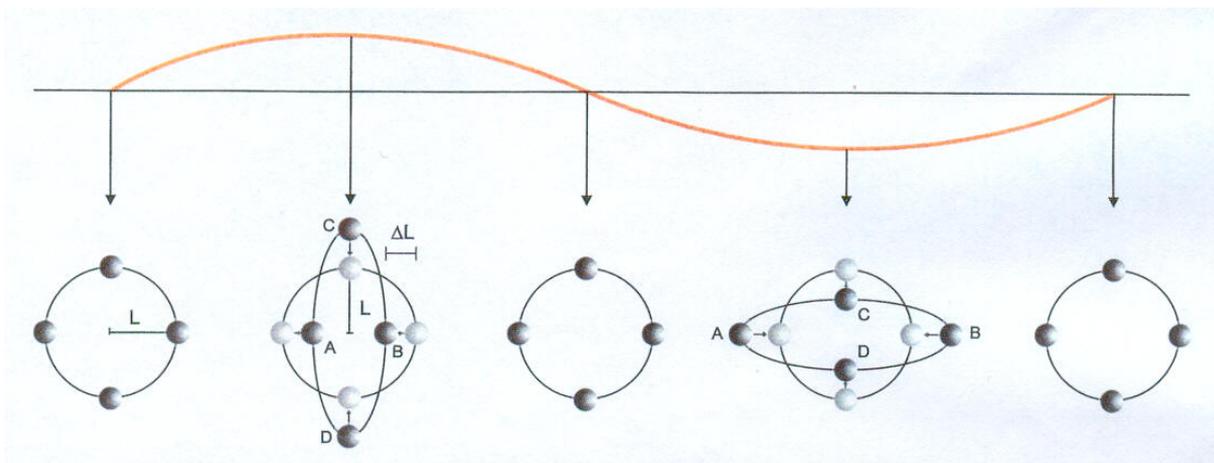
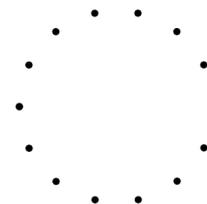


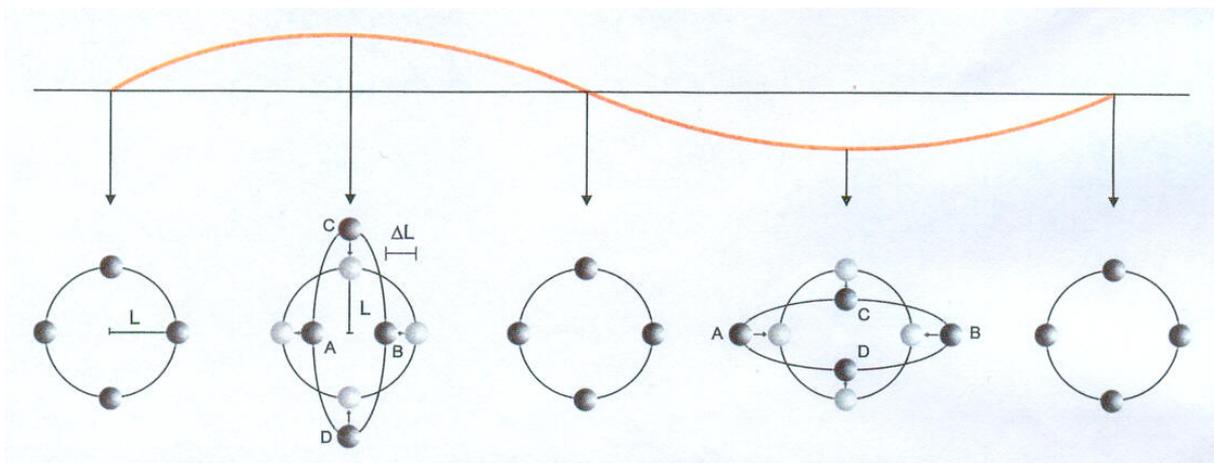
effetto dell'onda gravitazionale su un anello di particelle



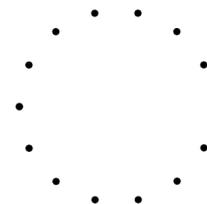
polarizzazione +



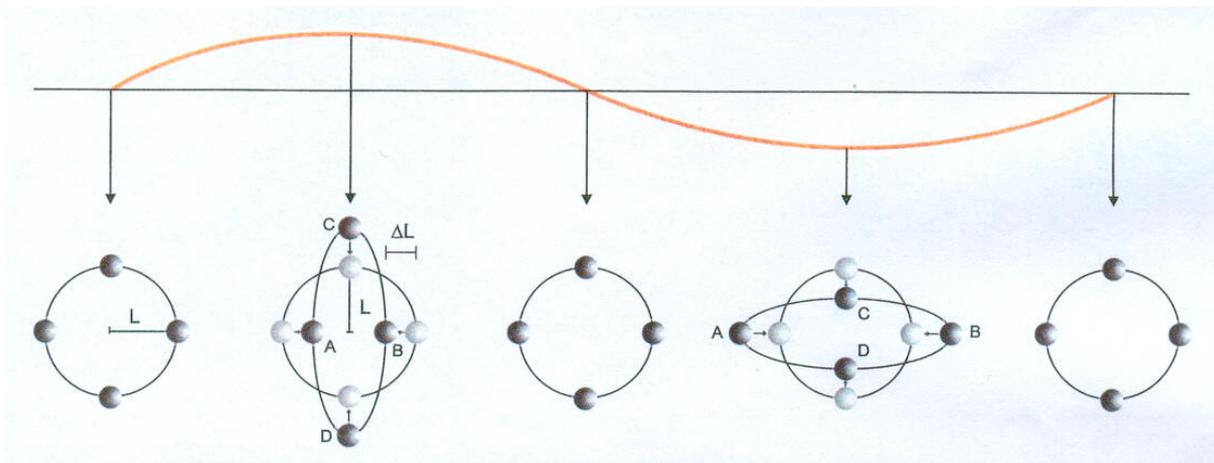
effetto dell'onda gravitazionale su un anello di particelle



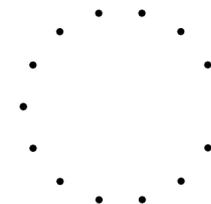
polarizzazione +



effetto dell'onda gravitazionale su un anello di particelle

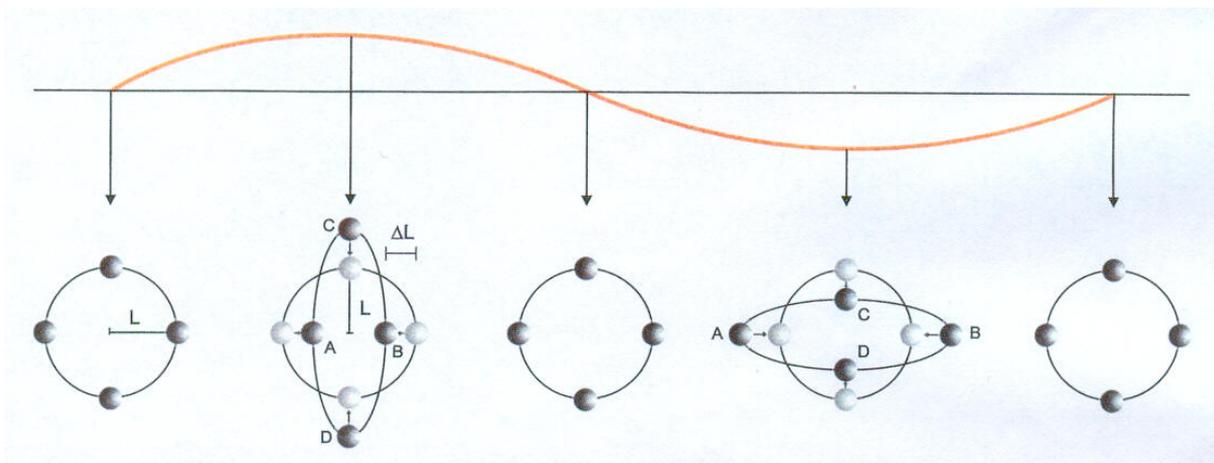


polarizzazione +

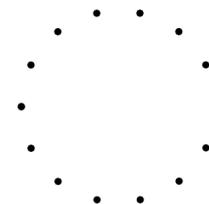


l'effetto della polarizzazione x e' lo stesso ma ruotato di 45 gradi

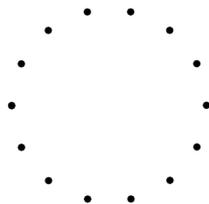
effetto dell'onda gravitazionale su un anello di particelle



polarizzazione +



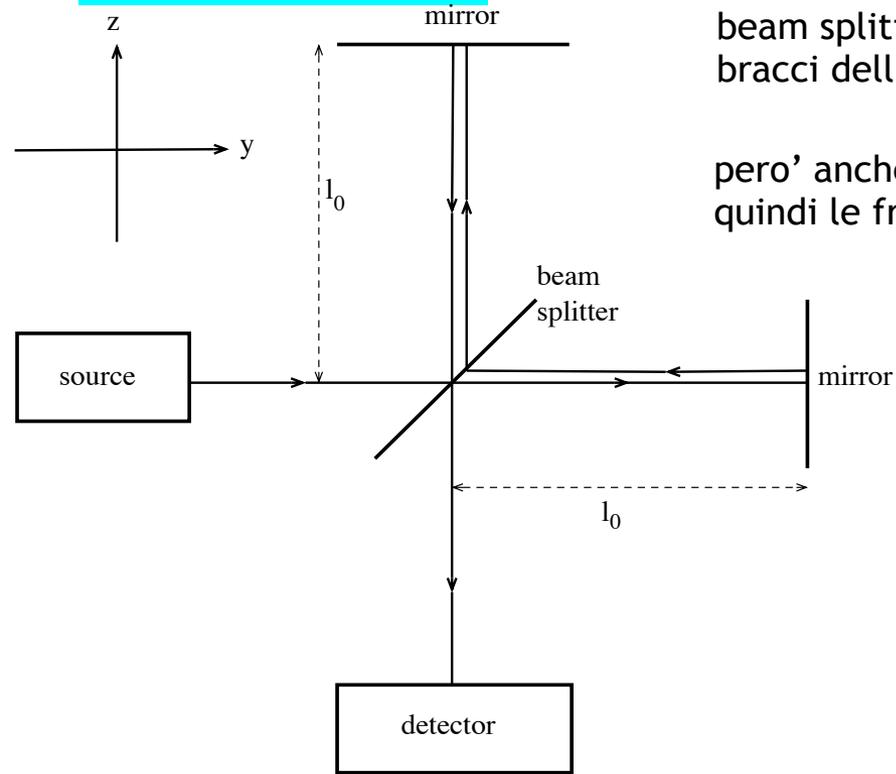
l'effetto della polarizzazione x e' lo stesso ma ruotato di 45 gradi



INTERFEROMETRO

l'onda incidente fa variare la distanza propria tra gli specchi e il beam splitter, quindi cambia il cammino ottico della luce nei due bracci dell'interferometro

però anche la lunghezza d'onda della luce varia della stessa quantità, quindi le frange d'interferenza non dovrebbero cambiare....

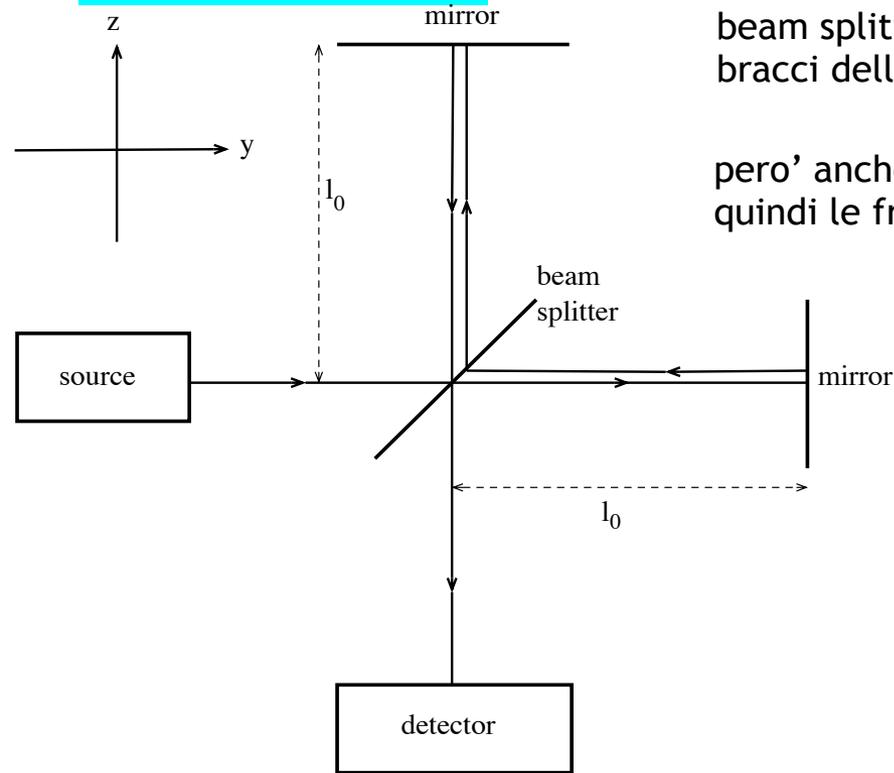


INTERFEROMETRO

l'onda incidente fa variare la distanza propria tra gli specchi e il beam splitter, quindi cambia il cammino ottico della luce nei due bracci dell'interferometro

però anche la lunghezza d'onda della luce varia della stessa quantità, quindi le frange d'interferenza non dovrebbero cambiare....

e invece cambiano!



INTERFEROMETRO

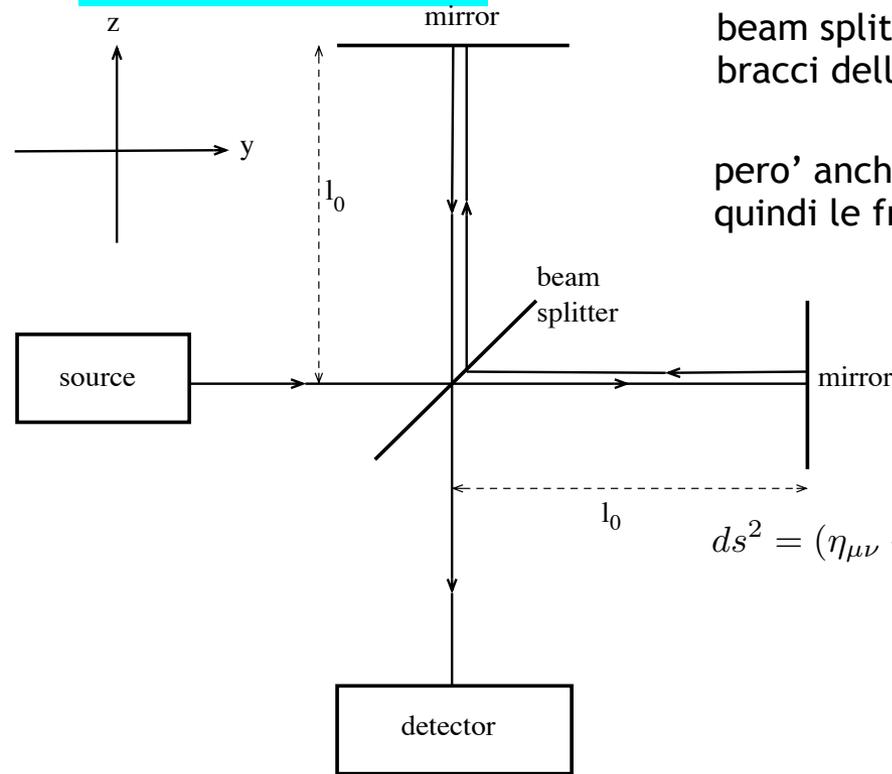
l'onda incidente fa variare la distanza propria tra gli specchi e il beam splitter, quindi cambia il cammino ottico della luce nei due bracci dell'interferometro

però anche la lunghezza d'onda della luce varia della stessa quantità, quindi le frange d'interferenza non dovrebbero cambiare....

e invece cambiano!

perché il tempo di propagazione dei beam cambia in maniera diversa nei due bracci. Supponiamo ci sia solo la polarizzazione +

$$ds^2 = (\eta_{\mu\nu} + h_{\mu\nu}^{TT})dx^\mu dx^\nu = -c^2 dt^2 + dx^2 + (1 + h_+)dy^2 + (1 - h_+)dz^2 .$$



INTERFEROMETRO

l'onda incidente fa variare la distanza propria tra gli specchi e il beam splitter, quindi cambia il cammino ottico della luce nei due bracci dell'interferometro

però anche la lunghezza d'onda della luce varia della stessa quantità, quindi le frange d'interferenza non dovrebbero cambiare....

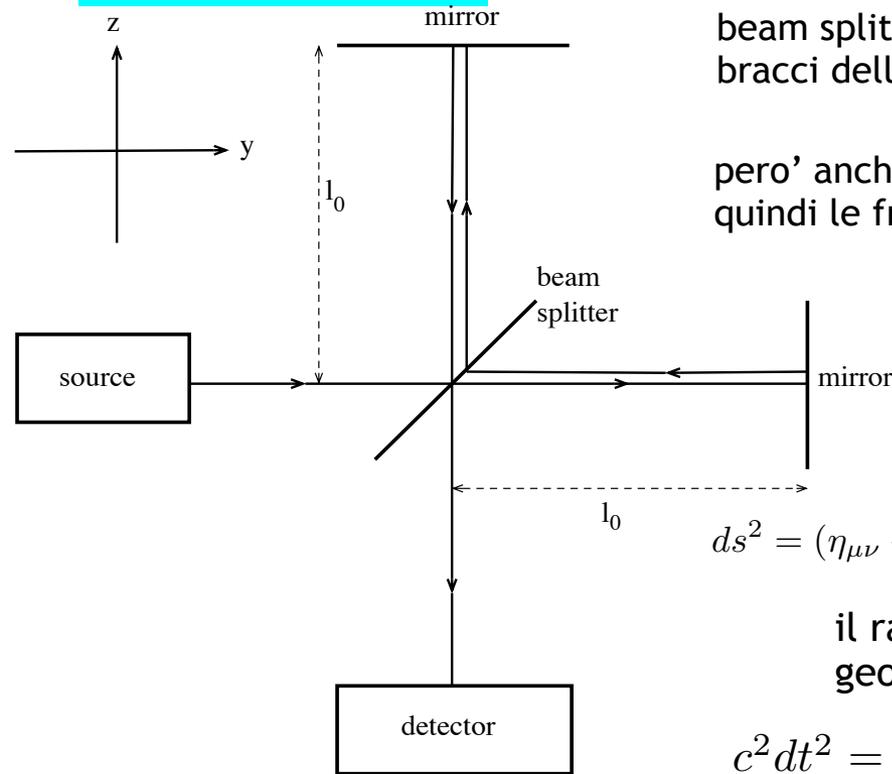
e invece cambiano!

perché il tempo di propagazione dei beam cambia in maniera diversa nei due bracci. Supponiamo ci sia solo la polarizzazione +

$$ds^2 = (\eta_{\mu\nu} + h_{\mu\nu}^{TT})dx^\mu dx^\nu = -c^2 dt^2 + dx^2 + (1 + h_+)dy^2 + (1 - h_+)dz^2 .$$

il raggio luminoso che viaggia lungo y segue la geodetica nulla

$$c^2 dt^2 = (1 + h_+)dy^2 \longrightarrow dt = c^{-1} (1 + h_+/2) dy + O(h^2)$$



INTERFEROMETRO

l'onda incidente fa variare la distanza propria tra gli specchi e il beam splitter, quindi cambia il cammino ottico della luce nei due bracci dell'interferometro

però anche la lunghezza d'onda della luce varia della stessa quantità, quindi le frange d'interferenza non dovrebbero cambiare....

e invece cambiano!

perché il tempo di propagazione dei beam cambia in maniera diversa nei due bracci. Supponiamo ci sia solo la polarizzazione +

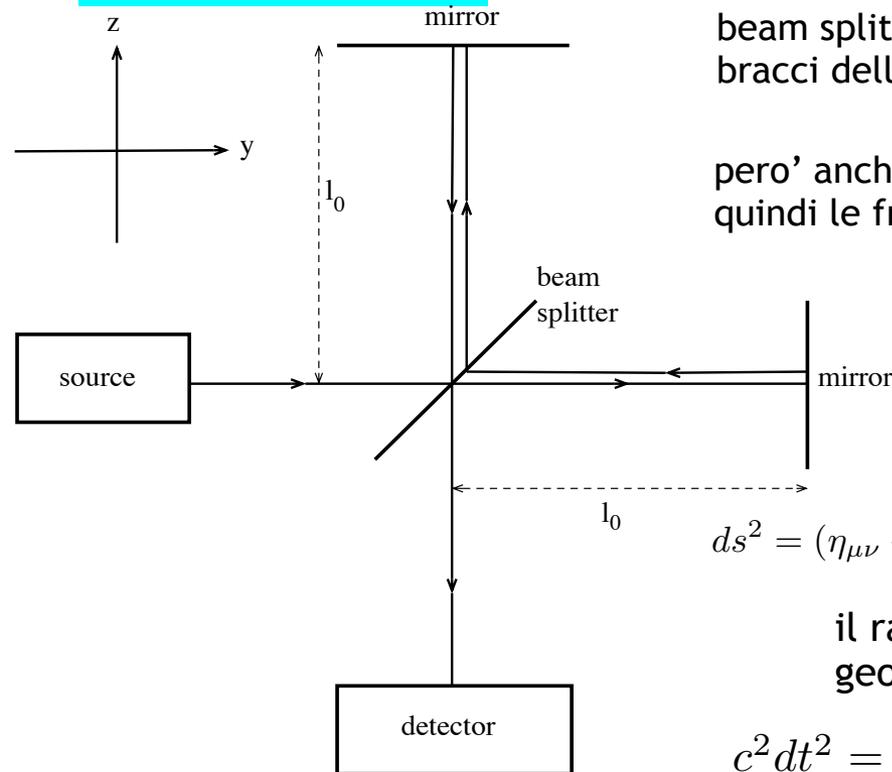
$$ds^2 = (\eta_{\mu\nu} + h_{\mu\nu}^{TT}) dx^\mu dx^\nu = -c^2 dt^2 + dx^2 + (1 + h_+) dy^2 + (1 - h_+) dz^2 .$$

il raggio luminoso che viaggia lungo y segue la geodetica nulla

$$c^2 dt^2 = (1 + h_+) dy^2 \quad \longrightarrow \quad dt = c^{-1} (1 + h_+/2) dy + O(h^2)$$

che integrata sul percorso specchio-beamsplitter- specchio ($2l_0$) da'

$$t_{(y)} = \left(1 + \frac{h_+}{2}\right) \frac{2l_0}{c}$$



INTERFEROMETRO

l'onda incidente fa variare la distanza propria tra gli specchi e il beam splitter, quindi cambia il cammino ottico della luce nei due bracci dell'interferometro

però anche la lunghezza d'onda della luce varia della stessa quantità, quindi le frange d'interferenza non dovrebbero cambiare....

e invece cambiano!

perché il tempo di propagazione dei beam cambia in maniera diversa nei due bracci. Supponiamo ci sia solo la polarizzazione +

$$ds^2 = (\eta_{\mu\nu} + h_{\mu\nu}^{TT}) dx^\mu dx^\nu = -c^2 dt^2 + dx^2 + (1 + h_+) dy^2 + (1 - h_+) dz^2.$$

