

# LA RIVELAZIONE DELLE ONDE GRAVITAZIONALI 100 ANNI DOPO LA PREDIZIONE DI EINSTEIN

GABRIELE VEDOVATO



SEPTEMBER 14, 2015

Estage - 6 Luglio 2016 – LNL Padova

# LE ONDE GRAVITAZIONALI UN PÒ DI STORIA

# LA STORIA



1905

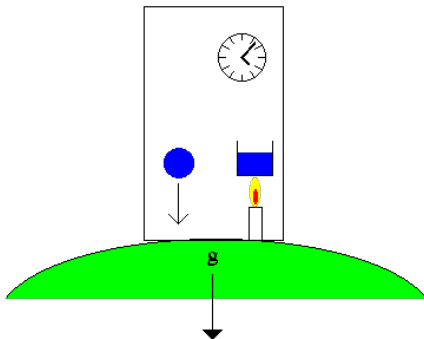
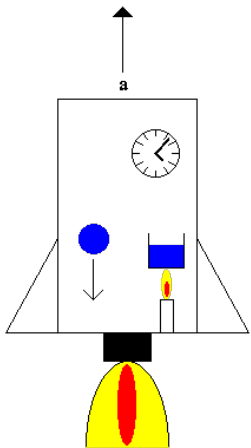
Nasce la **relatività ristretta** e il **concetto di spazio-tempo**

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

1908

Einstein propone il **principio di equivalenza forte**

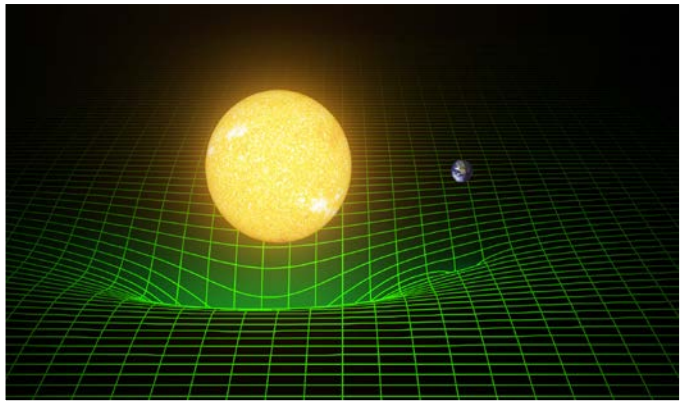
- Per tutte le leggi fisiche, un campo gravitazionale è localmente equivalente ad un sistema di riferimento accelerato
- Fondamento della Relatività Generale



# LA STORIA

100 anni fa...

1915

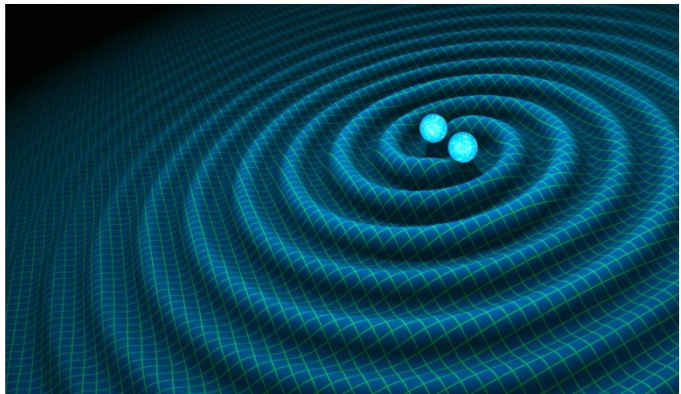


## Nasce la **relatività generale**

- 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)*

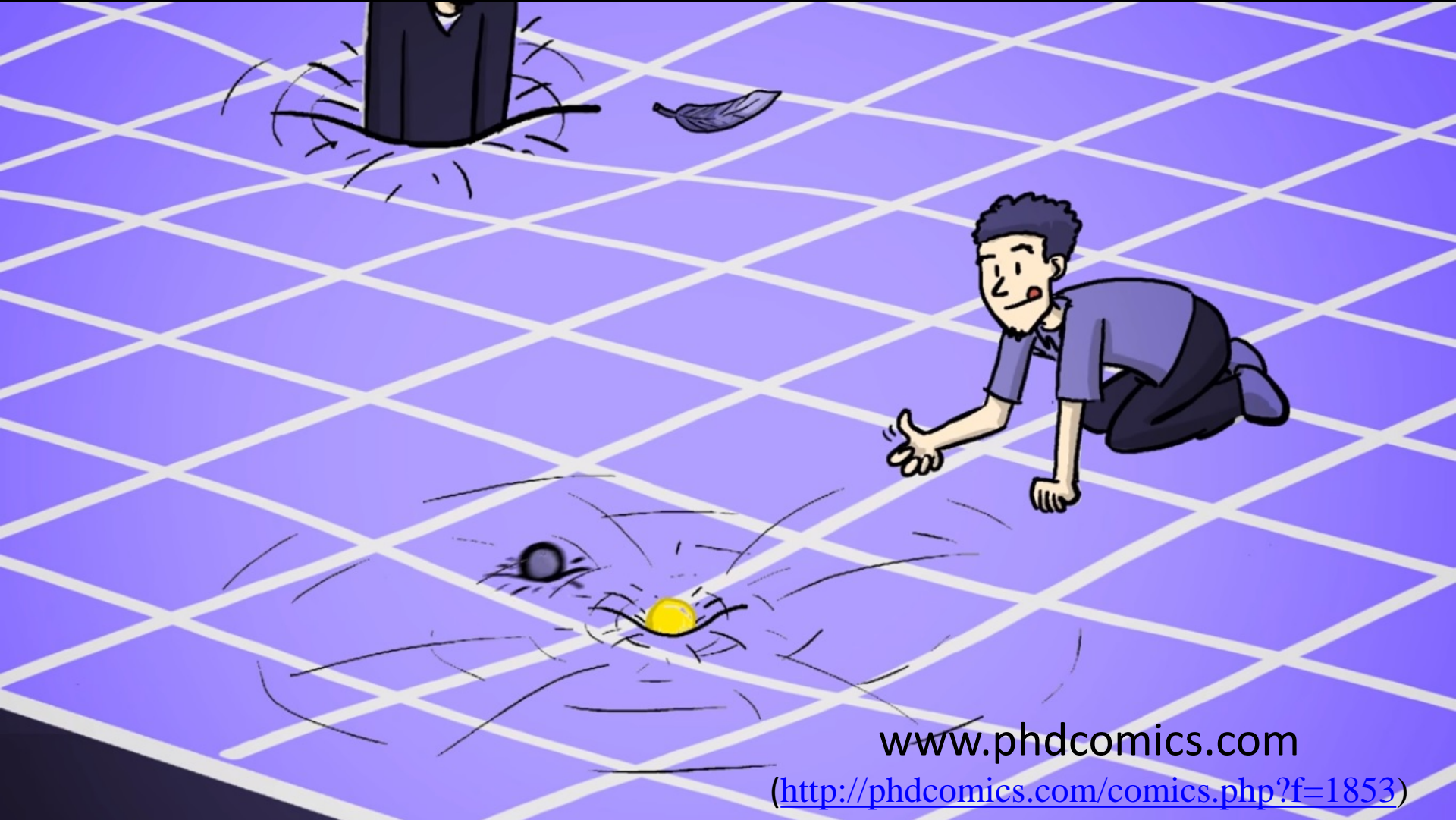
1916



## 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



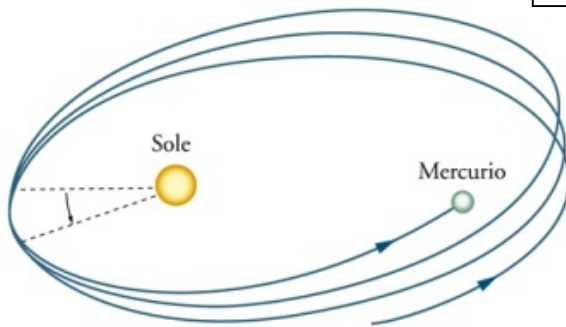
[www.phdcomics.com](http://www.phdcomics.com)

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

# LA STORIA



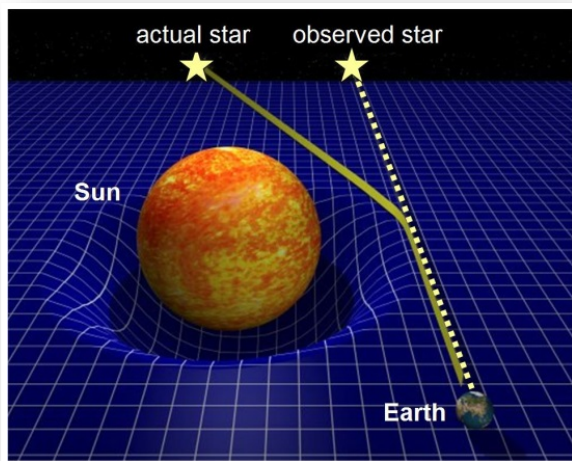
1916



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

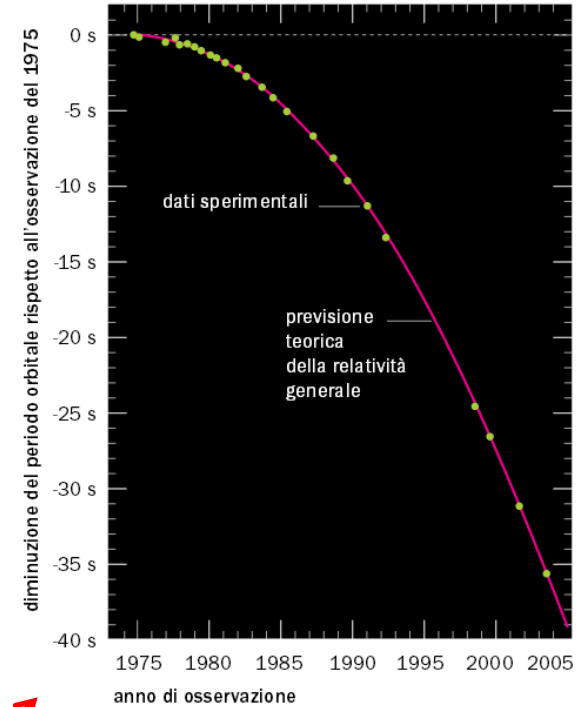
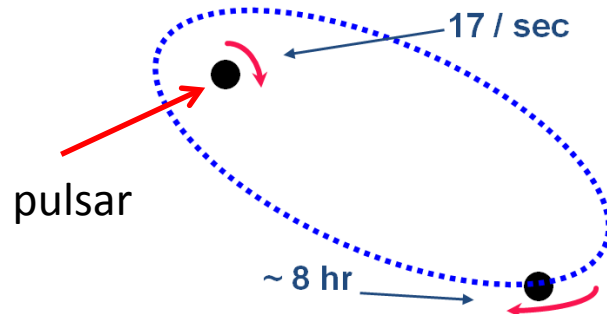
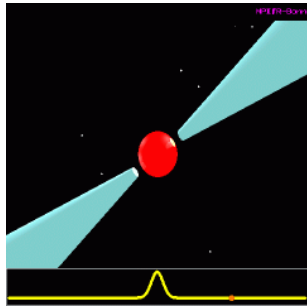


**relatività generale** **+1.8"**

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

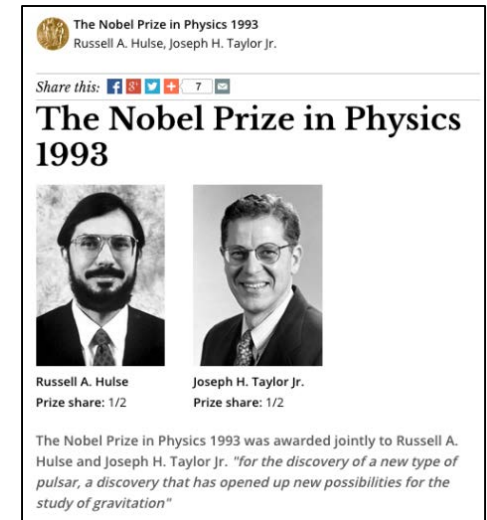


Taylor e Weisberg misurano nell'arco di vari anni la variazione del periodo

Stabiliscono che il sistema sta perdendo energia a causa dell'emissione di onde gravitazionali in perfetto accordo con la teoria di Einstein



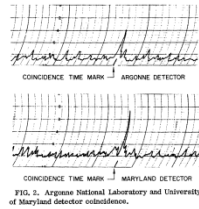
**prima prova indiretta dell'esistenza delle onde gravitazionali**



# LA RICERCA DIRETTA : ANTENNE



Anni 60



Anni 90



Laboratori Nazionali di Legnaro, Padova

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

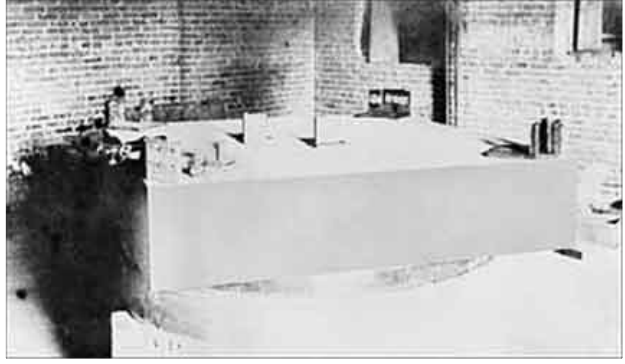
Vengono costruiti altri rivelatori a barra, tra i quali **AURIGA**



