



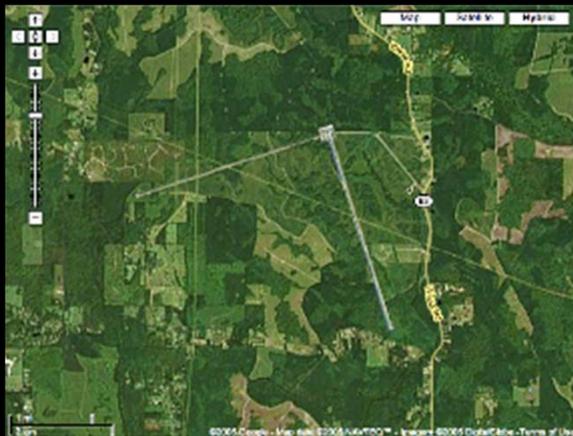
Onde gravitazionali, messaggeri dello spazio tempo

Francesco Fidecaro – Università di Pisa e *INFN*

per le Collaborazioni LIGO e Virgo

Erice, 7 dicembre 2017

LIGO Livingston Observatory
Louisiana, USA



Virgo, Cascina, Italy

LIGO Hanford Observatory
Washington, USA



GEOMETRIA E GRAVITAZIONE:
LA RELATIVITÀ GENERALE

L'universalità della caduta dei corpi

1638

Galileo:

e finalmente ho potuto
ed una di sughero
volte più grave di
ho attaccata a due
lunghi quattro o cinque

gli ho dato l'andata
esse, scendendo per
descritti da gli spazi
sensatamente molto
talmente sotto il tempo
ben cento vibrazioni
tempo d'un minimo

ma camminando



Spazio tempo

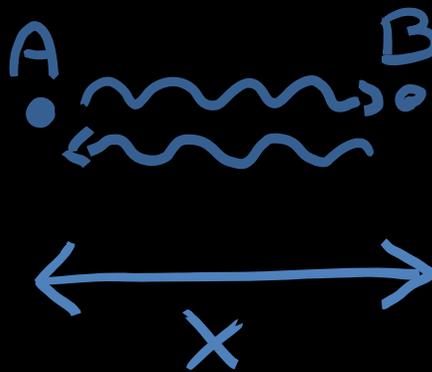
- Il moto di un corpo sottoposto alla forza di gravità non dipende dalla massa, forma, struttura
- Tutti i corpi si muovono con accelerazione di gravità ...
- ... nello spazio(-tempo) comune a tutti

Luce: Misura dello spazio tempo

Usiamo la luce:

per vedere quanto distano dei corpi nello spazio

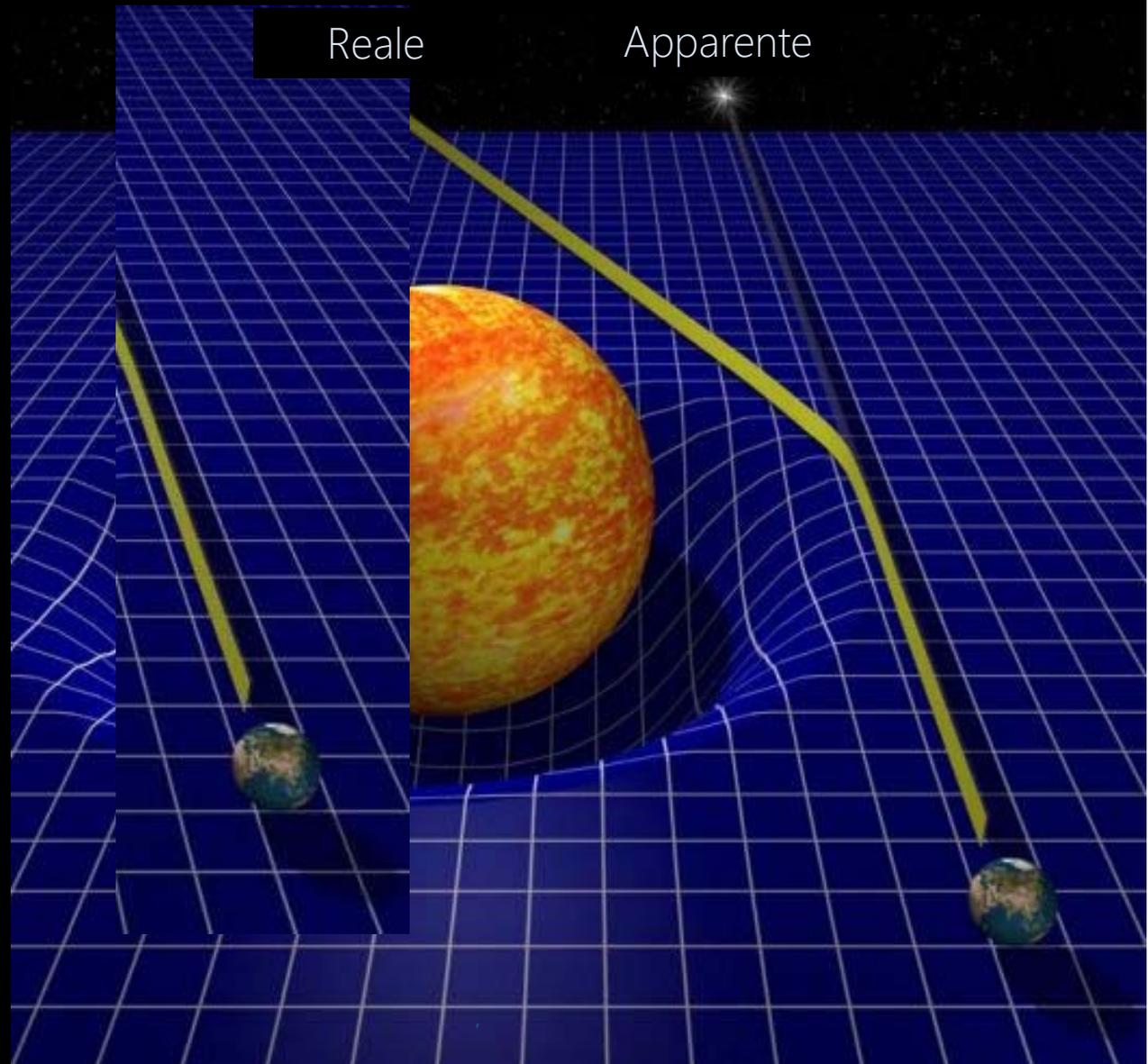
per vedere quanto tempo trascorre tra due eventi



$$2x = c \cdot t$$

Geometria e gravitazione

- In assenza di gravità, la luce viaggia in linea retta a velocità costante
- Tesse la trama di uno spazio-tempo dove vale la geometria euclidea.
- La luce dice dove si trovano i corpi e quando avvengono gli eventi.
- Le masse modificano la trama, la luce curva, rallenta... è cambiata la geometria
- Vicino al Sole l'effetto è di qualche parte su un milione.



Percezione e misura dello spazio e del tempo

La luce, visibile, infrarossa, ultravioletta...

Permette di percepire lo spazio, esplorarlo, misurarlo

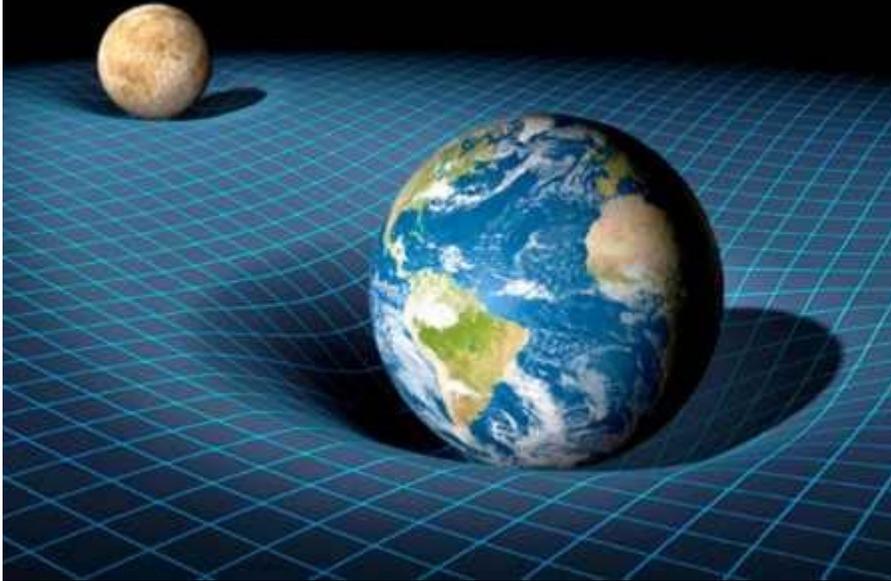
Permette di percepire il tempo, scandirlo, misurarlo

Dove la luce non arriva,

lo spazio e il tempo non esistono

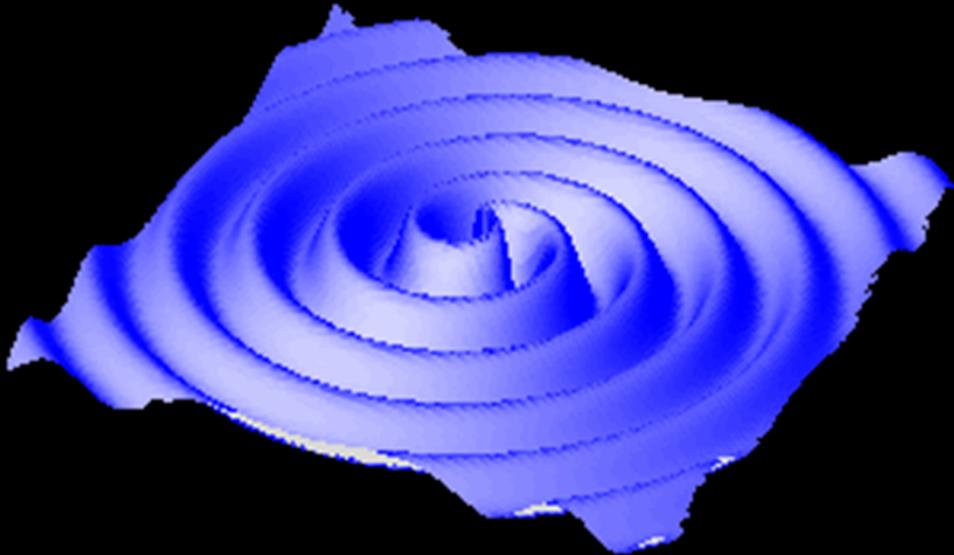
lo spazio non esiste (Mario Botta, Luce e Gravità)

Propagazione della curvatura



La curvatura non si crea istantaneamente ovunque
Si propaga alla velocità della luce

Le onde gravitazionali sono grinze che viaggiano nel tessuto dello spazio tempo
Mantengono la stessa forma
Trasportano energia
Ci svelano il moto delle stelle anche quando non le vediamo, sono un segnale «diverso»



Sono i segnali trasmessi dallo spazio tempo



PHDCOMICS.COM/TV



Le onde gravitazionali sono prodotte ogniqualvolta
che delle masse accelerano, modificando la deformazione

A background image showing a vertical interference pattern of red laser light on a black background. The pattern consists of several vertical, slightly wavy red lines of varying intensity, creating a shimmering effect.

INTERFEROMETRI PER RIVELARE ONDE GRAVITAZIONALI

Source <http://laser.physics.sunysb.edu/~kevin/journal/>

Un'antenna per onde gravitazionali

Si quadretta lo spazio-tempo usando masse «libere»

La distanza tra due masse cambia se cambia la curvatura al passaggio di un'onda gravitazionale

Il passaggio di un'onda gravitazionale cambia la distanza tra due masse, altrimenti ferme

Più le masse sono lontane, maggiore è l'effetto ...

... che è piccolissimo anche per masse distanti 3 km:

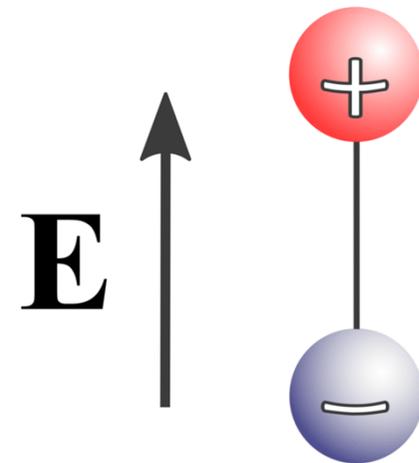
$$\frac{1}{10^{20}} \text{ m} = \frac{1}{\underbrace{1000 \dots 000}_{20 \text{ zeri}}} \text{ m}$$

È un decimiliardesimo del raggio di un atomo, da misurarsi su oggetti di diametro 35 cm e spessi 20 cm.

L'antenna radio

Un trasduttore per Onde Elettromagnetiche

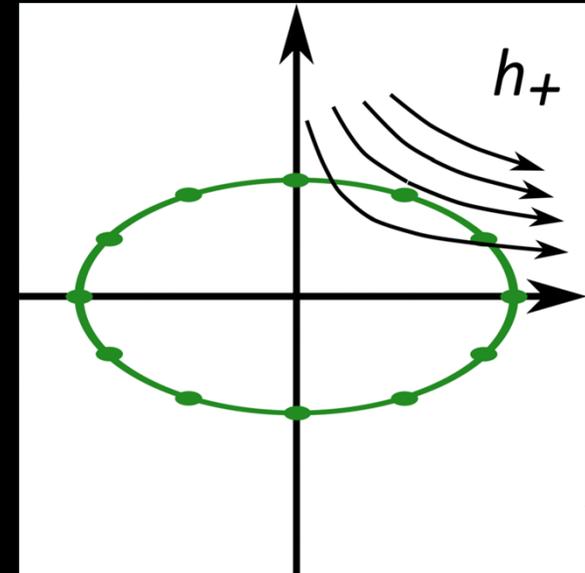
- Un'onda elettromagnetica che entra perpendicolarmente allo schermo muove le cariche elettriche così:
- Più l'antenna è lunga, più cariche si accumulano (per antenne non troppo grandi)
- Si misura il movimento delle cariche, ovvero la corrente elettrica.



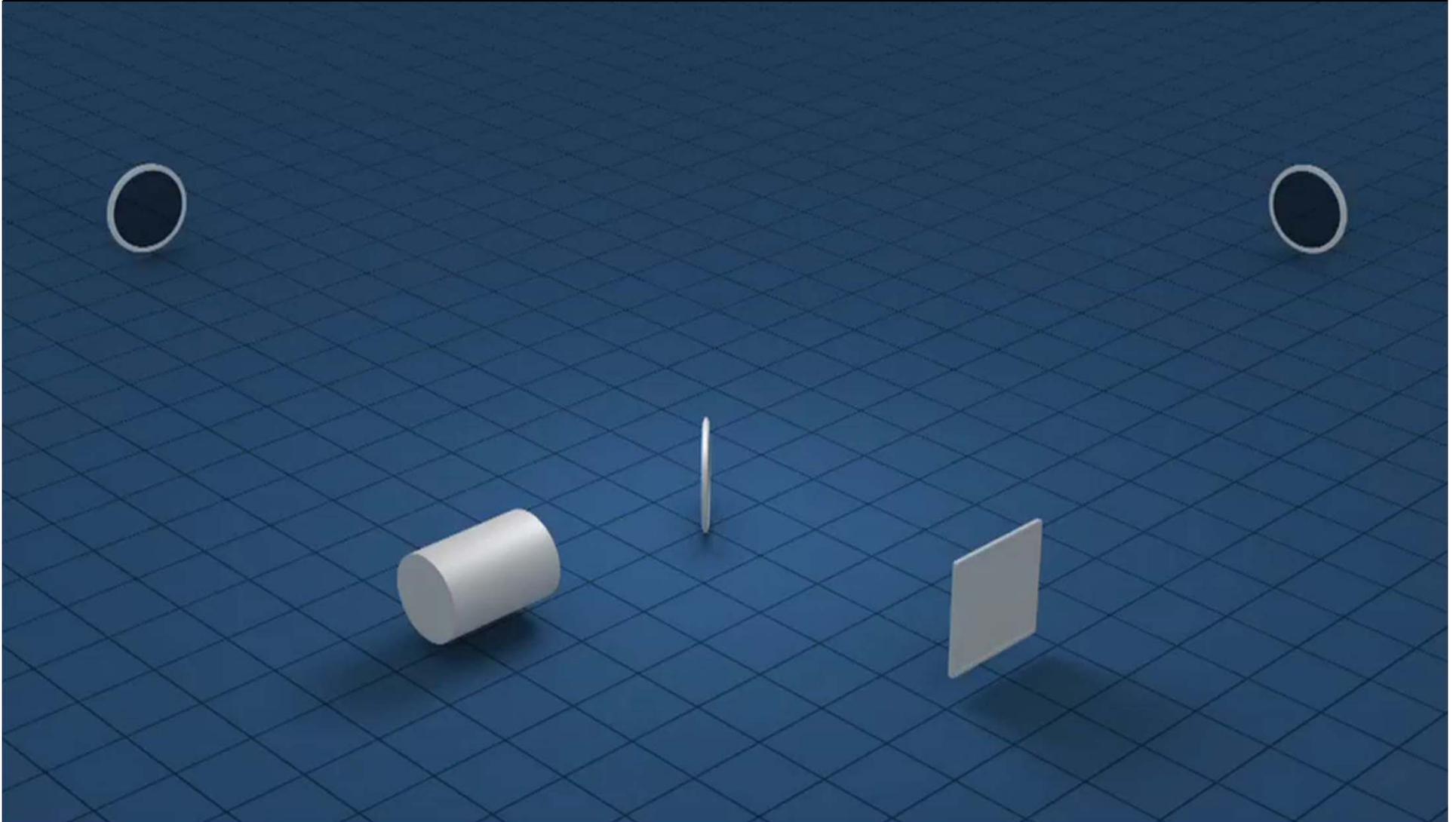
Le masse libere

Un trasduttore per Onde Gravitazionali

- Un'onda che entra perpendicolarmente allo schermo muove le masse così:
- Più le masse sono distanti, più aumenta lo spostamento delle masse (per interferometri non troppo grandi)
- Si misura il movimento delle masse misurando le distanze tra di loro con l'interferenza di due raggi di luce.



