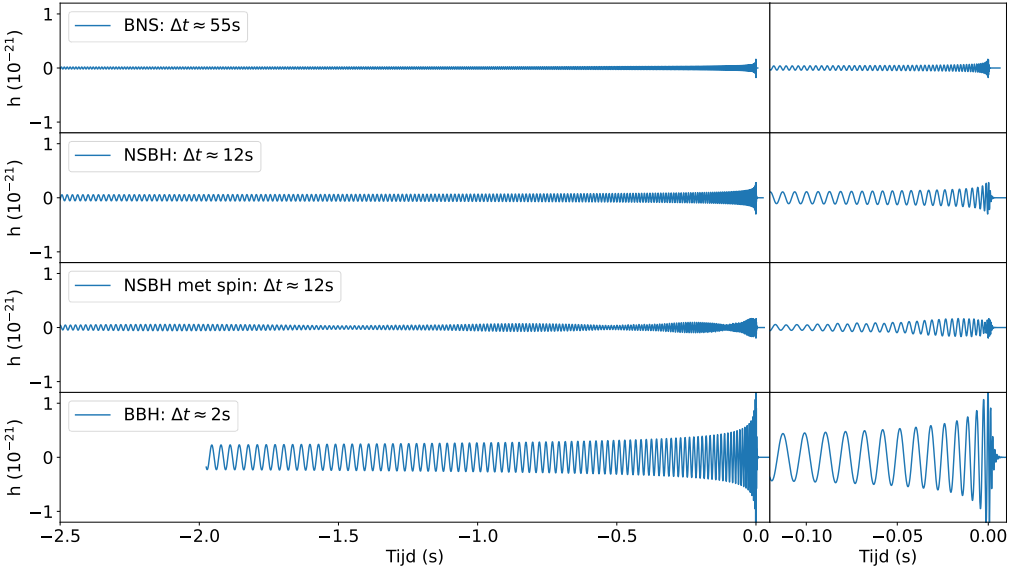
- **O1:** LIGO Observation run 1 (2015)

Het signaal van een inspiral, merger en ringdown (H 12.5)



Bron: Abbott et al., 2016

Het signaal van een inspiral, merger en ringdown (H 12.5)



BNS: binary neutron star; **BBH**: binary black hole; **NSBH**: NS+BH. $M_{\rm ns} = 1.4, M_{\rm bh} = 10\,M_\odot$

Inhoud

Sterevolutie
Sterren
Lichte sterren
Zware sterren
Supernova's
Zwarte gaten
Ontsnappingssnelheid
Licht bij een zw. gat
Zwaartekrachtlenzen
Dubbelsterren
Dubbelsterren
Materie-overdracht
Hoe detecteren we zwarte gaten?
Zwaartekrachtsgolven
LIGO/Virgo
Michelson interferometer
Waarnemingen
GW 150914
GW 170817
Gammaflitsers
Meer detecties
De toekomst
Global GW-detector network
Einstein Telescope
LISA

1 Sterevolutie
- Sterren
- Evolutie van lichte sterren
- Evolutie van zware sterren
- Supernova's

2 Zwarte gaten
- Ontsnappingssnelheid
- Licht bij een zwart gat
- Zwaartekrachtlenzen

3 Dubbelsterevolutie en materie-overdracht
- Dubbelsterren
- Materie-overdracht

4 Hoe detecteren we zwarte gaten?
- Zwaartekrachtsgolven
- LIGO/Virgo
- Michelson interferometer

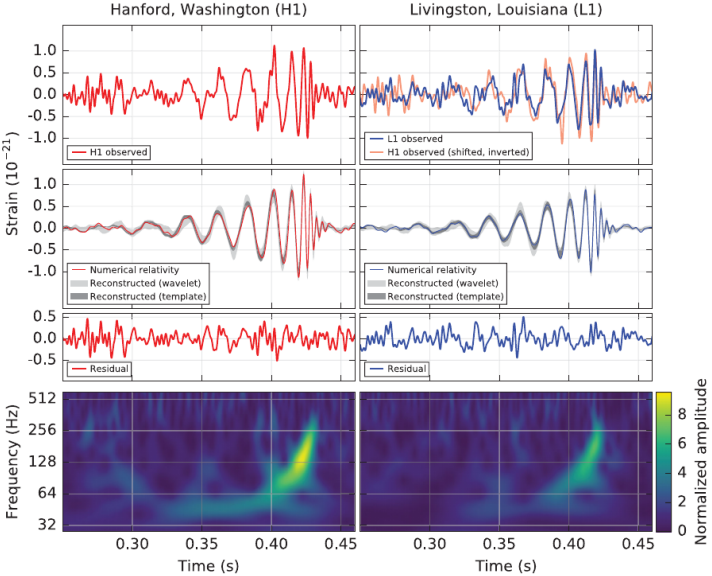
5 Waarnemingen
- GW 150914
- GW 170817
- Gammaflitsers
- Meer detecties

