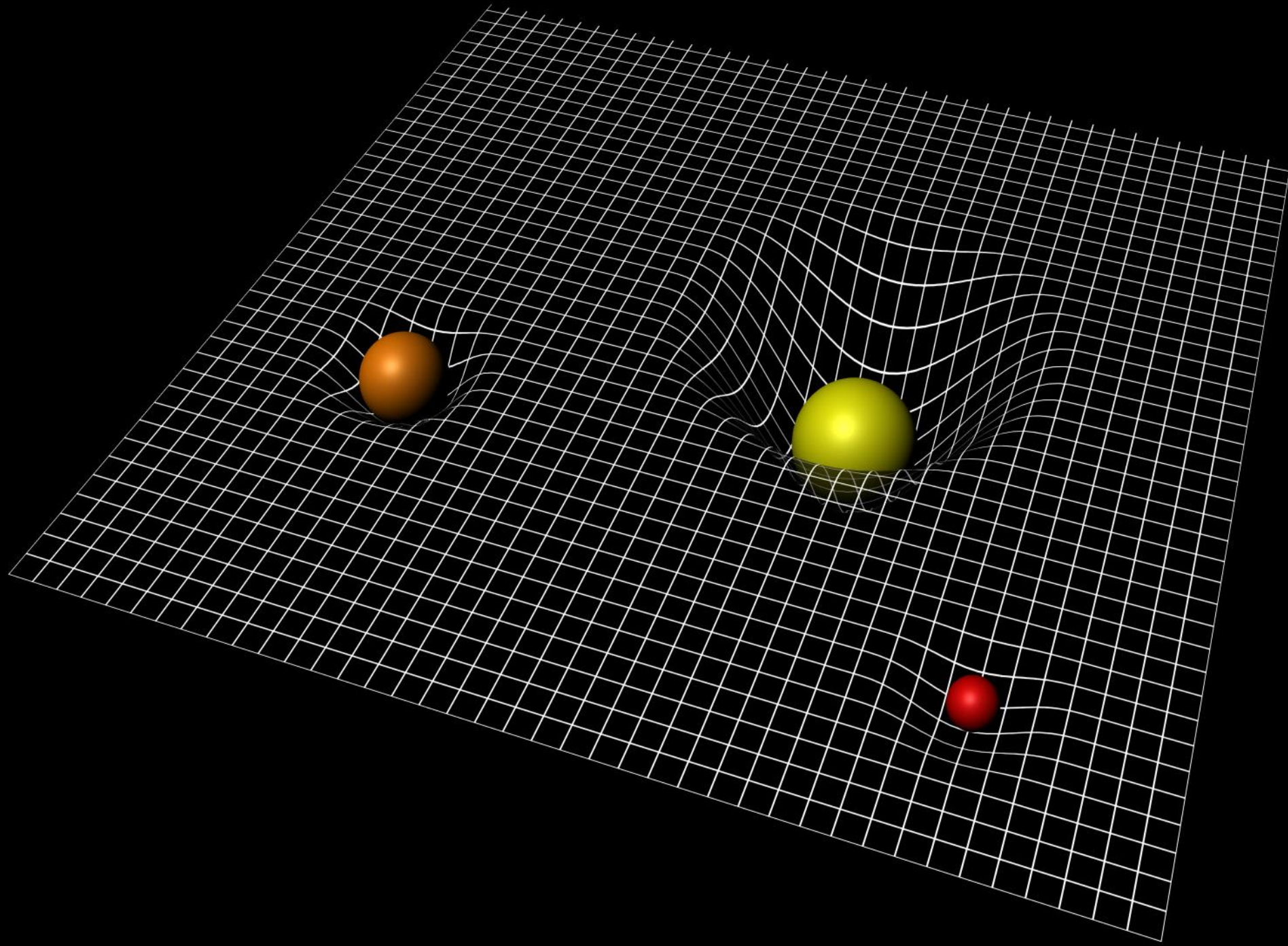


# Le onde gravitazionali e la nascita di una nuova astronomia

**Filippo Martelli**

LIGO-Virgo Collaboration

Gli ultimi  
straordinari  
risultati dalle  
onde gravitazionali







L-100  
Te Quiero,  
Bolivia  
- un  
Americano

Tapa  
Ekechaca  
ie Bahntafelst-  
kartensysteme

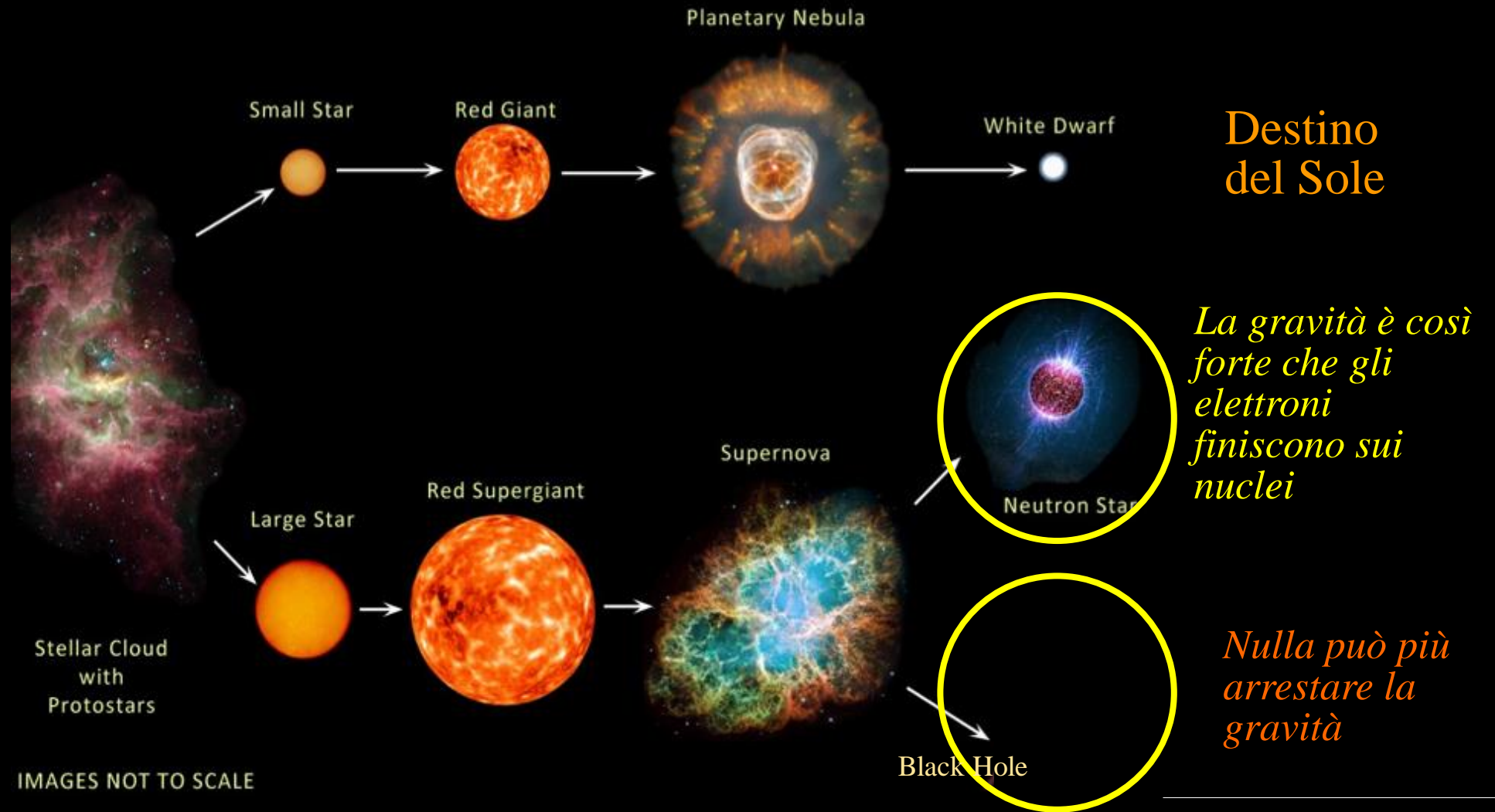
A. EINSTEIN

LIMBER  
XXX

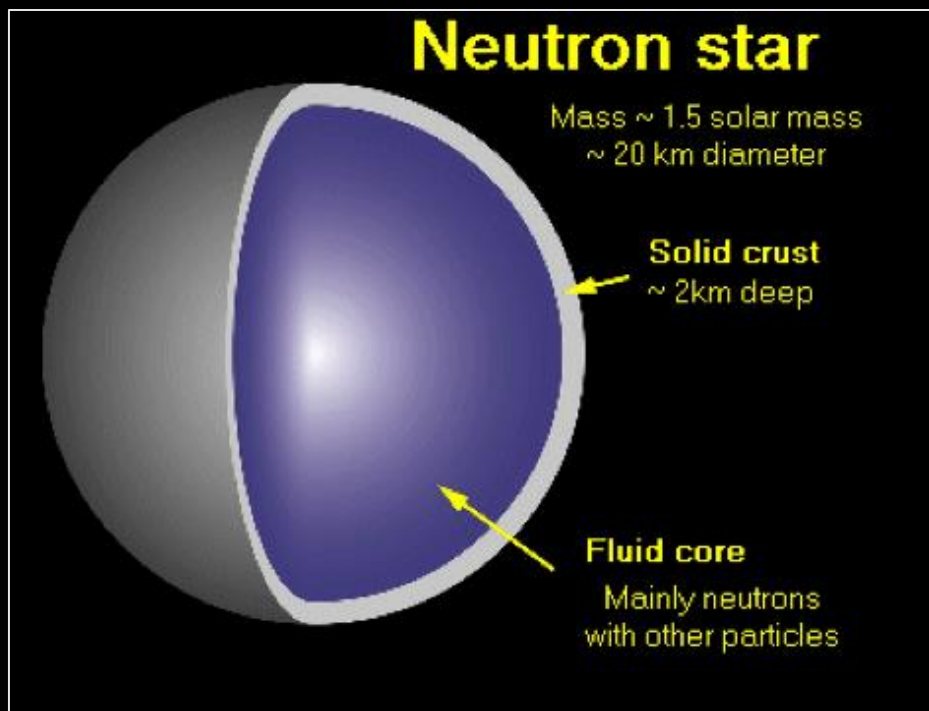
hile

LIMBER

# Quali sono gli oggetti con più massa?



# Stelle di neutroni



Raggio = 15 km

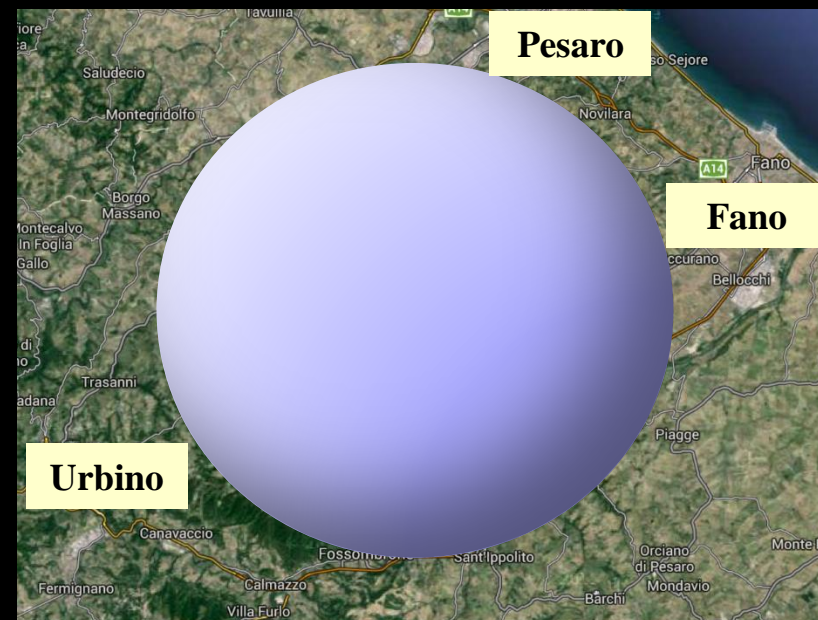
Massa = 1.4 massa del sole

Densità = Massa / Volume =  
 $10^{11} \text{ kg/cm}^3$

**1 cm<sup>3</sup> = 100 milioni di ton !!!**

(marmo:  $2.7 \text{ g/cm}^3$ )

**Le stelle di neutroni hanno  
massa sempre minore di  
3 masse solari**



# Se i buchi neri sono invisibili, esistono ?

Nel 1970 è stata misurata una massa maggiore di 3 masse solari per il sistema binario Cygnus X-1 che emette nei raggi X

I buchi neri da ipotesi teorica sono divenuti un'evidenza osservativa

Disco di accrescimento

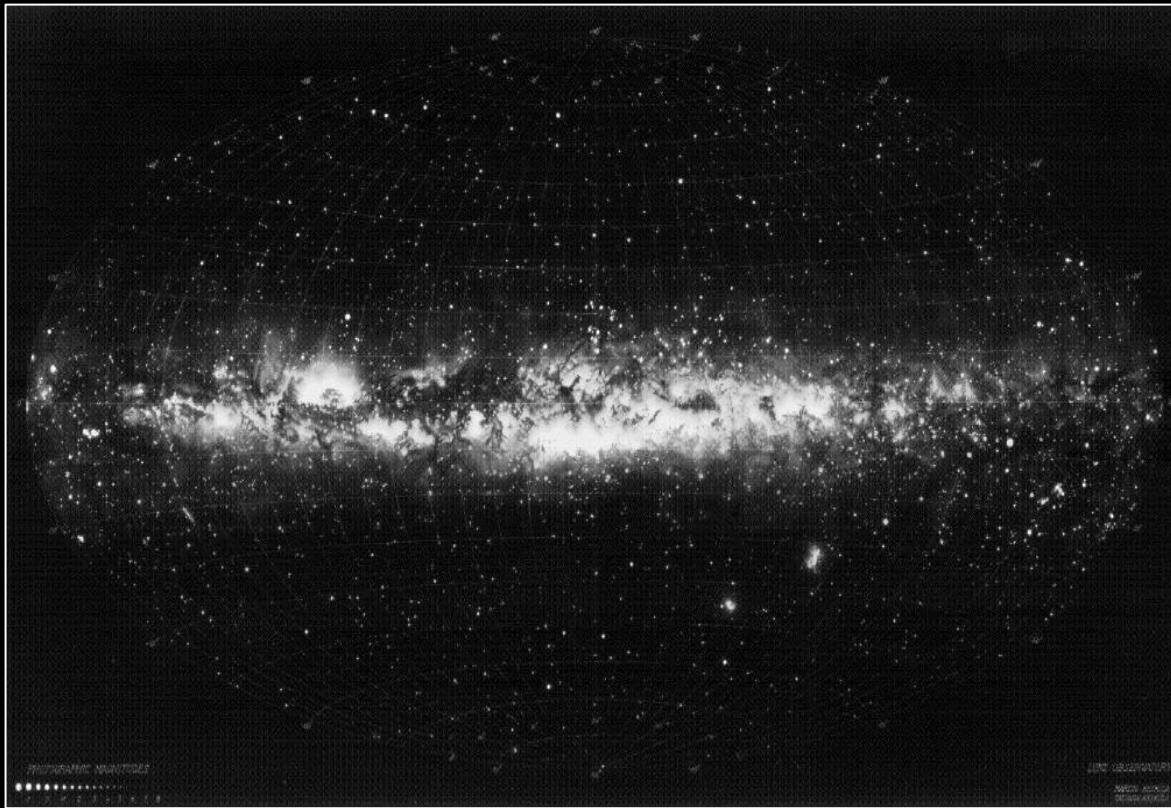
Immagine artistica di un buco nero

Ci sono 22 sistemi binari X per i quali è stata stimata la massa del buco nero

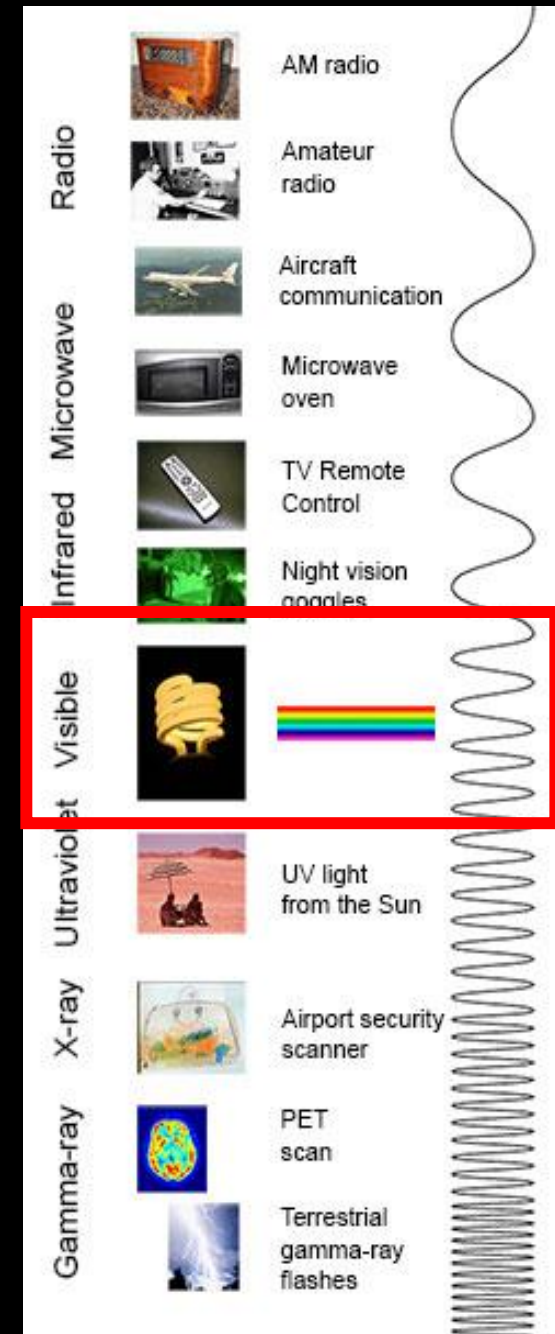
La loro massa:  $5 M_{\odot} < M_{BH} < 20 M_{\odot}$

