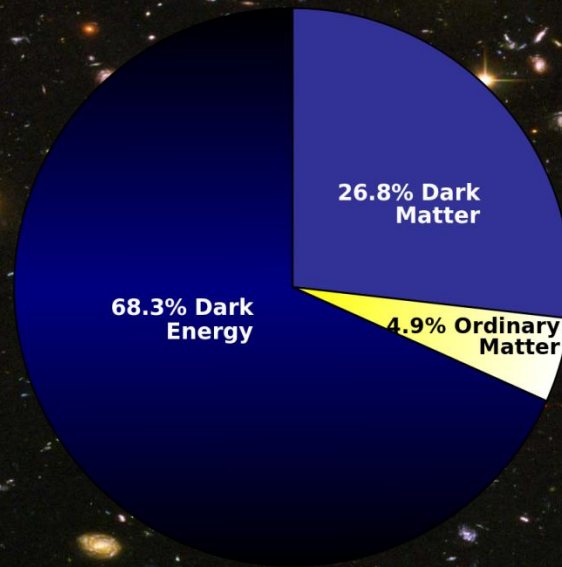




# L'interferometro VIRGO e la rivelazione delle onde gravitazionali

# Materia Oscura & Energia Oscura

I corpi celesti “visibili” rendono conto solamente del 5% della massa presente nell’Universo

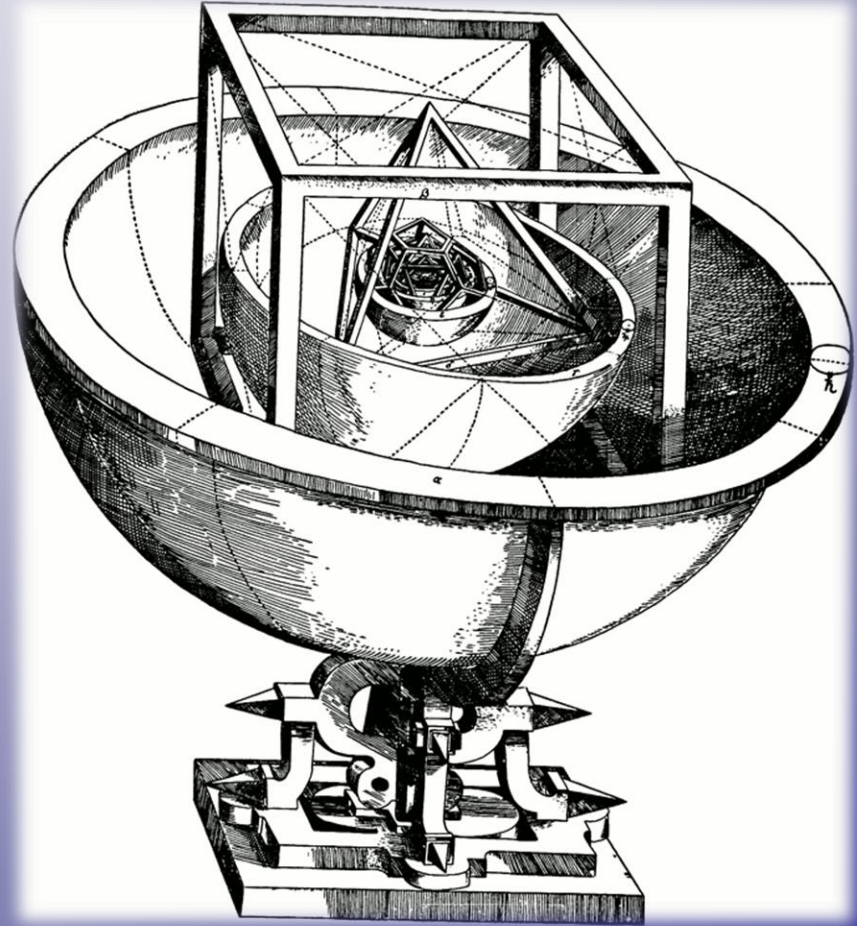




# Musica universalis



- **J.Kepler** nell'*Harmonices Mundi* (1618) scrisse che ogni pianeta produce un distinto tono musicale durante la sua rivoluzione intorno al Sole.
- Al tempo si credeva che la terra ed i pianeti ruotassero attorno al Sole ciascuno nella propria sfera (come nella *Divina Commedia*)
- Si credeva inoltre che i raggi di tali sfere fossero legati da rapporti di numeri interi analoghi agli intervalli musicali (*musica universalis*).



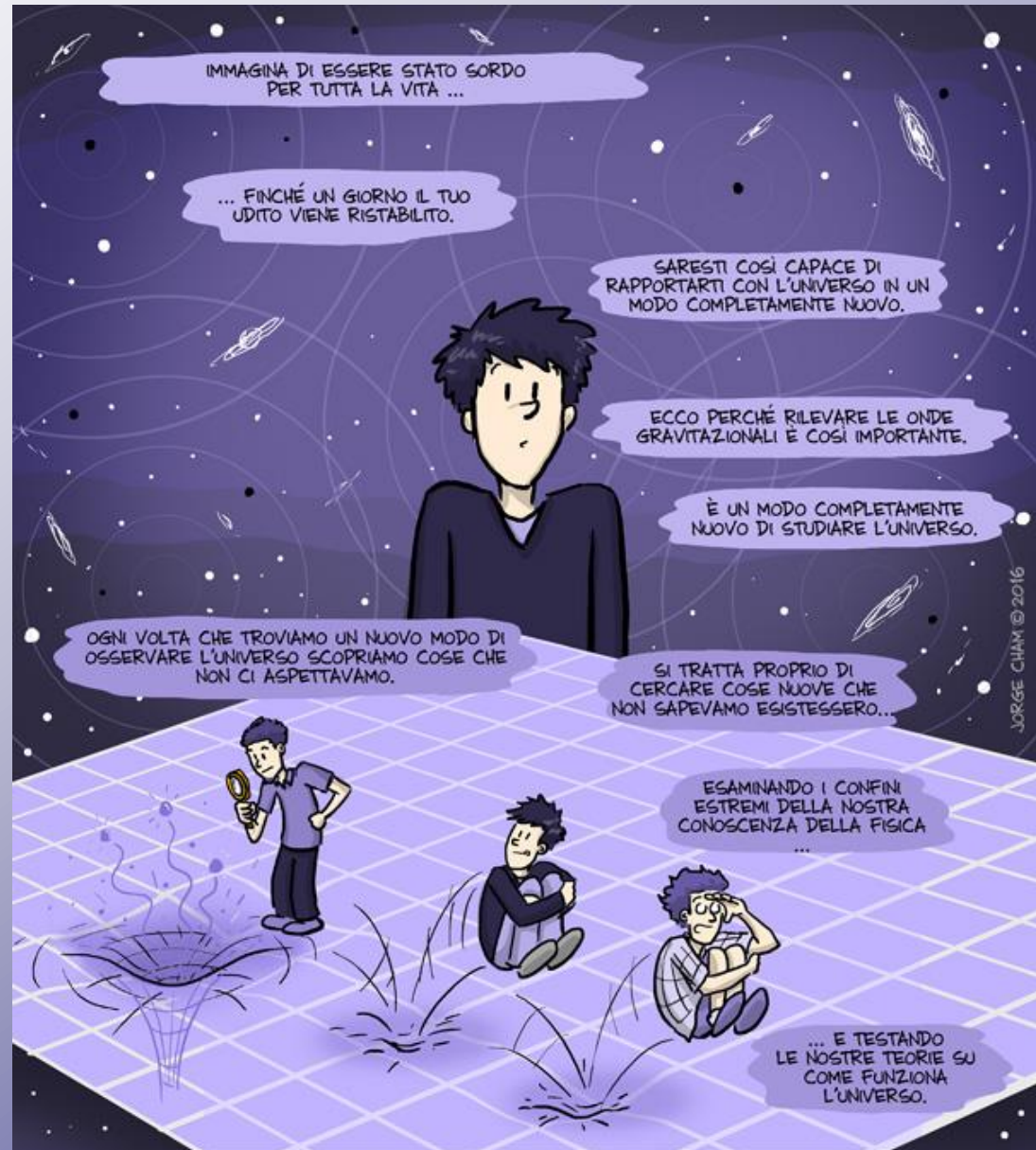
# Sebbene per ragioni molto differenti l'universo produce suoni !!

