

# La Rivelazione delle Onde Gravitazionali La nascita di una Rivoluzione in Astronomia

*Gabriele Vedovato*

*INFN Padova*

*Virgo Collaboration*



PERCHE' E' IMPORTANTE  
L'OSSERVAZIONE DELLE  
ONDE GRAVITAZIONALI?

# Alcune delle domande a cui le Onde Gravitazionali possono rispondere

- **Rilevanti Domande di Fisica Fondamentale**



- *E' la Relativita' Generale la teoria corretta della gravita' ?*
- *Come si comporta la materia in condizioni estreme ?*
- ...

- **Rilevanti Domande di Cosmologia**



- *I buchi neri osservati possono essere una componente della materia oscura ?*
- *Le stelle di neutroni posso esse usate per una misura diretta della velocita' di espansione dell'universo ?*
- ...

- **Rilevanti Domande di Astrofisica e Astronomia**



- *Quale e' il meccanismo che causa il collasso del nucleo di una Supernova ?*
- *Quale e' l'origine deli elementi pesanti ?*
- ...

# LE ONDE GRAVITAZIONALI

## UN PO' DI STORIA

# LA STORIA



1905

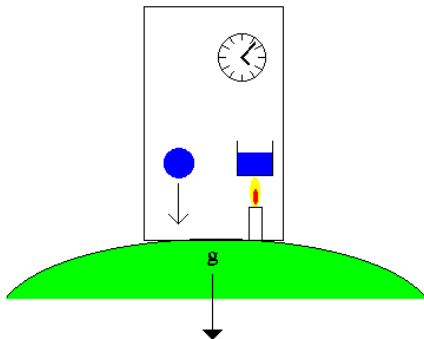
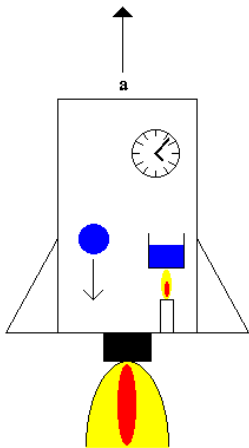
Nasce la **relatività ristretta** e il **concetto di spazio-tempo**

- Spazio e tempo sono connessi, distanze e tempi non sono assoluti

1908

Einstein propone il **principio di equivalenza forte**

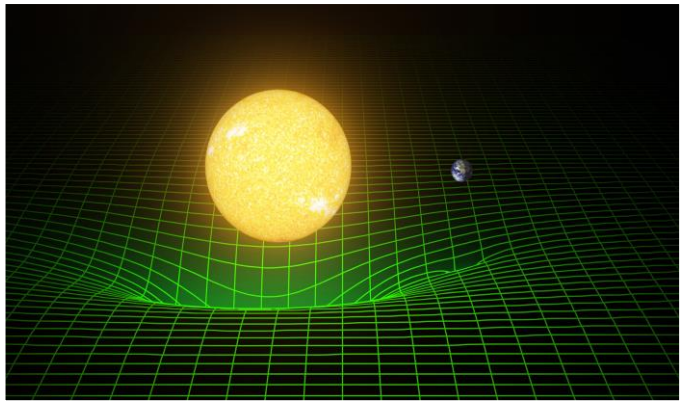
- Per tutte le leggi fisiche, un campo gravitazionale è localmente equivalente ad un sistema di riferimento accelerato
- Fondamento della Relatività Generale



# LA STORIA

~100 anni fa...

1915

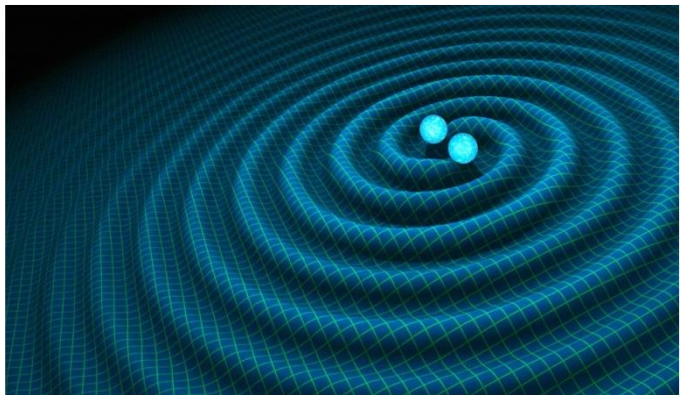


## Nasce la **relatività generale**

- La gravità è descritta come curvatura dello spazio-tempo
- *La materia dice allo spazio come curvarsi e lo spazio curvo dice alla materia come muoversi*

*(John Wheeler)*

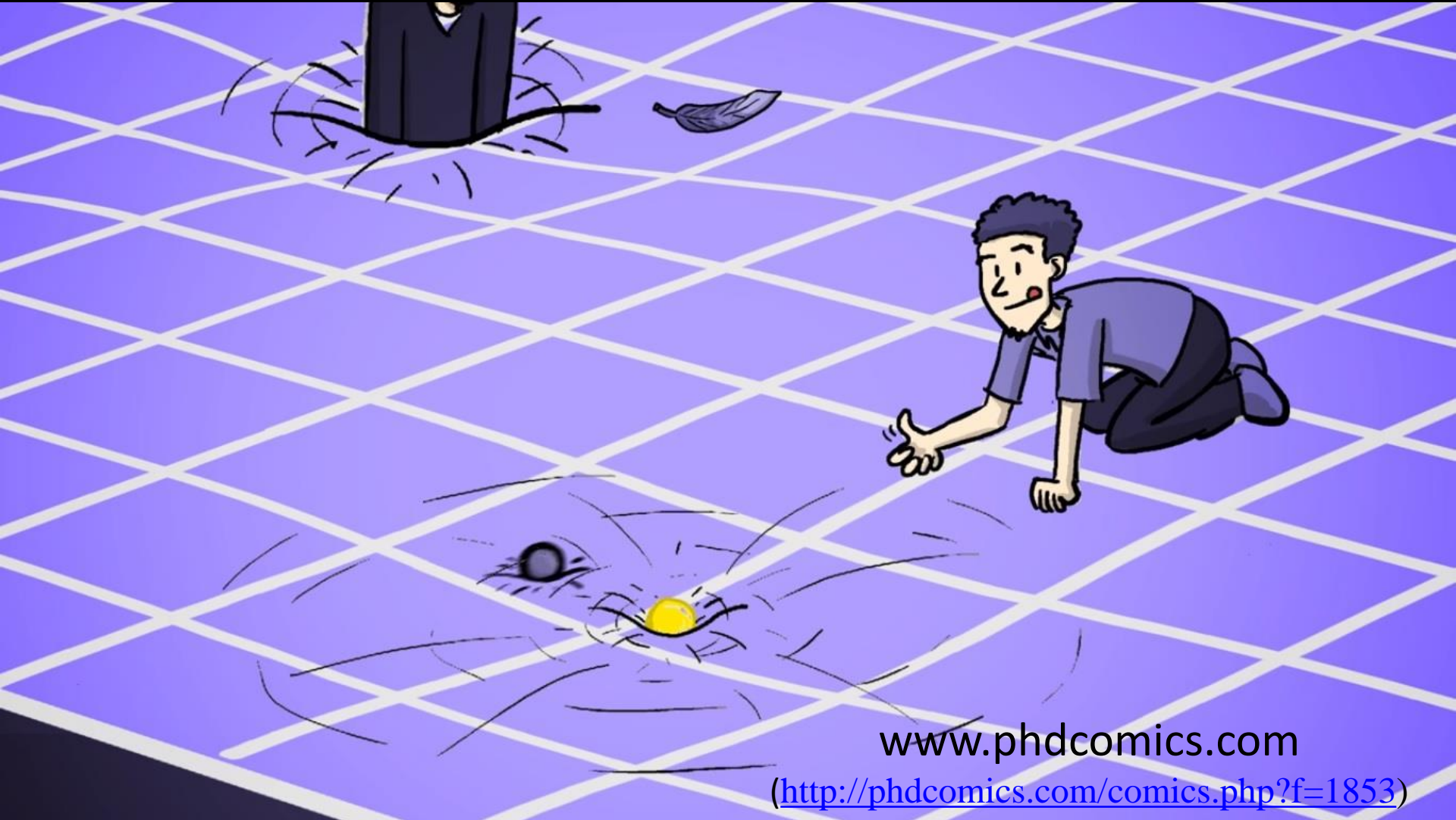
1916



## Einstein formula il concetto di **onde gravitazionali**

- Sono increspature dello spazio-tempo che si propagano alla velocità della luce
- Sono prodotte da masse in moto accelerato

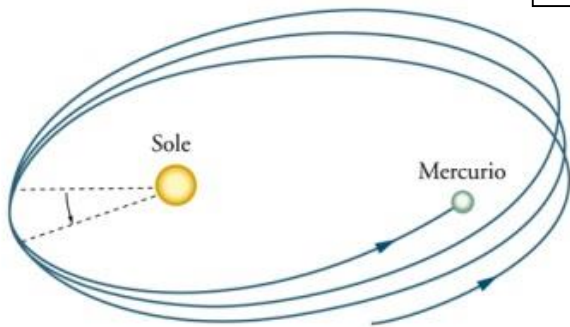
# LA FORZA DI GRAVITÀ È LA MANIFESTAZIONE DELLA CURVATURA DELLO SPAZIO-TEMPO



# LA STORIA



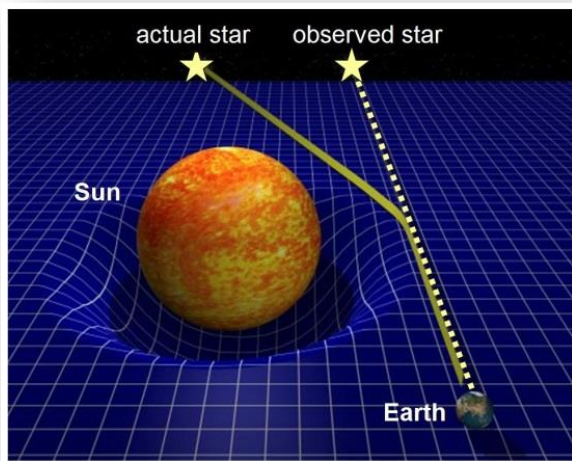
1916



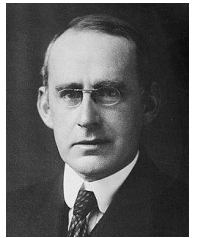
Spiegazione dell'avanzamento del **perielio di Mercurio**

|                            |                    |
|----------------------------|--------------------|
| osservazione               | 5600"/secolo       |
| modello 1850's             | 5557"/secolo       |
| <b>relatività generale</b> | <b>+43"/secolo</b> |

1919



Eddington osserva la **deflessione della luce** durante un'eclissi solare



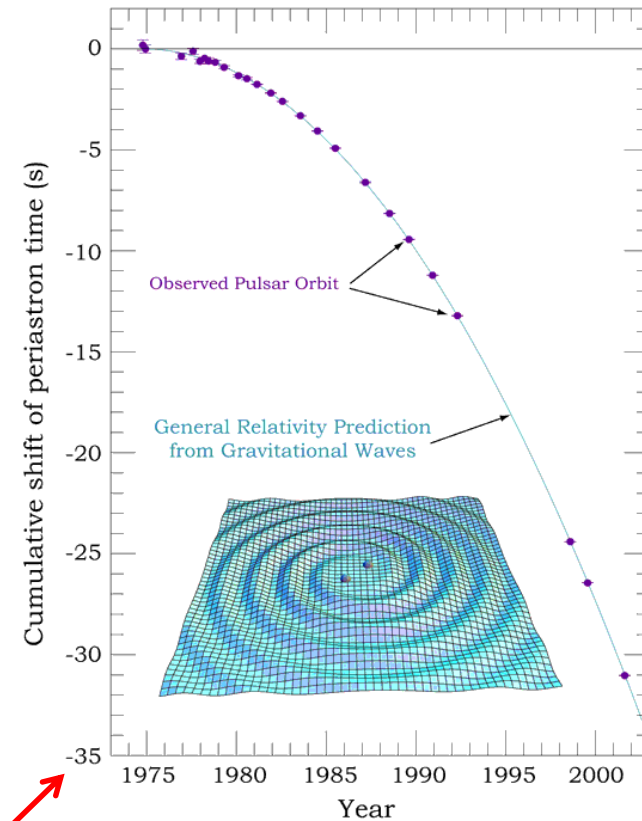
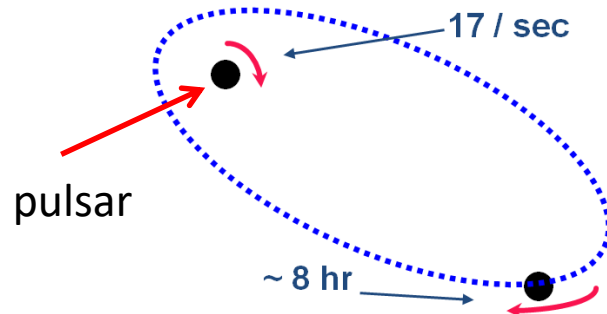
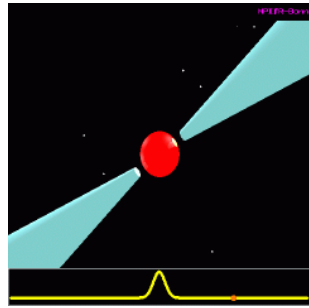
**relatività generale** **+1.8"**

La verifica sperimentale di questa predizione ha reso Einstein famoso in tutto il mondo



# LA RICERCA INDIRETTA DELLE ONDE GRAVITAZIONALI

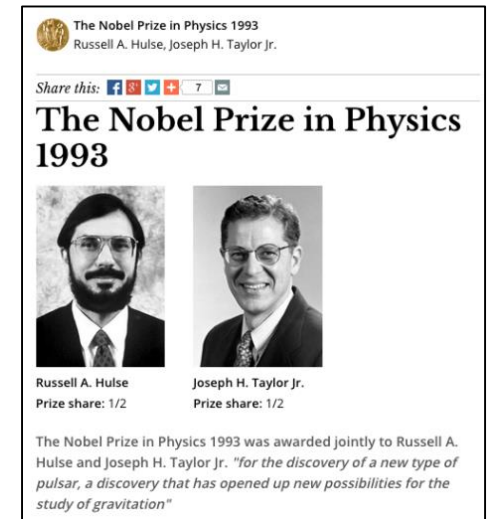
Nel 1974, Hulse e Taylor scoprono il sistema binario PSR 1913+16



Taylor e Weisberg misurano nell'arco di vari anni la variazione del periodo

Verificano che il sistema sta perdendo energia in perfetto accordo con l'emissione di onde gravitazionali previste dalla teoria della Relatività Generale di Einstein

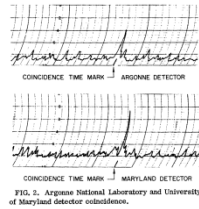
Prima prova indiretta dell'esistenza delle onde gravitazionali



# LA RICERCA DIRETTA : ANTENNE



Anni 60



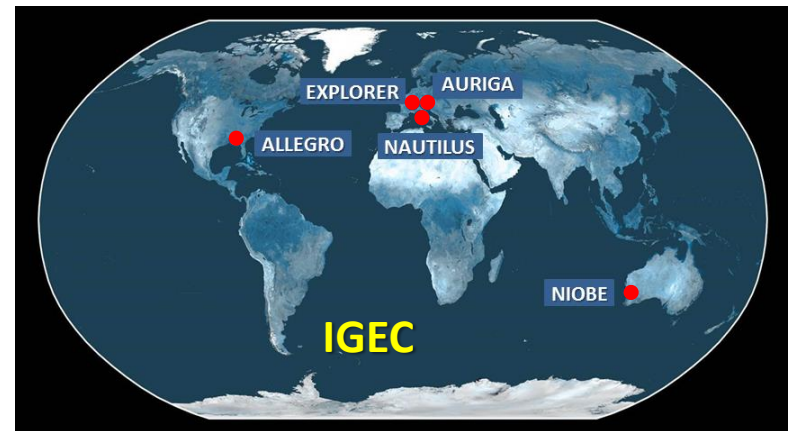
Anni 90



Laboratori Nazionali di Legnaro, Padova

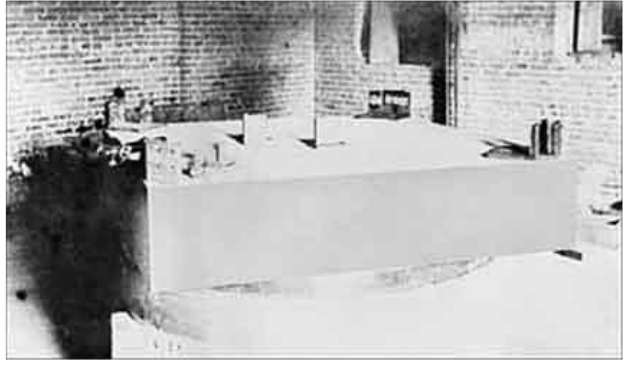
Weber progetta e costruisce il **primo rivelatore a barra**

Vengono costruiti altri rivelatori a barra, tra i quali **AURIGA**



Rete internazionale di rivelatori a barre

# LA RICERCA DIRETTA : INTERFEROMETRI



1971

Primo prototipo (2m)

