

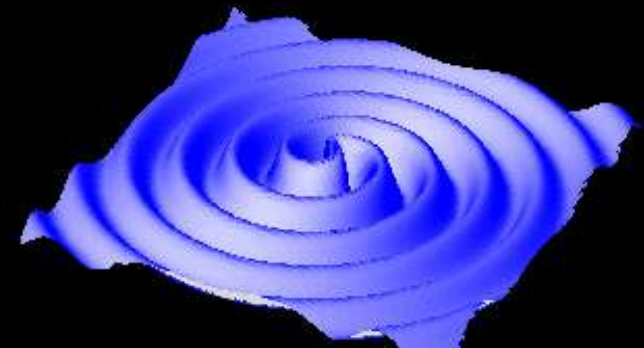
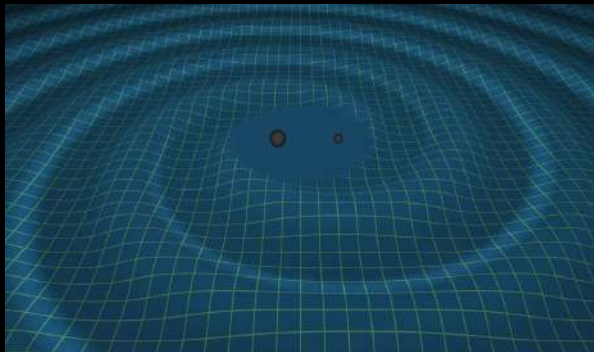


Istituto Nazionale di Fisica Nucleare



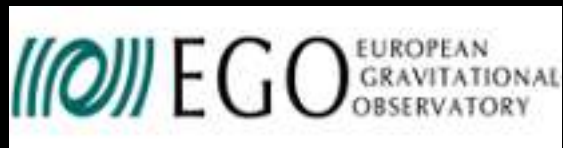
La scoperta delle onde gravitazionali e la nascita della astronomia multimessaggera

Pia Astone, INFN Roma, LIGO/Virgo collaboration



LNF, Summer School 15-19 giugno

VIRGO ha iniziato la presa dati nel 2003
E ha rivelato il primo segnale nel 2017

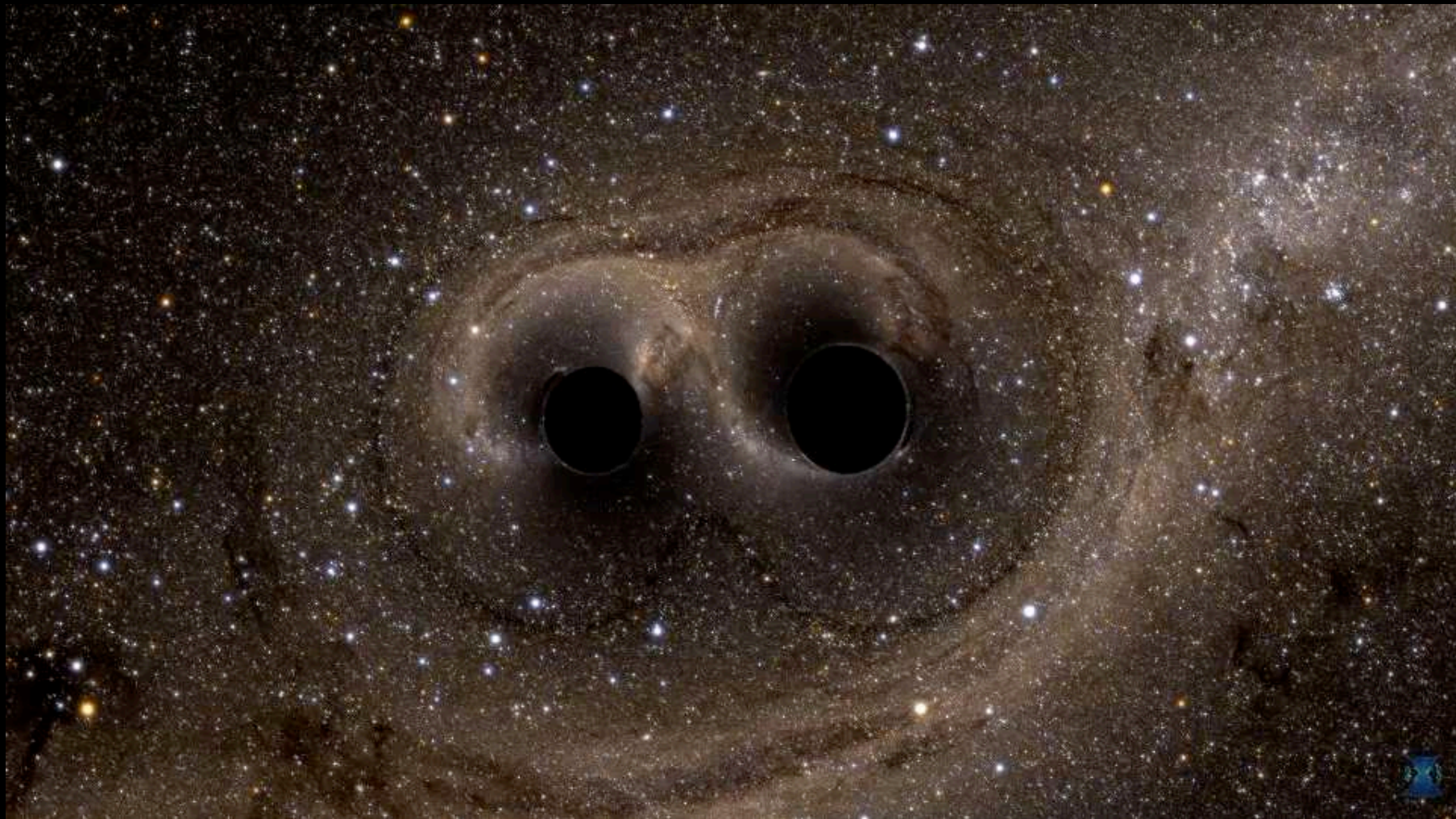


11 paesi diversi
99 istituzioni
~ 500 membri

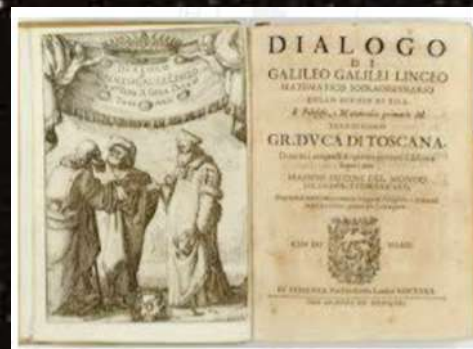
<http://public.virgo-gw.eu/la-collaborazione-virgo/>



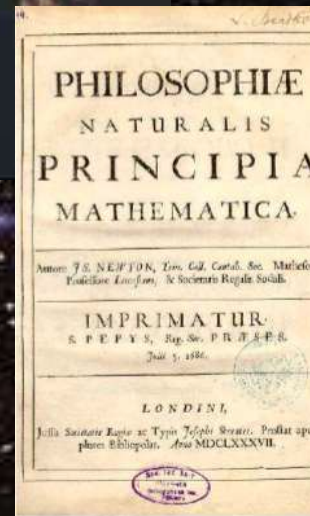
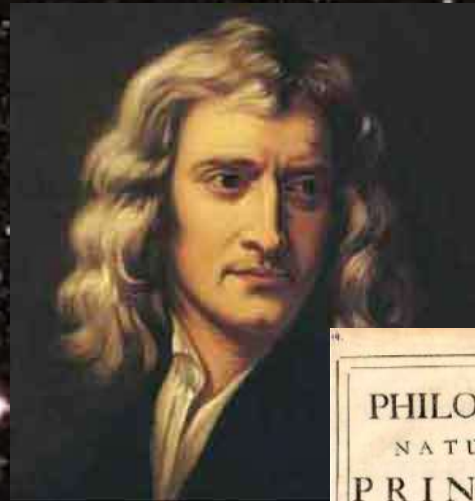
1,3 miliardi di anni fa...



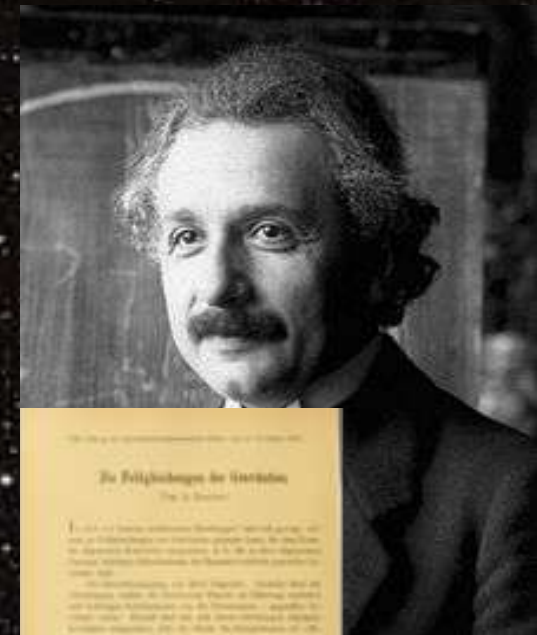
I 3 pilastri della gravità



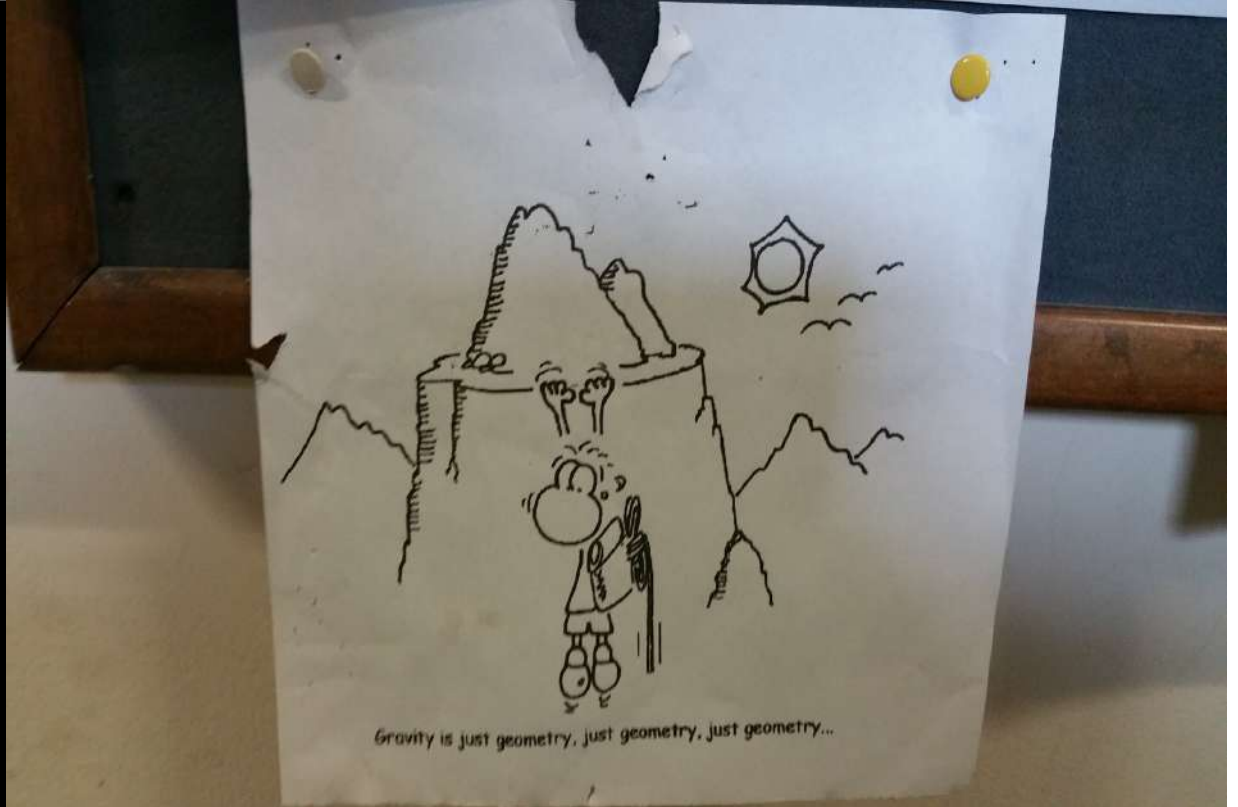
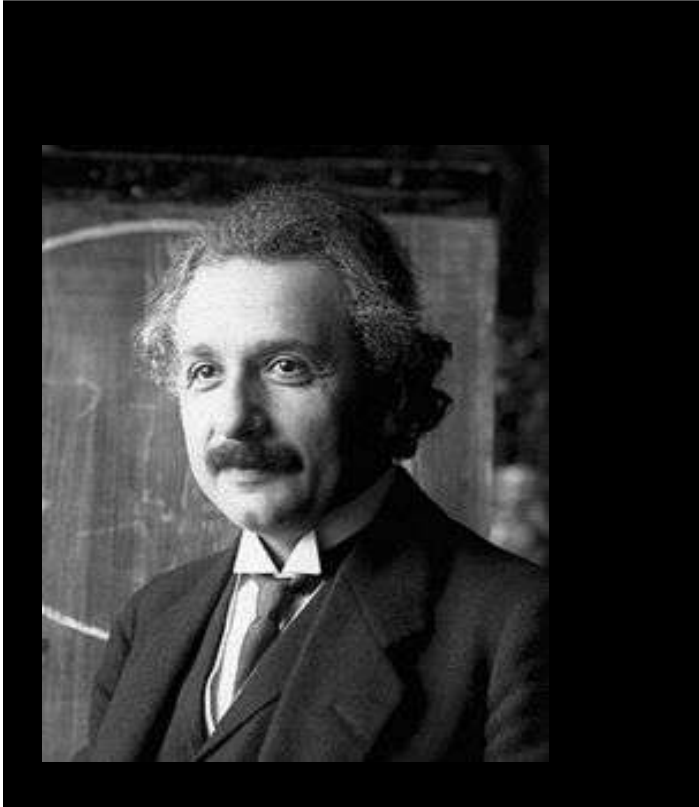
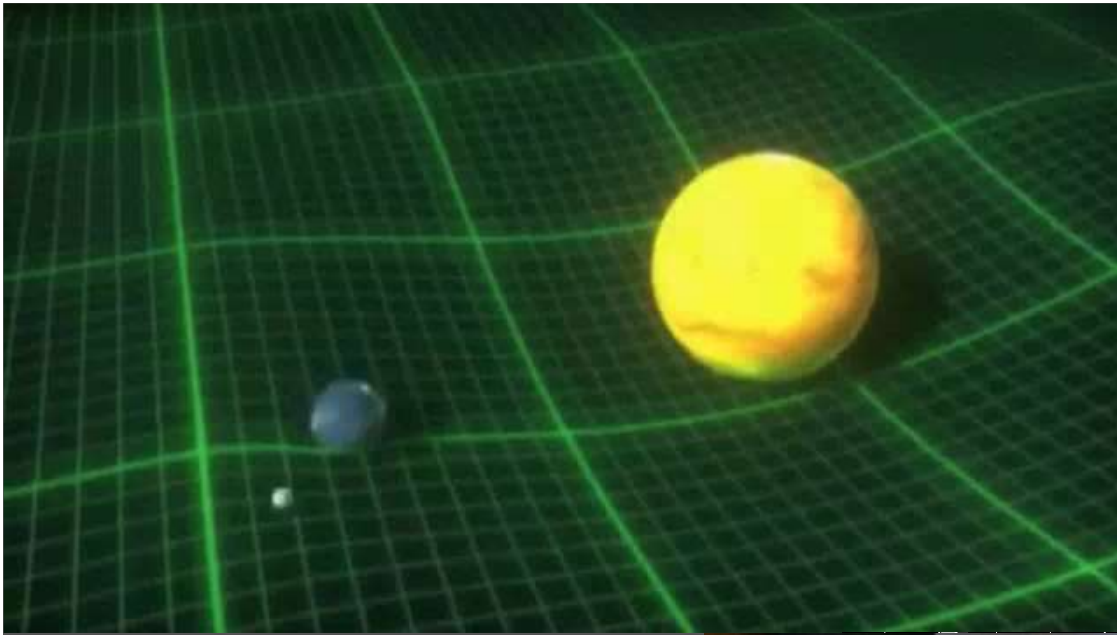
Galilei
1564-1642