La sfera celeste e' stata studiata per mezzo di radiazioni elettromagnetiche, dovute a temperatura, carica, magnetismo delle stelle:  
*l'immagine dell'universo*

Le onde gravitazionali, di natura completamente diversa, sono dovute alla massa dei corpi celesti. Possono portare informazioni totalmente nuove e sconosciute:

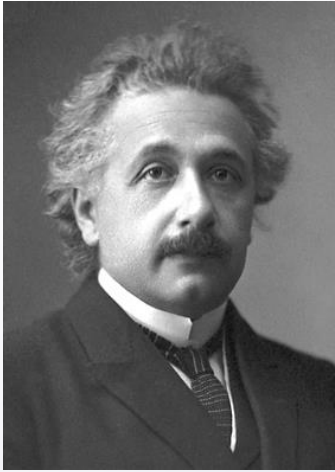
*il suono dell'universo*

Osservare le onde gravitazionali puo' essere paragonato ad *alzare per la prima volta il volume del televisore, mentre si assiste ad un concerto*

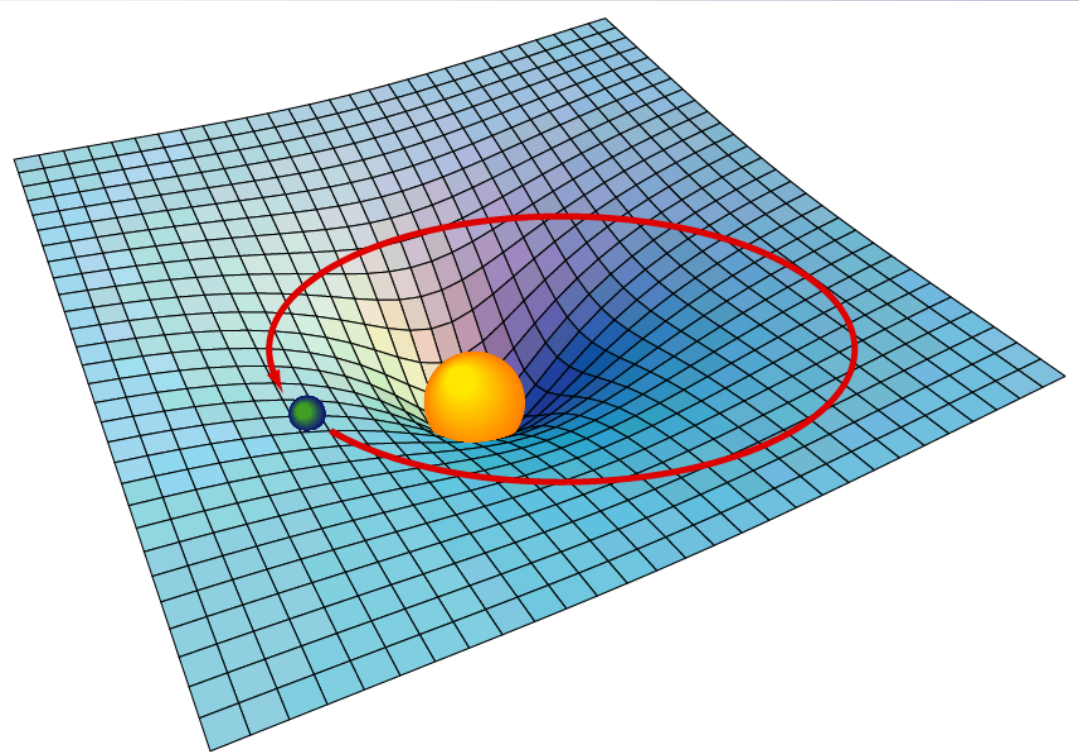




# Geometria dello spazio-tempo



*Einstein ha ipotizzato che corpi leggeri tendono a muoversi verso corpi pesanti, non perché sono attratti da una forza 'misteriosa', ma perché i corpi di massa piccola si muovono attraverso lo spazio-tempo che è deformato dai corpi di massa grande*

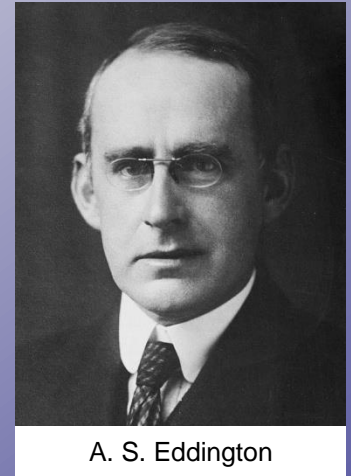
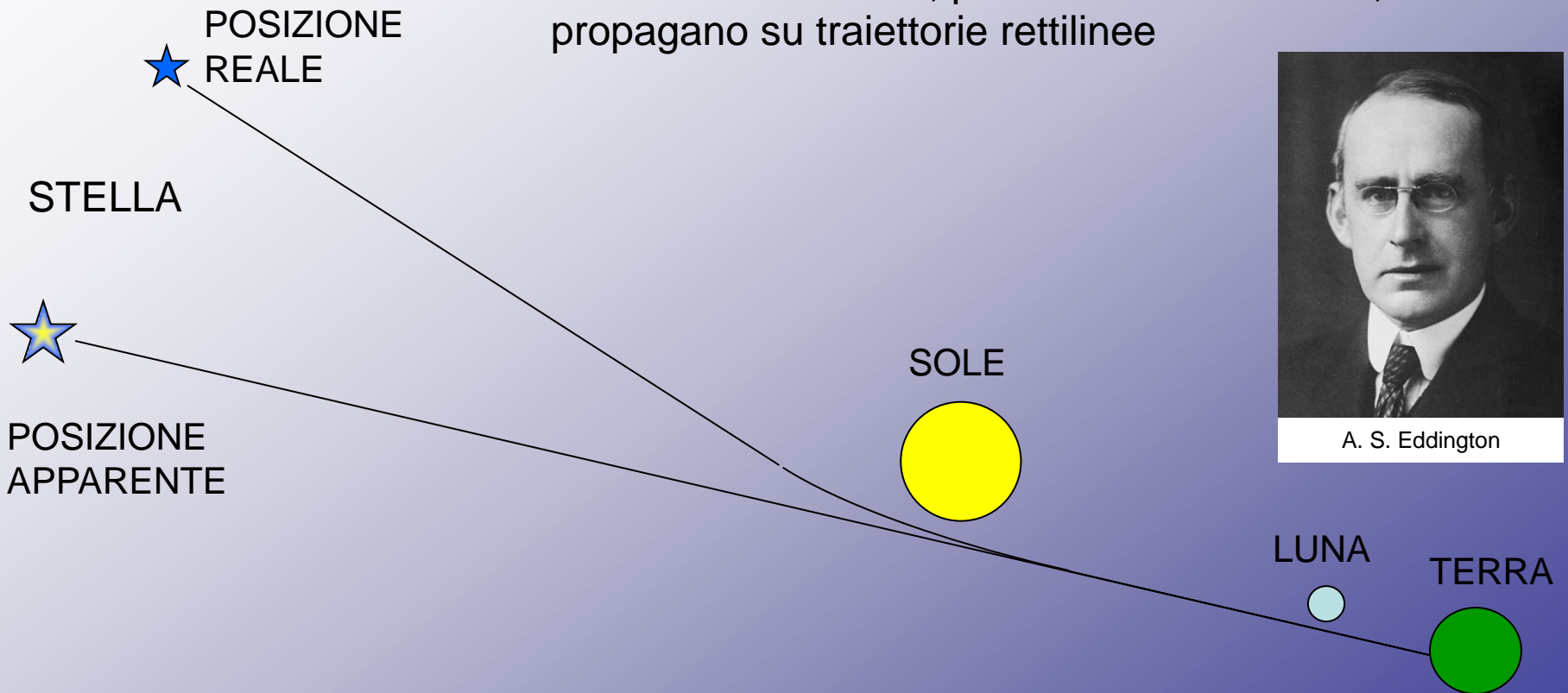


- Immaginate lo spazio come una superficie di gomma.
- Una massa sulla superficie causerà una deformazione.
- Un'altra massa più piccola posta sulla superficie scivolerà verso la precedente.

# Geometria dello spazio-tempo

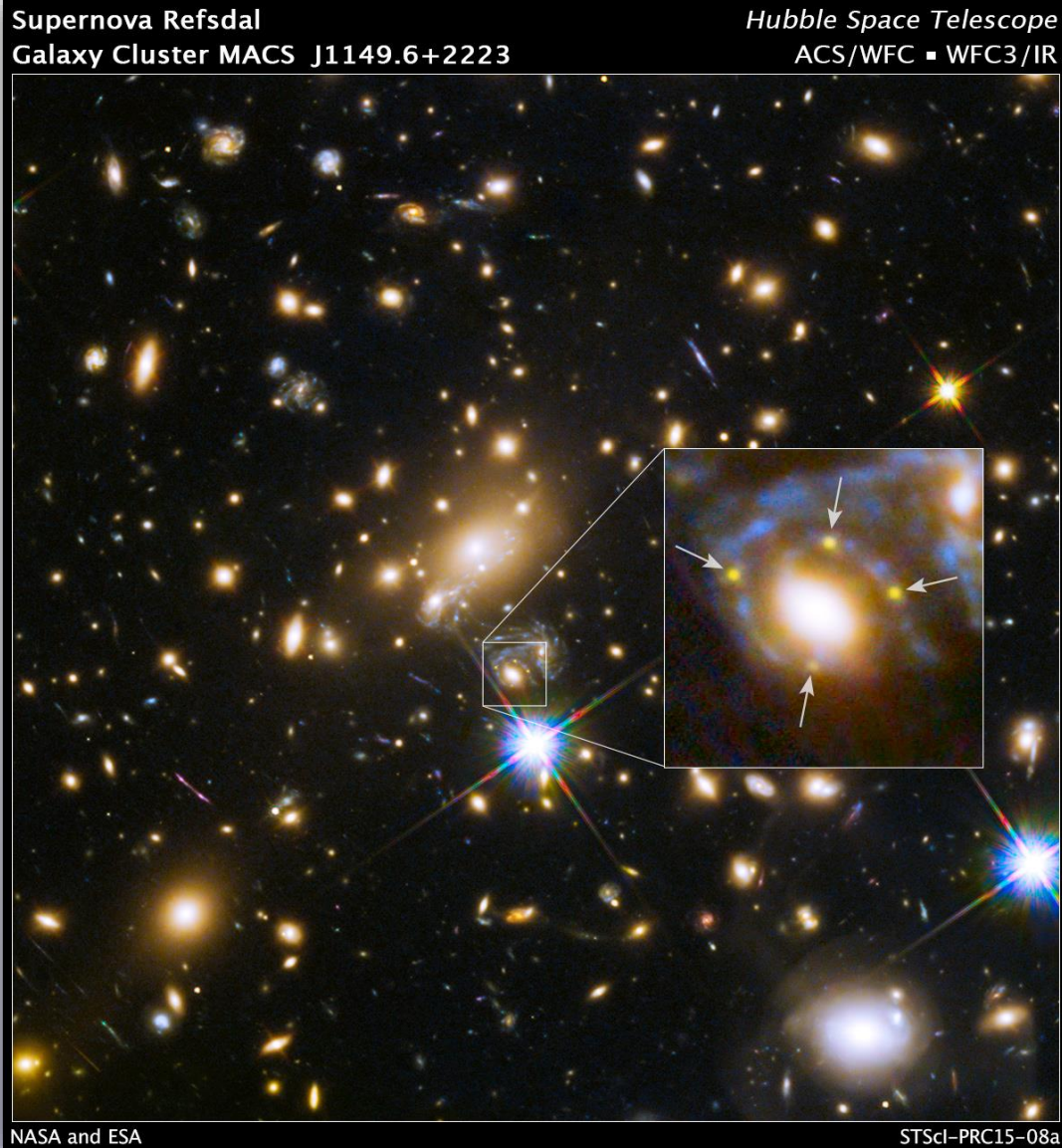
In presenza di un campo gravitazionale lo spazio-tempo e' distorto (lo spazio non e' euclideo)

