

Hoe kunnen we zwarte gaten 'horen'?



Hoe kunnen we zwarte gaten 'horen'?

Golven!

Golven in een vijver

Wat is een zwart gat?

Ontsnappingsnelheid

Licht bij een zw. gat

Zwaartekrachtslenzen

Sterren en sterevolutie

Sterren

Lichte sterren

Zware sterren

Supernova's

Hoe ontstaan zwarte gaten?

Evolutie van enkele sterren

Dubbelsterevolutie

Hoe detecteren we zwarte gaten?

Zwaartekrachtsgolven

LIGO/Virgo

Waarnemingen

GW 150914

GW 170817

Gammaflitsers

De toekomst

Global GW-detector network

1

Golven!

- Golven in een vijver

2

Wat is een zwart gat?

- Ontsnappingsnelheid
- Licht bij een zwart gat
- Zwaartekrachtslenzen

3

Sterren en sterevolutie

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

4

Hoe ontstaan zwarte gaten?

- Evolutie van enkele sterren

- Dubbelsterevolutie en materie-overdracht

5

Hoe detecteren we zwarte gaten?

- Zwaartekrachtsgolven
- LIGO/Virgo

6

Waarnemingen

- GW 150914
- GW 170817
- Gammaflitsers

7

De toekomst

- Global GW-detector network
- Einstein Telescope
- LISA



Hoe kunnen we zwarte gaten 'horen'?

Golven!

Golven in een vijver

Wat is een zwart gat?

Ontsnappingsnelheid

Licht bij een zw. gat

Zwaartekrachtslenzen

Sterren en sterevolutie

Sterren

Lichte sterren

Zware sterren

Supernova's

Hoe ontstaan zwarte gaten?

Evolutie van enkele sterren

Dubbelsterevolutie

Hoe detecteren we zwarte gaten?

Zwaartekrachtsgolven

LIGO/Virgo

Waarnemingen

GW 150914

GW 170817

Gammaflitsers

De toekomst

Global GW-detector network

1

Golven!

• Golven in een vijver

2

Wat is een zwart gat?

• Ontsnappingsnelheid

• Licht bij een zwart gat

• Zwaartekrachtslenzen

3

Sterren en sterevolutie

• Sterren

• Evolutie van lichte sterren

• Evolutie van zware sterren

• Supernova's

4

Hoe ontstaan zwarte gaten?

• Evolutie van enkele sterren

5

Hoe detecteren we zwarte gaten?

• Zwaartekrachtsgolven

• LIGO/Virgo

6

Waarnemingen

• GW 150914

• GW 170817

• Gammaflitsers

7

De toekomst

• Global GW-detector network

• Einstein Telescope

• LISA



Golven in een vijver: wat is hier gebeurd?

Hoe kunnen we
zwarte gaten
'horen'?

Golven!

Golven in een vijver

Wat is een zwart
gat?

Ontsnappingsnelheid

Licht bij een zw. gat

Zwaartekrachtslenzen

Sterren en
sterevolutie

Sterren

Lichte sterren

Zware sterren

Supernova's

Hoe ontstaan
zwarte gaten?

Evolutie van enkele
sterren

Dubbelsterevolutie

Hoe detecteren
we zwarte gaten?

Zwaartekrachtsgolven

LIGO/Virgo

Waarnemingen

GW 150914

GW 170817

Gammalitsers

De toekomst

Global GW-detector
network



Golven in een vijver: de oplossing!



**Hoe kunnen we
zwarte gaten
'horen'?**

Golven!

Golven in een vijver

**Wat is een zwart
gat?**

Ontsnappingsnelheid

Licht bij een zw. gat

Zwaartekrachtslenzen

**Sterren en
sterevolutie**

Sterren

Lichte sterren

Zware sterren

Supernova's

**Hoe ontstaan
zwarte gaten?**

Evolutie van enkele
sterren

Dubbelsterevolutie

**Hoe detecteren
we zwarte gaten?**

Zwaartekrachtsgolven

LIGO/Virgo

Waarnemingen

GW 150914

GW 170817

Gammalitsers

De toekomst

Global GW-detector
network

Golven meten aan de rand van de vijver!

Hoe kunnen we zwarte gaten 'horen'?

Golven!

Golven in een vijver

Wat is een zwart gat?

Ontsnappingsnelheid

Licht bij een zw. gat

Zwaartekrachtlenzen

Sterren en sterevolutie

Sterren

Lichte sterren

Zware sterren

Supernova's

Hoe ontstaan zwarte gaten?

Evolutie van enkele sterren

Dubbelsterevolutie

Hoe detecteren we zwarte gaten?

Zwaartekrachtsgolven

LIGO/Virgo

Waarnemingen

GW 150914

GW 170817

Gammalitsers

De toekomst

Global GW-detector network

Wat kunnen we meten?

- Hoeveel golven zijn er?
- Hoe lang duren ze?
- Hoe hoog zijn de golven?
- Uit welke richting komen de golven?
- Meet op meerdere punten!

Wat kunnen we leren

- Was het object groot/klein?
- Was het zwaar/licht?
 - was het een steen?
- Viel het, of werd het gegooid?
 - kunnen we het verschil zien tussen een grote steen die viel en een kleine steen die hard werd gegooid?
- In welke richting in de vijver gebeurde het?
- Hoe ver weg in de vijver gebeurde het?

Hoe kunnen we zwarte gaten 'horen'?

Golven!

Golven in een vijver

Wat is een zwart gat?

Ontsnappingsnelheid

Licht bij een zw. gat

Zwaartekrachtslenzen

Sterren en sterevolutie

Sterren

Lichte sterren

Zware sterren

Supernova's

Hoe ontstaan zwarte gaten?

Evolutie van enkele sterren

Dubbelsterevolutie

Hoe detecteren we zwarte gaten?

Zwaartekrachtsgolven

LIGO/Virgo

Waarnemingen

GW 150914

GW 170817

Gammaflitsers

De toekomst

Global GW-detector network

1

Golven!

- Golven in een vijver

2

Wat is een zwart gat?

- Ontsnappingsnelheid
- Licht bij een zwart gat
- Zwaartekrachtslenzen

3

Sterren en sterevolutie

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

4

Hoe ontstaan zwarte gaten?

- Evolutie van enkele sterren

5

Hoe detecteren we zwarte gaten?

- Zwaartekrachtsgolven
- LIGO/Virgo

6

Waarnemingen

- GW 150914
- GW 170817
- Gammaflitsers

7

De toekomst

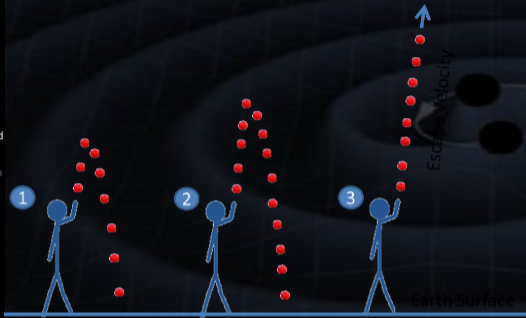
- Global GW-detector network
- Einstein Telescope
- LISA



Ontsnappingsnelheid op Aarde

40.300 km/u

11,2 km/s



Hoe kunnen we zwarte gaten 'horen'?

Golven!

Golven in een vijver

Wat is een zwart gat?

Ontsnappingsnelheid

Licht bij een zw. gat

Zwaartekrachtslenzen

Sterren en sterevolutie

Sterren

Lichte sterren

Zware sterren

Supernova's

Hoe ontstaan zwarte gaten?

Evolutie van enkele sterren

Dubbelsterevolutie

Hoe detecteren we zwarte gaten?

Zwaartekrachtsgolven

LIGO/Virgo

Waarnemingen

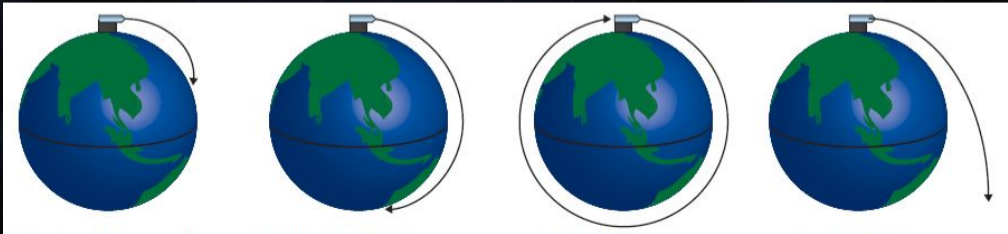
GW 150914

GW 170817

Gammalitsers

De toekomst

Global GW-detector network



Hoe kunnen we zwarte gaten 'horen'?

Golven!

Golven in een vijver

Wat is een zwart gat?

Ontsnappingsnelheid

Licht bij een zw. gat

Zwaartekrachtslenzen

Sterren en sterevolutie

Sterren

Lichte sterren

Zware sterren

Supernova's

Hoe ontstaan zwarte gaten?

Evolutie van enkele sterren

Dubbelsterevolutie

Hoe detecteren we zwarte gaten?

Zwaartekrachtsgolven

LIGO/Virgo

Waarnemingen

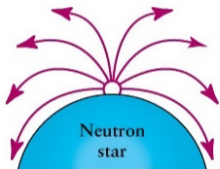
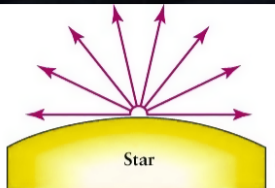
GW 150914

GW 170817

Gammalitsers

De toekomst

Global GW-detector network

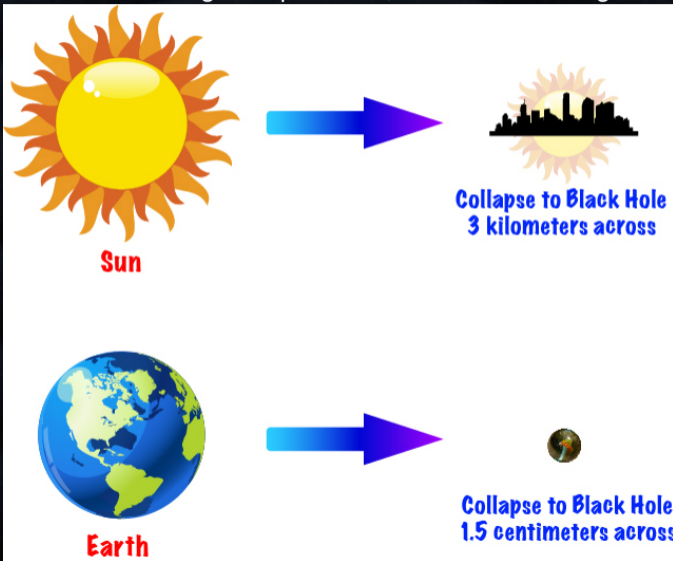


Zon: 618 km/s

Neutronenster: \sim
100.000 km/s

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

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



Hoe kunnen we zwarte gaten 'horen'?

