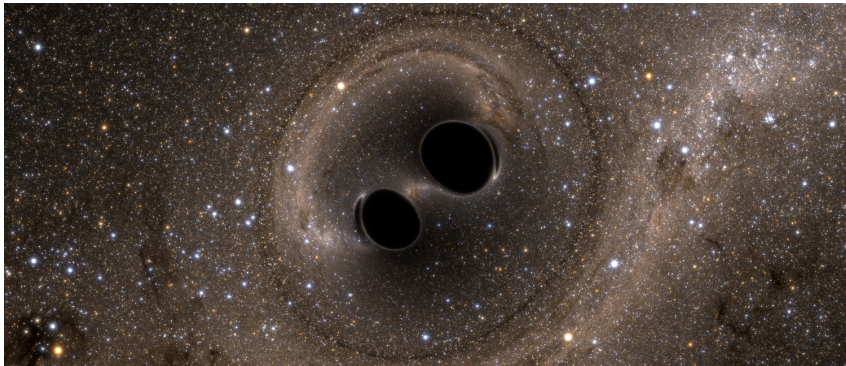


Hoe kunnen we zwarte gaten 'horen'?



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

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

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

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

Hoe kunnen we
zwarte gaten
'horen'?

Stereolutie

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?

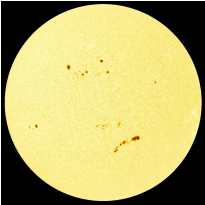
- Zwaartekrachtsgolven
- LIGO/Virgo
- Michelson
interferometer

Waarnemingen

- GW 150914
- GW 170817
- Gammaflitsers
- Meer detecties

De toekomst

- Global GW-detector
network
- Einstein Telescope
- LISA



	Grootheid	Eenheid	Aarde
Massa	$M_{\odot}$	$1,99 \times 10^{30} \text{ kg}$	$333.000 M_{\oplus}$
Straal	$R_{\odot}$	696.000 km	$109 R_{\oplus}$
Dichtheid	$\bar{\rho}_{\odot}$	$1,4 \text{ g/cm}^3$	$0,26 \bar{\rho}_{\oplus}$
Lichtkracht	$L_{\odot}$	$3,85 \times 10^{26} \text{ W}$	$\sim 3 \times 10^9 "L_{\oplus}"$
Temperatuur:			
Oppervlak	$T_{\text{opp},\odot}$	5500°C	15°C
Centrum	$T_{\text{c},\odot}$	$\sim 16 \times 10^6 ^{\circ}\text{C}$	$\sim 7000^{\circ}\text{C}$

Hoe kunnen we zwarte gaten 'horen'?

Stereolutie

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?

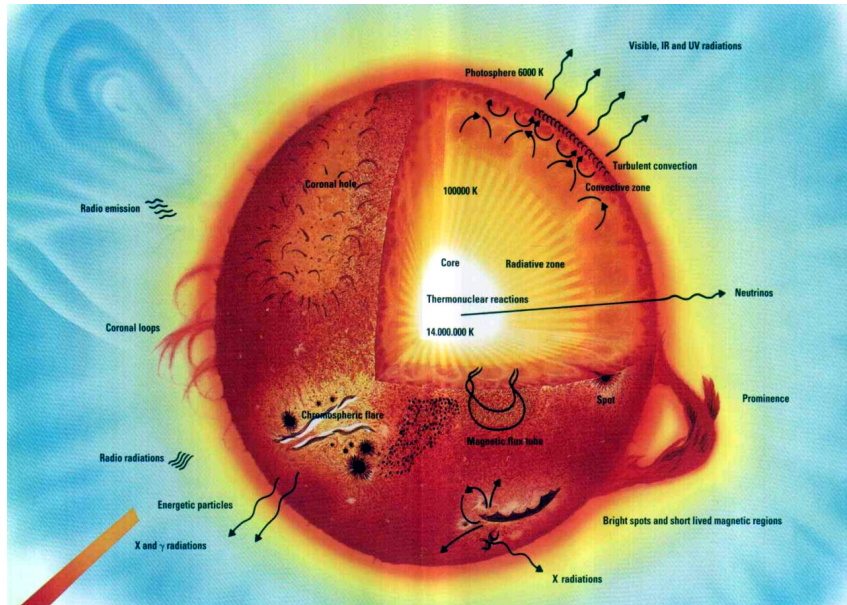
Zwaartekrachtsgolven
LIGO/Virgo
Michelson interferometer

Waarnemingen

GW 150914
GW 170817
Gammaflitsers
Meer detecties

De toekomst

Global GW-detector network
Einstein Telescope
LISA



Hoe kunnen we
zwarte gaten
'horen'?

Stereolutie

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

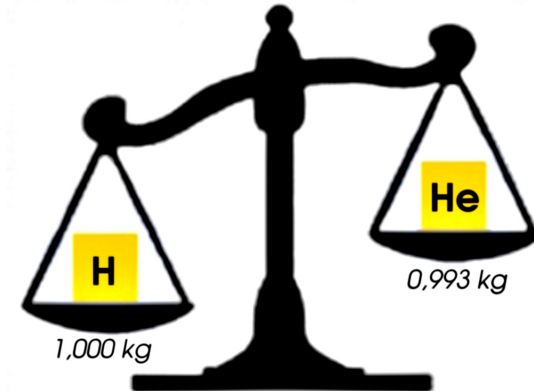
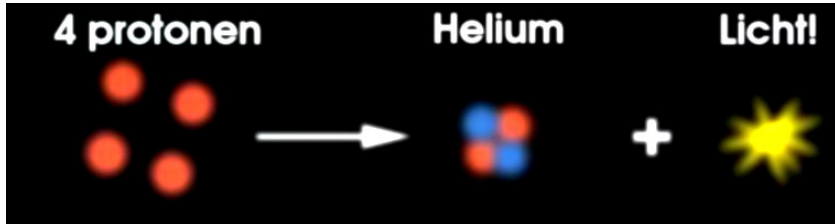
Meer detecties

De toekomst

Global GW-detector
network

Einstein Telescope

LISA



Eigenschappen van hoofdreekssterren

Hoe kunnen we
zwarte gaten
'horen'?

Stereolutie

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

Gammafilters

Meer detecties

De toekomst

Global GW-detector

network

Einstein Telescope

LISA

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	0,00959
3,0	246	3,09	120	11 100	25,2	0,00380
5,0	70,6	4,19	895	15 700	28,6	0,000327
10,0	12,7	5,74	8590	23 500	32,8	0,0000116
20,0	5,18	8,78	67 900	31 700	37,0	0,00000093
50,0	2,41	15,9	527 000	39 300	41,4	0,00000005

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

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

Hoe kunnen we
zwarte gaten
'horen'?

Stereolutie
Sterren
Lichte sterren
Zware sterren
Supernova's

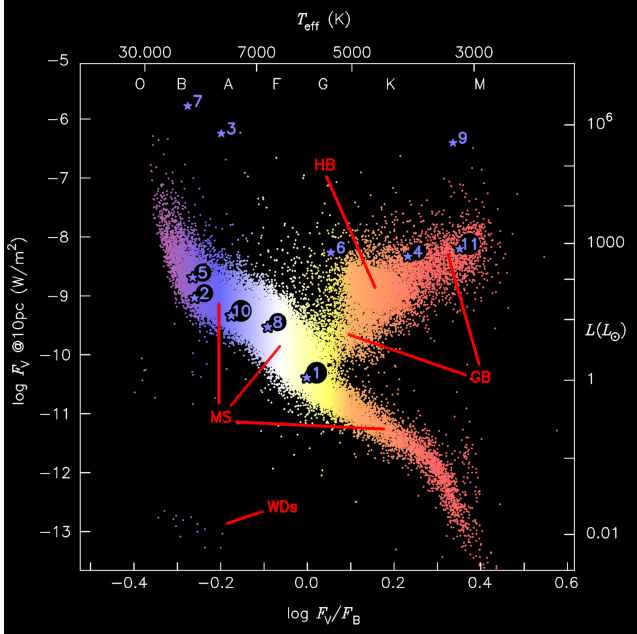
Zwarte gaten
Ontsnappingssnelheid
Licht bij een zw. gat
Zwaartekrachtlenzen