Quindi anche i fotoni, pur non avendo massa, non si propagano su traiettorie rettilinee



*Questo straordinario effetto della gravità sulla luce fu verificato per la prima volta dall'astronomo inglese Arthur Eddington durante l'eclissi solare del 29 Maggio 1919.*

# Lenti gravitazionali

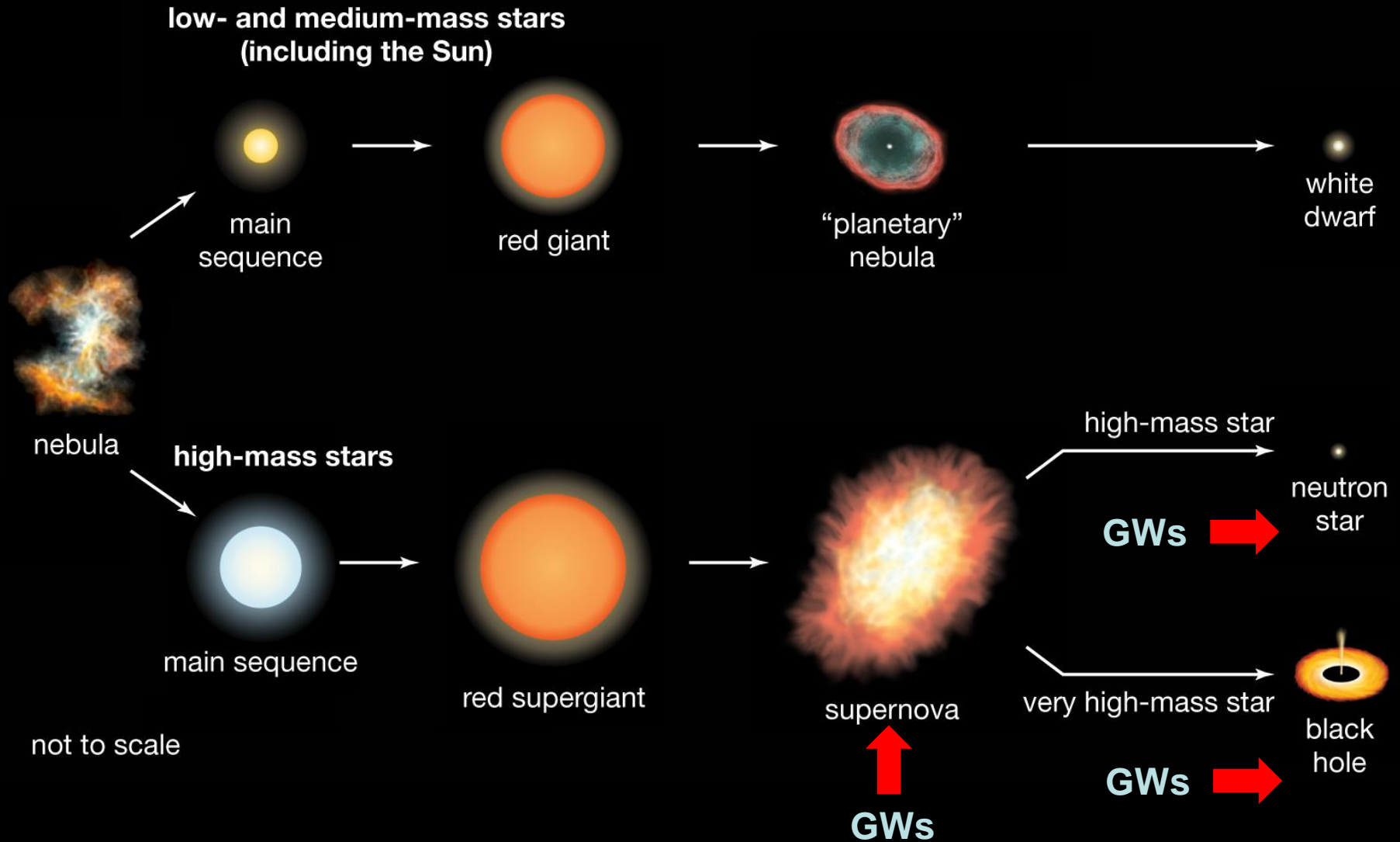


- Prima osservazione dell'effetto delle lenti gravitazionali sull'immagine di una supernova (Marzo 2015).
- 4 immagini simultanee della stessa supernova prodotte dal campo gravitazionale della galassia al centro del riquadro.
- La galassia dista 5 miliardi di anni luce mentre la supernova è lontana 9 miliardi di anni luce.



