

Onde gravitazionali: ma che roba è ?



Una frase corona 50 anni di sforzi

NSF - 11 febbraio 2016



Onde e Gravitazione:

due mini ripassi....?

Cosa é un'onda ?

- *Onde del mare*
- *Onde acustiche (o sonore)*
- *Onde elastiche nei solidi, sismiche*
- *La corda vibrante...*



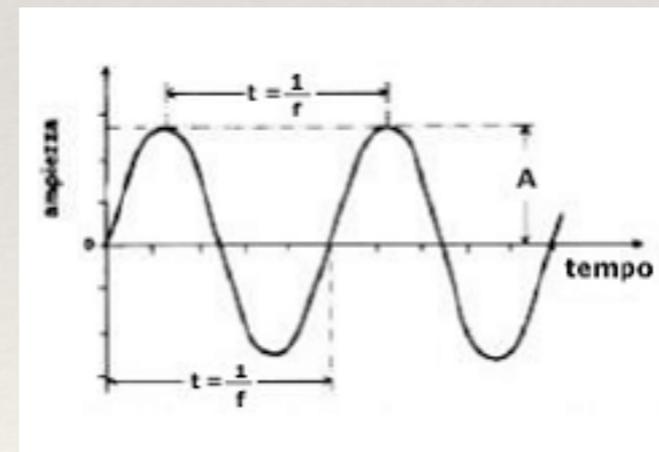
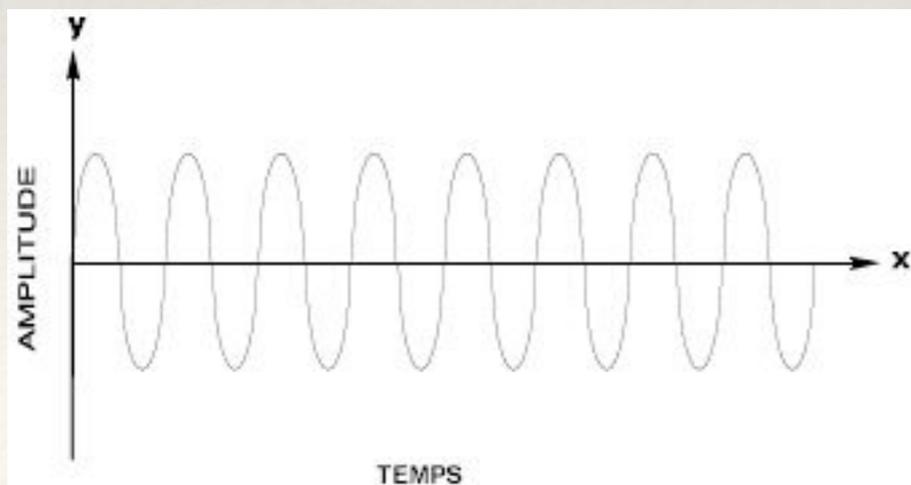
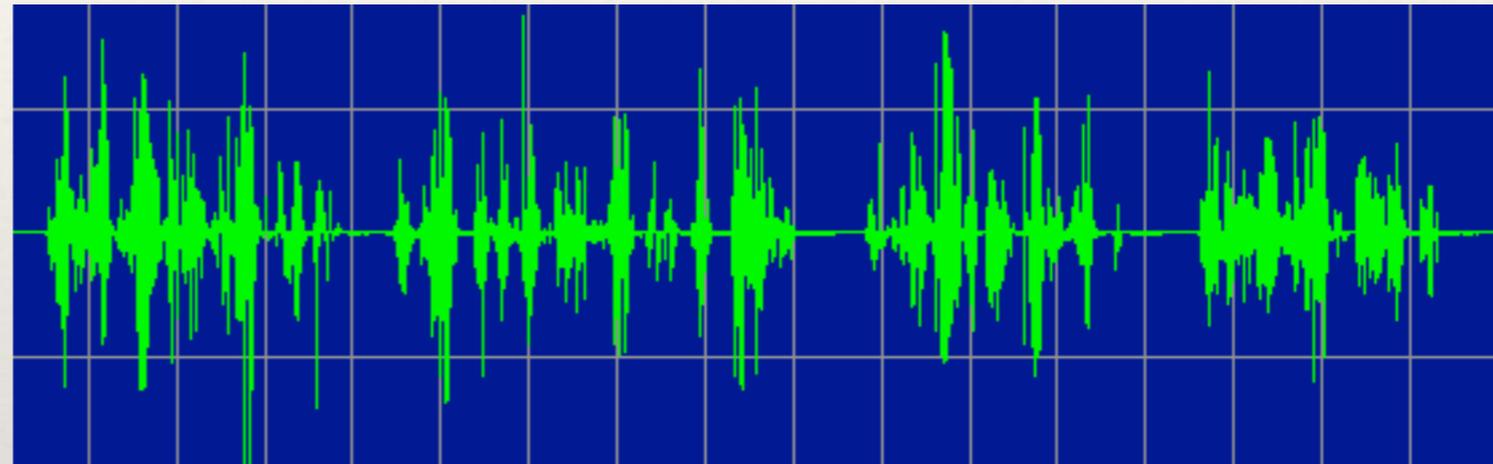
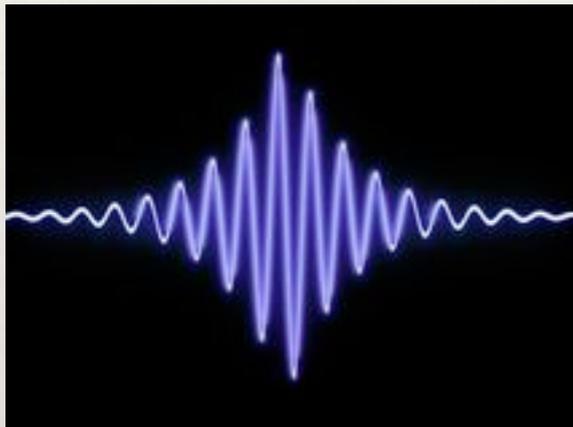
- *C'è sempre una grandezza fisica (misurabile) il cui valore cambia nel tempo.... e nello spazio.*

Cosa é un'onda ?



Come é un'onda? (2)

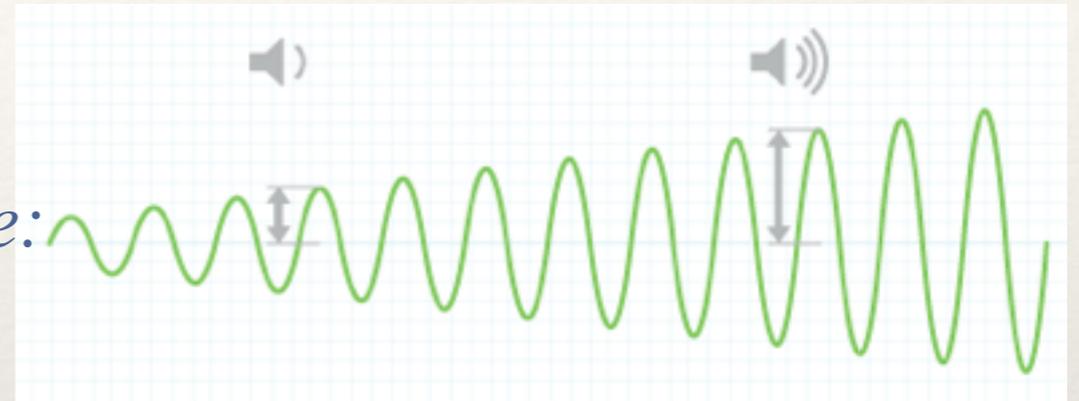
- *C'è sempre una grandezza fisica (misurabile) il cui valore cambia nel tempo.... e nello spazio. Come la descrivo?*



2 grandezze: ampiezza e frequenza

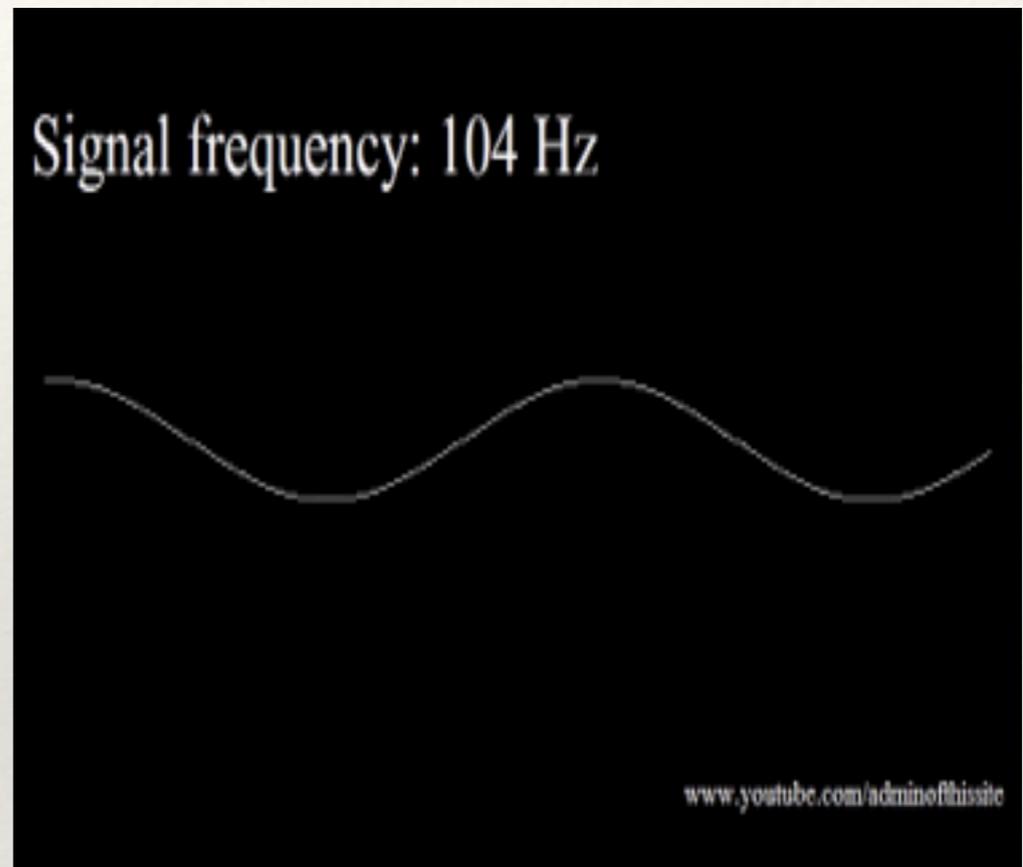
Cosa é un'onda? (3)

- *C'è sempre una grandezza fisica (misurabile) il cui valore cambia nel tempo.... e nello spazio.*
- *suono di ampiezza (“volume”) crescente:*



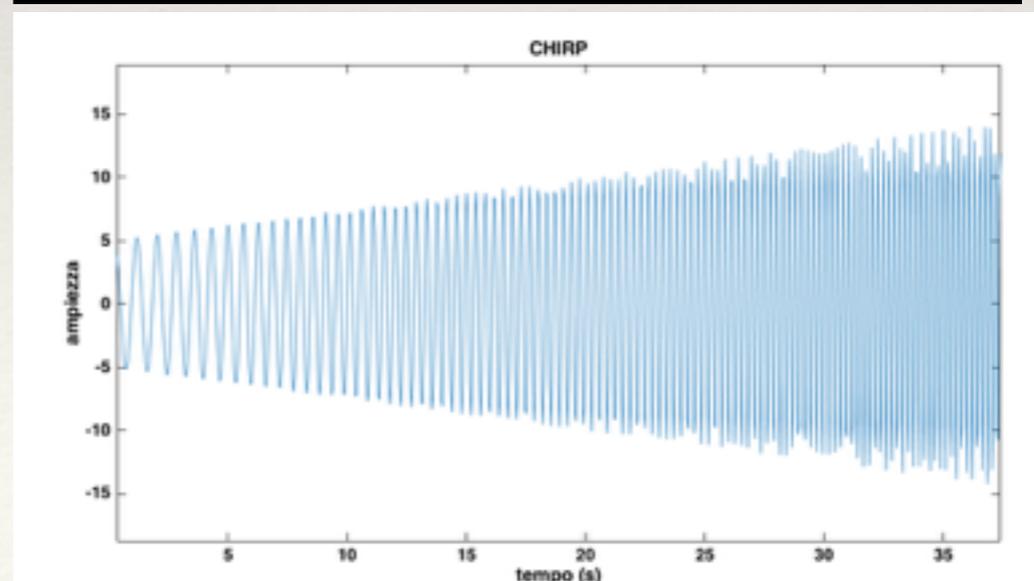
Cosa é un'onda? (3)

- *C'è sempre una grandezza fisica (misurabile) il cui valore cambia nel tempo.... e nello spazio.*



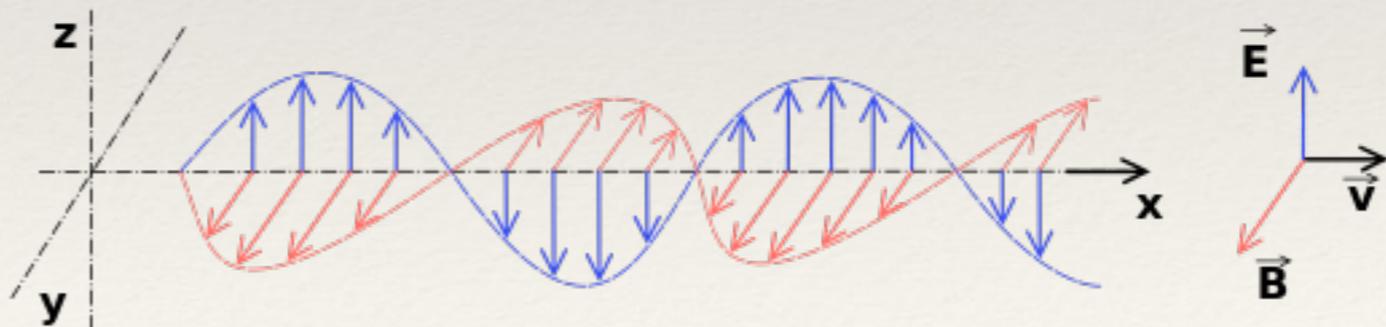
- *suono di frequenza (“tono”) crescente:*

- *suono di ampiezza e frequenza crescente (chirp):*



Cosa é un'onda ? (4)

- *C'è sempre una grandezza fisica (misurabile) che vibra nello spazio (il livello del mare, la densità dell'aria, la posizione della corda....)*
- *E nel vuoto ? può vibrare qualcosa nel vuoto ?*
- *Le onde elettromagnetiche (radio, microonde, luce, UV, raggi X ...) viaggiano nel vuoto.
NON c'è etere cosmico
Sono i campi elettrico e magnetico che vibrano e “avanzano” nello spazio*



Cosa é la gravità ?

Galileo - 1638:

Tutti i corpi cadono nel vuoto con la stessa legge oraria, indipendentemente da massa, forma, composizione etc.



Se noi troviamo, in fatto, i mobili differenti di gravità meno e meno differir di velocità secondo che i mezzi più e più cedenti si troveranno, ..., parmi che potremo con molto probabili conietture credere che nel vacuo sarebbero le velocità loro del tutto eguali."