Golven!

Golven in een vijver

Wat is een zwart gat?

Ontsnappingsnelheid

Licht bij een zw. gat

Zwaartekrachtlenzen

Sterren en sterevolutie

Sterren

Lichte sterren

Zware sterren

Supernova's

Hoe ontstaan zwarte gaten?

Evolutie van enkele sterren

Dubbelsterevolutie

Hoe detecteren we zwarte gaten?

Zwaartekrachtgolven

LIGO/Virgo

Waarnemingen

GW 150914

GW 170817

Gammalitsers

De toekomst

Global GW-detector network

Licht in de buurt van een zwart gat

Hoe kunnen we zwarte gaten 'horen'?

Golven!

Golven in een vijver

Wat is een zwart gat?

Ontsnappingsnelheid

Licht bij een zw. gat

Zwaartekrachtslenzen

Sterren en sterevolutie

Sterren

Lichte sterren

Zware sterren

Supernova's

Hoe ontstaan zwarte gaten?

Evolutie van enkele sterren

Dubbelsterevolutie

Hoe detecteren we zwarte gaten?

Zwaartekrachtsgolven

LIGO/Virgo

Waarnemingen

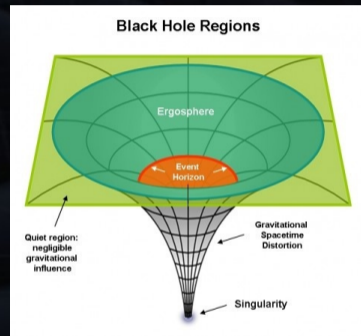
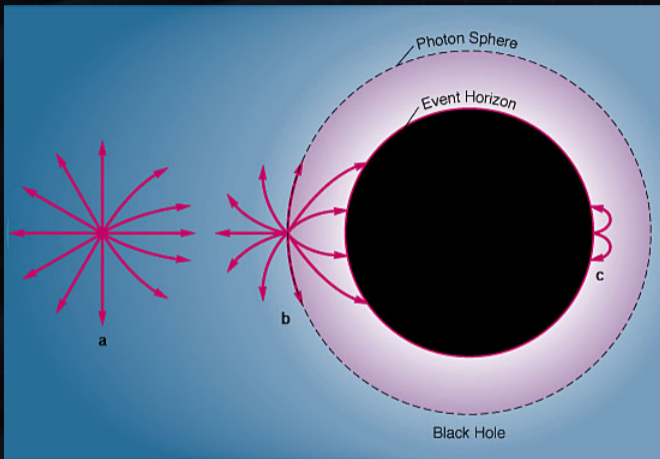
GW 150914

GW 170817

Gammalitsers

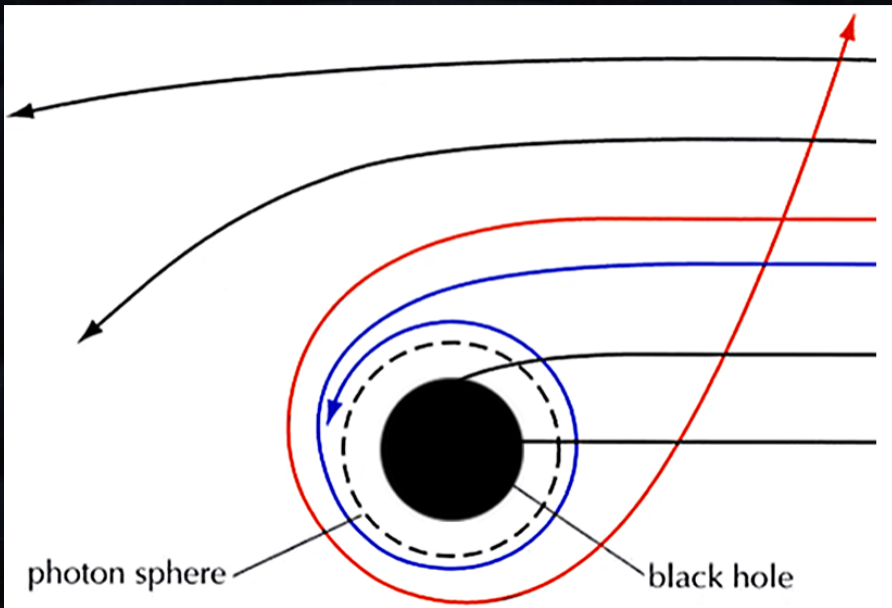
De toekomst

Global GW-detector network



- **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.

Licht in de buurt van een zwart gat



Hoe kunnen we
zwarte gaten
'horen'?

Golven!

Golven in een vijver

Wat is een zwart
gat?

Ontsnappingsnelheid

Licht bij een zw. gat

Zwaartekrachtslenzen

Sterren en
sterevolutie

Sterren

Lichte sterren

Zware sterren

Supernova's

Hoe ontstaan
zwarte gaten?

Evolutie van enkele
sterren

Dubbelsterevolutie

Hoe detecteren
we zwarte gaten?

Zwaartekrachtsgolven

LIGO/Virgo

Waarnemingen

GW 150914

GW 170817

Gammalitsers

De toekomst

Global GW-detector
network

Zwart gat als zwaartekrachtslens



**Hoe kunnen we
zwarte gaten
'horen'?**

Golven!

Golven in een vijver

**Wat is een zwart
gat?**

Ontsnappingsnelheid

Licht bij een zw. gat

Zwaartekrachtslenzen

**Sterren en
sterevolutie**

Sterren

Lichte sterren

Zware sterren

Supernova's

**Hoe ontstaan
zwarte gaten?**

Evolutie van enkele
sterren

Dubbelsterevolutie

**Hoe detecteren
we zwarte gaten?**

Zwaartekrachtsgolven

LIGO/Virgo

Waarnemingen

GW 150914

GW 170817

Gammalitsers

De toekomst

Global GW-detector
network

Hoe kunnen we zwarte gaten 'horen'?

Golven!

Golven in een vijver

Wat is een zwart gat?

Ontsnappingsssnelheid

Licht bij een zw. gat

Zwaartekrachtslenzen

Sterren en sterevolutie

Sterren

Lichte sterren

Zware sterren

Supernova's

Hoe ontstaan zwarte gaten?

Evolutie van enkele sterren

Dubbelsterevolutie

Hoe detecteren we zwarte gaten?

Zwaartekrachtsgolven

LIGO/Virgo

Waarnemingen

GW 150914

GW 170817

Gammaflitsers

De toekomst

Global GW-detector network

1

Golven!

• Golven in een vijver

2

Wat is een zwart gat?

• Ontsnappingsssnelheid

• Licht bij een zwart gat

• Zwaartekrachtslenzen

3

Sterren en sterevolutie

• Sterren

• Evolutie van lichte sterren

• Evolutie van zware sterren

• Supernova's

4

Hoe ontstaan zwarte gaten?

• Evolutie van enkele sterren

5

Hoe detecteren we zwarte gaten?

• Zwaartekrachtsgolven

• LIGO/Virgo

6

Waarnemingen

• GW 150914

• GW 170817

• Gammaflitsers

7

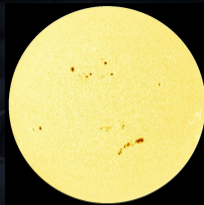
De toekomst

• 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'?

Golven!

Golven in een vijver

Wat is een zwart
gat?

Ontsnappingsnelheid

Licht bij een zw. gat

Zwaartekrachtlenzen

Sterren en
sterevolutie

Sterren

Lichte sterren

Zware sterren

Supernova's

Hoe ontstaan
zwarte gaten?

Evolutie van enkele
sterren

Dubbelsterevolutie

Hoe detecteren
we zwarte gaten?

Zwaartekrachtsgolven

LIGO/Virgo

Waarnemingen

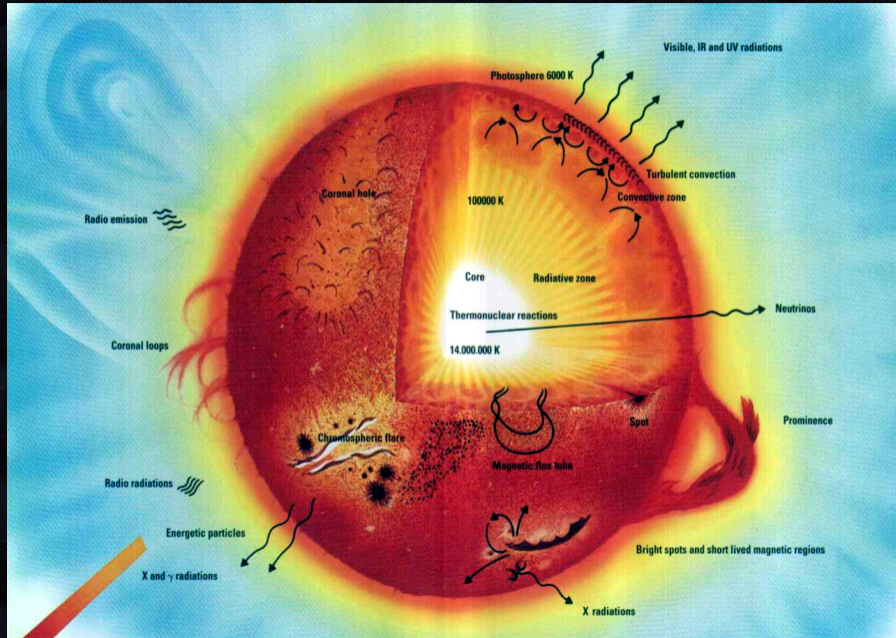
GW 150914

GW 170817

Gammalitsers

De toekomst

Global GW-detector
network



Hoe kunnen we zwarte gaten 'horen'?

Golven!

Golven in een vijver

Wat is een zwart gat?

Ontsnappingsnelheid

Licht bij een zw. gat

Zwaartekrachtlenzen

Sterren en sterevolutie

Sterren

Lichte sterren

Zware sterren

Supernova's

Hoe ontstaan zwarte gaten?

Evolutie van enkele sterren

Dubbelsterevolutie

Hoe detecteren we zwarte gaten?

Zwaartekrachtgolven

LIGO/Virgo

Waarnemingen

GW 150914

GW 170817

Gammalitsers

De toekomst

Global GW-detector network

4 protonen



Helium



Licht!



