

*Onde gravitazionali e  
“Multimessenger Astronomy”*

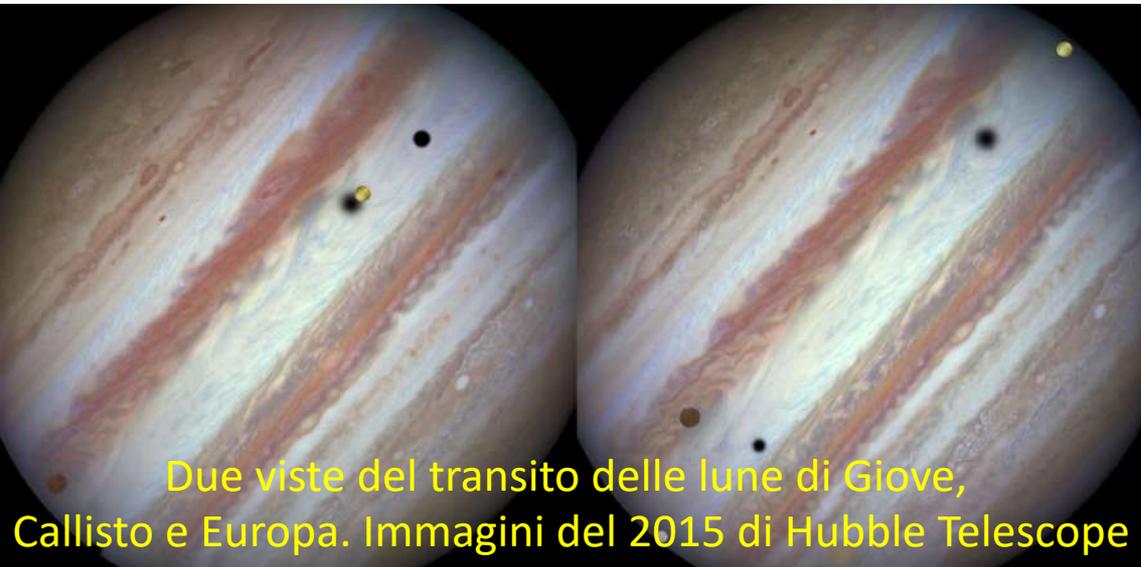
*Fulvio Ricci*

*INFN Sezione di Roma*

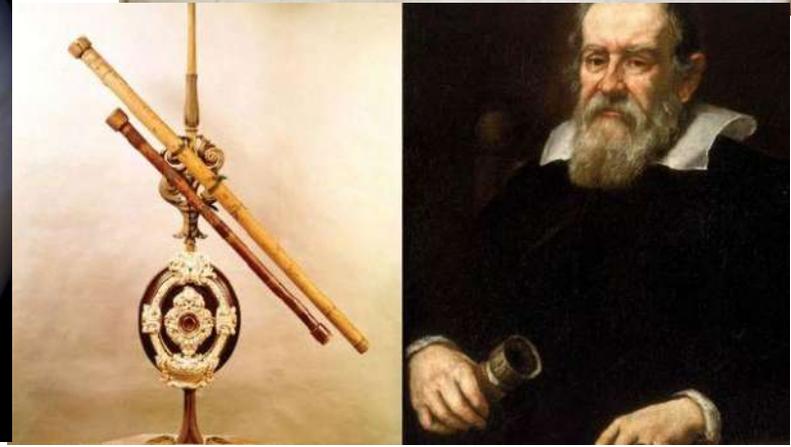
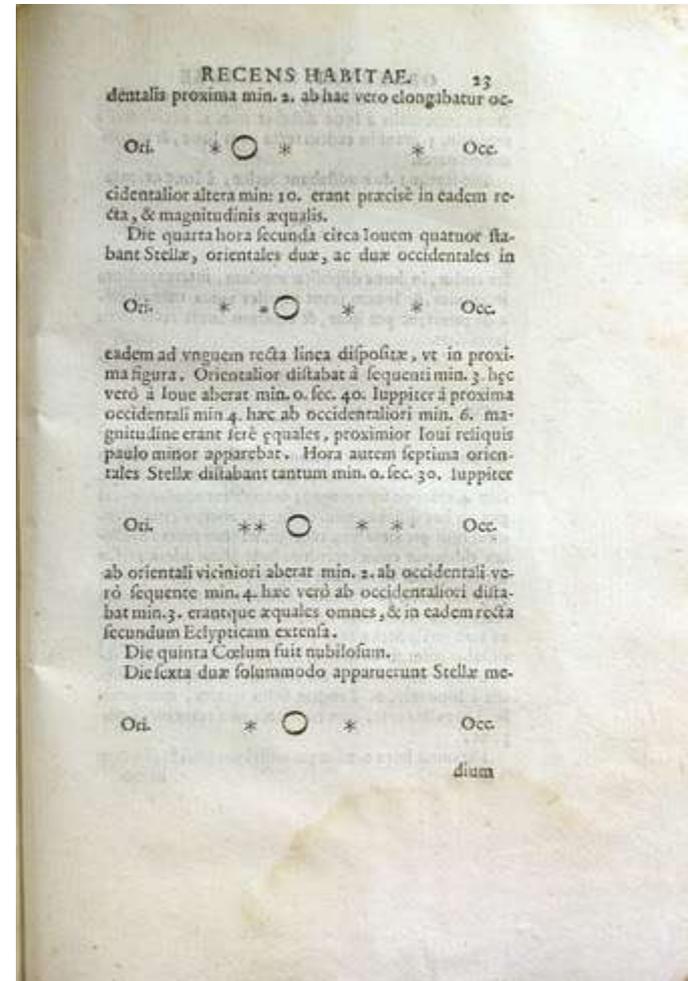


