

# La scoperta delle onde gravitazionali

## Un modo nuovo di osservare l'Universo

Giulia Stratta  
Francesco Piergiovanni

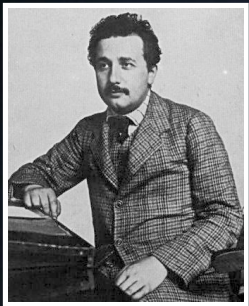
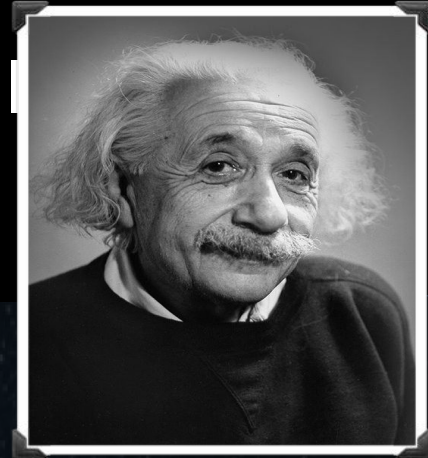
in rappresentanza del gruppo Virgo/Urbino

14 Settembre 2015 11:51 CET

Hanford (WA)

Livingston (LA)

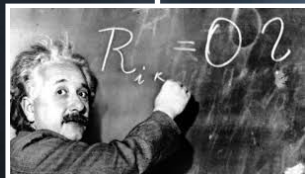
# Una ricerca lunga cent'anni, iniziata con il nuovo concetto di gravità di Albert Einstein



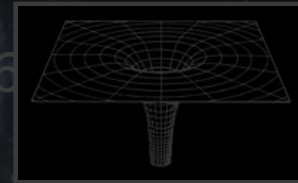
1905  
Einstein pubblica la relatività speciale



1916  
Einstein predice l'esistenza delle onde gravitazionali



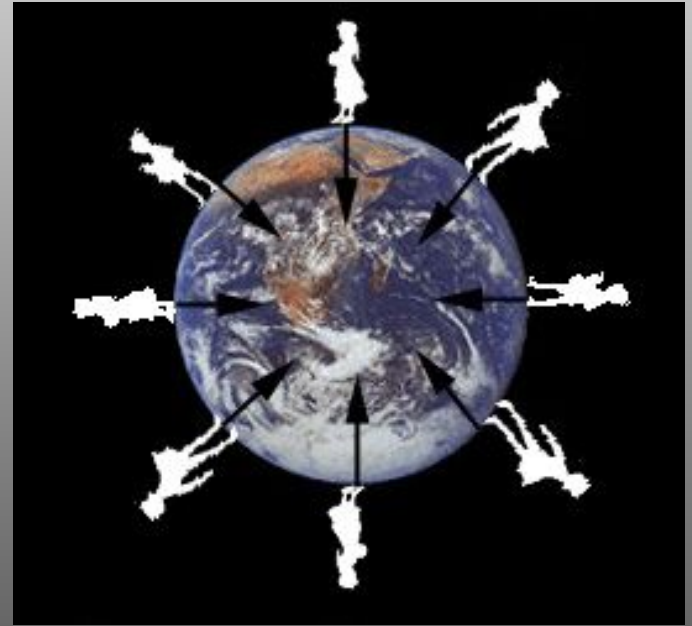
1915  
Einstein pubblica la teoria della relatività generale



1916  
Schwarzschild trova la prima soluzione esatta delle equazioni di campo di Einstein, definendo il concetto di buco nero

# La gravità per Newton

La **gravità** è una forza tra due masse (punti materiali)



I principi  
matematici  
della filosofia  
Naturale  
(1687)


massa

$$F = G \frac{M_1 M_2}{R^2}$$

forza

# La gravità per Einstein

La gravità non è una forza  
ma è l'effetto della  
curvatura dello spazio!


$$G_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

Curvatura dello  
Spazio

massa

# La massa curva lo spazio

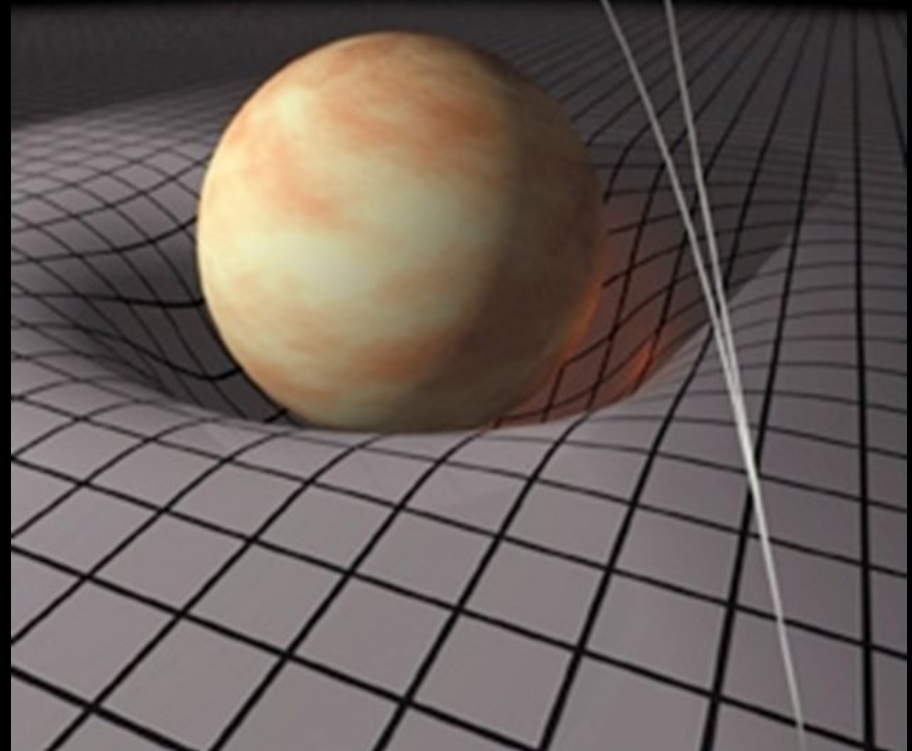


# La curvatura dello spazio è stata confermata da numerose verifiche empiriche...

Nel 1919 Arthur Eddington durante una eclissi solare totale misurò la posizione delle stelle vicine al sole e constatò una effettiva deflessione

Posizion  
e reale  
della  
stella

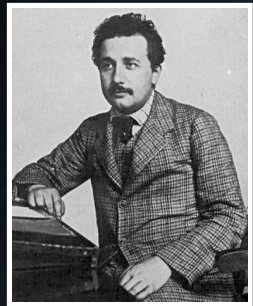
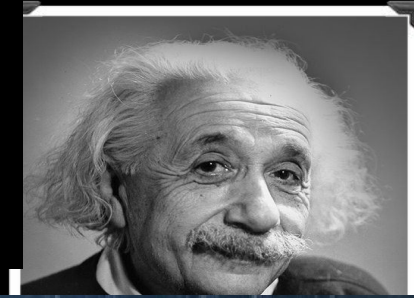
Posizione  
apparente



Esempio di “lente gravitazionale!”



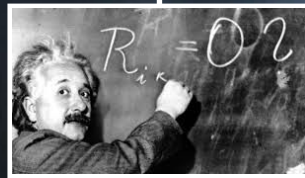
# Una ricerca lunga cent'anni..che è iniziata con il nuovo concetto di gravità di Albert Einstein



1905  
Einstein pubblica la relatività speciale

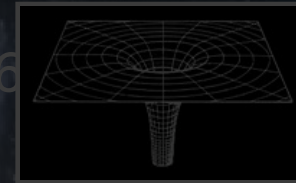


1916  
Einstein predice l'esistenza delle onde gravitazionali



1915  
Einstein pubblica la teoria della relatività generale

1916



Schwarzschild trova la prima soluzione esatta delle equazioni di campo di Einstein, definendo il concetto di buco nero



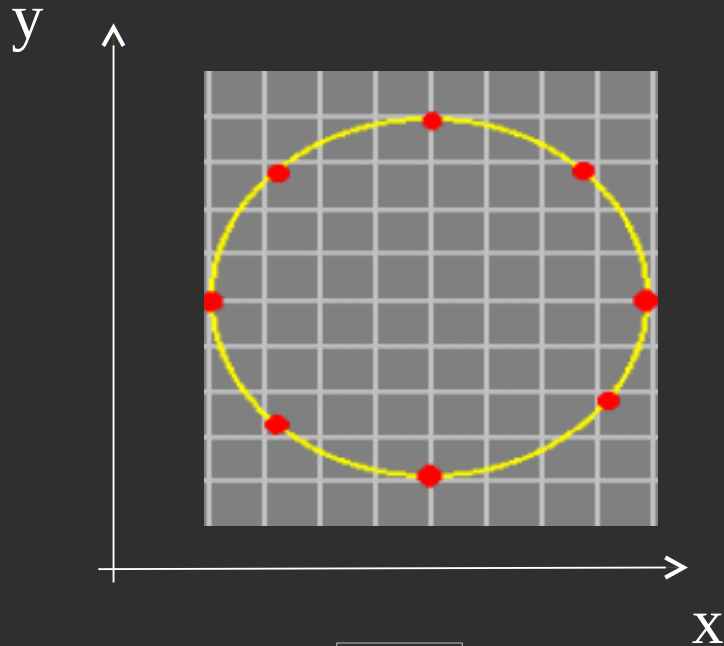
Le onde gravitazionali sono **increspature** nel tessuto dello spazio-tempo prodotte da un moto accelerato di una distribuzione di massa non simmetrica

**...si  
propagano  
alla** velocità della  
luce...

**...quando passano deformano la  
distanza tra due punti**

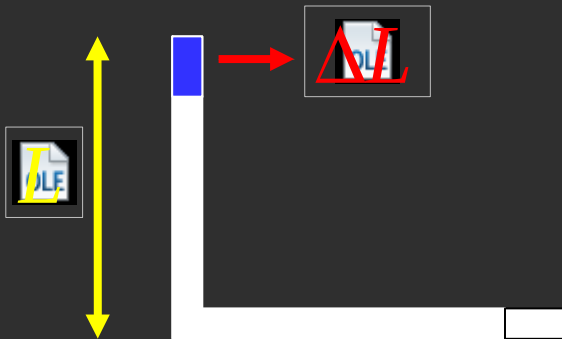


# Che effetto producono ?

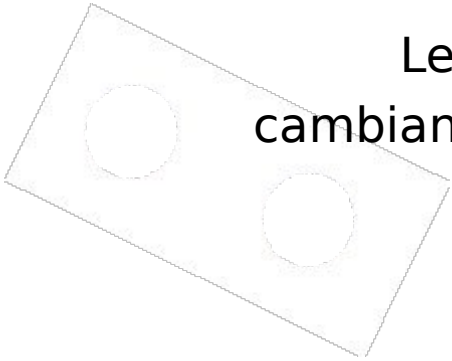


*Un'onda deforma lo spazio sul piano perpendicolare alla direzione di propagazione*

*Accorcia e allunga la distanza tra due punti lungo una certa direzione (x) e fanno l'opposto nella direzione ortogonale (y)*



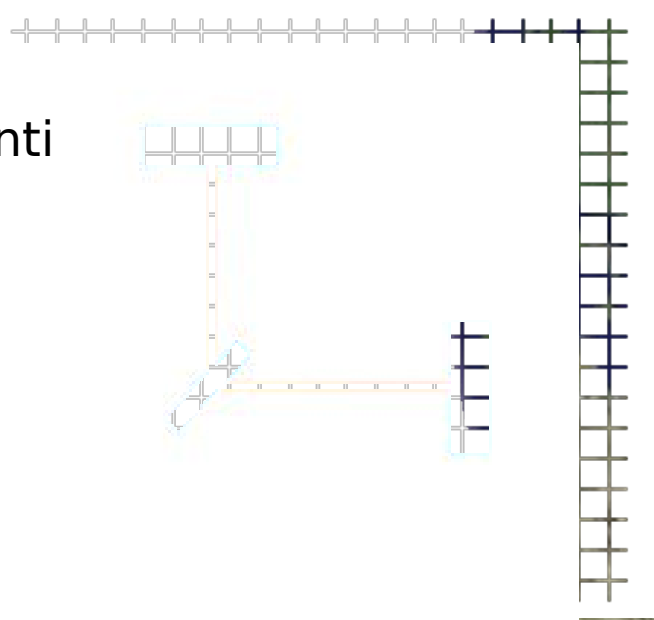
# Come si possono rivelare le onde gravitazionali



Le onde gravitazionali cambiano la distanza tra due punti

$$\Delta L = h(t)L$$

L'ampiezza dell'onda



Come misurare le variazioni di lunghezza?

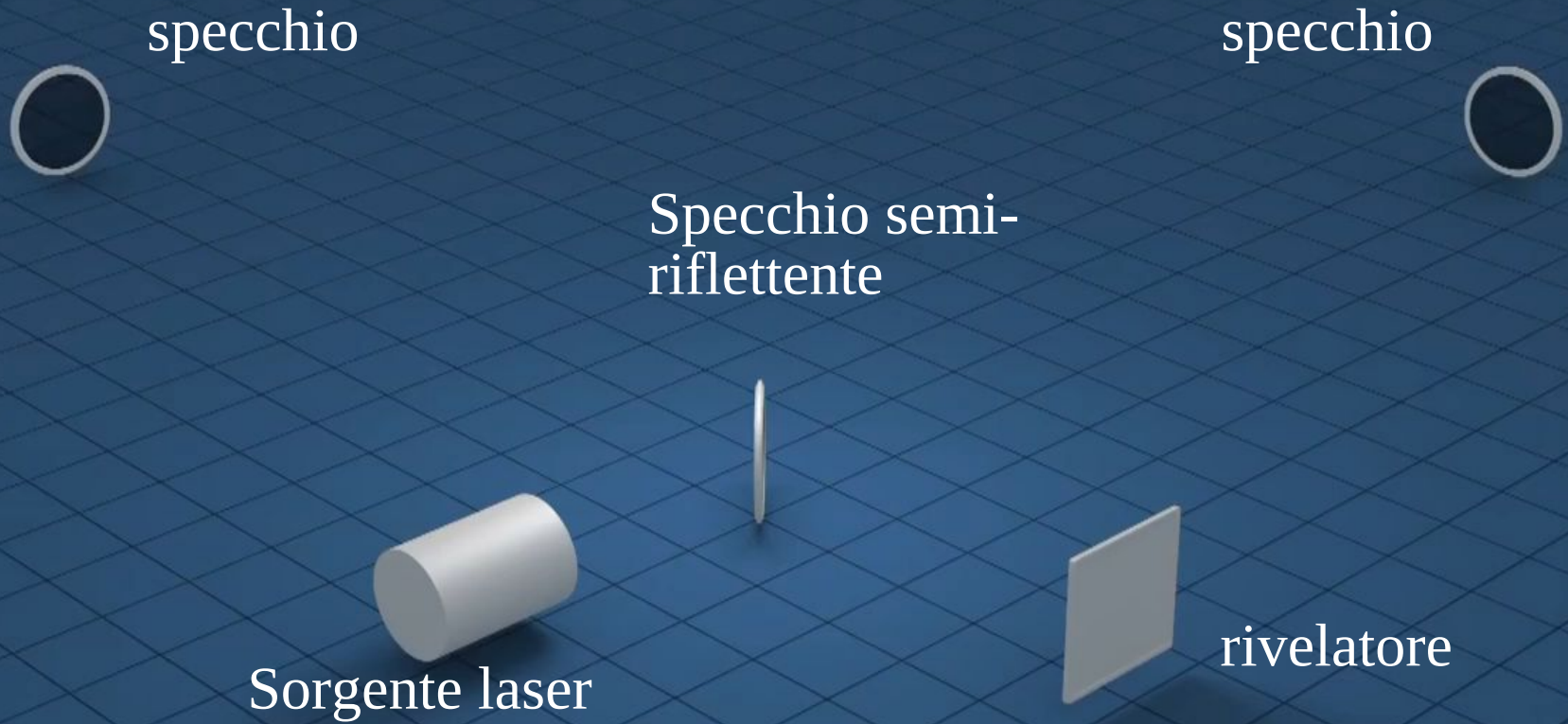
Credits: Lorenzini, M.



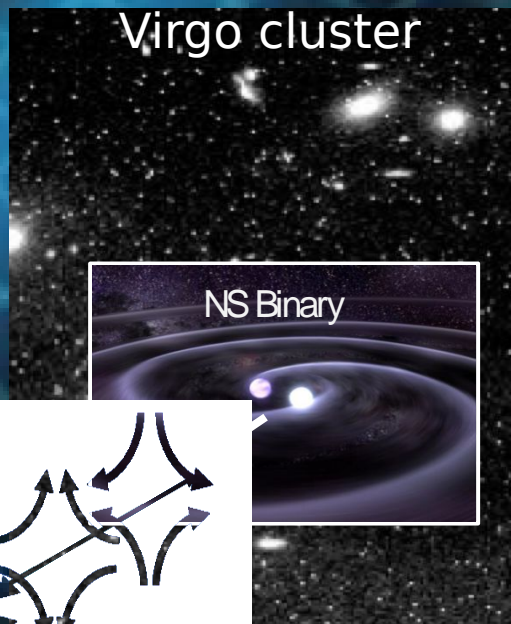
Attraverso gli **interferometri di Michelson**



# Il rivelatore interferometrico



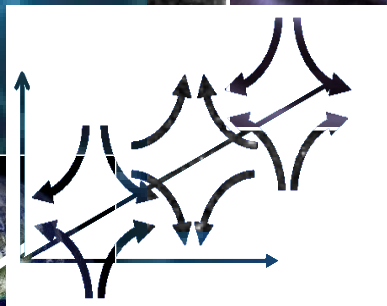
# Alcuni numeri ...



L'ampiezza per un sistema binario di stelle di neutroni nel Virgo cluster

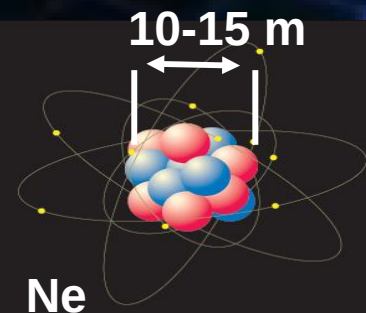
$$h_{NS} \sim 10^{-21}$$

$$\Delta L \sim hL$$



I rivelatori a terra di onde gravitazionali:

- interferometri con braccia di  $L = 3 - 4$  km
- misurano variazioni di lunghezza di  $\Delta L = 10^{-18}$  m, 1/1000 del nucleo di un atomo



# The advanced GW detector network:

## 2015-2025

Advanced LIGO  
Hanford  
2015



Advanced LIGO  
Livingston  
2015

2011



Advanced  
Virgo  
2016



LIGO-India  
2022



KAGRA  
2017

# L'interferometro Virgo (Cascina, Pisa)









**7000 m<sup>3</sup>**

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

*Specchi trasparenti ?*



# La sala controllo



# Sviluppo di Virgo

**1993 - 1994**

CNRS e INFN

approvano

**2007**  
Virgo

LIGO e Virgo firmano  
un accordo di piena  
condivisione dei dati

**2007 - 2011**

Virgo e LIGO di prima  
generazione

acquisiscono dati

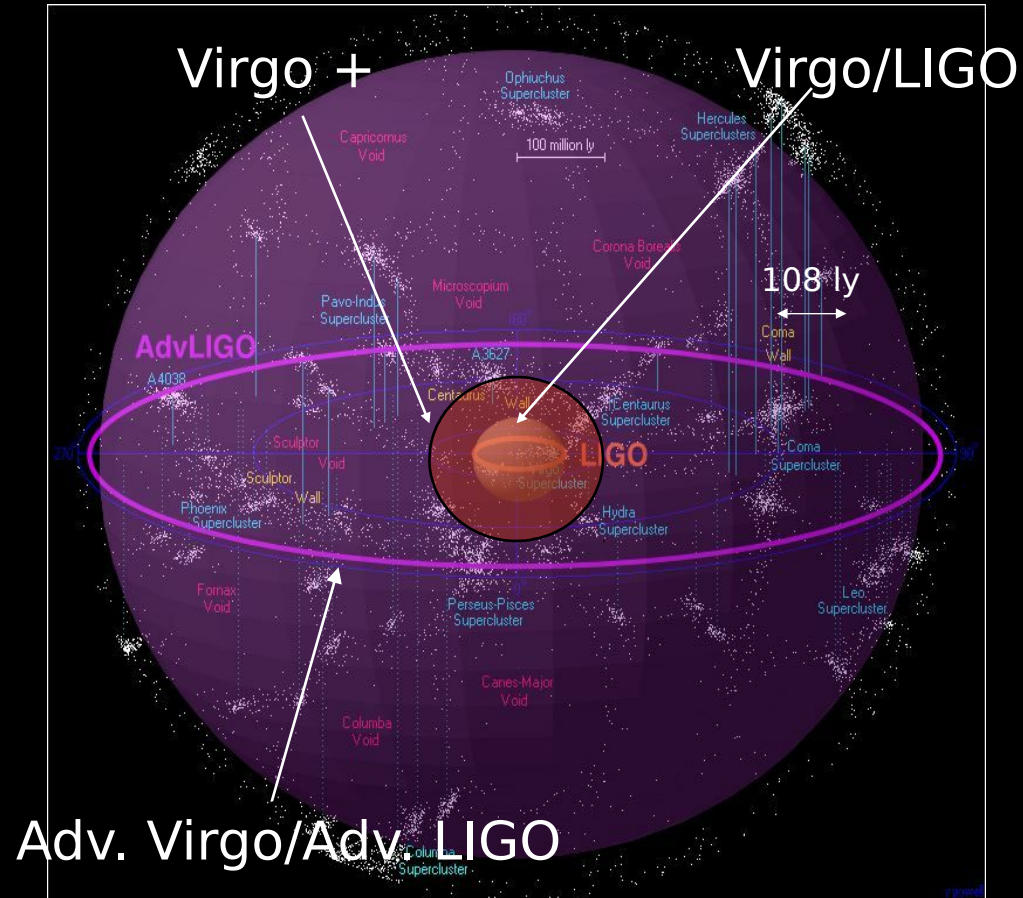
**2017**

in agosto Advanced  
Virgo è entrato in

funzione

**2018-2019**

in autunno una nuova  
versione di Advanced Virgo sarà  
in presa dati



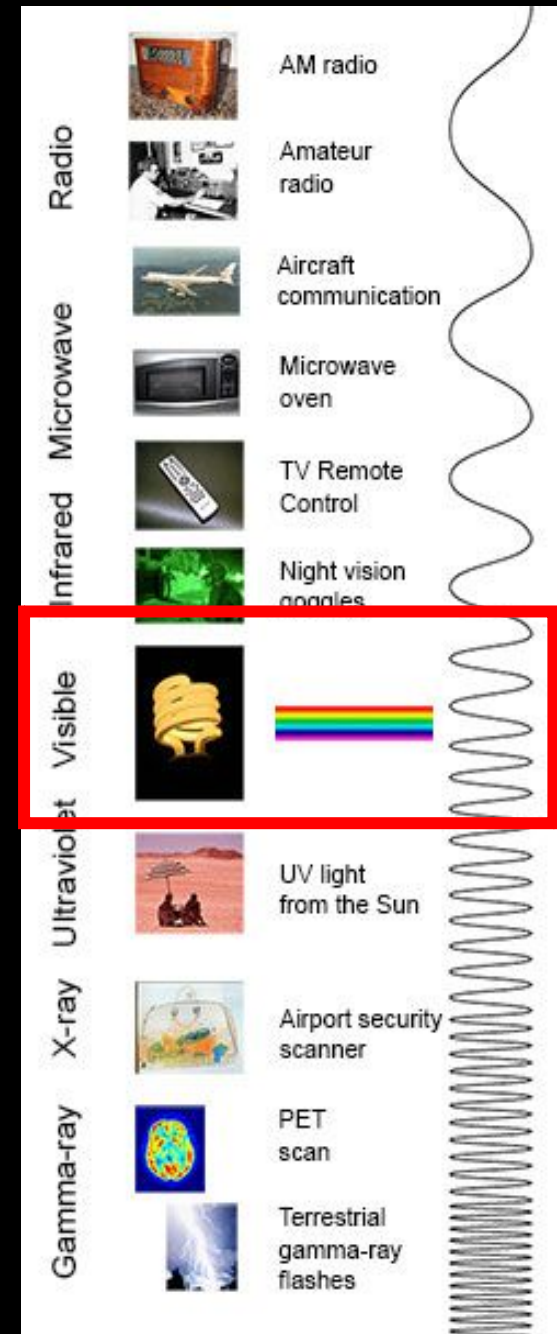
# Perché cercare le Onde Gravitazionali ?