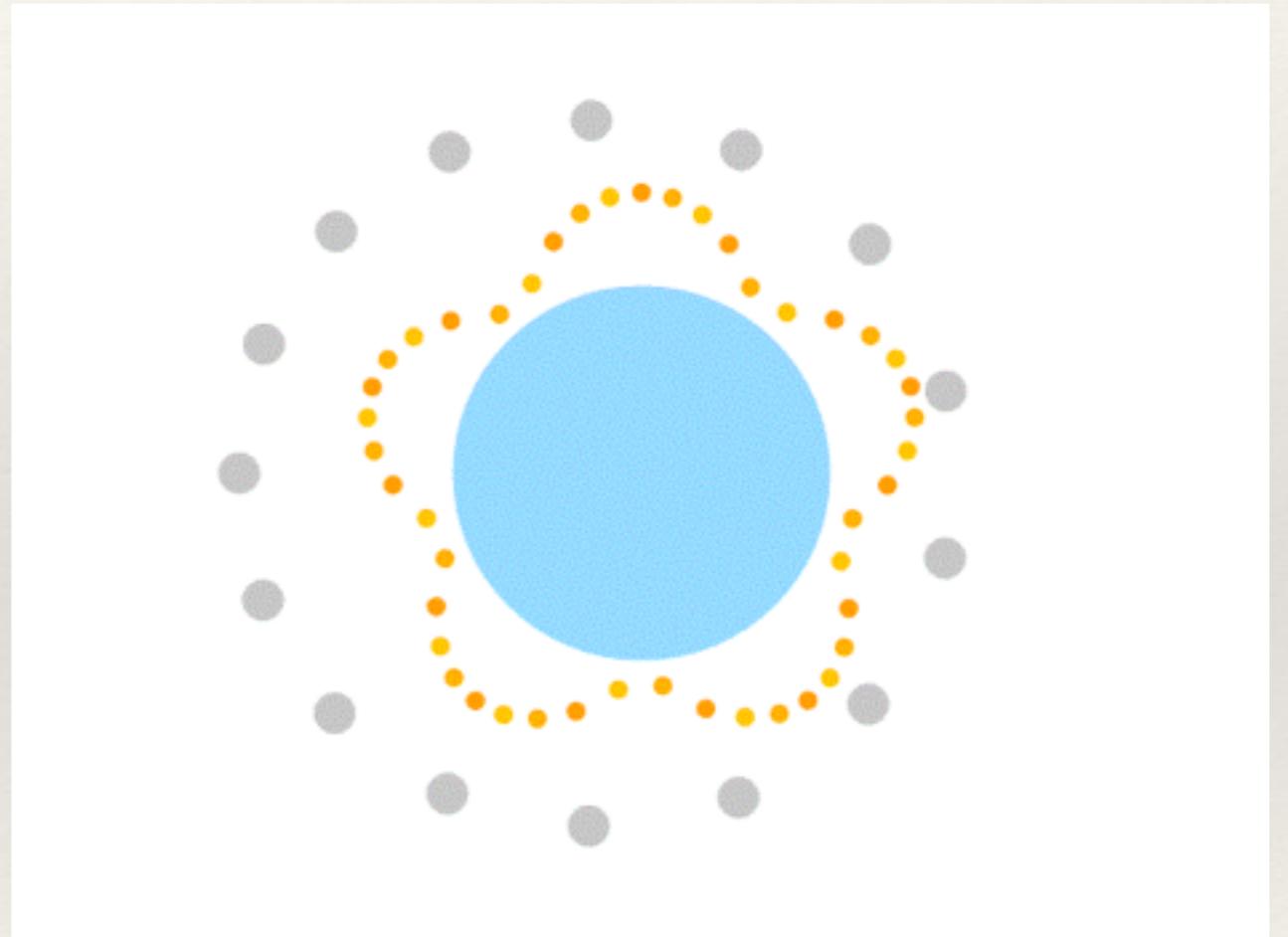


David Scott - Apollo 15; 2 agosto 1971

Legge di Newton - 1687

Le parabole dei proiettili (e dei palloni...) ed il moto dei pianeti sono governati dalla stessa legge.

$$\vec{F} = -G \frac{m_1 m_2}{r^2} \hat{r}$$



La Luna “casca” sulla Terra come la mela !

Einstein - 1915

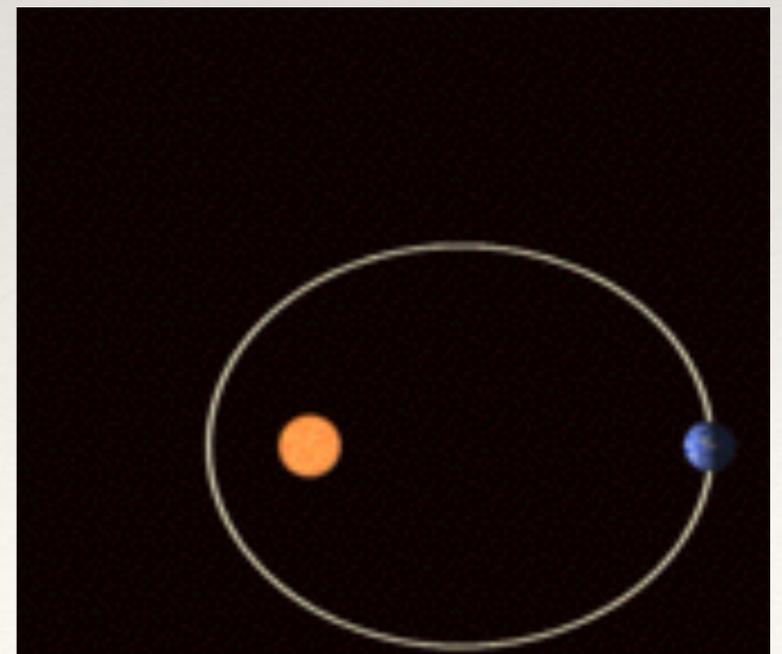
La gravità di Newton funziona bene (tranne un piccolo dettaglio...) ma non soddisfa il dott. Einstein da un punto di vista concettuale.

Se tutti i corpi cadono nello spazio con la stessa legge, allora la caduta dipende dallo spazio, e non dai corpi ! Deve essere un puro effetto geometrico.

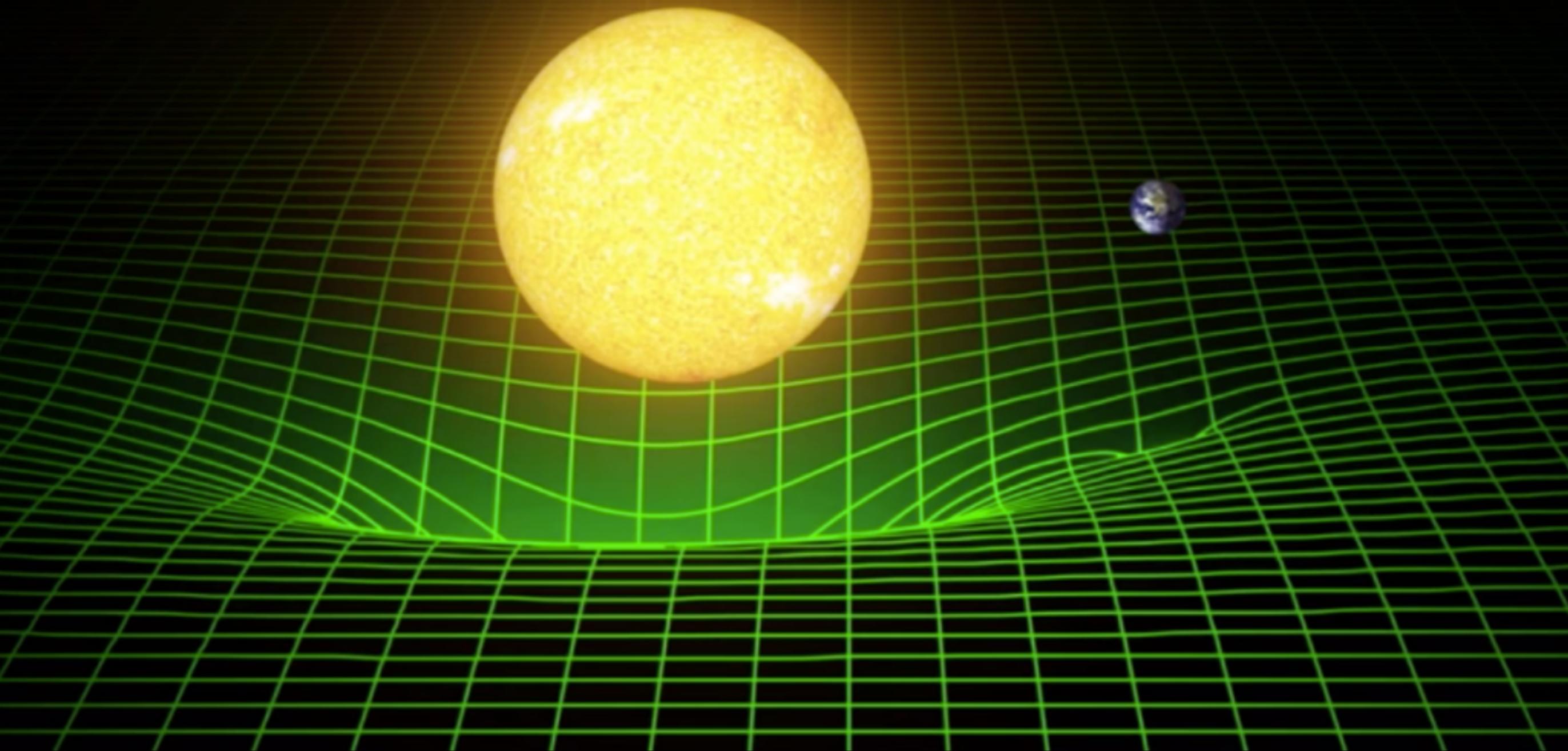
Allora non c'è attrazione, ma moto in uno spazio curvo !

10 anni per sviluppare una matematica che spieghi la sua idea.

Relatività Generale (GR) : “geometria differenziale su varietà Riemanniane a 4 dimensioni”:



Sole e Terra nella visione GR

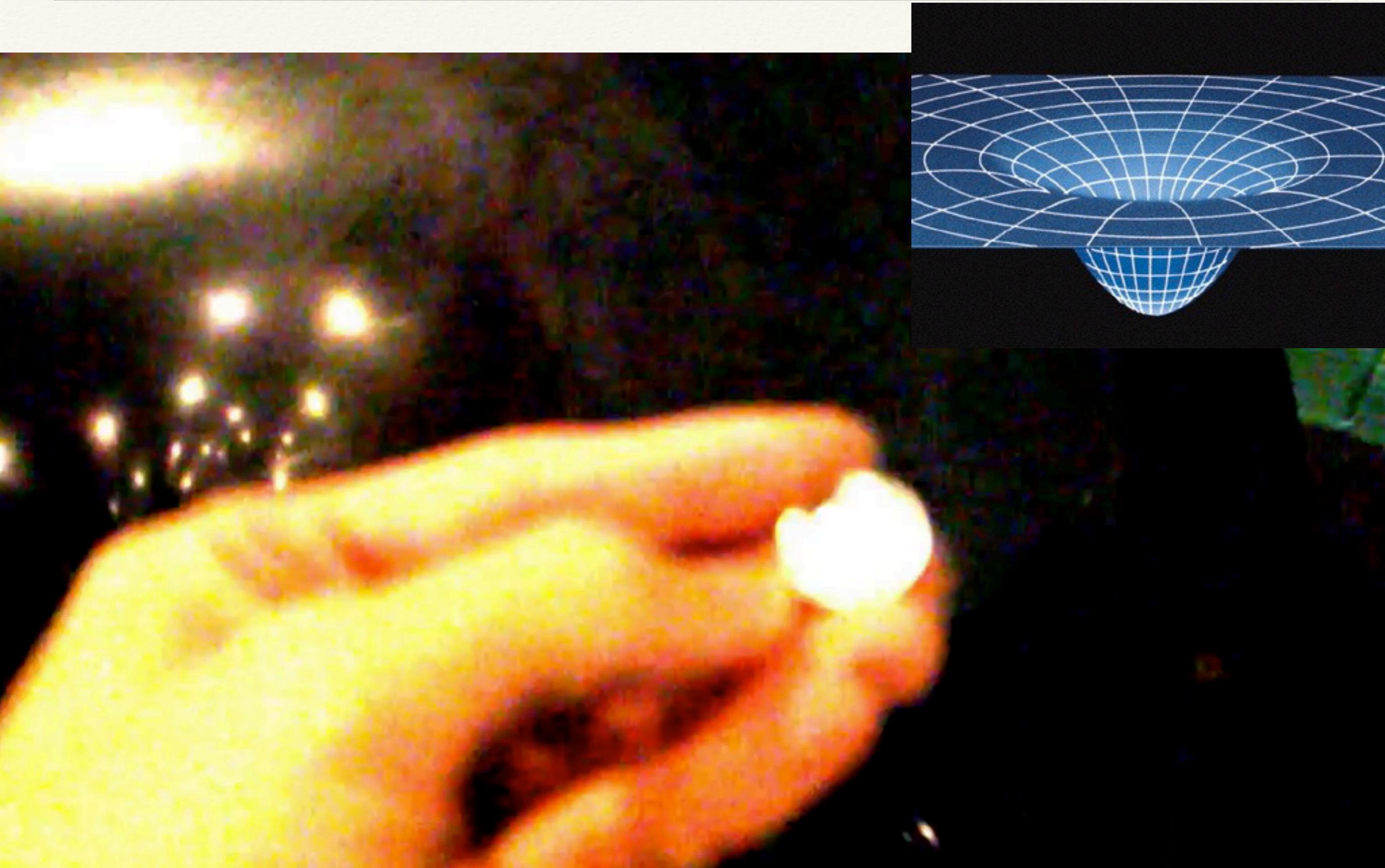




La massa dice allo spazio come curvarsi;
lo spazio dice alla massa come muoversi.

J.A. Wheeler

Gira intorno...o cade dentro ?



Riassumendo:

- *Il corpo piccolo orbita, attratto da quello grande...
=> Il corpo piccolo si muove nello spazio incurvato da quello grande.*
- *Se c'è attrito (perdita di energia) il corpo si avvicina all'attrattore*
- *Più si avvicina, più accelera (momento angolare...)*
- *In generale, accelera fino a caderci dentro*

*Tranquilli....nello spazio non c'è attrito !
però...*

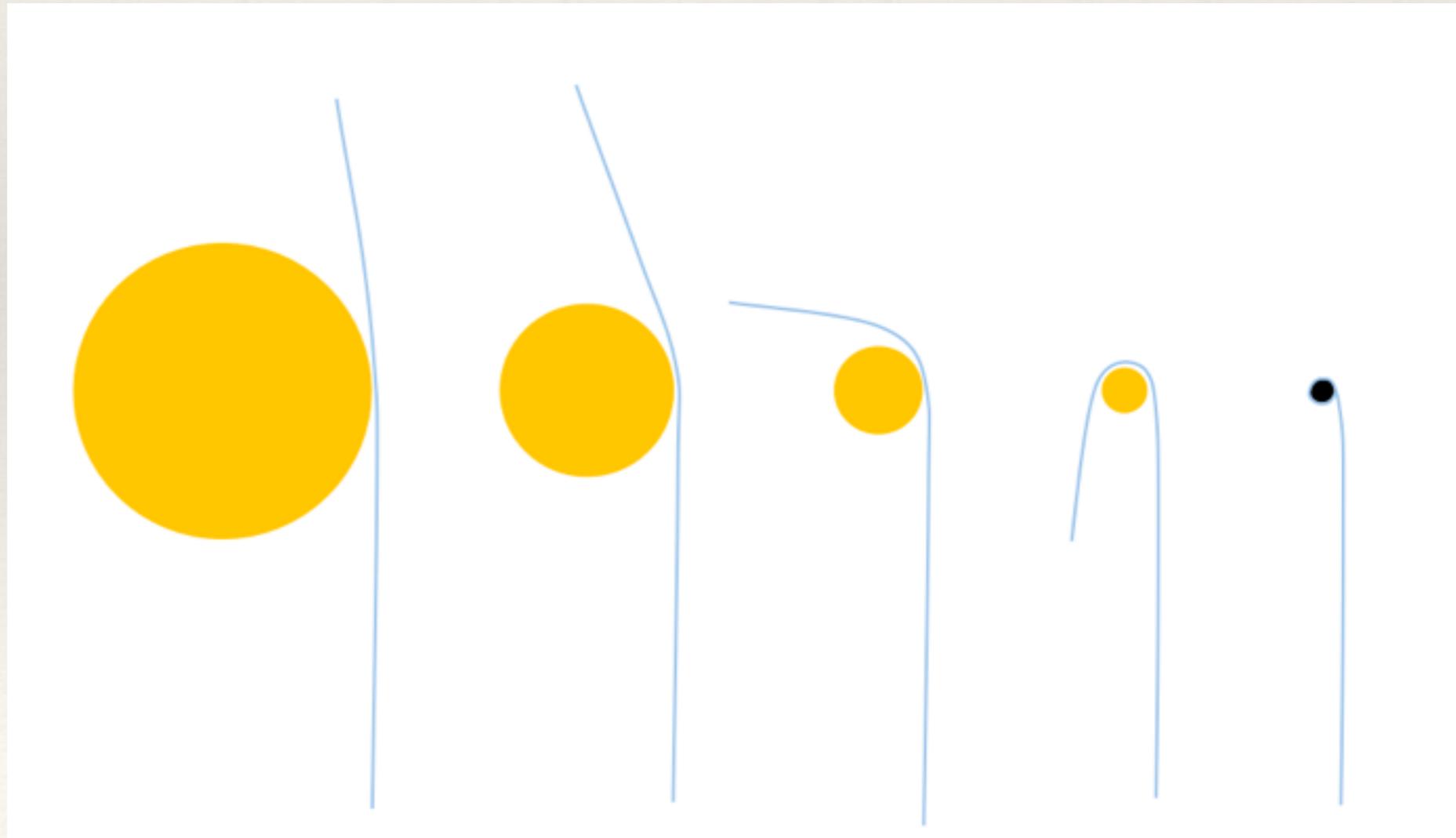
e i buchi neri ?

