Hoe kunnen we zwarte gaten ‘horen’?

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

Inhoud

Dubbelsterren
Dubbelsterren
Materie-overdracht
Hoe detecteren we zwarte gaten?
Zwaartekrachtsgolven
LIGO/Virgo
Michelson interferometer
Waarnemingen
GW 150914
GW 170817
Meer detecties
De toekomst
Global GW-detector network
Einstein Telescope
LISA

1. Dubbelsterevolutie en materie-overdracht
   - Dubbelsterren
   - Materie-overdracht
2. Hoe detecteren we zwarte gaten?
   - Zwaartekrachtsgolven
   - LIGO/Virgo
   - Michelson interferometer
3. Waarnemingen
   - GW 150914
   - GW 170817
   - Meer detecties
4. De toekomst
   - Global GW-detector network
   - Einstein Telescope
   - LISA

Inhoud

Dubbelsterren
Dubbelsterren
Materie-overdracht
Hoe detecteren we zwarte gaten?
Zwaartekrachtsgolven
LIGO/Virgo
Michelson interferometer
Waarnemingen
GW 150914
GW 170817
Meer detecties
De toekomst
Global GW-detector network
Einstein Telescope
LISA

1 Dubbelsterevolutie en materie-overdracht
- Dubbelsterren
- Materie-overdracht

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

3 Waarnemingen
- GW 150914
- GW 170817
- Meer detecties

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

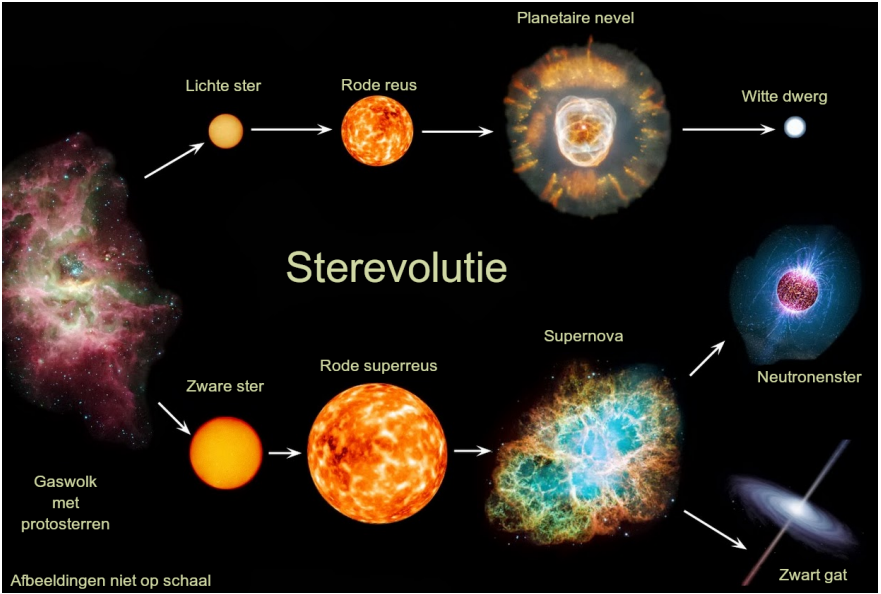
Overzicht sterevolutie

Dubbelsterren
- **Dubbelsterren**
- Materie-overdracht

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

Waarnemingen
- GW 150914
- GW 170817
- Meer detecties

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



Dubbelsterren: Albireo

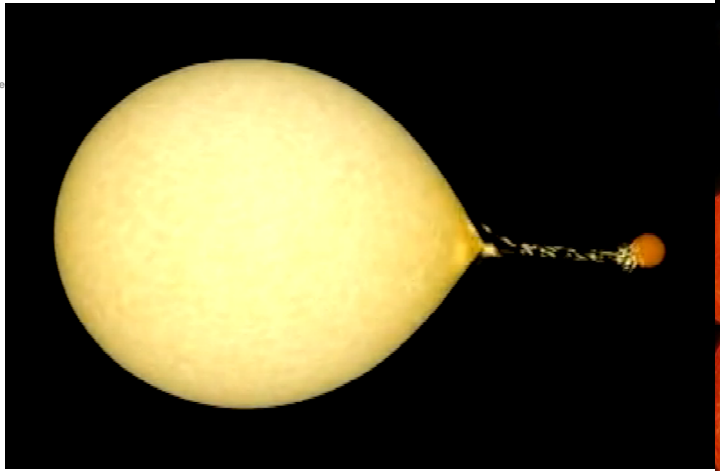
Dubbelsterren
Dubbelsterren
Materie-overdracht
Hoe detecteren we zwarte gaten?
Zwaartekrachtsgolven
LIGO/Virgo
Michelson interferometer
Waarnemingen
GW 150914
GW 170817
Meer detecties
De toekomst
Global GW-detector network
Einstein Telescope
LISA

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

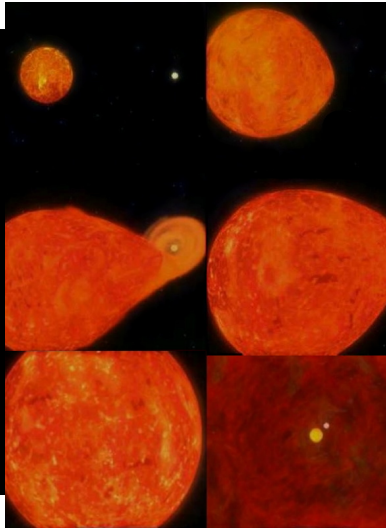
Materie-overdracht

Dubbelsterren
Dubbelsterren
Materie-overdracht
Hoe detecteren we zwarte gaten?
Zwaartekrachtsgolve
LIGO/Virgo
Michelson interferometer
Waarnemingen
GW 150914
GW 170817
Meer detecties
De toekomst
Global GW-detector network
Einstein Telescope
LISA