# Perché cercare le Onde Gravitazionali ?

Questo è il cielo nella banda visibile dello spettro elettromagnetico (dove è sensibile l'occhio umano)



Per migliaia di anni l'uomo ha potuto vedere "questo" cielo

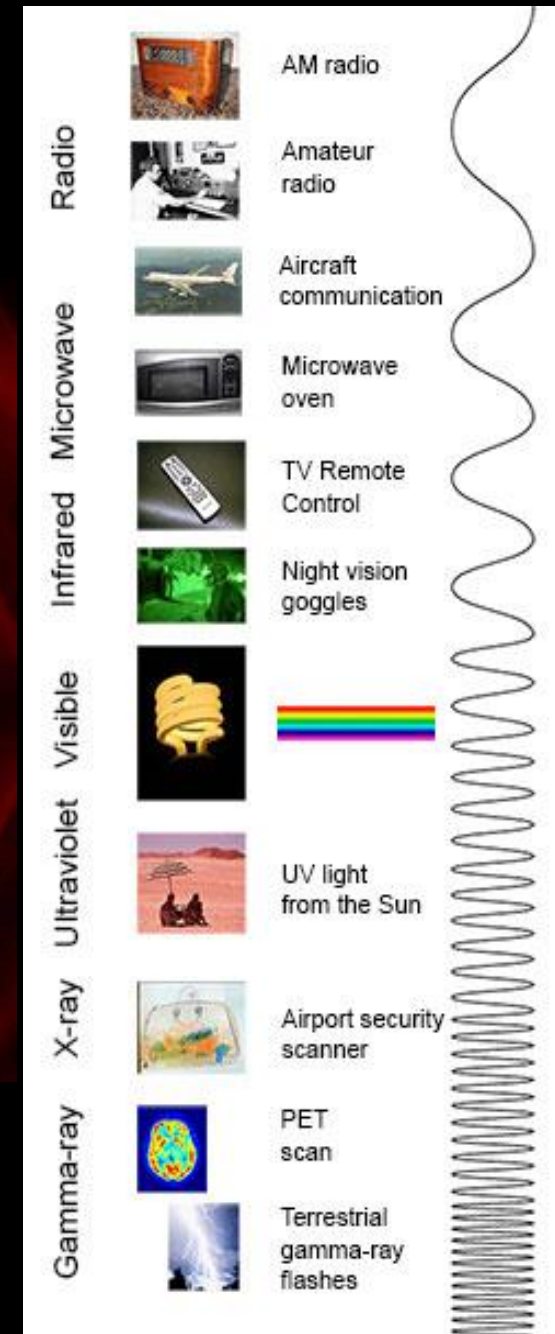




La nostra conoscenza dell'universo è basata solo su indagini condotte attraverso la radiazione elettromagnetica

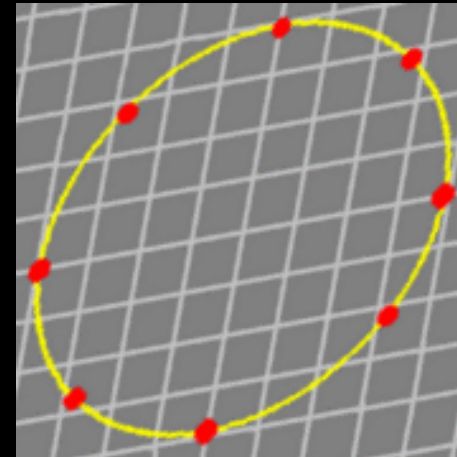
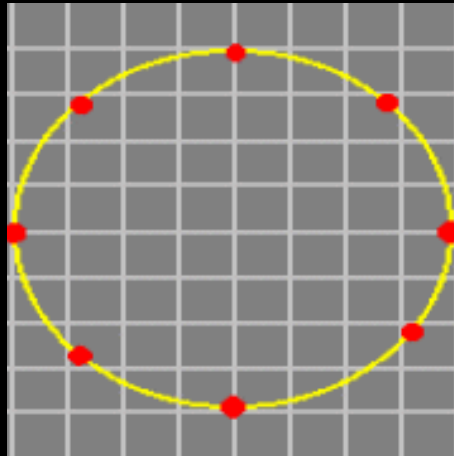


Le onde gravitazionali hanno varie lunghezze d'onda, proprio come lo spettro elettromagnetico



# Che effetto producono ?

Le onde gravitazionali cambiano la distanza tra i punti dello spazio



$L$   $\updownarrow$   $L$  **Ampiezza**

$$h = \frac{\Delta L}{L}$$

$$h \approx 10^{-22}$$

$\emptyset$  capello / stella più vicina



# LIGO

Hanford (LA)



Livingstone (WA)

Virgo





# Tanto, tanto spazio vuoto

La più grande  
camera da vuoto  
in Europa

7000 m<sup>3</sup>

in cui la luce viaggia  
senza essere disturbata  
da polvere o gas

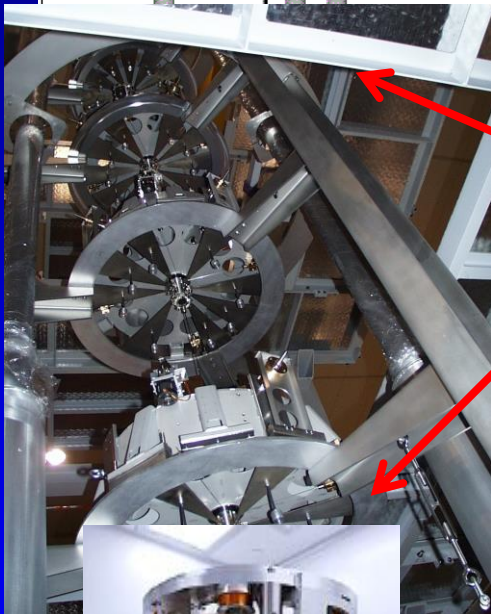
Specifiche:

- $10^{-9}$  mbar per H<sub>2</sub>,  $10^{-14}$  mbar per gli idrocarburi
- $10^{-6}$  mbar nelle camere delle sospensioni