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



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

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

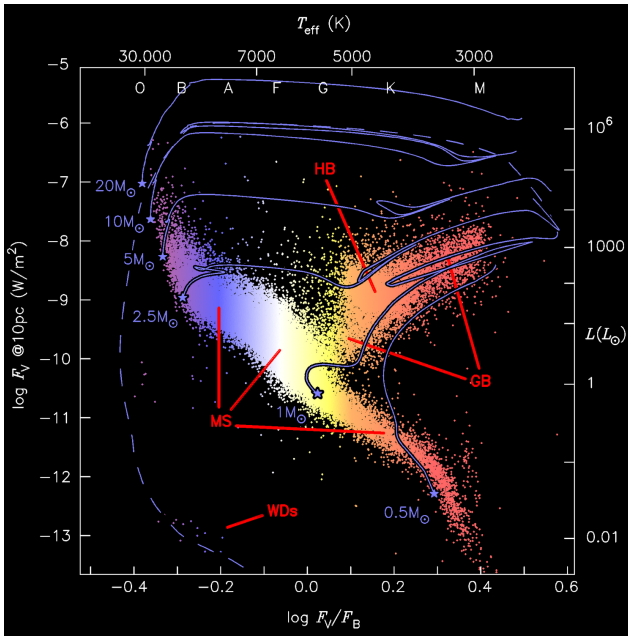
Meer detecties

De toekomst

Global GW-detector
network

Einstein Telescope

LISA



- 48 495 nabije sterren uit de Hipparcos-catalogus:

- $\frac{\Delta d}{d} < 20\%$
- $\Delta(F_B/F_V) < 0.1$

- 1 Evolutesporen
- 2 $0.5 M_\odot - 20 M_\odot$

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

Evolutie van een ster van 1 zonsmassa

Hoe kunnen we
zwarte gaten
'horen'?

Stereolutie

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

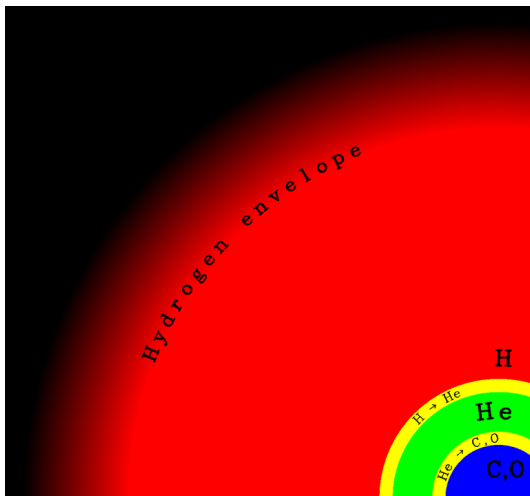
Meer detecties

De toekomst

Global GW-detector
network

Einstein Telescope

LISA



Fase:
Waterstoffusie
Heliumfusie

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

Temperatuur:
 $T \gtrsim 7$ miljoen°C,
 $T \gtrsim 200$ miljoen°C,

Tijdschaal:
 $\tau \approx 7 + 4$ miljard jaar
 $\tau \approx 200 + 25$ miljoen jaar

Reacties:
 $4H \rightarrow He$
 $3He \rightarrow C,$
 $C + He \rightarrow O$

Hoe kunnen we zwarte gaten 'horen'?

Stereolutie

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

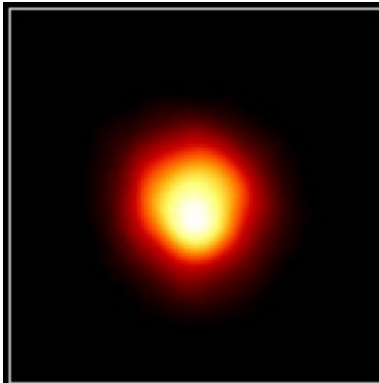
Meer detecties

De toekomst

Global GW-detector
network

Einstein Telescope

LISA



Diameter ster

Diameter aardbaan

Diameter jupiterbaan



Planetaire nevels

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



Butterfly nebula (HST/NASA)

Hoe kunnen we
zwarte gaten
'horen'?

Stereolutie

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

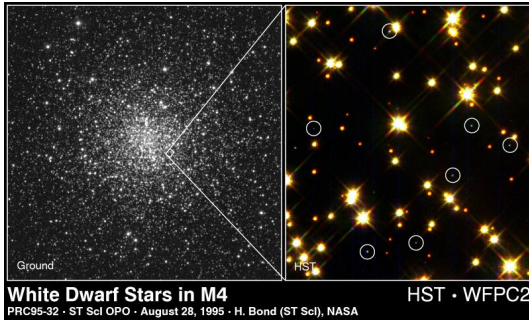
Meer detecties

De toekomst

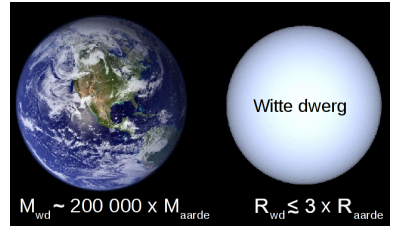
Global GW-detector
network

Einstein Telescope

LISA



Bron: [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 ~ 1 miljoen keer die van water
- $M_{wd} \lesssim 1.4 M_{\odot}$; $\langle M_{wd} \rangle \approx 0.6 M_{\odot}$
- $L_{wd} \lesssim 0.001 L_{\odot}$

Hoe kunnen we
zwarte gaten
'horen'?

Stereolutie

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

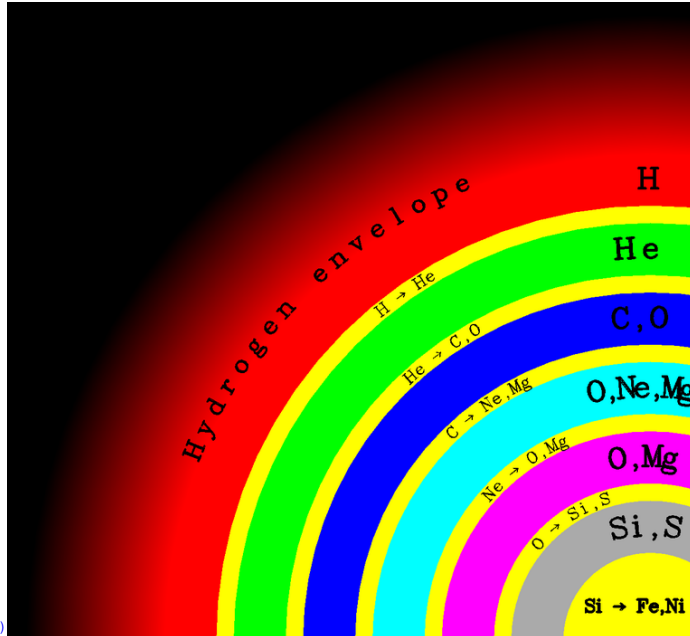
Global GW-detector
network

Einstein Telescope

LISA



Uienchil-structuur voor zware sterren



Hoe kunnen we
zwarte gaten
'horen'?

Stereolutie

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: Van der Sluys (2006)

Hoe kunnen we zwarte gaten 'horen'?

Stereolutie

Sterren

Lichte sterren

Zware sterren

Supernova's

Zwarte gaten

Ontsnappingssnelheid

Licht bij een zw. gat

Zwaartekrachten

Dubbelsterren

Dubbelsterren

Materie-overdracht

Hoe detecteren we zwarte gaten?

Zwaartekrachtsgolven

LIGO/Virgo

Michelson

interferometer

Waarnemingen

GW 150914

GW 170817

Gammaflitsers

Meer detecties

De toekomst

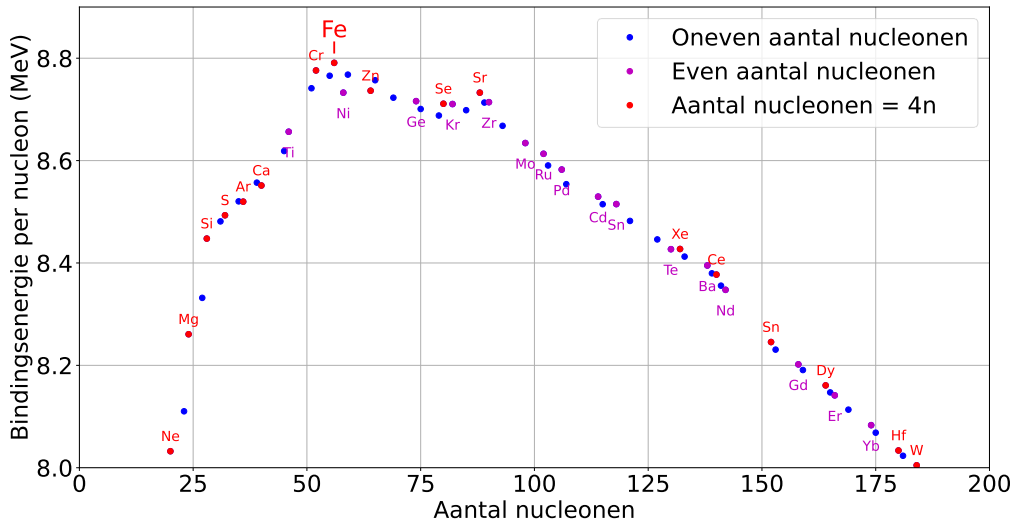
Global GW-detector network

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



Supernova

Hoe kunnen we
zwarte gaten
'horen'?