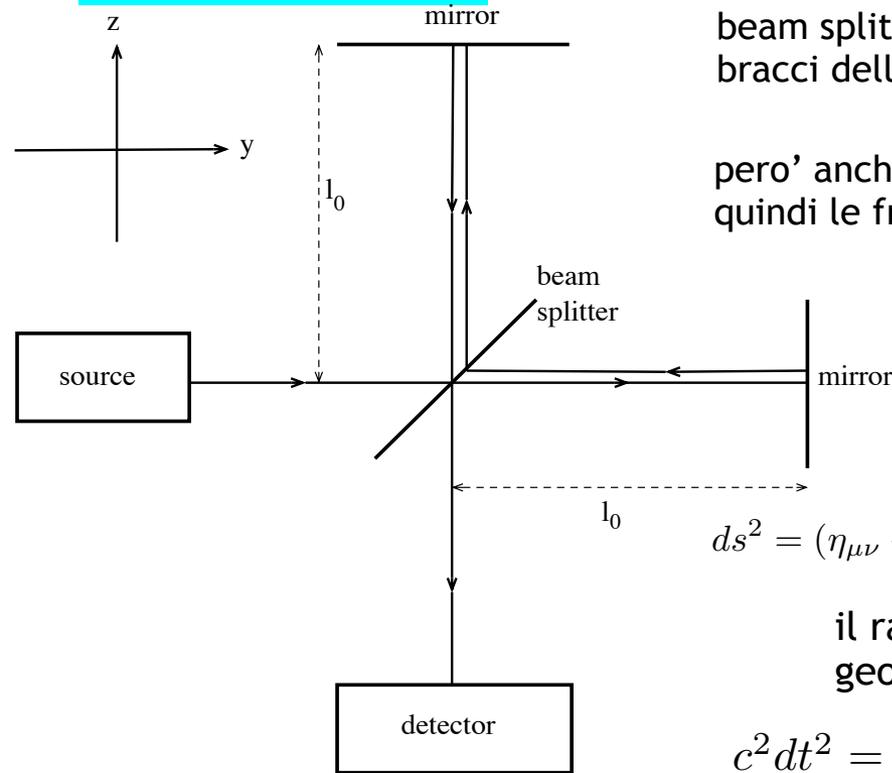
il raggio luminoso che viaggia lungo y segue la geodetica nulla

$$c^2 dt^2 = (1 + h_+) dy^2 \quad \longrightarrow \quad dt = c^{-1} (1 + h_+/2) dy + O(h^2)$$

che integrata sul percorso specchio-beamsplitter- specchio ($2l_0$) da'

$$t_{(y)} = \left(1 + \frac{h_+}{2}\right) \frac{2l_0}{c}$$

per il raggio luminoso che viaggia lungo z, invece: $c^2 dt^2 = (1 - h_+) dz^2$



INTERFEROMETRO

l'onda incidente fa variare la distanza propria tra gli specchi e il beam splitter, quindi cambia il cammino ottico della luce nei due bracci dell'interferometro

però anche la lunghezza d'onda della luce varia della stessa quantità, quindi le frange d'interferenza non dovrebbero cambiare....

e invece cambiano!

perché il tempo di propagazione dei beam cambia in maniera diversa nei due bracci. Supponiamo ci sia solo la polarizzazione +

$$ds^2 = (\eta_{\mu\nu} + h_{\mu\nu}^{TT}) dx^\mu dx^\nu = -c^2 dt^2 + dx^2 + (1 + h_+) dy^2 + (1 - h_+) dz^2 .$$

il raggio luminoso che viaggia lungo y segue la geodetica nulla

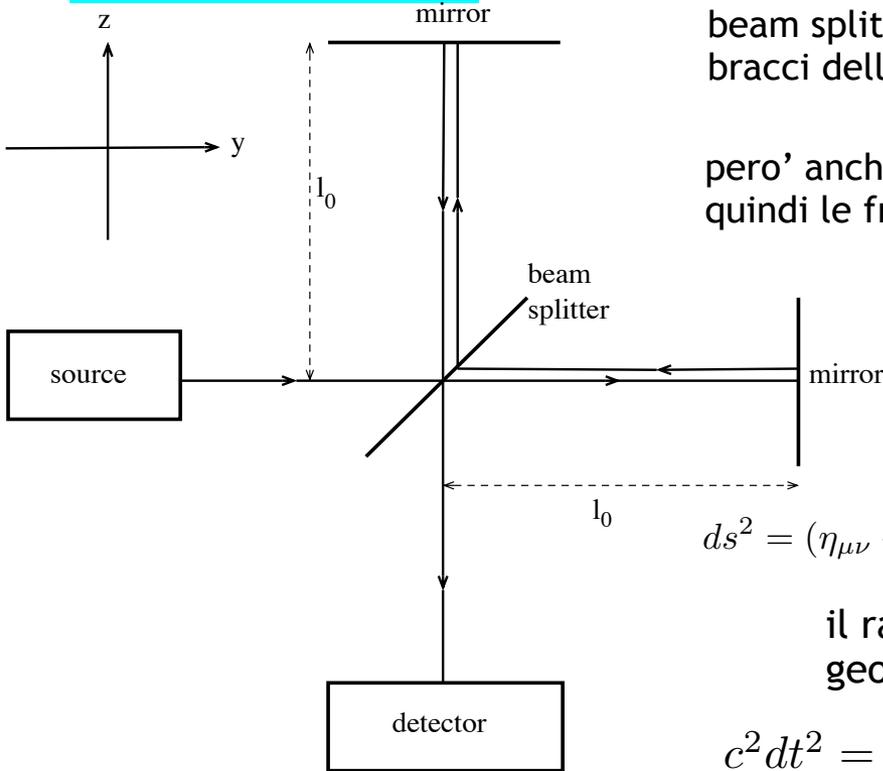
$$c^2 dt^2 = (1 + h_+) dy^2 \longrightarrow dt = c^{-1} (1 + h_+/2) dy + O(h^2)$$

che integrata sul percorso specchio-beamsplitter- specchio ($2l_0$) da'

$$t_{(y)} = \left(1 + \frac{h_+}{2}\right) \frac{2l_0}{c}$$

per il raggio luminoso che viaggia lungo z, invece: $c^2 dt^2 = (1 - h_+) dz^2$

$$\text{per cui } t_{(z)} = \left(1 - \frac{h_+}{2}\right) \frac{2l_0}{c}$$



INTERFEROMETRO

l'onda incidente fa variare la distanza propria tra gli specchi e il beam splitter, quindi cambia il cammino ottico della luce nei due bracci dell'interferometro

però anche la lunghezza d'onda della luce varia della stessa quantità, quindi le frange d'interferenza non dovrebbero cambiare....

e invece cambiano!

perché il tempo di propagazione dei beam cambia in maniera diversa nei due bracci. Supponiamo ci sia solo la polarizzazione +

$$ds^2 = (\eta_{\mu\nu} + h_{\mu\nu}^{TT}) dx^\mu dx^\nu = -c^2 dt^2 + dx^2 + (1 + h_+) dy^2 + (1 - h_+) dz^2 .$$

il raggio luminoso che viaggia lungo y segue la geodetica nulla

$$c^2 dt^2 = (1 + h_+) dy^2 \longrightarrow dt = c^{-1} (1 + h_+/2) dy + O(h^2)$$

che integrata sul percorso specchio-beamsplitter- specchio ($2l_0$) da'

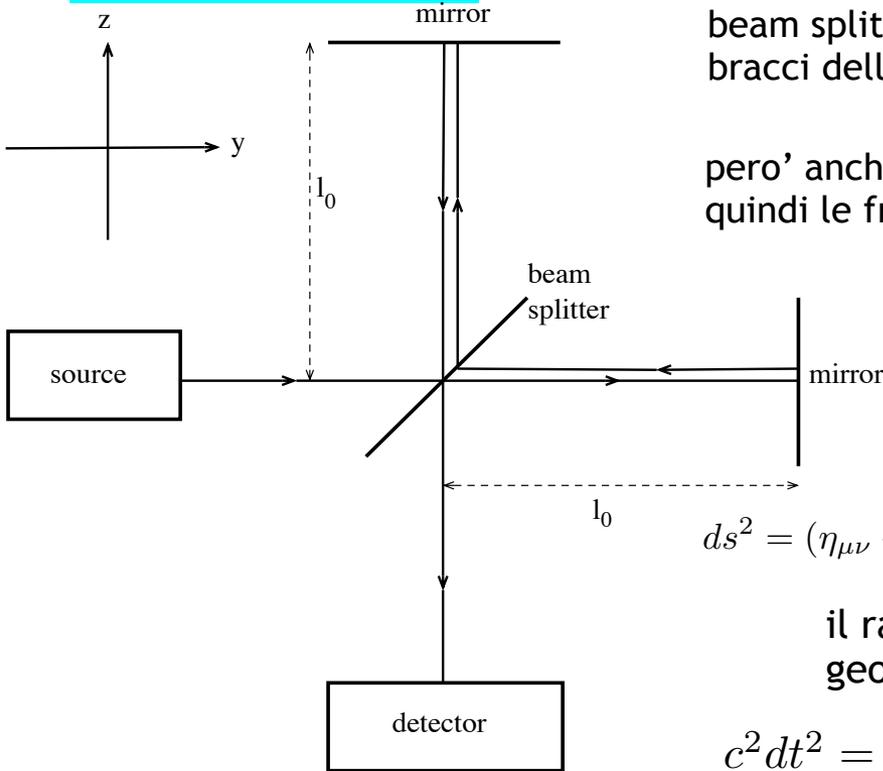
$$t_{(y)} = \left(1 + \frac{h_+}{2}\right) \frac{2l_0}{c}$$

per il raggio luminoso che viaggia lungo z, invece: $c^2 dt^2 = (1 - h_+) dz^2$

$$\text{per cui } t_{(z)} = \left(1 - \frac{h_+}{2}\right) \frac{2l_0}{c}$$

quindi i due raggi si ricongiungono nel detector con un ritardo temporale

$$\Delta t = t_{(y)} - t_{(z)} = \frac{2l_0}{c} h_+$$



INTERFEROMETRO

l'onda incidente fa variare la distanza propria tra gli specchi e il beam splitter, quindi cambia il cammino ottico della luce nei due bracci dell'interferometro

però anche la lunghezza d'onda della luce varia della stessa quantità, quindi le frange d'interferenza non dovrebbero cambiare....

e invece cambiano!

perché il tempo di propagazione dei beam cambia in maniera diversa nei due bracci. Supponiamo ci sia solo la polarizzazione +

$$ds^2 = (\eta_{\mu\nu} + h_{\mu\nu}^{TT}) dx^\mu dx^\nu = -c^2 dt^2 + dx^2 + (1 + h_+) dy^2 + (1 - h_+) dz^2 .$$

il raggio luminoso che viaggia lungo y segue la geodetica nulla

$$c^2 dt^2 = (1 + h_+) dy^2 \longrightarrow dt = c^{-1} (1 + h_+/2) dy + O(h^2)$$

che integrata sul percorso specchio-beamsplitter- specchio ($2l_0$) da'

$$t_{(y)} = \left(1 + \frac{h_+}{2}\right) \frac{2l_0}{c}$$

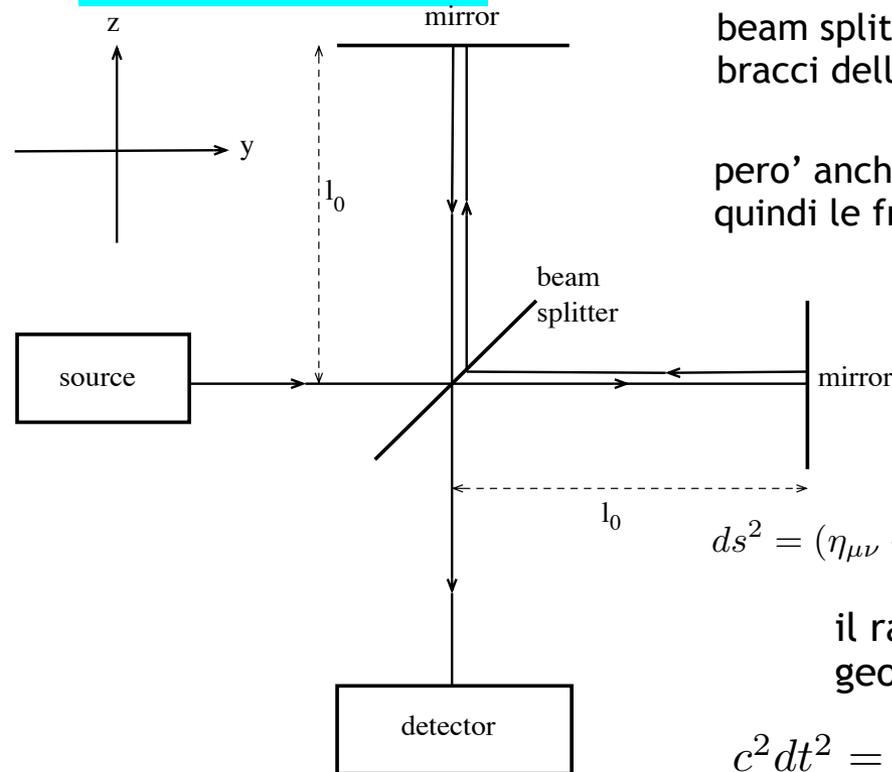
per il raggio luminoso che viaggia lungo z, invece: $c^2 dt^2 = (1 - h_+) dz^2$

$$\text{per cui } t_{(z)} = \left(1 - \frac{h_+}{2}\right) \frac{2l_0}{c}$$

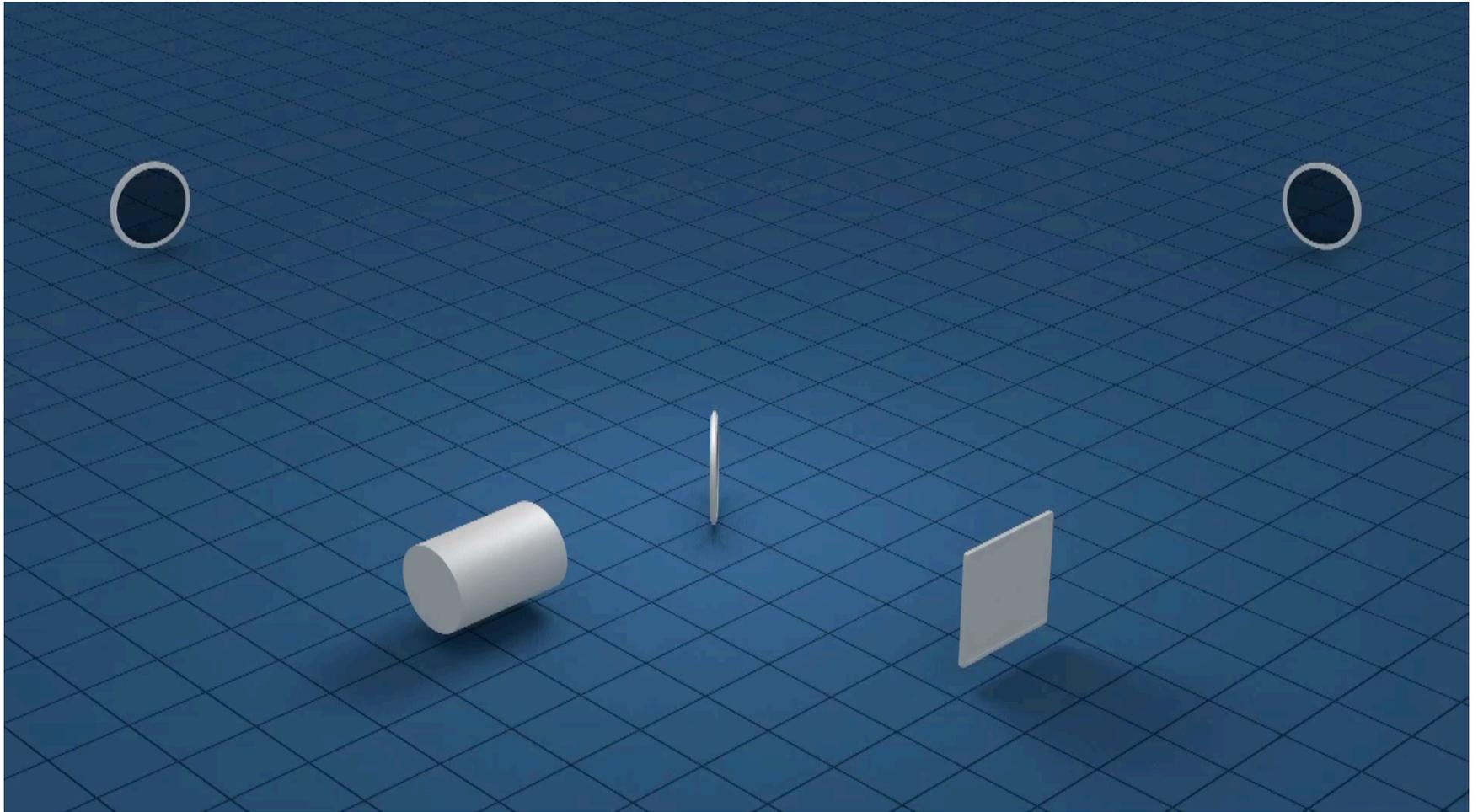
quindi i due raggi si ricongiungono nel detector con un ritardo temporale

$$\Delta t = t_{(y)} - t_{(z)} = \frac{2l_0}{c} h_+$$

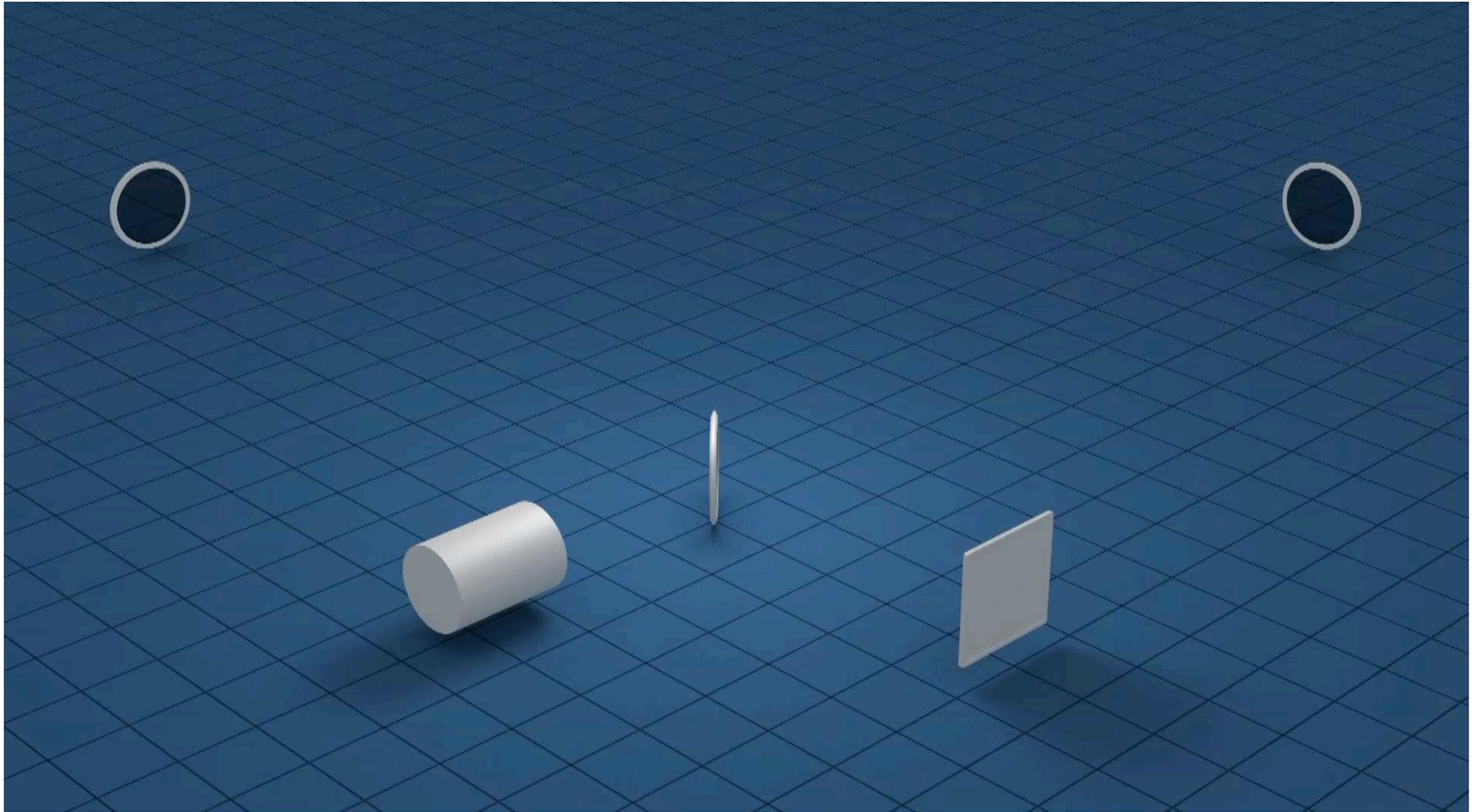
che produce uno shift nelle frange di interferenza $\sim c\Delta t = 2 l_0 h_+$



Come si rivelano le onde gravitazionali: interferometri



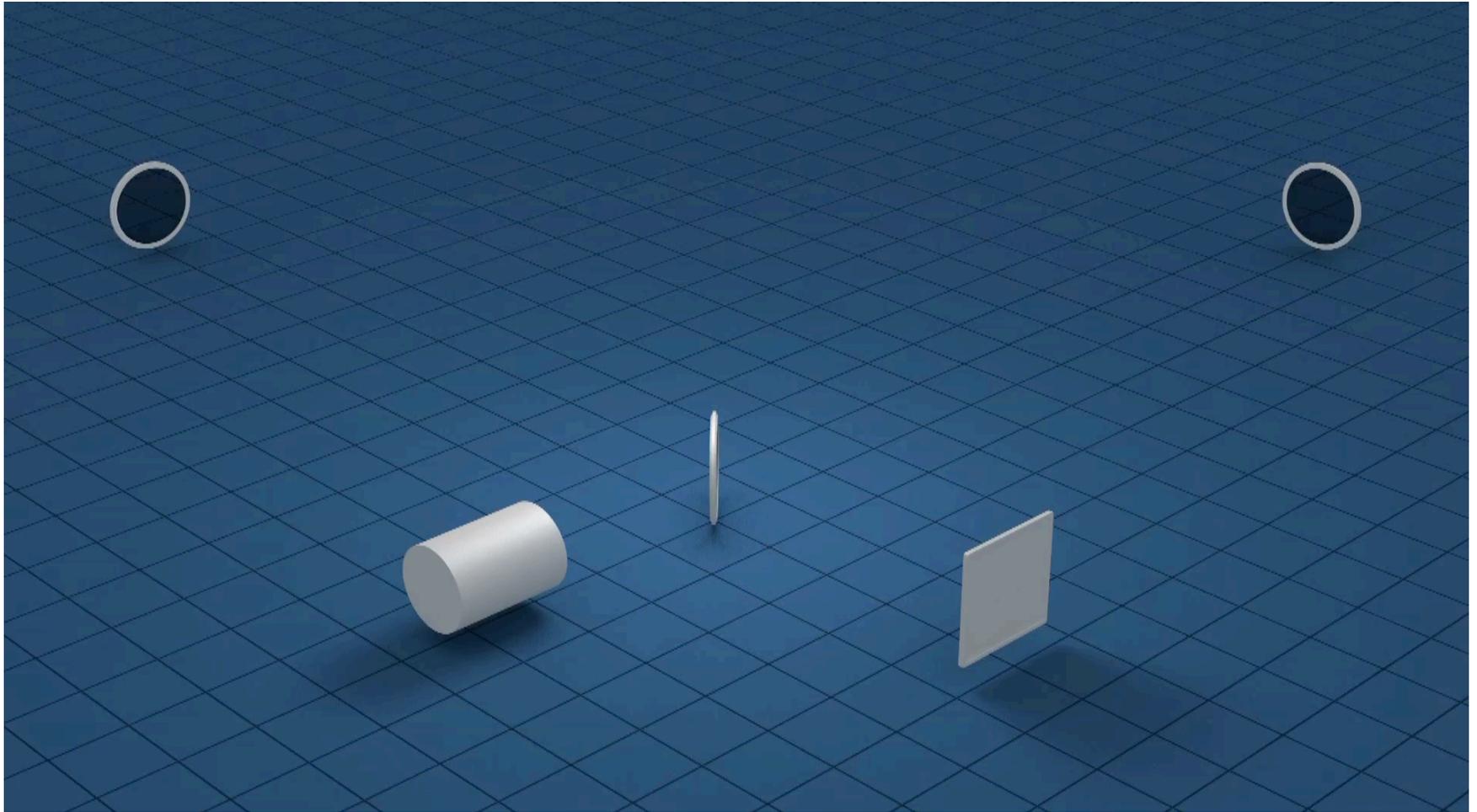
Come si rivelano le onde gravitazionali: interferometri



l'onda gravitazionale fa variare il tempo di arrivo dei raggi riflessi dagli specchi al fotorivelatore; questo produce uno shift delle frange d'interferenza