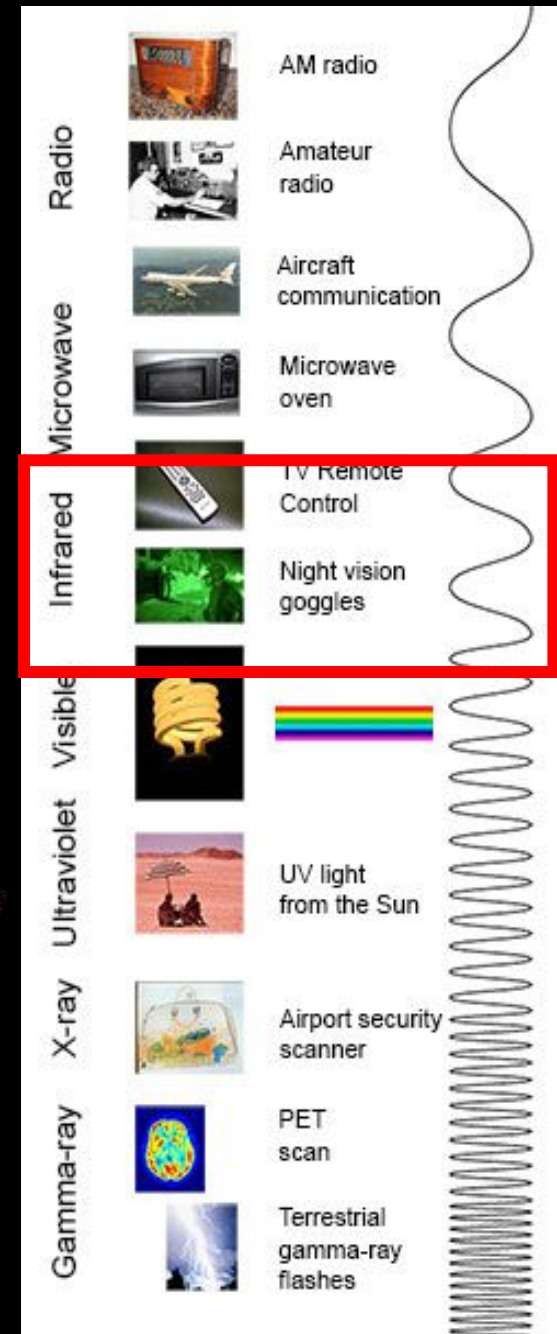
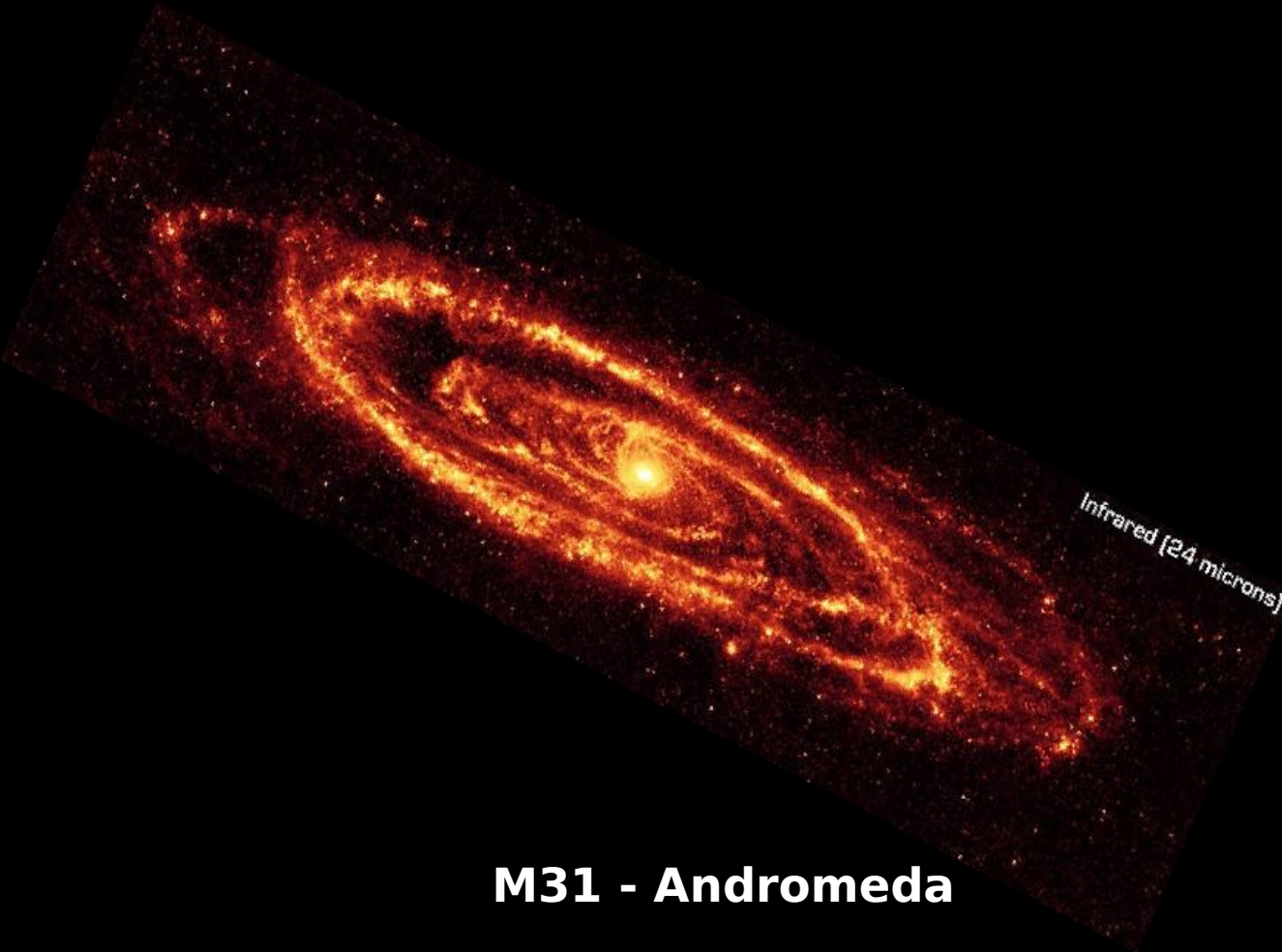
gliaia di anni l'uomo ha potuto vedere "questo"



**M31 - Andromeda**

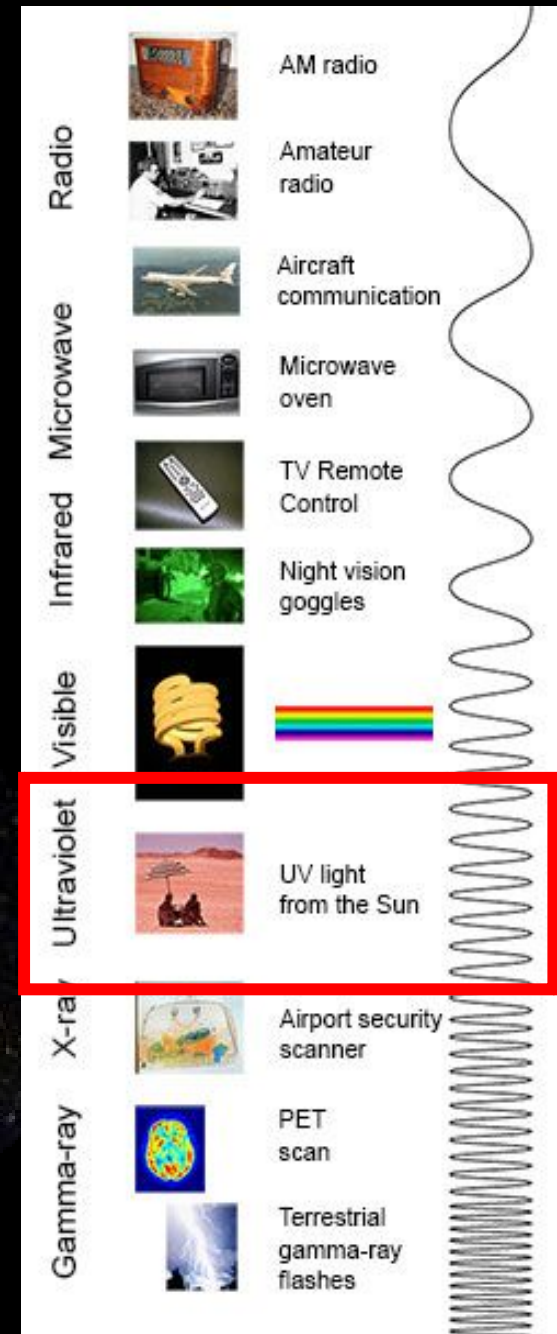


# Nell'IR vediamo le regioni dove si formano le stelle



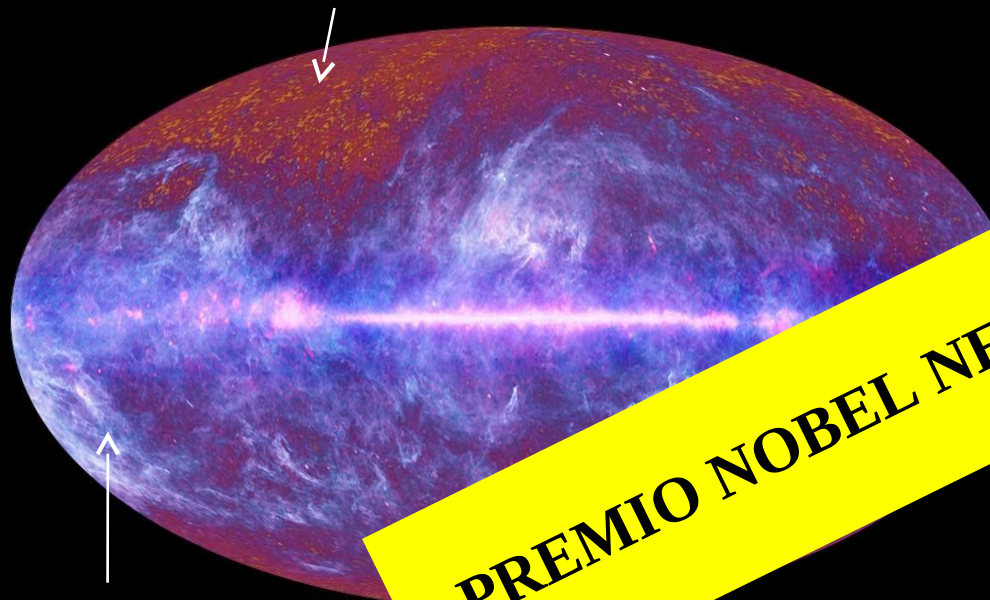
Nell'UV vediamo la luce delle  
le stelle più giovani

**M31 - Andromeda**





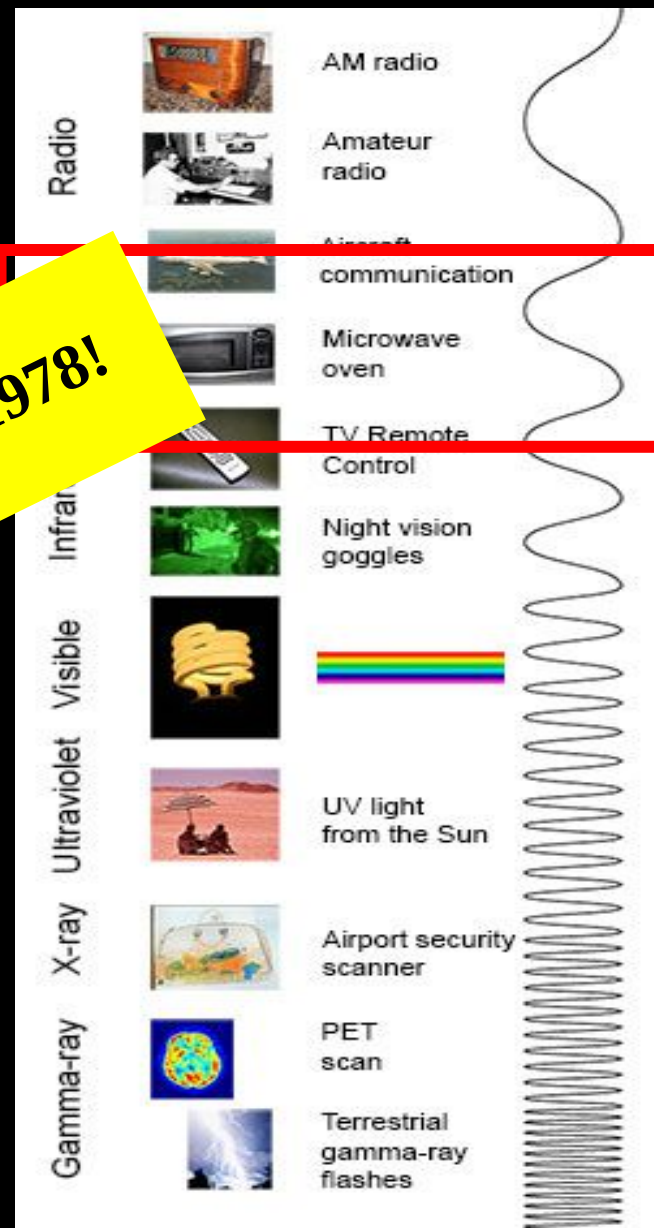
Rosso: radiazione di fondo cosmico  
(scoperta nel 1964)



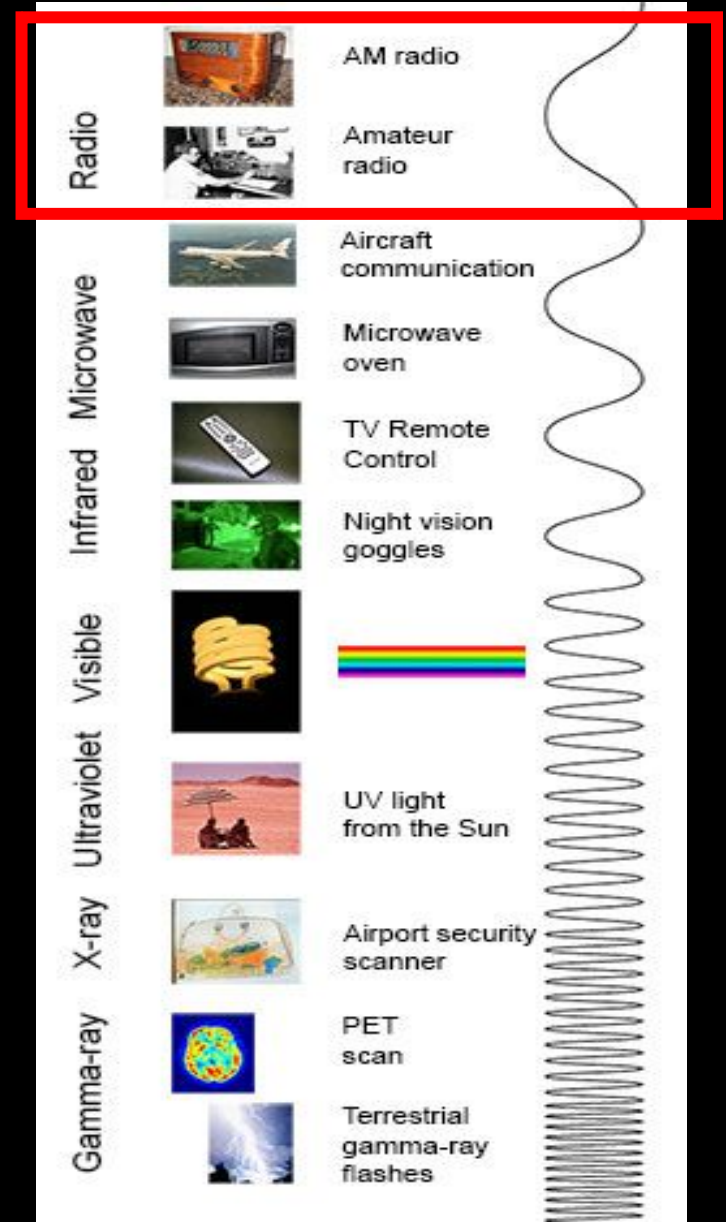
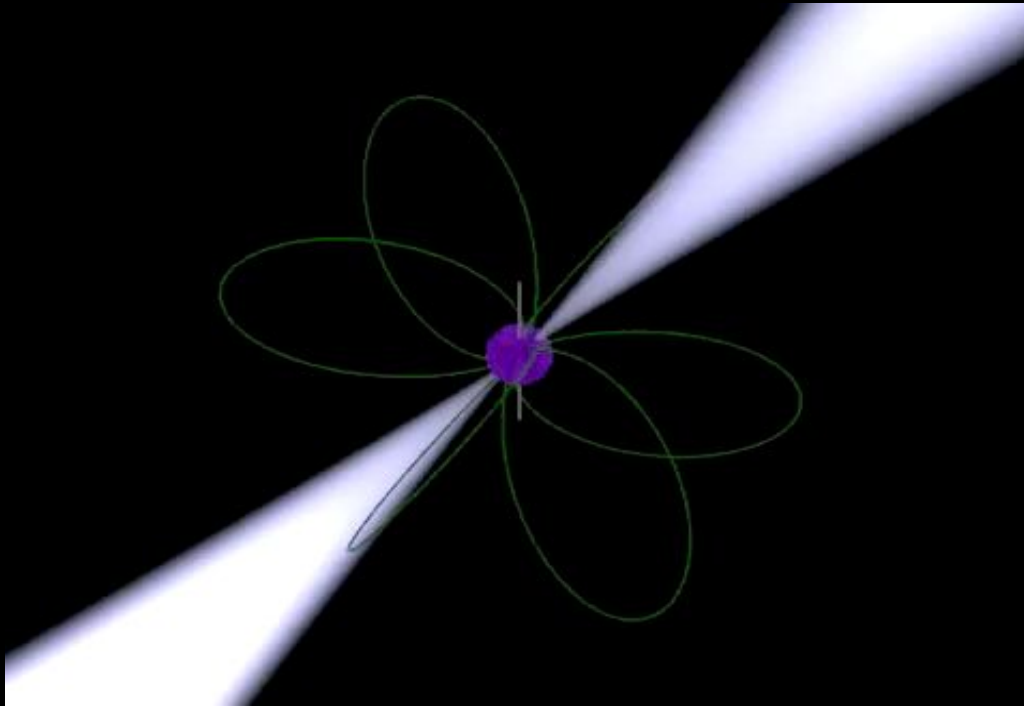
Blu: nubi di polveri nella nostra galassia

**PREMIO NOBEL NEL 1978!**

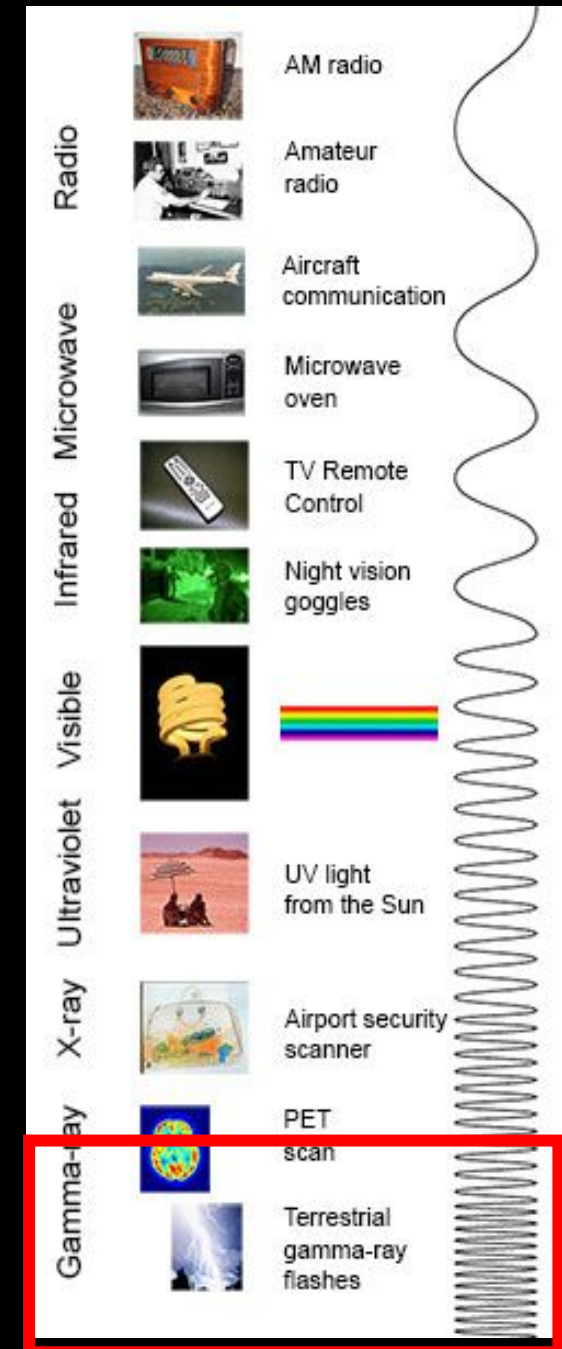
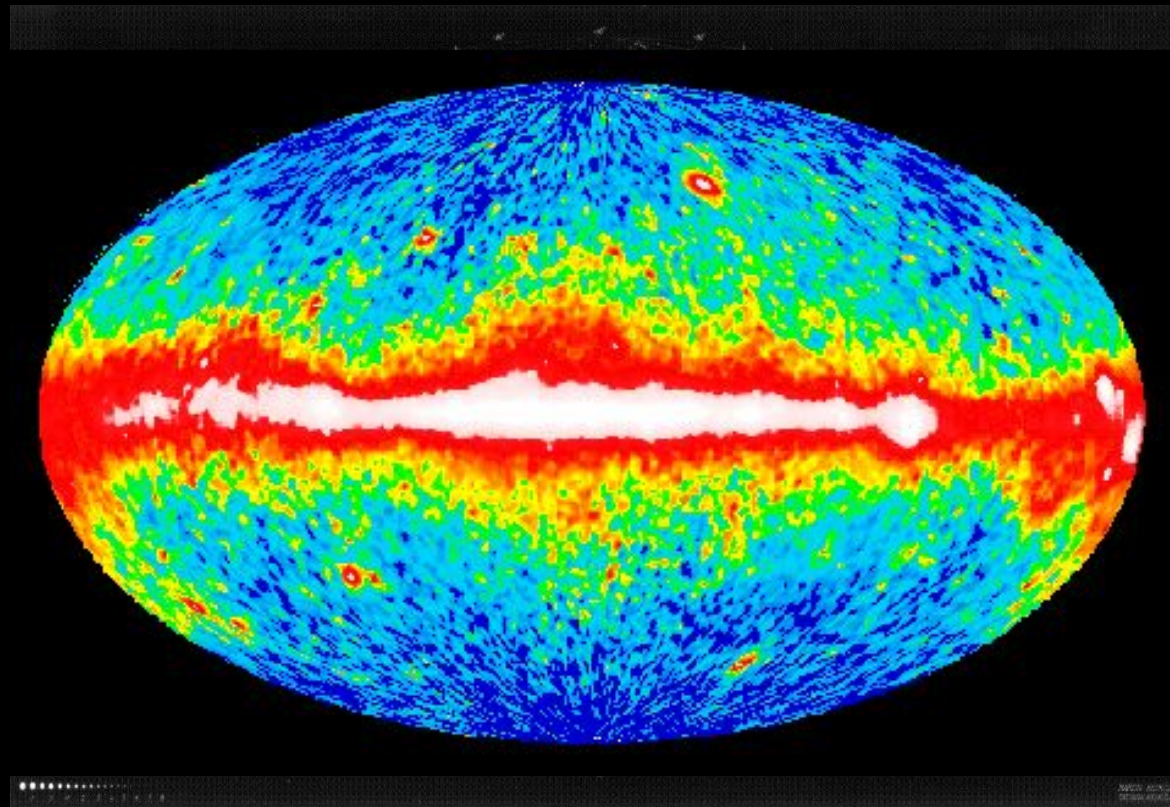
Il cielo nelle microonde  
ci ha permesso di  
vedere la prima luce  
emessa dall'Universo  
appena nato!



# Il cielo radio ci ha rivelato le pulsar

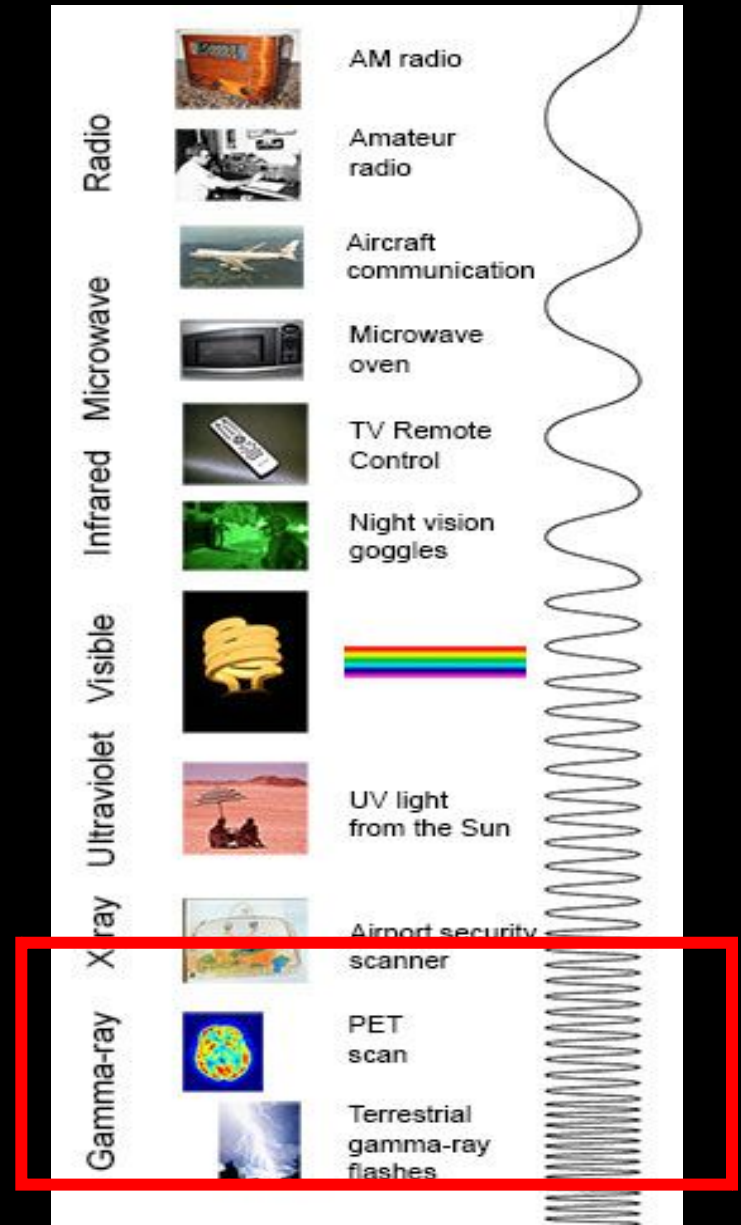
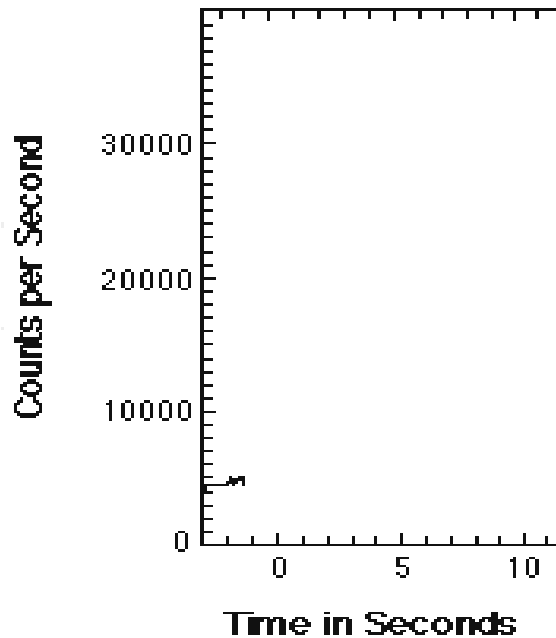
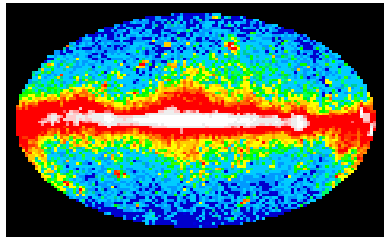


...e questo è il cielo **nei raggi gamma**

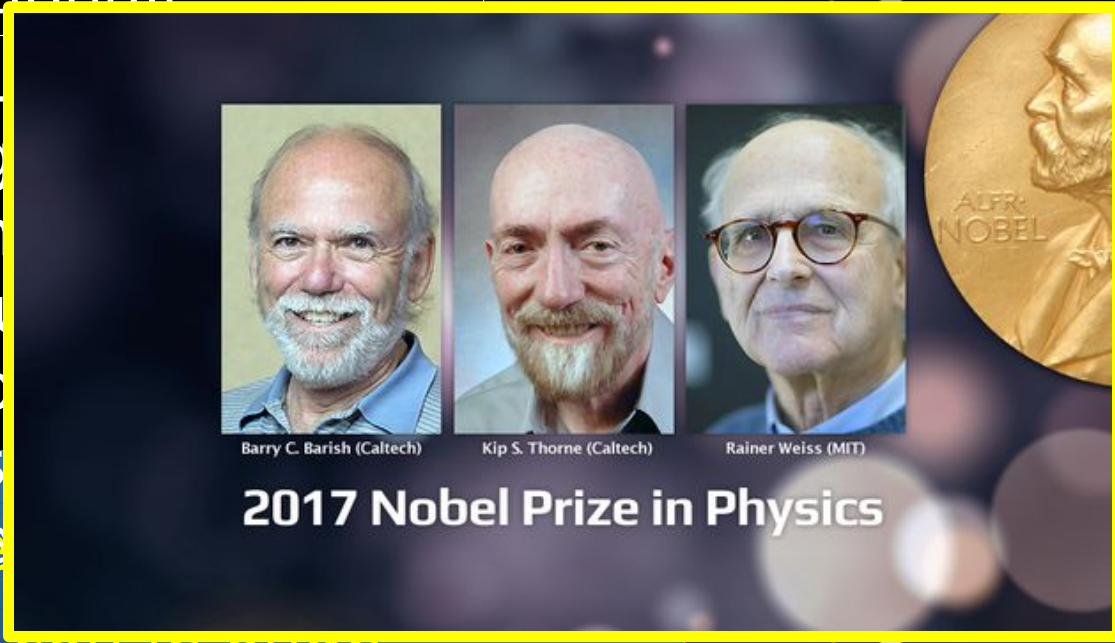


# Lampi gamma (gamma-ray burst)

Gigantesche esplosioni si osservano in media ogni uno/due giorni in pochi secondi viene rilasciata l'energia emessa dal sole in tutta la sua vita



...ma il cielo emette  
anche onde  
gravitazionali!