# Sorgenti di onde gravitazionali

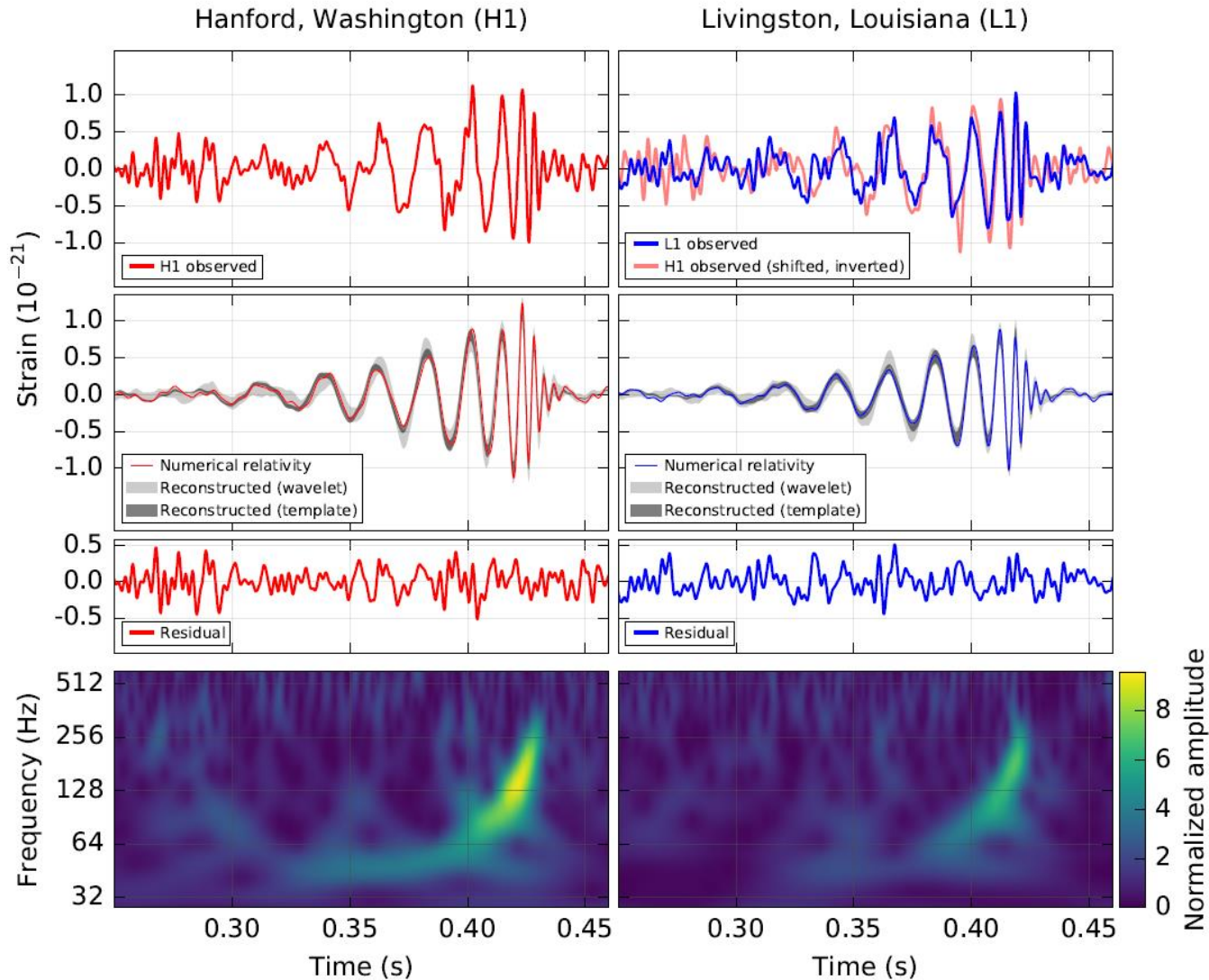
## Stellar evolution





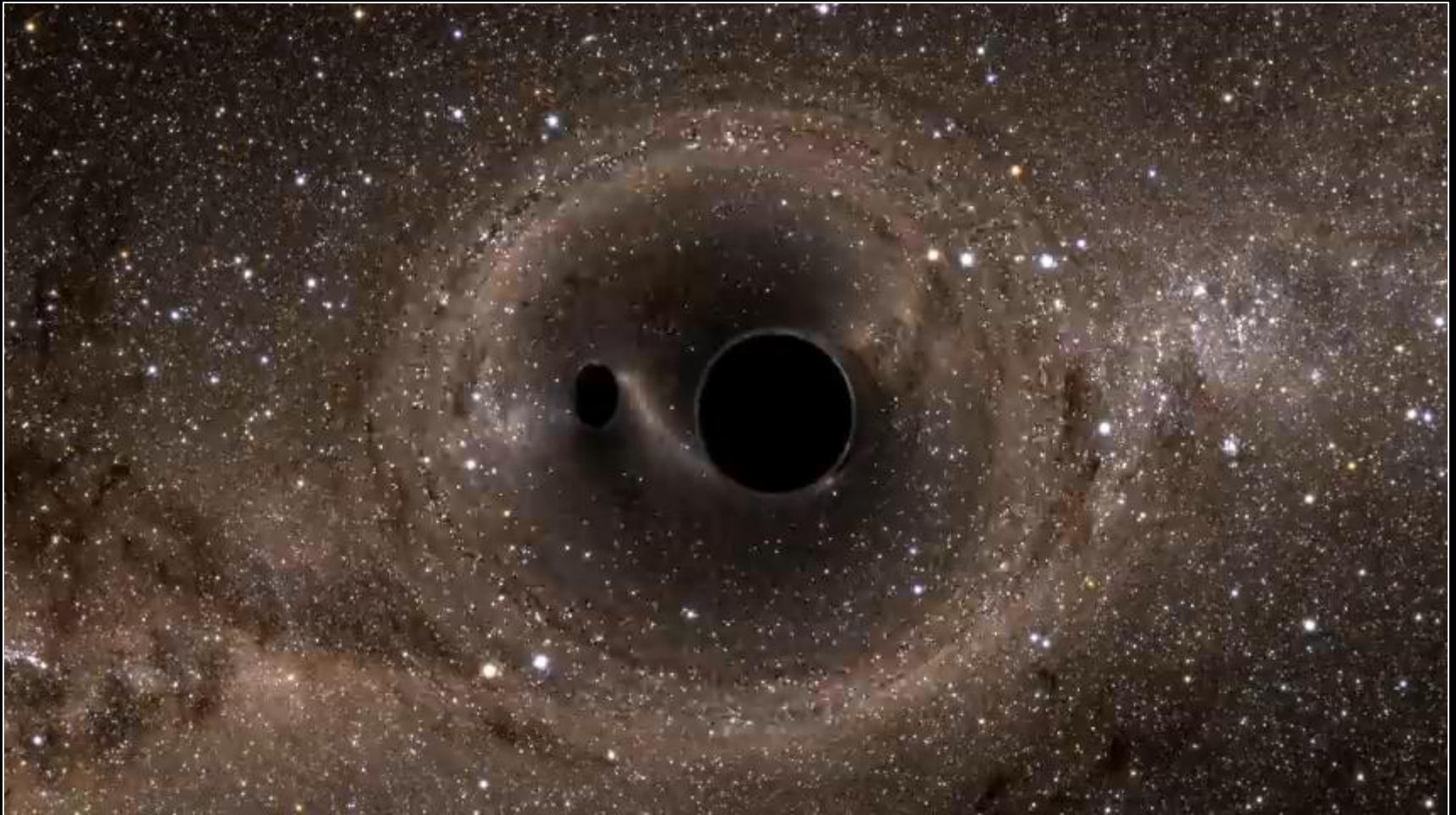
# La 'first detection'

14 Settembre 2015 alle 11:50:45 CET



Probabilità falso allarme: 1/203000 anni !!

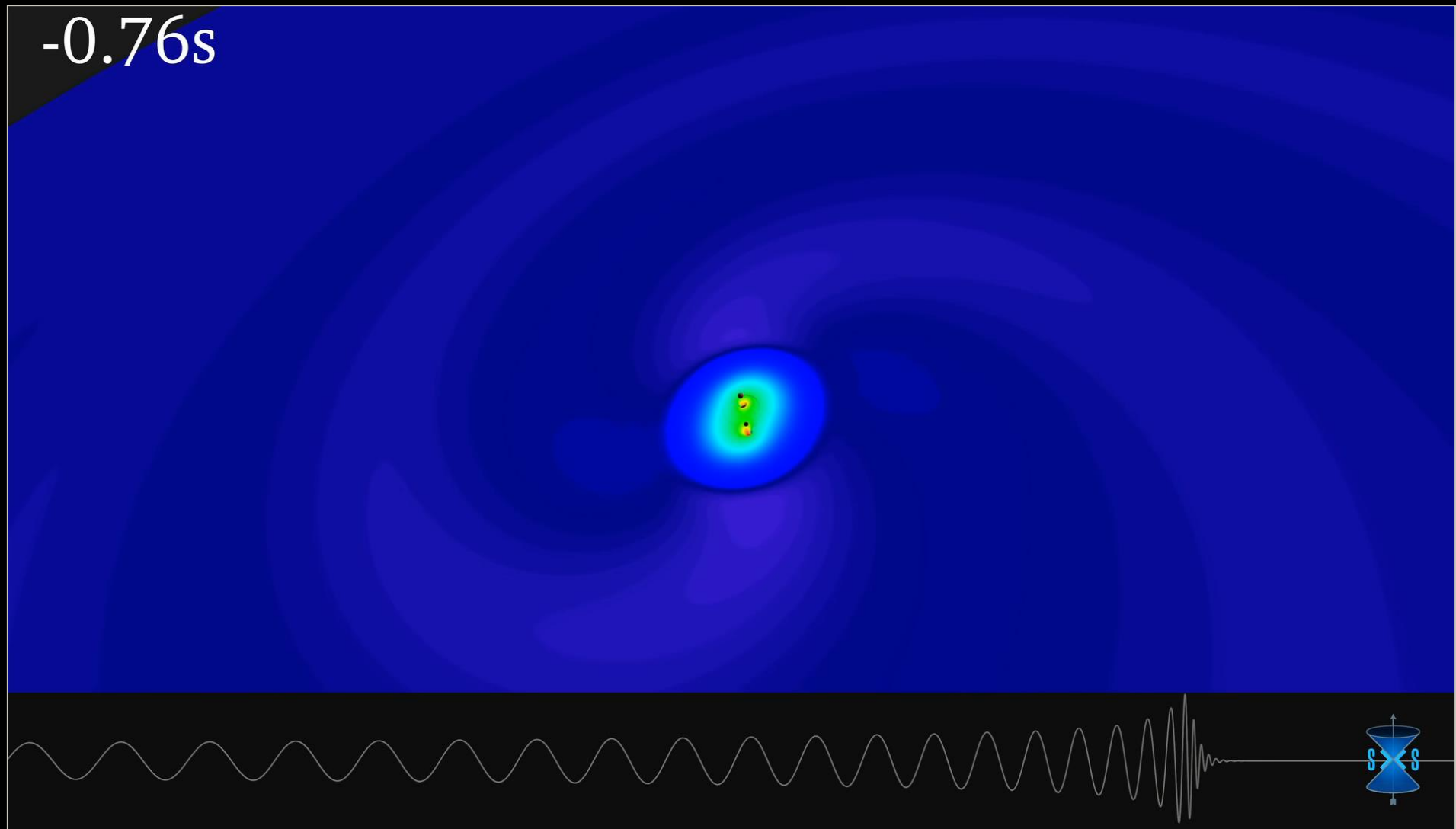
# La 'first detection'





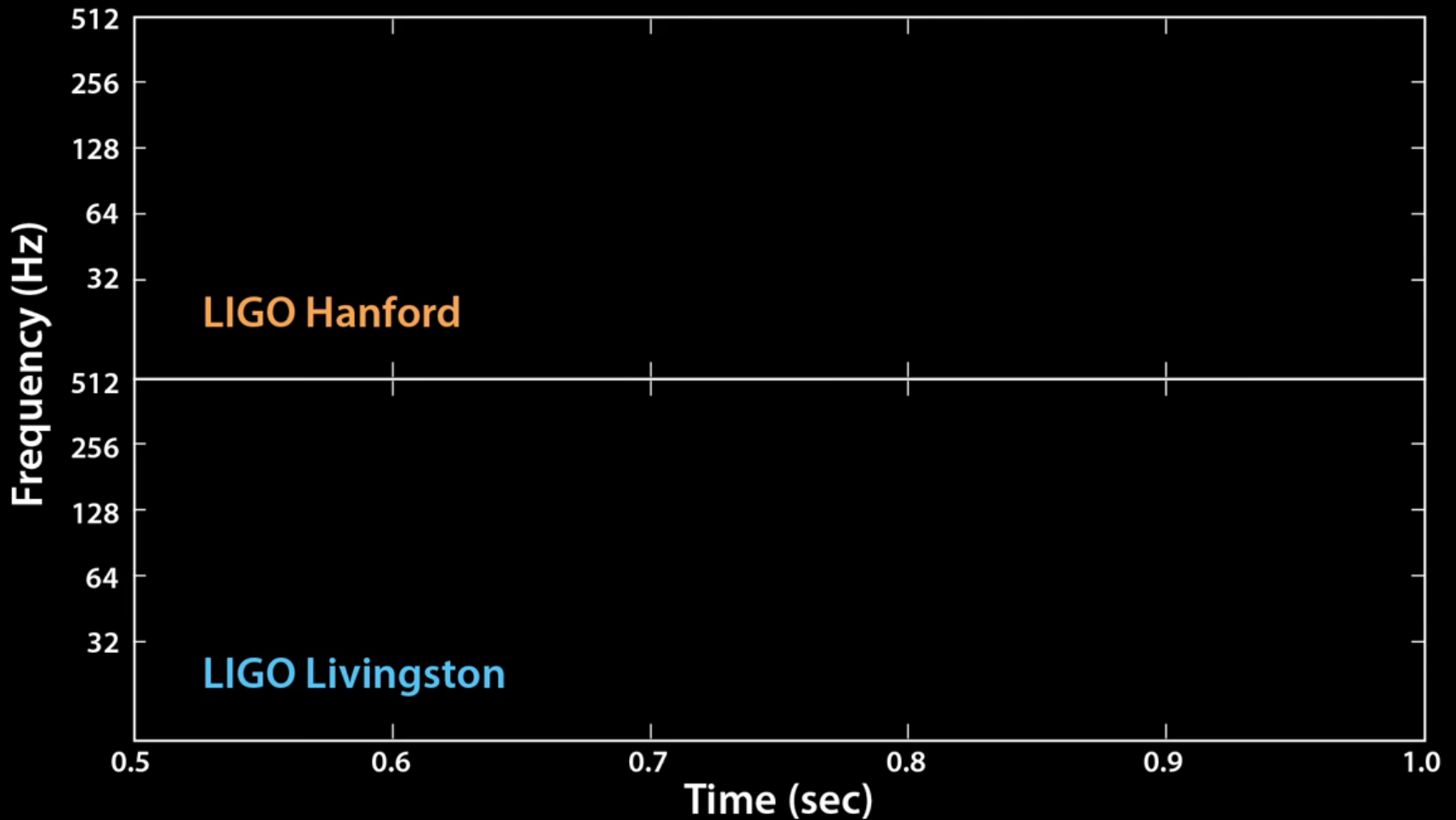
# La 'first detection'

