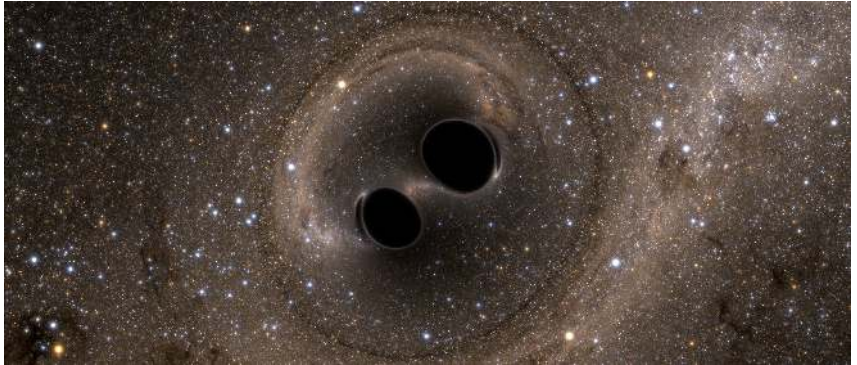


# GW 150914: de eerste detectie van gravitatiegolven



**Marc van der Sluys**

Northwestern University, Canadian Institute for Theoretical Astrophysics,  
Radboud Universiteit Nijmegen / LIGO, Virgo, Nikhef, FOM

[hemel.waarnemen.com](http://hemel.waarnemen.com)

# Outline

- 1 Oorsprong van zwarte gaten
  - Evolutie van enkele sterren
  - Dubbelsterevolutie en materie-overdracht
  - Röntgendubbelsterren
- 2 De detectie van gravitatiegolven
  - Gravitatiegolven
  - LIGO/Virgo
- 3 GW 150914
  - Signaal GW 150914
  - Bron van GW 150914
  - Nieuw!!!
  - Vorming van GW 150914
  - Gammaflitsers
  - BlackGEM
- 4 The future of gravitational waves
  - Global GW-detector network
  - Advanced LIGO/Virgo
  - Einstein Telescope
  - eLISA

# De Zon



Grootheid		Eenheid	Aarde
Massa	$M_{\odot}$	$1,99 \times 10^{30}$ kg	$333\,000 M_{\oplus}$
Straal	$R_{\odot}$	696 000 km	$109 R_{\oplus}$
Dichtheid	$\bar{\rho}_{\odot}$	1,4 g/cm <sup>3</sup>	$0,26 \bar{\rho}_{\oplus}$
Lichtkracht	$L_{\odot}$	$3,85 \times 10^{26}$ W	$\sim 3 \times 10^9 "L_{\oplus}"$
Temperatuur:			
Oppervlak	$T_{\text{opp},\odot}$	5500°C	15°C
Centrum	$T_{\text{c},\odot}$	$\sim 14 \times 10^6$ °C	$\sim 7000$ °C

# Hoofdreekssterren

Eigenschappen van enkele sterren met zonne-metalliciteit, halverwege de hoofdreeks ( $X_c = 0.35$ ):

M ( $M_\odot$ )	age (Myr)	R ( $R_\odot$ )	L ( $L_\odot$ )	$T_s$ (K)	$T_c$ (MK)	Number density (w.r.t. $1 M_\odot$ )
0.5	52 600	0.50	0.05	3860	9.8	7.07
0.8	11 600	0.79	0.38	5100	13.4	2.34
1.0	4900	1.01	1.05	5810	15.9	1.00
1.5	1660	1.95	6.75	6660	20.9	0.131
2.0	582	2.23	20.4	8230	22.5	0.0232
2.5	405	2.80	57.8	9530	24.1	$9.59 \times 10^{-3}$
3.0	246	3.09	120	10 800	25.2	$3.80 \times 10^{-3}$
5.0	70.6	4.19	895	15 400	28.6	$3.27 \times 10^{-4}$
10.0	12.7	5.74	8590	23 100	32.8	$1.16 \times 10^{-5}$
20.0	5.18	8.78	67 900	31 300	37.0	$9.3 \times 10^{-6}$
50.0	2.41	15.9	527 000	39 000	41.4	$5 \times 10^{-7}$