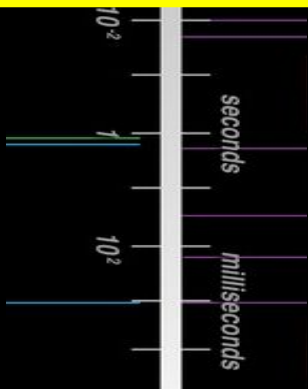



Come

gravitazionali?

...E' quello che stiamo  
scoprendo!

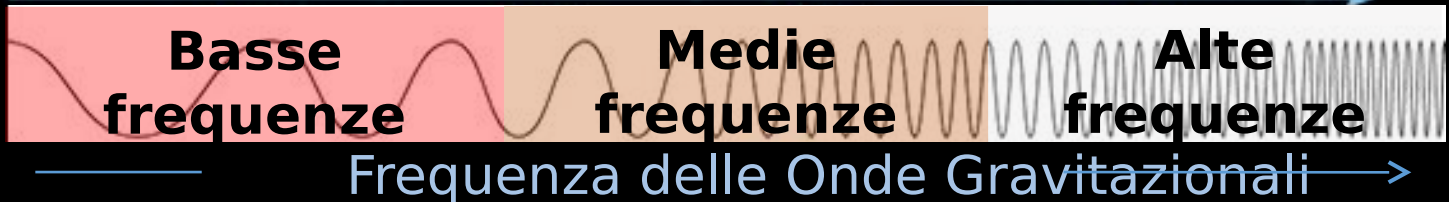
ONDE GRAVITAZIONALI





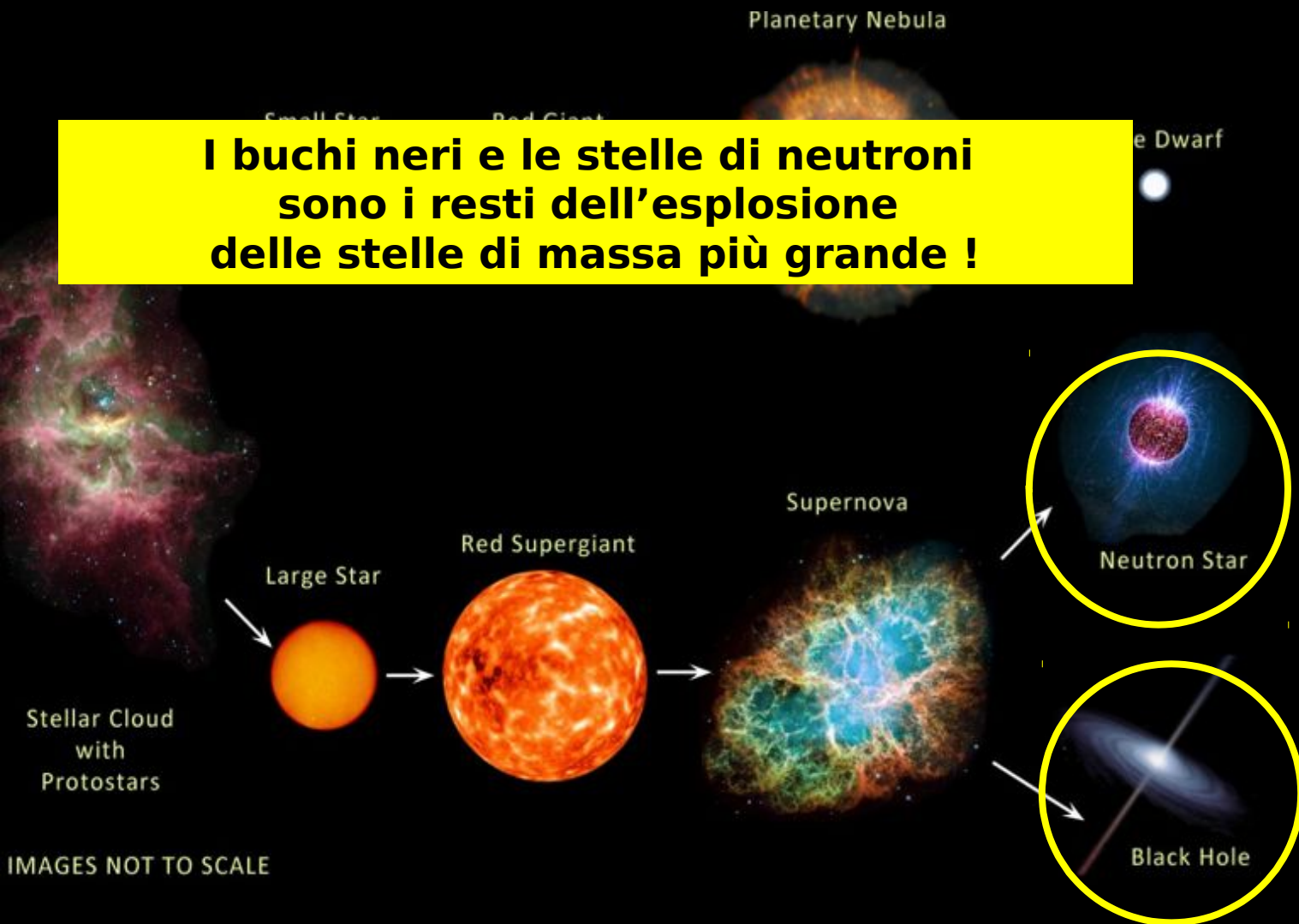
**...quali sono le sorgenti da cui ci aspettiamo emissione di onde gravitazionali?**

# Le sorgenti di onde gravitazionali



# Come si formano le stelle di neutroni ed i buchi neri (di massa stellare)?

**I buchi neri e le stelle di neutroni sono i resti dell'esplosione delle stelle di massa più grande !**



IMAGES NOT TO SCALE

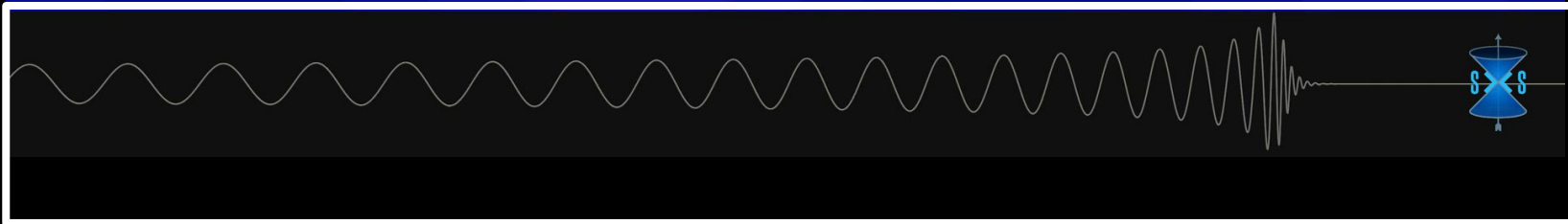
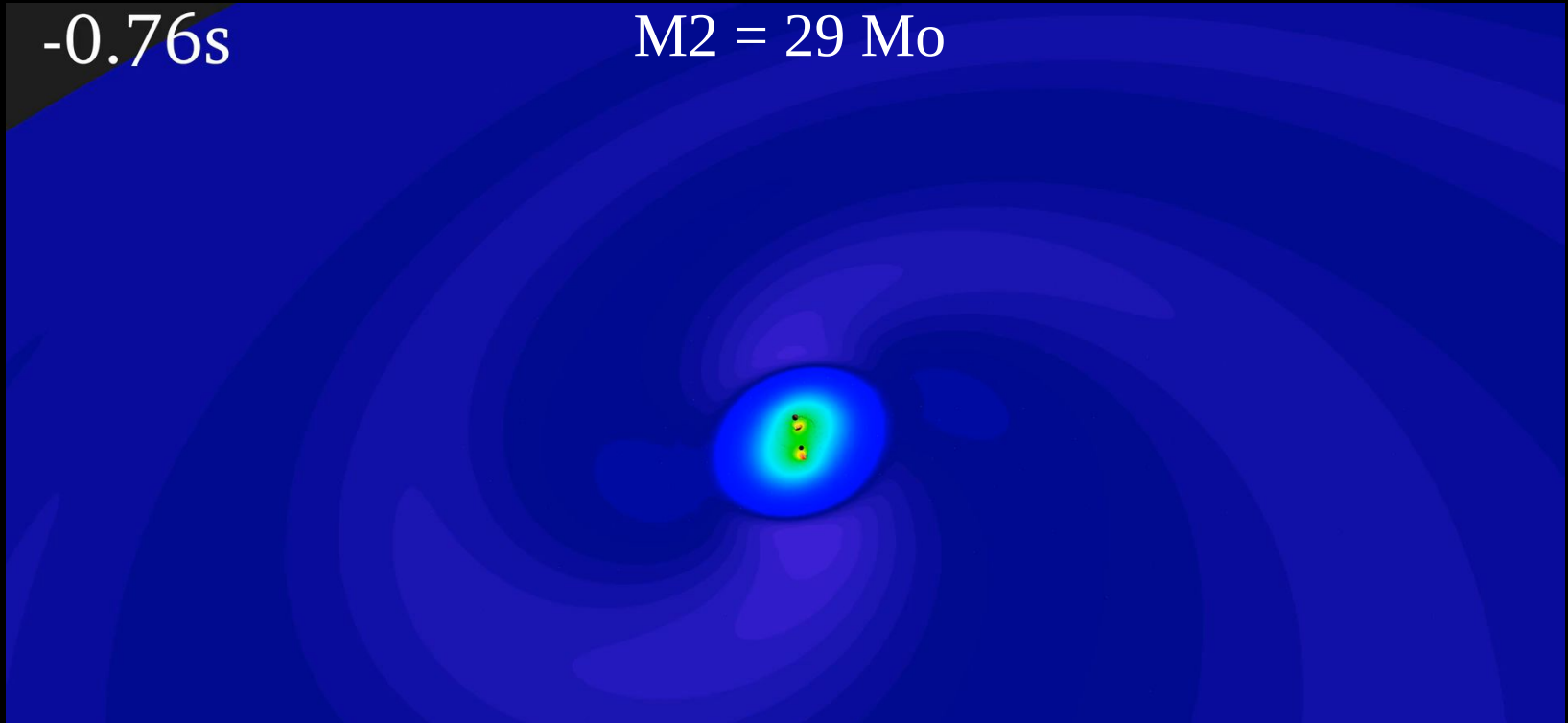


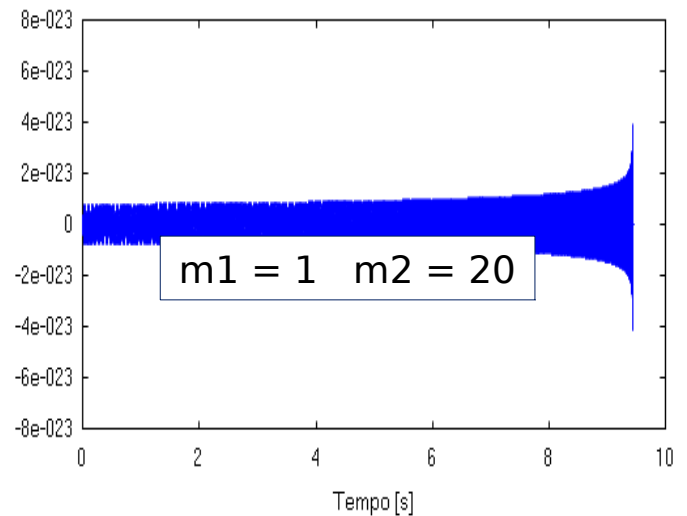
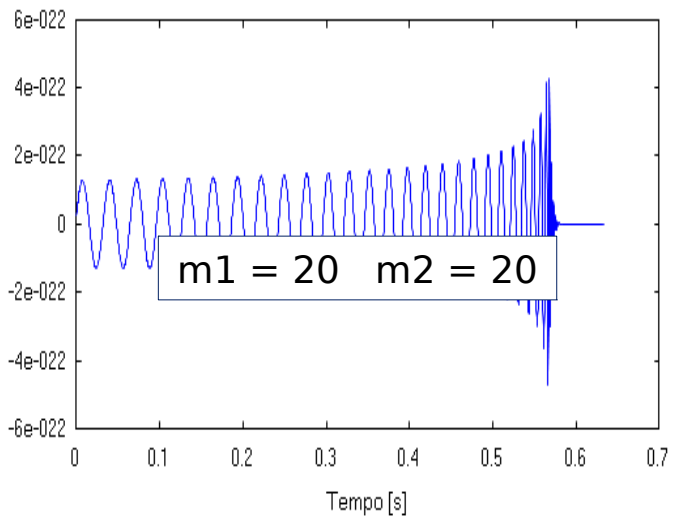
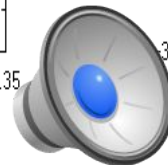
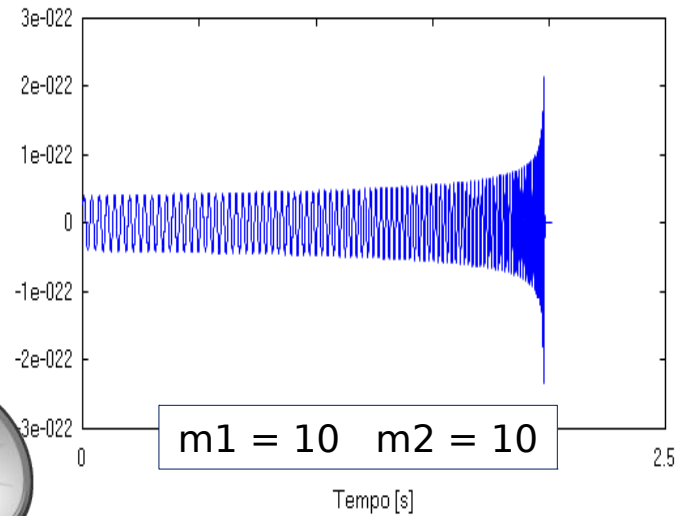
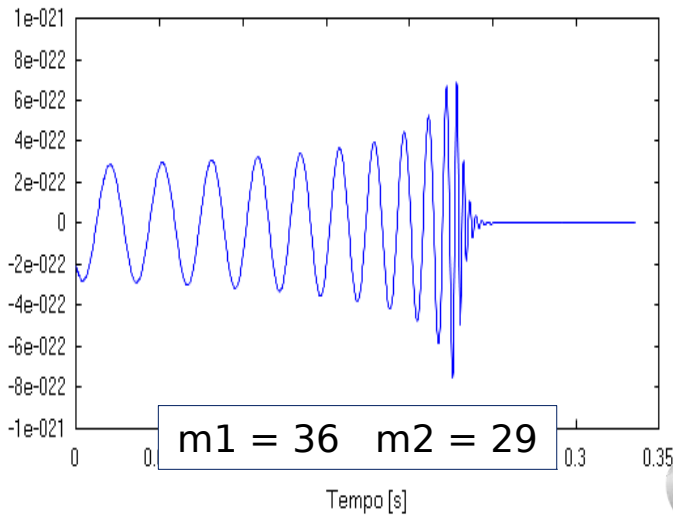
# Simulazione della coalescenza di due buchi neri di massa

$M1 = 36 M_{\odot}$

$M2 = 29 M_{\odot}$

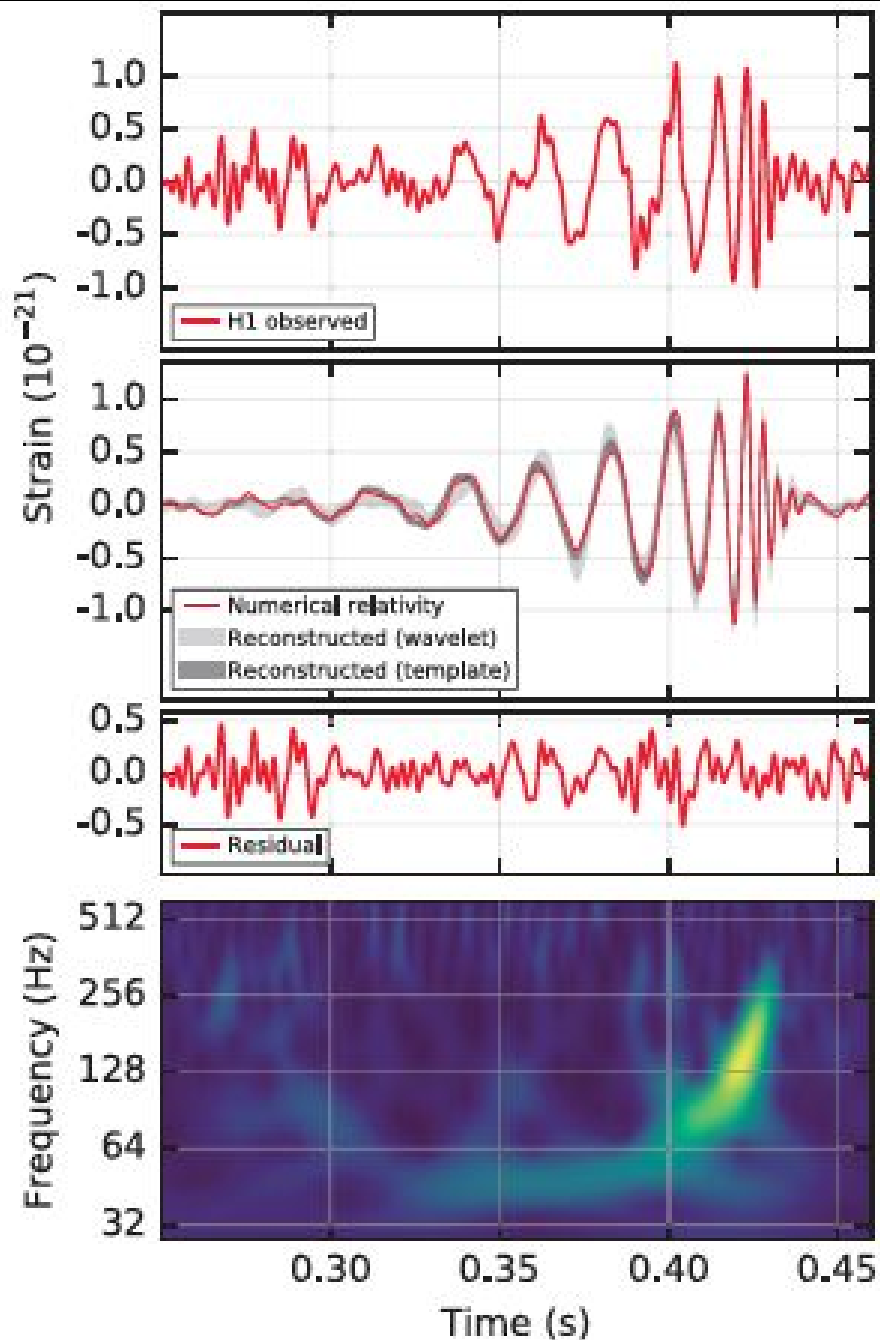
-0.76s





Intervallo di frequenze: 10 – 2000Hz

# GW150914



Massa primo BH:  
36 Msolari

Massa secondo BH:  
29 Msolari

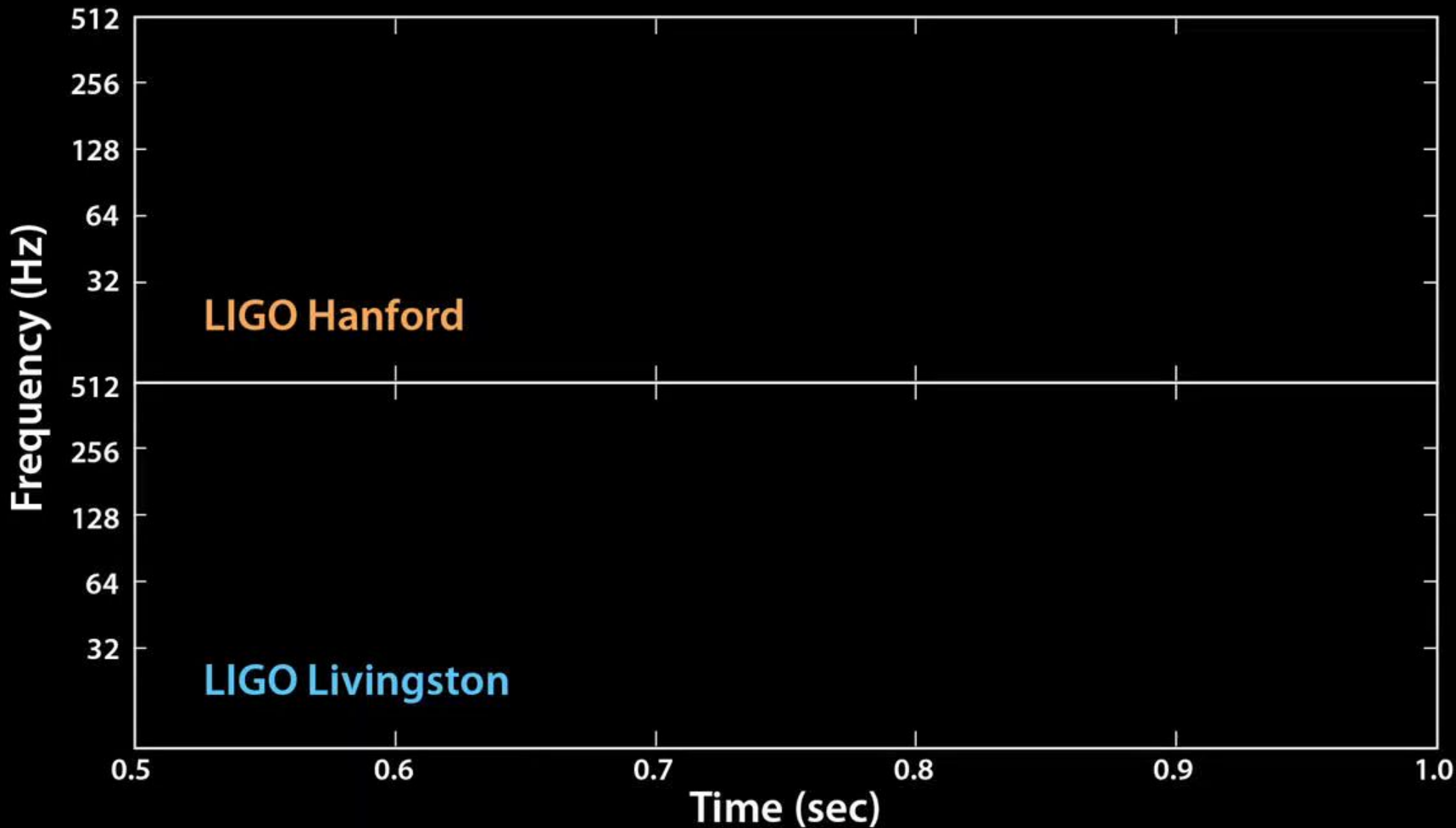
Massa BH finale:  
62 Msolari

Energia emessa in OG :  
3 Masse solari

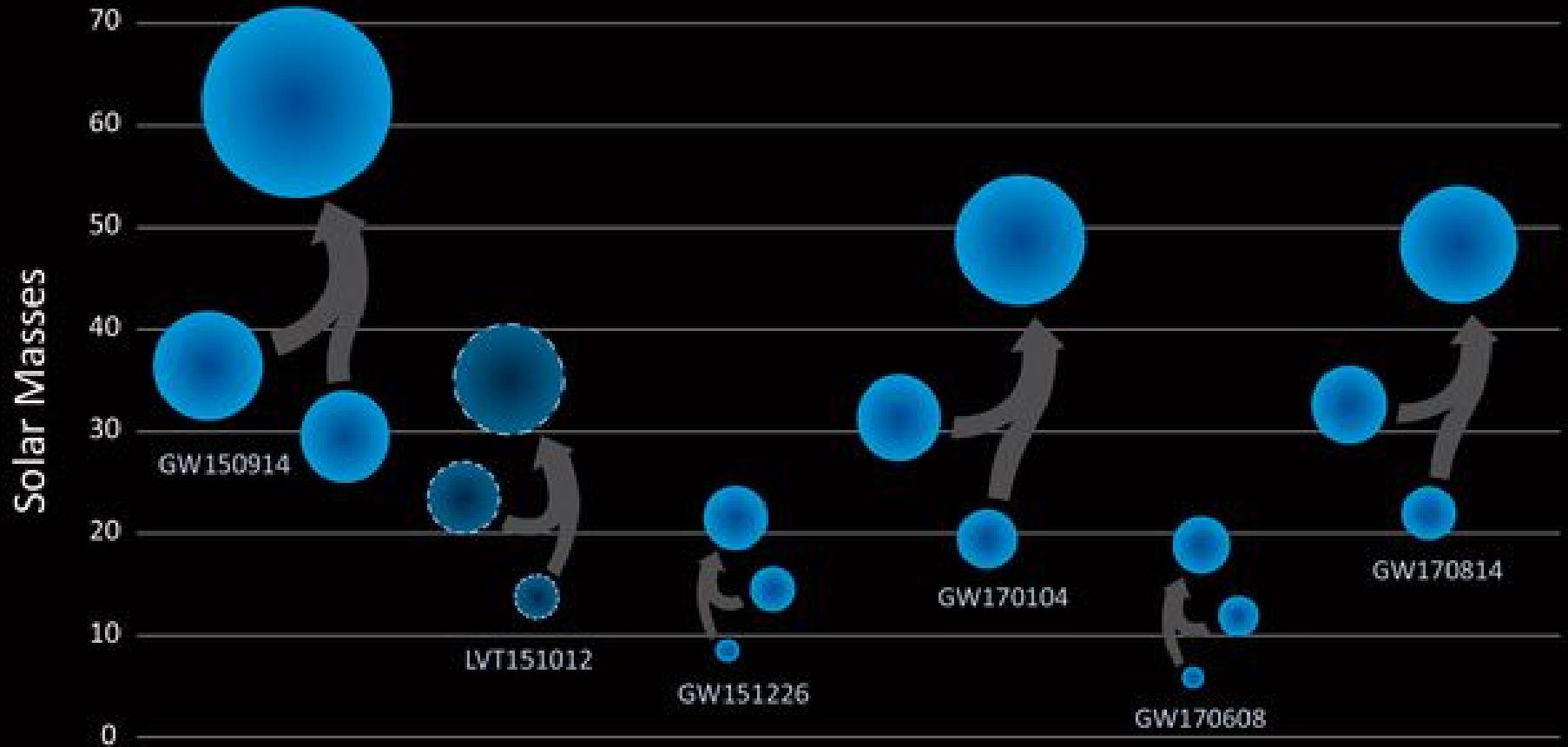
Distanza: 410 Mpc (1 Gly)

# Il primo segnale

Intervallo di frequenze reale: 35-150 Hz



# Coalescenze di BH confermate fino ad oggi: 5



<https://www.soundsofspacetime.org/>

LIGO/VIRGO

**Al “suono” delle sorgenti di onde gravitazionali vogliamo associare una immagine luminosa...**

L'unione delle informazioni dalle onde gravitazionali e dalla luce permette di avere un quadro fenomenologico molto più completo di tante classi di sorgenti



# Cosa ci aspettiamo di vedere con i telescopi astronomici dalla fusione di due oggetti compatti ?

Un “Gamma Ray Burst” (raggi X e gamma) dopo  
1ms - 1s

Una sorgente in  
banda  
visibile/NIR  
 (“kilonova”)  
dopo  
ore/settimane

Una emissione  
dall’impatto con  
il mezzo  
interstellare (o  
“afterglow”)  
dopo ore/mesi

# ...per osservare la controparte elettromagnetica di una sorgente di onde gravitazionali bisogna essere rapidi!

Ricerca di onde gravitazionali...