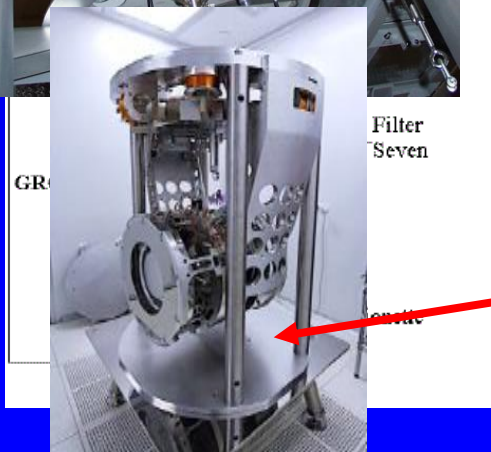
# Superattenuatore di Virgo



Pendolo  
invertito

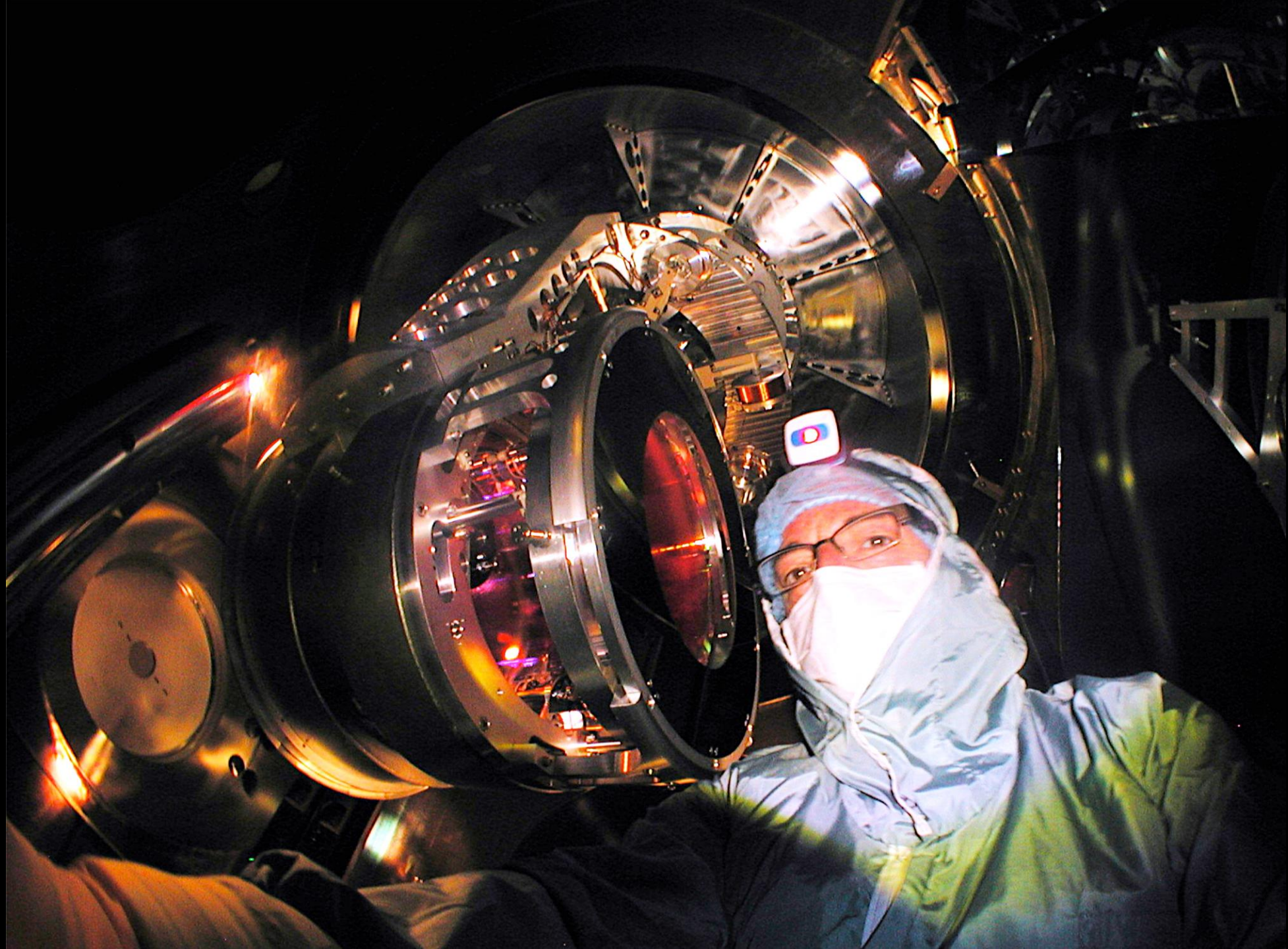


Filtri  
sospesi

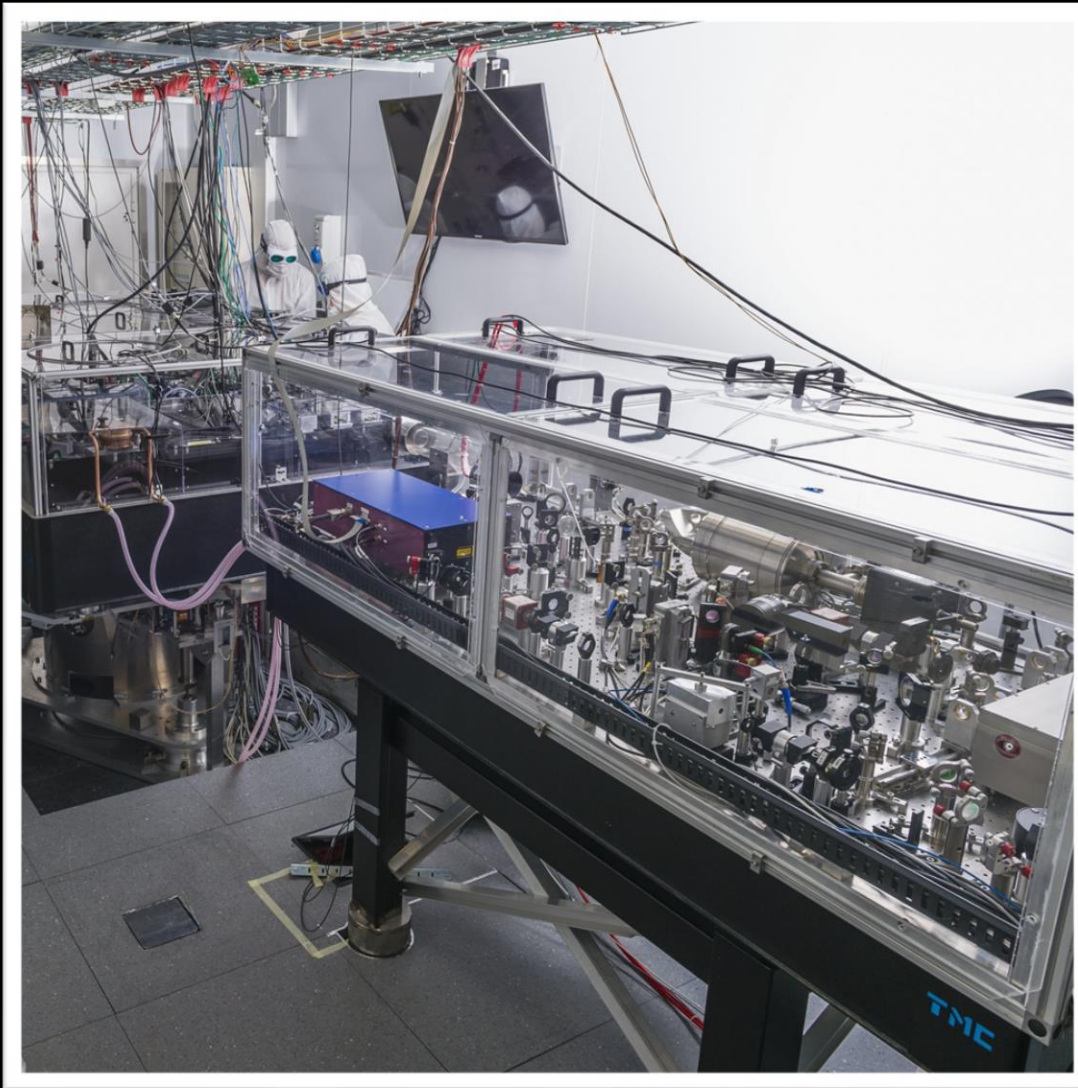


Specchio

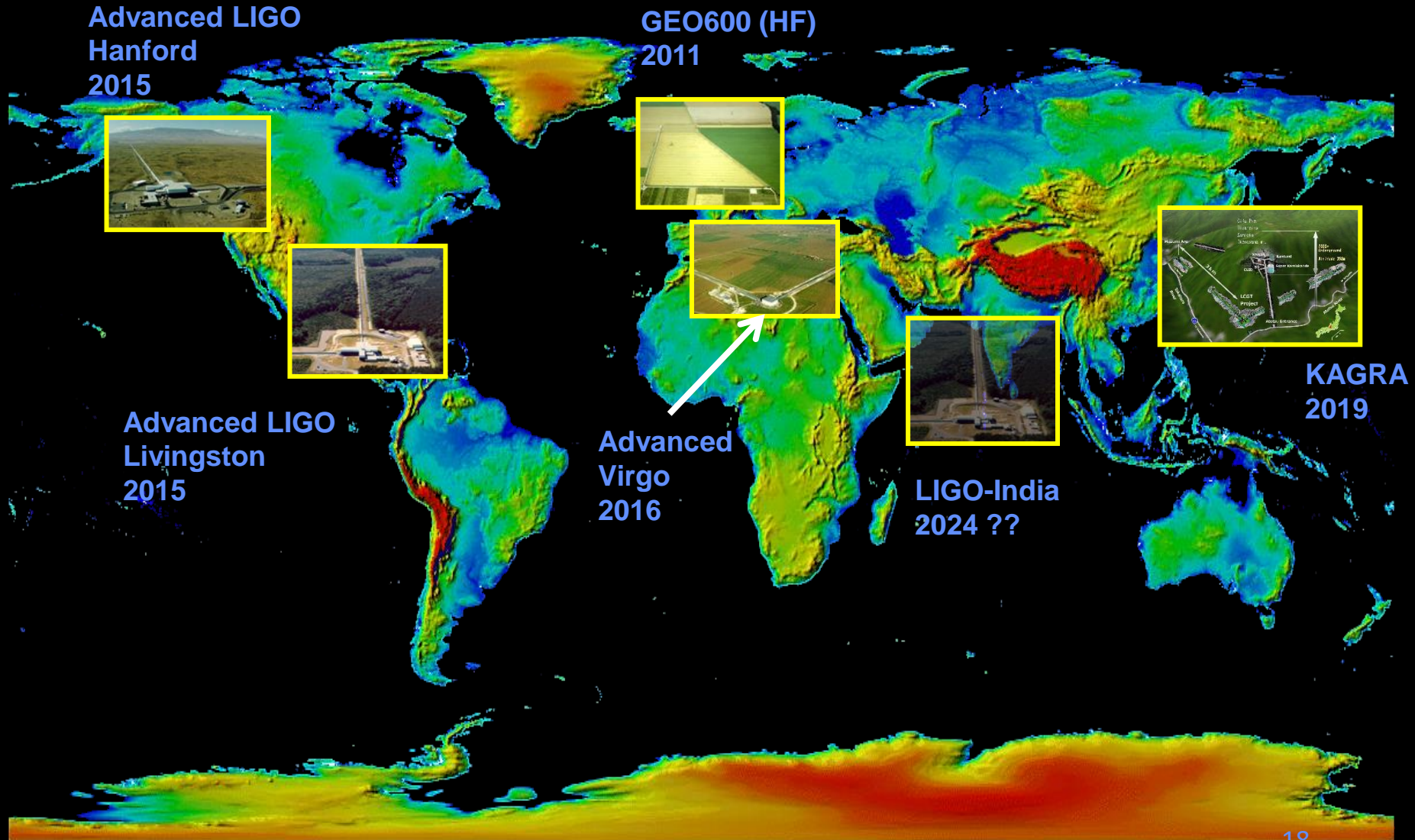


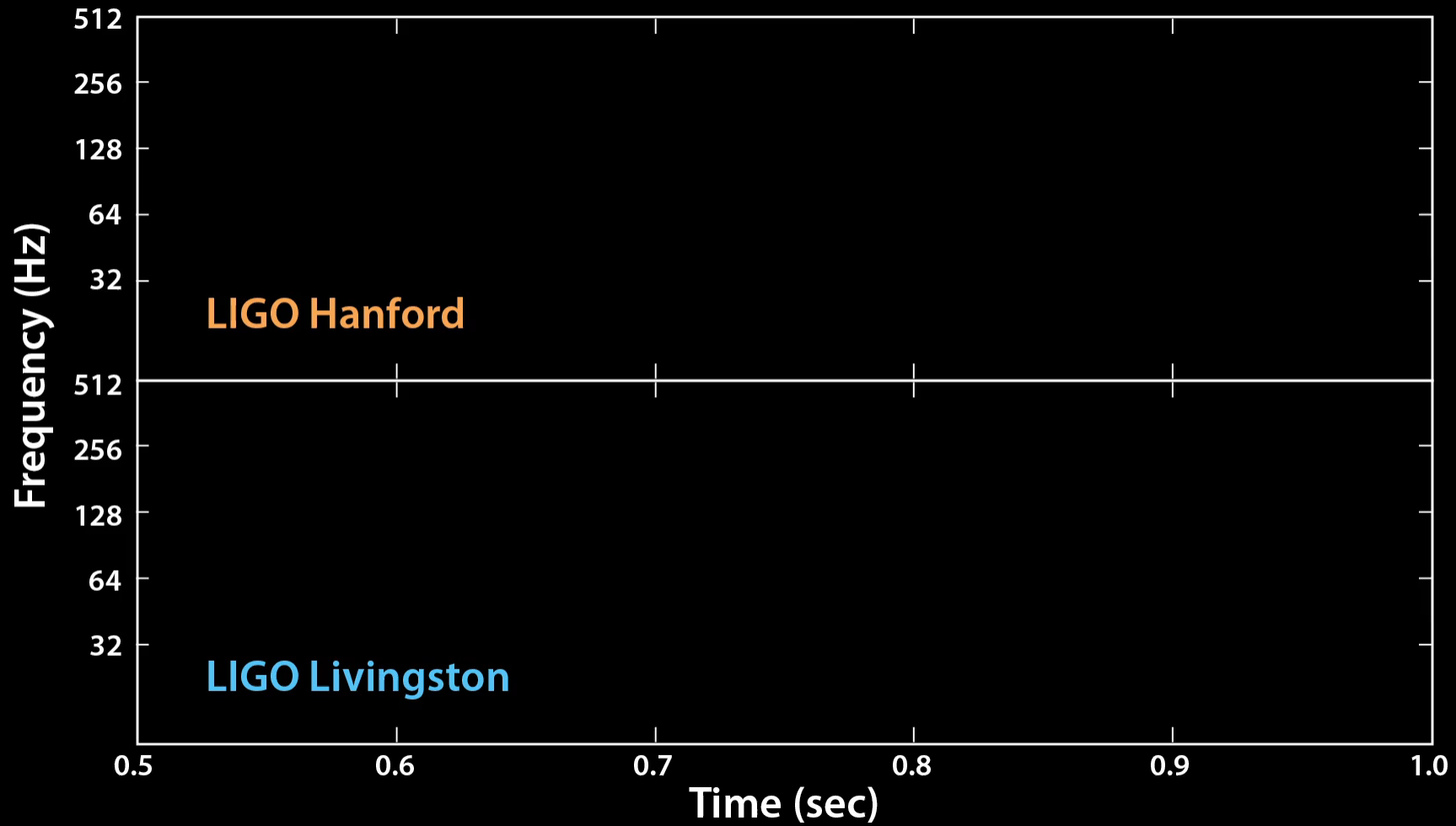




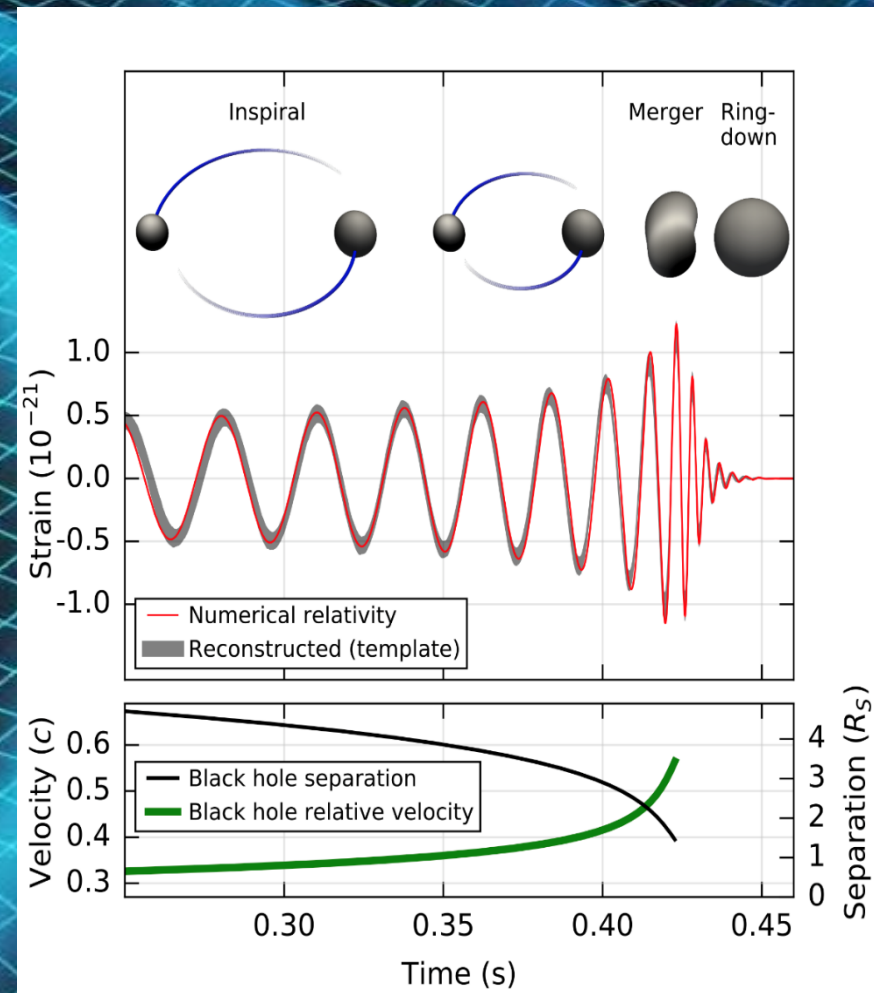
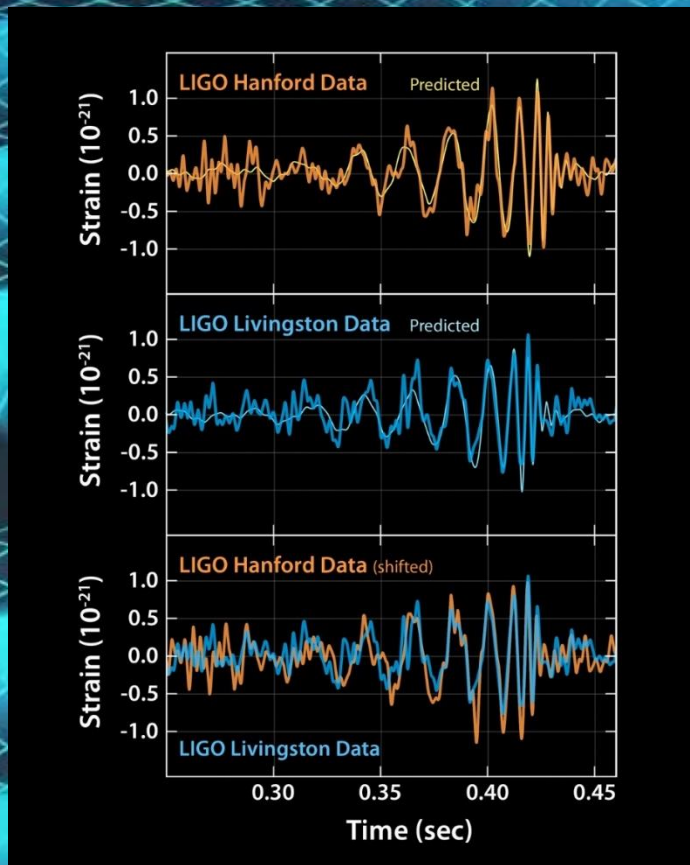


# The advanced GW detector network: 2015-2025



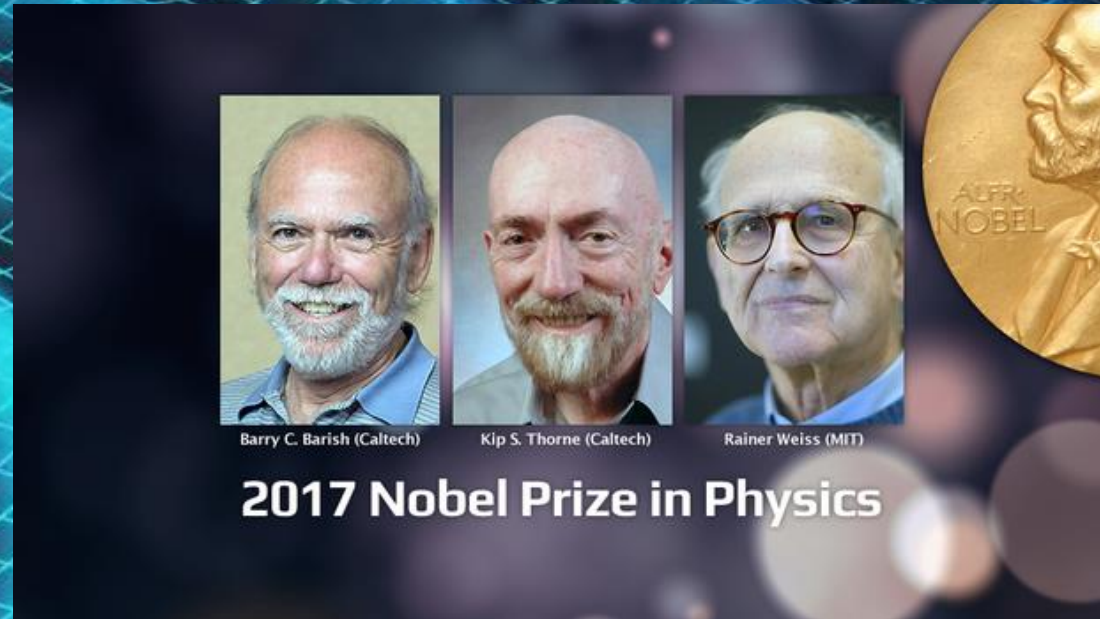
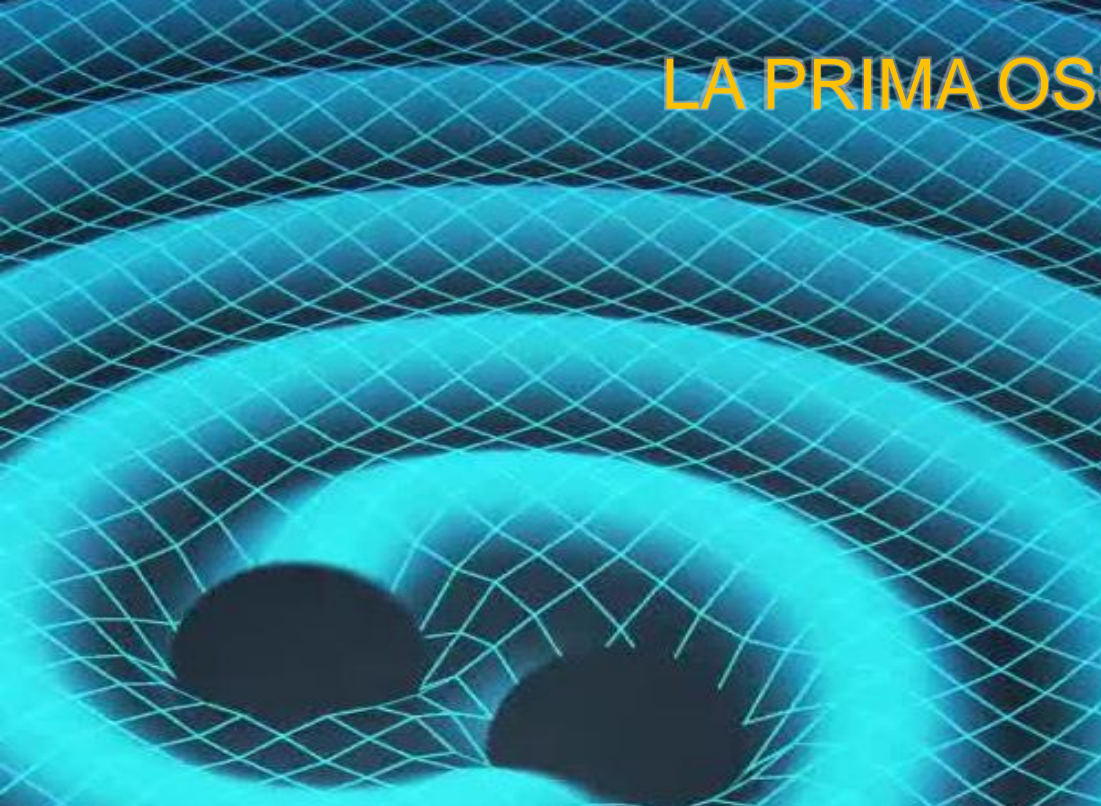


# LA PRIMA OSSERVAZIONE: GW150914

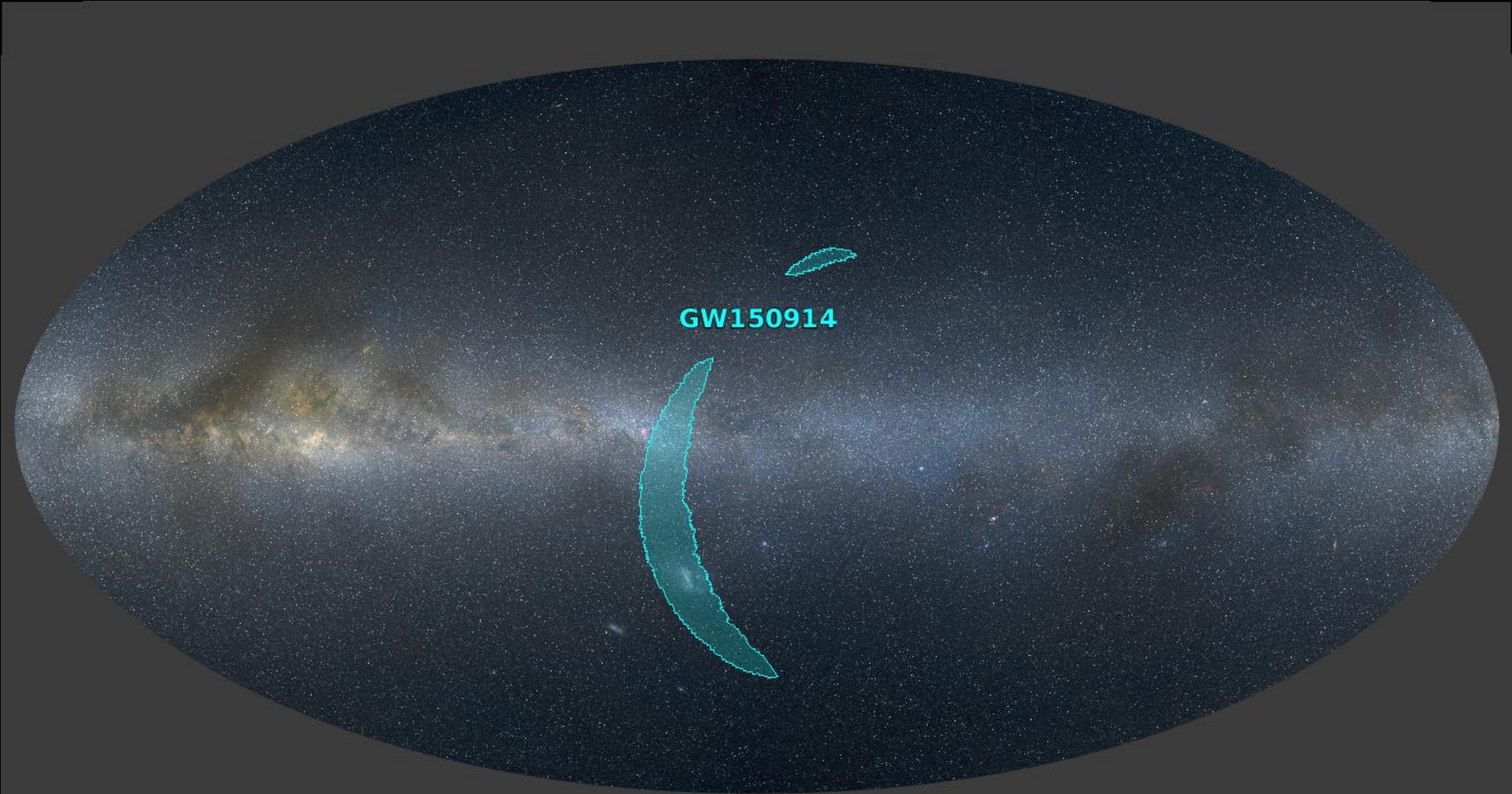


**Massa primo BH: 36 Msolari**  
**Massa secondo BH: 29 Msolari**  
**Massa BH finale: 62 Msolari**  
**3 Masse solari in energia delle OG**