Hoe kunnen we zwarte gaten 'horen'?

Golven!

Golven in een vijver

Wat is een zwart gat?

Ontsnappingsnelheid

Licht bij een zw. gat

Zwaartekrachtslenzen

Sterren en sterevolutie

Sterren

Lichte sterren

Zware sterren

Supernova's

Hoe ontstaan zwarte gaten?

Evolutie van enkele sterren

Dubbelsterevolutie

Hoe detecteren we zwarte gaten?

Zwaartekrachtsgolven

LIGO/Virgo

Waarnemingen

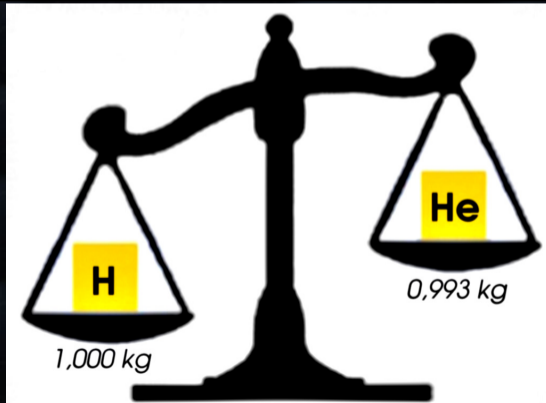
GW 150914

GW 170817

Gammalitsers

De toekomst

Global GW-detector network



Eigenschappen van hoofdreekssterren

	M (M_{\odot})	t (Mjr)	R (R_{\odot})	L (L_{\odot})	T_o ($^{\circ}\text{C}$)	T_c (miljn $^{\circ}\text{C}$)	Aantal (t.o.v. 1 M_{\odot})
Golven!							
Golven in een vijver							
Wat is een zwart gat?	0,5	52 600	0,50	0,05	4138	9,8	7,07
Ontsnappingssnelheid	0,8	11 600	0,79	0,38	5380	13,4	2,34
Licht bij een zw. gat							
Zwaartekrachtslenzen	1,0	4900	1,01	1,05	6080	15,9	1,00
Sterren en sterevolutie							
Sterren	1,5	1660	1,95	6,75	6930	20,9	0,131
Lichte sterren							
Zware sterren	2,0	582	2,23	20,4	8500	22,5	0,0232
Supernova's	2,5	405	2,80	57,8	9800	24,1	0,009 59
Hoe ontstaan zwarte gaten?	3,0	246	3,09	120	11 100	25,2	0,003 80
Evolutie van enkele sterren	5,0	70,6	4,19	895	15 700	28,6	0,000 327
Dubbelsterevolutie							
Hoe detecteren we zwarte gaten?	10,0	12,7	5,74	8590	23 500	32,8	0,000 011 6
Zwaartekrachtsgolven							
LIGO/Virgo	20,0	5,18	8,78	67 900	31 700	37,0	0,000 000 93
Waarnemingen	50,0	2,41	15,9	527 000	39 300	41,4	0,000 000 05
GW 150914							
GW 170817							
Gammalfilters							

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

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

Hoe kunnen we zwarte gaten 'horen'?

Golven!

Golven in een vijver

Wat is een zwart gat?

Ontsnappingssnelheid

Licht bij een zw. gat

Zwaartekrachtslenzen

Sterren en sterevolutie

Sterren

Lichte sterren

Zware sterren

Supernova's

Hoe ontstaan zwarte gaten?

Evolutie van enkele sterren

Dubbelsterevolutie

Hoe detecteren we zwarte gaten?

Zwaartekrachtsgolven

LIGO/Virgo

Waarnemingen

GW 150914

GW 170817

Gammalfilters

De toekomst

Global GW-detector network

Spectraaltypen en helderheidsklassen

Hoe kunnen we zwarte gaten 'horen'?

Golven!

Golven in een vijver

Wat is een zwart gat?

Ontsnappingsnelheid

Licht bij een zw. gat

Zwaartekrachtslenzen

Sterren en sterevolutie

Sterren

Lichte sterren

Zware sterren

Supernova's

Hoe ontstaan zwarte gaten?

Evolutie van enkele sterren

Dubbelsterevolutie

Hoe detecteren we zwarte gaten?

Zwaartekrachtsgolven

LIGO/Virgo

Waarnemingen

GW 150914

GW 170817

Gammalitsers

De toekomst

Global GW-detector network

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

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

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

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

Evolutie van een ster van 1 zonsmassa

Hoe kunnen we zwarte gaten 'horen'?

Golven!

Golven in een vijver

Wat is een zwart gat?

Ontsnappingsnelheid

Licht bij een zw. gat

Zwaartekrachtslenzen

Sterren en sterevolutie

Sterren

Lichte sterren

Zware sterren

Supernova's

Hoe ontstaan zwarte gaten?

Evolutie van enkele sterren

Dubbelsterevolutie

Hoe detecteren we zwarte gaten?

Zwaartekrachtsgolven

LIGO/Virgo

Waarnemingen

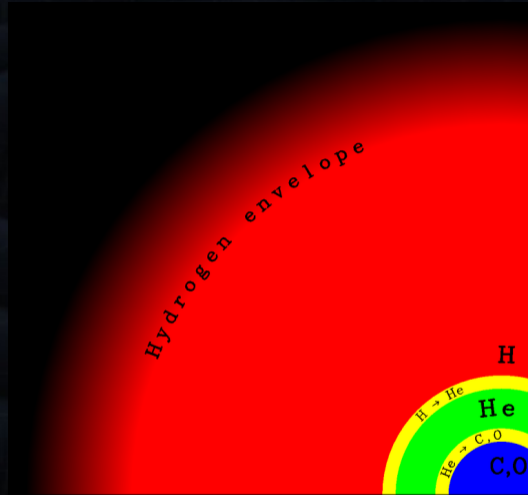
GW 150914

GW 170817

Gammalitsers

De toekomst

Global GW-detector network



Fase:
Waterstoffusie
Heliumfusie

[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'?

Golven!

Golven in een vijver

Wat is een zwart gat?

Ontsnappingsnelheid

Licht bij een zw. gat

Zwaartekrachtslenzen

Sterren en sterevolutie

Sterren

Lichte sterren

Zware sterren

Supernova's

Hoe ontstaan zwarte gaten?

Evolutie van enkele sterren

Dubbelsterevolutie

Hoe detecteren we zwarte gaten?

Zwaartekrachtsgolven

LIGO/Virgo

Waarnemingen

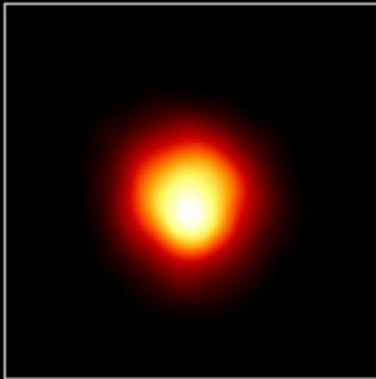
GW 150914

GW 170817

Gammalitsers

De toekomst

Global GW-detector network



Diameter ster

Diameter aardbaan

Diameter jupiterbaan



Hoe kunnen we zwarte gaten 'horen'?

Golven!

Golven in een vijver

Wat is een zwart gat?

Ontsnappingsnelheid

Licht bij een zw. gat

Zwaartekrachtslenzen

Sterren en sterevolutie

Sterren

Lichte sterren

Zware sterren

Supernova's

Hoe ontstaan zwarte gaten?

Evolutie van enkele sterren

Dubbelsterevolutie

Hoe detecteren we zwarte gaten?

Zwaartekrachtsgolven

LIGO/Virgo

Waarnemingen

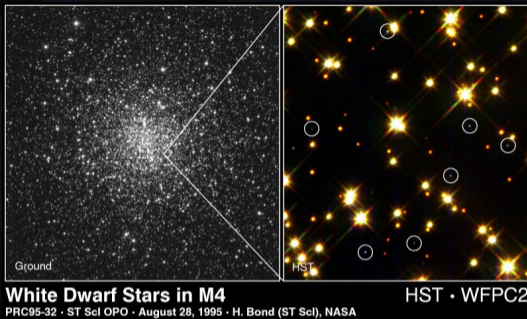
GW 150914

GW 170817

Gammalitsers

De toekomst

Global GW-detector network



- 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'?

Golven!

Golven in een vijver

Wat is een zwart gat?

Ontsnappingsnelheid

Licht bij een zw. gat

Zwaartekrachtslenzen

Sterren en sterevolutie

Sterren

Lichte sterren

Zware sterren

Supernova's

Hoe ontstaan zwarte gaten?

Evolutie van enkele sterren

Dubbelsterevolutie

Hoe detecteren we zwarte gaten?

Zwaartekrachtsgolven

LIGO/Virgo

Waarnemingen

GW 150914

GW 170817

Gammalitsers

De toekomst

Global GW-detector network



Cat's eye nebula (HST/NASA)



Butterfly nebula (HST/NASA)



JWST: NASA/ESA/CSA

Hoe kunnen we zwarte gaten 'horen'?

Golven!

Golven in een vijver

Wat is een zwart gat?

Ontsnappingsnelheid

Licht bij een zw. gat

Zwaartekrachtlenzen

Sterren en sterevolutie

Sterren

Lichte sterren

Zware sterren

Supernova's

Hoe ontstaan zwarte gaten?

Evolutie van enkele sterren

Dubbelsterevolutie

Hoe detecteren we zwarte gaten?

Zwaartekrachtsgolven

LIGO/Virgo

Waarnemingen

GW 150914

GW 170817

Gammalitsers

De toekomst

Global GW-detector network

Hoe kunnen we zwarte gaten 'horen'?

Golven!

Golven in een vijver

Wat is een zwart gat?

Ontsnappingsnelheid

Licht bij een zw. gat

Zwaartekrachtslenzen

Sterren en sterevolutie

Sterren

Lichte sterren

Zware sterren

Supernova's

Hoe ontstaan zwarte gaten?

Evolutie van enkele sterren

Dubbelsterevolutie

Hoe detecteren we zwarte gaten?