Stabiele materie-overdracht

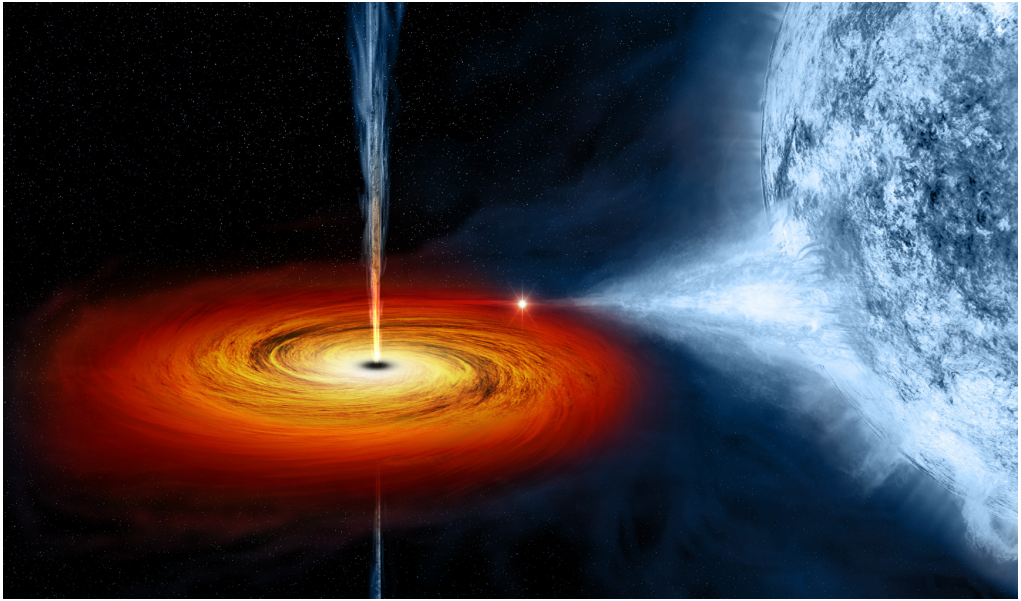


Common envelope



Bron: Van der Sluys (2006)

Indirecte waarneming van een zwart gat: Cygnus X-1



Bron: NASA/CXC/M.Weiss, 2011

Hoe kunnen we zwarte gaten 'horen'?

Dubbelsterren
- Dubbelsterren
- **Materie-overdracht**

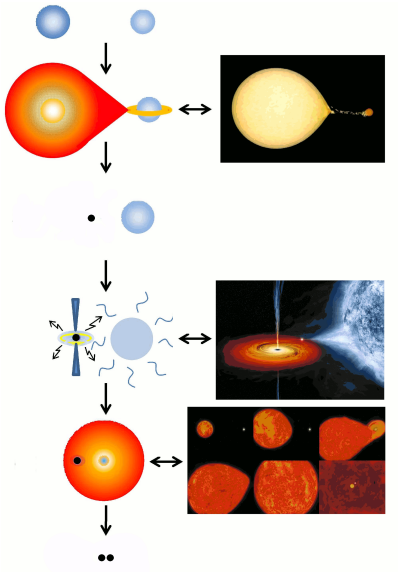
Hoe detecteren we zwarte gaten?
- Zwaartekrachtsgolven
- LIGO/Virgo
- Michelson interferometer

Waarnemingen
- GW 150914
- GW 170817
- Meer detecties

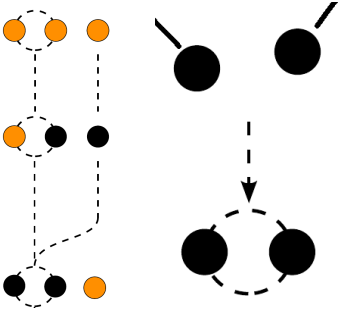
De toekomst
- Global GW-detector network
- Einstein Telescope
- LISA

Dubbele neurtronensterren/zwarte gaten

Uit dubbelster



Cluster: uit dubbelster en ster



Inhoud

Dubbelsterren
Dubbelsterren
Materie-overdracht
Hoe detecteren we zwarte gaten?
Zwaartekrachtsgolven
LIGO/Virgo
Michelson interferometer
Waarnemingen
GW 150914
GW 170817
Meer detecties
De toekomst
Global GW-detector network
Einstein Telescope
LISA

1 Dubbelsterevolutie en materie-overdracht
- Dubbelsterren
- Materie-overdracht

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

3 Waarnemingen
- GW 150914
- GW 170817
- Meer detecties

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

Hoe kunnen we zwarte gaten 'horen'?