# Evolutie van een ster van 1 zonsmassa



## Fase:

Waterstoffusie

Heliumfusie

## Temperatuur:

$T \gtrsim 7$  miljoen K,

$T \gtrsim 200$  miljoen K,

## Tijdschaal:

$\tau \approx 7 + 4$  miljard jaar

$\tau \approx 200 + 25$  miljoen jaar

## Reacties:

$4H \rightarrow He$

$3He \rightarrow C,$

$C + He \rightarrow O$

# Fusiestadia voor een $10 M_{\odot}$ -ster

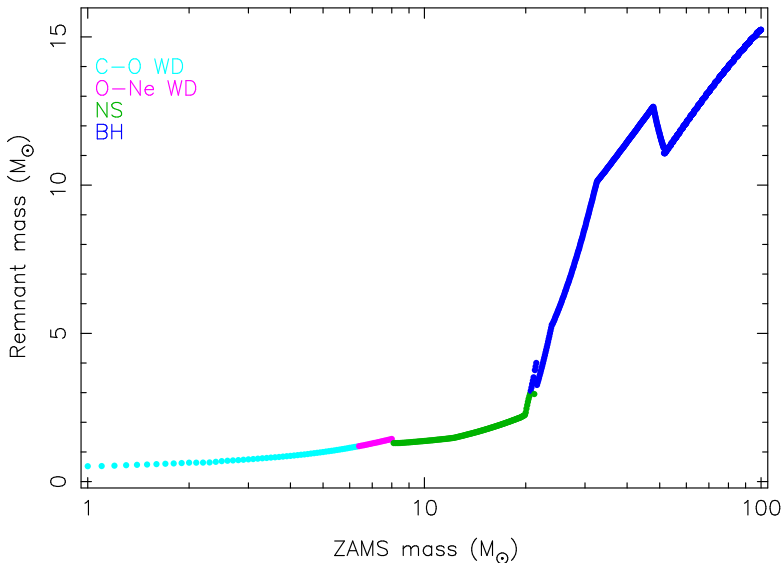
Stage	Net reactions	T (K)	$\tau$
Hydrogen burning	$H \rightarrow He$	$> 7 \times 10^6$	10 Myr
Helium burning	$He \rightarrow C,O$	$> 2 \times 10^8$	1 Myr
Carbon burning	$C \rightarrow Ne,Mg$	$> 8 \times 10^8$	1 kyr
Neon burning	$Ne \rightarrow O,Mg$	$> 1.5 \times 10^9$	1 month
Oxygen burning	$O \rightarrow Si,S$	$> 2 \times 10^9$	2 years
Silicon burning	$Si \rightarrow Fe,Ni$	$> 3.3 \times 10^9$	3 days

# Supernova



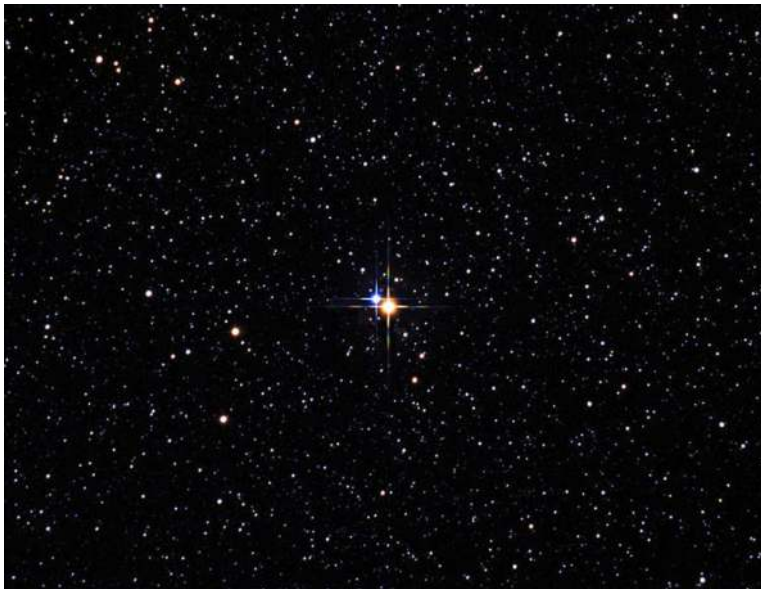
# Relatie tussen ZAMS-massa en eindmassa

ZAMS: Zero-Age Main Sequence





# Dubbelsterren: Albireo



# Conservative materieoverdracht



# Low-mass X-ray binaries

## Mechanism

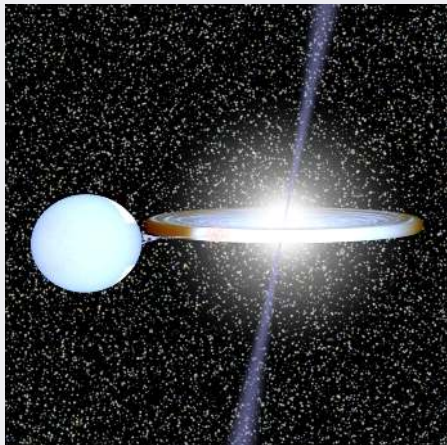
- Low-mass star transfers mass to neutron star or black hole
- Gravitational acceleration causes X-rays:

$$L_x \approx \frac{GM_{\text{ns}}}{R_{\text{ns}}} \dot{M}_{\text{tr}}$$

- Optical radiation comes from reprocessed X-rays in accretion disc:

$$L_{\text{opt}} \propto L_x R_{\text{disc}}$$

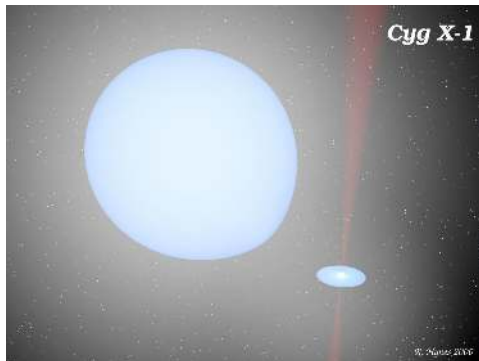
## BinSim



BinSim, R. Hynes, LSU:

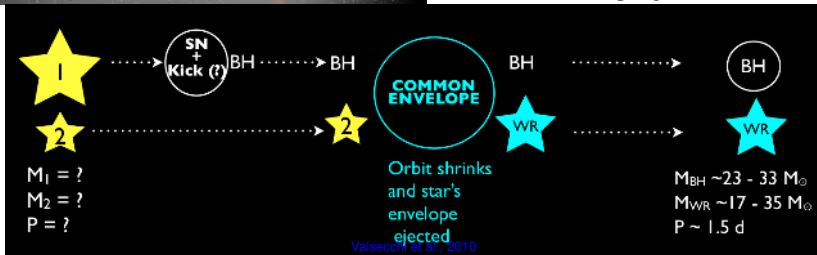
<http://www.phys.lsu.edu/~rih/binsim/>

# Hoge-massa röntgendubbelsterren

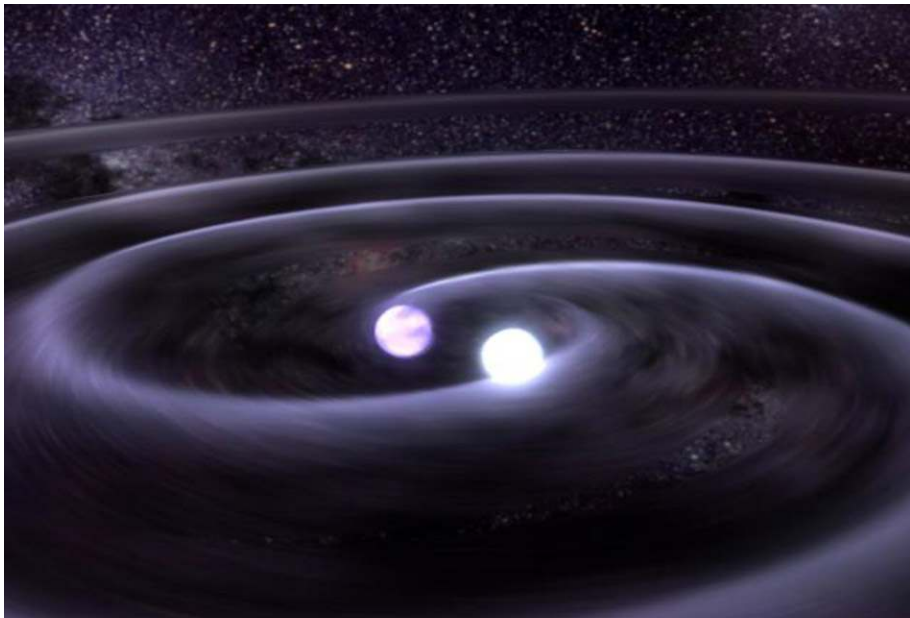


- Hoge-massa ster draagt materie over aan NS of BH
- Vaak geen RLOF, maar materieoverdracht door wind
- Voorlopers van NS-NS, BH-NS en BH-BH dubbelsterren: gravitatiestraling-bronnen voor LIGO/Virgo

## IC 10 X-1:



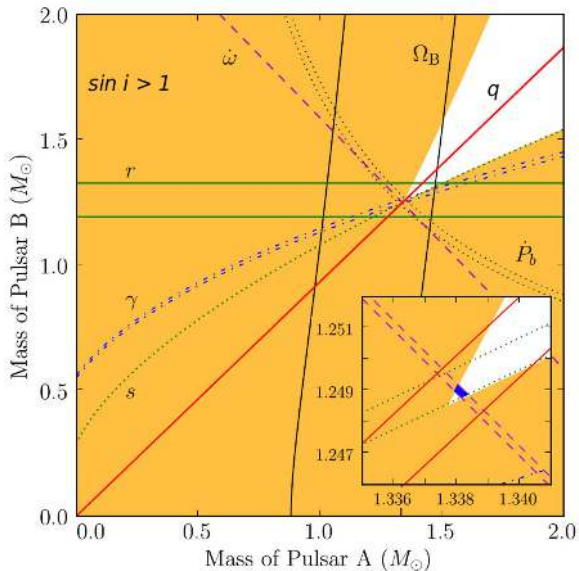
# Gravitatiegolven



# Gravitatiegolven

## GWs:

- “Ripples in spacetime”
- Voorspeld door Einstein's Algemene Relativiteitstheorie
- *Indirect* waargenomen in de Hulse-Taylor binary pulsar:



# Electromagnetische en gravitatiegolven

## EM golven ...

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

## Gravitatiegolven ...

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

# Waarom GWs detecteren?

## Fysica:

- Directe meting van GWs en verificatie van ART
- Directe waarneming van zwarte gaten
- Verifiëer dat GWs met de lichtsnelheid bewegen, d.w.z. dat de rustmassa van het graviton 0 is
- Verifiëer dat GWs transversaal zijn, d.w.z. dat de spin van het graviton 2 is

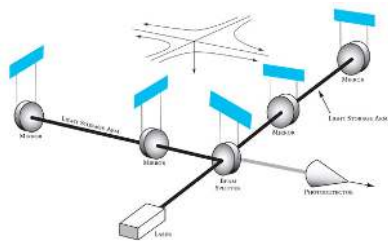
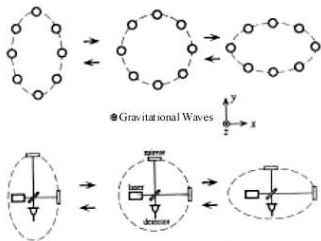


# Waarom GWs detecteren?

## Astrofysica:

- Geheel nieuw venster op het heelal!
- Neutronensterren uiteengetrokken zien worden, hun implosie tot zwart gat waarnemen
- Zwarte gaten die neutronensterren 'opeten', BH-BH 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...*

# Laser Interferometer GW Observatory (LIGO)



● Strain:  $h(t) = h_+(t)F_+(t) + h_\times(t)F_\times(t) = \frac{\delta L(t)}{L} \sim 10^{-22}$

# LIGO/Virgo

- LLO: Livingston, Louisiana (L1: 4 km)
- LHO: Hanford, Washington (H1: 4 km)
- Virgo: Pisa, Italy (V: 3 km)
- KAGRA: Japan (2018+?, 3 km)
- Indigo: India (2024+?, 4 km)
  
- Michelson interferometers
- Frequency sensitivity:  $f \sim 10 - 5000$  Hz
- $\delta L = 10^{-23} \times L \approx 10^{-17}$  cm (atomic nucleus  $\sim 10^{-13}$  cm)

## LIGO/Virgo collaboration (LVC):

- Data sharing since spring 2007
- Working groups:
  - Compact binary coalescences
  - Bursts
  - Continuous waves
  - Stochastic background