Interferometria con due bracci perpendicolari tra loro



Advanced Virgo

- Advanced Virgo (AdV): upgrade dell'interferometro Virgo
- Fisici dall'Italia e dalla Francia (dal 1994), dall'Olanda, Polonia, Ungheria, Spagna
- Finanziamento approvato nel dicembre 2009 (21.8 ME + contributo materiale dall'Olanda)
- Fine dell'installazione: Luglio 2016
- Componente la rete globale di rivelatori
- Obiettivo immediato: osservazioni in luglio 2017

6 Paesi europei
20 labs ~ 250 partecipanti

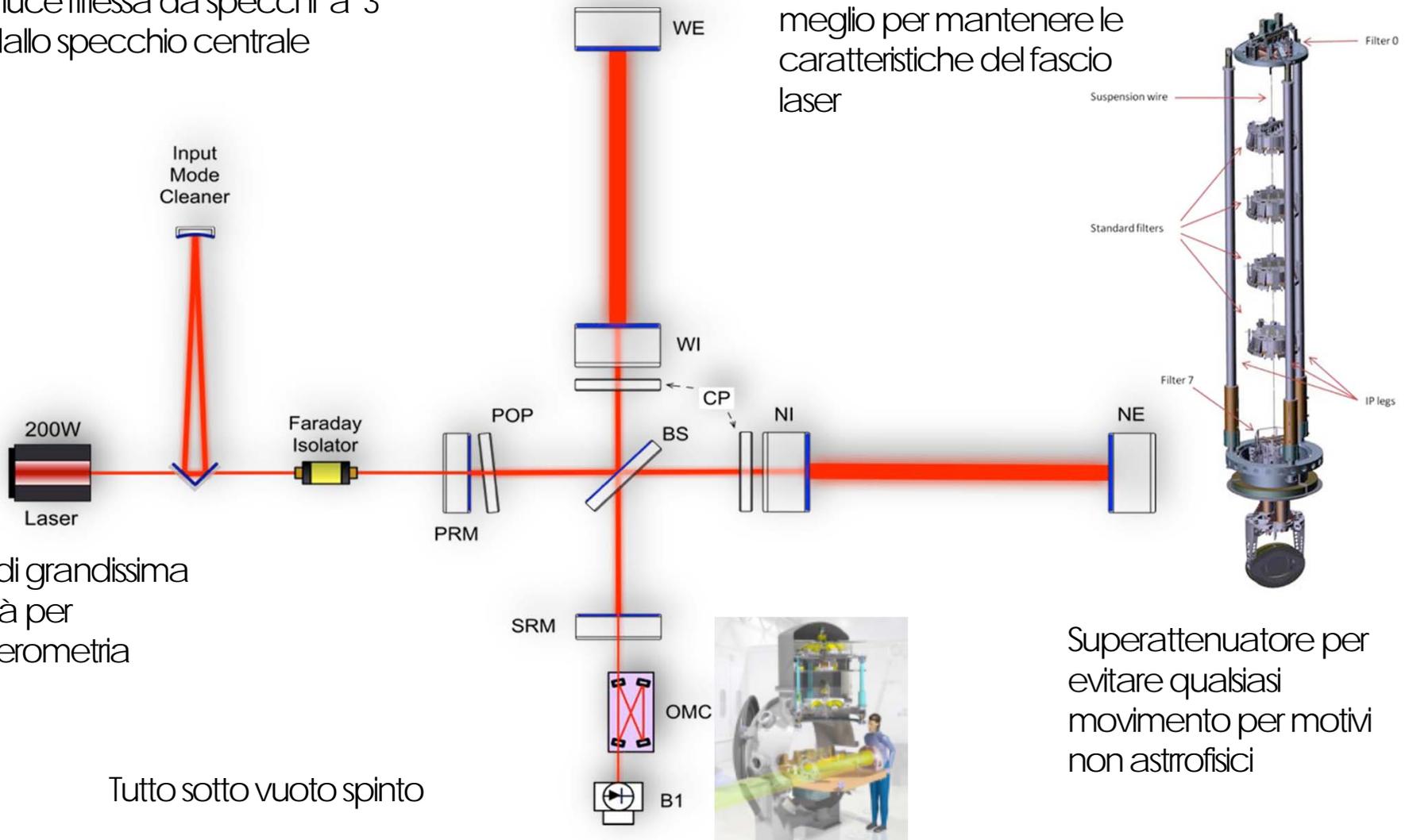
APC Paris
ARTEMIS Nice
EGO Cascina
INFN Firenze-Urbino
INFN Genova
INFN Napoli
INFN Perugia
INFN Pisa
INFN Roma La Sapienza
INFN Roma Tor Vergata
INFN Trento-Padova
LAL Orsay – ESPCI Paris
LAPP Annecy
LKB Paris
LMA Lyon
NIKHEF Amsterdam
POLGRAW(Poland)
RADBOUD Uni. Nijmegen
RMKI Budapest
Univ. of Valencia



PRINCIPALI COMPONENTI

Confronto della distanza percorsa dalla luce riflessa da specchi a 3 km dallo specchio centrale

Specchi lavorati al meglio per mantenere le caratteristiche del fascio laser

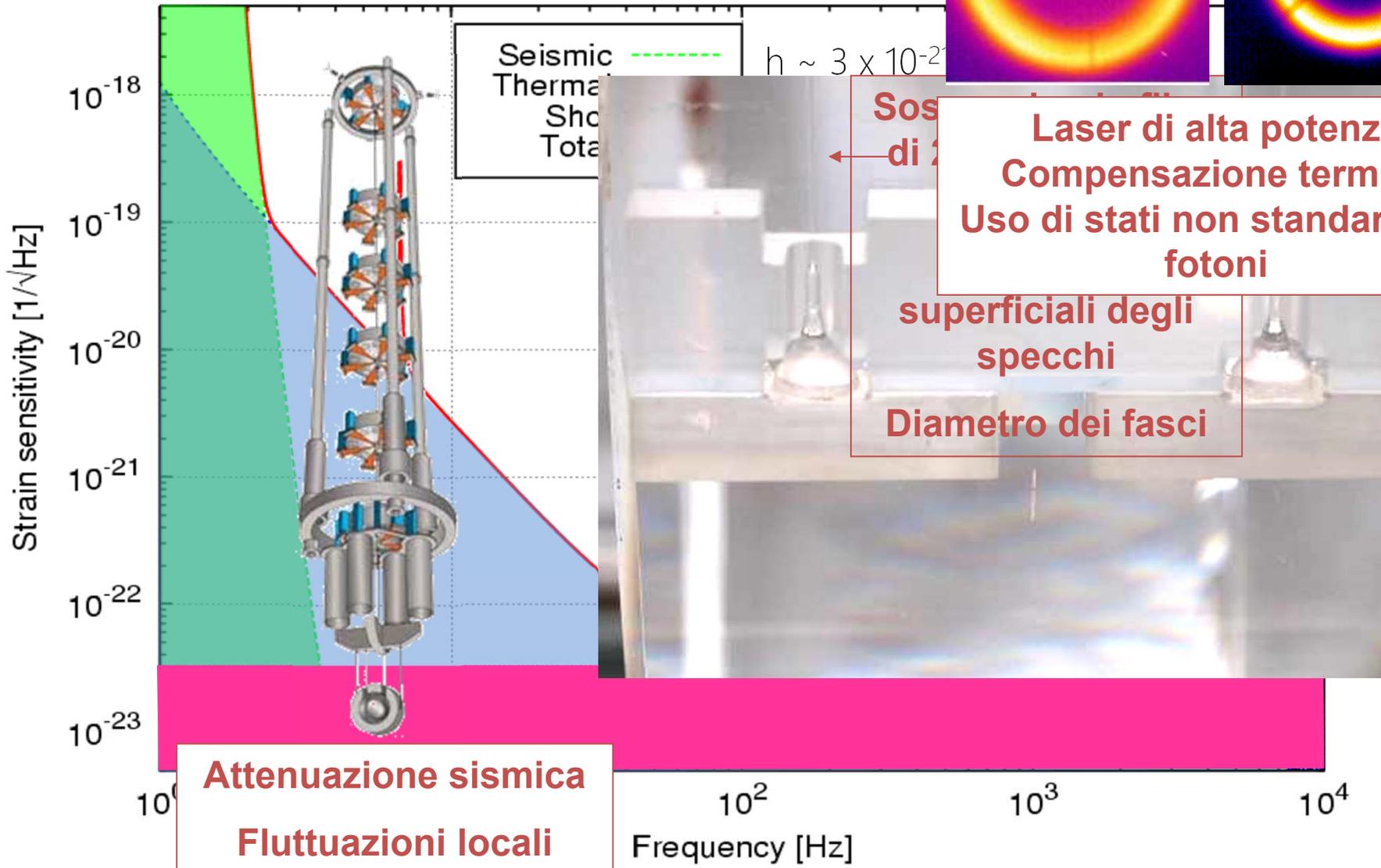
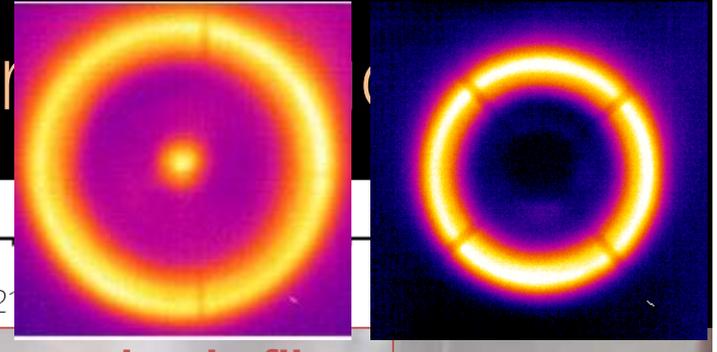


Laser di grandissima stabilità per l'interferometria

Tutto sotto vuoto spinto

Superattenuatore per evitare qualsiasi movimento per motivi non astrofisici

Sorgenti di rumore



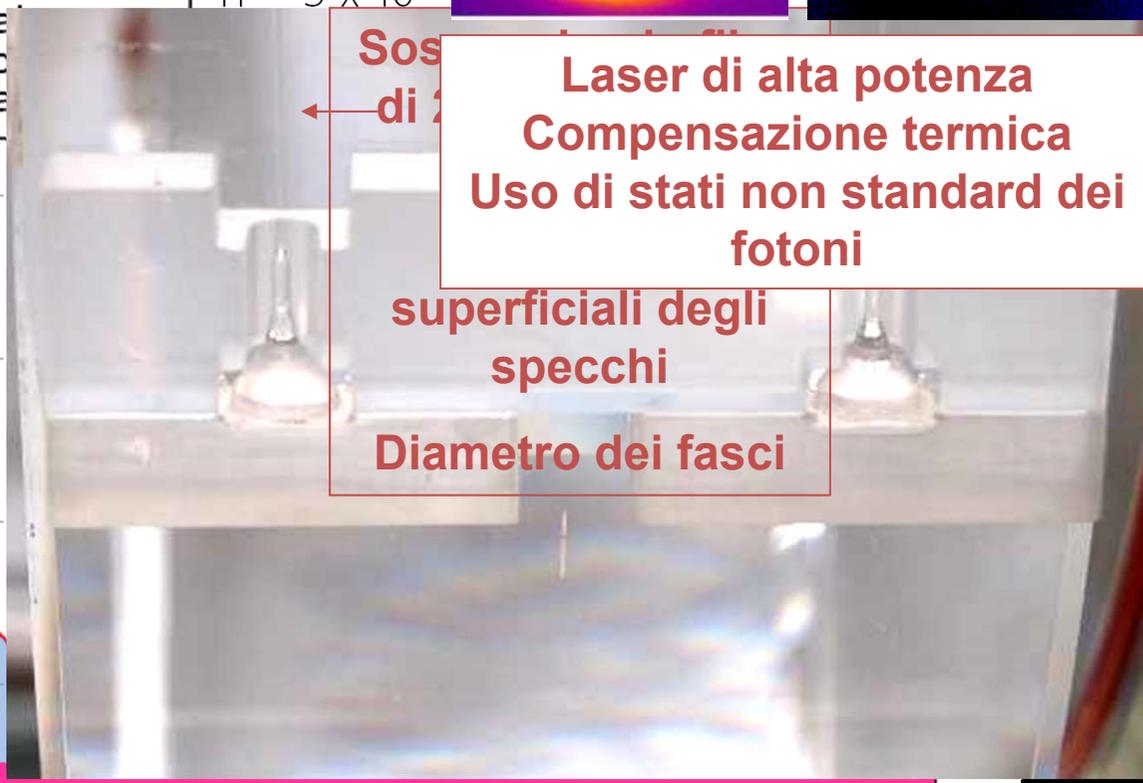
Attenuazione sismica
 Fluttuazioni locali
 della gravità

Sostanze
 di 2

Laser di alta potenza
 Compensazione termica
 Uso di stati non standard dei
 fotoni