- *La gravità ci “tira”; Più è forte, più è difficile sfuggirvi.*
- *Più è forte, più roba ci casca dentro, più aumenta l’attrazione.*
- *e si arriva ad una massa tale per cui non sfugge più nulla: neanche la luce.*

e i buchi neri ?

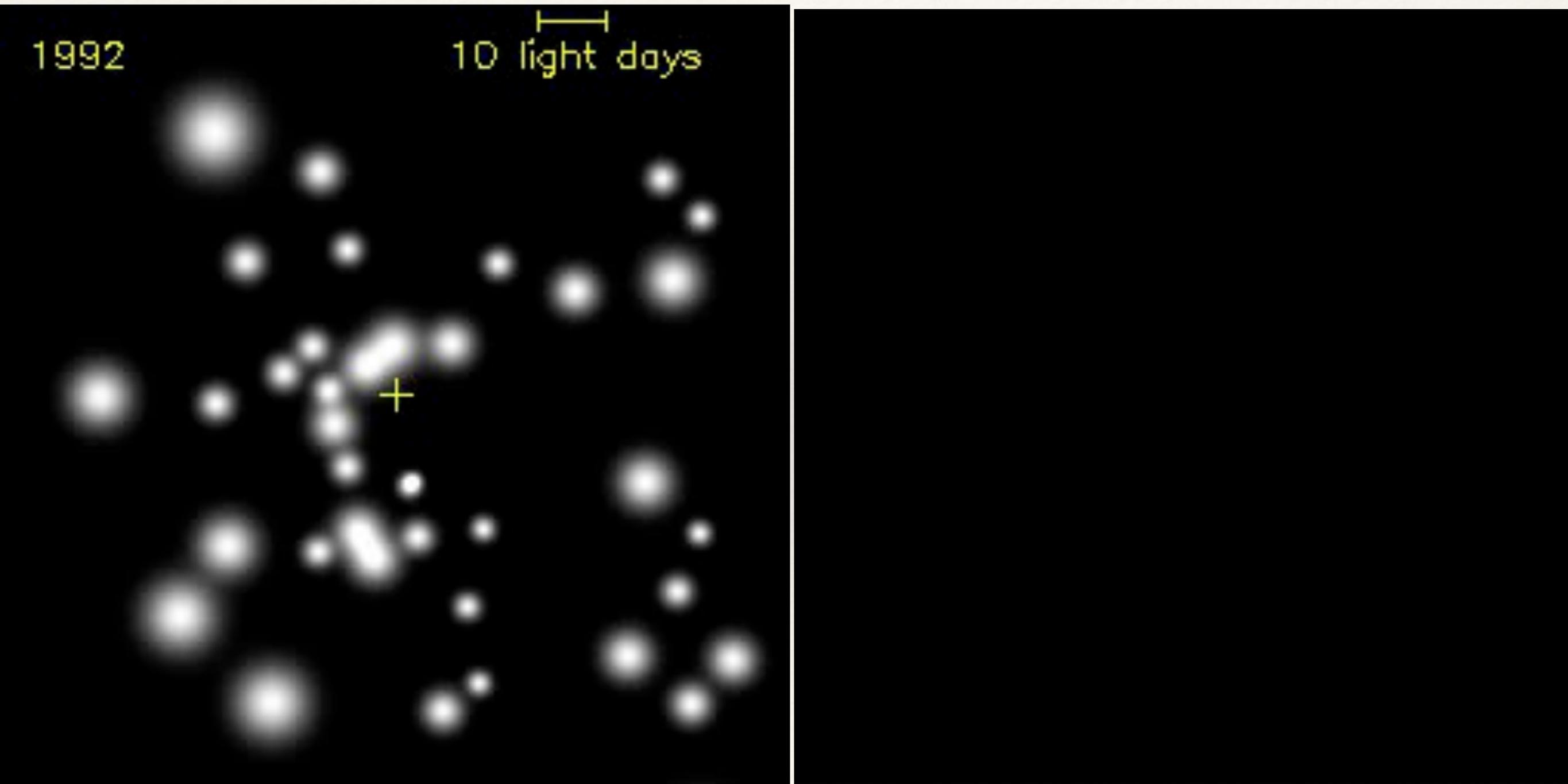
- *La gravità ci “tira”; Più è forte, più è difficile sfuggirvi.*
- *Più è forte, più roba ci casca dentro, più aumenta l’attrazione.*
- *e si arriva ad una massa tale per cui non sfugge più nulla: neanche la luce.*

*Altro modo di vederlo:
secondo la GR, la
gravità fa curvare non
solo i corpi, ma anche
la luce..*



Buco nero al centro della nostra galassia

4 milioni di masse solari - a 26 mila anni luce da qui



Chi gira intorno a chi ?

La Luna gira intorno alla Terra ✓

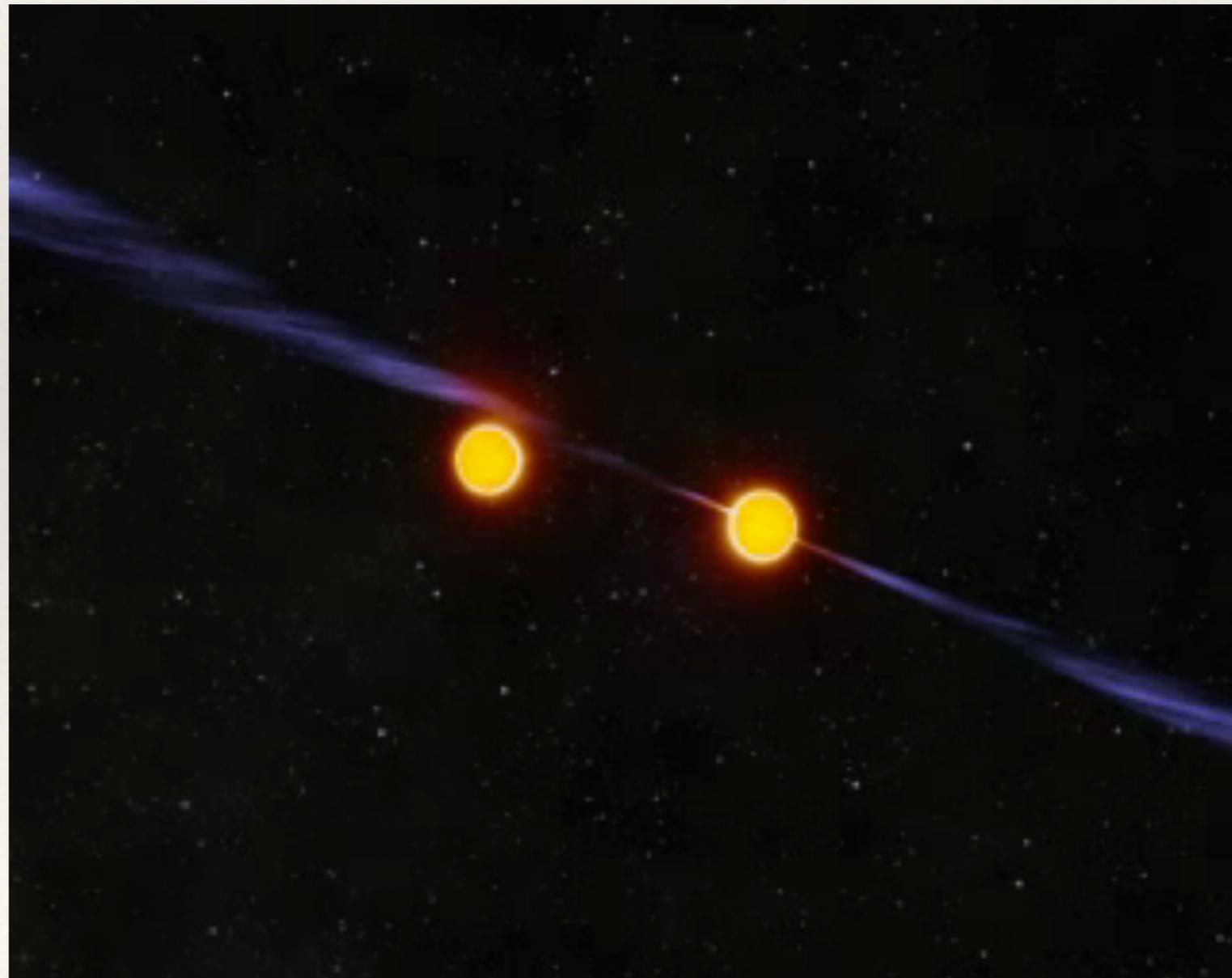
La Terra gira intorno al Sole ✓

La materia stellare cade nel Buco Nero ✓

*.....Il corpo piccolo intorno a
(o dentro) quello grosso*

*Ma se due stelle hanno masse
circa uguali ?*

*Notate il “tappeto verde
pizzicato”*



La gravità é geometria... e le onde ?

Quando cambia la distribuzione di massa (esplosione di supernova, un buco nero che si mangia una stella, coalescenza di due stelle binarie....) DEVE cambiare la gravità, ovunque.

Questo cambiamento é portato dall'onda gravitazionale: lo spazio (-tempo) si dilata e contrae come un foglio elastico "pizzicato".

QUINDI: o.g =>.vibrazione dello spazio-tempo (???)

Quanto varia ? pochissimo ! lo vediamo poi....

A che velocità viaggia ? c

Porta energia ? SI !

Come le misuro ? variazione della distanza tra i punti dello spazio

Gravitational Waves

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

$$g_{\mu\nu} = \eta_{\mu\nu} + h_{\mu\nu}$$

$$\square h_{\mu\nu} = 0$$

$$\frac{d^2 \xi^i}{dt^2} = -\xi^k R_{0k0}^i = \frac{1}{2} \frac{\partial^2 h_k^i}{\partial t^2} \xi^k$$



$$\Rightarrow \frac{\delta L}{L} = \frac{1}{2} h(t)$$



$$h_{ij}(t) = \frac{2G}{rc^4} \ddot{Q}_{ij}(t - r/c)$$

- **1915** Teoria della G.R.
- **1916** Einstein predice le OG
- **1916 -57** le OG sono osservabili ?
- **1960** Weber inizia i primi esperimenti
- **1984** Taylor and Hulse trovano un'evidenza indiretta di OG. (Premio Nobel 1993)
- **2003** Cominciano a funzionare i grandi interferometri
- **2015** OG finalmente rivelate !
- **2015** Lancio di Lisa Pathfinder - inizia l'era spaziale delle OG
- **2017** Rivelazione di OG + controparte ottica
- **2030+** lancio di LISA + Interf. di terza generazione

Über Gravitationswellen.

VON A. EINSTEIN.

Die wichtige Frage, wie die Ausbreitung der Gravitationsfelder erfolgt, ist schon vor anderthalb Jahren in einer Akademiarbeit von mir behandelt worden¹. Da aber meine damalige Darstellung des Gegenstandes nicht genügend durchsichtig und außerdem durch einen bedauerlichen Rechenfehler verunstaltet ist, muß ich hier nochmals auf die Angelegenheit zurückkommen.

Wie damals beschränke ich mich auch hier auf den Fall, daß das betrachtete zeiträumliche Kontinuum sich von einem »galileischen« nur sehr wenig unterscheidet. Um für alle Indizes

$$g_{\mu\nu} = -\delta_{\mu\nu} + \gamma_{\mu\nu} \quad (1)$$

setzen zu können, wählen wir, wie es in der speziellen Relativitätstheorie üblich ist, die Zeitvariable x_4 rein imaginär, indem wir

$$x_4 = it$$

setzen, wobei t die »Lichtzeit« bedeutet. In (1) ist $\delta_{\mu\nu} = 1$ bzw. $\delta_{\mu\nu} = 0$, je nachdem $\mu = \nu$ oder $\mu \neq \nu$ ist. Die $\gamma_{\mu\nu}$ sind gegen 1 kleine Größen, welche die Abweichung des Kontinuums vom feldfreien darstellen; sie bilden einen Tensor vom zweiten Range gegenüber LORENTZ-Transformationen.

§ 1. Lösung der Näherungsgleichungen des Gravitationsfeldes durch retardierte Potentiale.

Wir gehen aus von den für ein beliebiges Koordinatensystem gültigen² Feldgleichungen

$$-\sum_{\alpha} \frac{\partial}{\partial x_{\alpha}} \left\{ \begin{matrix} \mu\nu \\ \alpha \end{matrix} \right\} + \sum_{\alpha} \frac{\partial}{\partial x_{\alpha}} \left\{ \begin{matrix} \mu\alpha \\ \alpha \end{matrix} \right\} + \sum_{\alpha\beta} \left\{ \begin{matrix} \mu\alpha \\ \beta \end{matrix} \right\} \left\{ \begin{matrix} \nu\beta \\ \alpha \end{matrix} \right\} - \sum_{\alpha\beta} \left\{ \begin{matrix} \mu\nu \\ \alpha \end{matrix} \right\} \left\{ \begin{matrix} \alpha\beta \\ \beta \end{matrix} \right\} \quad (2)$$

$$= -\kappa \left(T_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} T \right).$$

¹ Diese Sitzungsber. 1916, S. 688 ff.

² Von der Einführung des » λ -Gliedes« (vgl. diese Sitzungsber. 1917, S. 142) ist dabei Abstand genommen.

La prima pagina di un lavoro di Albert Einstein del 1918 in cui per la prima volta vengono dedotte le equazioni della propagazione ondosa del campo gravitazionale.

Esplosione di una Supernova



Supernova 1987A



Di nuovo le due stelle che “danzano”

Emissione di o.g. \Leftrightarrow perdita di energia (come l'attrito della monetina)

Le orbite si stringono, la velocità aumenta.....



La Pulsar binaria PSR 1913+16 (2)

*orbita stretta => forte gravità => effetti di Relatività Generale:
periastro avanza di (4.20 /yr)*

- Perdita di energia per emissione di OG;
l'orbita contrae di 3.1 mm/orbit.