6 De toekomst
- Global GW-detector network
- Einstein Telescope
- LISA

De eerste detectie: GW 150914

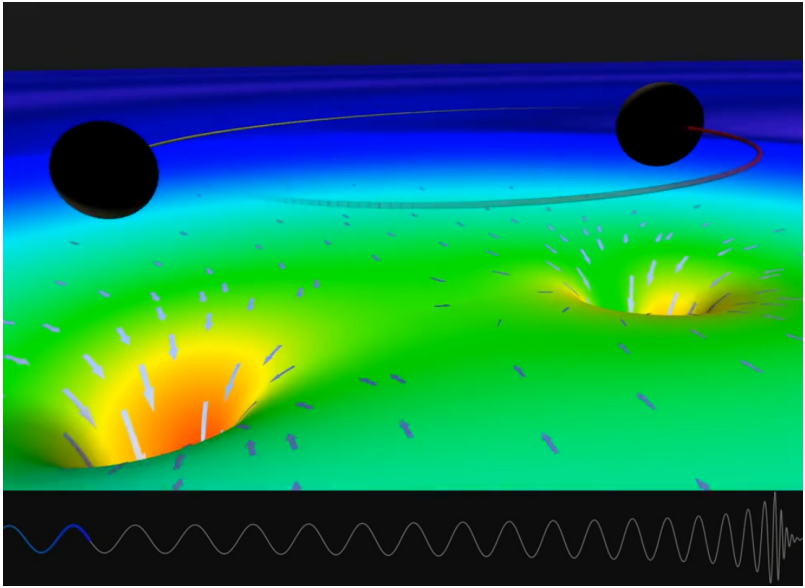
In de ruwe data zitten:

1. GW signaal
2. Ruis!



Bron: ligo.org

Bron van GW 150914: dubbel zwart gat



Bron: www.black-holes.org

Bron van GW 150914

Sterevolutie
- Sterren
- Lichte sterren
- Zware sterren
- Supernova's

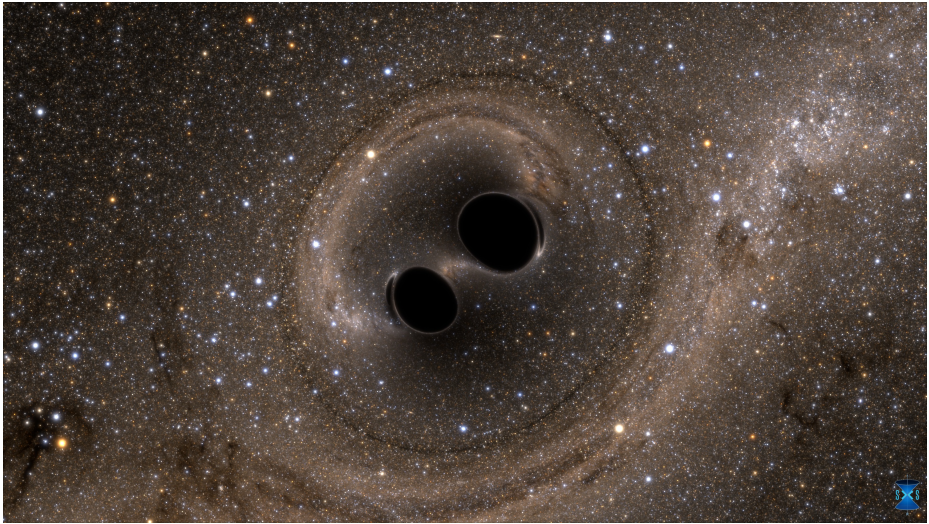
Zwarte gaten
- Ontsnappingssnelheid
- Licht bij een zw. gat
- Zwaartekrachtlenzen

Dubbelsterren
- Dubbelsterren
- Materie-overdracht

Hoe detecteren we zwarte gaten?
- Zwaartekrachtsgolven
- LIGO/Virgo
- Michelson interferometer