Rete internazionale di rivelatori a barre



# LA RICERCA DIRETTA : INTERFEROMETRI



1971

Primo prototipo (2m)

1989

Prima proposta per  
**LIGO, Virgo**

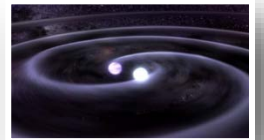
Anni  
2000

**LIGO & Virgo** operativi

2015

**LIGO** Advanced

*Discovery !*



2016

**Virgo** Advanced ?

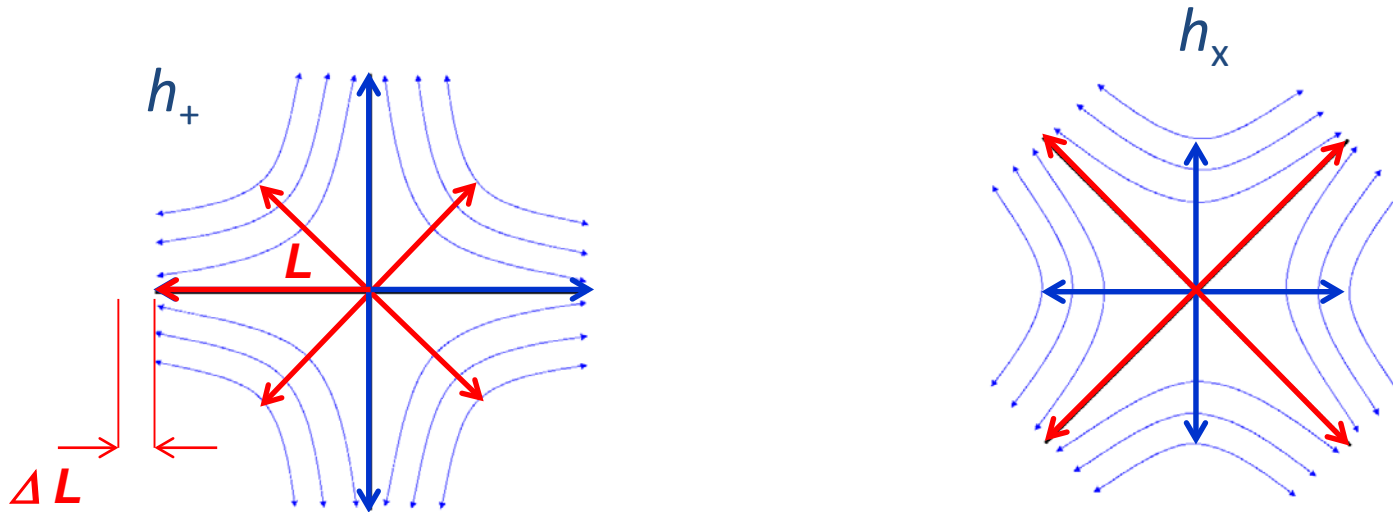


Virgo

COME SI RIVELANO  
LE ONDE GRAVITAZIONALI  
CON GLI INTERFEROMETRI

# 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

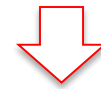
$$h \approx \frac{\Delta L}{L} \quad \longrightarrow \quad \Delta L \approx h \cdot L$$

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

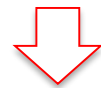
Le osservazioni fino al 2011 hanno escluso ampiezze di onda corrispondenti a variazioni relative pari a

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

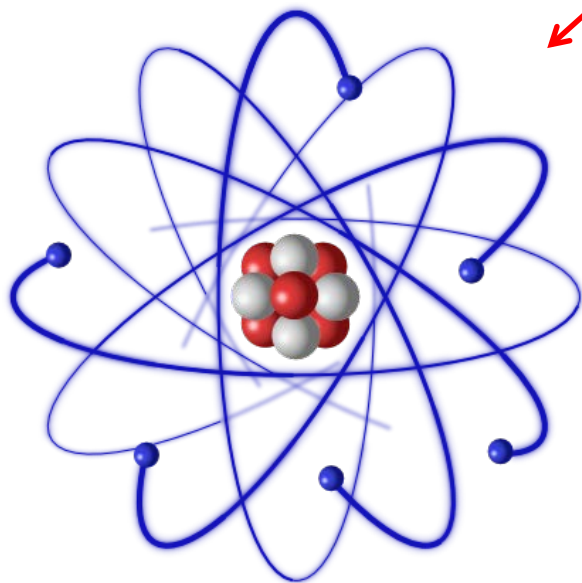
Dobbiamo cercare di misurare una distanza che è 1000 volte più piccola del nucleo di un atomo



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

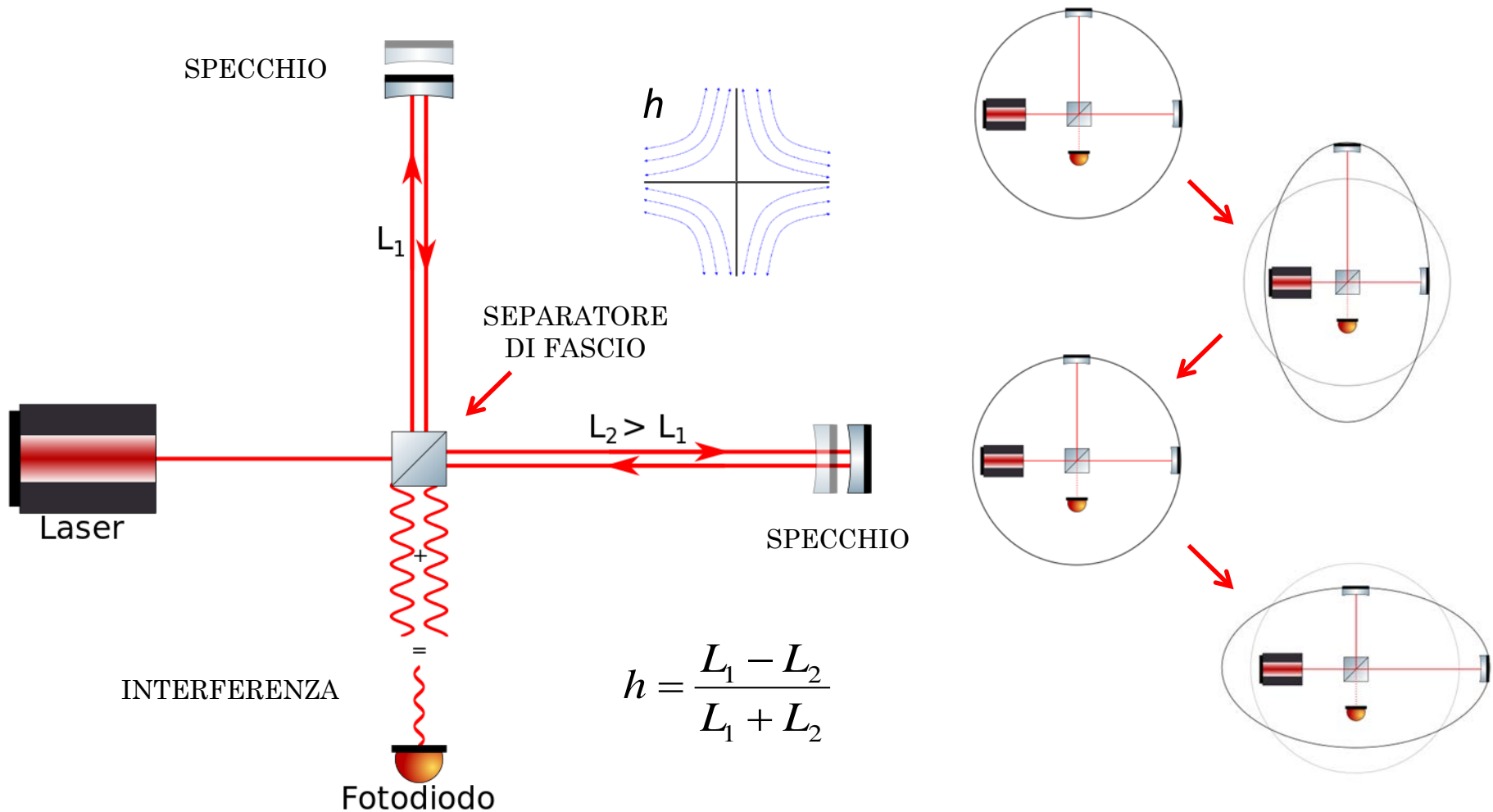


*La rivelazione diretta di un'onda gravitazionale è una sfida scientifica e tecnologica formidabile*



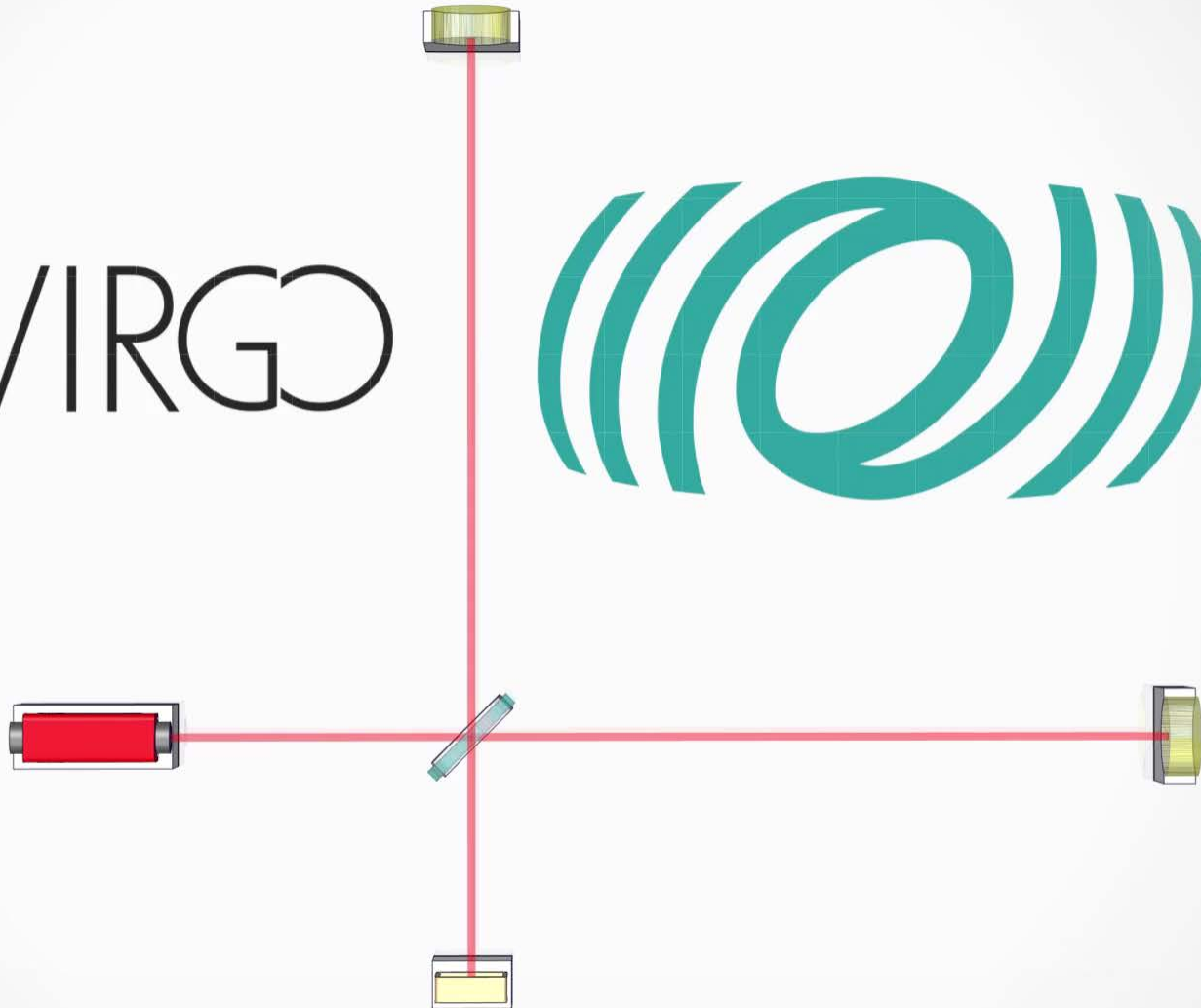
# COS'È UN INTERFEROMETRO?