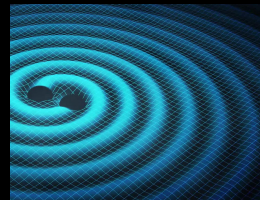
LIGO-H LIGO-L



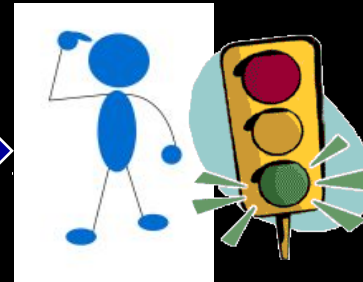
Virgo



Un Evento!



ALERT!



Telescopi puntate...



10 min.

20 min.

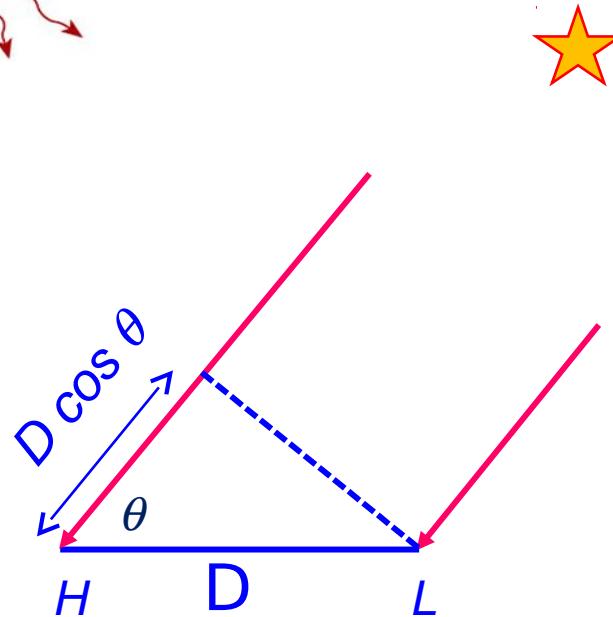
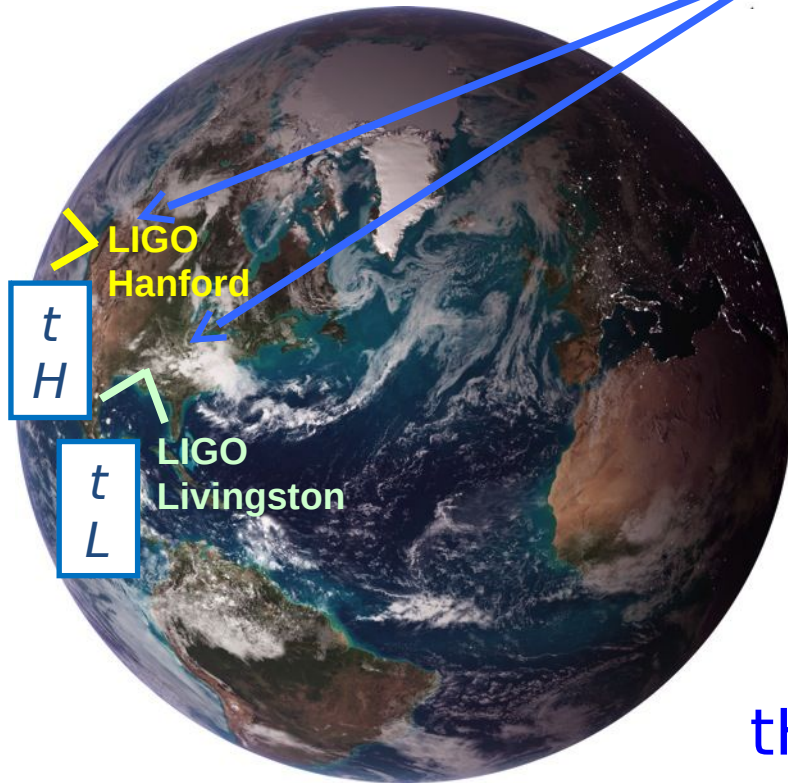
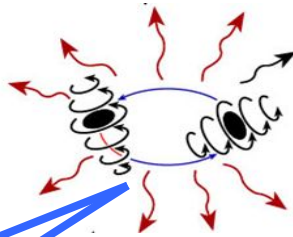


**... bene...ma dove  
puntare??**

**??**



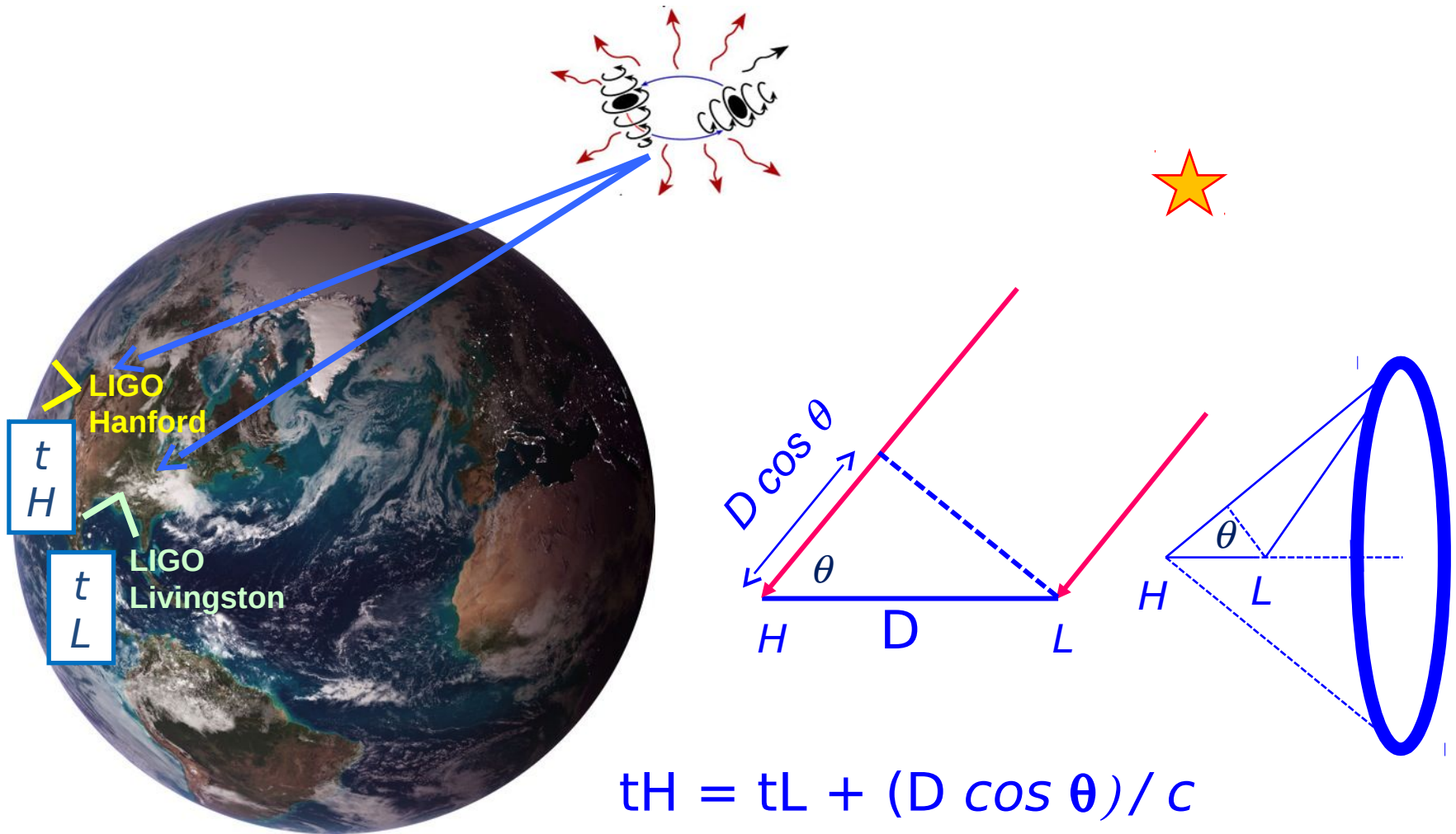
**Un singolo rivelatore di onde gravitazionali, non può localizzare una sorgente in cielo...**



$$t_H = t_L + (D \cos \theta) / c$$

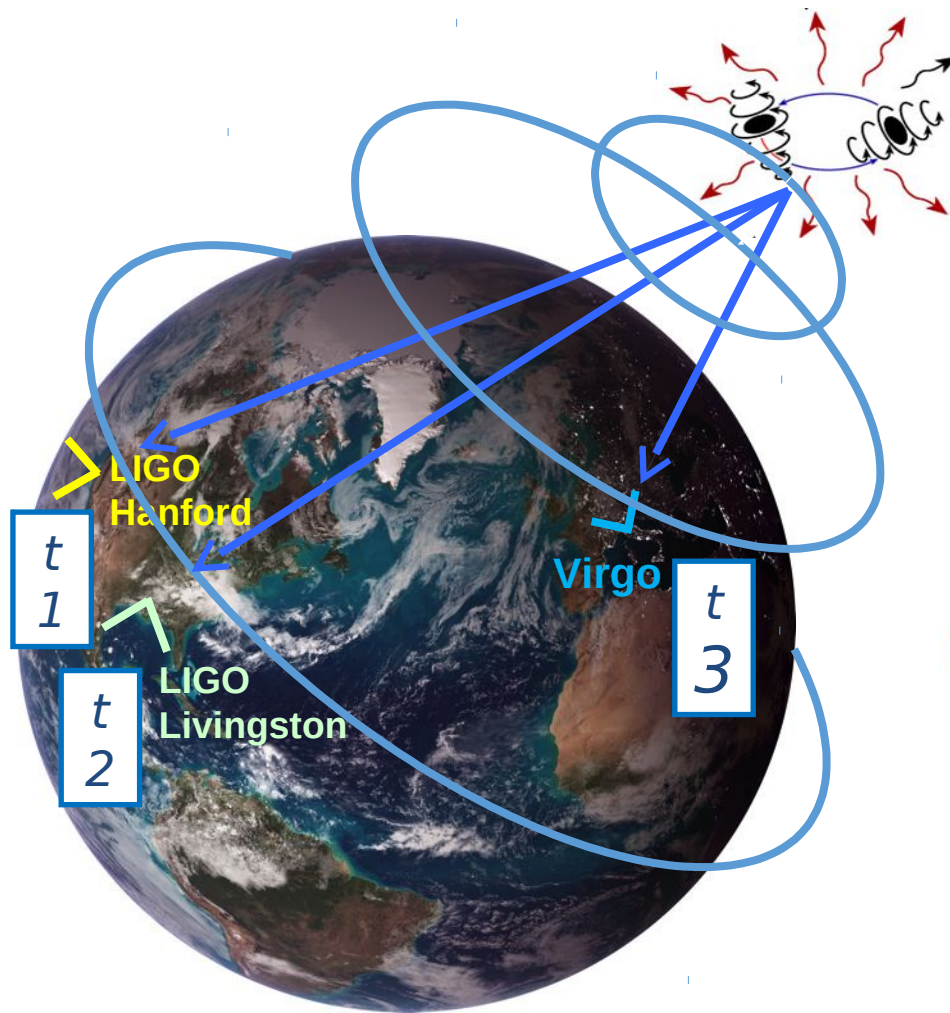
**...ma misurando il tempo di arrivo del segnale ai due rivelatori (L e H), e conoscendo la loro distanza D, posso ricavare l'angolo  $\theta$**

**Un singolo rivelatore di onde gravitazionali, non può localizzare una sorgente in cielo...**

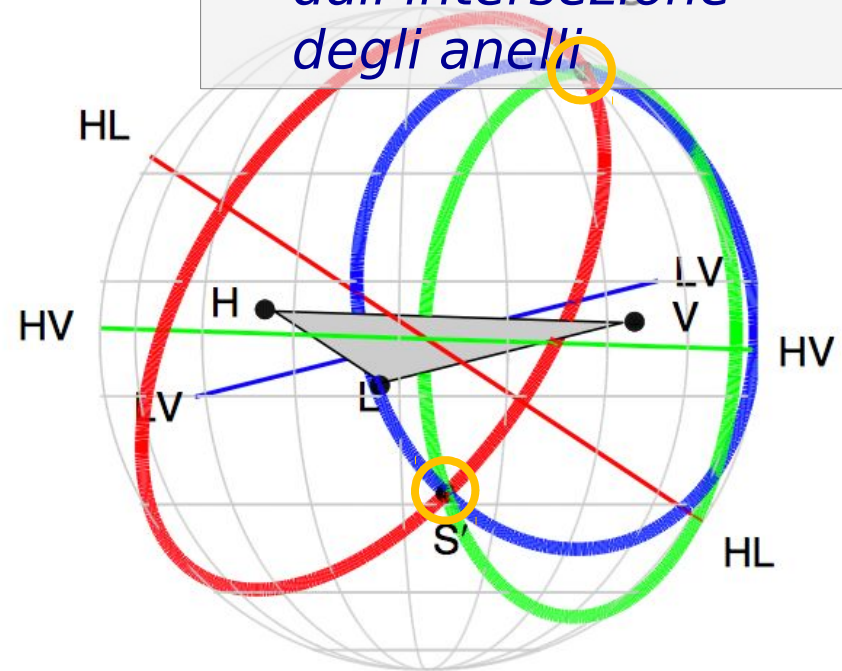


*Con 2 rivelatori possiamo dire che la sorgente si trova da qualche parte dentro la regione ad anello*

# ...e se avessimo tre rivelatori di onde gravitazionali?

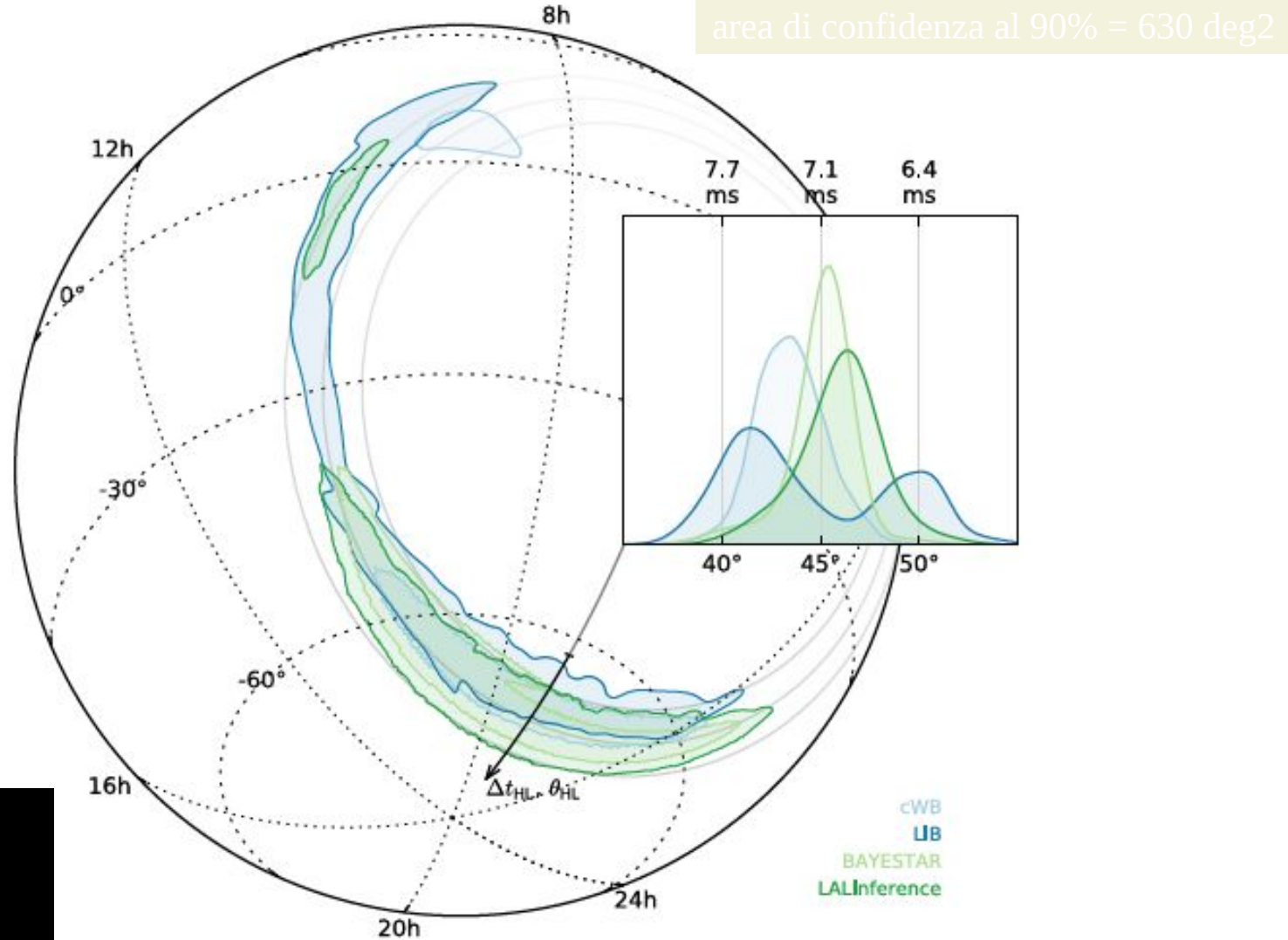


- Ogni coppia di rivelatori individua un anello
- La localizzazione è data dall'intersezione degli anelli

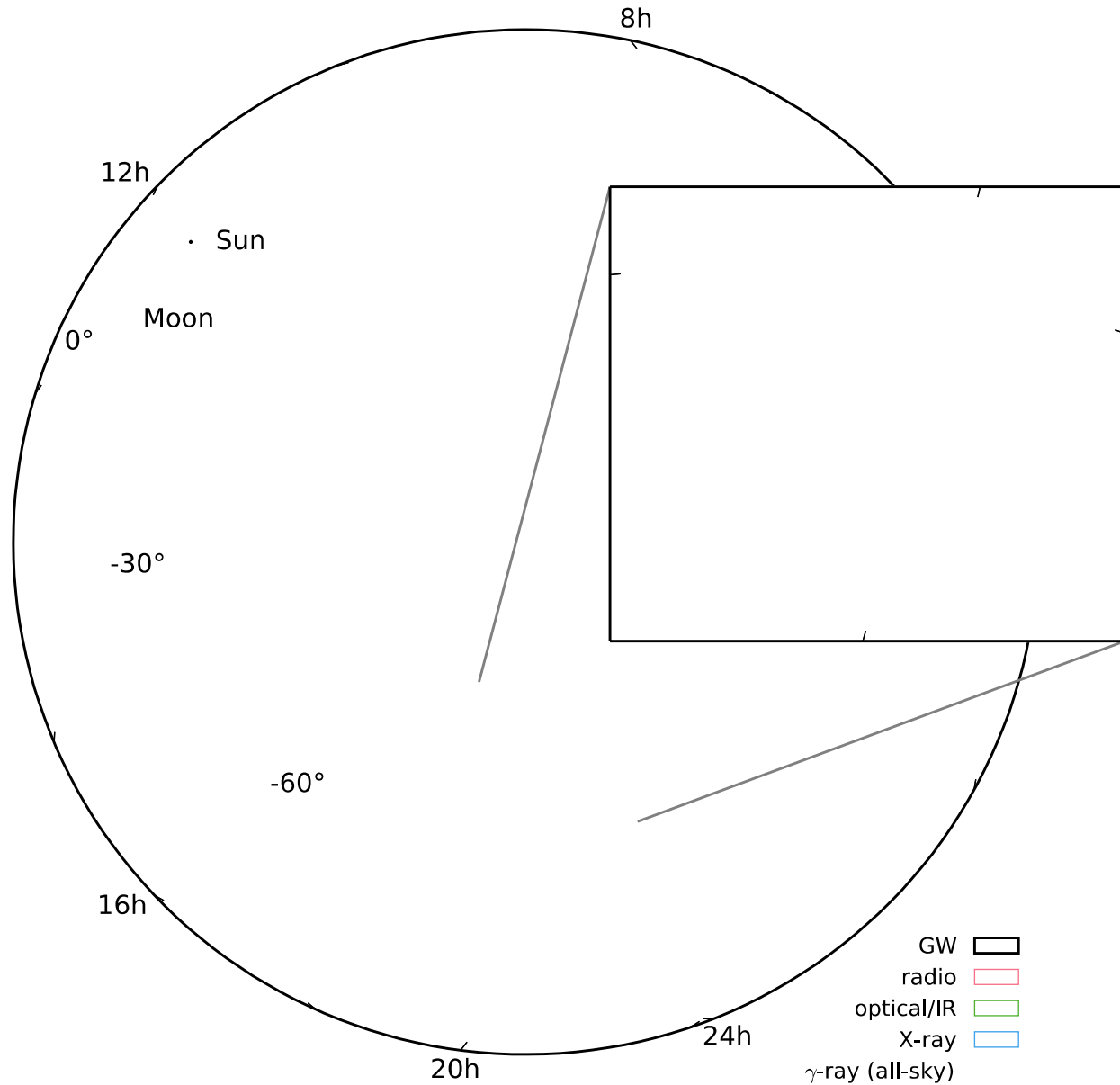


...Con 3 rivelatori la localizzazione è molto più precisa!!