# Voorspelde detectie-aantallen voor CBCs

## Horizonafstanden (Mpc):

	NS-NS	BH-NS	BH-BH
Initial LIGO/Virgo	33	70	161
Advanced LIGO/Virgo	445	927	2187

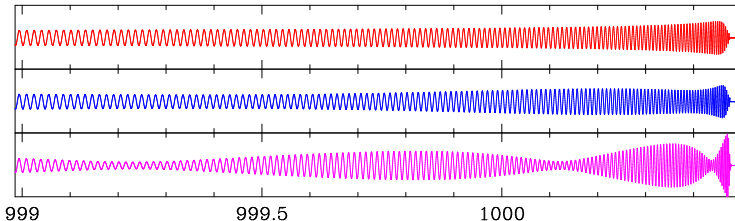
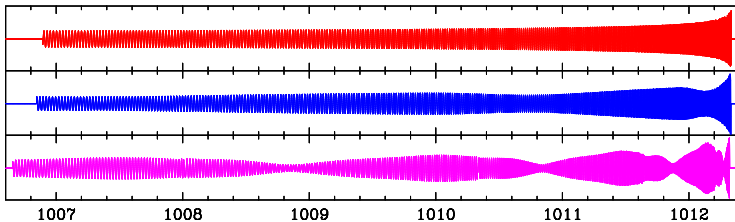
## Schatting van detectie-aantallen ( $\text{yr}^{-1}$ ):

	NS-NS	BH-NS	BH-BH
Initial LIGO/Virgo	$2 \times 10^{-4} - 0.2$	$7 \times 10^{-5} - 0.1$	$2 \times 10^{-4} - 0.5$
Advanced LIGO/Virgo	0.4 - 400	0.2 - 300	0.4 - 1000

Schattingen gaan uit van  $M_{\text{NS}} = 1.4 M_{\odot}$  en  $M_{\text{BH}} = 10 M_{\odot}$

# Inspirational waveforms met toenemende spin

LIGO and Virgo detect the last minutes of a binary inspiral:

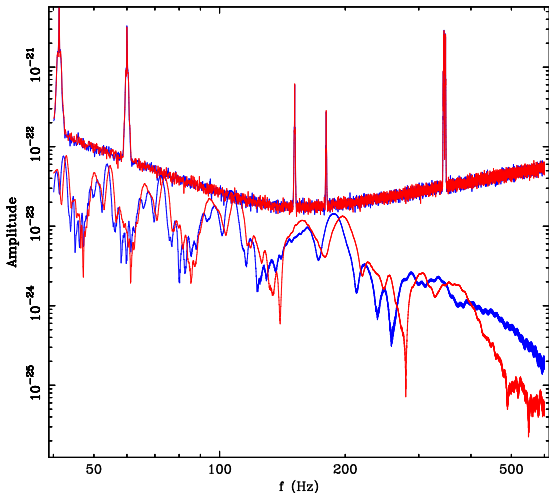


$$M_{1,2} = 10, 1.4 M_{\odot}, a_{\text{spin}} \equiv S/M^2 = 0.0, 0.1 \text{ and } 0.5$$

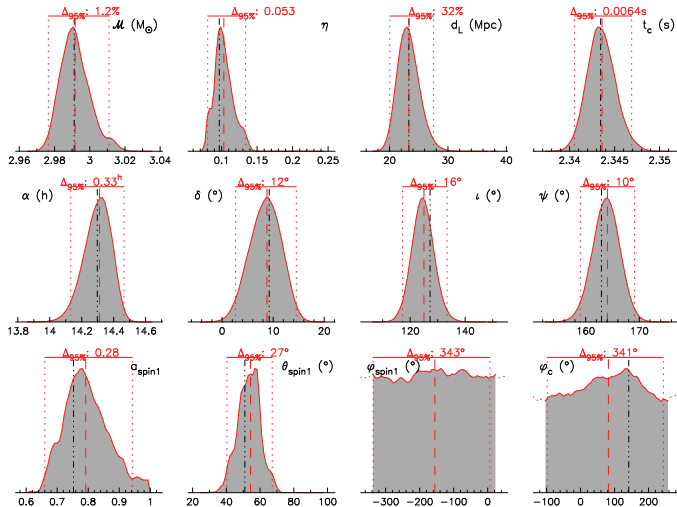
# Toevoegen van een signaal in de detectorruis

## Example:

- Using two 4-km detectors **H1**, **L1**
- Gaussian, stationary noise or LIGO/Virgo detector data
- Do software injections
- Retrieve physical parameters
- Example:  $\Sigma \text{SNR} = 17$



# Analyse van een BH-NS signaal

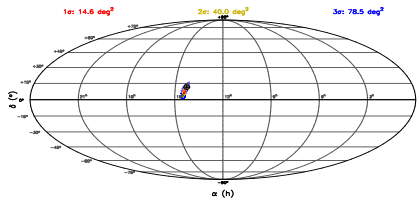
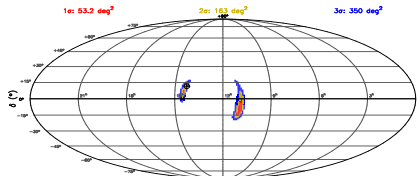
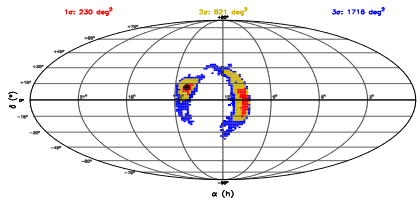


van der Sluis et al., 2008

## Parameters:

- H1, L1, V
- $M = 10, 1.4 M_{\odot}$
- $d_L = 22.4$  Mpc
- $a_{\text{spin}} = 0.8$ ,  
 $\theta_{\text{SL}} = 55^{\circ}$
- $\Sigma \text{SNR} \approx 17.0$
- simulated noise
- Black dash-dotted line: injection
- Red dashed line: median
- $\Delta$ 's: 95% probability