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



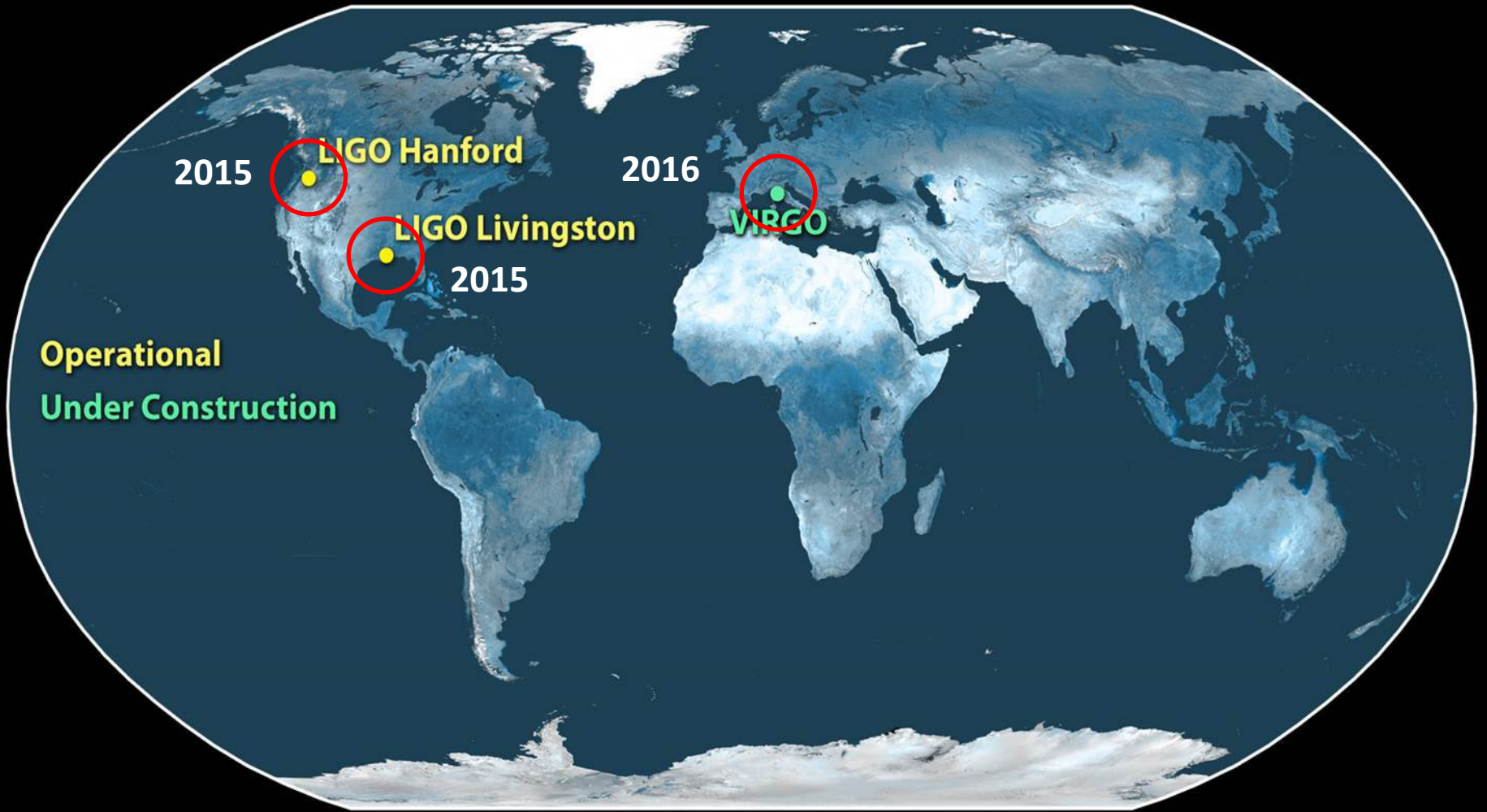
# COME FUNZIONA UN INTERFEROMETRO ?

VIRGO



[Link Video](#)

# GLI INTERFEROMETRI



# *LIGO Livingston*

*Lunghezza = 4+4 Km*





# LIGO Hanford

Lunghezza = 4+4 Km



# VIRGO

*Lunghezza = 3+3 Km*



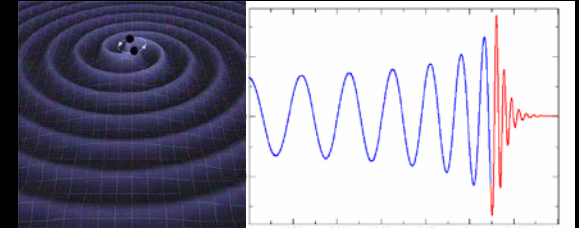
COSA CERCHIAMO ?

# SORGENTI DI ONDE GRAVITAZIONALI

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

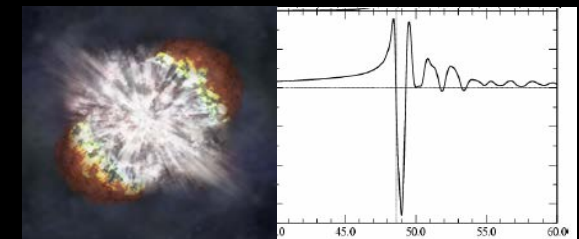
- **Collasso di sistemi binari**

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



- **Collasso di supernova (SN)**

- I modelli delle forme d'onda non ben conosciuti



# SORGENTI DI ONDE GRAVITAZIONALI

## Segnali Continui

- **Stelle a Neutroni (Pulsars)**

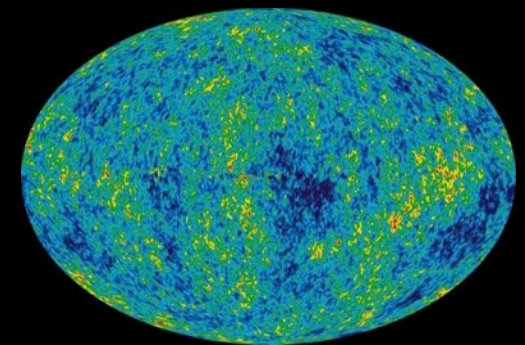
- Oggetti compatti velocemente rotanti con una distribuzione asimmetrica di massa
- La Relatività Generale fornisce il modello delle forme d'onda aspettate



Vela Pulsar

- **Fondo Cosmico  
Onde Gravitazioni**

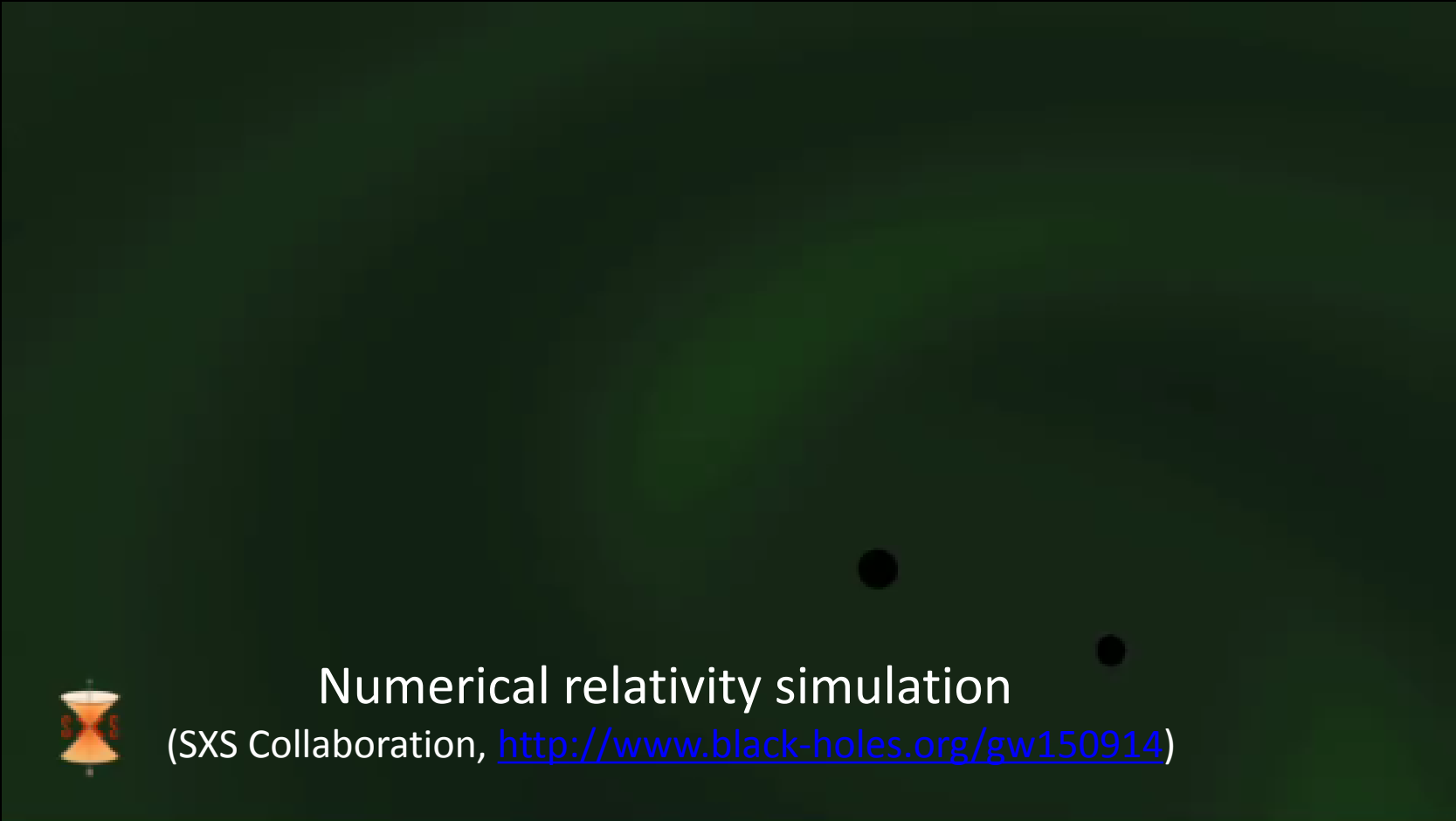
- Residuo del Big Bang
- Fondo incoerente di sorgenti di onde gravitazionali



NASA/WMAP Science Team

14 SETTEMBRE 2015  
ore 11:51 in Italia  
LA SCOPERTA

**14 SETTEMBRE 2015 11:51 in Italia**

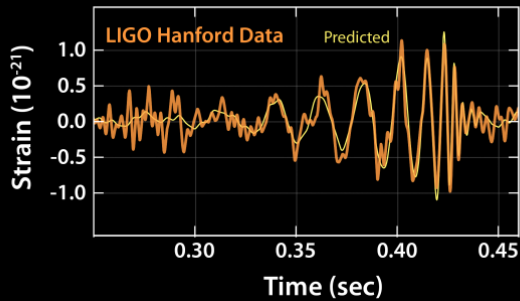


Numerical relativity simulation

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

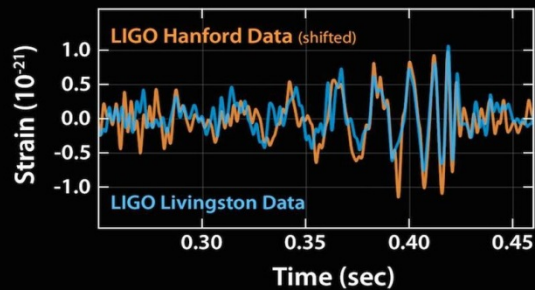
**(Beh, in realtà 1.3 miliardi di anni fa)**

# LIGO VEDE L'EVENTO

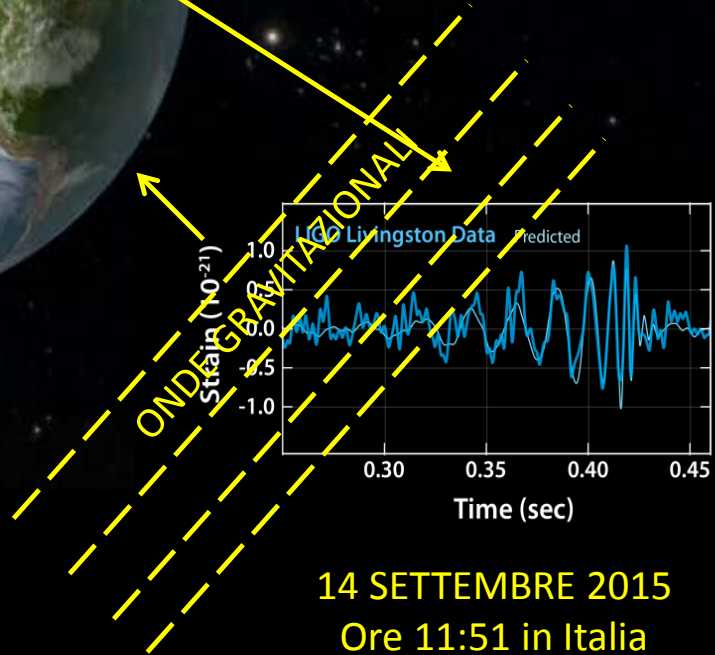


7 millisecondi più tardi

I DUE SEGNALI COINCIDONO !