1989

Prima proposta per  
**LIGO, Virgo**

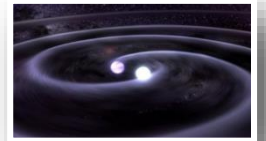
Anni  
2000

**LIGO & Virgo** operativi

*BBH Discovery !*

2015

**LIGO** Advanced



2017

**Virgo** Advanced

*BNS Discovery !*

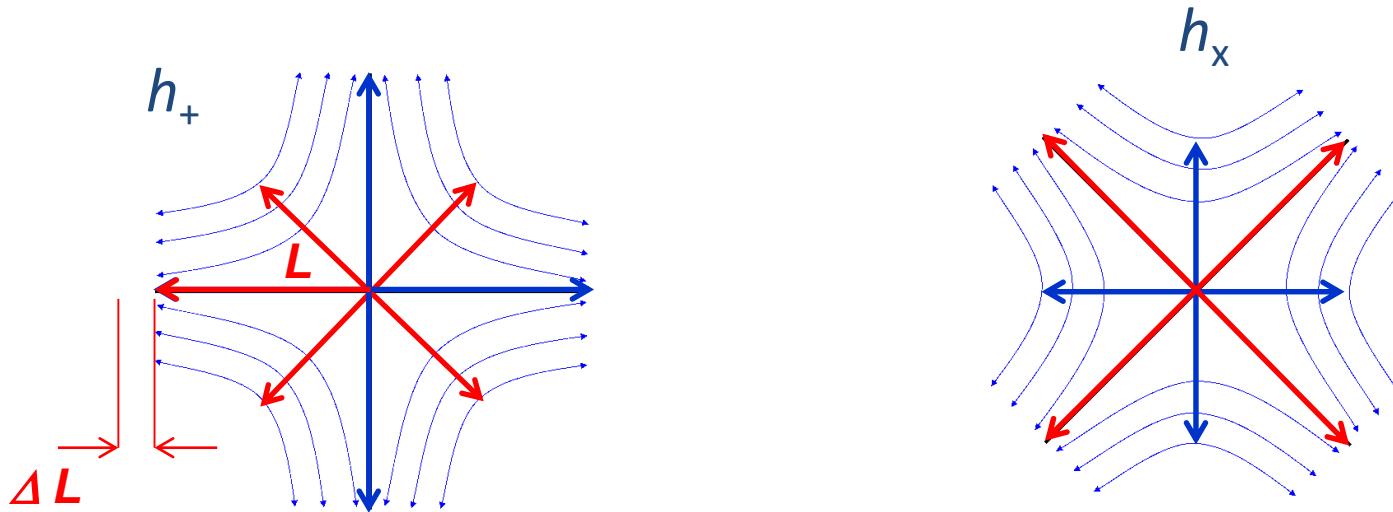


Virgo

COME SI RIVELANO  
LE ONDE GRAVITAZIONALI ?

# COME INTERAGISCONO ?

Le onde gravitazionali sono onde a due componenti di polarizzazione ( $h_+$ ,  $h_x$ ) che oscillano ortogonalmente alla direzione di propagazione



Al passaggio di un'onda gravitazionale lo spazio-tempo viene deformato  
Gli oggetti subiscono una **variazione  $\Delta L$**  proporzionale all'**ampiezza  $h$**   
dell'onda e alla **lunghezza  $L$**  dell'oggetto

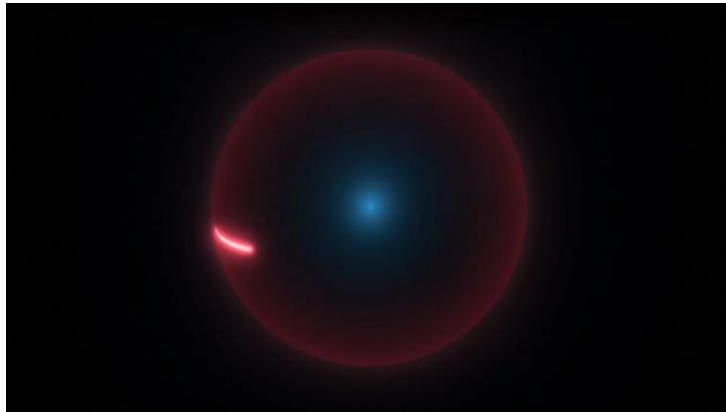
$$\Delta L \approx h \cdot L \longrightarrow h \approx \frac{\Delta L}{L}$$

# QUANTO È PICCOLA L'AMPIEZZA DI UN'ONDA GRAVITAZIONALE ?

Le osservazioni fino al 2011 hanno escluso ampiezze di onda corrispondenti a variazioni relative pari a

$$h = \frac{\Delta L}{L} \approx 10^{-20}$$

Dobbiamo cercare di misurare una variazione di lunghezza che è 1000 volte più piccola del nucleo di un atomo



NUCLEO



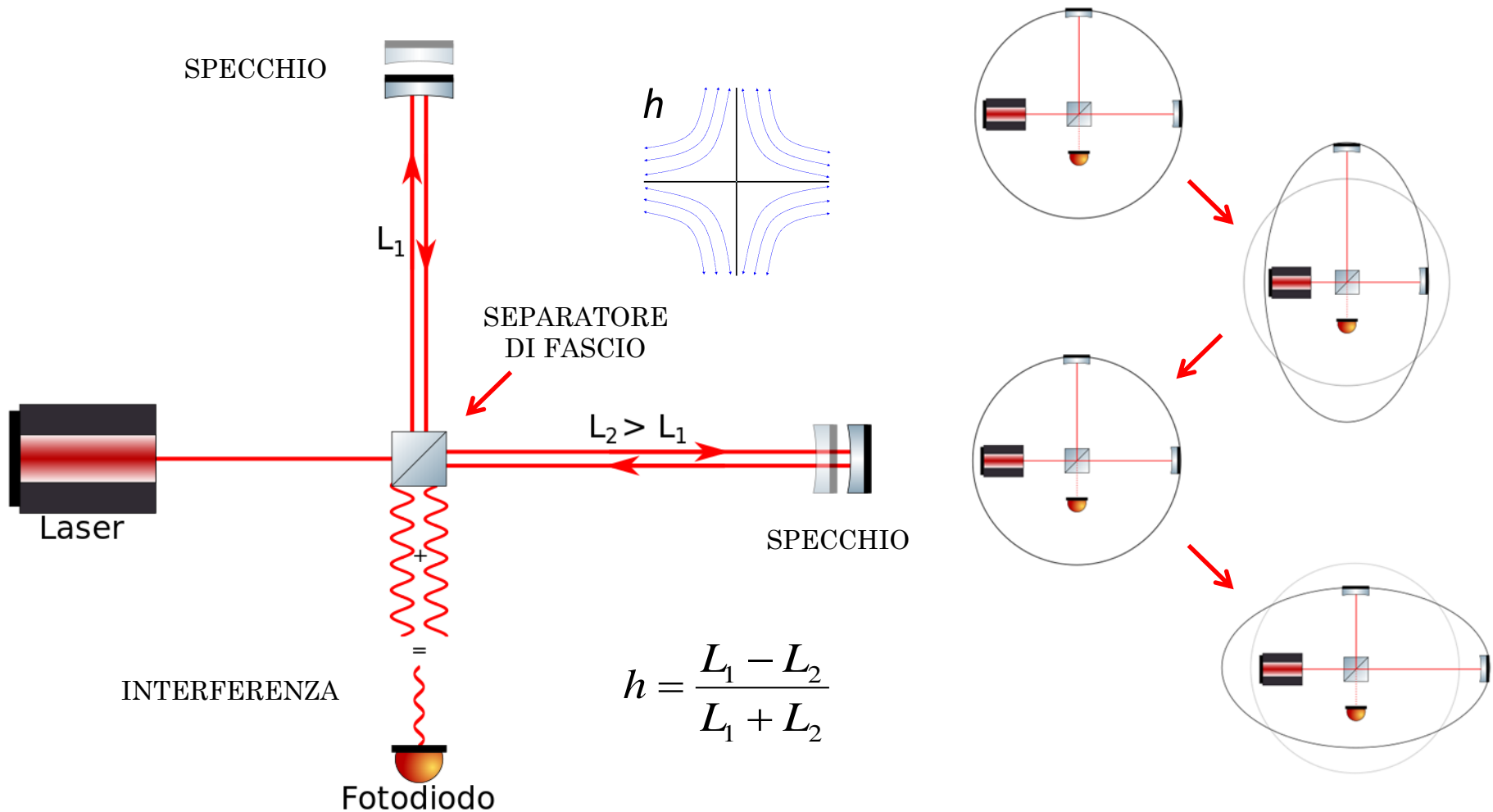
equivalente ad uno spostamento del diametro di un capello su una distanza tra il sole e alpha centauri



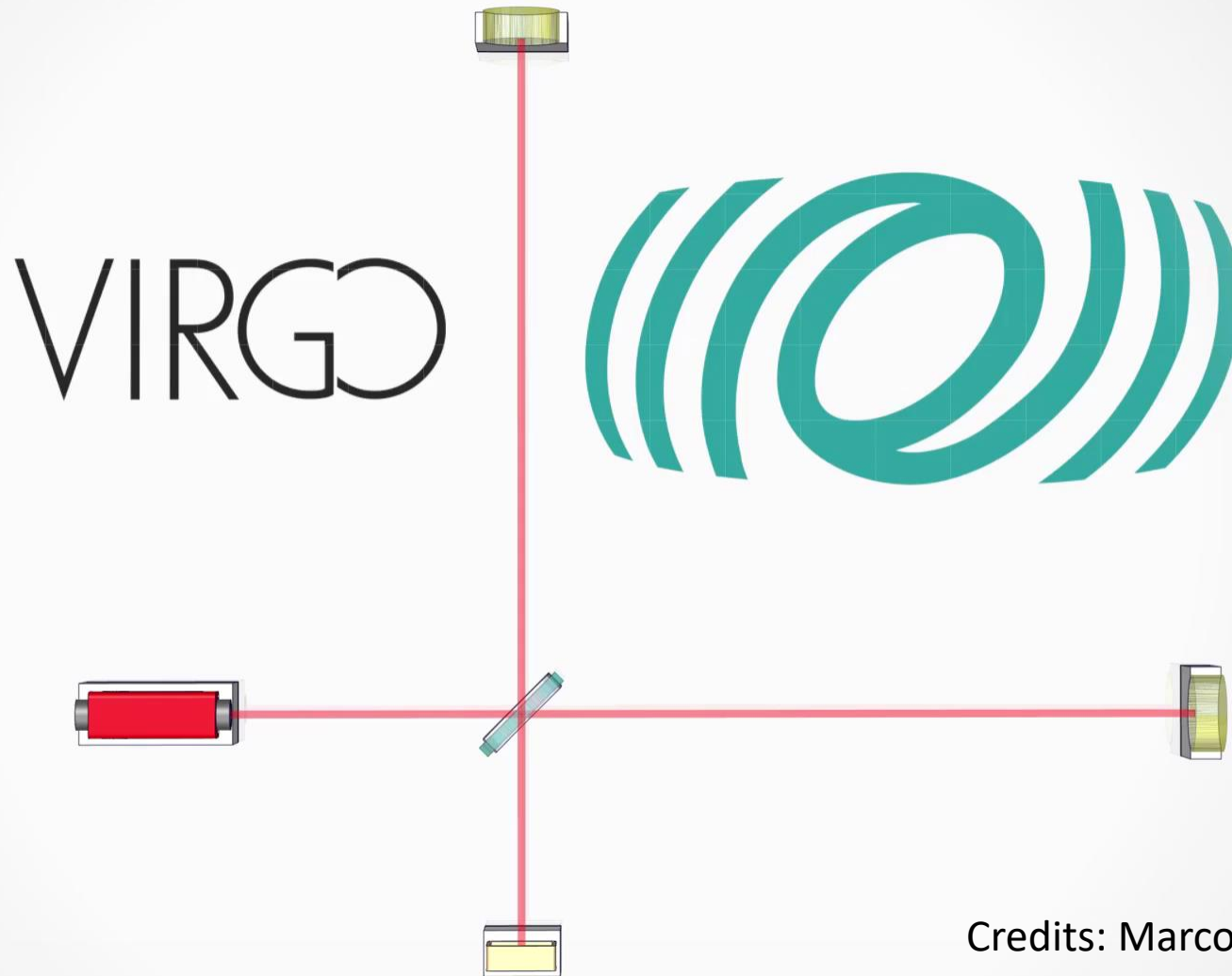
*La rivelazione diretta di un'onda gravitazionale è una sfida scientifica e tecnologica formidabile*

# COS'È UN INTERFEROMETRO?

L'interferometro è uno strumento molto preciso che sfrutta la **luce** per misurare **differenze di lunghezza**



# COME FUNZIONA UN INTERFEROMETRO ?

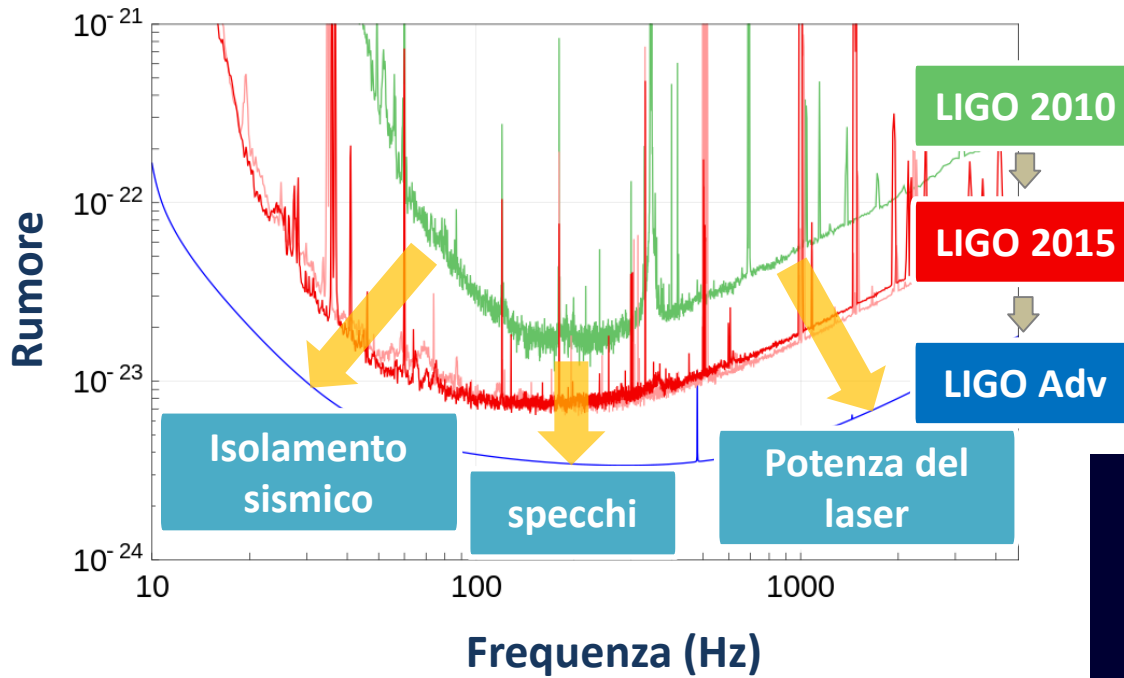


Credits: Marco Kraan, Nikhef 2016

[https://www.youtube.com/watch?v=h\\_FbHipV3No](https://www.youtube.com/watch?v=h_FbHipV3No)



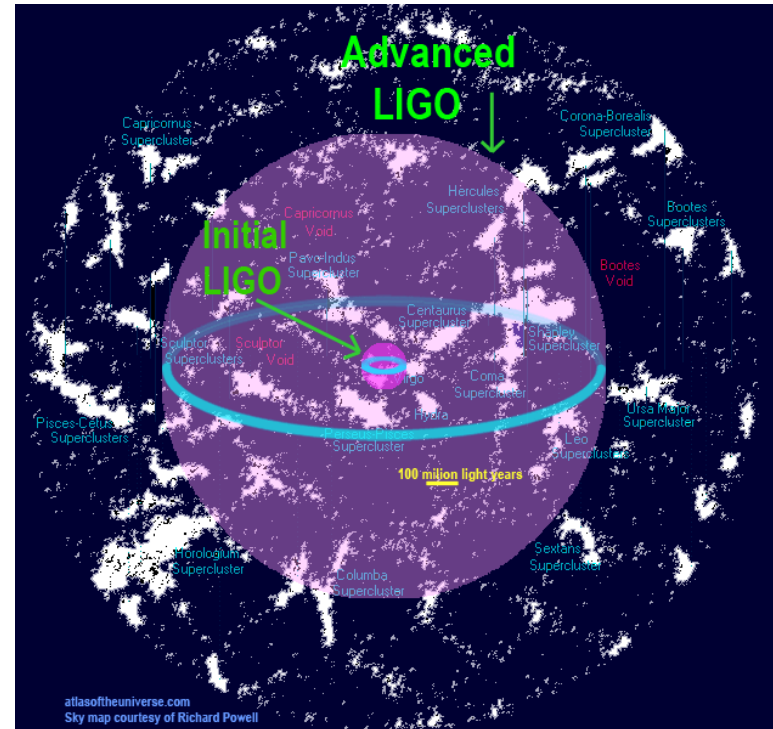
# Quanto lontano possiamo vedere?