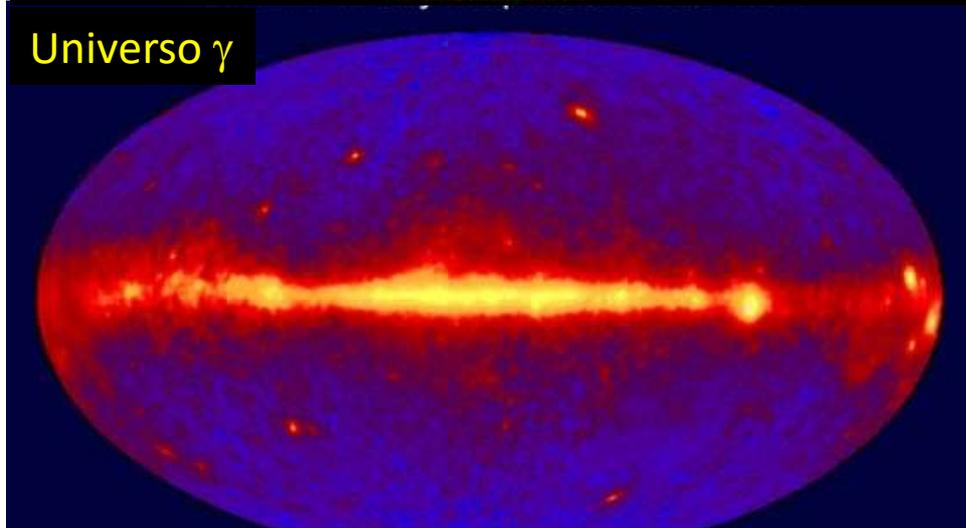
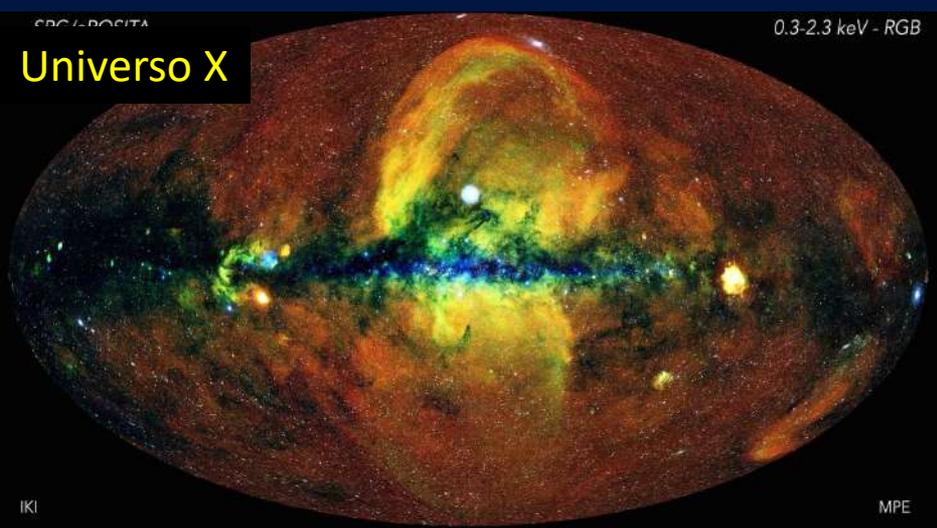
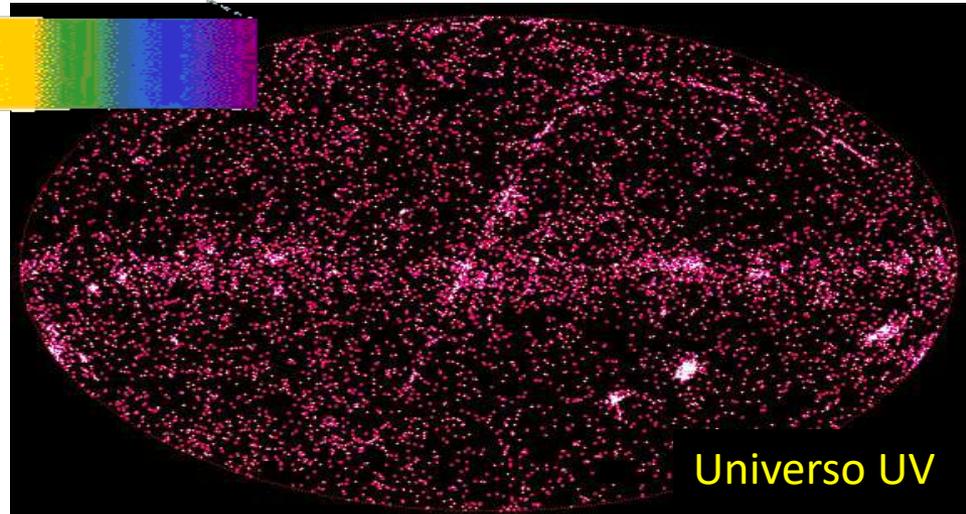
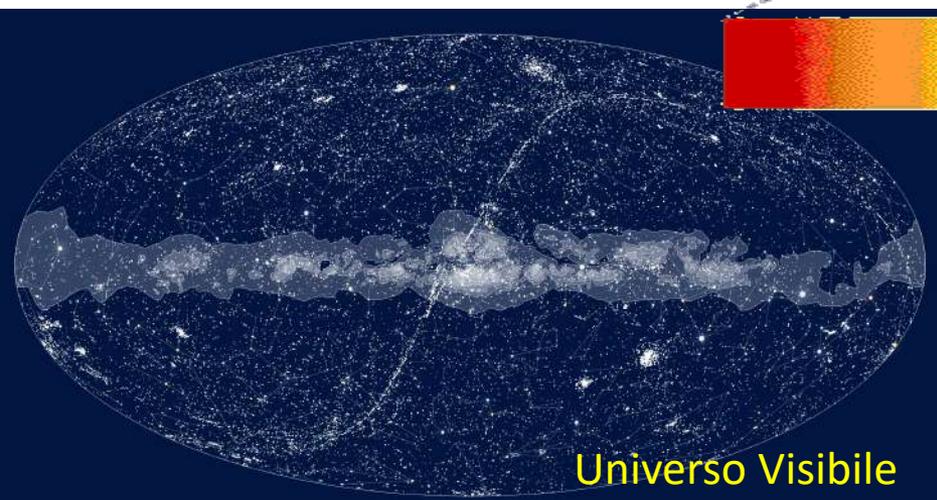
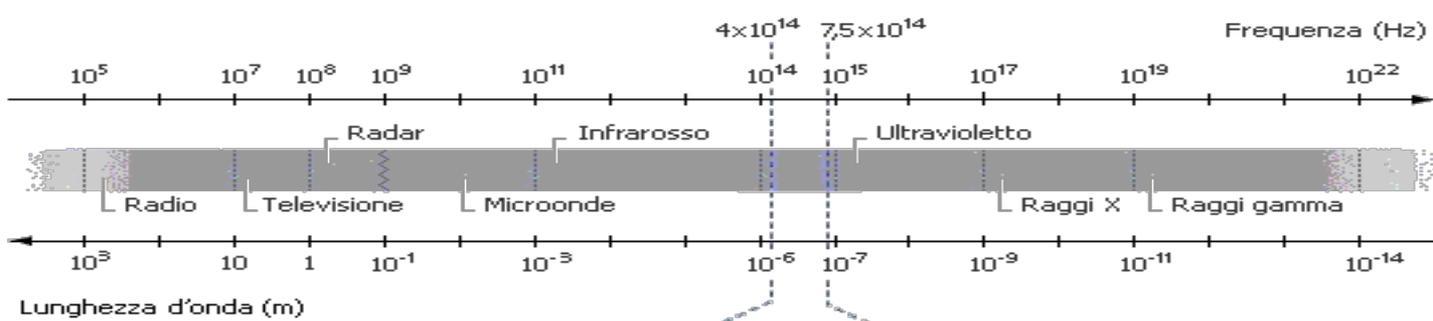
# L'Esplorazione dell'Universo

- Le lune di Giove
- Galileo Galilei
- In *Sidereus Nuncius*
- *pubblicato il 13 marzo 1610*



Due viste del transito delle lune di Giove, Callisto e Europa. Immagini del 2015 di Hubble Telescope



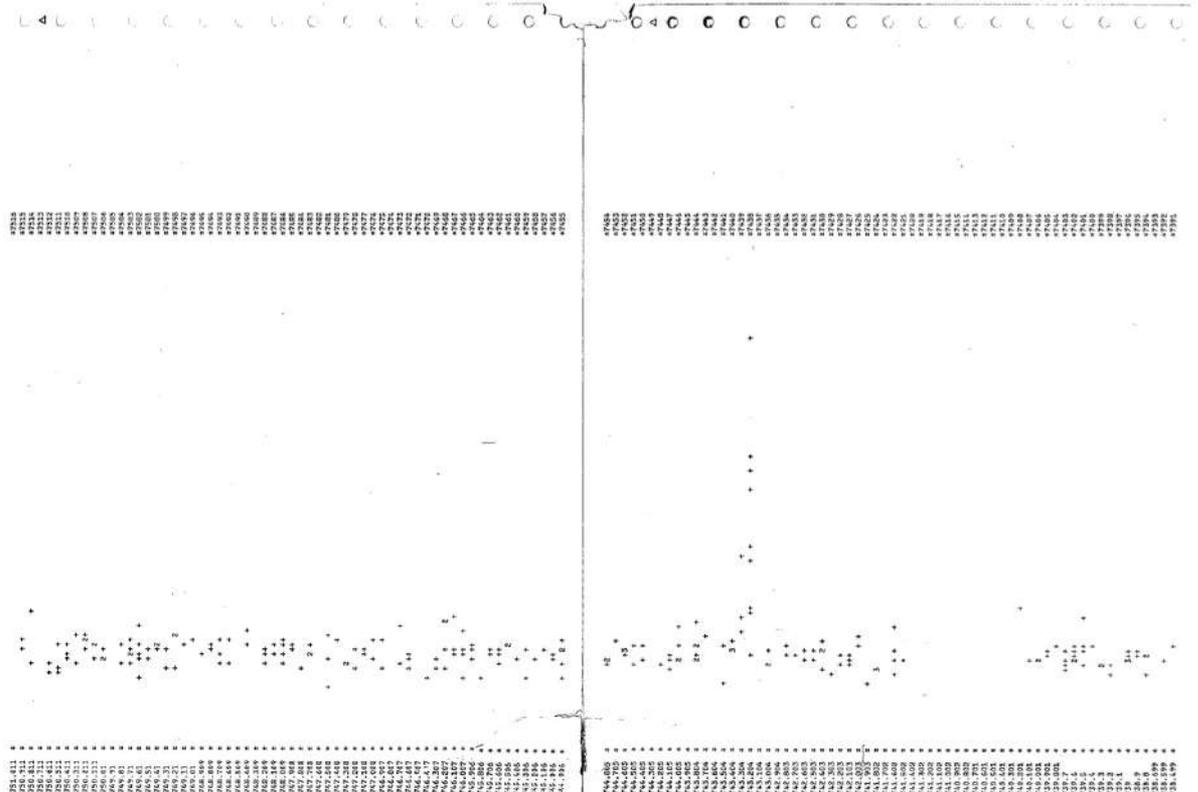
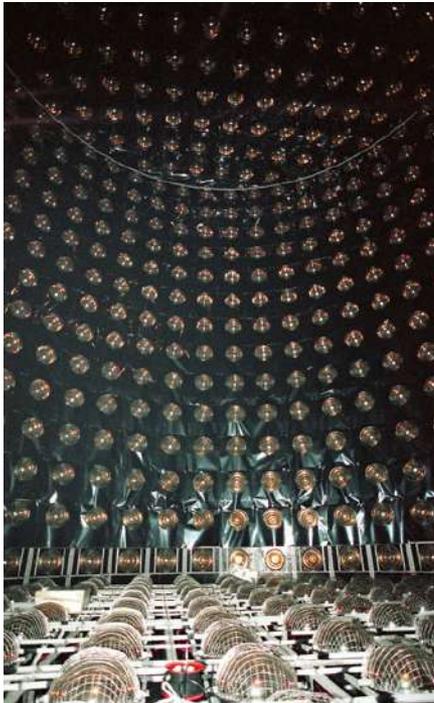


