

Sterrenkunde Hoofdstuk 5: Zwaartekrachtgolven

Marc van der Sluys

Universiteit Utrecht, Nikhef



**Universiteit
Utrecht**

<https://www.nikhef.nl/~sluys/>

sluys@nikhef.nl

Nikhef

**Zwaartekracht-
golven**

ART in 2 slides

- Einsteinvergelijkingen
- Golfoplossingen

Golven

- EM vs. GW
- Effect van een GW

Een GW detector

- Michelson
interferometer
- MI++

GW-signalen

- Inspiral, merger en
ringdown
- GW-signalen

Analyse van GWs

- Spectra en SNR

Detecties

- GW 150914: BH+BH
- GW 170817: NS+NS
- Meer detecties

De toekomst

- Globaal netwerk
- Einstein Telescope
- LISA

- 1 ART in 2 slides
 - Einsteinvergelijkingen
 - Golfoplossingen
- 2 Golven
- 3 Een GW detector

- 4 GW-signalen
- 5 Analyse van GWs
- 6 Detecties
- 7 De toekomst

ART in 2 slides

Einsteinvergelijkingen

Golfoplossingen

Golven

EM vs. GW

Effect van een GW

Een GW detector

Michelson
interferometer

MI++

GW-signalen

Inspiral, merger en
ringdown

GW-signalen

Analyse van GWs

Spectra en SNR

Detecties

GW 150914: BH+BH

GW 170817: NS+NS

Meer detecties

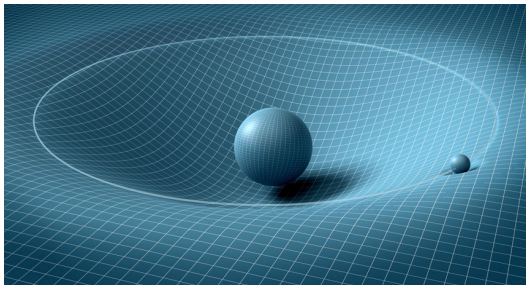
De toekomst

Globaal netwerk

Einstein Telescope

LISA

- Newton: $\vec{g} = -\frac{GM}{r^2}\hat{r}$
- Gauss: $\vec{\nabla} \cdot \vec{g} = -4\pi G \rho_m(\vec{r})$ (vergelijk $\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \rho_e(\vec{r})/\epsilon_0$)
- Einstein: $G_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$
 - $G_{\mu\nu}$: **Einsteintensor**: kromming van de ruimtetijd (m^{-2})
 - $T_{\mu\nu}$: **energie-impulstensor**: verdeling van massa en energie (J/m^3)
- **Massa en energie** vertellen de ruimtetijd **hoe te krommen**
- De **gekromde ruimtetijd** vertelt massa en energie **hoe te bewegen**



ART in 2 slides

Einsteinvergelijkingen

Golfoplossingen

Golven

EM vs. GW

Effect van een GW

Een GW detector

Michelson
interferometer

MI++

GW-signalen

Inspiral, merger en
ringdown

GW-signalen

Analyse van GWs

Spectra en SNR

Detecties

GW 150914: BH+BH

GW 170817: NS+NS

Meer detecties

De toekomst

Globaal netwerk

Einstein Telescope

LISA

- De **metrische tensor** kan worden geschreven als: $g_{\mu\nu} \approx \eta_{\mu\nu} + h_{\mu\nu}$
 - $\eta_{\mu\nu}$ is de *vlakke Minkowski*ruimteti*jd* van de SRT ($\eta_{\mu\mu} = \pm 1$; $\eta_{\mu \neq \nu} = 0$)
 - $h_{\mu\nu}$ is een kleine **verstoring** daarop, met $|h| \ll 1$

- Kies symmetrie en coördinaten slim m.b.v. de *Lorenz-ijking* en *TT-ijking*
- Beschouw “vacuüm” (lage dichtheid, **ver van de bron**): $T_{\mu\nu} \sim 0$:

$$\square \bar{h}_{\mu\nu} \equiv \left(\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} - \nabla^2 \right) \bar{h}_{\mu\nu} = 0$$

- Dan hebben we:
 - gelineariseerde** Einsteinvergelijkingen (een beperkt geldige versimpeling)
 - hebben de vorm van een **golfvergelijking** $\rightarrow$ oplossingen zijn **golven**
 - golven zijn **transversaal** en hebben **amplitude** $|h_{\mu\nu}|$
 - $c^2 \rightarrow$ snelheid = lichtsnelheid
 - twee vrijheidsgraden over $\rightarrow$ **twee polarisaties**: $+$ en $\times$

**Zwaartekracht-
golven**

ART in 2 slides

- Einsteinvergelijkingen
- Golfoplossingen

Golven

- EM vs. GW
- Effect van een GW

Een GW detector

- Michelson
interferometer
- MI++

GW-signalen

- Inspiral, merger en
ringdown
- GW-signalen

Analyse van GWs

- Spectra en SNR

Detecties

- GW 150914: BH+BH
- GW 170817: NS+NS
- Meer detecties

De toekomst

- Globaal netwerk
- Einstein Telescope
- LISA

- 1 ART in 2 slides
- 2 Golven
 - EM vs. GW
 - Effect van een GW
- 3 Een GW detector

- 4 GW-signalen
- 5 Analyse van GWs
- 6 Detecties
- 7 De toekomst

ART in 2 slides

Einsteinvergelijkingen

Golfplossingen

Golven

EM vs. GW

Effect van een GW

Een GW detector

Michelson
interferometer

MI++

GW-signalen

Inspiral, merger en
ringdown

GW-signalen

Analyse van GWs

Spectra en SNR

Detecties

GW 150914: BH+BH

GW 170817: NS+NS

Meer detecties

De toekomst

Globaal netwerk

Einstein Telescope

LISA

EM golven ...

- bewegen zich **door** de ruimtetijd
- worden **incoherent** geproduceerd door **vele (kleine) atomen**
- hebben een **korte golflengte** m.b.t. de afmeting van de bron
- hebben frequenties $\gtrsim 10^6$ Hz
- maken gebruik van de relatief **sterke** EM-kracht
- worden gemeten in **energie**
 $\rightarrow L(r) \sim 1/r^2$

Gravitatiegolven ...