La distanza massima di osservazione dipende dall'ampiezza del segnale gravitazionale e dal rumore presente nel rivelatore

Miglioramento del volume di Universo osservato nel **2015-17** rispetto **2010**

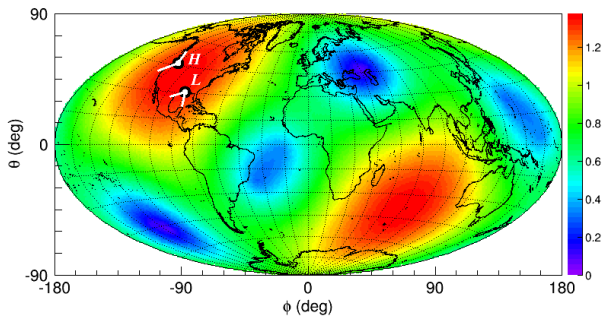
- **~100x** per sistemi binari di buchi neri
- **~30x** per sistemi binari di stelle di neutroni



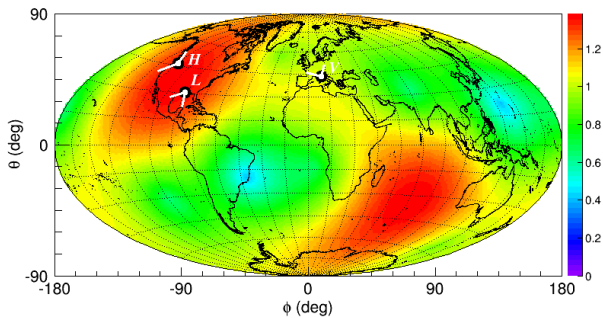
# Dove possiamo vedere?

La sensibilita' dell'interferometro dipende dalla direzione della sorgente  
Per aumentare la copertura del cielo sono necessari piu' interferometri

Componente  $h_+$

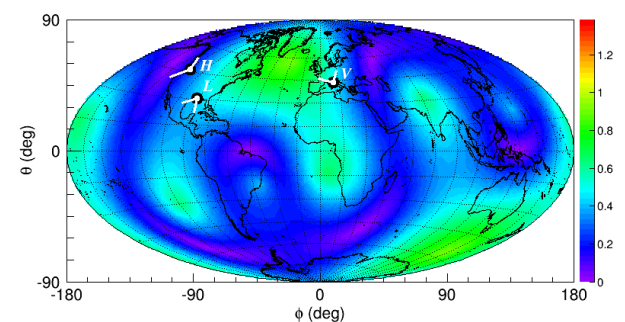
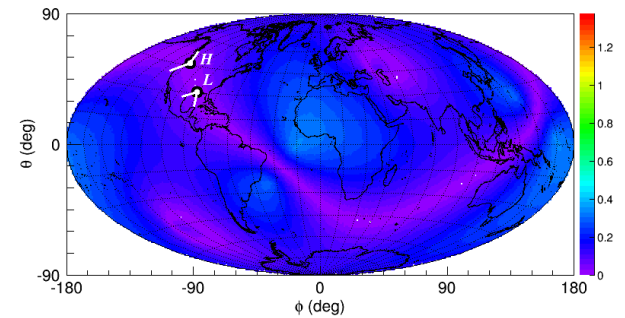


LIGO



LIGO+Virgo

Componente  $h_x$



# Un Osservatorio Mondiale



Aumenta la confidenza di  
rivelazione

Migliore localizzazione  
della sorgente

Aumenta la  
copertura del cielo

Aumenta il tempo osservativo

Migliore stima dei parametri della sorgente

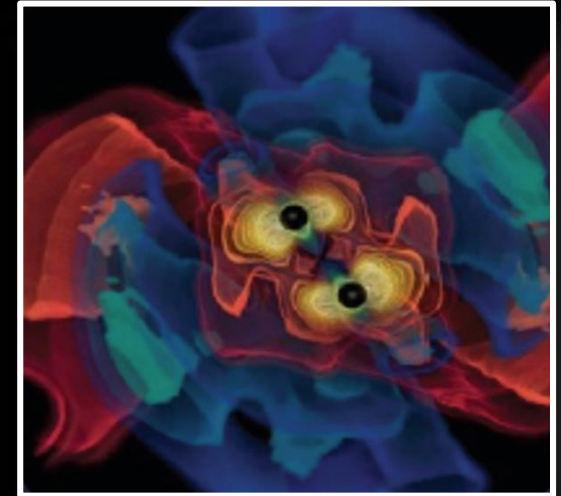
COSA CERCHIAMO ?

# SORGENTI DI ONDE GRAVITAZIONALI

Segnali Transienti : segnali di breve durata ( $10^{-3} - 10^3$ ) sec

- **Collasso di sistemi binari**

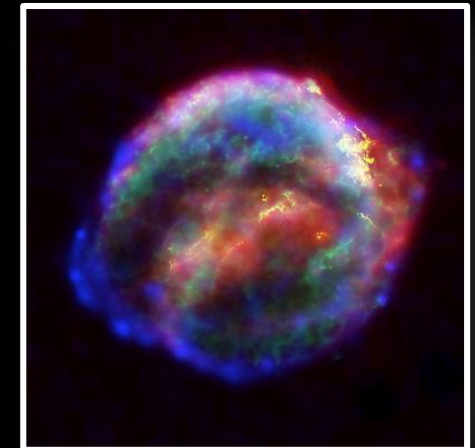
- Buco Nero – Buco Nero
- Stella di Neutroni – Stella di Neutroni
- Stella di Neutroni – Buco Nero
- La Relatività Generale fornisce il modello delle forme d'onda aspettate



Credit: AEI, CCT, LSU

- **Collasso di supernova (SN)**

- I modelli delle forma d'onda non ben conosciuti

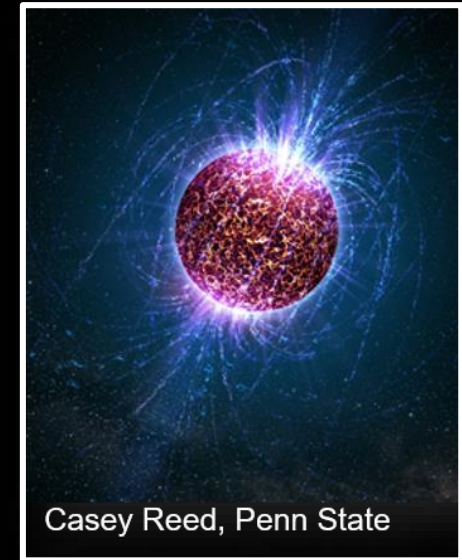


# SORGENTI DI ONDE GRAVITAZIONALI

## Segnali Continui

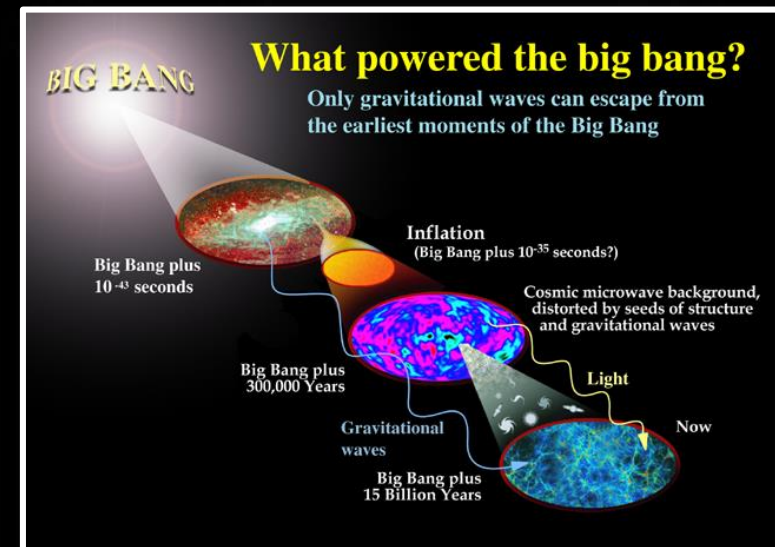
- **Stelle a Neutroni (Pulsars)**

- Oggetti compatti velocemente rotanti con una distribuzione asimmetrica di massa
- La Relatività Generale fornisce il modello delle forme d'onda aspettate

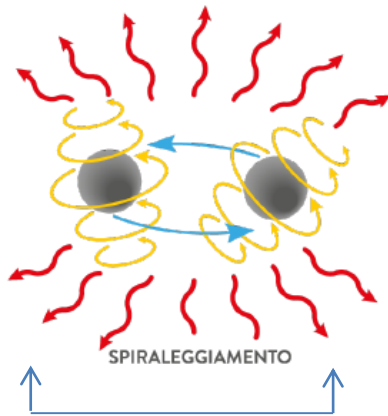
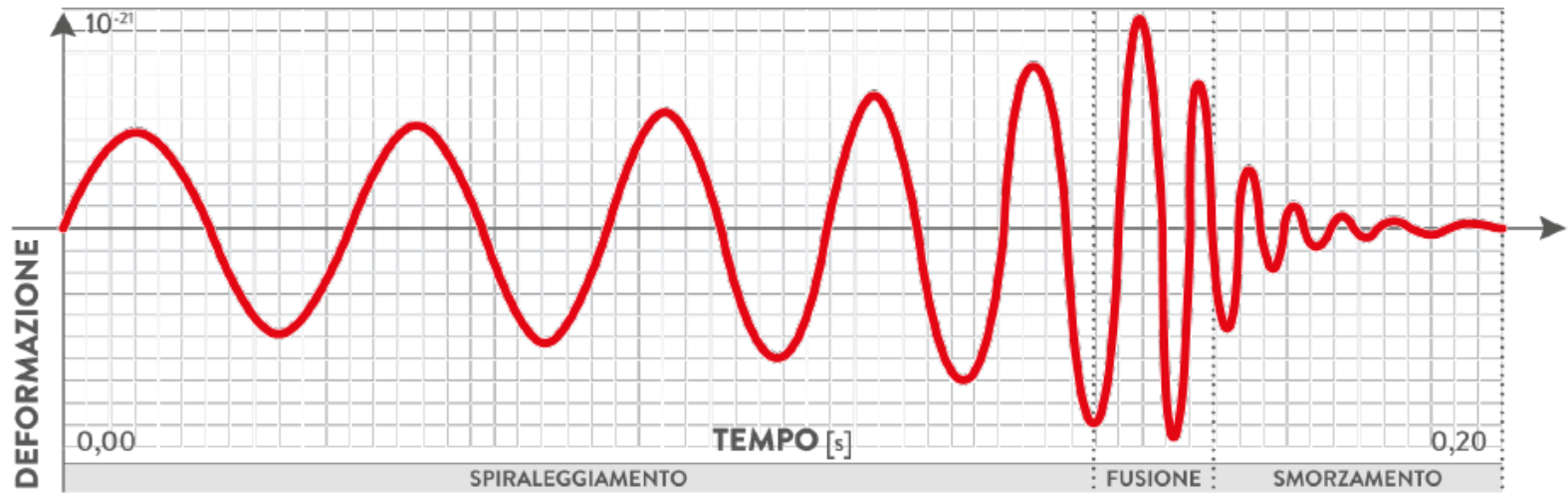


- **Fondo Cosmico Onde Gravitazionali**

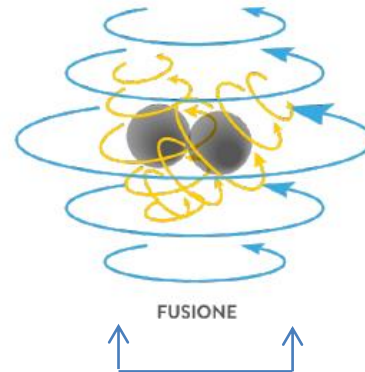
- Residuo del Big Bang
- Fondo incoerente di sorgenti di onde gravitazionali



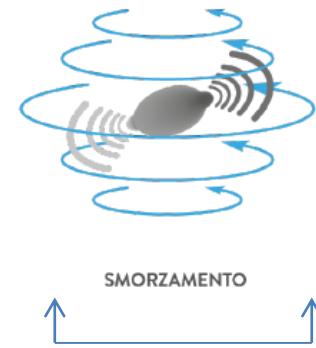
# Onde Gravitazionali da sistemi binari compatti



Le onde gravitazionali prodotte nella fase di spiraleggiamento negli ultimi cicli possono essere rivelate dagli interferometri



Sono disponibili solo soluzioni numeriche



Soluzioni numeriche o perturbative

Verifica della relatività generale in un regime di forte non linearità

COME SI CERCANO NEI DATI  
LE ONDE GRAVITAZIONALI ?



# IL BISBIGLIO DELL'UNIVERSO

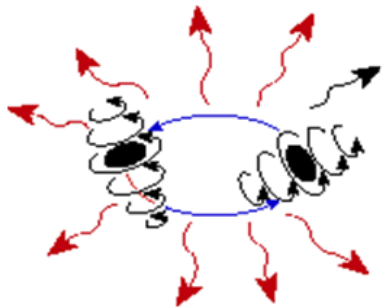


[www.phdcomics.com](http://www.phdcomics.com)

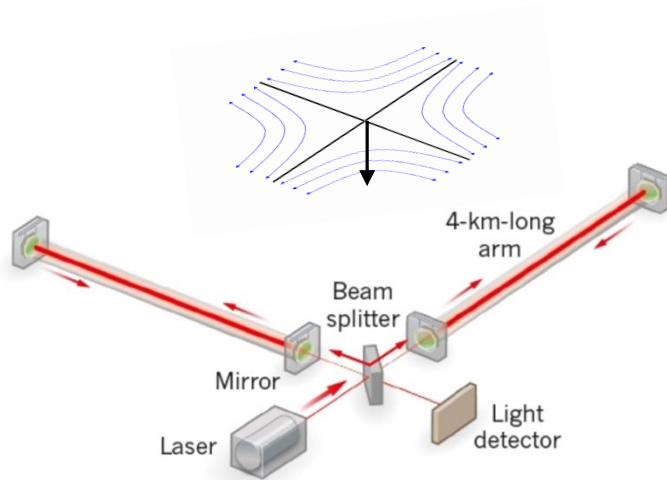
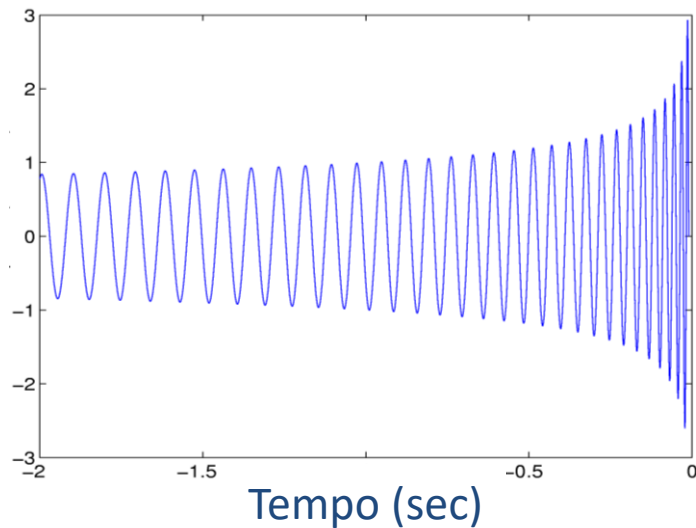
(<http://phdcomics.com/comics.php?f=1853>)

# COSA VEDONO I RIVELATORI ?

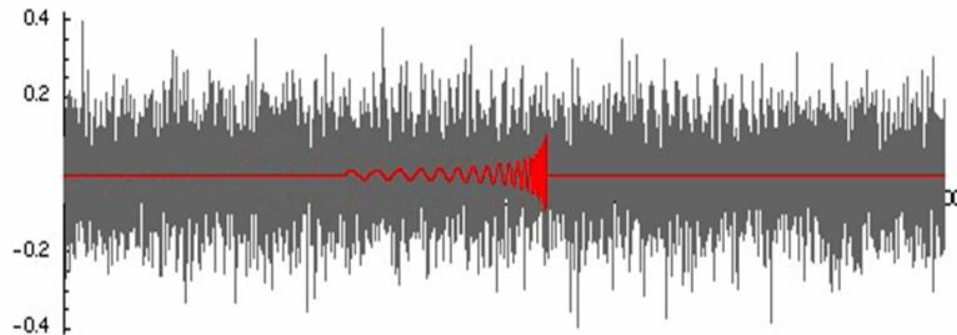
**SORGENTE**



**ONDA GRAVITAZIONALE**



**RIVELATORE**



Il **SEGNALE** misurato è contaminato dal **RUMORE** del rivelatore

# Sussurri nella confusione

- I segnali sono immersi nel “rumore”
- Diverse strategie di analisi:
  - Per segnali continui
  - **Per segnali spiraleggianti**
    - Confronto decine di migliaia di modelli teorici
  - Per segnali sconosciuti
  - Per il Fondo Cosmico



