



Università "Cardinale Giovanni Colombo" - Milano

A.A. 2024 - 2025

Corso di Astrofisica

Docente: **Adriano Gaspani**

Lezione 13

Le Onde Gravitazionali:
increspature nel tessuto dello
Spazio-Tempo

TEORIA DELLA GRAVITAZIONE

“La soluzione del problema della gravitazione non può essere la medesima nella fisica classica e nella teoria della relatività generale”

Equazione del Campo Gravitazionale di Einstein

Equazione del campo gravitazionale

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R = \kappa T_{\mu\nu}$$

Tensore di Einstein

Costante

Tensore di Curvatura (di Ricci Curbastro)

Tensore Metrico

Scalare di Curvatura

Tensore Energia-Impulso

The diagram shows the Einstein field equation $R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R = \kappa T_{\mu\nu}$ centered on a blue background. The left side of the equation is enclosed in a white oval. Arrows point from text labels to each part of the equation: 'Tensore di Einstein' points to the entire left side; 'Costante' points to the Greek letter kappa; 'Tensore di Curvatura (di Ricci Curbastro)' points to $R_{\mu\nu}$; 'Tensore Metrico' points to $g_{\mu\nu}$; 'Scalare di Curvatura' points to R ; and 'Tensore Energia-Impulso' points to $T_{\mu\nu}$.

Equazione del Campo Gravitazionale di Einstein

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}R g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

Geometria
spaziotempo

Materia-energia

Curvatura e gravitazione

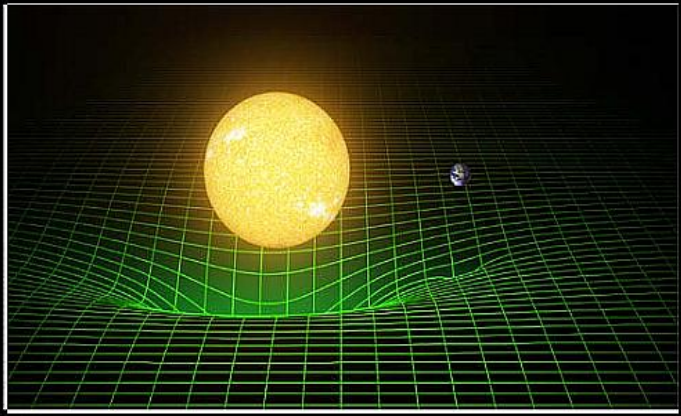
E' quindi la materia, attraverso il campo gravitazionale, a determinare le proprietà geometriche dello spazio e del tempo

Le equazioni di Einstein descrivono come varia la metrica: se conosci come varia, sai anche trovare la metrica stessa, e se conosci la metrica, conosci il moto di tutti i corpi che sono contenuti nello spaziotempo.

LA STORIA

100 anni fa...

1915

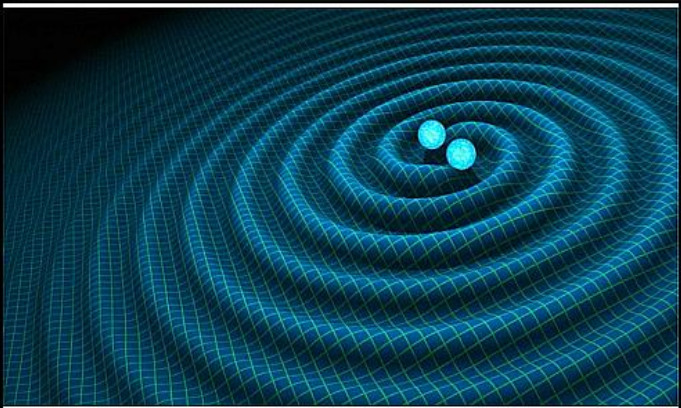


Nasce la **relatività generale**

- 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



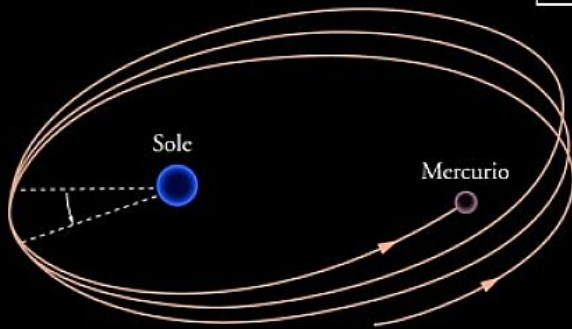
Einstein formula il concetto di **onde gravitazionali**

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

LA STORIA



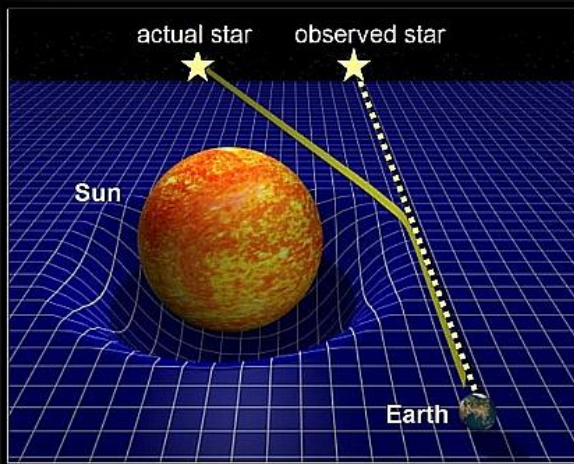
1916



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

osservazione	5600"/secolo
modello 1850's	5557"/secolo
relatività generale	+43"/secolo

1919



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

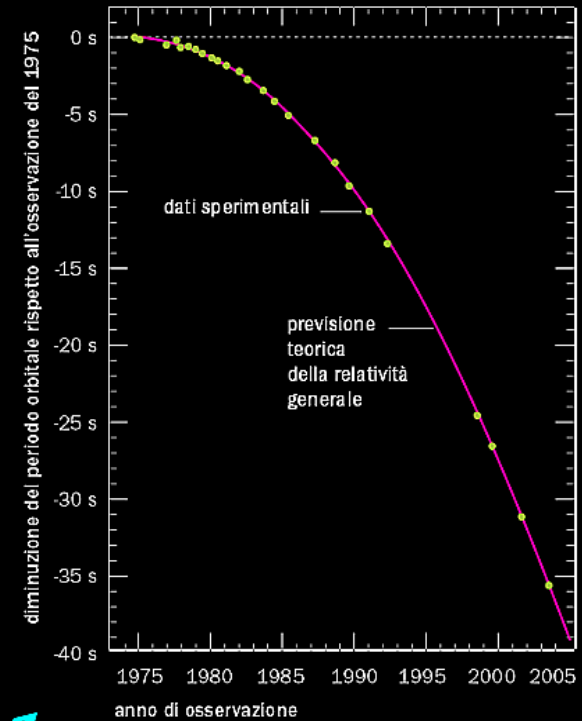
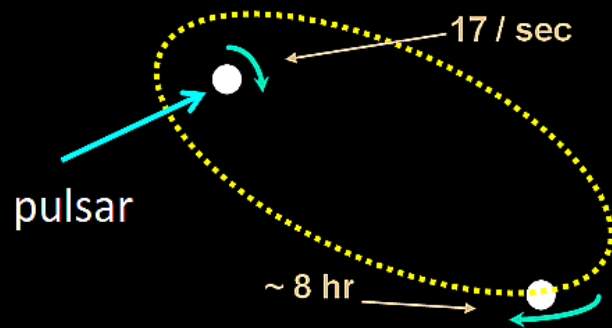
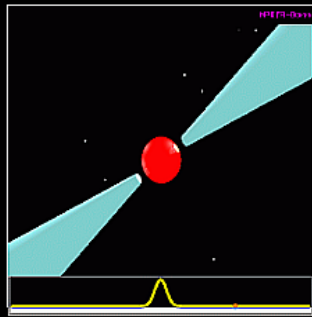


relatività generale +1.8"

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

LA RICERCA INDIRECTA 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

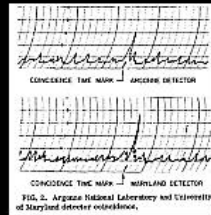
prima prova indiretta dell'esistenza delle onde gravitazionali

A screenshot of the Nobel Prize in Physics 1993 announcement. At the top, it says "The Nobel Prize in Physics 1993" and "Russell A. Hulse, Joseph H. Taylor Jr.". Below this is a "Share this:" section with social media icons. The main title is "The Nobel Prize in Physics 1993". There are two portraits: Russell A. Hulse on the left and Joseph H. Taylor Jr. on the right. Below each portrait, it says "Prize share: 1/2". At the bottom, a quote reads: "The Nobel Prize in Physics 1993 was awarded jointly to Russell A. Hulse and Joseph H. Taylor Jr. 'for the discovery of a new type of pulsar, a discovery that has opened up new possibilities for the study of gravitation'".

LA RICERCA DIRETTA : ANTENNE



Anni 60



Anni 90

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

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

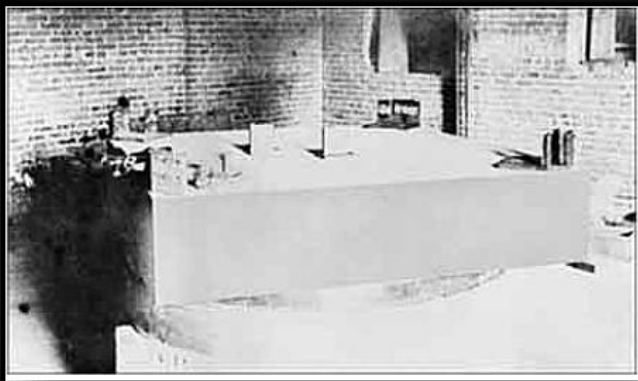


Laboratori Nazionali di Legnaro, Padova



Rete internazionale di rivelatori a barre

LA RICERCA DIRETTA : INTERFEROMETRI



1971

Primo prototipo (2m)

1989

Prima proposta per
LIGO, Virgo

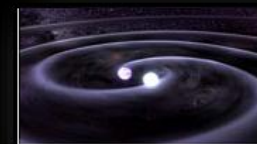
Anni
2000

LIGO & Virgo operativi

2015

LIGO Advanced

Discovery !



2016

Virgo Advanced ?

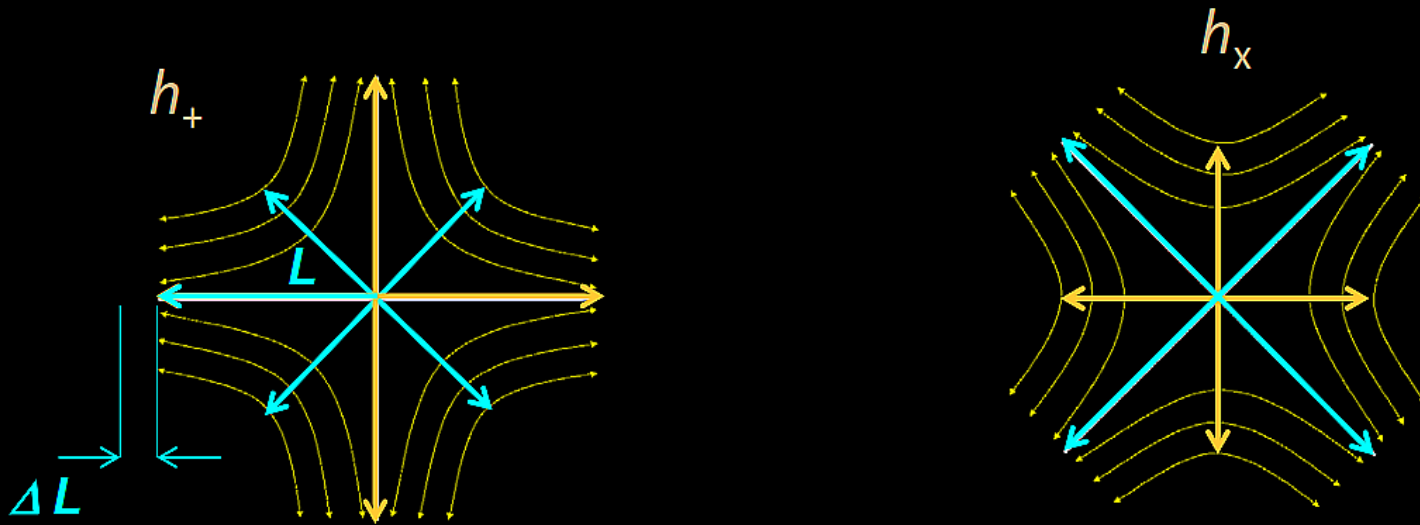


Virgo

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* ΔL proporzionale all'*ampiezza* h
dell'onda e alla *lunghezza* L dell'oggetto