Zwaartekrachtsgolven

LIGO/Virgo

Waarnemingen

GW 150914

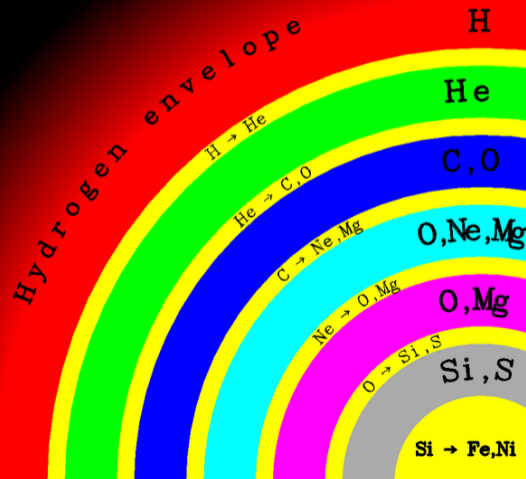
GW 170817

Gammalitsers

De toekomst

Global GW-detector network

Van der Sluys (2006)



Hoe kunnen we zwarte gaten 'horen'?

Golven!

Golven in een vijver

Wat is een zwart gat?

Ontsnappingsnelheid

Licht bij een zw. gat

Zwaartekrachtslenzen

Sterren en sterevolutie

Sterren

Lichte sterren

Zware sterren

Supernova's

Hoe ontstaan zwarte gaten?

Evolutie van enkele sterren

Dubbelsterevolutie

Hoe detecteren we zwarte gaten?

Zwaartekrachtsgolven

LIGO/Virgo

Waarnemingen

GW 150914

GW 170817

Gammalitsers

De toekomst

Global GW-detector network

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

Supernova

Hoe kunnen we zwarte gaten 'horen'?

Golven!

Golven in een vijver

Wat is een zwart gat?

Ontsnappingsnelheid

Licht bij een zw. gat

Zwaartekrachtslenzen

Sterren en sterevolutie

Sterren

Lichte sterren

Zware sterren

Supernova's

Hoe ontstaan zwarte gaten?

Evolutie van enkele sterren

Dubbelsterevolutie

Hoe detecteren we zwarte gaten?

Zwaartekrachtsgolven

LIGO/Virgo

Waarnemingen

GW 150914

GW 170817

Gammalitsers

De toekomst

Global GW-detector network

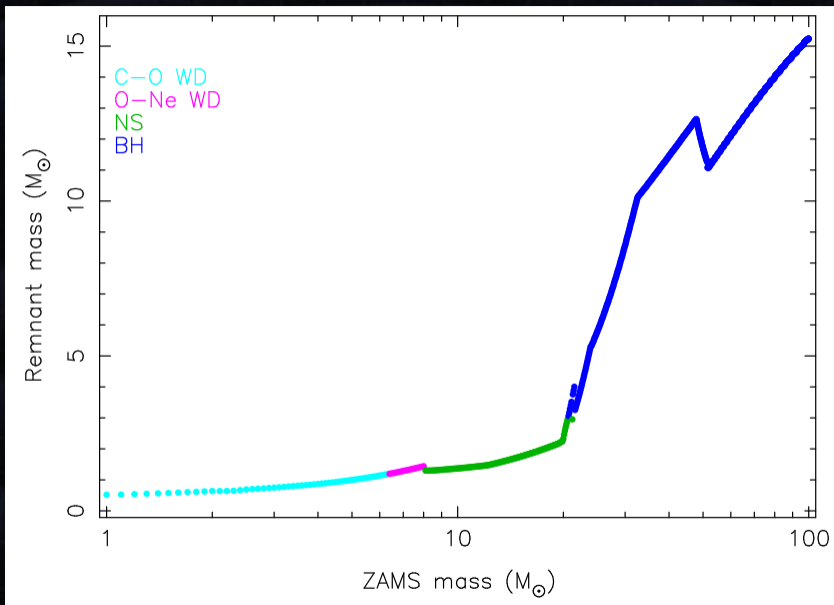


© Anglo-Australian Observatory



VLT/ESO

Relatie tussen ZAMS-massa en eindmassa



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

Hoe kunnen we zwarte gaten 'horen'?

Golven!

Golven in een vijver

Wat is een zwart gat?

Ontsnappingsnelheid

Licht bij een zw. gat

Zwaartekrachtslenzen

Sterren en sterevolutie

Sterren

Lichte sterren

Zware sterren

Supernova's

Hoe ontstaan zwarte gaten?

Evolutie van enkele sterren

Dubbelsterevolutie

Hoe detecteren we zwarte gaten?

Zwaartekrachtsgolven

LIGO/Virgo

Waarnemingen

GW 150914

GW 170817

Gammalitsers

De toekomst

Global GW-detector network

Indirecte waarneming van een zwart gat: Cygnus X-1

Hoe kunnen we zwarte gaten 'horen'?

Golven!

Golven in een vijver

Wat is een zwart gat?

Ontsnappingsnelheid

Licht bij een zw. gat

Zwaartekrachtslenzen

Sterren en sterevolutie

Sterren

Lichte sterren

Zware sterren

Supernova's

Hoe ontstaan zwarte gaten?

Evolutie van enkele sterren

Dubbelsterevolutie

Hoe detecteren we zwarte gaten?

Zwaartekrachtsgolven

LIGO/Virgo

Waarnemingen

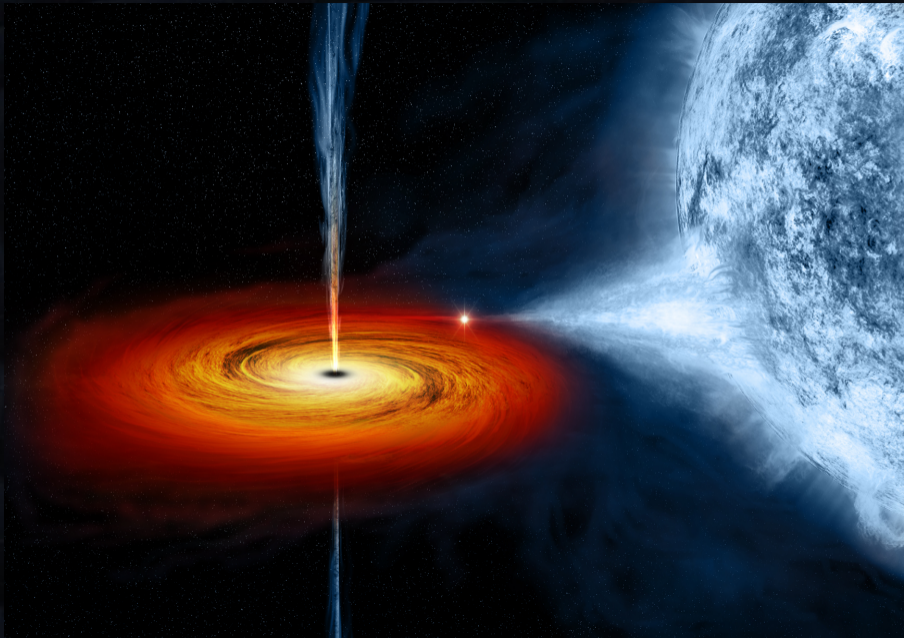
GW 150914

GW 170817

Gammalitsers

De toekomst

Global GW-detector network



Hoe kunnen we zwarte gaten 'horen'?

Golven!

Golven in een vijver

Wat is een zwart gat?

Ontsnappingsnelheid

Licht bij een zw. gat

Zwaartekrachtslenzen

Sterren en sterevolutie

Sterren

Lichte sterren

Zware sterren

Supernova's

Hoe ontstaan zwarte gaten?

Evolutie van enkele sterren

Dubbelsterevolutie

Hoe detecteren we zwarte gaten?

Zwaartekrachtsgolven

LIGO/Virgo

Waarnemingen

GW 150914

GW 170817

Gammalitsers

De toekomst

Global GW-detector network

1

Golven!

• Golven in een vijver

2

Wat is een zwart gat?

• Ontsnappingsnelheid

• Licht bij een zwart gat

• Zwaartekrachtslenzen

3

Sterren en sterevolutie

• Sterren

• Evolutie van lichte sterren

• Evolutie van zware sterren

• Supernova's

4

Hoe ontstaan zwarte gaten?

• Evolutie van enkele sterren

5

Hoe detecteren we zwarte gaten?

• Zwaartekrachtsgolven

• LIGO/Virgo

6

Waarnemingen

• GW 150914

• GW 170817

• Gammaflitsers

7

De toekomst

• Global GW-detector network

• Einstein Telescope

• LISA



Hoe kunnen we zwarte gaten 'horen'?

Golven!

Golven in een vijver

Wat is een zwart gat?

Ontsnappingsnelheid

Licht bij een zw. gat

Zwaartekrachtslenzen

Sterren en sterevolutie

Sterren

Lichte sterren

Zware sterren

Supernova's

Hoe ontstaan zwarte gaten?

Evolutie van enkele sterren

Dubbelsterevolutie

Hoe detecteren we zwarte gaten?

Zwaartekrachtsgolven

LIGO/Virgo

Waarnemingen

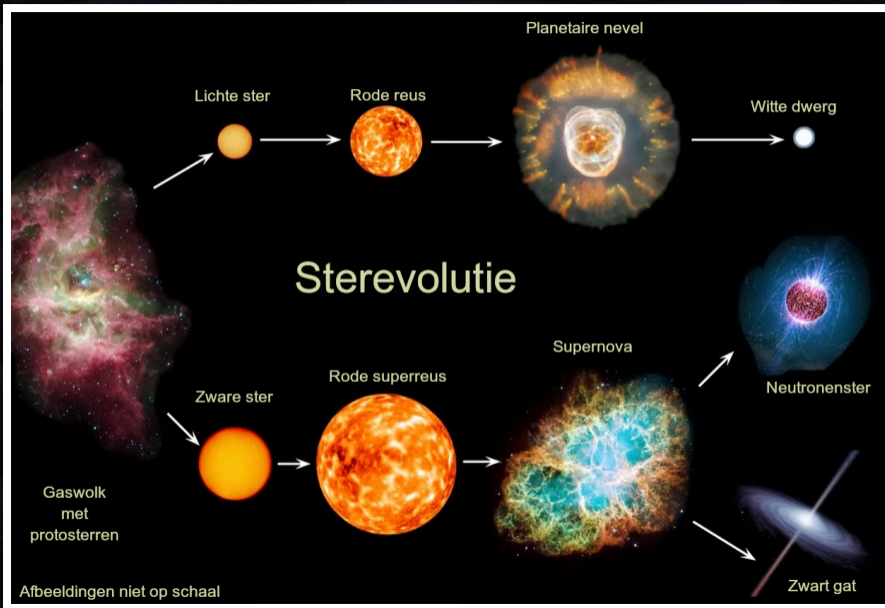
GW 150914

GW 170817

Gammalitsers

De toekomst

Global GW-detector network





Hoe kunnen we zwarte gaten 'horen'?

Golven!

Golven in een vijver

Wat is een zwart gat?