# Localizzazione con i due LIGO della prima sorgente GW150914



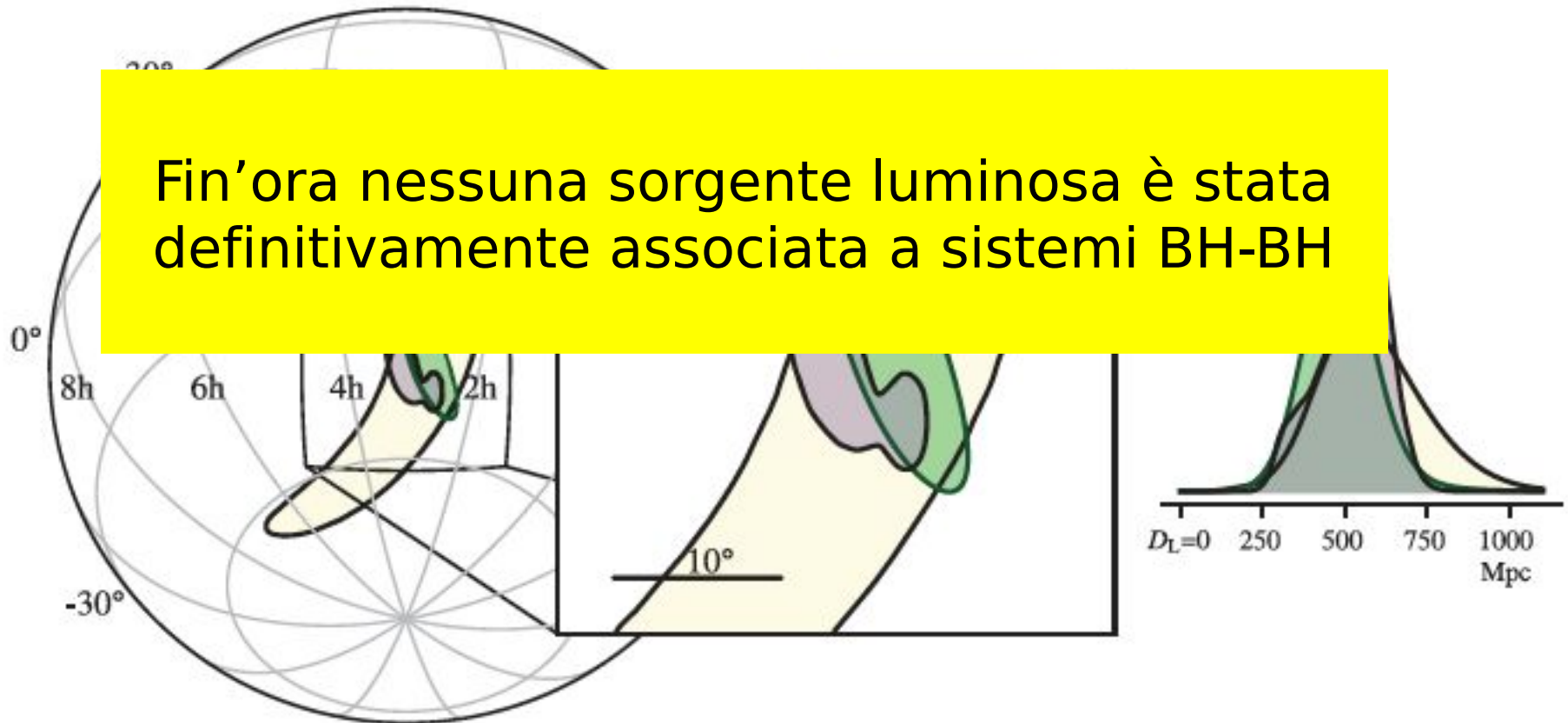
# Copertura dell'area di cielo effettuata dai telescopi



# Localizzazione con i due LIGO e Virgo della sorgente GW170814

area di confidenza al 90%  
Con i due LIGO = 1160 deg<sup>2</sup>  
Con i due LIGO+Virgo = 60 deg<sup>2</sup>

Fin'ora nessuna sorgente luminosa è stata definitivamente associata a sistemi BH-BH



17 AGOSTO 2017



# Qualcosa di nuovo!

GraceDB 17 ago

a

New CBC Event

...

...

Event Summary:

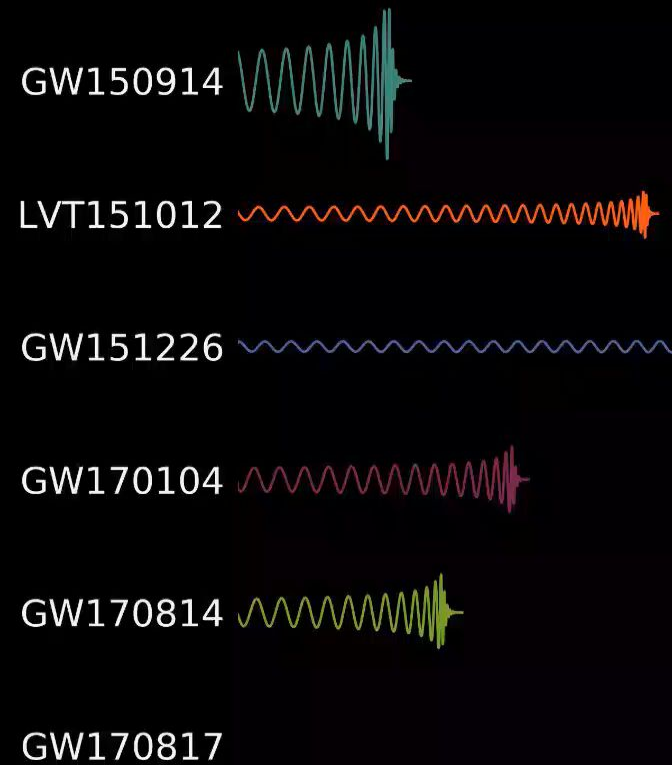
Event Time (GPS): 1187008882.45

Event Time (UTC): 2017-08-17 12:41:04

Instruments: H1

FAR: 3.478E-12

Component masses: 1.53, 1.24



Masse degli oggetti: circa 1-2  
Msolari

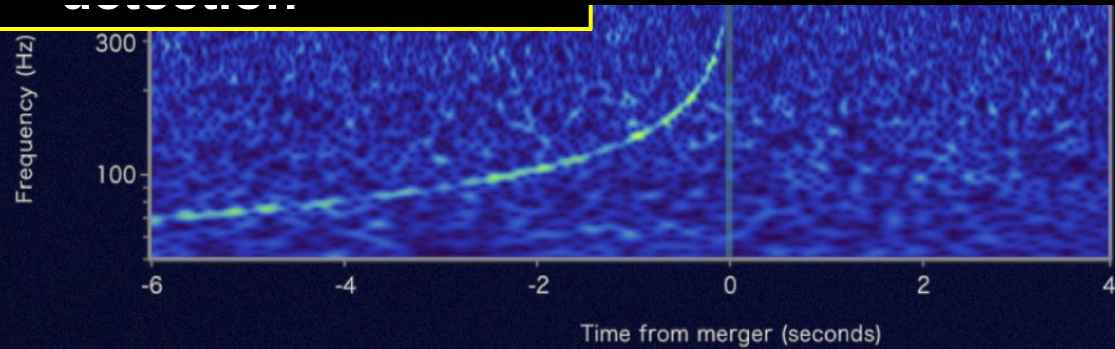
Distanza: circa 40 Mpc (130 000  
000 ly)

Frequenze: 30-2000 Hz

Remnant: ?

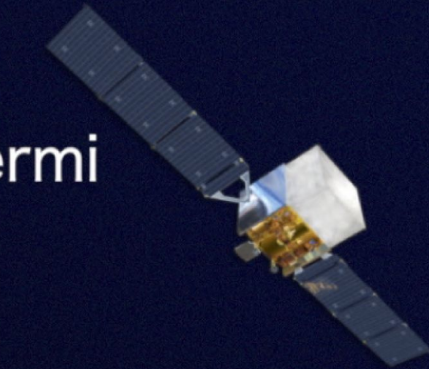


# La prima controparte elettromagnetica: un GRB !

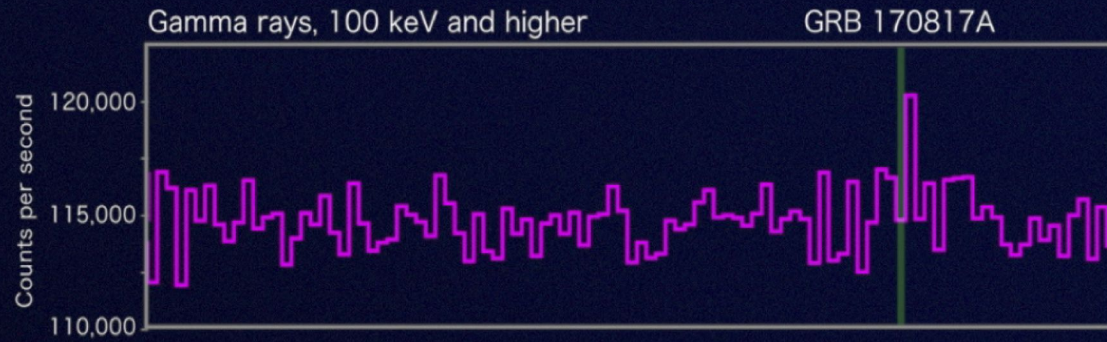


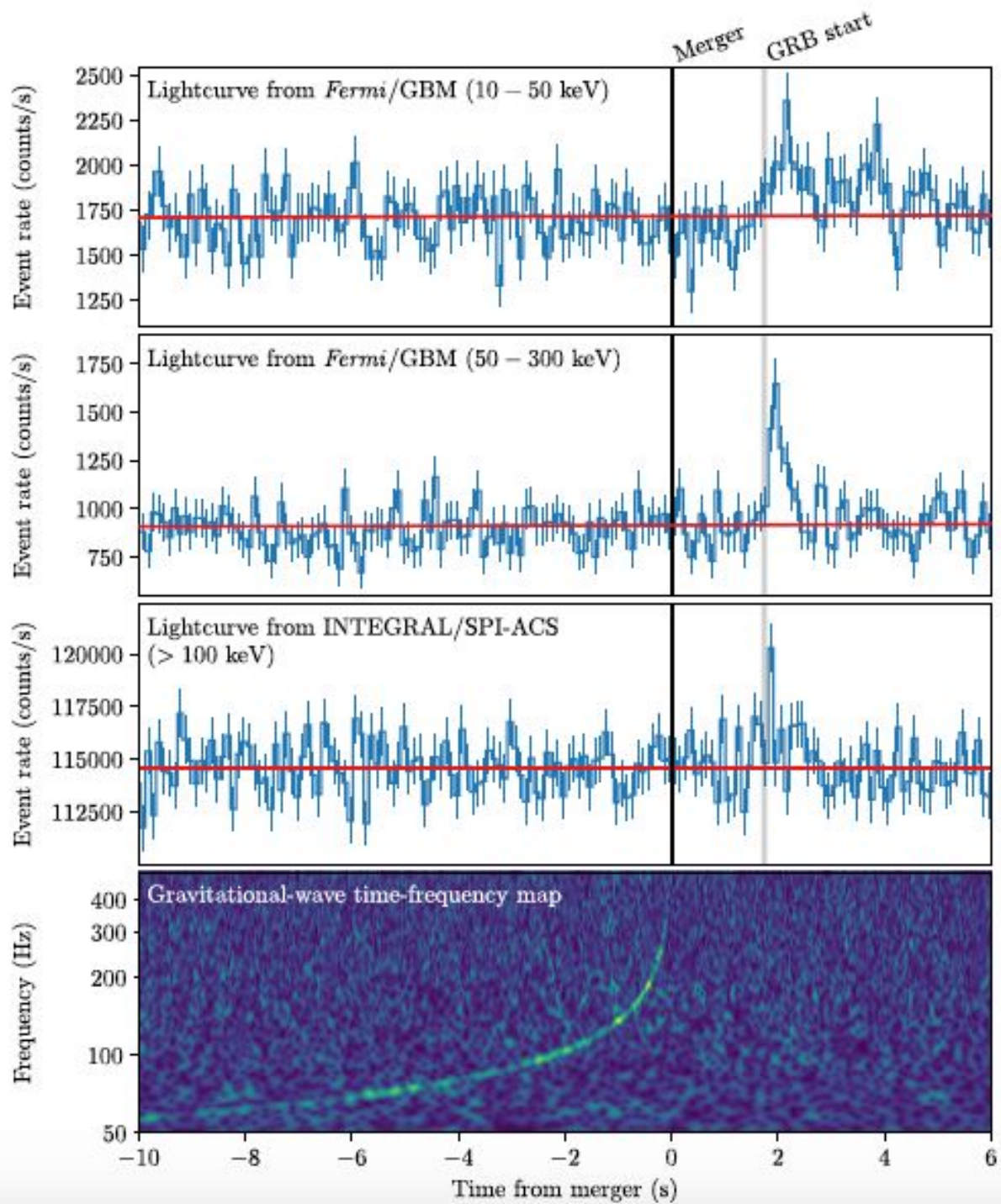
**GRB lags GW by 1.7 s**

Fermi



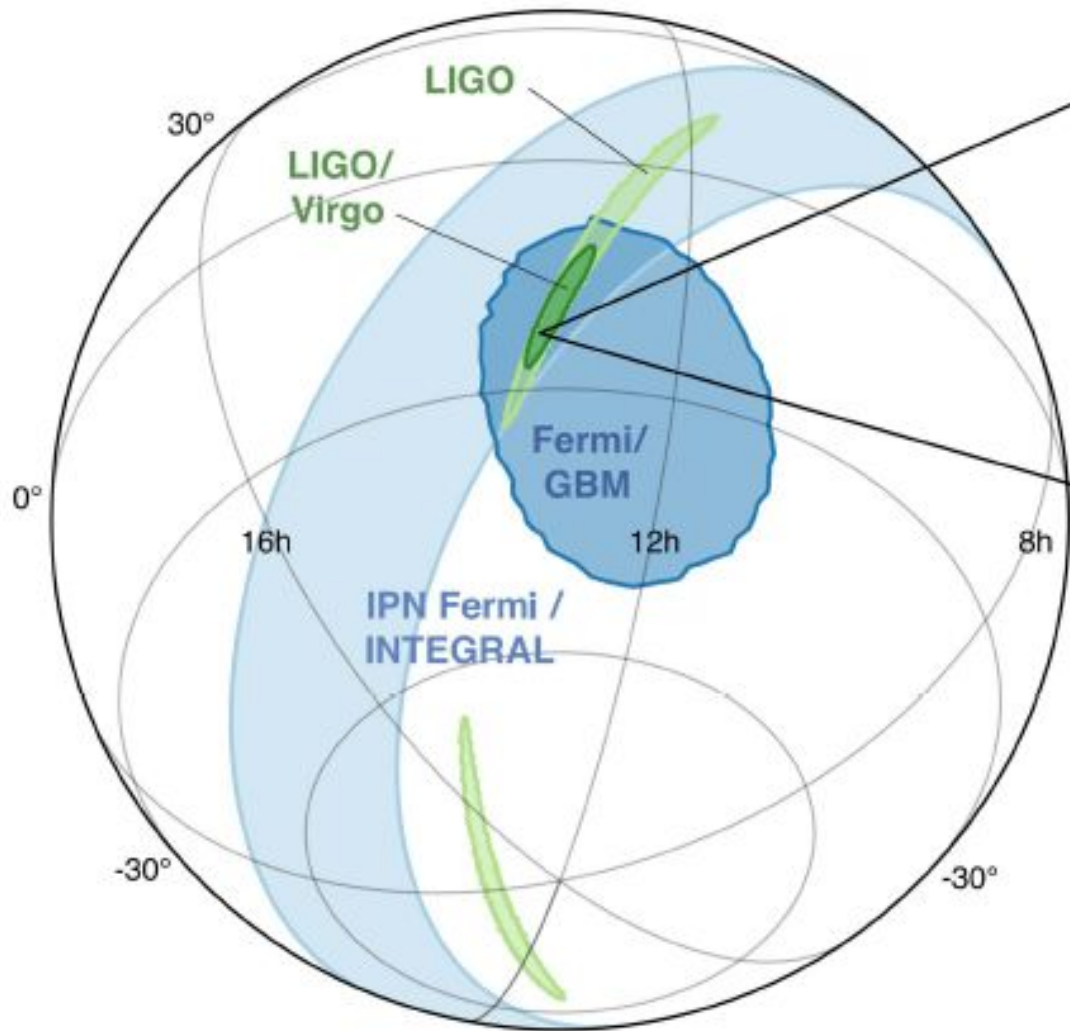
INTEGRAL



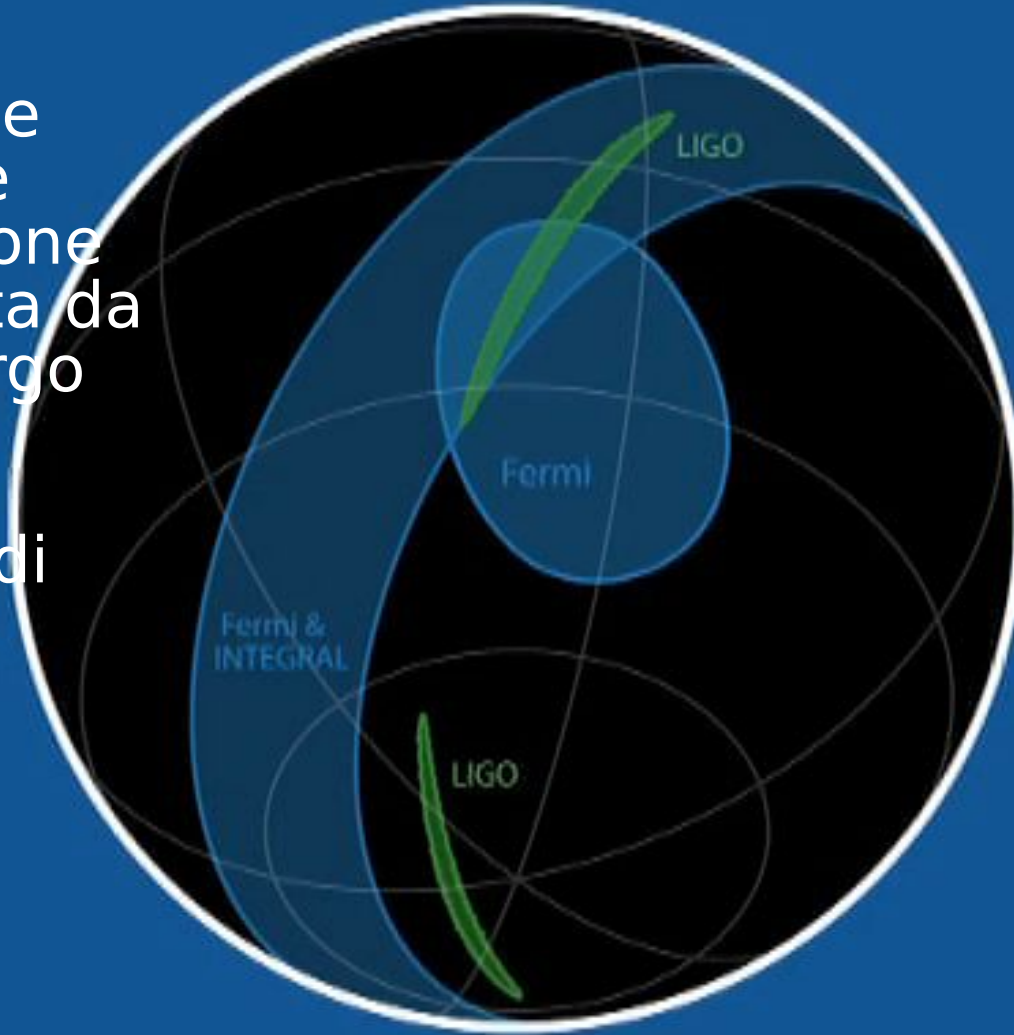


Abbott et al. 2017 ApJL 848,L13

# La localizzazione di GW170817 i due LIGO + Virgo



Le galassie  
contenute  
nella regione  
individuata da  
LIGO e Virgo  
alla la  
distanza  
misurata di  
40 Mpc



...ciascuna galassia  
è stata osservata  
diverse notti per  
cercare la  
sorgente...

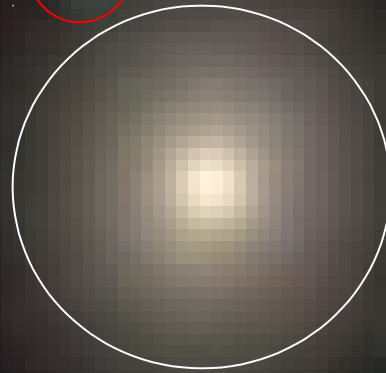
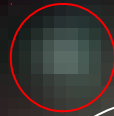


...e guardando la  
galassia  
NGC4993...

**AT2017gfo**



...dopo 10hr dall'evento, viene scoperta la prima controparte ottica di una sorgente di onde gravitazionali!

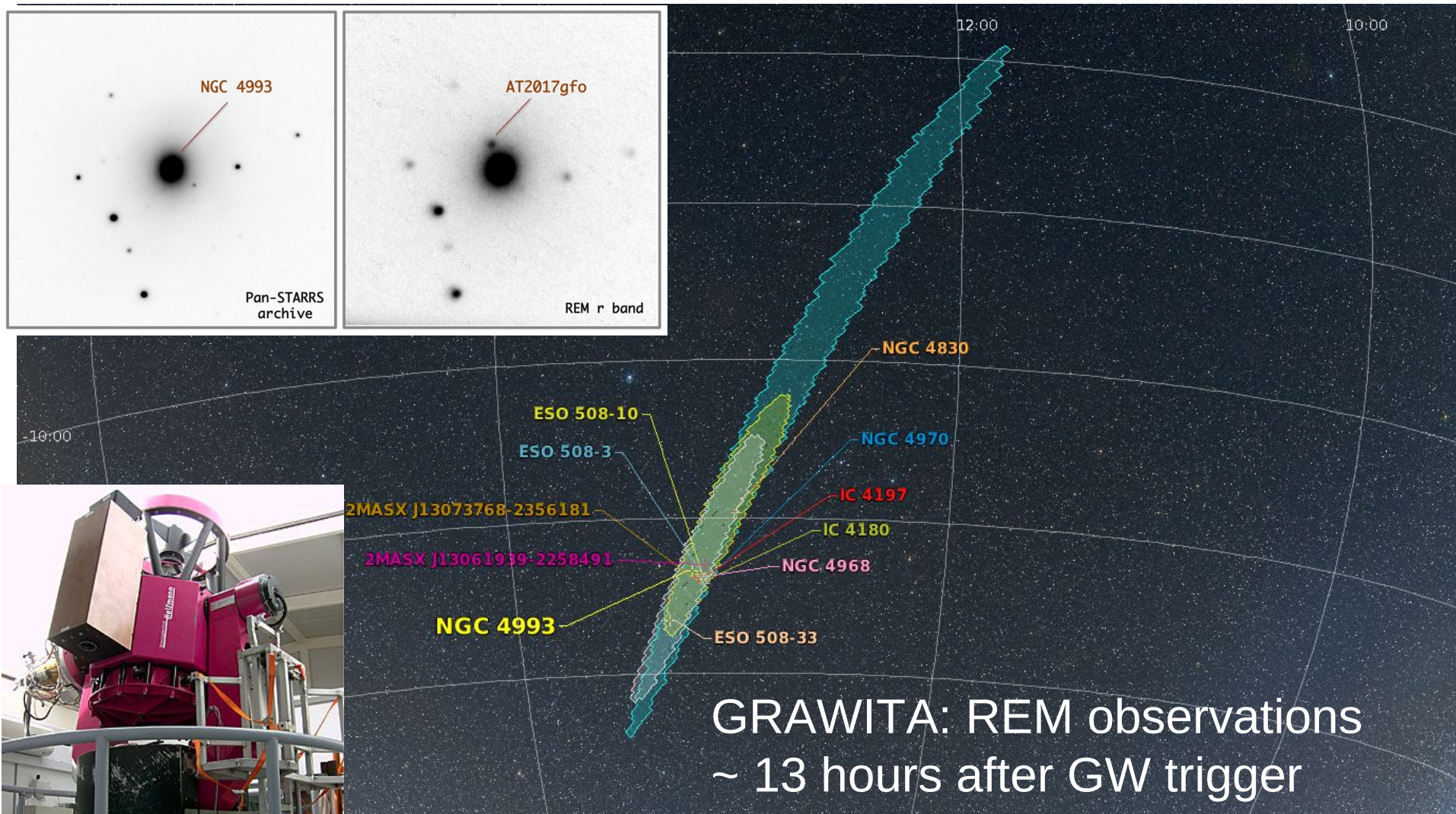


Galassia  
NCG4993



...poco dopo tanti altri telescopi confermano la scoperta!

# Anche l'Istituto Nazionale di Astrofisica italiano fa la sua parte!



REM @ ESO  
La Silla



...che tipo di sorgente è AT2017gfo?

$t = 10.3 \text{ ms}$

Durante la  
coalescenza, le  
stelle di  
neutroni si  
“sfaldano” per  
effetto delle  
forti forze  
mareali...



...e continuando  
a ruotare  
velocemente  
espellono una  
parte della loro  
massa...

...che tipo di sorgente è AT2017gfo?

$t = 16.6 \text{ ms}$

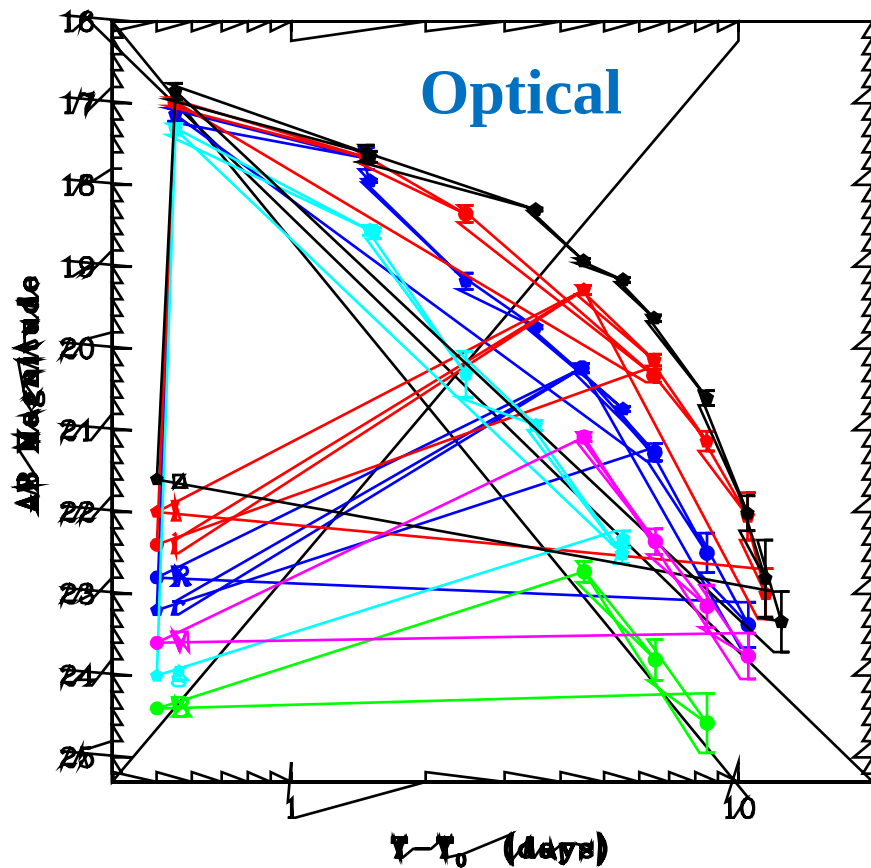
L'alta densità di neutroni e le elevate temperature innescano la sintesi di elementi pesanti sottoforma di isotopi instabili...