# 23 Febbraio 1987: un altro messaggero v

Supernova 1987a



UNIV OF PENN - DEPT OF PHYSICS P.01  
TO: EUGENE BEIER  
SENSATIONAL NEWS! SUPERNOVA WENT OFF  
4-7 DAYS AGO IN LARGE MAGELLANIC CLOUD, 50 KPC  
AWAY. NOW VISIBLE MAGNITUDE 4NS, WILL  
REACH MAXIMUM MAGNITUDE (-1.00) IN A WEEK.  
CAN YOU SEE IT? THIS IS WHAT WE HAVE  
BEEN WAITING 350 YEARS FOR!  
SID BLUDMAN  
(215) 546-3083



# Il Terzo Messaggero

PRL 116, 061102 (2016)

Selected for a Viewpoint in *Physics*  
PHYSICAL REVIEW LETTERS

week ending  
12 FEBRUARY 2016

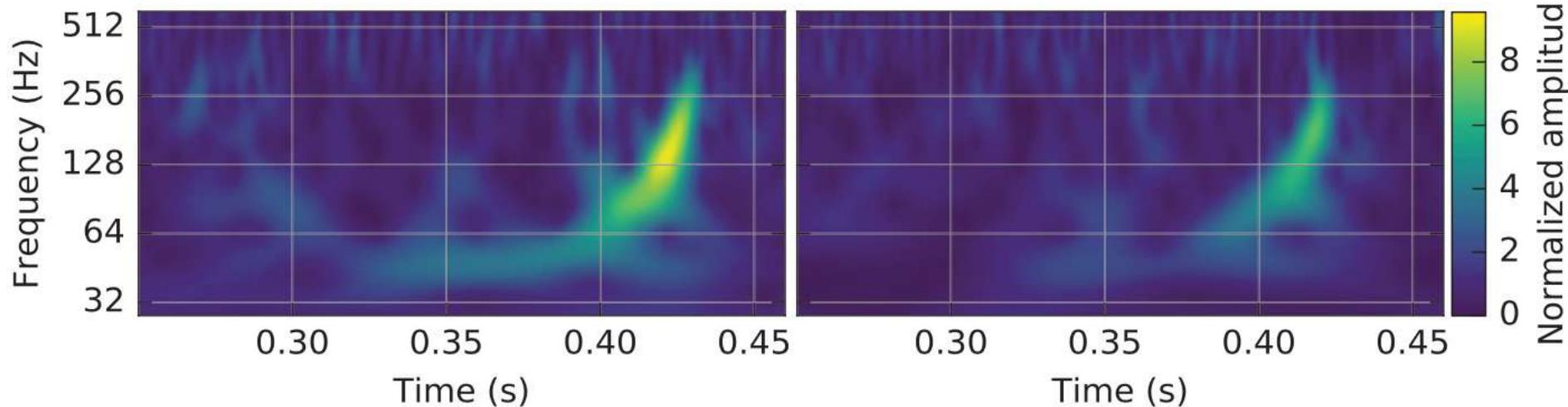


## Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger

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

(LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration)

(Received 21 January 2016; published 11 February 2016)

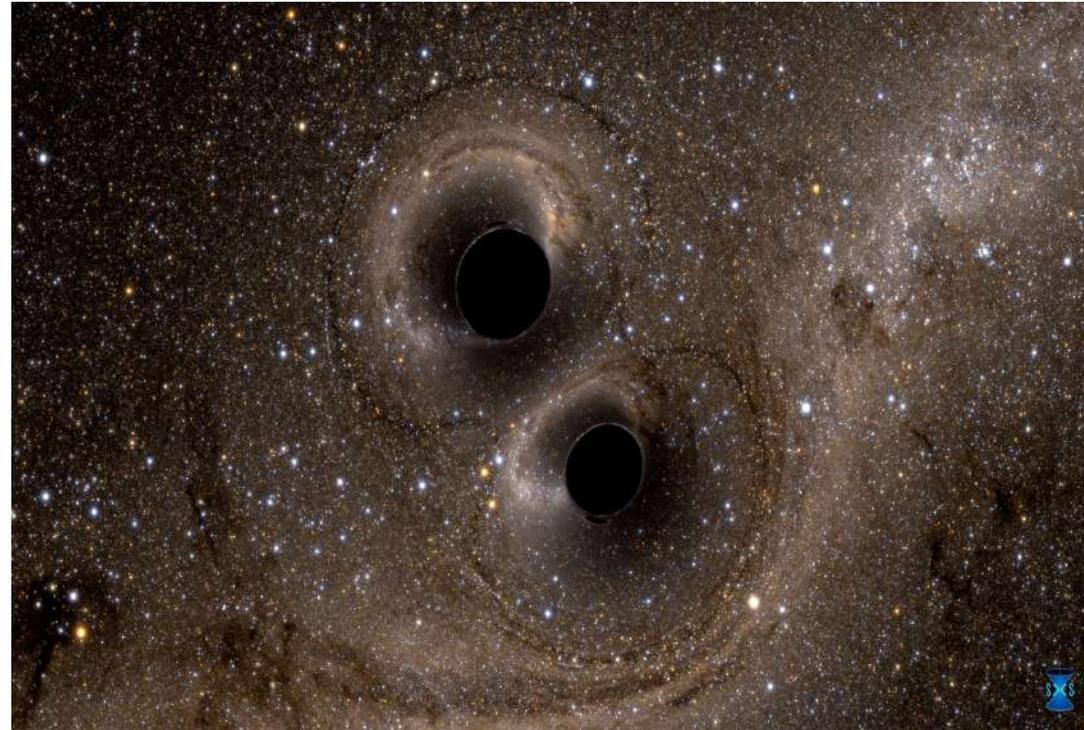


- Con le onde gravitazionali, di natura completamente diversa, abbiamo informazioni totalmente nuove e sconosciute
- L'astronomia gravitazionale è nata quando finalmente è stato possibile rilevare questo nuovo tipo di segnale

# Il Primo Segnale di Onda gravitazionale osservato 14 settembre 2015

- La prima osservazione diretta delle onde gravitazionali
- La prima osservazione di un buco nero
- La prima osservazione di un sistema binario di buchi neri
- Il sistema più intenso mai osservato