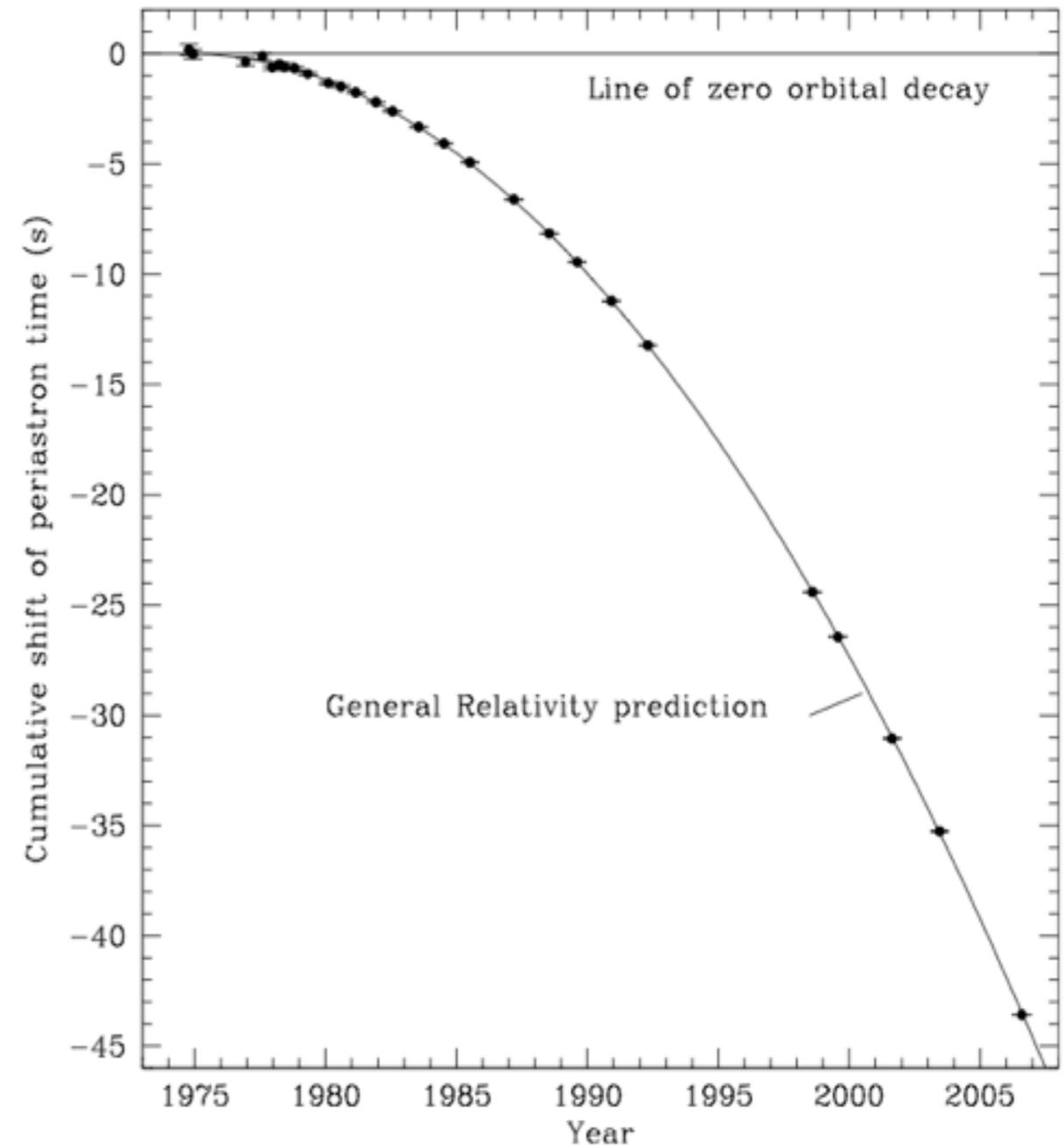
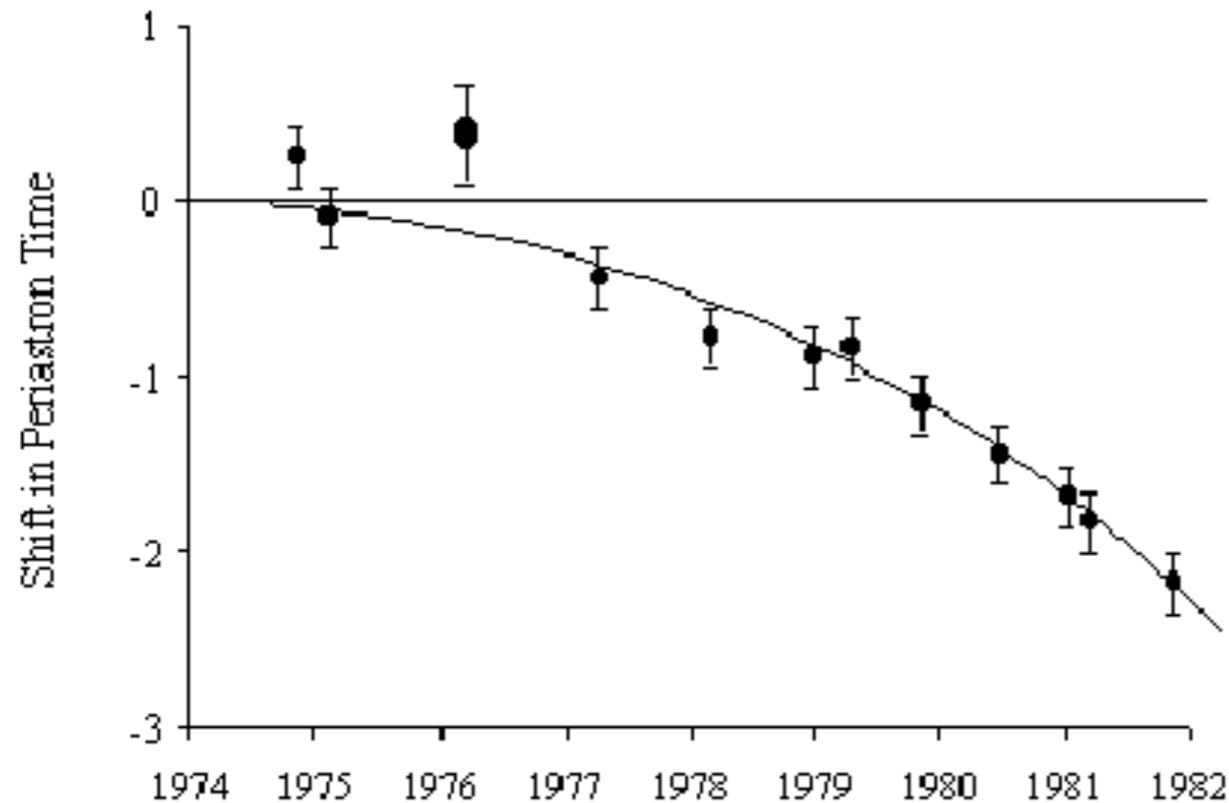


Figure 2. Orbital decay caused by the loss of energy by gravitational radiation. The parabola depicts the expected shift of periastron time relative to an unchanging orbit, according to general relativity. Data points represent our measurements, with error bars mostly too small to see.

Collasso tra 300 Myrs !!!

Web Adapted Version of the Nobel Poster from the Royal Swedish Academy of Sciences

[BACK](#)

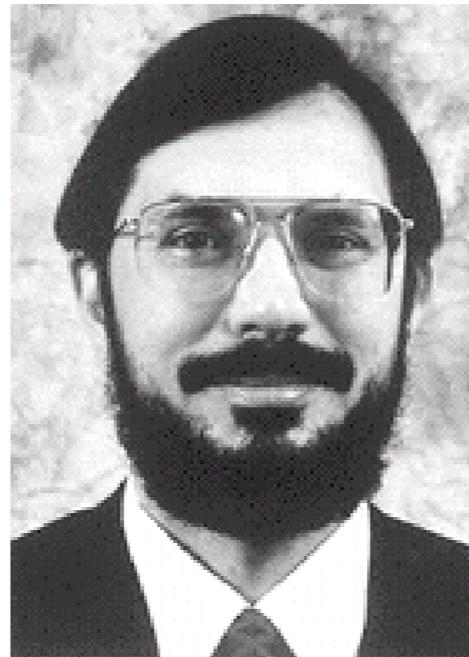
The Nobel Prize in Physics 1993



The Royal Swedish Academy of Sciences has awarded this year's Nobel Prize in Physics to

Joseph H. Taylor Jr and Russell A. Hulse

for their discovery of a new type of pulsar, a discovery that has opened up new possibilities for the study of gravitation.



At the time of the discovery Russell Hulse (right) was a graduate student and Joseph Taylor was his supervisor at the University of Massachusetts, Amherst. Taylor is currently Professor of Physics and Hulse is researching in plasma physics, both at Princeton University, USA.

Two stars for general relativity

On 2 July 1974 the first signals were discovered from a binary pulsar, two neutron stars that orbit each other. It turned out that they could be used to demonstrate the existence of gravitational radiation. It seems that Einstein was right...

Contents:

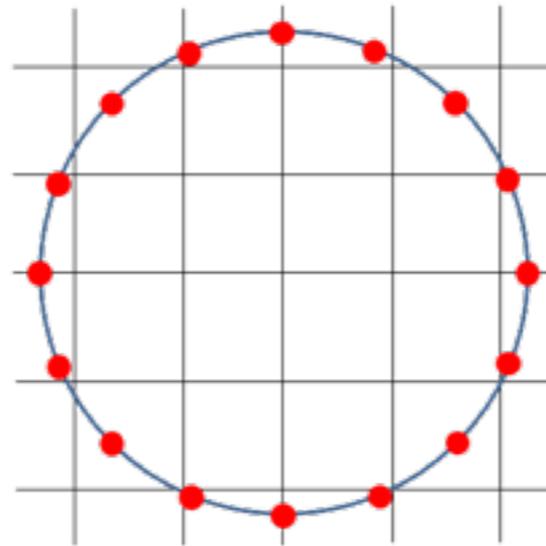
Introduction ▶▶

The discovery of the binary pulsar

[BACK](#)

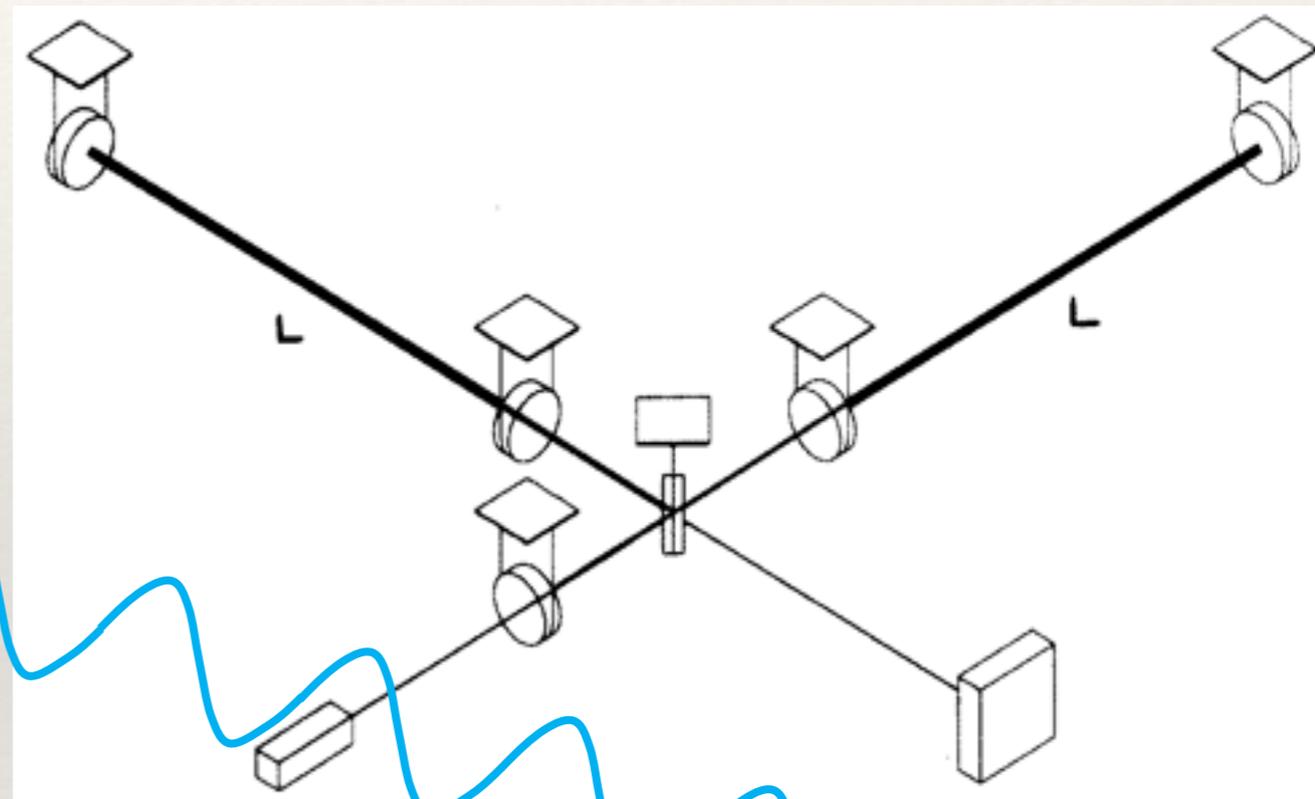
Qual è l'effetto delle OCG?

- L'effetto è "meccanico"
 - ◆ Le distanze tra tutti i punti dello spazio cambiano

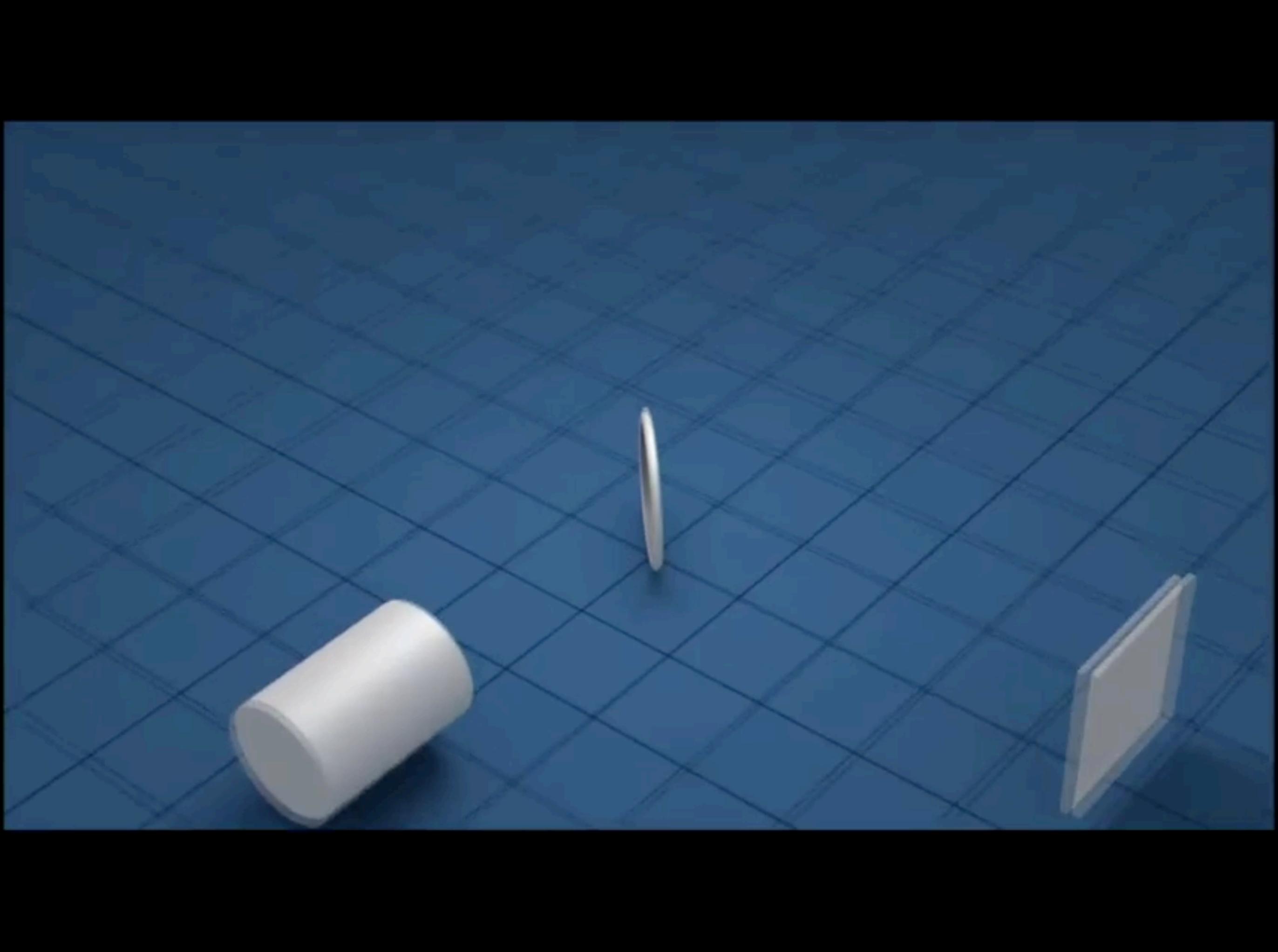


L'interferometro di Michelson

Strumento ideale:



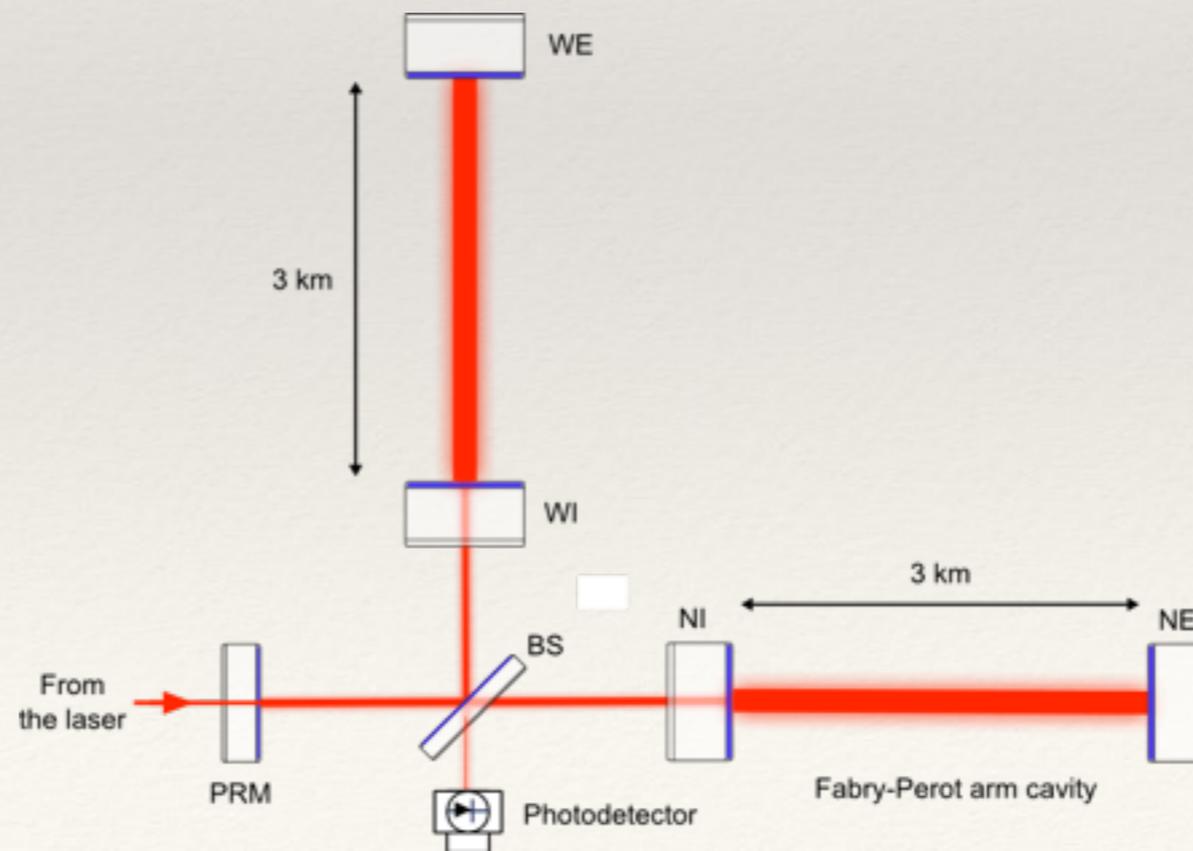
- Ma lo spostamento degli specchi per effetto delle onde è piccolissimo ...