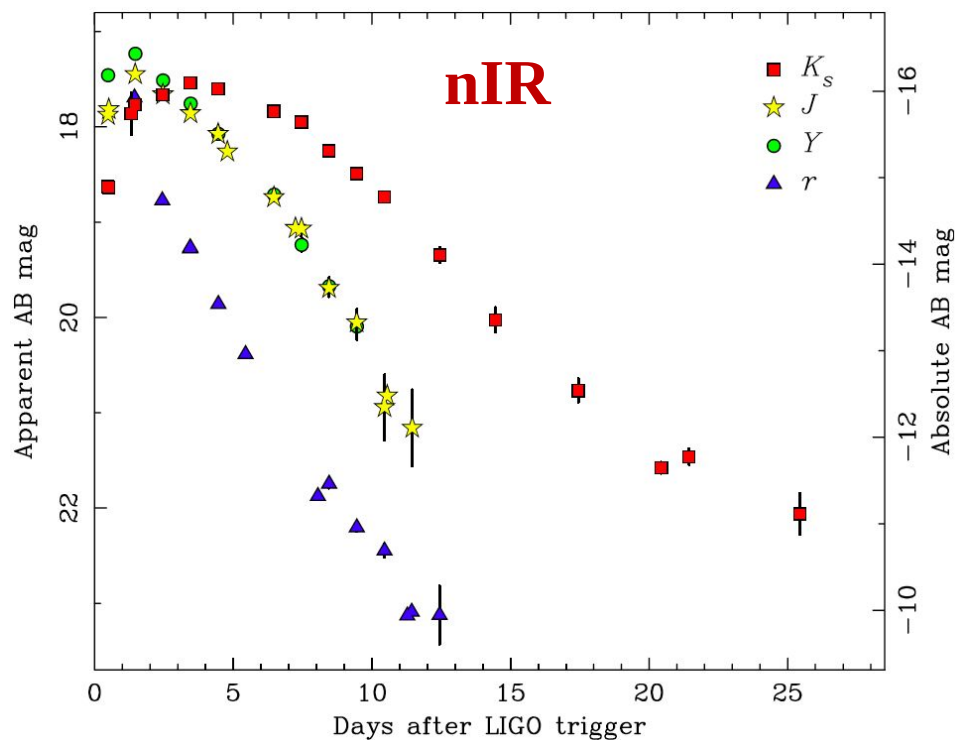
...il decadimento nucleare riscalda la materia che emette radiazione prima in banda visibile e poi nel vicino IR

# Prime osservazioni dettagliate di una KILONOVA

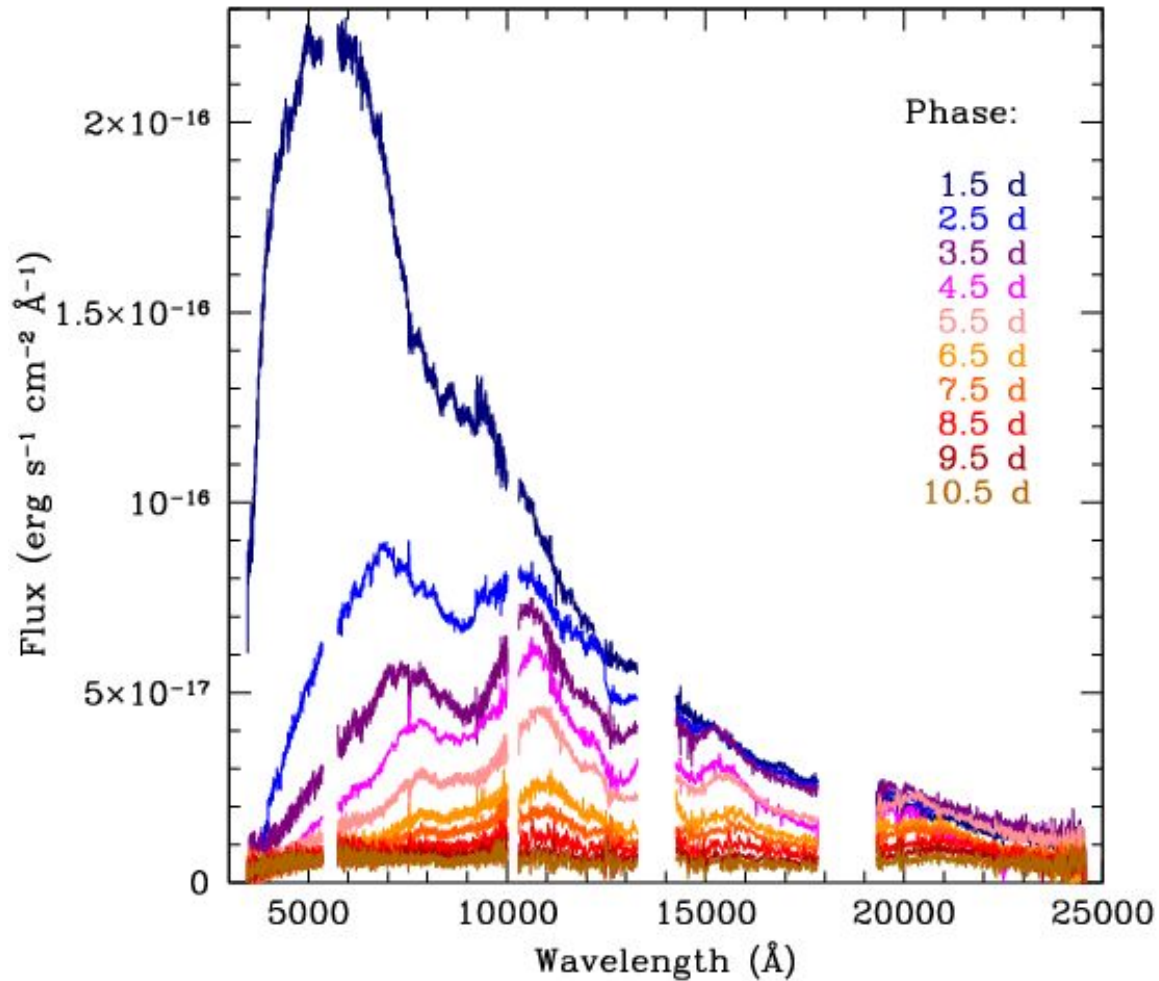
*Pian et al. 2017*



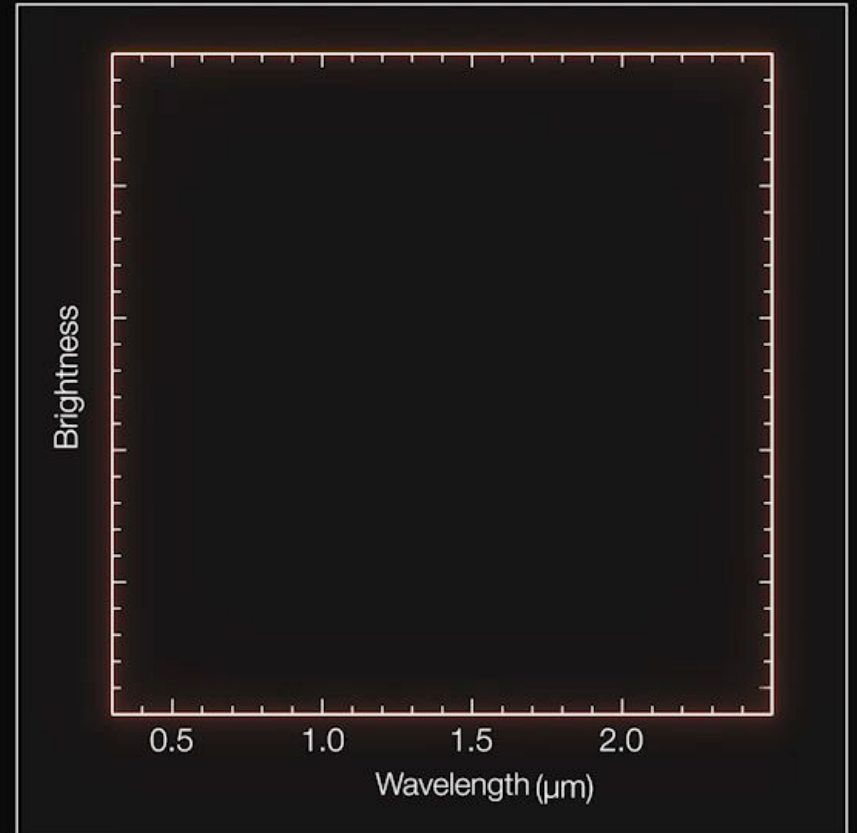
*Tanvir et al. 2017*



# Evoluzione dello spettro della kilonova nel tempo

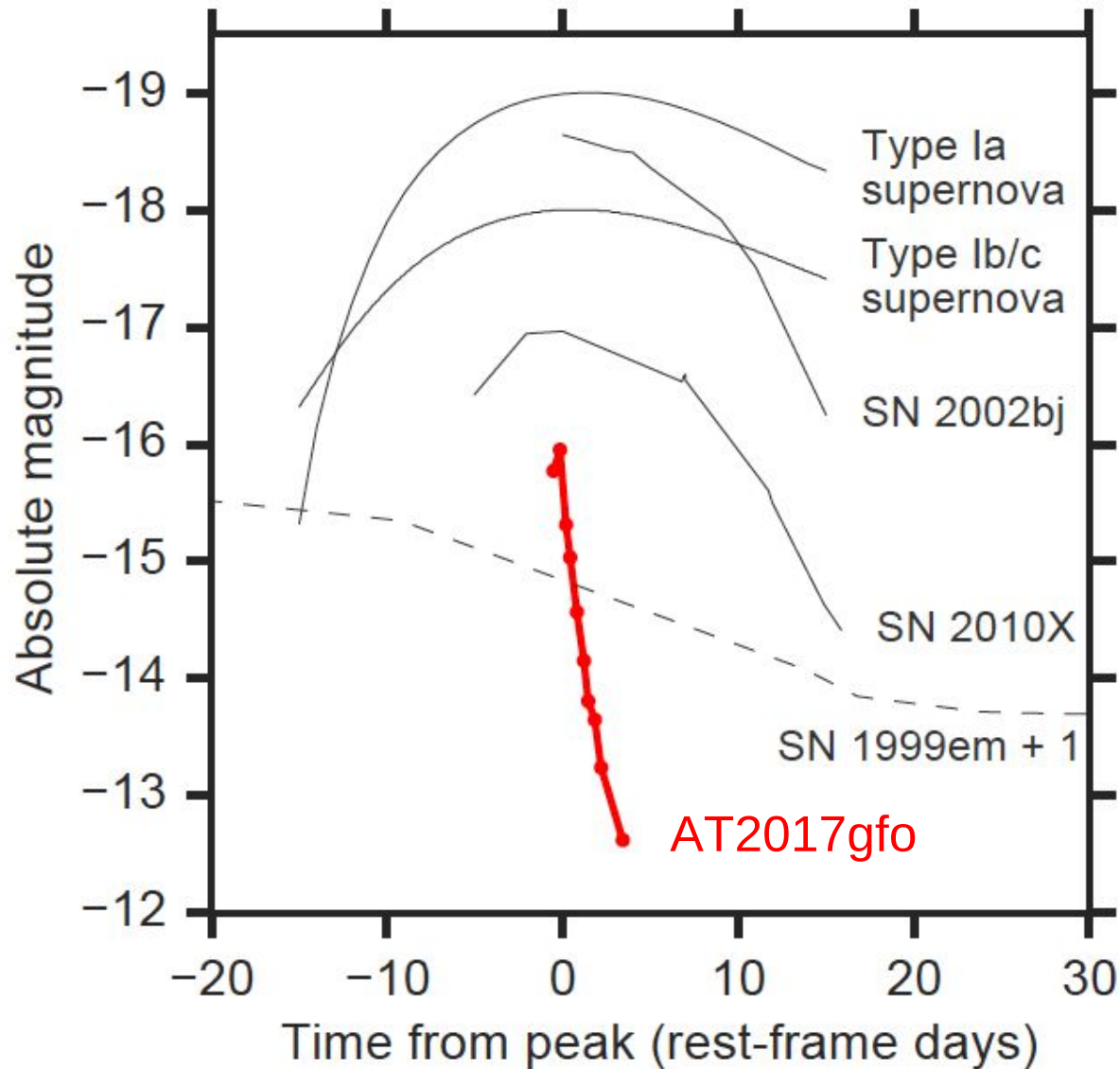


# Evoluzione dello spettro della kilonova nel tempo - immagini ESO - INAF









Time: -1225 days

# Potremmo aver sbagliato e aver osservato una “banale” SN?



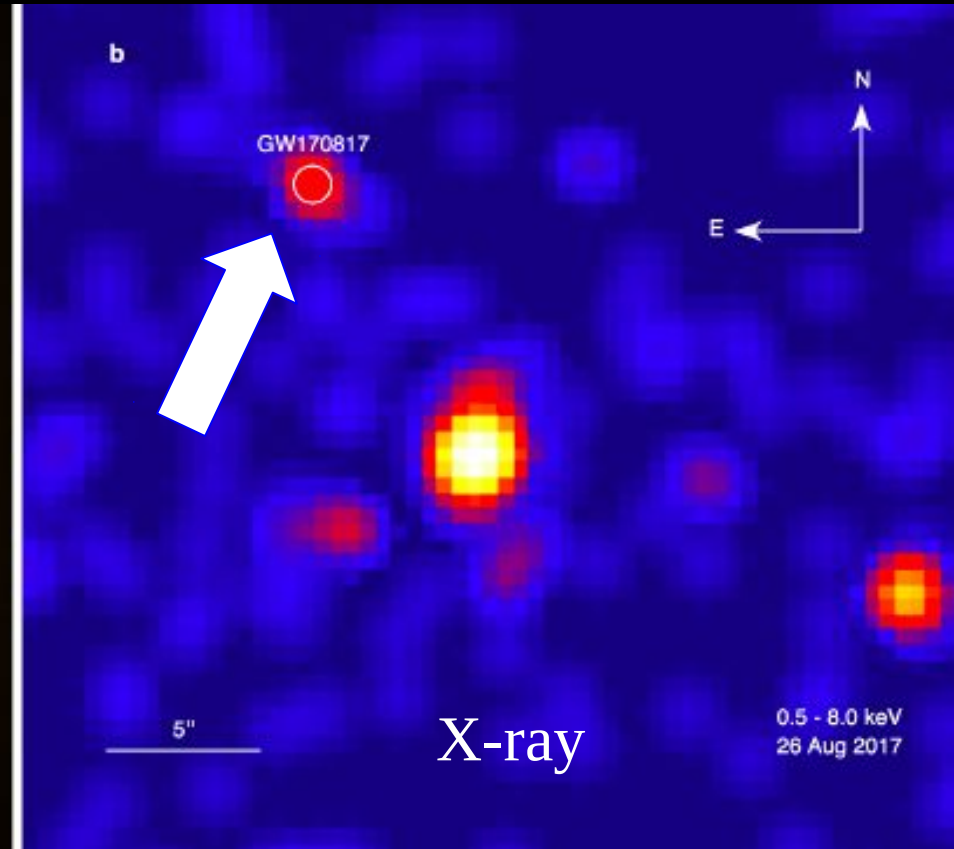


# Perché le kilonovae sono importanti?

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																
		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												

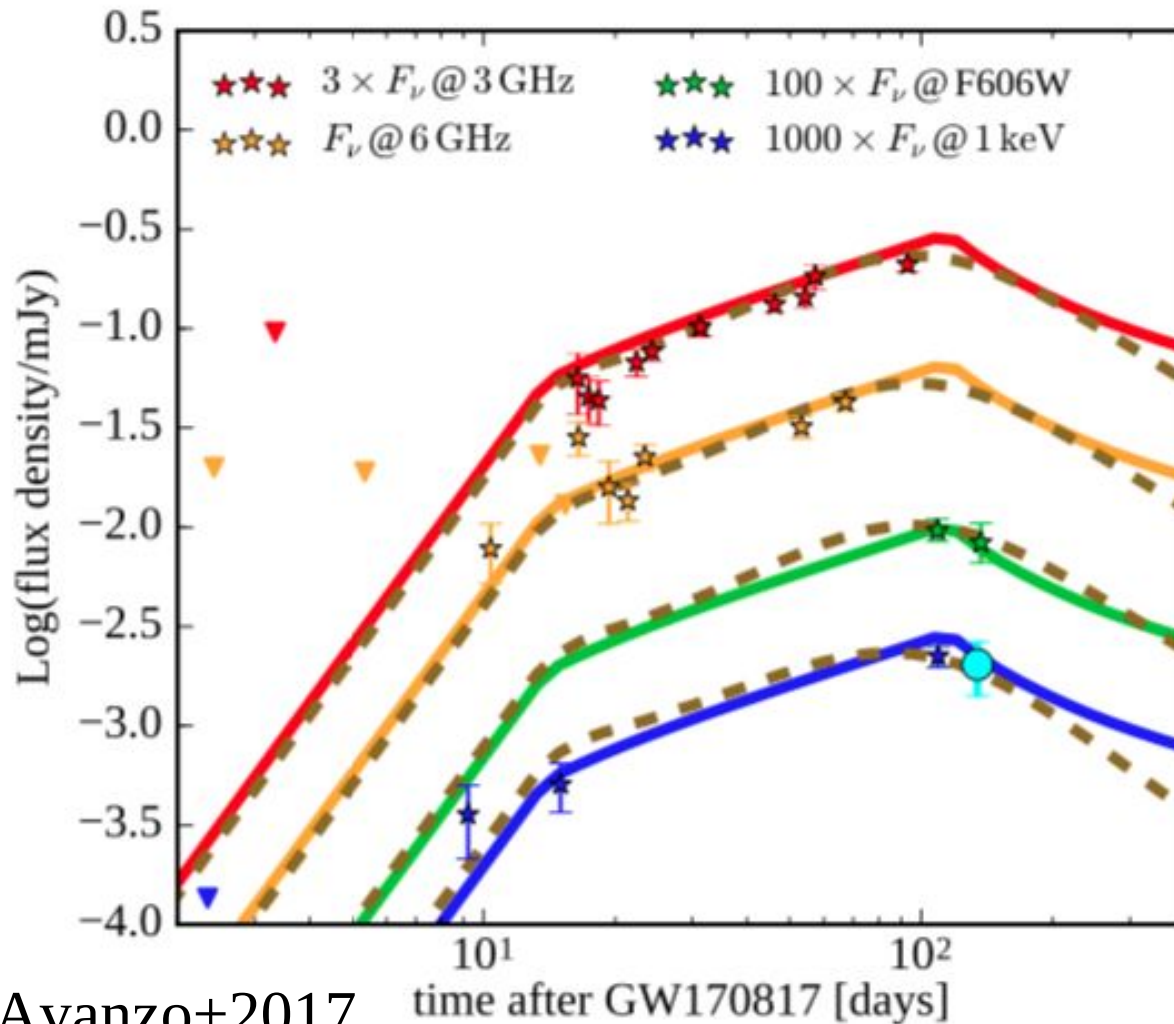
Le kilonovae sono le fabbriche degli elementi chimici più pesanti della tavola periodica

10 giorni dopo, il satellite Chandra osserva una emissione dalla sorgente anche nei raggi X...

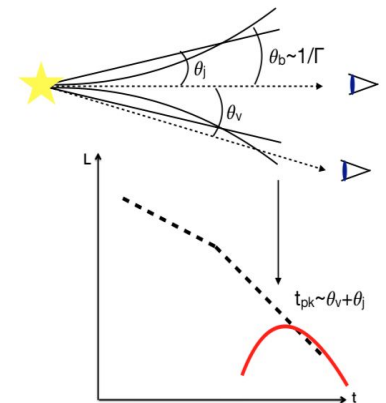


...Stiamo ora osservando  
l'emissione residua dei GRB  
AFTERGLOW

# GW170817: un afterglow fuori asse?



D'Avanzo+2017



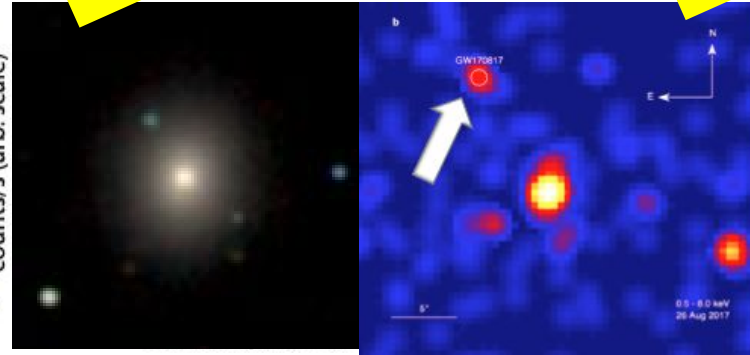
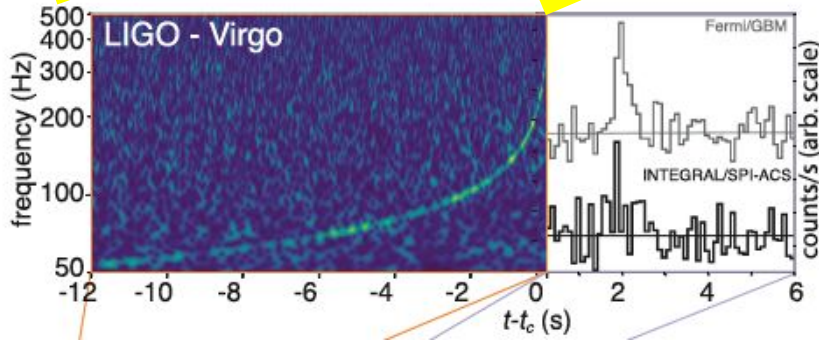
# Le previsioni sono state tutte confermate!

GW170817  
( $t_0=0$ )

GRB  
 $T_0+2s$

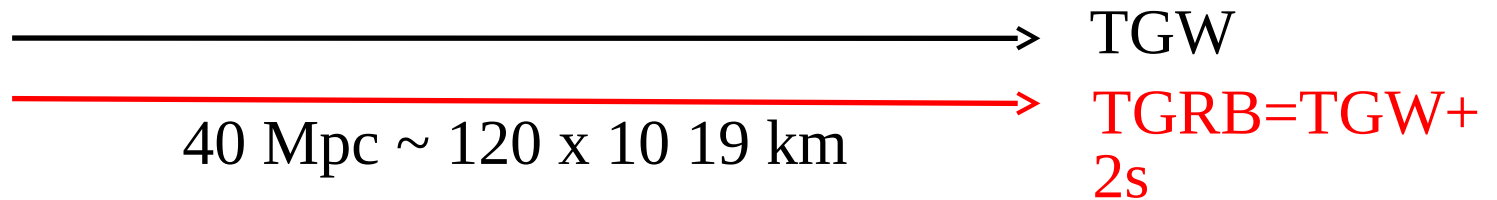
Kilonova  $t_0+11hr$

Afterglow  
 $t_0+10\text{ gg}$



Tempo →

# Stima della velocità delle onde gravitazionali



Se sono state emesse nello stesso istante, allora:

$$V_{GW} = V_{EM} (1 + 7 \times 10^{-16}) = V_{EM} (1 + 0.000000000000000007)$$

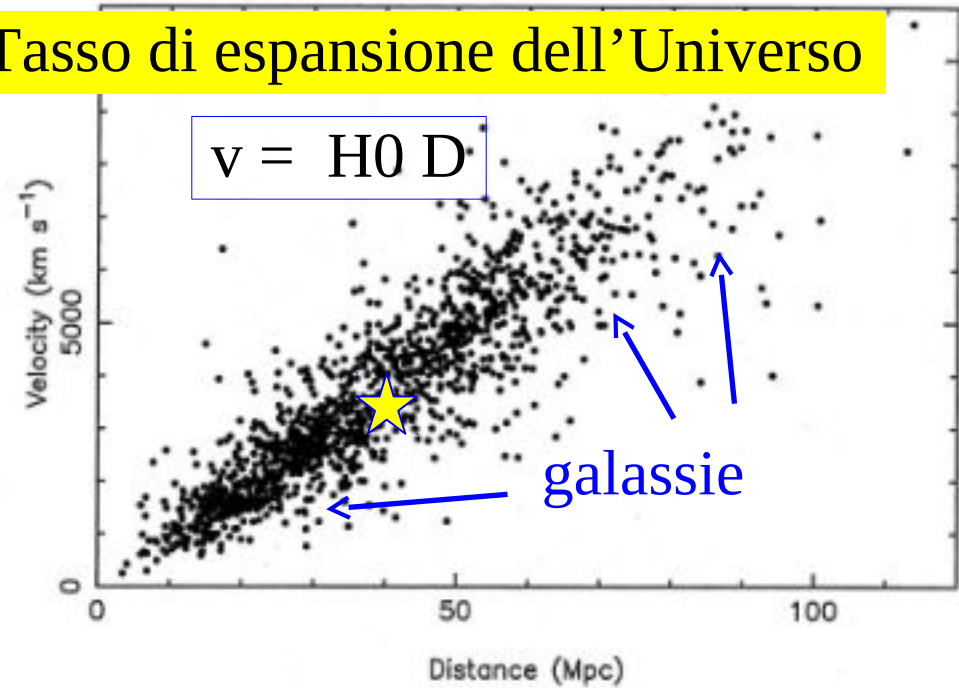
Se lo SGRB è stato emesso 10 s dopo le GW:

$$V_{GW} = V_{EM} (1 - 3 \times 10^{-15}) = V_{EM} (1 - 0.000000000000000003)$$

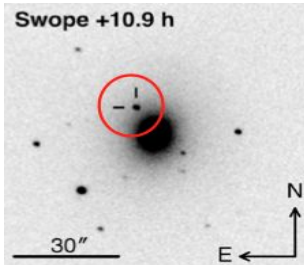
Abbott et al. 2017 ApJL 848, L13  
<https://arxiv.org/abs/1710.05834>