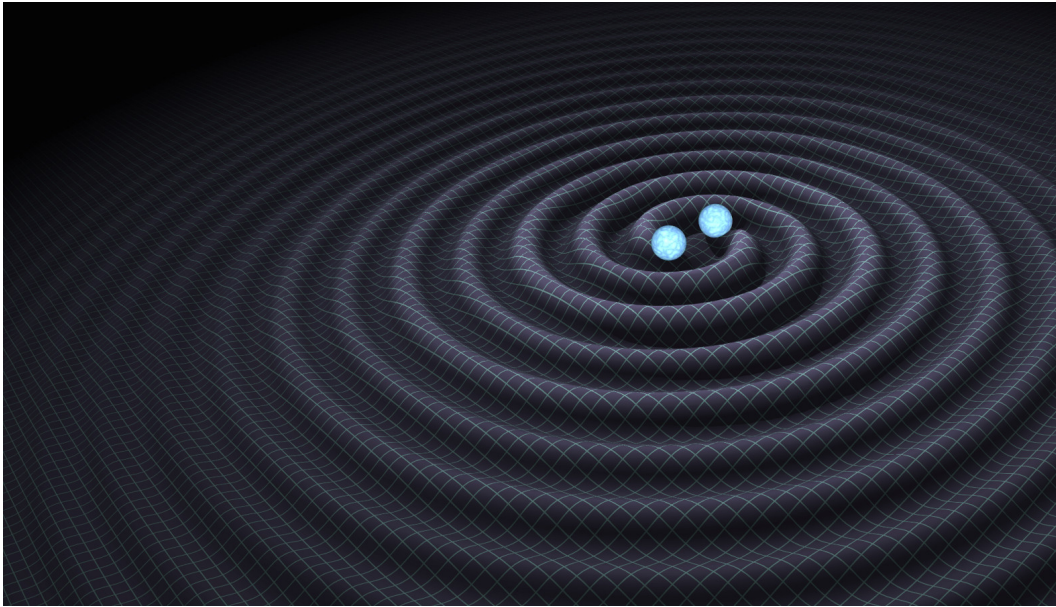
Dubbelsterren
- Dubbelsterren
- Materie-overdracht

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

Waarnemingen
- GW 150914
- GW 170817
- Meer detecties

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

Zwaartekrachtsgolven

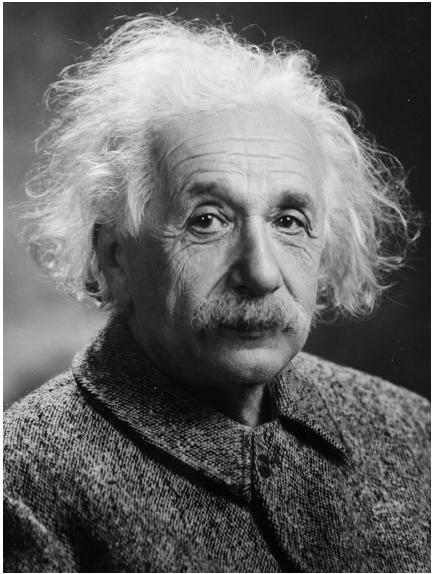


Zwaartekrachtsgolven

Dubbelsterren
Dubbelsterren
Materie-overdracht
Hoe detecteren we zwarte gaten?
Zwaartekrachtsgolven
LIGO/Virgo
Michelson interferometer
Waarnemingen
GW 150914
GW 170817
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?

Dubbelsterren
Dubbelsterren
Materie-overdracht
Hoe detecteren we zwarte gaten?
Zwaartekrachtsgolven
LIGO/Virgo
Michelson interferometer
Waarnemingen
GW 150914
GW 170817
Meer detecties
De toekomst
Global GW-detector network
Einstein Telescope
LISA

Nieuwe sterrenkunde:

- Geheel nieuw venster op het heelal!
- Waarnemen hoe neutronensterren uiteengetrokken worden;
- Neutronensterren waarnemen die imploderen tot zwart gat;
- Zwarte gaten die neutronensterren 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?

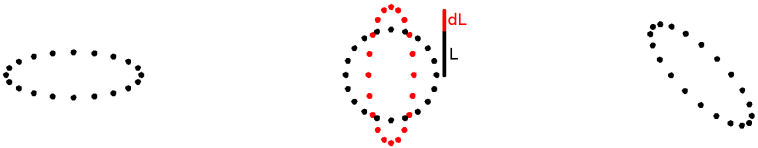
- Klopt de Relativiteitstheorie?

- *The unexpected* . . .

Eigenschappen van gravitatiegolven

Gravitatiegolven...

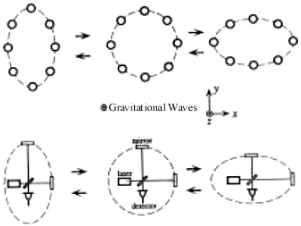
- propageren transversaal met de lichtsnelheid
- zijn quadrupoolstraling in de eerste orde
- rekken en drukken de ruimte-tijd in twee polarisaties
- laten ons hun amplitude meten

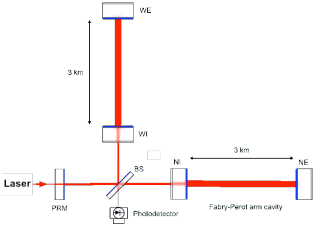


CBC strain: $|h(t)| \equiv \frac{\delta L(t)}{L} = \frac{4}{d}\frac{G^{5/3}}{c^4}\frac{M_1 M_2}{M_T^{1/3}}\left(\pi f_{gw}(t)\right)^{2/3} = \frac{4}{d}\frac{G^2}{c^4}\frac{M_1 M_2}{a_b(t)} \sim 1.5 \times 10^{-21}$

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

De Virgo-detector (Italië)