1.3 Miliardi di anni fa'



# .. da allora una pioggia di segnali

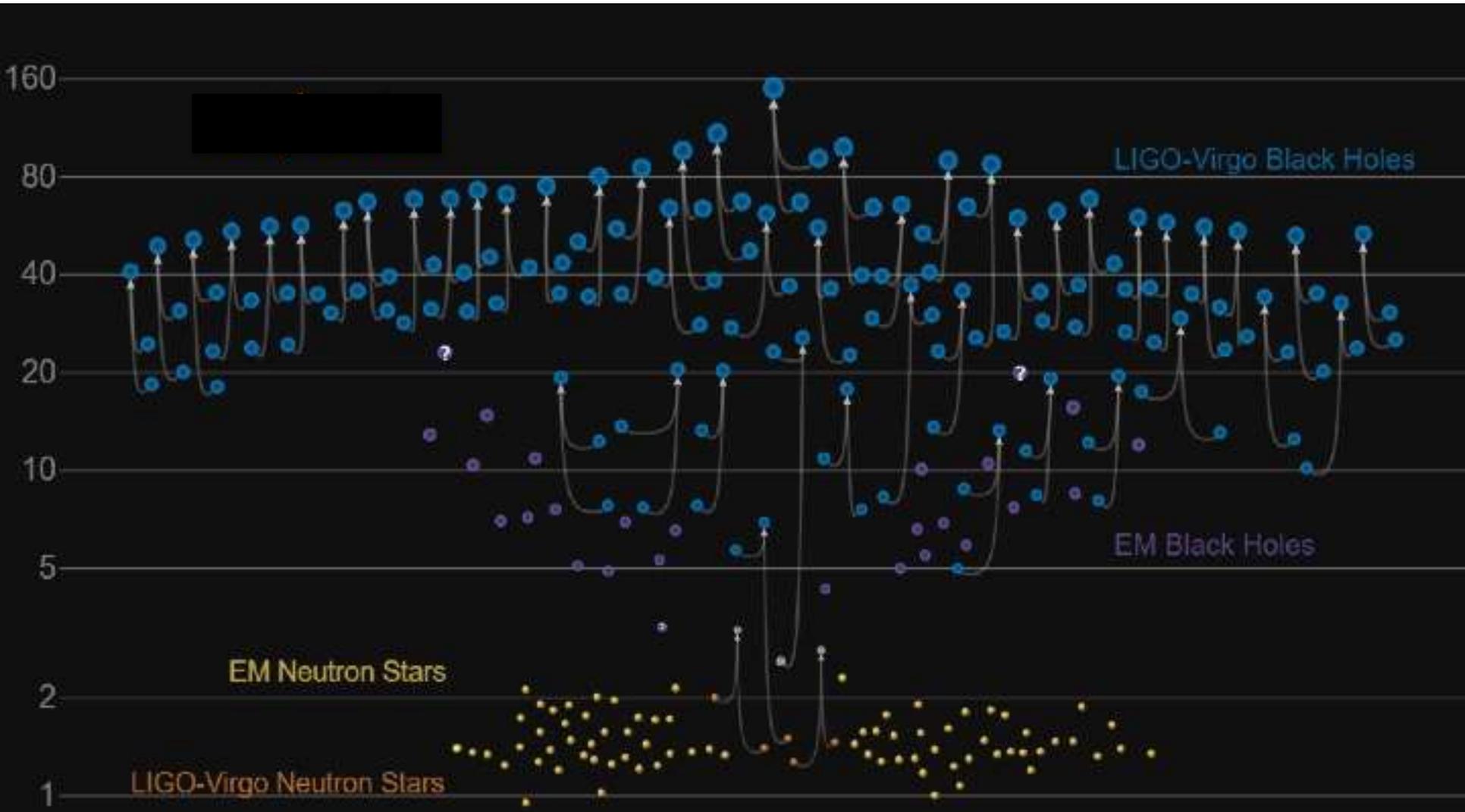
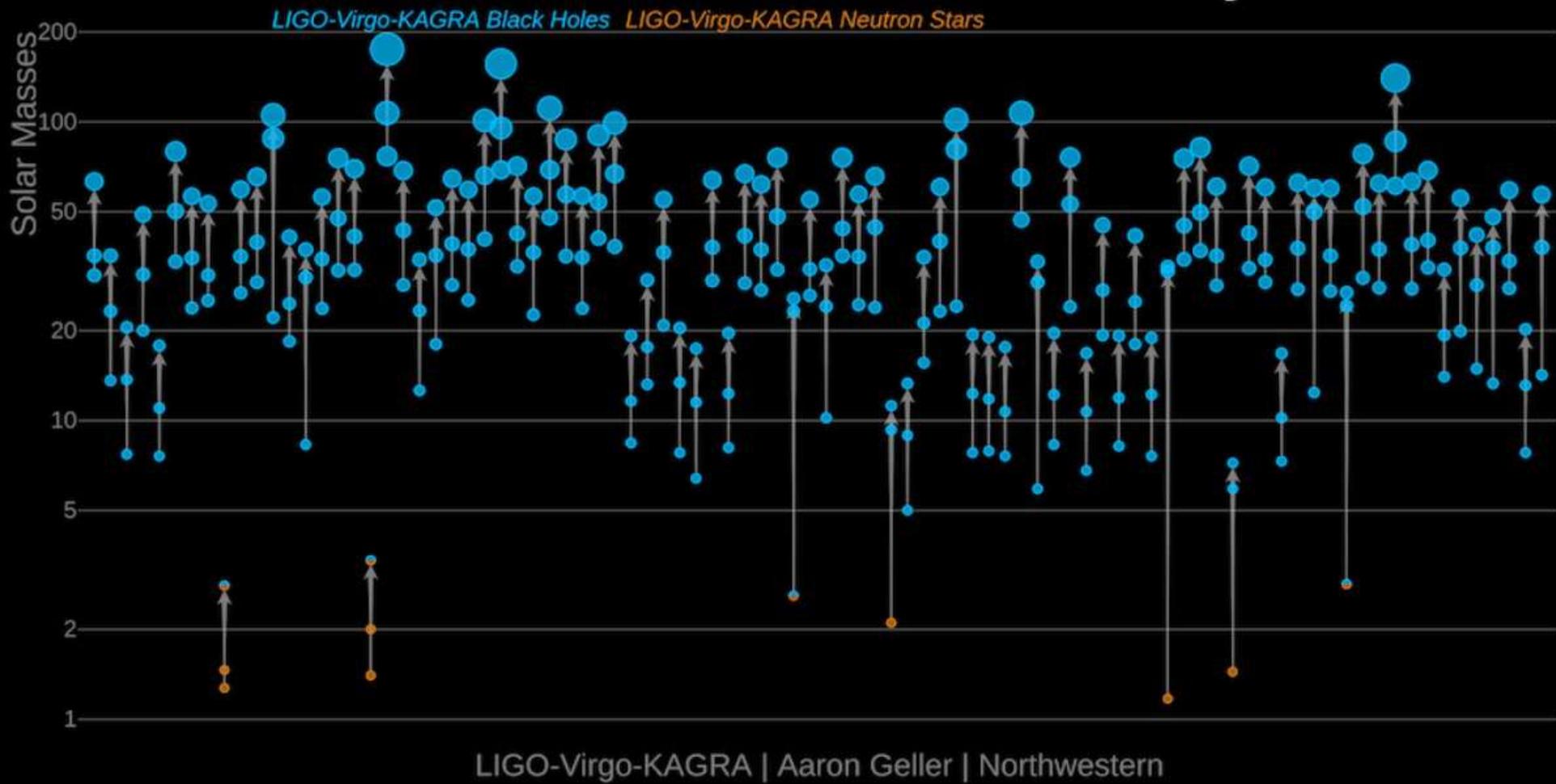


Grafico dedotto dal catalogo dei segnali GWTC-2

7 Novembre 2021 pubblicazione del nuovo catalogo di eventi (GWTC-3)  
che contiene tutti gli eventi osservati durante la terza fase di presa dati