Stereolutie

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

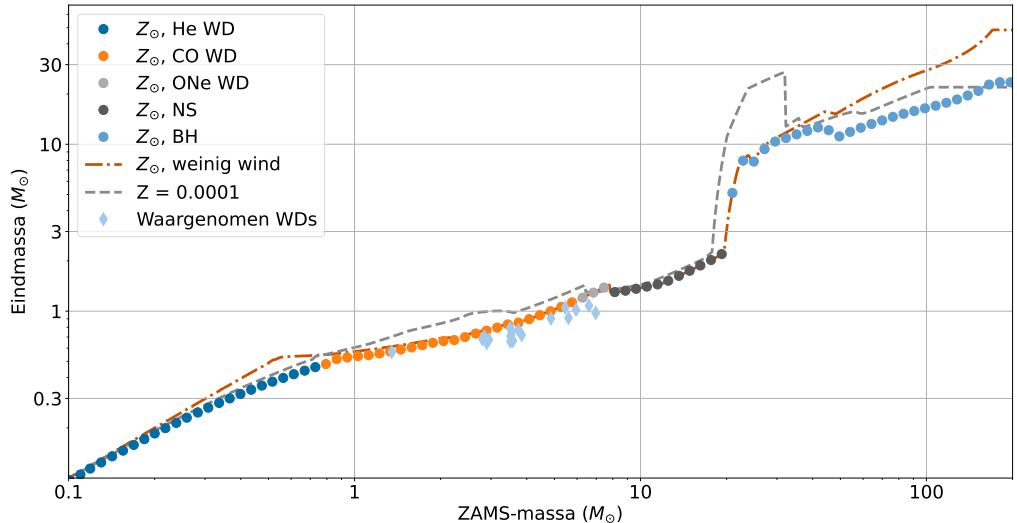
LISA



VLT/ESO



Relatie tussen ZAMS-massa en eindmassa (H8.4)



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

Hoe kunnen we
zwarte gaten
'horen'?

Stereolutie

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

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

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

Ontsnappingsnelheid op Aarde

Hoe kunnen we
zwarte gaten
'horen'?

Stereolutie

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

Gammablitsers

Meer detecties

De toekomst

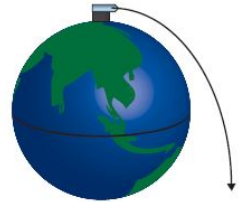
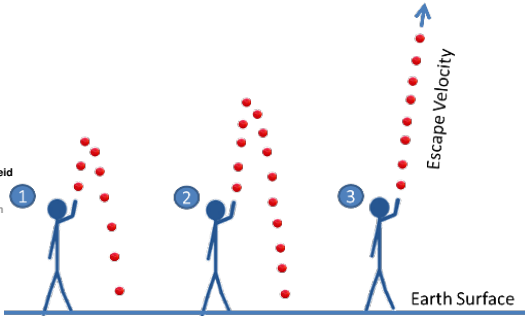
Global GW-detector
network

Einstein Telescope

LISA

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

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



Hoe kunnen we
zwarte gaten
'horen'?

Stereolutie

Sterren

Lichte sterren

Zware sterren

Supernova's

Zwarte gaten

Ontsnappingsnelheid

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

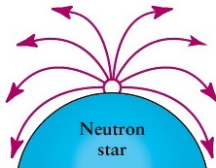
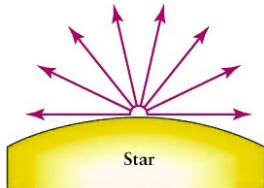
Meer detecties

De toekomst

Global GW-detector
network

Einstein Telescope

LISA



Ontsnappingsnelheid op sterren

Zon: $R \sim 700\,000\text{ km}$;

$v_{\text{esc}} \approx 618\text{ km/s}$

$R_s \sim 3\text{ km}$

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

Zwart gat: $v_{\text{esc}} > 300.000\text{ km/s}$

→ meer dan de lichtsnelheid!

$$R_s = \frac{2GM}{c^2}$$

Hoe kunnen we
zwarte gaten
'horen'?

Stereolutie

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

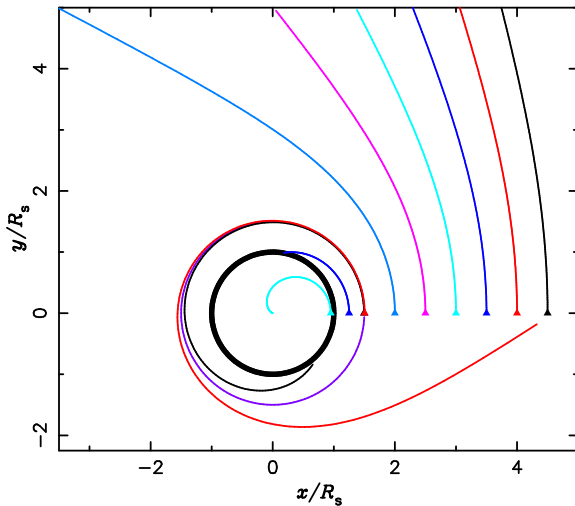
De toekomst

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 zwaartekracht lens

Hoe kunnen we
zwarte gaten
'horen'?

Stereolutie

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)

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

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

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

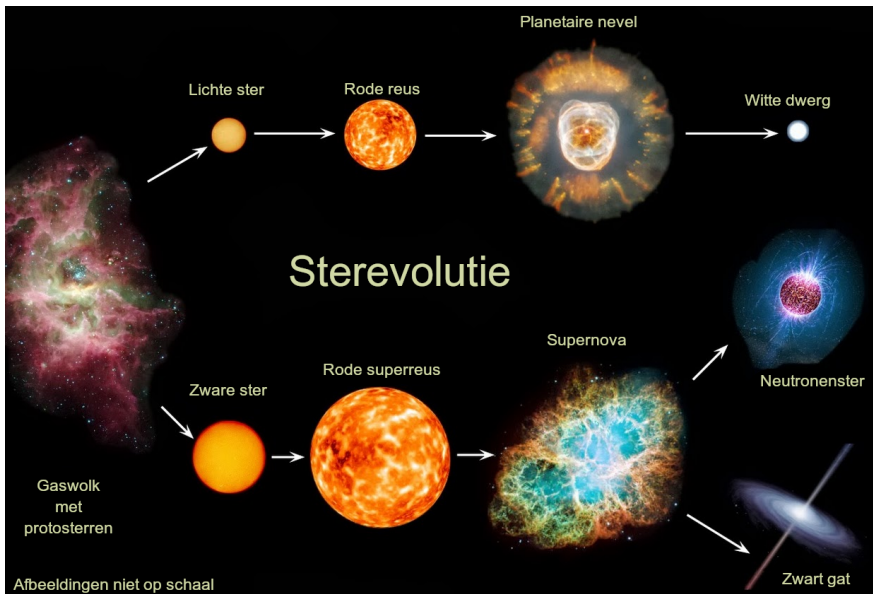
De toekomst

Global GW-detector

network

Einstein Telescope

LISA





Optische dubbelster — fysische dubbelster? ($P > 100\,000$ jaar!)

Hoe kunnen we
zwarte gaten
'horen'?

Stereolutie

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

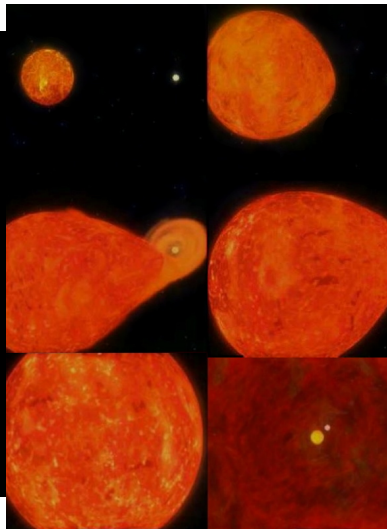
De toekomst

Global GW-detector
network

Einstein Telescope

LISA

Common envelope



Stabiele materie-overdracht



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

Hoe kunnen we
zwarte gaten
'horen'?

Stereolutie

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

Indirecte waarneming van een zwart gat: Cygnus X-1

Hoe kunnen we
zwarte gaten
'horen'?