# LA PRIMA OSSERVAZIONE: GW150914

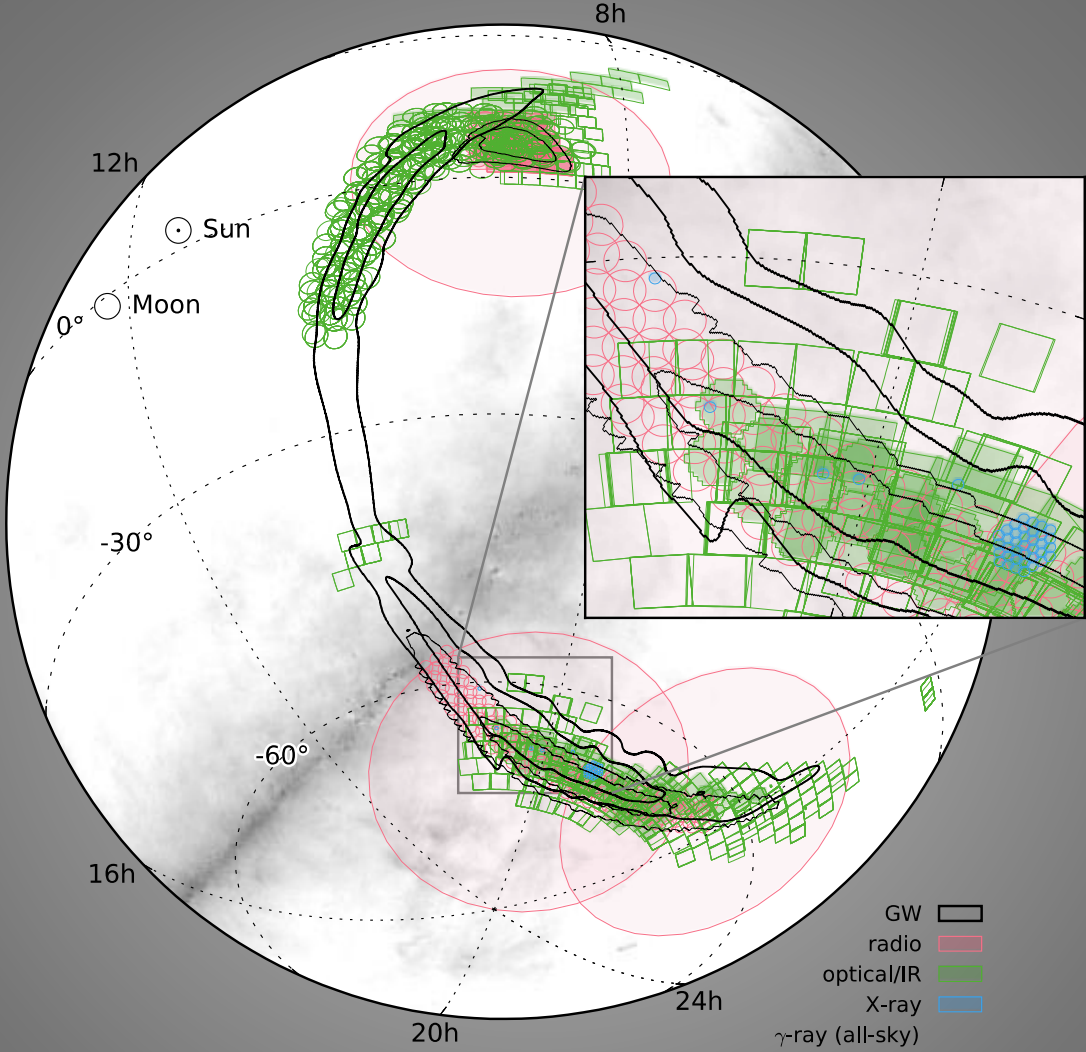


**Special Breakthrough Prize in  
Fundamental Physics 2016**



GW150914

# Copertura dell'area di cielo corrispondente a GW150914

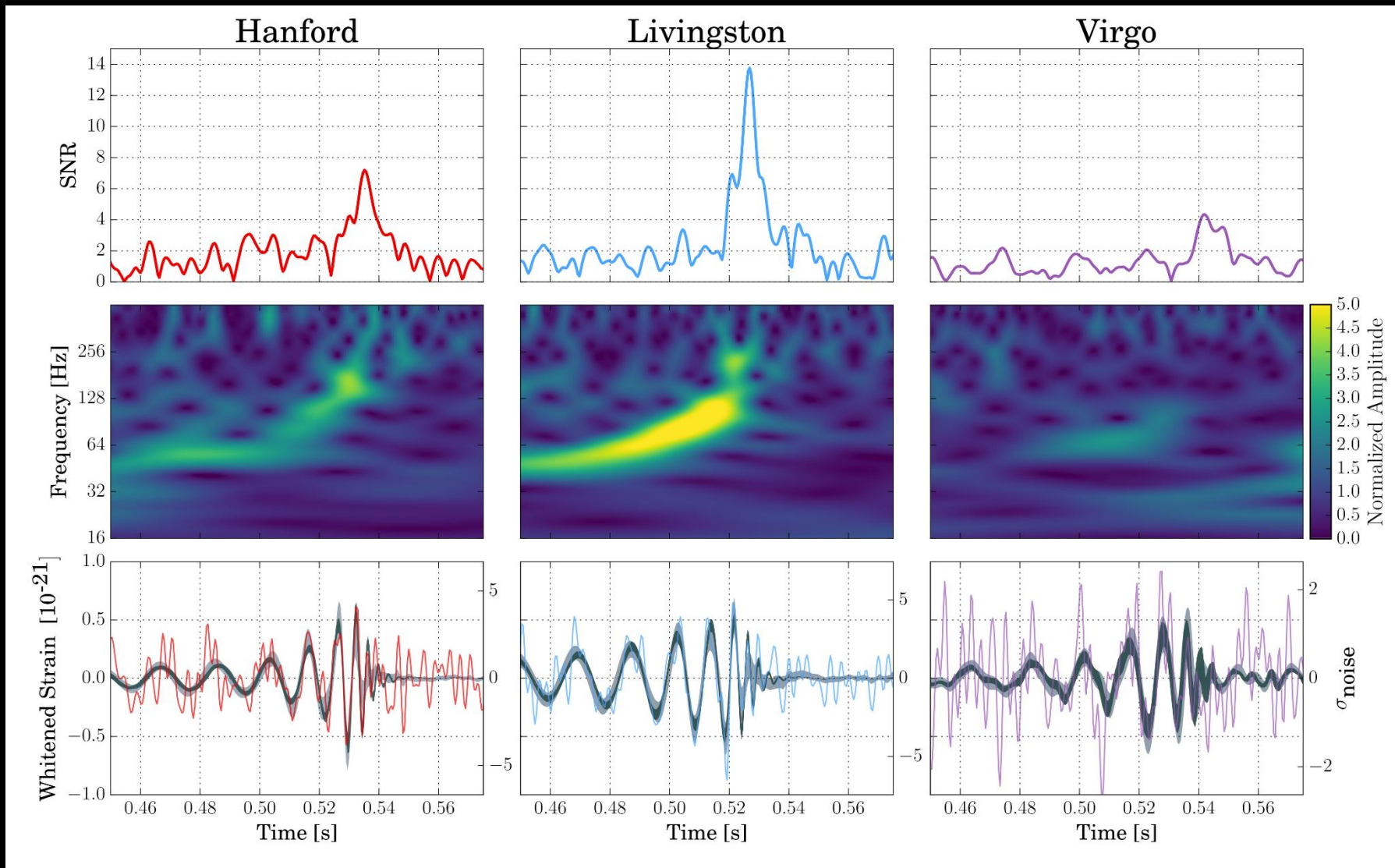


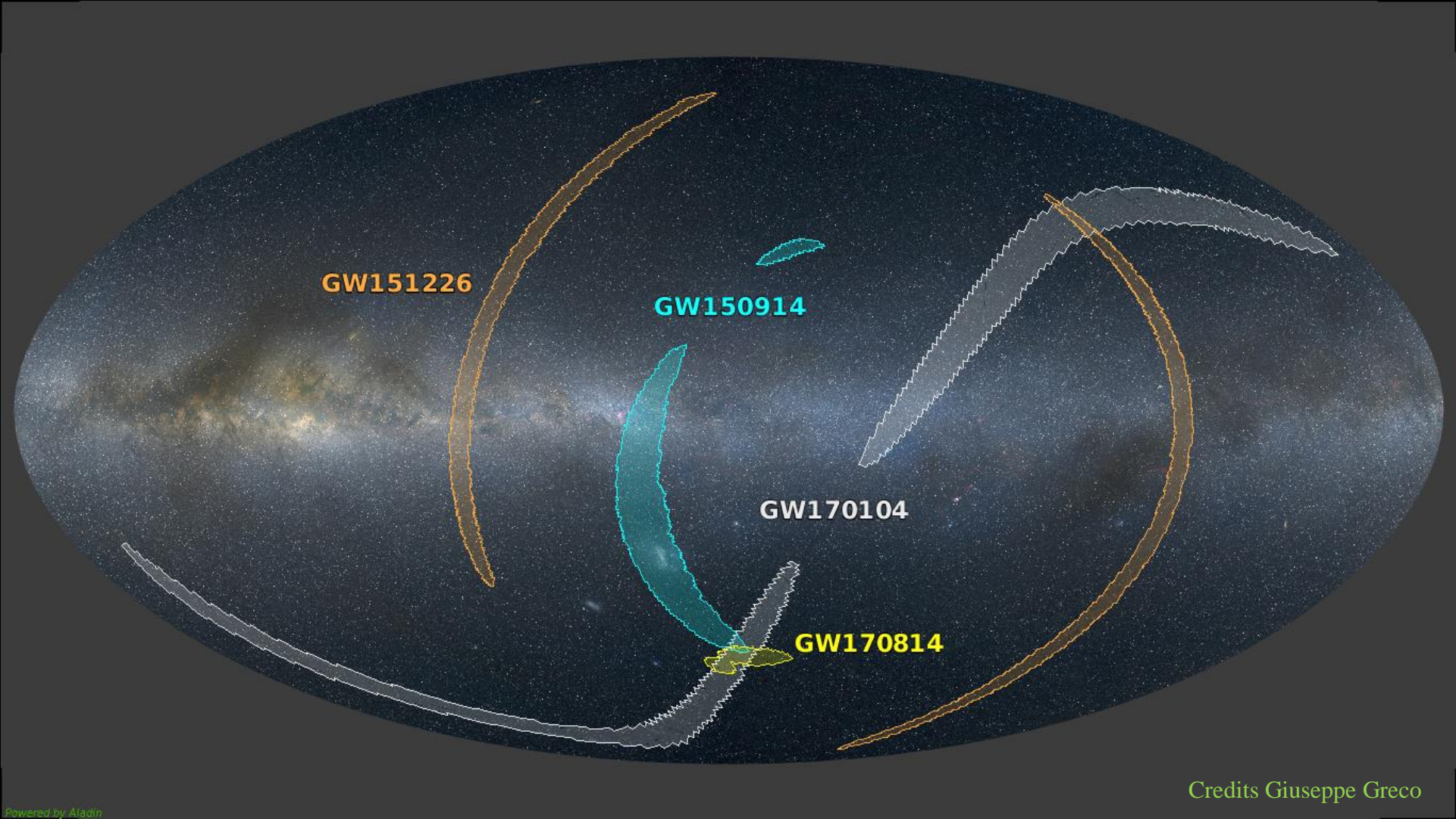
AdV best BNS range from May 7 (C8) to July 30 (ER12)





e il 14 agosto 2017...