# Masses in the Stellar Graveyard

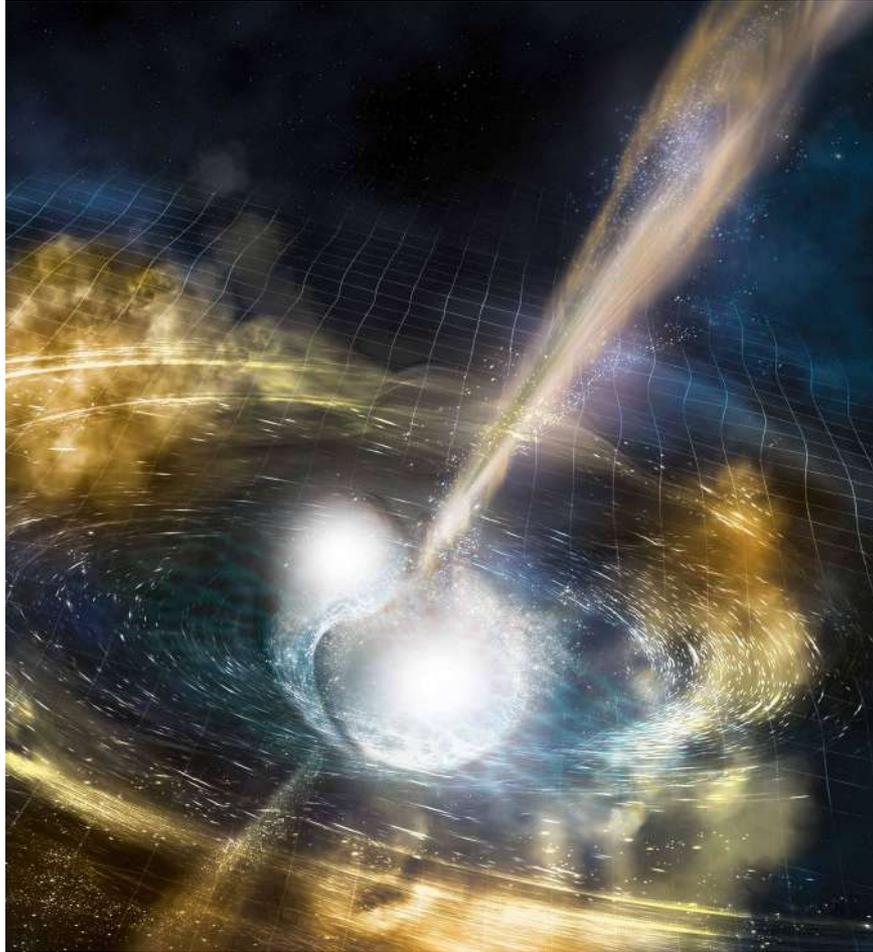


GWTC-1 → 11 eventi , GWTC-2 (2.1 revisited) → 55

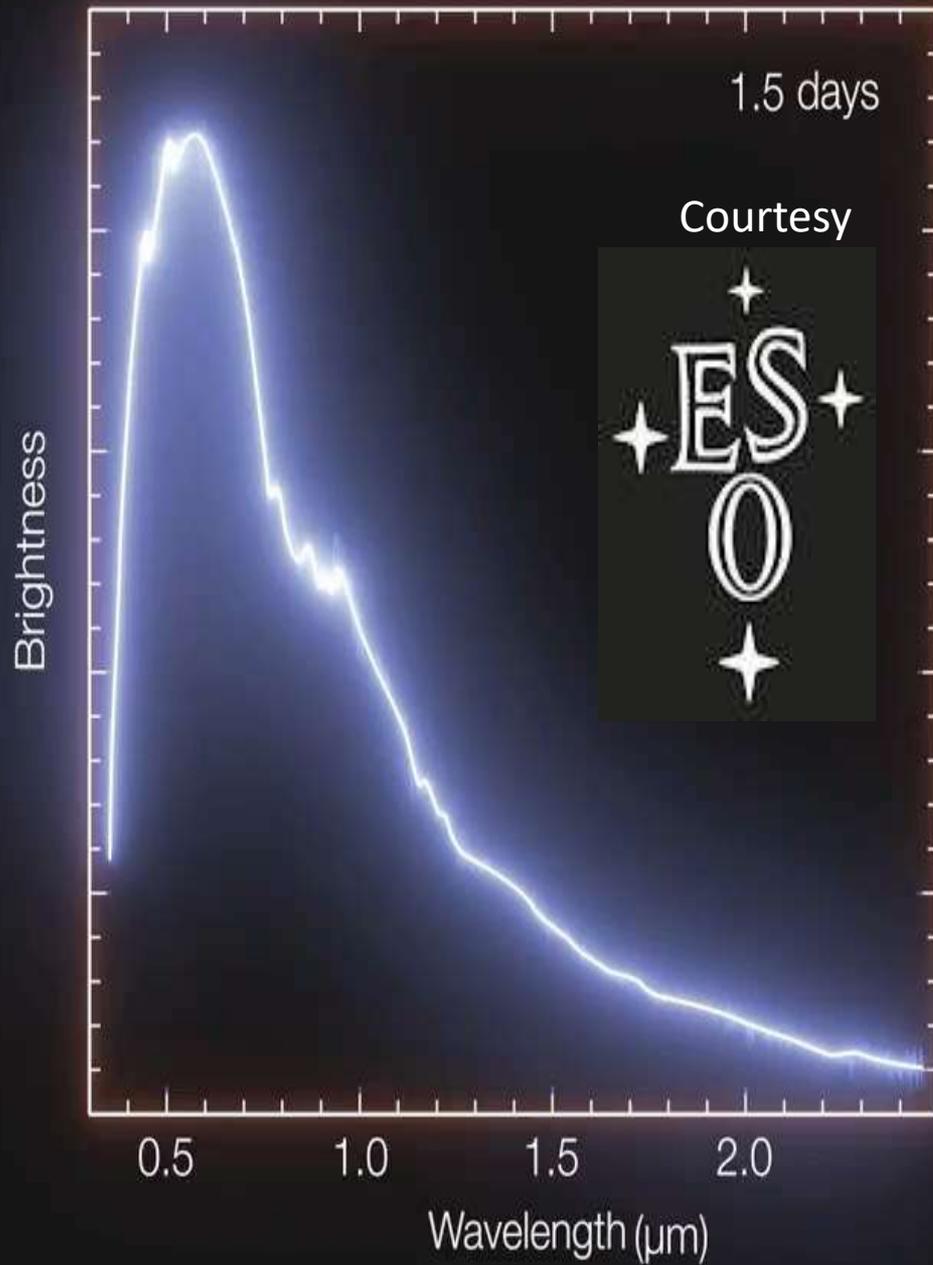
GWTC-3 → 90

# ... E ANCORA ... COSA ABBIAMO OSSERVATO - 17/8/2017

1.2 milioni di anni fa...



**La fusione di due stelle compatte di neutroni**



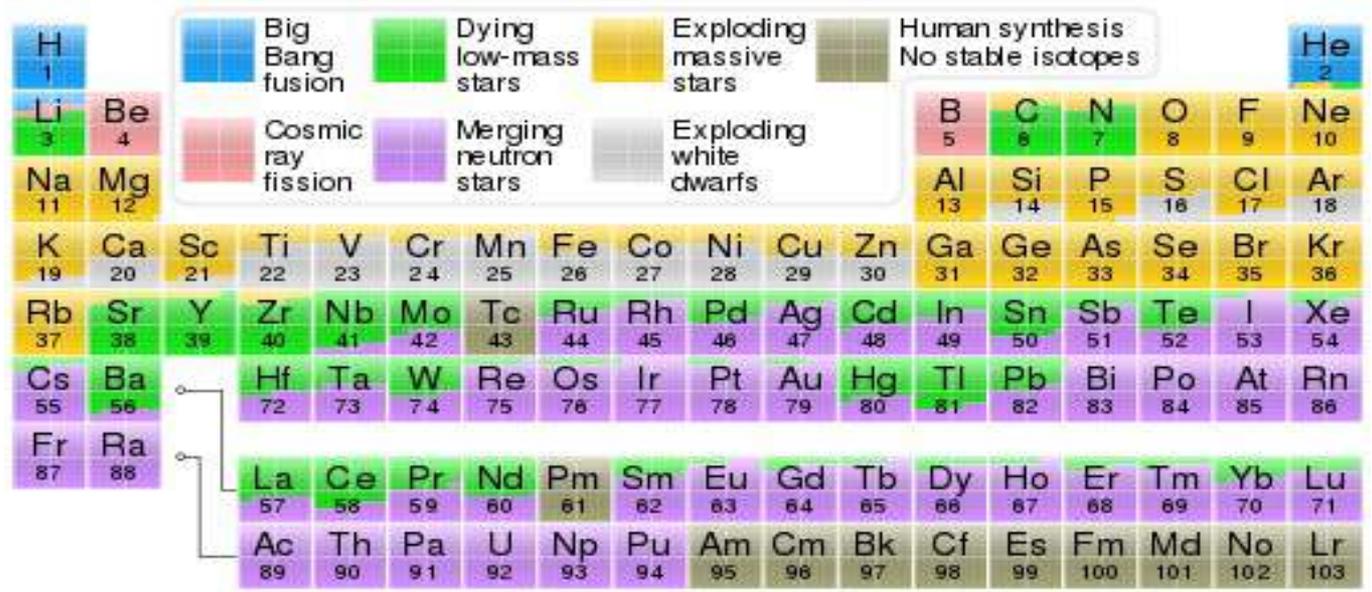
# DAGLI SPETTRI EVIDENZA DEI PROCESSI DI CATTURA