Waarnemingen
- **GW 150914**
- GW 170817
- Gammaflitsers
- Meer detecties

De toekomst
- Global GW-detector network
- Einstein Telescope
- LISA



Bron: www.black-holes.org

Bron van GW 150914

Sterevolutie
Sterren
Lichte sterren
Zware sterren
Supernova's
Zwarte gaten
Ontsnappingssnelheid
Licht bij een zw. gat
Zwaartekrachtlenzen
Dubbelsterren
Dubbelsterren
Materie-overdracht
Hoe detecteren we zwarte gaten?
Zwaartekrachtsgolven
LIGO/Virgo
Michelson interferometer
Waarnemingen
GW 150914
GW 170817
Gammaflitsers
Meer detecties
De toekomst
Global GW-detector network
Einstein Telescope
LISA

Dubbel zwart gat:

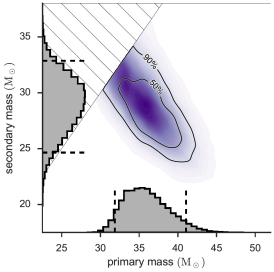
- $M_1 = 32 - 41\, M_\odot$
- $M_2 = 25 - 33\, M_\odot$
- Afstand: $\sim 0.75 - 1.86$ miljard lichtjaar

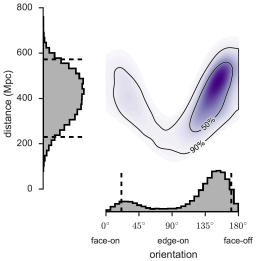
- Massa resultered zwart gat: $58 - 66\, M_\odot$
- Spin (0-1) resulterend zwart gat: $0.60 - 0.72$

- Verloren massa: $\sim 2.5 - 3.5\, M_\odot$: $E = mc^2$!
- Maximale helderheid:
  - $\sim 3.2 - 4.0 \times 10^{49}$ W
  - $\sim 50\times$ alle sterren in het zichtbare heelal!

Bron: Abbott et al., 2016

PDFs:





Sterevolutie
Sterren
Lichte sterren
Zware sterren
Supernova's
Zwarte gaten
Ontsnappingssnelheid
Licht bij een zw. gat
Zwaartekrachtlenzen
Dubbelsterren
Dubbelsterren
Materie-overdracht
Hoe detecteren we zwarte gaten?
Zwaartekrachtsgolven
LIGO/Virgo
Michelson interferometer
Waarnemingen
GW 150914
GW 170817
Gammaflitsers
Meer detecties
De toekomst
Global GW-detector network
Einstein Telescope
LISA

Nieuw!!!

Astrofysica:

- Eerste **directe waarneming** van een zwart gat
- Eerste **dubbele zwarte gat**
- Eerste **merger** van dubbel zwart gat
- **Zwaarste** stellaire zwarte gaten waargenomen ($> 25\,M_\odot$)
- Zwarte gaten smelten misschien **vaker** samen dan we dachten
- **Zwakke sterwinden**, lage metalliciteit ($\lesssim 0.5\,Z_\odot$)

Fysica:

- **Geen afwijkingen** Algemene Relativiteitstheorie (Einstein heeft gelijk!)

GW 170817: eerste NS-NS botsing

Sterevolutie
- Sterren
- Lichte sterren
- Zware sterren
- Supernova's

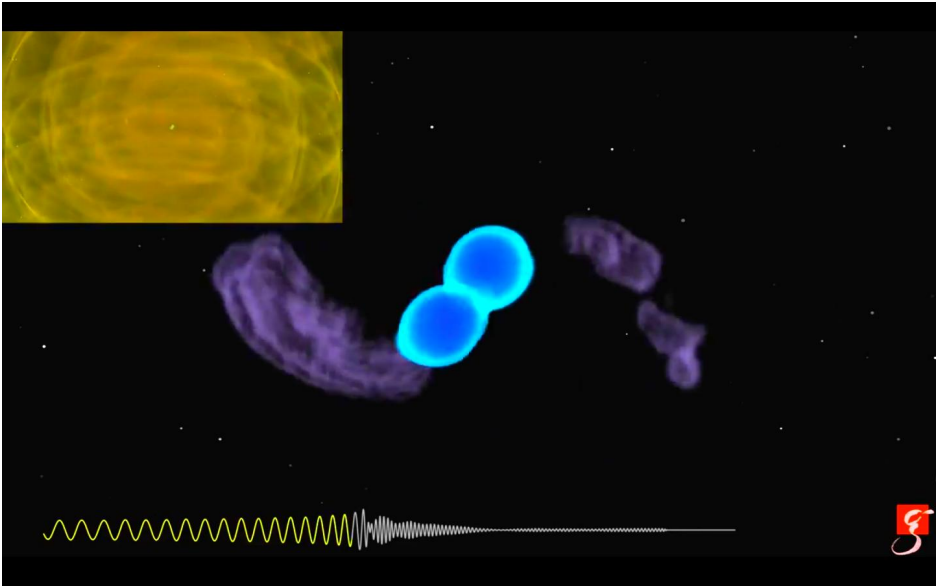
Zwarte gaten
- Ontsnappingssnelheid
- Licht bij een zw. gat
- Zwaartekrachtlenzen