-0.76s



# La 'first detection'

Il chirp



Il primo suono dell'universo ascoltato dall'uomo !!



# La 'first detection'

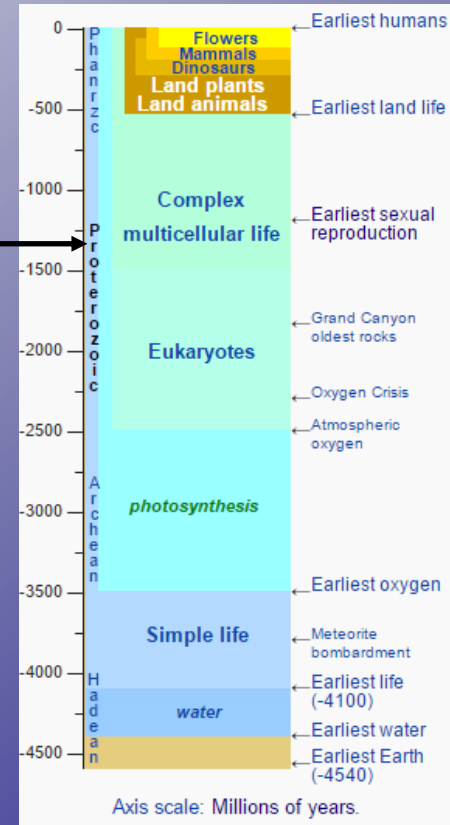
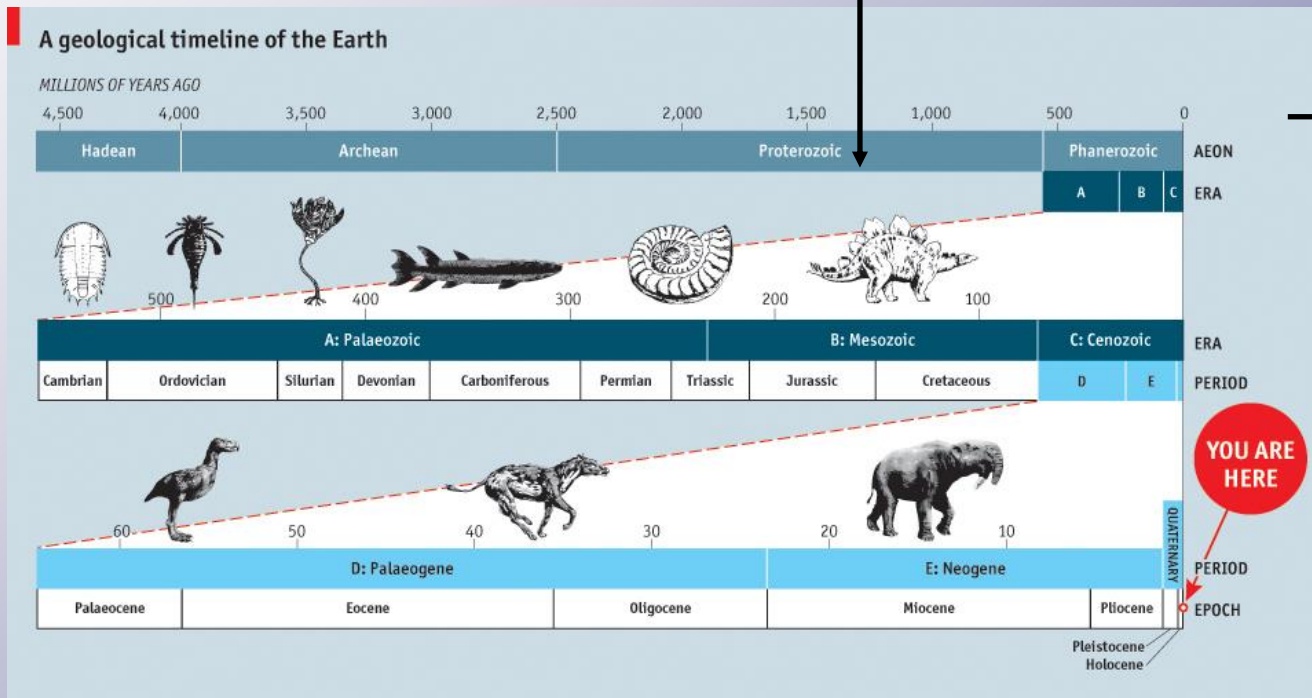
Primary black hole mass	$36^{+5}_{-4} M_{\odot}$
Secondary black hole mass	$29^{+4}_{-4} M_{\odot}$
Final black hole mass	$62^{+4}_{-4} M_{\odot}$
Final black hole spin	$0.67^{+0.05}_{-0.07}$
Luminosity distance	$410^{+160}_{-180}$ Mpc
Source redshift $z$	$0.09^{+0.03}_{-0.04}$