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

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

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

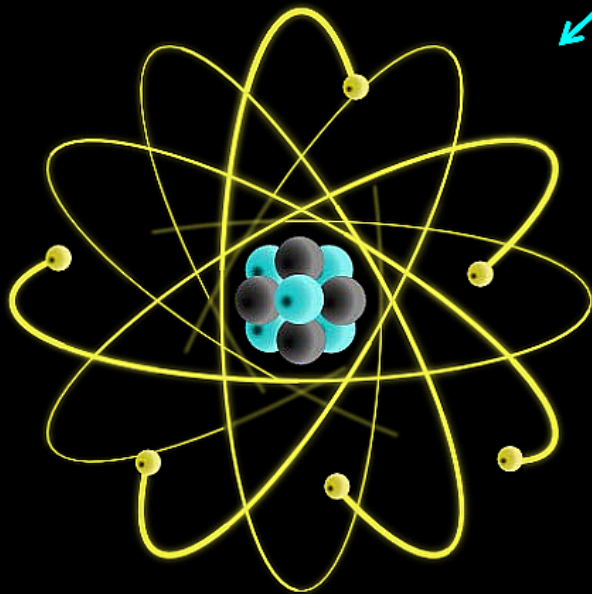
Dobbiamo cercare di misurare una distanza che è 1000 volte più piccola del nucleo di un atomo



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

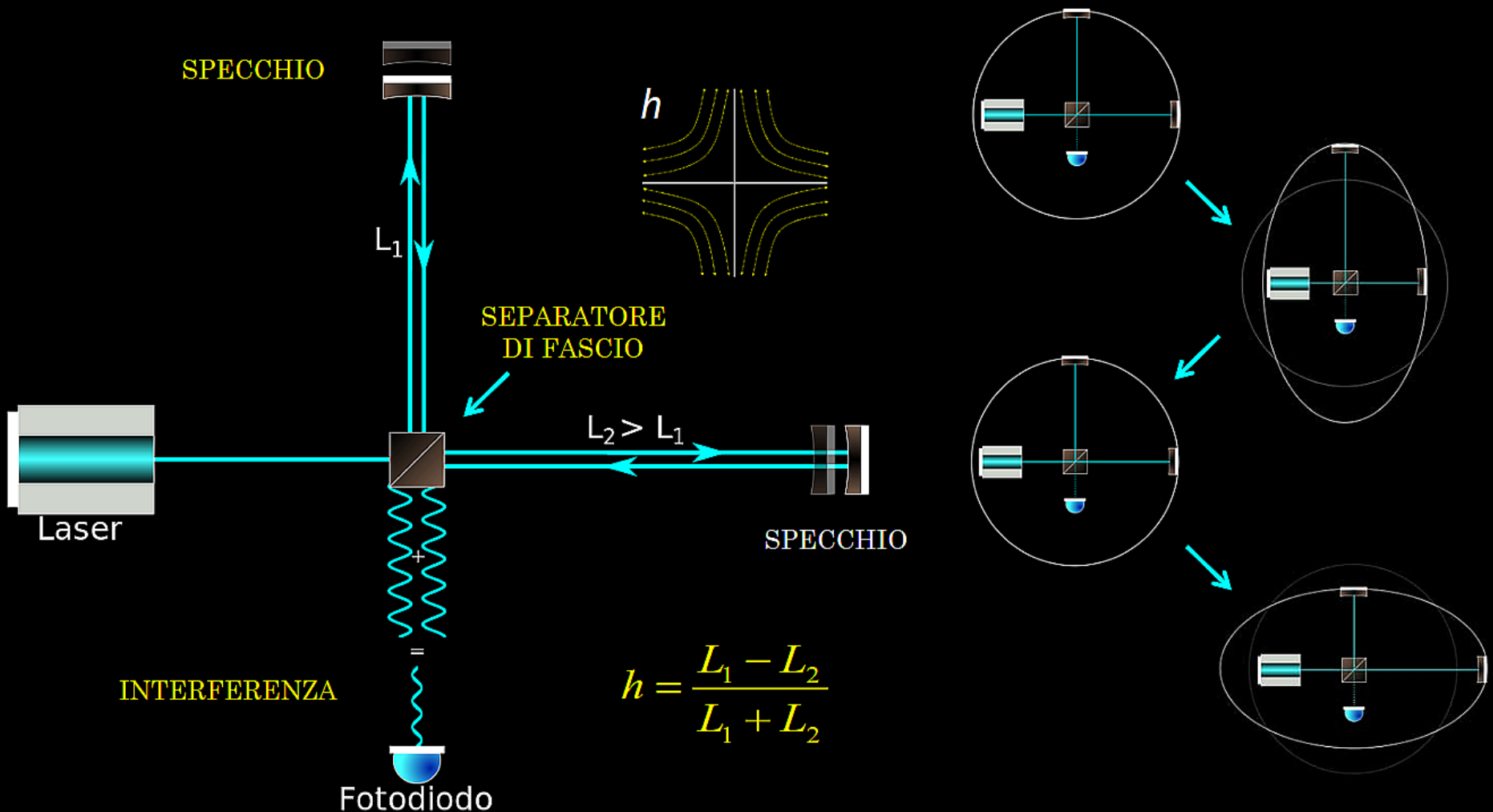


La rivelazione diretta di un'onda gravitazionale è una sfida scientifica e tecnologica formidabile



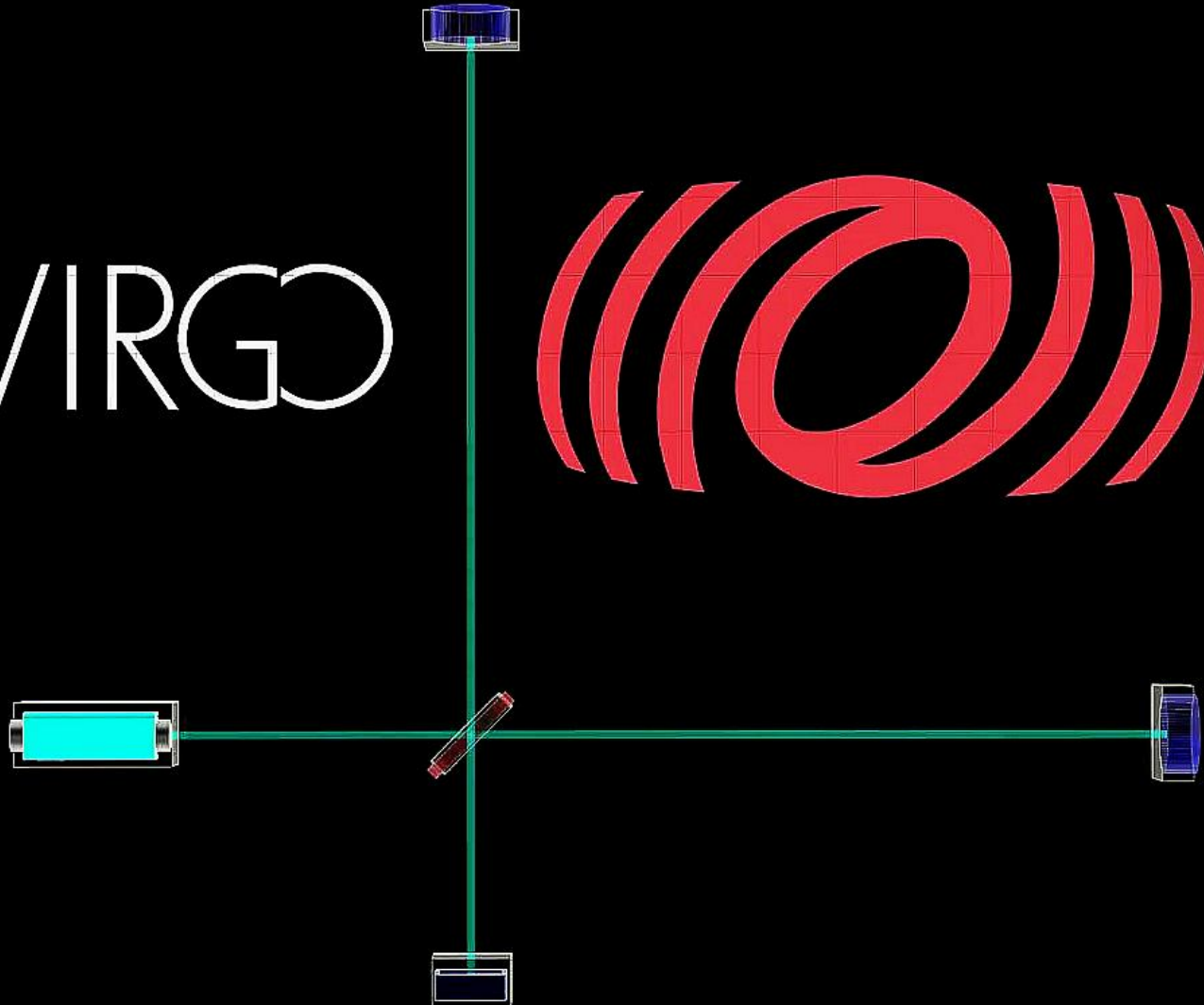
COS'È UN INTERFEROMETRO?

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

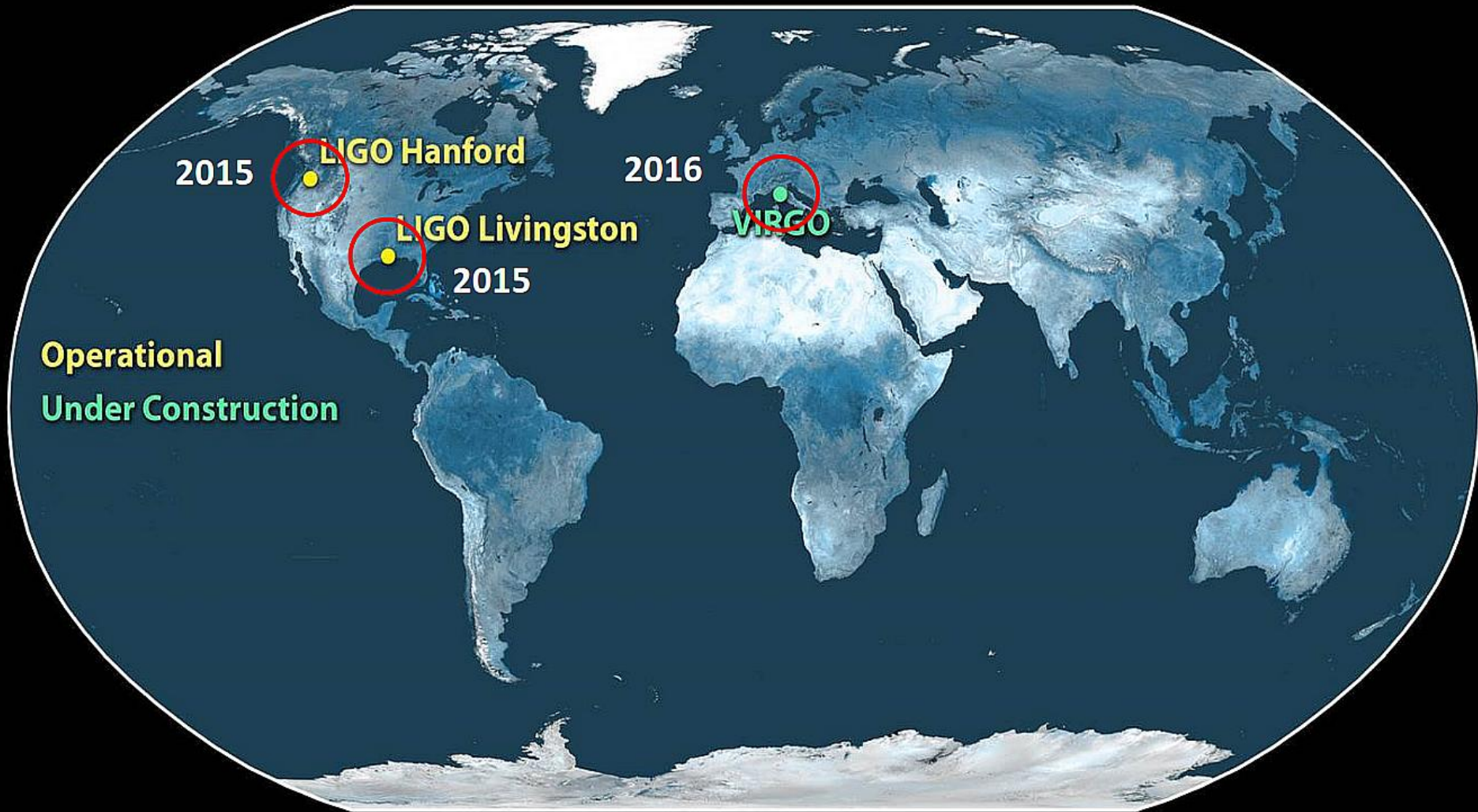


COME FUNZIONA UN INTERFEROMETRO ?