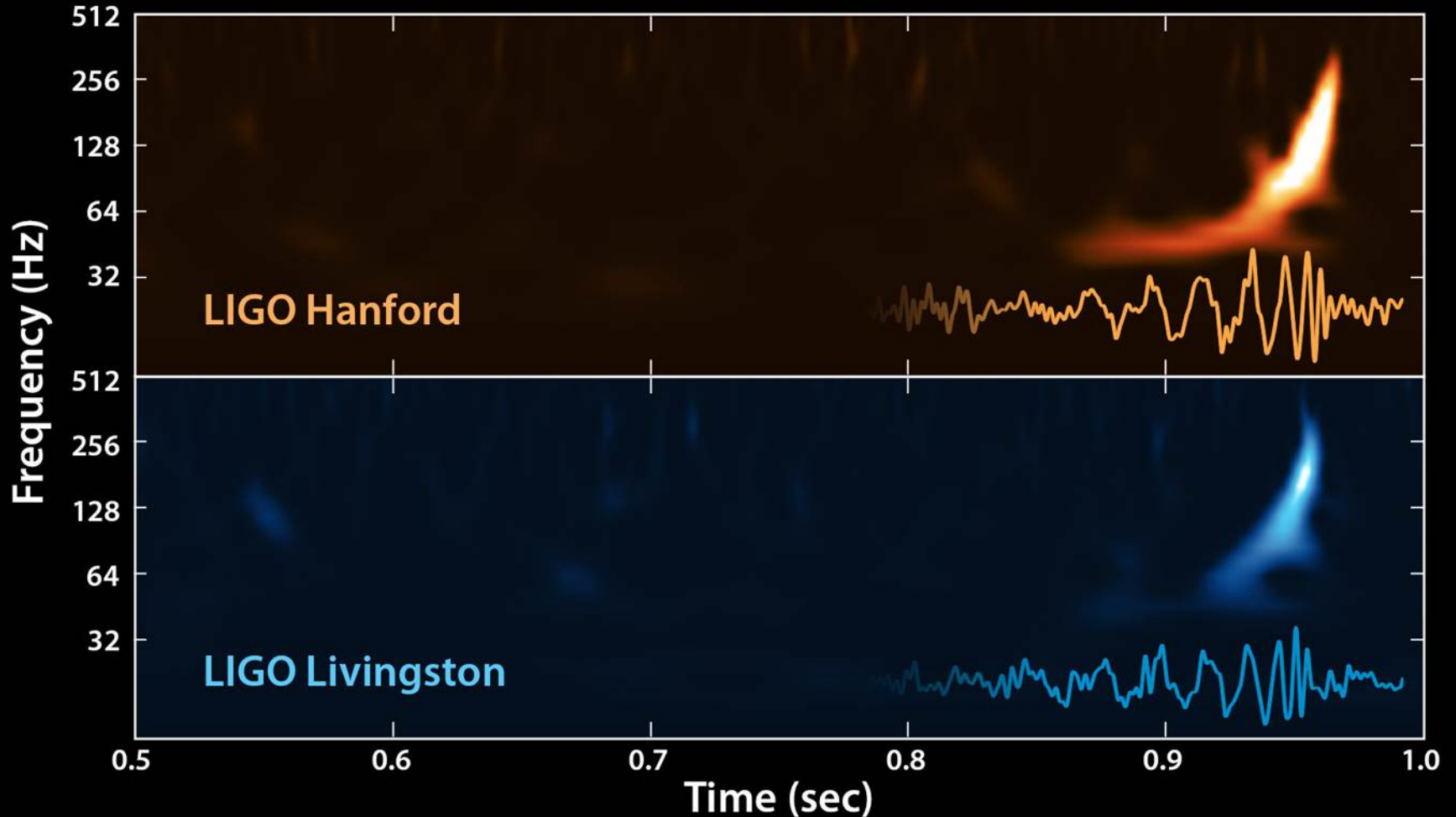
Il segnale di Hanford è spostato di 7msec e cambiato di segno



14 SETTEMBRE 2015  
Ore 11:51 in Italia

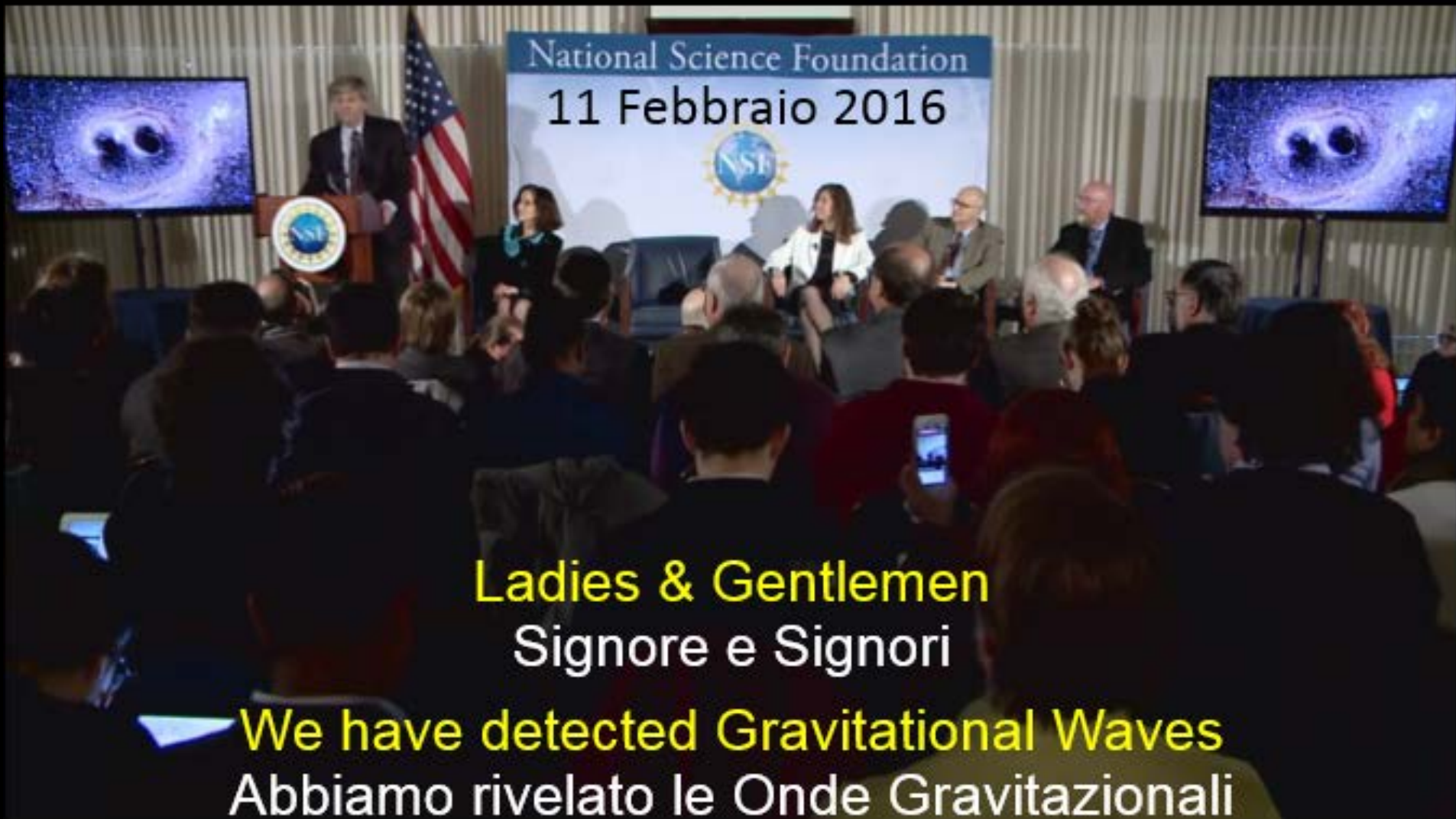


# I SUSSURRI DELL'ONDA



[https://www.youtube.com/watch?v=dP6ZWew83\\_Q](https://www.youtube.com/watch?v=dP6ZWew83_Q)

# L'annuncio della scoperta : LIGO



**Ladies & Gentlemen**  
Signore e Signori

**We have detected Gravitational Waves**  
Abbiamo rivelato le Onde Gravitazionali

**We did it !**  
L'abbiamo fatto !

[Link Video](#)

COME SI CERCANO NEI DATI  
LE ONDE GRAVITAZIONALI ?

L'effetto di un'onda gravitazionale si confonde talmente bene con il rumore di fondo che c'è bisogno di una tecnica raffinata per analizzare i dati

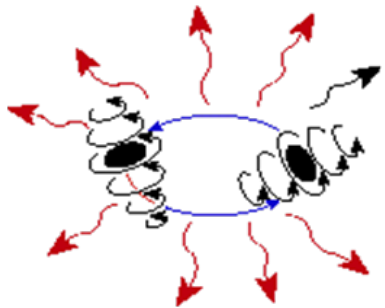


Gli scienziati cercano di identificare le caratteristiche delle onde gravitazionali confrontando i dati misurati nell'esperimento con i segnali che si aspettano dalle onde gravitazionali

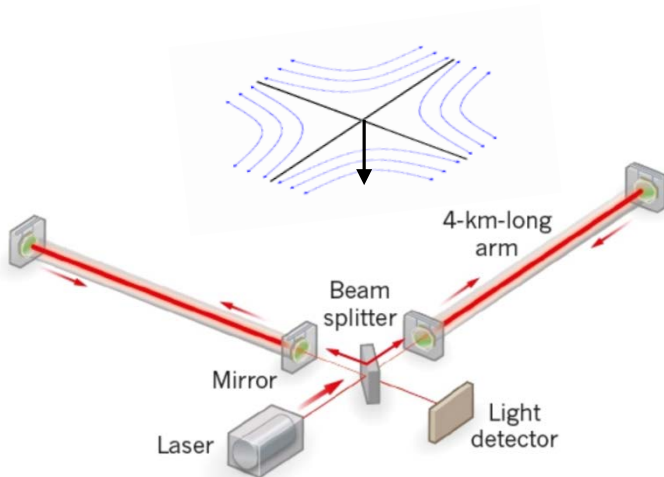
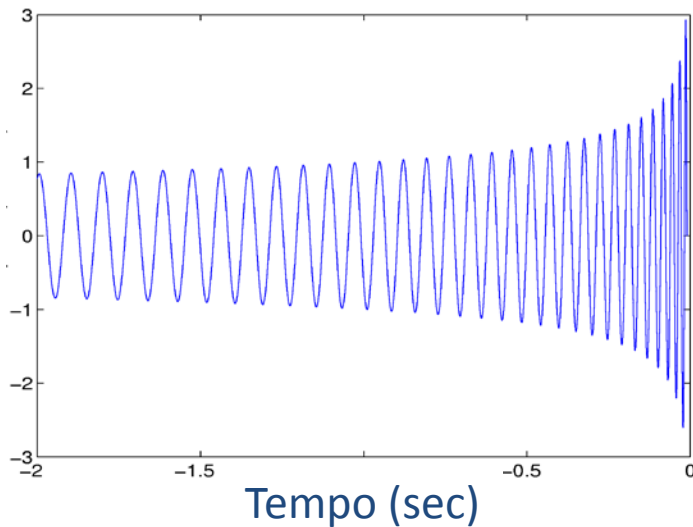
È come provare a riconoscere una canzone in una festa molto chiacchiosa

# COSA VEDONO I RIVELATORI ?

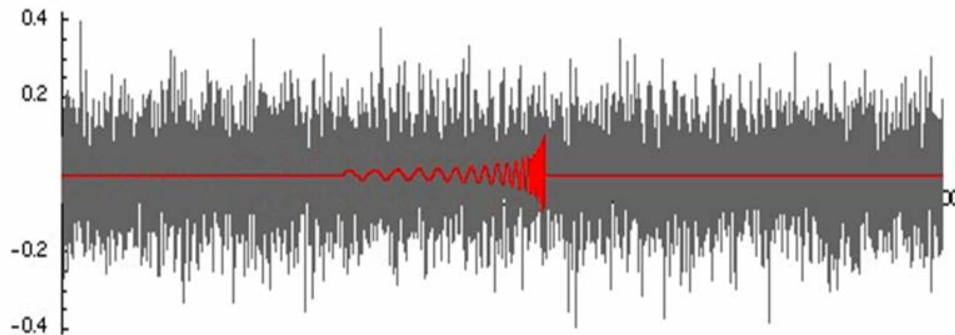
**SORGENTE**



**ONDA GRAVITAZIONALE**



**RIVELATORE**



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

# LA RICERCA DEL SEGNALE



I rivelatori registrano i dati



I programmi analizzano i dati



**minuti/ore**

Eventuali candidati inviati ai telescopi



**giorni/mesi**

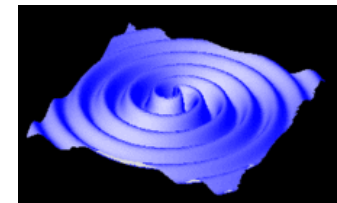
Verifica significanza dei candidati



Rumore



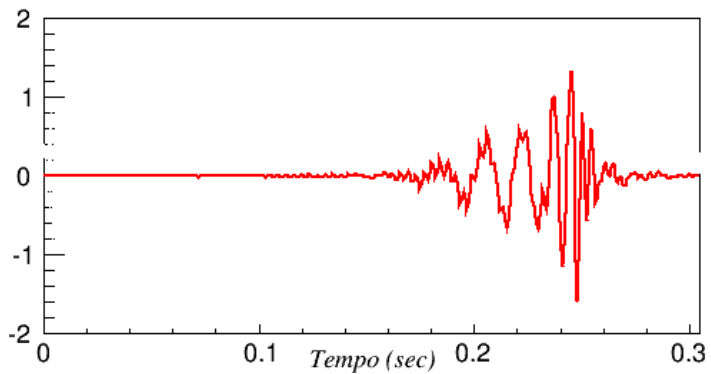
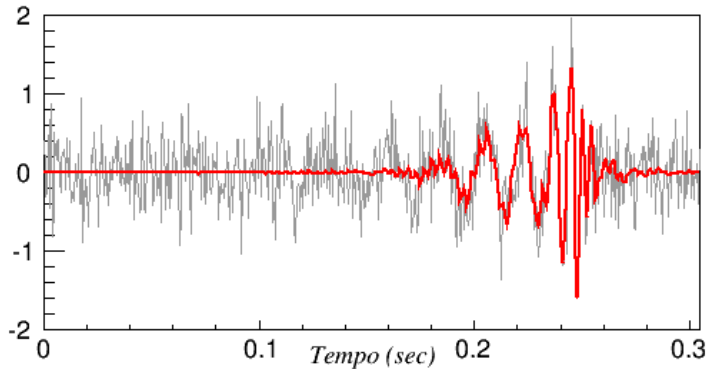
Segnale