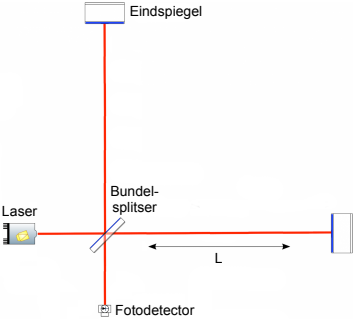




- LIGO Livingston, Louisiana (L1: 4 km)
- LIGO Hanford, Washington (H1: 4 km)
- Virgo: Pisa, Italië (V: 3 km)

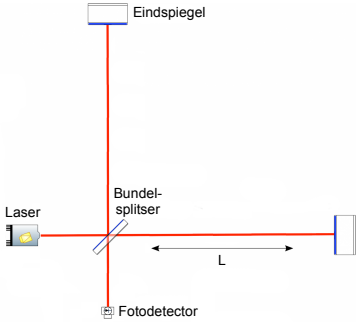
- KAGRA: Japan (2023, 3 km)
- Indigo: India (2025+?, 4 km)

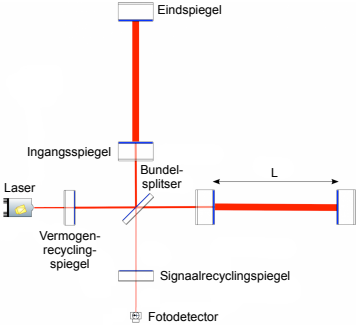
Een zwaartekrachtgolfdetector (H 6.6)



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

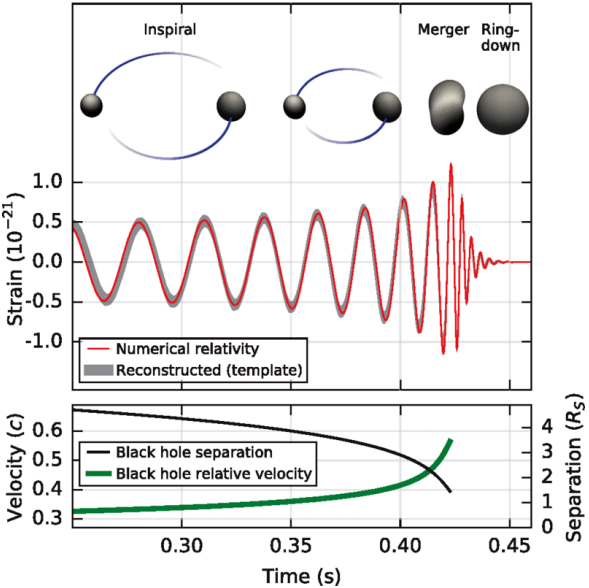




1. **Twee ingangsspiegels** in de armen $\rightarrow$ **Fabry-Pérot-holtes**: $L' \sim 250$–$300\,L$
   - minder shot noise, maar meer **ruis door stralingsdruk** bij lage frequentie
   - $\rightarrow\ h_{\rm min} \rightarrow \sim h_{\rm min}/250$
2. **Vermogenrecyclingspiegel** bij laser: $P'_{\rm L}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

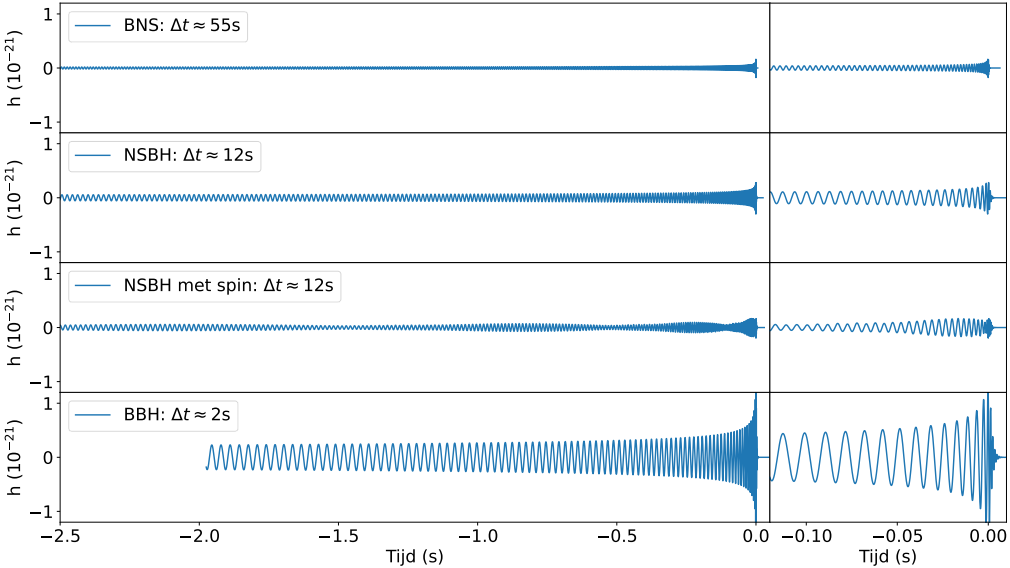
$$\rightarrow\ S_{\rm n}^{1/2}(f) \sim 3\times 10^{-24}/\sqrt{\rm Hz}\ \propto\ h_{\rm min} \sim 3\times 10^{-23}\ (@100\,{\rm Hz})\ \rightarrow \textbf{genoeg!}$$

Het signaal van een inspiral, merger en ringdown (H 6.5)