- zijn golven **in de metriek** van de ruimtetijd
- worden **coherent** geproduceerd door een **paar grote massa's**
- hebben een **lange golflengte** m.b.t. de afmeting van de bron
- hebben frequenties $\lesssim 10^3$ Hz
- maken gebruik van de **zwakke** zwaartekracht
- worden gemeten in **amplitude**
 $\rightarrow L(r) \sim 1/r$

- Voor alle i, j , dus alle combinaties van polarisatie en ruimtecoördinaat:

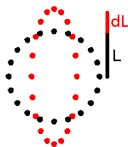
$$\delta x(t) = \frac{x_0}{2} A_+ \sin(\omega_{\text{gw}} t) = \frac{x_0}{2} h_+(t);$$

$$\delta y(t) = -\frac{y_0}{2} A_+ \sin(\omega_{\text{gw}} t) = -\frac{y_0}{2} h_+(t);$$

$$\delta x(t) = \frac{y_0}{2} A_{\times} \sin(\omega_{\text{gw}} t) = \frac{y_0}{2} h_{\times}(t);$$

$$\delta y(t) = \frac{x_0}{2} A_{\times} \sin(\omega_{\text{gw}} t) = \frac{x_0}{2} h_{\times}(t).$$

- $\rightarrow h(t) \sim \frac{\delta x(t)}{x}$ heet de **strain** en is een **relatieve** amplitude
- Dit verklaart ook de namen van de **twee polarisaties** $+$ en $\times$



ART in 2 slides

Einsteinvergelijkingen

Golfoplossingen

Golven

EM vs. GW

Effect van een GW

Een GW detector

Michelson
interferometer

MI++

GW-signalen

Inspirale, merger en
ringdown

GW-signalen

Analyse van GWs

Spectra en SNR

Detecties

GW 150914: BH+BH

GW 170817: NS+NS

Meer detecties

De toekomst

Globaal netwerk

Einstein Telescope

LISA

ART in 2 slides

Einsteinvergelijkingen
Golfoplossingen

Golven

EM vs. GW
Effect van een GW

Een GW detector

Michelson
interferometer
MI++

GW-signalen

Inspirale, merger en
ringdown
GW-signalen

Analyse van GWs

Spectra en SNR

Detecties

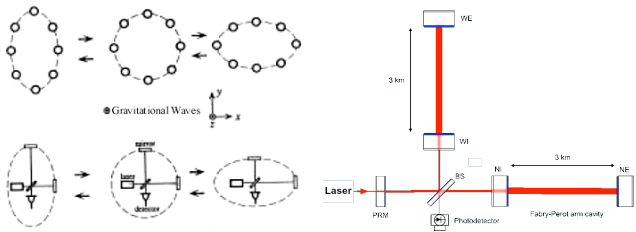
GW 150914: BH+BH
GW 170817: NS+NS
Meer detecties

De toekomst

Globaal netwerk
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)



ART in 2 slides

Einsteinvergelijkingen
Golfoplossingen

Golven

EM vs. GW
Effect van een GW

Een GW detector

Michelson
interferometer
MI++

GW-signalen

Inspiral, merger en
ringdown
GW-signalen

Analyse van GWs

Spectra en SNR

Detecties

GW 150914: BH+BH
GW 170817: NS+NS
Meer detecties

De toekomst

Globaal netwerk
Einstein Telescope
LISA

- 1 ART in 2 slides
- 2 Golven
- 3 Een GW detector
 - Michelson interferometer
 - MI++

- 4 GW-signalen
- 5 Analyse van GWs
- 6 Detecties
- 7 De toekomst

ART in 2 slides

Einsteinvergelijkingen

Golfoplossingen

Golven

EM vs. GW

Effect van een GW

Een GW detector

Michelson
interferometer

MI++

GW-signalen

Inspirale, merger en
ringdown

GW-signalen

Analyse van GWs

Spectra en SNR

Detecties

GW 150914: BH+BH

GW 170817: NS+NS

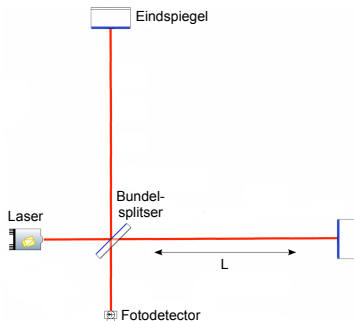
Meer detecties

De toekomst

Globaal netwerk

Einstein Telescope

LISA



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

ART in 2 slides

Einsteinvergelijkingen

Golfoplossingen

Golven

EM vs. GW

Effect van een GW

Een GW detector

Michelson interferometer

MI++

GW-signalen

Inspirale, merger en ringdown

GW-signalen

Analyse van GWs

Spectra en SNR

Detecties

GW 150914: BH+BH

GW 170817: NS+NS

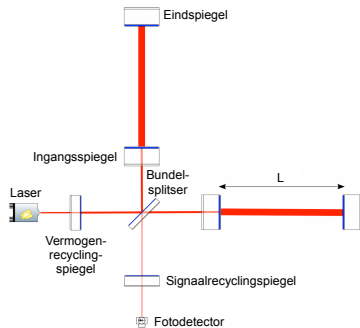
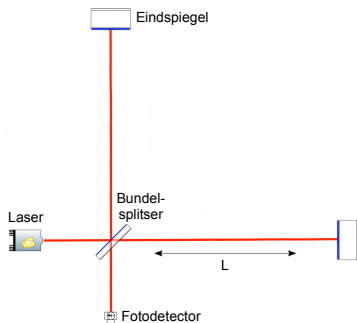
Meer detecties

De toekomst

Globaal netwerk

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}

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

ART in 2 slides

Einsteinvergelijkingen

Golfplossingen

Golven

EM vs. GW

Effect van een GW

Een GW detector

Michelson
interferometer

MI++

GW-signalen

Inspirale, merger en
ringdown

GW-signalen

Analyse van GWs

Spectra en SNR

Detecties

GW 150914: BH+BH

GW 170817: NS+NS

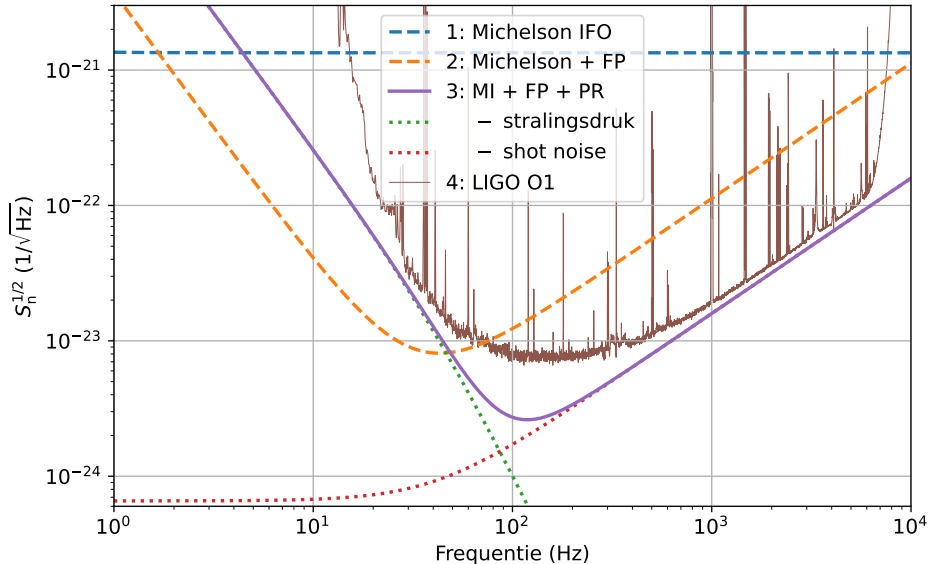
Meer detecties

De toekomst

Globaal netwerk

Einstein Telescope

LISA



● O1: LIGO Observation run 1 (2015)