- CATTURA NEUTRONICA:**

*s-capture*

*r-capture*

- La cattura neutronica via processo-R avviene più rapidamente del processo competitivo di decadimento dei neutroni
- Il processo r domina in ambienti che hanno un più alto flusso di neutroni liberi; produce elementi più pesanti e più isotopi ricchi di neutroni rispetto al processo s.*

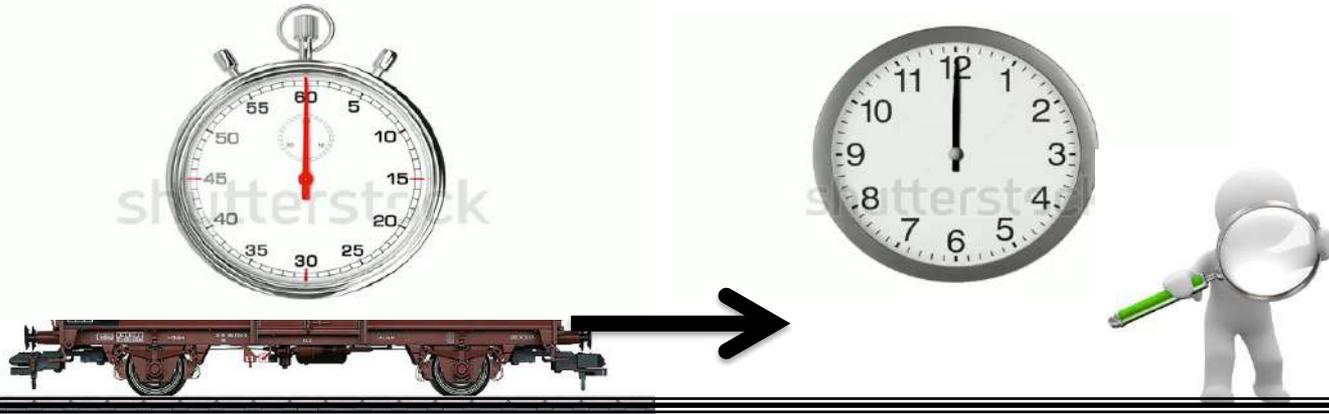


# *Ma cosa sono le onde gravitazionali?*

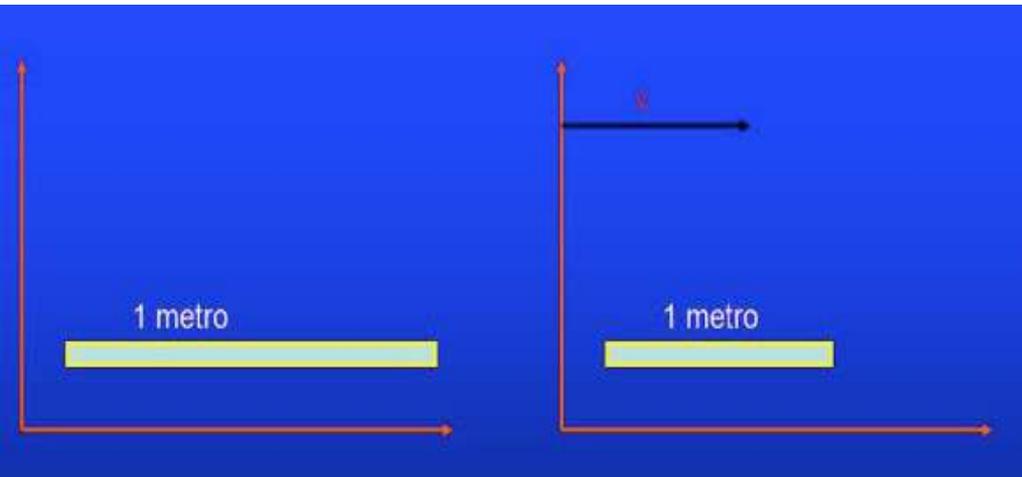
Per rispondere dobbiamo  
discutere alcuni aspetti  
della *Teoria della Relatività*

# Einstein 1905 → Relatività Ristretta

Intervalli di Tempo e Intervalli di Spazio non sono più quantità assolute:  
dipendono dallo stato di moto di chi osserva e misura



Rispetto all'osservatore sulla banchina il tempo dell'orologio in quiete scorre più rapido di quello dell'orologio in movimento



Il regolo in moto risulta più corto del regolo fermo

***Einstein 1905 → Esiste però una quantità che non dipende dallo stato di moto:  $c$  la velocità di propagazione della luce nel vuoto è invariante***

# Come misurare lo spazio → le lunghezze ?

Relatività ristretta → Le misure di lunghezza dipende dal sistema di riferimento !



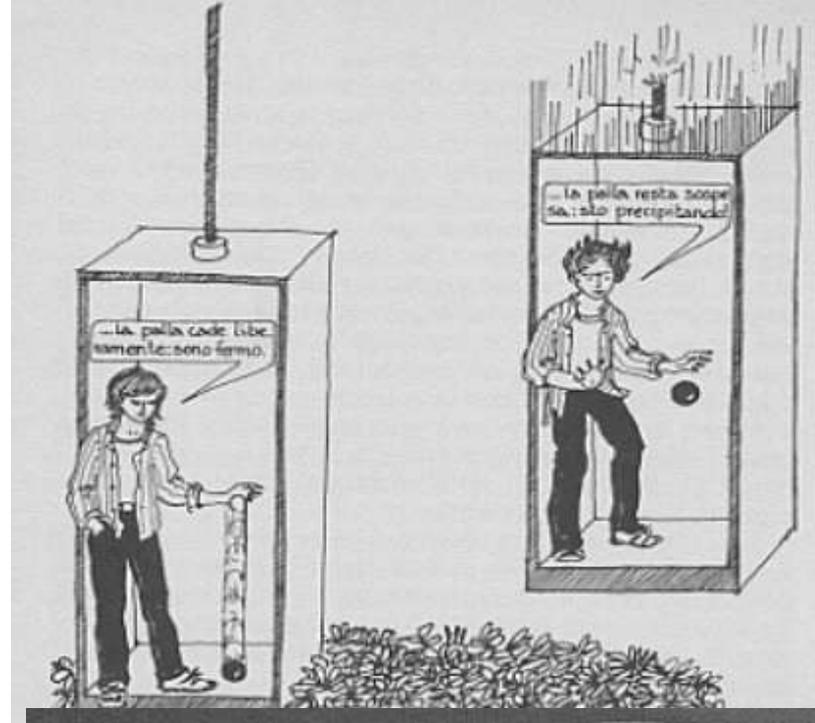
Metro campione conservato nell'Ufficio Internazionale di Pesi e Misure di Sèvres.

1983 → nuova convenzione  
L'unità di misura della lunghezza è il metro, definito come la distanza percorsa dalla luce nel vuoto in un intervallo di tempo pari a  $1/299792458$  di secondo.



# L'ascensore di Einstein

Se un ascensore è al suolo, un oggetto, lasciato andare dentro di esso, cade liberamente.