Stereolutie

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?

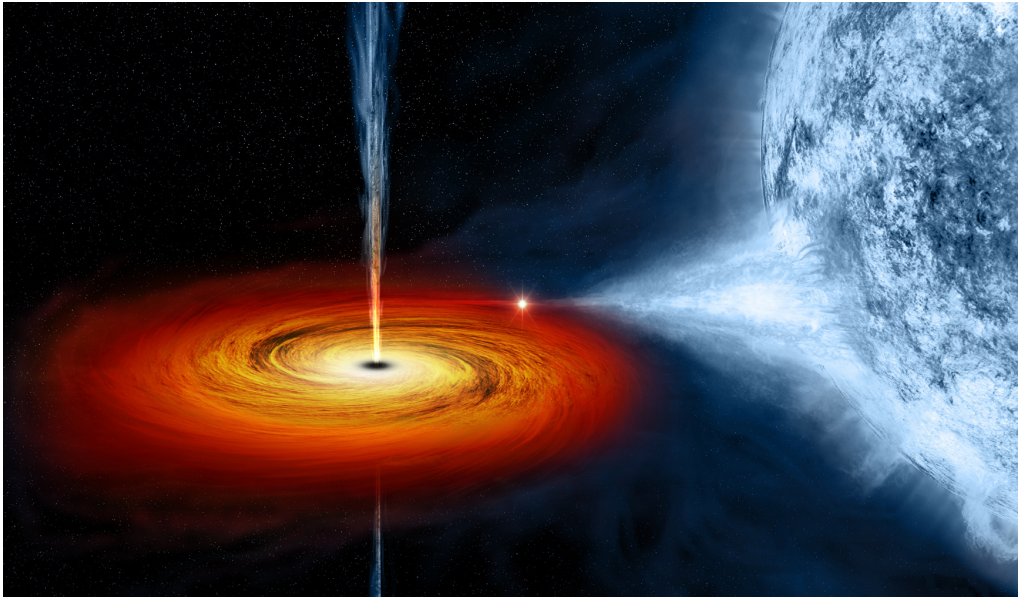
Zwaartekrachtsgolven
LIGO/Virgo
Michelson
interferometer

Waarnemingen

GW 150914
GW 170817
Gammaflitsers
Meer detecties

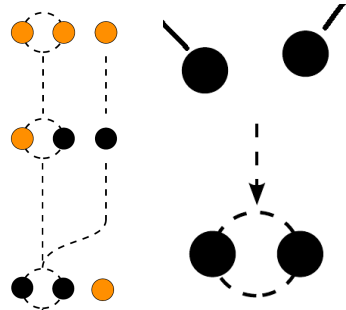
De toekomst

Global GW-detector
network
Einstein Telescope
LISA

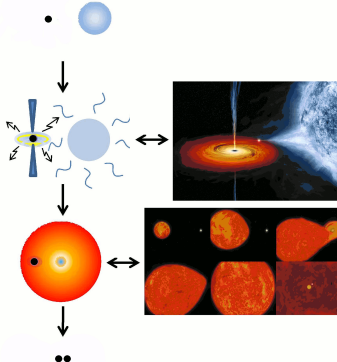
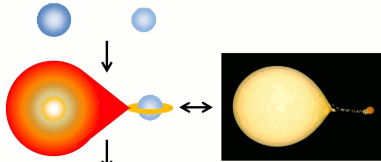


Dubbele neutronensterren/zwarte gaten

Cluster: uit dubbelster en ster



Uit dubbelster



Hoe kunnen we
zwarte gaten
'horen'?

Stereolutie

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

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

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

Hoe kunnen we zwarte gaten 'horen'?

Stereolutie

- 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

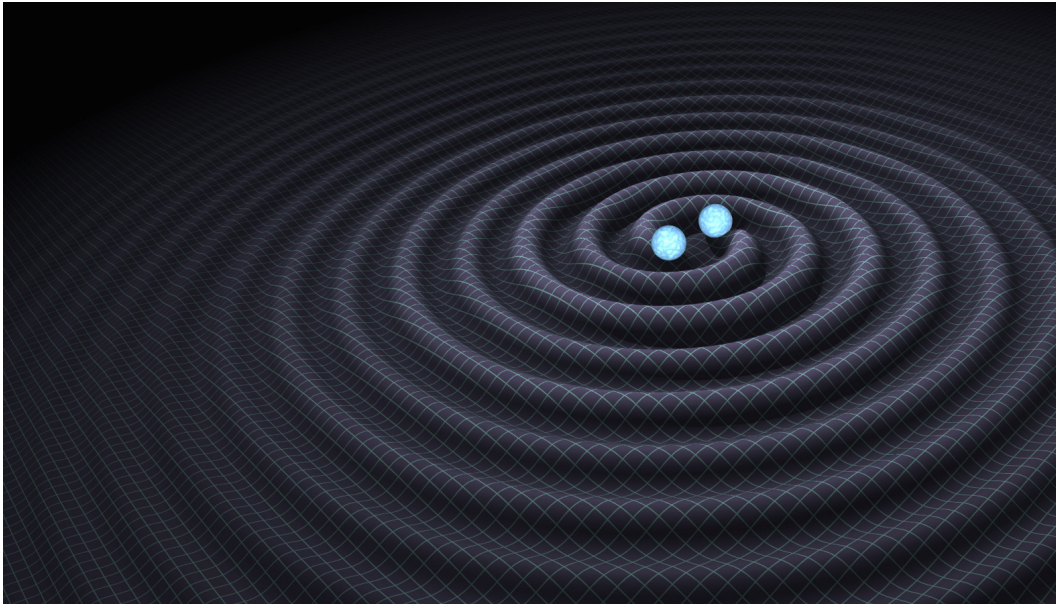
- LIGO/Virgo
- Michelson
interferometer

Waarnemingen

- GW 150914
- GW 170817
- Gammaflitsers
- Meer detecties

De toekomst

- Global GW-detector
network
- Einstein Telescope
- LISA



Hoe kunnen we
zwarte gaten
'horen'?

Stereolutie

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

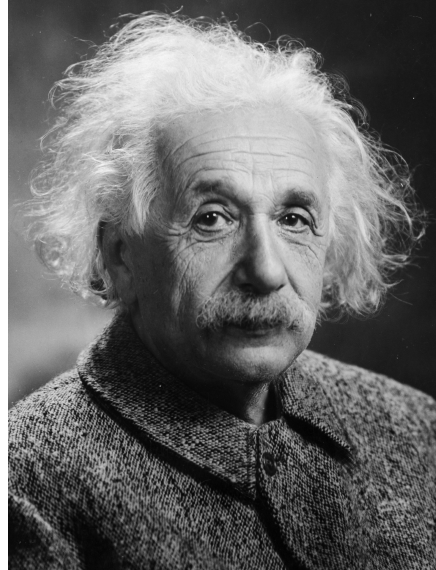
Global GW-detector
network

Einstein Telescope

LISA

Zwaartekrachtsgolven:

- “Rimpels/trillingen/golven **van** de lege ruimte”
 - niet golven in een medium (zoals watergolven, geluid)
 - niet golven **in** de ruimte (zoals licht)
- Voorspeld door Einstein's Algemene Relativiteitstheorie



Bron: [Wikipedia](#)

Waarom zwaartekrachtsgolven detecteren?

Hoe kunnen we
zwarte gaten
'horen'?

Nieuwe sterrenkunde:

Stereolutie

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

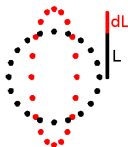
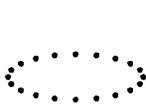
Einstein Telescope

LISA

- Geheel nieuw venster op het heelal!
 - Waarnemen hoe neutronensterren uiteengetrokken worden;
 - Neutronensterren waarnemen die imploderen tot zwart gat;
 - Zwarte gaten die neutronensterren opslokken, 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?
-
- Klopt de Relativiteitstheorie?
-
- *The unexpected . . .*

Gravitatiegolven...

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



CBC strain: $|h(t)| \equiv \frac{\delta L(t)}{L} = \frac{4}{d} \frac{G^{5/3}}{c^4} \frac{M_1 M_2}{M_T^{1/3}} (\pi f_{\text{gw}}(t))^{2/3} = \frac{4}{d} \frac{G^2}{c^4} \frac{M_1 M_2}{a_b(t)} \sim 1.5 \times 10^{-21}$

- voor een detector met $L \sim 3\text{--}4 \text{ km}$: $5\text{--}6 \times 10^{-18} \text{ m}$
 - vgl.: “ladingsdiameter” van een proton: $d_p \approx 1.7 \times 10^{-15} \text{ m}$
 - een glaasje water t.o.v. alle oceanen op Aarde!
 - 1/10 waterdruppel in het IJsselmeer

Hoe kunnen we
zwarte gaten
'horen'?