**Zwaartekracht-
golven**

ART in 2 slides

Einsteinvergelijkingen
Golfoplossingen

Golven

EM vs. GW
Effect van een GW

Een GW detector

Michelson
interferometer
MI++

GW-signalen

Inspiral, merger en
ringdown
GW-signalen

Analyse van GWs

Spectra en SNR

Detecties

GW 150914: BH+BH
GW 170817: NS+NS
Meer detecties

De toekomst

Globaal netwerk
Einstein Telescope
LISA

- 1 ART in 2 slides
- 2 Golven
- 3 Een GW detector
- 4 GW-signalen

- Inspiral, merger en ringdown
- GW-signalen
- 5 Analyse van GWs
- 6 Detecties
- 7 De toekomst

Het signaal van een inspiral, merger en ringdown (H5.5)

Zwaartekrachtgolven

ART in 2 slides

Einsteinvergelijkingen

Golfplossingen

Golven

EM vs. GW

Effect van een GW

Een GW detector

Michelson
interferometer

MI++

GW-signalen

Inspiral, merger en
ringdown

GW-signalen

Analyse van GWs

Spectra en SNR

Detecties

GW 150914: BH+BH

GW 170817: NS+NS

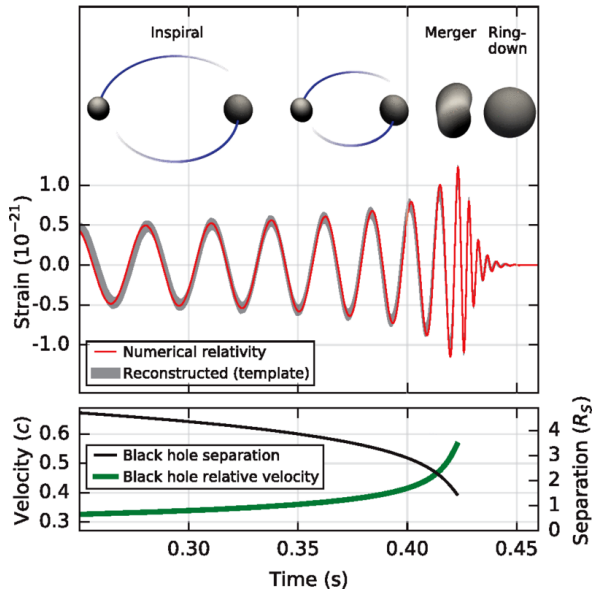
Meer detecties

De toekomst

Globaal netwerk

Einstein Telescope

LISA



Het signaal van een inspiral, merger en ringdown (H5.5)

Zwaartekrachtgolven

ART in 2 slides

Einsteinvergelijkingen

Golfplossingen

Golven

EM vs. GW

Effect van een GW

Een GW detector

Michelson
interferometer

MI++

GW-signalen

Inspiral, merger en
ringdown

GW-signalen

Analyse van GWs

Spectra en SNR

Detecties

GW 150914: BH+BH

GW 170817: NS+NS

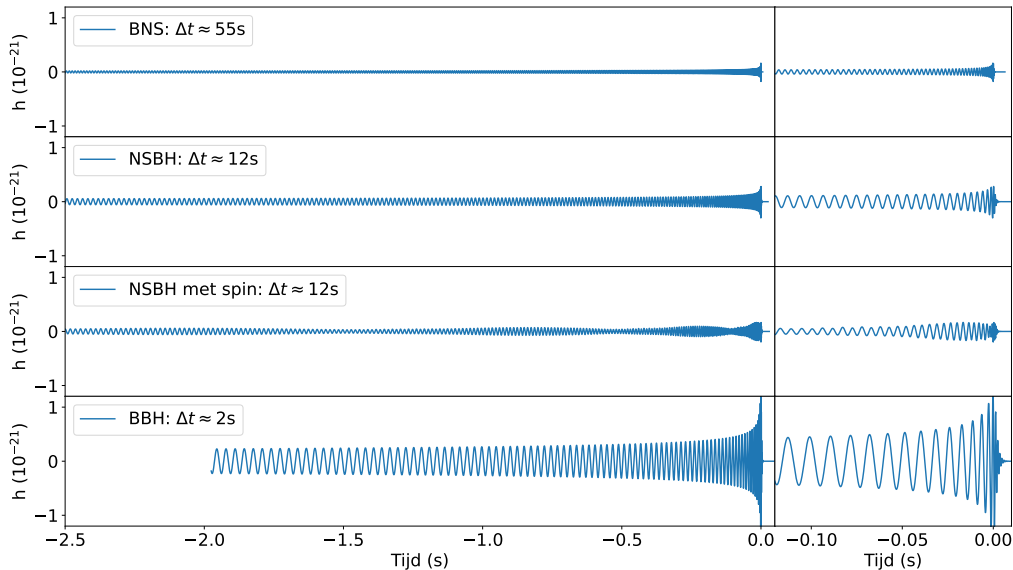
Meer detecties

De toekomst

Globaal netwerk

Einstein Telescope

LISA



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

Het signaal van (alleen!) een inspiral (H5.4, 5.6)