$$\sim c \Delta t = 2 l_0 h$$

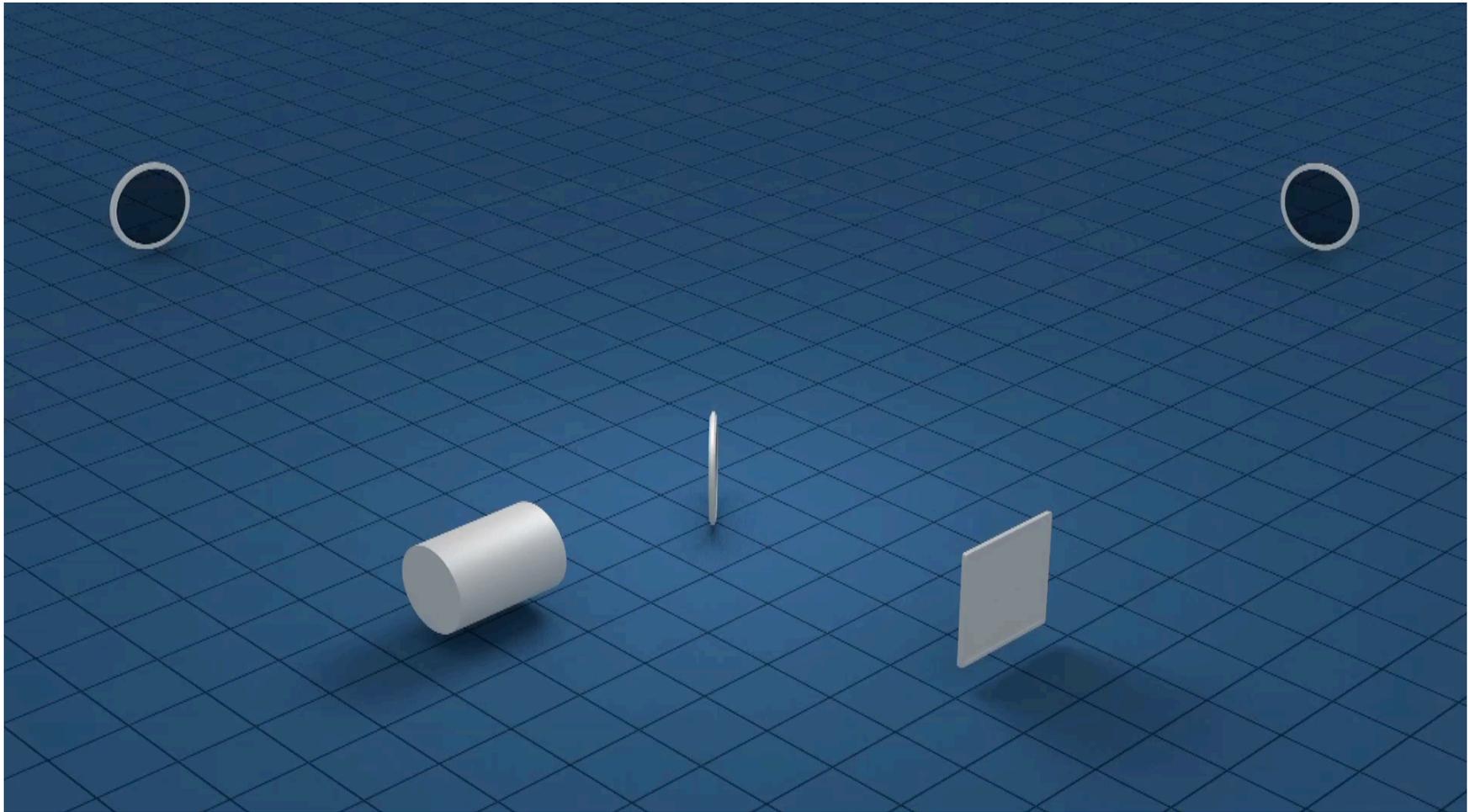
Come si rivelano le onde gravitazionali: interferometri



l'onda gravitazionale fa variare il tempo di arrivo dei raggi riflessi dagli specchi al fotorivelatore; questo produce uno shift delle frange d'interferenza

$$\sim c \Delta t = 2 l_0 h$$

Come si rivelano le onde gravitazionali: interferometri



l'onda gravitazionale fa variare il tempo di arrivo dei raggi riflessi dagli specchi al fotorivelatore; questo produce uno shift delle frange d'interferenza

$$\sim c \Delta t = 2 l_0 h$$

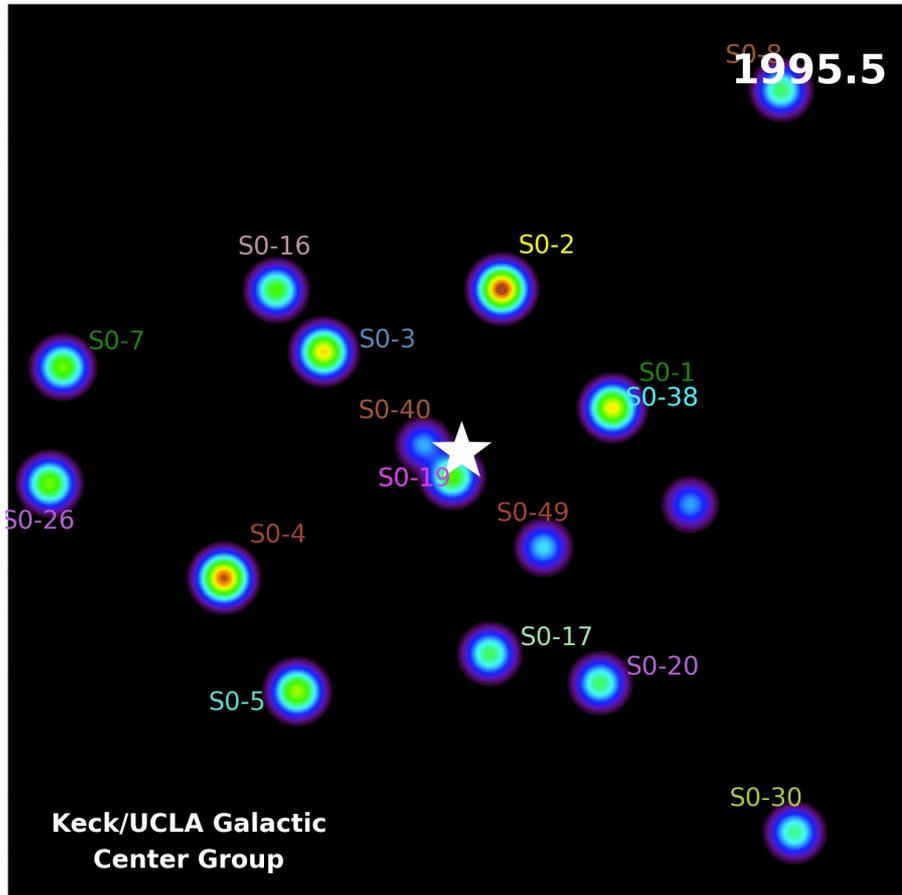
se per es. $h \sim 10^{-22}$ e $l_0 = 3 \text{ km}$, $2 l_0 h \sim 6 \times 10^{-17} \text{ cm}$, minore del raggio del protone! ($1.5 \times 10^{-16} \text{ cm}$)

Esperimento italo-francese Virgo

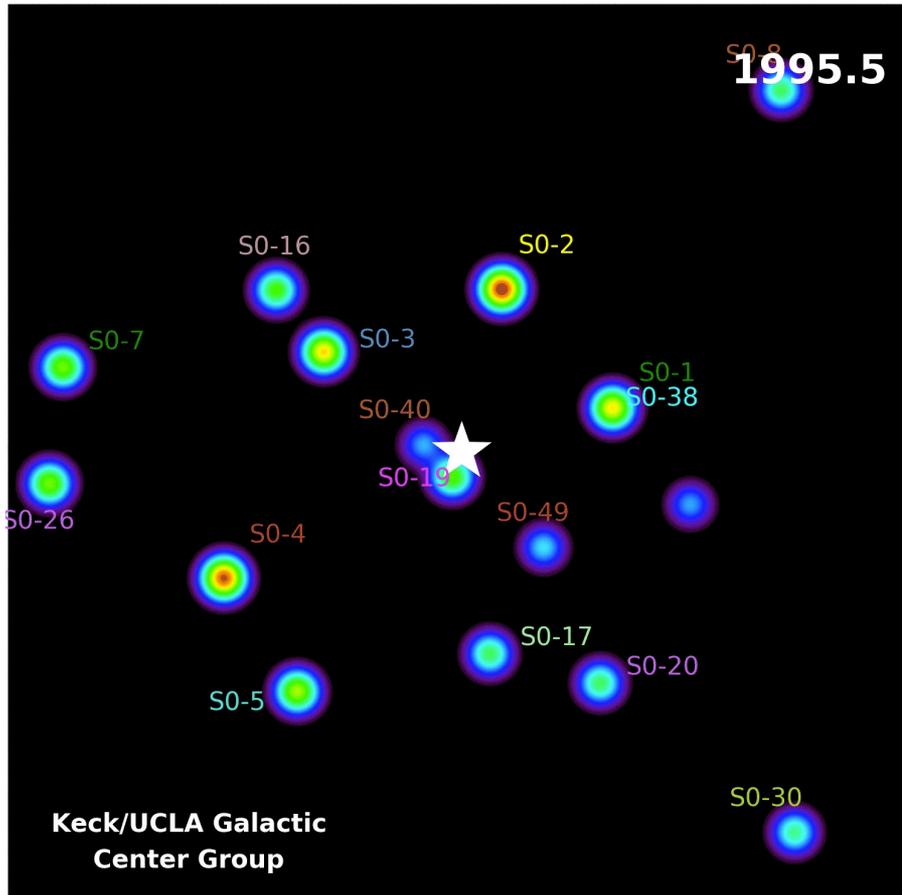
Cascina, Pisa



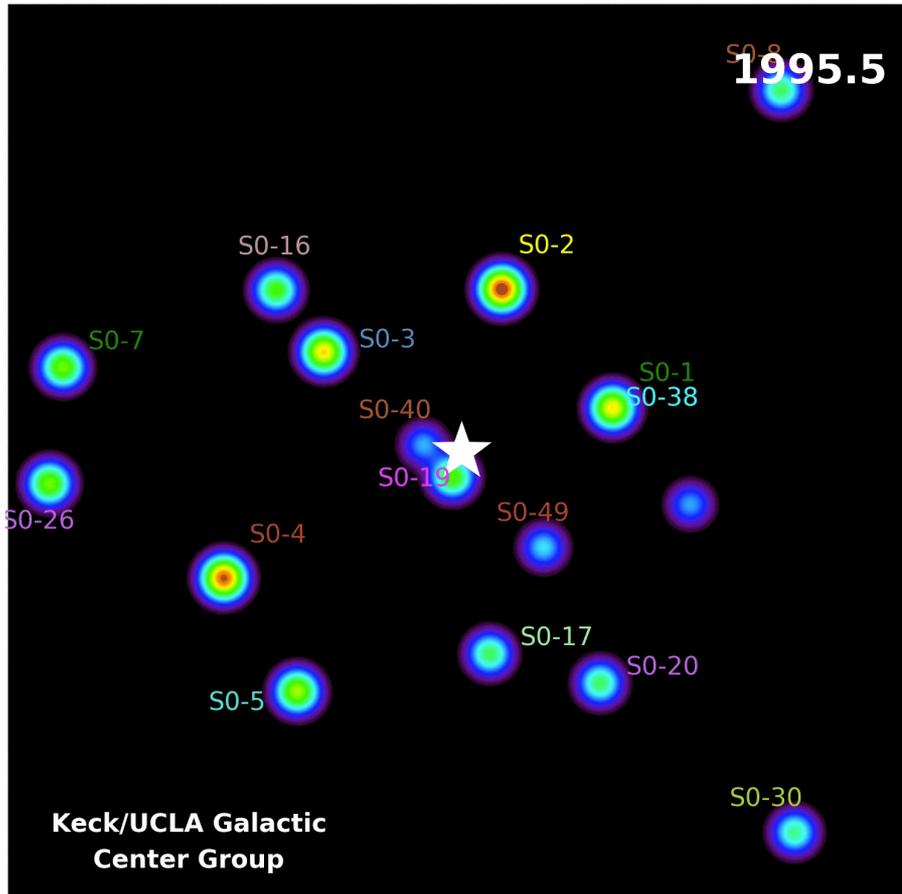
Cosa si sapeva dei buchi neri prima della rivelazione delle onde gravitazionali



Cosa si sapeva dei buchi neri prima della rivelazione delle onde gravitazionali



Cosa si sapeva dei buchi neri prima della rivelazione delle onde gravitazionali



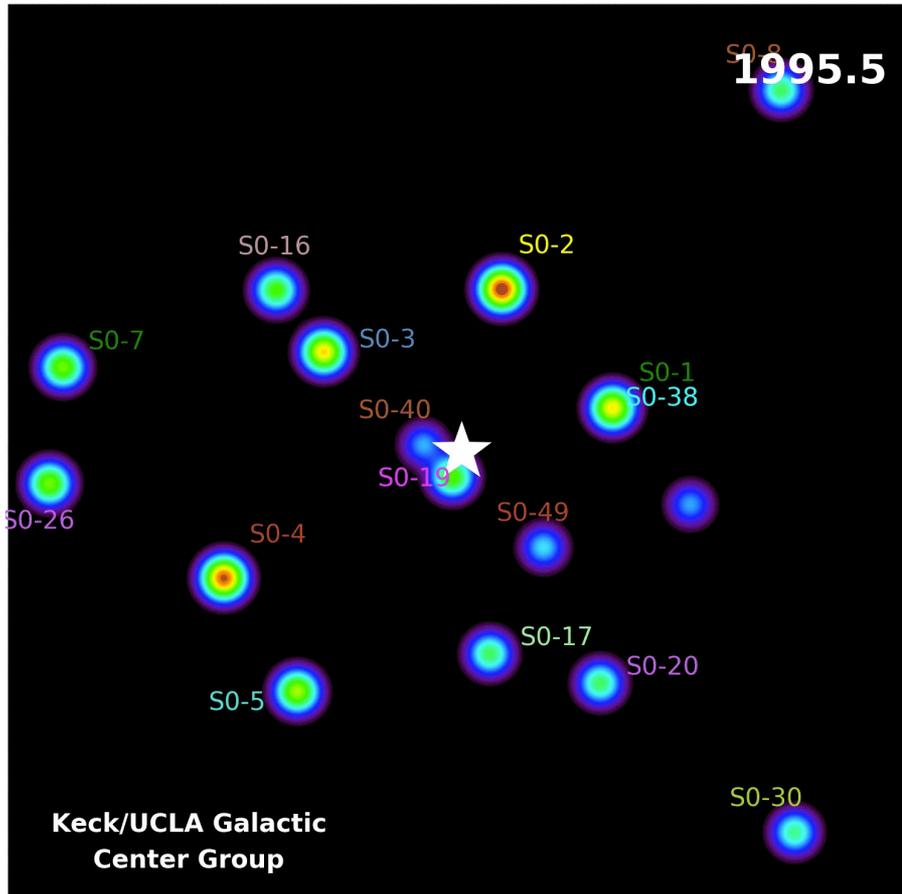
lo studio delle orbite delle stelle più brillanti al centro della nostra Galassia, mostra che queste sono possibili solo se al centro c'è una sorgente estremamente compatta, cioè un buco nero, chiamato

Sagittarius A*

di massa pari a

M= 4.4 milioni di masse solari

Cosa si sapeva dei buchi neri prima della rivelazione delle onde gravitazionali



lo studio delle orbite delle stelle più brillanti al centro della nostra Galassia, mostra che queste sono possibili solo se al centro c'è una sorgente estremamente compatta, cioè un buco nero, chiamato

Sagittarius A*

di massa pari a

M= 4.4 milioni di masse solari

Buchi neri enormi, con masse che arrivano a centinaia di miliardi di masse solari si trovano al centro di quasi tutte le galassie

I buchi neri non sono mai soli!

I buchi neri più piccoli, con masse pari a **10-20 masse solari** di solito si accompagnano a stelle da cui “risucchiano” materia; questa cadendo forma un

disco di accrescimento



I buchi neri non sono mai soli!

I buchi neri più piccoli, con masse pari a **10-20 masse solari** di solito si accompagnano a stelle da cui “risucchiano” materia; questa cadendo forma un

disco di accrescimento

la materia del disco emette raggi X, raggi Gamma e altri tipi di radiazione elettromagnetica che può essere osservata da satelliti progettati a questo scopo



I buchi neri non sono mai soli!

I buchi neri più piccoli, con masse pari a **10-20 masse solari** di solito si accompagnano a stelle da cui “risucchiano” materia; questa cadendo forma un

disco di accrescimento

la materia del disco emette raggi X, raggi Gamma e altri tipi di radiazione elettromagnetica che può essere osservata da satelliti progettati a questo scopo



Quindi i buchi neri si individuano studiando quello che avviene al di fuori dell'orizzonte

Hubble finally may have proof black holes do exist

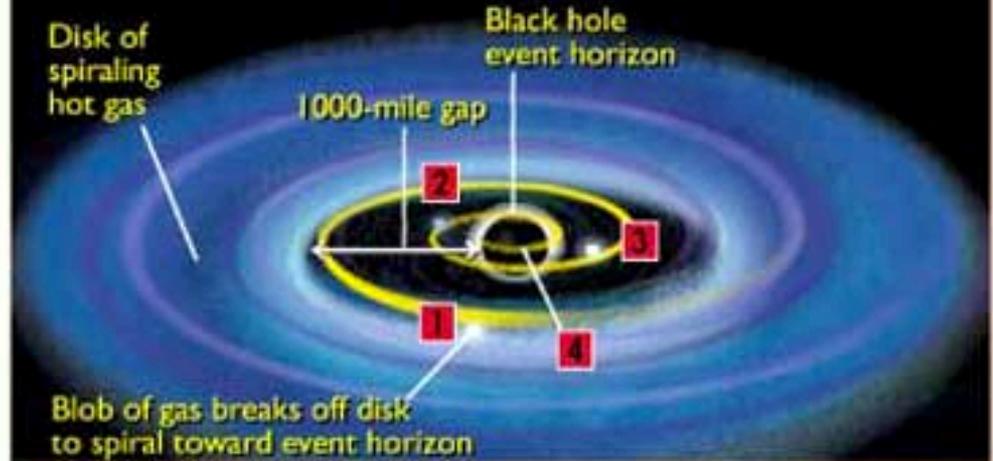
SPACE TELESCOPE SCIENCE INSTITUTE
RELEASE

Posted: January 11, 2001

NASA's Hubble Space Telescope may have, for the first time, provided direct evidence for the existence of black holes by observing the disappearance of matter as it falls beyond the "event horizon."

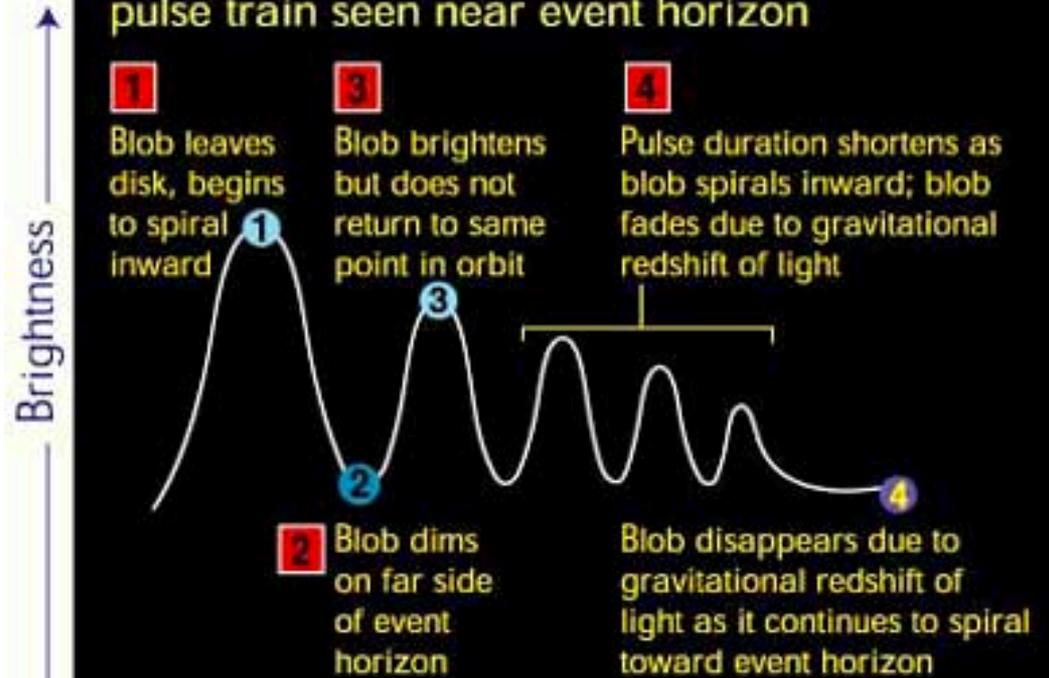
Joseph F. Dolan, of NASA's Goddard Space Flight Center in Greenbelt, MD, observed pulses of ultraviolet light from clumps of hot gas fade and then disappear as they swirled around a massive, compact object called Cygnus XR-1. This activity is just as would have been expected if the hot gas had fallen into a black hole.

Signature of piece of matter falling into black hole Cygnus XR-1



Blob of gas breaks off disk to spiral toward event horizon

Ultraviolet light signature of dying pulse train seen near event horizon





Prima della rivelazione delle onde gravitazionali avevamo visto:

- buchi neri supermassivi al centro delle galassie

$$10^5 M_{\odot} \approx M_{\text{BH}} \approx 10^{11} M_{\odot}$$

- buchi neri piccoli, al massimo di 20 masse solari (ora ne hanno visto uno di ~ 70 masse solari nella nostra galassia, ma che abbia quella massa e' ancora incerto)

Il 14 settembre 2015 per la prima volta le antenne dell'esperimento americano LIGO hanno rivelato l'onda gravitazionale emessa da due buchi neri che si sono fusi a formare un unico buco nero:



Il 14 settembre 2015 per la prima volta le antenne dell'esperimento americano LIGO hanno rivelato l'onda gravitazionale emessa da due buchi neri che si sono fusi a formare un unico buco nero:



Il 14 settembre 2015 per la prima volta le antenne dell'esperimento americano LIGO hanno rivelato l'onda gravitazionale emessa da due buchi neri che si sono fusi a formare un unico buco nero:



Da allora sono stati rivelati altri segnali dello stesso tipo+ un segnale dovuto alla coalescenza di due stelle di neutroni

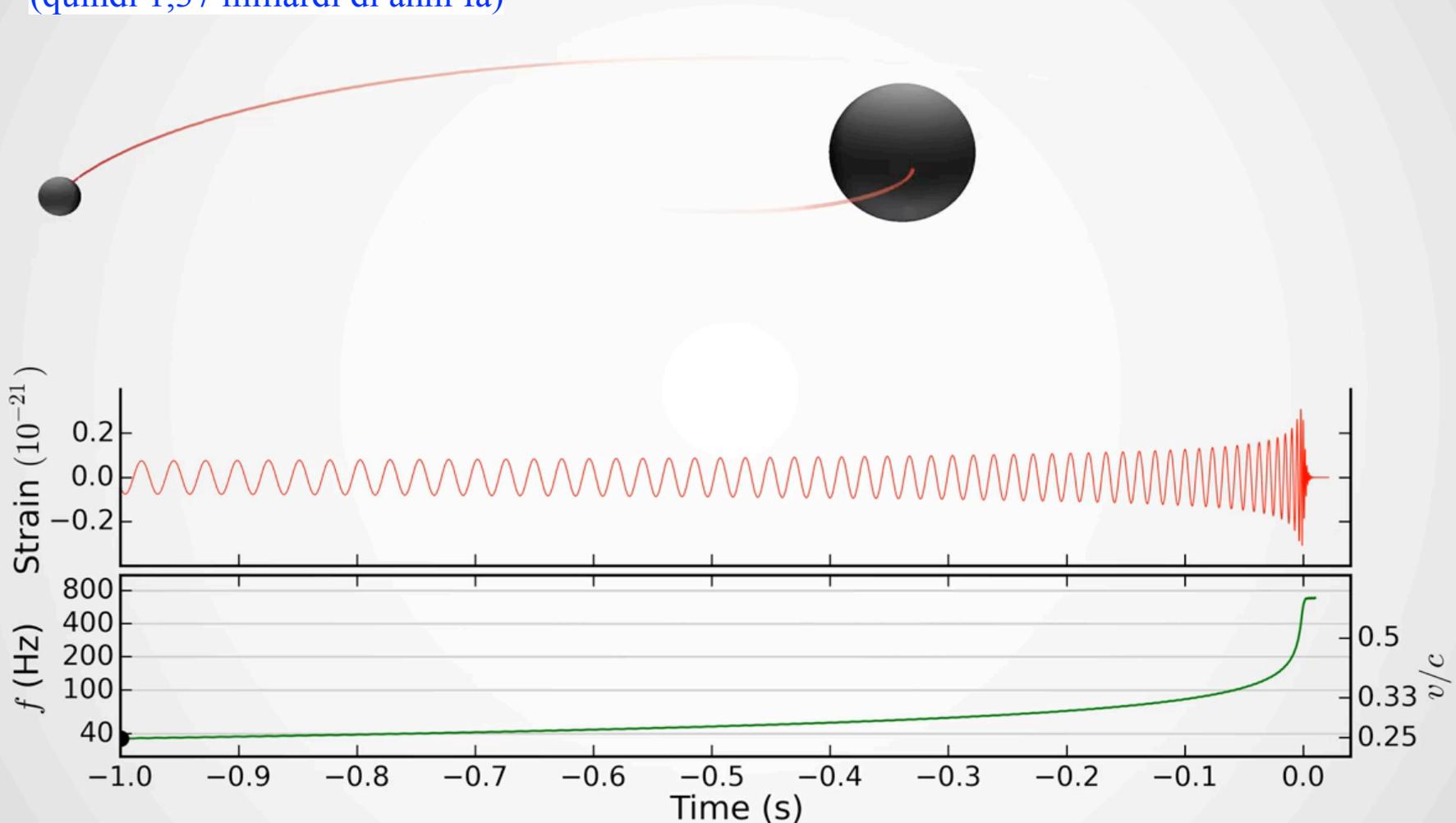
Il 14 settembre 2015 per la prima volta le antenne dell'esperimento americano LIGO hanno rivelato l'onda gravitazionale emessa da due buchi neri che si sono fusi a formare un unico buco nero:



Da allora sono stati rivelati altri segnali dello stesso tipo+ un segnale dovuto alla coalescenza di due stelle di neutroni

Che cosa hanno visto i rivelatori americani dell'esperimento LIGO il 15 settembre 2015?