superficiali degli
 specchi

Diametro dei fasci

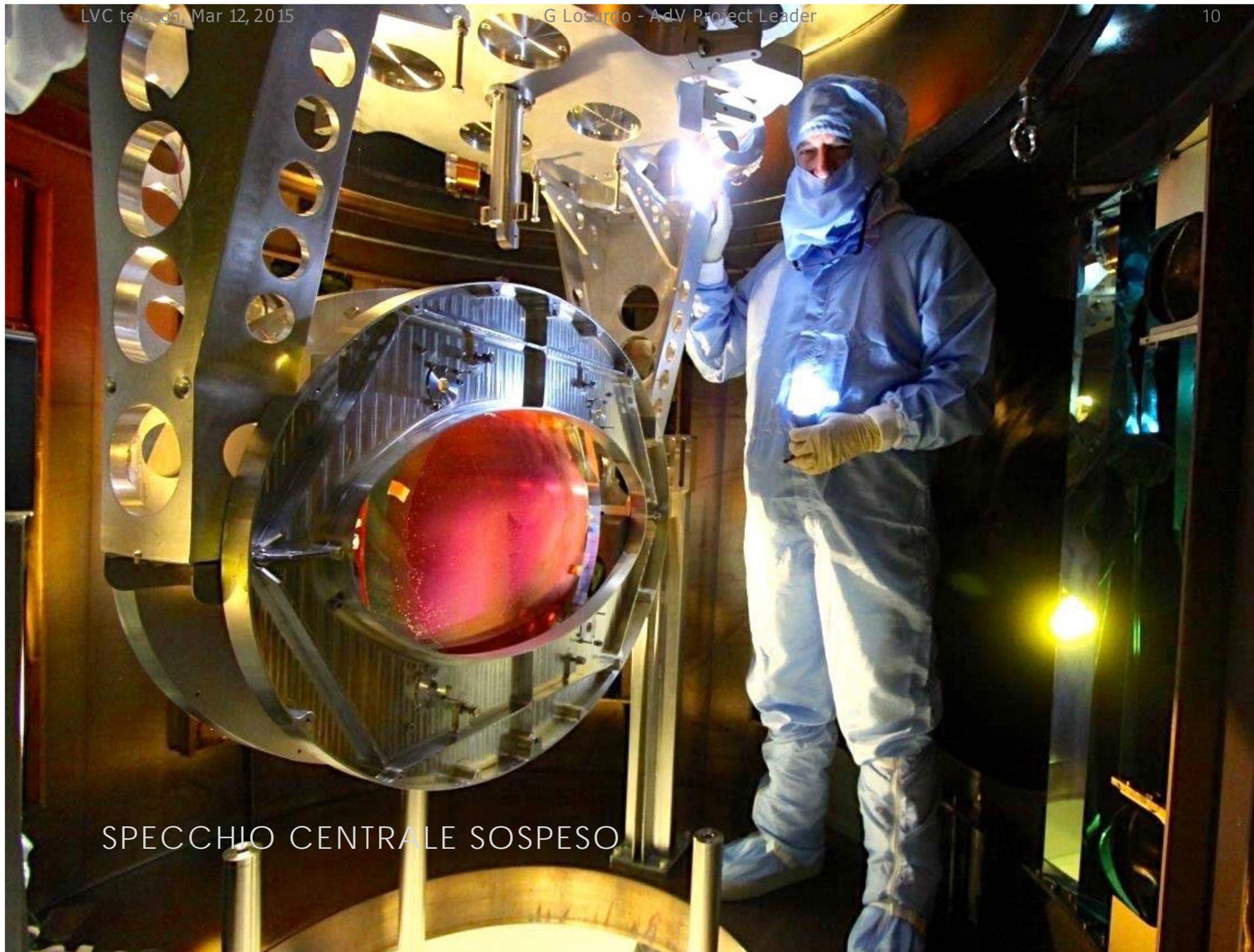




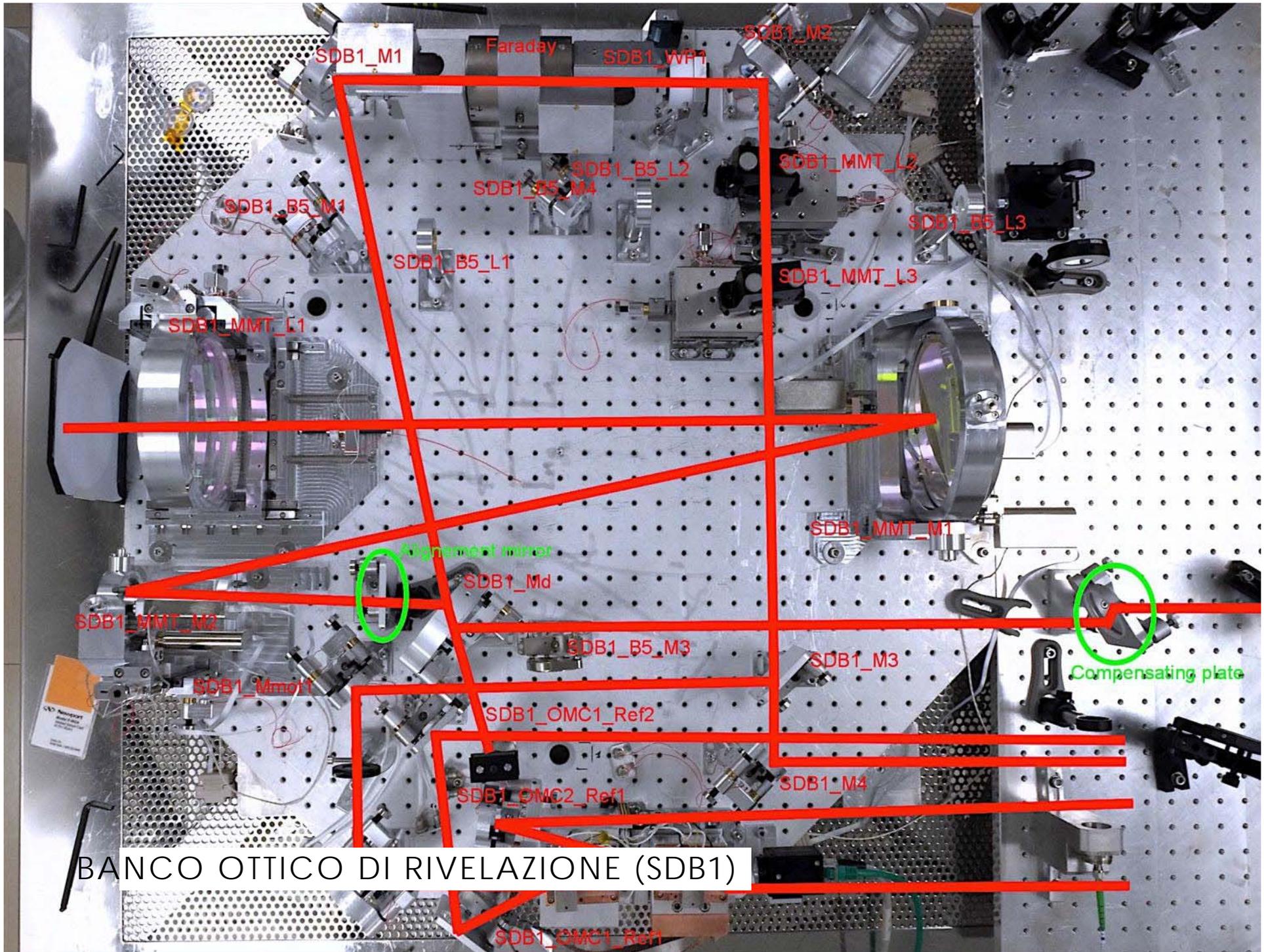
SUPERATTENUATORI

SA upgrade in progress.
BS completed, WI close to completion.





SPECCHIO CENTRALE SOSPESO



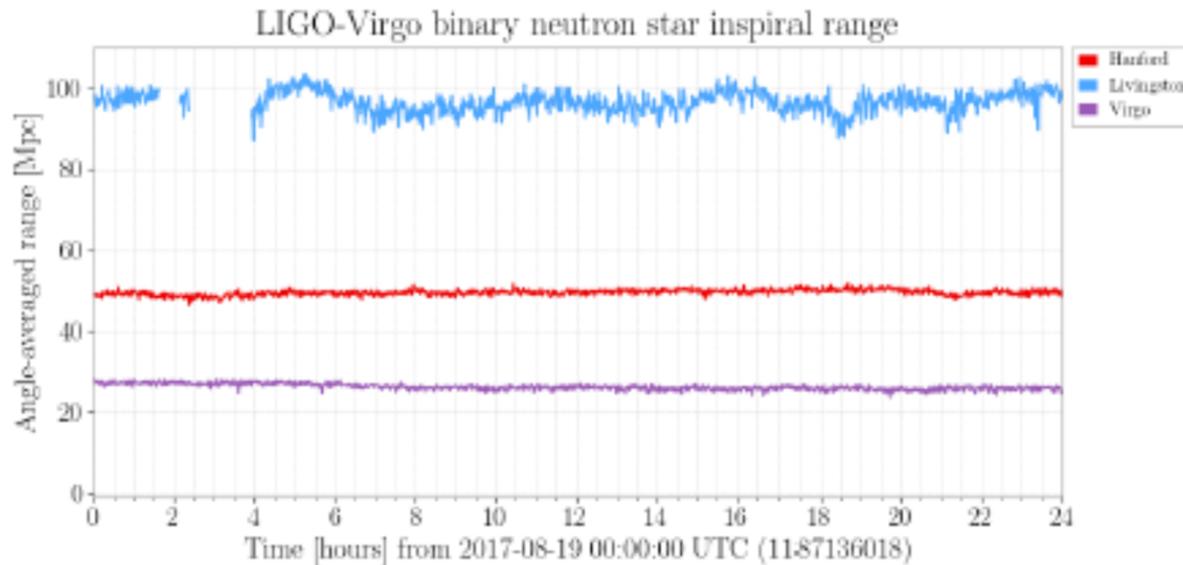
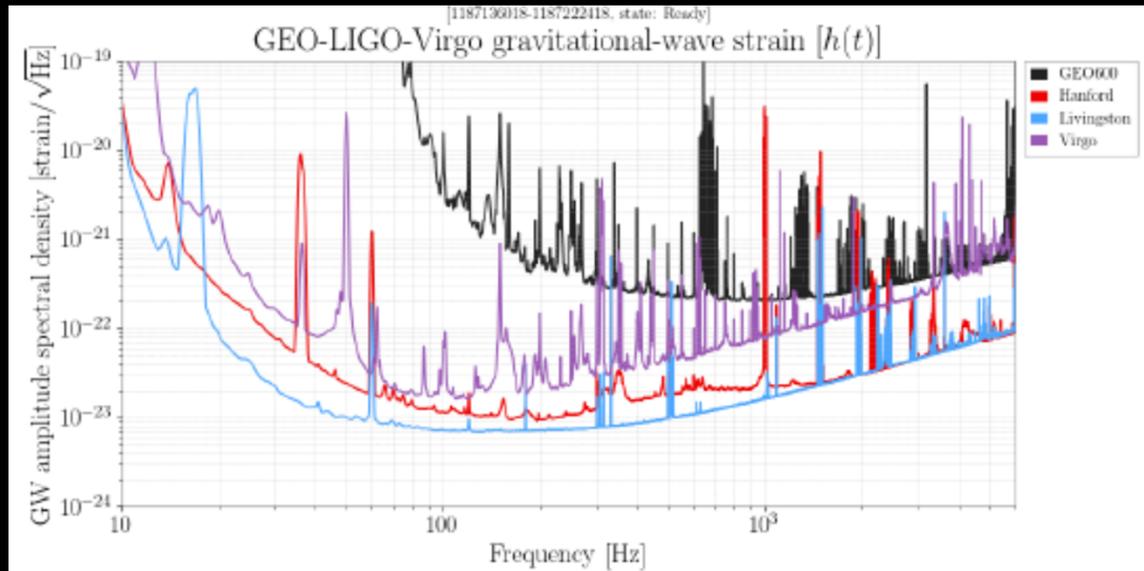
BANCO OTTICO DI RIVELAZIONE (SDB1)





Sensibilità durante il run O2

Rumore degli interferometri GEO600 Virgo LIGO Hanford e Livingston



“Orizzonte” per sistemi binari di stelle di neutron per Virgo LIGO Hanford e Livingston

Sensibilità per la rete globale

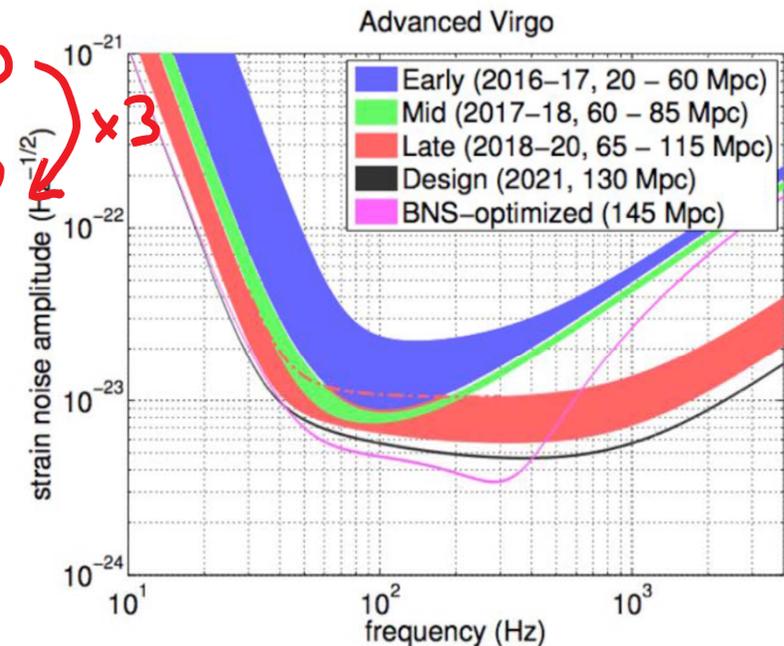
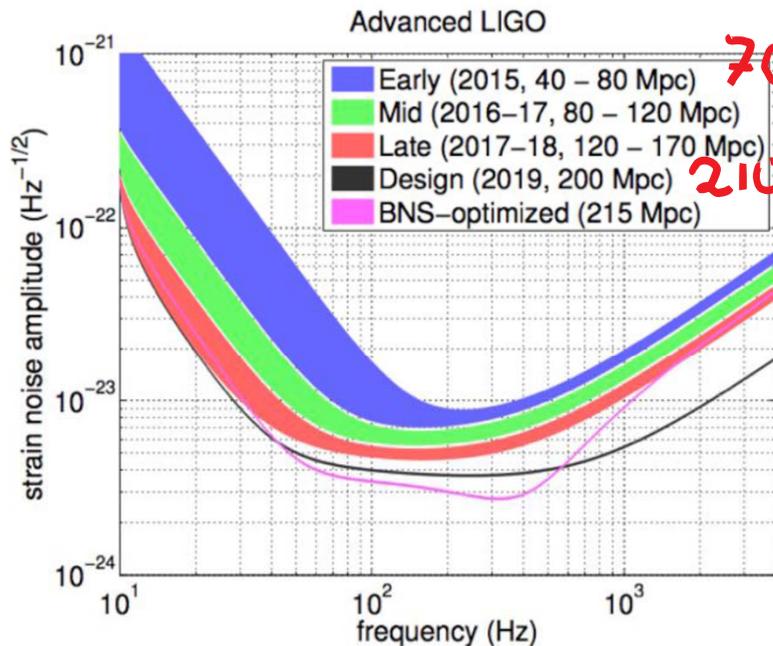
Prospects for Localization of Gravitational Wave Transients by the Advanced LIGO and Advanced Virgo Observatories

J. Aasi¹, J. Abadie¹, B. P. Abbott¹, R. Abbott¹, T. D. Abbott², M. Abernathy³, T. Accadia⁴, F. Acernese^{5ac}, C. Adams⁶, T. Adams⁷, P. Addesso⁸, R. X. Adhikari¹, C. Affeldt^{9,10}, M. Agathos^{11a}, O. D. Aguiar¹², P. Ajith¹, B. Allen^{9,13,10}, A. Allocca^{14ac}, E. Amador Ceron¹³, D. Amariutei¹⁵, S. B. Anderson¹, W. G. Anderson¹³, K. Arai¹, M. C. Araya¹, C. Arceneaux¹⁶, S. Ast^{9,10}, S. M. Aston⁶, P. Astone^{17a}, D. Atkinson¹⁸, P. Aufmuth^{10,9}, C. Aulbert^{9,10}, L. Austin¹, B. E. Aylott¹⁹, S. Babak²⁰, P. Baker²¹, G. Ballardin²², S. Ballmer²³, Y. Bao¹⁵, J. C. Barayoga¹, D. Barker¹⁸, F. Barone^{5ac}, B. Barr³,

Volume aumenta di 3^3
Eventi 27 volte più frequenti

arXiv:1304.0670v1 [gr-qc] 2 Apr 2013

L. E.
J. Bat.
A. S.
P. T.
M.
C.
R. B.
M. Ca.
S. Chi.
H.
F. Cl.
A. Co.
S.
M. D.
W.
S. Dh.
J. C.
S. S. Eikenberry¹⁹, G. Endrőczy²⁰, R. Engel¹, R. Essick²⁴, T. Etzel¹, K. Evans⁹, M. Evans²⁴, T. Evans⁹,



GLI EVENTI

Centodue anni fa
1916

Näherungsweise Integration der Feldgleichungen
der Gravitation.

VON A. EINSTEIN.

Bei der Behandlung der meisten speziellen (nicht prinzipiellen) Probleme auf dem Gebiete der Gravitationstheorie kann man sich damit begnügen, die $g_{\alpha\beta}$ in erster Näherung zu berechnen. Dabei bedient man sich mit Vorteil der imaginären Zeitvariable $x_4 = it$ aus denselben Gründen wie in der speziellen Relativitätstheorie. Unter „erster Näherung“ ist dabei verstanden, daß die durch die Gleichung

$$g_{\alpha\beta} = -\delta_{\alpha\beta} + \gamma_{\alpha\beta} \quad (1)$$



Albert Einstein

Näherungsweise Integration der Feldgleichungen der Gravitation, Berlin 22.6.1916

Integrazione approssimata delle equazioni di campo della gravitazione

L'anno scorso 2016

PRL 116, 061102 (2016)

Selected for a Viewpoint in *Physics*
PHYSICAL REVIEW LETTERS

week ending
12 FEBRUARY 2016



Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger

B. P. Abbott *et al.**

(LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration)

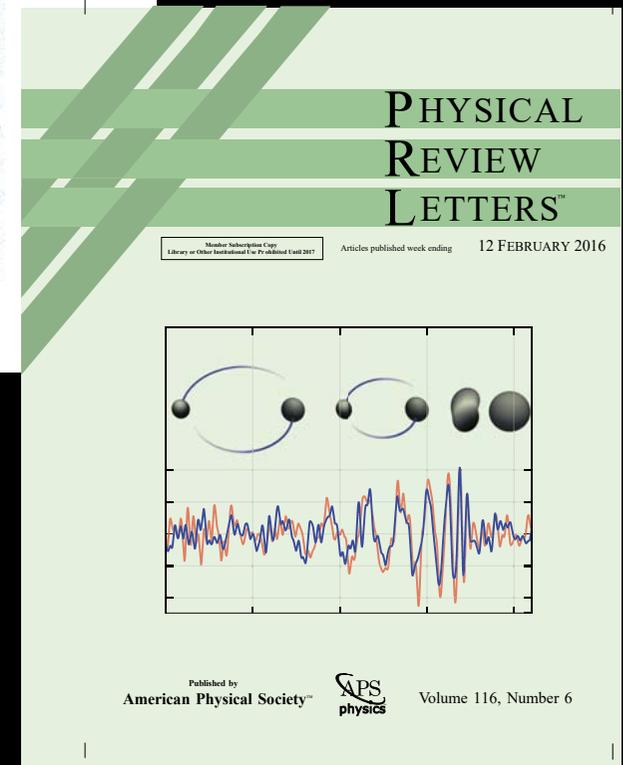
(Received 21 January 2016; published 11 February 2016)

On September 14, 2015 at 09:50:45 UTC the two detectors of the Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory simultaneously observed a transient gravitational-wave signal. The signal sweeps upwards in frequency from 35 to 250 Hz with a peak gravitational-wave strain of 1.0×10^{-21} . It matches the waveform predicted by general relativity for the inspiral and merger of a pair of black holes and the ringdown of the resulting single black hole. The signal was observed with a matched-filter signal-to-noise ratio of 24 and a false alarm rate estimated to be less than 1 event per 203 000 years, equivalent to a significance greater than 5.1σ . The source lies at a luminosity distance of 410_{-180}^{+160} Mpc corresponding to a redshift $z = 0.09_{-0.04}^{+0.03}$. In the source frame, the initial black hole masses are $36_{-4}^{+5} M_{\odot}$ and $29_{-4}^{+4} M_{\odot}$, and the final black hole mass is $62_{-4}^{+4} M_{\odot}$, with $3.0_{-0.5}^{+0.5} M_{\odot} c^2$ radiated in gravitational waves. All uncertainties define 90% credible intervals. These observations demonstrate the existence of binary stellar-mass black hole systems. This is the first direct detection of gravitational waves and the first observation of a binary black hole merger.