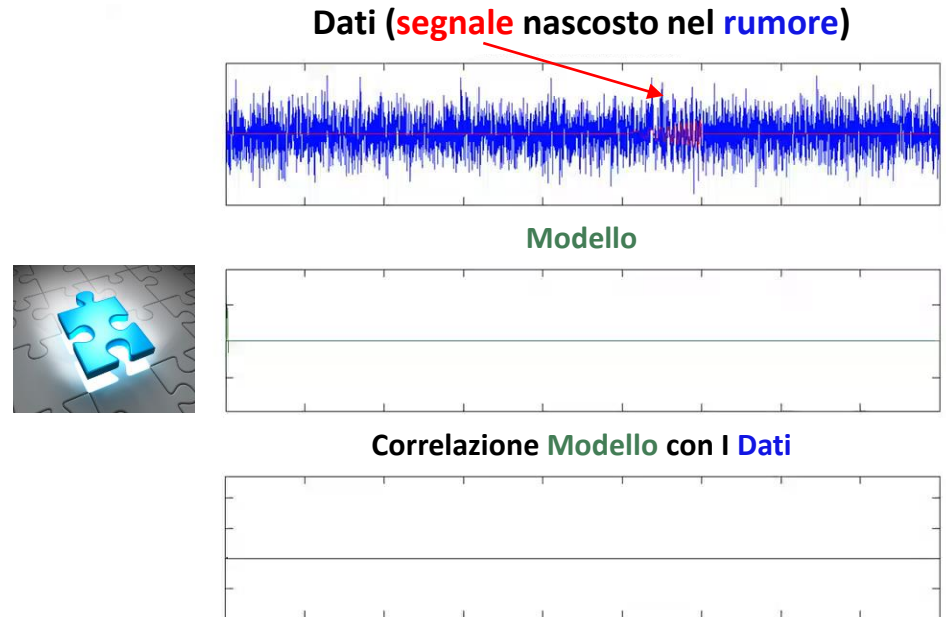
– **Per segnali spiraleggianti**

- Confronto decine di migliaia di modelli teorici

– Per segnali sconosciuti

– Per il Fondo Cosmico

- Tutti richiedono calcoli estremamente intensi
  - milioni di ore-CPU
  - Svariati centri di calcolo in US e Europa



# LA RICERCA DEL SEGNALE



I rivelatori registrano i dati



I programmi analizzano i dati



**Allerta - minuti/ore**

Eventuali candidati inviati agli astronomi



**giorni/mesi**

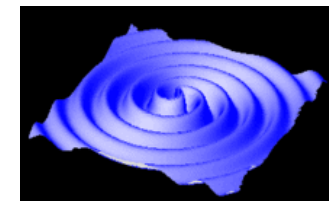
Verifica significanza dei candidati



**Rumore**

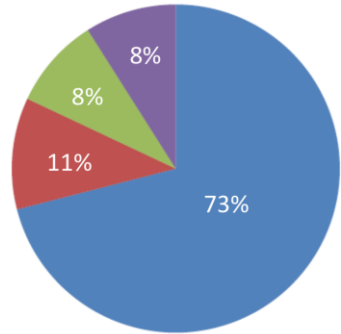


**Segnale**

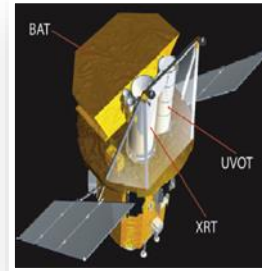
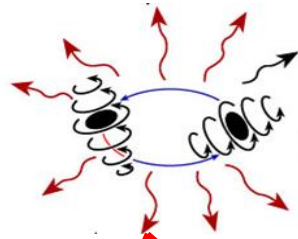


# ElectroMagnetic Follow-up

## L'Astronomia Multi-Messaggero



UV/OPTICAL/IR  
RADIO  
X-RAY  
GAMMA-RAY

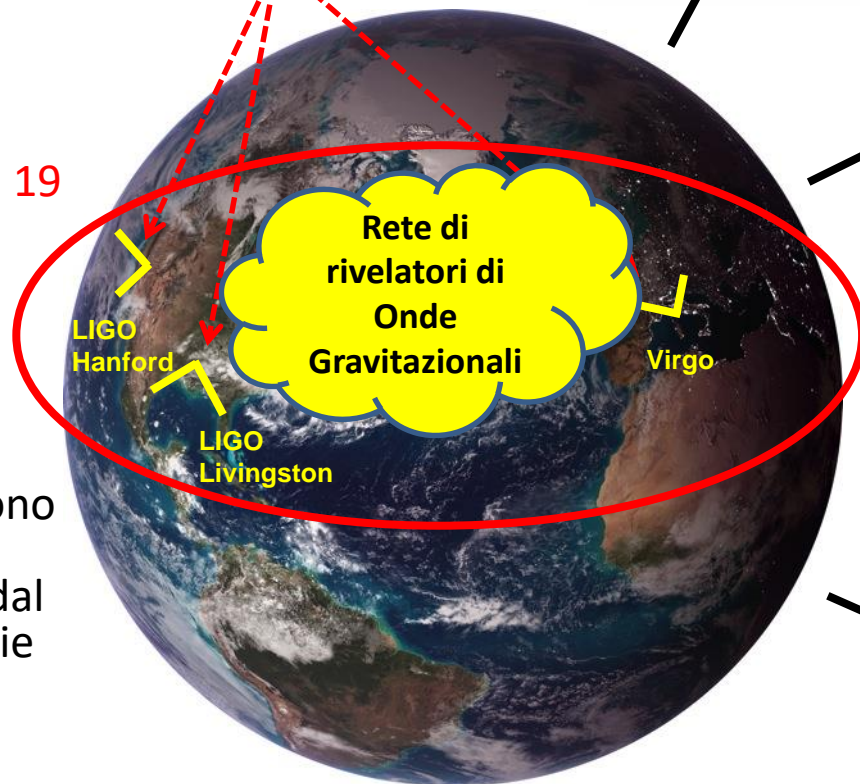


X-ray,  $\gamma$ -ray  
follow-up

Radio follow-up



Optical follow-up



- Circa **92** partners da **19** paesi

- Circa **200** strumenti che coprono l'osservazione dell'intero spettro, dal radio alle alte energie (raggi gamma)

14 SETTEMBRE 2015 9:50:45 UTC  
LA RIVELAZIONE DELLA PRIMA  
ONDA GRAVITAZIONALE

LIGO Open Science Center - <http://losc.ligo.org>

14 SETTEMBRE 2015 9:50:45 UTC

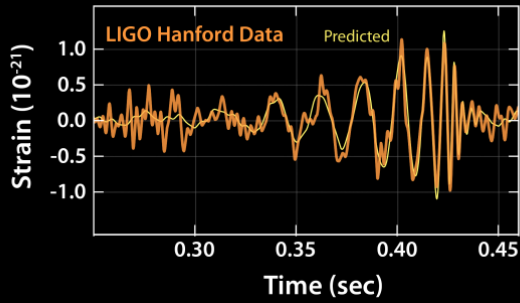


Numerical relativity simulation

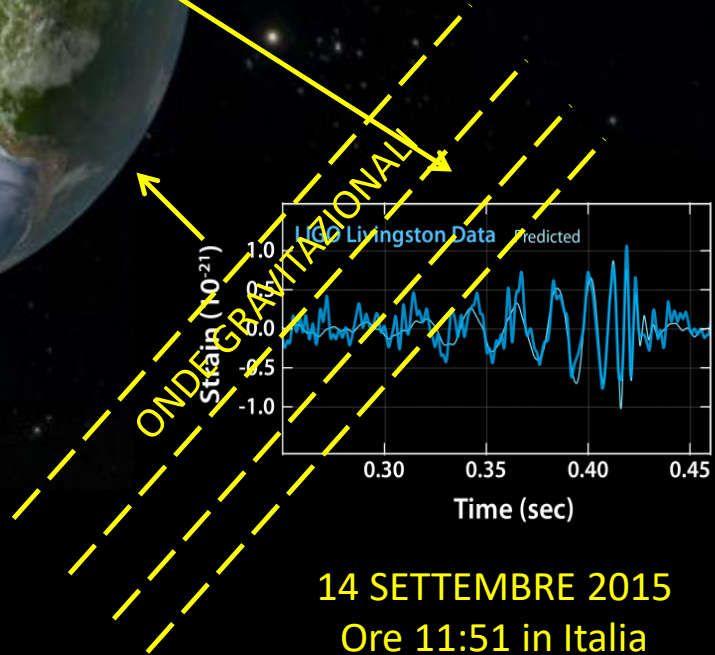
(SXS Collaboration, <http://www.black-holes.org/gw150914>)

(Beh, in realtà 1.3 miliardi di anni fa)

# LIGO VEDE L'EVENTO



7 millisecondi più tardi

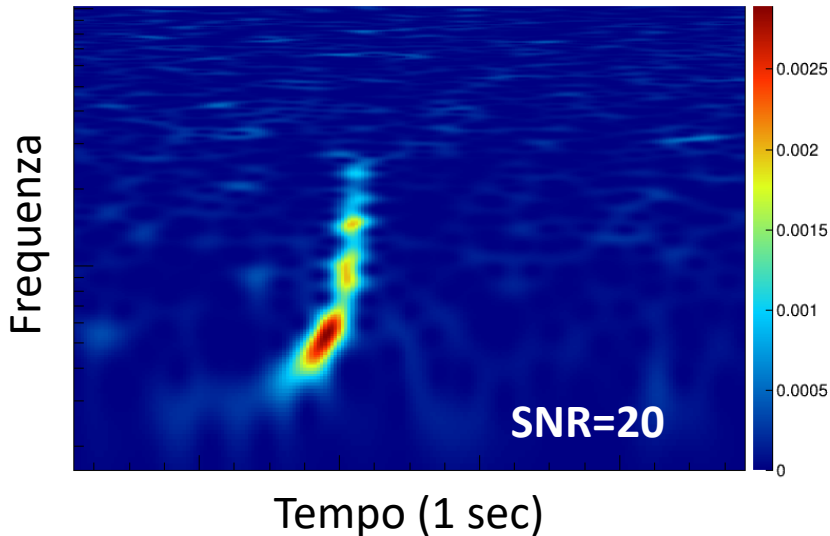


14 SETTEMBRE 2015  
Ore 11:51 in Italia

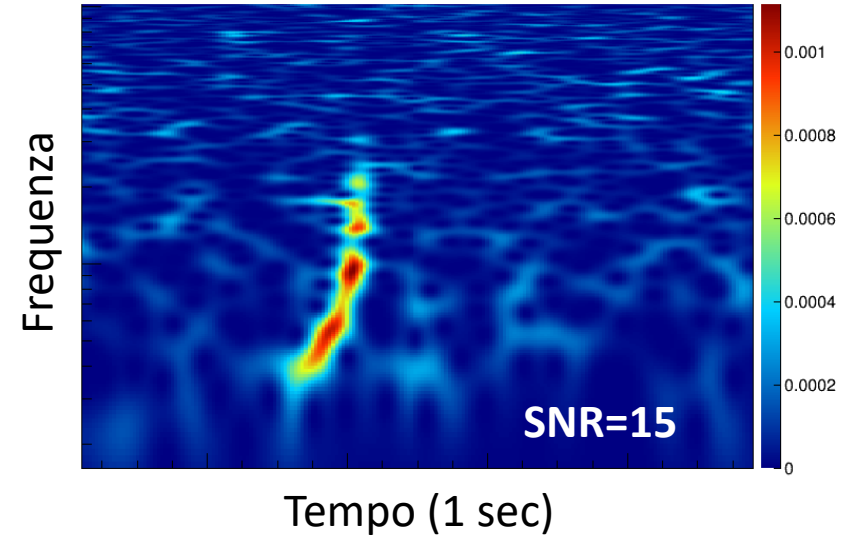


**14 SETTEMBRE 2015 9:50:45 UTC**  
**Registrato un segnale inaspettato**

**Hanford**



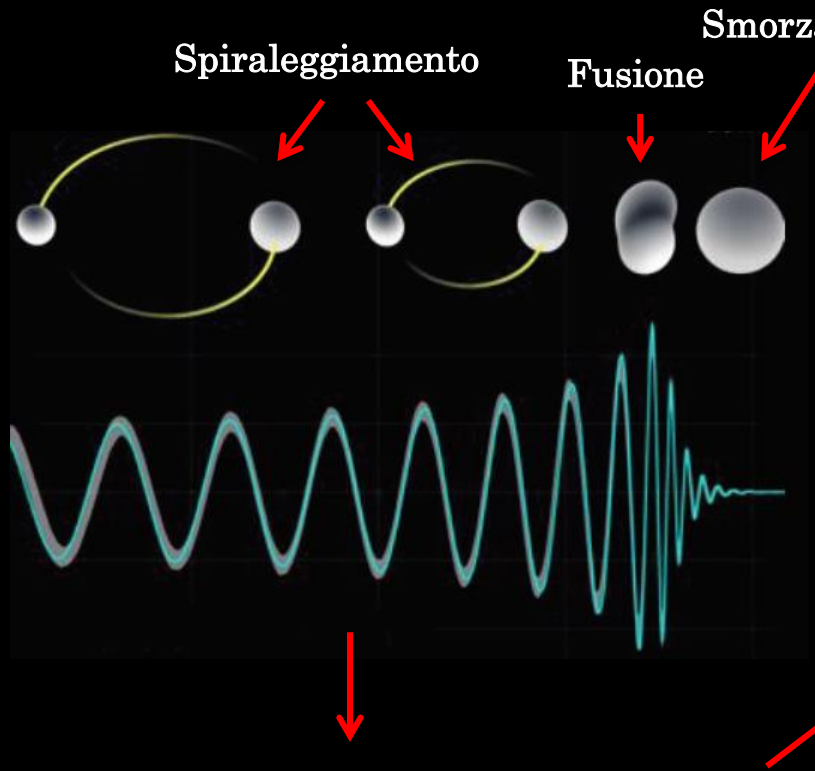
**Livingston**



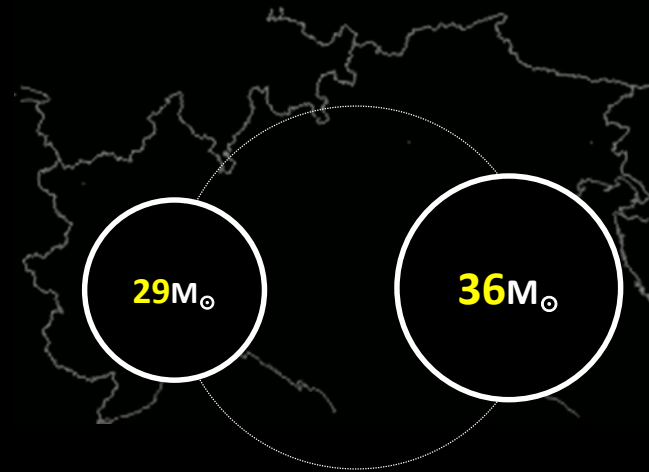
**Il primo allarme viene prodotto dopo 3 minuti da  
Coherent Waveburst**

**Un'analisi per segnali di forma generica sviluppata con  
l'importante contributo del gruppo Virgo di Padova/INFN**

# QUALI OGGETTI HANNO PRODOTTO QUESTO SEGNALE ?



Si tratta di due buchi neri con masse pari a **36** e **29** volte la massa solare e raggio pari rispettivamente a **108** e **87** km



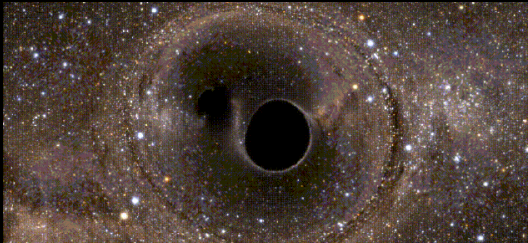
Il segnale è in perfetto accordo con la Relatività Generale

Prima di fondersi i due buchi neri si sono avvicinati a  $\sim$  **350 km** ad una velocità di  $\sim$  **150000 km/sec**

# IL BUCO NERO FINALE

La massa del buco nero finale è stimata in **62** masse solari  
( = **20** milioni di volte la massa della terra )

raggio del buco nero ~ **183** km



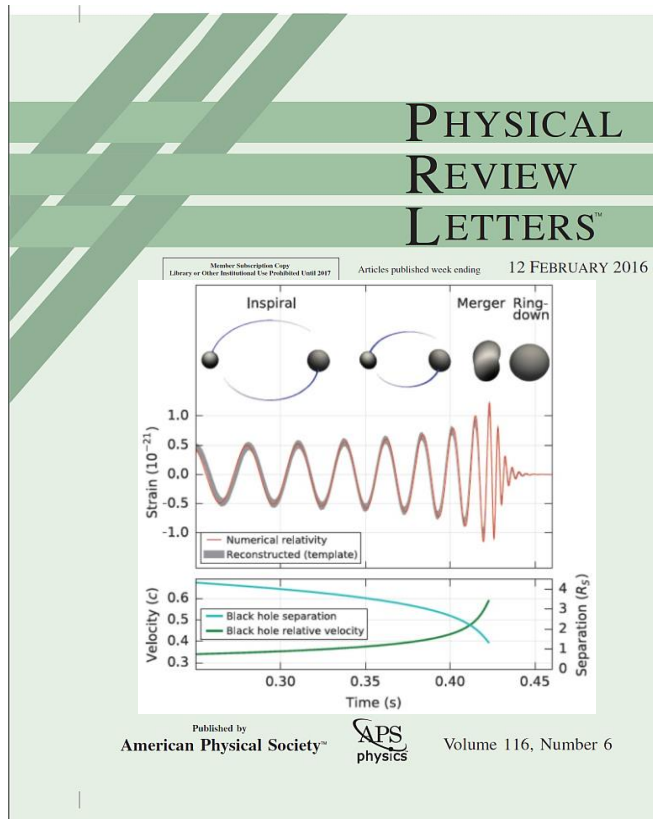
L'energia rilasciata sotto forma di onde gravitazionali  
corrisponde a **3** masse solari