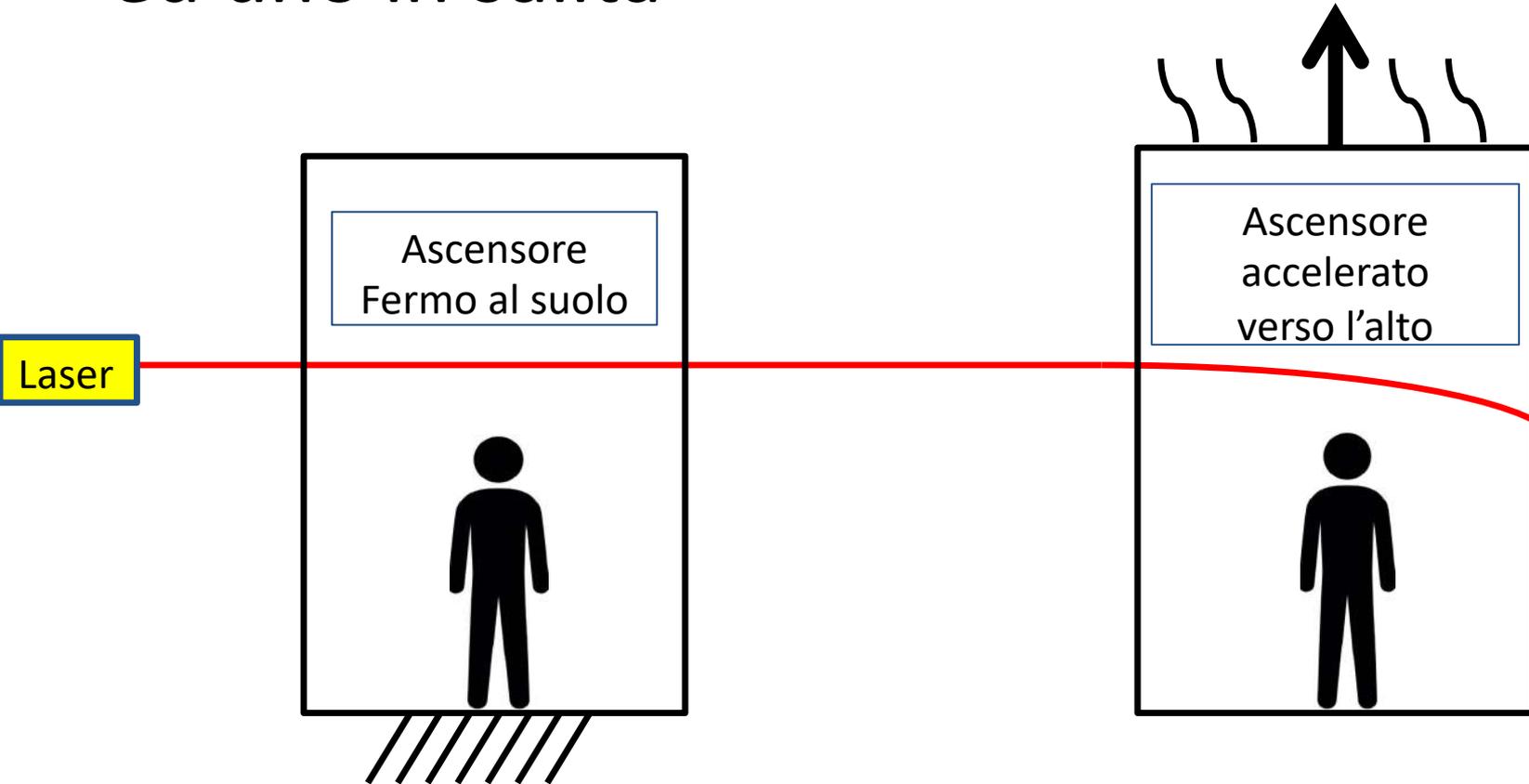
In un ascensore in caduta, un oggetto lasciato andare, resta dove è e non cade rispetto a chi lo lascia andare

Se un ascensore è nello spazio, lontano da un qualunque campo gravitazionale, un oggetto lasciato andare non cade.



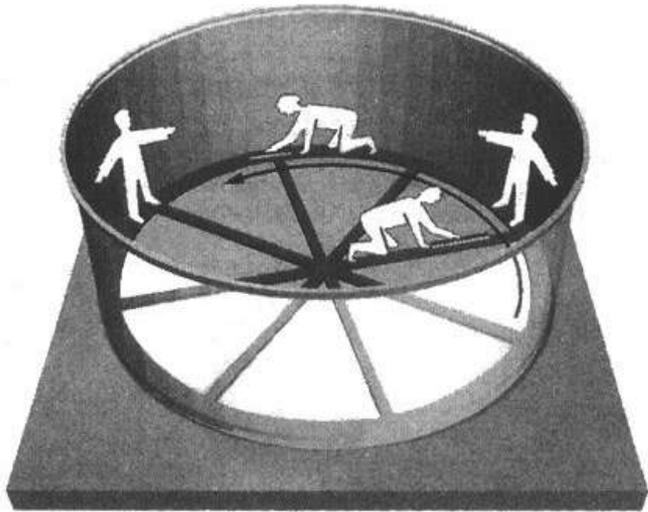
Se l'ascensore subisce una accelerazione verso l'alto, allora gli oggetti fermi (rispetto ad un osservatore) cadono rispetto all'ascensore

L'omino guarda la luce che attraversa un ascensore fermo rispetto al suolo ed uno in salita



*L'osservatore conclude che la traiettoria della luce è curva →  
nell'ascensore accelerato lo spazio è curvo !*

# Curvatura $\Rightarrow$ La giostra di EINSTEIN



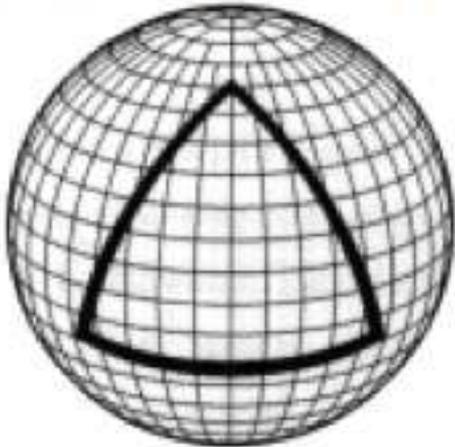
Giostra ferma

$$\text{Circonferenza/diametro} = \pi$$

Giostra in moto

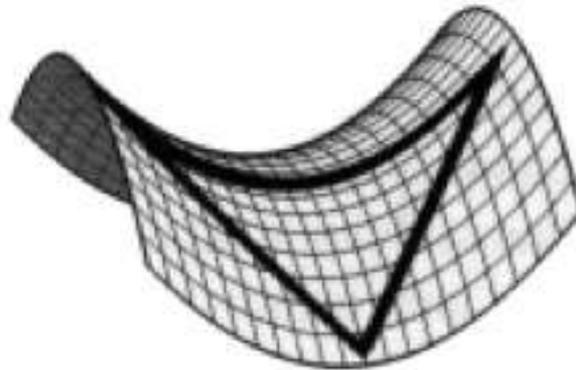
$$\text{Circonferenza/diametro} = \pi /$$