Ontsnappingsnelheid

Licht bij een zw. gat

Zwaartekrachtslenzen

Sterren en sterevolutie

Sterren

Lichte sterren

Zware sterren

Supernova's

Hoe ontstaan zwarte gaten?

Evolutie van enkele sterren

Dubbelsterevolutie

Hoe detecteren we zwarte gaten?

Zwaartekrachtsgolven

LIGO/Virgo

Waarnemingen

GW 150914

GW 170817

Gammalitsers

De toekomst

Global GW-detector network

Hoe kunnen we zwarte gaten 'horen'?

Golven!

Golven in een vijver

Wat is een zwart gat?

Ontsnappingsnelheid

Licht bij een zw. gat

Zwaartekrachtslenzen

Sterren en sterevolutie

Sterren

Lichte sterren

Zware sterren

Supernova's

Hoe ontstaan zwarte gaten?

Evolutie van enkele sterren

Dubbelsterevolutie

Hoe detecteren we zwarte gaten?

Zwaartekrachtsgolven

LIGO/Virgo

Waarnemingen

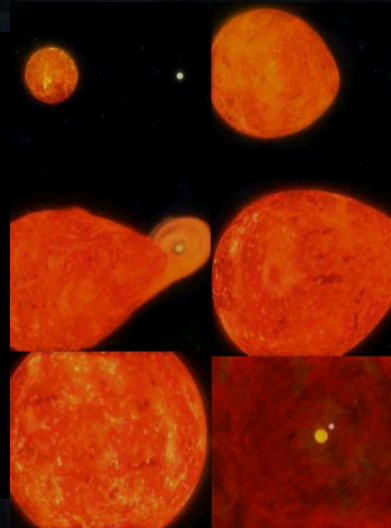
GW 150914

GW 170817

Gammalitsers

De toekomst

Global GW-detector network



Dubbele zwarte gaten

Hoe kunnen we zwarte gaten 'horen'?

Golven!

Golven in een vijver

Wat is een zwart gat?

Ontsnappingsnelheid

Licht bij een zw. gat

Zwaartekrachtslenzen

Sterren en sterevolutie

Sterren

Lichte sterren

Zware sterren

Supernova's

Hoe ontstaan zwarte gaten?

Evolutie van enkele sterren

Dubbelsterevolutie

Hoe detecteren we zwarte gaten?

Zwaartekrachtsgolven

LIGO/Virgo

Waarnemingen

GW 150914

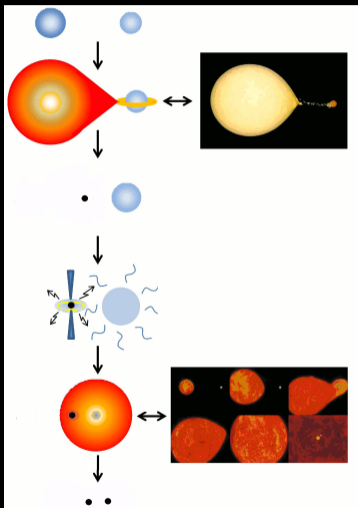
GW 170817

Gammalitsers

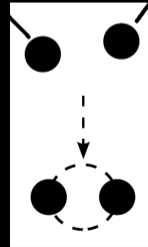
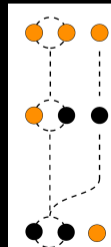
De toekomst

Global GW-detector network

Uit dubbelster



Cluster: uit dubbelster en ster



Hoe kunnen we zwarte gaten 'horen'?

Golven!

Golven in een vijver

Wat is een zwart gat?

Ontsnappings snelheid

Licht bij een zw. gat

Zwaartekracht lenzen

Sterren en sterevolutie

Sterren

Lichte sterren

Zware sterren

Supernova's

Hoe ontstaan zwarte gaten?

Evolutie van enkele sterren

Dubbelsterevolutie

Hoe detecteren we zwarte gaten?

Zwaartekrachtsgolven

LIGO/Virgo

Waarnemingen

GW 150914

GW 170817

Gammaflitsers

De toekomst

Global GW-detector network

1

Golven!

• Golven in een vijver

2

Wat is een zwart gat?

• Ontsnappings snelheid

• Licht bij een zwart gat

• Zwaartekracht lenzen

3

Sterren en sterevolutie

• Sterren

• Evolutie van lichte sterren

• Evolutie van zware sterren

• Supernova's

4

Hoe ontstaan zwarte gaten?

• Evolutie van enkele sterren

5

Hoe detecteren we zwarte gaten?

• Zwaartekrachtsgolven

• LIGO/Virgo

6

Waarnemingen

• GW 150914

• GW 170817

• Gammaflitsers

7

De toekomst

• Global GW-detector network

• Einstein Telescope

• LISA

Hoe kunnen we zwarte gaten 'horen'?

Golven!

Golven in een vijver

Wat is een zwart gat?

Ontsnappingsnelheid

Licht bij een zw. gat

Zwaartekrachtslenzen

Sterren en sterevolutie

Sterren

Lichte sterren

Zware sterren

Supernova's

Hoe ontstaan zwarte gaten?

Evolutie van enkele sterren

Dubbelsterevolutie

Hoe detecteren we zwarte gaten?

Zwaartekrachtsgolven

LIGO/Virgo

Waarnemingen

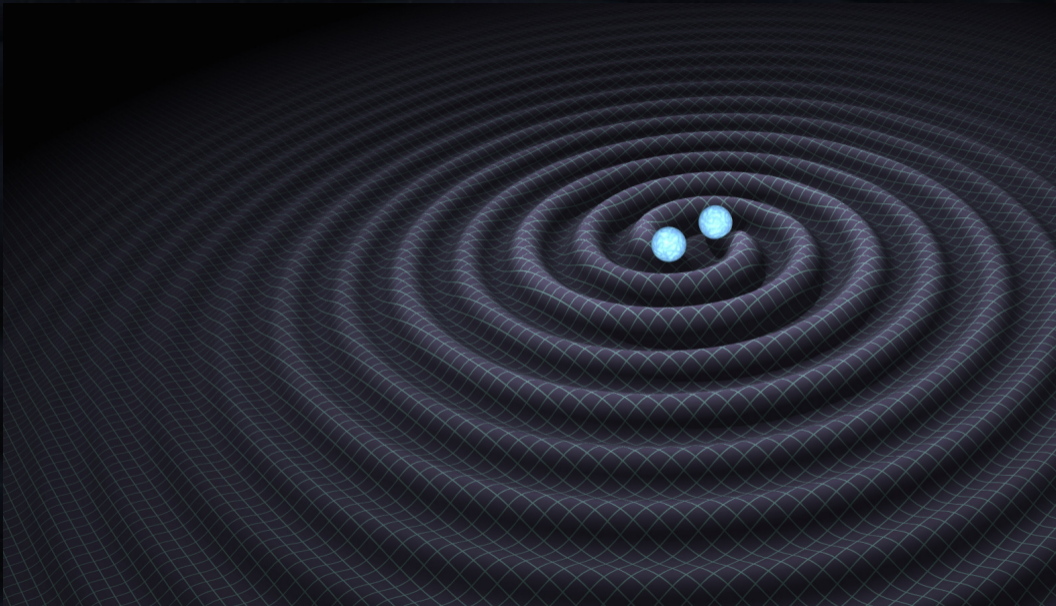
GW 150914

GW 170817

Gammalitsers

De toekomst

Global GW-detector network



Hoe kunnen we
zwarte gaten
'horen'?

Golven!

Golven in een vijver

Wat is een zwart
gat?

Ontsnappingsnelheid

Licht bij een zw. gat

Zwaartekrachtslenzen

Sterren en
sterevolutie

Sterren

Lichte sterren

Zware sterren

Supernova's

Hoe ontstaan
zwarte gaten?

Evolutie van enkele
sterren

Dubbelsterevolutie

Hoe detecteren
we zwarte gaten?

Zwaartekrachtsgolven

LIGO/Virgo

Waarnemingen

GW 150914

GW 170817

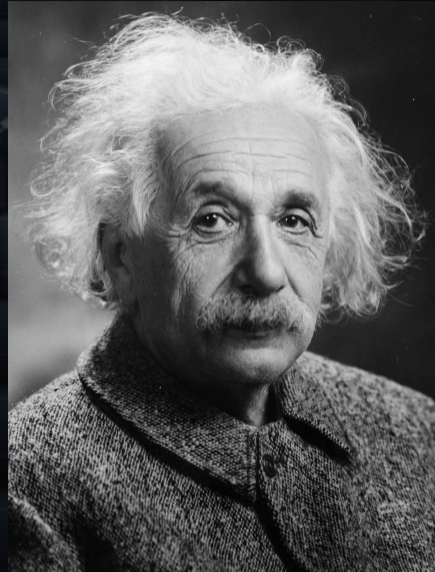
Gammalitsers

De toekomst

Global GW-detector
network

Zwaartekrachtsgolven:

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



Bron: [Wikipedia](#)

Waarom zwaartekrachtsgolven detecteren?

Hoe kunnen we zwarte gaten 'horen'?

Golven!

Golven in een vijver

Wat is een zwart gat?

Ontsnappingsnelheid

Licht bij een zw. gat

Zwaartekrachtslenzen

Sterren en sterevolutie

Sterren

Lichte sterren

Zware sterren

Supernova's

Hoe ontstaan zwarte gaten?

Evolutie van enkele sterren

Dubbelsterevolutie

Hoe detecteren we zwarte gaten?

Zwaartekrachtsgolven

LIGO/Virgo

Waarnemingen

GW 150914

GW 170817

Gammalitsers

De toekomst

Global GW-detector network

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 . . .*

De Virgo-detector (Italië)

Hoe kunnen we zwarte gaten 'horen'?



Golven!

Golven in een vijver

Wat is een zwart gat?

Ontsnappingsnelheid

Licht bij een zw. gat

Zwaartekrachtslenzen

Sterren en sterevolutie

Sterren

Lichte sterren

Zware sterren

Supernova's

Hoe ontstaan zwarte gaten?

Evolutie van enkele sterren

Dubbelsterevolutie

Hoe detecteren we zwarte gaten?

Zwaartekrachtsgolven

LIGO/Virgo

Waarnemingen

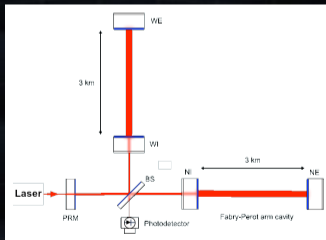
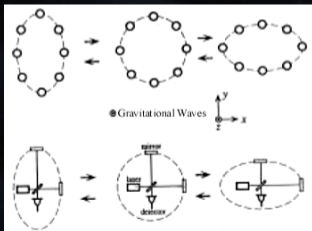
GW 150914

GW 170817

Gammalfilters

De toekomst

Global GW-detector network



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

- Gevoeligheid $\sim 10^{-22} = 0,000.000.000.000.001$ mm (~ 2 atoomkernen) over 3–4 km = een glaasje water t.o.v. alle oceanen op Aarde!