Newton
1642-1726



Einstein
1879-1955



LA GEOMETRIA CURVA LA LUCE...
OSCAR 2015 "MIGLIORI EFFETTI SPECIALI"
AL FILM INTERSTELLAR



Interstellar, Paramount Pictures

Directed by Christopher Nolan

Image based on calculations by Kip Thorne and Double Negative Co.

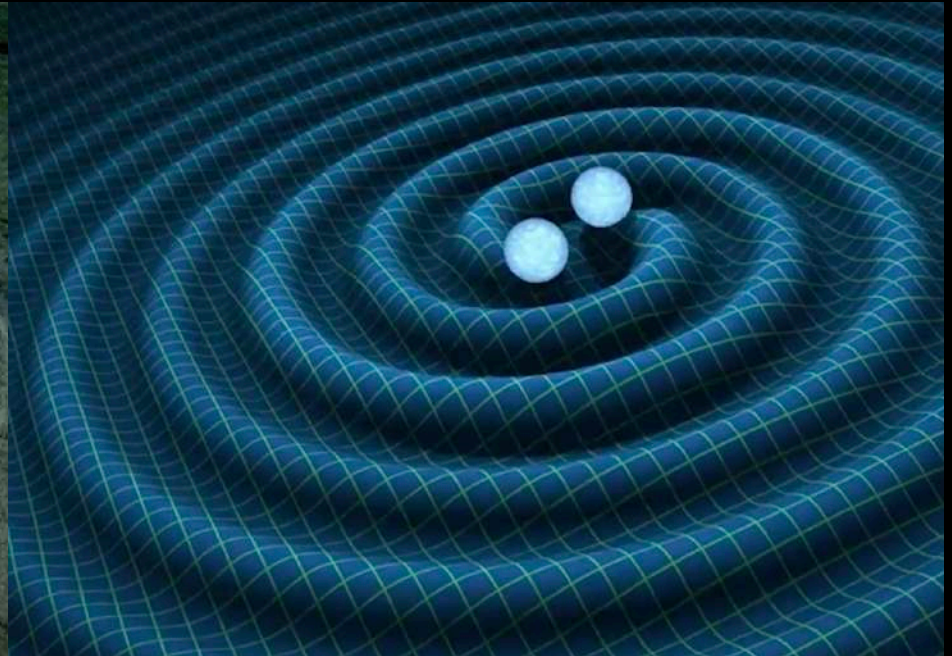
1916:

Einstein predice l'esistenza delle onde gravitazionali



Acqua come
fluido elastico

Se sollecitata, si
generano onde

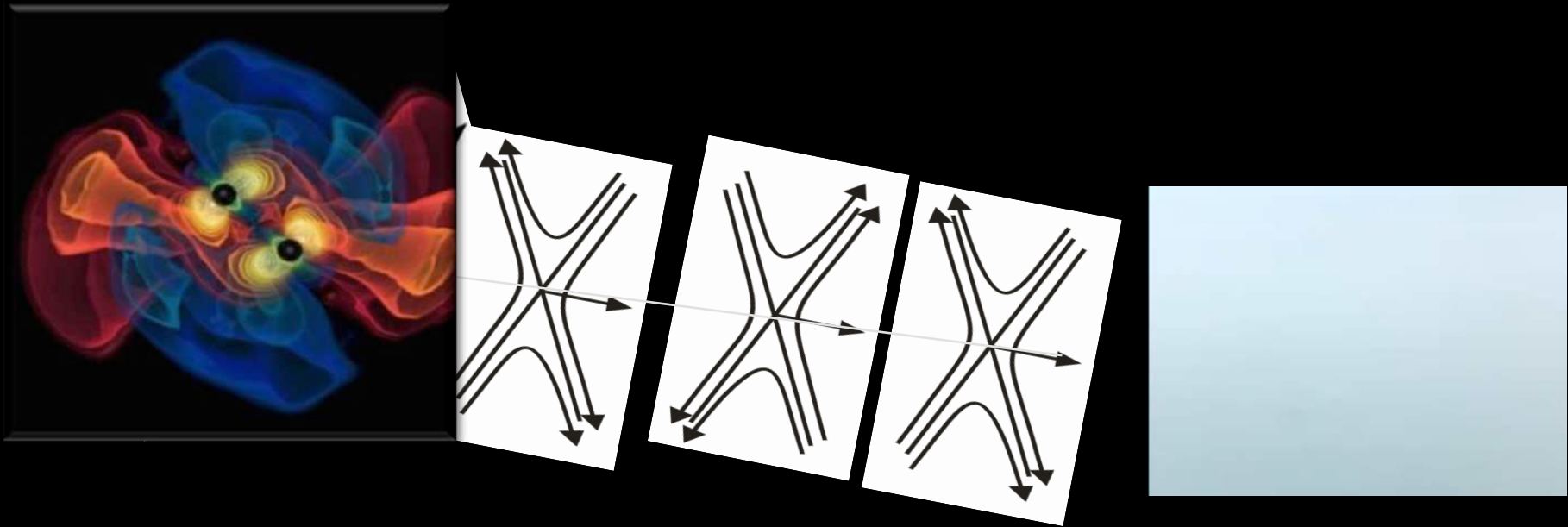


Lo spazio-tempo di
Einstein è elastico!

Se sollecitato, si
generano onde

Soluzione dell' equazione di campo nel vuoto: $\mathbf{G}_{\mu\nu} = \mathbf{R}_{\mu\nu} - 1/2 \mathbf{g}_{\mu\nu} \mathbf{R} = 0$

9



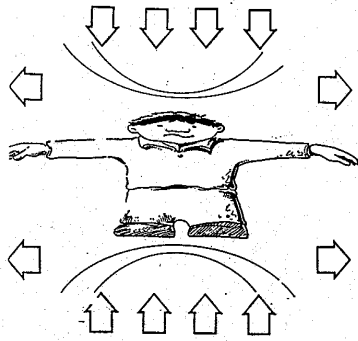
$$\left(\nabla^2 - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2}\right) h_{\mu\nu} = 0$$

Approssimazione di campo debole:

$$g_{\mu\nu} = g^0_{\mu\nu} + h_{\mu\nu} \text{ con } |h_{\mu\nu}| \ll 1$$

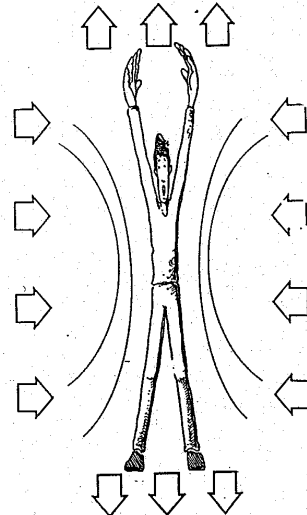
IL PRINCIPIO DELLA MISURA

CAUTION:
GRAVITATIONAL
RADIATION

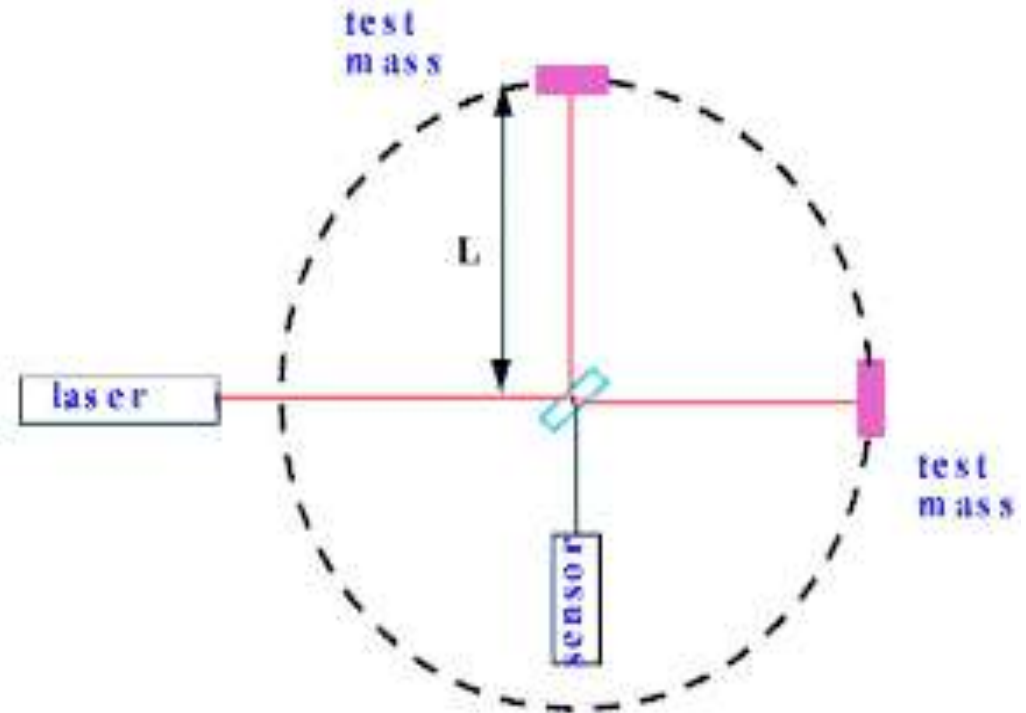


MAY BE DANGEROUS
TO YOUR HEALTH

CAUTION:
GRAVITATIONAL
RADIATION



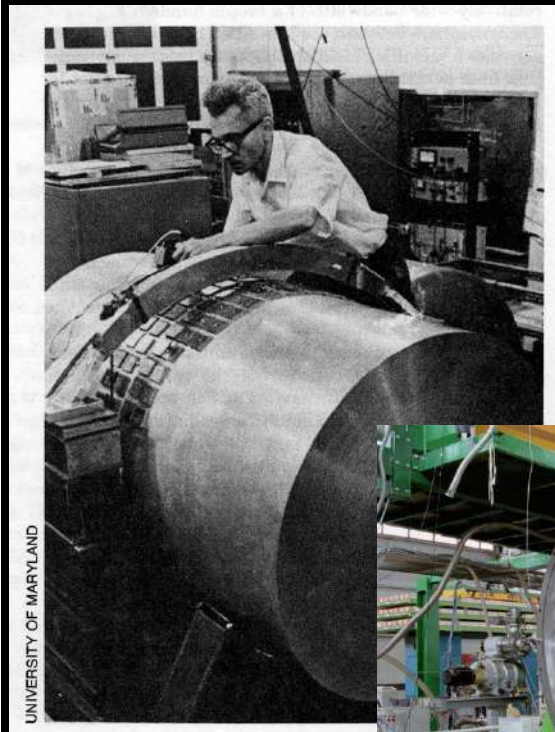
MAY BE DANGEROUS
TO YOUR HEALTH



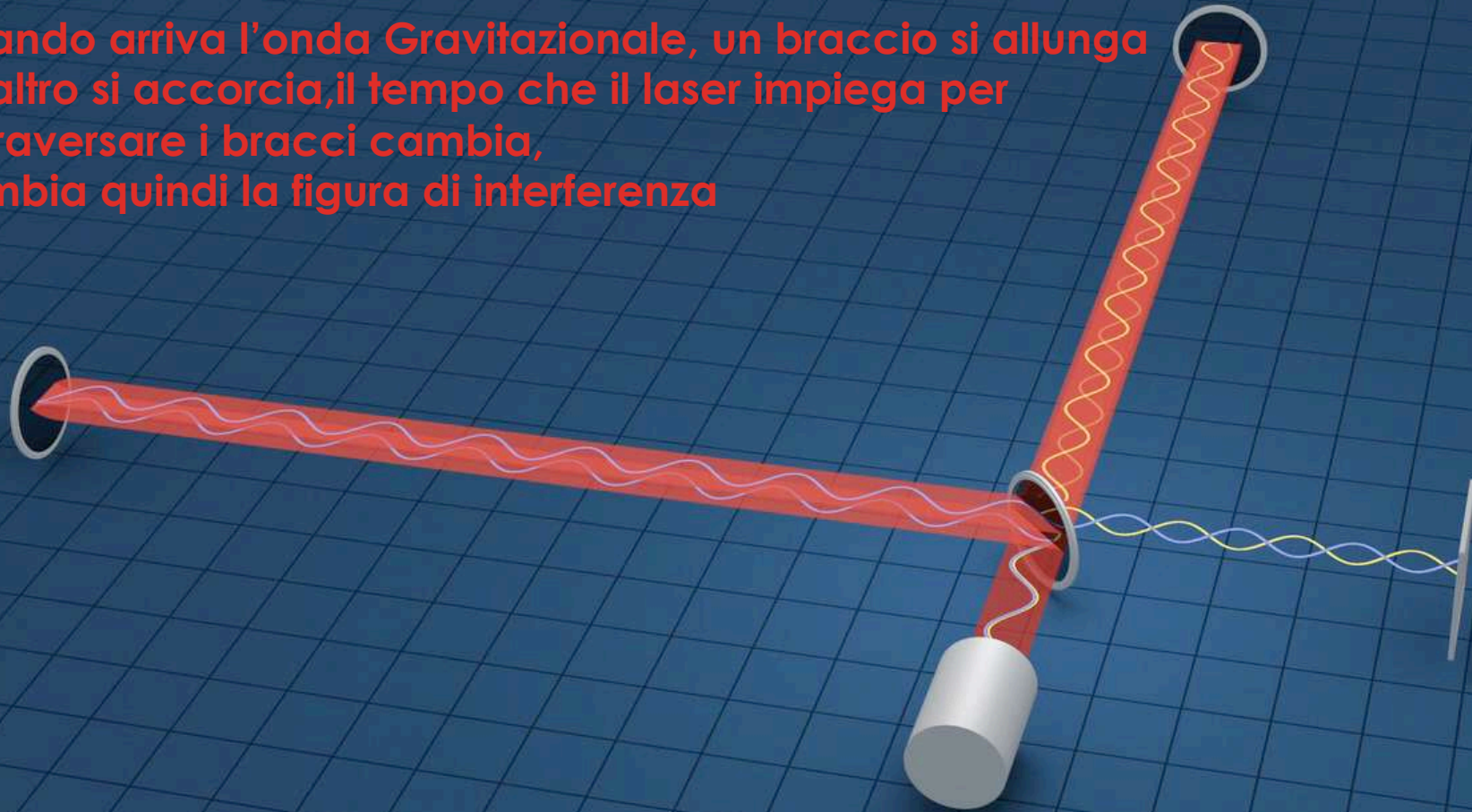
$$h = \Delta L / L \sim 10^{-21}$$

Il problema della misura sono i RUMORI,
ad esempio sismico ($\sim 10^{-8} \text{ m}$),
vibrazioni termiche ($\sim 10^{-12} \text{ m}$)

Oltre 50 anni di lavoro e progressi



Quando arriva l'onda Gravitazionale, un braccio si allunga e l'altro si accorcia, il tempo che il laser impiega per attraversare i bracci cambia, cambia quindi la figura di interferenza



Qui l'effetto dello sfasamento dovuto all'onda è molto esagerato !

$$\Delta\varphi_{GW} = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta L_{GW} = \frac{4\pi}{\lambda} hL \approx 10^{-11} \text{ rad}$$

Servono bracci lunghi per aumentare il segnale misurato

**Specchio
42 kg
35 cm diametro**

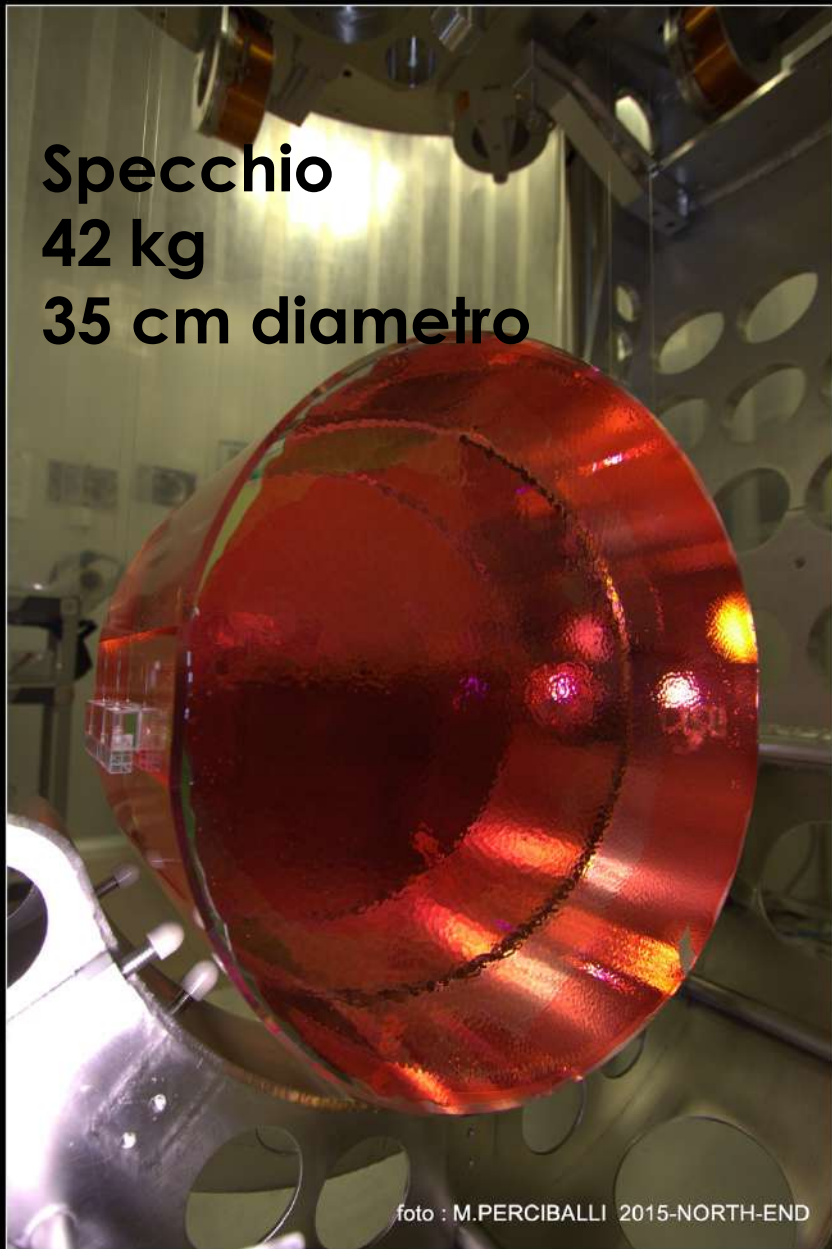


foto : M.PERCIBALLI 2015-NORTH-END

**Beam splitter
34 kg
55 cm diametro**

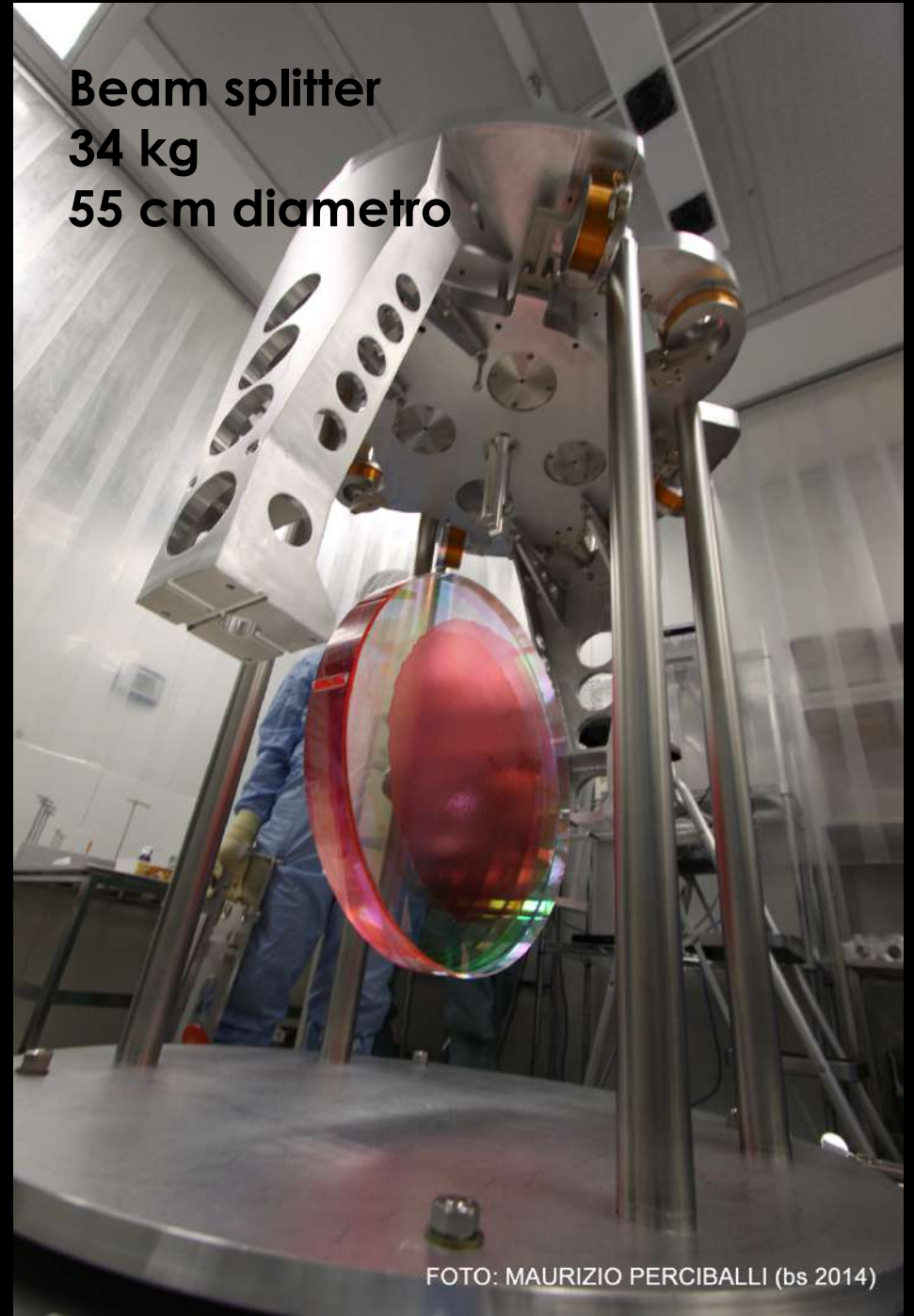
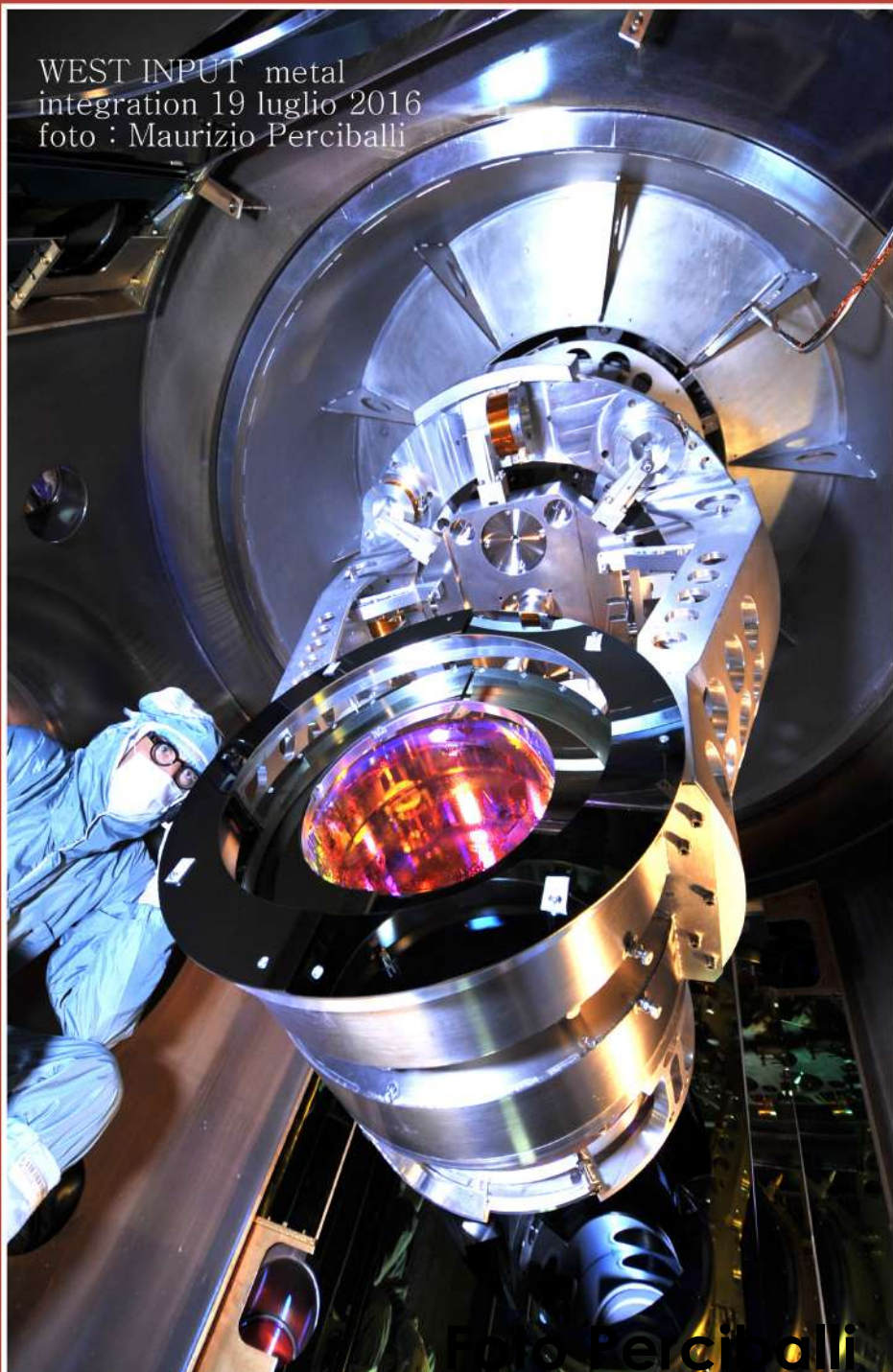