**GW151226**

**GW150914**

**GW170104**

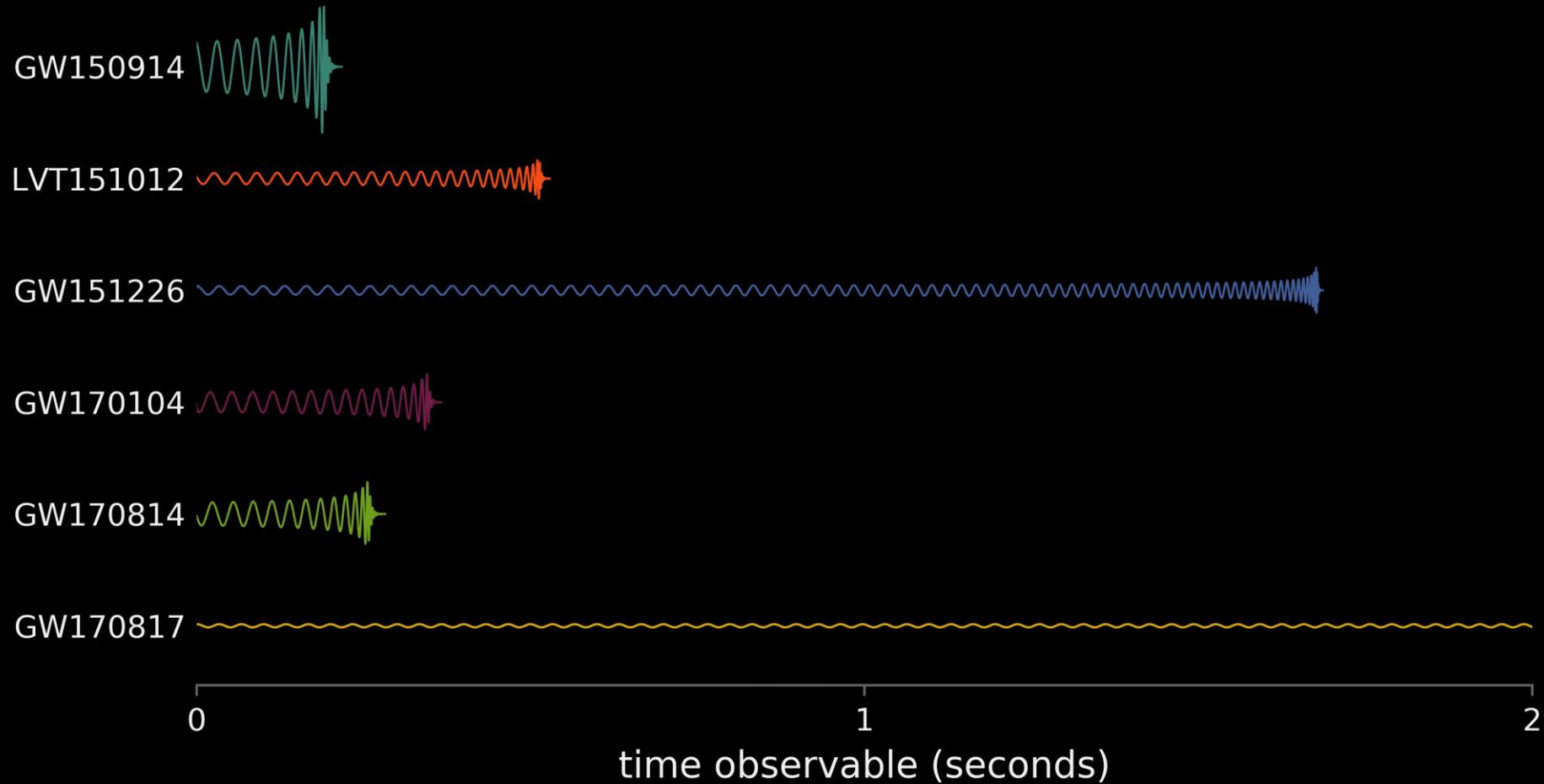
**GW170814**

...tre giorni dopo

17 agosto 2017

$m$   $1.17 \div 1.6 M_{\odot}$

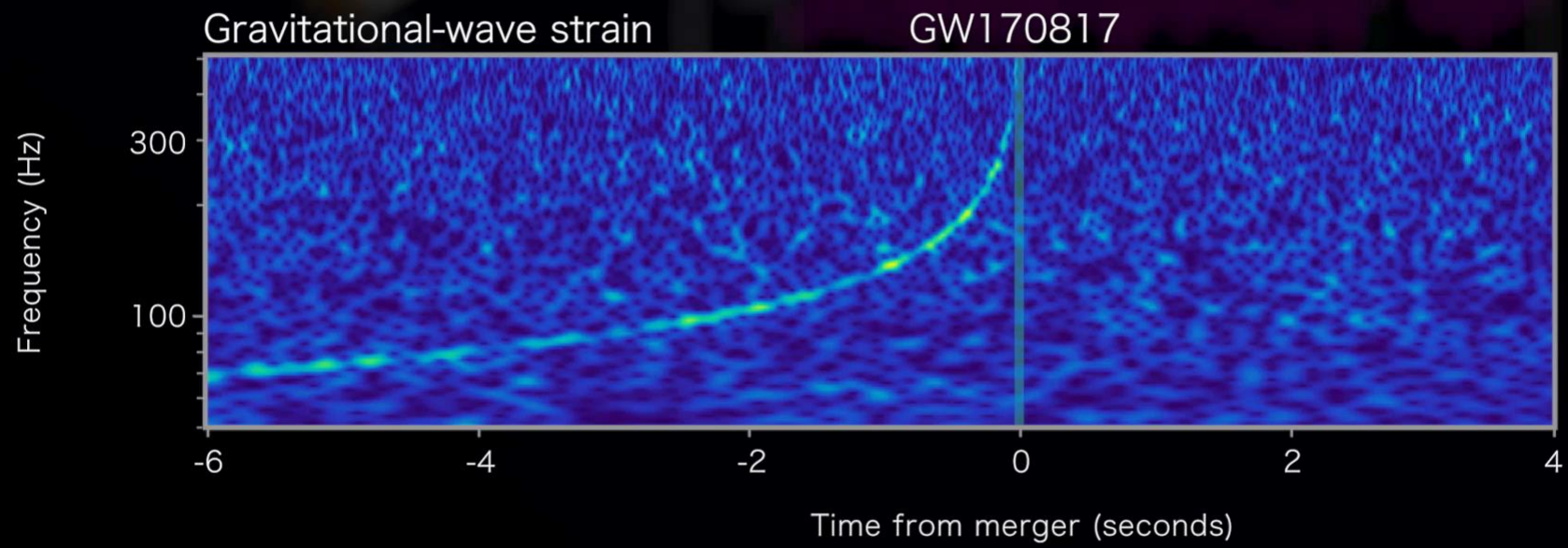
$d$  130 MLY

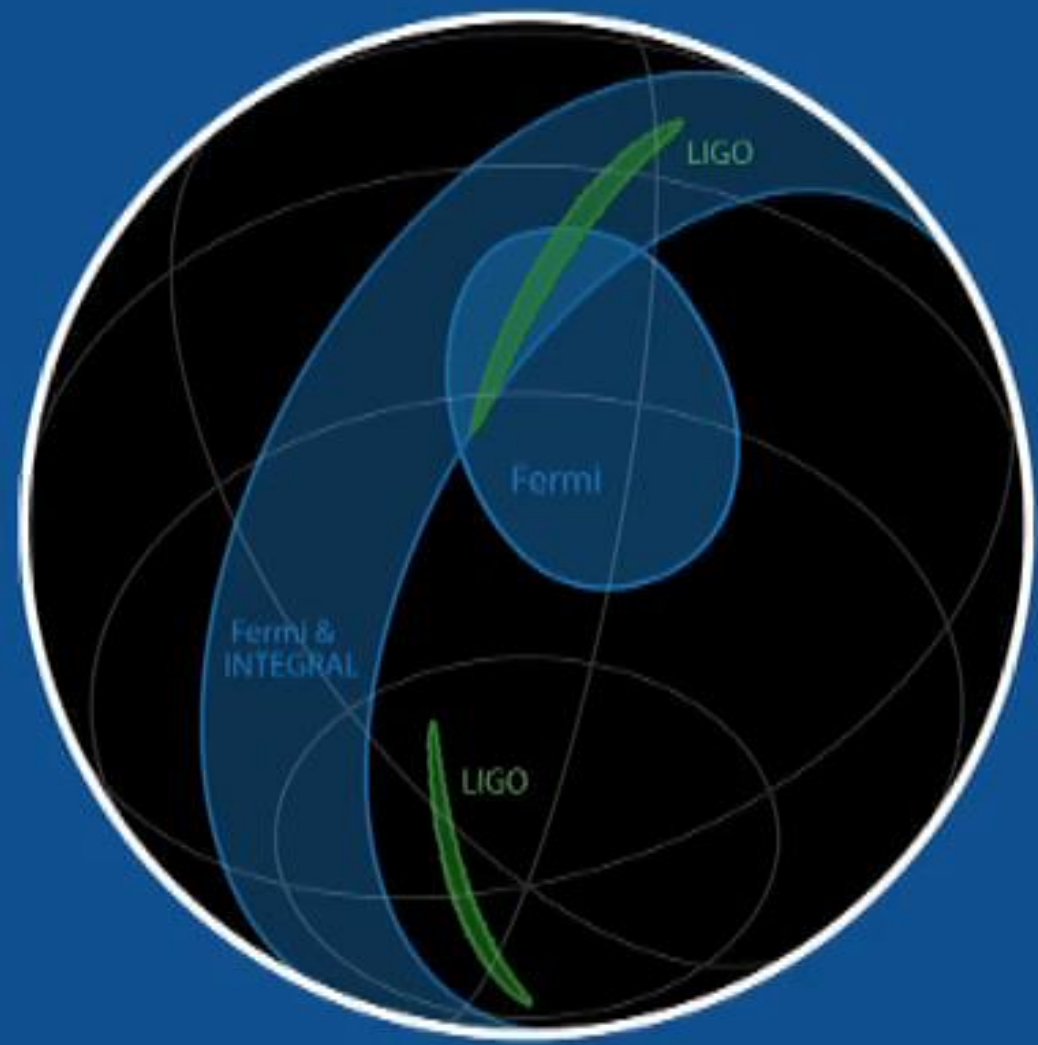


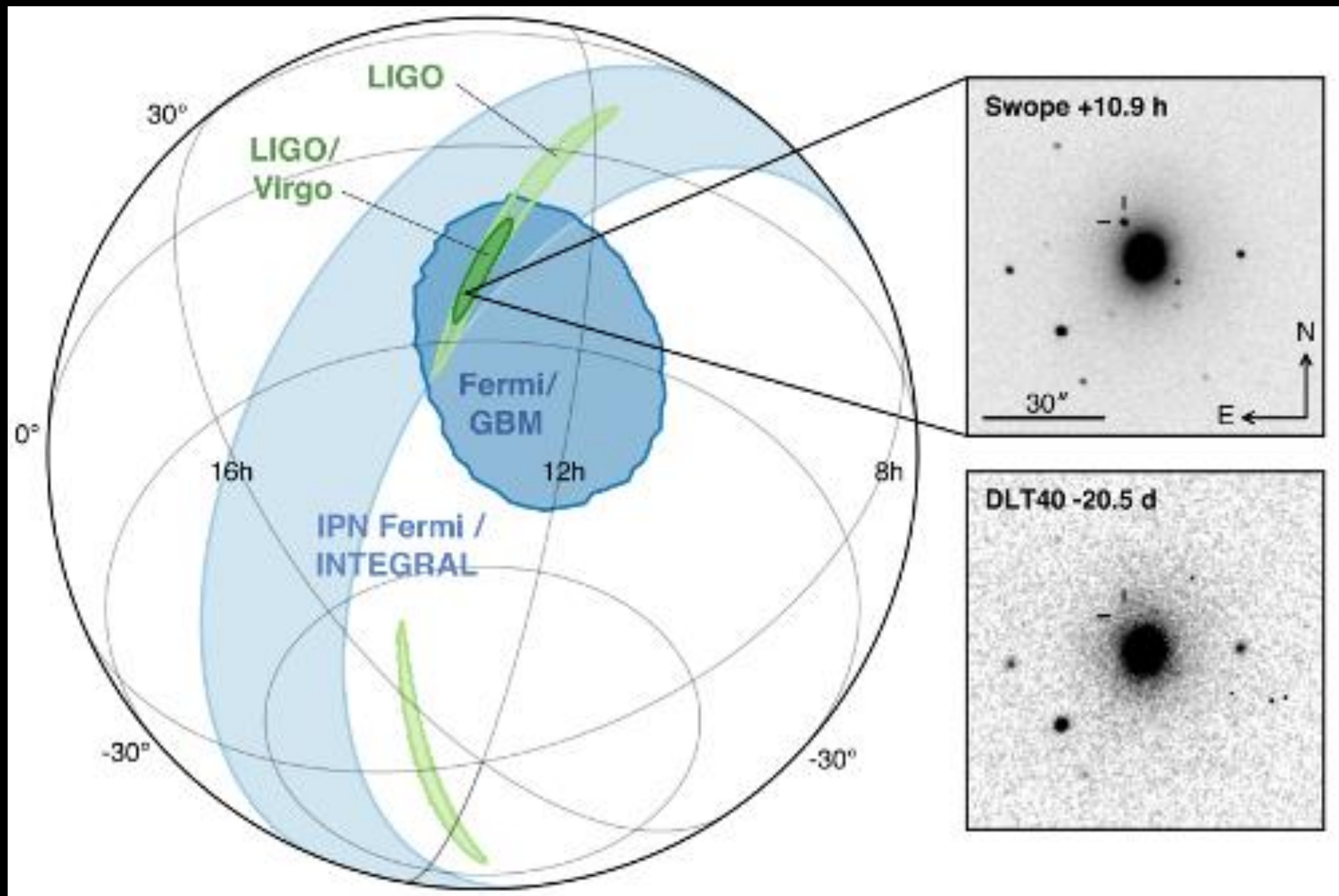
Gamma rays, 50 to 300 keV

GRB 170817A



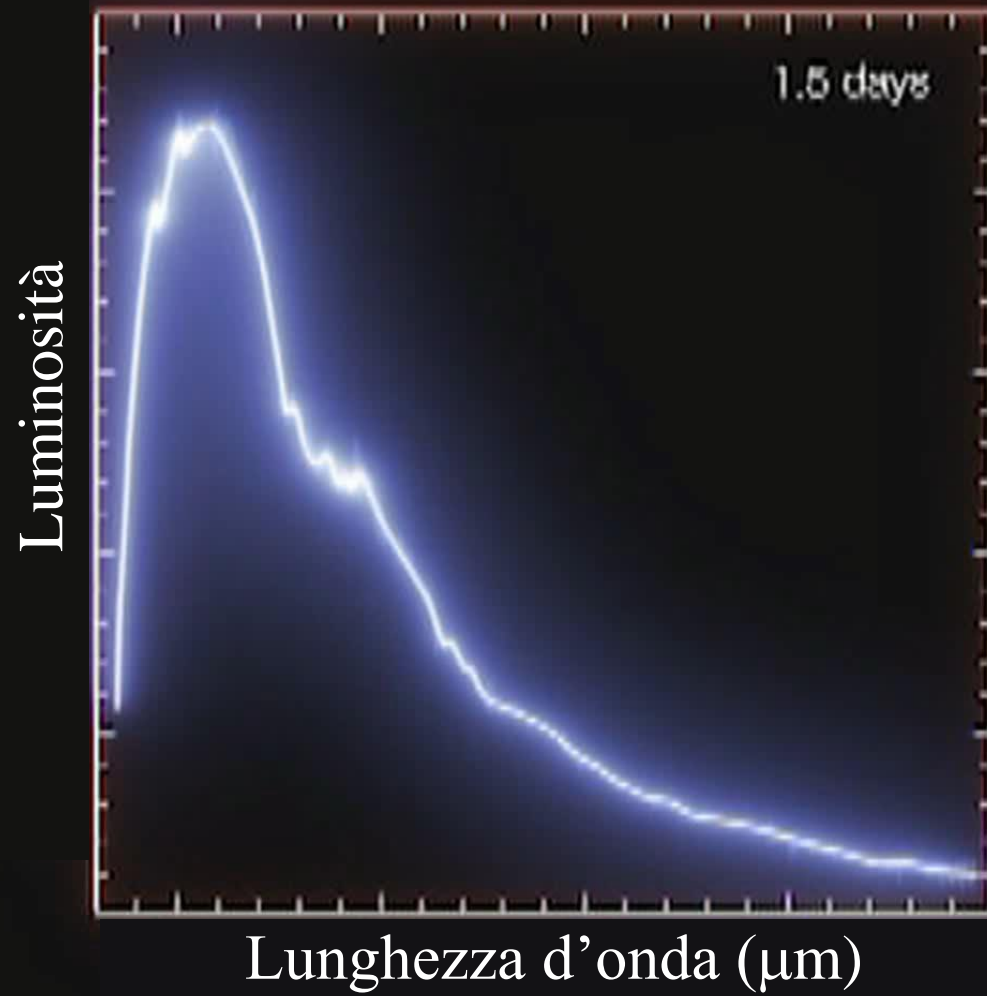






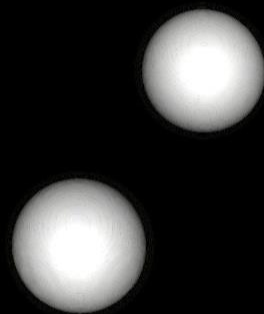


E' finalmente nata  
l'astronomia  
multi-messaggera



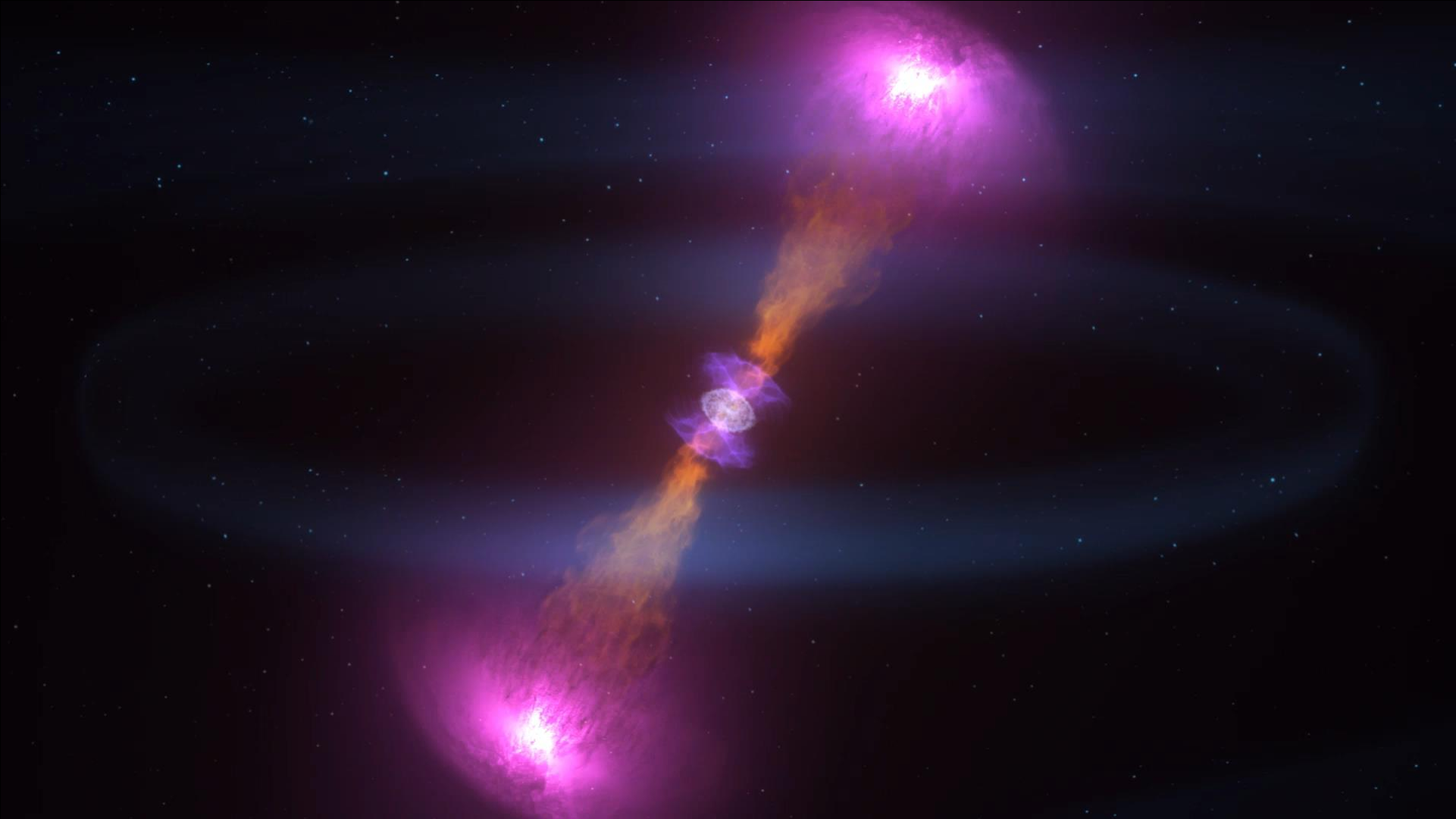
ESO-VLT/X-Shooter

$t = 10.3 \text{ ms}$









$t = 16.6 \text{ ms}$



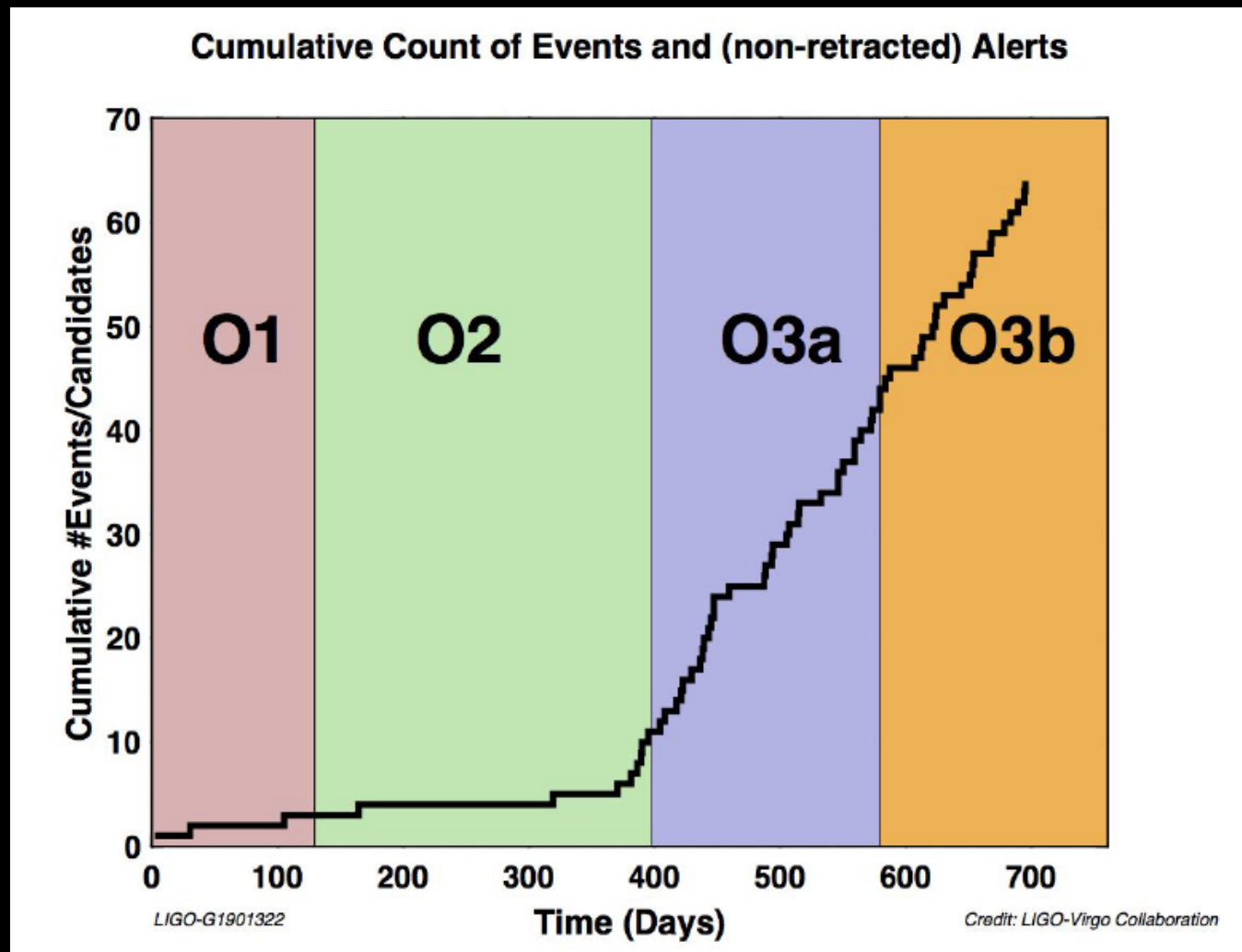


# The Origin of the Solar System Elements

1 H	big bang fusion 										cosmic ray fission 					2 He						
3 Li	4 Be	merging neutron stars 										exploding massive stars 					5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
11 Na	12 Mg	dying low mass stars 										exploding white dwarfs 					13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr					
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe					
55 Cs	56 Ba	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn						
87 Fr	88 Ra	<b>100-200 Masse della Terra di Oro !!!!</b>																				

57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu
89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U											

1 aprile 2019  
inizia la terza  
presa dati  
scientifica O3



## O3 è stato diviso in due parti

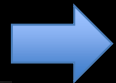
1 aprile 19 - 30 settembre 19  
O3a



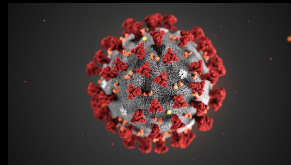
39 eventi

Manutenzione e miglioramenti  
in Virgo e LIGO

1 novembre 19 - ~~27~~ marzo 20  
O3b



Almeno 20 candidati

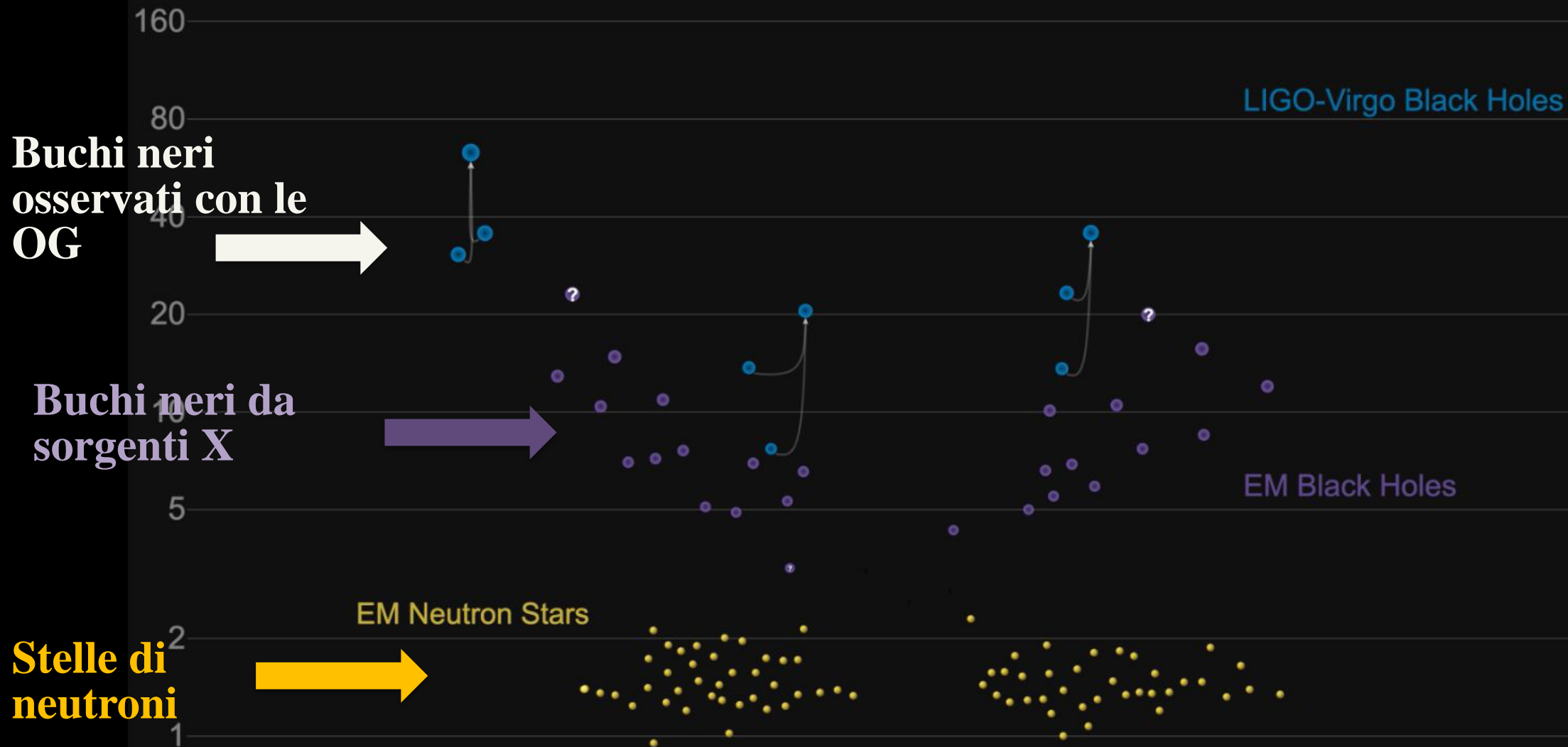


**ATTENZIONE: sono solo candidati**  
Per essere promossi a EVENTI devono essere  
analizzati in modo molto dettagliato



# Masses in the Stellar Graveyard

*in Solar Masses*



**Buchi neri  
osservati con le  
OG**

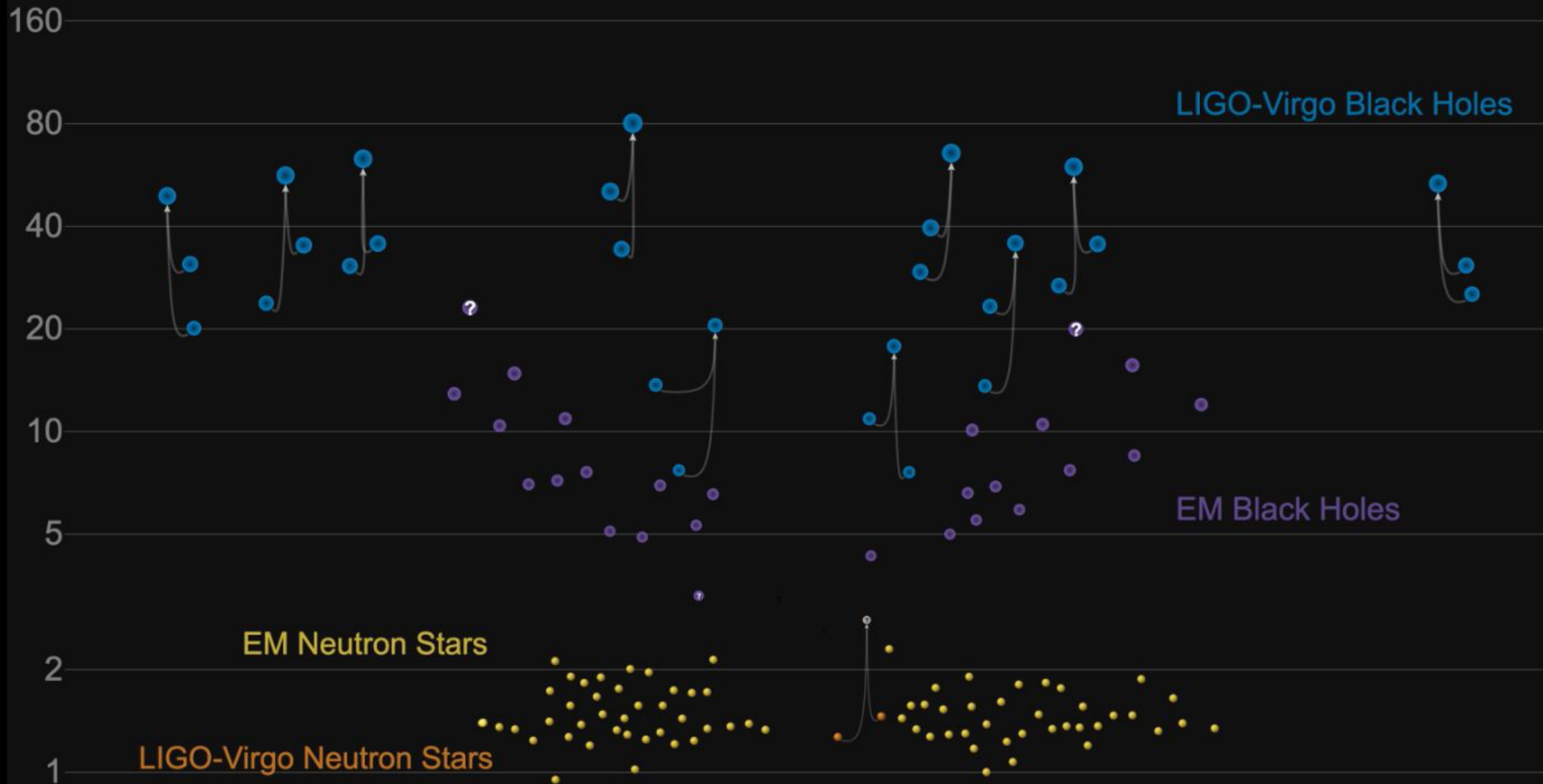
**Buchi neri da  
sorgenti X**

**Stelle di  
neutroni**

**O1**

# Masses in the Stellar Graveyard

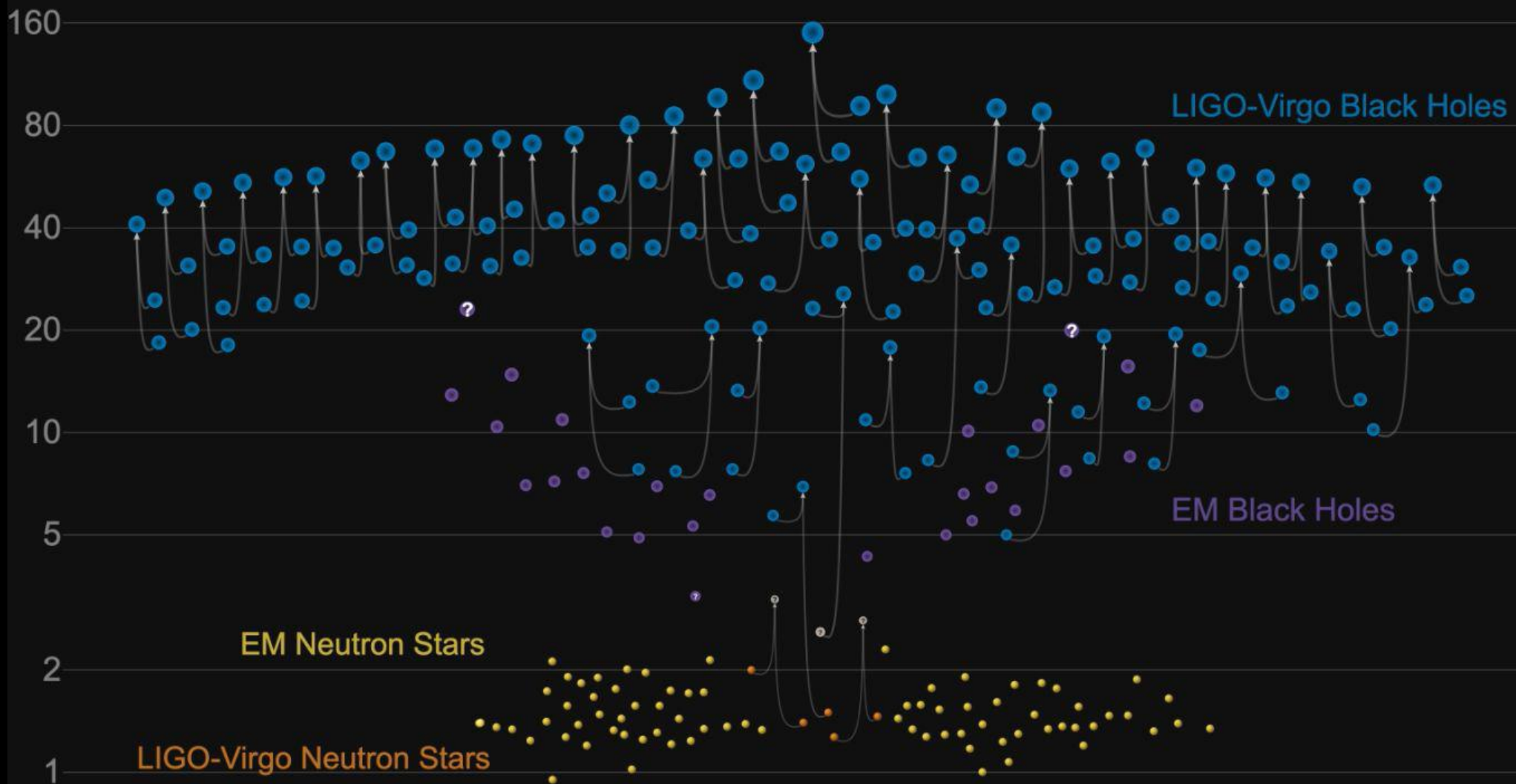
*in Solar Masses*



**O2**

# Masses in the Stellar Graveyard

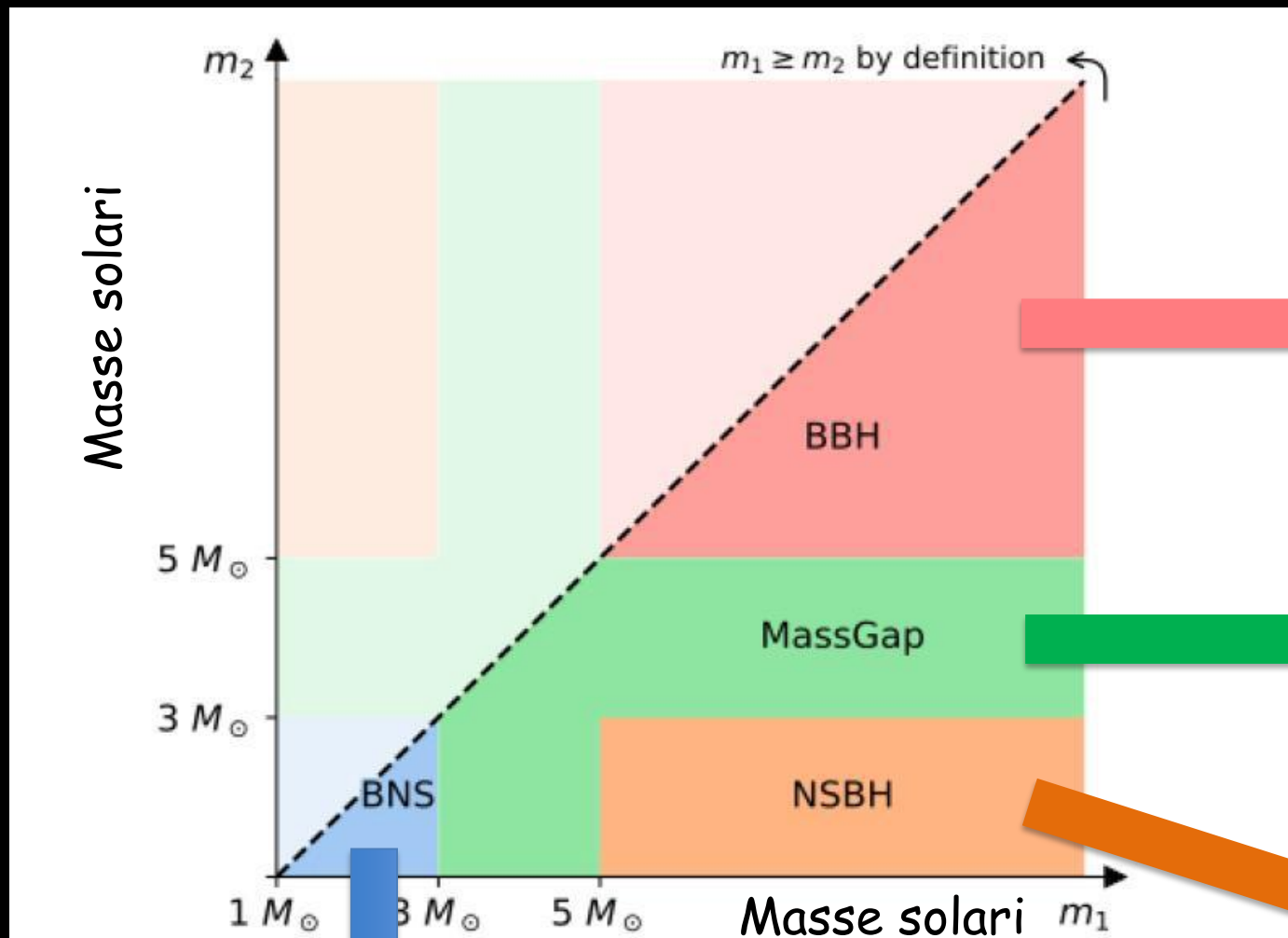
*in Solar Masses*



**O3a**

# Cosa cerchiamo ?

Sistemi binari



Sono così tanti che li raccogliamo ormai in un catalogo

Non si conoscono per ora stelle di neutroni così grandi, né buchi neri così leggeri

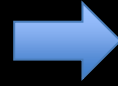
Qualche candidato c'è...