La sfida tecnologica

Vedere un 'OG invece di un disturbo "locale" implica:

- *Isolare dalle vibrazioni del suolo e dal rumore ambiente*
 - *Ultra alto vuoto (su 3-4 km !)*
 - *Sistemi di isolamento degli specchi (torri alte 8 metri)*
 - *Specchi super raffinati*
- *Una sorgente luminosa ultra stabile (in frequenza e in ampiezza)*
- *Analisi dei dati non convenzionale*
- *Controllo di qualche centinaio di monitor ambientali*
- *etc.*



Quanto é piccolo questo segnale ?

$$h = \frac{\delta L}{L} \sim 10^{-21}$$

E' come cambiare la distanza Terra- Sole del diametro di un atomo

E' come cambiare la distanza da qui alla stella più vicina dello spessore di un capello

E' ~~come~~ cambiare la distanza tra gli specchi di LIGO (4 km) di un millesimo del diametro di un protone !

Tutti i rivelatori di onde gravitazionali





LIGO HANFORD

GEO HF



VIRGO



KAGRA



LIGO LIVINGSTON

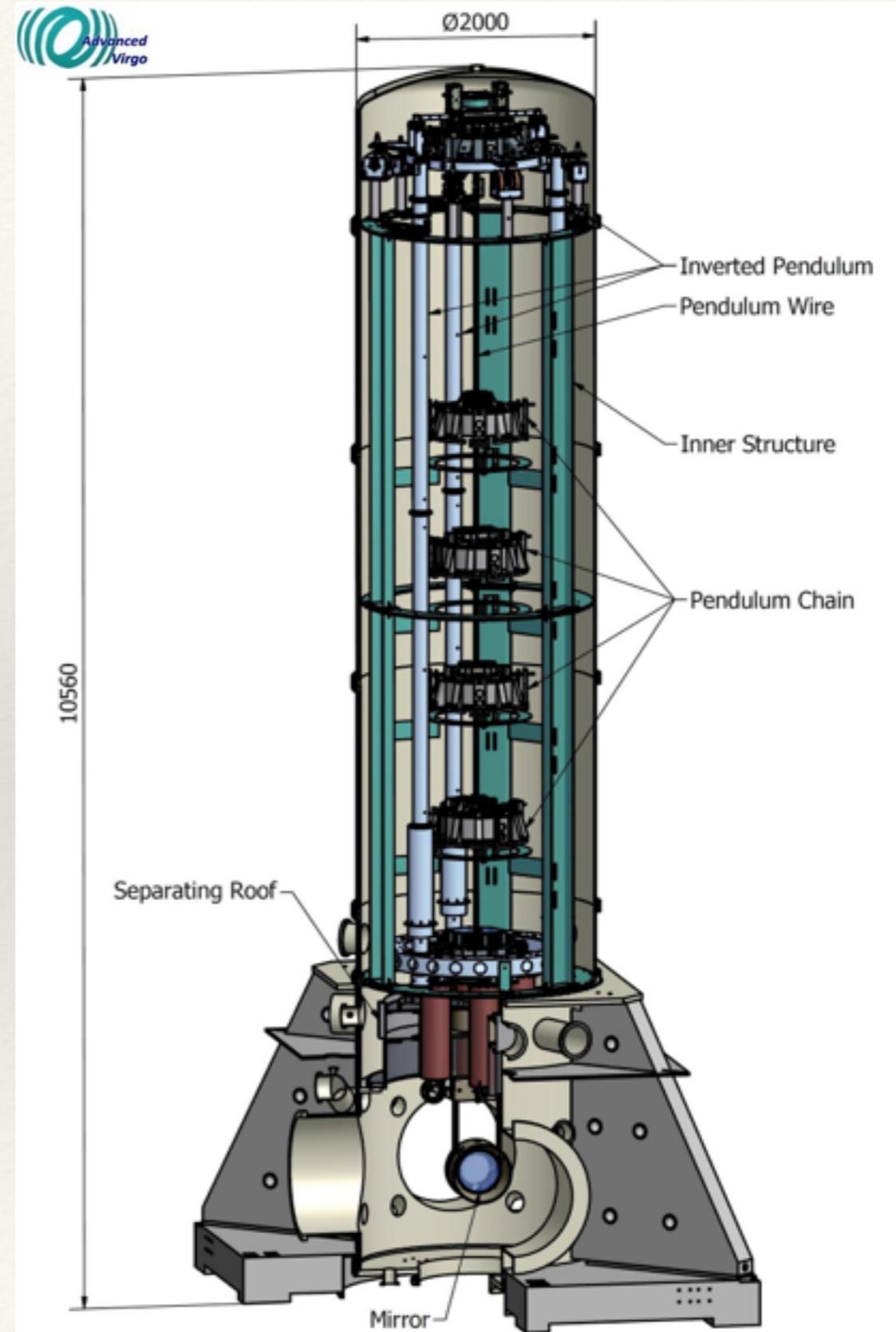


L'apparato





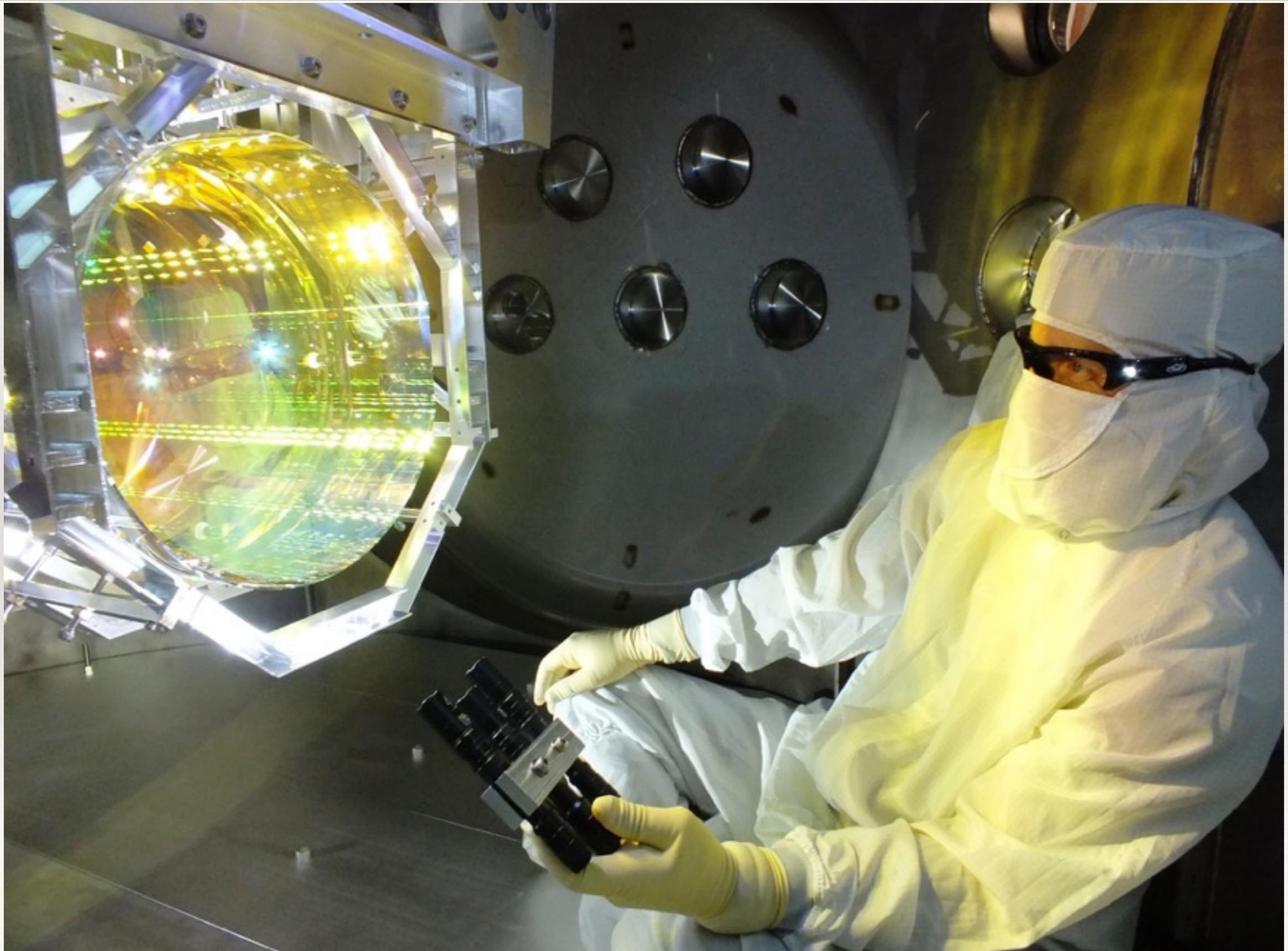
Esempi: 1- le torri di sospensione a Virgo



Esempi: 1- le torri di sospensione a Virgo

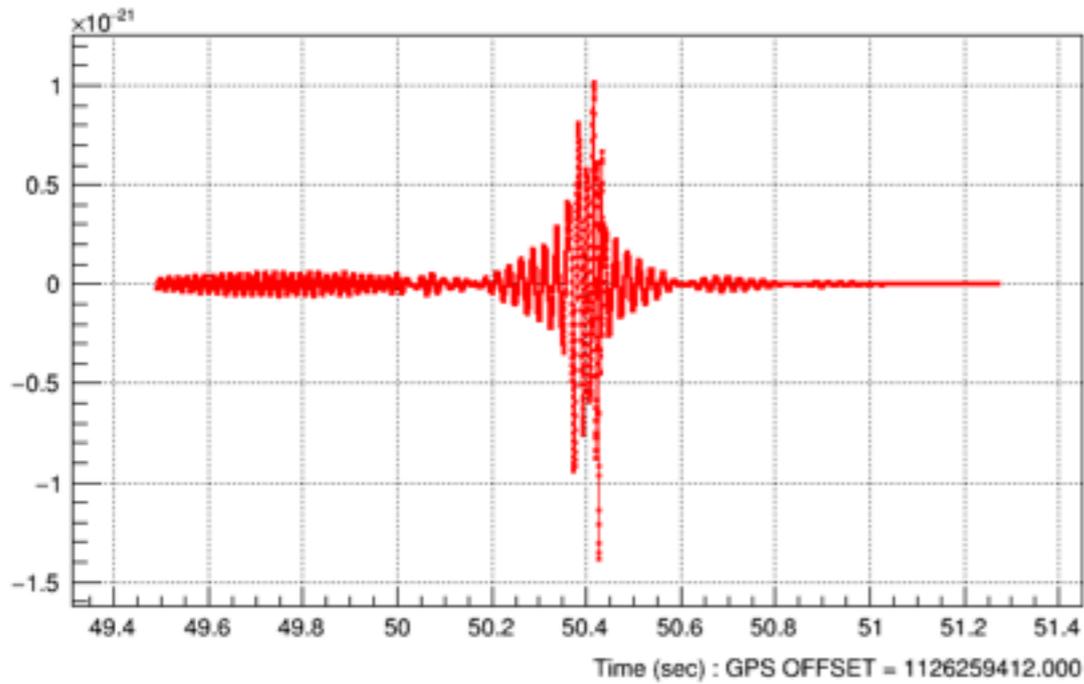


2- Gli specchi di LIGO (fatti a Lione)