# Hemelpositie voor signalen met en zonder spin



**Spinning BH, non-spinning NS:**  
 $10 + 1.4 M_{\odot}$ , 16–22 Mpc,  $\Sigma$  SNR=17

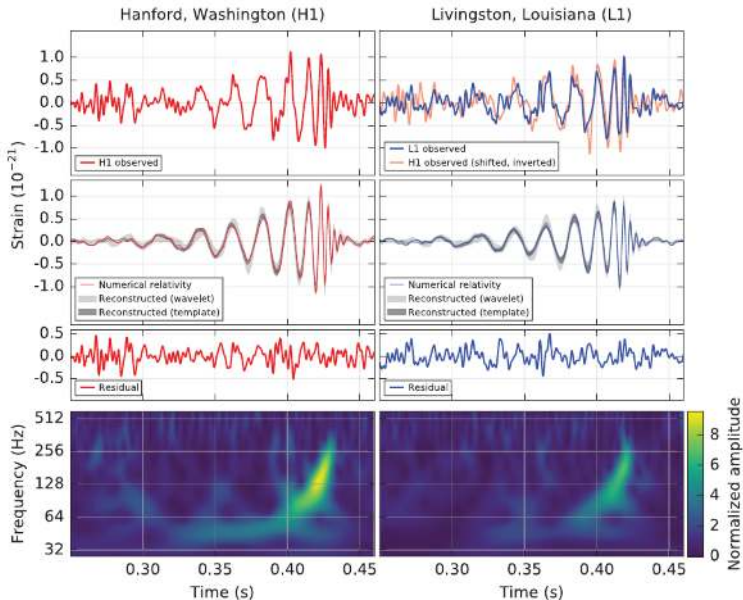
2 detectors,  $a_{\text{spin}} = 0.0$   
 2- $\sigma$  accuracy: 821°<sup>2</sup>

2 detectors,  $a_{\text{spin}} = 0.5$   
 2- $\sigma$  accuracy: 163°<sup>2</sup>

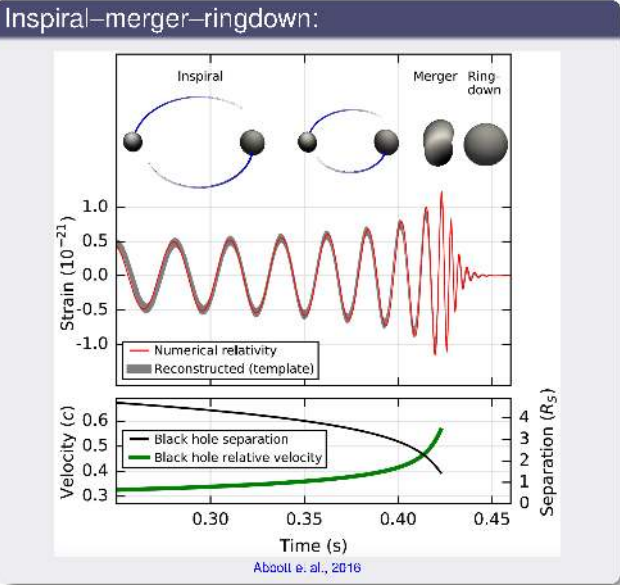
3 detectors,  $a_{\text{spin}} = 0.5$   
 2- $\sigma$  accuracy: 40°<sup>2</sup>



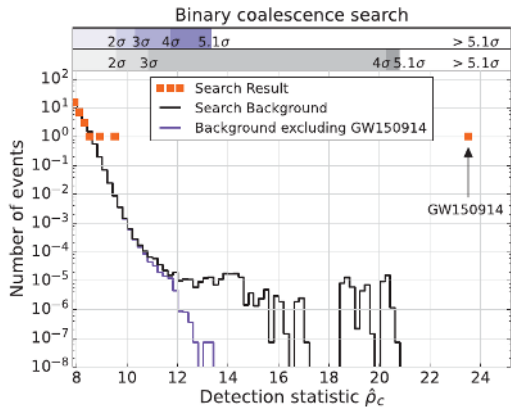
# De eerste detectie: GW 150914



# Bron van GW 150914



# GW 150914 significance

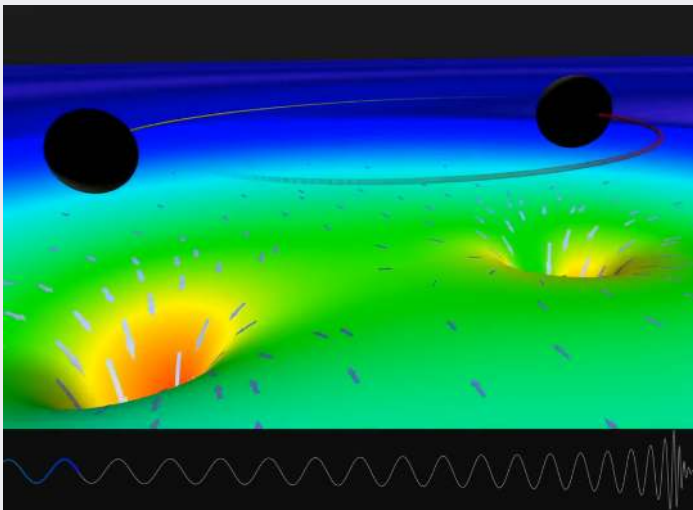


## Significance:

- S/N:  $\sim 24$
- Detection:  $> 5\sigma$   
 ( $\sim 99.99998\%$ )
- False-alarm probability:  
 $< 1/203,000$  years
  - strongest noise trigger:  
 S/N  $\sim 13$
  - cut 16 days of data in  
 0.5 s chunks  
 ( $\sim 3$  million)
  - randomly combine time  
 slides: ( $\sim 9 \times 10^{12}$ )