GW170817 la scoperta

GW190425 nuovo evento !!!

# GW190425: seconda osservazione BNS

L'evento è stato visto solo da LIGO-Livingstone

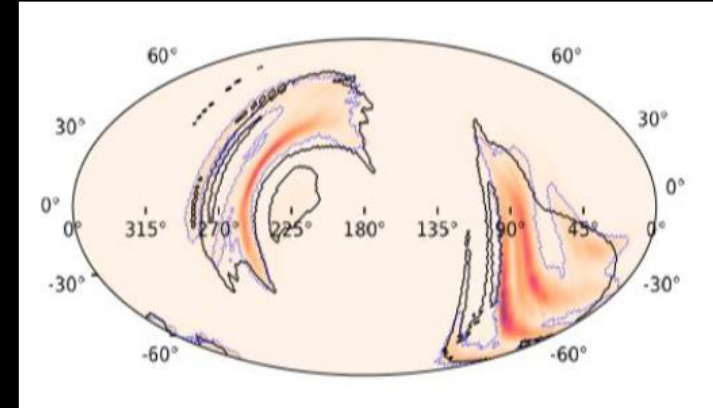


Pessima localizzazione

La sorgente è molto distante: 520 MLY contro i 130 MLY del primo evento



Segnale debole



## Nessuna osservazione EM associata

m1: 1.61 - 2.52  
m2: 1.12 - 1.68 masse solari

Buchi neri ??? Sarebbero i più piccoli mai visti

La massa del sistema però è 3.4 masse solari

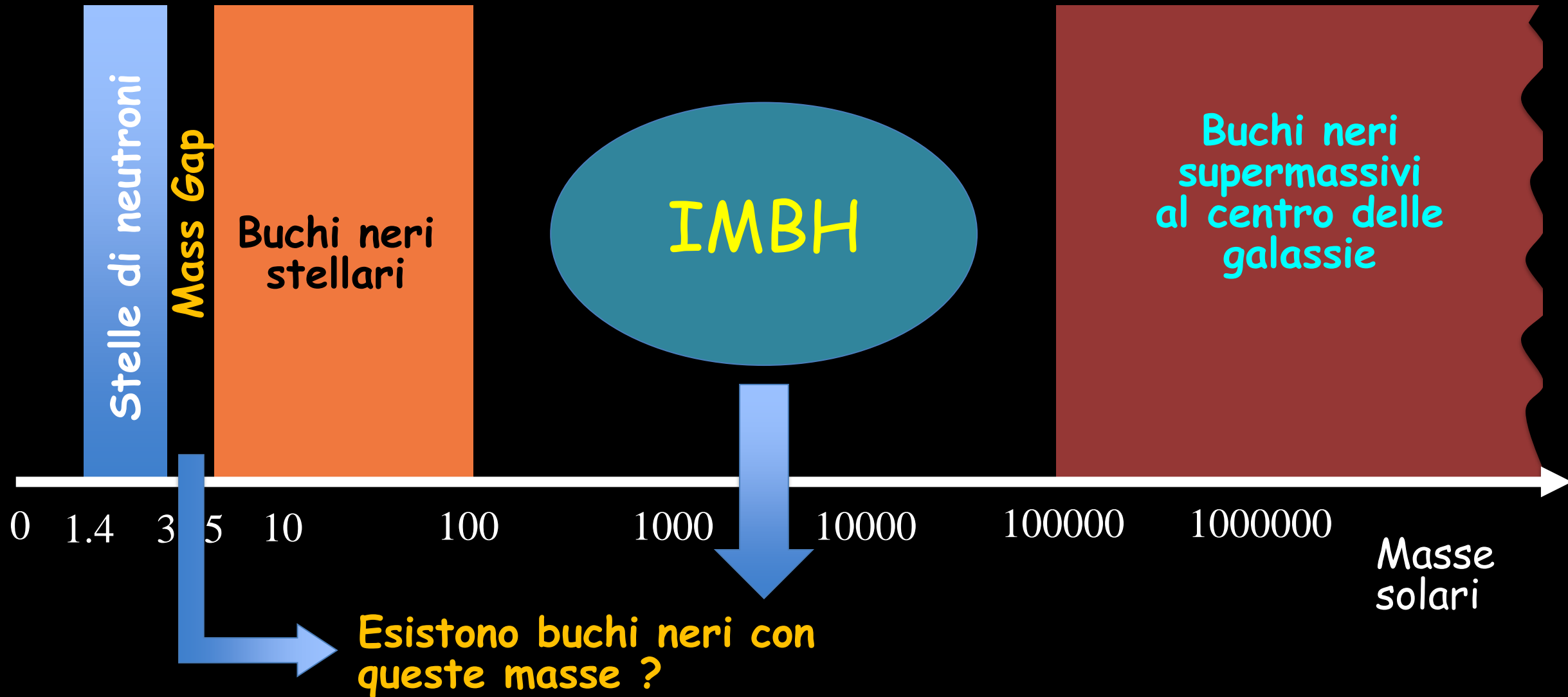
E' molto più grande di qualunque sistema di NS conosciuto

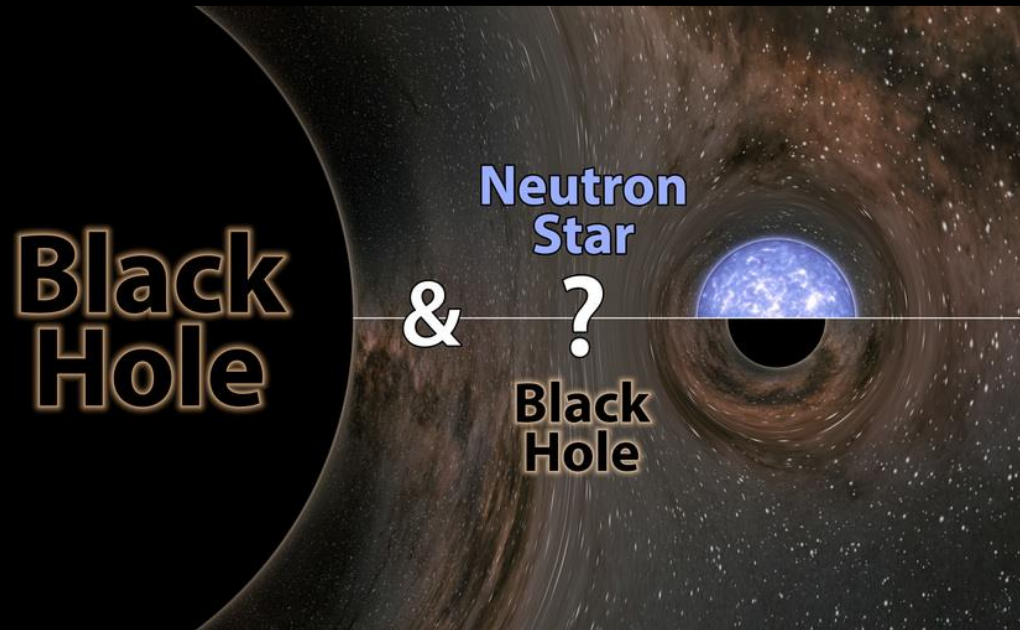
Come si sarà formato?



Quanti sistemi come questo ci sono, non visibili con altri sistemi?

Ma i buchi neri sono ancora interessanti?





Black Hole

& ?