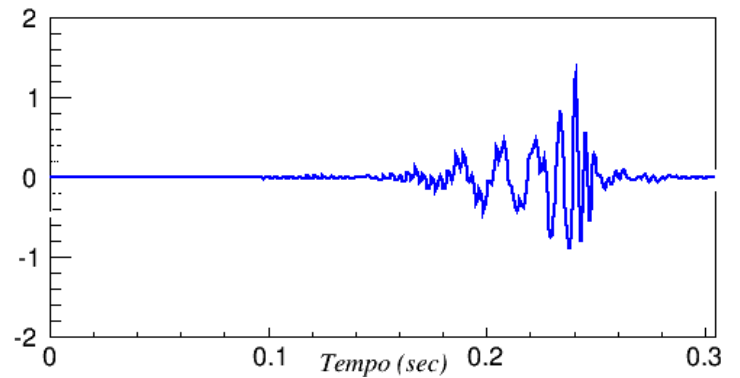
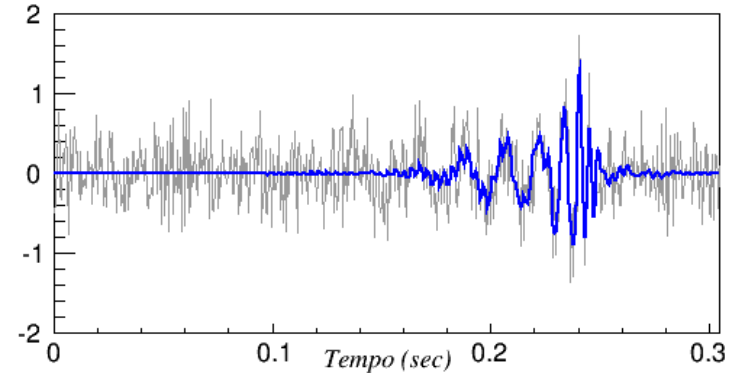
# IL SEGNALE È NASCOSTO NEL RUMORE DOBBIAMO SEPARARE IL SEGNALE DAL RUMORE



**LIGO HANFORD**

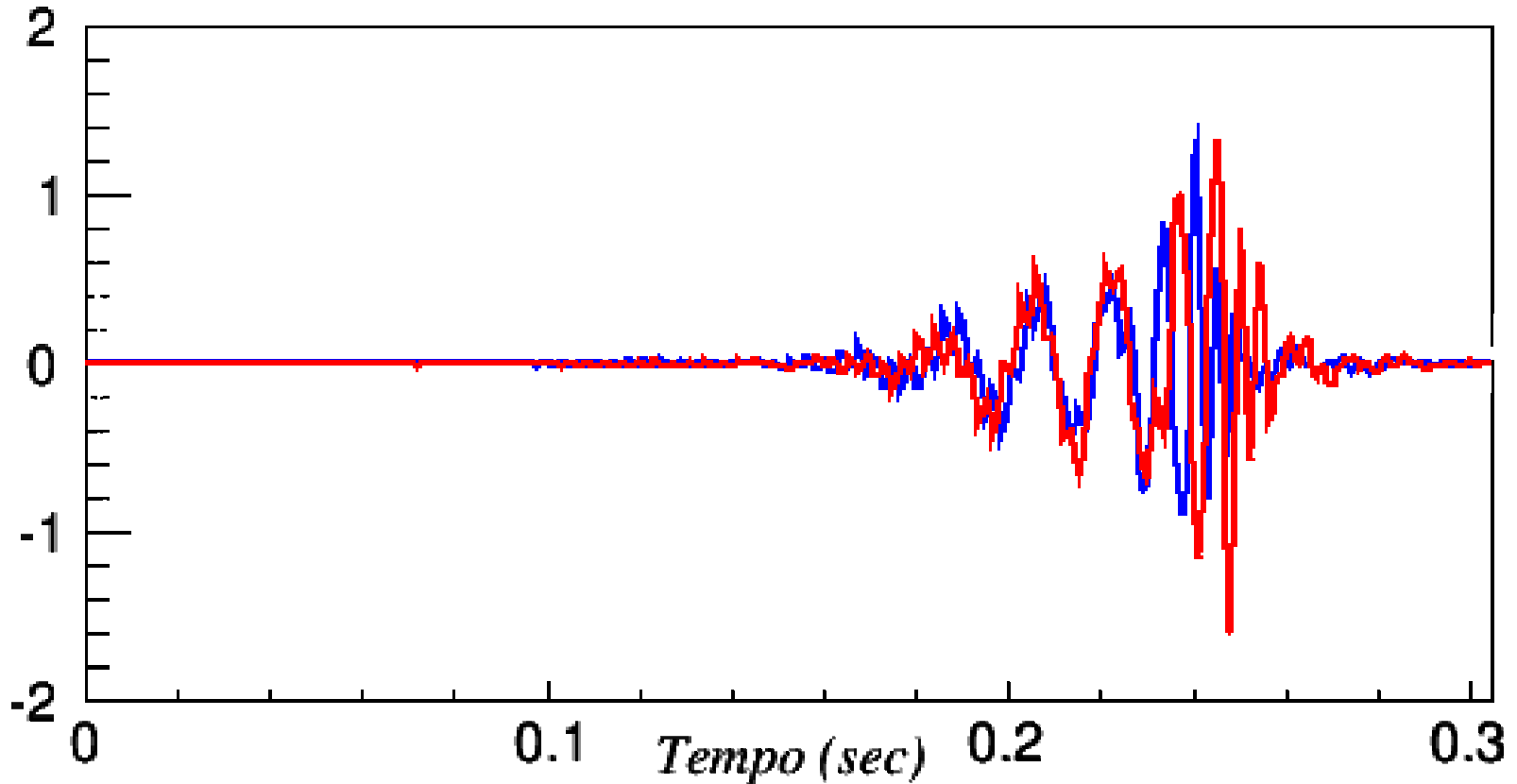


**LIGO LIVINGSTONE**



# I SEGNALI DEI DUE RIVELATORI SONO UGUALI ?

Sovrapponiamo il segnale in **LIGO HANFORD**  
a quello di **LIGO LIVINGSTONE**



**I segnali coincidono solo parzialmente**

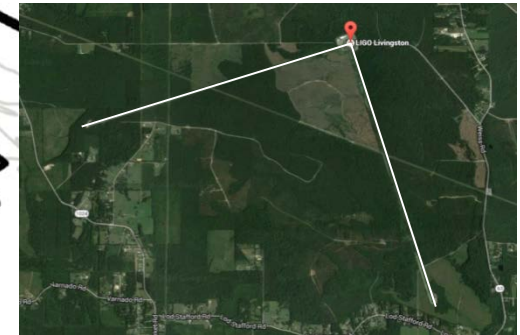
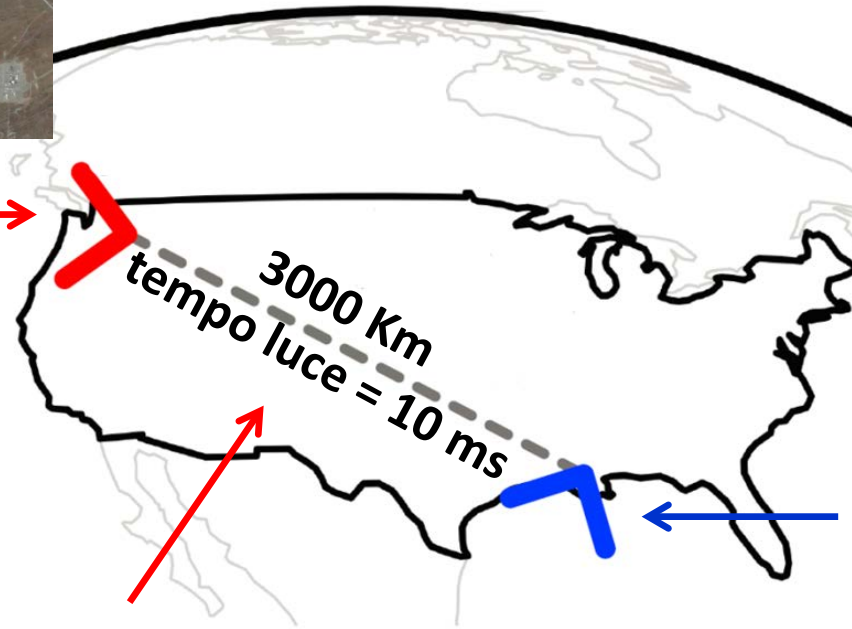
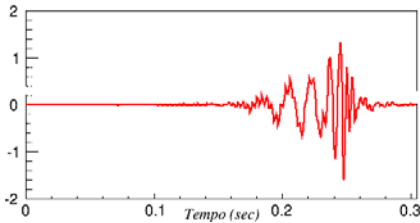


# I SEGNALI DEI DUE RIVELATORI SONO UGUALI ?

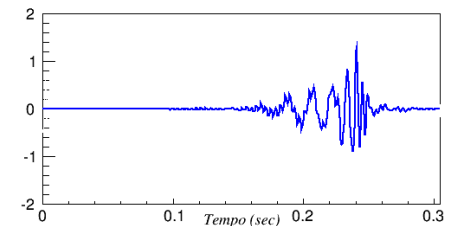
Il segnale in **LIGO HANFORD** ha segno opposto perchè il rivelatore è ruotato di 90 gradi rispetto a **LIGO LIVINGSTONE**



**LIGO HANFORD**



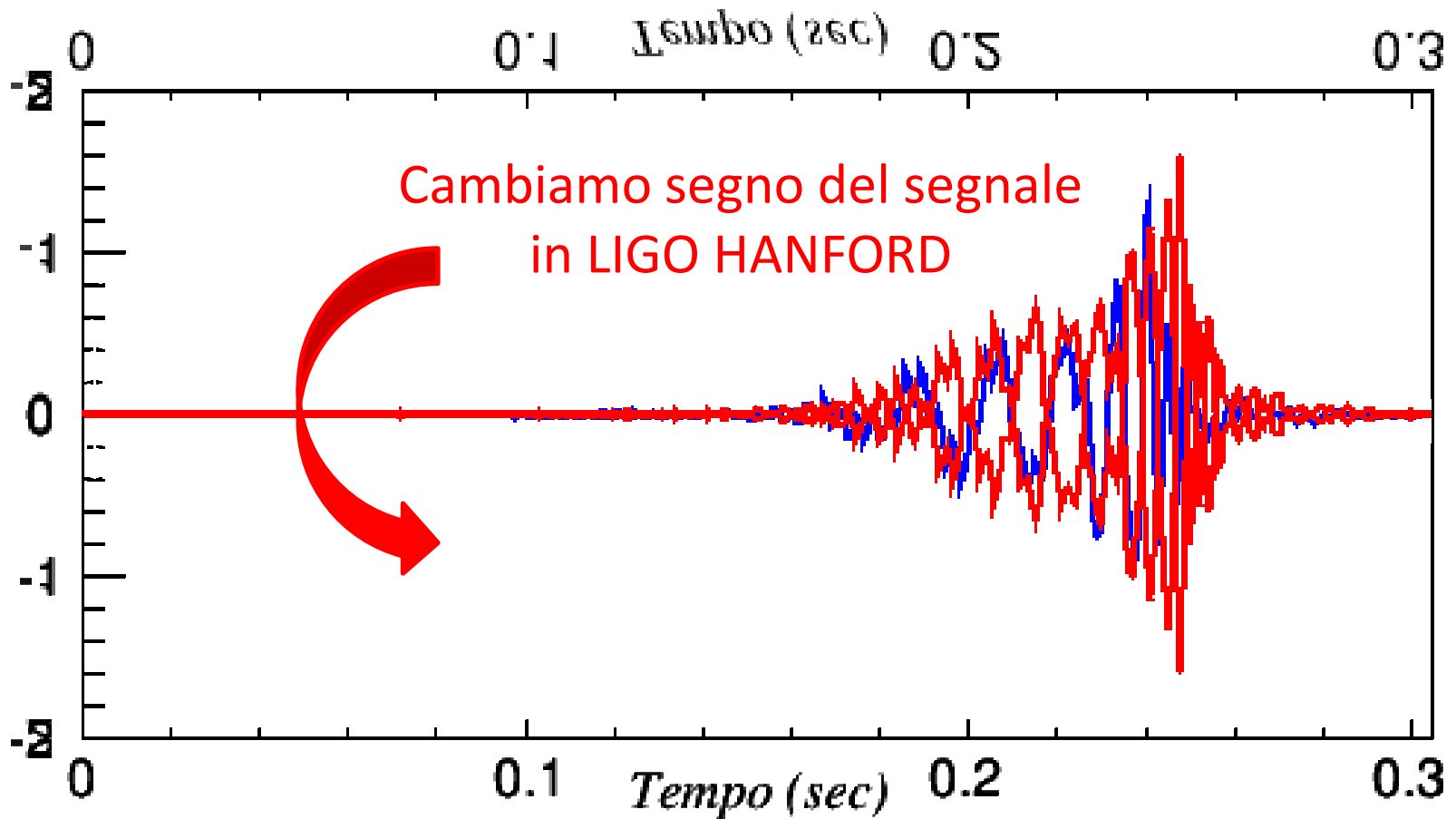
**LIGO LIVINGSTONE**



Il segnale in **LIGO HANFORD** è arrivato 7 millisecondi dopo rispetto a **LIGO LIVINGSTONE**