Interferentie van lichtgolven in een laser

Hoe kunnen we zwarte gaten 'horen'?

Golven!

Golven in een vijver

Wat is een zwart gat?

Ontsnappingsnelheid

Licht bij een zw. gat

Zwaartekrachtslenzen

Sterren en sterevolutie

Sterren

Lichte sterren

Zware sterren

Supernova's

Hoe ontstaan zwarte gaten?

Evolutie van enkele sterren

Dubbelsterevolutie

Hoe detecteren we zwarte gaten?

Zwaartekrachtsgolven

LIGO/Virgo

Waarnemingen

GW 150914

GW 170817

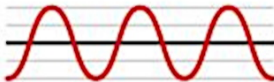
Gammalitsers

De toekomst

Global GW-detector network

Interferentie van golven

golf 1



golf 2



golf 1 + golf 2



constructieve interferentie

golf 1



golf 2



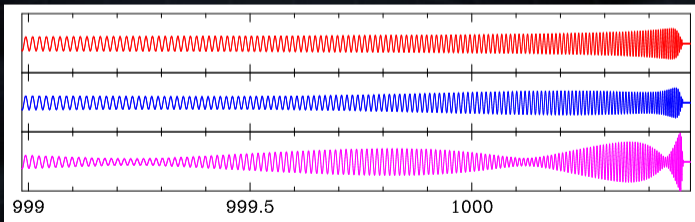
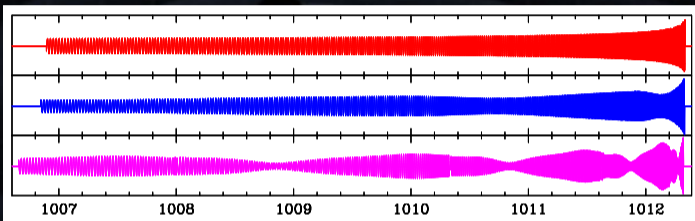
golf 1 + golf 2



destructieve interferentie

Signalen van zwarte gaten en neutronensterren met spin

LIGO en Virgo kunnen de laatste seconden tot minuten van botsende neutronensterren en zwarte gaten waarnemen:



$$a_{\text{spin}} \equiv S/M^2 = 0\%, 10\% \text{ en } 50\%$$

Hoe kunnen we zwarte gaten 'horen'?

Golven!

Golven in een vijver

Wat is een zwart gat?

Ontsnappingsnelheid

Licht bij een zw. gat

Zwaartekrachtslenzen

Sterren en sterevolutie

Sterren

Lichte sterren

Zware sterren

Supernova's

Hoe ontstaan zwarte gaten?

Evolutie van enkele sterren

Dubbelsterevolutie

Hoe detecteren we zwarte gaten?

Zwaartekrachtsgolven

LIGO/Virgo

Waarnemingen

GW 150914

GW 170817

Gammalitsers

De toekomst

Global GW-detector network

Hoe kunnen we zwarte gaten 'horen'?

Golven!

Golven in een vijver

Wat is een zwart gat?

Ontsnappingsssnelheid

Licht bij een zw. gat

Zwaartekrachtslenzen

Sterren en sterevolutie

Sterren

Lichte sterren

Zware sterren

Supernova's

Hoe ontstaan zwarte gaten?

Evolutie van enkele sterren

Dubbelsterevolutie

Hoe detecteren we zwarte gaten?

Zwaartekrachtsgolven

LIGO/Virgo

Waarnemingen

GW 150914

GW 170817

Gammaflitsers

De toekomst

Global GW-detector network

1

Golven!

• Golven in een vijver

2

Wat is een zwart gat?

• Ontsnappingsssnelheid

• Licht bij een zwart gat

• Zwaartekrachtslenzen

3

Sterren en sterevolutie

• Sterren

• Evolutie van lichte sterren

• Evolutie van zware sterren

• Supernova's

4

Hoe ontstaan zwarte gaten?

• Evolutie van enkele sterren

5

Hoe detecteren we zwarte gaten?

• Zwaartekrachtsgolven

• LIGO/Virgo

6

Waarnemingen

• GW 150914

• GW 170817

• Gammaflitsers

7

De toekomst

• Global GW-detector network

• Einstein Telescope

• LISA



De eerste detectie: GW 150914

Hoe kunnen we zwarte gaten 'horen'?

Golven!

Golven in een vijver

Wat is een zwart gat?

Ontsnappingsnelheid

Licht bij een zw. gat

Zwaartekrachtslenzen

Sterren en sterevolutie

Sterren

Lichte sterren

Zware sterren

Supernova's

Hoe ontstaan zwarte gaten?

Evolutie van enkele sterren

Dubbelsterevolutie

Hoe detecteren we zwarte gaten?

Zwaartekrachtsgolven

LIGO/Virgo

Waarnemingen

GW 150914

GW 170817

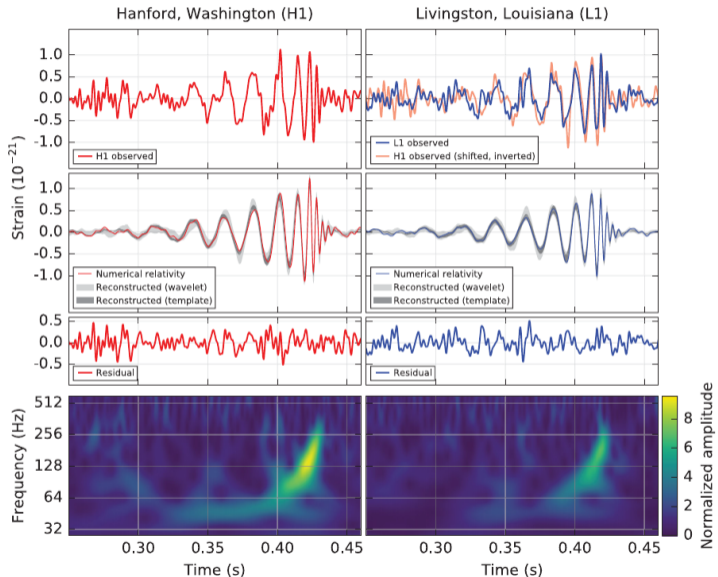
Gammalitsers

De toekomst

Global GW-detector network

In de ruwe data zitten:

- 1 GW signaal
- 2 Ruis!



Bron: ligo.org

Bron van GW 150914: dubbel zwart gat

Hoe kunnen we
zwarte gaten
'horen'?

Golven!

Golven in een vijver

Wat is een zwart
gat?

Ontsnappingsnelheid

Licht bij een zw. gat

Zwaartekrachtslenzen

Sterren en
sterevolutie

Sterren

Lichte sterren

Zware sterren

Supernova's

Hoe ontstaan
zwarte gaten?

Evolutie van enkele
sterren

Dubbelsterevolutie

Hoe detecteren
we zwarte gaten?

Zwaartekrachtgolven

LIGO/Virgo

Waarnemingen

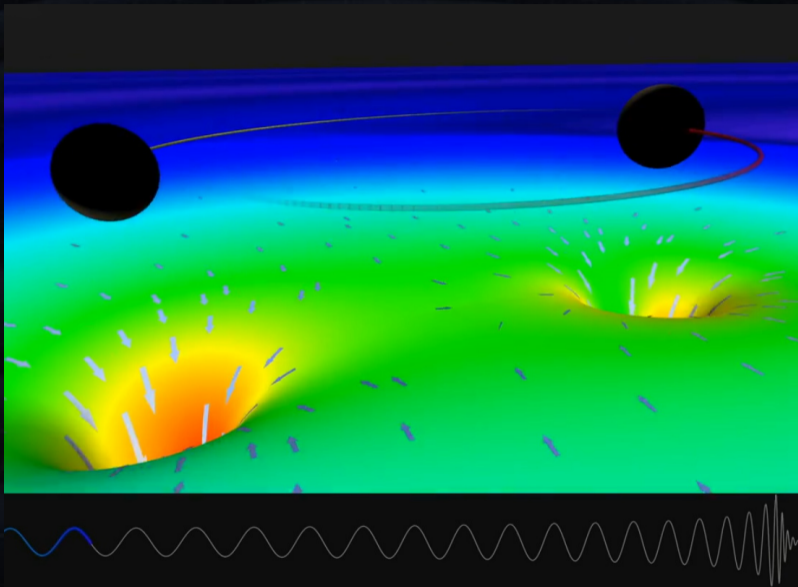
GW 150914

GW 170817

Gammalitsers

De toekomst

Global GW-detector
network



Bron: www.black-holes.org

Hoe kunnen we zwarte gaten 'horen'?

Golven!

Golven in een vijver

Wat is een zwart gat?

Ontsnappingsnelheid

Licht bij een zw. gat

Zwaartekrachtslenzen

Sterren en sterevolutie

Sterren

Lichte sterren

Zware sterren

Supernova's

Hoe ontstaan zwarte gaten?

Evolutie van enkele sterren

Dubbelsterevolutie

Hoe detecteren we zwarte gaten?

Zwaartekrachtsgolven

LIGO/Virgo

Waarnemingen

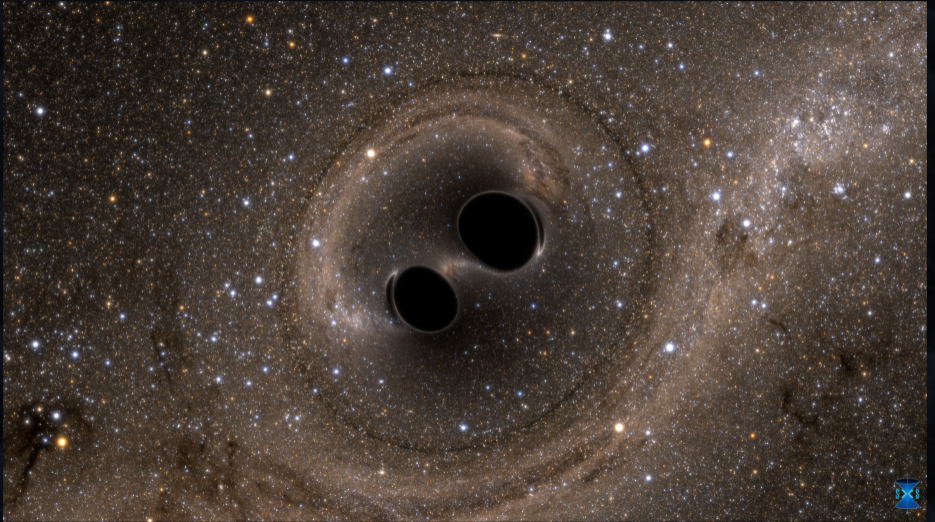
GW 150914

GW 170817

Gammalitsers

De toekomst

Global GW-detector network



Bron: www.black-holes.org

Hoe kunnen we zwarte gaten 'horen'?