Dubbelsterren
- Dubbelsterren
- Materie-overdracht

Hoe detecteren we zwarte gaten?
- Zwaartekrachtsgolven
- LIGO/Virgo
- Michelson interferometer

Waarnemingen
- GW 150914
- **GW 170817**
- Gammaflitsers
- Meer detecties

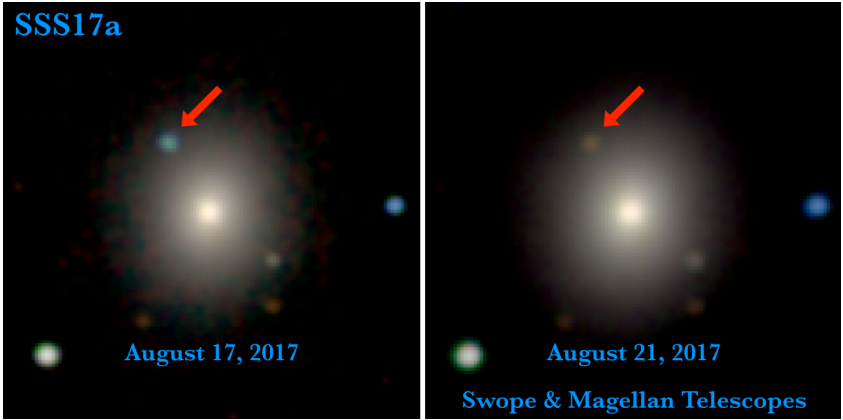
De toekomst
- Global GW-detector network
- Einstein Telescope
- LISA



Bron: ligo.org

Sterevolutie
Sterren
Lichte sterren
Zware sterren
Supernova's
Zwarte gaten
Ontsnappingssnelheid
Licht bij een zw. gat
Zwaartekrachtlenzen
Dubbelsterren
Dubbelsterren
Materie-overdracht
Hoe detecteren we zwarte gaten?
Zwaartekrachtsgolven
LIGO/Virgo
Michelson interferometer
Waarnemingen
GW 150914
GW 170817
Gammaflitsers
Meer detecties
De toekomst
Global GW-detector network
Einstein Telescope
LISA

GW 170817: optische tegenhanger!

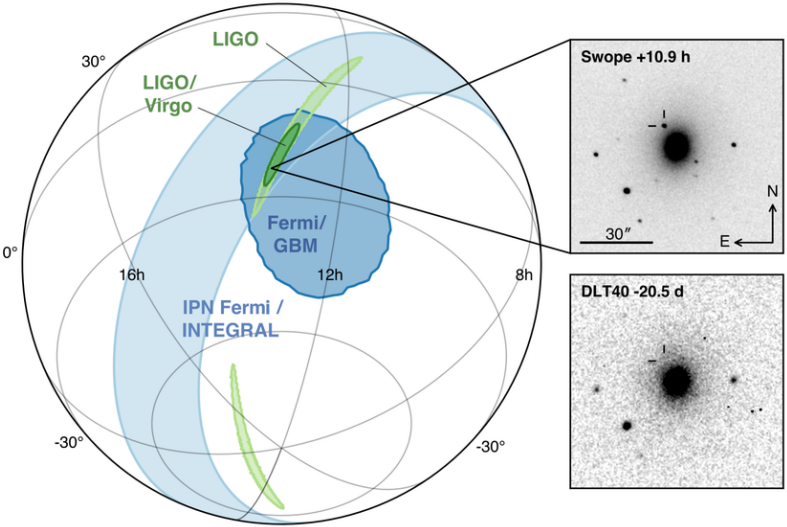


Bron: ligo.org

Electromagnetische waarnemingen

- Gammaflitser: Fermi
- Optische waarneming: Swope & Magellan telescopen

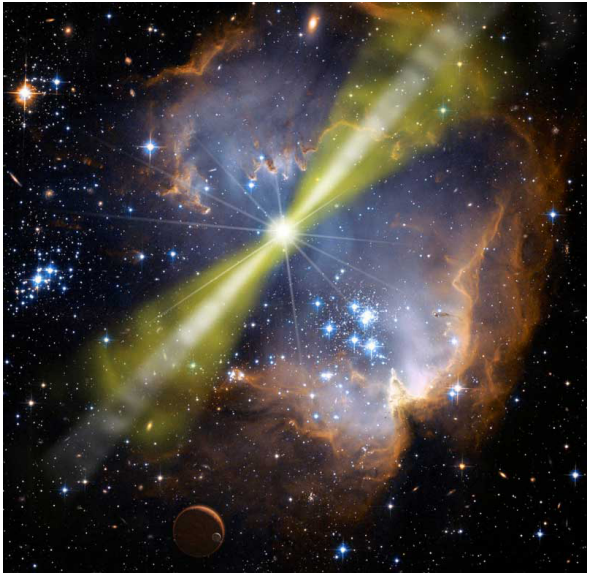
GW 170817: hemelpositie



Bron: Abbott et al. (2017)