# I SEGNALI DEI DUE RIVELATORI SONO UGUALI ?

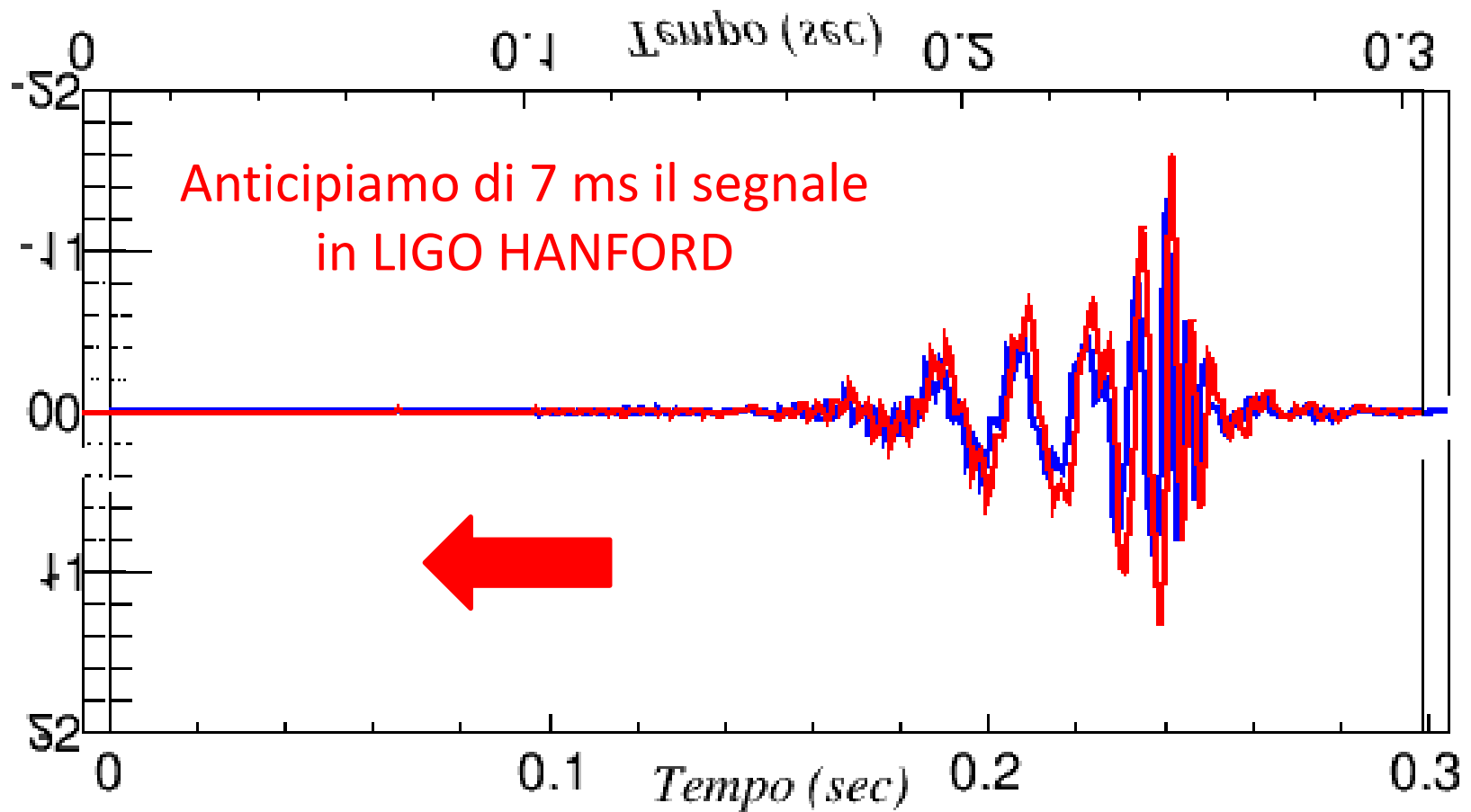
Il segnale in **LIGO HANFORD** viene visto con il segno opposto perchè il rivelatore è ruotato di 90 gradi rispetto a **LIGO LIVINGSTONE**



**I segnali non coincidono**

# I SEGNALI DEI DUE RIVELATORI SONO UGUALI ?

Il segnale in **LIGO HANFORD** arriva 7 millisecondi dopo  
rispetto a **LIGO LIVINGSTONE**

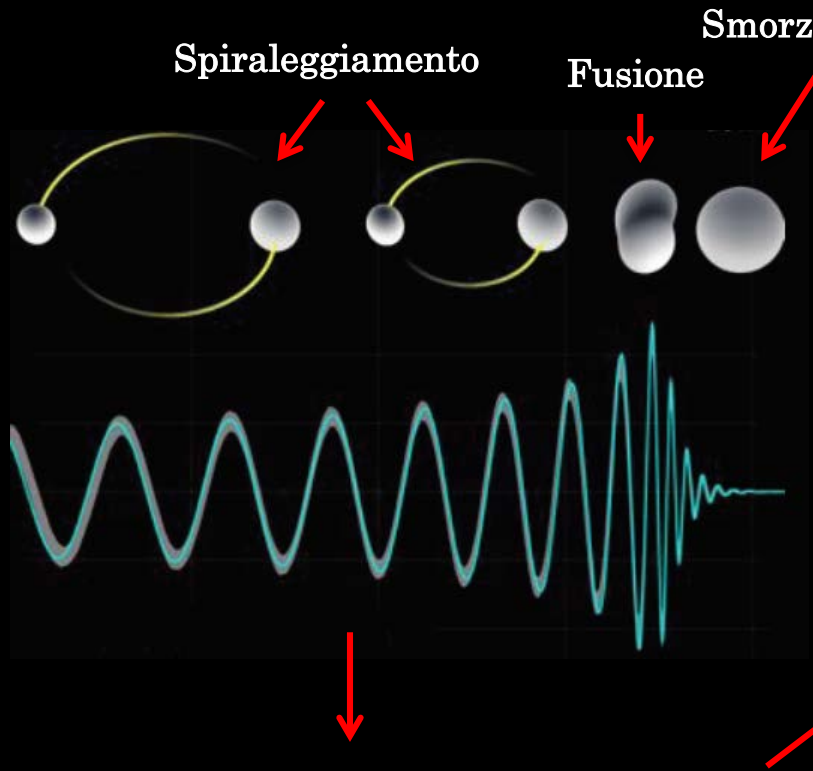


**I segnali coincidono !!!**

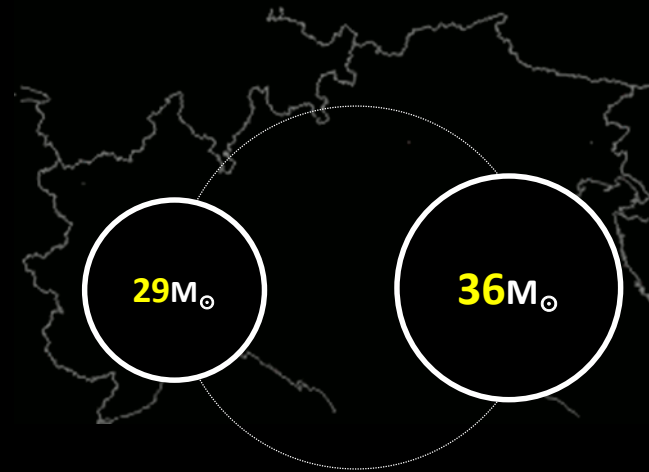
# GW150914 IL SEGNALE

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

# 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 : È DI ORIGINE ASTROFISICA ?

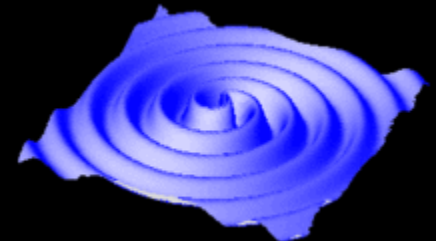
Può l'evento essere dovuto ad un rumore ambientale  
o ad un eccesso di rumore strumentale ?



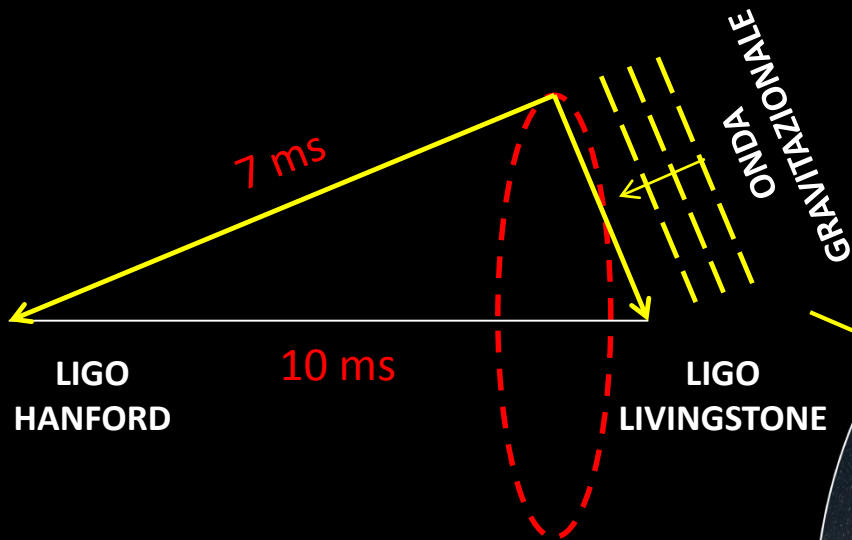
E' stato stimato che la probabilità  
che l'evento sia dovuto al rumore è  
**minore di 1 su 203000 anni di osservazione**



**Il segnale è di origine astrofisica →**



# DA DOVE VIENE ?

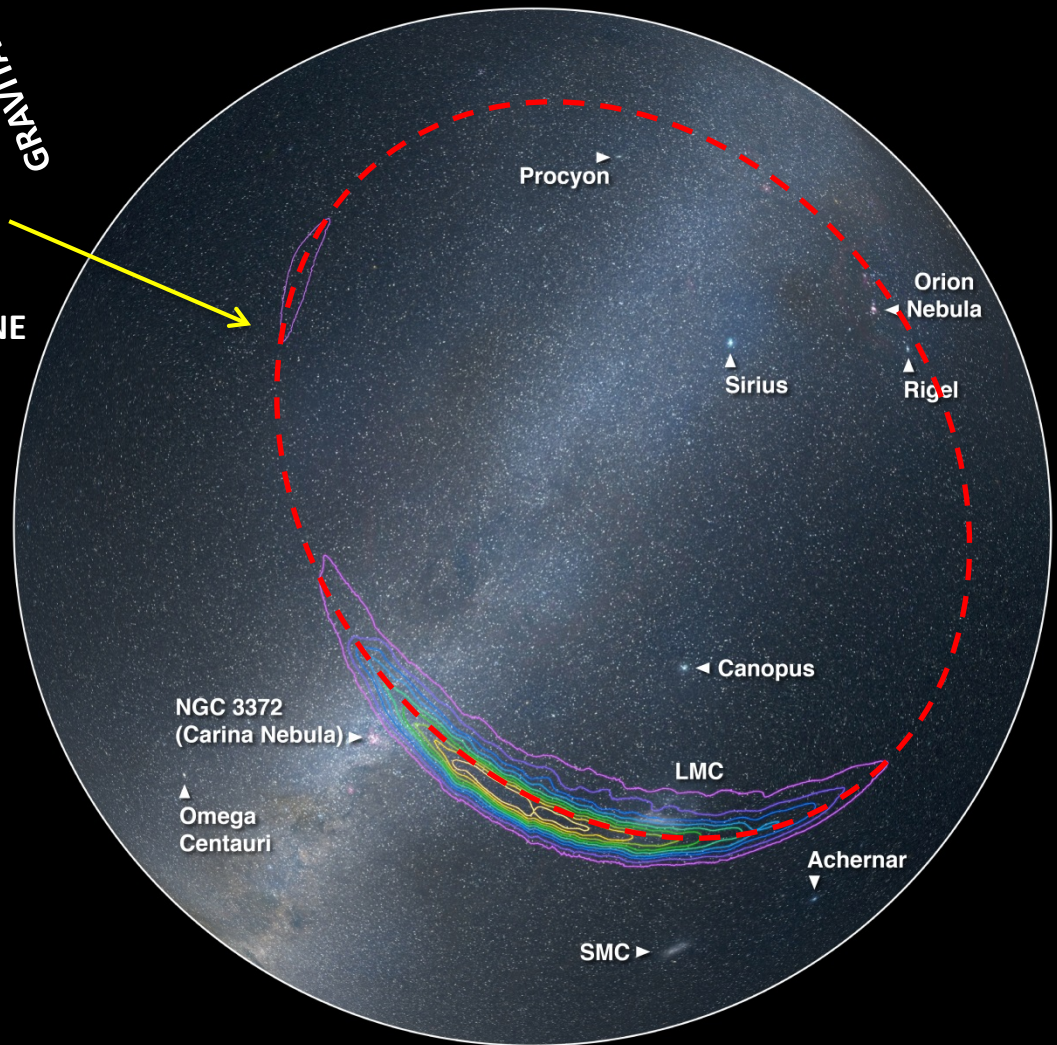


La posizione della sorgente viene determinata usando la differenza di arrivo (triangolazione) e le informazioni sulla fase e ampiezza del segnale