Zwaartekrachtgolven

ART in 2 slides

Einsteinvergelijkingen

Golfplossingen

Golven

EM vs. GW

Effect van een GW

Een GW detector

Michelson
interferometer

MI++

GW-signalen

Inspiral, merger en
ringdown

GW-signalen

Analyse van GWs

Spectra en SNR

Detecties

GW 150914: BH+BH

GW 170817: NS+NS

Meer detecties

De toekomst

Globaal netwerk

Einstein Telescope

LISA

- **chirp:** $f_{\text{gw}}(t) = \frac{1}{\pi} \left(\frac{5}{256} \frac{1}{t_{\text{coal}} - t} \right)^{3/8} \left(\frac{G\mathcal{M}_c}{c^3} \right)^{-5/8}$
- **amplitude:** $|h_{\text{opt}}(t)| = \frac{4}{d} \frac{G^{5/3}}{c^4} \frac{M_1 M_2}{M_T^{1/3}} (\pi f_{\text{gw}}(t))^{2/3} = \frac{4}{d} \left(\frac{G\mathcal{M}_c}{c^2} \right)^{5/3} \left(\frac{\pi f_{\text{gw}}(t)}{c} \right)^{2/3}$
- **tijd in detectorband:** $\Delta t = \frac{5}{256} \pi^{-8/3} \left(\frac{G\mathcal{M}_c}{c^3} \right)^{-5/3} \left[f_{\text{min}}^{-8/3} - f_{\text{max}}^{-8/3} \right]$
 $\approx 2.16 \text{ s} \left(\frac{\mathcal{M}_c}{1.22 M_{\odot}} \right)^{-5/3} \left[\left(\frac{f_{\text{min}}}{100 \text{ Hz}} \right)^{-8/3} - \left(\frac{f_{\text{max}}}{100 \text{ Hz}} \right)^{-8/3} \right] (\mathcal{M}_c \approx 1.22 M_{\odot} \text{ voor BNS})$
 - $f_{\text{min}} \sim 30 \text{ Hz}$ voor LIGO/Virgo O1–O2; $\sim 20 \text{ Hz}$ voor O3
 - $\Delta t \sim \text{minuut}$ voor **BNS**; $\sim \text{seconden}$ voor **BBH**; $\ll 1 \text{ seconde}$ voor **zwaar BBH**
- **merger:**
 - BH: $R_{\text{isco}} = \frac{6GM}{c^2} = 3R_s$: innermost stable circular orbit
 - $f_{\text{max}} = f_{\text{gw,isco}} = \frac{1}{6^{3/2}\pi} \frac{c^3}{GM} \approx 4.4 \text{ kHz} \left(\frac{M}{M_{\odot}} \right)^{-1}$
 - NS: $R_{\text{ns}} \sim 12 \text{ km} \rightarrow \text{Kepler} \rightarrow f_{\text{max}}$
 - $f_{\text{gw,max}} \sim \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{GM}{a_{\text{min}}^3}}; \quad a_{\text{min}} \sim 1.5 (R_1 + R_2)$

ART in 2 slides

- Einsteinvergelijkingen
- Golfplossingen

Golven

- EM vs. GW
- Effect van een GW

Een GW detector

- Michelson interferometer
- MI++

GW-signalen

- Inspiral, merger en ringdown

GW-signalen

Analyse van GWs

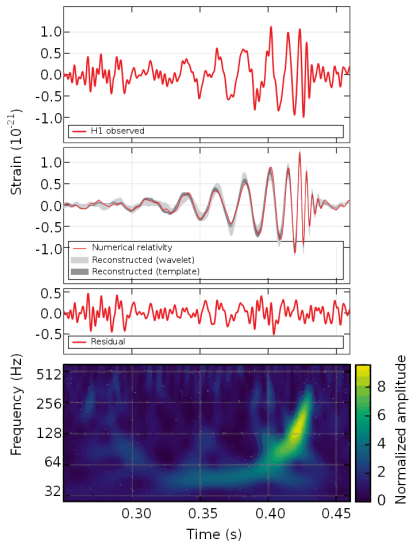
- Spectra en SNR

Detecties

- GW 150914: BH+BH
- GW 170817: NS+NS
- Meer detecties

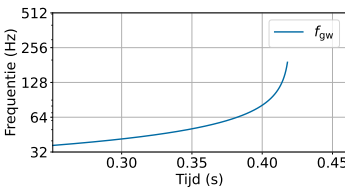
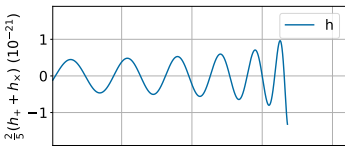
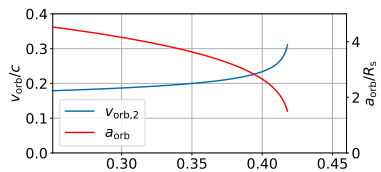
De toekomst

- Globaal netwerk
- Einstein Telescope
- LISA



GW 150914

Bron: [Abbott et al. \(2016\)](#)



Newtoniaans modelletje

**Zwaartekracht-
golven**

ART in 2 slides

Einsteinvergelijkingen
Golfoplossingen

Golven

EM vs. GW
Effect van een GW

Een GW detector

Michelson
interferometer
MI++

GW-signalen

Inspiral, merger en
ringdown
GW-signalen

Analyse van GWs

Spectra en SNR

Detecties

GW 150914: BH+BH
GW 170817: NS+NS
Meer detecties

De toekomst

Globaal netwerk
Einstein Telescope
LISA

- 1 ART in 2 slides
- 2 Golven
- 3 Een GW detector

- 4 GW-signalen
- 5 Analyse van GWs
 - Spectra en SNR
- 6 Detecties
- 7 De toekomst

ART in 2 slides

Einsteinvergelijkingen

Golfoplossingen

Golven

EM vs. GW

Effect van een GW

Een GW detector

Michelson
interferometer

MI++

GW-signalen

Inspiral, merger en
ringdown

GW-signalen

Analyse van GWs

Spectra en SNR

Detecties

GW 150914: BH+BH

GW 170817: NS+NS

Meer detecties

De toekomst

Globaal netwerk

Einstein Telescope

LISA

- **Spectrum:** $\tilde{h}(f) = \frac{2}{5} \left(\frac{5}{6}\right)^{1/2} \frac{1}{2\pi^{2/3}} \frac{c}{d} \left(\frac{GM_c}{c^3}\right)^{5/6} f_{\text{gw}}^{-7/6}$ (Fouriertransformatie)

- tilde ($\sim$) $\rightarrow$ frequentiedomein
- 2/5: gemiddeld over alle posities en oriëntaties

- **SNR ρ :** $\rho^2 \equiv 4 \int_{f_{\min}}^{f_{\max}} \frac{|\tilde{h}(f)|^2}{S_n(f)} df$ signaal-ruisverhouding; *signal-to-noise ratio*

- netwerk: $\rho_{\text{tot}} = \sqrt{\sum_i^{N_{\text{det}}} \rho_i^2}$

- **let op:** $[h(t)]=1$; $[\tilde{h}(f)] = \text{Hz}^{-1}$; $[S_n^{1/2}(f)] = \text{Hz}^{-1/2}$! (**ASD** $\equiv \sqrt{\text{PSD}}$)

- **Detectie** $\equiv$

- $N_{\text{det}} > 1$
- $\rho \equiv \sum_i \rho_i$; $\rho = \frac{h_0}{n_0} > \rho_{\min} \sqrt{\frac{\tau_0}{T_{\text{obs}}}} \sim 8$

- **Gevoeligheid detector**

- **range** $\equiv$ afstand waarvoor $\rho = 8$ voor een **gemiddelde** positie en oriëntatie
- **horizon** $\equiv$ afstand waarvoor $\rho = 8$ voor een **optimale** positie en oriëntatie