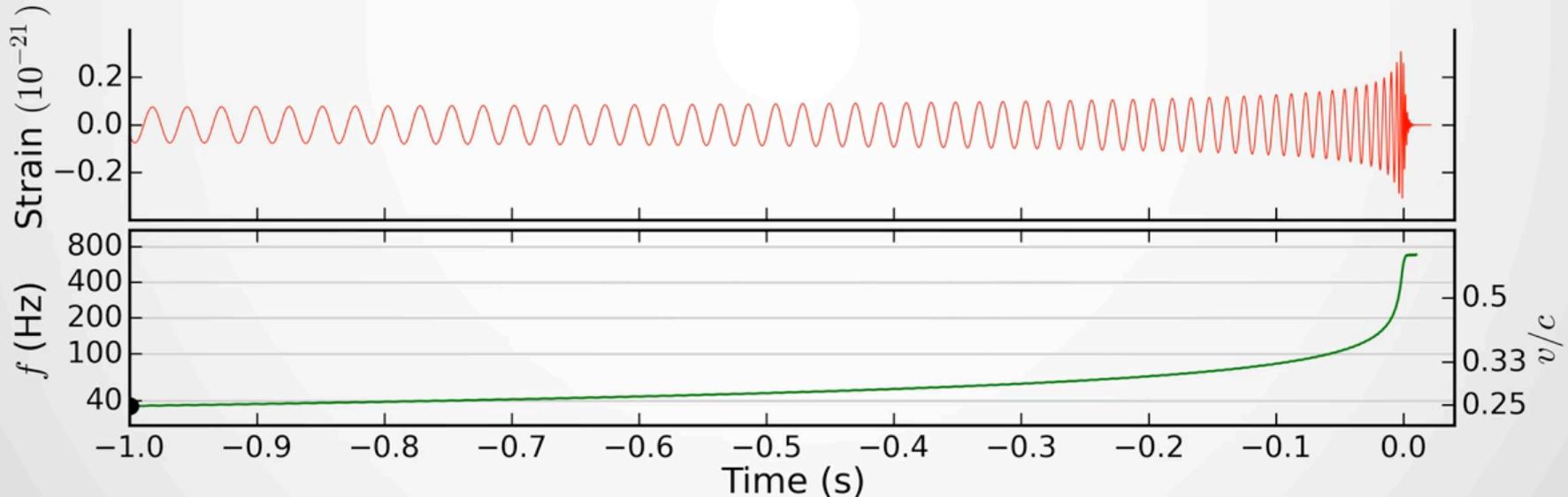
Due buchi neri con massa pari a **29** e **36** volte la massa del Sole, che dopo aver spiraleggiato uno attorno all'altro si sono fusi e hanno formato un buco nero di massa pari a **62** volte la massa del Sole. Tutto questo è avvenuto a una distanza di 1,37 miliardi di anni luce (quindi 1,37 miliardi di anni fa)



Che cosa hanno visto i rivelatori americani dell'esperimento LIGO il 15 settembre 2015?

Due buchi neri con massa pari a **29** e **36** volte la massa del Sole, che dopo aver spiraleggiato uno attorno all'altro si sono fusi e hanno formato un buco nero di massa pari a **62** volte la massa del Sole. Tutto questo è avvenuto a una distanza di 1,37 miliardi di anni luce (quindi 1,37 miliardi di anni fa)

il periodo orbitale diminuisce

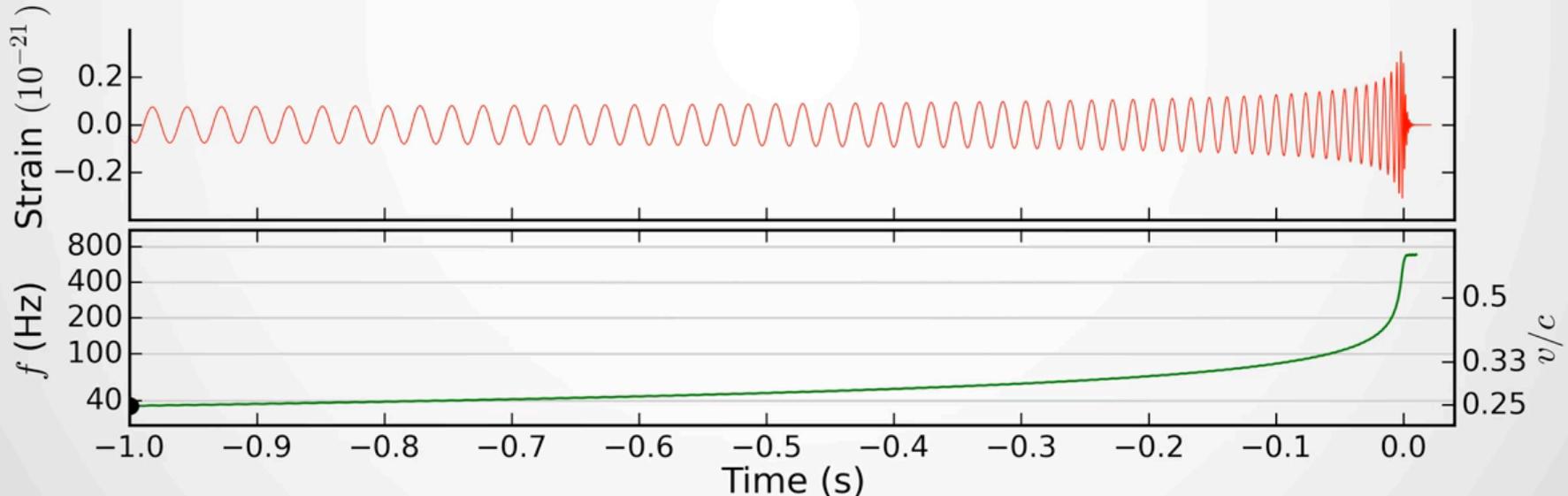


Che cosa hanno visto i rivelatori americani dell'esperimento LIGO il 15 settembre 2015?

Due buchi neri con massa pari a **29** e **36** volte la massa del Sole, che dopo aver spiraleggiato uno attorno all'altro si sono fusi e hanno formato un buco nero di massa pari a **62** volte la massa del Sole. Tutto questo è avvenuto a una distanza di 1,37 miliardi di anni luce (quindi 1,37 miliardi di anni fa)

il periodo orbitale diminuisce

la frequenza dell'onda è
2x inverso del periodo
quindi aumenta



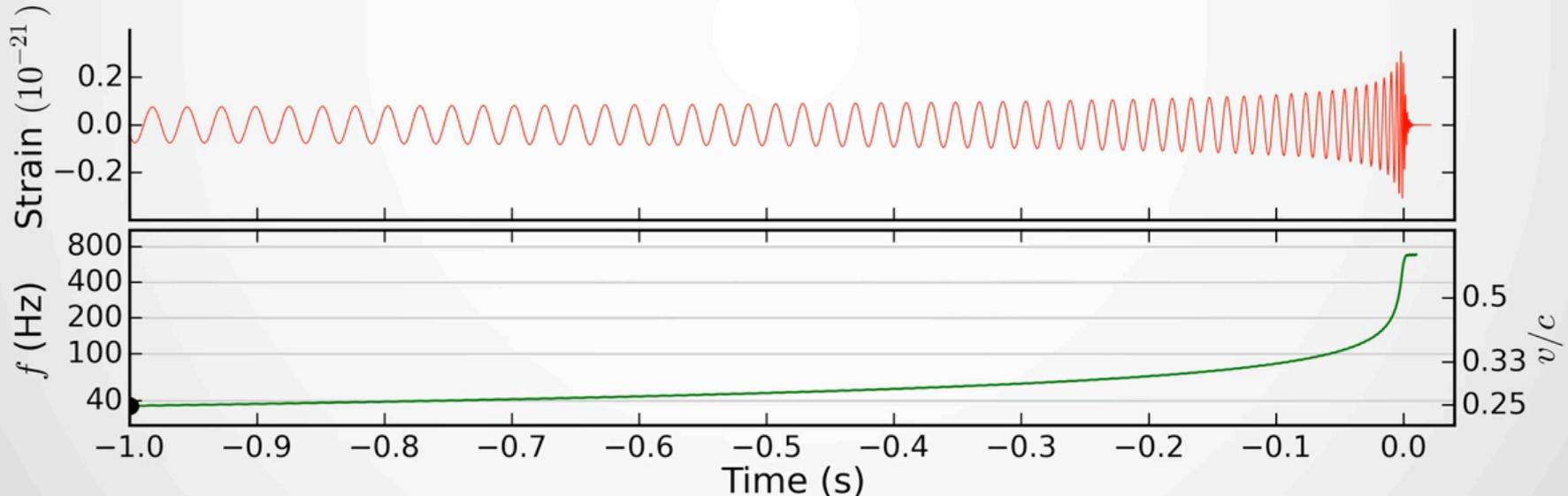
Che cosa hanno visto i rivelatori americani dell'esperimento LIGO il 15 settembre 2015?

Due buchi neri con massa pari a **29** e **36** volte la massa del Sole, che dopo aver spiraleggiato uno attorno all'altro si sono fusi e hanno formato un buco nero di massa pari a **62** volte la massa del Sole. Tutto questo è avvenuto a una distanza di 1,37 miliardi di anni luce (quindi 1,37 miliardi di anni fa)

il periodo orbitale diminuisce

la frequenza dell'onda è
2x inverso del periodo
quindi aumenta

l'ampiezza aumenta



Che cosa hanno visto i rivelatori americani dell'esperimento LIGO il 15 settembre 2015?

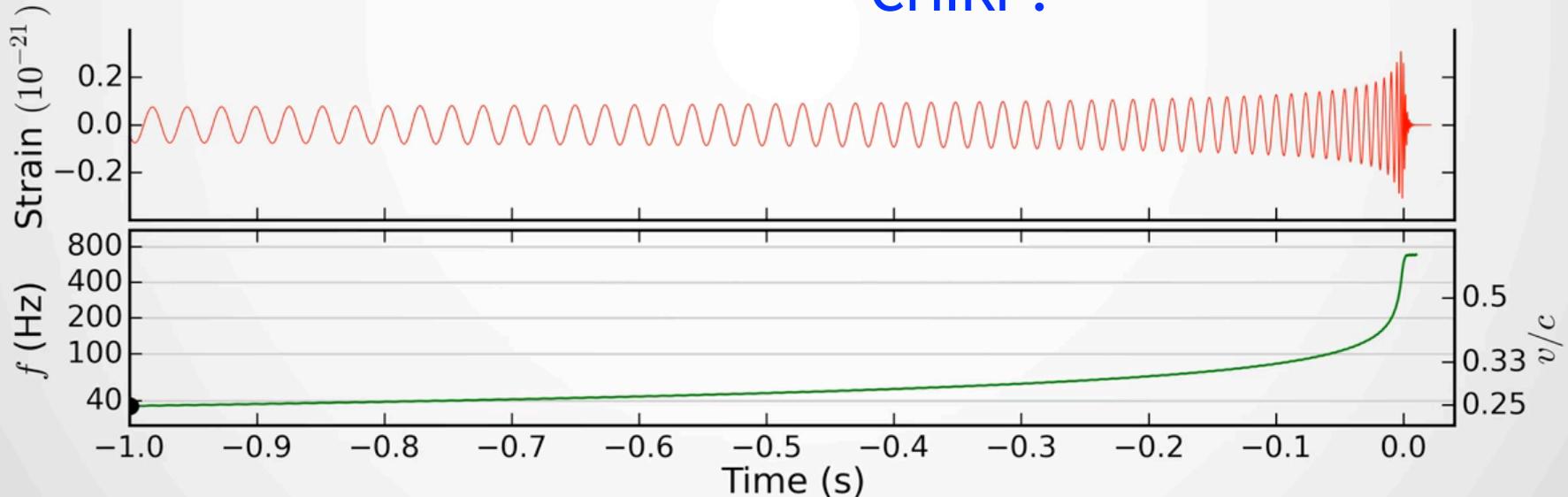
Due buchi neri con massa pari a **29** e **36** volte la massa del Sole, che dopo aver spiraleggiato uno attorno all'altro si sono fusi e hanno formato un buco nero di massa pari a **62** volte la massa del Sole. Tutto questo è avvenuto a una distanza di 1,37 miliardi di anni luce (quindi 1,37 miliardi di anni fa)

il periodo orbitale diminuisce

la frequenza dell'onda è
2x inverso del periodo
quindi aumenta

l'ampiezza aumenta

CHIRP!



Che cosa hanno visto i rivelatori americani dell'esperimento LIGO il 15 settembre 2015?

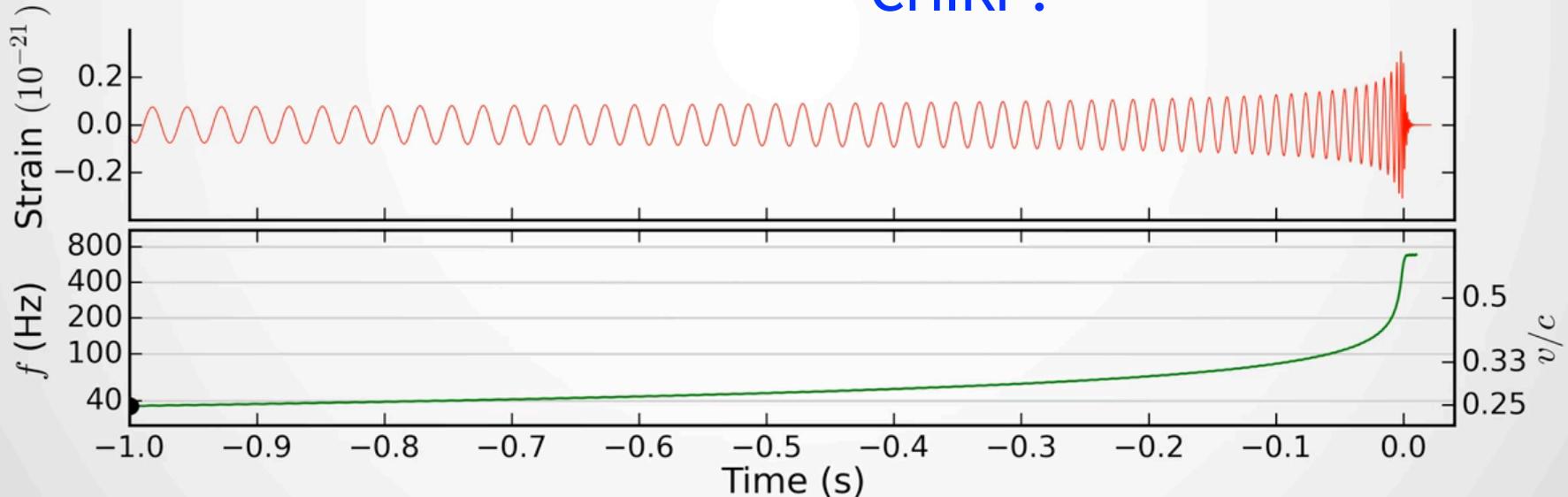
Due buchi neri con massa pari a **29** e **36** volte la massa del Sole, che dopo aver spiraleggiato uno attorno all'altro si sono fusi e hanno formato un buco nero di massa pari a **62** volte la massa del Sole. Tutto questo è avvenuto a una distanza di 1,37 miliardi di anni luce (quindi 1,37 miliardi di anni fa)

il periodo orbitale diminuisce

la frequenza dell'onda è
2x inverso del periodo
quindi aumenta

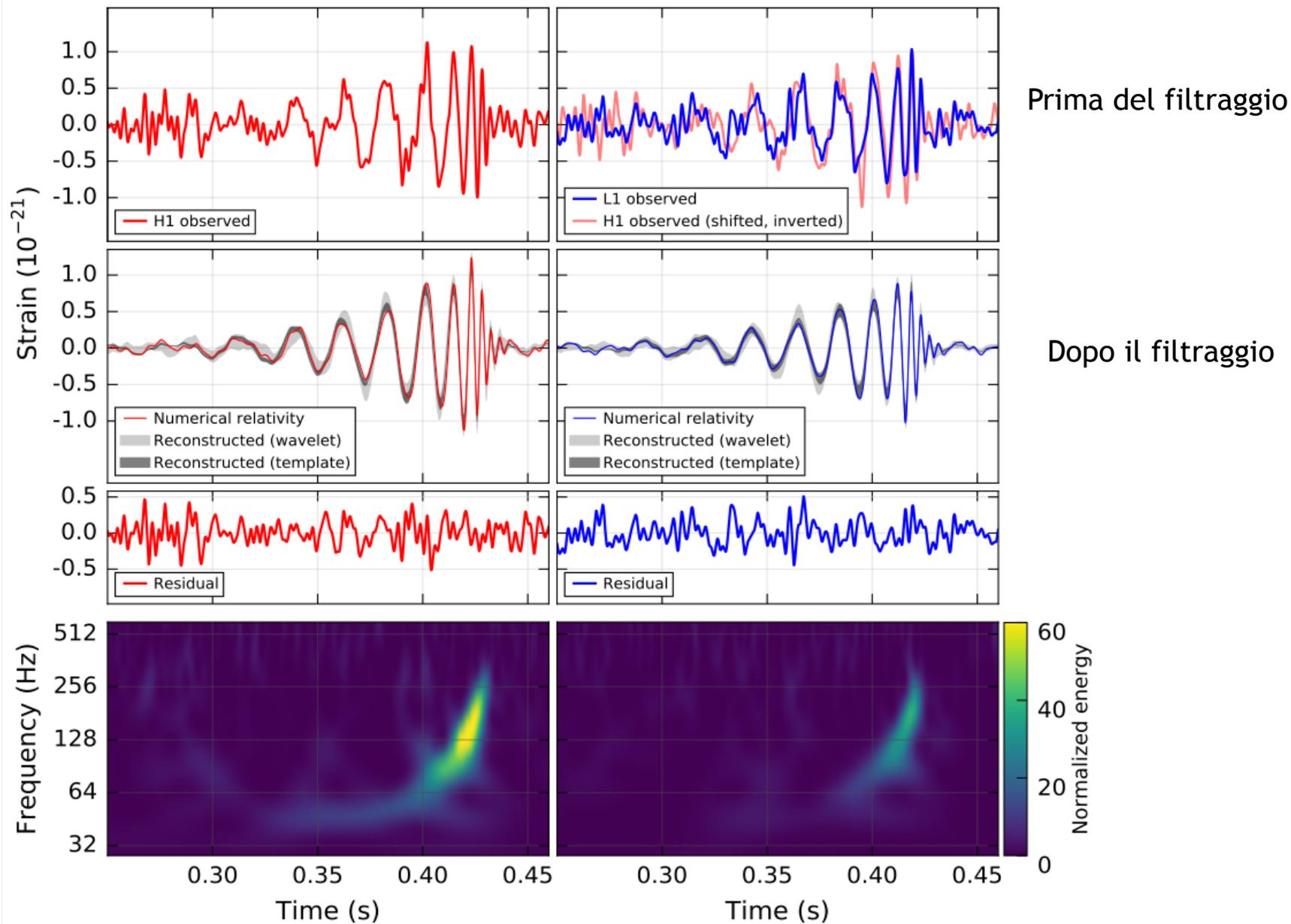
l'ampiezza aumenta

CHIRP!



Hanford, Washington (H1)

Livingston, Louisiana (L1)



L'ultimo segnale rivelato da LIGO e Virgo e' stato emesso durante la coalescenza di due stelle di neutroni : GW170817

PRL **119**, 161101 (2017)

PHYSICAL REVIEW LETTERS

week ending
20 OCTOBER 2017

~ 100 s (calculated starting from 24 Hz) in the detectors' sensitive band, the inspiral signal ended at 12:41:04.4 UTC. In addition, a γ -ray burst was observed 1.7 s after the coalescence time [39–45]. The combination of data from the LIGO and Virgo detectors allowed a precise sky position localization to an area of 28 deg^2 . This measurement enabled an electromagnetic follow-up campaign that identified a counterpart near the galaxy NGC 4993, consistent with the localization and distance inferred from gravitational-wave data [46–50].

From the gravitational-wave signal, the best measured combination of the masses is the chirp mass [51] $\mathcal{M} = 1.188_{-0.002}^{+0.004} M_{\odot}$. From the union of 90% credible intervals obtained using different waveform models (see Sec. IV for details), the total mass of the system is between 2.73 and $3.29 M_{\odot}$. The individual masses are in the broad range of 0.86 to $2.26 M_{\odot}$, due to correlations between their uncertainties. This suggests a BNS as the source of the gravitational-wave signal, as the total masses of known BNS systems are between 2.57 and $2.88 M_{\odot}$ with components between 1.17 and $\sim 1.6 M_{\odot}$ [52]. Neutron stars in general have precisely measured masses as large as $2.01 \pm 0.04 M_{\odot}$ [53], whereas stellar-mass black holes found in binaries in our galaxy have masses substantially greater than the components of GW170817 [54–56].

Gravitational-wave observations alone are able to measure the masses of the two objects and set a lower limit on their compactness, but the results presented here do not exclude objects more compact than neutron stars such as quark stars, black holes, or more exotic objects [57–61]. The detection of GRB 170817A and subsequent electromagnetic emission demonstrates the presence of matter. Moreover, although a neutron star–black hole system is not ruled out, the consistency of the mass estimates with the

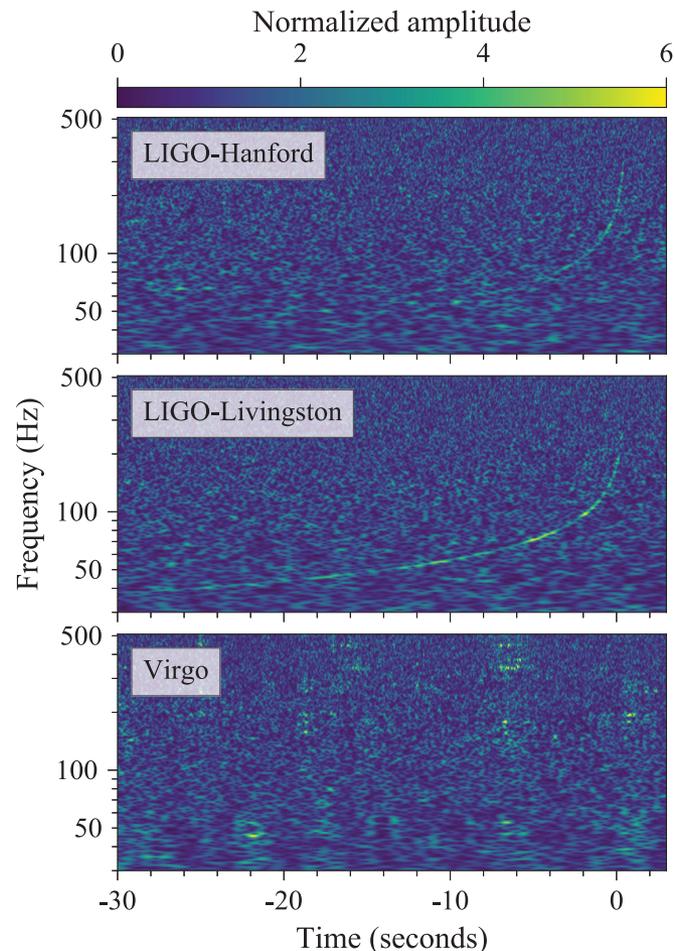


FIG. 1. Time-frequency representations [65] of data containing the gravitational-wave event GW170817, observed by the LIGO-Hanford (top), LIGO-Livingston (middle), and Virgo (bottom) detectors. Times are shown relative to August 17, 2017 12:41:04 UTC. The amplitude scale in each detector is normalized to that detector's noise amplitude spectral density. In the LIGO data

Gravitational wave events detected by advanced interferometers

Table 15.1 Source parameters of the events detected in the observational runs O1 and O2, 2015-17.