Con solo due rivelatori la localizzazione non è molto accurata

140 deg<sup>2</sup> a 50% probabilità

590 deg<sup>2</sup> a 90% probabilità





# QUANTO DISTA ?

14 Settembre 2015

4.5 h prima

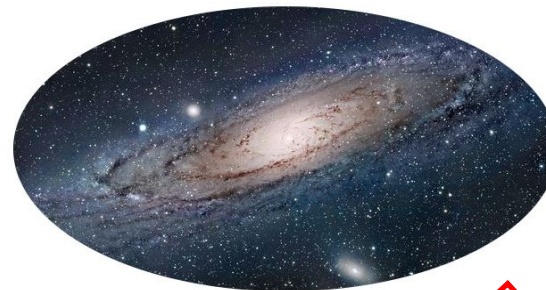
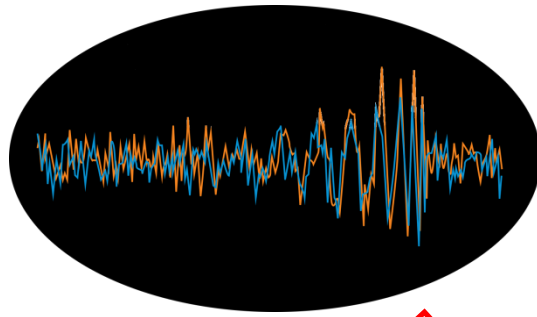
Il segnale e' entrato  
nel sistema solare

50000 anni prima

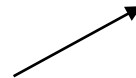
Il segnale entra nella nostra  
galassia 33000 Parsec

1.3 miliardi anni prima

Il segnale si genera a  
400 milioni di Parsec  
di distanza



LIGO ascolta



L'uomo moderno  
appare in Europa e in Italia

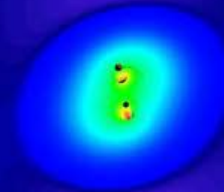
Comparsa delle prime forme  
di vita sulla Terra



# ... SIMULIAMO L'EVENTO



-0.76s



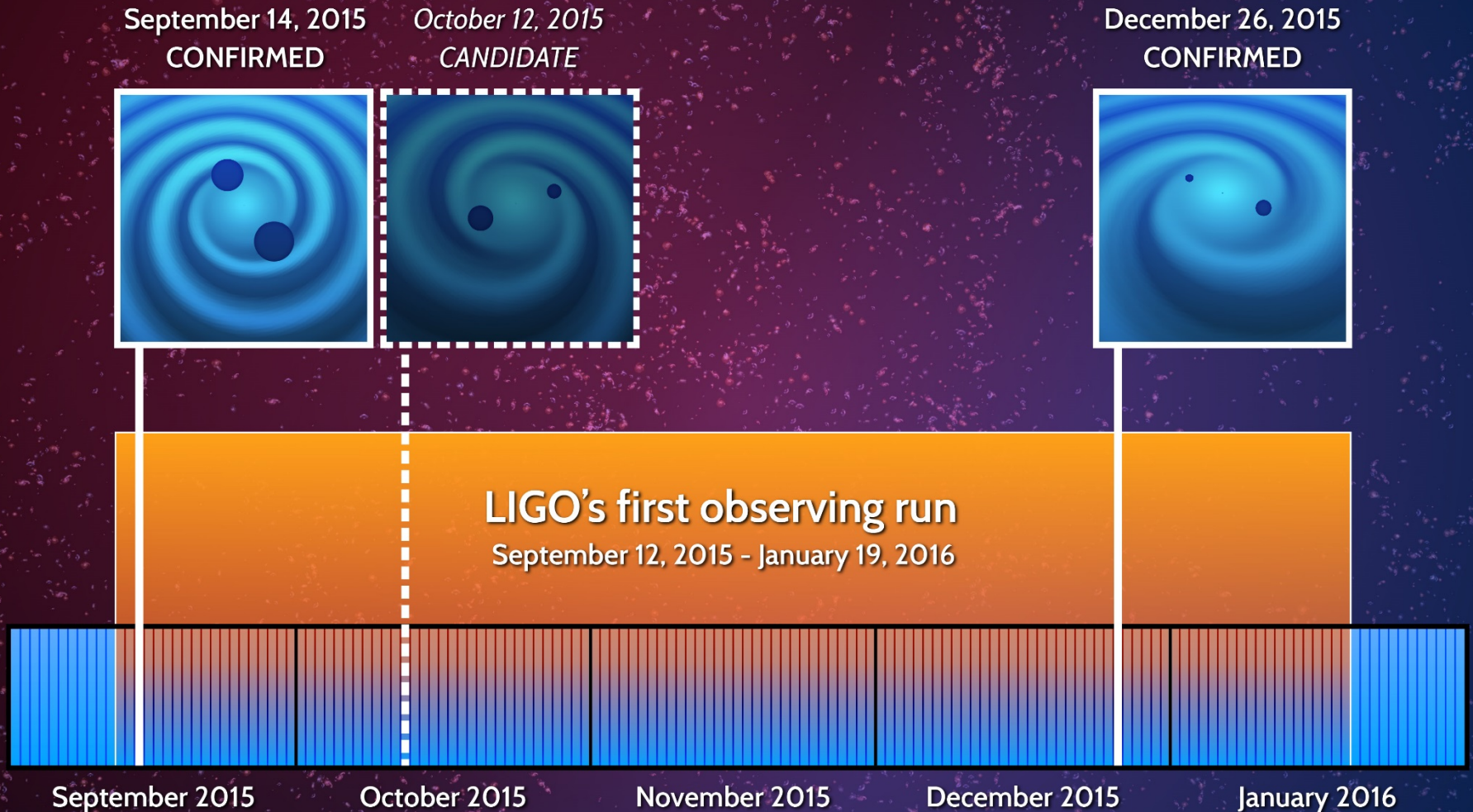
Numerical relativity simulation  
(SXS Collaboration, <http://www.black-holes.org/gw150914>)



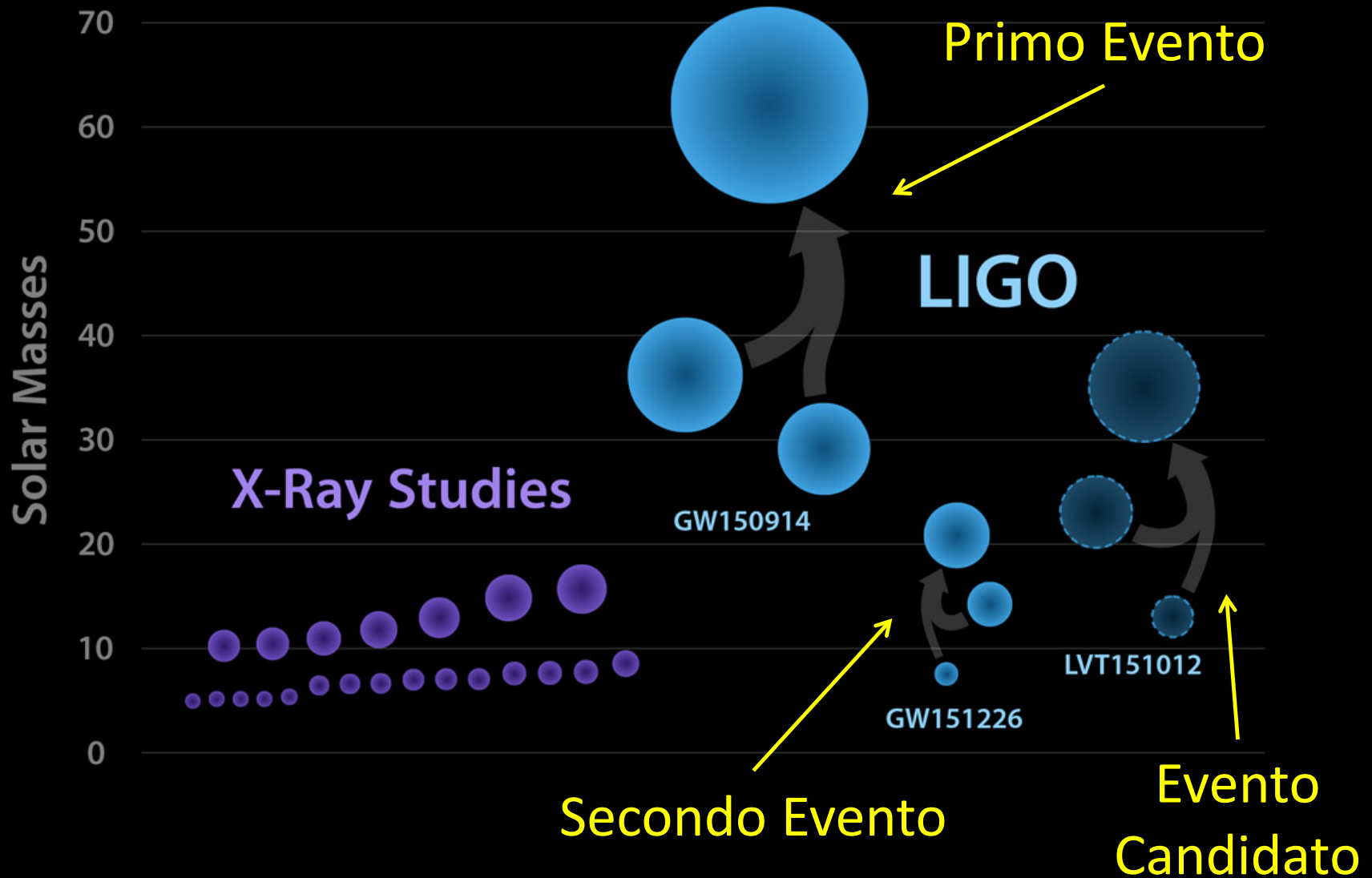
# PERCHÈ QUESTA È UNA SCOPERTA IMPORTANTE ?

- Il 14 settembre 2015 è stata per la prima volta rivelata direttamente un'onda gravitazionale
- Prima evidenza di buchi neri di origine stellare con massa molto elevata
- Prima evidenza di sistemi composti da due buchi neri
- Verifica della teoria della Relatività Generale in presenza di un forte campo gravitazionale