DOI: 10.1103/PhysRevLett.116.061102

Scaricato 229,000 dal sito della rivista Physical Review Letters nelle prime 24 ore

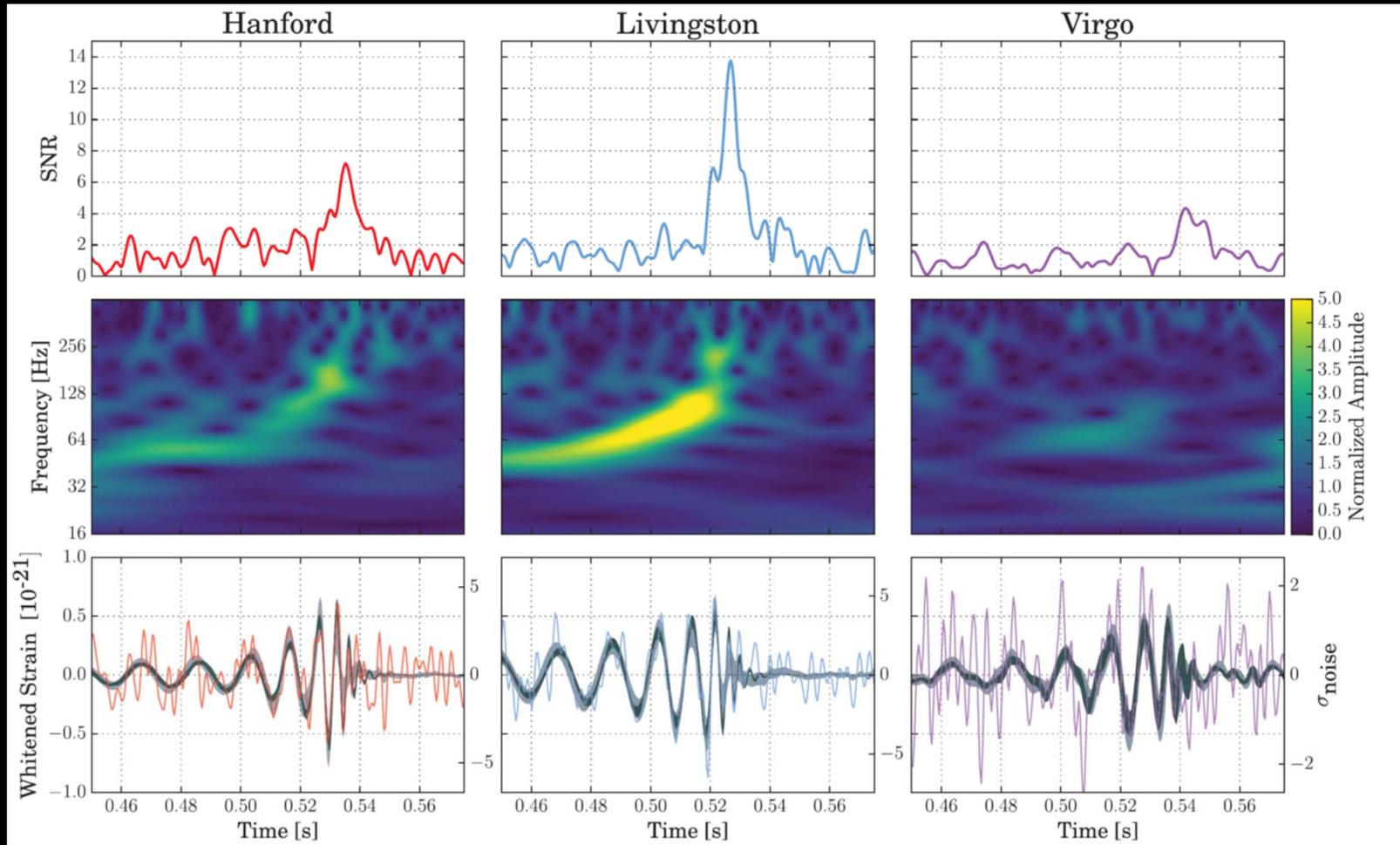
Phys. Rev. Lett. 116, 061102 (2016)



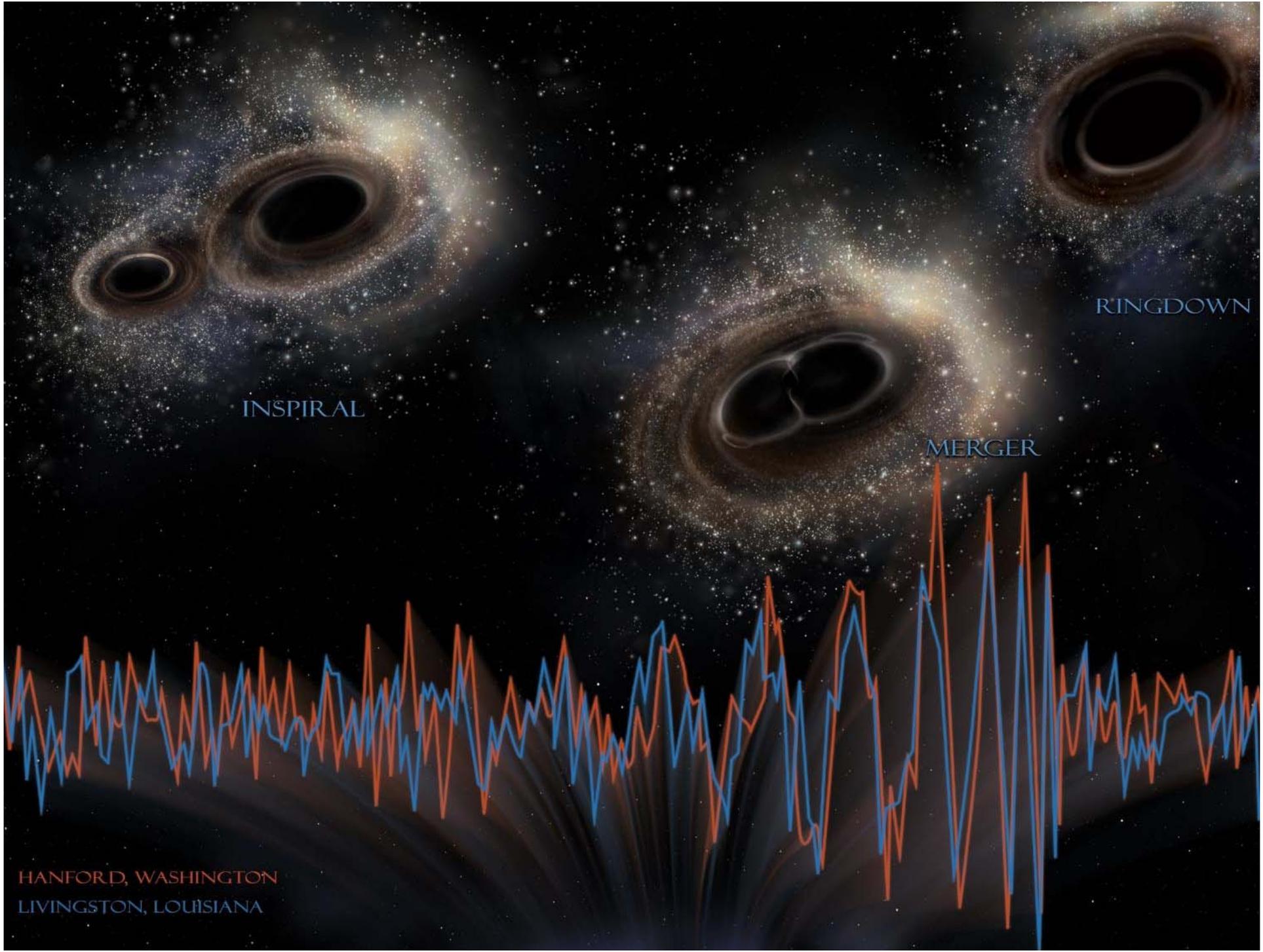
A false-color plot showing the detection of a gravitational wave event. The plot features a prominent, bright yellow and green signal that curves across the frame, set against a dark blue background with a faint grid of stars. The signal is most intense in the lower-left quadrant and extends towards the upper-right.

L'EVENTO GW170814
AL TEMPO 2017-08-14 12:30:43 CEST

14 Agosto 2017 – 12:30:43 CEST



Evento segnalato automaticamente dopo 3 minuti dalla registrazione



INSPIRAL

MERGER

RINGDOWN

HANFORD, WASHINGTON
LIVINGSTON, LOUISIANA

Osservazione del passaggio di onde gravitazionali

Dopo più di cinquant'anni di sviluppi riusciamo a registrare il flebile segnale di eventi drammatici

Avvenuti più di un miliardo di anni fa

Lontani più di un miliardo di anni-luce

Due buchi neri di decine di masse solari stavano orbitando l'uno intorno all'altro a metà della velocità della luce avvicinandosi sempre di più

Si sono irresistibilmente attratti fino a formare un unico oggetto

Una porzione di spazio tempo ha risuonato come una campana per poi smorzarsi e diventare silente

Una energia pari a diverse masse solari si è dispersa nell'Universo

$$E = mc^2$$

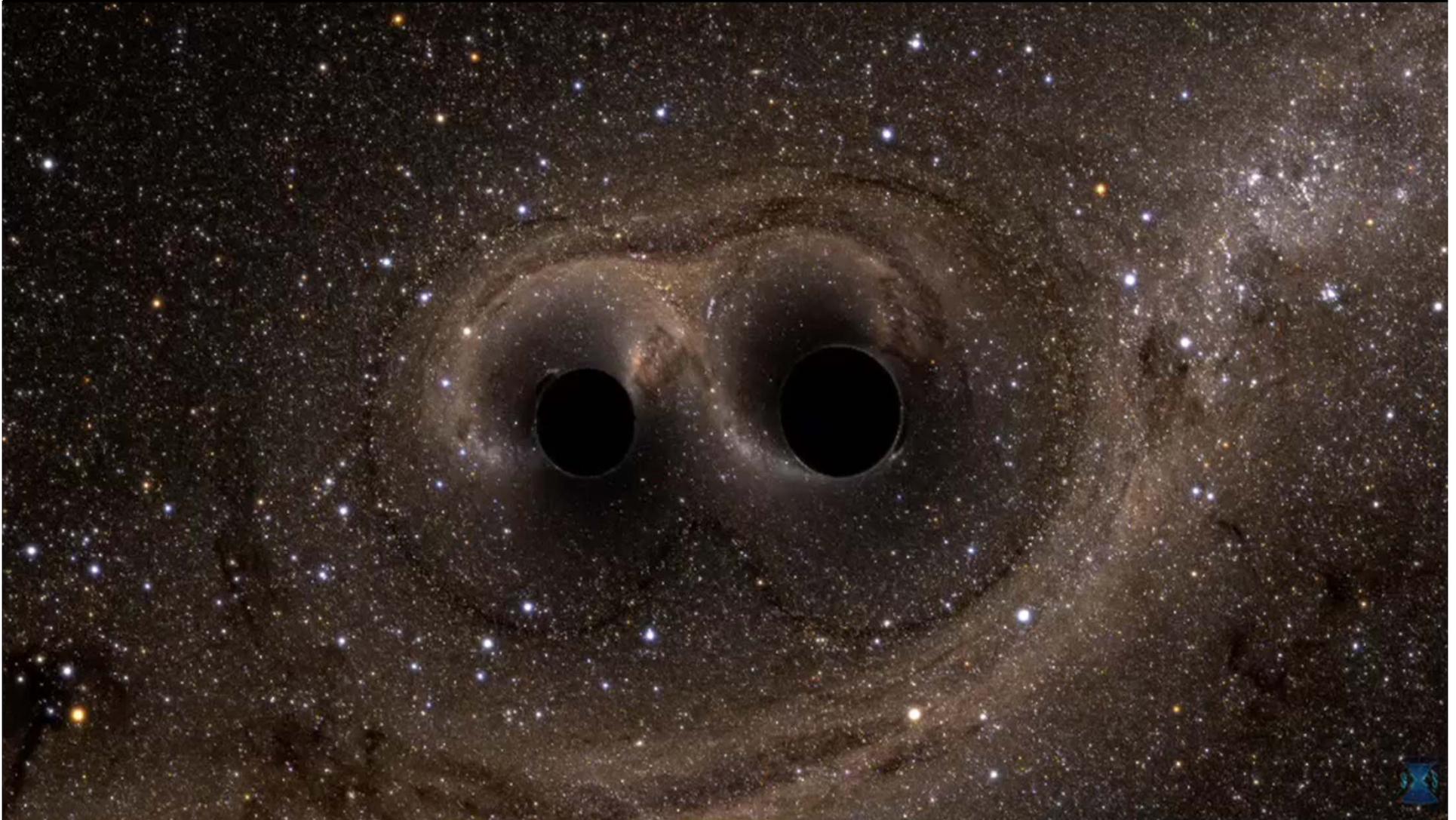
I suoni della gravità

Parametri della sorgente per GW170814

- Usando famiglie di segnali ottenute da simulazioni numeriche di coalescenze di buchi neri per determinare i parametri del sistema
- Oltre alle masse si ottiene la distanza e il momento angolare del buco nero risultante

Primary black hole mass m_1	$30.5^{+5.7}_{-3.0} M_{\odot}$
Secondary black hole mass m_2	$25.3^{+2.8}_{-4.2} M_{\odot}$
Chirp mass \mathcal{M}	$24.1^{+1.4}_{-1.1} M_{\odot}$
Total mass M	$55.9^{+3.4}_{-2.7} M_{\odot}$
Final black hole mass M_f	$53.2^{+3.2}_{-2.5} M_{\odot}$
Radiated energy E_{rad}	$2.7^{+0.4}_{-0.3} M_{\odot} c^2$
Peak luminosity ℓ_{peak}	$3.7^{+0.5}_{-0.5} \times 10^{56} \text{ erg s}^{-1}$
Effective inspiral spin parameter χ_{eff}	$0.06^{+0.12}_{-0.12}$
Final black hole spin a_f	$0.70^{+0.07}_{-0.05}$
Luminosity distance D_L	$540^{+130}_{-210} \text{ Mpc}$
Source redshift z	$0.11^{+0.03}_{-0.04}$

Due buchi neri
su sfondo di cielo stellato







Piccolo ma irresistibilmente attraente

Un buco nero, di massa pari a 53 Soli e 360 km di diametro si troverebbe a 40000 km, più vicino alla Terra che alla Luna

Non arriveremo mai a vedere una situazione simile

La forza di gravità avrebbe già dilaniato noi, sgretolato la nostra casa, la Terra intera

E comunque l'istante successivo saremmo inghiottiti

Una alchimia nera cancella ogni traccia di struttura vivente, di composto chimico, di elemento atomico per formare un ammasso indistinto di neutroni o forse altro che non conosciamo

A composite image showing a galaxy with two prominent black holes. The galaxy is a barred spiral, with a central bar and two distinct spiral arms. Two large, dark, circular regions are superimposed on the galaxy, representing black holes. The background is a dense field of stars, with some stars appearing as bright points and others as fainter, more diffuse spots. The overall color palette is dark, with the galaxy's dust and stars providing the primary light source.

IMPLICAZIONI DELLE
OSSERVAZIONI

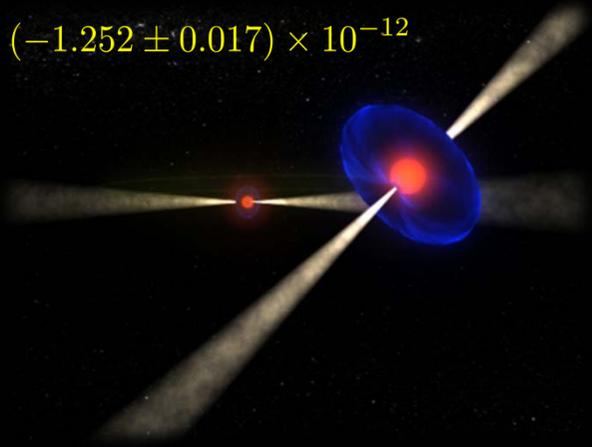
Implicazioni per l'Astrofisica

Fatti principali

- I sistemi binari di buchi neri esistono!
 - Si formano e collassano su una scala di tempo a noi accessibile
 - In precedenza si prevedevano da 0 a 1000 eventi / Gpc³ / anno
 - Ora possiamo escludere l'estremità più bassa: tasso > 1 / Gpc³ / anno
 - Le masse ($M > 20 M_{\odot}$) sono grandi rispetto a quelle di buchi neri noti
- Progenitori sono
 - Presumibilmente **pesanti**, $M > 60 M_{\odot}$
 - Probabilmente con **bassa metallicità**, $Z < 0.25 Z_{\odot}$
- Il redshift misurato $z \sim 0.1$
- Modelli con bassa metallicità possono produrre coalescenze a basso z con frequenza consistente con le nostre osservazioni

GW150914: una sonda per il regime di gravità forte

$$\dot{T}_b = (-1.252 \pm 0.017) \times 10^{-12}$$



Binaria più relativistica nota fino da oggi: J0737-3039

Raggio di Schwarzschild: $R_s \sim 4.8\text{km}$

Distanza tra le due pulsar: $d \sim 9 \times 10^5\text{km}$

Velocità orbitale: $\left(\frac{v}{c}\right)^2 \sim 4 \times 10^{-6} \sim \frac{R_s}{d}$