# Nuova misura (indipendente) della costante di Hubble $H_0$

Tasso di espansione dell'Universo

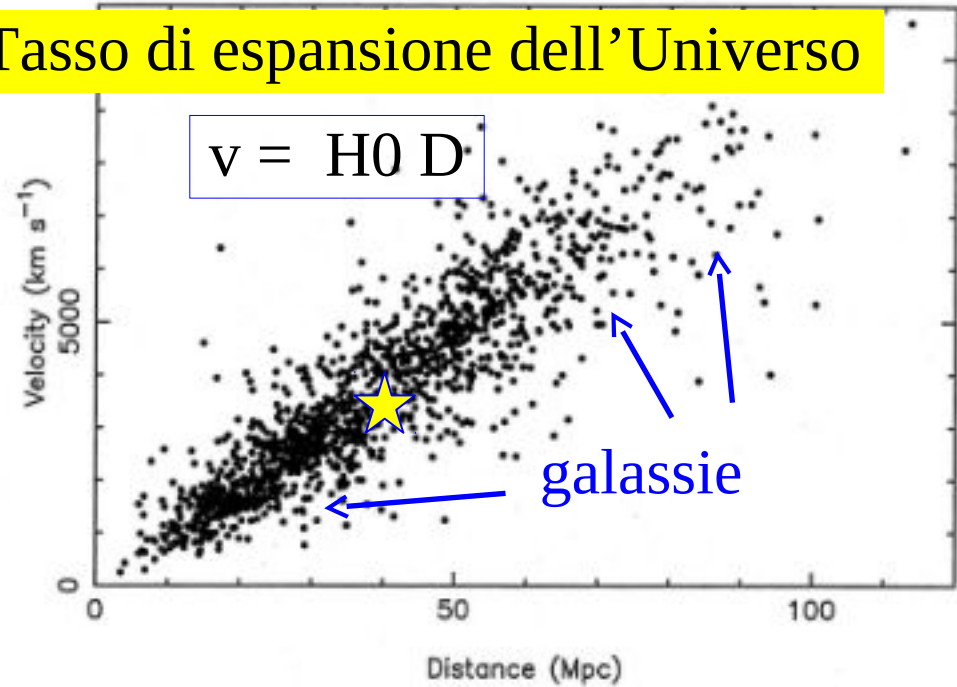


# Nuova misura (indipendente) della costante di Hubble $H_0$

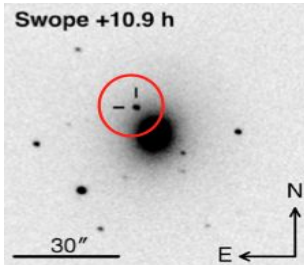


Velocità di recessione di NGC4993 da misure spettroscopiche

## Tasso di espansione dell'Universo



# Nuova misura (indipendente) della costante di Hubble $H_0$

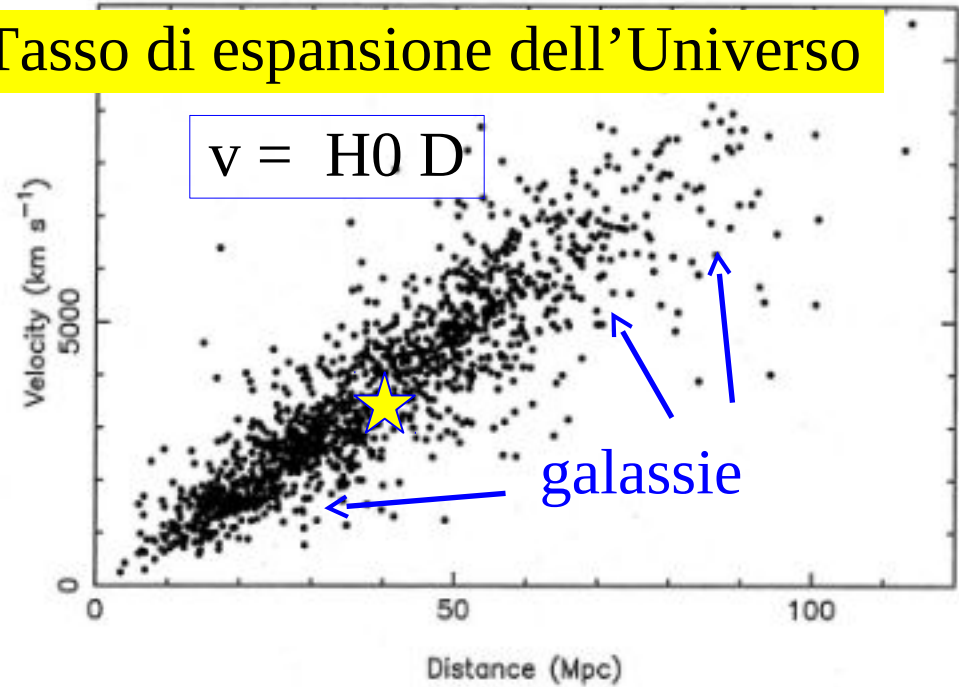


Velocità di recessione di NGC4993 da misure spettroscopiche

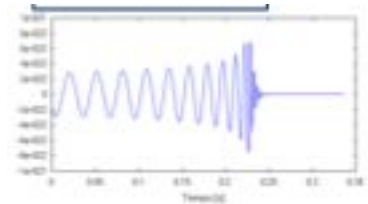
$$v = 3017 \pm 166 \text{ km/s}$$

$$D = 43.8^{+2.9}_{-6.9} \text{ Mpc}$$

## Tasso di espansione dell'Universo

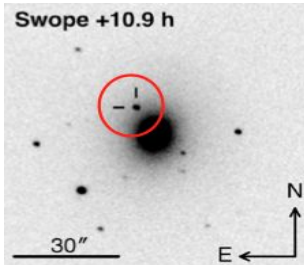


Distanza dalla forma d'onda gravitazionale





# Nuova misura (indipendente) della costante di Hubble $H_0$



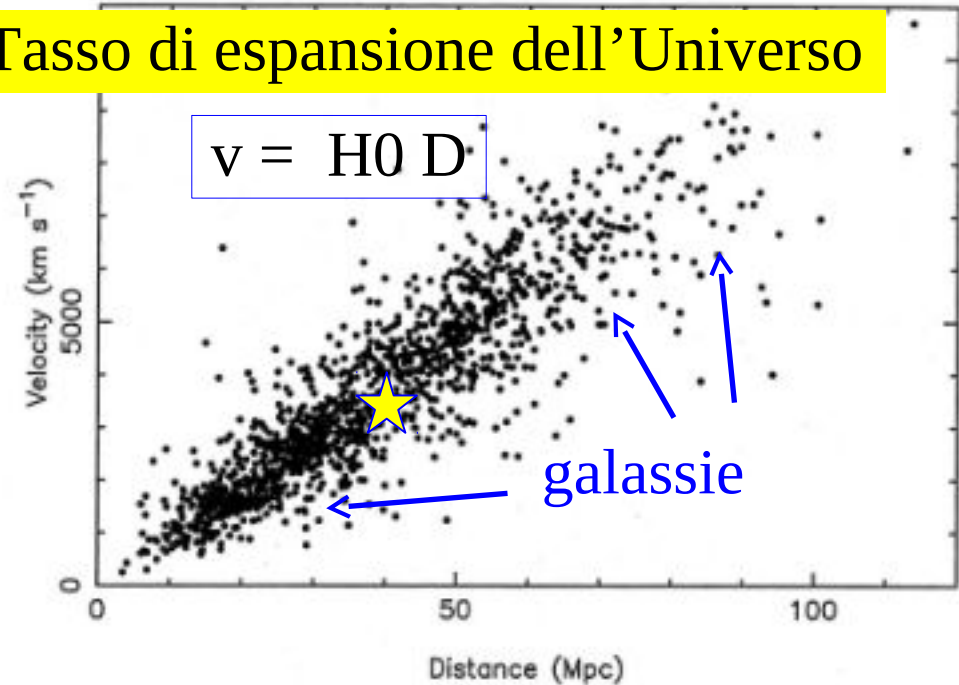
Velocità di recessione di NGC4993 da misure spettroscopiche

$$v = 3017 \pm 166 \text{ km/s}$$

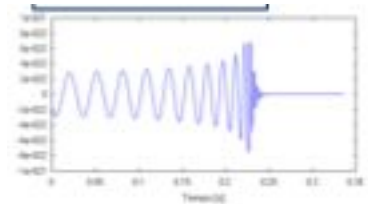
$$D = 43.8^{+2.9}_{-6.9} \text{ Mpc}$$

$$H_0 = 70^{+12}_{-8} \text{ km/s Mpc}^{-1}$$

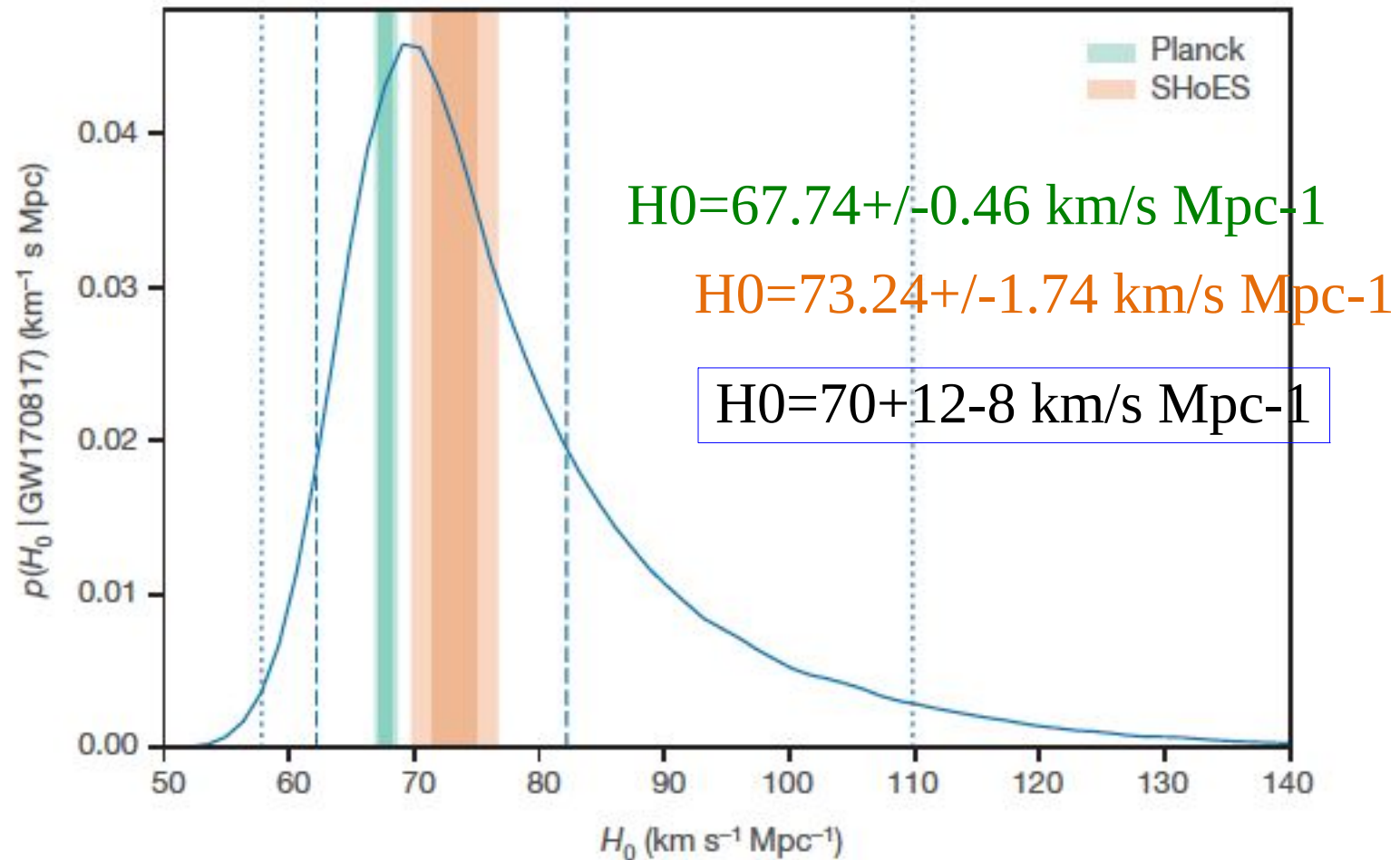
## Tasso di espansione dell'Universo



Distanza dalla forma d'onda gravitazionale

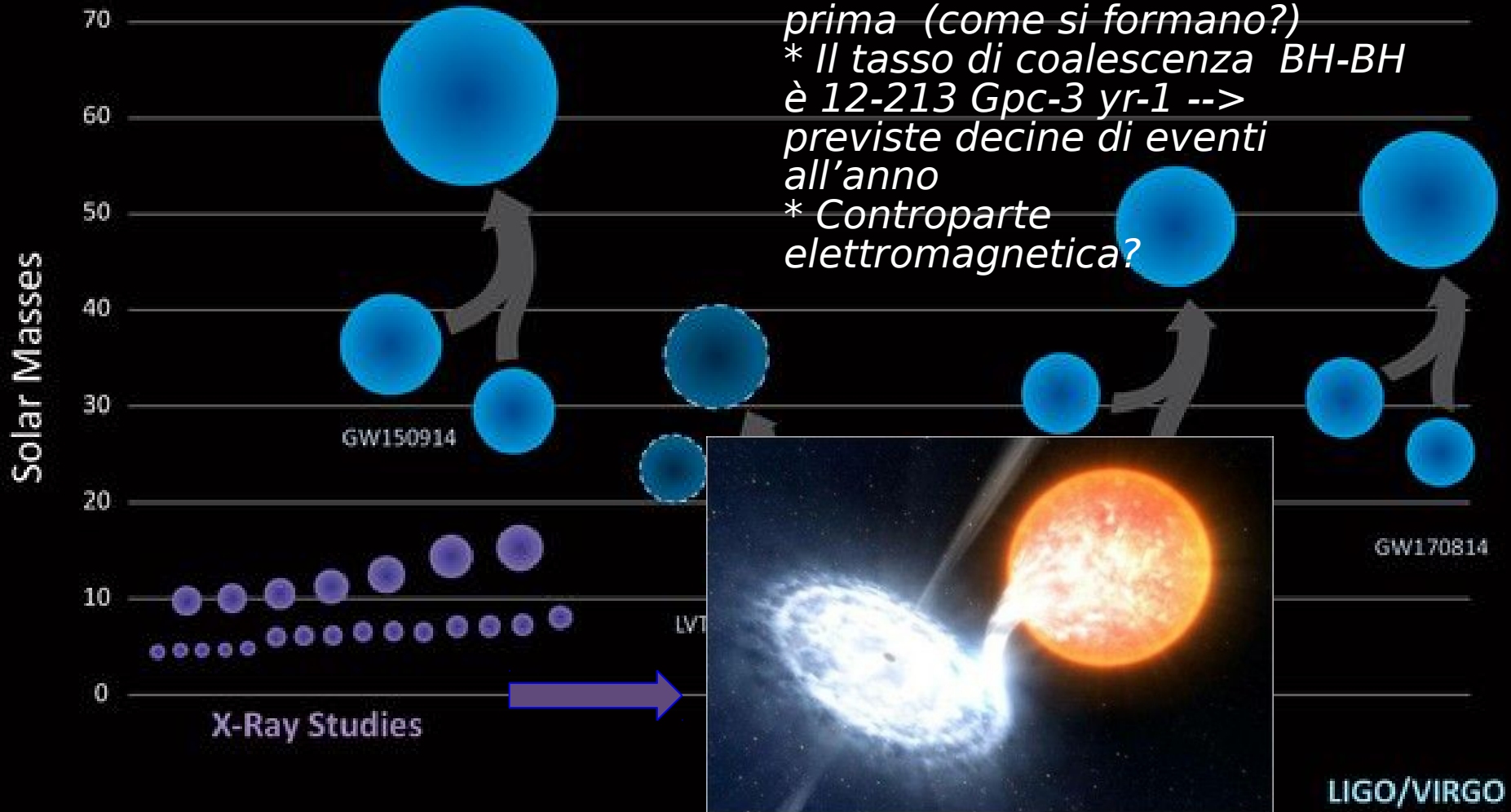


# Nuova misura (indipendente) della costante di Hubble $H_0$



# Ad oggi: confermate 5 coalescenze di due BH

- \* *Esistono BH massivi mai visti prima (come si formano?)*
- \* *Il tasso di coalescenza BH-BH è  $12-213 \text{ Gpc}^{-3} \text{ yr}^{-1}$  --> previste decine di eventi all'anno*
- \* *Controparte elettromagnetica?*



# ..ed 1 coalescenza di due NS

- \* *Alcuni (tutti?) i lampi gamma si formano dalla coalescenza di due stelle di neutroni*
- \* *Osservata con grande dettaglio una kilonova che conferma la produzione di elementi pesanti*
- \* *Le onde gravitazionali viaggiano alla velocità della luce*
- \* *Nuovo modo di misurare l'espansione dell'Universo*

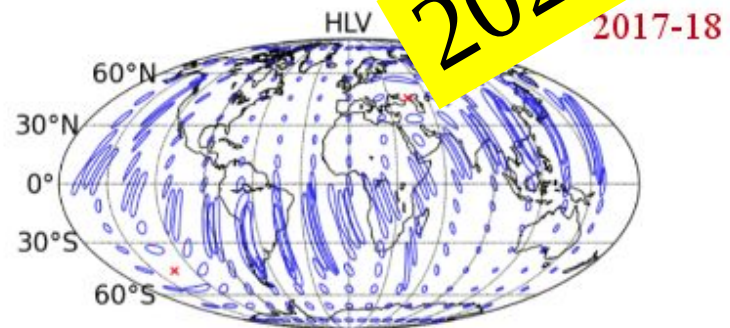
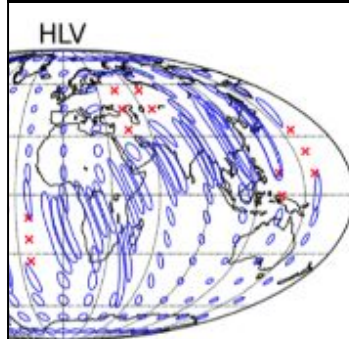
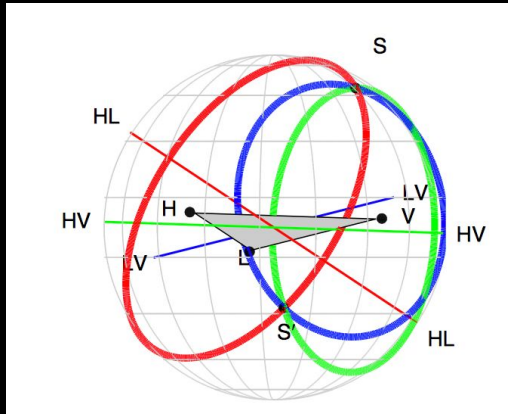
...ed è solo l'inizio !!!



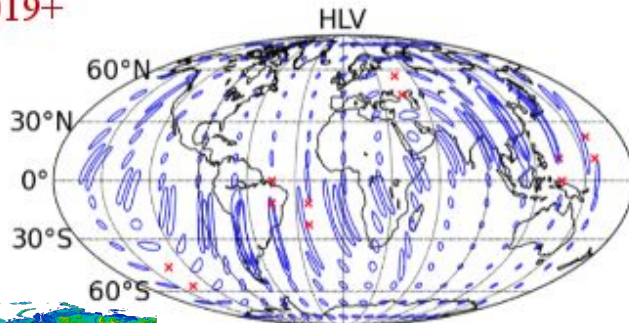
E' finalmente nata  
l'astronomia  
multi-messaggera

# Cosa ci aspettiamo nelle prossime campagne osservative?

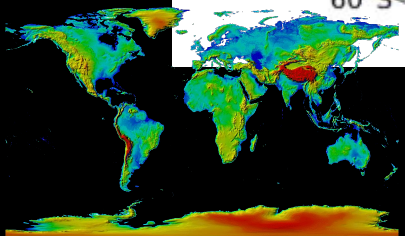
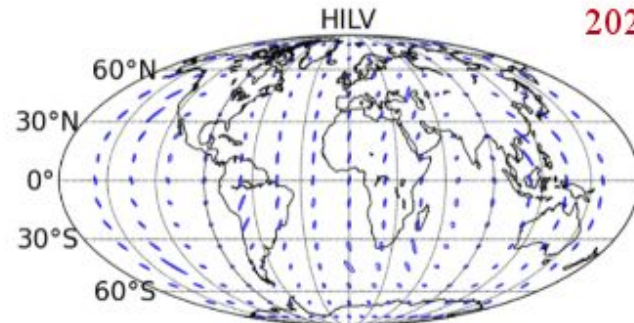
2020-2030



2019+

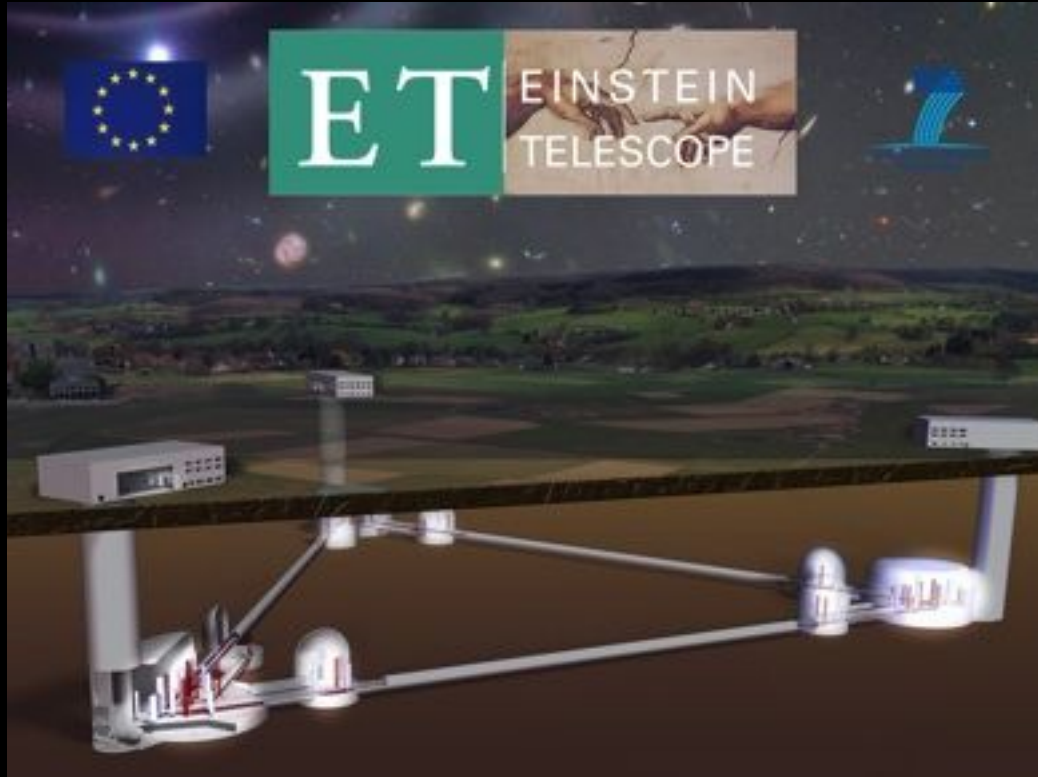


2022+



...più precisi nella localizzazione

# Cosa ci aspettiamo nelle prossime campagne osservative?



2030-...

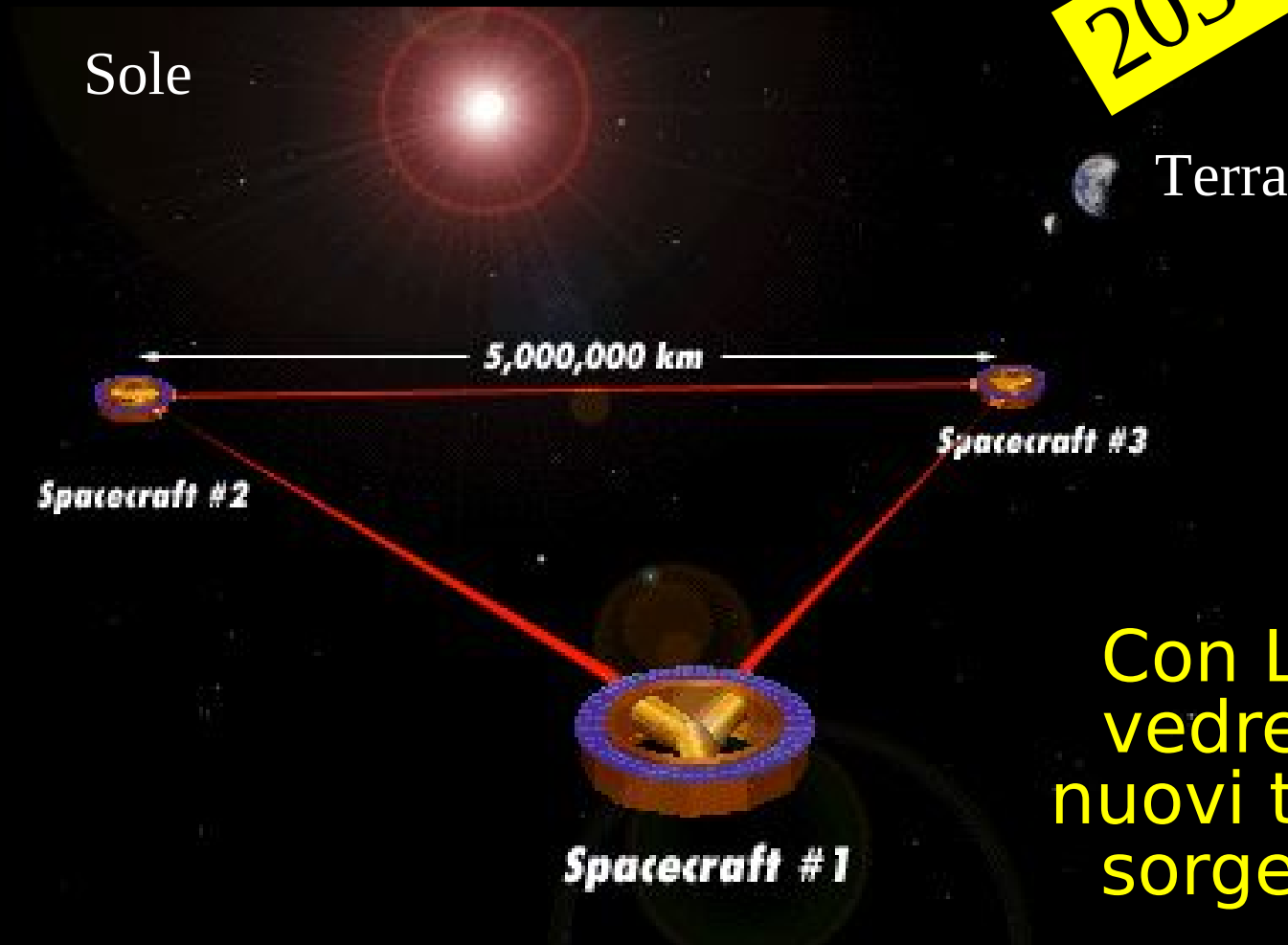
N sorgenti  
proporzionale  
al volume di  
Universo  
osservato

$D = 10 \times d$   
 $N = 1000 \times$   
 $n !!$

...vedremo molto più lontano

# LISA: LASER INTERFEROMETER SPACE ANTENNA

2035-...



Con LISA  
vedremo  
nuovi tipi di  
sorgenti!