ART in 2 slides

Einsteinvergelijkingen

Golfplossingen

Golven

EM vs. GW

Effect van een GW

Een GW detector

Michelson interferometer

MI++

GW-signalen

Inspiral, merger en ringdown

GW-signalen

Analyse van GWs

Spectra en SNR

Detecties

GW 150914: BH+BH

GW 170817: NS+NS

Meer detecties

De toekomst

Globaal netwerk

Einstein Telescope

LISA

• SNR: $\rho \equiv 2 \int_{f_{\min}}^{f_{\text{gw, isco}}} \frac{|\tilde{h}(f)|}{S_n^{1/2}(f)} df \rightarrow \sim \text{integraal over signaal-ruisverhouding}$

Zwaartekracht- golven

ART in 2 slides

Einsteinvergelijkingen

Golfoplossingen

Golven

EM vs. GW

Effect van een GW

Een GW detector

Michelson
interferometer

MI++

GW-signalen

Inspiral, merger en
ringdown

GW-signalen

Analyse van GWs

Spectra en SNR

Detecties

GW 150914: BH+BH

GW 170817: NS+NS

Meer detecties

De toekomst

Globaal netwerk

Einstein Telescope

LISA

1 ART in 2 slides

2 Golven

3 Een GW detector

4 GW-signalen

5 Analyse van GWs

6 Detecties

- GW 150914: BH+BH
- GW 170817: NS+NS
- Meer detecties

7 De toekomst

ART in 2 slides

- Einsteinvergelijkingen
- Golfplossingen

Golven

- EM vs. GW
- Effect van een GW

Een GW detector

- Michelson interferometer
- MI++

GW-signalen

- Inspirale, merger en ringdown
- GW-signalen

Analyse van GWs

- Spectra en SNR

Detecties

- GW 150914: BH+BH
- GW 170817: NS+NS
- Meer detecties

De toekomst

- Globaal netwerk
- Einstein Telescope
- LISA

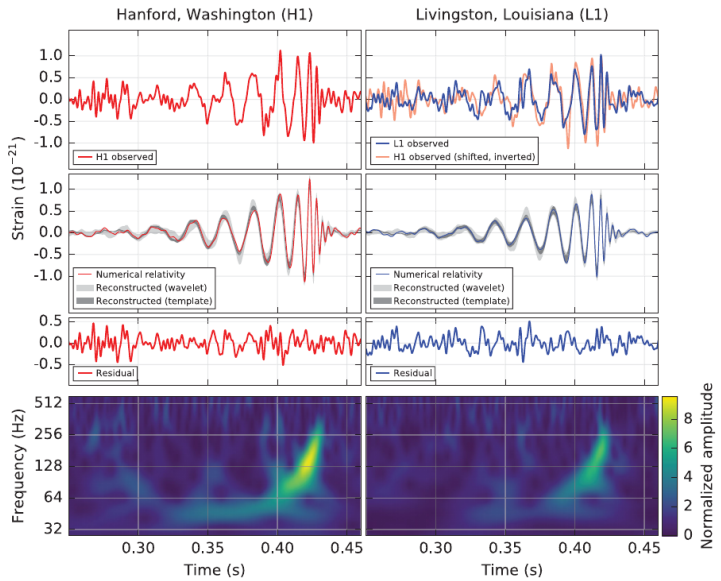
In de ruwe data zitten:

1

GW signaal

2

Ruis!



ART in 2 slides

Einsteinvergelijkingen

Golfoplossingen

Golven

EM vs. GW

Effect van een GW

Een GW detector

Michelson
interferometer

MI++

GW-signalen

Inspiral, merger en
ringdown

GW-signalen

Analyse van GWs

Spectra en SNR

Detecties

GW 150914: BH+BH

GW 170817: NS+NS

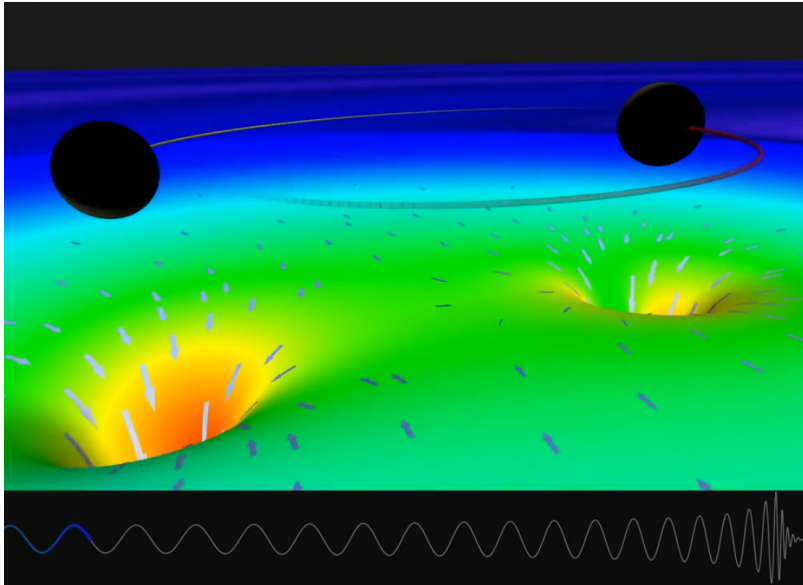
Meer detecties

De toekomst

Globaal netwerk

Einstein Telescope

LISA



ART in 2 slides

- Einsteinvergelijkingen
- Golfplossingen

Golven

- EM vs. GW
- Effect van een GW

Een GW detector

- Michelson
interferometer
- MI++

GW-signalen

- Inspiral, merger en
ringdown
- GW-signalen

Analyse van GWs

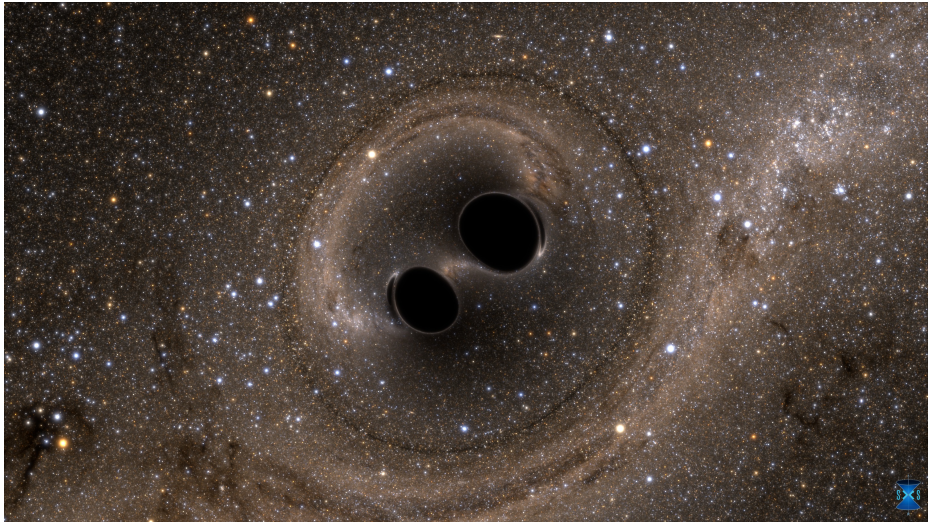
- Spectra en SNR

Detecties

- GW 150914: BH+BH
- GW 170817: NS+NS
- Meer detecties

De toekomst

- Globaal netwerk
- Einstein Telescope
- LISA



Bron: [SXS Collaboration](#)