**3 masse solari convertite in Onde Gravitazionali !!!**



**1.34 miliardi di anni luce !!!**



# La nascita dell'astronomia gravitazionale

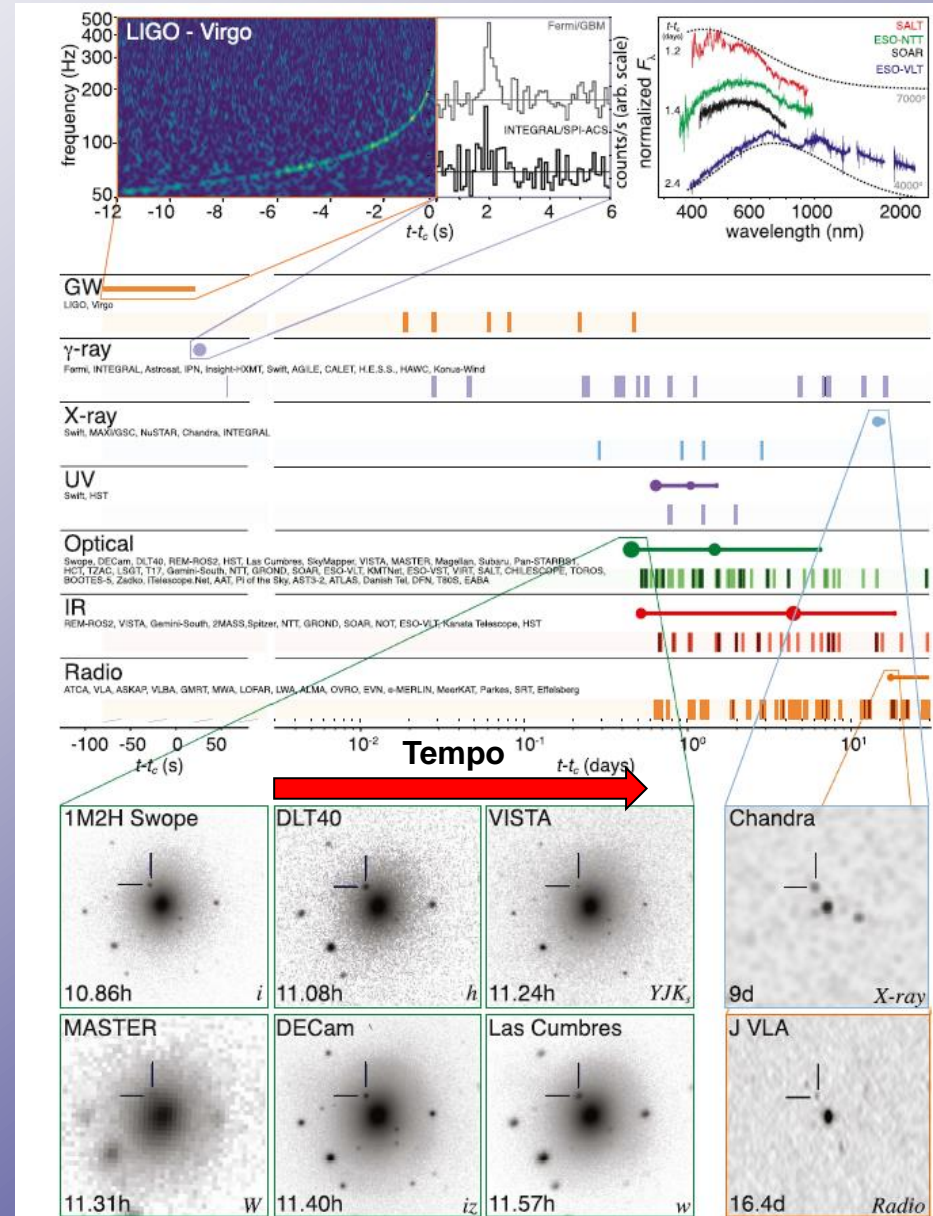
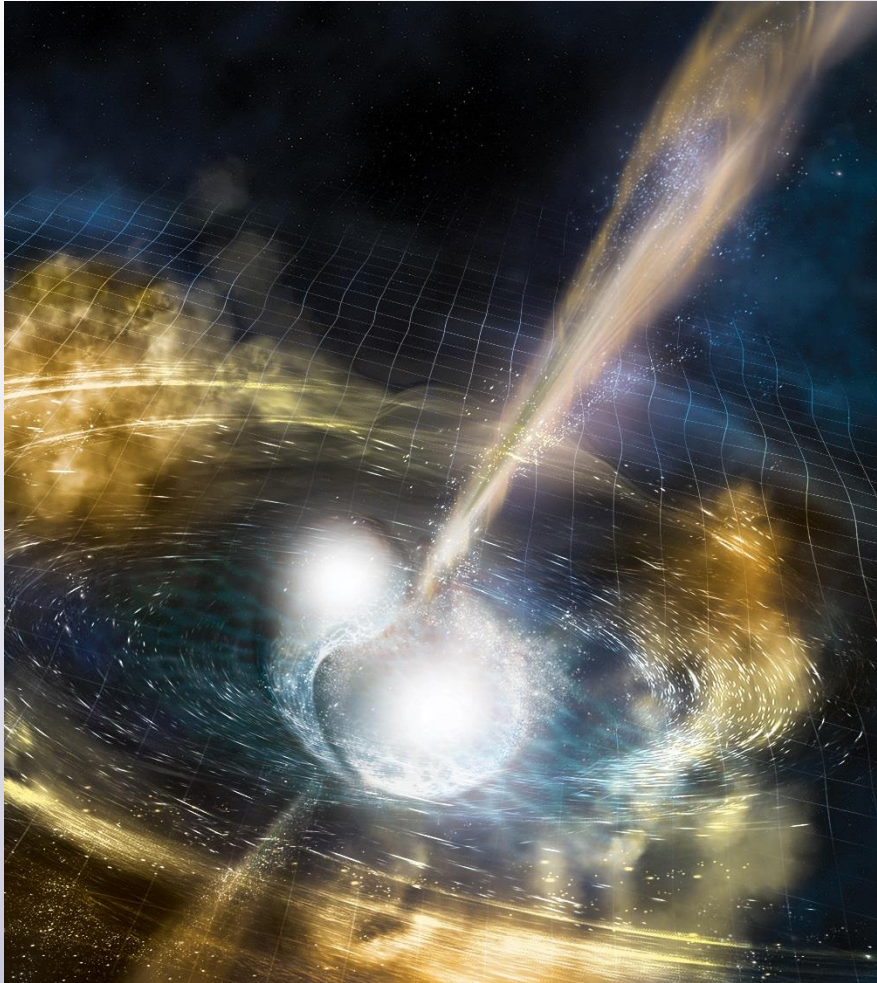
17 Agosto 2017 alle 14:41:04 CET





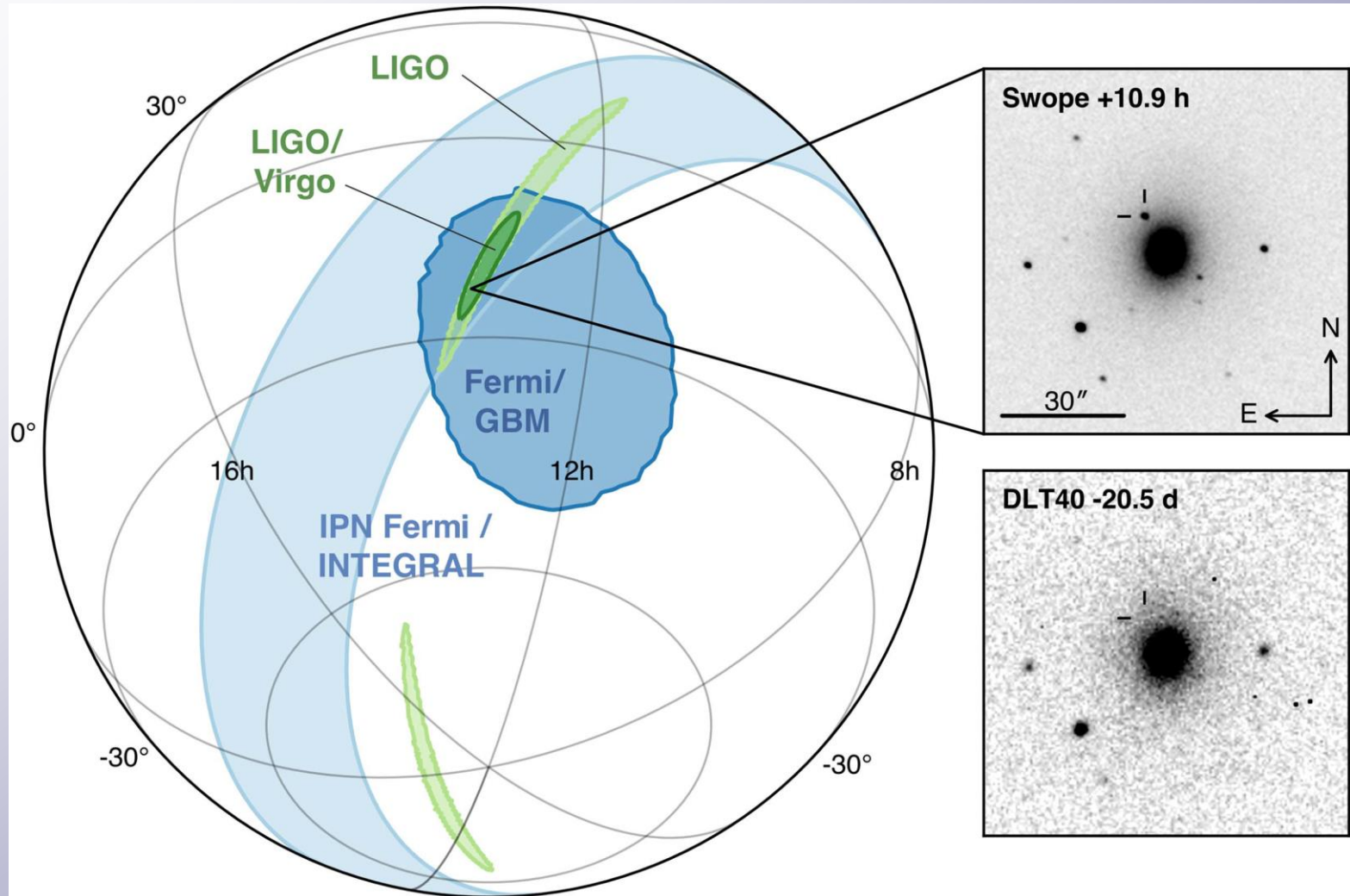
# La nascita dell'astronomia gravitazionale

## Binaria di stelle neutrone coalescenti



# La nascita dell'astronomia gravitazionale

## La localizzazione della kilonova

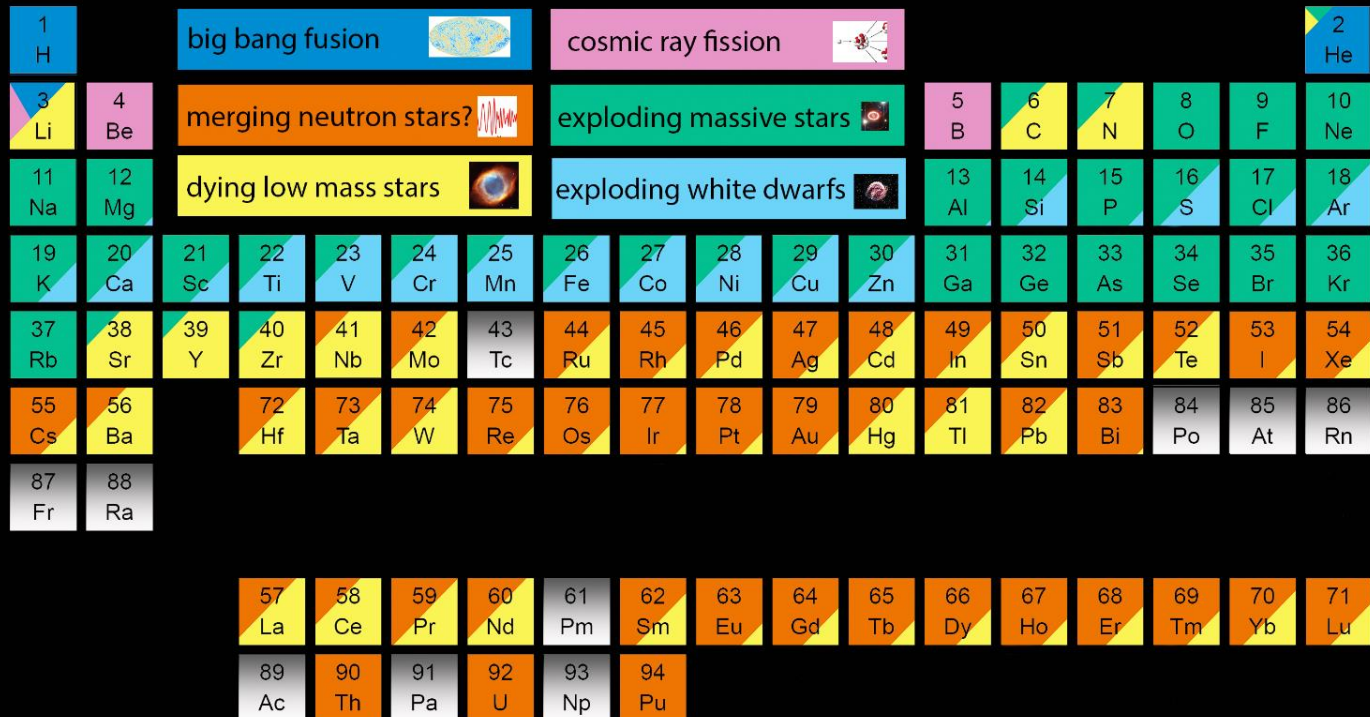




# La nascita dell'astronomia gravitazionale

Le stelle di neutroni sono miniere di oro !!