Stereolutie

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

De Virgo-detector (Italië)

Hoe kunnen we
zwarte gaten
'horen'?

Stereolutie

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

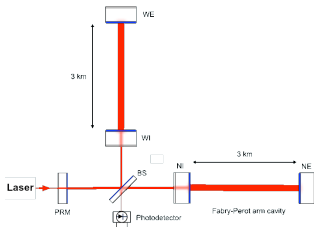
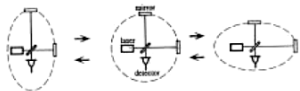
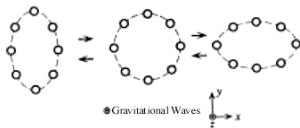
Meer detecties

De toekomst

Global GW-detector
network

Einstein Telescope

LISA

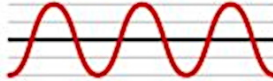


- LIGO Livingston, Louisiana (L1: 4 km)
- LIGO Hanford, Washington (H1: 4 km)
- Virgo: Pisa, Italië (V: 3 km)
- KAGRA: Japan (2023, 3 km)
- Indigo: India (2025+?, 4 km)

Interferentie van lichtgolven in een laser

Interferentie van golven

golf 1



golf 2

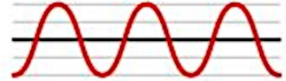


golf 1 + golf 2

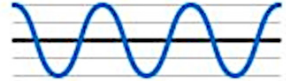


constructieve interferentie

golf 1



golf 2



golf 1 + golf 2



destructieve interferentie

Hoe kunnen we
zwarte gaten
'horen'?

Stereolutie

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

Hoe kunnen we zwarte gaten 'horen'?

Stereolutie

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

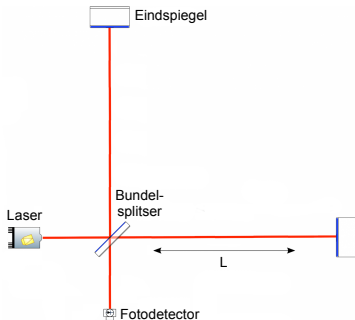
Waarnemingen

GW 150914
GW 170817
Gammaflitsers
Meer detecties

De toekomst

Global GW-detector network
Einstein Telescope
LISA

Een zwaartekrachtgolfdetector (H6.6)



- $\Delta L(t) = \Delta L_x(t) - \Delta L_y(t) = \frac{L_x}{2} h(t) - \frac{-L_y}{2} h(t) \approx L h(t) \rightarrow h \equiv \frac{\Delta L}{L}$
- 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 6.6)

Hoe kunnen we
zwarte gaten
'horen'?

Stereolutie

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

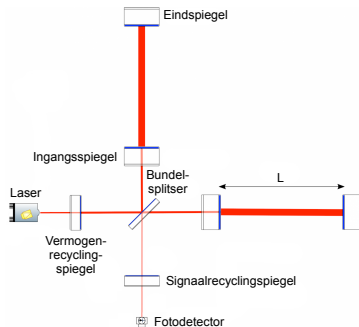
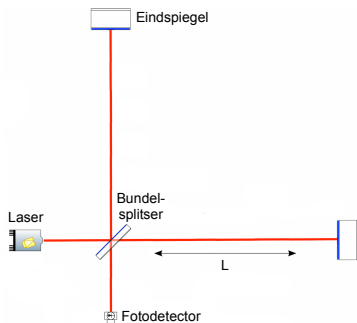
Meer detecties

De toekomst

Global GW-detector
network

Einstein Telescope

LISA



1 Twee ingangsspiegels in de armen $\rightarrow$ **Fabry-Pérot-holtes**: $L' \sim 250\text{--}300 L$

- minder shot noise, maar meer **ruis door stralingsdruk** bij lage frequentie
- $\rightarrow h_{\min} \rightarrow \sim h_{\min}/250$

2 **Vermogenrecyclingspiegel** bij laser: $P'_L \sim 50 P_L \rightarrow h_{\min} \rightarrow \sim h_{\min}/3$

3 **Signaalrecyclingspiegel** bij fotodiode: kies optimale f_{gw}

$$\rightarrow S_n^{1/2}(f) \sim 3 \times 10^{-24} / \sqrt{\text{Hz}} \propto h_{\min} \sim 3 \times 10^{-23} (@100 \text{ Hz}) \rightarrow \text{genoeg!}$$

Een zwaartekrachtgolfdetector (H 12.6)

Hoe kunnen we
zwarte gaten
'horen'?

Stereolutie
Sterren
Lichte sterren
Zware sterren
Supernova's

Zwarte gaten
Ontsnappingssnelheid
Licht bij een zw. gat
Zwaartekrachtlenzen

Dubbelsterren
Dubbelsterren
Materie-overdracht

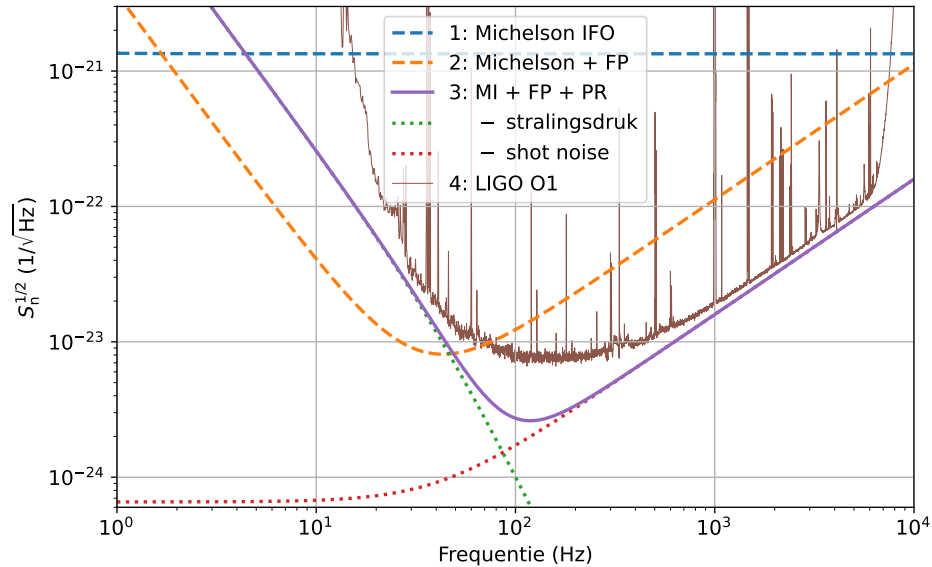
Hoe detecteren
we zwarte gaten?
Zwaartekrachtsgolven
LIGO/Virgo

Michelson
interferometer

Waarnemingen

GW 150914
GW 170817
Gammaflitsers
Meer detecties

De toekomst
Global GW-detector
network
Einstein Telescope
LISA



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

Het signaal van een inspiral, merger en ringdown (H6.5)

Hoe kunnen we
zwarte gaten
'horen'?