Neutron Star

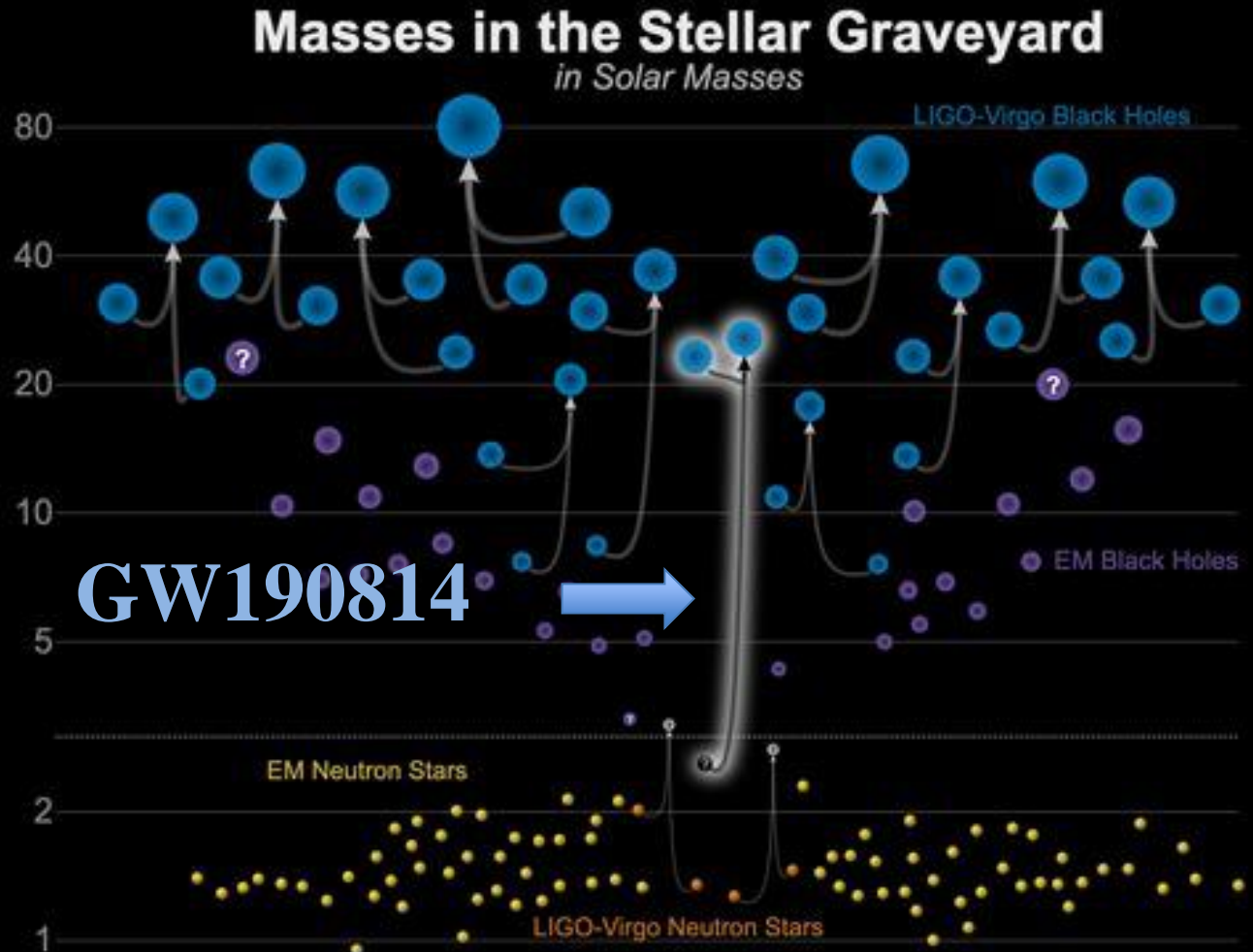
Black Hole

2.6 masse solari

Non si osservano effetti mareali

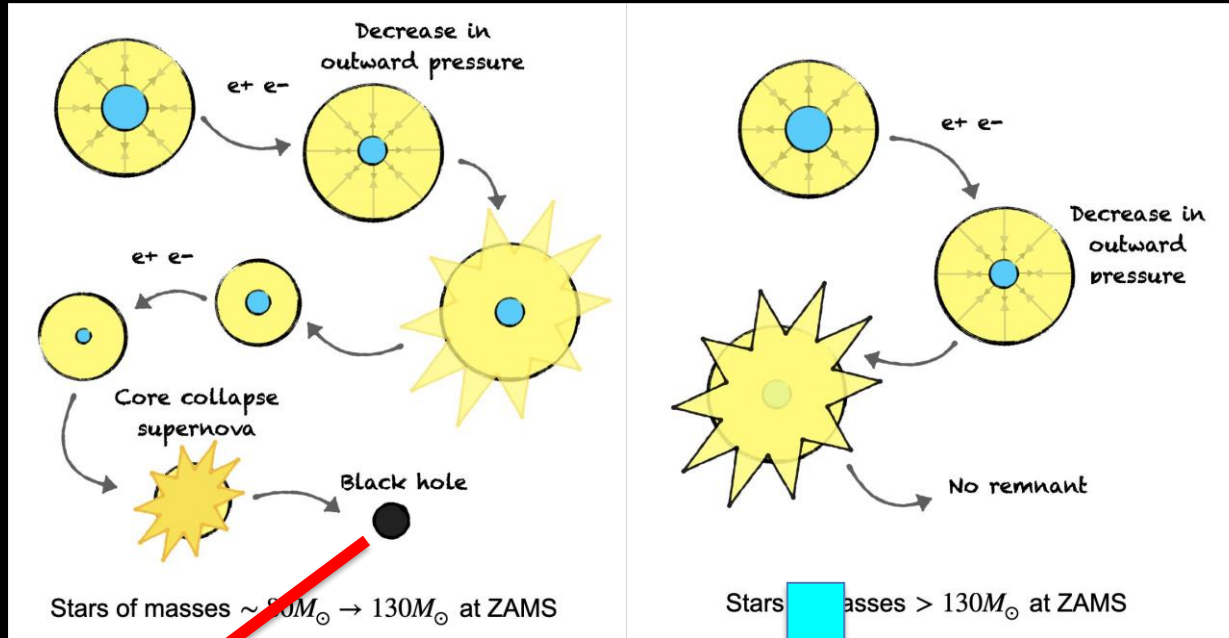
Non si è vista la controparte EM

E' compatibile con NSBH o BBH



# Pair Instability Gap

Pulsational Pair Instability



Pair Instability

Buchi neri stellari

Perdita di massa

Non rimane nulla

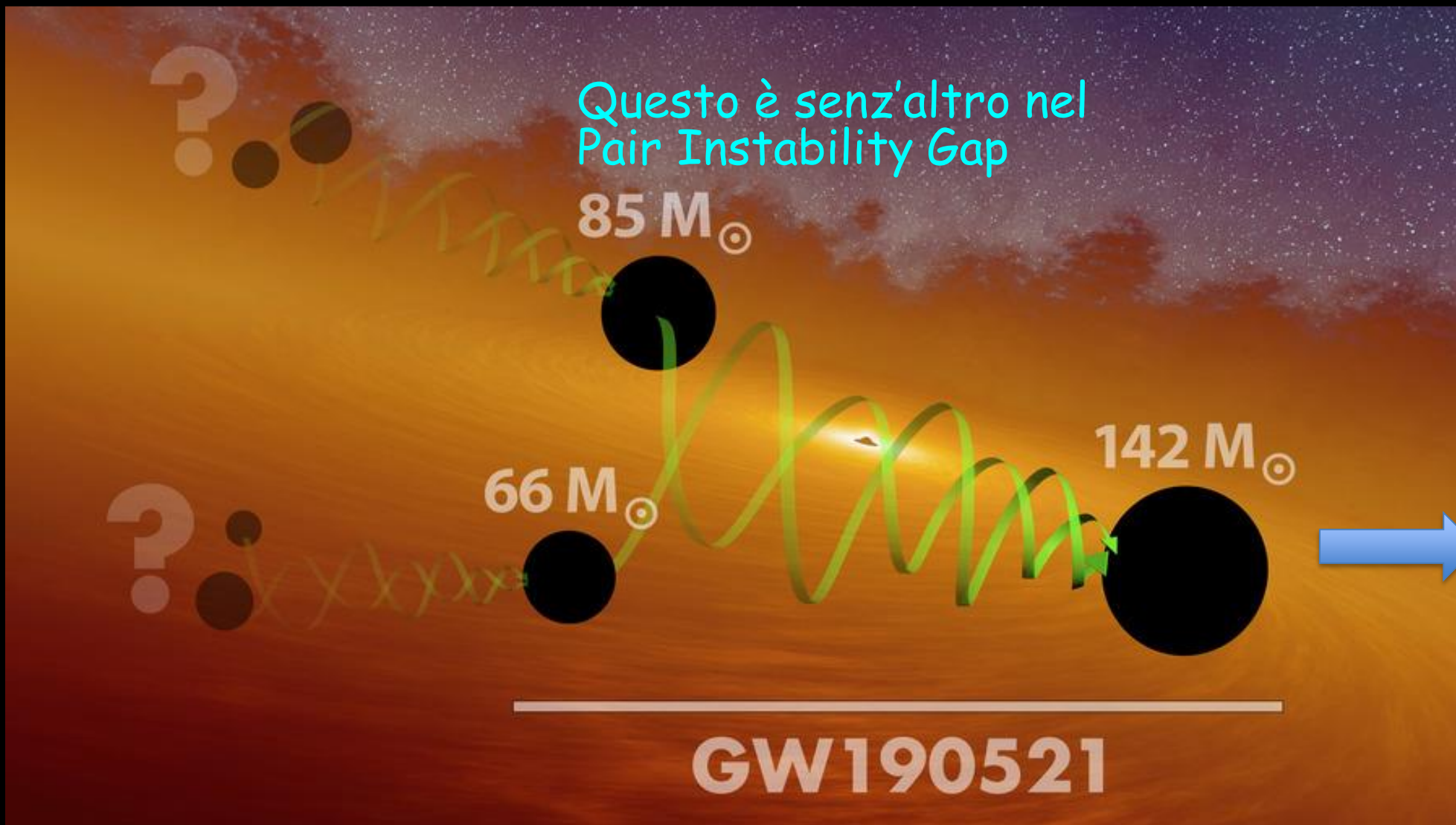
IMBH

65

130

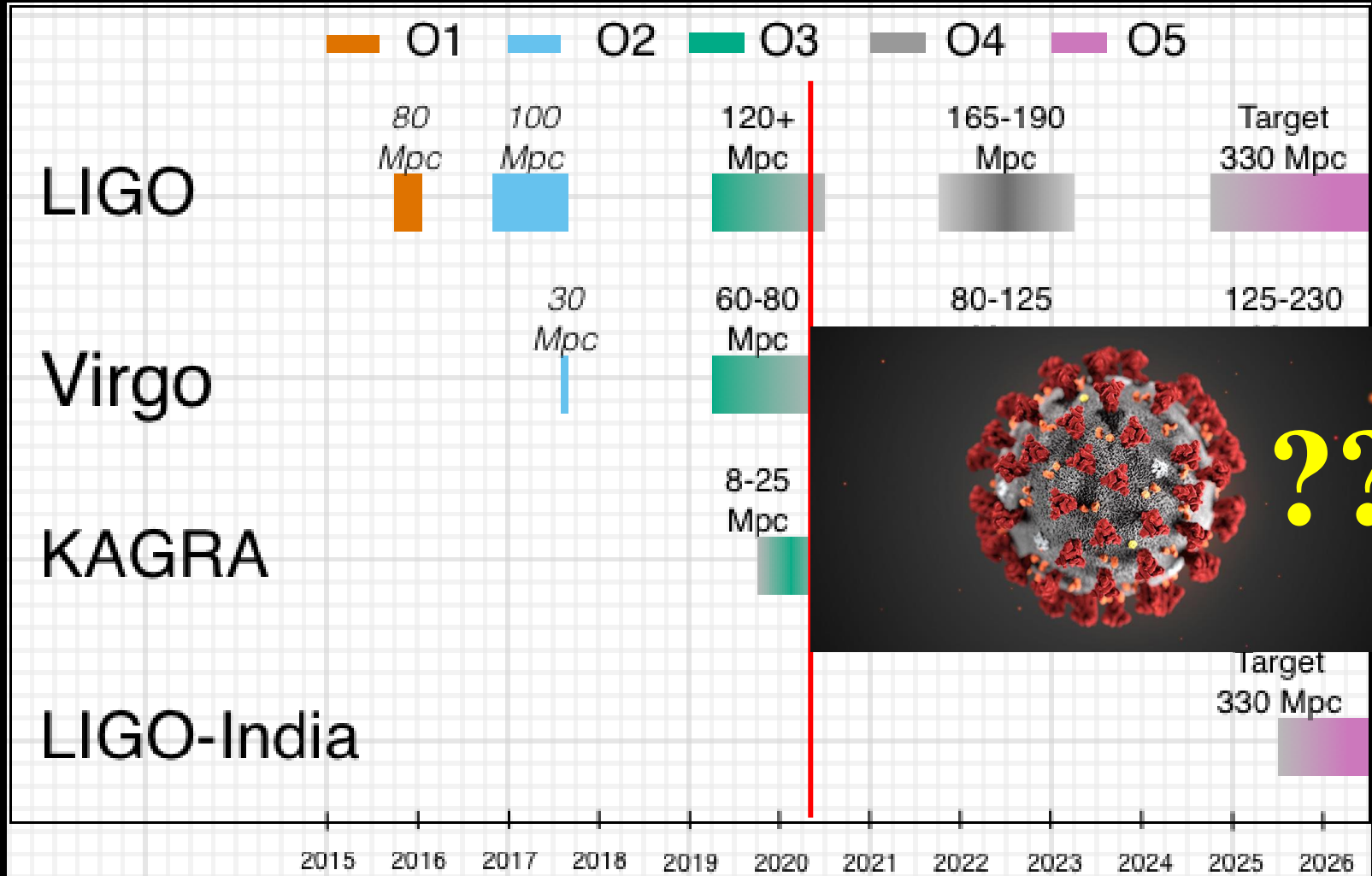
(Masse solari)





La prima  
osservazione  
della formazione  
di un IMBH

# Il futuro...



Courtesy of R. Flaminio

# Il futuro...

- Fase I **O4**

- Specchio aggiuntivo di Signal recycling
- Laser più potente (40 W invece degli attuali 26 W)
- Nuova configurazione ottica (Frequency dependent squeezing)
- Sottrazione del rumore Newtoniano

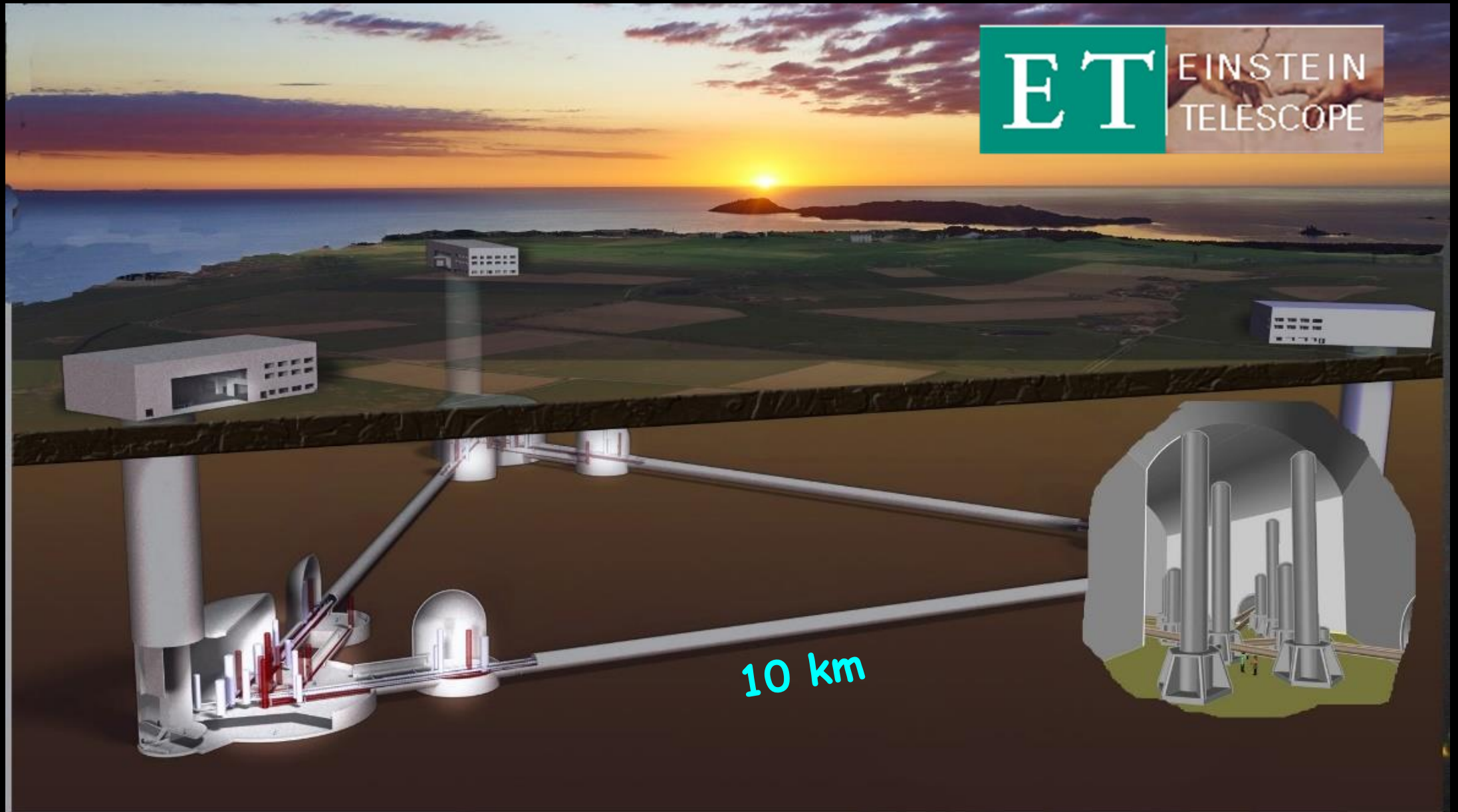
- Fase II **O5**

- Ulteriore aumento della potenza del laser ( $> 60$  W)
- Fasci più larghi sugli specchi terminali
  - Specchi più grandi ( $\sim 100$  kg)
- Strati riflettenti che riducano il rumore termico

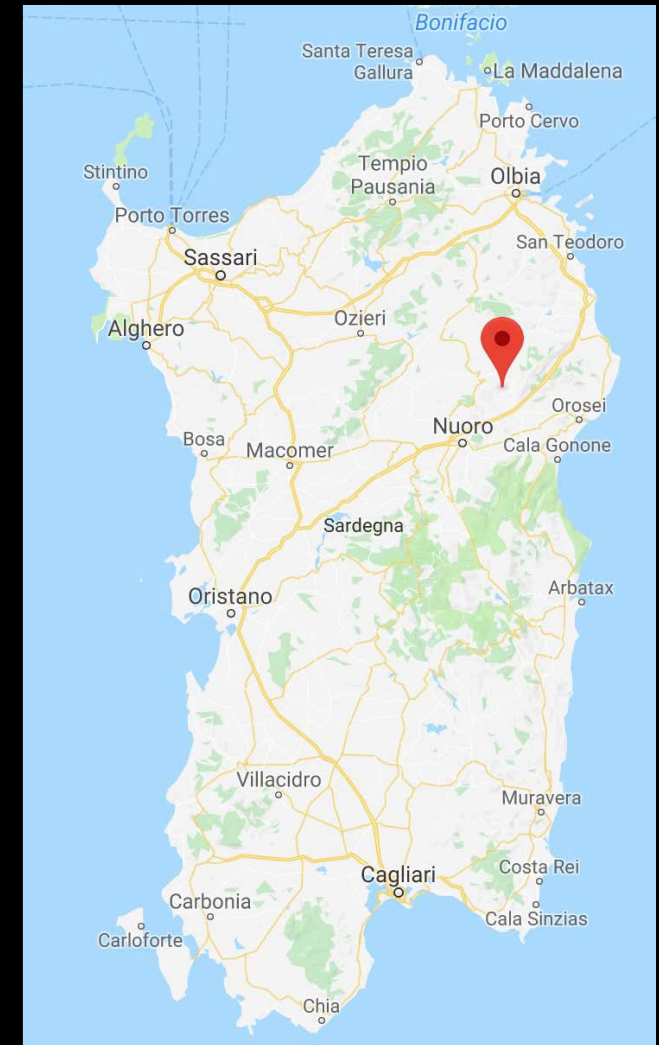
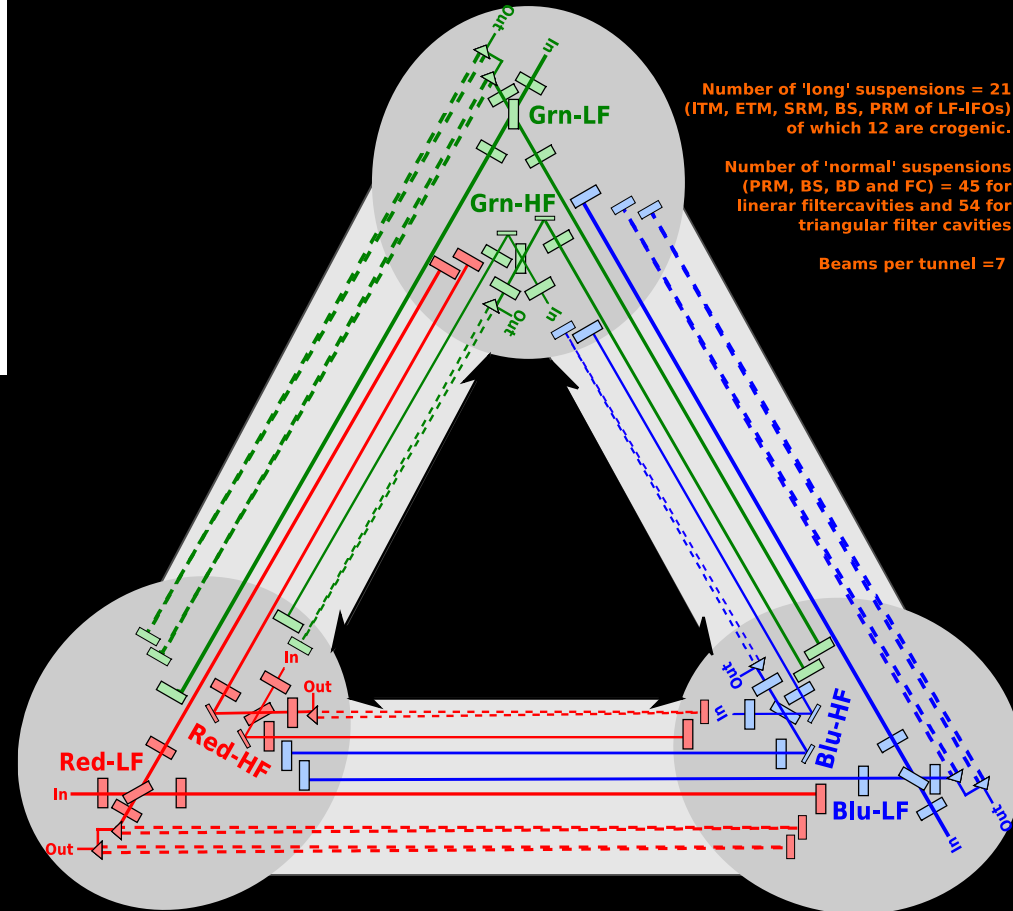
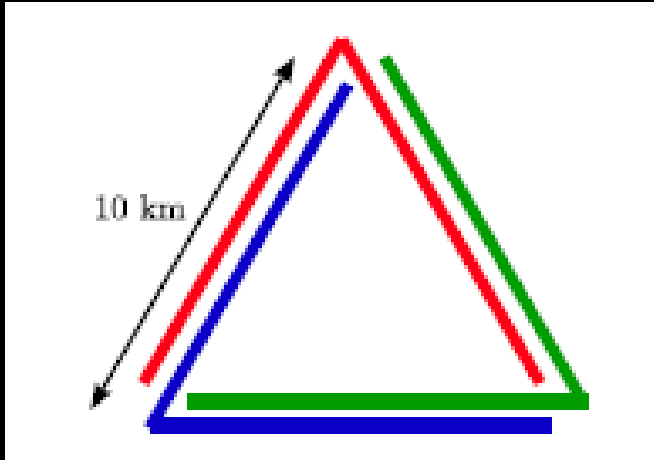
# Il futuro...remoto



# Il futuro...remoto



# Il futuro...remoto



**Siamo stati come spettatori di un meraviglioso film muto. Ora, d'un tratto, abbiamo anche il sonoro. E la nostra comprensione potrà enormemente ampliarsi, in quanto potremo finalmente ascoltare la voce dello spazio e del tempo, il canto delle stelle lontane, il brusio del Big Bang, la musica nascosta dell'universo.**



**Adalberto Giazotto, La musica nascosta dell'Universo, Einaudi**