## The Origin of the Solar System Elements



Graphic created by Jennifer Johnson  
<http://www.astronomy.ohio-state.edu/~jaj/nucleo/>

Astronomical Image Credits:  
 ESA/NASA/AASNova

# Onde Gravitazionali

Come interagiscono con la materia?

Supponiamo di versare un bicchiere di vino (o di acqua) in mare....

**Superficie dell'oceano (S):**

$$70\% \times 4\pi \times R_{\text{terra}}^2 =$$

$$0.7 \times 4 \times 3.14 \times (6.37e6 \text{ m})^2$$

$$\sim 3.6e14 \text{ m}^2$$

**Volume di un bicchiere (V):**

$$\sim 0.25e-3 \text{ m}^3$$



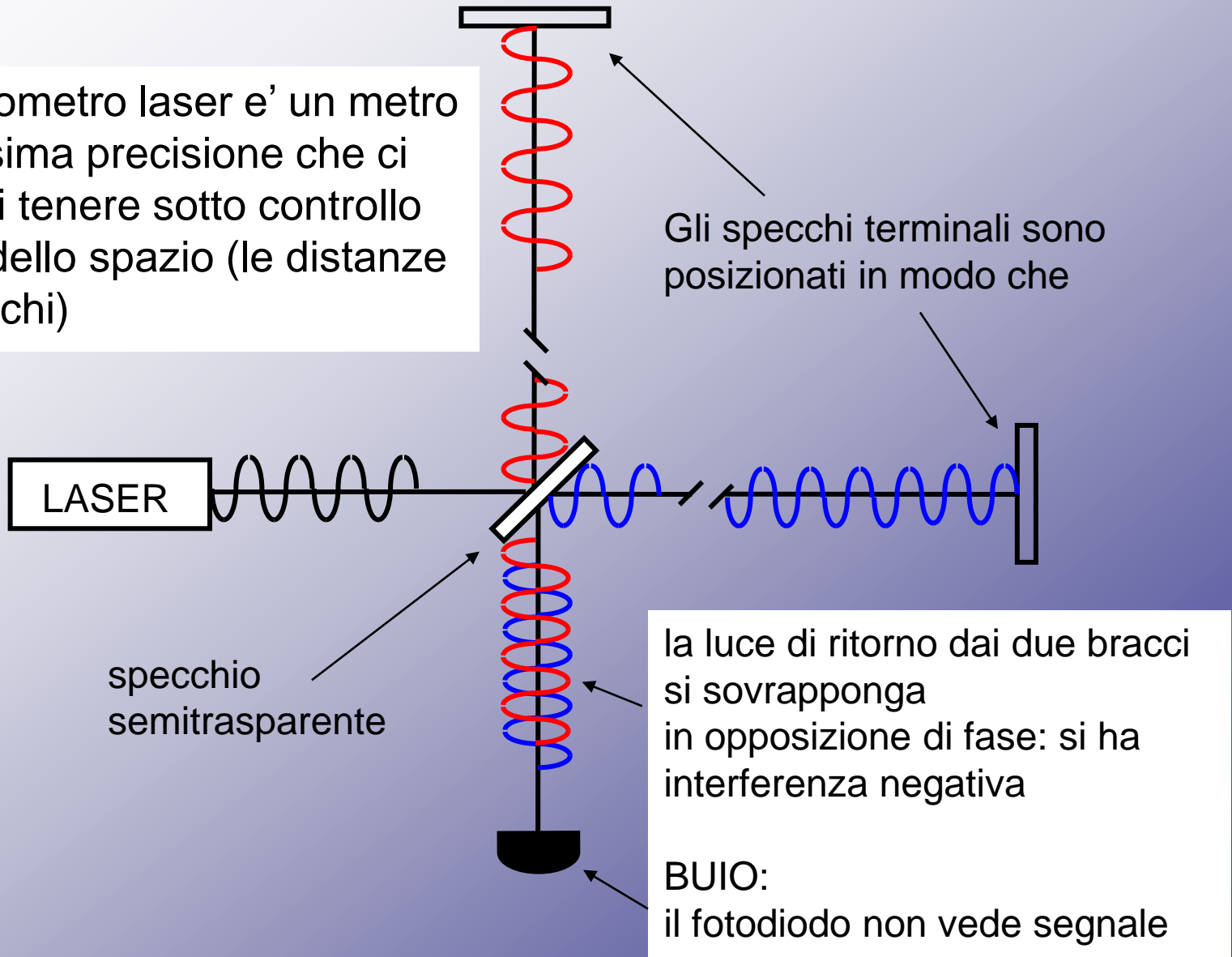
**Innalzamento prodotto:**

$$h \sim V / S \sim \mathbf{1e-18 \text{ m}}$$

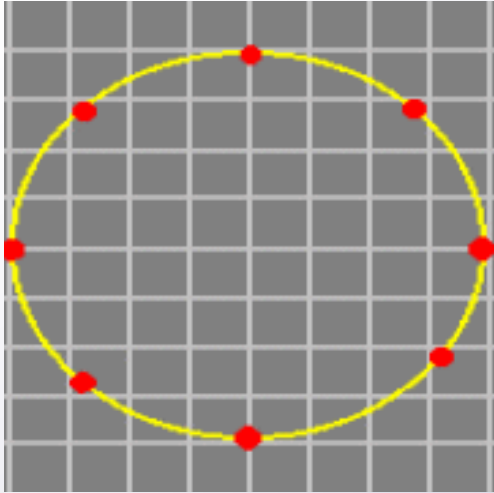
Quello che possiamo misurare con Virgo è dello stesso ordine di grandezza !!

# Interferometro di Michelson

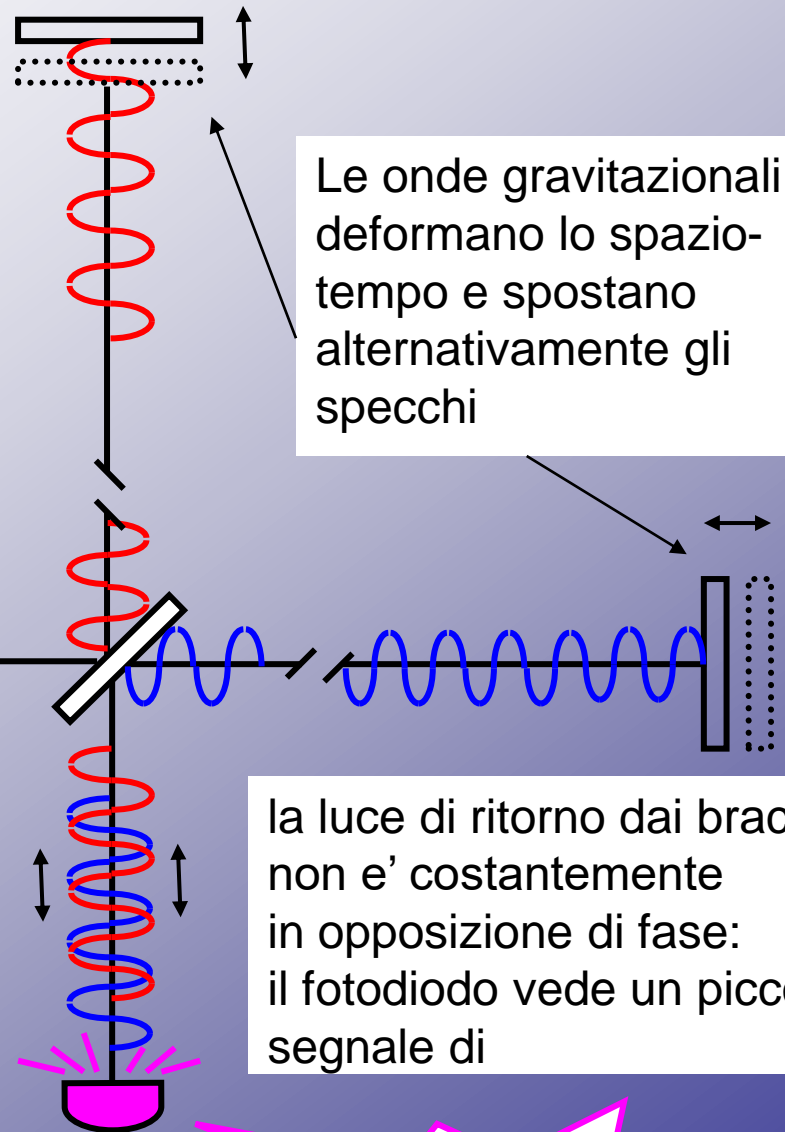
Un interferometro laser e' un metro di elevatissima precisione che ci permette di tenere sotto controllo l'isotropia dello spazio (le distanze fra gli specchi)