**50** volte la potenza di tutte le stelle dell'universo osservabile !!!

# GW150914

## La prima osservazione diretta di un'onda gravitazionale

[PRL 116, 061102 \(2016\)](#)



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  $1.0 \times 10^{-21}$ . 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  $5.1\sigma$ . 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  $3.0_{-0.3}^{+0.5} M_{\odot} c^2$  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

- **Un evento di grande significato scientifico e storico**
- **Crash del web site della rivista PRL dovuto all'elevato numero di richieste di download dell'articolo**

# 2017: Premio *Nobel in fisica* viene simbolicamente assegnato alla collaborazione *LIGO-Virgo*



## Press Release: The Nobel Prize in Physics 2017

3 October 2017

The Royal Swedish Academy of Sciences has decided to award the Nobel Prize in Physics 2017 with one half to

**Rainer Weiss**  
LIGO/VIRGO Collaboration

and the other half jointly to

**Barry C. Barish**  
LIGO/VIRGO Collaboration

and

**Kip S. Thorne**  
LIGO/VIRGO Collaboration

*"for decisive contributions to the LIGO detector and the observation of gravitational waves"*



Photo: Bryce Vickmark  
**Rainer Weiss**  
Prize share: 1/2

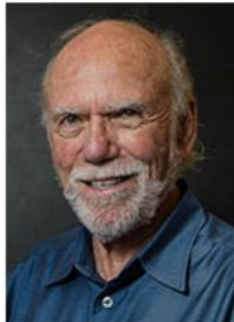


Photo: Caltech  
**Barry C. Barish**  
Prize share: 1/4



Photo: Caltech Alumni Association  
**Kip S. Thorne**  
Prize share: 1/4

# Altri Sistemi Binari di Buchi Neri Rivelati da LIGO/Virgo

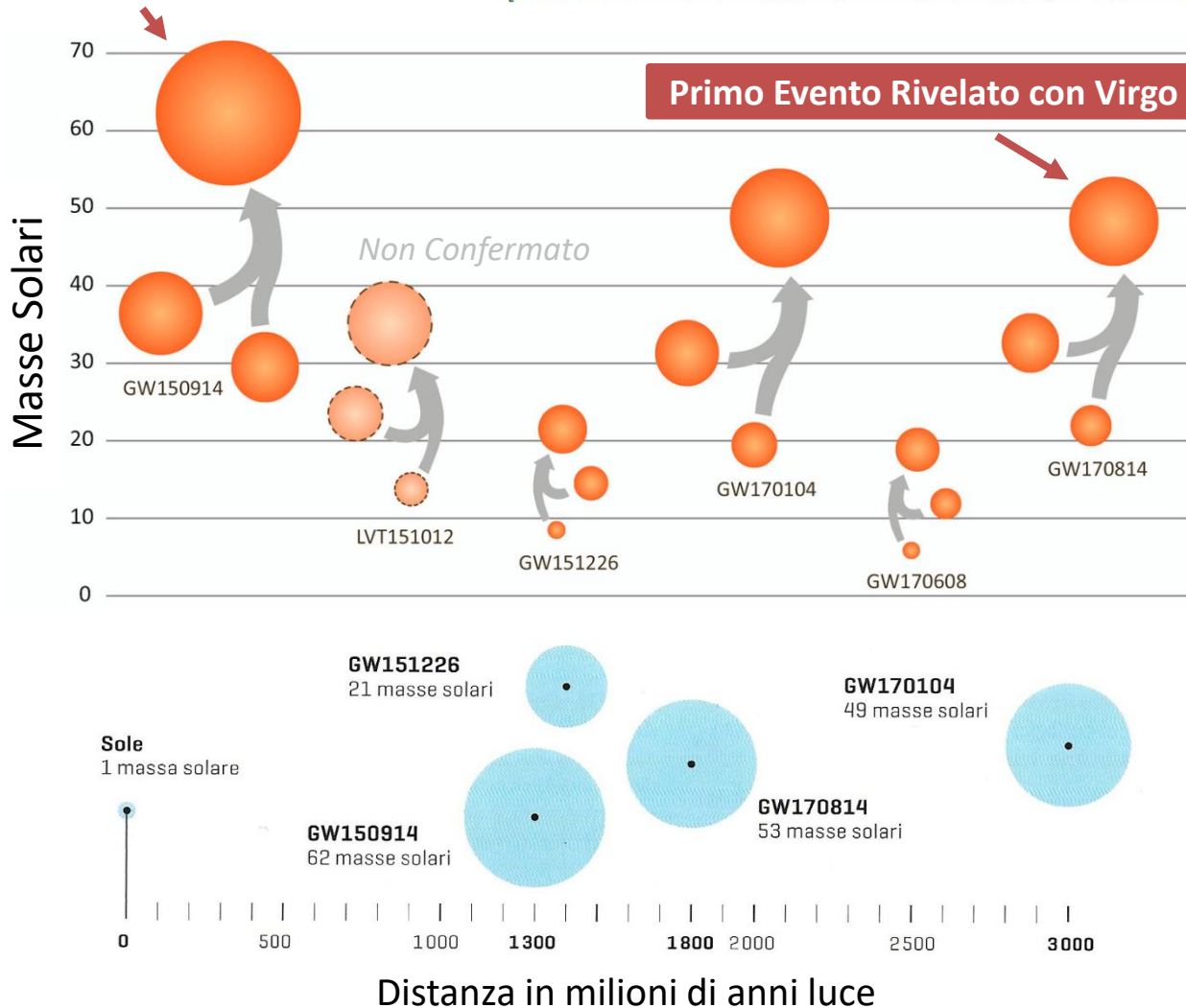
LIGO Open Science Center - <http://losc.ligo.org>

# Sono state rivelate altre onde gravitazionali emmesse da sistemi binari di buchi neri

Data Release: [losc.ligo.org](https://www.ligo.org)

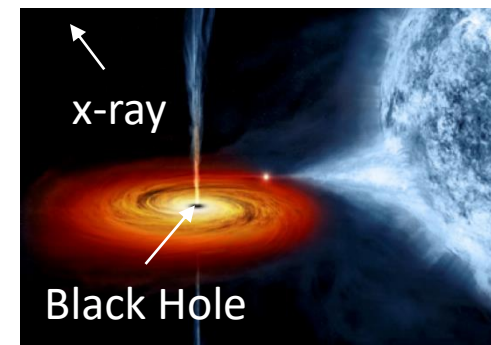
**PRIMO Evento Rivelato**

[credit:LSC/LIGO/Caltech/Sonoma State (A. Simonnet) ]



**Popolazione inaspettata di buchi neri**

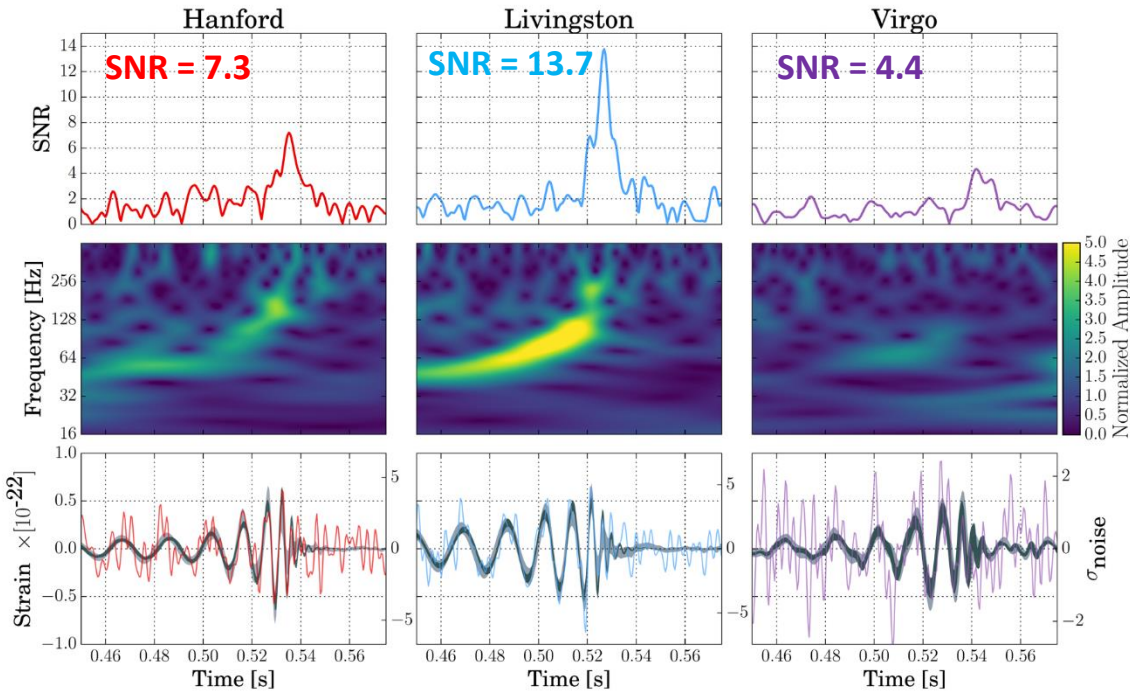
- La massa piu' elevate di buchi neri osservata in sistemi binari x-ray sono  $< 20M_{\odot}$



- Non sono state rivelate emissioni nello spettro elettromagnetico

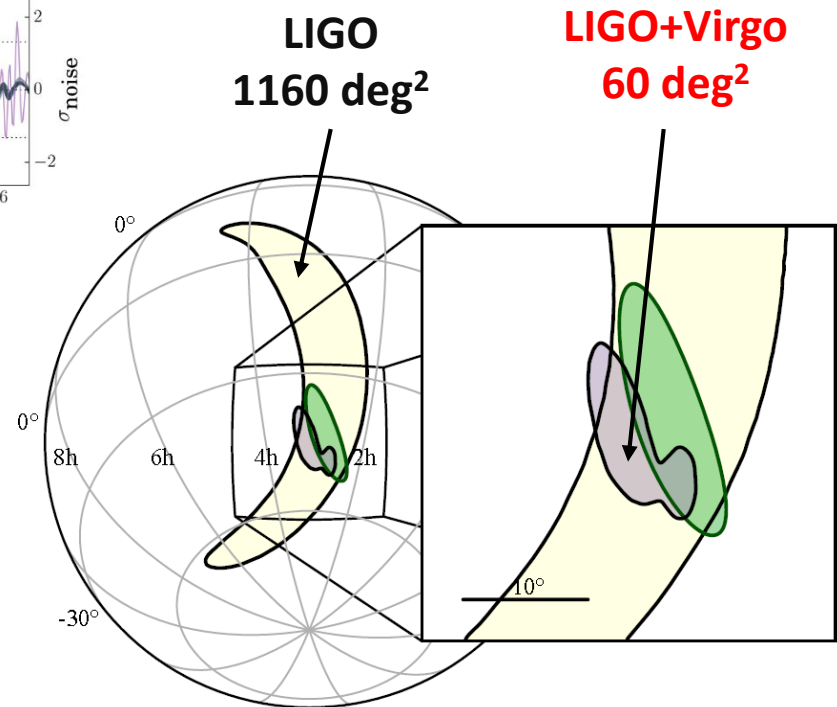
# Perché Virgo è importante?

GW170814 : 14 Agosto 2017 - 10:30:43 UTC



La localizzazione della sorgente viene notevolmente migliorata con Virgo

Virgo ha permesso una migliore stima dei parametri della sorgente, come lo studio delle due componenti di polarizzazione del segnale





# Cosa abbiamo imparato ?

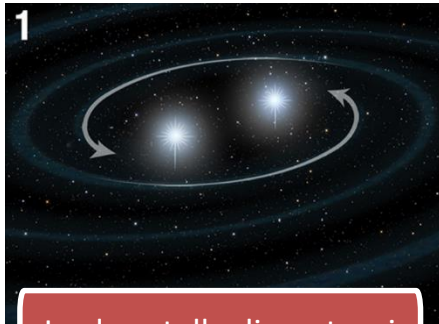
- I sistemi binari di buchi neri di origine stellare esistono
- I sistemi binari di buchi neri si fondono in un tempo inferiore al tempo di vita dell'universo
- Sono stati osservati buchi neri di origine stellare con la massa piu' grande finora misurata ( $M > 20 M_{\odot}$ )
- E' stata verificata la Relativita' Generale in condizioni estreme del campo gravitazionale

# LA NASCITA DELL'ASTRONOMIA MULTI-MESSAGGERO CON LE ONDE GRAVITAZIONALI

GW170817

La Prima Rivelazione della Fusione di un Sistema  
Binario di Stelle di Neutroni

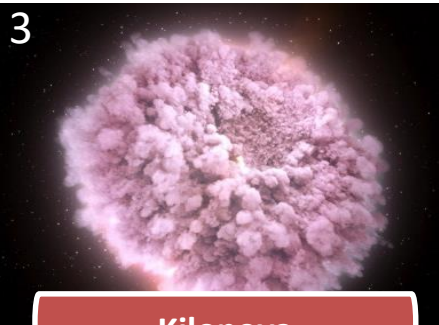
# 17 Agosto 2017: Cosa e' successo?



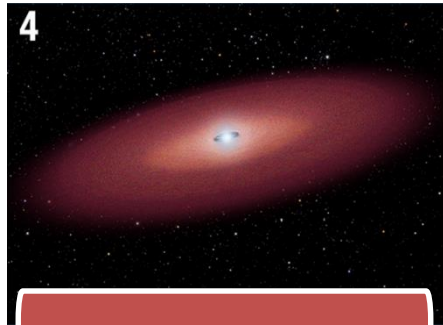
1  
Le due stelle di neutroni coalescono/fondono ed emettono **onde gravitazionali**



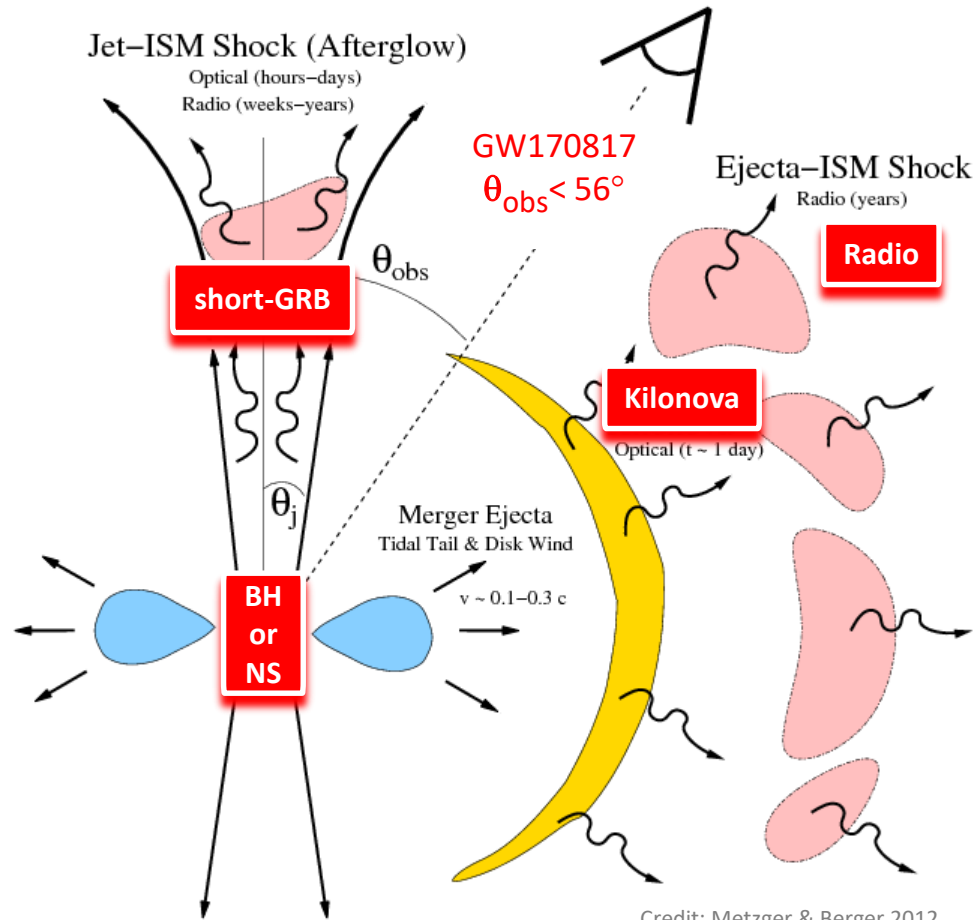
2  
**Short-GRB**  
Produzione di un lampo di raggi gamma breve



3  
**Kilonova**  
nube radioattiva di detriti espulsi dalle due stelle di neutroni prima della fusione