# Bron van GW 150914

Dubbel zwart gat:



Source: [www.black-holes.org](http://www.black-holes.org)

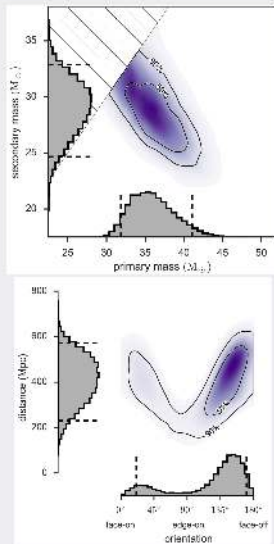
# Bron van GW 150914

## Dubbel zwart gat:

- $M_{1,2} = 36^{+5}_{-4}, 29^{+4}_{-4} M_{\odot}$
- Afstand:  $\sim 410^{+160}_{-180}$  Mpc  
 ( $\sim 1.4$  Gly)
- Final BH mass:  $62 \pm 4 M_{\odot}$
- Final BH spin:  $0.67^{+0.05}_{-0.07}$
- Mass lost:  $\sim 3^{+0.5}_{-0.5} M_{\odot}$
- Maximum brightness:  
 $\sim 3.6 \pm 0.4 \times 10^{49}$  W  
 $\sim 200 M_{\odot} c^2/s$

Abbott et al., 2016

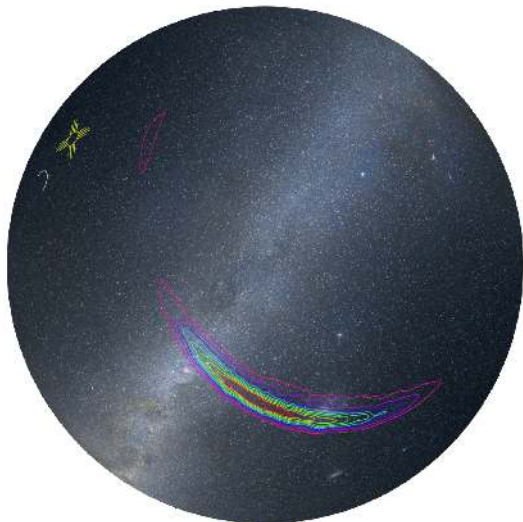
## PDFs:



# Bron van GW 150914

## Hemelpositie:

- Onzekerheid:  $\sim 600^{\circ 2}$   
(90% confidence)
- Met Virgo online:  
 $\sim 20^{\circ 2}$



# Nieuw!!!

## Fysica:

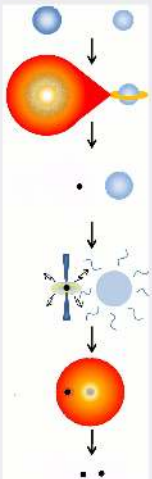
- Geen afwijkingen Algemene Relativiteitstheorie
- Bevestiging theoretische (IMR) *waveforms* ( $\geq 96\%$ )
- Gravitonmassa:  $m_g \leq 1.2 \times 10^{-22} \text{ eV}/c^2 = 2 \times 10^{-55} \text{ g}$
- Gravitonspin, polarisaties GWs: geen constraints

## Astrofysica:

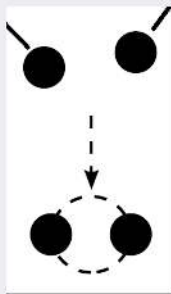
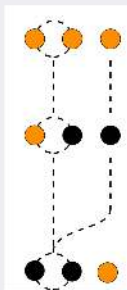
- Eerste directe waarneming van een zwart gat
- Eerste dubbele zwarte gat
- Eerste *merger* van dubbel zwart gat
- Zwaarste zwarte gaten waargenomen ( $> 25 M_\odot$ )
- BBH rate  $\gtrsim 1 \text{ Gpc}^{-3} \text{ yr}^{-1}$
- Zwakke sterwinden, lage metalliciteit ( $\lesssim 0.5 M_\odot$ )

# Formation

## Dubbelster?



## Cluster?

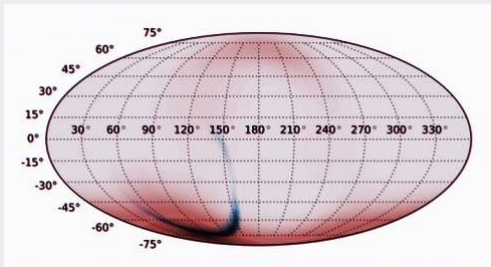




# Correlatie met een GRB?

## Fermi-waarneming:

- 0.4 s na GW 150914!