Sterevolutie
Sterren
Lichte sterren
Zware sterren
Supernova's
Zwarte gaten
Ontsnappingssnelheid
Licht bij een zw. gat
Zwaartekrachtlenzen
Dubbelsterren
Dubbelsterren
Materie-overdracht
Hoe detecteren we zwarte gaten?
Zwaartekrachtsgolven
LIGO/Virgo
Michelson interferometer
Waarnemingen
GW 150914
GW 170817
Gammaflitsers
Meer detecties
De toekomst
Global GW-detector network
Einstein Telescope
LISA

Short-hard gamma-ray bursts (shGRBs)



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-ZG mergers?
  - oude sterpopulaties
  - energie
  - frequentie

Detecties van zwaartekrachtgolven

Sterevolutie
Sterren
Lichte sterren
Zware sterren
Supernova's
Zwarte gaten
Ontsnappingssnelheid
Licht bij een zw. gat
Zwaartekrachtlenzen
Dubbelsterren
Dubbelsterren
Materie-overdracht
Hoe detecteren we zwarte gaten?
Zwaartekrachtsgolven
LIGO/Virgo
Michelson interferometer
Waarnemingen
GW 150914
GW 170817
Gammaflitsers
Meer detecties
De toekomst
Global GW-detector network
Einstein Telescope
LISA

Signaal	M_1 ($M_\odot$)	M_2 ($M_\odot$)	Afstand (Mpc)	N_{det} —	SNR —	T_{obs} (s)	Run	Opmerkingen
GW 150914	35.6	30.6	440	2	26.0	0.3	O1	eerste detectie, BBH
GW 151012	23.2	13.6	1080	2	10.0	0.8	O1	tweede detectie, BBH
GW 151226	13.7	7.7	450	2	13.1	1.9	O1	derde detectie, BBH
GW 170817	1.46	1.27	40	3	33.0	56	O2	eerste BNS, GRB 170817A, luidste signaal in O1–O3
GW 190425	2.1	1.3	150	2	12.4	121	O3	BNS
GW 190426	105.5	76.0	4580	2	8.7	0.1	O3	zwaarste BBH in O1–O3
GW 190521	98.4	57.2	3310	3	14.3	0.2	O3	zware BBH
GW 200105	9.1	1.91	270	2	13.7	28	O3	eerste NSBH
GW 200115	5.9	1.44	290	3	11.3	50	O3	NSBH
GW 200308	60	24	7100	3	4.7	0.5	O3	zwaarste BBH

Bron: The Gravitational-wave Transient Catalog (GWTC)

- **O4** begon in mei 2023 en heeft een geplande duur van 18 maanden

Waargenomen kosmische signalen

Sterevolutie
- Sterren
- Lichte sterren
- Zware sterren
- Supernova's

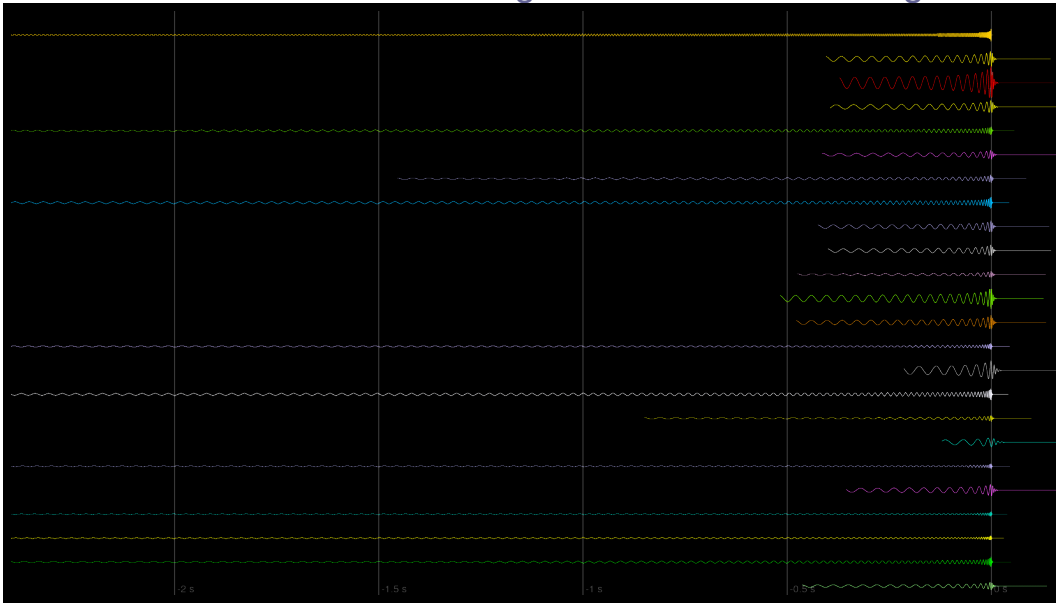
Zwarte gaten
- Ontsnappingssnelheid
- Licht bij een zw. gat
- Zwaartekrachtlenzen