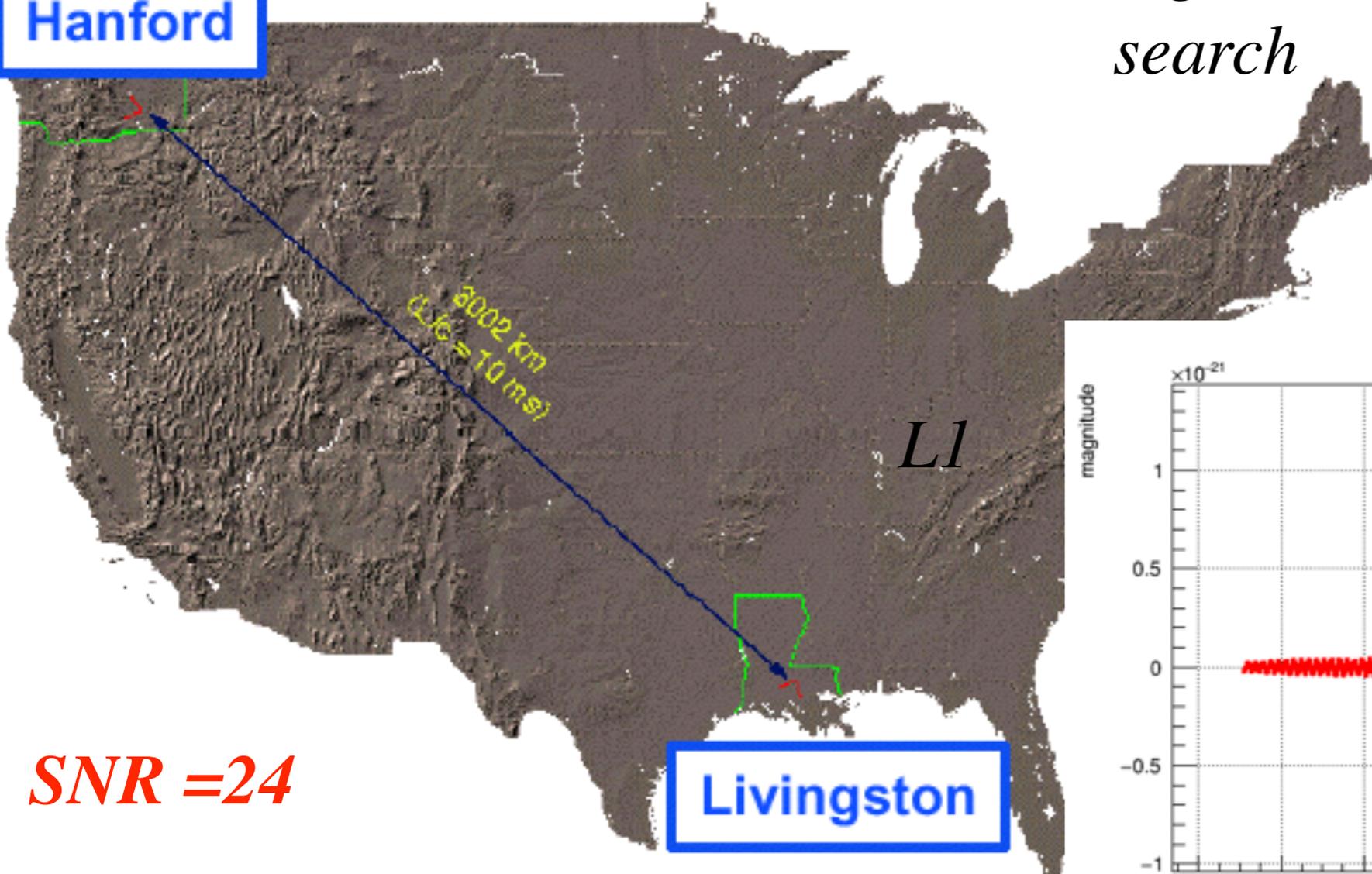


*September 14, 2015 at
11:50:45 in Central
Europe*

*Alarm reported by the on-line
algorithm for generic transient
search*

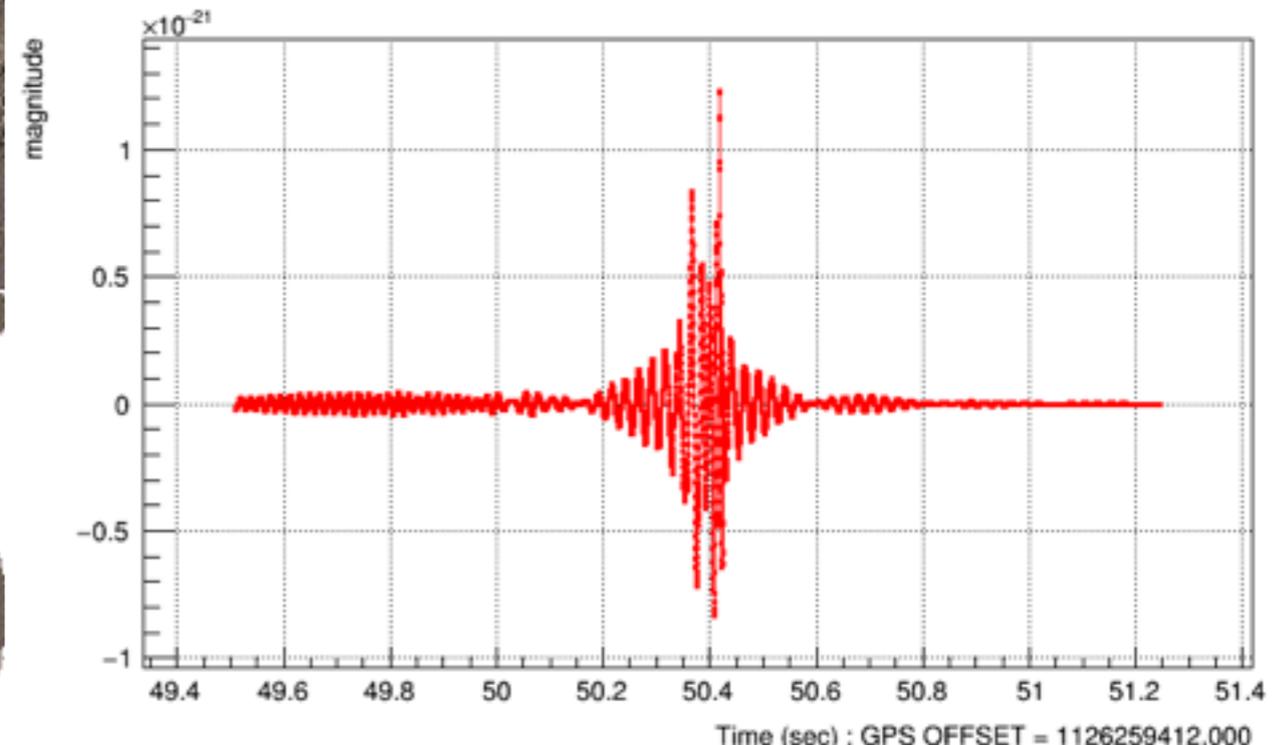


Hanford

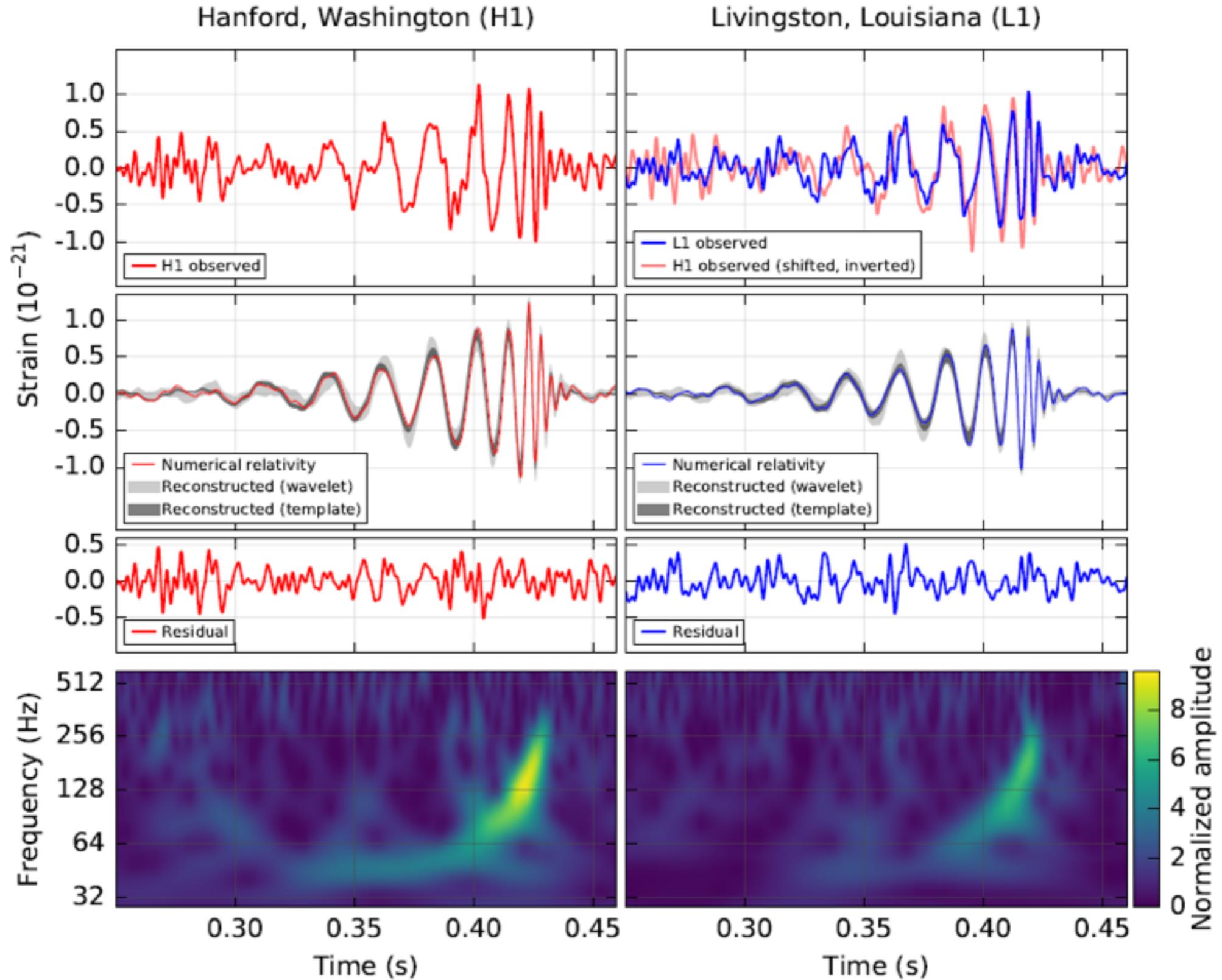


SNR = 24

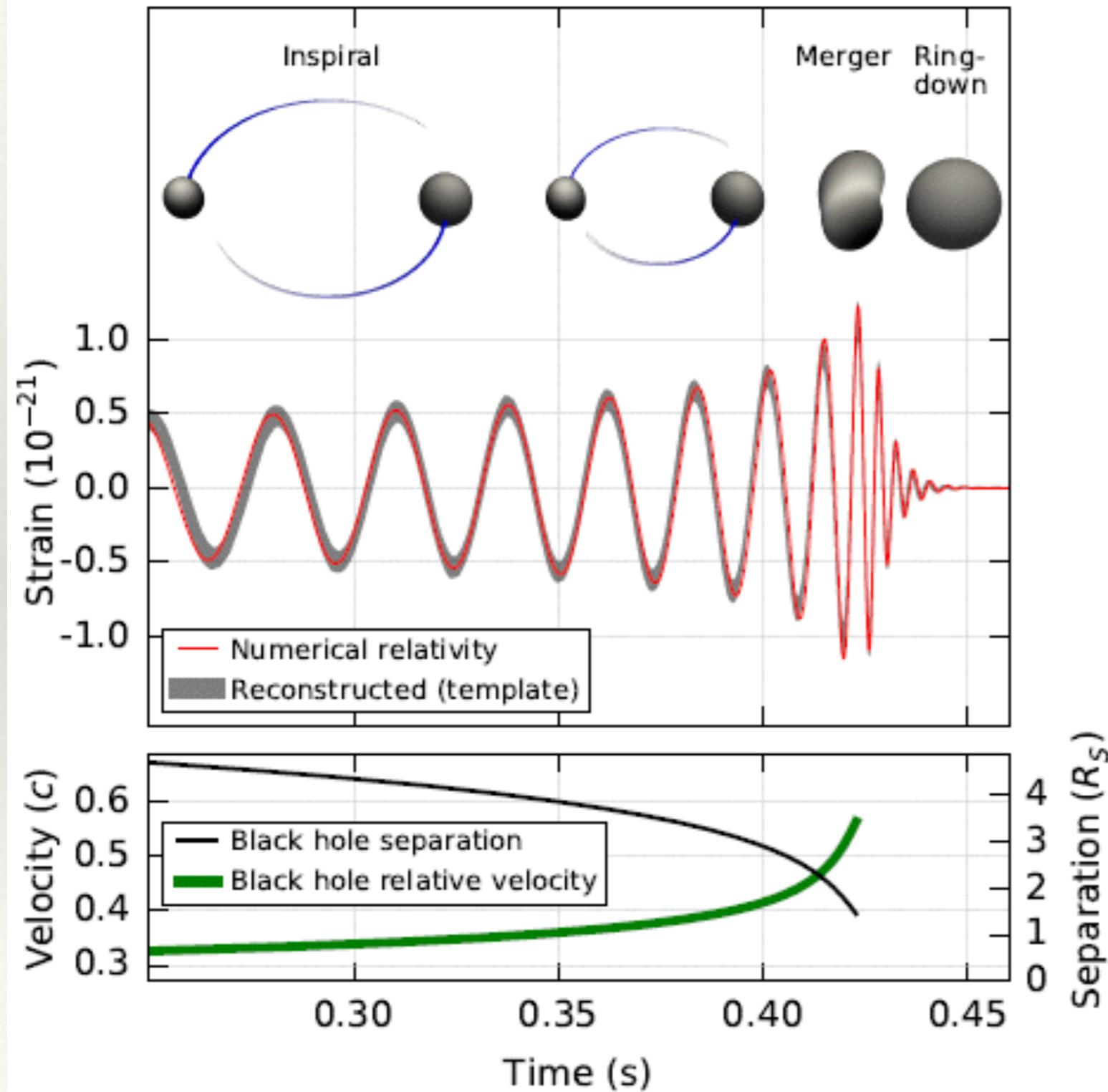
Livingston



The event: *GW150914*

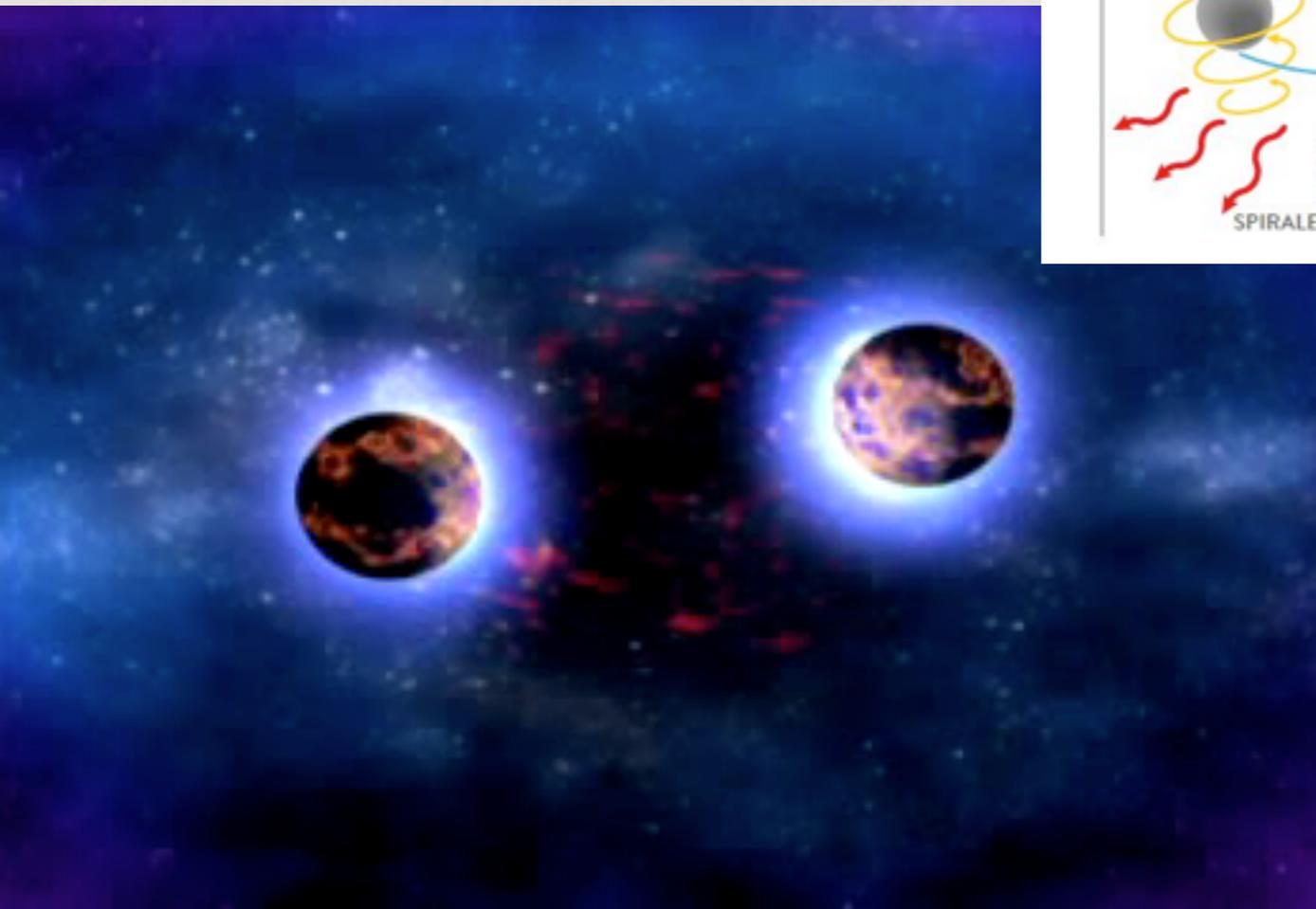
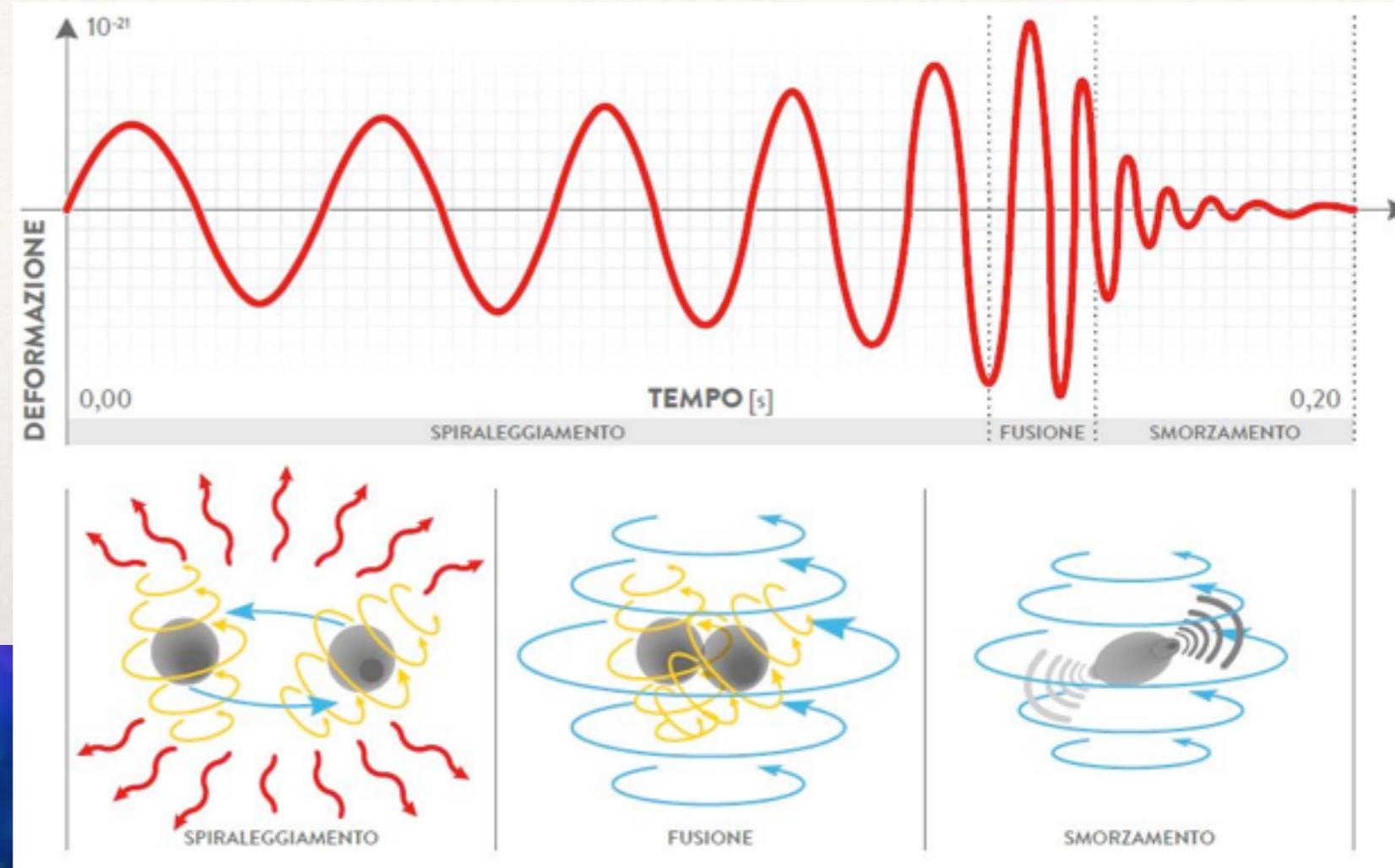