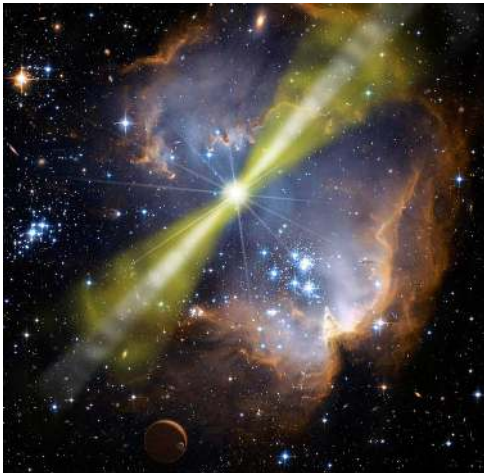
Connaughton et al. (2016)

## “Astrofysically highly implausible”:

- Radiative power of  $2 \times 10^{49} \text{ erg s}^{-1}$
- $B \sim 10^{12} \text{ Gauss}$
- Random probability of coincidence: 0.22%

Lyutikov (2016)

# Short-hard gamma-ray bursts (shGRBs)

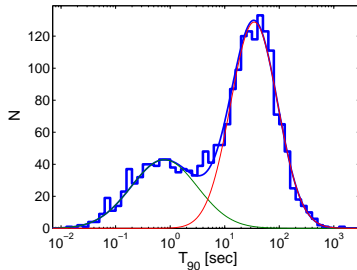
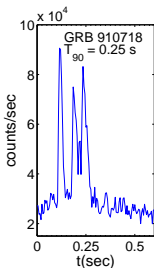


Artist's impression van een GRB (bron: NASA)

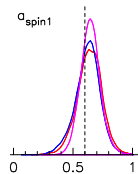
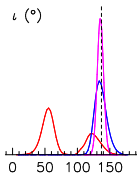
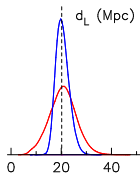
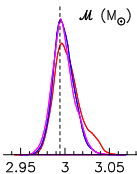
## Gammaflitsers:

- $\sim 2$  per dag
- $\sim 25\%$  short GRB
- duur:  $\sim 10$  ms – 10 s
- $\sim 10^{44}$  W, circa 1 miljoen sterrenstelsels
- straling *gebeamed* door emissie in *jets*
- long GRBs gerelateerd aan supernovae
- short GRBs veroorzaakt door NS-NS en NS-BH mergers?
  - oude sterpopulaties
  - energie
  - frequentie

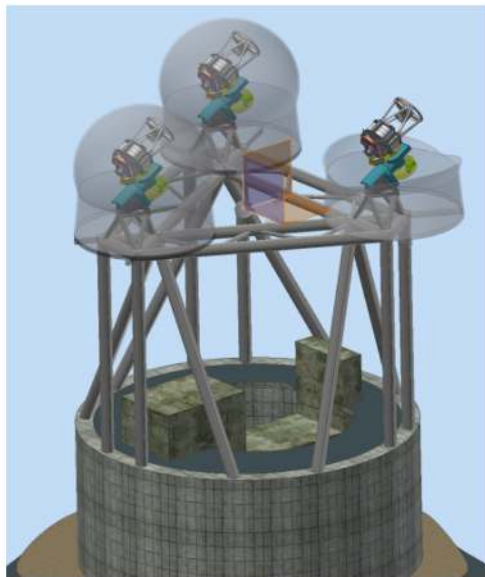
# Short-hard gamma-ray bursts (shGRBs)



- Gebruik LIGO/Virgo trigger om *GRB afterglow* te vinden
- Gebruik GRB positie en afstand voor nauwkeuriger LIGO/Virgo analyse



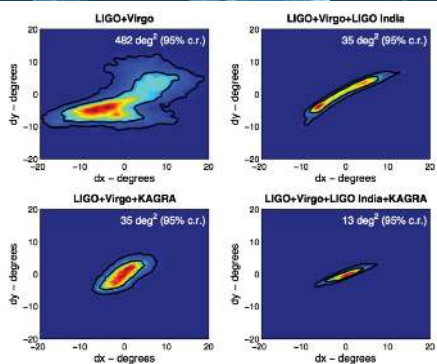
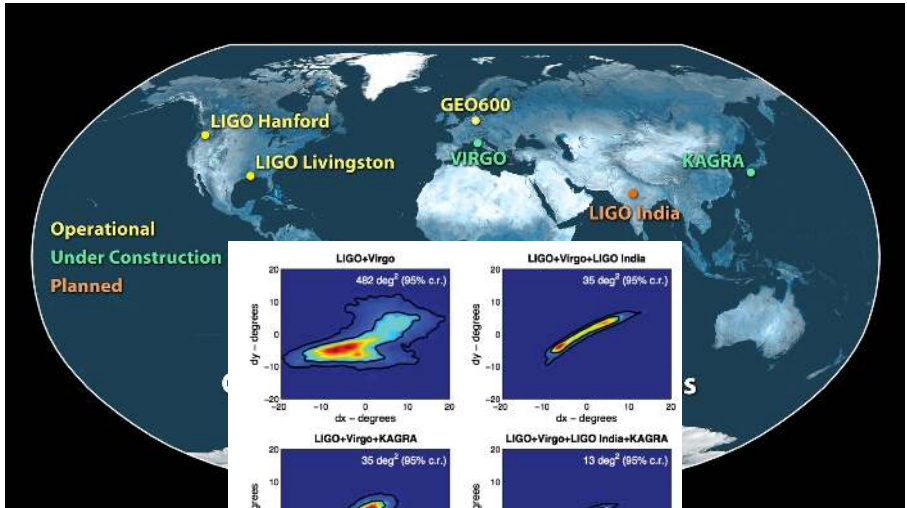
# BlackGEM