4  
Formazione di una **stella di neutroni o un buco nero** con un possibile disco residuo di detriti attorno ad esso



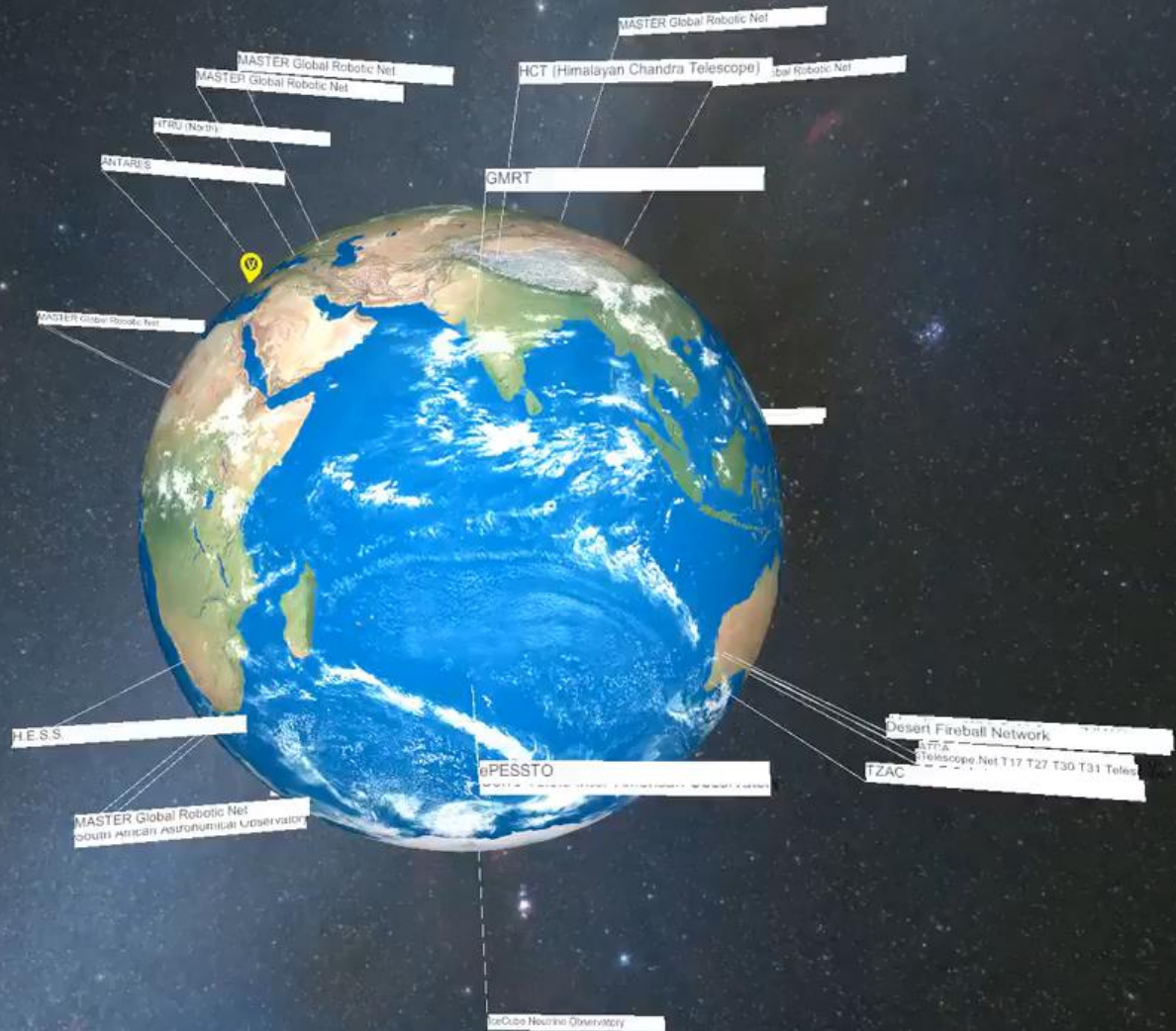
Credit: Metzger & Berger 2012

17 Agosto 2017

# La fusione delle stelle di neutroni



L'evento GW170817 e' stato seguito da una rete mondiale di circa 70 osservatori a terra (incluso l'antartide) e nello spazio



## GW170817: Cronologia della Scoperta

**17 Agosto 2017 12:41:04 UTC**

**LIGO/Virgo** intercettano l'onda gravitazionale e dopo 40 minuti diramano un alert

**+11 ore 36 minuti**

**Rapid Eye Mount** osserva il primo segnale **infrarosso** della sorgente

**+9 giorni**

**Chandra** registra il primo segnale **X** della sorgente

**+1.7 sec**

Lo strumento GMB di **Fermi** rivela il **lampeo gamma** e dopo 14 sec dirama un alert

**+10 ore 52 minuti**

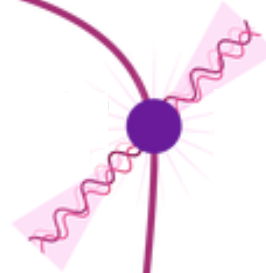
**Swope** osserva per primo **controparte ottica** della sorgente

**+15 ore**

**Swift** osserva il primo segnale **ultravioletto** della sorgente

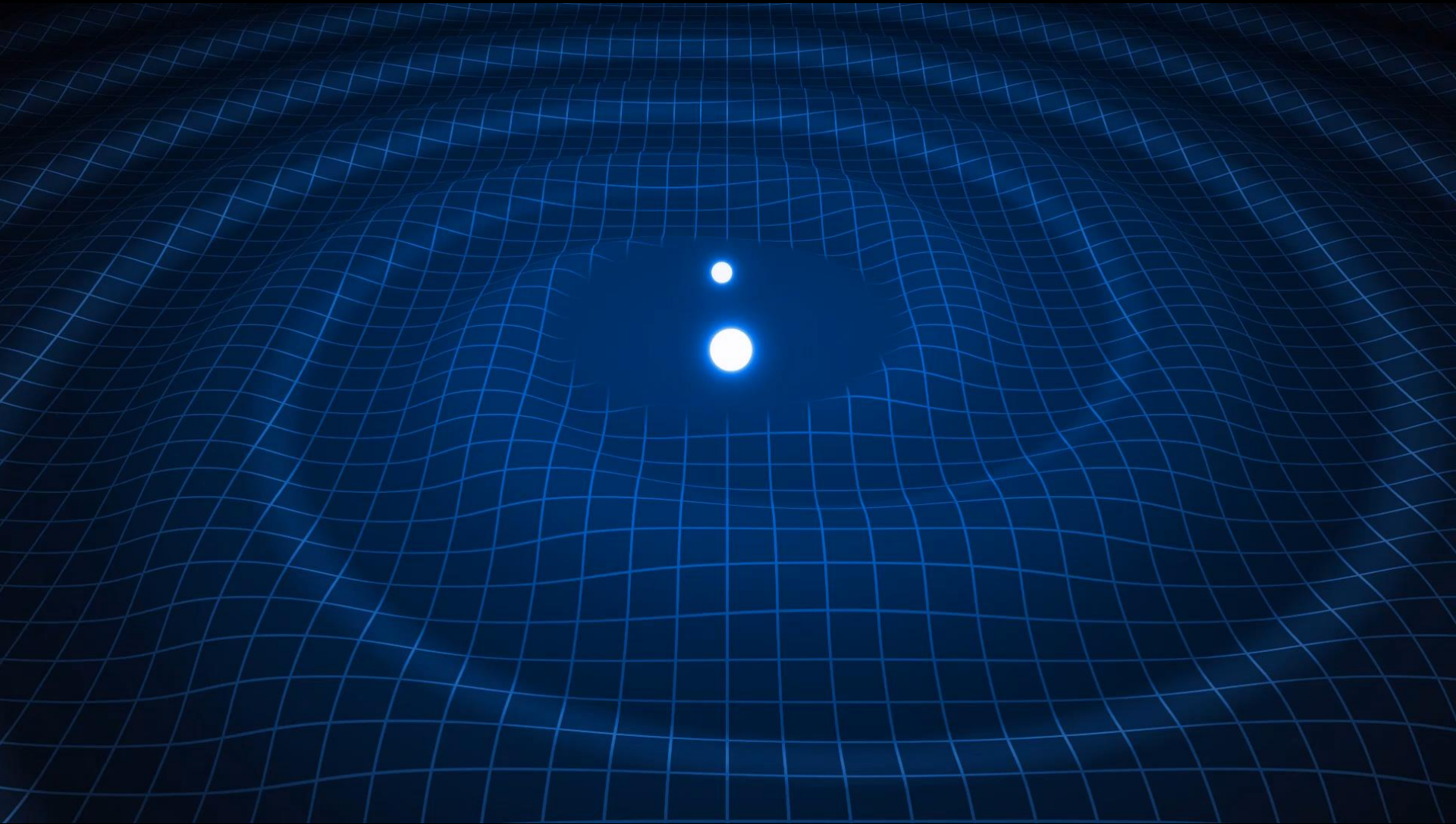
**+16 giorni**

Prima osservazione **radio** della sorgente con **VLA**



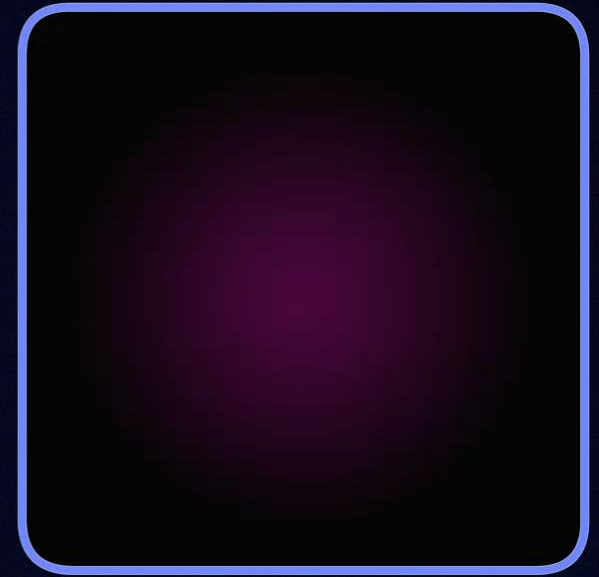
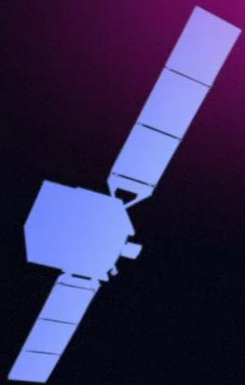
17 Agosto 2017

# L'osservazione delle Onde Gravitazionali e dei Raggi Gamma



[https://www.youtube.com/watch?v=EtlkOjq0\\_50](https://www.youtube.com/watch?v=EtlkOjq0_50)

Dopo 1.7sec il satellite Fermi osserva un lampo gamma breve  
con una intensita' inferiore a quella tipica aspettata  
E' un'indicazione che l'emissione dei getti gamma e' fuori asse

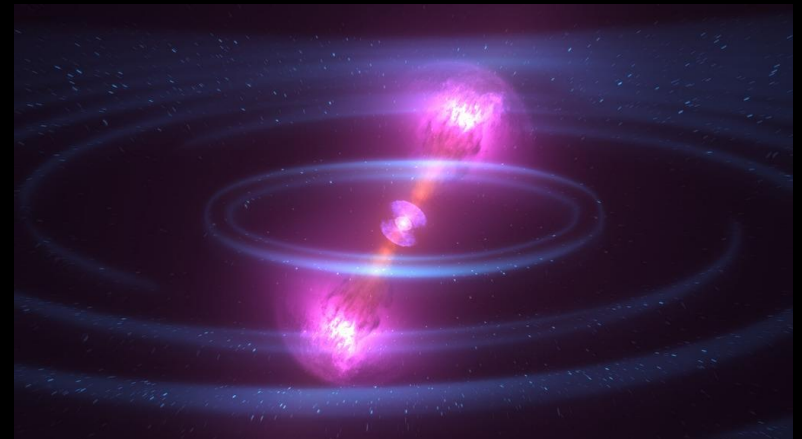
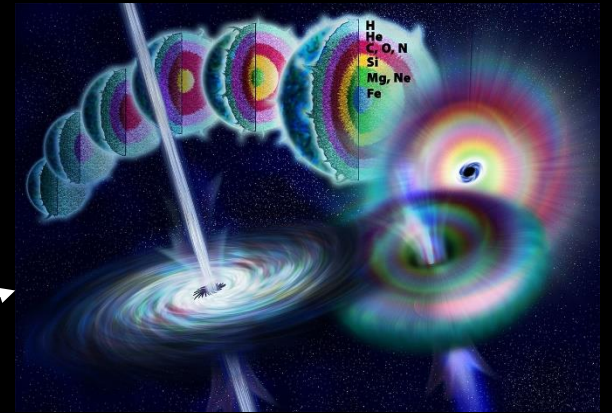
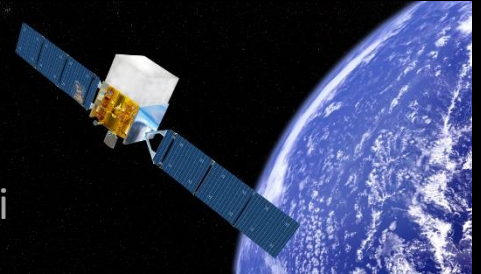




# Il mistero dei lampi gamma brevi

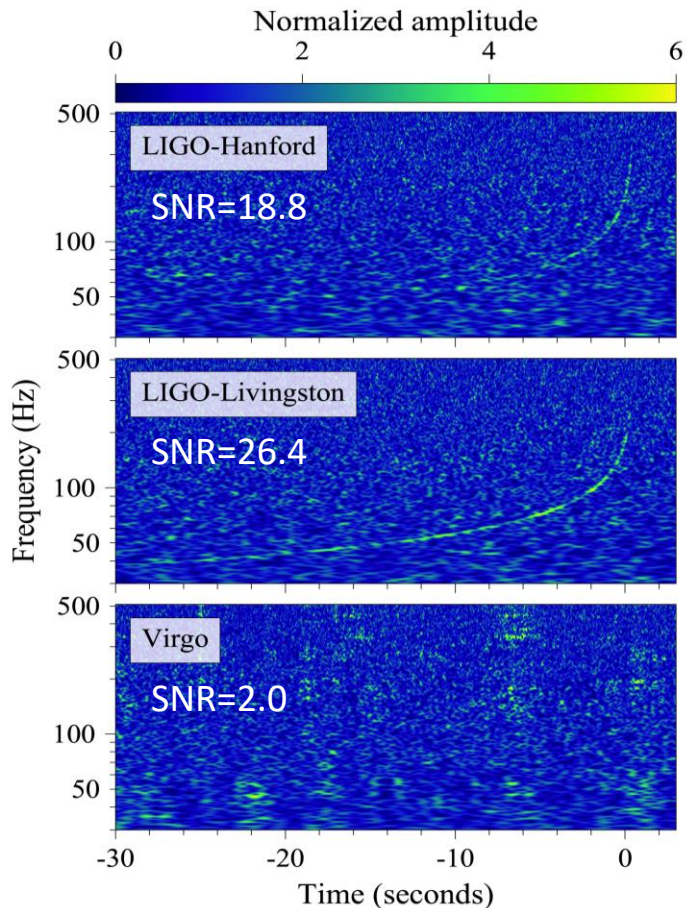
- I raggi gamma sono la piu' energetica radiazione elettromagnetica
- Si osservano lampi di raggi gamma provenienti da tutte le direzioni
- **I più lunghi**
  - supernovae
- **I più corti ?**
  - ora sappiamo che sono prodotti dalla fusione di stelle di neutroni