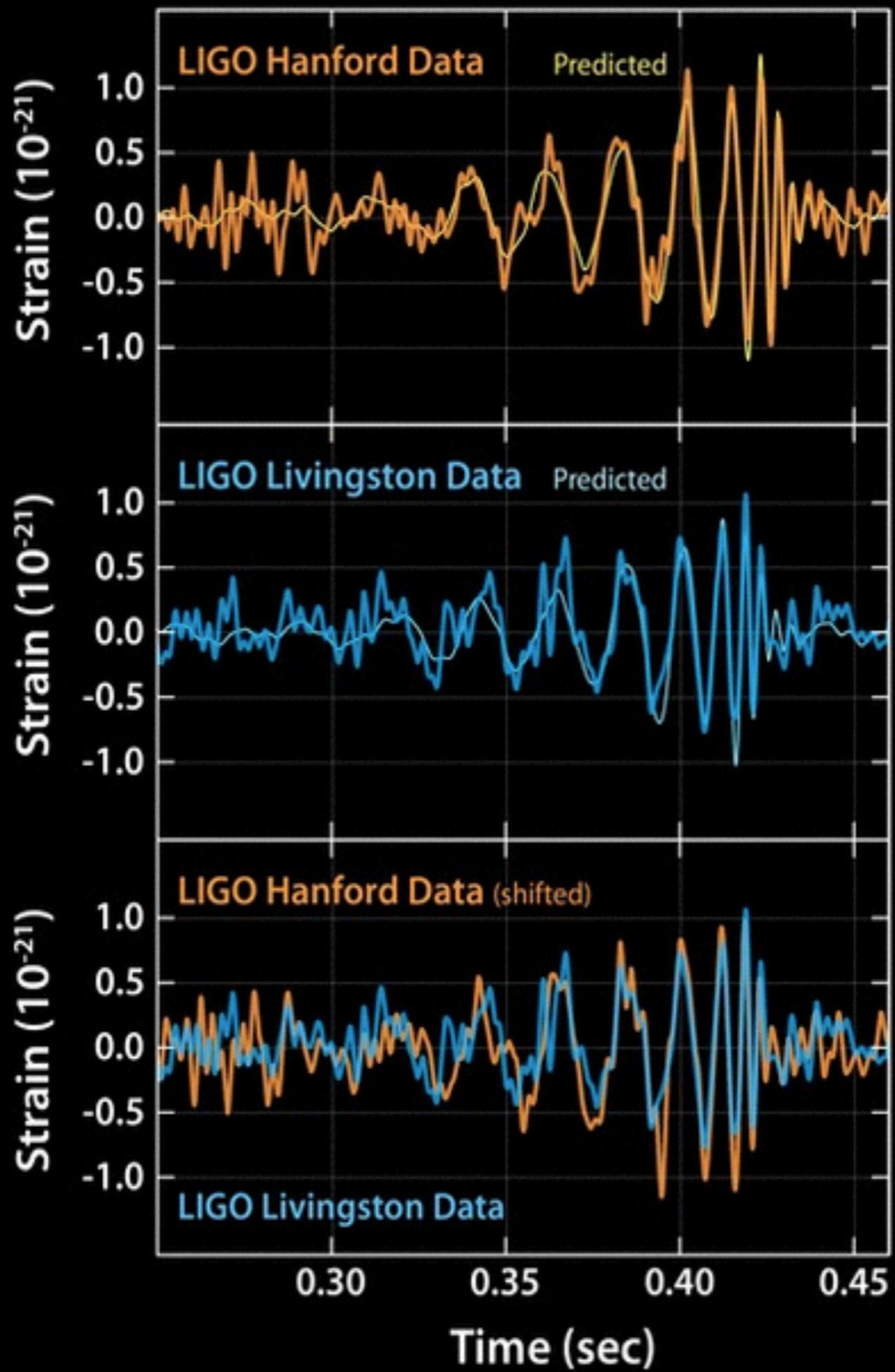
GW150914: Il segnale, e la sorgente che l'ha generato

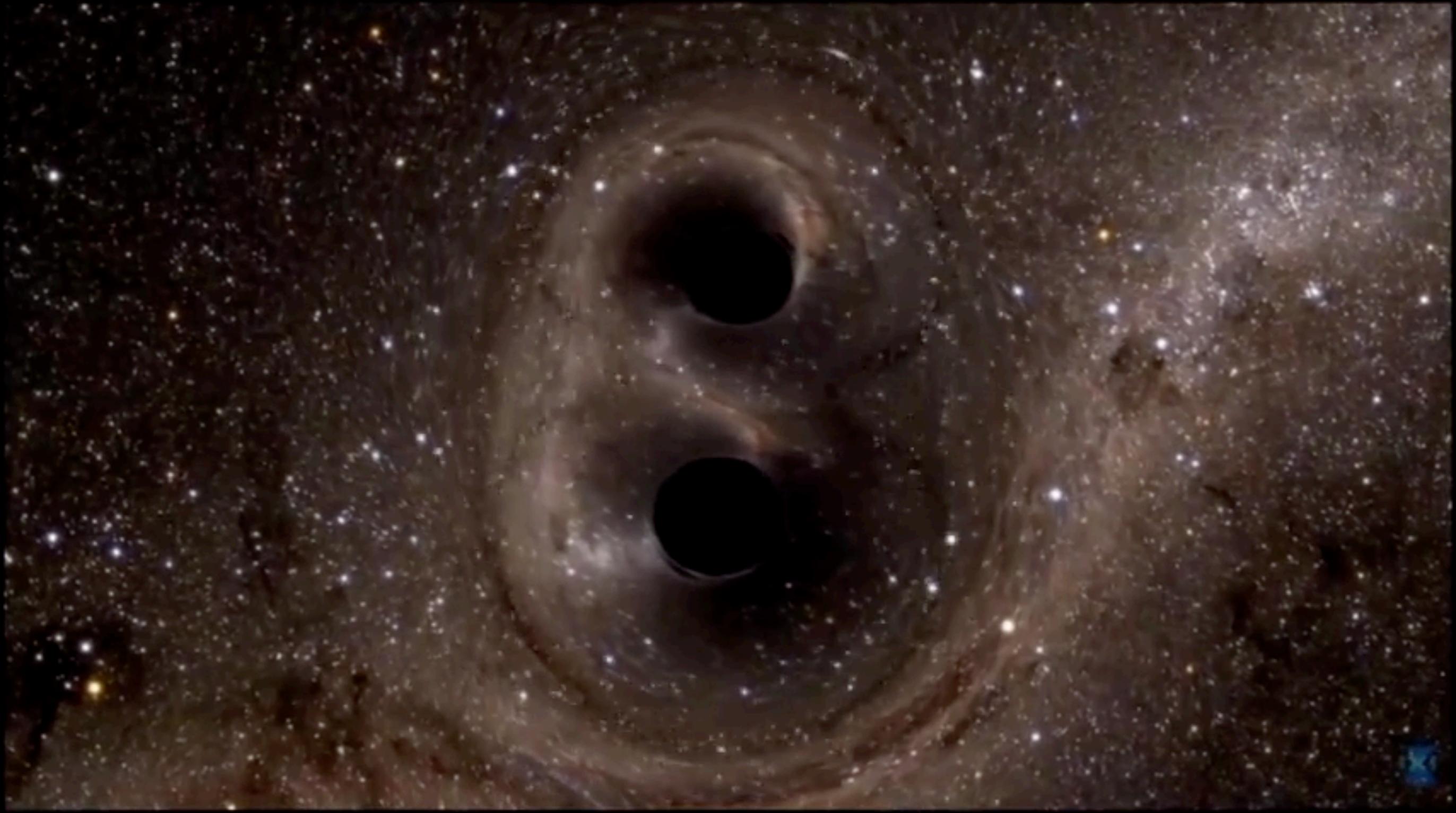


$$\mathcal{M} = \frac{(m_1 m_2)^{3/5}}{(m_1 + m_2)^{1/5}} = \frac{c^3}{G} \left[\frac{5}{96} \pi^{-8/3} f^{-11/3} \dot{f} \right]^{3/5}$$

Coalescenza di due stelle binarie

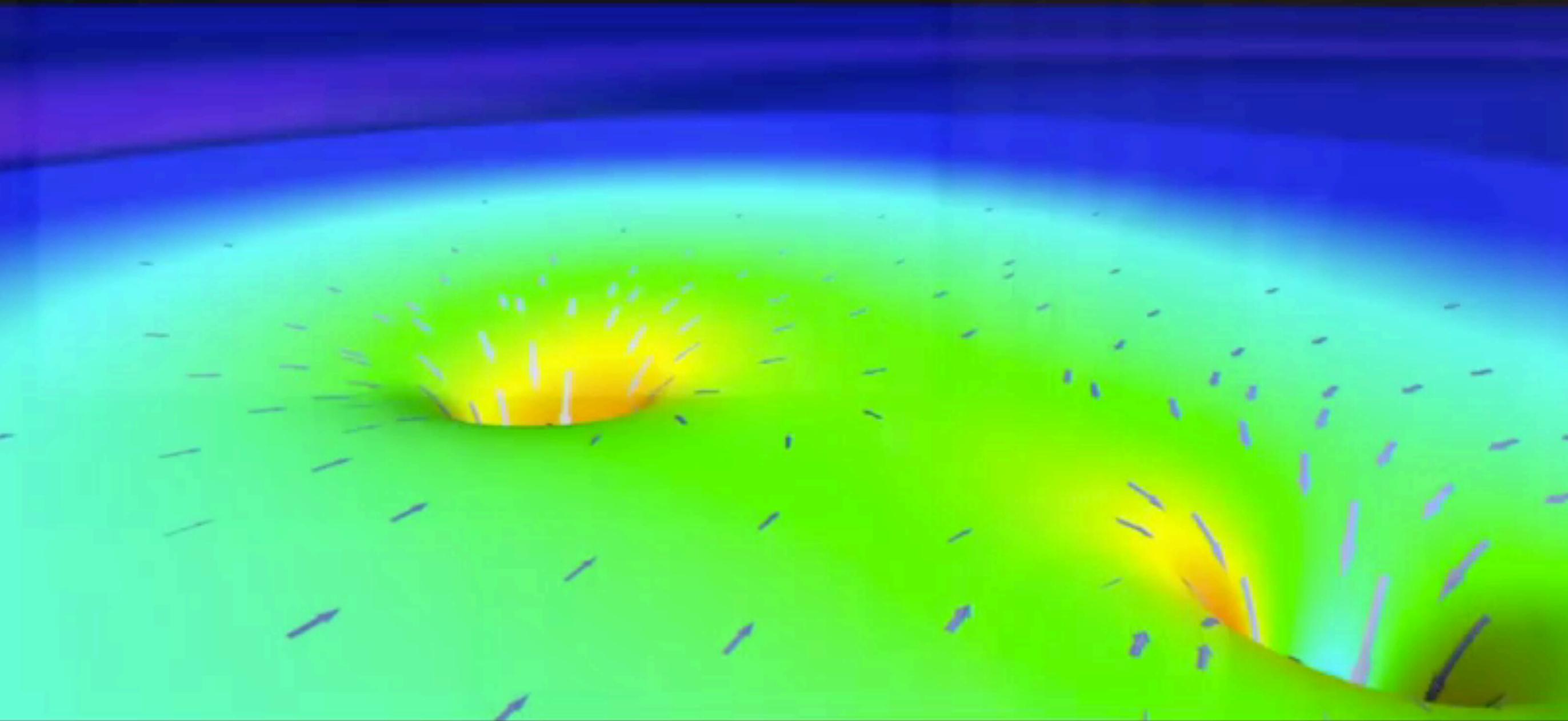






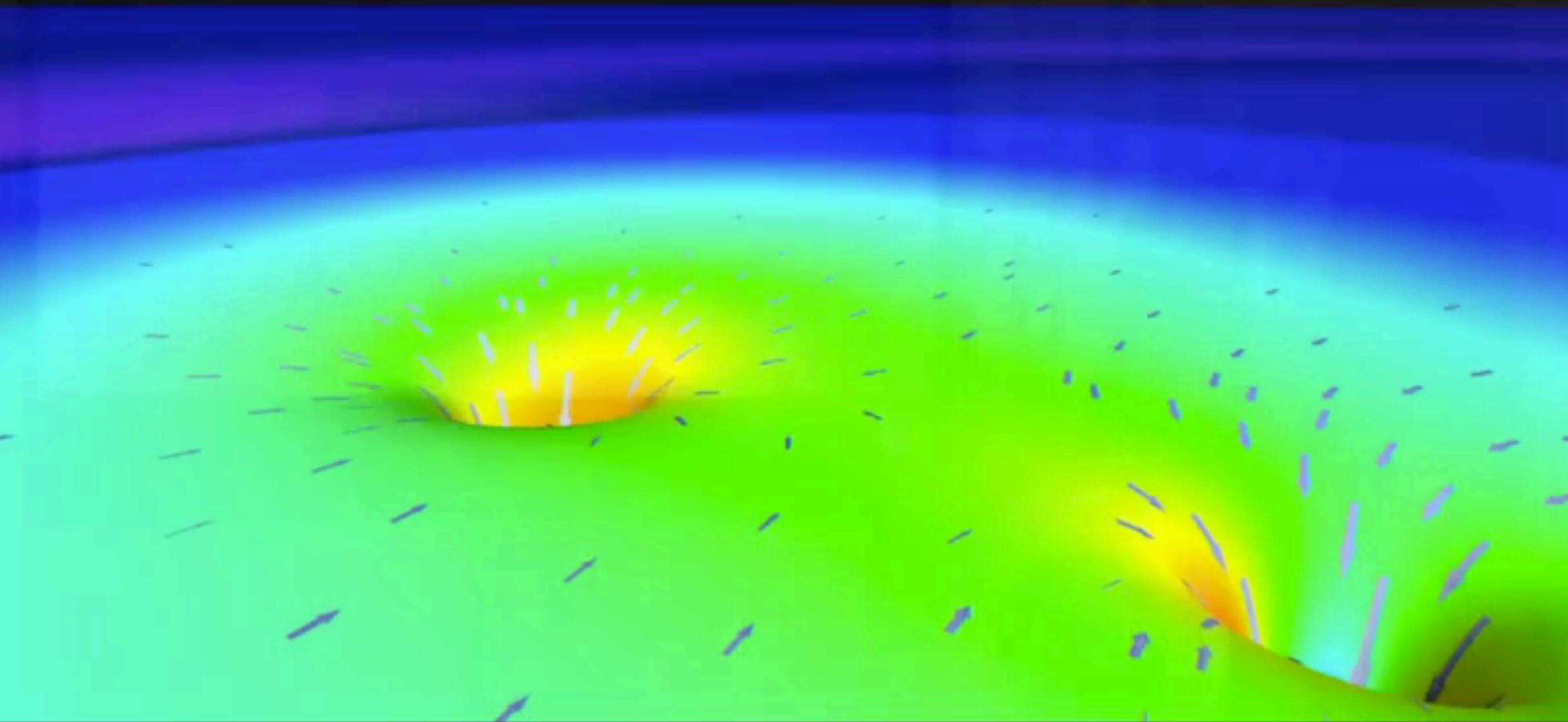
BH-BH merging (from K. Thorne's press conference)