ART in 2 slides

Einsteinvergelijkingen

Golfplossingen

Golven

EM vs. GW

Effect van een GW

Een GW detector

Michelson
interferometer

MI++

GW-signalen

Inspiral, merger en
ringdown

GW-signalen

Analyse van GWs

Spectra en SNR

Detecties

GW 150914: BH+BH

GW 170817: NS+NS

Meer detecties

De toekomst

Globaal netwerk

Einstein Telescope

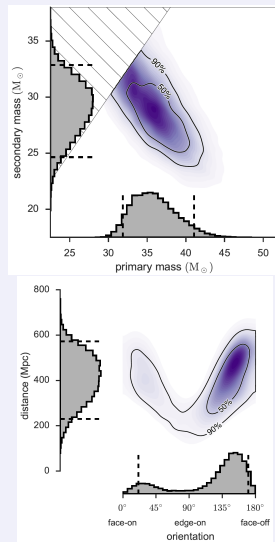
LISA

Dubbel zwart gat:

- $M_1 = 32 - 41 M_\odot$
- $M_2 = 25 - 33 M_\odot$
- Afstand: $\sim 230 - 570$ Mpc
($\sim 0.75 - 1.86$ miljard lichtjaar)
- Massa resulterend zwart gat: $58 - 66 M_\odot$
- Spin (0-1) resulterend zwart gat: $0.60 - 0.72$
- Verloren massa: $\sim 2.5 - 3.5 M_\odot$: $mc^2 = E!$
- Maximale helderheid:
 - $\sim 3.2 - 4.0 \times 10^{49}$ W
 - $\sim 200 M_\odot c^2/s$
 - $\sim 9.4 \times 10^{22} L_\odot$
 - $\sim 50 \times$ alle sterren in het zichtbare heelal!

Bron: [Abbott et al. \(2016\)](#)

PDFs:



ART in 2 slides

Einsteinvergelijkingen

Golfplossingen

Golven

EM vs. GW

Effect van een GW

Een GW detector

Michelson
interferometer

MI++

GW-signalen

Inspiral, merger en
ringdown

GW-signalen

Analyse van GWs

Spectra en SNR

Detecties

GW 150914: BH+BH

GW 170817: NS+NS

Meer detecties

De toekomst

Globaal netwerk

Einstein Telescope

LISA

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
 - BBH rate $\gtrsim 1 \text{ Gpc}^{-3} \text{ yr}^{-1}$
- Zwakke **sterenwinden**, lage metalliciteit ($\lesssim 0.5 Z_{\odot}$)

Fysica:

- Geen afwijkingen Algemene Relativiteitstheorie
- Bevestiging theoretische (IMR) *waveforms* ($\geq 96\%$)
- Gravitonmassa: $m_g \leq 1.2 \times 10^{-22} \text{ eV}/c^2 = 2 \times 10^{-55} \text{ g}$
- Gravitonspin, polarisaties GWs: geen constraints