LASER



Le onde gravitazionali deformano lo spazio-tempo e spostano alternativamente gli specchi

la luce di ritorno dai bracci non e' costantemente in opposizione di fase: il fotodiode vede un piccolo segnale di

Le onde gravitazionali piu' intense che si possono prevedere deformano lo spazio-tempo di una frazione infinitesima:  $10^{-21}$   
I bracci di 3 km si allungano e si accorciano di  $3 \times 10^{-18} \text{ m}$ :  
***un millesimo del raggio del protone !!!***

**Luce oscillante**



# The Virgo Collaboration



Virgo is a European collaboration with about 400 members

Participating countries are  
France, Italy, Belgium, The Netherlands, Poland, Hungary, Spain, Germany

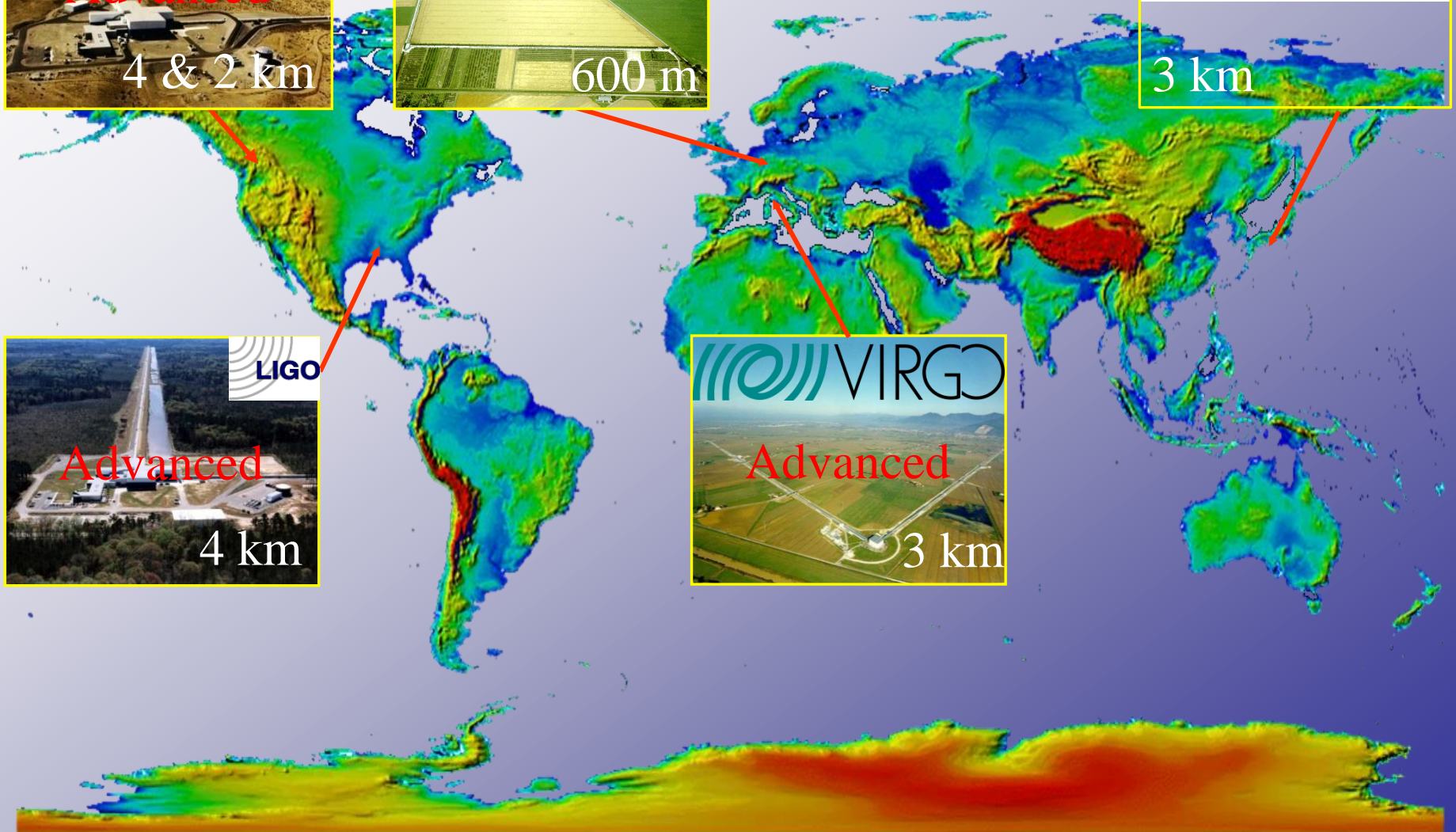
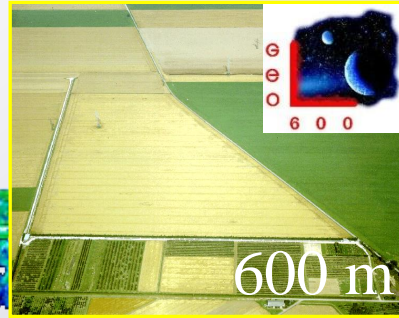
With a total of 25 laboratories

- APC Paris - ARTEMIS Nice - EGO Cascina - IFAE - 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 - Minkhel Amsterdam - POLGRAW(Poland) - RADBOUD Urij, Nijmegen - RMKI Budapest - UCLouvain - ULiège - Univ. of Barcelona - Univ. of Valencia - University of Jena





# Il network mondiale



# Last Science Run (O3)

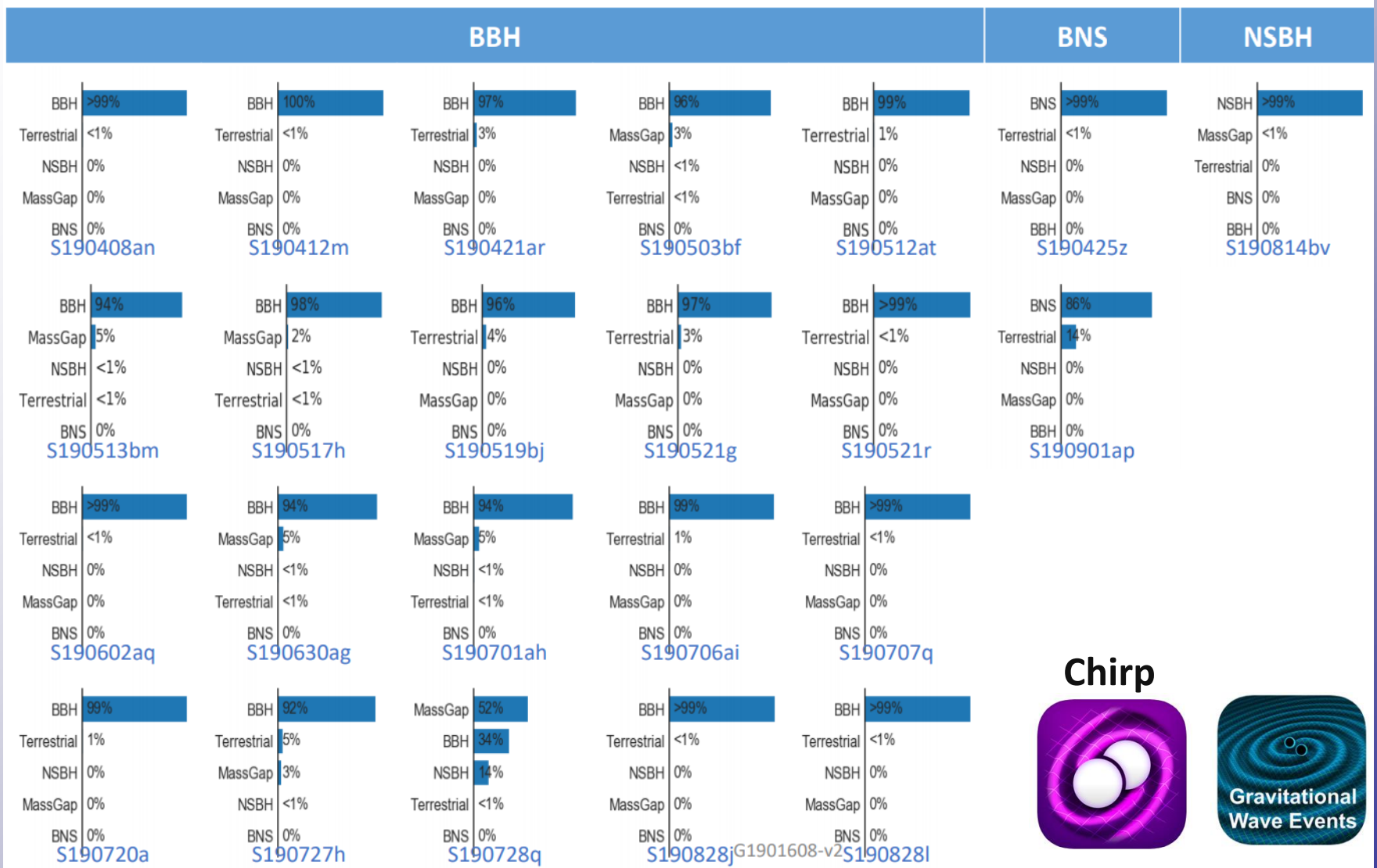
April 1<sup>st</sup>, 2019





# Last Science Run (O3)

More than a signal per week!!



Chirp



<https://gracedb.ligo.org/latest/>