VIRGO



GLI INTERFEROMETRI



LIGO Livingston

Lunghezza = 4+4 Km



LIGO Hanford

Lunghezza = 4+4 Km



VIRGO

Lunghezza = 3+3 Km



COSA CERCHIAMO ?

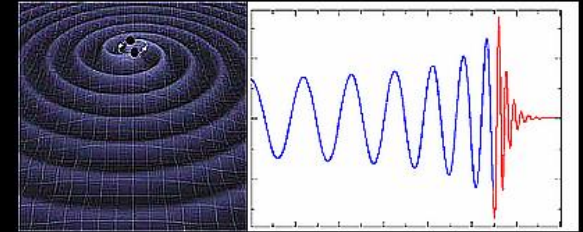
SORGENTI DI ONDE GRAVITAZIONALI

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

- **Collasso di sistemi binari**

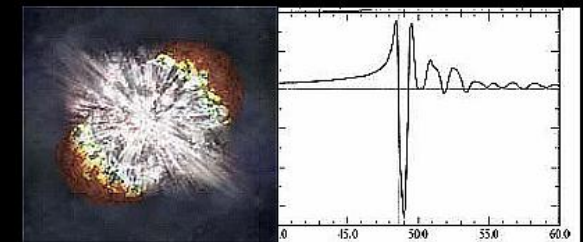
- Stella di Neutroni – Stella di Neutroni
- Stella di Neutroni – Buco Nero
- Buco Nero – Buco Nero

- La Relatività Generale fornisce il modello delle forme d'onda aspettate



- **Collasso di supernova (SN)**

- I modelli delle forma d'onda non ben conosciuti

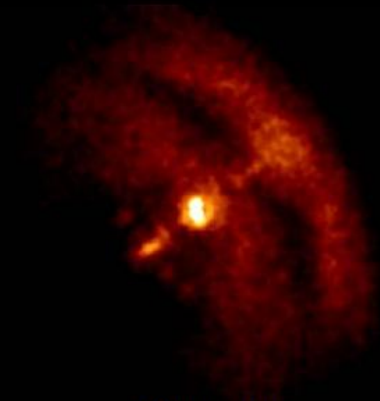


SORGENTI DI ONDE GRAVITAZIONALI

Segnali Continui

- **Stelle a Neutroni (Pulsars)**

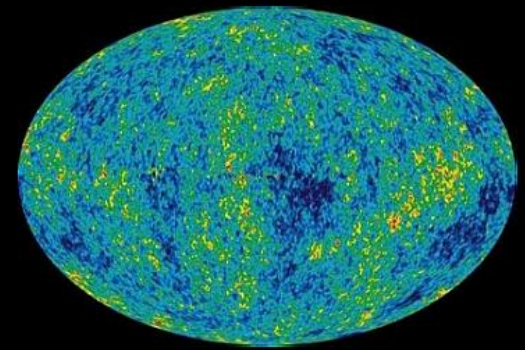
- Oggetti compatti velocemente rotanti con una distribuzione asimmetrica di massa
- La Relatività Generale fornisce il modello delle forme d'onda aspettate



Vela Pulsar

- **Fondo Cosmico
Onde Gravitazionali**

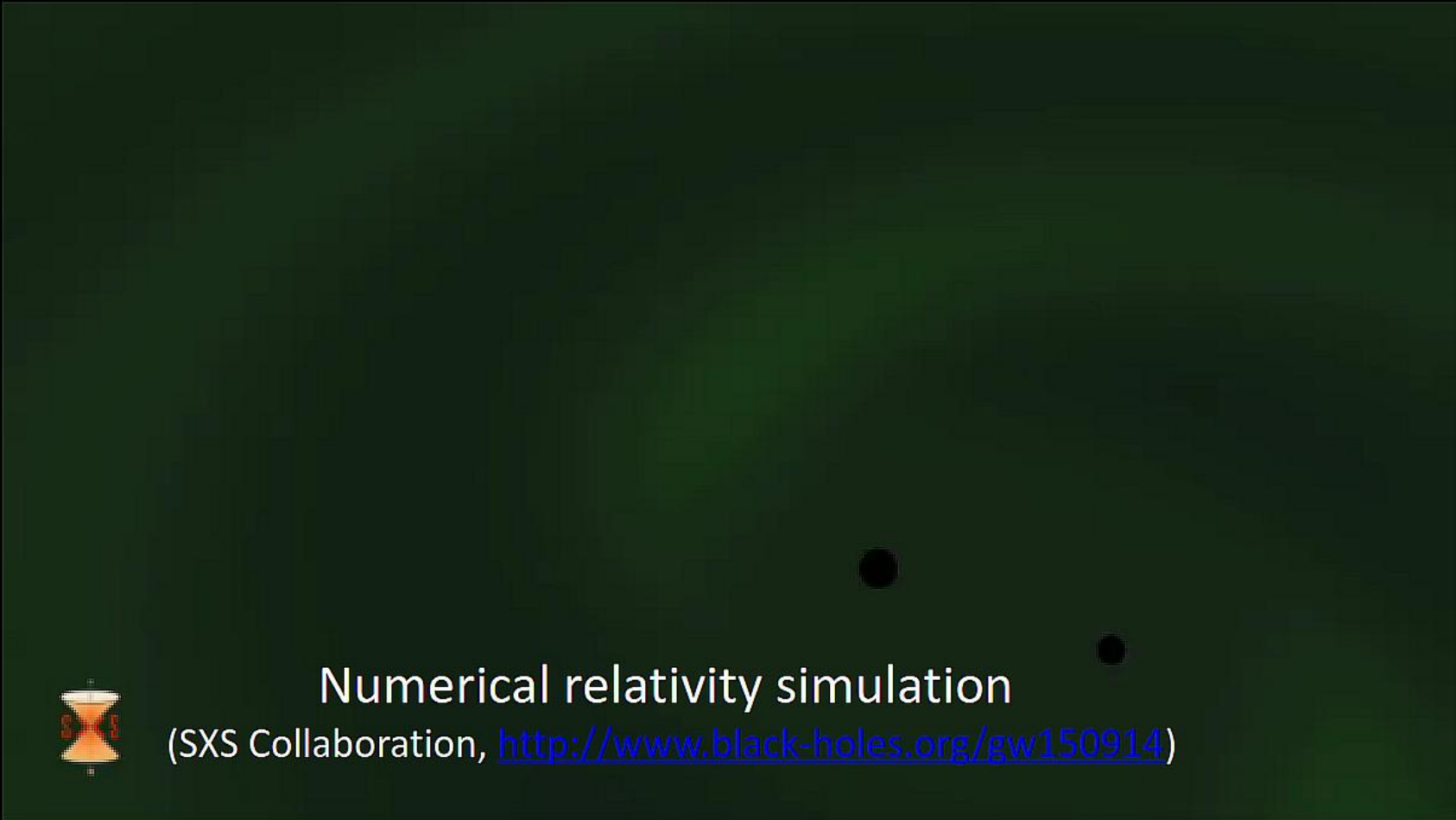
- Residuo del Big Bang
- Fondo incoerente di sorgenti di onde gravitazionali



NASAWMAP Science Team

14 SETTEMBRE 2015
ore 11:51 in Italia
LA SCOPERTA

14 SETTEMBRE 2015 11:51 in Italia

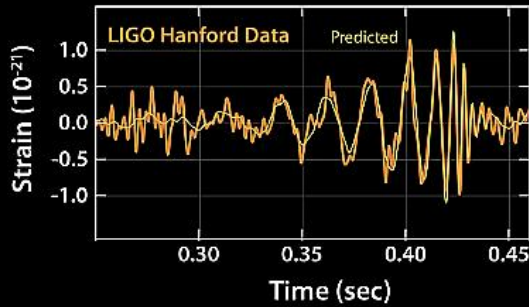


Numerical relativity simulation

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

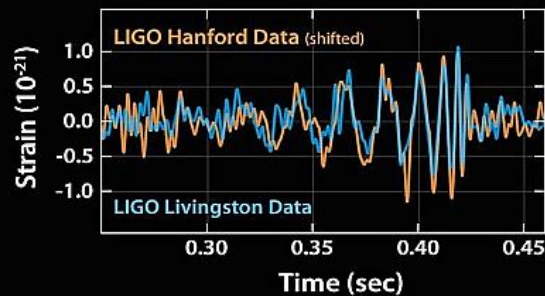
(Beh, in realtà 1.3 miliardi di anni fa)

LIGO VEDE L'EVENTO



7 millisecondi più tardi

I DUE SEGNALI COINCIDONO !



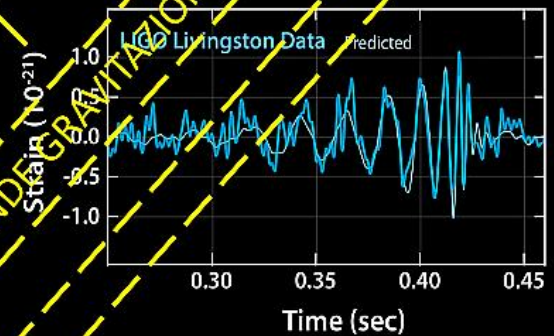
Il segnale di Hanford è spostato di 7msec e cambiato di segno



ONDE GRAVITAZIONALI

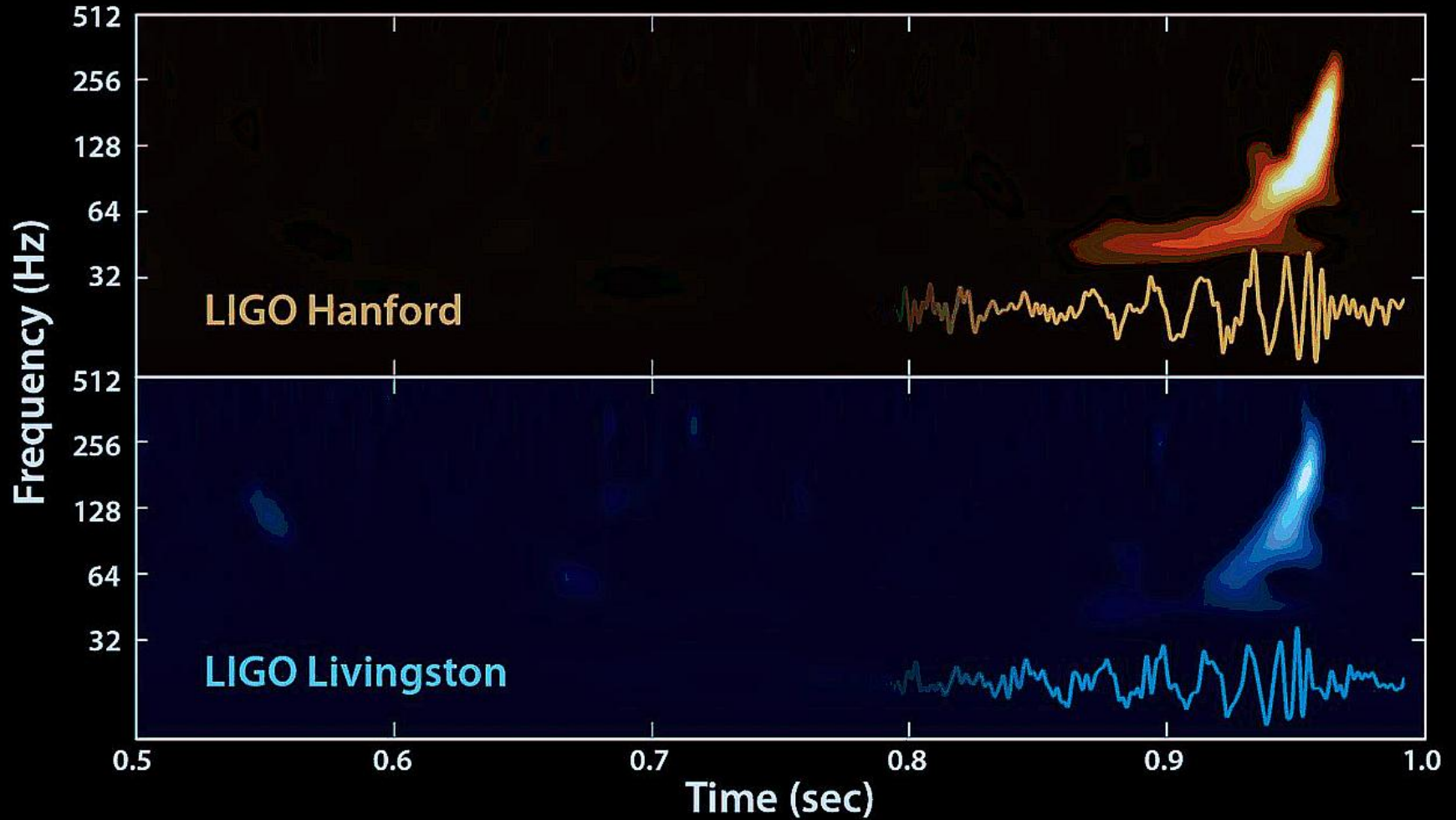
Strain (10^{-21})

This text is written vertically along a set of dashed yellow lines that represent the propagation of gravitational waves across the Earth. The lines are parallel to each other and slanted across the map.