Osservati dai satelliti

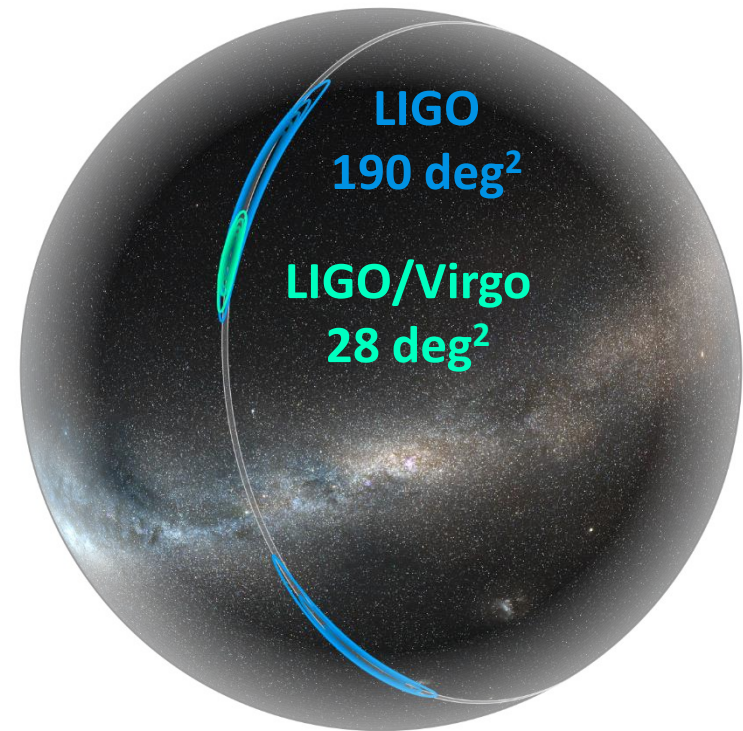


# GW170817 : Il segnale gravitazionale osservato da LIGO/Virgo

Segnale rilevato in LIGO/Virgo



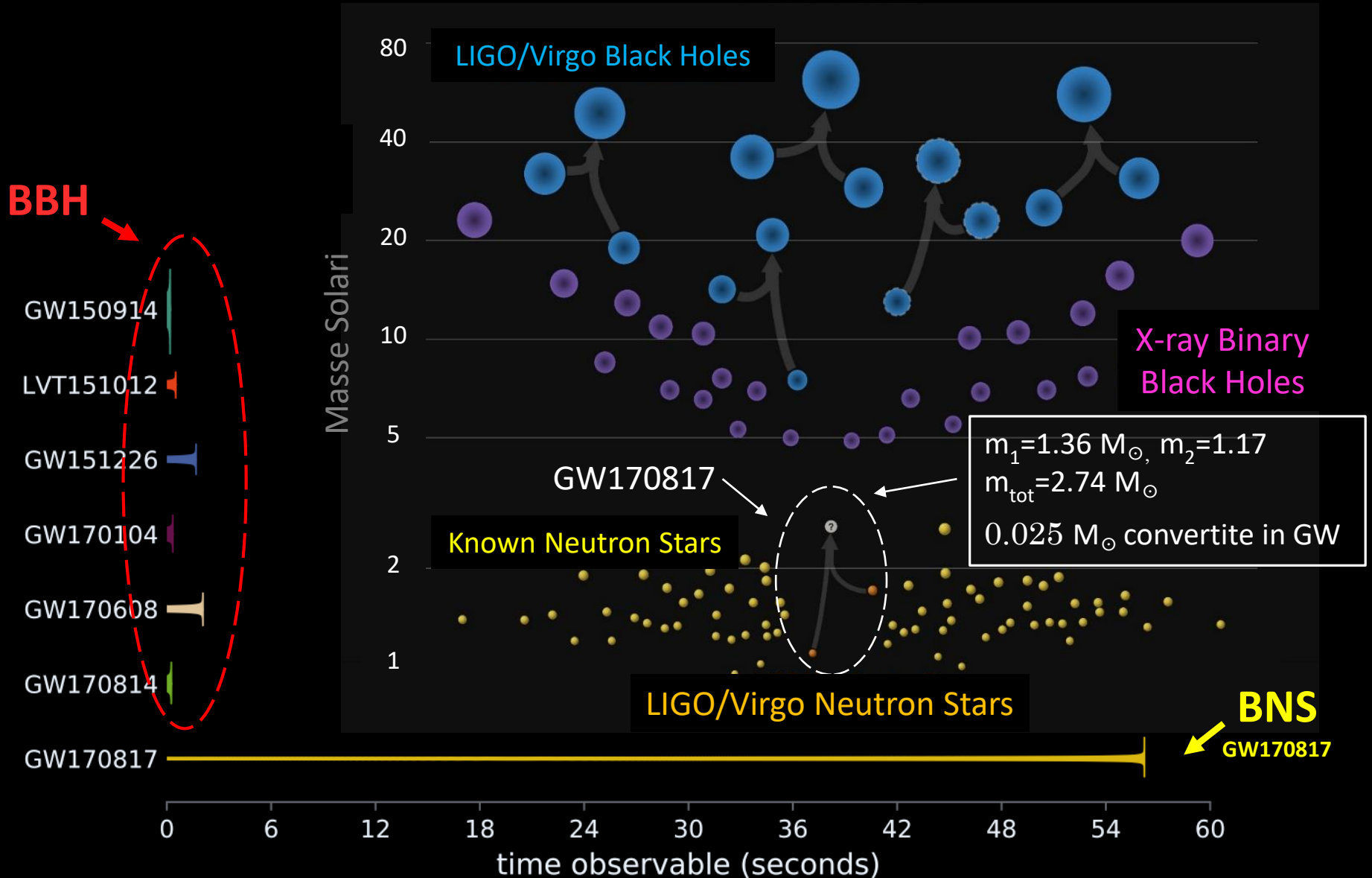
Localizzazione della sorgente



Distanza  $\approx$  130 milioni di anni luce

La probabilita' che l'evento sia stato prodotto da rumore e'  $< 1$  evento in 80.000 anni

# Confronto Masse e Forme d'Onda



# La scoperta della controparte ottica (AT2017fgo) e della galassia ospite (NGC 4993)

Il team 1M2H e' stato il primo a scoprire la controparte ottica AT2017fgo nella galassia ospite NGC 4993 usando il telescopio Swope da 1m 10.9 hr dopo la fusione delle stelle di neutroni

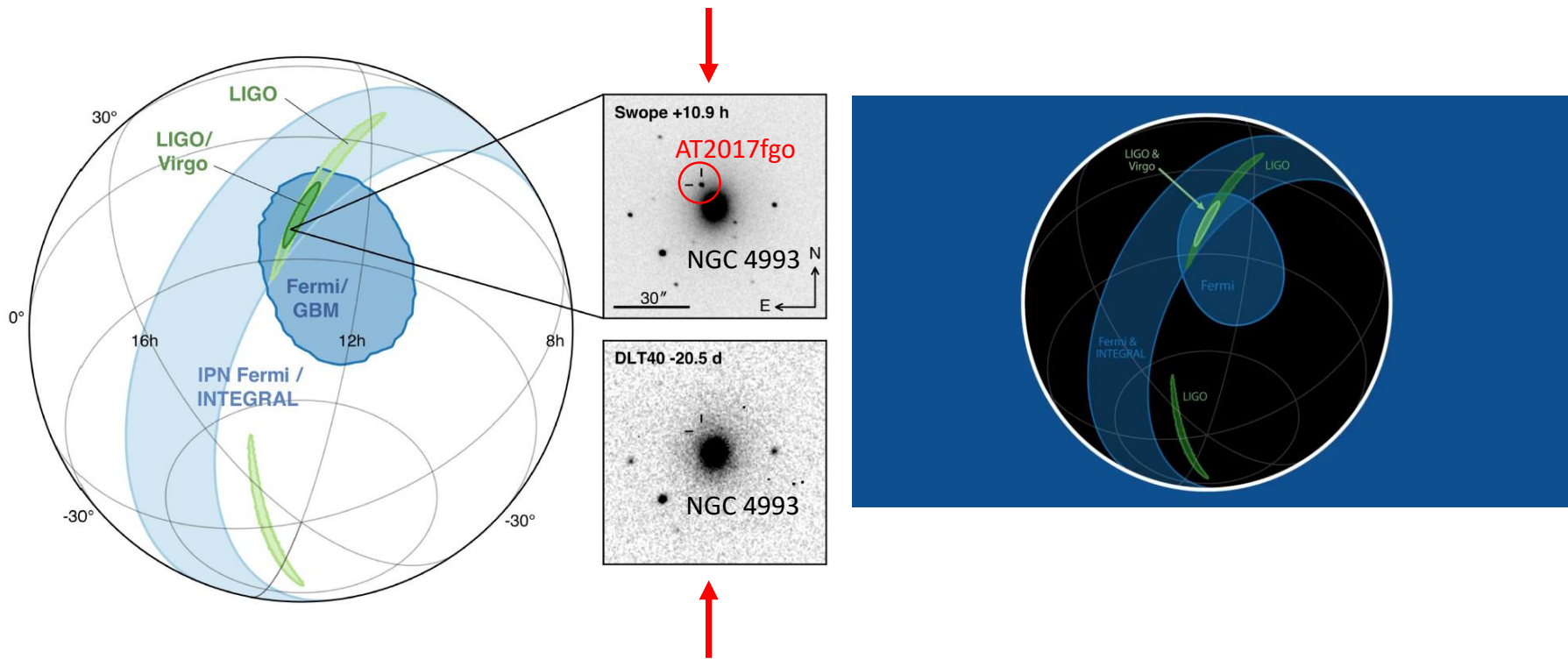
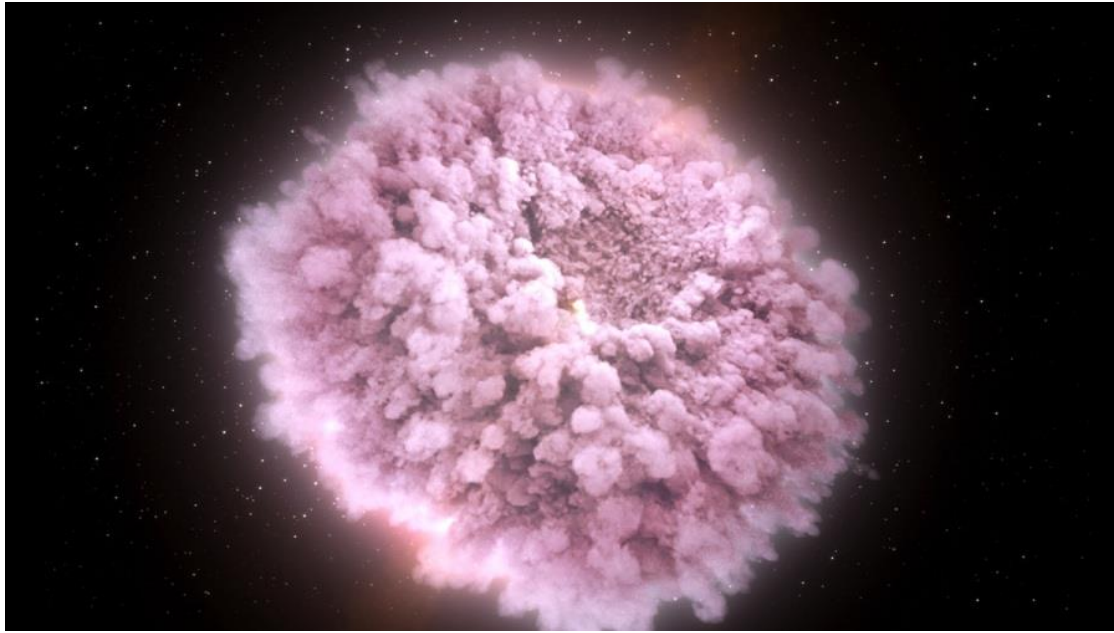
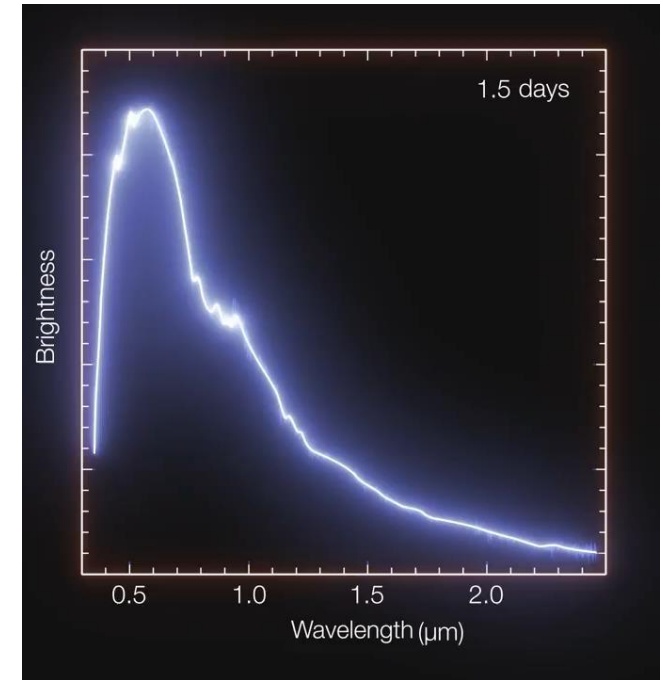


Immagine della galassia ospite presa da DLT40 20.5 giorni prima della fusione delle stelle di neutroni

# La Kilonova



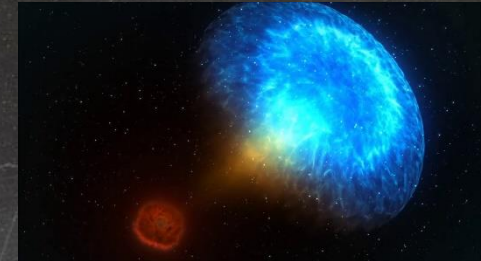
- L'immagine mostra la densa e calda nube di detriti espulsi dalle **stelle di neutroni** prima della fusione.
- Questa nube produce la luce visibile e infrarossa della **kilonova**
- All'interno di questi detriti ricchi di neutroni sono state forgiate grandi quantità di alcuni degli elementi più pesanti dell'Universo, producendo **centinaia di masse terrestri di oro e platino**



- Animazione basata su una serie di spettri della Kilonova osservati dallo strumento X-shooter al Very Large Telescope (ESO) in Cile
- Gli spettri sono consistenti con quelli aspettati dall'emissione di una kilonova

# Cosa abbiamo imparato ?

- Origine dei lampi gamma brevi
  - Un mistero decennale
- Meccanismo di formazione metalli pesanti
  - Circa 100 masse terrestri d'oro!
- Misura della velocità delle onde gravitazionali:
  - 1,7 s di differenza su 130 milioni di anni!  
Addio a tante teorie alternative alla relatività'...
- Misura diretta della velocità di espansione dell'universo
  - Conferma indipendente dalla scala cosmica

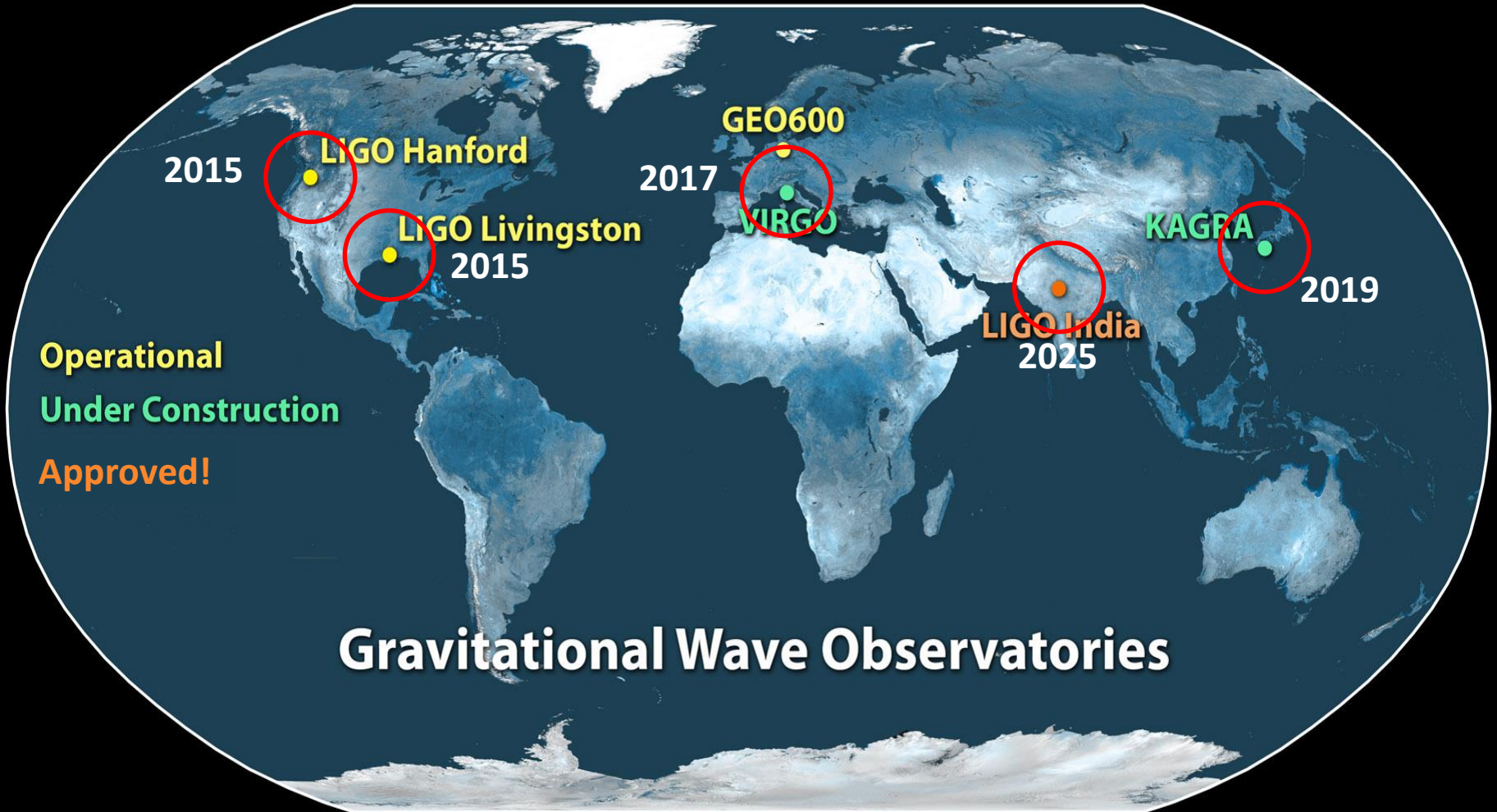


$$\begin{aligned} \mathcal{L}_2 &= c_2 X, & \mathcal{L}_3 &= 2 \frac{c_3}{M^3} X \square \phi \quad \rightarrow \text{"Cubic Galileons"} \\ \mathcal{L}_4 &= \left( \frac{M_p^2}{2} + \frac{c_4}{M^6} X^2 \right) R + 2 \frac{c_4}{M^6} X \left[ (\square \phi)^2 - (\nabla_\mu \nabla_\nu \phi)^2 \right] \\ \mathcal{L}_5 &= \frac{c_5}{M^9} X^2 G_{\mu\nu} \nabla^\mu \nabla^\nu \phi - \frac{1}{3} \frac{c_5}{M^9} X \left[ (\square \phi)^3 - 3 (\nabla_\mu \nabla_\nu \phi)^2 \square \phi + 2 (\nabla_\mu \nabla_\nu \phi)^3 \right] \end{aligned}$$



E ORA  
COSA CI ASPETTA ?