Zwaartekrachtgolven

ART in 2 slides

- Einsteinvergelijkingen
- Golfoplossingen

Golven

- EM vs. GW
- Effect van een GW

Een GW detector

- Michelson interferometer
- MI++

GW-signalen

- Inspirale, merger en ringdown
- GW-signalen

Analyse van GWs

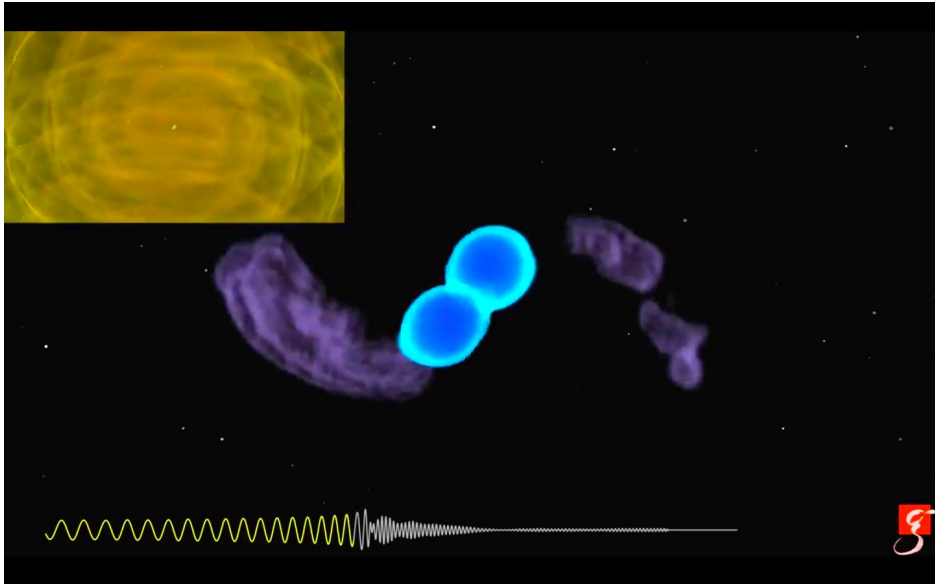
- Spectra en SNR

Detecties

- GW 150914: BH+BH
- GW 170817: NS+NS
- Meer detecties

De toekomst

- Globaal netwerk
- Einstein Telescope
- LISA



ART in 2 slides

Einsteinvergelijkingen

Golfoplossingen

Golven

EM vs. GW

Effect van een GW

Een GW detector

Michelson
interferometer

MI++

GW-signalen

Inspiral, merger en
ringdown

GW-signalen

Analyse van GWs

Spectra en SNR

Detecties

GW 150914: BH+BH

GW 170817: NS+NS

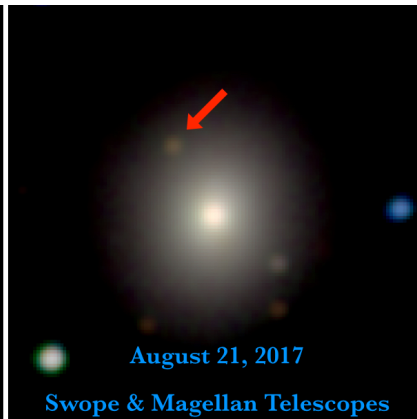
Meer detecties

De toekomst

Globaal netwerk

Einstein Telescope

LISA



Bron: ligo.org

Elektromagnetische waarnemingen

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

ART in 2 slides

- Einsteinvergelijkingen
- Golfoplossingen

Golven

- EM vs. GW
- Effect van een GW

Een GW detector

- Michelson interferometer
- MI++

GW-signalen

- Inspirale, merger en ringdown
- GW-signalen

Analyse van GWs

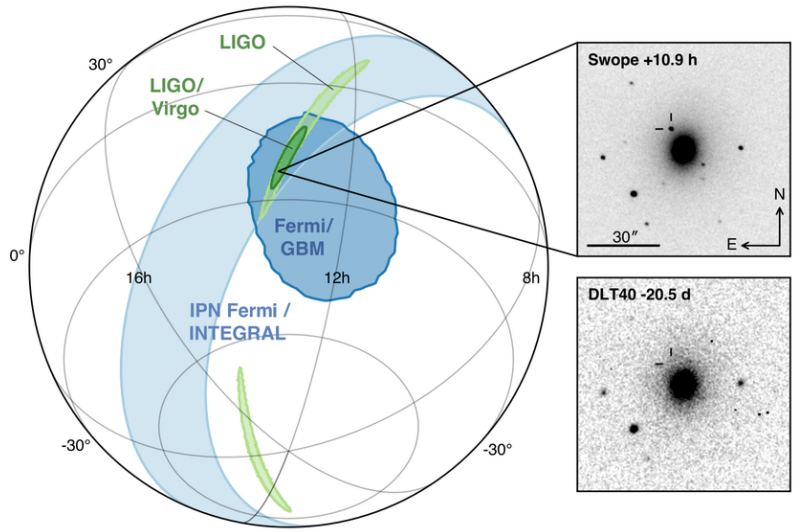
- Spectra en SNR

Detecties

- GW 150914: BH+BH
- GW 170817: NS+NS
- Meer detecties

De toekomst

- Globaal netwerk
- Einstein Telescope
- LISA



ART in 2 slides

Einsteinvergelijkingen

Golfplossingen

Golven

EM vs. GW

Effect van een GW

Een GW detector

Michelson interferometer

MI++

GW-signalen

Inspiral, merger en ringdown

GW-signalen

Analyse van GWs

Spectra en SNR

Detecties

GW 150914: BH+BH

GW 170817: NS+NS

Meer detecties

De toekomst

Globaal netwerk

Einstein Telescope

LISA

Signaal	M ₁ (M _⊙)	M ₂ (M _⊙)	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	verst verwijderde bron

Bron: The Gravitational-wave Transient Catalog (GWTC)

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

Waargenomen kosmische signalen

Zwaartekrachtgolven

ART in 2 slides

Einsteinvergelijkingen

Golfplossingen

Golven

EM vs. GW

Effect van een GW

Een GW detector

Michelson
interferometer

MI++

GW-signalen

Inspirale, merger en
ringdown

GW-signalen

Analyse van GWs

Spectra en SNR

Detecties

GW 150914: BH+BH

GW 170817: NS+NS

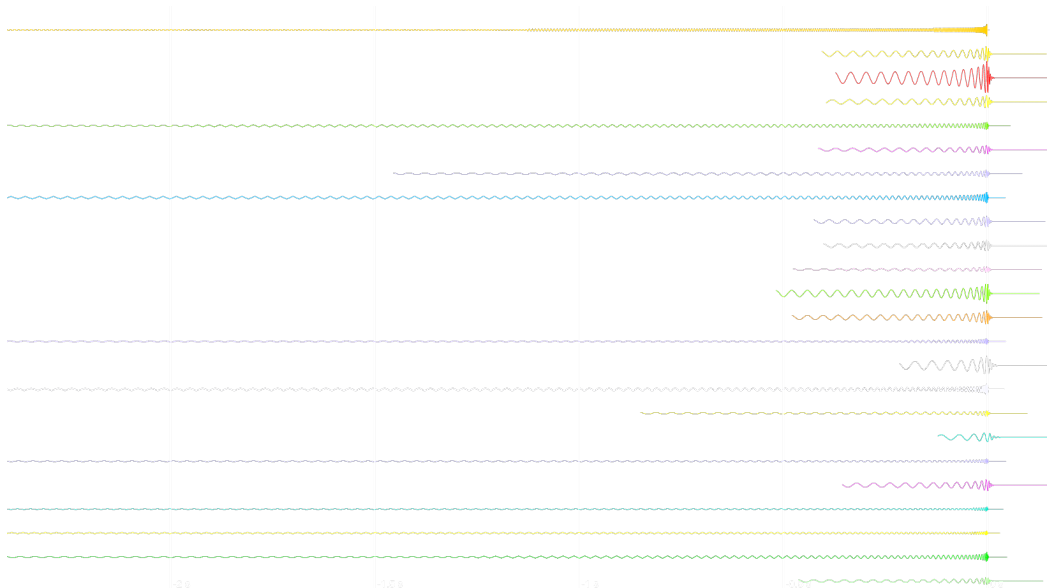
Meer detecties

De toekomst

Globaal netwerk

Einstein Telescope

LISA



ART in 2 slides

Einsteinvergelijkingen

Golfplossingen

Golven

EM vs. GW

Effect van een GW

Een GW detector

Michelson
interferometer

MI++

GW-signalen

Inspiraal, merger en
ringdown

GW-signalen

Analyse van GWs

Spectra en SNR

Detecties

GW 150914: BH+BH

GW 170817: NS+NS

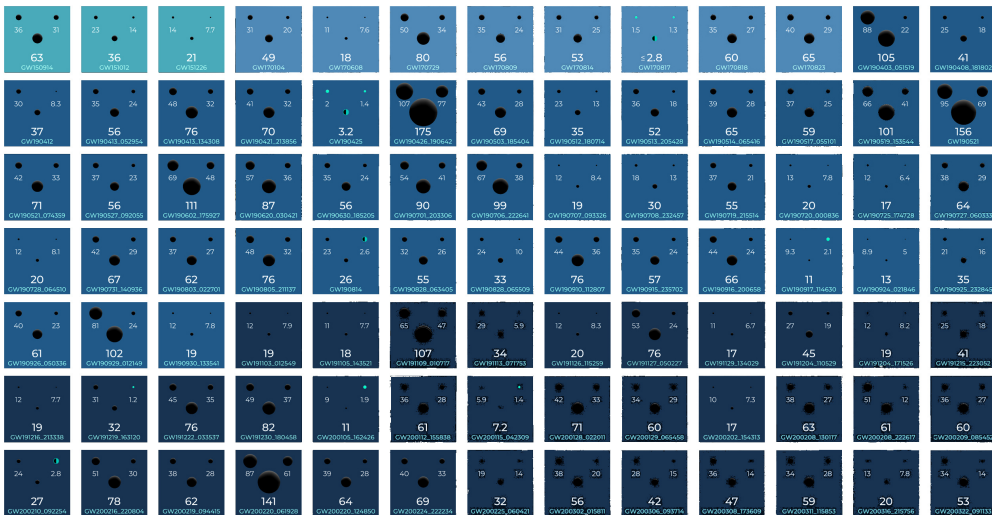
Meer detecties

De toekomst

Globaal netwerk

Einstein Telescope

LISA



**Zwaartekracht-
golven**

ART in 2 slides

Einsteinvergelijkingen
Golfoplossingen

Golven

EM vs. GW
Effect van een GW

Een GW detector

Michelson
interferometer
MI++

GW-signalen

Inspiral, merger en
ringdown
GW-signalen

Analyse van GWs

Spectra en SNR

Detecties

GW 150914: BH+BH
GW 170817: NS+NS
Meer detecties

De toekomst

Globaal netwerk
Einstein Telescope
LISA

- 1 ART in 2 slides
- 2 Golven
- 3 Een GW detector
- 4 GW-signalen

- 5 Analyse van GWs
- 6 Detecties
- 7 De toekomst
 - Globaal netwerk
 - Einstein Telescope
 - LISA