14 SETTEMBRE 2015
Ore 11:51 in Italia

I SUSSURRI DELL'ONDA



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 !

COME SI CERCANO NEI DATI
LE ONDE GRAVITAZIONALI ?

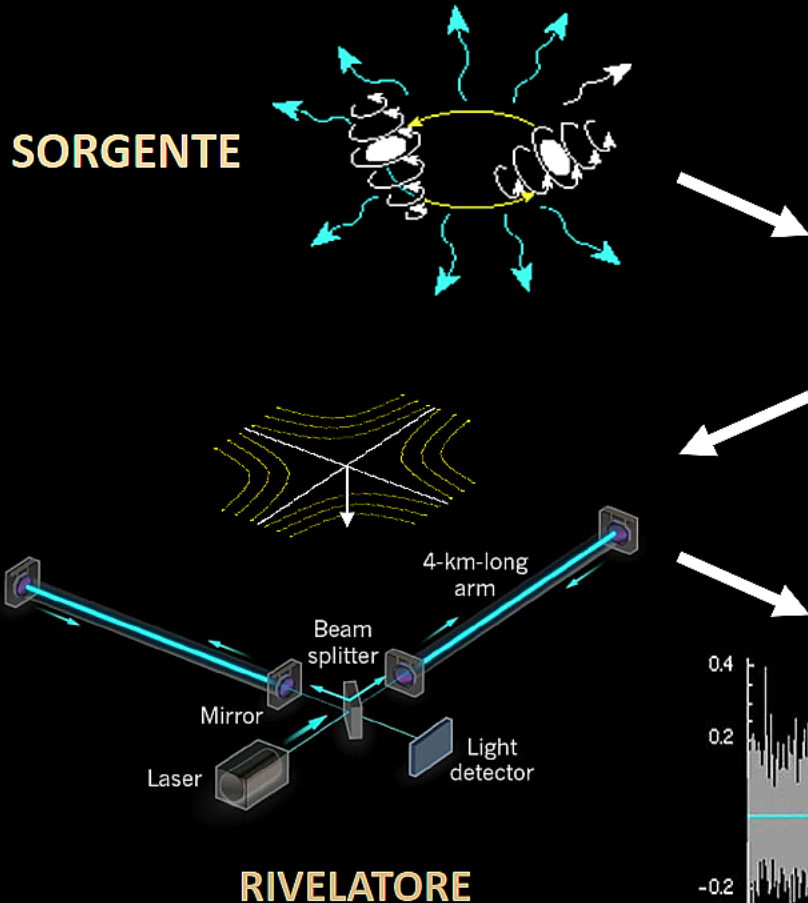
L'effetto di un'onda gravitazionale si confonde talmente bene con il rumore di fondo che c'è bisogno di una tecnica raffinata per analizzare i dati



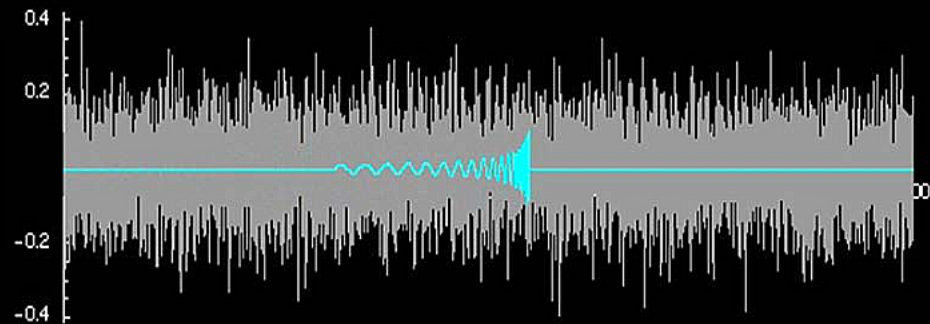
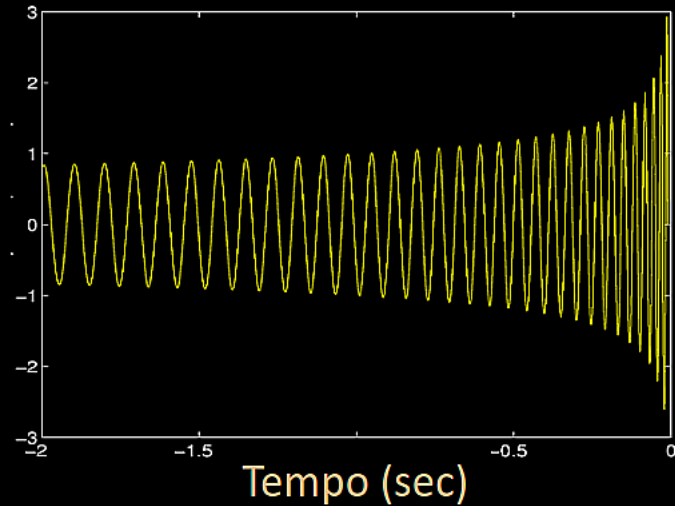
Gli scienziati cercano di identificare le caratteristiche delle onde gravitazionali confrontando i dati misurati nell'esperimento con i segnali che si aspettano dalle onde gravitazionali

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

COSA VEDONO I RIVELATORI ?



ONDA GRAVITAZIONALE



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

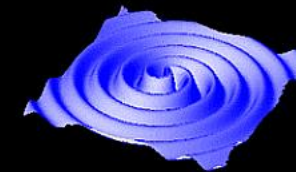
Verifica significanza dei candidati



Rumore



Segnale

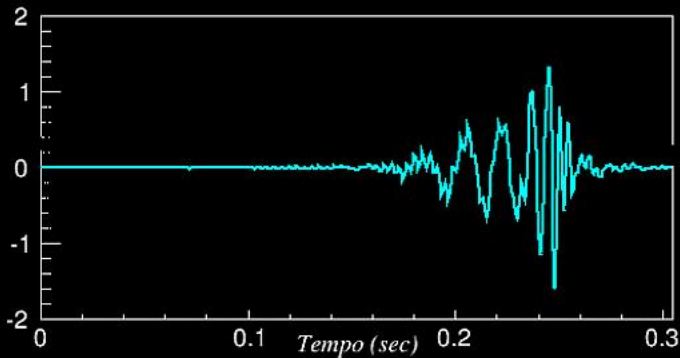
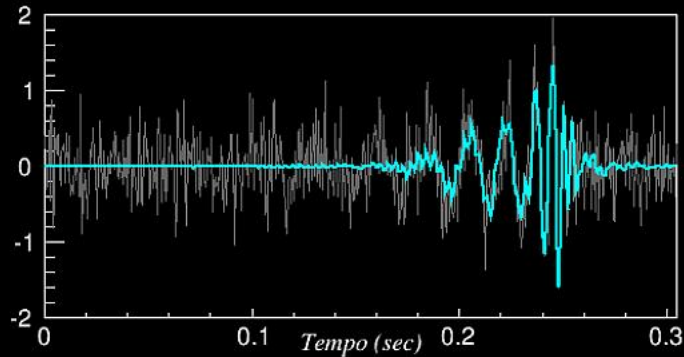


IL SEGNALE È NASCOSTO NEL RUMORE

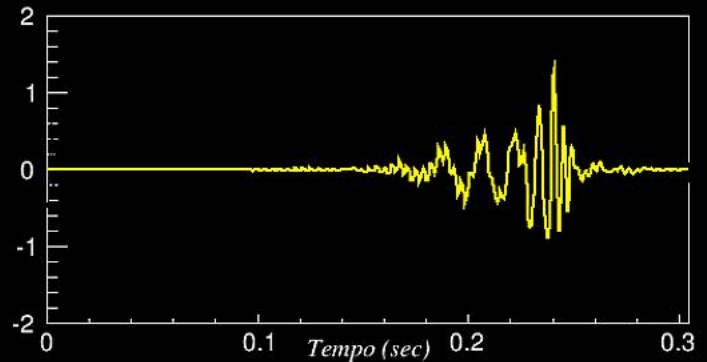
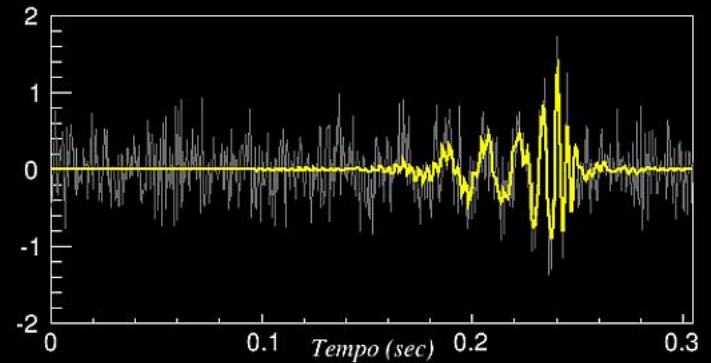
DOBBIAMO SEPARARE IL SEGNALE DAL RUMORE



LIGO HANFORD

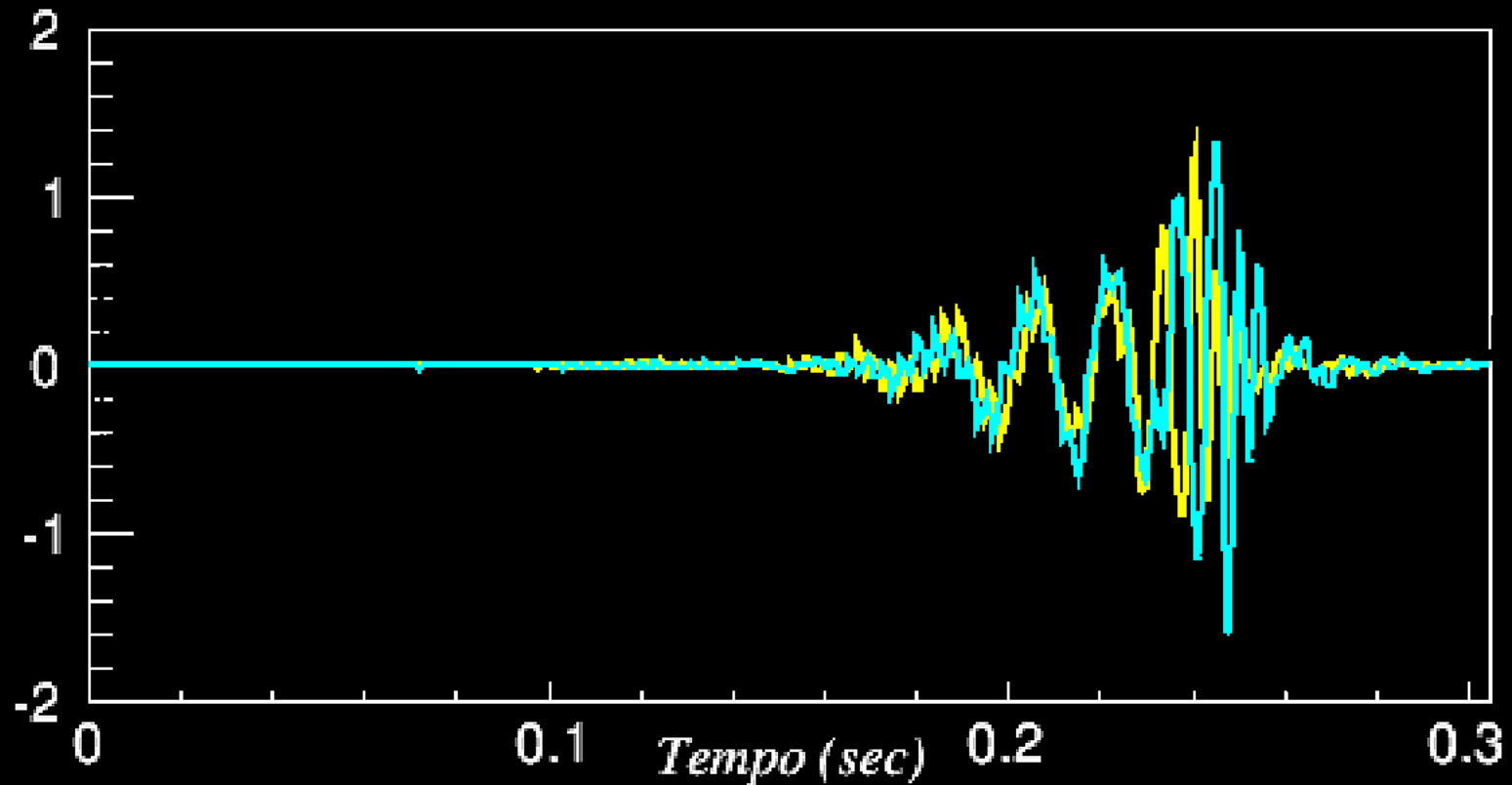


LIGO LIVINGSTONE



I SEGNALI DEI DUE RIVELATORI SONO UGUALI ?