Dubbelsterren
- Dubbelsterren
- Materie-overdracht

Hoe detecteren we zwarte gaten?
- Zwaartekrachtsgolven
- LIGO/Virgo
- Michelson interferometer

Waarnemingen
- GW 150914
- GW 170817
- Gammaflitsers
- **Meer detecties**

De toekomst
- Global GW-detector network
- Einstein Telescope
- LISA



Bron: waveview.cardiffgravity.org

Waargenomen botsende ZG-en en NS-en: 91!

Hoe kunnen we zwarte gaten 'horen'?

Sterevolutie
- Sterren
- Lichte sterren
- Zware sterren
- Supernova's

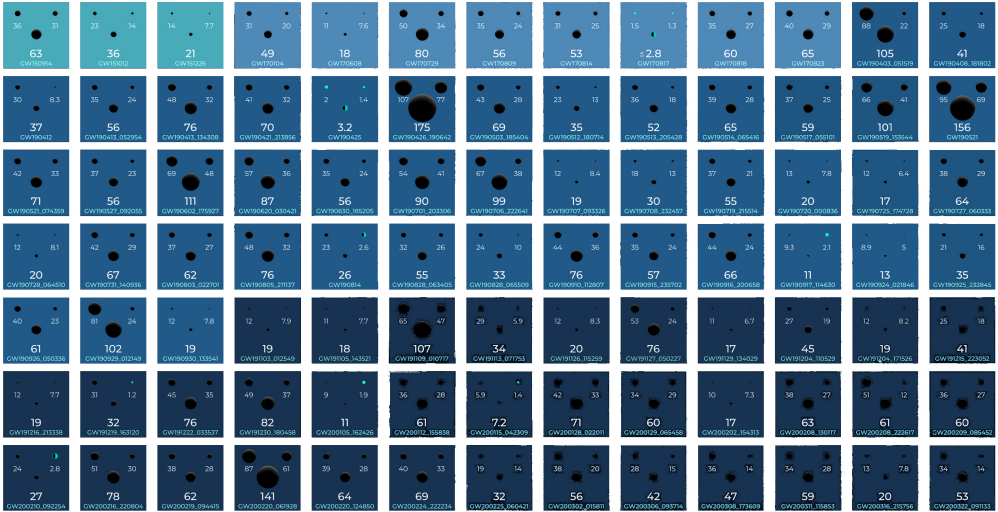
Zwarte gaten
- Ontsnappingssnelheid
- Licht bij een zw. gat
- Zwaartekrachtlenzen

Dubbelsterren
- Dubbelsterren
- Materie-overdracht

Hoe detecteren we zwarte gaten?
- Zwaartekrachtsgolven
- LIGO/Virgo
- Michelson interferometer

Waarnemingen
- GW 150914
- GW 170817
- Gammaflitsers
- **Meer detecties**

De toekomst
- Global GW-detector network
- Einstein Telescope
- LISA



Bron: www.ligo.caltech.edu

Inhoud

Sterevolutie
Sterren
Lichte sterren
Zware sterren
Supernova's
Zwarte gaten
Ontsnappingssnelheid
Licht bij een zw. gat
Zwaartekrachtlenzen
Dubbelsterren
Dubbelsterren
Materie-overdracht
Hoe detecteren we zwarte gaten?
Zwaartekrachtsgolven
LIGO/Virgo
Michelson interferometer
Waarnemingen
GW 150914
GW 170817
Gammaflitsers
Meer detecties
De toekomst
Global GW-detector network
Einstein Telescope
LISA