Event height	m_1/M_\odot	m_2/M_\odot	$E_{rad}/(M_\odot)c^2$	M_F/M_\odot	J/M_F^2	D_L/Mpc	z	$\Delta\Omega/deg^2$
GW150914	$35.6^{+4.8}_{-3.0}$	$30.6^{+3.0}_{-4.4}$	$3.1^{+0.4}_{-0.4}$	$63.1^{+3.3}_{-3.0}$	$0.69^{+0.05}_{-0.04}$	430^{+150}_{-170}	$0.09^{+0.03}_{-0.03}$	179
GW151012	$23.3^{+14.0}_{-5.5}$	$13.6^{+4.1}_{-4.8}$	$1.5^{+0.5}_{-0.5}$	$35.7^{+9.9}_{-3.8}$	$0.67^{+0.13}_{-0.11}$	1060^{+540}_{-480}	$0.21^{+0.09}_{-0.09}$	1555
GW151226	$13.7^{+8.8}_{-3.2}$	$7.7^{+2.2}_{-2.6}$	$1.0^{+0.1}_{-0.2}$	$20.5^{+6.4}_{-1.5}$	$0.74^{+0.07}_{-0.05}$	440^{+180}_{-190}	$0.09^{+0.04}_{-0.04}$	1033
GW170104	$31.0^{+7.2}_{-5.6}$	$20.1^{+4.9}_{-4.5}$	$2.2^{+0.5}_{-0.5}$	$49.1^{+5.2}_{-3.9}$	$0.66^{+0.08}_{-0.10}$	960^{+430}_{-410}	$0.19^{+0.07}_{-0.08}$	924
GW170608	$10.9^{+5.3}_{-1.7}$	$7.6^{+1.3}_{-2.1}$	$0.9^{+0.0}_{-0.1}$	$17.8^{+3.2}_{-0.7}$	$0.69^{+0.04}_{-0.04}$	320^{+120}_{-110}	$0.07^{+0.02}_{-0.02}$	396
GW170729	$50.6^{+16.6}_{-10.2}$	$34.3^{+9.1}_{-10.1}$	$4.8^{+1.7}_{-1.7}$	$80.3^{+14.6}_{-10.2}$	$0.81^{+0.07}_{-0.13}$	2750^{+1350}_{-1320}	$0.48^{+0.19}_{-0.20}$	1033
GW170809	$35.2^{+8.3}_{-6.0}$	$23.8^{+5.2}_{-5.1}$	$2.7^{+0.6}_{-0.6}$	$56.4^{+5.2}_{-3.7}$	$0.70^{+0.08}_{-0.09}$	990^{+320}_{-380}	$0.20^{+0.05}_{-0.07}$	340
GW170814	$30.7^{+5.7}_{-3.0}$	$25.3^{+2.9}_{-4.1}$	$2.7^{+0.4}_{-0.3}$	$53.4^{+3.2}_{-2.4}$	$0.72^{+0.07}_{-0.05}$	580^{+160}_{-210}	$0.12^{+0.03}_{-0.04}$	87
GW170817	$1.46^{+0.12}_{-0.10}$	$1.27^{+0.09}_{-0.09}$	$\gtrsim 0.04$	≤ 2.8	≤ 0.89	40^{+10}_{-10}	$0.01^{+0.00}_{-0.00}$	16
GW170818	$35.5^{+7.5}_{-4.7}$	$26.8^{+4.3}_{-5.2}$	$2.7^{+0.5}_{-0.5}$	$59.8^{+4.8}_{-3.8}$	$0.67^{+0.07}_{-0.08}$	1020^{+430}_{-360}	$0.20^{+0.07}_{-0.07}$	39
GW170823	$39.6^{+10.0}_{-6.6}$	$29.4^{+6.3}_{-7.1}$	$3.3^{+0.9}_{-0.8}$	$65.6^{+9.4}_{-6.6}$	$0.71^{+0.08}_{-0.10}$	1850^{+840}_{-840}	$0.34^{+0.13}_{-0.14}$	1651

GWTC-1: A Gravitational-Wave Transient Catalog of Compact Binary Mergers Observed by LIGO and Virgo during the First and Second Observing Runs, The LIGO-Virgo collab. [arXiv:1811.12907](https://arxiv.org/abs/1811.12907)

Note that: the final mass is always smaller than the sum of the two colliding bodies

1 parsec $\sim 3 \times 10^{13}$ km

Gravitational wave events detected by advanced interferometers

Table 15.1 Source parameters of the events detected in the observational runs O1 and O2, 2015-17.

Event height	m_1/M_\odot	m_2/M_\odot	$E_{rad}/(M_\odot)c^2$	M_F/M_\odot	J/M_F^2	D_L/Mpc	z	$\Delta\Omega/deg^2$
GW150914	$35.6^{+4.8}_{-3.0}$	$30.6^{+3.0}_{-4.4}$	$3.1^{+0.4}_{-0.4}$	$63.1^{+3.3}_{-3.0}$	$0.69^{+0.05}_{-0.04}$	430^{+150}_{-170}	$0.09^{+0.03}_{-0.03}$	179
GW151012	$23.3^{+14.0}_{-5.5}$	$13.6^{+4.1}_{-4.8}$	$1.5^{+0.5}_{-0.5}$	$35.7^{+9.9}_{-3.8}$	$0.67^{+0.13}_{-0.11}$	1060^{+540}_{-480}	$0.21^{+0.09}_{-0.09}$	1555
GW151226	$13.7^{+8.8}_{-3.2}$	$7.7^{+2.2}_{-2.6}$	$1.0^{+0.1}_{-0.2}$	$20.5^{+6.4}_{-1.5}$	$0.74^{+0.07}_{-0.05}$	440^{+180}_{-190}	$0.09^{+0.04}_{-0.04}$	1033
GW170104	$31.0^{+7.2}_{-5.6}$	$20.1^{+4.9}_{-4.5}$	$2.2^{+0.5}_{-0.5}$	$49.1^{+5.2}_{-3.9}$	$0.66^{+0.08}_{-0.10}$	960^{+430}_{-410}	$0.19^{+0.07}_{-0.08}$	924
GW170608	$10.9^{+5.3}_{-1.7}$	$7.6^{+1.3}_{-2.1}$	$0.9^{+0.0}_{-0.1}$	$17.8^{+3.2}_{-0.7}$	$0.69^{+0.04}_{-0.04}$	320^{+120}_{-110}	$0.07^{+0.02}_{-0.02}$	396
GW170729	$50.6^{+16.6}_{-10.2}$	$34.3^{+9.1}_{-10.1}$	$4.8^{+1.7}_{-1.7}$	$80.3^{+14.6}_{-10.2}$	$0.81^{+0.07}_{-0.13}$	2750^{+1350}_{-1320}	$0.48^{+0.19}_{-0.20}$	1033
GW170809	$35.2^{+8.3}_{-6.0}$	$23.8^{+5.2}_{-5.1}$	$2.7^{+0.6}_{-0.6}$	$56.4^{+5.2}_{-3.7}$	$0.70^{+0.08}_{-0.09}$	990^{+320}_{-380}	$0.20^{+0.05}_{-0.07}$	340
GW170814	$30.7^{+5.7}_{-3.0}$	$25.3^{+2.9}_{-4.1}$	$2.7^{+0.4}_{-0.3}$	$53.4^{+3.2}_{-2.4}$	$0.72^{+0.07}_{-0.05}$	580^{+160}_{-210}	$0.12^{+0.03}_{-0.04}$	87
coalescing neutron stars	$1.46^{+0.12}_{-0.10}$	$1.27^{+0.09}_{-0.09}$	$\gtrsim 0.04$	≤ 2.8	≤ 0.89	40^{+10}_{-10}	$0.01^{+0.00}_{-0.00}$	16
GW170818	$35.5^{+7.5}_{-4.7}$	$26.8^{+4.3}_{-5.2}$	$2.7^{+0.5}_{-0.5}$	$59.8^{+4.8}_{-3.8}$	$0.67^{+0.07}_{-0.08}$	1020^{+430}_{-360}	$0.20^{+0.07}_{-0.07}$	39
GW170823	$39.6^{+10.0}_{-6.6}$	$29.4^{+6.3}_{-7.1}$	$3.3^{+0.9}_{-0.8}$	$65.6^{+9.4}_{-6.6}$	$0.71^{+0.08}_{-0.10}$	1850^{+840}_{-840}	$0.34^{+0.13}_{-0.14}$	1651

GWTC-1: A Gravitational-Wave Transient Catalog of Compact Binary Mergers Observed by LIGO and Virgo during the First and Second Observing Runs, The LIGO-Virgo collab. [arXiv:1811.12907](https://arxiv.org/abs/1811.12907)

Note that: the final mass is always smaller than the sum of the two colliding bodies

1 parsec $\sim 3 \times 10^{13}$ km

Gravitational wave events detected by advanced interferometers

Table 15.1 Source parameters of the events detected in the observational runs O1 and O2, 2015-17.

Event height	m_1/M_\odot	m_2/M_\odot	$E_{rad}/(M_\odot)c^2$	M_F/M_\odot	J/M_F^2	D_L/Mpc	z	$\Delta\Omega/deg^2$	
GW150914	$35.6^{+4.8}_{-3.0}$	$30.6^{+3.0}_{-4.4}$	$3.1^{+0.4}_{-0.4}$	$63.1^{+3.3}_{-3.0}$	$0.69^{+0.05}_{-0.04}$	430^{+150}_{-170}	$0.09^{+0.03}_{-0.03}$	179	
GW151012	$23.3^{+14.0}_{-5.5}$	$13.6^{+4.1}_{-4.8}$	$1.5^{+0.5}_{-0.5}$	$35.7^{+9.9}_{-3.8}$	$0.67^{+0.13}_{-0.11}$	1060^{+540}_{-480}	$0.21^{+0.09}_{-0.09}$	1555	
GW151226	$13.7^{+8.8}_{-3.2}$	$7.7^{+2.2}_{-2.6}$	$1.0^{+0.1}_{-0.2}$	$20.5^{+6.4}_{-1.5}$	$0.74^{+0.07}_{-0.05}$	440^{+180}_{-190}	$0.09^{+0.04}_{-0.04}$	1033	
GW170104	$31.0^{+7.2}_{-5.6}$	$20.1^{+4.9}_{-4.5}$	$2.2^{+0.5}_{-0.5}$	$49.1^{+5.2}_{-3.9}$	$0.66^{+0.08}_{-0.10}$	960^{+430}_{-410}	$0.19^{+0.07}_{-0.08}$	924	
GW170608	$10.9^{+5.3}_{-1.7}$	$7.6^{+1.3}_{-2.1}$	$0.9^{+0.0}_{-0.1}$	$17.8^{+3.2}_{-0.7}$	$0.69^{+0.04}_{-0.04}$	320^{+120}_{-110}	$0.07^{+0.02}_{-0.02}$	396	
GW170729	$50.6^{+16.6}_{-10.2}$	$34.3^{+9.1}_{-10.1}$	$4.8^{+1.7}_{-1.7}$	$80.3^{+14.6}_{-10.2}$	$0.81^{+0.07}_{-0.13}$	2750^{+1350}_{-1320}	$0.48^{+0.19}_{-0.20}$	1033	
GW170809	$35.2^{+8.3}_{-6.0}$	$23.8^{+5.2}_{-5.1}$	$2.7^{+0.6}_{-0.6}$	$56.4^{+5.2}_{-3.7}$	$0.70^{+0.08}_{-0.09}$	990^{+320}_{-380}	$0.20^{+0.05}_{-0.07}$	340	
GW170814	$30.7^{+5.7}_{-3.0}$	$25.3^{+2.9}_{-4.1}$	$2.7^{+0.4}_{-0.3}$	$53.4^{+3.2}_{-2.4}$	$0.72^{+0.07}_{-0.05}$	580^{+160}_{-210}	$0.12^{+0.03}_{-0.04}$	87	
coalescing neutron stars	GW170817	$1.46^{+0.12}_{-0.10}$	$1.27^{+0.09}_{-0.09}$	$\gtrsim 0.04$	≤ 2.8	≤ 0.89	40^{+10}_{-10}	$0.01^{+0.00}_{-0.00}$	16
GW170818	$35.5^{+7.5}_{-4.7}$	$26.8^{+4.3}_{-5.2}$	$2.7^{+0.5}_{-0.5}$	$59.8^{+4.8}_{-3.8}$	$0.67^{+0.07}_{-0.08}$	1020^{+430}_{-360}	$0.20^{+0.07}_{-0.07}$	39	
GW170823	$39.6^{+10.0}_{-6.6}$	$29.4^{+6.3}_{-7.1}$	$3.3^{+0.9}_{-0.8}$	$65.6^{+9.4}_{-6.6}$	$0.71^{+0.08}_{-0.10}$	1850^{+840}_{-840}	$0.34^{+0.13}_{-0.14}$	1651	

GWTC-1: A Gravitational-Wave Transient Catalog of Compact Binary Mergers Observed by LIGO and Virgo during the First and Second Observing Runs, The LIGO-Virgo collab. [arXiv:1811.12907](https://arxiv.org/abs/1811.12907)

Note that: the final mass is always smaller than the sum of the two colliding bodies

1 parsec $\sim 3 \times 10^{13}$ km

Gravitational wave events detected by advanced interferometers

Table 15.1 Source parameters of the events detected in the observational runs O1 and O2, 2015-17.

Event height	m_1/M_\odot	m_2/M_\odot	$E_{rad}/(M_\odot)c^2$	M_F/M_\odot	J/M_F^2	D_L/Mpc	z	$\Delta\Omega/deg^2$
GW150914	$35.6^{+4.8}_{-3.0}$	$30.6^{+3.0}_{-4.4}$	$3.1^{+0.4}_{-0.4}$	$63.1^{+3.3}_{-3.0}$	$0.69^{+0.05}_{-0.04}$	430^{+150}_{-170}	$0.09^{+0.03}_{-0.03}$	179
GW151012	$23.3^{+14.0}_{-5.5}$	$13.6^{+4.1}_{-4.8}$	$1.5^{+0.5}_{-0.5}$	$35.7^{+9.9}_{-3.8}$	$0.67^{+0.13}_{-0.11}$	1060^{+540}_{-480}	$0.21^{+0.09}_{-0.09}$	1555
GW151226	$13.7^{+8.8}_{-3.2}$	$7.7^{+2.2}_{-2.6}$	$1.0^{+0.1}_{-0.2}$	$20.5^{+6.4}_{-1.5}$	$0.74^{+0.07}_{-0.05}$	440^{+180}_{-190}	$0.09^{+0.04}_{-0.04}$	1033
GW170104	$31.0^{+7.2}_{-5.6}$	$20.1^{+4.9}_{-4.5}$	$2.2^{+0.5}_{-0.5}$	$49.1^{+5.2}_{-3.9}$	$0.66^{+0.08}_{-0.10}$	960^{+430}_{-410}	$0.19^{+0.07}_{-0.08}$	924
GW170608	$10.9^{+5.3}_{-1.7}$	$7.6^{+1.3}_{-2.1}$	$0.9^{+0.0}_{-0.1}$	$17.8^{+3.2}_{-0.7}$	$0.69^{+0.04}_{-0.04}$	320^{+120}_{-110}	$0.07^{+0.02}_{-0.02}$	396
GW170729	$50.6^{+16.6}_{-10.2}$	$34.3^{+9.1}_{-10.1}$	$4.8^{+1.7}_{-1.7}$	$80.3^{+14.6}_{-10.2}$	$0.81^{+0.07}_{-0.13}$	2750^{+1350}_{-1320}	$0.48^{+0.19}_{-0.20}$	1033
GW170809	$35.2^{+8.3}_{-6.0}$	$23.8^{+5.2}_{-5.1}$	$2.7^{+0.6}_{-0.6}$	$56.4^{+5.2}_{-3.7}$	$0.70^{+0.08}_{-0.09}$	990^{+320}_{-380}	$0.20^{+0.05}_{-0.07}$	340
GW170814	$30.7^{+5.7}_{-3.0}$	$25.3^{+2.9}_{-4.1}$	$2.7^{+0.4}_{-0.3}$	$53.4^{+3.2}_{-2.4}$	$0.72^{+0.07}_{-0.05}$	580^{+160}_{-210}	$0.12^{+0.03}_{-0.04}$	87
GW170817	$1.46^{+0.12}_{-0.10}$	$1.27^{+0.09}_{-0.09}$	$\gtrsim 0.04$	≤ 2.8	≤ 0.89	40^{+10}_{-10}	$0.01^{+0.00}_{-0.00}$	16
GW170818	$35.5^{+7.5}_{-4.7}$	$26.8^{+4.3}_{-5.2}$	$2.7^{+0.5}_{-0.5}$	$59.8^{+4.8}_{-3.8}$	$0.67^{+0.07}_{-0.08}$	1020^{+430}_{-360}	$0.20^{+0.07}_{-0.07}$	39
GW170823	$39.6^{+10.0}_{-6.6}$	$29.4^{+6.3}_{-7.1}$	$3.3^{+0.9}_{-0.8}$	$65.6^{+9.4}_{-6.6}$	$0.71^{+0.08}_{-0.10}$	1850^{+840}_{-840}	$0.34^{+0.13}_{-0.14}$	1651

much larger than those observed in low mass X-ray binaries

coalescing neutron stars

GWTC-1: A Gravitational-Wave Transient Catalog of Compact Binary Mergers Observed by LIGO and Virgo during the First and Second Observing Runs, The LIGO-Virgo collab. [arXiv:1811.12907](https://arxiv.org/abs/1811.12907)

Note that: the final mass is always smaller than the sum of the two colliding bodies

1 parsec $\sim 3 \times 10^{13}$ km

More events detected by advanced interferometers

Table 15.1 Source parameters of the events detected in the observational runs O1 and O2, 2015-17.

Event height	m_1/M_\odot	m_2/M_\odot	$E_{rad}/(M_\odot)c^2$	M_F/M_\odot	J/M_F^2	D_L/Mpc	z	$\Delta\Omega/deg^2$
GW150914	$35.6^{+4.8}_{-3.0}$	$30.6^{+3.0}_{-4.4}$	$3.1^{+0.4}_{-0.4}$	$63.1^{+3.3}_{-3.0}$	$0.69^{+0.05}_{-0.04}$	430^{+150}_{-170}	$0.09^{+0.03}_{-0.03}$	179
GW151012	$23.3^{+14.0}_{-5.5}$	$13.6^{+4.1}_{-4.8}$	$1.5^{+0.5}_{-0.5}$	$35.7^{+9.9}_{-3.8}$	$0.67^{+0.13}_{-0.11}$	1060^{+540}_{-480}	$0.21^{+0.09}_{-0.09}$	1555
GW151226	$13.7^{+8.8}_{-3.2}$	$7.7^{+2.2}_{-2.6}$	$1.0^{+0.1}_{-0.2}$	$20.5^{+6.4}_{-1.5}$	$0.74^{+0.07}_{-0.05}$	440^{+180}_{-190}	$0.09^{+0.04}_{-0.04}$	1033
GW170104	$31.0^{+7.2}_{-5.6}$	$20.1^{+4.9}_{-4.5}$	$2.2^{+0.5}_{-0.5}$	$49.1^{+5.2}_{-3.9}$	$0.66^{+0.08}_{-0.10}$	960^{+430}_{-410}	$0.19^{+0.07}_{-0.08}$	924
GW170608	$10.9^{+5.3}_{-1.7}$	$7.6^{+1.3}_{-2.1}$	$0.9^{+0.0}_{-0.1}$	$17.8^{+3.2}_{-0.7}$	$0.69^{+0.04}_{-0.04}$	320^{+120}_{-110}	$0.07^{+0.02}_{-0.02}$	396
GW170729	$50.6^{+16.6}_{-10.2}$	$34.3^{+9.1}_{-10.1}$	$4.8^{+1.7}_{-1.7}$	$80.3^{+14.6}_{-10.2}$	$0.81^{+0.07}_{-0.13}$	2750^{+1350}_{-1320}	$0.48^{+0.19}_{-0.20}$	1033
GW170809	$35.2^{+8.3}_{-6.0}$	$23.8^{+5.2}_{-5.1}$	$2.7^{+0.6}_{-0.6}$	$56.4^{+5.2}_{-3.7}$	$0.70^{+0.08}_{-0.09}$	990^{+320}_{-380}	$0.20^{+0.05}_{-0.07}$	340
GW170814	$30.7^{+5.7}_{-3.0}$	$25.3^{+2.9}_{-4.1}$	$2.7^{+0.4}_{-0.3}$	$53.4^{+3.2}_{-2.4}$	$0.72^{+0.07}_{-0.05}$	580^{+160}_{-210}	$0.12^{+0.03}_{-0.04}$	87
GW170817	$1.46^{+0.12}_{-0.10}$	$1.27^{+0.09}_{-0.09}$	$\gtrsim 0.04$	≤ 2.8	≤ 0.89	40^{+10}_{-10}	$0.01^{+0.00}_{-0.00}$	16
GW170818	$35.5^{+7.5}_{-4.7}$	$26.8^{+4.3}_{-5.2}$	$2.7^{+0.5}_{-0.5}$	$59.8^{+4.8}_{-3.8}$	$0.67^{+0.07}_{-0.08}$	1020^{+430}_{-360}	$0.20^{+0.07}_{-0.07}$	39
GW170823	$39.6^{+10.0}_{-6.6}$	$29.4^{+6.3}_{-7.1}$	$3.3^{+0.9}_{-0.8}$	$65.6^{+9.4}_{-6.6}$	$0.71^{+0.08}_{-0.10}$	1850^{+840}_{-840}	$0.34^{+0.13}_{-0.14}$	1651

J/M_F^2 is the angular momentum, normalised to M_F^2 , in geometric units

$$0 \leq J/M_F^2 \leq 1$$

More events detected by advanced interferometers

Table 15.1 Source parameters of the events detected in the observational runs O1 and O2, 2015-17.