**Cosmic Background Afterglow**    **First Stars**    **Stars, Galaxies Develop**    **Expansion Accelerates**    **Today**

**Inflation**

**Big Bang**

Rivelatori di onde gravitazionali del futuro

Rivelatori come Virgo

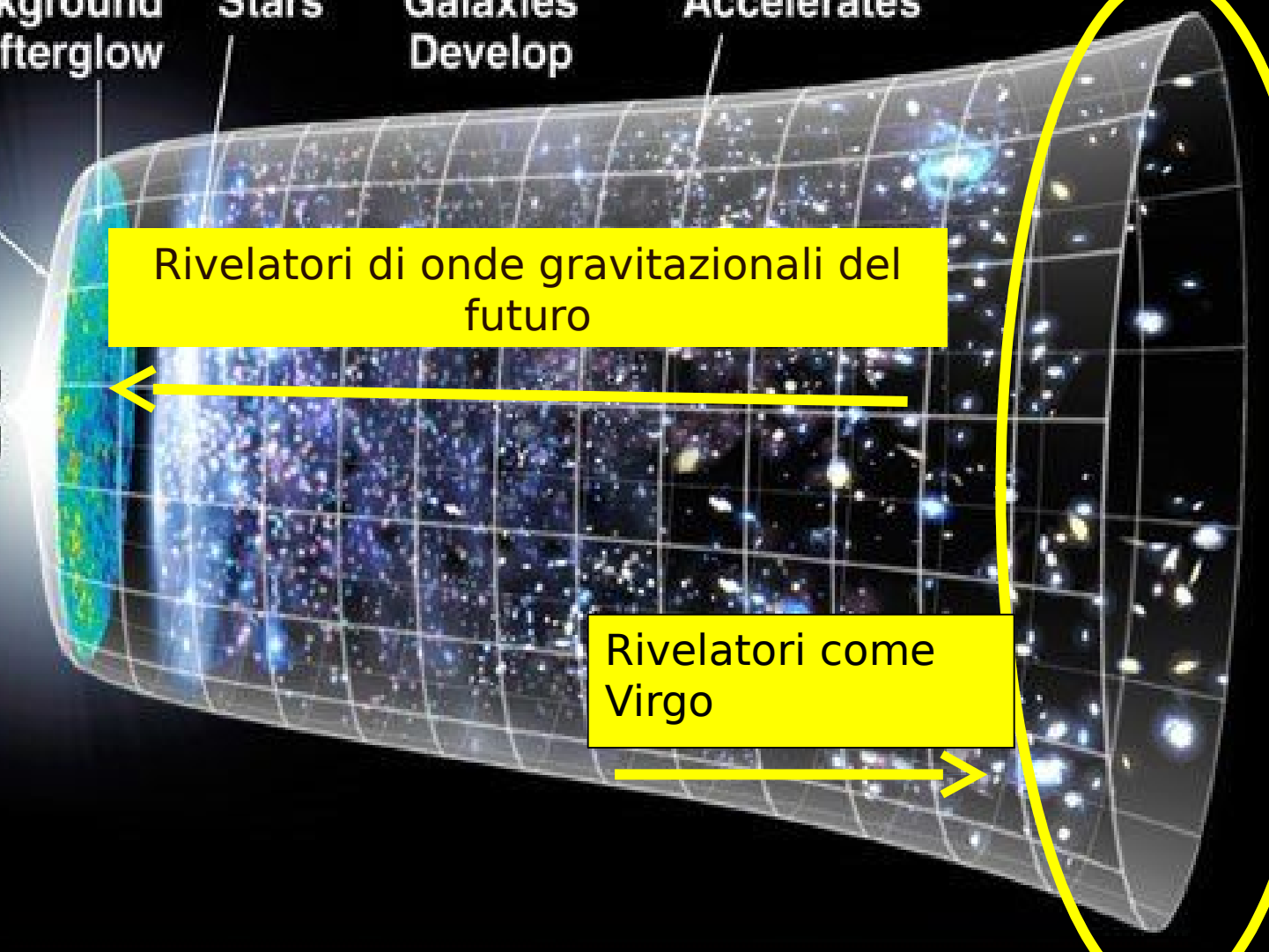
| 13.7

| 13.3

| 5

| 0

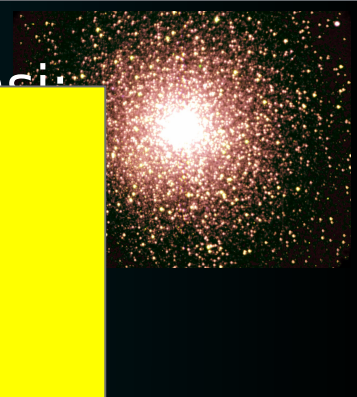
Billions of Years Before Today



# Come si formano buchi neri di 30 masse solari?

Nel campo delle

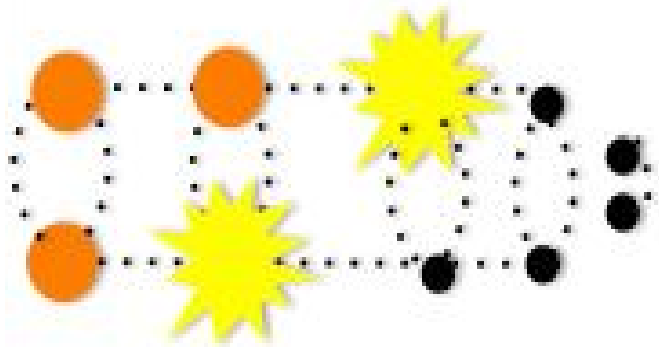
In ambienti densi



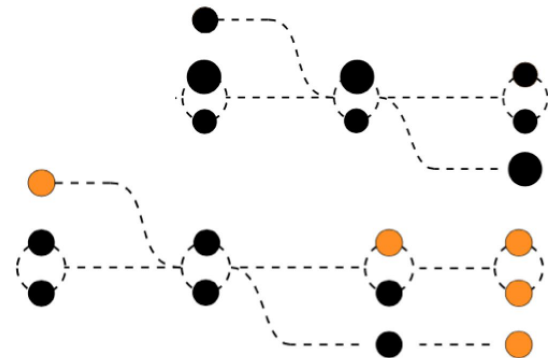
$R \sim 10$   
 $N \sim 10$

La scoperta della controparte  
"luminosa" permetterebbe di  
individuare dove si formano!

## Sistema binario isolato

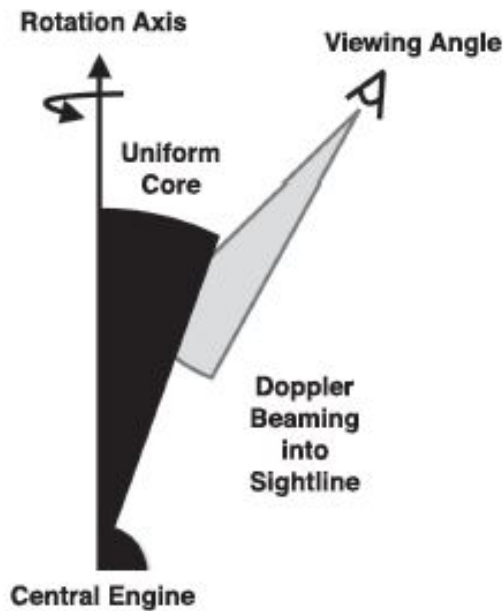


## Interazioni dinamiche

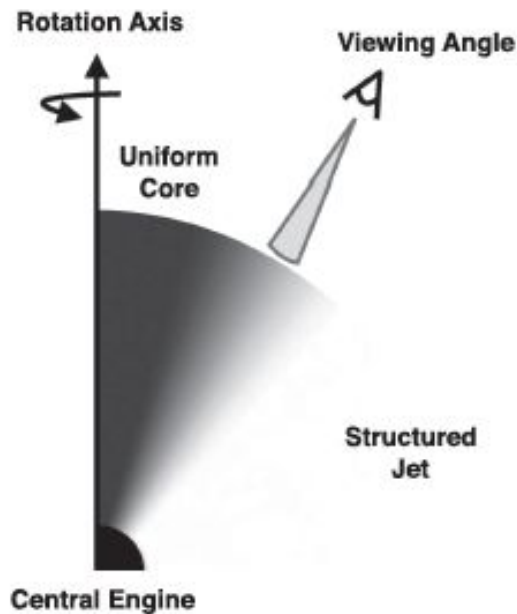


# Modelli di “getto” relativistico nei GRB

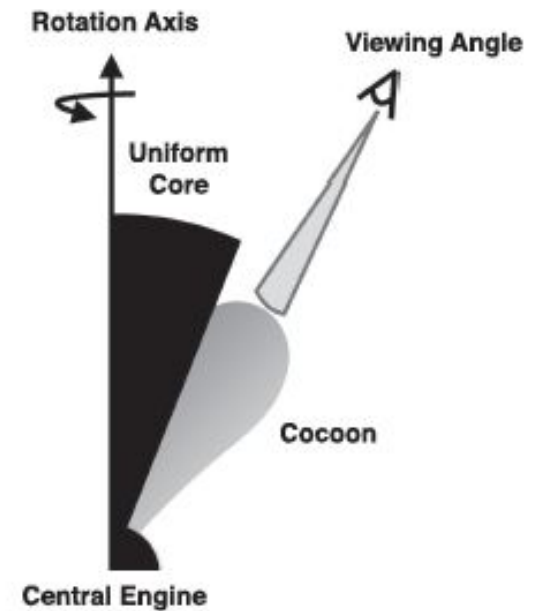
**Scenario i: Uniform Top-hat Jet**



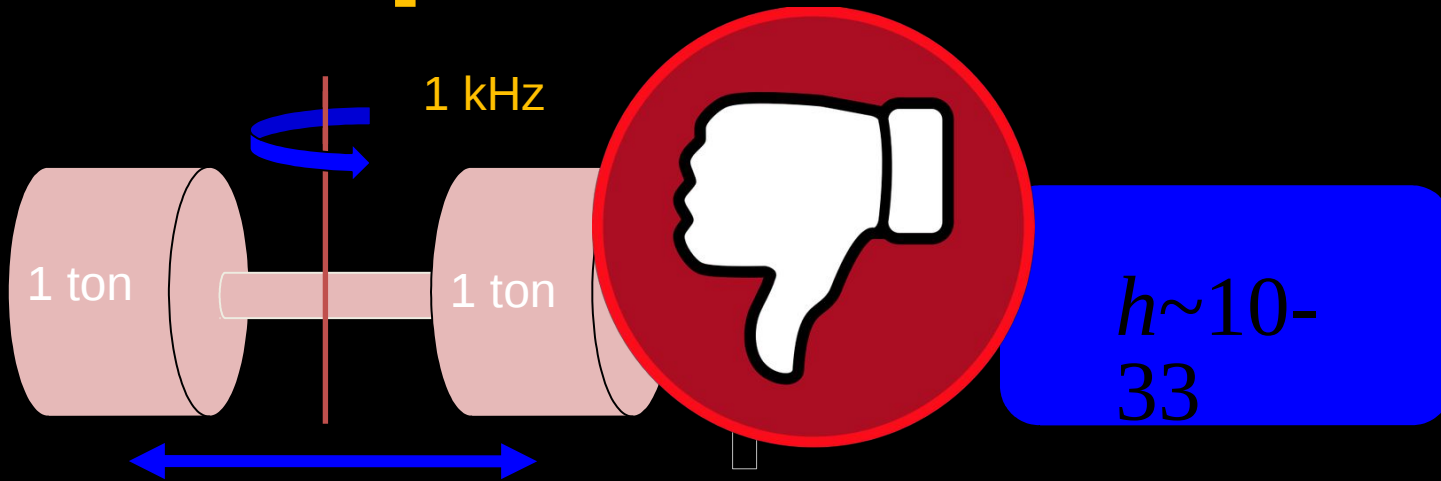
**Scenario ii: Structured Jet**



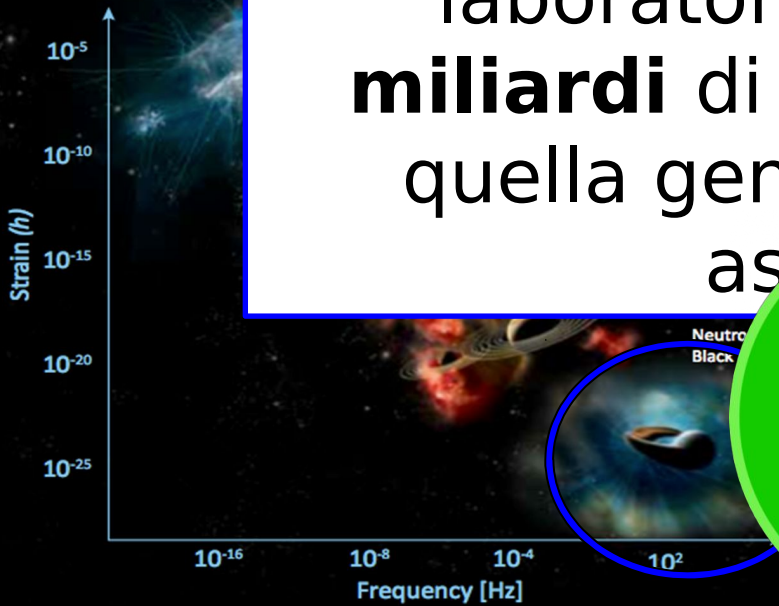
**Scenario iii: Uniform Jet + Cocoon**



# Non possiamo riprodurle in laboratorio

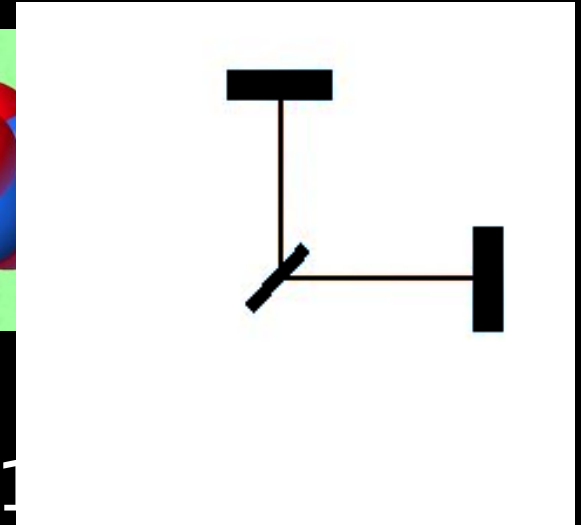
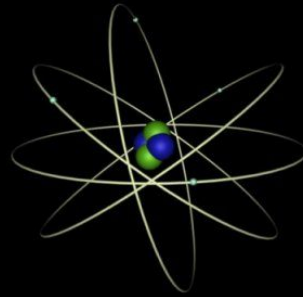
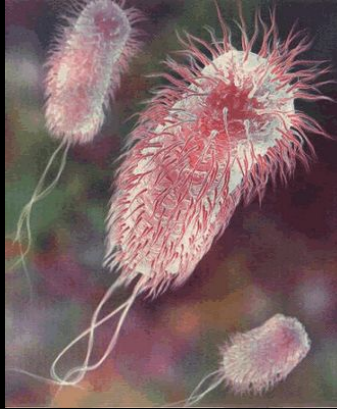


L'onda Gravitazionale prodotta in laboratorio sarebbe **1000 miliardi** di volte più piccola di quella generata da sorgenti astrofisiche



$h \sim 10^{-21}$

# Quanto è piccolo $10^{-18}$ m?



$\approx 10^{-5}$  m

$\approx 10^{-10}$  m  $\approx 10^{-15}$  m

1 metro

10 micron

1 Angstrom

1 femtometro

1 attometro

$\div 100.000$

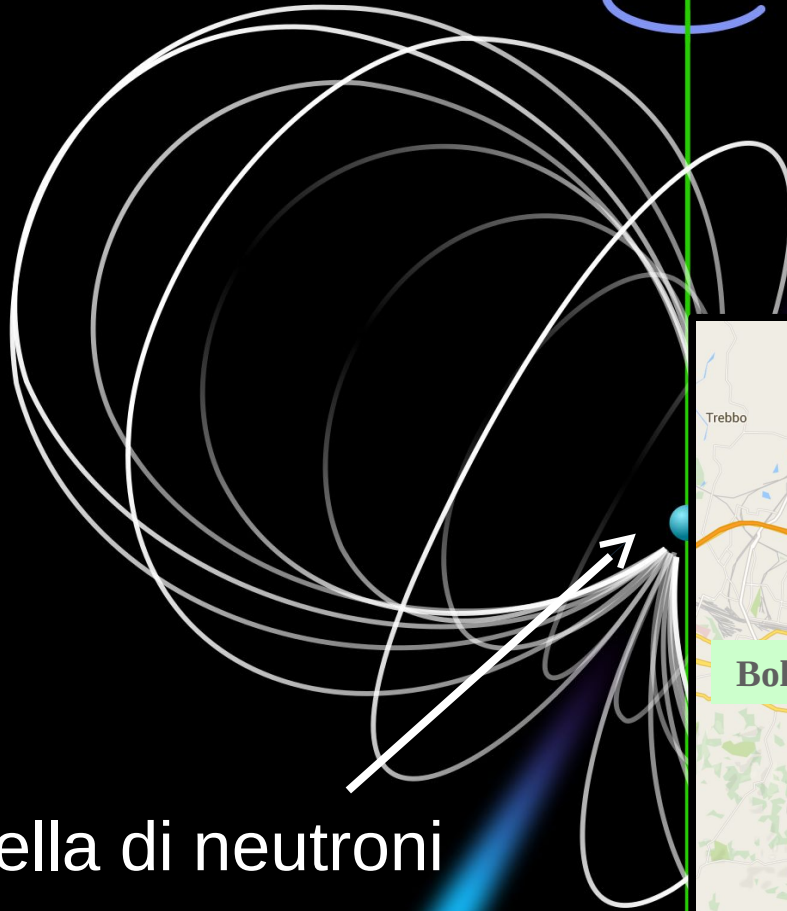
$\div 100.000$

$\div 100.000$

$\div 1.000$

# Le stelle di neutroni

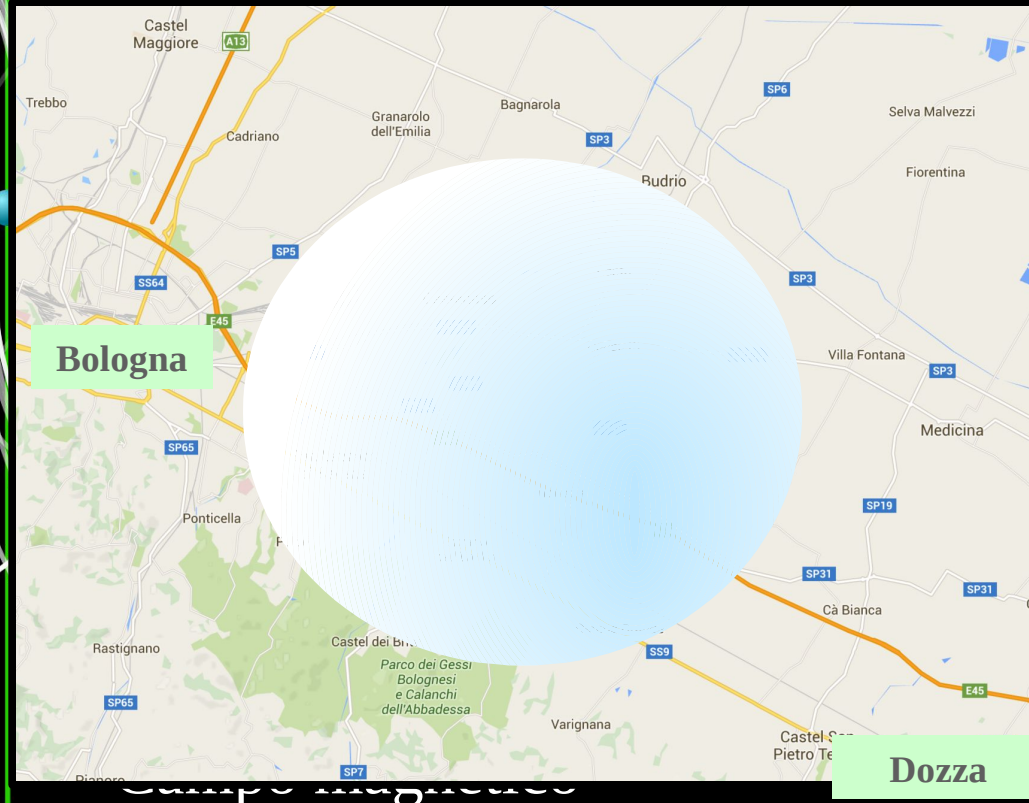
Rotazione velocissima



Stella di neutroni

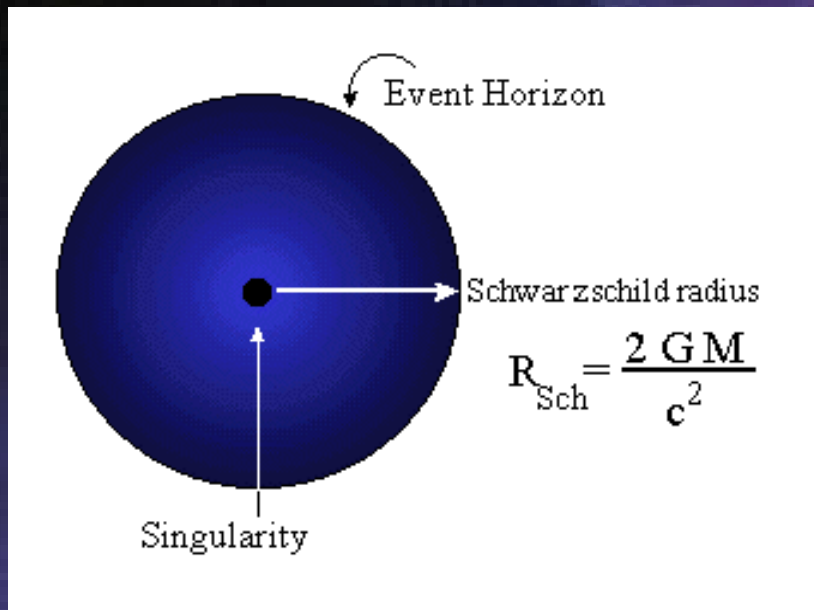
Diametro = 20 km  
Massa = 1.4 massa del sole

Densità = Massa / Volume  
= 10<sup>17</sup> kg/m<sup>3</sup> !!!!



# I BUCHI NERI

1916 Schwarzschild ha teorizzato **una regione dove il campo gravitazionale è così forte, che neanche la luce può uscire**



**Le dimensioni di un buco nero sono definite dal suo “orizzonte degli eventi” e dipendono dalla massa del buco nero:**

$$\text{Raggio} = 2GM/c^2$$

**Esempio: Massa = 10 x massa del sole**

$$\text{Raggio} = 30 \text{ km !!}$$

**I buchi neri sono invisibili - esistono?**

# Quanto è grande il buco nero finale?

Dimensioni di  
un buco nero  
definite  
dall'orizzonte  
degli eventi

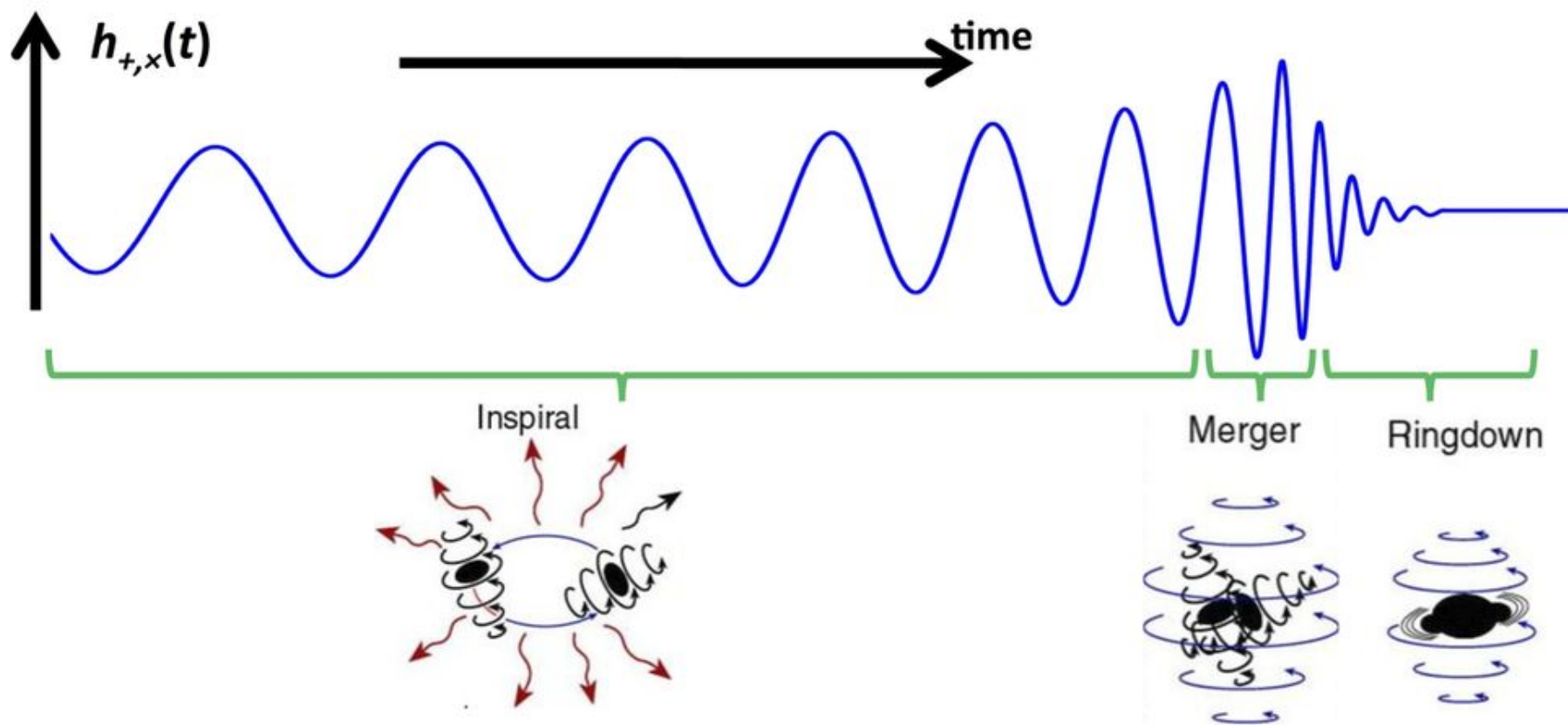
$$R=2GM/c^2$$

In un diametro di  
180 km è concentrata la  
massa di 62 soli





# Tre fasi principali





# Quanto è sensibile Virgo ?