Sovrapponiamo il segnale in LIGO HANFORD
a quello di LIGO LIVINGSTONE



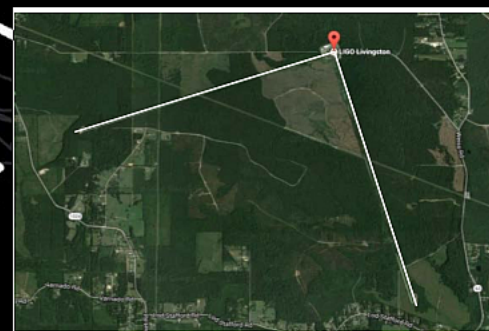
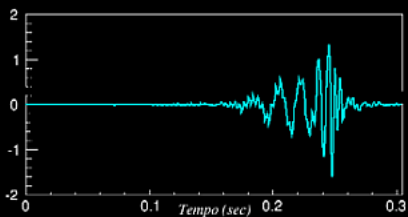
I segnali coincidono solo parzialmente

I SEGNALI DEI DUE RIVELATORI SONO UGUALI ?

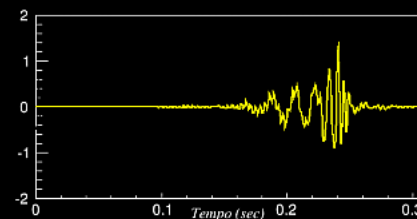
Il segnale in **LIGO HANFORD** ha segno opposto perchè il rivelatore è ruotato di 90 gradi rispetto a **LIGO LIVINGSTONE**



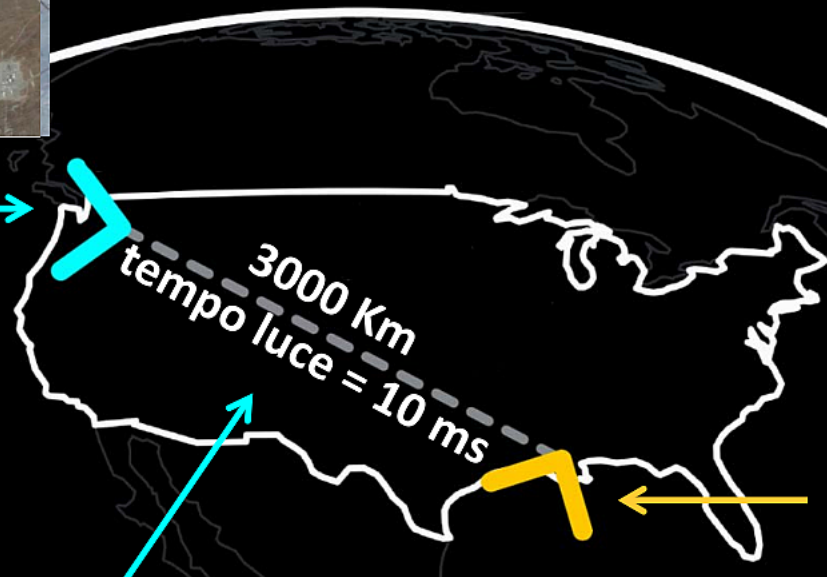
LIGO HANFORD



LIGO LIVINGSTONE

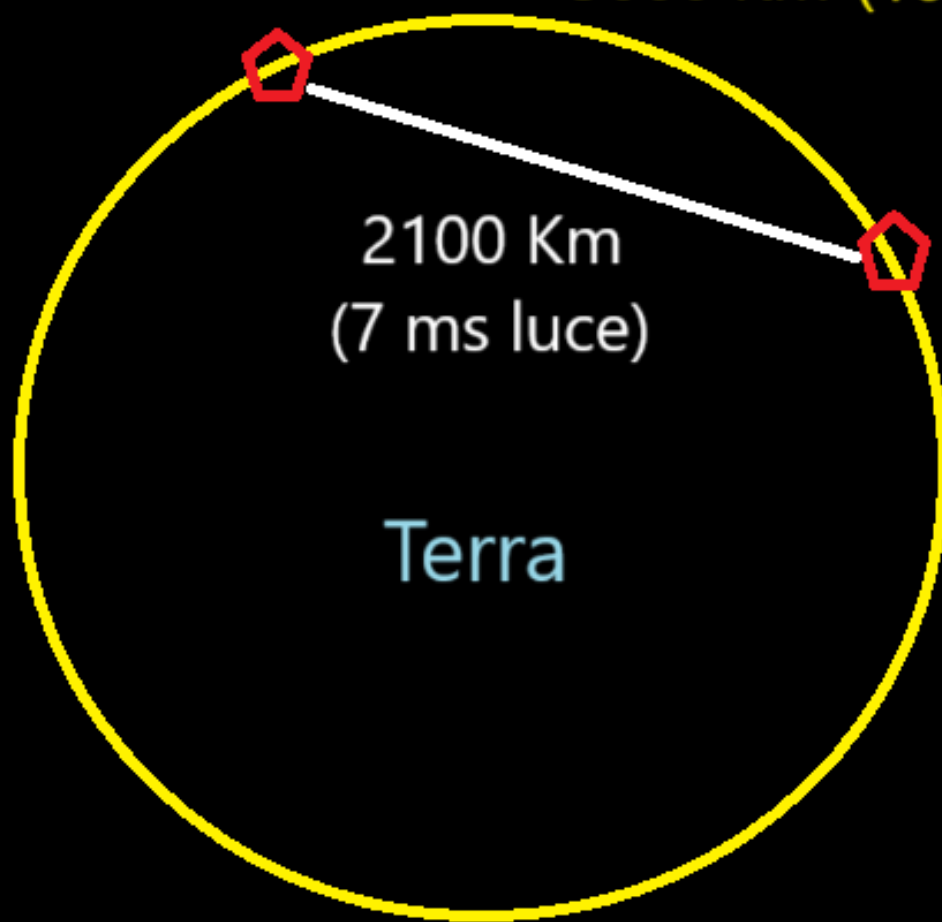


Il segnale in **LIGO HANFORD** è arrivato 7 millisecondi dopo rispetto a **LIGO LIVINGSTONE**



LIGO Hanford

3000 Km (10 ms luce)



LIGO Livingston

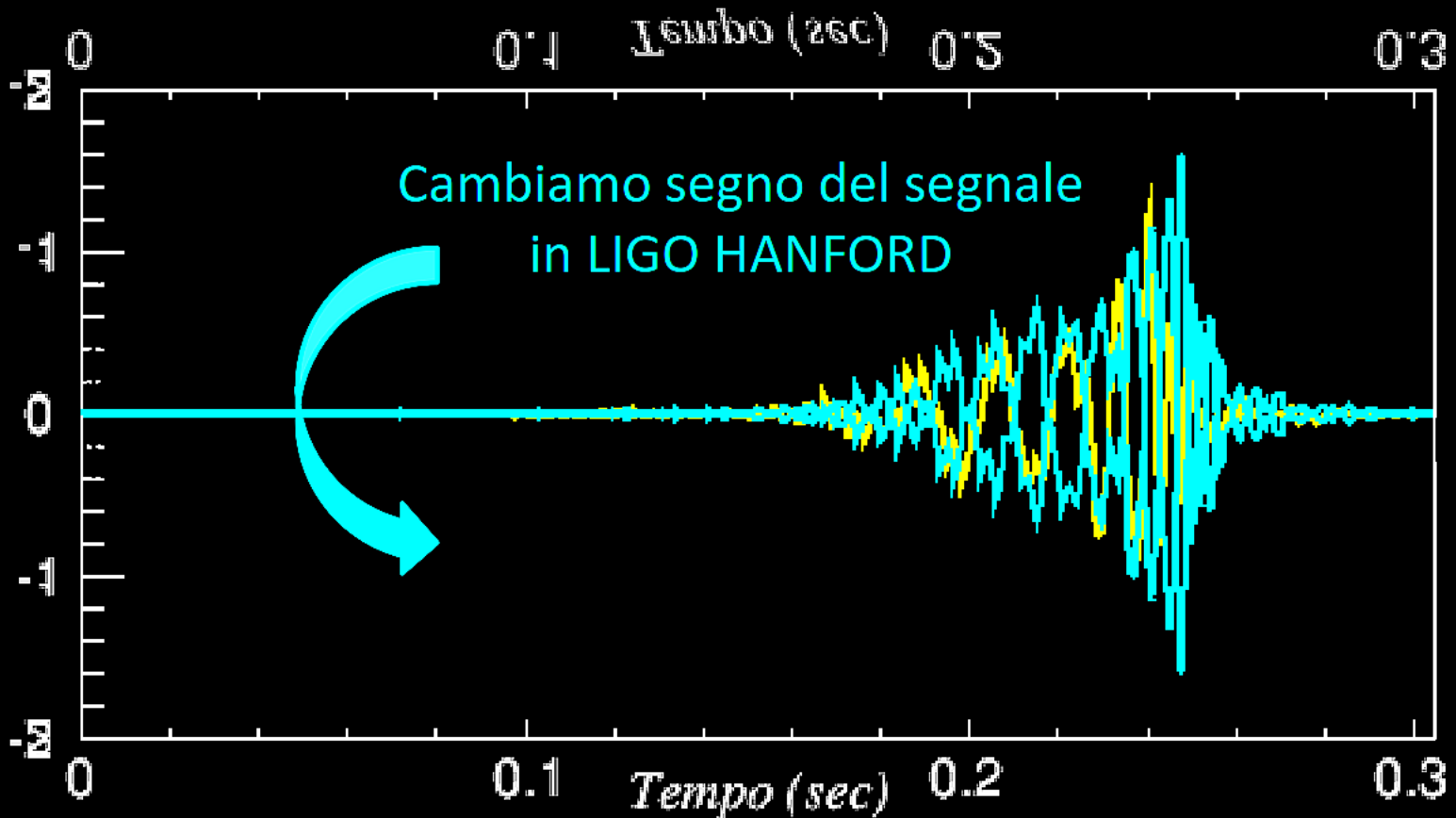
2100 Km
(7 ms luce)

Terra

Le onde gravitazionali si propagano alla velocità della luce

I SEGNALI DEI DUE RIVELATORI SONO UGUALI ?