Golven!

Golven in een vijver

Wat is een zwart gat?

Ontsnappingsnelheid

Licht bij een zw. gat

Zwaartekrachtslenzen

Sterren en sterevolutie

Sterren

Lichte sterren

Zware sterren

Supernova's

Hoe ontstaan zwarte gaten?

Evolutie van enkele sterren

Dubbelsterevolutie

Hoe detecteren we zwarte gaten?

Zwaartekrachtsgolven

LIGO/Virgo

Waarnemingen

GW 150914

GW 170817

Gammalitsers

De toekomst

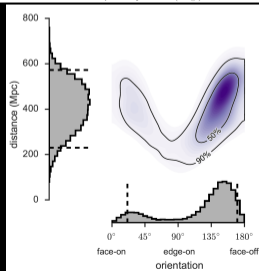
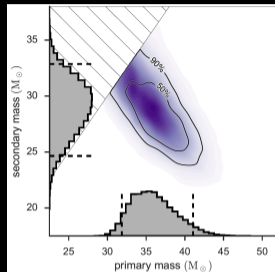
Global GW-detector network

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 heelal!

Abbott et al., 2016

PDFs:



Hoe kunnen we zwarte gaten 'horen'?

Golven!

Golven in een vijver

Wat is een zwart gat?

Ontsnappingsnelheid

Licht bij een zw. gat

Zwaartekrachtslenzen

Sterren en sterevolutie

Sterren

Lichte sterren

Zware sterren

Supernova's

Hoe ontstaan zwarte gaten?

Evolutie van enkele sterren

Dubbelsterevolutie

Hoe detecteren we zwarte gaten?

Zwaartekrachtsgolven

LIGO/Virgo

Waarnemingen

GW 150914

GW 170817

Gammalitsers

De toekomst

Global GW-detector network

Astrofysica:

- Eerste directe waarneming van een zwart gat
- Eerste dubbele zwarte gat
- Eerste *merger* van dubbel zwart gat
- Zwaarste 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'?

Golven!

Golven in een vijver

Wat is een zwart gat?

Ontsnappingsnelheid

Licht bij een zw. gat

Zwaartekrachtslenzen

Sterren en sterevolutie

Sterren

Lichte sterren

Zware sterren

Supernova's

Hoe ontstaan zwarte gaten?

Evolutie van enkele sterren

Dubbelsterevolutie

Hoe detecteren we zwarte gaten?

Zwaartekrachtsgolven

LIGO/Virgo

Waarnemingen

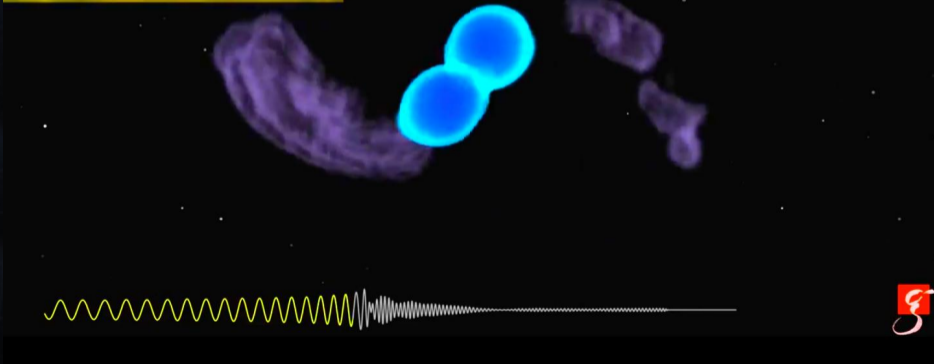
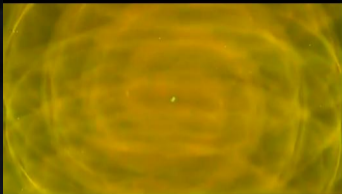
GW 150914

GW 170817

Gammalfilters

De toekomst

Global GW-detector network



Optische tegenhanger!

SSS17a



www.ligo.org

Electromagnetische waarnemingen

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

Hoe kunnen we zwarte gaten 'horen'?

Golven!

Golven in een vijver

Wat is een zwart gat?

Ontsnappingsnelheid

Licht bij een zw. gat

Zwaartekrachtslenzen

Sterren en sterevolutie

Sterren

Lichte sterren

Zware sterren

Supernova's

Hoe ontstaan zwarte gaten?

Evolutie van enkele sterren

Dubbelsterevolutie

Hoe detecteren we zwarte gaten?

Zwaartekrachtsgolven

LIGO/Virgo

Waarnemingen

GW 150914

GW 170817

Gammaflitsers

De toekomst

Global GW-detector network

Short-hard gamma-ray bursts (shGRBs)

Hoe kunnen we zwarte gaten 'horen'?

Golven!

Golven in een vijver

Wat is een zwart gat?

Ontsnappingsnelheid

Licht bij een zw. gat

Zwaartekrachtslenzen

Sterren en sterevolutie

Sterren

Lichte sterren

Zware sterren

Supernova's

Hoe ontstaan zwarte gaten?

Evolutie van enkele sterren

Dubbelsterevolutie

Hoe detecteren we zwarte gaten?

Zwaartekrachtsgolven

LIGO/Virgo

Waarnemingen

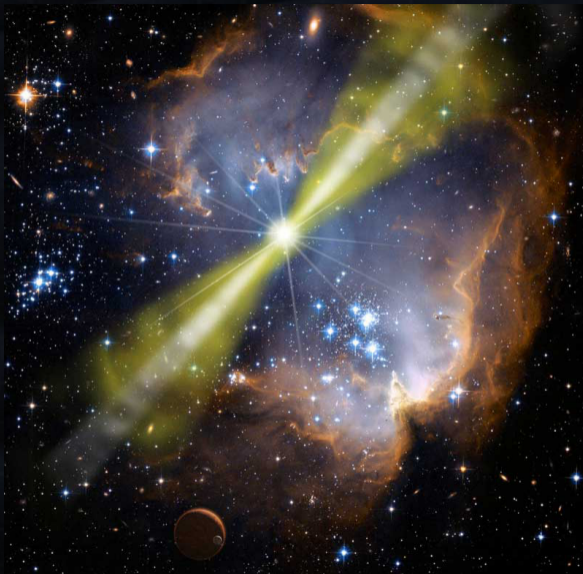
GW 150914

GW 170817

Gammaflitsers

De toekomst

Global GW-detector network



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

Waargenomen kosmische signalen

Hoe kunnen we zwarte gaten 'horen'?

Golven!

Golven in een vijver

Wat is een zwart gat?

Ontsnappingsnelheid

Licht bij een zw. gat

Zwaartekrachtslenzen

Sterren en sterevolutie

Sterren

Lichte sterren

Zware sterren

Supernova's

Hoe ontstaan zwarte gaten?

Evolutie van enkele sterren

Dubbelsterevolutie

Hoe detecteren we zwarte gaten?

Zwaartekrachtsgolven

LIGO/Virgo

Waarnemingen

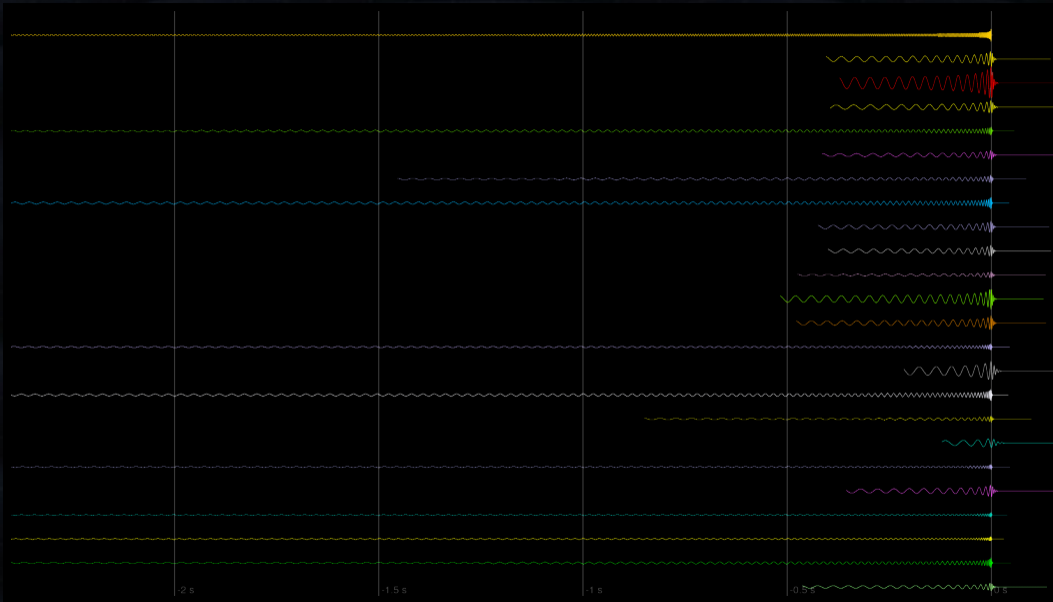
GW 150914

GW 170817

Gammalitsers

De toekomst

Global GW-detector network



Hoe kunnen we zwarte gaten 'horen'?

Golven!

Golven in een vijver

Wat is een zwart gat?

Ontsnappingsnelheid

Licht bij een zw. gat

Zwaartekrachtslenzen

Sterren en sterevolutie

Sterren

Lichte sterren

Zware sterren

Supernova's

Hoe ontstaan zwarte gaten?

Evolutie van enkele sterren

Dubbelsterevolutie

Hoe detecteren we zwarte gaten?