FOTO: MAURIZIO PERCIBALLI (bs 2014)

WEST INPUT metal
integration 19 luglio 2016
foto : Maurizio Perciballi



LIGO-VIRGO meeting in Sapienza

14 settembre 2012

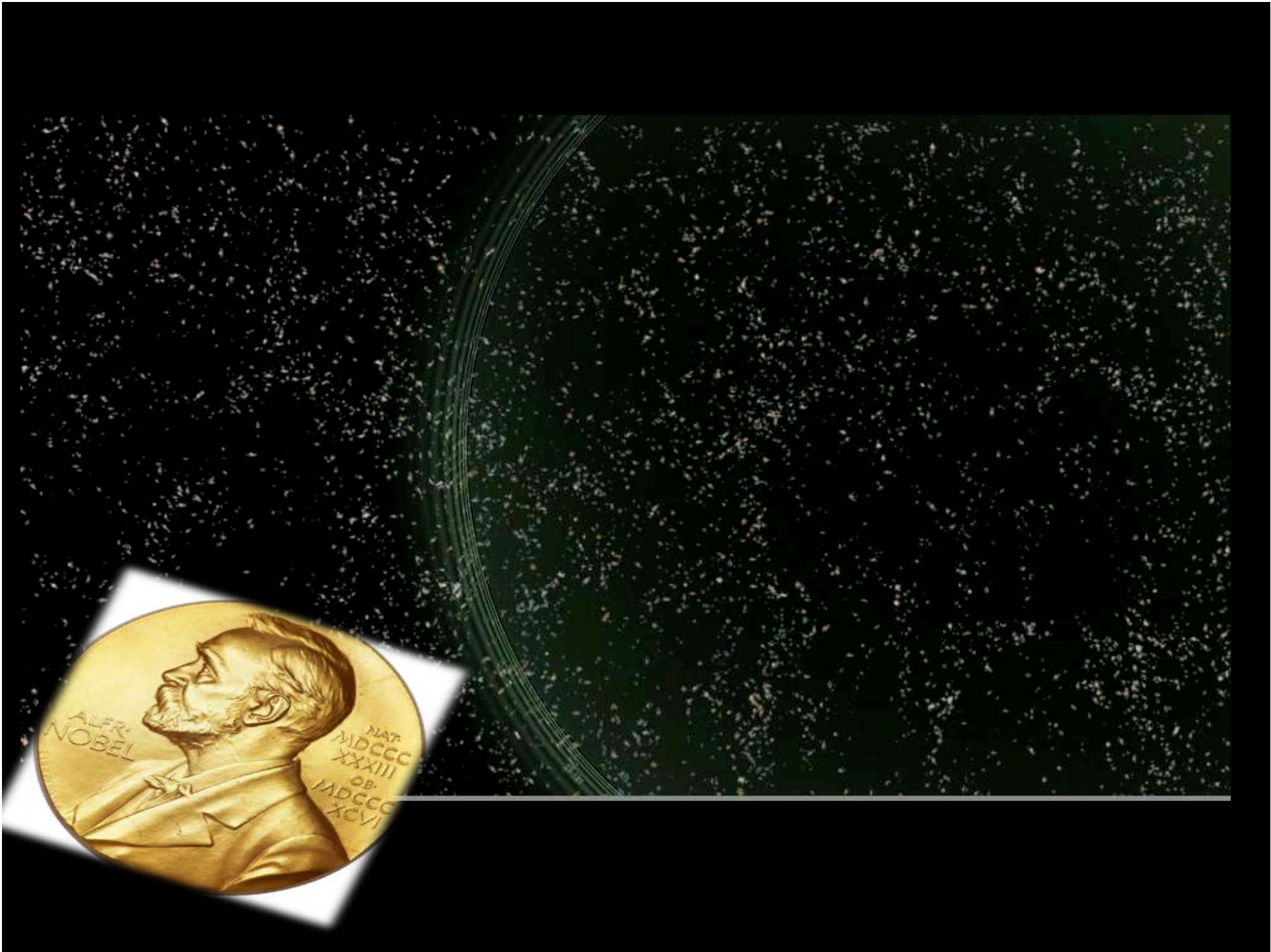




DOMANDE ?

LNF, Summer School 15-19 giugno

14 settembre 2015





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 1.0×10^{-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 5.1σ . 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 $3.0_{-0.5}^{+0.5}M_{\odot}c^2$ 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.

Questa è stata **la prima osservazione diretta di onde gravitazionali e la prima osservazione del merger di un sistema binario di buchi neri**


$$E = Mc^2$$

$$M = \text{☺☺☺}$$

3 Soli convertiti in onde gravitazionali

Circa l'energia che l'umanità consuma in
un miliardo di miliardi di miliardi di anni

...in frazioni di un secondo !

*Raggiungendo una velocità tale da poter andare
dalla Terra alla Luna in 10 secondi*

La rete di cacciatori terrestri di onde gravitazionali



LIGO
Hanford



GEO600



KAGRA



LIGO
Livingston



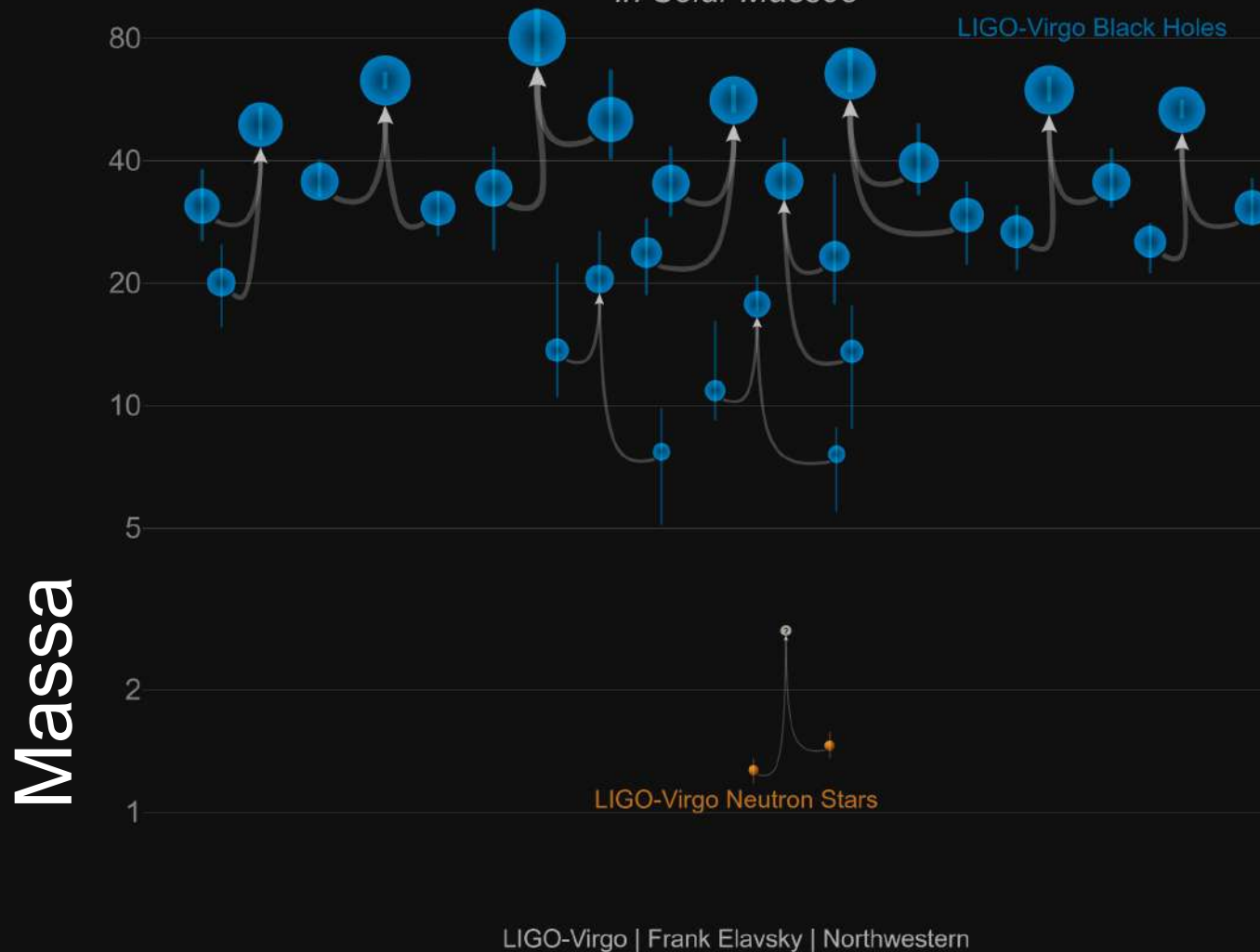
VIRGO

LIGO India



2018: il primo catalogo di sorgenti di onde gravitazionali

in masse solari



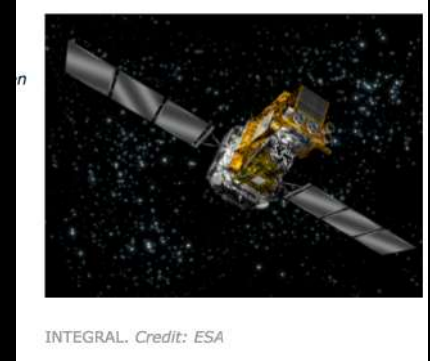
La sorpresa di
una
popolazione di
Buchi Neri
altrimenti
invisibili

il primo segnale
da collisione di
Stelle di
Neutroni

*È iniziato il nostro viaggio di esplorazione
della natura estrema dello spazio e del tempo*