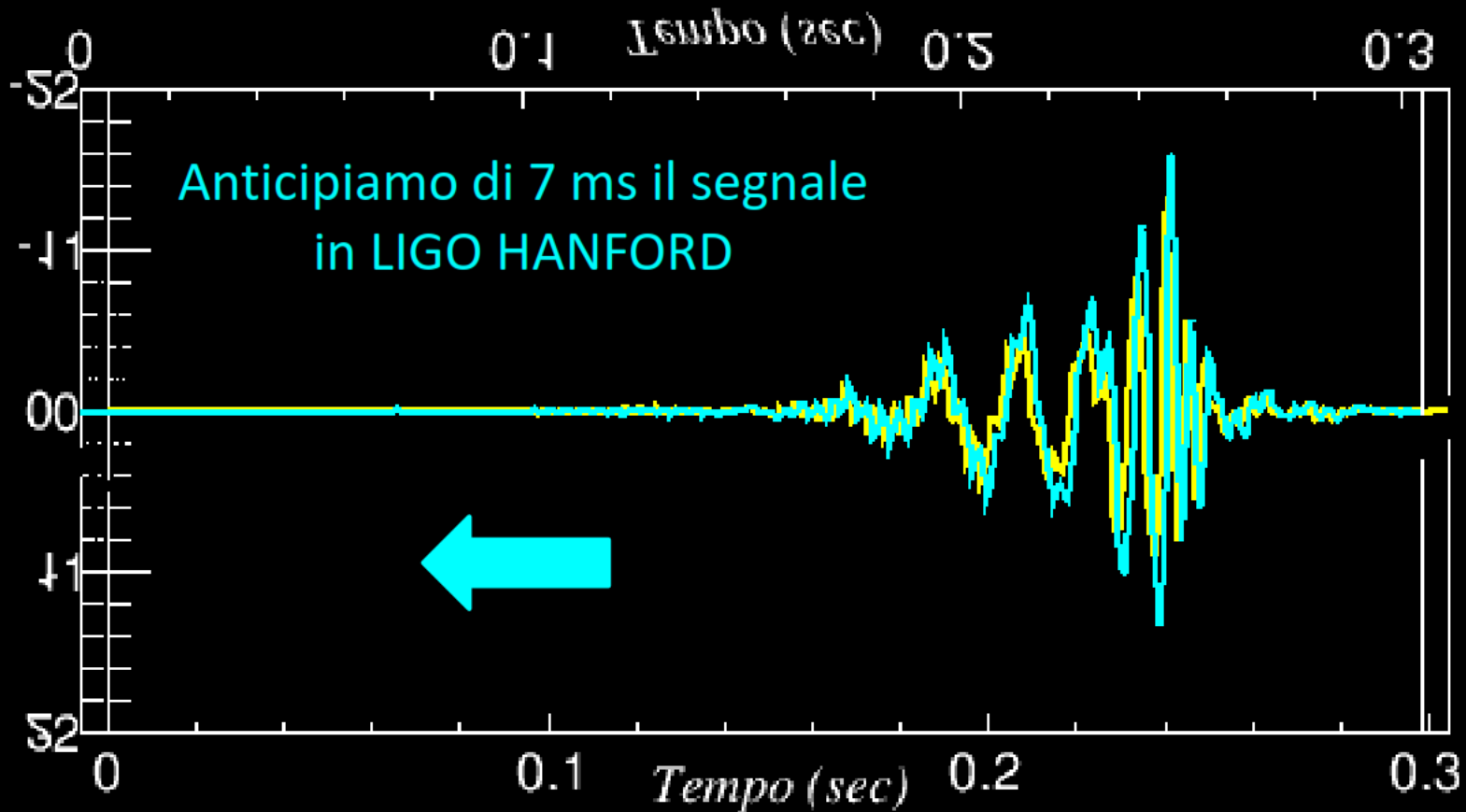
Il segnale in **LIGO HANFORD** viene visto con il segno opposto perchè il rivelatore è ruotato di 90 gradi rispetto a **LIGO LIVINGSTONE**



I segnali non coincidono

I SEGNALI DEI DUE RIVELATORI SONO UGUALI ?

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



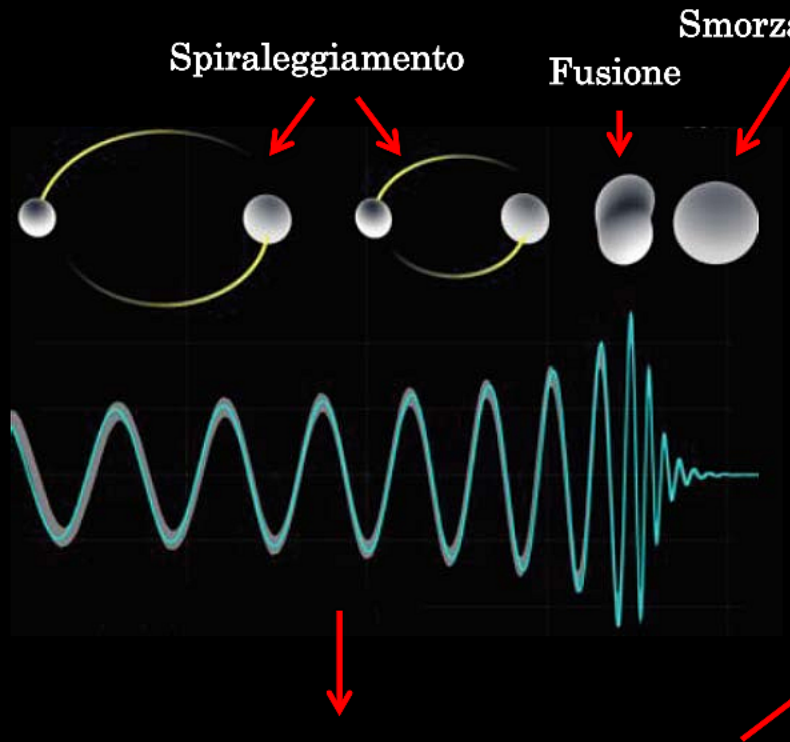
I segnali coincidono !!!

GW150914

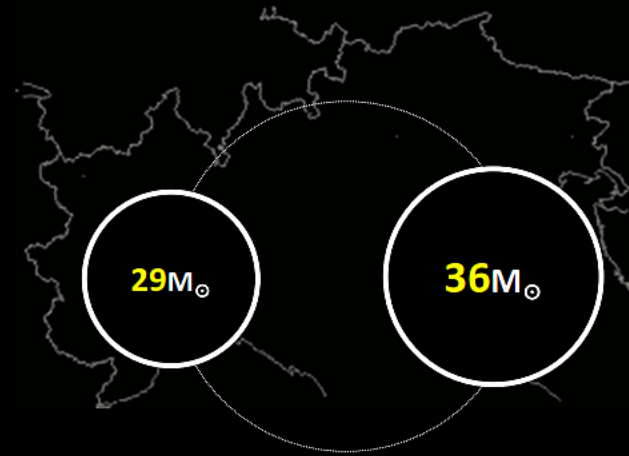
IL SEGNALE

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



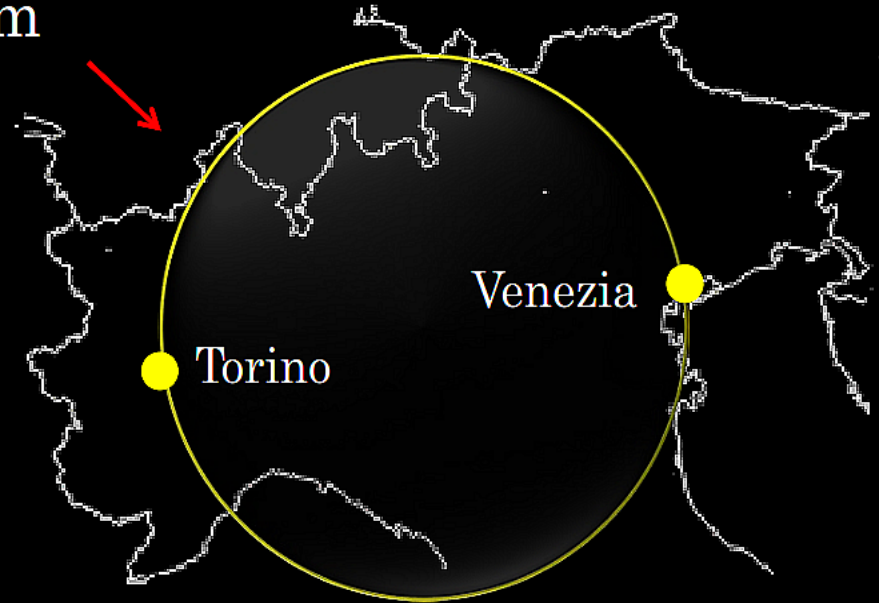
Il segnale è in perfetto accordo con la Relatività Generale

Prima di fondersi i due buchi neri si sono avvicinati a ~ 350 km ad una velocità di ~ 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 ?

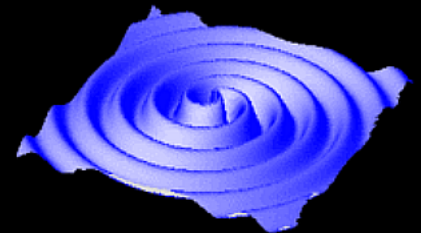
Può l'evento essere dovuto ad un rumore ambientale o ad un eccesso di rumore strumentale ?



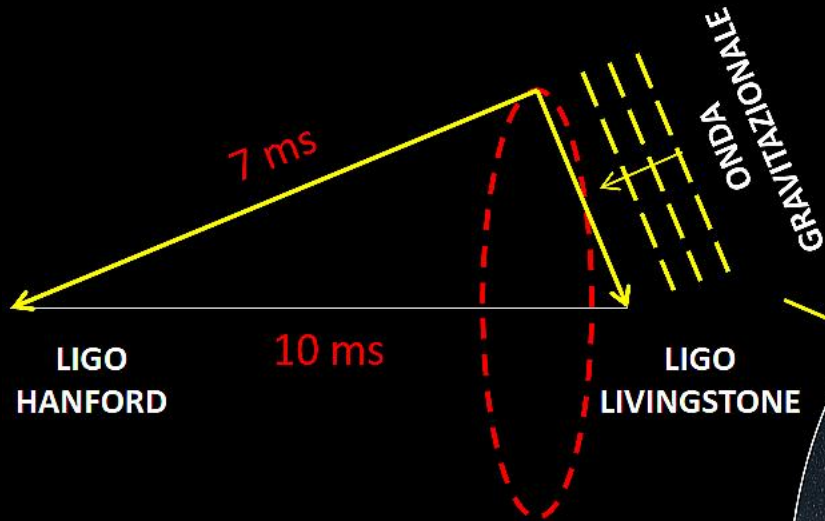
E' stato stimato che la probabilità che l'evento sia dovuto al rumore è **minore di 1 su 203000 anni di osservazione**



Il segnale è di origine astrofisica →



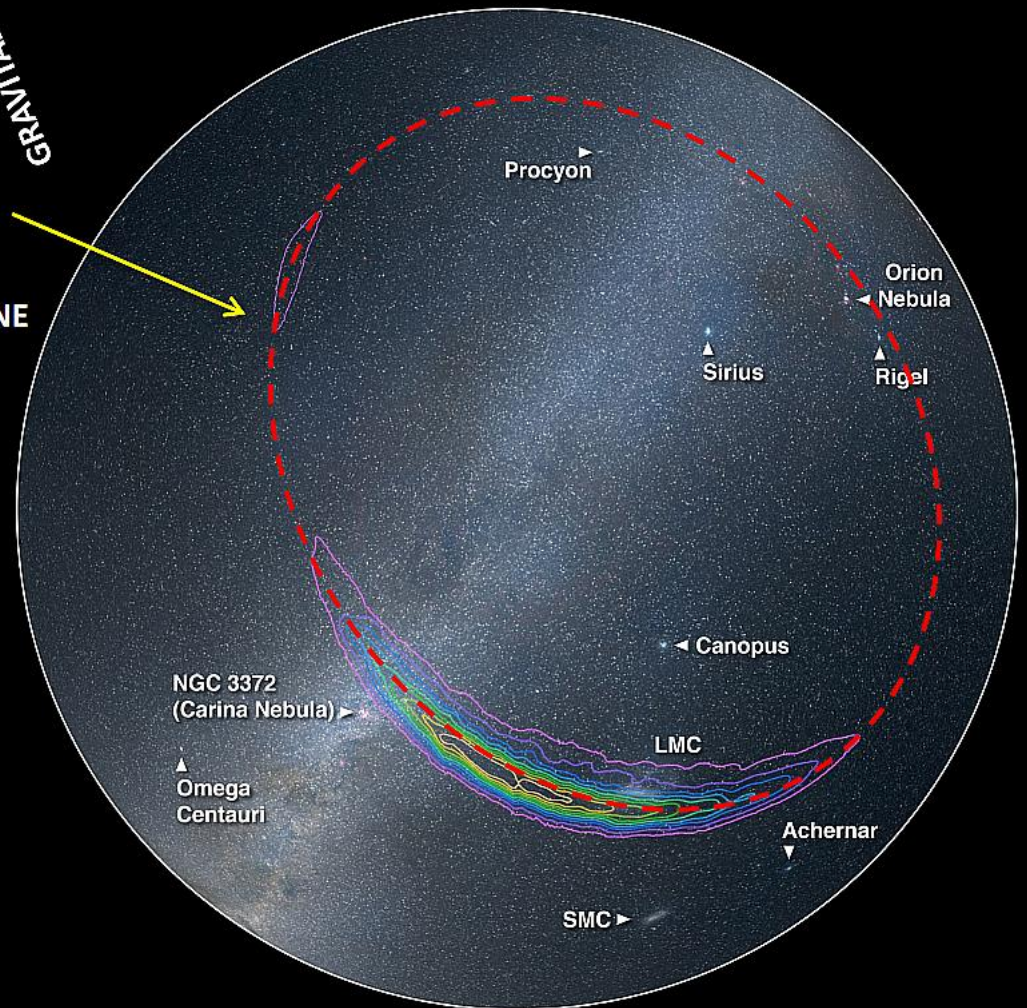
DA DOVE VIENE ?