Coalescenza: tra $85 \times 10^6\text{yr}$

GW150914

Raggio di Schwarzschild: $R_s \sim 90\text{km}$

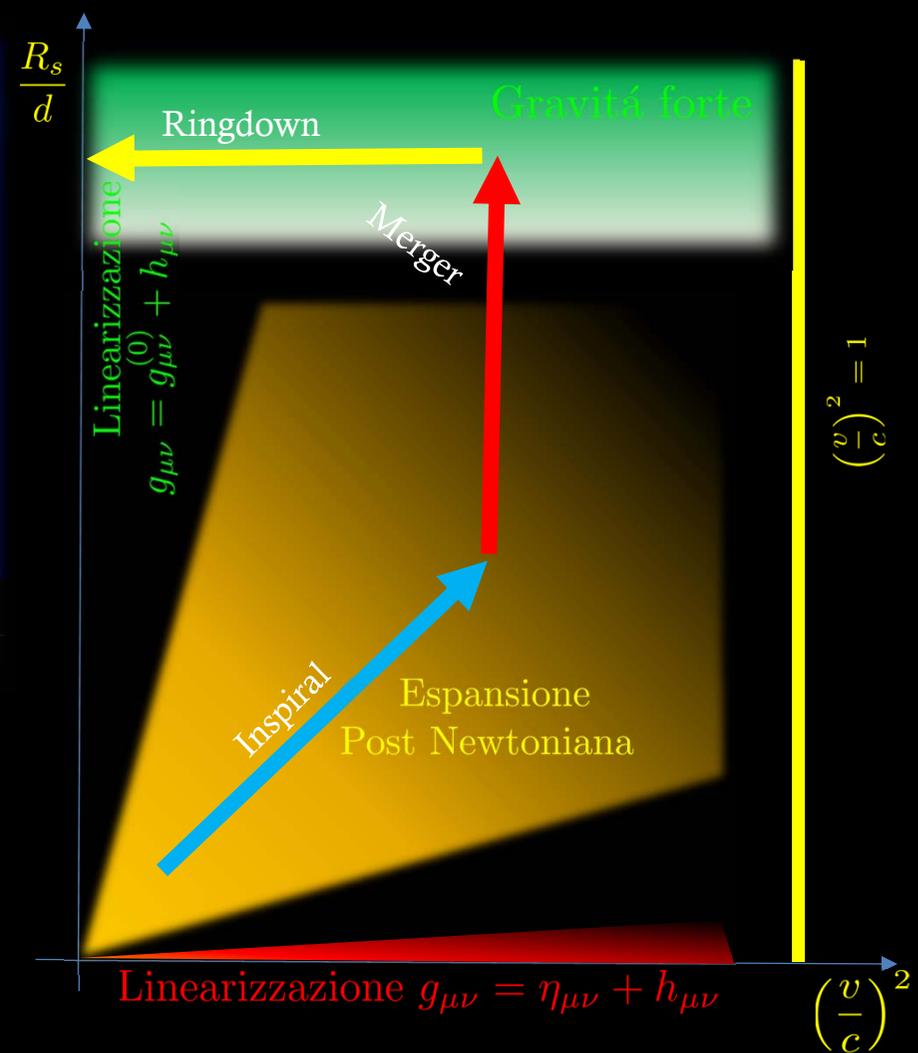
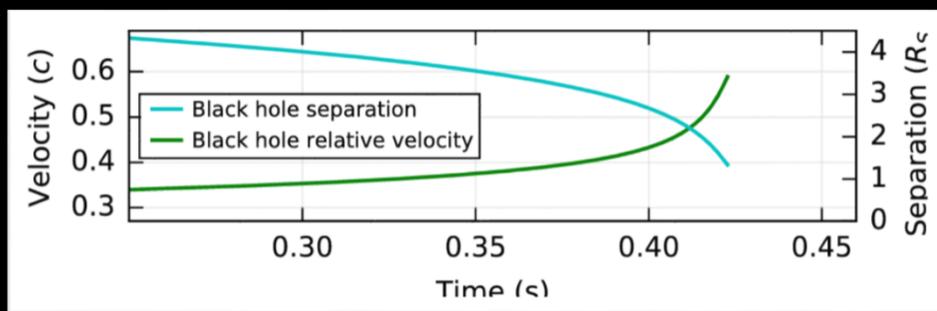
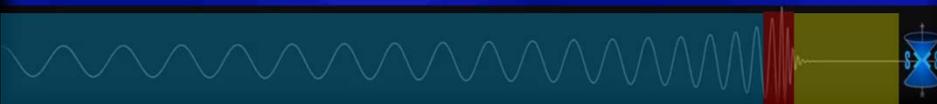
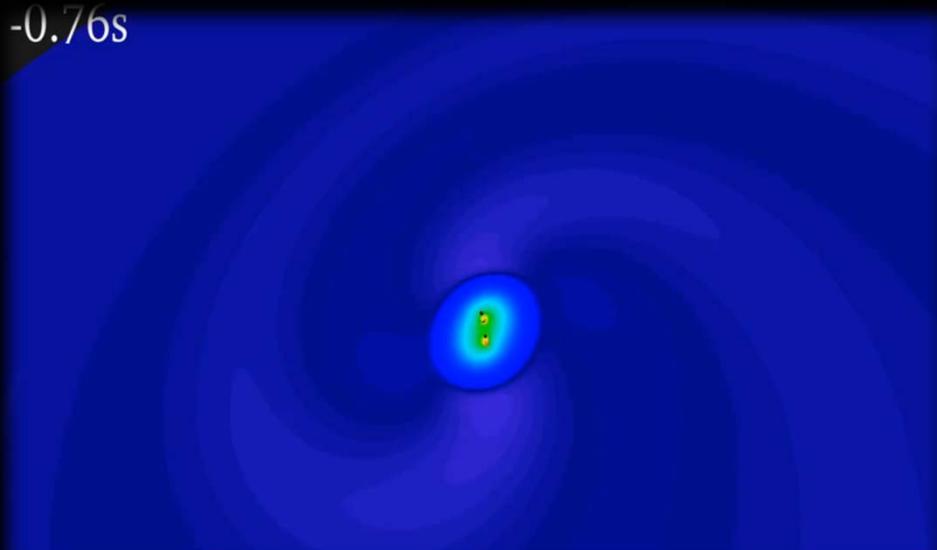
Distanza tra le due pulsar: $d \gtrsim 180\text{km}$

Velocità orbitale: $\left(\frac{v}{c}\right)^2 \lesssim 0.36$



$$-1 \lesssim \dot{T}_b \lesssim -0.1$$

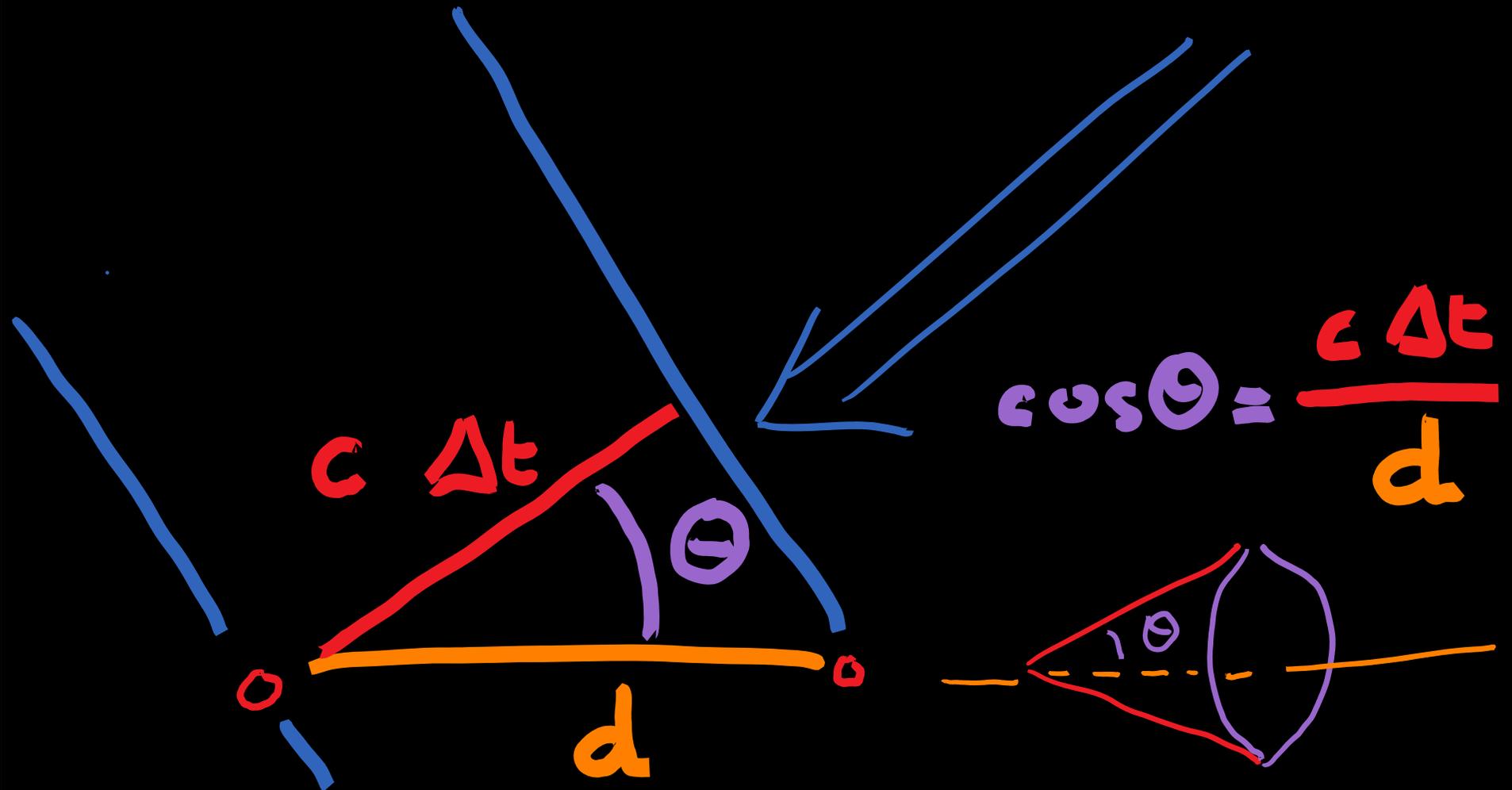
-0.76s



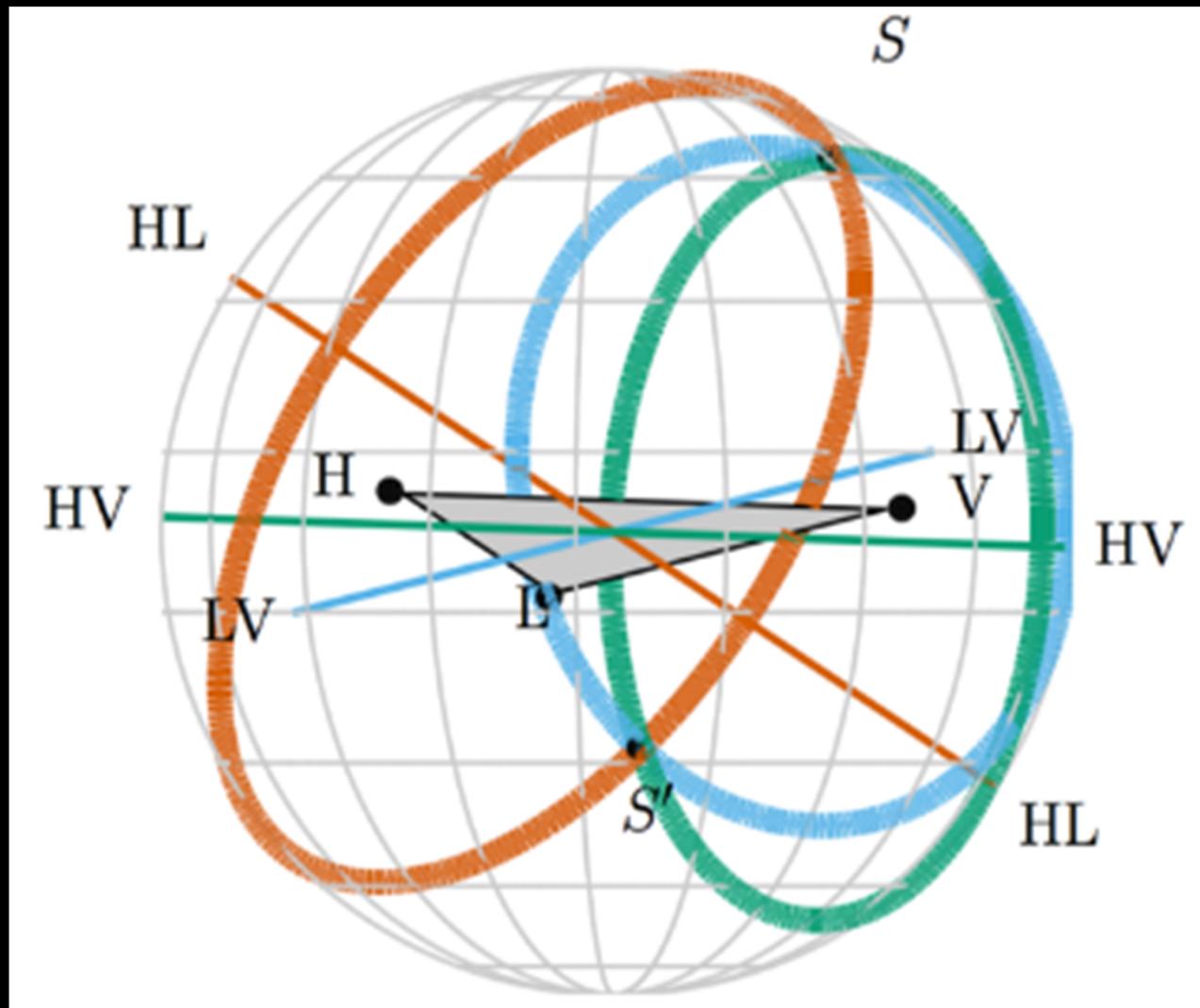
LA NUOVA ASTRONOMIA

Posizione della sorgente con due interferometri

onda gravitazionale



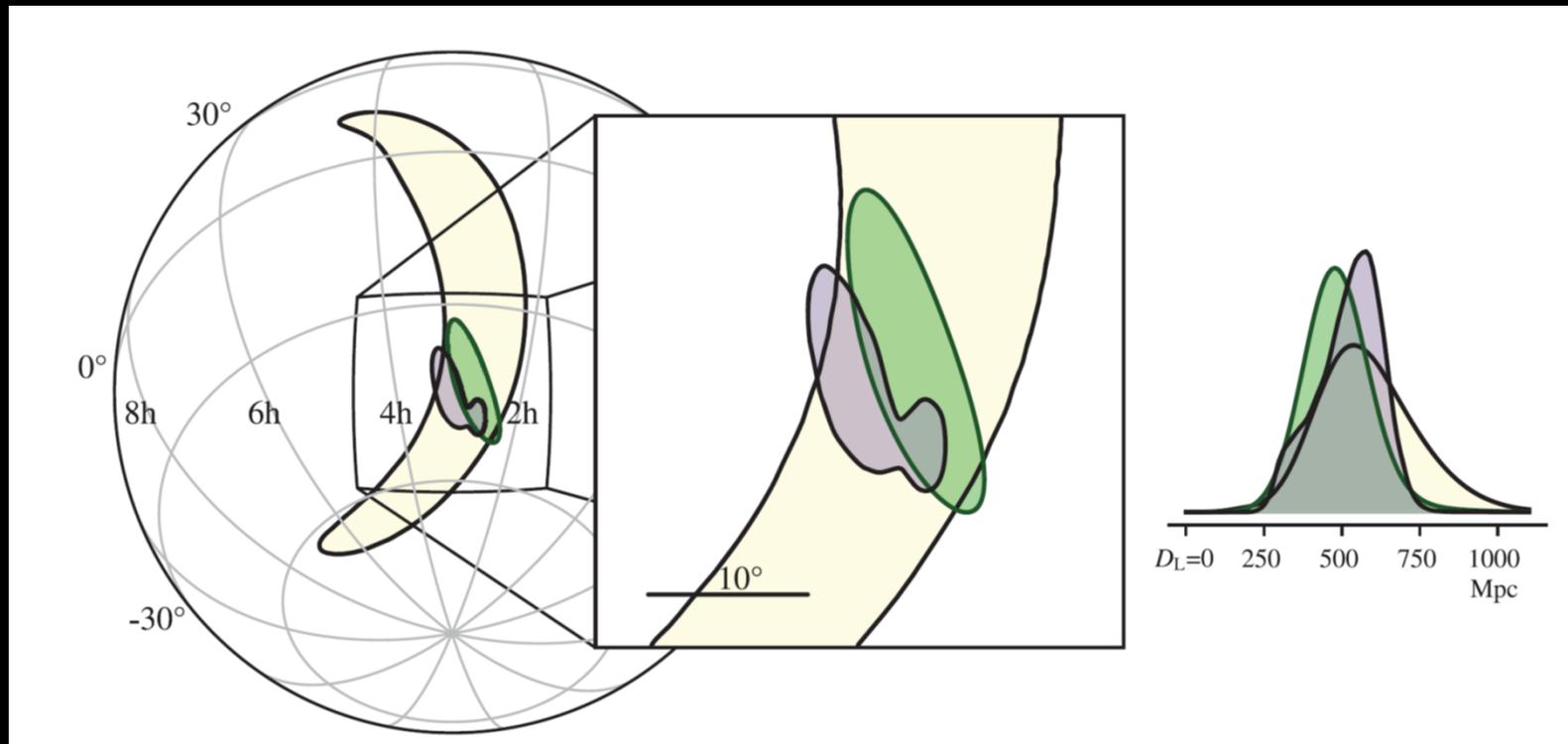
Localizzazione della sorgente



Posizione nel cielo

Le differenze tra i tempi di arrivo permettono di individuare la direzione di provenienza