Fermi Space Telescope



INTEGRAL. Credit: ESA

17 agosto 2017

2 stelle di neutroni

3 rivelatori gravitazionali

100 telescopi



The Astrophysical Journal Letters, 848:L13
2017 October 20



***130 MILIONI DI ANNI FA...IN UNA GALASSIA
MOLTO MOLTO LONTANA***



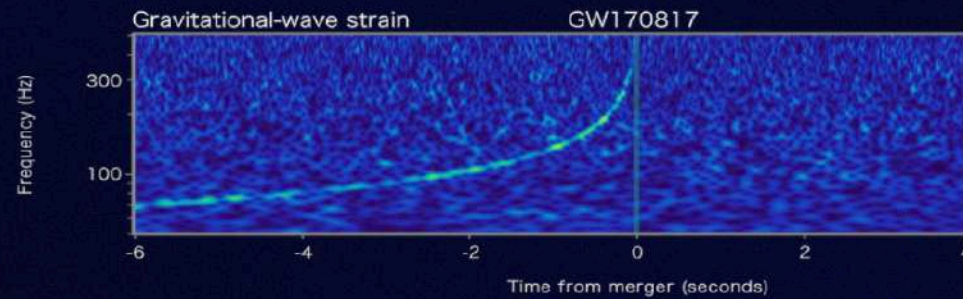
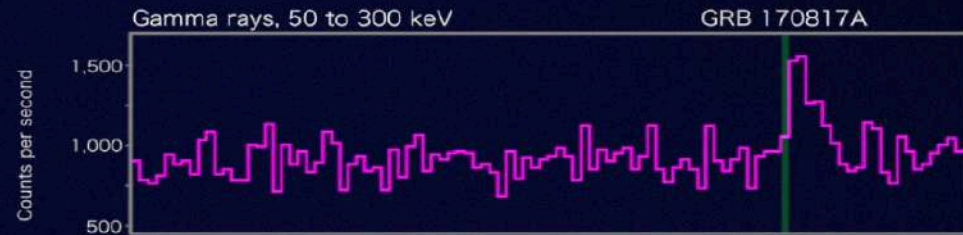
Fermi



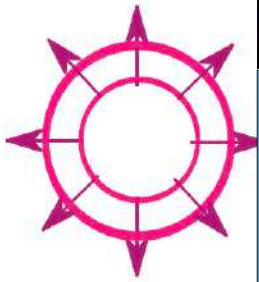
LIGO-Virgo



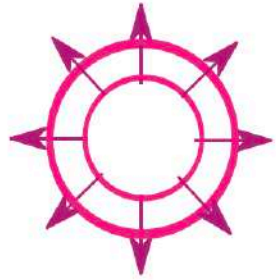
INTEGRAL



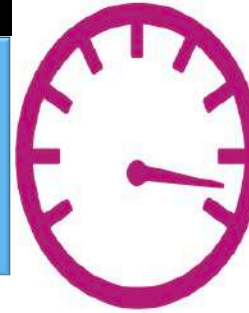
Onde gravitazionali e luce:
nasce l'astronomia multimessaggera



**Misura del tasso di
espansione
dell'Universo**



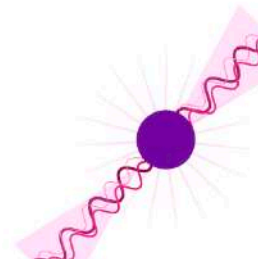
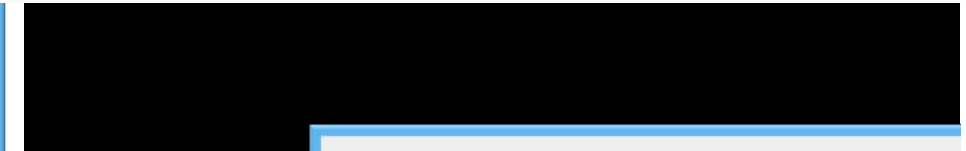
Misura del tasso di espansione dell'Universo



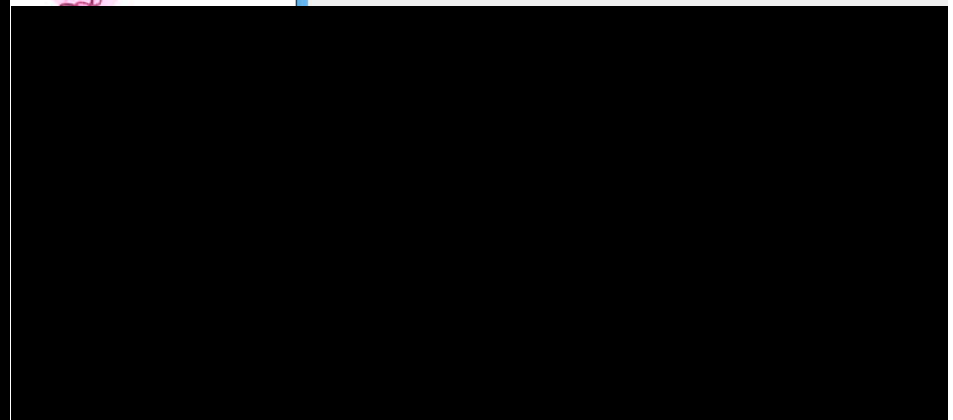
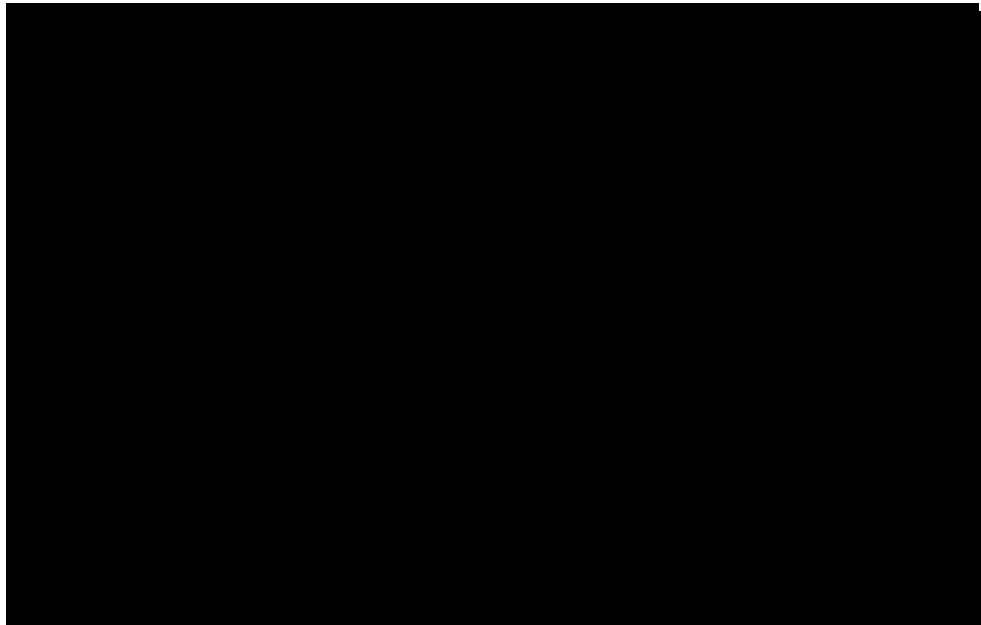
Confronto della velocità dell'onda elettromagnetica e gravitazionale: evidenza che le onde gravitazionali viaggiano alla velocità della luce



Studio della struttura e composizione di oggetti assolutamente "estremi"



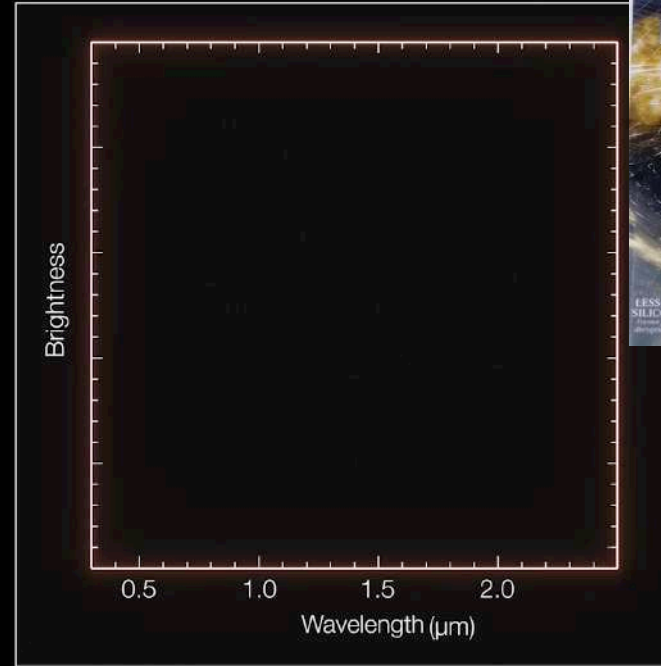
**Conferma dell'origine degli "short gamma ray bursts".
Informazioni sui modelli**



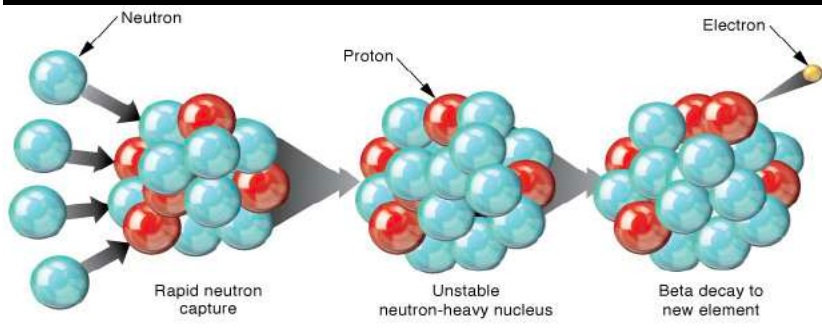
KILONOVA INTERPRETATION

Credit: ESO/E. Pian et al./S. Smartt & ePESSTO/L. Calçada

31



Time: -1225 days



A banner featuring the flags of 45 countries and territories, arranged in three rows. Below the flags, the text reads: 'The discovery and analysis of GW170817 and its associated electromagnetic events involved researchers working in 45 countries and territories.'