Zwaartekrachtgolven

LIGO/Virgo

Waarnemingen

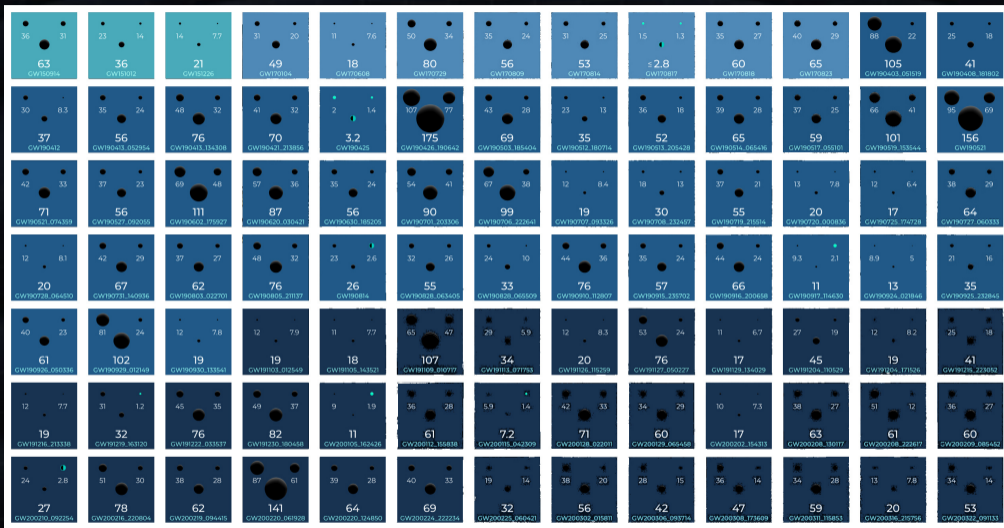
GW 150914

GW 170817

Gammalfitsters

De toekomst

Global GW-detector network



Hoe kunnen we zwarte gaten 'horen'?

Golven!

Golven in een vijver

Wat is een zwart gat?

Ontsnappings snelheid

Licht bij een zw. gat

Zwaartekracht lenzen

Sterren en sterevolutie

Sterren

Lichte sterren

Zware sterren

Supernova's

Hoe ontstaan zwarte gaten?

Evolutie van enkele sterren

Dubbelsterevolutie

Hoe detecteren we zwarte gaten?

Zwaartekrachtsgolven

LIGO/Virgo

Waarnemingen

GW 150914

GW 170817

Gammaflitsers

De toekomst

Global GW-detector network

1

Golven!

• Golven in een vijver

2

Wat is een zwart gat?

• Ontsnappings snelheid

• Licht bij een zwart gat

• Zwaartekracht lenzen

3

Sterren en sterevolutie

• Sterren

• Evolutie van lichte sterren

• Evolutie van zware sterren

• Supernova's

4

Hoe ontstaan zwarte gaten?

• Evolutie van enkele sterren

5

Hoe detecteren we zwarte gaten?

• Zwaartekrachtsgolven

• LIGO/Virgo

6

Waarnemingen

• GW 150914

• GW 170817

• Gammaflitsers

7

De toekomst

• Global GW-detector network

• Einstein Telescope

• LISA



Hoe kunnen we zwarte gaten 'horen'?

Golven!

Golven in een vijver

Wat is een zwart gat?

Ontsnappingsnelheid

Licht bij een zw. gat

Zwaartekrachtslenzen

Sterren en sterevolutie

Sterren

Lichte sterren

Zware sterren

Supernova's

Hoe ontstaan zwarte gaten?

Evolutie van enkele sterren

Dubbelsterevolutie

Hoe detecteren we zwarte gaten?

Zwaartekrachtsgolven

LIGO/Virgo

Waarnemingen

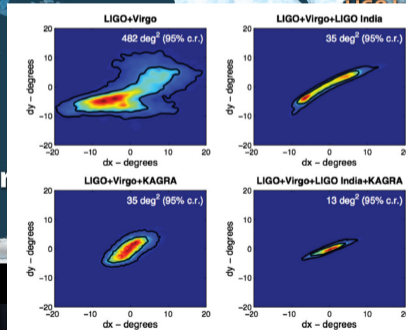
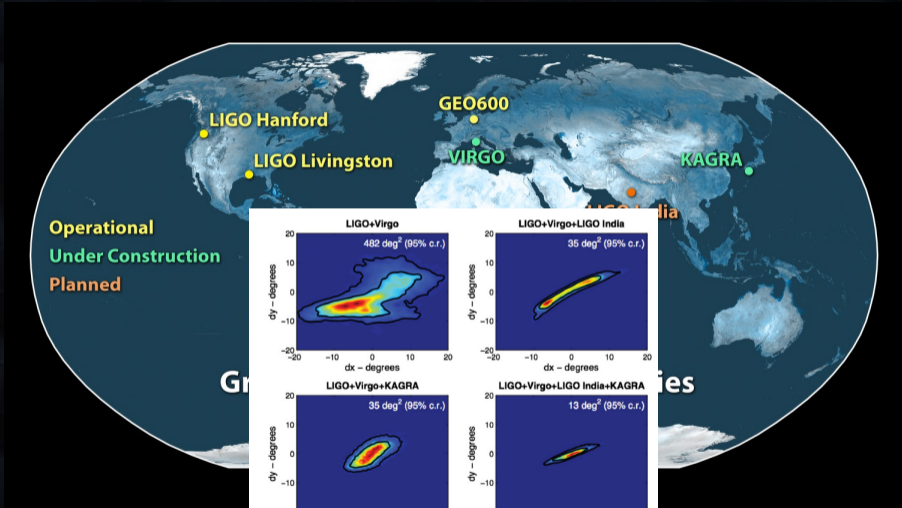
GW 150914

GW 170817

Gammalitsers

De toekomst

Global GW-detector network



Nissanke et al., 2013

Hoe kunnen we zwarte gaten 'horen'?

Golven!

Golven in een vijver

Wat is een zwart gat?

Ontsnappingsnelheid

Licht bij een zw. gat

Zwaartekrachtlenzen

Sterren en sterevolutie

Sterren

Lichte sterren

Zware sterren

Supernova's

Hoe ontstaan zwarte gaten?

Evolutie van enkele sterren

Dubbelsterevolutie

Hoe detecteren we zwarte gaten?

Zwaartekrachtgolven

LIGO/Virgo

Waarnemingen

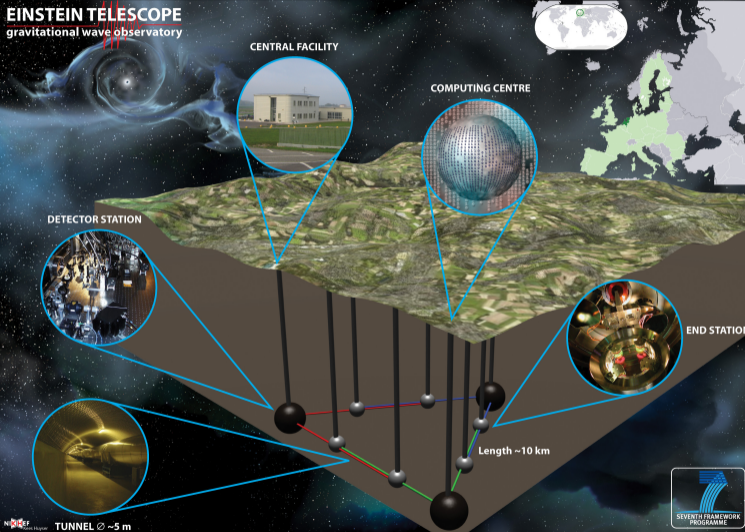
GW 150914

GW 170817

Gammalitsers

De toekomst

Global GW-detector network



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

Laser Interferometer Space Antenna (LISA)

Hoe kunnen we zwarte gaten 'horen'?

Golven!

Golven in een vijver

Wat is een zwart gat?

Ontsnappingsnelheid

Licht bij een zw. gat

Zwaartekrachtlenzen

Sterren en sterevolutie

Sterren

Lichte sterren

Zware sterren

Supernova's

Hoe ontstaan zwarte gaten?

Evolutie van enkele sterren

Dubbelsterevolutie

Hoe detecteren we zwarte gaten?

Zwaartekrachtsgolven

LIGO/Virgo

Waarnemingen

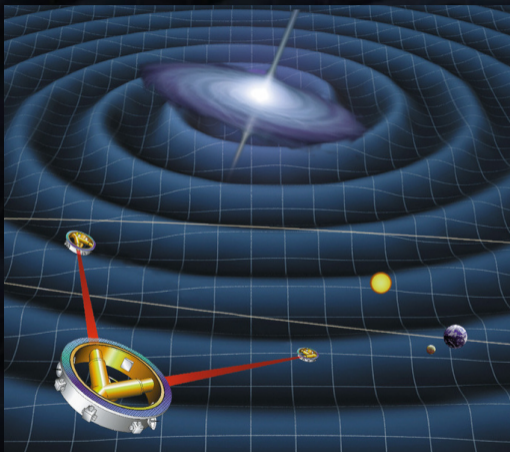
GW 150914

GW 170817

Gammalitsers

De toekomst

Global GW-detector network



Ruimtemissie

- 3 ruimtevaartuigen, 4 testmassa's
- Detector in een baan om de Zon, 20° achter de Aarde
- Driehoekopstelling, 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'?

Golven!

Golven in een vijver

Wat is een zwart gat?

Ontsnappingsnelheid

Licht bij een zw. gat

Zwaartekrachtslenzen

Sterren en sterevolutie

Sterren

Lichte sterren

Zware sterren

Supernova's

Hoe ontstaan zwarte gaten?

Evolutie van enkele sterren

Dubbelsterevolutie

Hoe detecteren we zwarte gaten?

Zwaartekrachtgolven

LIGO/Virgo

Waarnemingen

GW 150914

GW 170817

Gammalitsers

De toekomst

Global GW-detector network

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>

Golven!

Golven in een vijver

Wat is een zwart
gat?

Ontsnappingsnelheid

Licht bij een zw. gat

Zwaartekrachtlenzen

Sterren en
sterevolutie

Sterren

Lichte sterren

Zware sterren

Supernova's

Hoe ontstaan
zwarte gaten?

Evolutie van enkele
sterren

Dubbelsterevolutie

Hoe detecteren
we zwarte gaten?

Zwaartekrachtgolven

LIGO/Virgo

Waarnemingen

GW 150914

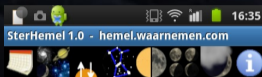
GW 170817

Gammalfiters

De toekomst

Global GW-detector
network

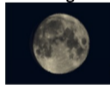
- Actuele, eenvoudig en lastiger waar te nemen hemelverschijnselen
- Zichtbaarheid van Zon, Maan, planeten, meteoren, kometen, deepsky, ISS, ...
- Astrokalenders, hemelkaarten, maanfasen, hemel vannacht, waarneemweer, tabellen
- Apps (Android/Apple), Facebook, Twitter
- ~ 10 000 pagina's; **Geen reclame**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