# Buchi Neri rivelati nel primo run scientifico di LIGO

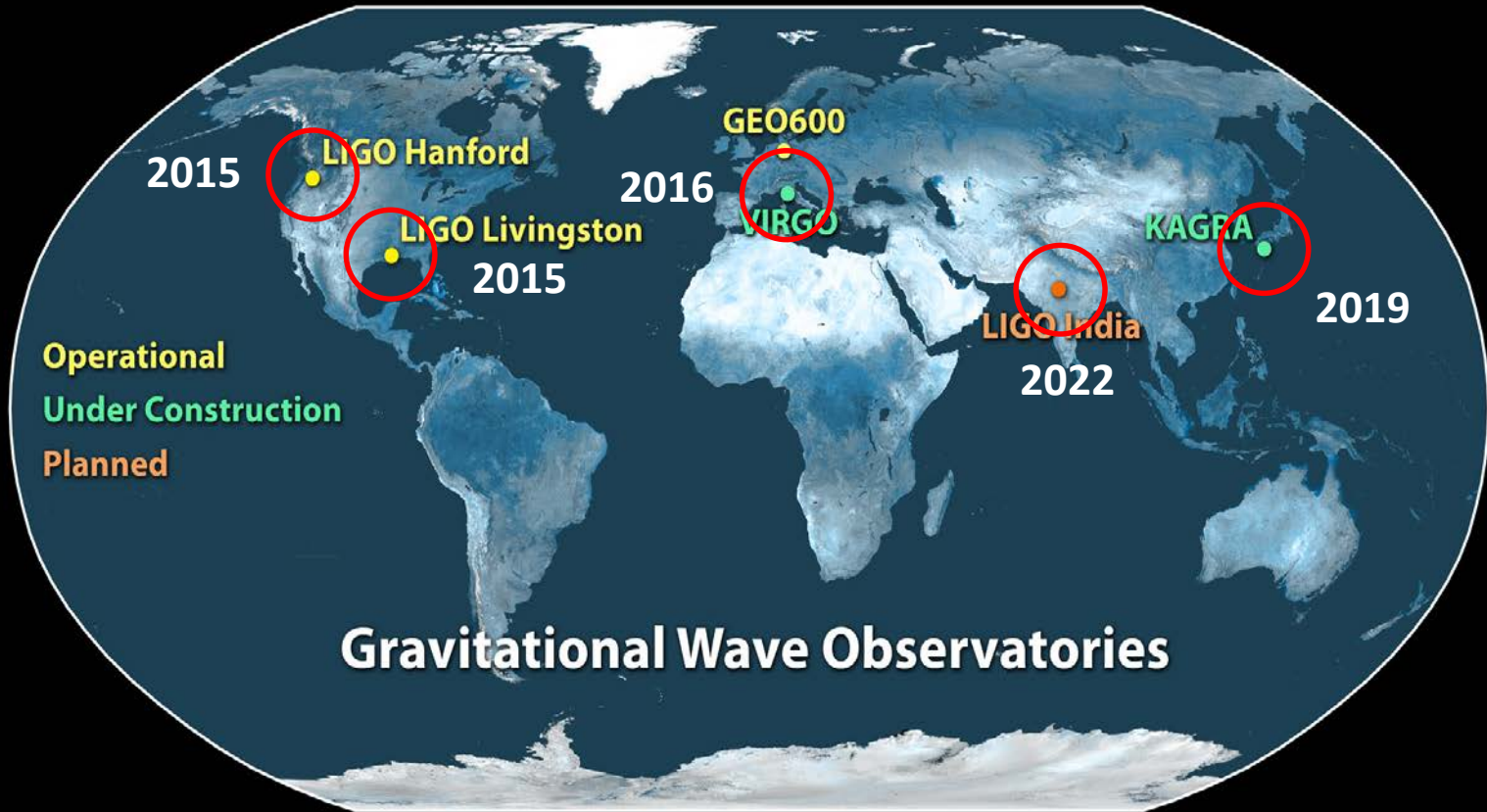


# Buchi Neri di origine stellare conosciuti



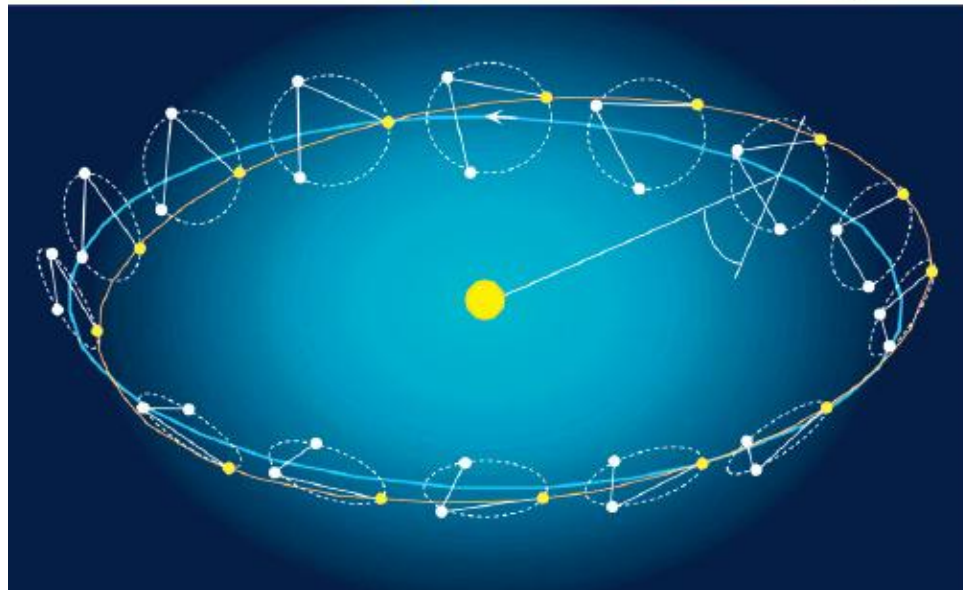
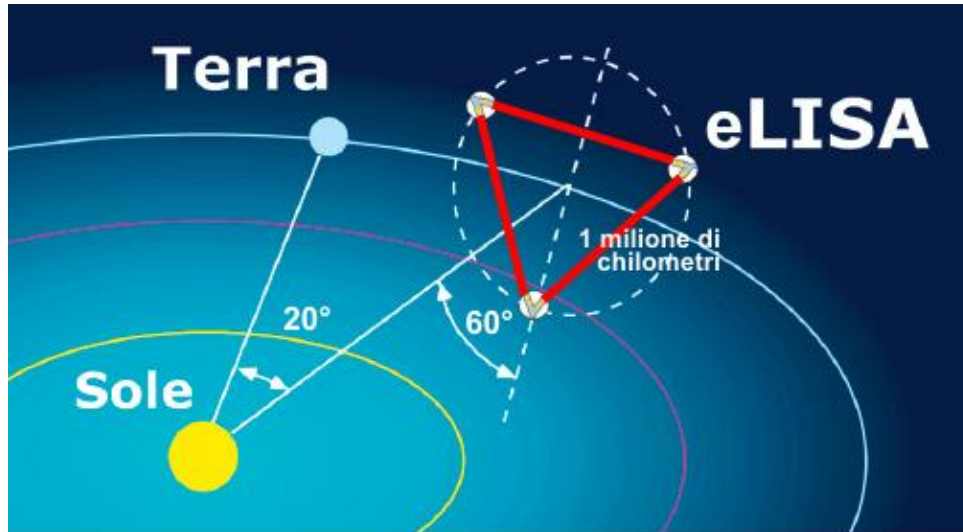
E ORA  
COSA CI ASPETTA ?

# IL FUTURO



Aumenterà la sensibilità e il numero dei rivelatori

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

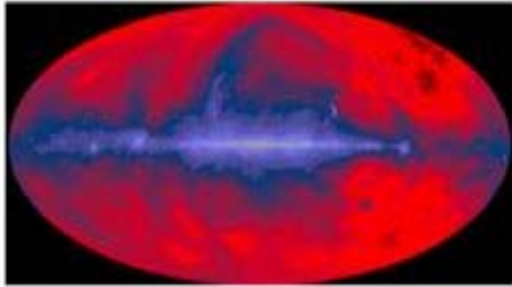


- **eLISA** è un interferometro nello spazio costituito da 3 satelliti alla distanza reciproca di 1 milione di km
- permetterà di vedere le emissioni di centinaia o migliaia di stelle binarie con grande massa a basse frequenze : **0,1 mHz e 1 Hz**
- Il 3 dicembre 2015 è stata lanciata la sonda **PathFinder**.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

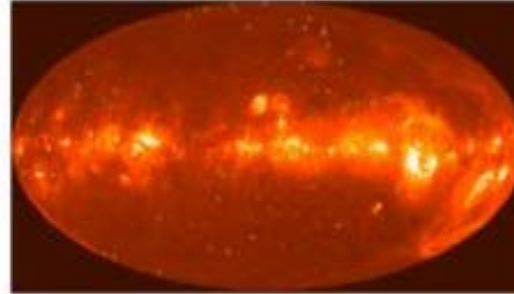


# SI È APERTA UNA NUOVA FINESTRA SULL'UNIVERSO

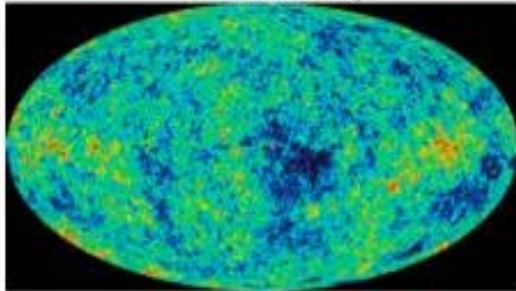
Radio sky



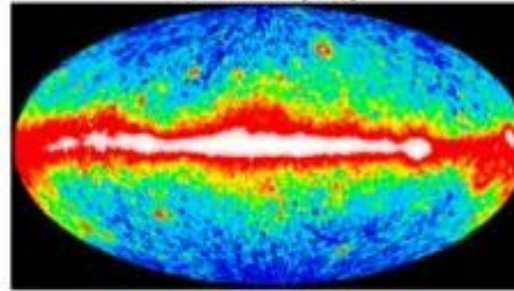
X-ray sky



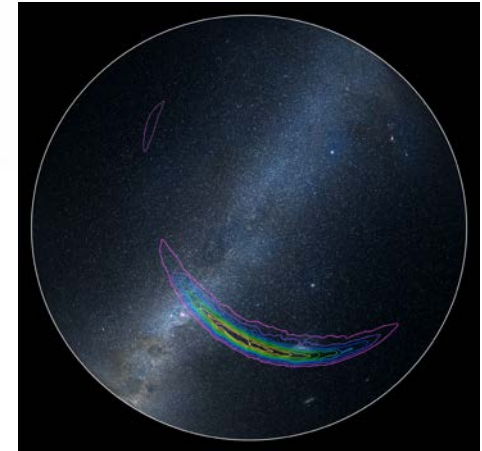
Microwave sky



Gamma-ray sky



Gravitational-wave Sky

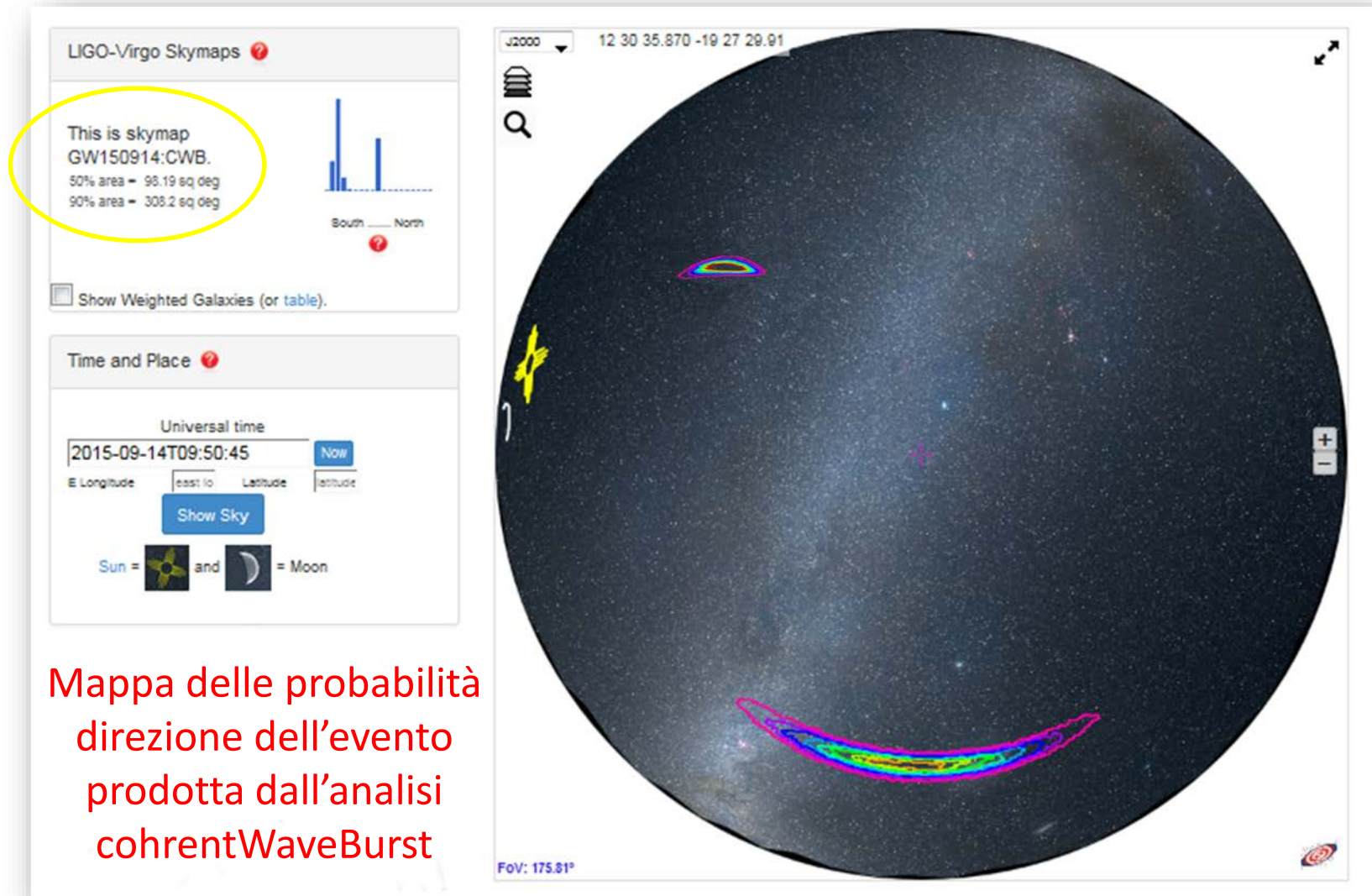


**ONDE ELETTROMAGNETICHE**

**ONDE GRAVITAZIONALI**

Osserveremo altre Onde Gravitazionali  
Fino ad oggi abbiamo VISTO il nostro Universo  
ora possiamo anche SENTIRLO !

# Grazie



Mappa delle probabilità  
direzione dell'evento  
prodotta dall'analisi  
coherentWaveBurst