Bron: Abbott et al., 2016

Het signaal van een inspiral, merger en ringdown (H 6.5)



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

Inhoud

Dubbelsterren
Dubbelsterren
Materie-overdracht
Hoe detecteren we zwarte gaten?
Zwaartekrachtsgolven
LIGO/Virgo
Michelson interferometer
Waarnemingen
GW 150914
GW 170817
Meer detecties
De toekomst
Global GW-detector network
Einstein Telescope
LISA

1 Dubbelsterevolutie en materie-overdracht
- Dubbelsterren
- Materie-overdracht

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

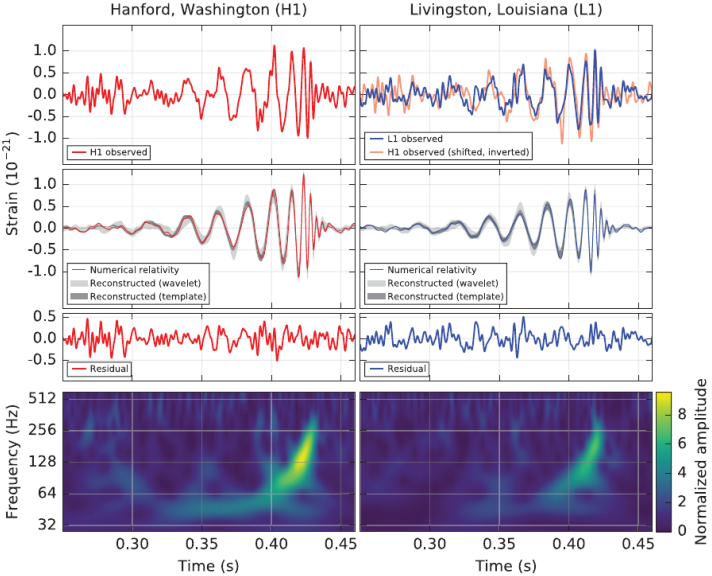
3 Waarnemingen
- GW 150914
- GW 170817
- Meer detecties

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

De eerste detectie: GW 150914

In de ruwe data zitten:

1. GW signaal
2. Ruis!



Bron: ligo.org

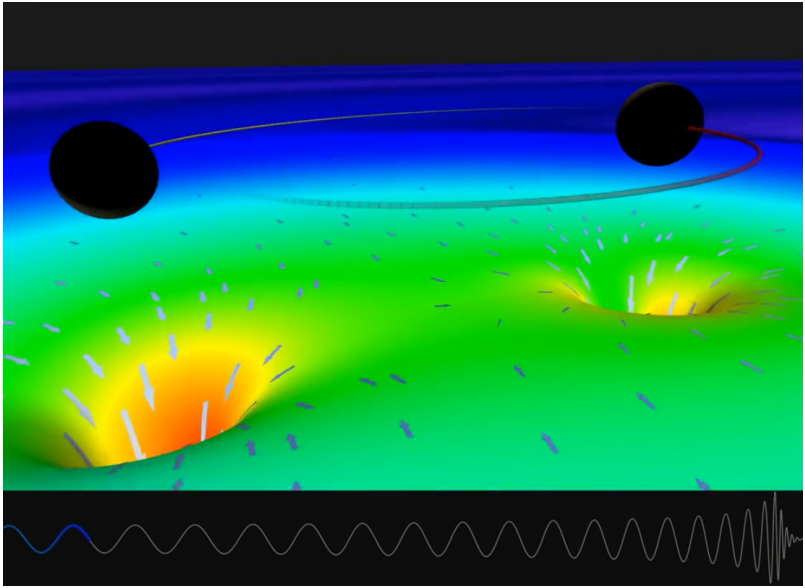
Dubbelsterren
- Dubbelsterren
- Materie-overdracht

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

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

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

Bron van GW 150914: dubbel zwart gat



Bron: www.black-holes.org

Bron van GW 150914

Dubbelsterren
Dubbelsterren
Materie-overdracht
Hoe detecteren we zwarte gaten?
Zwaartekrachtsgolven
LIGO/Virgo
Michelson interferometer
Waarnemingen
GW 150914
GW 170817
Meer detecties
De toekomst
Global GW-detector network
Einstein Telescope
LISA

Dubbel zwart gat:

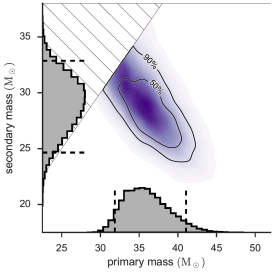
- $M_1 = 32 - 41\, M_\odot$
- $M_2 = 25 - 33\, M_\odot$
- Afstand: $\sim 0.75 - 1.86$ miljard lichtjaar

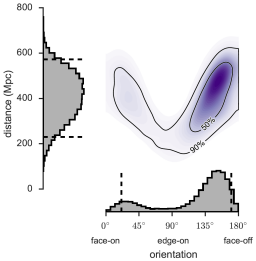
- Massa resultered zwart gat: $58 - 66\, M_\odot$
- Spin (0-1) resulterend zwart gat: $0.60 - 0.72$

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

Bron: Abbott et al., 2016

PDFs:





Dubbelsterren
Dubbelsterren
Materie-overdracht
Hoe detecteren we zwarte gaten?
Zwaartekrachtsgolven
LIGO/Virgo
Michelson interferometer
Waarnemingen
GW 150914
GW 170817
Meer detecties
De toekomst
Global GW-detector network
Einstein Telescope
LISA

Nieuw!!!