L'ampiezza permette una misura della distanza



Una rete mondiale di osservatori

Earth

Space

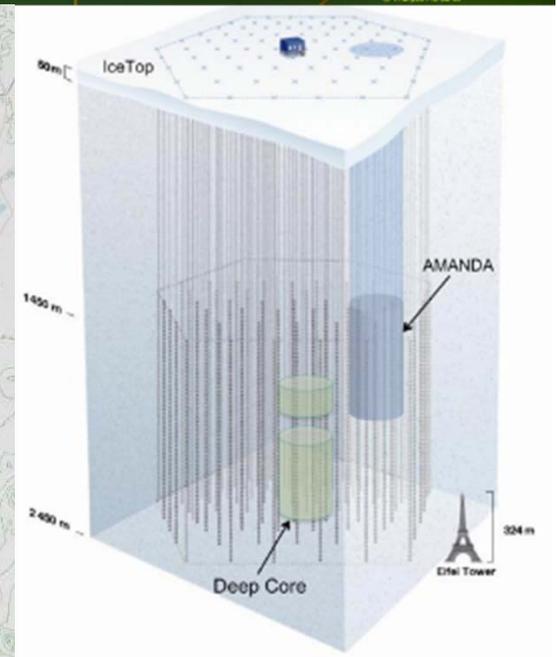
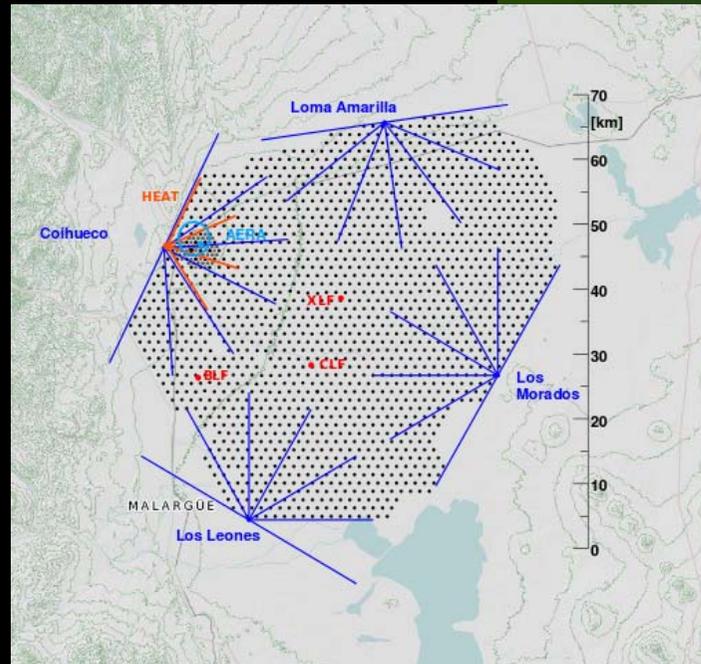
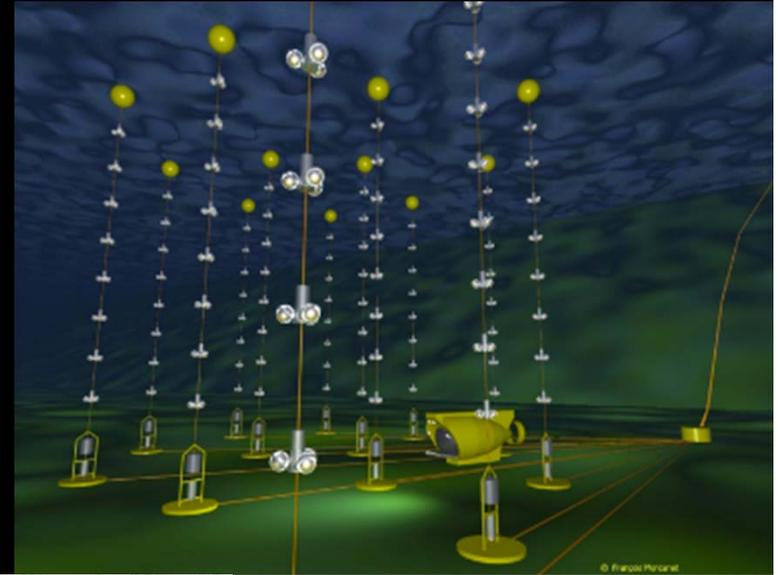


Segnali da neutrini

IceCube, Antares, Auger hanno cercato ν in coincidenza con gli eventi

Entro una finestra di 500 s dall'evento GW : si tiene conto dei limiti sulla massa di neutrini leggeri, di alta energia

Nessun neutrino osservato in direzione della sorgente



GW170817/GRB170817A

Situazione al 15 Agosto 2017

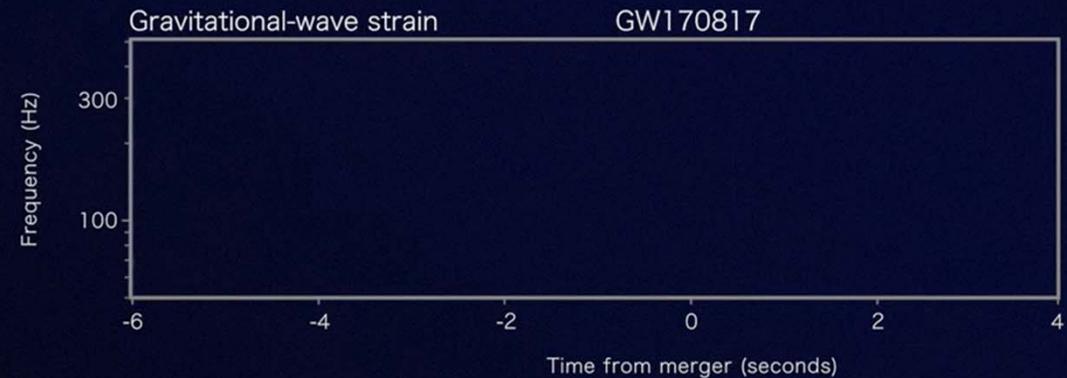
- Dopo anni di lavoro le collaborazioni LIGO e Virgo erano pronte per rivelare deboli segnali provenienti dai luoghi più remoti dell'Universo
- Un primo segnale era stato registrato il 15 settembre 2015, da un sistema di 36 e 29 masse solari
- In circa un anno di presa dati (O1 e O2) erano stati pubblicati 3 eventi certi di sistemi binari di buchi neri e uno molto probabile, mentre ne risultavano registrati almeno altri due
- **Era iniziato lo studio delle Onde Gravitazionali**

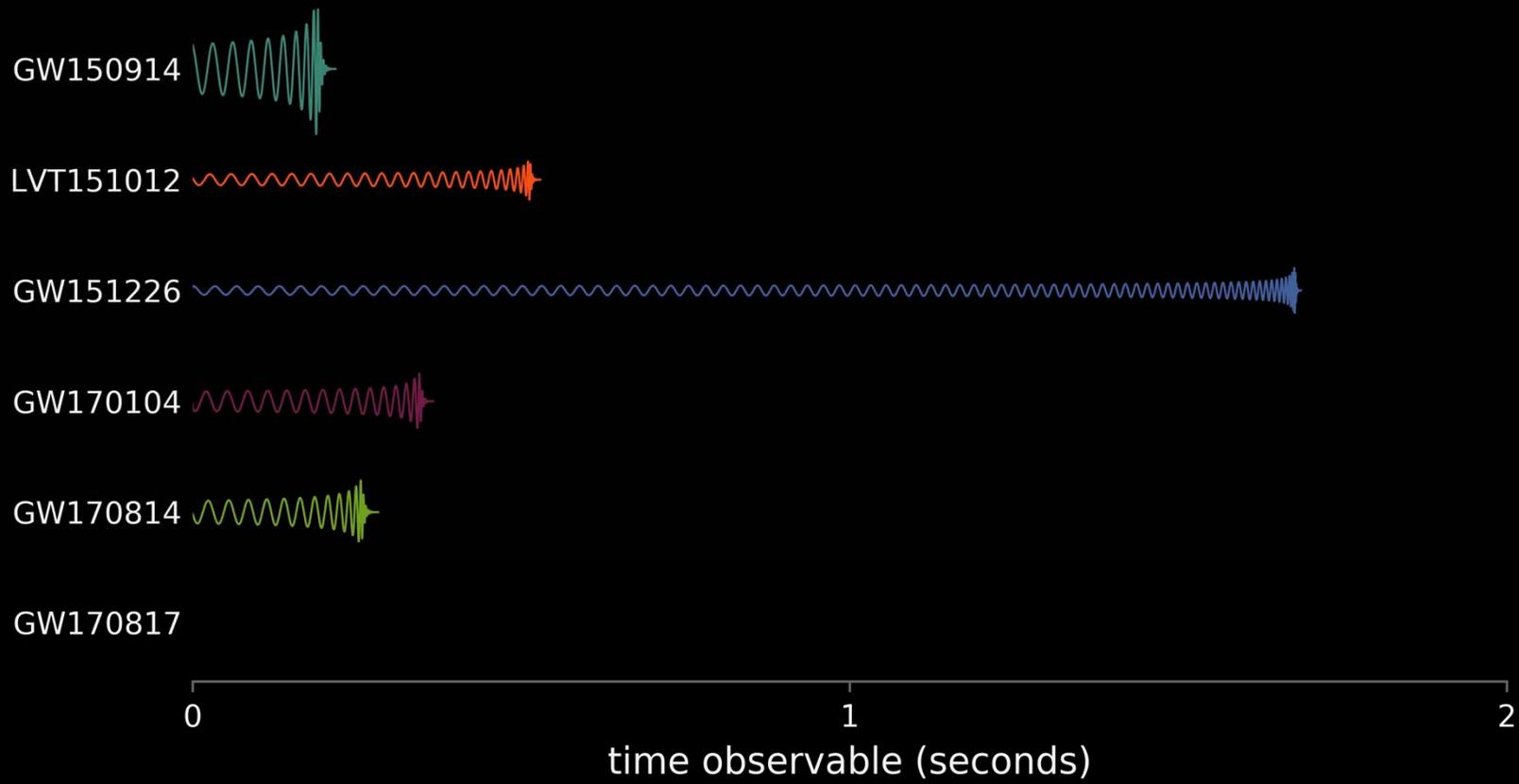
Ore 14:41:04 del 17 agosto 2017

Fermi

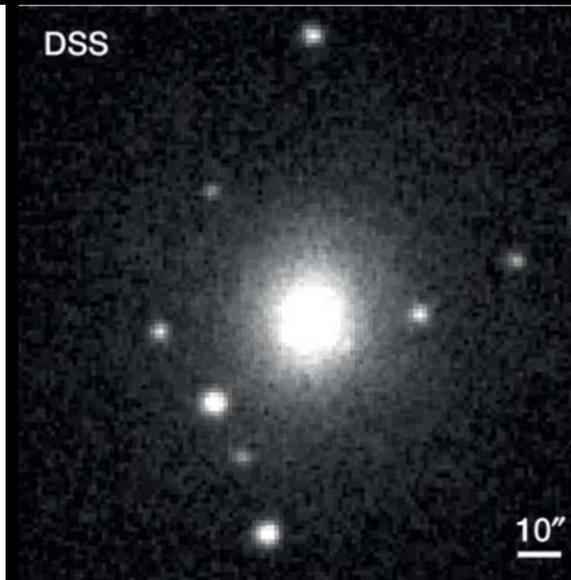
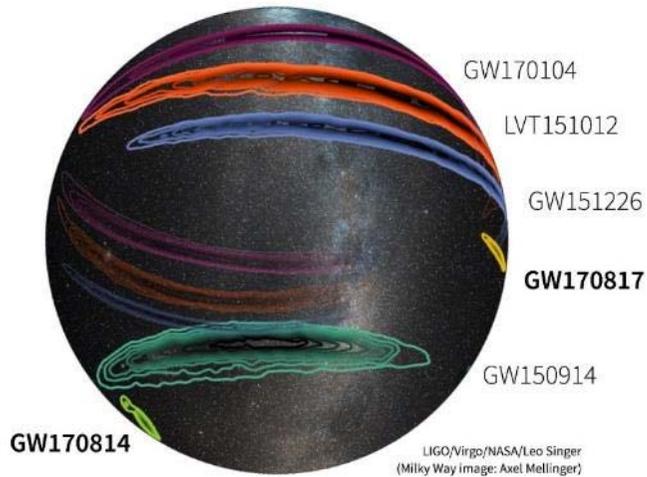