TAVOLA PERIODICA DEGLI ELEMENTI

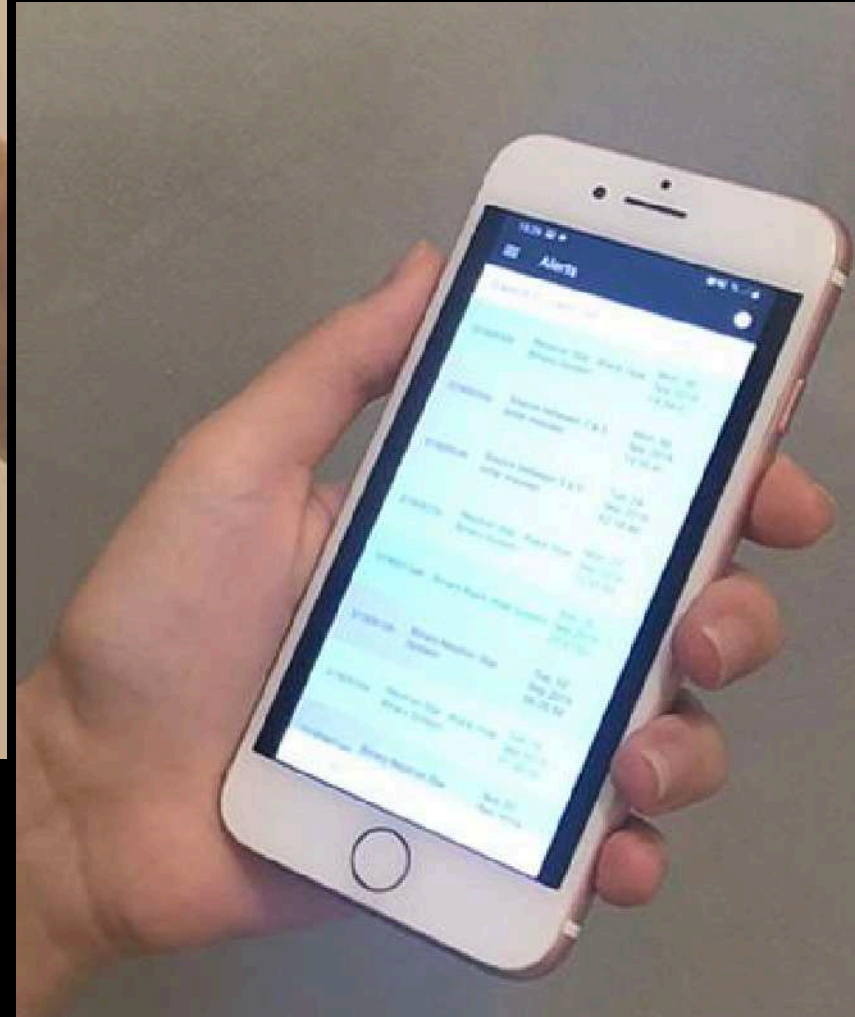
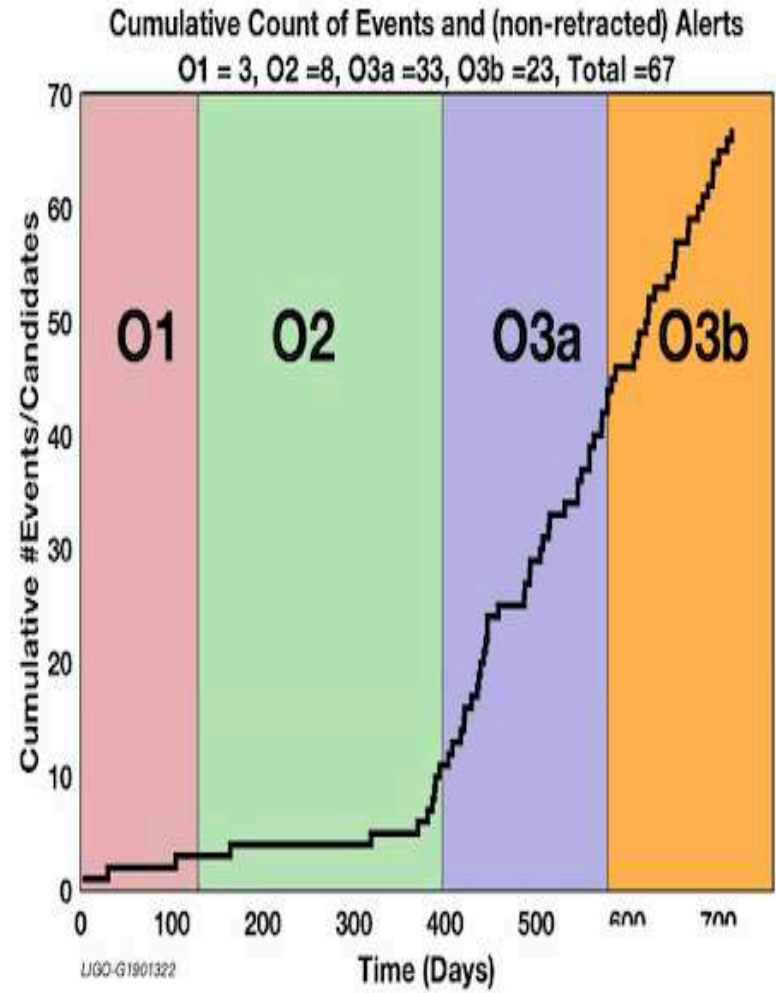


Siamo
polvere di
stelle



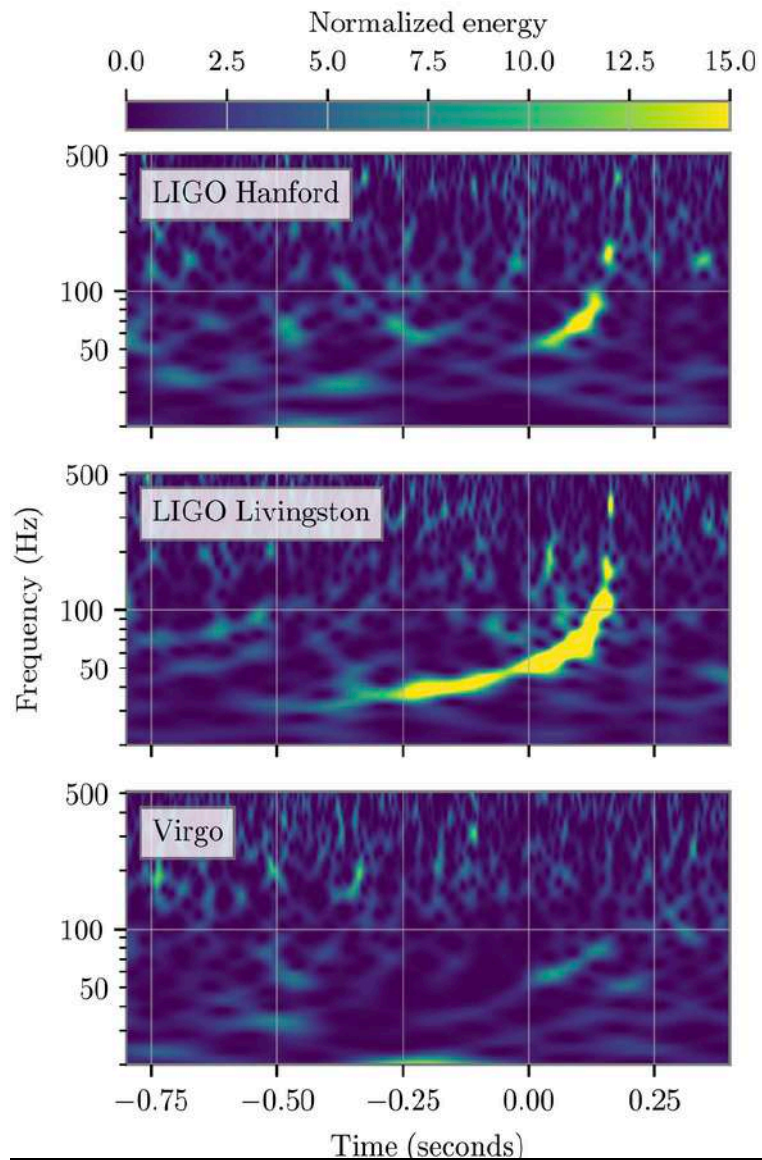
DOMANDE ?

LNF, Summer School 15-19 giugno

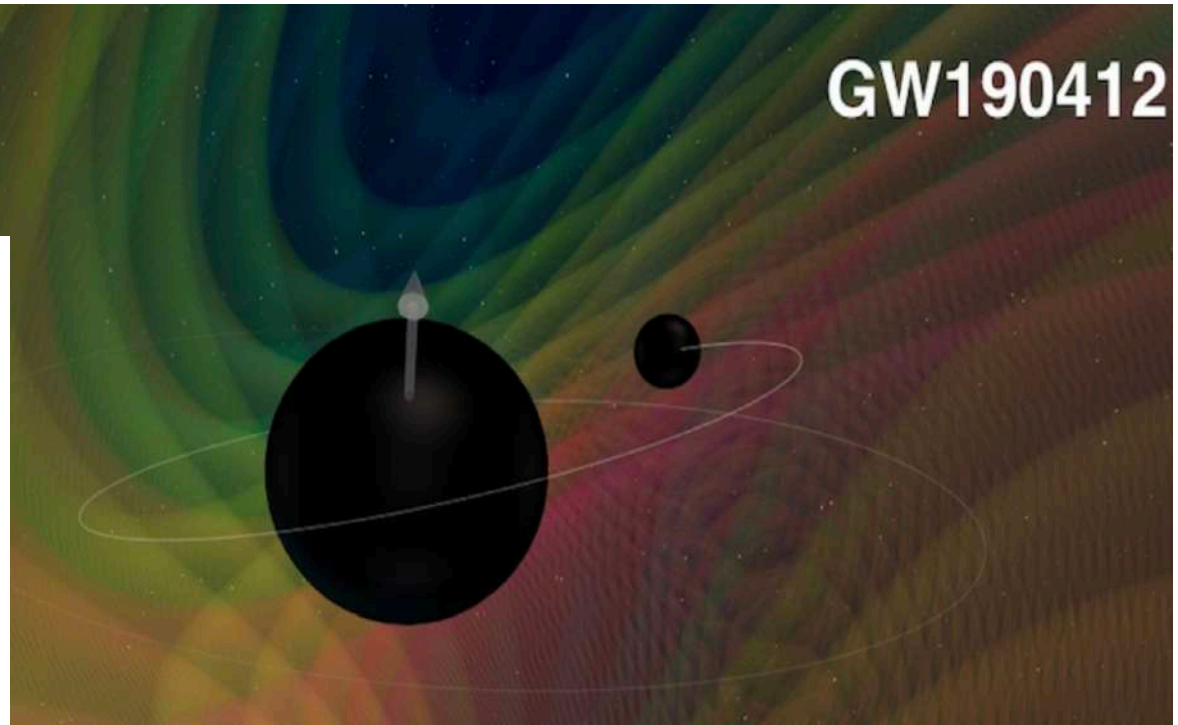


~ 33 nuovi segnali
 in soli 6 mesi (O3a)

*Un risultato
molto recente*



GW190412



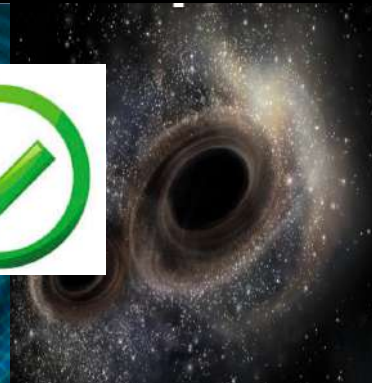
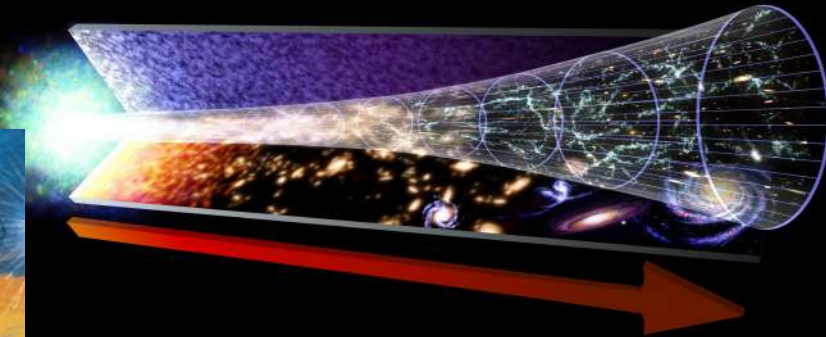
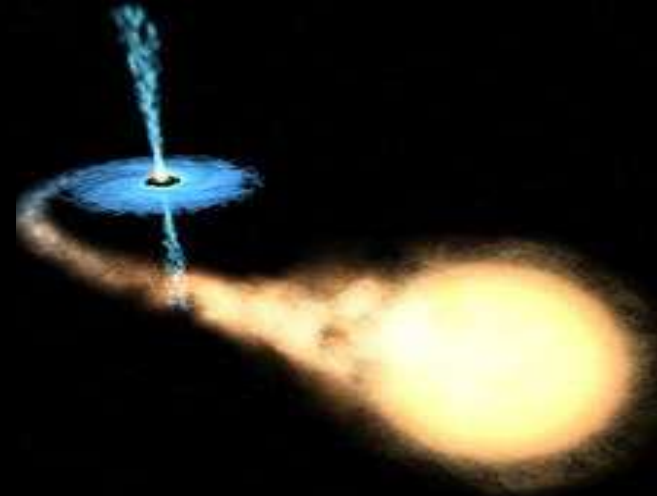
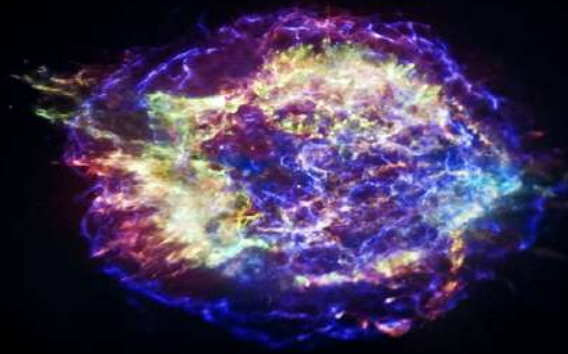
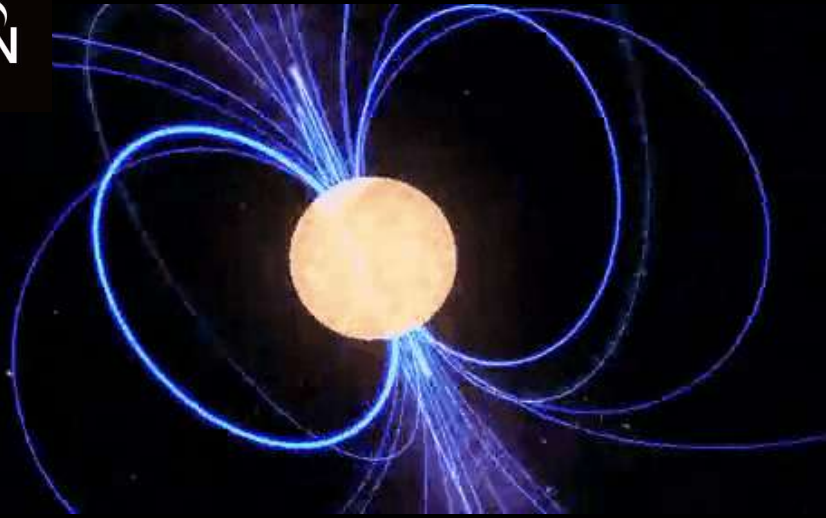
$$M1 = 30 M_{\odot}$$