Stereolutie

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

Waarnezingen

GW 150914

GW 170817

Gammaflitsers

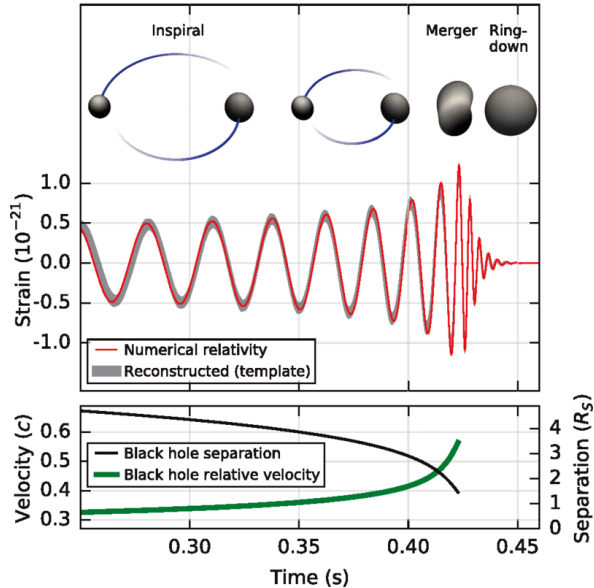
Meer detecties

De toekomst

Global GW-detector
network

Einstein Telescope

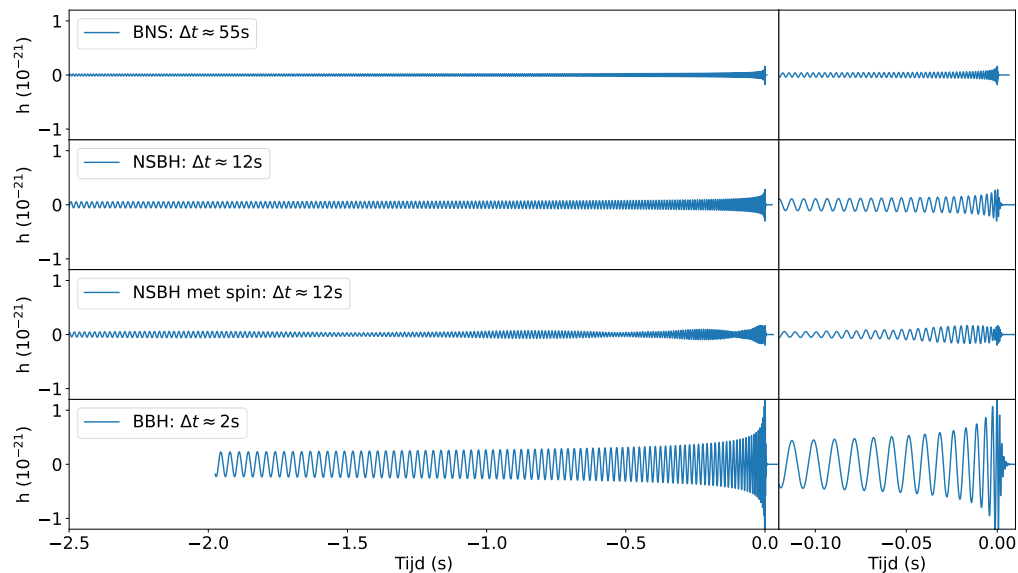
LISA



Het signaal van een inspiral, merger en ringdown (H6.5)

Hoe kunnen we
zwarte gaten
'horen'?

- Stereolutie
- 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



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

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

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

Hoe kunnen we
zwarte gaten
'horen'?

Stereolutie
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

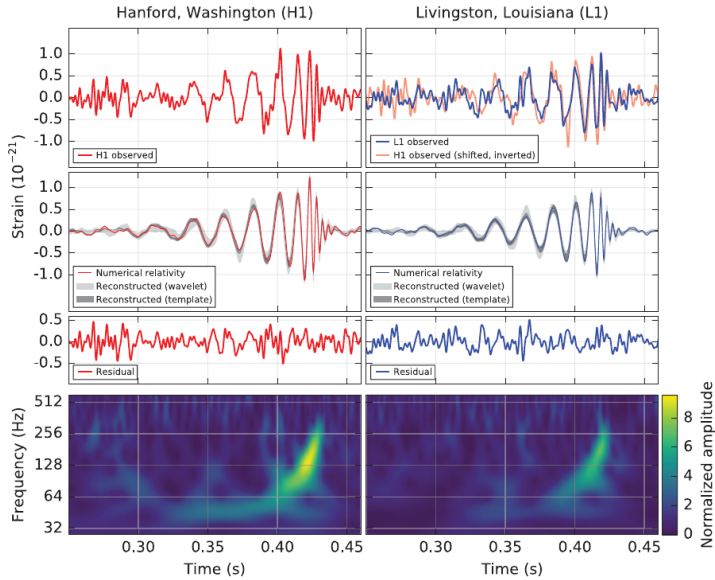
Waarnemingen
GW 150914
GW 170817
Gammaflitsers
Meer detecties

De toekomst
Global GW-detector
network
Einstein Telescope
LISA

In de ruwe data zitten:

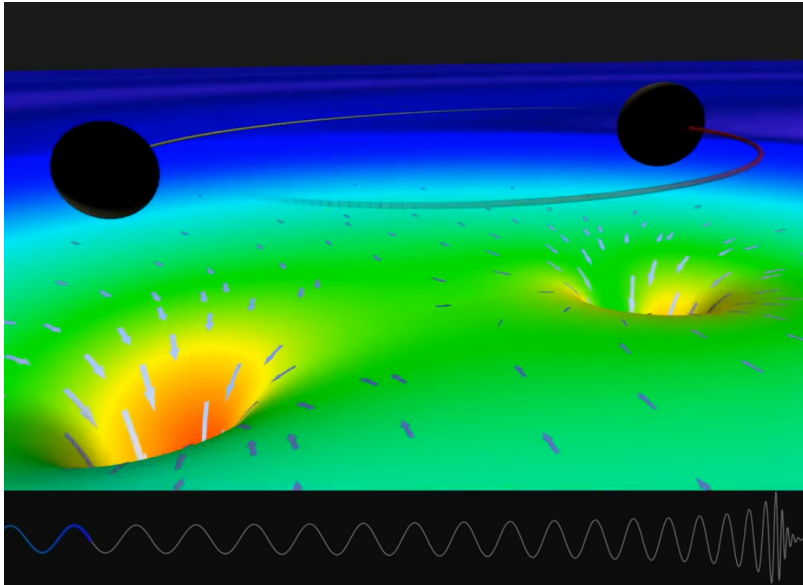
- 1 GW signaal
- 2 Ruis!

De eerste detectie: GW 150914



Bron: ligo.org

Bron van GW 150914: dubbel zwart gat



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.black-holes.org (aangepast)

Hoe kunnen we zwarte gaten 'horen'?

Stereolutie

- 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?

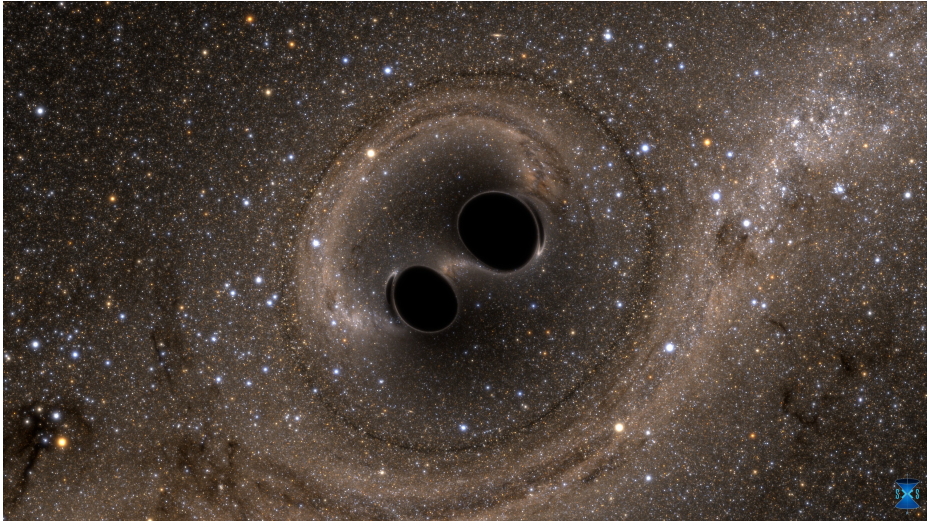
- Zwaartekrachtsgolven
- LIGO/Virgo
- Michelson
interferometer

Waarnemingen

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

De toekomst

- Global GW-detector
network
- Einstein Telescope
- LISA



Bron: www.black-holes.org (aangepast)

Hoe kunnen we zwarte gaten 'horen'?

Stereolutie

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

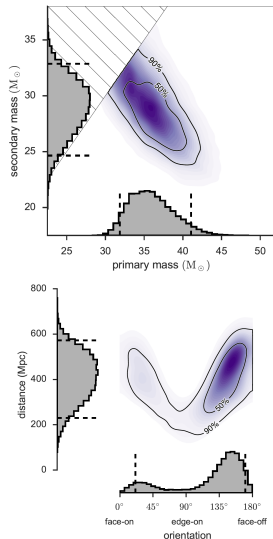
Dubbel zwart gat:

- $M_1 = 32 - 41 M_{\odot}$
- $M_2 = 25 - 33 M_{\odot}$
- Afstand: $\sim 0.75 - 1.86$ miljard lichtjaar
- Massa resulterend 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](#)

Bron van GW 150914

PDFs:



Hoe kunnen we zwarte gaten 'horen'?

Stereolutie

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

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

Hoe kunnen we
zwarte gaten
'horen'?

Stereolutie

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?