LIGO





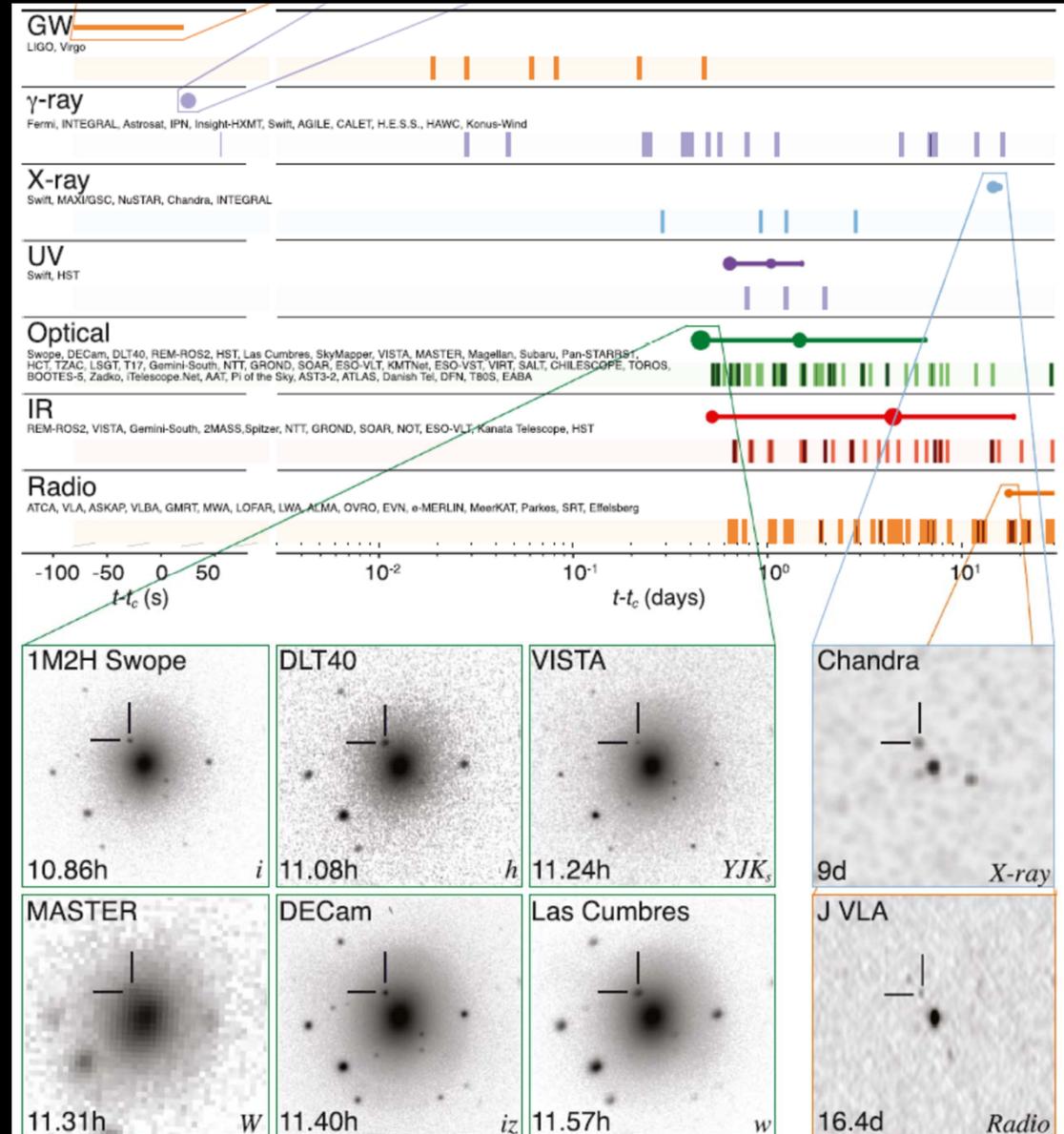
Localizzazione nel cielo



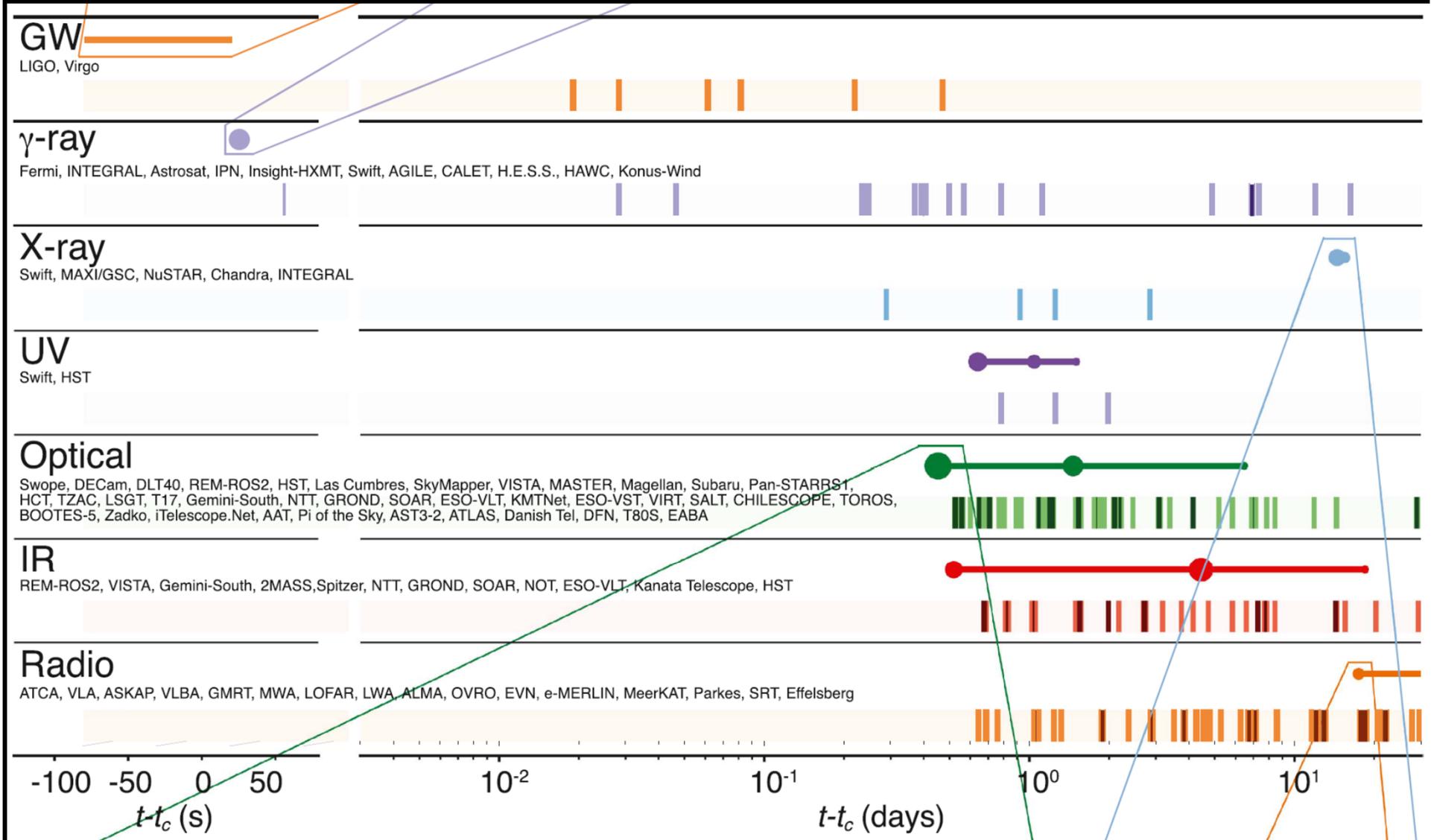
- Dopo 10.9 ore (il tempo che cali la notte in Cile) Swope, confrontando le nuove immagini con i cataloghi di galassie dell'area, trova una sorgente nuova, una «kilonova»

La successione delle osservazioni

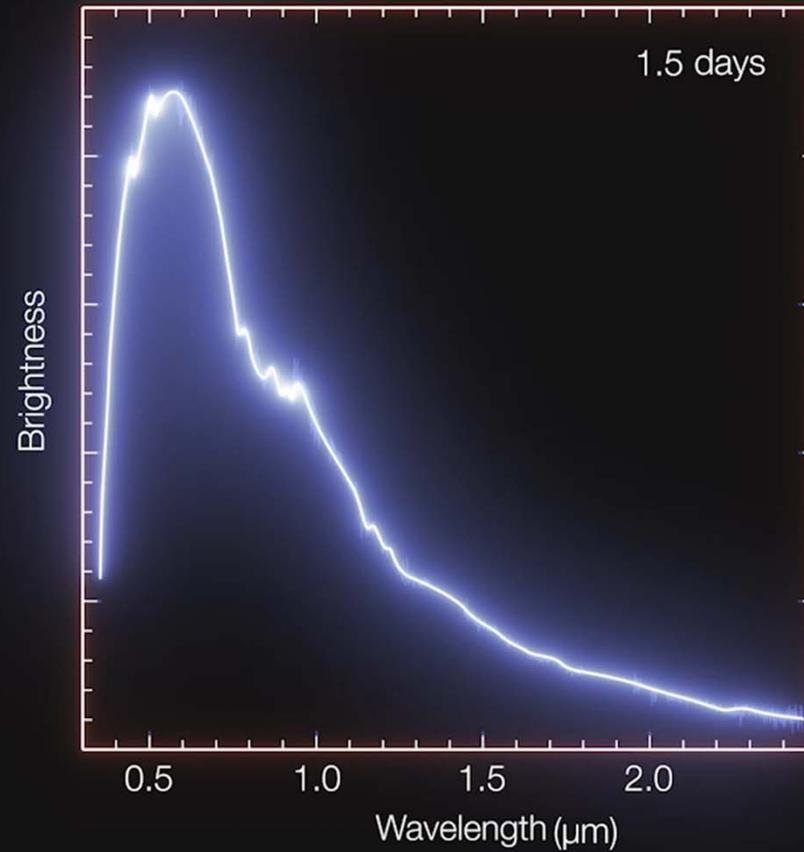
Iniziano le onde gravitazionali con i gamma
 Poi i raggi X e l'UV
 Luce visibile
 Infrarosso
 Onde radio



Gli osservatori



L'evoluzione della kilonova



La kilonova diventa rossa e si raffredda

SSS17a



2017 August 17



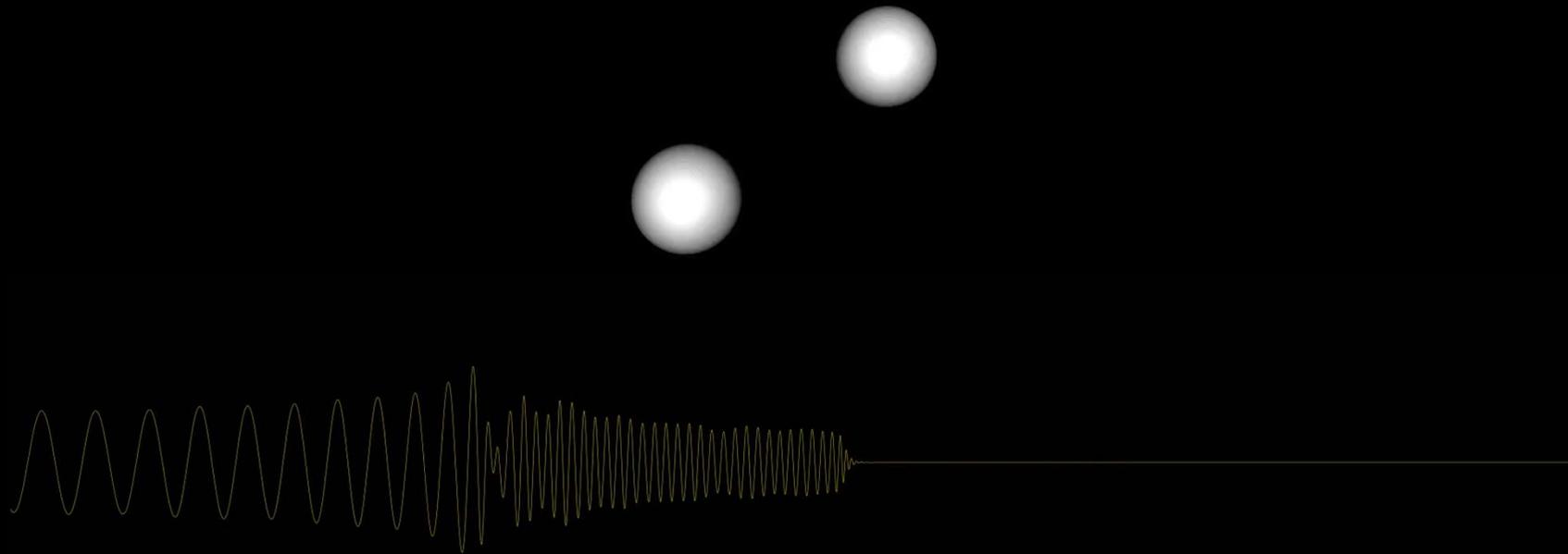
2017 August 21

Swope & Magellan Telescopes

Cosa è avvenuto?

Il segnale gravitazionale e gli istanti successivi

$t = 0.0$ ms

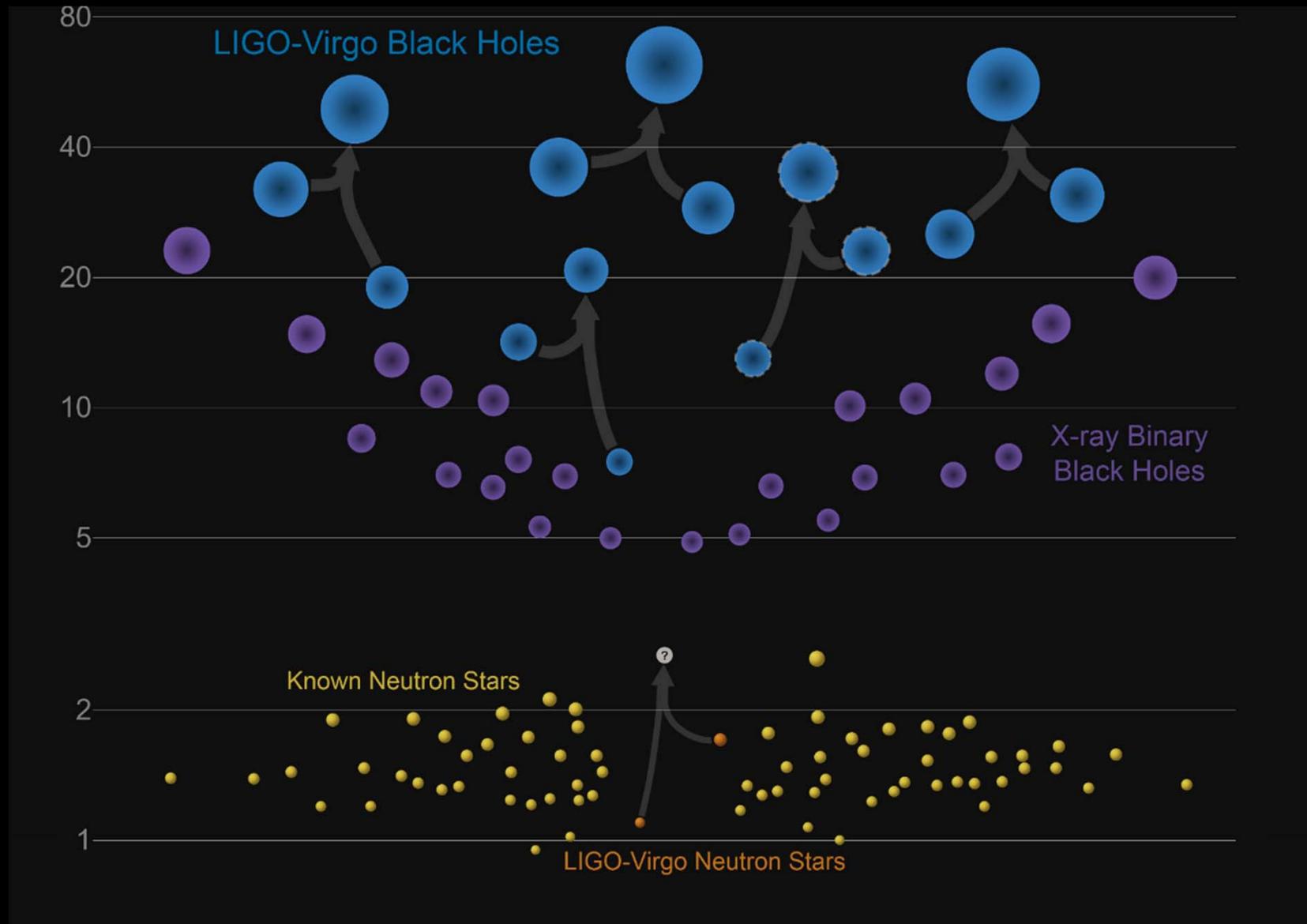


La materia eiettata

- L'alta densità di neutroni favorisce la fusione atomica e la creazione di elementi anche molto pesanti
- L'oro e il platino o anche l'uranio sono prodotti principalmente da questo processo

Legend																	
Big Bang fusion	Dying low-mass stars																
Exploding massive stars	Human synthesis																
Cosmic ray fission	Merging neutron stars																
Exploding white dwarfs	No stable isotopes																
H (1)	He (2)																
Li (3)	Be (4)	B (5)	C (6)	N (7)	O (8)	F (9)	Ne (10)										
Na (11)	Mg (12)	Al (13)	Si (14)	P (15)	S (16)	Cl (17)	Ar (18)										
K (19)	Ca (20)	Sc (21)	Ti (22)	V (23)	Cr (24)	Mn (25)	Fe (26)	Co (27)	Ni (28)	Cu (29)	Zn (30)	Ga (31)	Ge (32)	As (33)	Se (34)	Br (35)	Kr (36)
Rb (37)	Sr (38)	Y (39)	Zr (40)	Nb (41)	Mo (42)	Tc (43)	Ru (44)	Rh (45)	Pd (46)	Ag (47)	Cd (48)	In (49)	Sn (50)	Sb (51)	Te (52)	I (53)	Xe (54)
Cs (55)	Ba (56)	Hf (72)	Ta (73)	W (74)	Re (75)	Os (76)	Ir (77)	Pt (78)	Au (79)	Hg (80)	Tl (81)	Pb (82)	Bi (83)	Po (84)	At (85)	Rn (86)	
Fr (87)	Ra (88)	La (57)	Ce (58)	Pr (59)	Nd (60)	Pm (61)	Sm (62)	Eu (63)	Gd (64)	Tb (65)	Dy (66)	Ho (67)	Er (68)	Tm (69)	Yb (70)	Lu (71)	
		Ac (89)	Th (90)	Pa (91)	U (92)	Np (93)	Pu (94)	Am (95)	Cm (96)	Bk (97)	Cf (98)	Es (99)	Fm (100)	Md (101)	No (102)	Lr (103)	

Il cimitero delle stelle



IL FUTURO

I dati sono disponibili (Open data)

- I dati di deformazione dello spazio tempo, in un intervallo di 2048 s o 4096s intorno agli eventi, sono pubblici
- Per GW170817: da -1842.43 a +205.57 s
- Sono disponibili script di analisi e tutorial
- Si prevede nei prossimi anni di pubblicare i dati di tutto il run, con una certa latenza
- <https://losc.ligo.org> LIGO Open Science Center

Arcobaleno gravitazionale

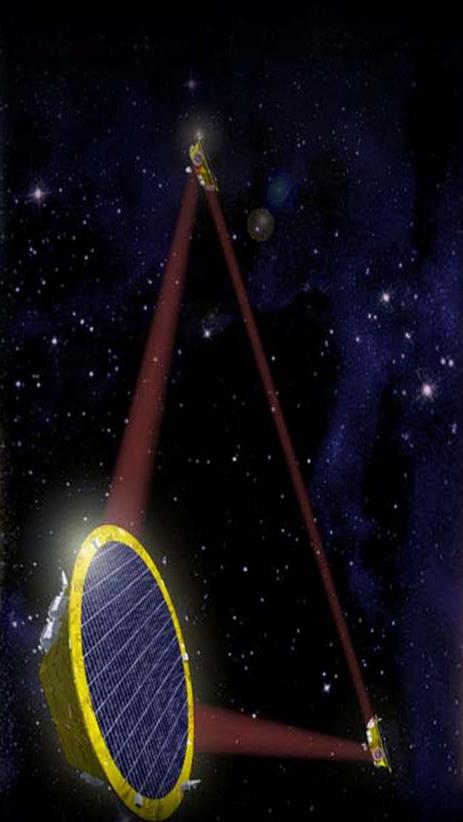
- Collegamento tra il periodo (o la lunghezza d'onda) della radiazione gravitazionale e la massa o la dimensione del sistema
- Millisecondi: decine di km, struttura della turbolenza nelle stelle di neutroni, supernovae, risonanze di buchi neri
- Secondi: decine di migliaia di masse solari o sistemi di decine di migliaia di km
- Ore: decine milioni di masse solari, sistemi di decine di milioni di km
- Anni: coda del fondo gravitazionale proveniente dal big bang
- ...
- Sistemi più massivi: ampiezza delle onde maggiore o distanza maggiore cioè più lontano nel passato