1 Sterevolutie
- Sterren
- Evolutie van lichte sterren
- Evolutie van zware sterren
- Supernova's

2 Zwarte gaten
- Ontsnappingssnelheid
- Licht bij een zwart gat
- Zwaartekrachtlenzen

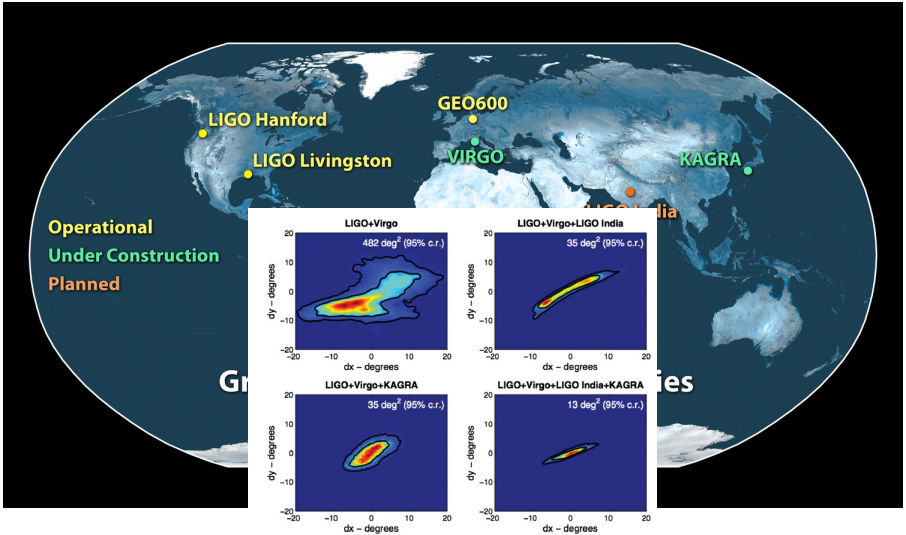
3 Dubbelsterevolutie en materie-overdracht
- Dubbelsterren
- Materie-overdracht

4 Hoe detecteren we zwarte gaten?
- Zwaartekrachtsgolven
- LIGO/Virgo
- Michelson interferometer

5 Waarnemingen
- GW 150914
- GW 170817
- Gammaflitsers
- Meer detecties

6 De toekomst
- Global GW-detector network
- Einstein Telescope
- LISA

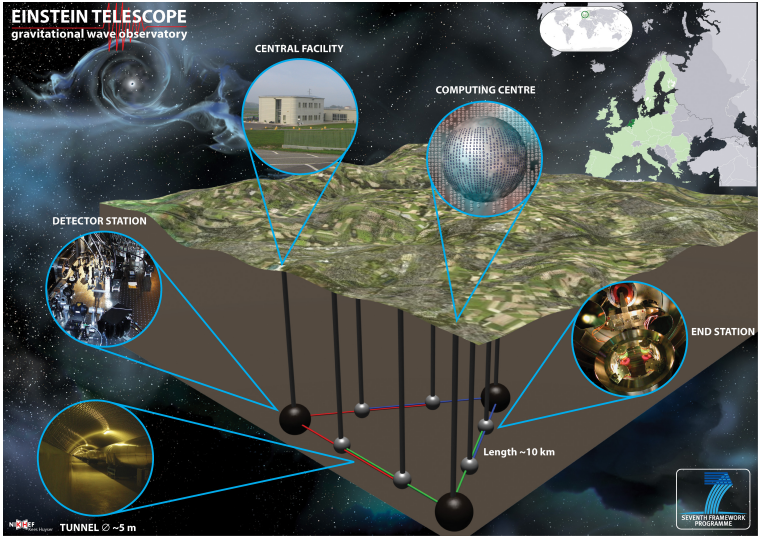
Global GW-detector network



Nissanke et al., 2013

Einstein Telescope

Sterevolutie
Sterren
Lichte sterren
Zware sterren
Supernova's
Zwarte gaten
Ontsnappingssnelheid
Licht bij een zw. gat
Zwaartekrachtlenzen
Dubbelsterren
Dubbelsterren
Materie-overdracht
Hoe detecteren we zwarte gaten?
Zwaartekrachtsgolven
LIGO/Virgo
Michelson interferometer
Waarnemingen
GW 150914
GW 170817
Gammaflitsers
Meer detecties
De toekomst
Global GW-detector network
Einstein Telescope
LISA