Event height	m_1/M_\odot	m_2/M_\odot	$E_{rad}/(M_\odot)c^2$	M_F/M_\odot	J/M_F^2	D_L/Mpc	z	$\Delta\Omega/deg^2$
GW150914	$35.6^{+4.8}_{-3.0}$	$30.6^{+3.0}_{-4.4}$	$3.1^{+0.4}_{-0.4}$	$63.1^{+3.3}_{-3.0}$	$0.69^{+0.05}_{-0.04}$	430^{+150}_{-170}	$0.09^{+0.03}_{-0.03}$	179
GW151012	$23.3^{+14.0}_{-5.5}$	$13.6^{+4.1}_{-4.8}$	$1.5^{+0.5}_{-0.5}$	$35.7^{+9.9}_{-3.8}$	$0.67^{+0.13}_{-0.11}$	1060^{+540}_{-480}	$0.21^{+0.09}_{-0.09}$	1555
GW151226	$13.7^{+8.8}_{-3.2}$	$7.7^{+2.2}_{-2.6}$	$1.0^{+0.1}_{-0.2}$	$20.5^{+6.4}_{-1.5}$	$0.74^{+0.07}_{-0.05}$	440^{+180}_{-190}	$0.09^{+0.04}_{-0.04}$	1033
GW170104	$31.0^{+7.2}_{-5.6}$	$20.1^{+4.9}_{-4.5}$	$2.2^{+0.5}_{-0.5}$	$49.1^{+5.2}_{-3.9}$	$0.66^{+0.08}_{-0.10}$	960^{+430}_{-410}	$0.19^{+0.07}_{-0.08}$	924
GW170608	$10.9^{+5.3}_{-1.7}$	$7.6^{+1.3}_{-2.1}$	$0.9^{+0.0}_{-0.1}$	$17.8^{+3.2}_{-0.7}$	$0.69^{+0.04}_{-0.04}$	320^{+120}_{-110}	$0.07^{+0.02}_{-0.02}$	396
GW170729	$50.6^{+16.6}_{-10.2}$	$34.3^{+9.1}_{-10.1}$	$4.8^{+1.7}_{-1.7}$	$80.3^{+14.6}_{-10.2}$	$0.81^{+0.07}_{-0.13}$	2750^{+1350}_{-1320}	$0.48^{+0.19}_{-0.20}$	1033
GW170809	$35.2^{+8.3}_{-6.0}$	$23.8^{+5.2}_{-5.1}$	$2.7^{+0.6}_{-0.6}$	$56.4^{+5.2}_{-3.7}$	$0.70^{+0.08}_{-0.09}$	990^{+320}_{-380}	$0.20^{+0.05}_{-0.07}$	340
GW170814	$30.7^{+5.7}_{-3.0}$	$25.3^{+2.9}_{-4.1}$	$2.7^{+0.4}_{-0.3}$	$53.4^{+3.2}_{-2.4}$	$0.72^{+0.07}_{-0.05}$	580^{+160}_{-210}	$0.12^{+0.03}_{-0.04}$	87
GW170817	$1.46^{+0.12}_{-0.10}$	$1.27^{+0.09}_{-0.09}$	$\gtrsim 0.04$	≤ 2.8	≤ 0.89	40^{+10}_{-10}	$0.01^{+0.00}_{-0.00}$	16
GW170818	$35.5^{+7.5}_{-4.7}$	$26.8^{+4.3}_{-5.2}$	$2.7^{+0.5}_{-0.5}$	$59.8^{+4.8}_{-3.8}$	$0.67^{+0.07}_{-0.08}$	1020^{+430}_{-360}	$0.20^{+0.07}_{-0.07}$	39
GW170823	$39.6^{+10.0}_{-6.6}$	$29.4^{+6.3}_{-7.1}$	$3.3^{+0.9}_{-0.8}$	$65.6^{+9.4}_{-6.6}$	$0.71^{+0.08}_{-0.10}$	1850^{+840}_{-840}	$0.34^{+0.13}_{-0.14}$	1651

$$z = \frac{\lambda_{obs} - \lambda_{em}}{\lambda_{em}} \quad \rightarrow \quad \omega_{obs} = \frac{\omega_{em}}{1 + z}$$

redshift due to the expansion of the universe

More events detected by advanced interferometers

Table 15.1 Source parameters of the events detected in the observational runs O1 and O2, 2015-17.

Event height	m_1/M_\odot	m_2/M_\odot	$E_{rad}/(M_\odot)c^2$	M_F/M_\odot	J/M_F^2	D_L/Mpc	z	$\Delta\Omega/deg^2$
GW150914	$35.6_{-3.0}^{+4.8}$	$30.6_{-4.4}^{+3.0}$	$3.1_{-0.4}^{+0.4}$	$63.1_{-3.0}^{+3.3}$	$0.69_{-0.04}^{+0.05}$	430_{-170}^{+150}	$0.09_{-0.03}^{+0.03}$	179
GW151012	$23.3_{-5.5}^{+14.0}$	$13.6_{-4.8}^{+4.1}$	$1.5_{-0.5}^{+0.5}$	$35.7_{-3.8}^{+9.9}$	$0.67_{-0.11}^{+0.13}$	1060_{-480}^{+540}	$0.21_{-0.09}^{+0.09}$	1555
GW151226	$13.7_{-3.2}^{+8.8}$	$7.7_{-2.6}^{+2.2}$	$1.0_{-0.2}^{+0.1}$	$20.5_{-1.5}^{+6.4}$	$0.74_{-0.05}^{+0.07}$	440_{-190}^{+180}	$0.09_{-0.04}^{+0.04}$	1033
GW170104	$31.0_{-5.6}^{+7.2}$	$20.1_{-4.5}^{+4.9}$	$2.2_{-0.5}^{+0.5}$	$49.1_{-3.9}^{+5.2}$	$0.66_{-0.10}^{+0.08}$	960_{-410}^{+430}	$0.19_{-0.08}^{+0.07}$	924
GW170608	$10.9_{-1.7}^{+5.3}$	$7.6_{-2.1}^{+1.3}$	$0.9_{-0.1}^{+0.0}$	$17.8_{-0.7}^{+3.2}$	$0.69_{-0.04}^{+0.04}$	320_{-110}^{+120}	$0.07_{-0.02}^{+0.02}$	396
GW170729	$50.6_{-10.2}^{+16.6}$	$34.3_{-10.1}^{+9.1}$	$4.8_{-1.7}^{+1.7}$	$80.3_{-10.2}^{+14.6}$	$0.81_{-0.13}^{+0.07}$	2750_{-1320}^{+1350}	$0.48_{-0.20}^{+0.19}$	1033
GW170809	$35.2_{-6.0}^{+8.3}$	$23.8_{-5.1}^{+5.2}$	$2.7_{-0.6}^{+0.6}$	$56.4_{-3.7}^{+5.2}$	$0.70_{-0.09}^{+0.08}$	990_{-380}^{+320}	$0.20_{-0.07}^{+0.05}$	340
GW170814	$30.7_{-3.0}^{+5.7}$	$25.3_{-4.1}^{+2.9}$	$2.7_{-0.3}^{+0.4}$	$53.4_{-2.4}^{+3.2}$	$0.72_{-0.05}^{+0.07}$	580_{-210}^{+160}	$0.12_{-0.04}^{+0.03}$	87
coalescing neutron stars GW170817	$1.46_{-0.10}^{+0.12}$	$1.27_{-0.09}^{+0.09}$	$\gtrsim 0.04$	≤ 2.8	≤ 0.89	40_{-10}^{+10}	$0.01_{-0.00}^{+0.00}$	16
GW170818	$35.5_{-4.7}^{+7.5}$	$26.8_{-5.2}^{+4.3}$	$2.7_{-0.5}^{+0.5}$	$59.8_{-3.8}^{+4.8}$	$0.67_{-0.08}^{+0.07}$	1020_{-360}^{+430}	$0.20_{-0.07}^{+0.07}$	39
GW170823	$39.6_{-6.6}^{+10.0}$	$29.4_{-7.1}^{+6.3}$	$3.3_{-0.8}^{+0.9}$	$65.6_{-6.6}^{+9.4}$	$0.71_{-0.10}^{+0.08}$	1850_{-840}^{+840}	$0.34_{-0.14}^{+0.13}$	1651

$$z = \frac{\lambda_{obs} - \lambda_{em}}{\lambda_{em}} \quad \rightarrow \quad \omega_{obs} = \frac{\omega_{em}}{1 + z}$$

redshift due to the expansion of the universe

More events detected by advanced interferometers

Table 15.1 Source parameters of the events detected in the observational runs O1 and O2, 2015-17.

Event height	m_1/M_\odot	m_2/M_\odot	$E_{rad}/(M_\odot)c^2$	M_F/M_\odot	J/M_F^2	D_L/Mpc	z	$\Delta\Omega/deg^2$	
GW150914	$35.6^{+4.8}_{-3.0}$	$30.6^{+3.0}_{-4.4}$	$3.1^{+0.4}_{-0.4}$	$63.1^{+3.3}_{-3.0}$	$0.69^{+0.05}_{-0.04}$	430^{+150}_{-170}	$0.09^{+0.03}_{-0.03}$	179	
GW151012	$23.3^{+14.0}_{-5.5}$	$13.6^{+4.1}_{-4.8}$	$1.5^{+0.5}_{-0.5}$	$35.7^{+9.9}_{-3.8}$	$0.67^{+0.13}_{-0.11}$	1060^{+540}_{-480}	$0.21^{+0.09}_{-0.09}$	1555	
GW151226	$13.7^{+8.8}_{-3.2}$	$7.7^{+2.2}_{-2.6}$	$1.0^{+0.1}_{-0.2}$	$20.5^{+6.4}_{-1.5}$	$0.74^{+0.07}_{-0.05}$	440^{+180}_{-190}	$0.09^{+0.04}_{-0.04}$	1033	
GW170104	$31.0^{+7.2}_{-5.6}$	$20.1^{+4.9}_{-4.5}$	$2.2^{+0.5}_{-0.5}$	$49.1^{+5.2}_{-3.9}$	$0.66^{+0.08}_{-0.10}$	960^{+430}_{-410}	$0.19^{+0.07}_{-0.08}$	924	
GW170608	$10.9^{+5.3}_{-1.7}$	$7.6^{+1.3}_{-2.1}$	$0.9^{+0.0}_{-0.1}$	$17.8^{+3.2}_{-0.7}$	$0.69^{+0.04}_{-0.04}$	320^{+120}_{-110}	$0.07^{+0.02}_{-0.02}$	396	
farthest source	GW170729	$50.6^{+16.6}_{-10.2}$	$34.3^{+9.1}_{-10.1}$	$4.8^{+1.7}_{-1.7}$	$80.3^{+14.6}_{-10.2}$	$0.81^{+0.07}_{-0.13}$	2750^{+1350}_{-1320}	$0.48^{+0.19}_{-0.20}$	1033
	GW170809	$35.2^{+8.3}_{-6.0}$	$23.8^{+5.2}_{-5.1}$	$2.7^{+0.6}_{-0.6}$	$56.4^{+5.2}_{-3.7}$	$0.70^{+0.08}_{-0.09}$	990^{+320}_{-380}	$0.20^{+0.05}_{-0.07}$	340
	GW170814	$30.7^{+5.7}_{-3.0}$	$25.3^{+2.9}_{-4.1}$	$2.7^{+0.4}_{-0.3}$	$53.4^{+3.2}_{-2.4}$	$0.72^{+0.07}_{-0.05}$	580^{+160}_{-210}	$0.12^{+0.03}_{-0.04}$	87
coalescing neutron stars	GW170817	$1.46^{+0.12}_{-0.10}$	$1.27^{+0.09}_{-0.09}$	$\gtrsim 0.04$	≤ 2.8	≤ 0.89	40^{+10}_{-10}	$0.01^{+0.00}_{-0.00}$	16
	GW170818	$35.5^{+7.5}_{-4.7}$	$26.8^{+4.3}_{-5.2}$	$2.7^{+0.5}_{-0.5}$	$59.8^{+4.8}_{-3.8}$	$0.67^{+0.07}_{-0.08}$	1020^{+430}_{-360}	$0.20^{+0.07}_{-0.07}$	39
	GW170823	$39.6^{+10.0}_{-6.6}$	$29.4^{+6.3}_{-7.1}$	$3.3^{+0.9}_{-0.8}$	$65.6^{+9.4}_{-6.6}$	$0.71^{+0.08}_{-0.10}$	1850^{+840}_{-840}	$0.34^{+0.13}_{-0.14}$	1651

$$z = \frac{\lambda_{obs} - \lambda_{em}}{\lambda_{em}} \quad \rightarrow \quad \omega_{obs} = \frac{\omega_{em}}{1 + z}$$

redshift due to the expansion of the universe

More events detected by advanced interferometers

Table 15.1 Source parameters of the events detected in the observational runs O1 and O2, 2015-17.

Event height	m_1/M_\odot	m_2/M_\odot	$E_{rad}/(M_\odot)c^2$	M_F/M_\odot	J/M_F^2	D_L/Mpc	z	$\Delta\Omega/deg^2$
GW150914	$35.6_{-3.0}^{+4.8}$	$30.6_{-4.4}^{+3.0}$	$3.1_{-0.4}^{+0.4}$	$63.1_{-3.0}^{+3.3}$	$0.69_{-0.04}^{+0.05}$	430_{-170}^{+150}	$0.09_{-0.03}^{+0.03}$	179
GW151012	$23.3_{-5.5}^{+14.0}$	$13.6_{-4.8}^{+4.1}$	$1.5_{-0.5}^{+0.5}$	$35.7_{-3.8}^{+9.9}$	$0.67_{-0.11}^{+0.13}$	1060_{-480}^{+540}	$0.21_{-0.09}^{+0.09}$	1555
GW151226	$13.7_{-3.2}^{+8.8}$	$7.7_{-2.6}^{+2.2}$	$1.0_{-0.2}^{+0.1}$	$20.5_{-1.5}^{+6.4}$	$0.74_{-0.05}^{+0.07}$	440_{-190}^{+180}	$0.09_{-0.04}^{+0.04}$	1033
GW170104	$31.0_{-5.6}^{+7.2}$	$20.1_{-4.5}^{+4.9}$	$2.2_{-0.5}^{+0.5}$	$49.1_{-3.9}^{+5.2}$	$0.66_{-0.10}^{+0.08}$	960_{-410}^{+430}	$0.19_{-0.08}^{+0.07}$	924
GW170608	$10.9_{-1.7}^{+5.3}$	$7.6_{-2.1}^{+1.3}$	$0.9_{-0.1}^{+0.0}$	$17.8_{-0.7}^{+3.2}$	$0.69_{-0.04}^{+0.04}$	320_{-110}^{+120}	$0.07_{-0.02}^{+0.02}$	396
GW170729	$50.6_{-10.2}^{+16.6}$	$34.3_{-10.1}^{+9.1}$	$4.8_{-1.7}^{+1.7}$	$80.3_{-10.2}^{+14.6}$	$0.81_{-0.13}^{+0.07}$	2750_{-1320}^{+1350}	$0.48_{-0.20}^{+0.19}$	1033
GW170809	$35.2_{-6.0}^{+8.3}$	$23.8_{-5.1}^{+5.2}$	$2.7_{-0.6}^{+0.6}$	$56.4_{-3.7}^{+5.2}$	$0.70_{-0.09}^{+0.08}$	990_{-380}^{+320}	$0.20_{-0.07}^{+0.05}$	340
GW170814	$30.7_{-3.0}^{+5.7}$	$25.3_{-4.1}^{+2.9}$	$2.7_{-0.3}^{+0.4}$	$53.4_{-2.4}^{+3.2}$	$0.72_{-0.05}^{+0.07}$	580_{-210}^{+160}	$0.12_{-0.04}^{+0.03}$	87
GW170817	$1.46_{-0.10}^{+0.12}$	$1.27_{-0.09}^{+0.09}$	$\gtrsim 0.04$	≤ 2.8	≤ 0.89	40_{-10}^{+10}	$0.01_{-0.00}^{+0.00}$	16
GW170818	$35.5_{-4.7}^{+7.5}$	$26.8_{-5.2}^{+4.3}$	$2.7_{-0.5}^{+0.5}$	$59.8_{-3.8}^{+4.8}$	$0.67_{-0.08}^{+0.07}$	1020_{-360}^{+430}	$0.20_{-0.07}^{+0.07}$	39
GW170823	$39.6_{-6.6}^{+10.0}$	$29.4_{-7.1}^{+6.3}$	$3.3_{-0.8}^{+0.9}$	$65.6_{-6.6}^{+9.4}$	$0.71_{-0.10}^{+0.08}$	1850_{-840}^{+840}	$0.34_{-0.14}^{+0.13}$	1651

$\Delta\Omega/deg^2$ is the sky localization area

More events detected by advanced interferometers

Table 15.1 Source parameters of the events detected in the observational runs O1 and O2, 2015-17.

Event height	m_1/M_\odot	m_2/M_\odot	$E_{rad}/(M_\odot)c^2$	M_F/M_\odot	J/M_F^2	D_L/Mpc	z	$\Delta\Omega/deg^2$
GW150914	$35.6_{-3.0}^{+4.8}$	$30.6_{-4.4}^{+3.0}$	$3.1_{-0.4}^{+0.4}$	$63.1_{-3.0}^{+3.3}$	$0.69_{-0.04}^{+0.05}$	430_{-170}^{+150}	$0.09_{-0.03}^{+0.03}$	179
GW151012	$23.3_{-5.5}^{+14.0}$	$13.6_{-4.8}^{+4.1}$	$1.5_{-0.5}^{+0.5}$	$35.7_{-3.8}^{+9.9}$	$0.67_{-0.11}^{+0.13}$	1060_{-480}^{+540}	$0.21_{-0.09}^{+0.09}$	1555
GW151226	$13.7_{-3.2}^{+8.8}$	$7.7_{-2.6}^{+2.2}$	$1.0_{-0.2}^{+0.1}$	$20.5_{-1.5}^{+6.4}$	$0.74_{-0.05}^{+0.07}$	440_{-190}^{+180}	$0.09_{-0.04}^{+0.04}$	1033
GW170104	$31.0_{-5.6}^{+7.2}$	$20.1_{-4.5}^{+4.9}$	$2.2_{-0.5}^{+0.5}$	$49.1_{-3.9}^{+5.2}$	$0.66_{-0.10}^{+0.08}$	960_{-410}^{+430}	$0.19_{-0.08}^{+0.07}$	924
GW170608	$10.9_{-1.7}^{+5.3}$	$7.6_{-2.1}^{+1.3}$	$0.9_{-0.1}^{+0.0}$	$17.8_{-0.7}^{+3.2}$	$0.69_{-0.04}^{+0.04}$	320_{-110}^{+120}	$0.07_{-0.02}^{+0.02}$	396
GW170729	$50.6_{-10.2}^{+16.6}$	$34.3_{-10.1}^{+9.1}$	$4.8_{-1.7}^{+1.7}$	$80.3_{-10.2}^{+14.6}$	$0.81_{-0.13}^{+0.07}$	2750_{-1320}^{+1350}	$0.48_{-0.20}^{+0.19}$	1033
GW170809	$35.2_{-6.0}^{+8.3}$	$23.8_{-5.1}^{+5.2}$	$2.7_{-0.6}^{+0.6}$	$56.4_{-3.7}^{+5.2}$	$0.70_{-0.09}^{+0.08}$	990_{-380}^{+320}	$0.20_{-0.07}^{+0.05}$	340
GW170814	$30.7_{-3.0}^{+5.7}$	$25.3_{-4.1}^{+2.9}$	$2.7_{-0.3}^{+0.4}$	$53.4_{-2.4}^{+3.2}$	$0.72_{-0.05}^{+0.07}$	580_{-210}^{+160}	$0.12_{-0.04}^{+0.03}$	87
GW170817	$1.46_{-0.10}^{+0.12}$	$1.27_{-0.09}^{+0.09}$	$\gtrsim 0.04$	≤ 2.8	≤ 0.89	40_{-10}^{+10}	$0.01_{-0.00}^{+0.00}$	16
GW170818	$35.5_{-4.7}^{+7.5}$	$26.8_{-5.2}^{+4.3}$	$2.7_{-0.5}^{+0.5}$	$59.8_{-3.8}^{+4.8}$	$0.67_{-0.08}^{+0.07}$	1020_{-360}^{+430}	$0.20_{-0.07}^{+0.07}$	39
GW170823	$39.6_{-6.6}^{+10.0}$	$29.4_{-7.1}^{+6.3}$	$3.3_{-0.8}^{+0.9}$	$65.6_{-6.6}^{+9.4}$	$0.71_{-0.10}^{+0.08}$	1850_{-840}^{+840}	$0.34_{-0.14}^{+0.13}$	1651

$\Delta\Omega/deg^2$ is the sky localization area

localised with higher precision with LIGO and Virgo

More events detected by advanced interferometers

Table 15.1 Source parameters of the events detected in the observational runs O1 and O2, 2015-17.

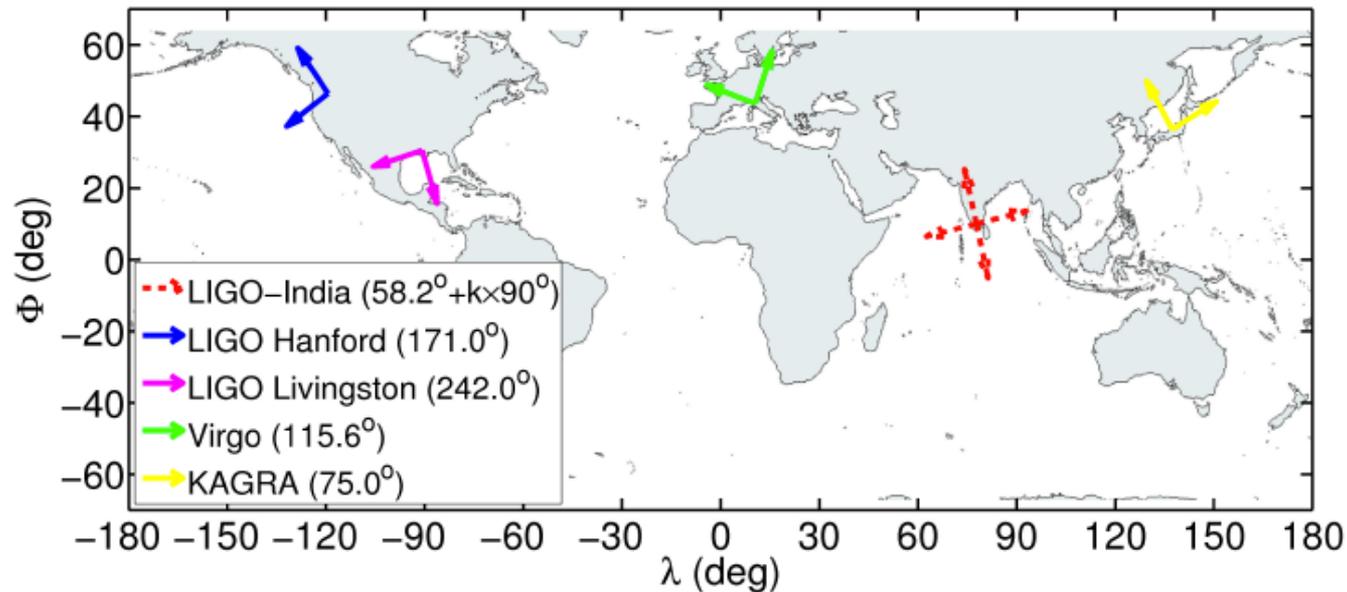
Event height	m_1/M_\odot	m_2/M_\odot	$E_{rad}/(M_\odot)c^2$	M_F/M_\odot	J/M_F^2	D_L/Mpc	z	$\Delta\Omega/deg^2$
GW150914	$35.6_{-3.0}^{+4.8}$	$30.6_{-4.4}^{+3.0}$	$3.1_{-0.4}^{+0.4}$	$63.1_{-3.0}^{+3.3}$	$0.69_{-0.04}^{+0.05}$	430_{-170}^{+150}	$0.09_{-0.03}^{+0.03}$	179
GW151012	$23.3_{-5.5}^{+14.0}$	$13.6_{-4.8}^{+4.1}$	$1.5_{-0.5}^{+0.5}$	$35.7_{-3.8}^{+9.9}$	$0.67_{-0.11}^{+0.13}$	1060_{-480}^{+540}	$0.21_{-0.09}^{+0.09}$	1555
GW151226	$13.7_{-3.2}^{+8.8}$	$7.7_{-2.6}^{+2.2}$	$1.0_{-0.2}^{+0.1}$	$20.5_{-1.5}^{+6.4}$	$0.74_{-0.05}^{+0.07}$	440_{-190}^{+180}	$0.09_{-0.04}^{+0.04}$	1033
GW170104	$31.0_{-5.6}^{+7.2}$	$20.1_{-4.5}^{+4.9}$	$2.2_{-0.5}^{+0.5}$	$49.1_{-3.9}^{+5.2}$	$0.66_{-0.10}^{+0.08}$	960_{-410}^{+430}	$0.19_{-0.08}^{+0.07}$	924
GW170608	$10.9_{-1.7}^{+5.3}$	$7.6_{-2.1}^{+1.3}$	$0.9_{-0.1}^{+0.0}$	$17.8_{-0.7}^{+3.2}$	$0.69_{-0.04}^{+0.04}$	320_{-110}^{+120}	$0.07_{-0.02}^{+0.02}$	396
GW170729	$50.6_{-10.2}^{+16.6}$	$34.3_{-10.1}^{+9.1}$	$4.8_{-1.7}^{+1.7}$	$80.3_{-10.2}^{+14.6}$	$0.81_{-0.13}^{+0.07}$	2750_{-1320}^{+1350}	$0.48_{-0.20}^{+0.19}$	1033
GW170809	$35.2_{-6.0}^{+8.3}$	$23.8_{-5.1}^{+5.2}$	$2.7_{-0.6}^{+0.6}$	$56.4_{-3.7}^{+5.2}$	$0.70_{-0.09}^{+0.08}$	990_{-380}^{+320}	$0.20_{-0.07}^{+0.05}$	340
GW170814	$30.7_{-3.0}^{+5.7}$	$25.3_{-4.1}^{+2.9}$	$2.7_{-0.3}^{+0.4}$	$53.4_{-2.4}^{+3.2}$	$0.72_{-0.05}^{+0.07}$	580_{-210}^{+160}	$0.12_{-0.04}^{+0.03}$	87
coalescing neutron stars	$1.46_{-0.10}^{+0.12}$	$1.27_{-0.09}^{+0.09}$	$\gtrsim 0.04$	≤ 2.8	≤ 0.89	40_{-10}^{+10}	$0.01_{-0.00}^{+0.00}$	16
GW170818	$35.5_{-4.7}^{+7.5}$	$26.8_{-5.2}^{+4.3}$	$2.7_{-0.5}^{+0.5}$	$59.8_{-3.8}^{+4.8}$	$0.67_{-0.08}^{+0.07}$	1020_{-360}^{+430}	$0.20_{-0.07}^{+0.07}$	39
GW170823	$39.6_{-6.6}^{+10.0}$	$29.4_{-7.1}^{+6.3}$	$3.3_{-0.8}^{+0.9}$	$65.6_{-6.6}^{+9.4}$	$0.71_{-0.10}^{+0.08}$	1850_{-840}^{+840}	$0.34_{-0.14}^{+0.13}$	1651