Gravitational Wave Periods

Milliseconds



Minutes
to Hours



Years
to Decades



Billions
of Years



Altre sorgenti

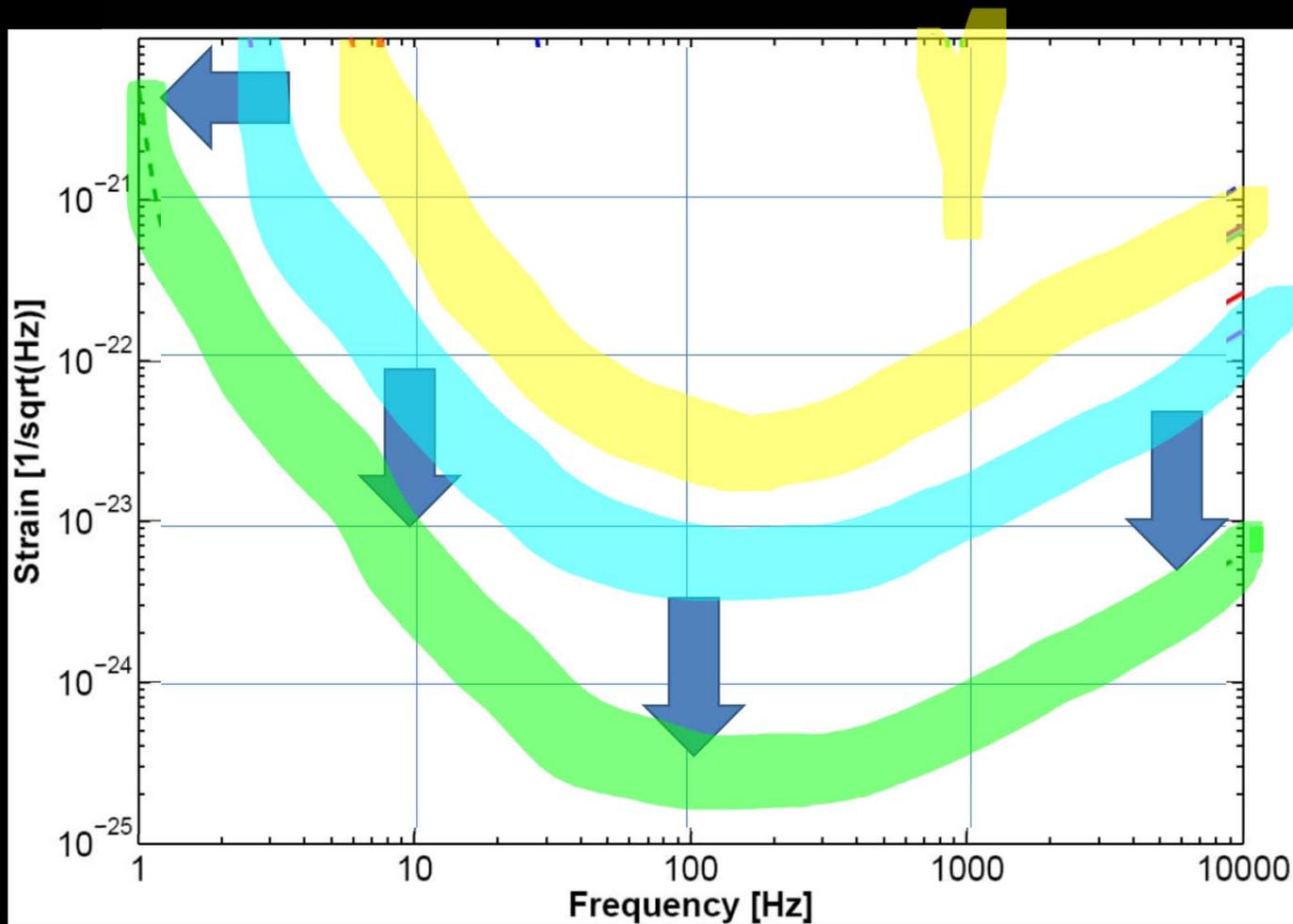
Ancora non abbiamo registrato segnali da:

Pulsar

Supernovae

Fondo stocastico astrofisico e cosmologico

Sensibilità dei rivelatori terrestri Dalle barre risonanti a ET



Barre risonanti e
prima
generazione di
interferometri

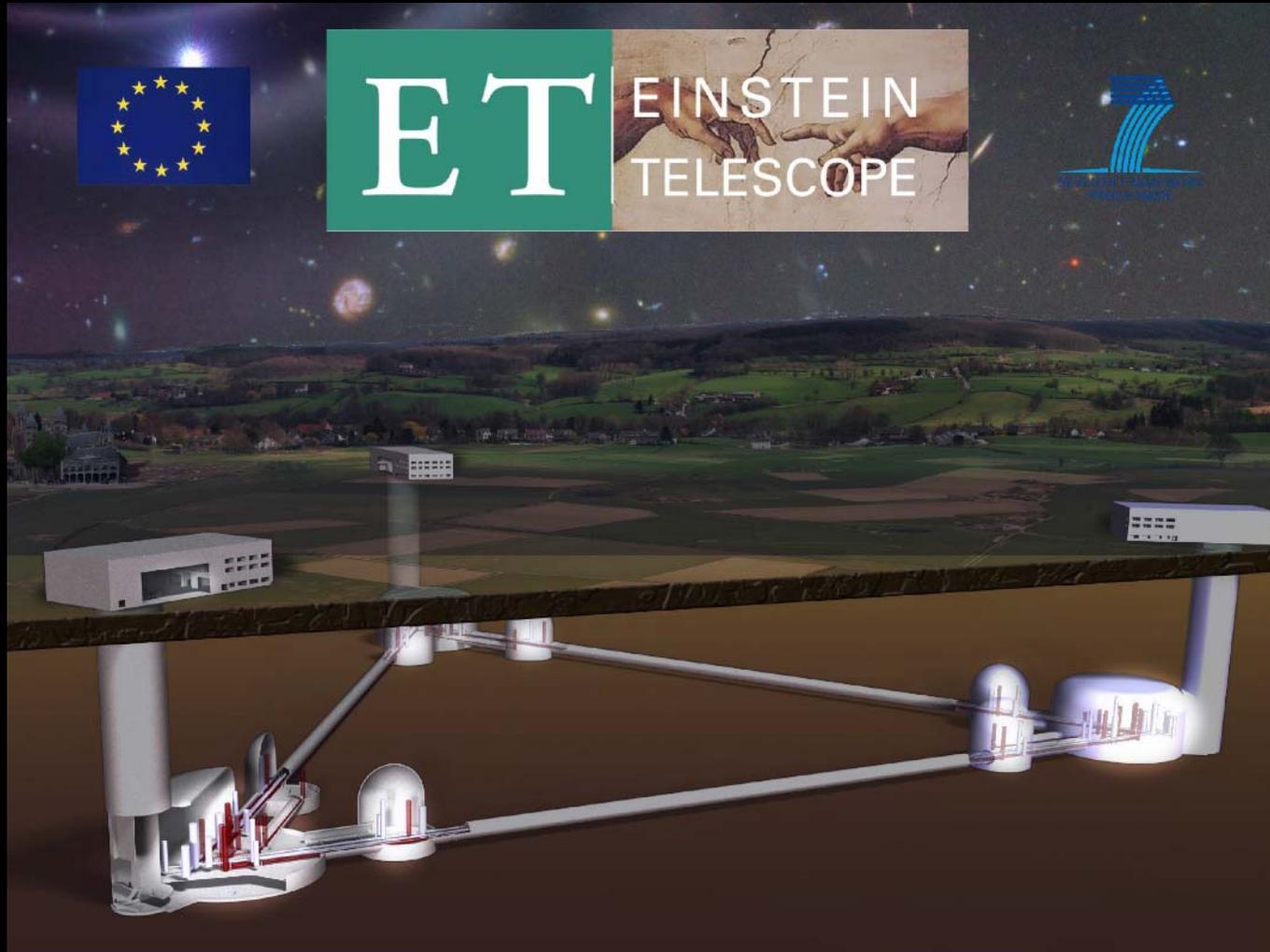
La seconda
generazione

La terza
generazione:

- Da 10 a 1 Hz
- Rumore termico ridotto 10 volte
- Rumore dei fotoni ridotto 10 volte
- Osservatorio sempre attivo

Einstein Telescope

Una idea europea



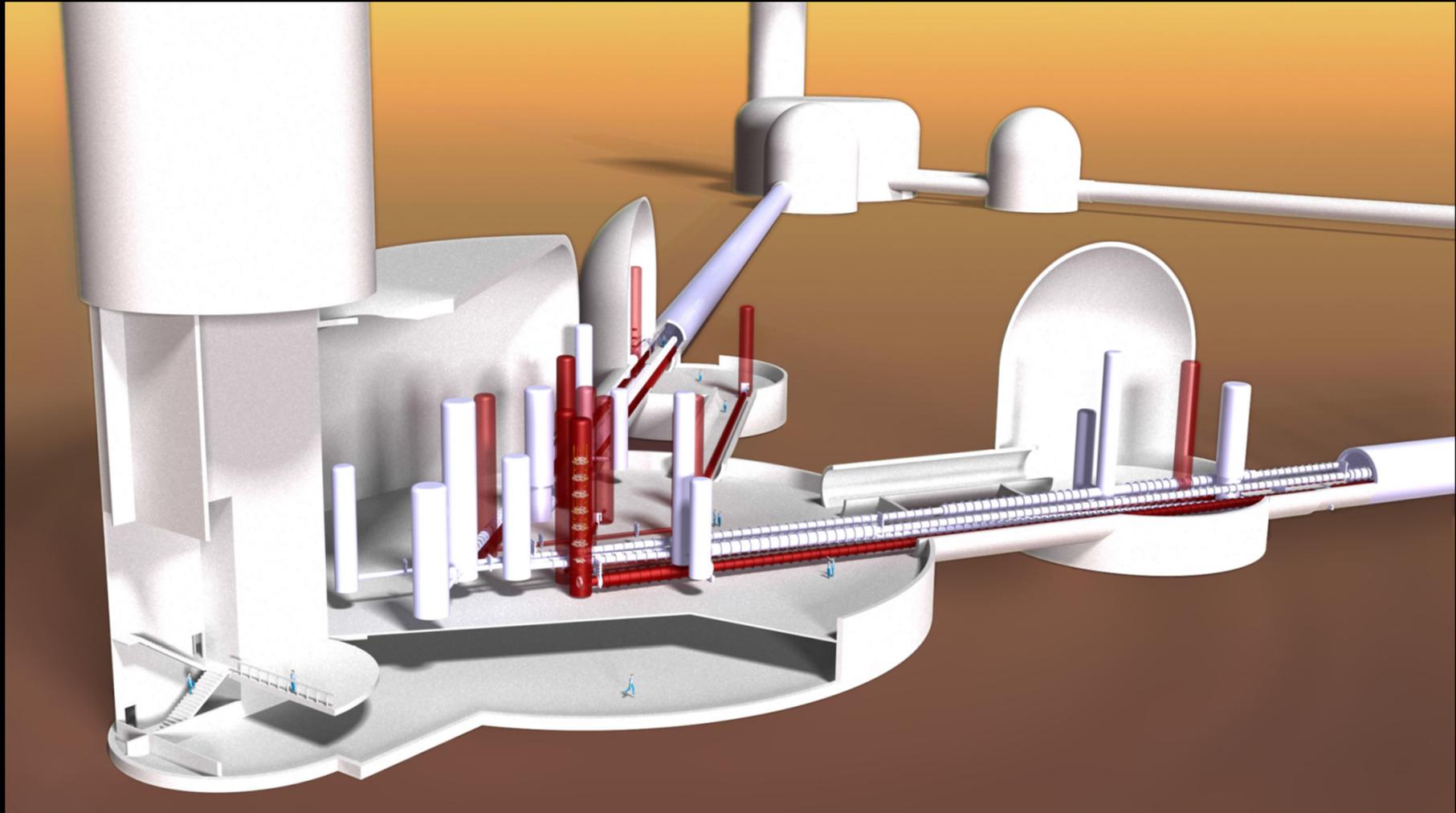
Design study

Ha riunito
scienziati di Italia,
Germania, Gran
Bretagna,
Francia, Spagna,
Ungheria,
Olanda, Polonia

Una infrastruttura
utilizzabile per
diversi decenni

Infrastruttura flessibile

In grado di ospitare più interferometri in fasi successive



Principali obiettivi scientifici di ET

- Fisica fondamentale
 - La natura della radiazione gravitazionale è quella prevista da Einstein?
 - La Relatività Generale di Einstein è la teoria corretta della gravitazione?
 - I buchi neri nell'Universo sono quelli della Relatività Generale?
 - Ci sono singolarità visibili?
- Astrofisica
 - Qual'è la natura del collasso gravitazionale? What is the nature of gravitational collapse?
 - Qual'è l'origine dei fiotti di raggi gamma?
 - Qual'è la struttura delle stele di neutron e altri oggetti compatti?
 - objects?
- Cosmologia
 - Come si sono formati ed evoluti i buchi neri massivi dei nuclei delle galassie?
 - Cos'è «l'energia oscura»?
 - Quali transizione di fase hanno avuto luogo nell'Universo primordiale?
 - Quali erano le condizioni fisiche al big bang?

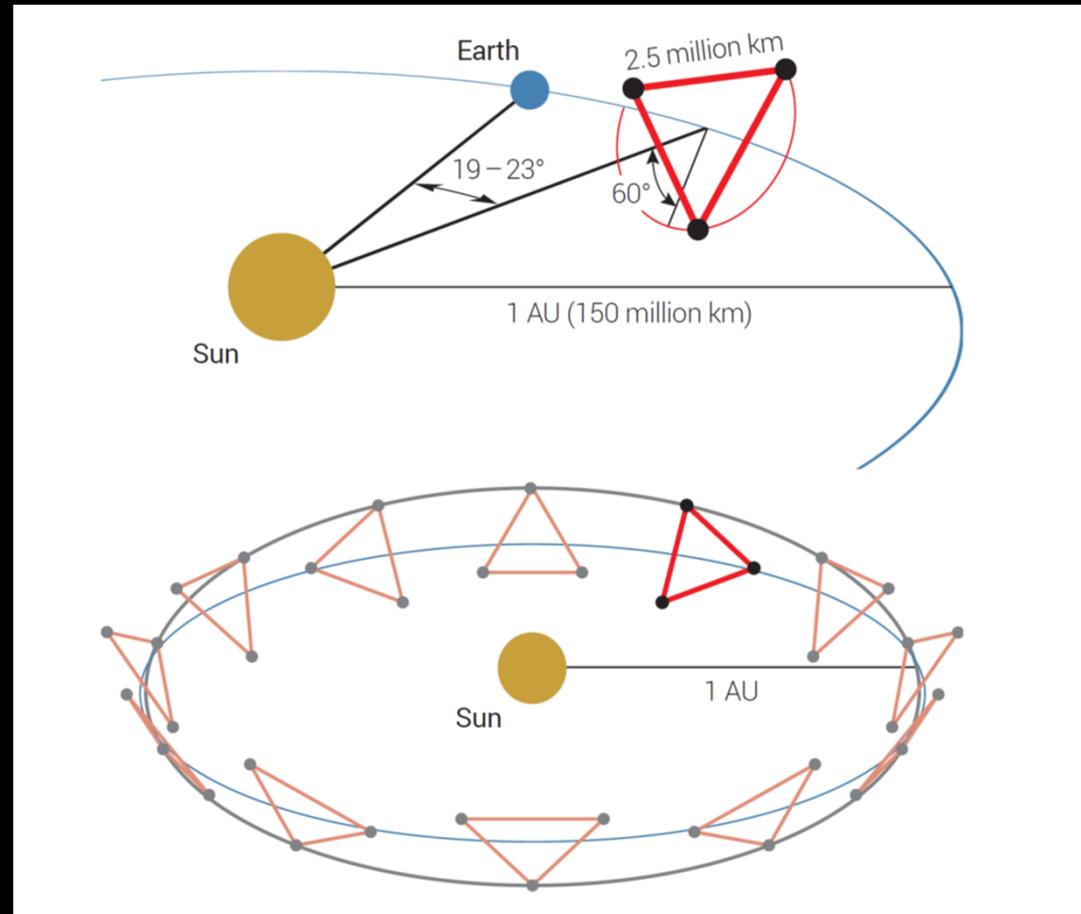
La missione spaziale LISA

- Le masse in caduta libera tracciano geodetiche dello spazio tempo
- I pianeti, i satelliti nello spazio sono in perenne caduta libera
- Le variazioni di distanza tra due satelliti misurano anche variazioni della metrica.
- Laser Interferometer Space Antenna: LISA
- Costellazione triangolare di satelliti con lati di 2.5 milioni di km in orbita intorno al Sole
- Sensibile a onde con periodo compreso tra svariate ore e qualche decina di secondi

Configurazione orbitale di LISA

Orbita eliocentrica, a tre settimane dalla Terra

Triangolo ruotante, variazioni sufficientemente lente della distanza tra i satelliti



CONCLUDENDO

- Sono state registrate onde gravitazionali dalla coalescenza di due buchi neri di massa stellare e di stelle di neutroni
- La forma del segnale osservato e la previsione della relatività generale per riduzione delle dimensioni dell'orbita, coalescenza e "rimbombo" del buco nero finale sono in accord
- L'ipotesi della kilonova trova conferma
- **Queste sono le prime rivelazioni dirette di onde gravitazionali**
- **Inizia una visione completamente nuova dell'Universo**

Uno dei vertici della triangolazione è in Italia

Grazie ad Adalberto Giazotto, la cui visione e caparbità ci ha portati fin qui.

Adalberto ci ha lasciati qualche settimana fa, tutti noi continueremo il suo lavoro



GRAZIE !

Misura dei parametri

- Orbite per emissione di onde gravitazionali
 - **Prim'ordine** determinate dalla massa di "chirp" \mathcal{M}

$$\mathcal{M} = \frac{(m_1 m_2)^{3/5}}{M^{1/5}} \simeq \frac{c^3}{G} \left[\frac{5}{96} \pi^{-8/3} f^{-11/3} \dot{f} \right]^{3/5}$$

- Gli ordini successive permettono la misura del rapporto delle masse e degli spin
- Si misura direttamente le masse, al lordo del red-shift $(1+z)m$
- Ampiezza inversamente proporzionale alla distanza di luminosità
- Si ha precessione orbitale quando gli spin sono disallineati rispetto al momento angolare orbitale – non c'è evidenza di precessione
- Posizione nel cielo e dati sull'orientamento del Sistema ottenuti dalla differenza di tempo di arrivo e delle ampiezze e fasi nei rivelatori
- Cf Annalen der Physik: The basic physics of the binary black hole merger GW150914, Ann. Phys. (Berlin) 529 1600209 (2017)
- <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/andp.201600209/epdf>