$$M2 = 8 M_{\odot}$$

Frequenza del segnale osservato
in funzione del tempo

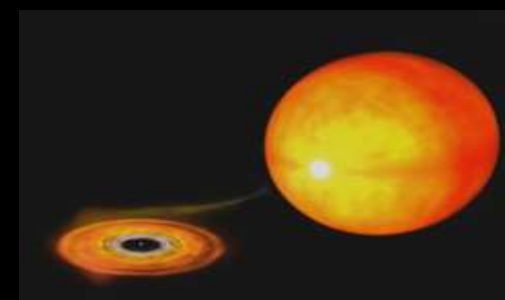
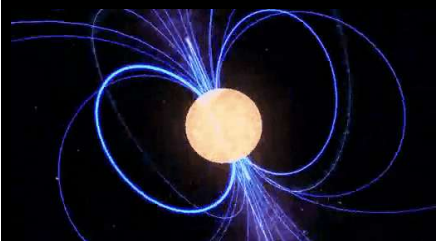
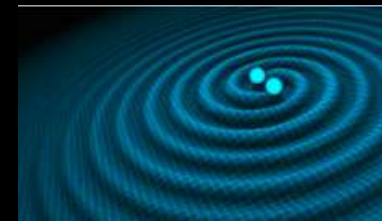
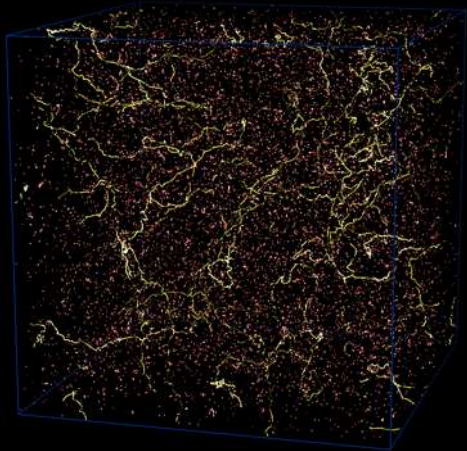
3 rivelatori

INFN

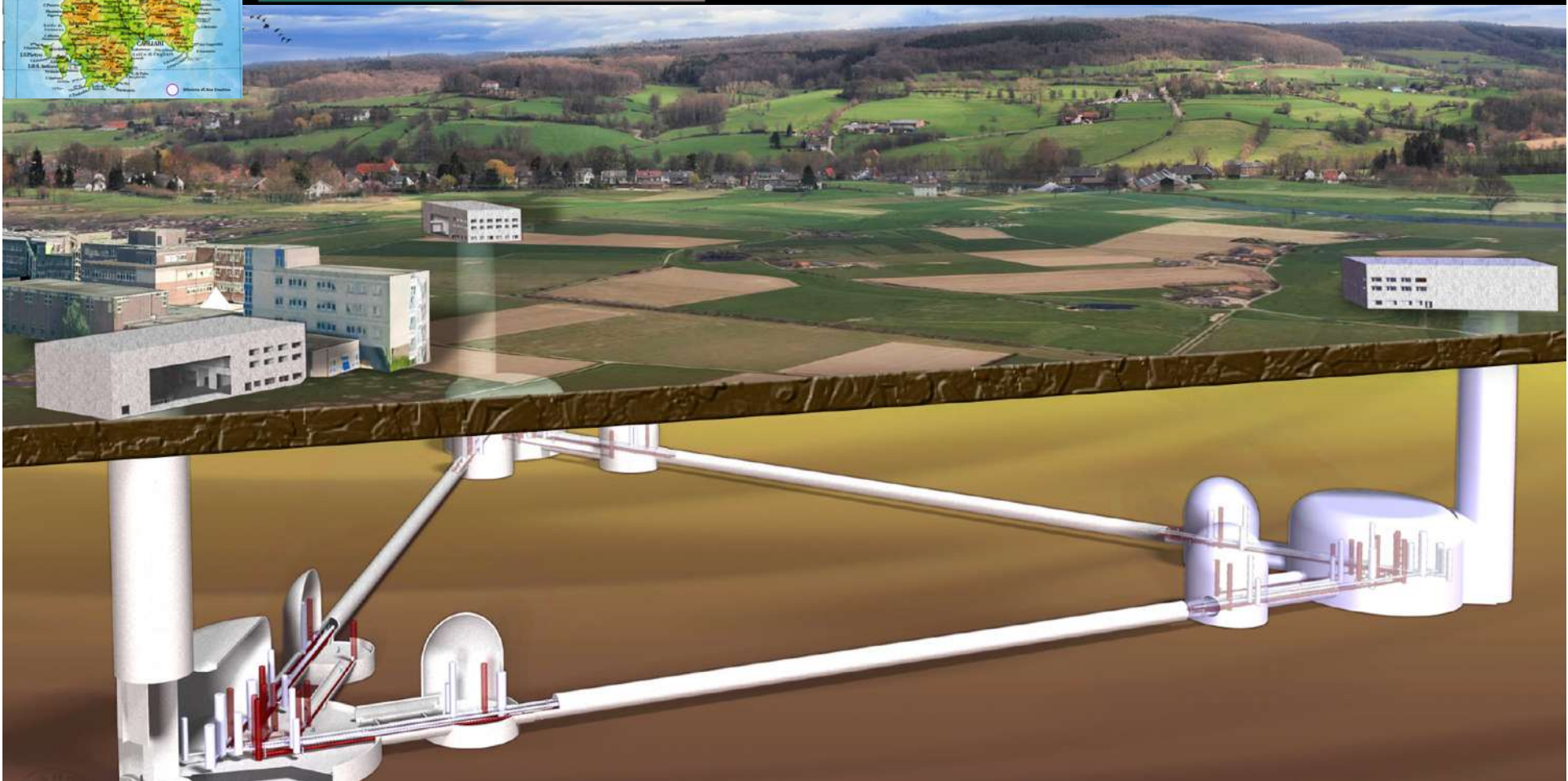


By L Ralli

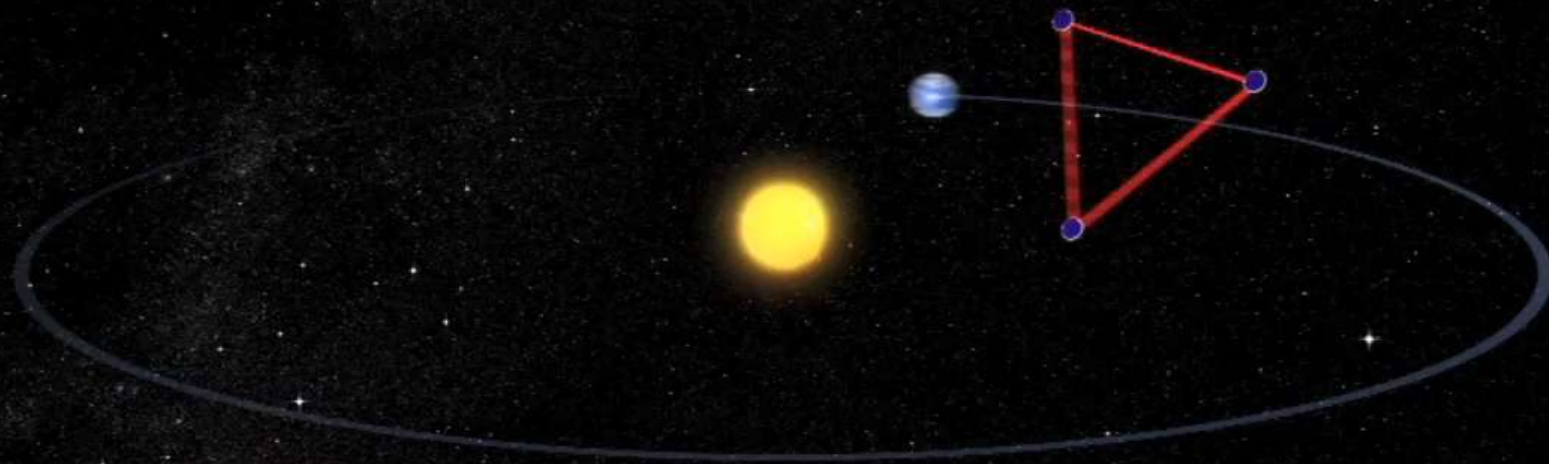
Rumore di fondo



Einstein telescope



LISA: una costellazione di satelliti che orbiteranno attorno al Sole



Lo spettro di onde gravitazionali

fondo
stocastico
primordiale



stringhe
cosmiche



coalescenze



coalescenze



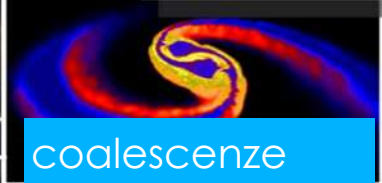
supernovae



buchi neri
supermassivi



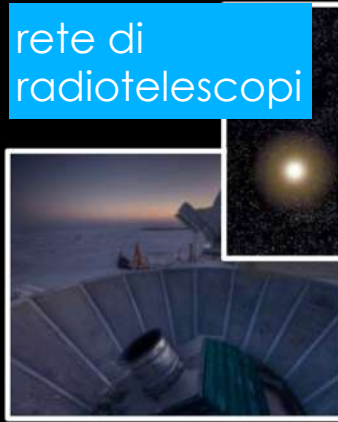
coalescenze



pulsar



rete di
radiotelescopi



timing
array



rivelatori
spaziali



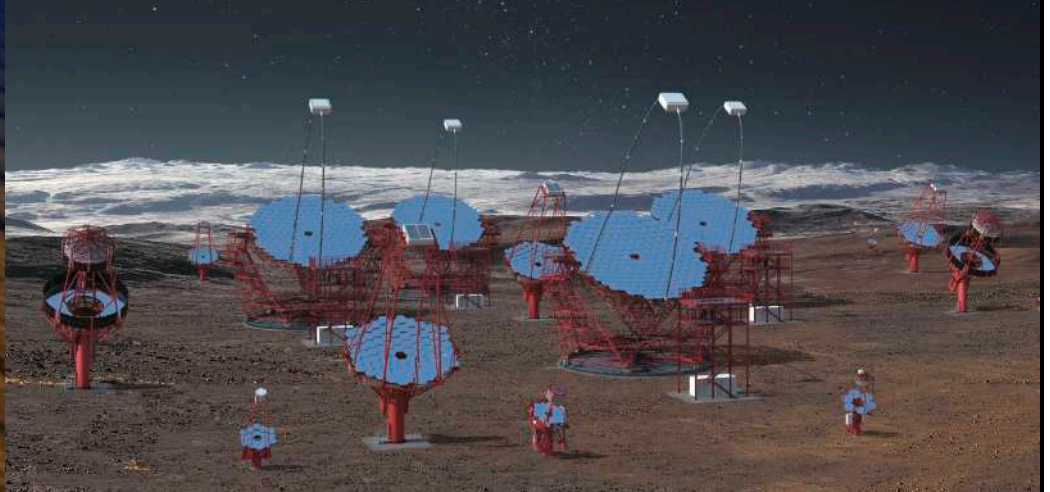
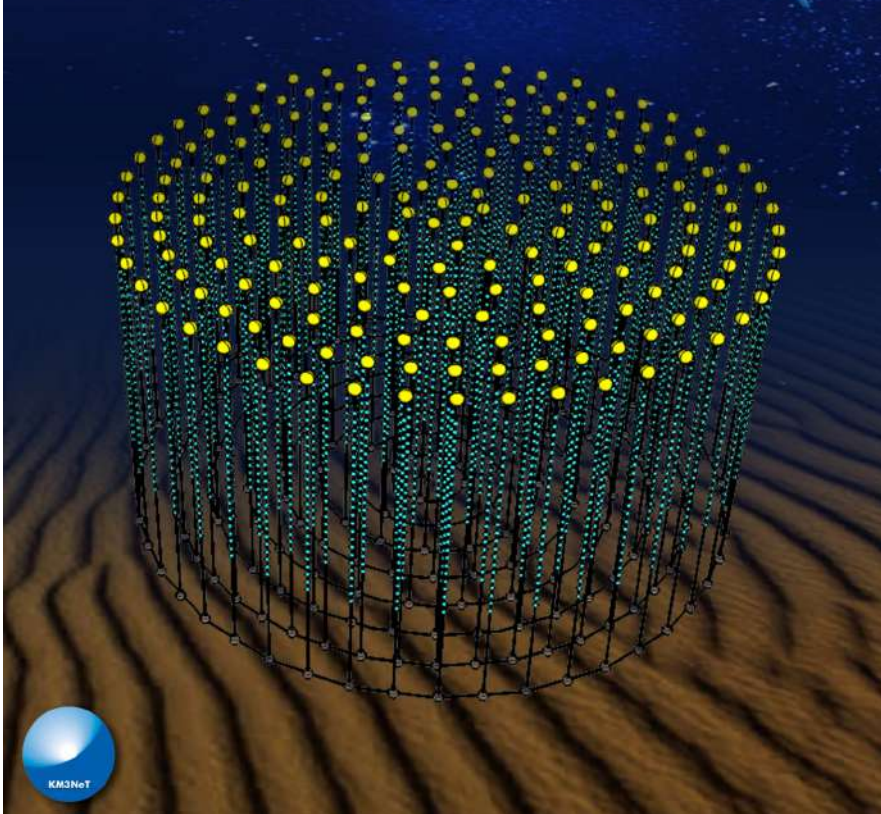
rivelatori terrestri





Credit: ESO/M. Kornmesser & ACO Team

Exploring the Universe at the Highest Energies



Informazioni e dati pubblici @....