Zwaartekrachtgolven

ART in 2 slides

Einsteinvergelijkingen
Golfoplossingen

Golven

EM vs. GW
Effect van een GW

Een GW detector

Michelson
interferometer
MI++

GW-signalen

Inspirale, merger en
ringdown
GW-signalen

Analyse van GWs

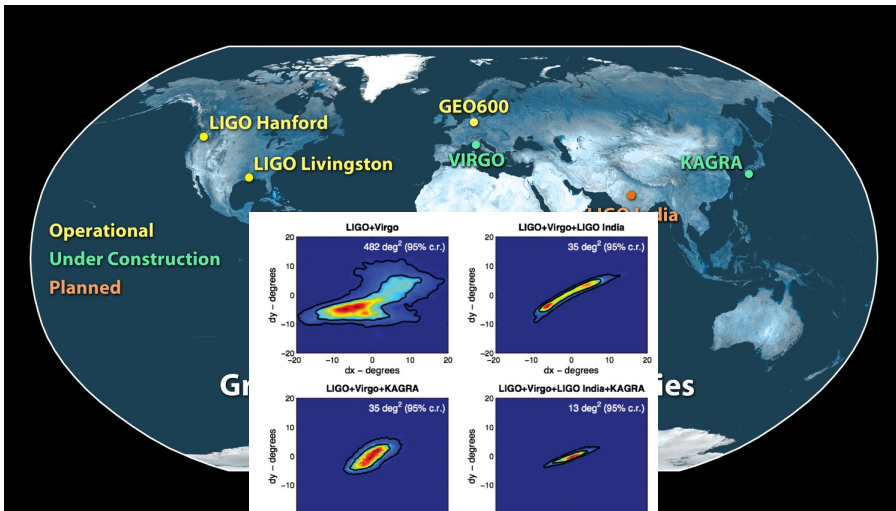
Spectra en SNR

Detecties

GW 150914: BH+BH
GW 170817: NS+NS
Meer detecties

De toekomst

Globaal netwerk
Einstein Telescope
LISA



ART in 2 slides

Einsteinvergelijkingen

Golfflossingen

Golven

EM vs. GW

Effect van een GW

Een GW detector

Michelson
interferometer

MI++

GW-signalen

Inspirale, merger en
ringdown

GW-signalen

Analyse van GWs

Spectra en SNR

Detecties

GW 150914: BH+BH

GW 170817: NS+NS

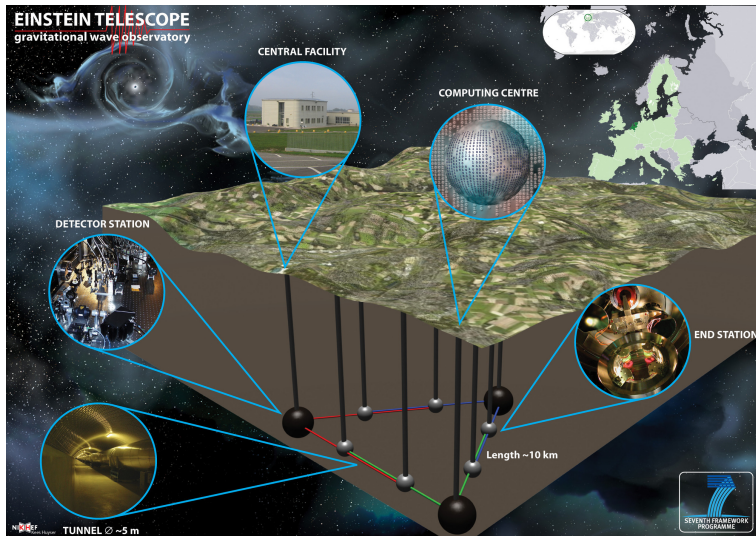
Meer detecties

De toekomst

Globaal netwerk

Einstein Telescope

LISA



- Groter dan LIGO/Virgo
- Gevoeliger
- Zwakkere → meer signalen
- Overlappende signalen!
- 1 driehoek of 2 L's?
- 10–15–20 km?
- NI-B-D of It?
- Tegenhanger VS: Cosmic Explorer

ART in 2 slides

Einsteinvergelijkingen

Golfplossingen

Golven

EM vs. GW

Effect van een GW

Een GW detector

Michelson
interferometer

MI++

GW-signalen

Inspirale, merger en
ringdown

GW-signalen

Analyse van GWs

Spectra en SNR

Detecties

GW 150914: BH+BH

GW 170817: NS+NS

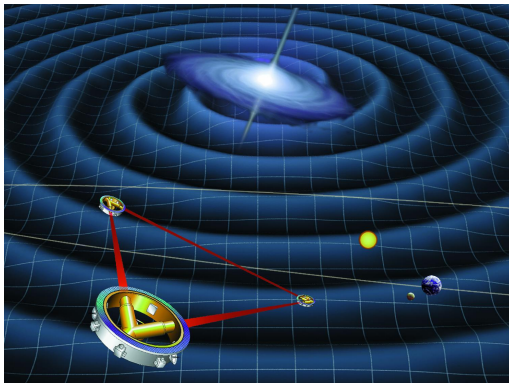
Meer detecties

De toekomst

Globaal netwerk

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 2.5 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+?

ART in 2 slides

Einsteinvergelijkingen
Golfplossingen

Golven

EM vs. GW
Effect van een GW

Een GW detector

Michelson
interferometer
MI++

GW-signalen

Inspiral, merger en
ringdown
GW-signalen

Analyse van GWs

Spectra en SNR

Detecties

GW 150914: BH+BH
GW 170817: NS+NS
Meer detecties

De toekomst

Globaal netwerk
Einstein Telescope
LISA

Waarnemingen

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

Nauwkeurigheid

- Massa's van SMBHs ($10^4 - 10^7 M_{\odot}$): tot $\sim 0.1 - 10\%$
- Posities: enkele graden
- Directe afstandmeting: $\sim 1 - 10\%$



Bron: [Hubble Space Telescope](#)