-0.45s



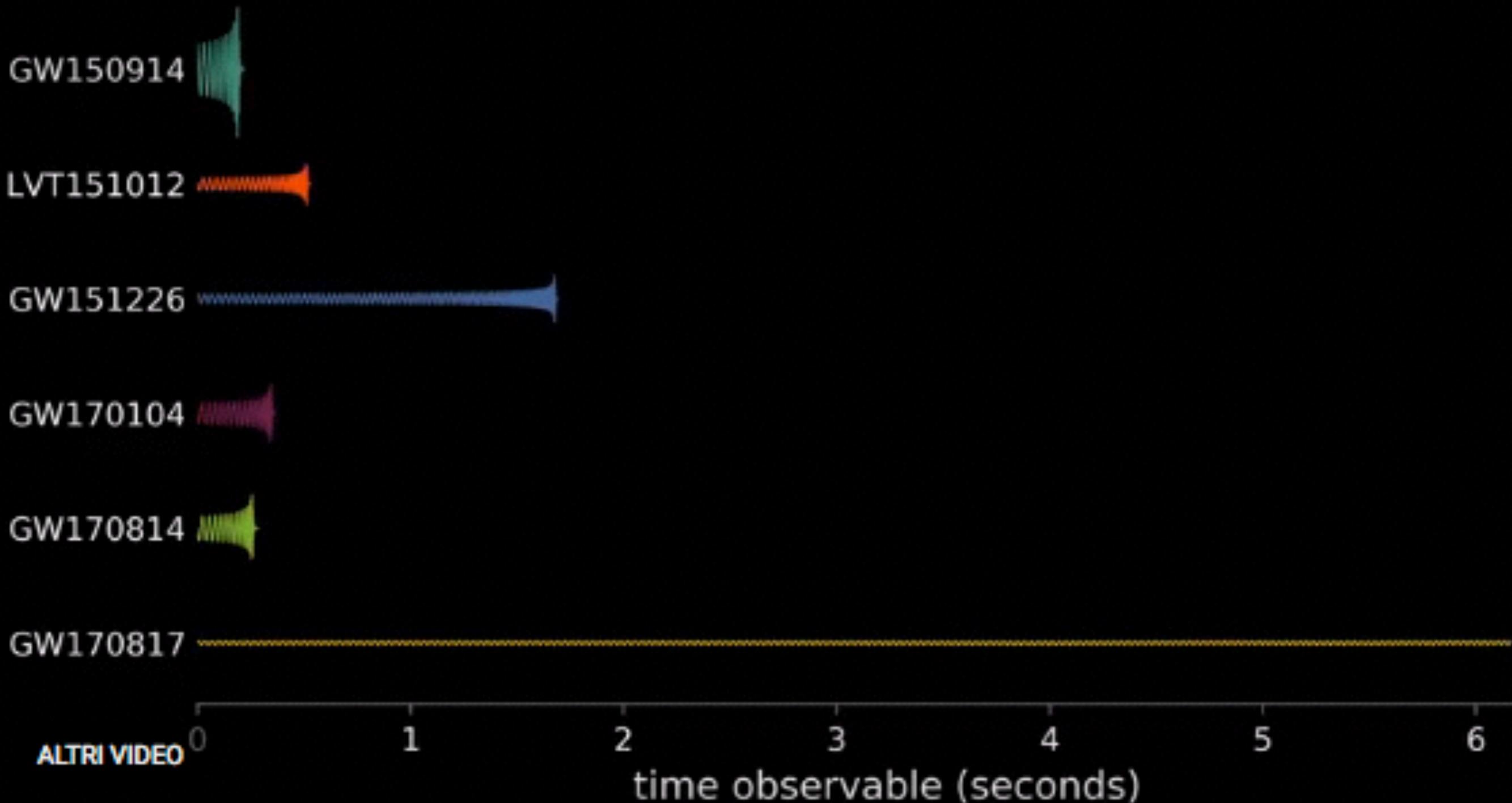
BH-BH merging (from K. Thorne's press conference)

-0.45s



e infatti....

Variety of Gravitational Waves and a Chirp



Variety of Gravitational Waves

GW150914



LVT151012



GW151226



GW170104



GW170814



GW170817



ALTRI VIDEO



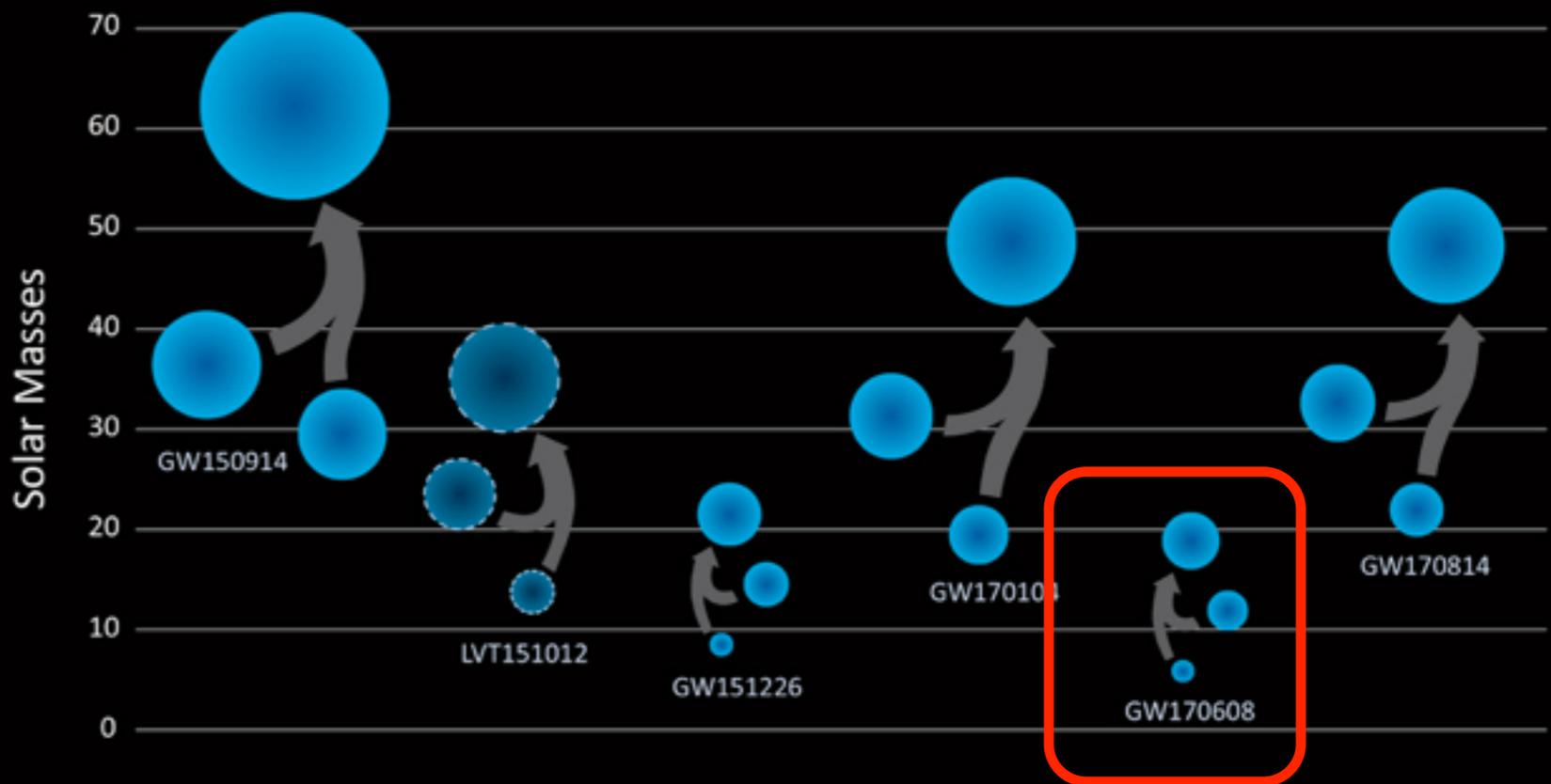
time observable (seconds)

0:06 / 0:56



YouTube

Black Holes of Known Mass



LIGO/VIRGO

Premio Nobel 2017 :

Nobel Prizes and Laureates

Physics Prizes < 2017 >

▼ About the Nobel Prize in Physics 2017

Summary

Prize Announcement

Press Release

Advanced Information

Popular Information

Award Ceremony Video

Award Ceremony Speech

► Rainer Weiss

► Barry C. Barish

► Kip S. Thorne

All Nobel Prizes in Physics

All Nobel Prizes in 2017



The Nobel Prize in Physics 2017
Rainer Weiss, Barry C. Barish, Kip S. Thorne

Share this: 1.5K

The Nobel Prize in Physics 2017



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

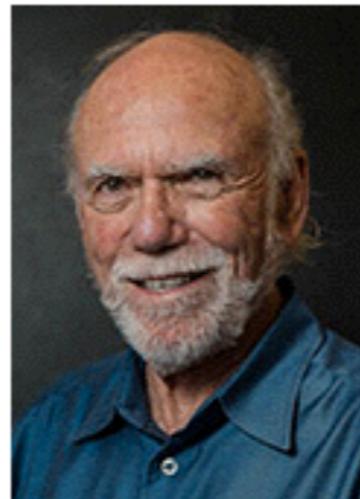
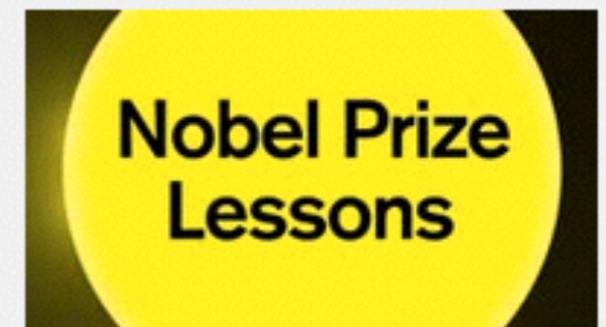
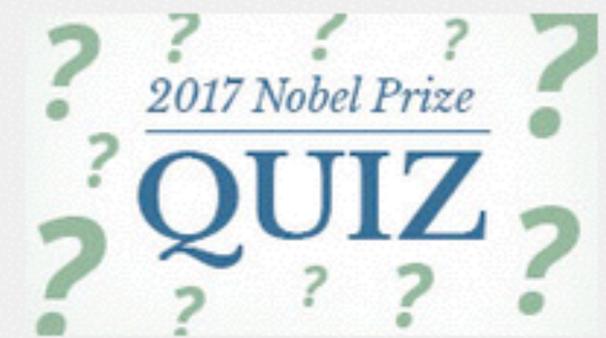
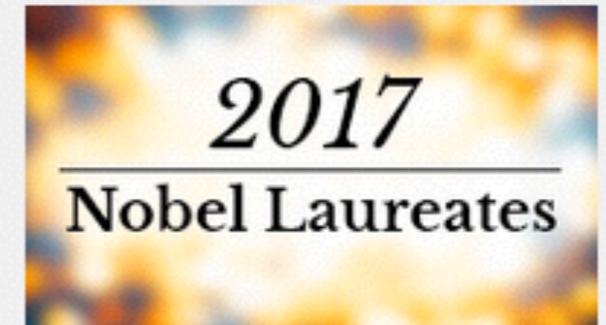


Photo: Caltech
Barry C. Barish
Prize share: 1/4



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

The Nobel Prize in Physics 2017 was divided, one half awarded to Rainer Weiss, the other half jointly to Barry C. Barish and Kip S. Thorne "for decisive contributions to the LIGO detector and the observation of gravitational waves".



E l'Italia? e l'Europa?

L'Europa è divisa....

- *D+ GB (GEO, 600 m) sono parte della LIGO Collaboration,*
- *Italia + Francia hanno creato **VIRGO** (3 km), a Cascina (PI)*
- *ora con Olanda, Polonia, Ungheria.... l'upgrade: **adVIRGO***



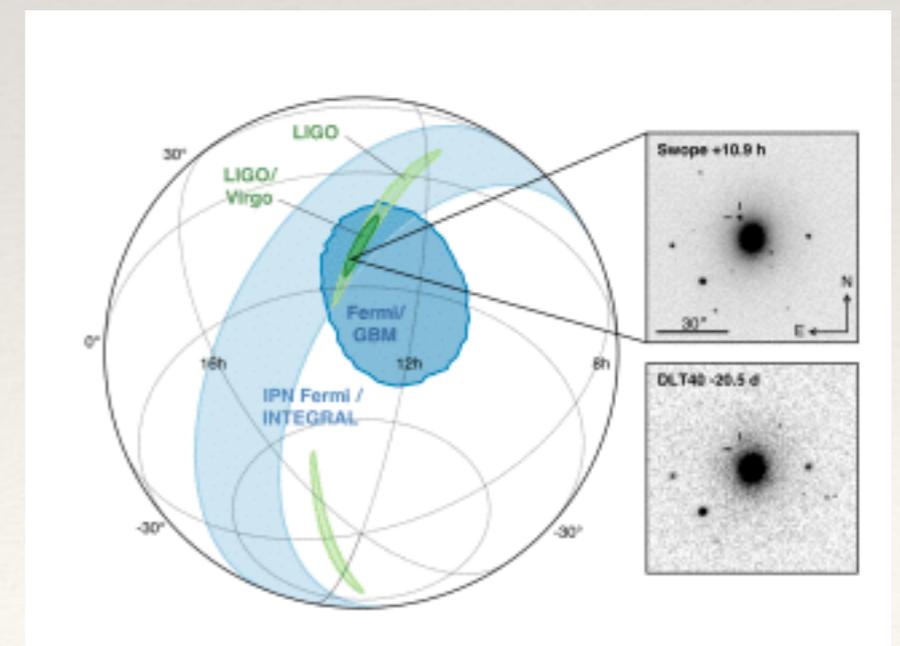
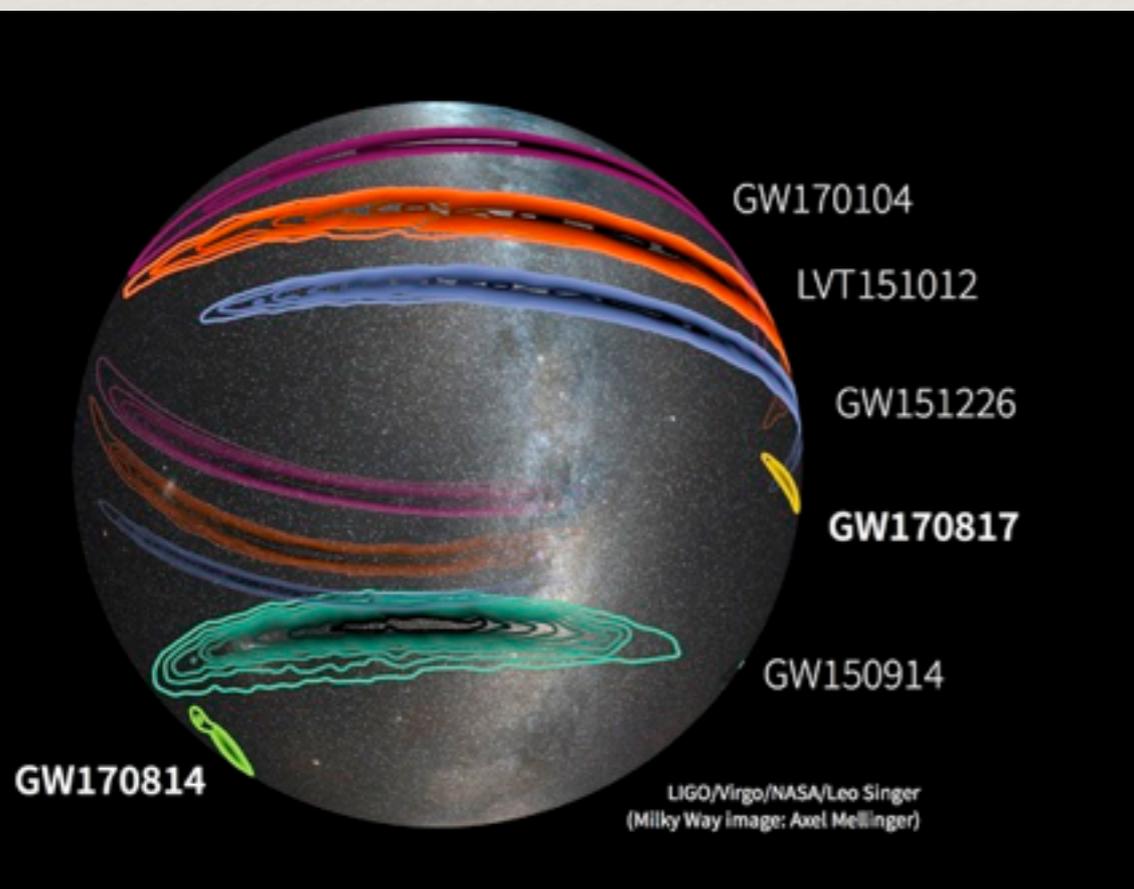
E l'Italia? e l'Europa?

adVIRGO, ha iniziato a funzionare solo nell'agosto 2017

MA:

nei 25 giorni di presa dati insieme a LIGO, Virgo ha "visto":

- Una coalescenza di buchi neri*
- La prima coalescenza di stelle di neutroni, contribuendo, grazie alla triangolazione, a localizzarla nel cielo, e a trovare la **controparte e.m.***



....e dopo ?

LISA - una missione per i 2030

- Se il segnale aumenta con la distanza....
3 navicelle a 2 milioni di km di distanza !



Per saperne di più:

- *advanced ligo on youtube*
- <http://public.virgo-gw.eu>
- www.ligo.caltech.edu



- <http://www.phdcomics.com/comics.php?f=1853#italian>