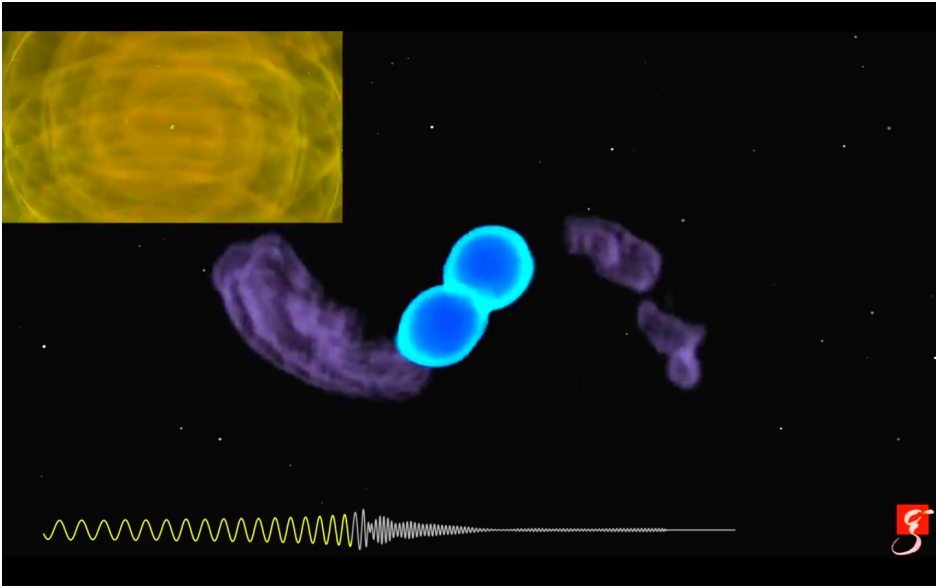
Astrofysica:

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

Fysica:

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

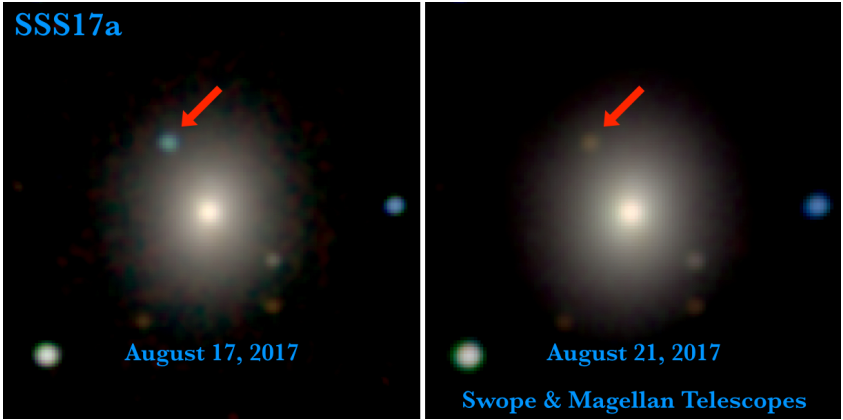
GW 170817: eerste NS-NS botsing



Bron: ligo.org

Dubbelsterren
Dubbelsterren
Materie-overdracht
Hoe detecteren we zwarte gaten?
Zwaartekrachtsgolven
LIGO/Virgo
Michelson interferometer
Waarnemingen
GW 150914
GW 170817
Meer detecties
De toekomst
Global GW-detector network
Einstein Telescope
LISA

GW 170817: optische tegenhanger!

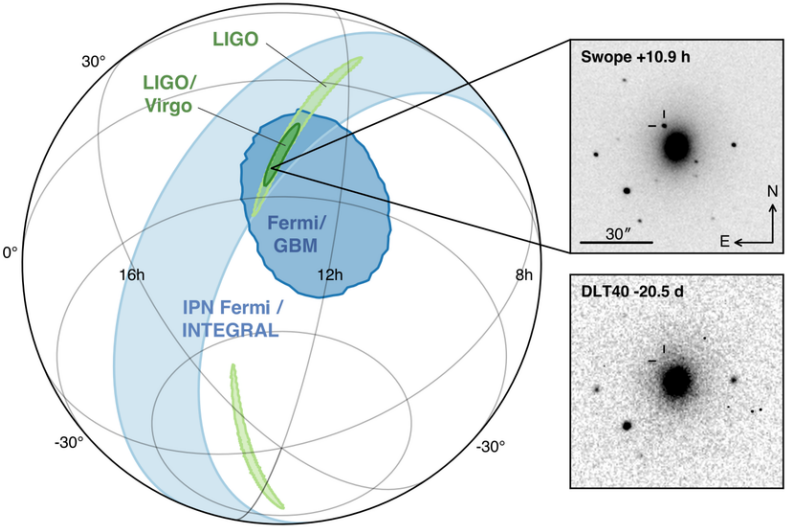


Bron: ligo.org

Electromagnetische waarnemingen

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

GW 170817: hemelpositie



Bron: Abbott et al. (2017)