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 deg² a 50% probabilità
590 deg² a 90% probabilità

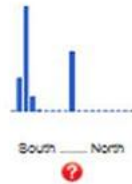


LIGO-Virgo Skymaps

This is skymap
GW150914:CWB.

50% area = 98.19 sq deg

90% area = 309.2 sq deg



Show Weighted Galaxies (or table).

Time and Place



Universal time

2015-09-14T09:50:45

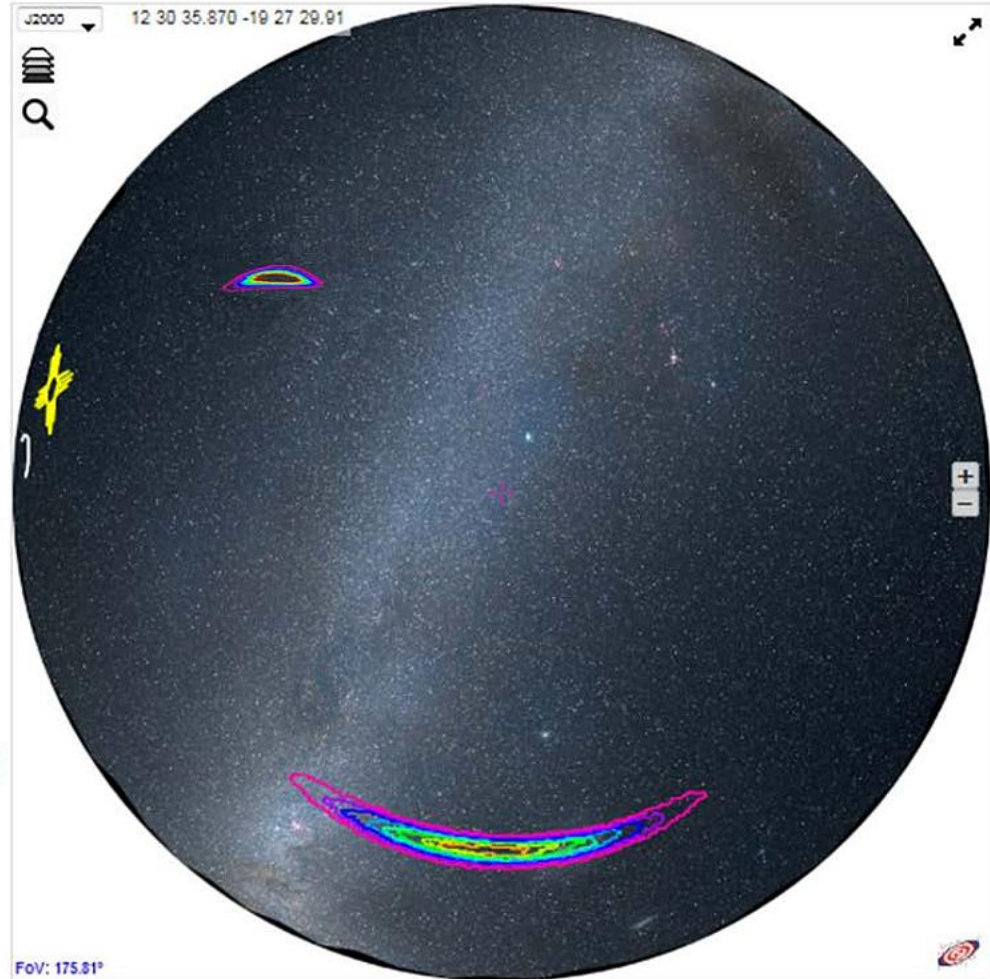
Now

E Longitude east to Latitude latitude

Show Sky

Sun =  and  = Moon

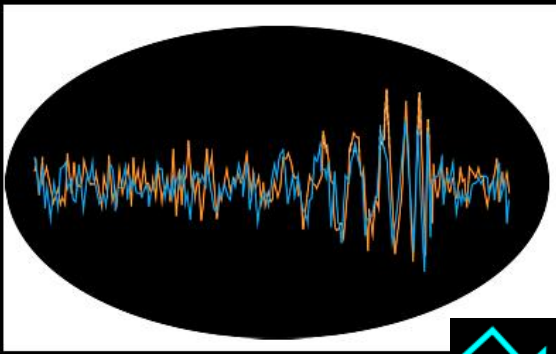
J2000 12 30 35.870 -19 27 29.91



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

QUANTO DISTA ?

14 Settembre 2015



LIGO ascolta



4.5 h prima

Il segnale e' entrato nel sistema solare

50000 anni prima

Il segnale entra nella nostra galassia 33000 Parsec



L'uomo moderno appare in Europa e in Italia

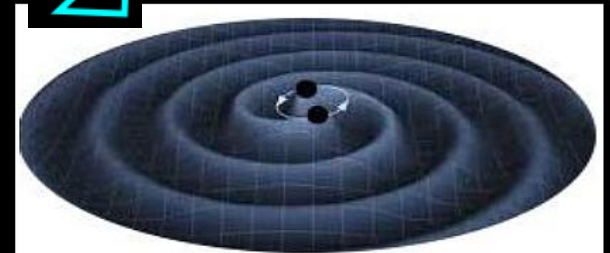


1.3 miliardi anni prima

Il segnale si genera a 400 milioni di Parsec di distanza

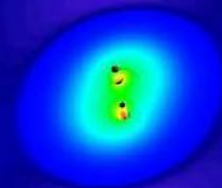


Comparsa delle prime forme di vita sulla Terra



... SIMULIAMO L'EVENTO

-0.76s



Numerical relativity simulation

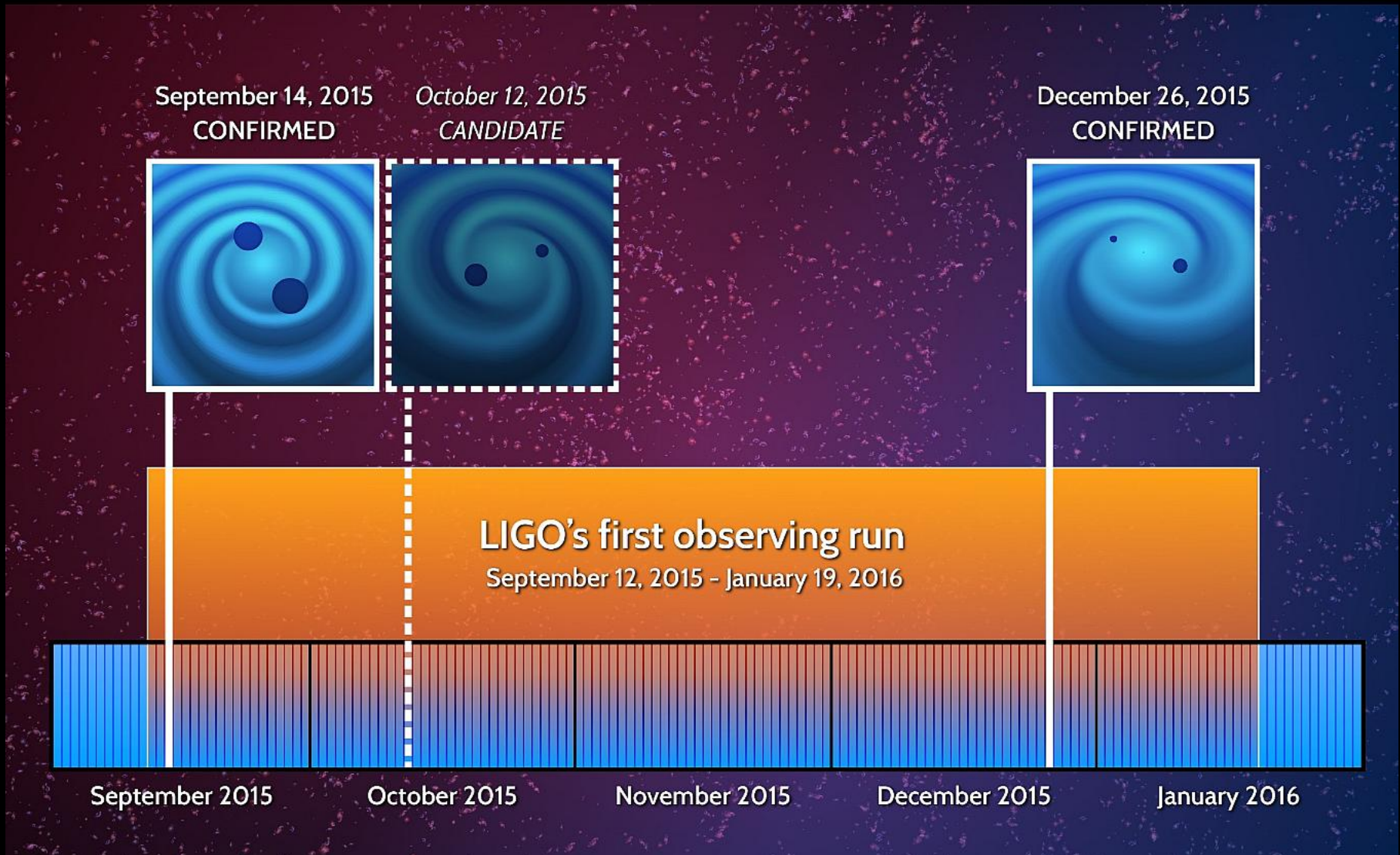
(SXS Collaboration, <http://www.black-holes.org/gw150914>)



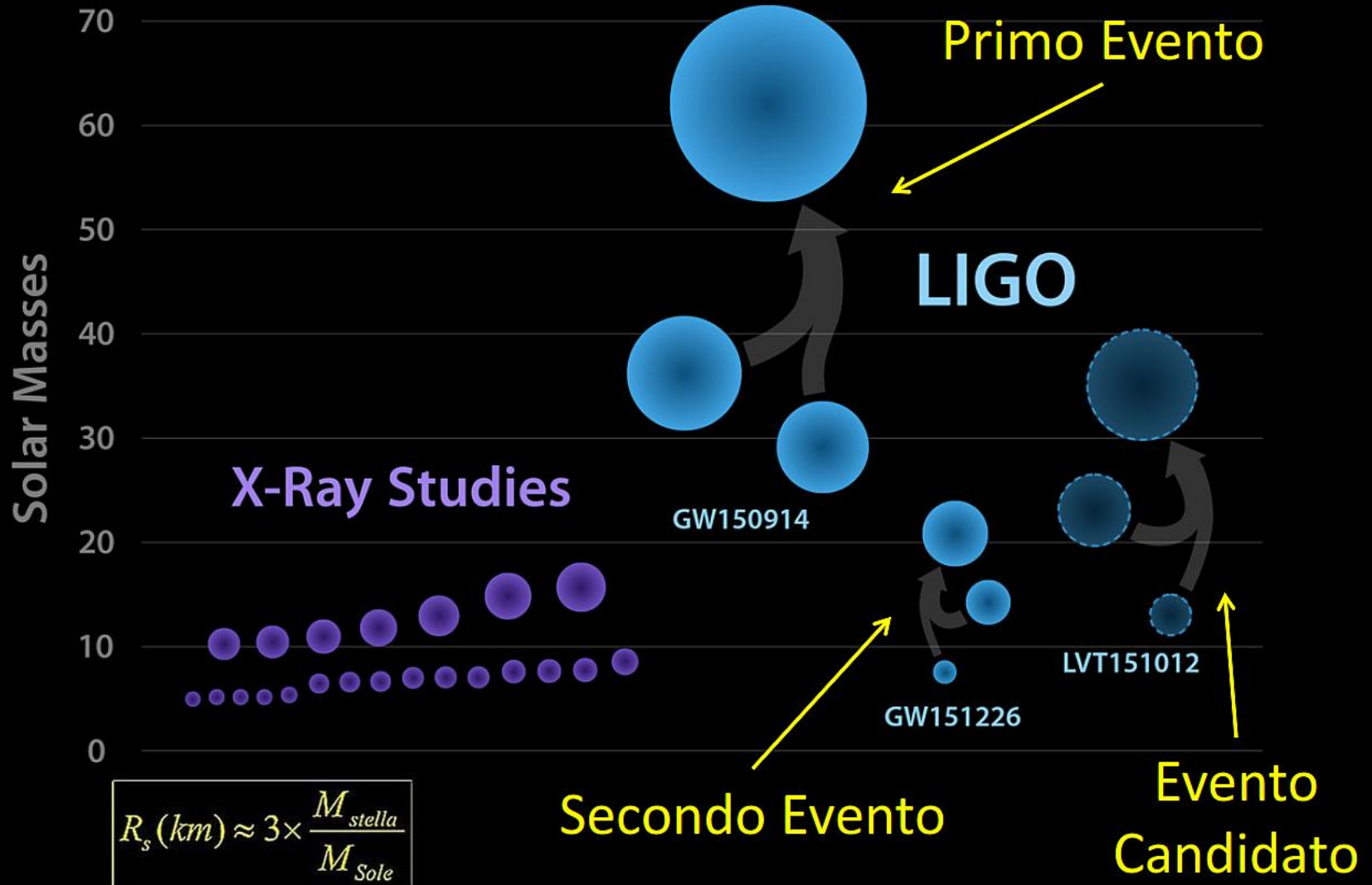
PERCHÈ QUESTA È UNA SCOPERTA IMPORTANTE ?