$\Delta\Omega/deg^2$ is the sky localization area

localised with
higher precision
with LIGO
and Virgo

Con piu' rivelatori saremo in grado di localizzare la posizione della sorgente con maggiore accuratezza

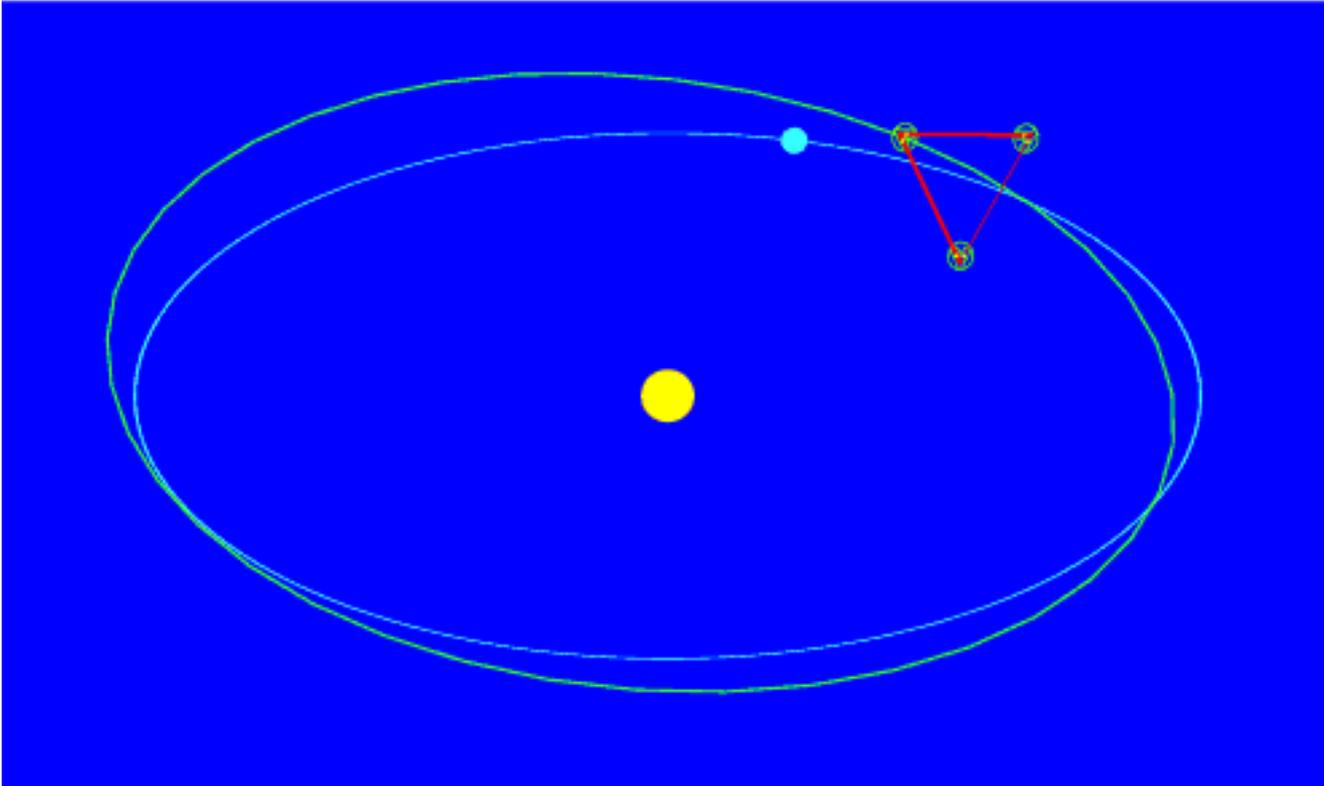
DETECTORS WHICH WILL OPERATE IN THE NEXT DECADE



When all detectors will be operating it will be possible to localize the source position within 4-5 deg²

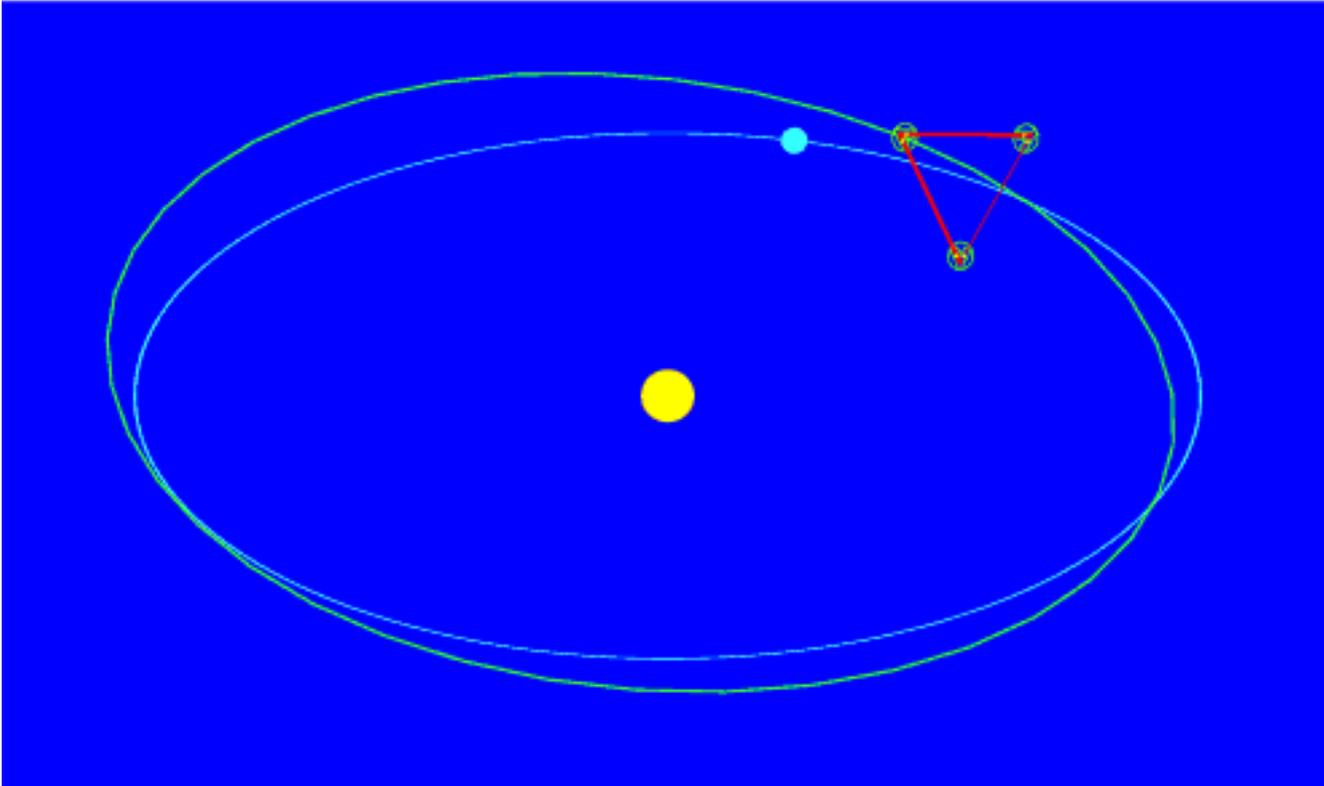
NEL FUTURO: per esplorare le basse frequenze bisogna andare nello spazio

eLISA: 3 spacecraft in orbita eliocentrica. Formano un triangolo equilatero inclinato di **60°** rispetto all'eclittica
equilateral triangle **L=10⁶ km** : sensitivi range **$\sim 10^{-4} \text{ Hz} < \nu < 1 \text{ Hz}$**

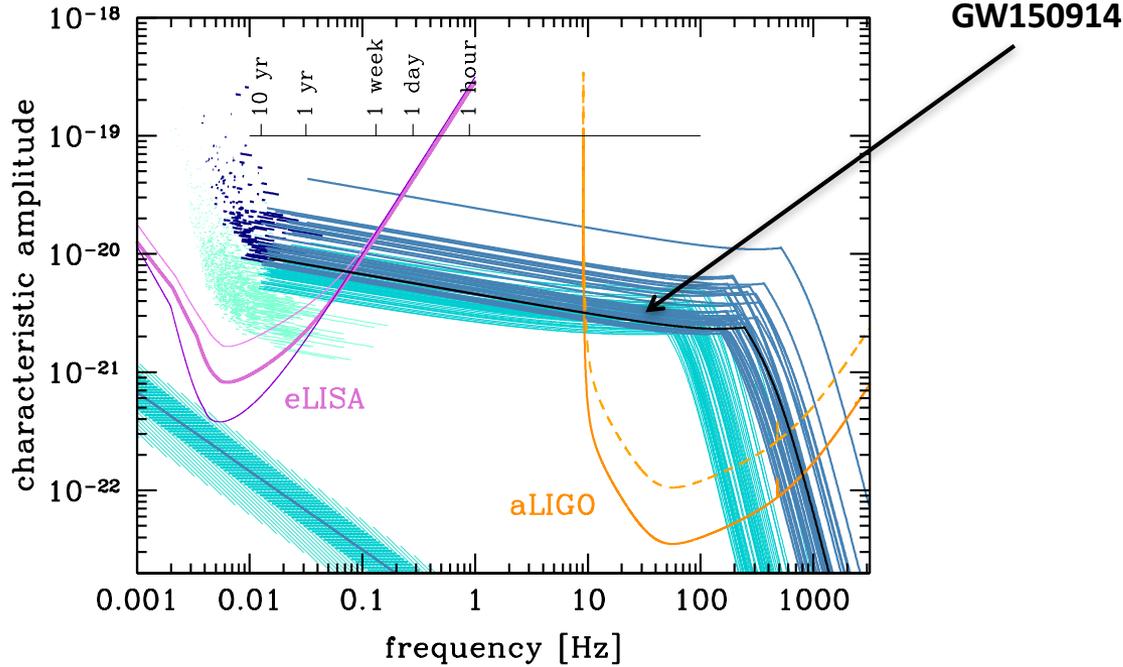


NEL FUTURO: per esplorare le basse frequenze bisogna andare nello spazio

eLISA: 3 spacecraft in orbita eliocentrica. Formano un triangolo equilatero inclinato di **60°** rispetto all'eclittica
equilateral triangle **L=10⁶ km** : sensitivi range **$\sim 10^{-4} \text{ Hz} < \nu < 1 \text{ Hz}$**



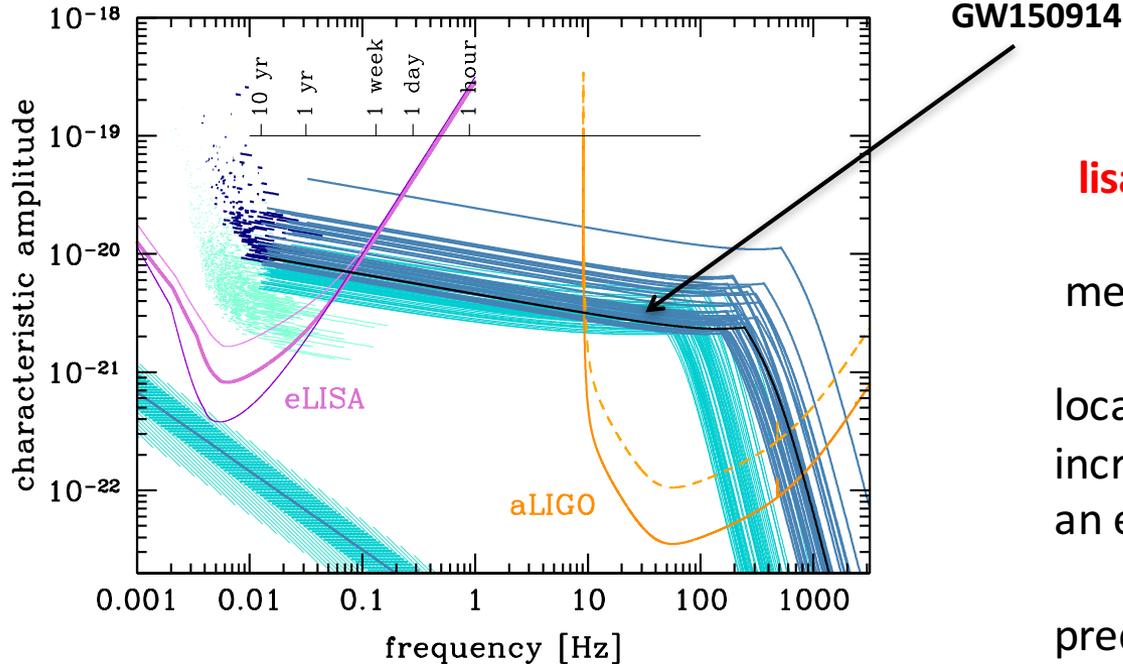
When both LISA and the Adv LIGO-Virgo will be operating at the same time



Alberto Sesana, Phys. Rev. Lett. 116, 2016

Blue band: systems with total mass $50 M_{\odot} < M < 100 M_{\odot}$

When both LISA and the Adv LIGO-Virgo will be operating at the same time



lisa will:

measure the source parameters

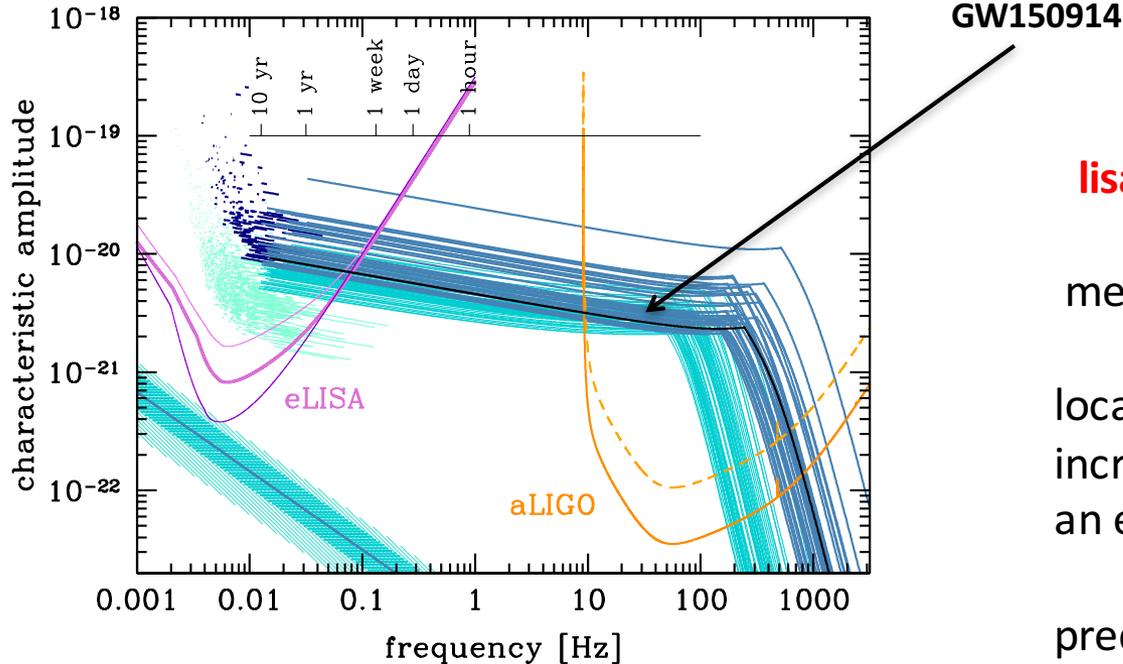
localize the source position
increasing the chance of finding
an em counterpart

predict the coalescence time in
the LIGO/Virgo band weeks/month
in advance

Alberto Sesana, Phys. Rev. Lett. 116, 2016

Blue band: systems with total mass $50 M_{\odot} < M < 100 M_{\odot}$

When both LISA and the Adv LIGO-Virgo will be operating at the same time



lisa will:

measure the source parameters

localize the source position
increasing the chance of finding
an em counterpart

predict the coalescence time in
the LIGO/Virgo band weeks/month
in advance

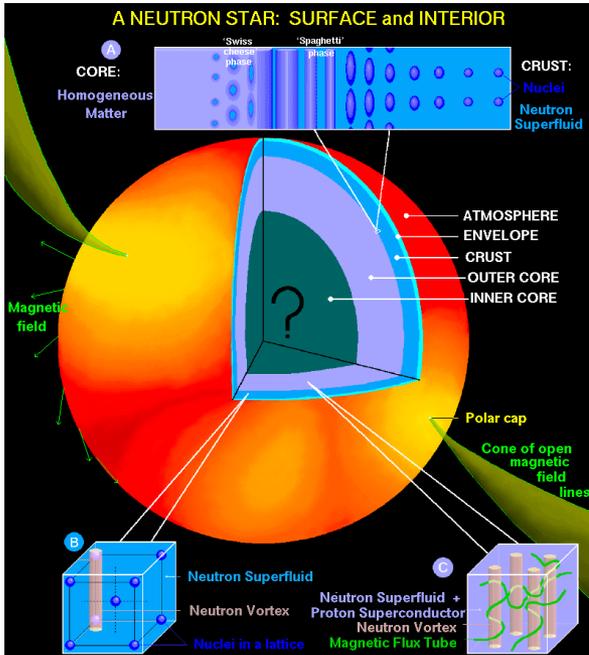
Alberto Sesana, Phys. Rev. Lett. 116, 2016

Blue band: systems with total mass $50 M_{\odot} < M < 100 M_{\odot}$

a signal like GW150914 will be seen by LISA for ~ 10 years and then will enter in the LIGO-Virgo waveband, where will stay for ~ 0.2 s

le onde gravitazionali permettono di studiare,
oltre alla coalescenza di stelle e buchi neri,
anche altri problemi di fisica fondamentale

STELLE di NEUTRONI



credits D. Page

massa osservata: [1-2] M_{\odot}

raggio: difficile da misurare (oggi misurato con un'accuratezza di circa il 13-15 %)

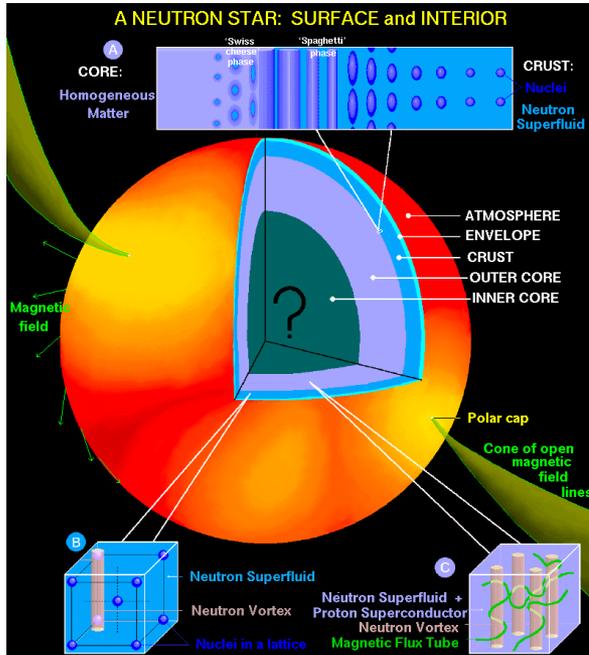
stime teoriche: [10-15] km

Nella parte piu' interna di una stella di neutroni la densita' puo' raggiungere, e superare, la densita' di equilibrio della materia nucleare

$$\rho_0 = 2.67 \times 10^{14} \text{ g/cm}^3$$

densita' tipiche $\approx 2-5 \rho_0$ o piu'

STELLE di NEUTRONI



massa osservata: [1-2] M_{\odot}

raggio: difficile da misurare (oggi misurato con un'accuratezza di circa il 13-15 %)

stime teoriche: [10-15] km

Nella parte piu' interna di una stella di neutroni la densita' puo' raggiungere, e superare, la densita' di equilibrio della materia nucleare

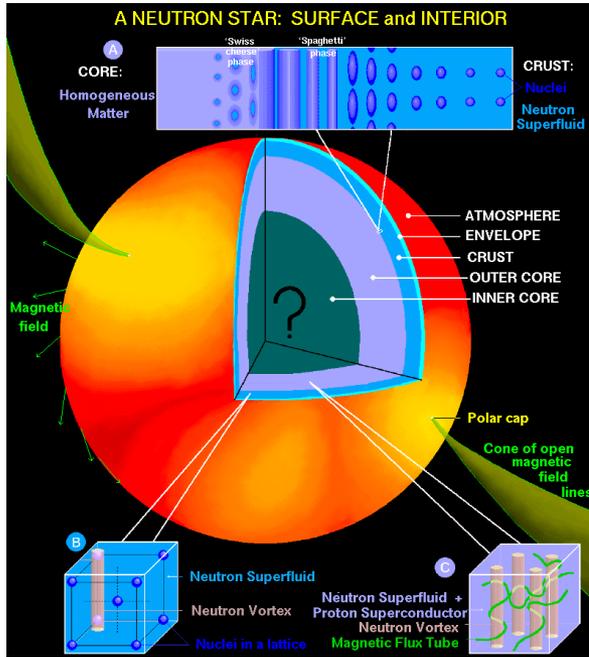
$$\rho_0 = 2.67 \times 10^{14} \text{ g /cm}^3$$

densita' tipiche $\approx 2-5 \rho_0$ o piu'

credits D. Page

A queste densita' che non possono essere raggiunte in esperimenti in laboratorio, l'interazione tra gli adroni non puo' essere trascurata e va trattata nell'ambito della teoria della Cromodinamica quantistica

STELLE di NEUTRONI



credits D. Page

massa osservata: $[1-2] M_{\odot}$

raggio: difficile da misurare (oggi misurato con un'accuratezza di circa il 13-15 %)

stime teoriche: $[10-15]$ km

Nella parte piu' interna di una stella di neutroni la densita' puo' raggiungere, e superare, la densita' di equilibrio della materia nucleare

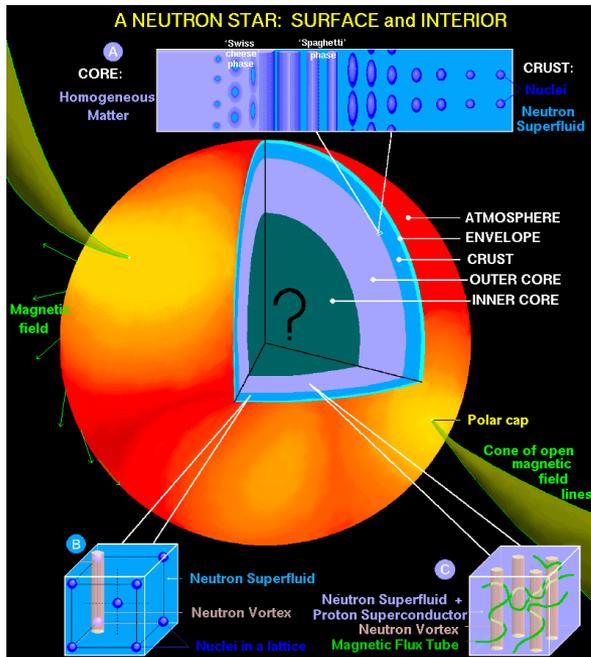
$$\rho_0 = 2.67 \times 10^{14} \text{ g /cm}^3$$

densita' tipiche $\approx 2-5 \rho_0$ o piu'

A queste densita' che non possono essere raggiunte in esperimenti in laboratorio, l'interazione tra gli adroni non puo' essere trascurata e va trattata nell'ambito della teoria della **Cromodinamica quantistica**

non si sa nemmeno quale sia la composizione della materia in questo stato estremo: ci sono solo adroni? si formano iperioni? O condensati di mesoni? O si forma un gas di quarks deconfinati?