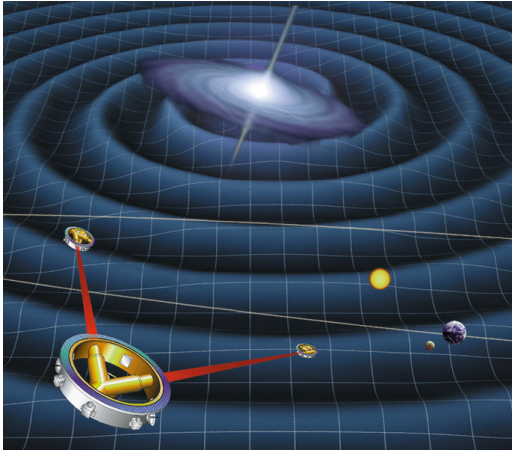
- Groter dan LIGO/Virgo
- Gevoeliger
- Meer signalen
- Meerdere signalen tegelijk!

- 1 driehoek of 2 L's?
- 10–15–20 km?
- Nl-B-D of It?

- Tegenhanger VS: Cosmic Explorer

Laser Interferometer Space Antenna (LISA)

Sterevolutie
Sterren
Lichte sterren
Zware sterren
Supernova's
Zwarte gaten
Ontsnappingssnelheid
Licht bij een zw. gat
Zwaartekrachtlenzen
Dubbelsterren
Dubbelsterren
Materie-overdracht
Hoe detecteren we zwarte gaten?
Zwaartekrachtsgolven
LIGO/Virgo
Michelson interferometer
Waarnemingen
GW 150914
GW 170817
Gammaflitsers
Meer detecties
De toekomst
Global GW-detector network
Einstein Telescope
LISA



Bron: lisamission.org

Ruimtemissie

- 3 ruimtevaartuigen, 4 testmassa's
- Detector in een baan om de Zon, 20° achter de Aarde
- Driehoeksopstelling, armen van 1 miljoen km
- 1 Watt lasers
- Lage frequenties: 0.1 mHz – 1 Hz ($P \sim 1\,\mathrm{s} - 3\,\mathrm{u}$)
- Missieduur 5+ jaar
- LISA Pathfinder (december 2015) heeft technologie getest
- Lancering 2037+?

Laser Interferometer Space Antenna (LISA)

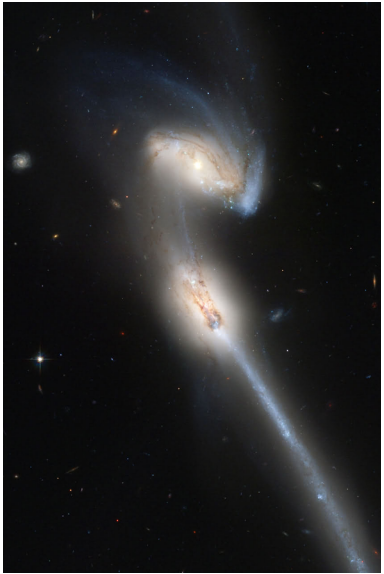
Sterevolutie
Sterren
Lichte sterren
Zware sterren
Supernova's
Zwarte gaten
Ontsnappingssnelheid
Licht bij een zw. gat
Zwaartekrachtlenzen
Dubbelsterren
Dubbelsterren
Materie-overdracht
Hoe detecteren we zwarte gaten?
Zwaartekrachtsgolven
LIGO/Virgo
Michelson interferometer
Waarnemingen
GW 150914
GW 170817
Gammaflitsers
Meer detecties
De toekomst
Global GW-detector network
Einstein Telescope
LISA

Waarnemingen

- Galactische dubbele witte dwergen
- Super-massieve zwarte gaten (SMZG-en) in de kernen van botsende sterrenstelsels
- Vangst van compacte objecten door SMZG-en
- Kosmische strings?
- Fase-overgangen in het vroege heelal?

Nauwkeurigheid

- Massa's van SMZG-en (10.000 – 10.000.000 $M_\odot$): $\sim 0.1 - 10\%$
- Posities: enkele graden
- Directe afstandsmeting: $\sim 1 - 10\%$

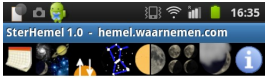


Sterevolutie
Sterren
Lichte sterren
Zware sterren
Supernova's
Zwarte gaten
Ontsnappingssnelheid
Licht bij een zw. gat
Zwaartekrachtlenzen
Dubbelsterren
Dubbelsterren
Materie-overdracht
Hoe detecteren we zwarte gaten?
Zwaartekrachtsgolven
LIGO/Virgo
Michelson interferometer
Waarnemingen
GW 150914
GW 170817
Gammaflitsers
Meer detecties
De toekomst
Global GW-detector network
Einstein Telescope
LISA

hemel.waarnemen.com

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 op **https://hemel.waarnemen.com/lezingen**