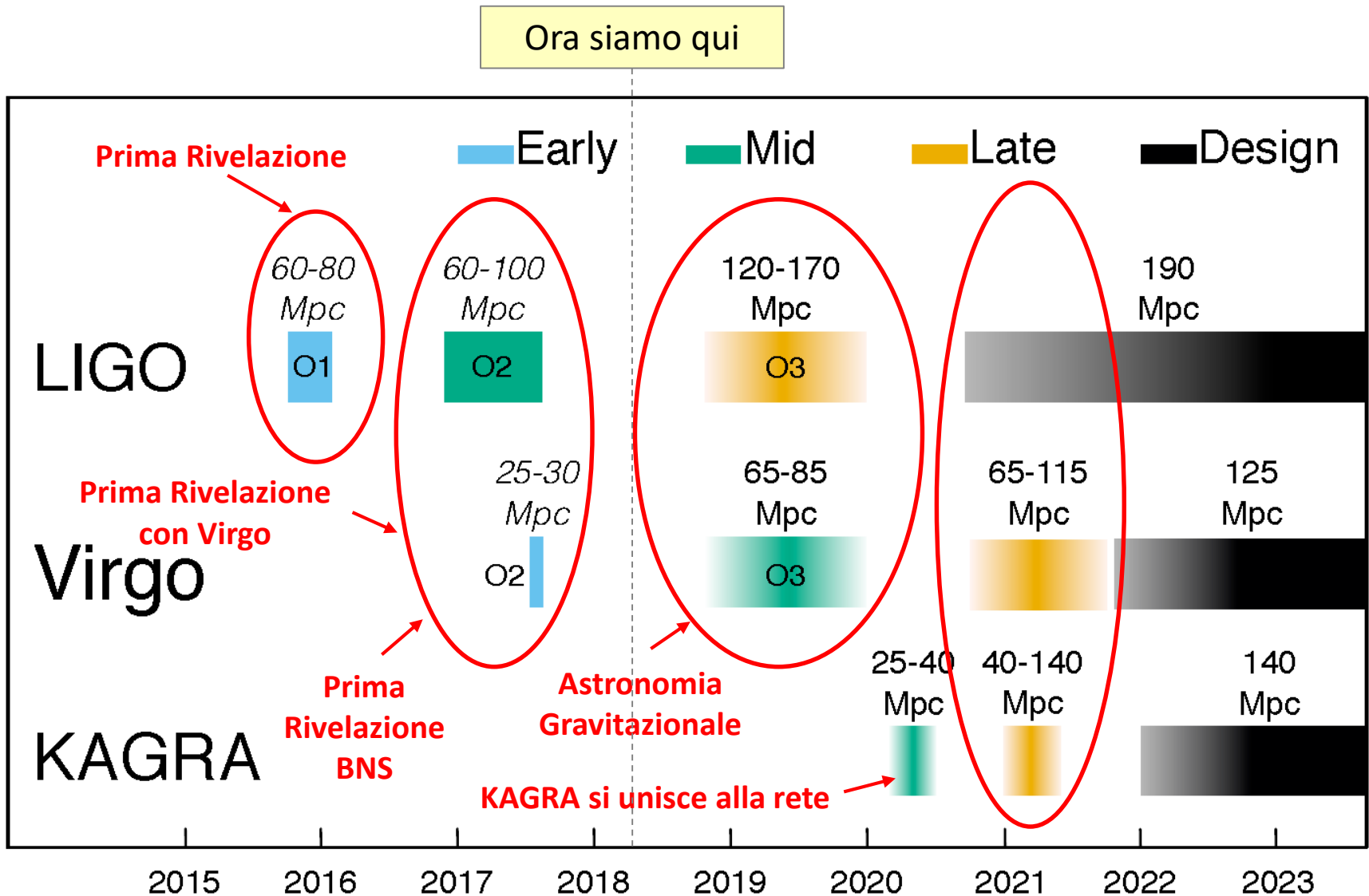
# IL FUTURO



Aumenterà il numero dei rivelatori e la loro sensibilità



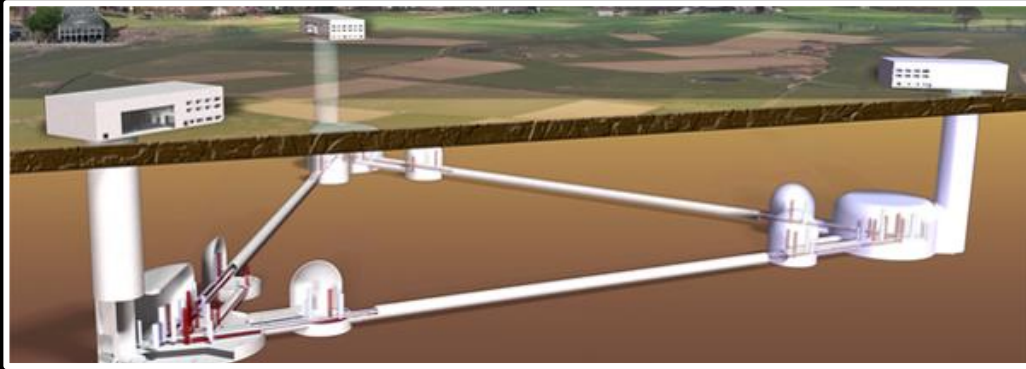
# Piano delle Osservazioni Future



1 Mpc =  $3.26 \times 10^6$  Anni Luce

Distanza Galassia Andromeda =  $2.54 \times 10^6$  Anni Luce

# La 3<sup>rd</sup> generazione di rivelatori a terra



<http://www.et-gw.eu/>

- ET permettera' di realizzare osservazioni di astronomia gravitazionale con alta precisione.
- Se le tecnologie lo permetteranno potrebbe essere realizzato in 10-15 anni

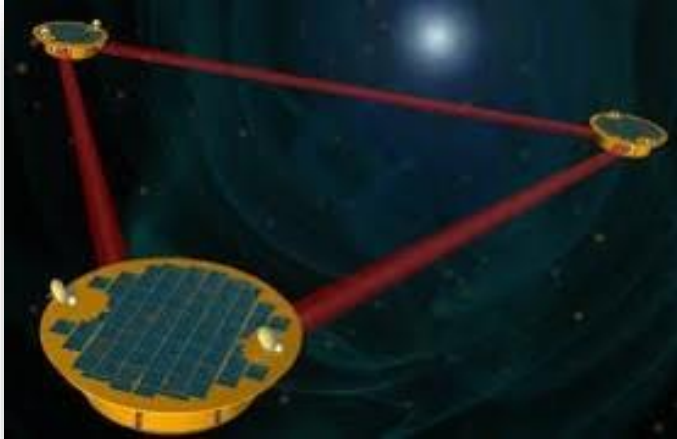
## EINSTEIN TELESCOPE

Interferometro con braccia di 10 km di lunghezza, in configurazione triangolare, criogenico, sotterraneo

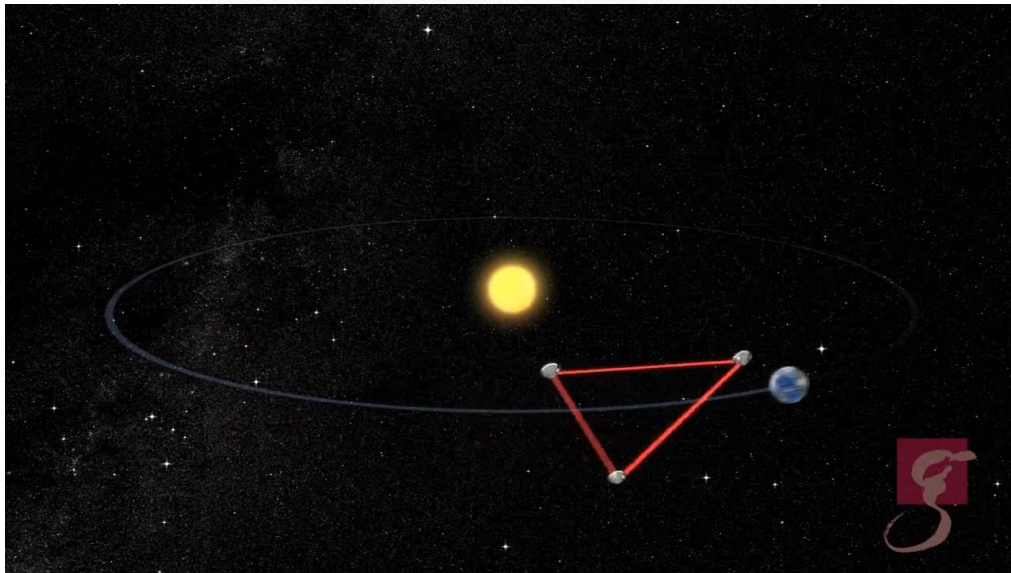
E' stato proposto come sito candidato la miniera di **Sos Enattos** in Sardegna



# IL FUTURO DELLA RICERCA DELLE ONDE GRAVITAZIONALI È NELLO SPAZIO – eLISA (2034)

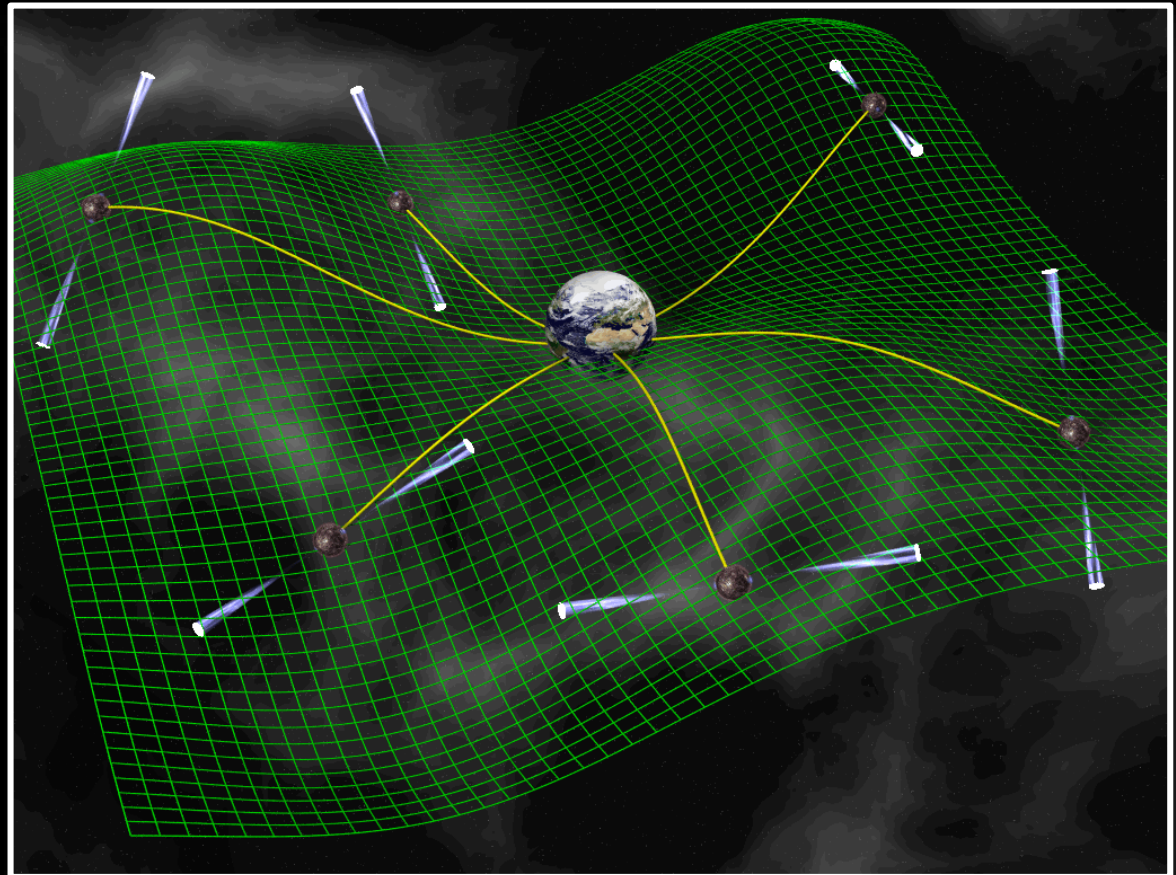


- **eLISA** è un interferometro nello spazio costituito da 3 satelliti alla distanza reciproca di 1 milione di km
- permetterà di vedere le emissioni di centinaia o migliaia di stelle binarie con grande massa a basse frequenze : **0,1 mHz e 1 Hz**
- Il 3 dicembre 2015 è stata lanciata la sonda **PathFinder** che ha verificato la fattibilità' del progetto eLISA



# IL RIVELATORE PIÙ GRANDE PULSAR TIMING ARRAY

- **Idea:**
  - misurare il tempo di arrivo di segnali radio da millisecond-pulsar
  - Le onde gravitazionali alterano i tempi di arrivo
- **Diversi progetti attivi a partire dal 2005:**
  - Centinaia di pulsar monitorate
  - Servono anni per accumulare dati sufficienti



E PER FINIRE ...

# Riassumendo ...

- LIGO/Virgo hanno eseguito le prime misure dell'ampiezza e della fase di un'onda gravitazionale
- E' stata osservata per la prima volta la fusione di sistemi binari di buchi neri e di stelle di neutroni!
  - **una rivoluzione scientifica**
- Sono in corso aggiornamenti dei rivelatori LIGO e Virgo per migliorare la loro sensibilita' per il run osservativo O3 e oltre

Virgo



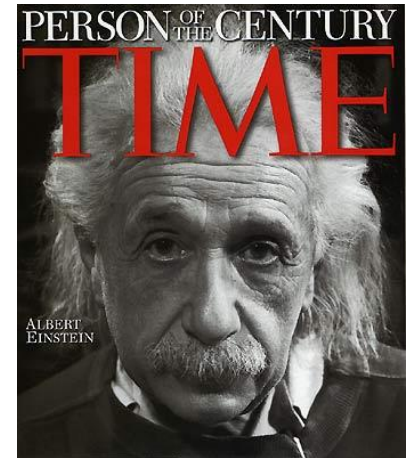
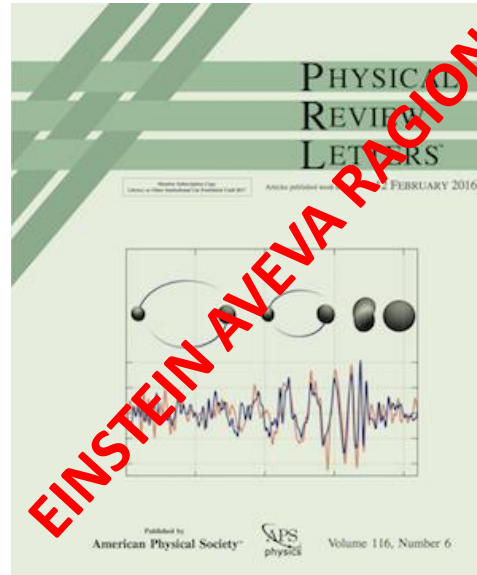
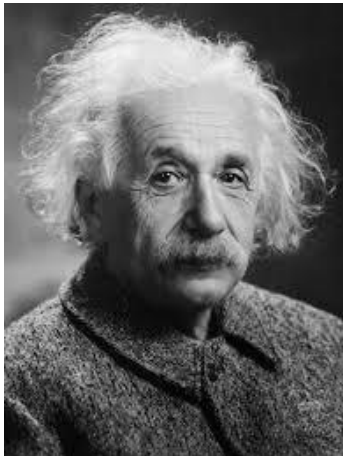
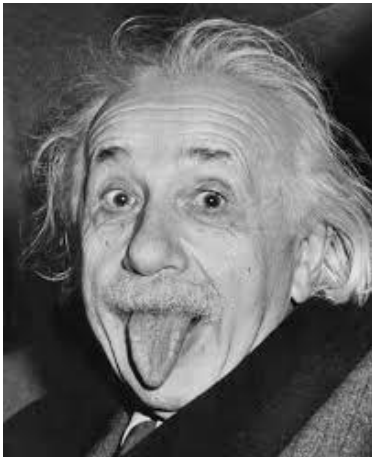


# Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger

B. P. Abbott *et al.*\*

(LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration)

(Received 21 January 2016; published 11 February 2016)





*Estendo  
la dedica  
di  
Kip Thorne  
fatta a  
mio figlio  
a tutti voi*



**Pasadena Marzo 2015  
LIGO-Virgo  
Collaboration Meeting  
Kip Thorne parla di  
Interstellar**



*With best wishes for your studies  
of science. I hope you enjoy it  
as much as I have!  
Kip Thorne*

*Con i migliori  
auguri per i tuoi  
studi scientifici.  
Spero che ti piaccia  
tanto quanto lo è  
stato per me*