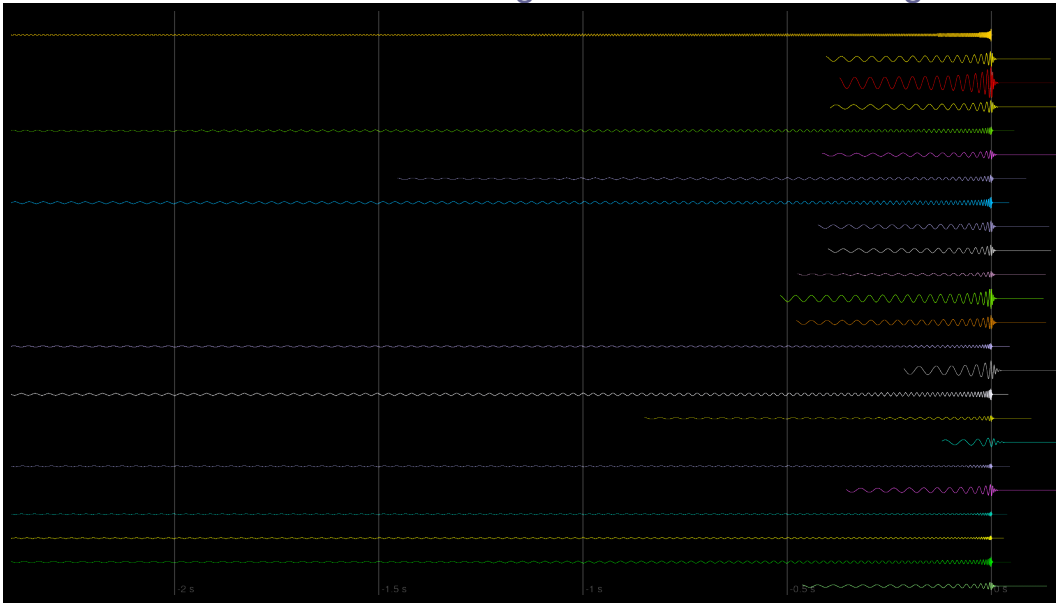
Detecties van zwaartekrachtgolven

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

Bron: The Gravitational-wave Transient Catalog (GWTC)

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

Waargenomen kosmische signalen



Bron: waveview.cardiffgravity.org

Hoe kunnen we zwarte gaten 'horen'?

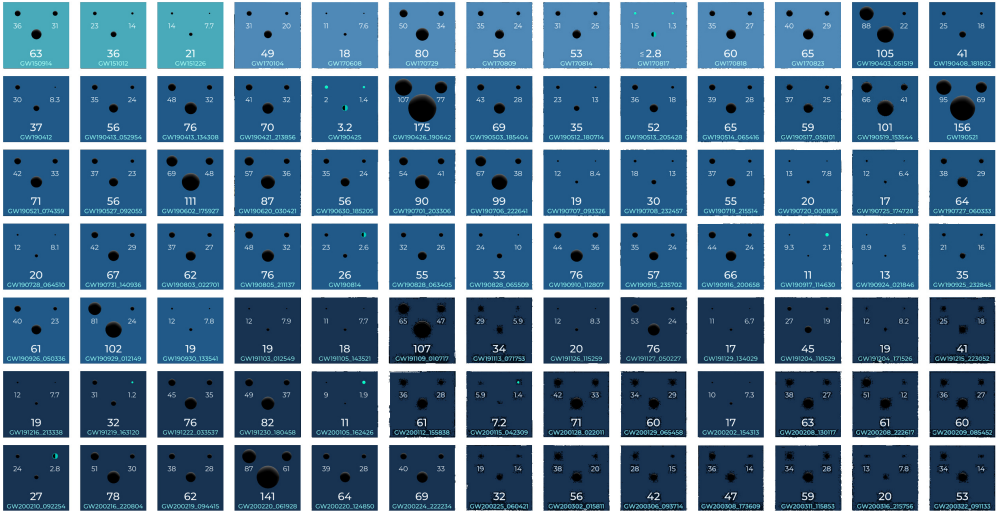
Dubbelsterren
- Dubbelsterren
- Materie-overdracht

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

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

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

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



Bron: www.ligo.caltech.edu

Inhoud

Dubbelsterren
Dubbelsterren
Materie-overdracht
Hoe detecteren we zwarte gaten?
Zwaartekrachtsgolven
LIGO/Virgo
Michelson interferometer
Waarnemingen
GW 150914
GW 170817
Meer detecties
De toekomst
Global GW-detector network
Einstein Telescope
LISA

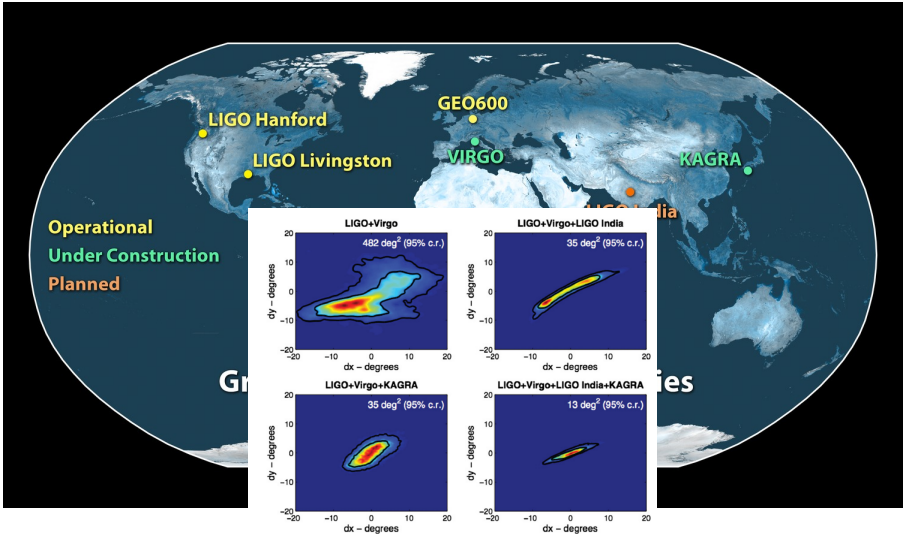
1 Dubbelsterevolutie en materie-overdracht
- Dubbelsterren
- Materie-overdracht