<https://www.gw-openscience.org/about/>



Gravitational Wave Open Science Center

Home Data Software Online Status About GWOSC

The Gravitational Wave Open Science Center provides data from gravitational-wave observatories, along with access to tutorials and software tools.



LIGO Hanford Observatory, Washington

(Credits: C. Gray)



LIGO Livingston Observatory, Louisiana

(Credits: J. Giaime)



Virgo detector, Italy

(Credits: Virgo Collaboration)

<http://public.virgo-gw.eu/>

<https://www.ligo.org/public.php>

Visitate le nostre pagine
di divulgazione ...e
giocate con noi...!

www.asimmetrie.it

Numero 25: Interferometro fai da te.

blackholehunter.org/game.html

Search

BLACK HOLE HUNTER

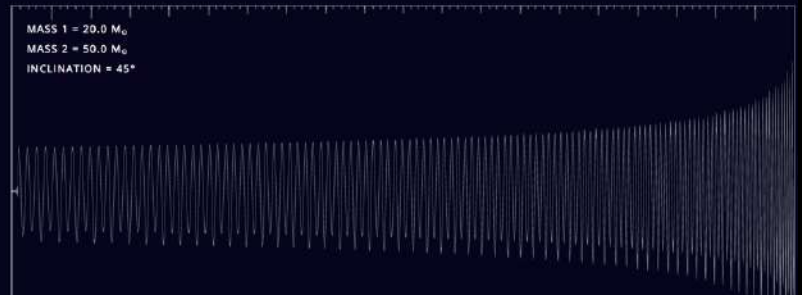


Welcome to Black Hole Hunter

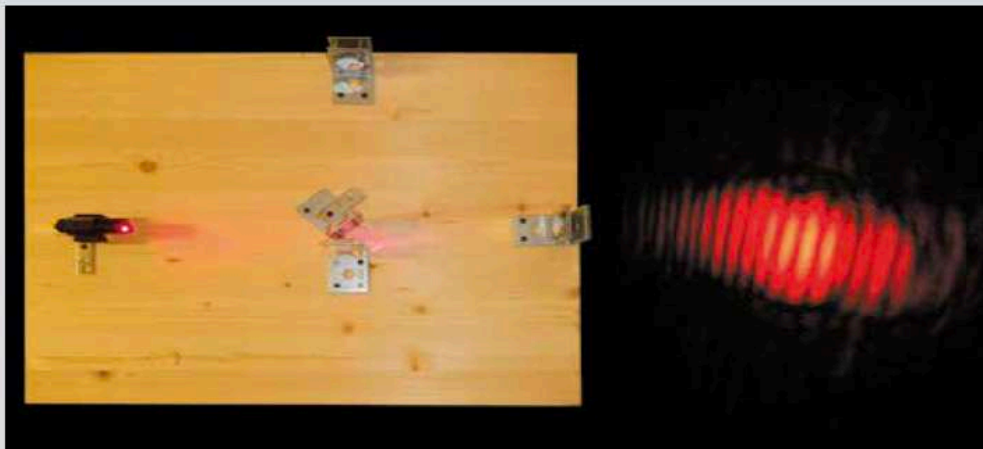
Your objective is to listen to the signal below, and then determine which of the four data files contains the signal you heard. To begin with, the signals will be relatively loud. As you progress through the game the signals will get quieter.



MASS 1 = 20.0 M_{\odot}
MASS 2 = 50.0 M_{\odot}
INCLINATION = 45°



<http://blackholehunter.org/game.html>



a.
L'interferometro fai da te (a sinistra) è un esempio di interferenza prodotta (a destra). L'interferometro ha bracci di lunghezza fissa, ma la struttura sulla quale si montano gli specchietti consente di muoverli su tre assi, quanto basta per produrre (o distruggere) la figura di interferenza.

<https://www.asimmetrie.it/images/26/pdf/fumetto allegato AS26.pdf>



Racconti dal Bar Aonda

— LE ONDE GRAVITAZIONALI E VARI CATACLISMI —



Istituto Nazionale di Fisica Nucleare

Racconti dal Bar Aonda

LE ONDE GRAVITAZIONALI E VARI CATACLISMI

©Istituto Nazionale di Fisica Nucleare

Aprile 2019

In collaborazione con



Scuola del Fumetto
Passione disegno dal 1979

PROGETTO SCIENTIFICO **Pia Astone** (direzione)

Carlo Bradaschia, Livia Conti, Dario Menasce, Catia Peduto, Piero Rapagnani, Massimiliano R.

DIREZIONE CREATIVA **Giuseppe Calzolari e Massimiliano Calzolari**

SOGGETTO **Marco Madoglio e Catia Peduto**

SCENEGGIATURA **Marco Madoglio**

DISEGNO **Ramie**

COLORE **Ramie e Bianca Burzotta**

PROGETTO GRAFICO E LETTERING **Daniela Sanziani e Giulia Livio**



*A 100 anni dalle previsioni di Einstein
ha avuto inizio l'Astronomia
gravitazionale*

Concludo con una nota personale ...

HA VINTO L'UOMO

Ha vinto l'uomo. È un'espressione di gioia che fa sapere quanto il suo grande. L'uomo ha conquistato il mondo che rivoltò anche contro le macchine da lui create. Questa volta, per, ha dimostrato il coraggio, la potenza e la forza dell'uomo. Due volte aveva non ha mai perso nulla, anche la missione di "Apollo 13", non è stata una perdita. Ha vinto, perché la missione perfettamente riuscita. La calma di non hanno dimostrato la potenza dell'uomo. Gli uomini hanno fatto quanto potevano per

mezzogiorno, una specie di doppio acco rotondo-quadrate e riuscimmo così a funzionare nel Lem il grande depuratore della capsula. Da quel momento non ci sono più pericoli per la respirazione e fu necessario utilizzare anche il secondo depuratore.

Tra i molti problemi che ci trovammo ad affrontare nelle lunghe ore del difficile e lento ritorno ce n'è uno che a citarlo farà tanto sorridere ma che per noi non fu per nulla secondario: il problema dell'orina. Formalmente a bordo delle capsule Apollo gli astronauti urinano in uno speciale recipiente che elimina poi il liquido espellendolo. L'orina, cioè, viene «spruzzata» nello spazio dove ovviamente si disperde. Dopo l'incidente pensammo che sarebbe stato as-

to il «treno» spaziale, modificare l'allineamento della capsula, con conseguenze disastrose. Decidemmo così di rinunciare ad evacuare l'orina. Utilizzammo invece ogni recipiente disponibile, compresi i sacchetti di plastica che avevano contenuto i cibi liquidi, immagazzinandoli poi in un angolo dell'Odisea.

Un problema assai grave che ci toccò affrontare fu quello d'imboccare correttamente il «corridoio» per il rientro nell'atmosfera. Dovevamo, cioè, presentarci al contatto con gli strati densi dell'atmosfera con un angolo inferiore ai sei gradi e mezzo e a una determinata velocità. Se avessimo sbagliato l'angolo e la velocità avremmo potuto «rimbalzare» verso l'infinito, abbandonando ogni

l'angolo e la velocità avremmo potuto «rimbalzare» verso l'infinito, abbandonando ogni caso ci saremmo disolati rogo.

Tutto, invece, andò bene presentammo con un angolo ma per un valore trascurabile, utilizzando il motore motore destinato a tutti i casi la capsula esattamente rientro lo considero un r

Vorrei tornare nello spazio

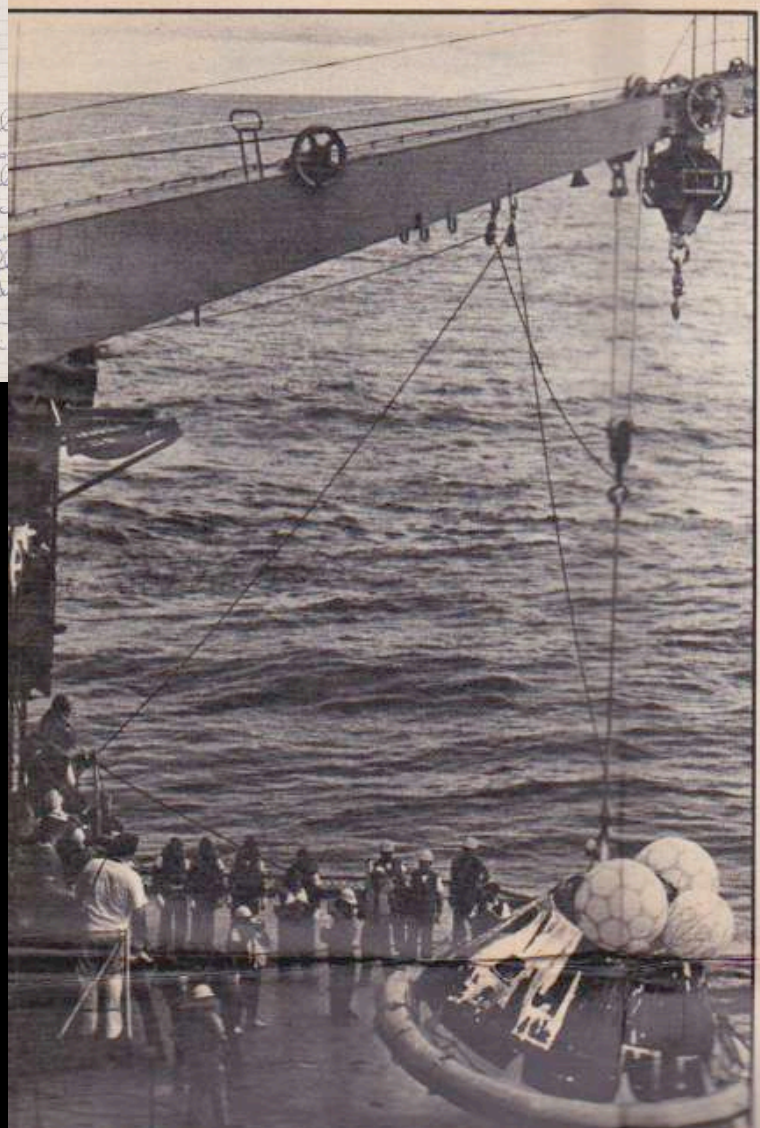
DAL momento in cui siamo fuori di servizio e poi il Lem rientrò di nuovo nella rotta dell'incidente in poi avremmo provveduto alle operazioni e al limite dell'emergenza, avremmo avuto un piano di riserva, mezzi di fortuna. Infatti nell'atmosfera tornammo normale. Utilizzammo la batteria, gli strumenti perfino a bere tranquillizzanti.

Devo confessare che quando mi presentai, dopo il rientro, a seguire gli ordini di routine. Mi parve di poter schiacciare gli stessi strumenti, come di un normalissimo riscontro mi sentii imbarazzato comportarmi in modo «strano».

È difficile dire, oggi, quanta lacerazione del modulo meteorite può averlo con essere stato un guasto alla lacerazione dei serbatoi blocco delle batterie d'efficienza che soltanto questo servizio, ormai sganciato un oblo della capsula e del disastro. Sapevamo che dato a pezzi ma non immaginabile. Un intero pezzo, dal foro, il modulo e le istruzioni interne. Avevamo nello spazio molti pezzi, ma anche visto volteggiare altri se n'erano andati. Credo che per noi sia stato un modulo di servizio avesse una parte del suo contenuto il nostro «treno spaziale» una notevole diminuzione meno faticoso il compimento. Con il modulo di ma formalmente intatto avrebbe potuto rispondere ai comandi. Debbo ancora certo che tutto il modulo se fuori uso. Quando succedemmo di considerarlo e ci affidammo al Lem. Fu buona volontà e qualche remmo riusciti a rimettere funzione, almeno per accordo che a bordo parlavo questa eventualità. Dicemmo che l'avesse fatta avremmo lizzare quel che restava vivo.

Se l'incidente fosse caputo non credo proprio che mi a tornare a casa. Anzi fatto di sicuro.

Tornerei nello spazio? In molti dopo il rientro «Sì, tornerei». Anzi, adesso non. Anche Fred e John non se la NASA lo pensa che molto molto padre. Per questo, di loro era





**Stoccolma,
Dicembre 2017**