STELLE di NEUTRONI



massa osservata: $[1-2] M_{\odot}$

raggio: difficile da misurare (oggi misurato con un'accuratezza di circa il 13-15 %)

stime teoriche: $[10-15]$ km

Nella parte piu' interna di una stella di neutroni la densita' puo' raggiungere, e superare, la densita' di equilibrio della materia nucleare

$$\rho_0 = 2.67 \times 10^{14} \text{ g /cm}^3$$

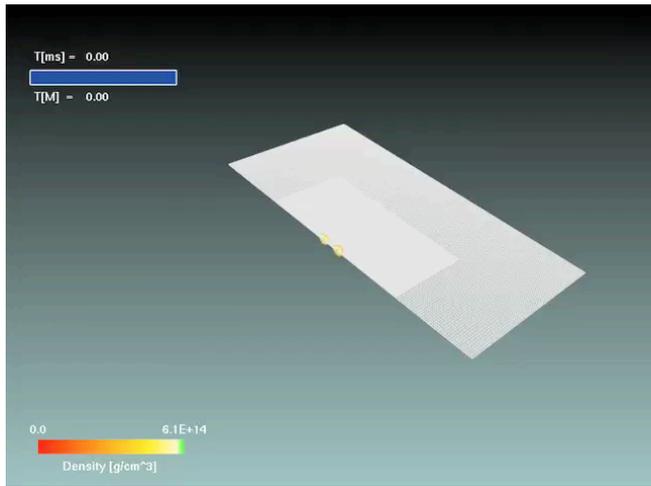
densita' tipiche $\approx 2-5 \rho_0$ o piu'

credits D. Page

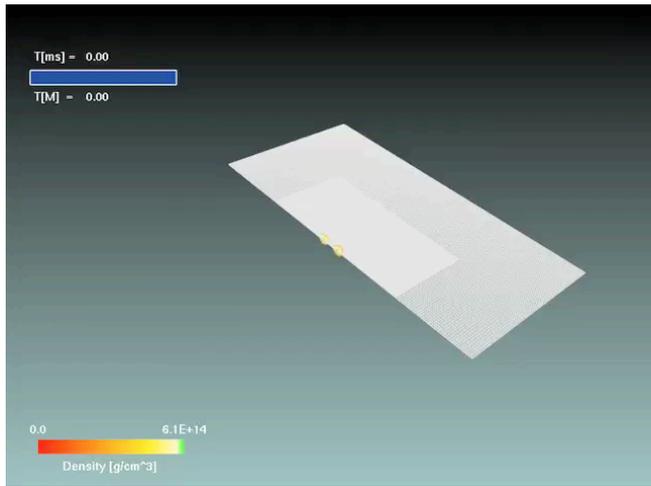
A queste densita' che non possono essere raggiunte in esperimenti in laboratorio, l'interazione tra gli adroni non puo' essere trascurata e va trattata nell'ambito della teoria della **Cromodinamica quantistica**

non si sa nemmeno quale sia la composizione della materia in questo stato estremo: ci sono solo adroni? si formano iperoni? O condensati di mesoni? O si forma un gas di quarks deconfinati?

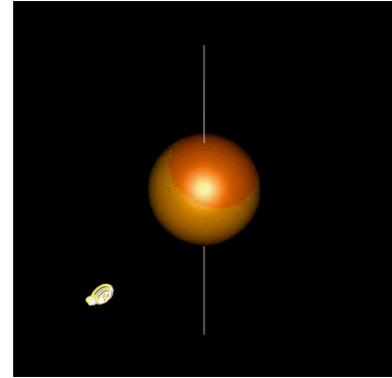
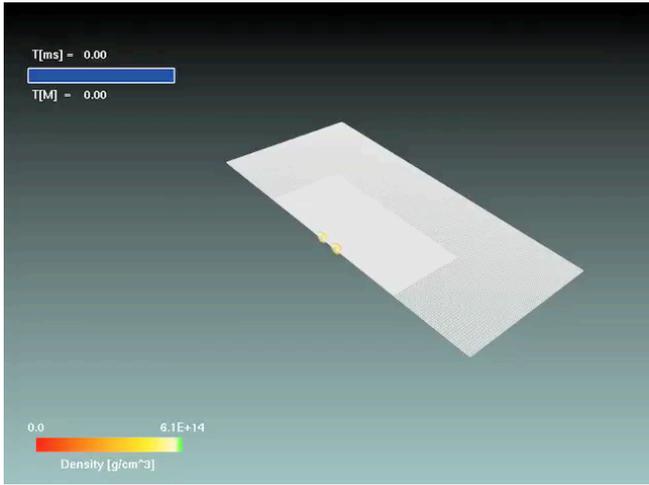
sono stati proposti molti modelli, ma questi vanno validati e si pensa di farlo attraverso le onde gravitazionali.



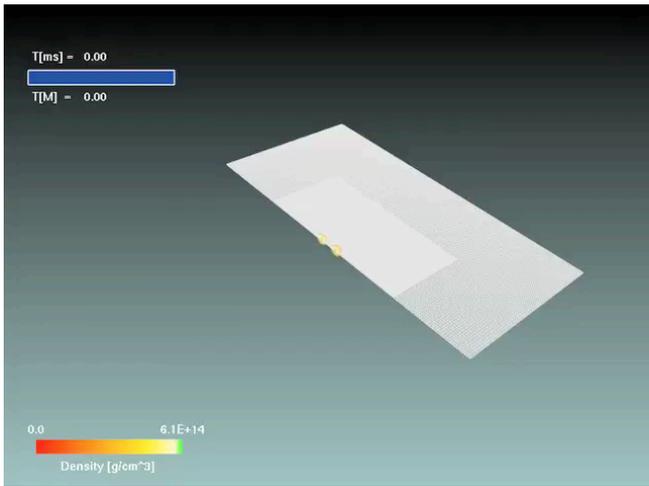
altre coalescenze di stelle di neutroni



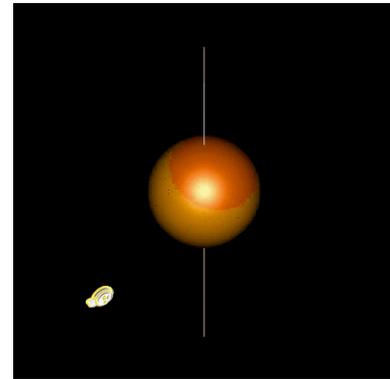
altre coalescenze di stelle di neutroni



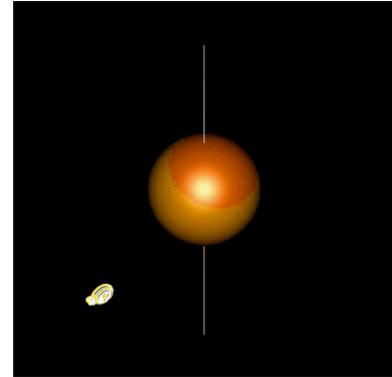
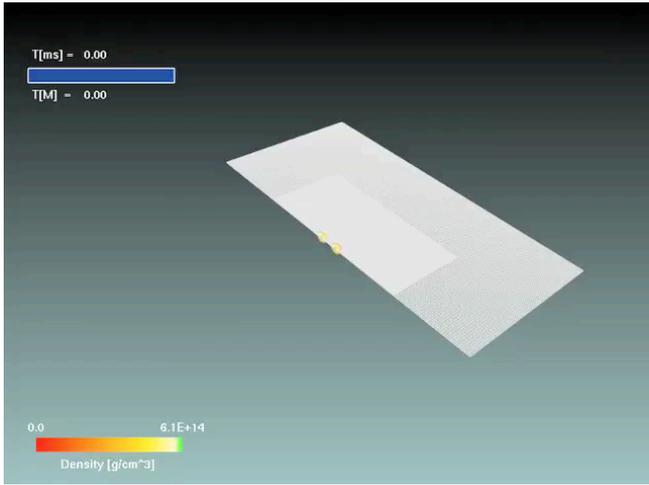
altre coalescenze di stelle di neutroni



altre coalescenze di stelle di neutroni



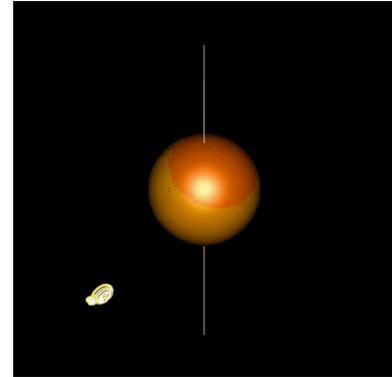
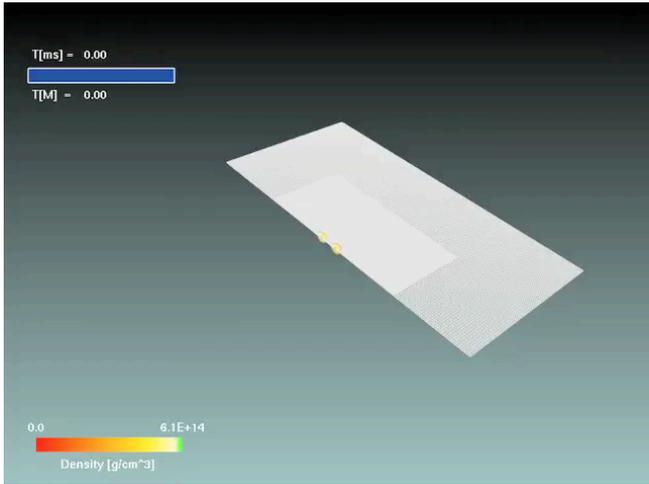
stelle di neutroni che ruotano:
emettono tanta più energia in onde quanto più la loro forma è asimmetrica



stelle di neutroni che
 ruotano:
 emettono tanta più
 energia in onde quanto
 più la loro forma
 è asimmetrica

altre coalescenze di stelle di neutroni



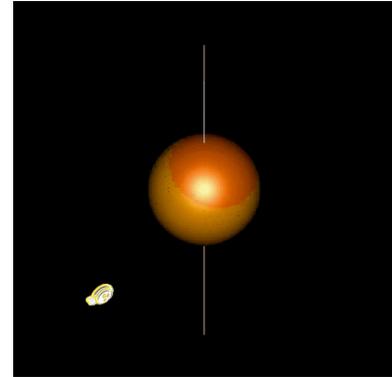
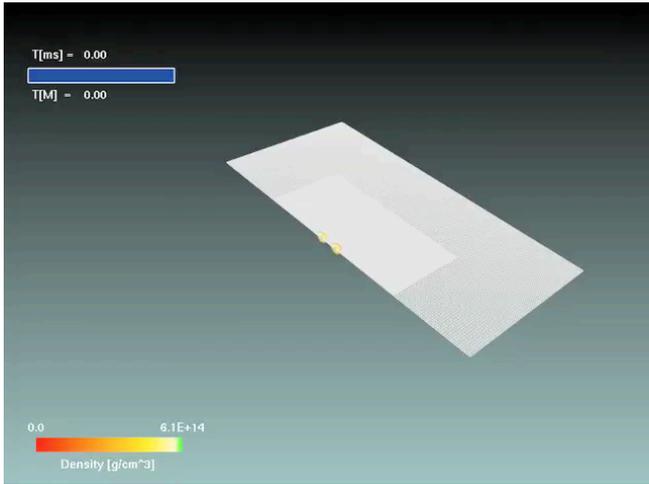


stelle di neutroni che
 ruotano:
 emettono tanta più
 energia in onde quanto
 più la loro forma
 è asimmetrica

altre coalescenze di stelle di neutroni



stelle di neutroni che oscillano: le frequenze a cui
 oscillano dipende da come è composta la materia al
 loro interno: di questo non sappiamo ancora molto



stelle di neutroni che ruotano: emettono tanta più energia in onde quanto più la loro forma è asimmetrica

altre coalescenze di stelle di neutroni



Attraverso lo studio dei segnali gravitazionali emessi in questi in questi processi si spera di ricavare informazioni su una questione di fisica fondamentale;

come si comporta la materia in condizioni estreme?

stelle di neutroni che oscillano: le frequenze a cui oscillano dipende da come è composta la materia al loro interno: di questo non sappiamo ancora molto

Le onde gravitazionali ci forniscono uno strumento per esplorare il comportamento della gravita' in regime di campo forte e grande curvatura che non e' stato mai possibile studiare

Le onde gravitazionali ci forniscono uno strumento per esplorare il comportamento della gravita' in regime di campo forte e grande curvatura che non e' stato mai possibile studiare

$$\epsilon = \frac{GM}{r} \text{ gravitational potential}$$

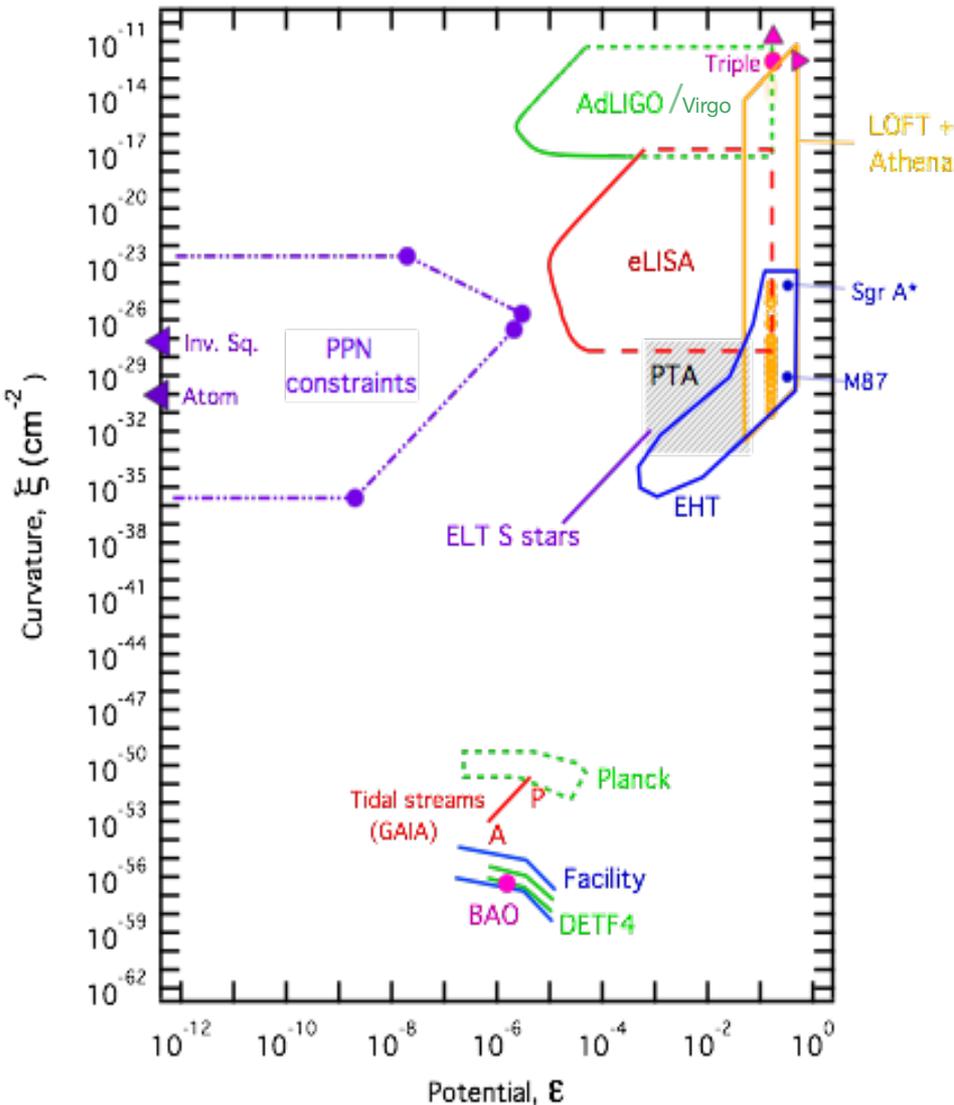
$$\zeta = \frac{GM}{r^3} \text{ spacetime curvature}$$

Le onde gravitazionali ci forniscono uno strumento per esplorare il comportamento della gravita' in regime di campo forte e grande curvatura che non e' stato mai possibile studiare

Baker et al. '15

$$\epsilon = \frac{GM}{r} \text{ gravitational potential}$$

$$\zeta = \frac{GM}{r^3} \text{ spacetime curvature}$$

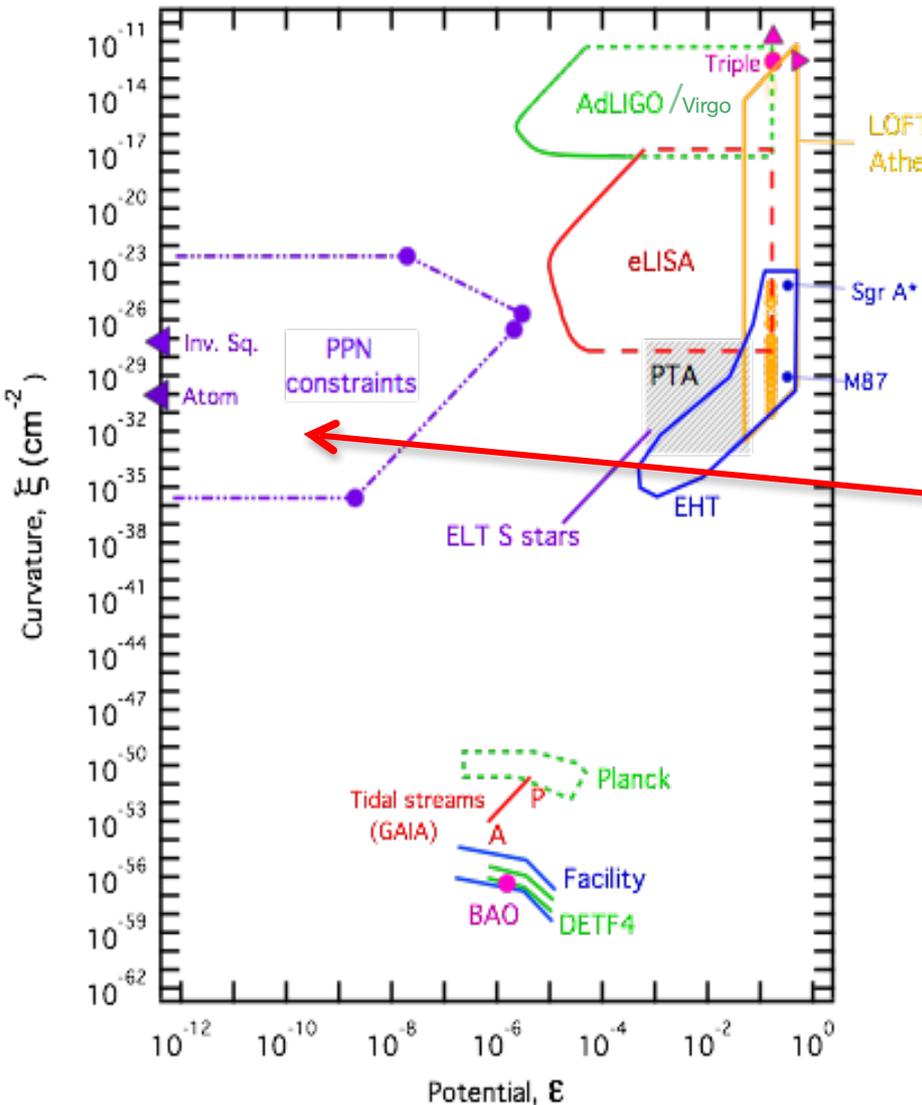


Le onde gravitazionali ci forniscono uno strumento per esplorare il comportamento della gravita' in regime di campo forte e grande curvatura che non e' stato mai possibile studiare

Baker et al. '15

$$\epsilon = \frac{GM}{r} \text{ gravitational potential}$$

$$\zeta = \frac{GM}{r^3} \text{ spacetime curvature}$$



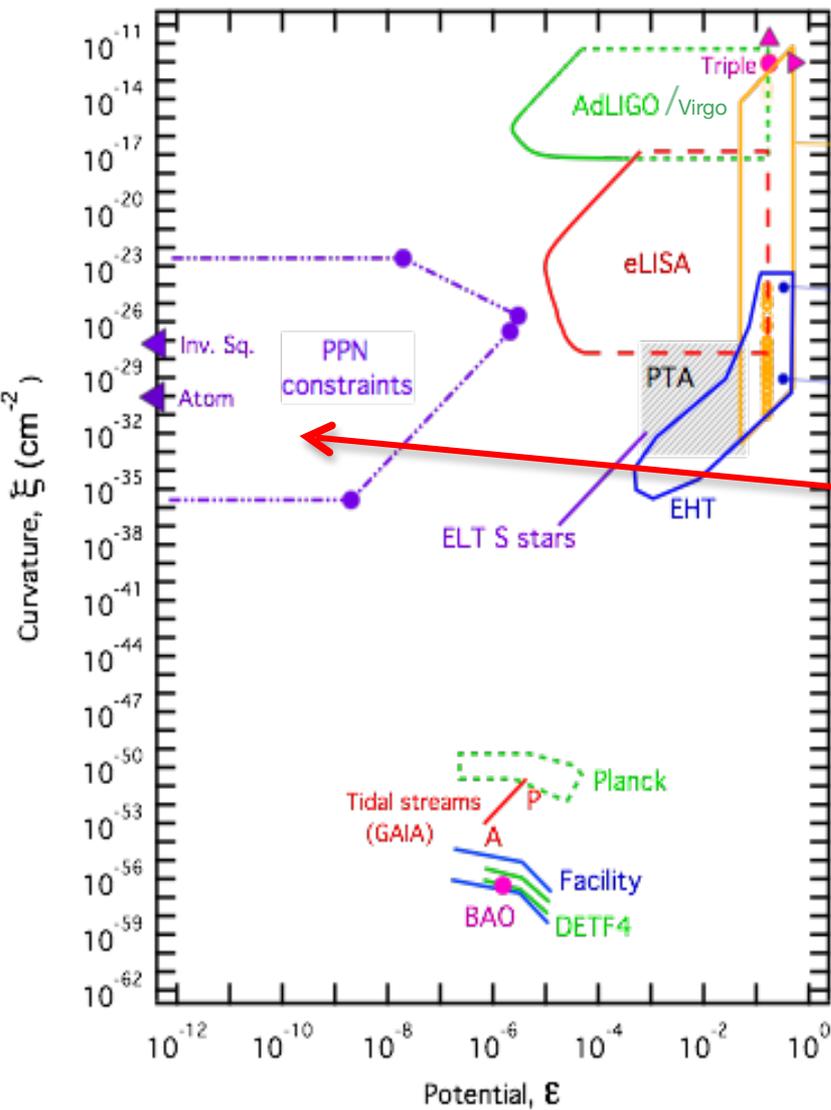
solar system + binary pulsar tests

Le onde gravitazionali ci forniscono uno strumento per esplorare il comportamento della gravita' in regime di campo forte e grande curvatura che non e' stato mai possibile studiare

Baker et al. '15

$$\epsilon = \frac{GM}{r} \text{ gravitational potential}$$

$$\zeta = \frac{GM}{r^3} \text{ spacetime curvature}$$



solar system + binary pulsar tests

In linea di principio, non c'e' ragione di credere che nel regime di grande curvatura e campo forte la gravita' si comporti come in regime di campo debole

Oltre al Big Bang, in nessun altro posto dell'universo la gravita' e' cosi intensa come nelle vicinanze dell'orizzonte di un buco nero

Oltre al Big Bang, in nessun altro posto dell'universo la gravita' e' cosi intensa come nelle vicinanze dell'orizzonte di un buco nero

quindi, se ci sono deviazioni nel comportamento della gravita' rispetto a quanto predetto dalla Relativita' Generale, queste emergeranno proprio da processi che avvengono nelle vicinanze dell'orizzonte dei buchi neri e le onde gravitazionali sono l'unico mezzo che abbiamo per studiare questa regione misteriosa dello spaziotempo