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

3 Waarnemingen
- GW 150914
- GW 170817
- Meer detecties

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

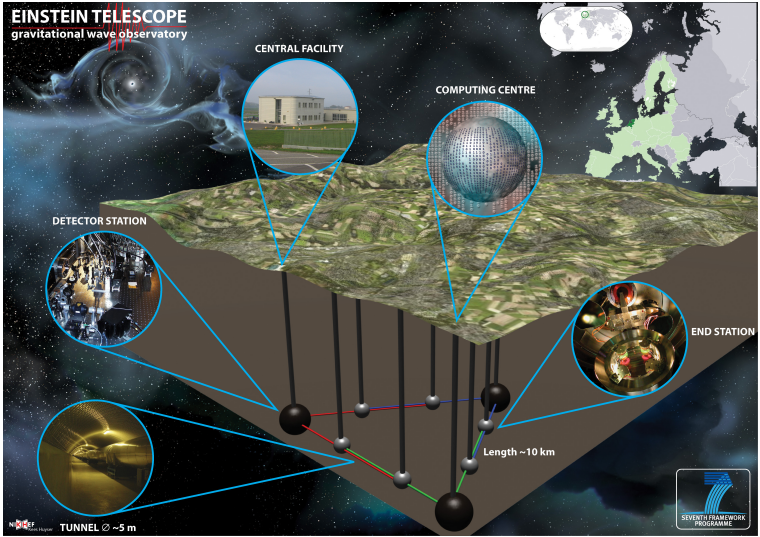
Global GW-detector network



Nissanke et al., 2013

Einstein Telescope

Dubbelsterren
Dubbelsterren
Materie-overdracht
Hoe detecteren we zwarte gaten?
Zwaartekrachtsgolven
LIGO/Virgo
Michelson interferometer
Waarnemingen
GW 150914
GW 170817
Meer detecties
De toekomst
Global GW-detector network
Einstein Telescope
LISA



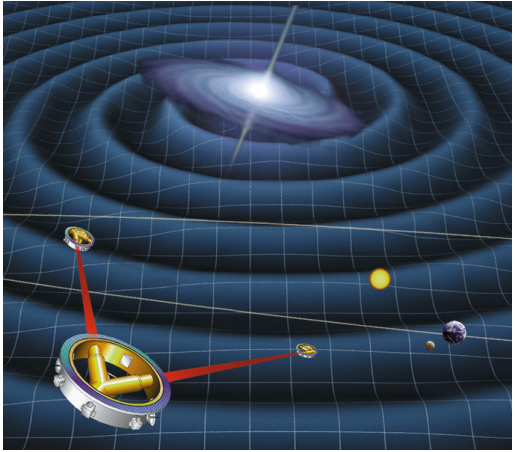
- Groter dan LIGO/Virgo
- Gevoeliger
- Meer signalen
- Meerdere signalen tegelijk!

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

- Tegenhanger VS: Cosmic Explorer

Laser Interferometer Space Antenna (LISA)

Dubbelsterren
Dubbelsterren
Materie-overdracht
Hoe detecteren we zwarte gaten?
Zwaartekrachtsgolven
LIGO/Virgo
Michelson interferometer
Waarnemingen
GW 150914
GW 170817
Meer detecties
De toekomst
Global GW-detector network
Einstein Telescope
LISA



Bron: lisamission.org

Ruimtemissie

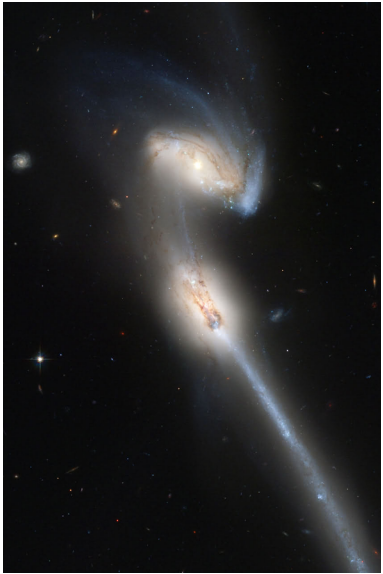
- 3 ruimtevaartuigen, 4 testmassa's
- Detector in een baan om de Zon, 20° achter de Aarde
- Driehoeksopstelling, armen van 1 miljoen km
- 1 Watt lasers
- Lage frequenties: 0.1 mHz – 1 Hz ($P \sim 1\,\mathrm{s} - 3\,\mathrm{u}$)
- Missieduur 5+ jaar
- LISA Pathfinder (december 2015) heeft technologie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

Laser Interferometer Space Antenna (LISA)

Dubbelsterren
Dubbelsterren
Materie-overdracht
Hoe detecteren we zwarte gaten?
Zwaartekrachtsgolven
LIGO/Virgo
Michelson interferometer
Waarnemingen
GW 150914
GW 170817
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: $\sim 1 - 10\%$