- 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

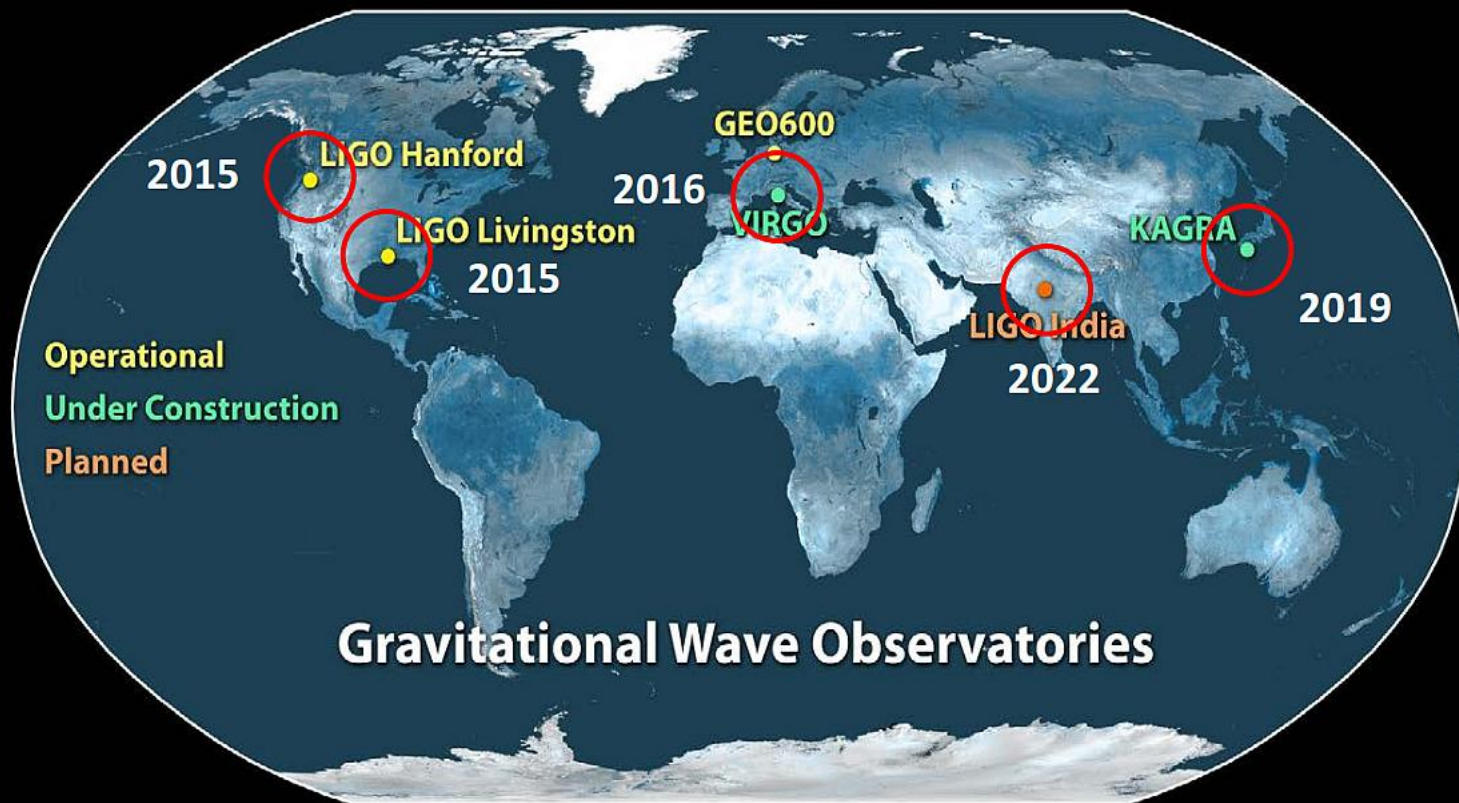
Buchi Neri rivelati nel primo run scientifico di LIGO



Buchi Neri di origine stellare conosciuti

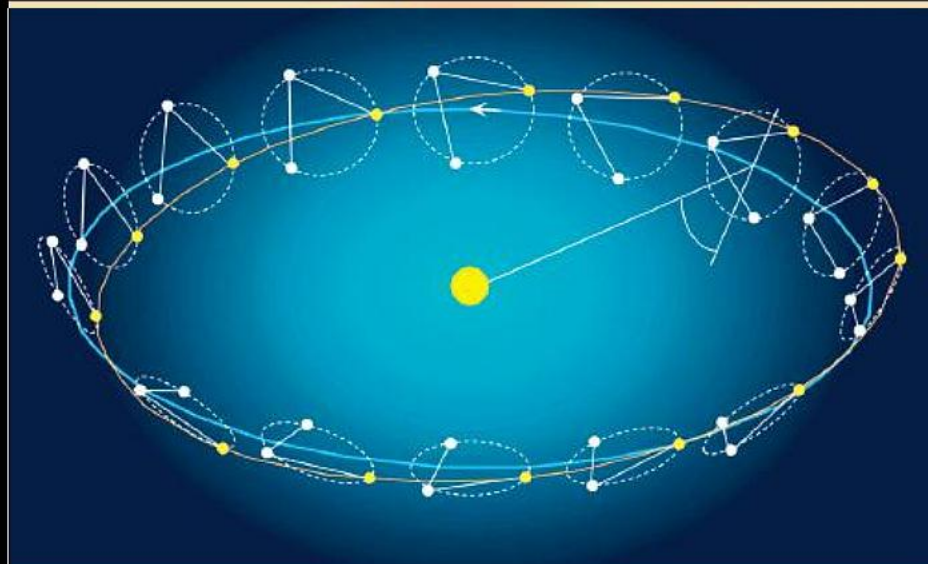
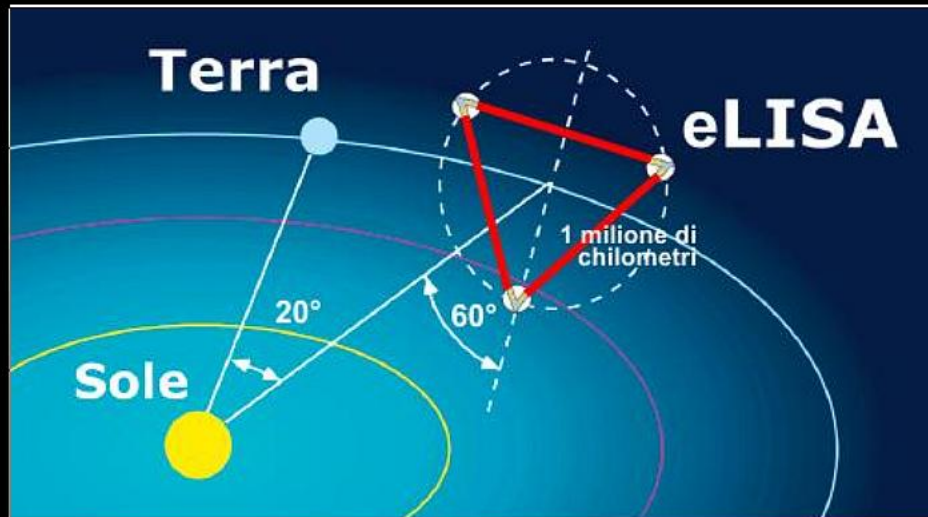


IL FUTURO



Aumenterà la sensibilità e il numero dei rivelatori

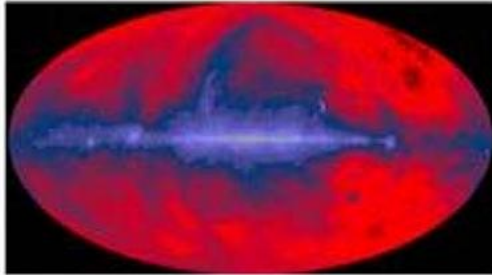
IL FUTURO DELLA RICERCA DELLE ONDE GRAVITAZIONALI È NELLO SPAZIO – eLISA (2034)



- **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

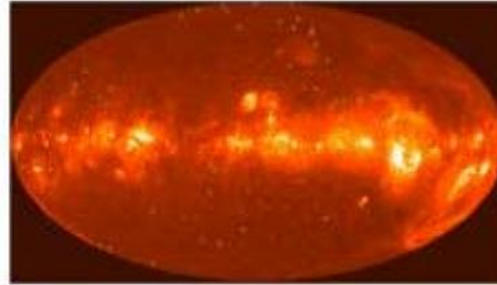
SI È APERTA UNA NUOVA FINESTRA SULL'UNIVERSO

Radio sky



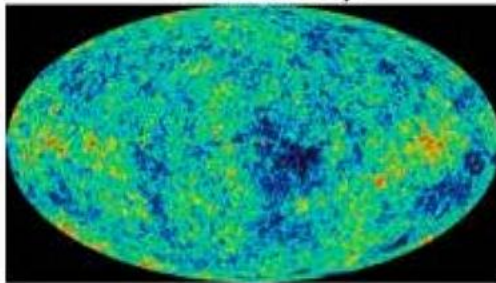
MIPY for Radio Astronomy

X-ray sky



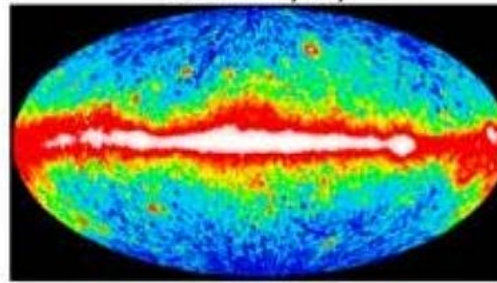
ESA INTEGRAL

Microwave sky



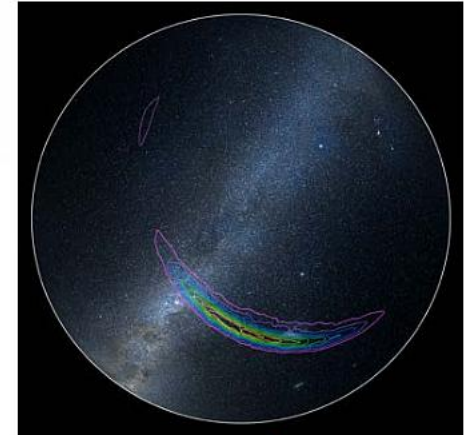
NASA, WMAP

Gamma-ray sky



NASA, SWIFT

Gravitational-wave Sky



ONDE ELETTROMAGNETICHE

ONDE GRAVITAZIONALI

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



Kip Thorne

Premio Nobel per la Fisica nel
2017 per la rivelazione
sperimentale delle onde
gravitazionali mediante LIGO