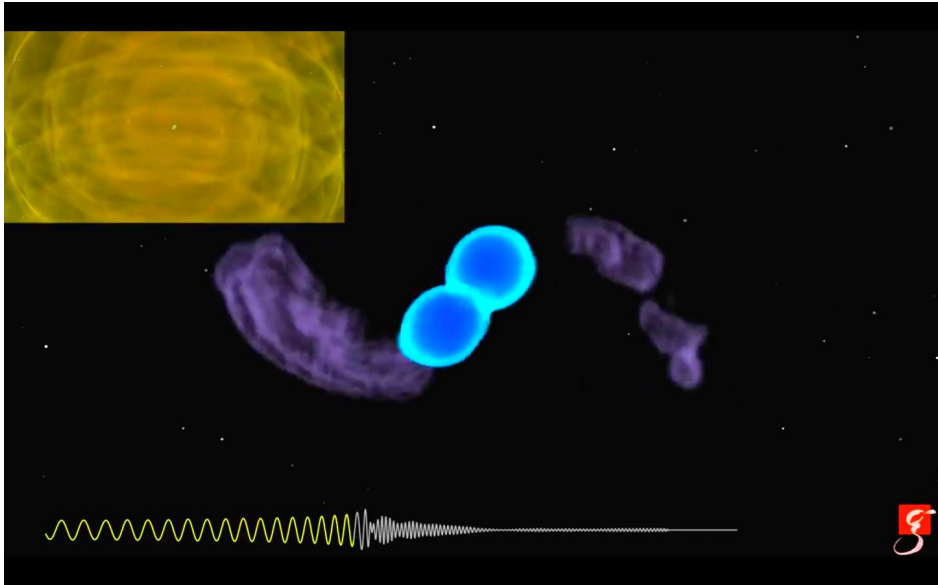
Zwaartekrachtsgolven
LIGO/Virgo
Michelson
interferometer

Waarnemingen

GW 150914
GW 170817
Gammaflitsers
Meer detecties

De toekomst

Global GW-detector
network
Einstein Telescope
LISA



GW 170817: optische tegenhanger!

Hoe kunnen we
zwarte gaten
'horen'?

Stereolutie

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

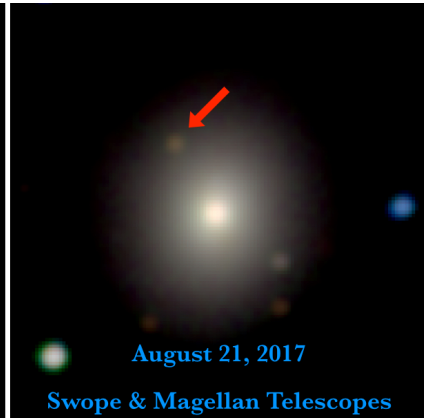
Meer detecties

De toekomst

Global GW-detector
network

Einstein Telescope

LISA



Bron: ligo.org

Electromagnetische waarnemingen

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

GW 170817: hemelpositie

Hoe kunnen we
zwarte gaten
'horen'?

Stereolutie

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?

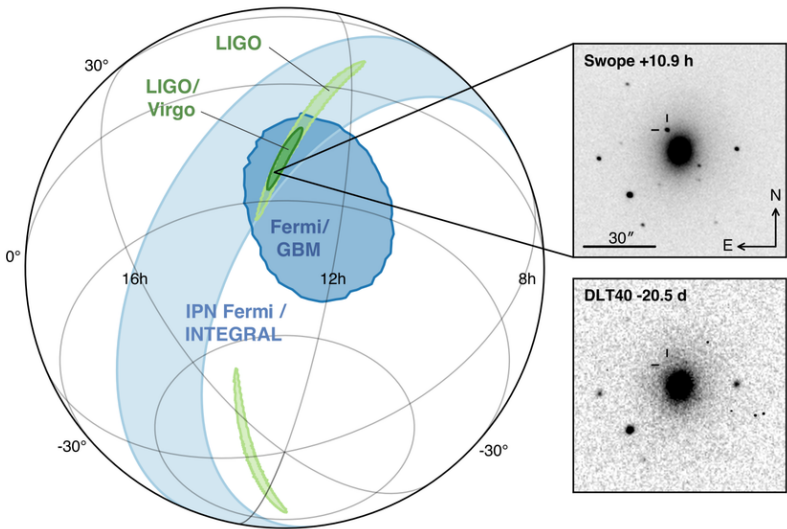
Zwaartekrachtsgolven
LIGO/Virgo
Michelson
interferometer

Waarnemingen

GW 150914
GW 170817
Gammaflitsers
Meer detecties

De toekomst

Global GW-detector
network
Einstein Telescope
LISA



Bron: [Abbott et al. \(2017\)](#)

Short-hard gamma-ray bursts (shGRBs)

Hoe kunnen we
zwarte gaten
'horen'?

Stereolutie

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

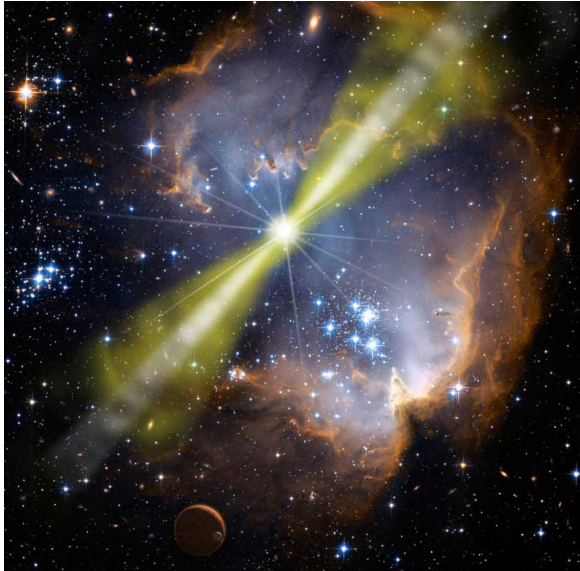
Waarnemingen

GW 150914
GW 170817

Gammaflitsers
Meer detecties

De toekomst

Global GW-detector
network
Einstein Telescope
LISA



Artist's impression van een GRB (bron: NASA)

Gammaflitsers:

- ~ 2 per dag
- $\sim 25\%$ short GRB
- duur: ~ 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

Hoe kunnen we
zwarte gaten
'horen'?

Stereolutie

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?

Zwaartekrachtgolven

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	zwarte 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

Hoe kunnen we zwarte gaten 'horen'?

Stereolutie

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

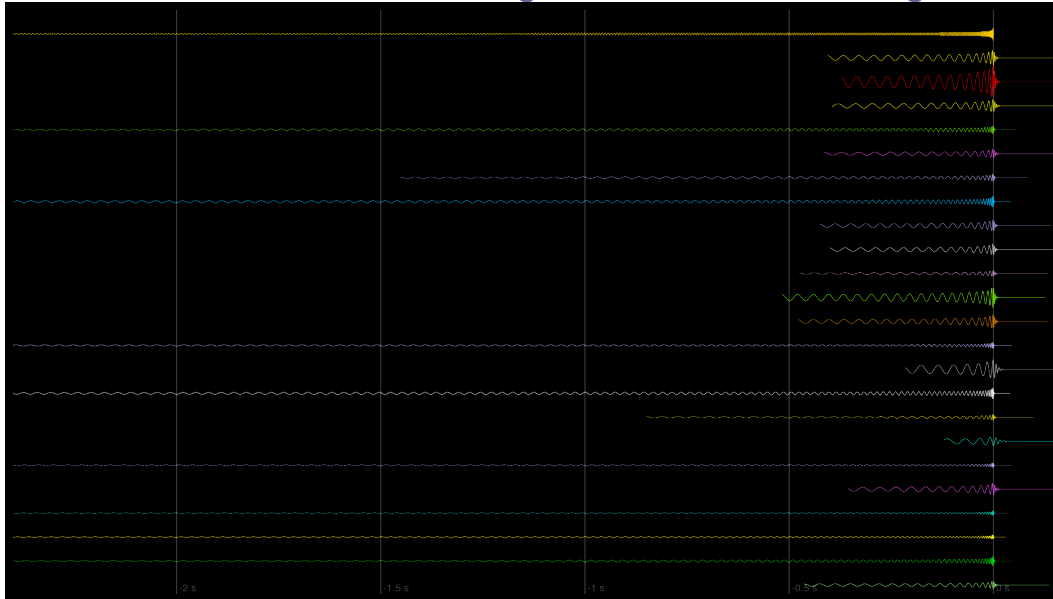
Meer detecties

De toekomst

Global GW-detector
network

Einstein Telescope

LISA



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

Hoe kunnen we
zwarte gaten
'horen'?