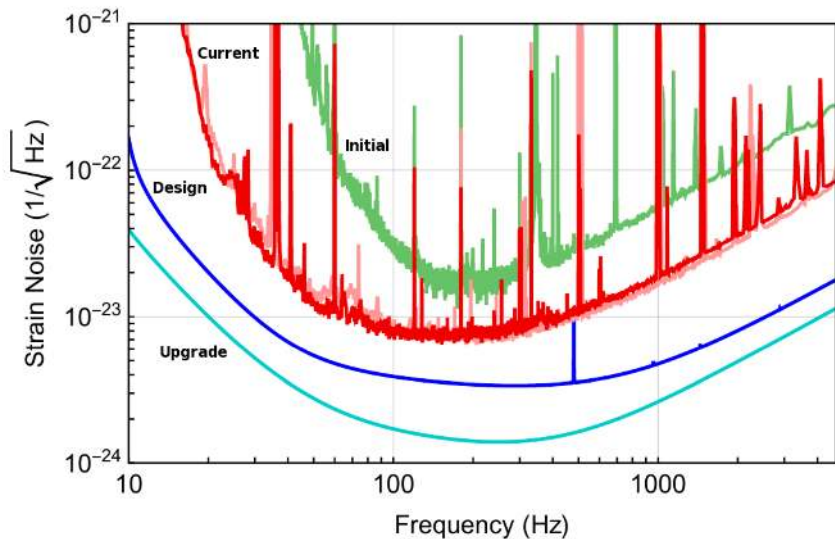
## BlackGEM:

- GW resolutie:  $\sim 100^{\circ 2}$
- Nodig voor grote telescopen:  $\sim 1''$
- $\rightarrow$  factor  $10^9$
  
- Radboud Universiteit
- 15 telescopen
- $2,7^{\circ 2}$ , 110 Mpix,  $0.56''/\text{pixel}$   
(11 Volle Manen)

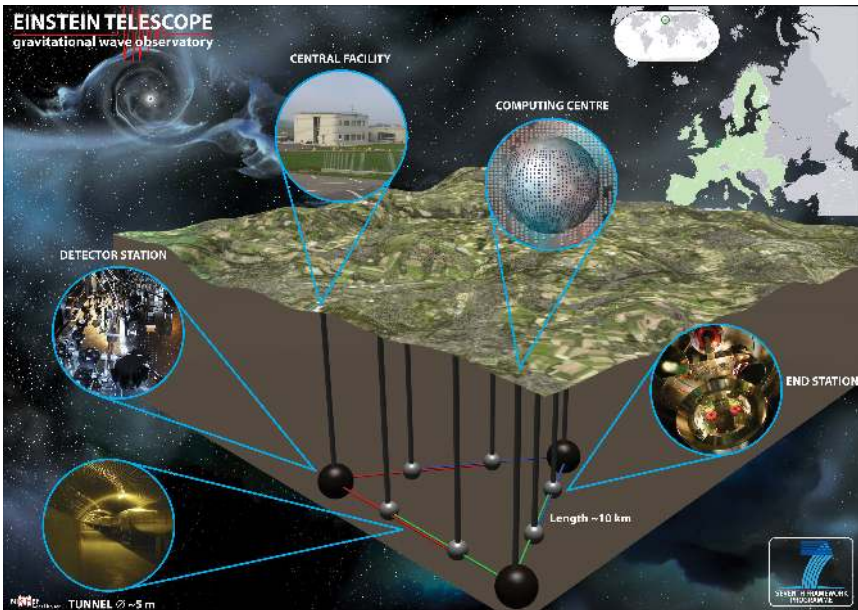
# Global GW-detector network



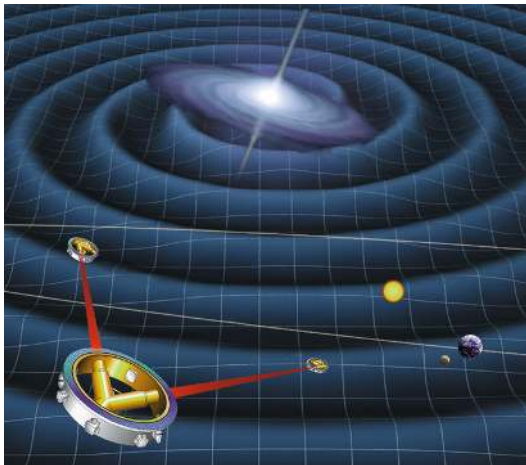
# Advanced LIGO/Virgo sensitivity improvement



# Einstein Telescope



# Evolved Laser Interferometer Space Antenna (eLISA)



## Missie

- 3 ruimtevaartuigen, 4 testmassa's
- Detector in een baan om de Zon,  $20^\circ$  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  $\geq 5$  jaar
- LISA Pathfinder (december 2015) moet technologie testen/bewijzen
- Lancering  $\gtrsim 2034?$



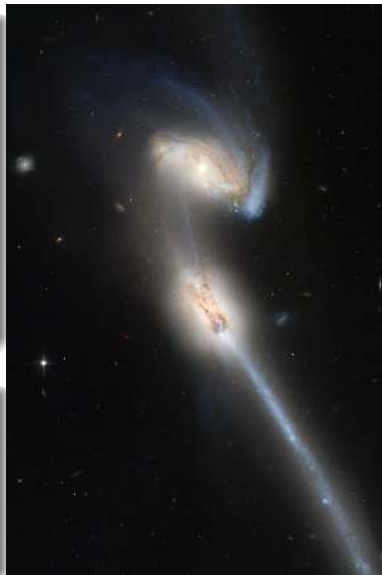
# Evolved Laser Interferometer Space Antenna (eLISA)

## Waarnemingen

- Galactische dubbele witte dwergen
- Super-massieve 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 afstandsmeting:  $\sim 1 - 10\%$





hemel.waarnemen.com

## <http://hemel.waarnemen.com>

- Actuele, eenvoudig (en lastiger) waar te nemen hemelverschijnselen
- Zichtbaarheid van Zon, Maan, planeten, meteoren, kometen, deepsky, ISS, ...
- Astrokalenders, hemelkaarten, maanfasen, hemel vannacht, waarneemweer, tabellen
- Apps (Android/Apple), Facebook, Twitter
- ~ 8600 pagina's, **geen reclame, pop-ups**
- ~ **1,8 miljoen** bezoekers in 2015



**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 <http://hemel.waarnemen.com/lezingen>