Stereolutie

Sterren

Lichte sterren

Zware sterren

Supernova's

Zwarte gaten

Ontsnappingsnelheid

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

Gammalitsers

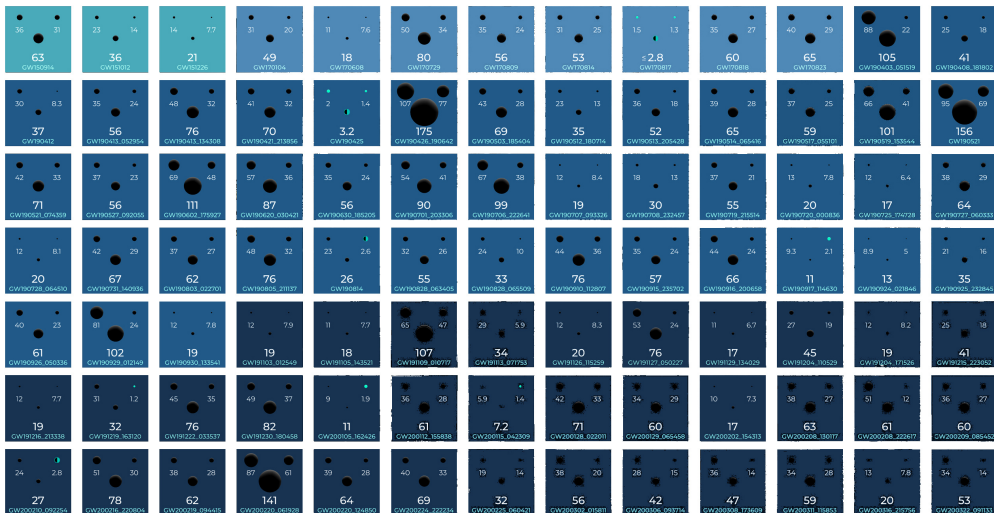
Meer detecties

De toekomst

Global GW-detector
network

Einstein Telescope

LISA



Bron: www.ligo.caltech.edu

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

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

Hoe kunnen we
zwarte gaten
'horen'?

Stereolutie

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?

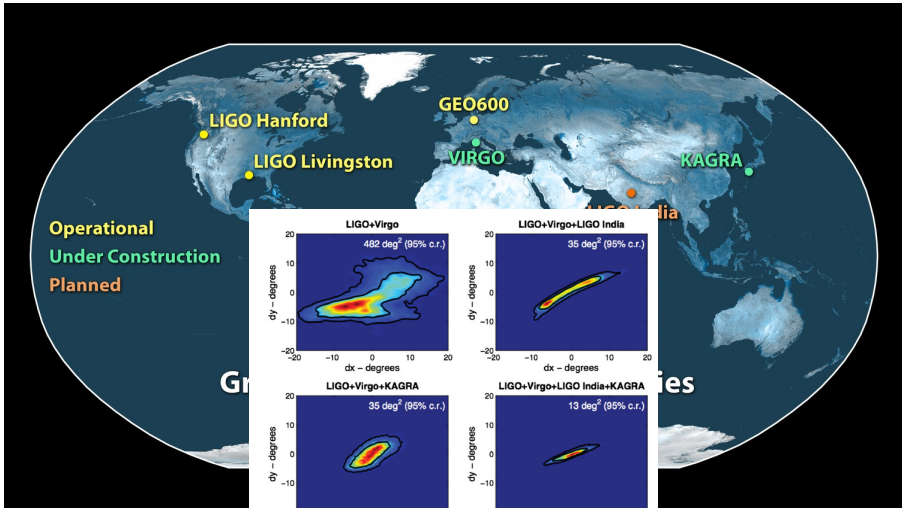
Zwaartekrachtsgolven
LIGO/Virgo
Michelson
interferometer

Waarnemingen

GW 150914
GW 170817
Gammaflitsers
Meer detecties

De toekomst

Global GW-detector
network
Einstein Telescope
LISA



Hoe kunnen we zwarte gaten 'horen'?

Stereolutie

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?

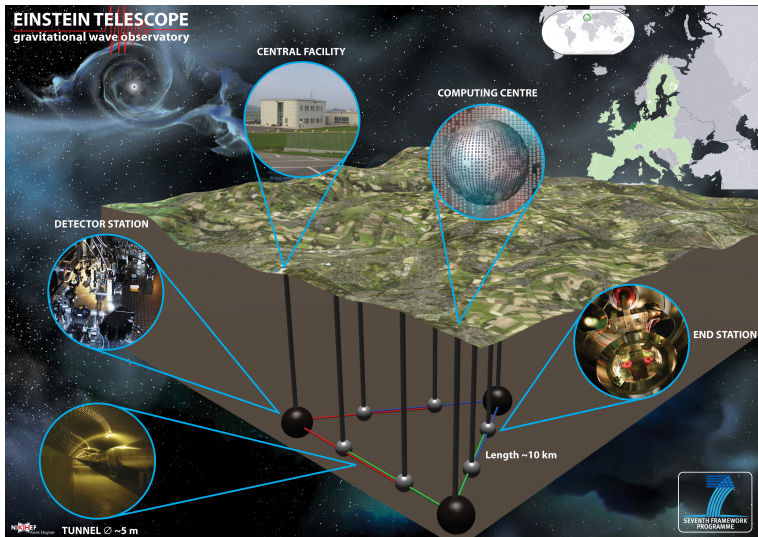
Zwaartekrachtsgolven
LIGO/Virgo
Michelson interferometer

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?
- NI-B-D of It?
- Tegenhanger VS: Cosmic Explorer

Laser Interferometer Space Antenna (LISA)

Hoe kunnen we
zwarte gaten
'horen'?

Stereolutie

Sterren
Lichte sterren
Zware sterren
Supernova's

Zwarte gaten

Ontsnappingsnelheid
Licht bij een zw. gat
Zwaartekrachtlenzen

Dubbelsterren

Dubbelsterren
Materie-overdracht

Hoe detecteren we zwarte gaten?

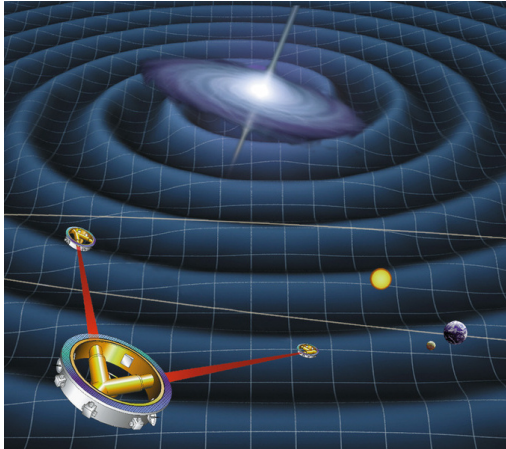
Zwaartekrachtsgolven
LIGO/Virgo
Michelson
interferometer

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
- Driehoeksofstelling, armen van 1 miljoen km
- 1 Watt lasers
- Lage frequenties: 0.1 mHz – 1 Hz ($P \sim 1 \text{ s} - 3 \text{ u}$)
- Missieduur 5+ jaar
- LISA Pathfinder (december 2015) heeft technologie getest
- Lancering 2037+?

Hoe kunnen we
zwarte gaten
'horen'?

Stereolutie

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

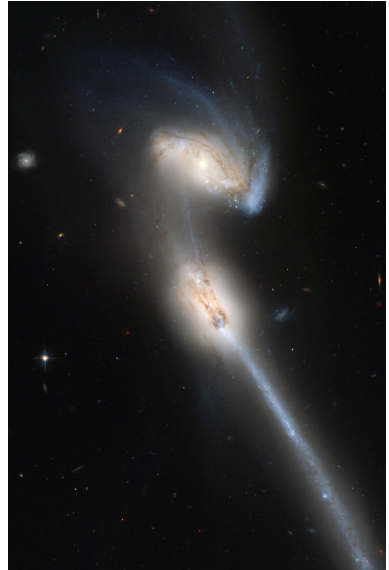
LISA

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: $\sim 1 - 10\%$



Hoe kunnen we
zwarte gaten
'horen'?



<https://hemel.waarnemen.com>

Stereolutie

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

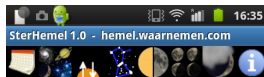
De toekomst

Global GW-detector
network

Einstein Telescope

LISA

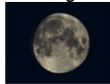
- Actuele, eenvoudig en lastiger waar te nemen hemelverschijnselen
- Zichtbaarheid van Zon, Maan, planeten, meteoren, kometen, deepsky, ISS, ...
- Astrokalenders, hemelkaarten, maanfasen, hemel vannacht, waarneemweer, tabellen
- Apps (Android/Apple), Facebook, Twitter
- ~ 10 000 pagina's; **Geen reclame**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