Curvatura Positiva

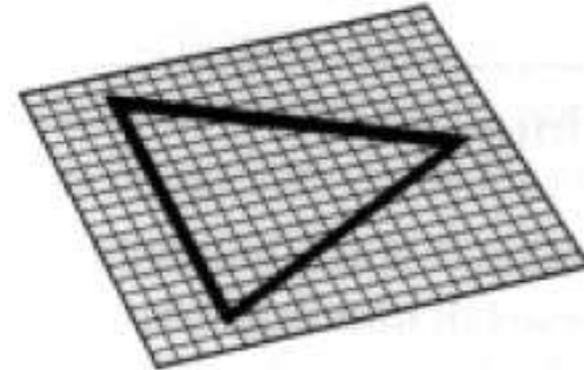


$$\alpha + \beta + \gamma \neq \pi$$

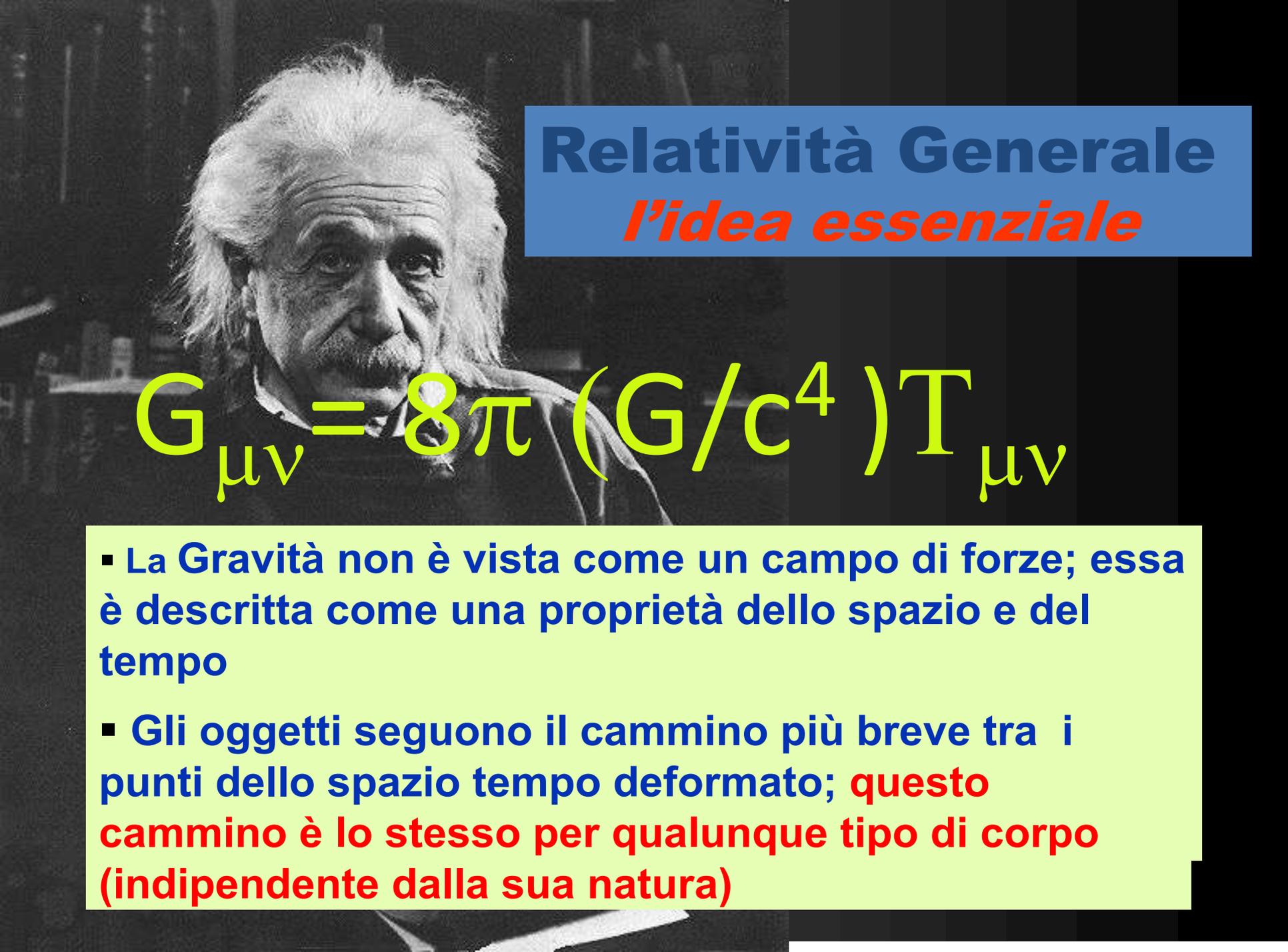
Curvatura Negativa



Curvatura Nulla



$$\alpha + \beta + \gamma = \pi$$

A black and white portrait of Albert Einstein, looking slightly to the right with a thoughtful expression. He has his characteristic wild, white hair and a mustache. The background is dark and out of focus.

# Relatività Generale

*l'idea essenziale*

$$G_{\mu\nu} = 8\pi \left( G/c^4 \right) T_{\mu\nu}$$

- La Gravità non è vista come un campo di forze; essa è descritta come una proprietà dello spazio e del tempo
- Gli oggetti seguono il cammino più breve tra i punti dello spazio tempo deformato; **questo cammino è lo stesso per qualunque tipo di corpo (indipendente dalla sua natura)**

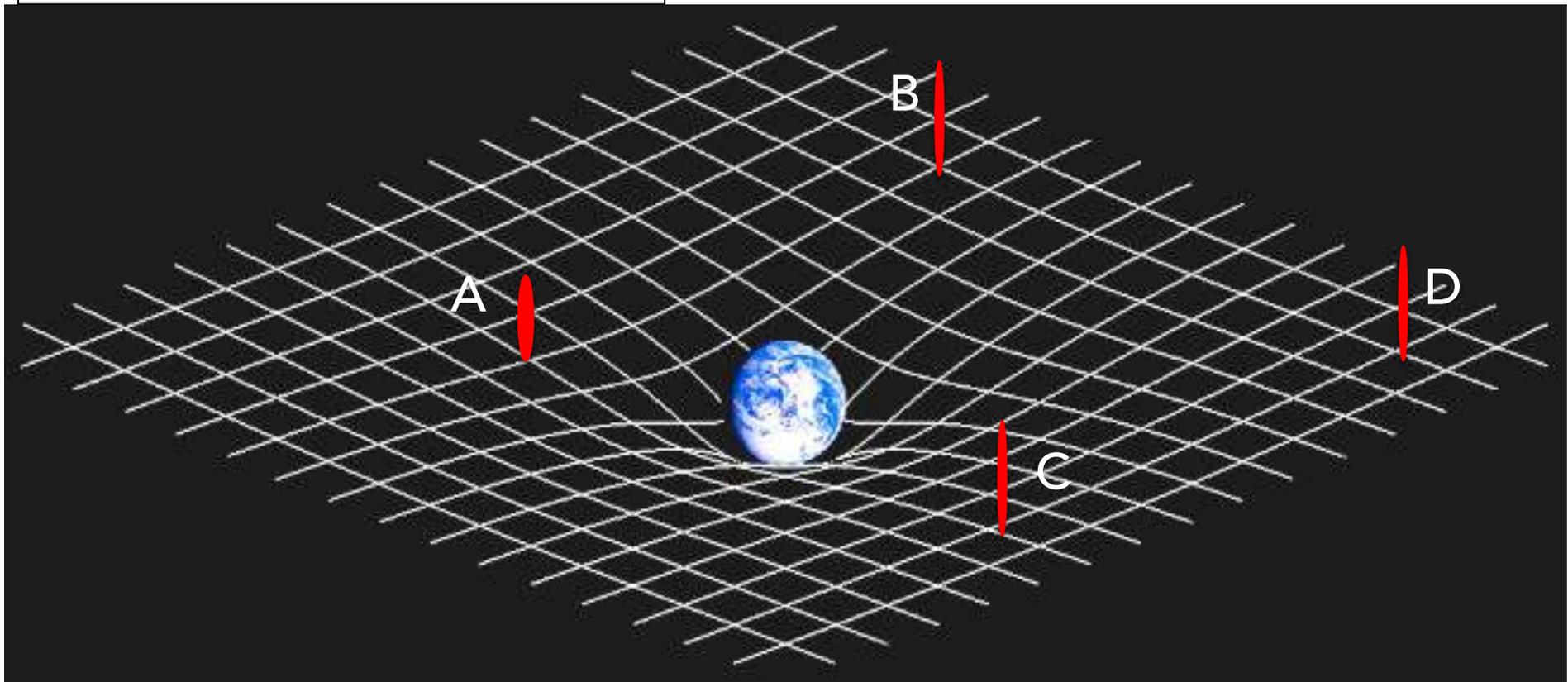
# La Gravità Curva lo Spazio

$$G_{\mu\nu} = 8\pi (G/c^4) T_{\mu\nu}$$

$$G = 6.7 \times 10^{-11} \text{ (N m}^2\text{) /kg}^2$$

$$c^4 = (3.0 \times 10^8 \text{ m/s})^4 = 81 \times 10^{32} \text{ (m/s)}^4$$

$$\longrightarrow G / c^4 = 8.3 \times 10^{-45} \text{ [N s}^4\text{/(m}^2 \text{kg}^2\text{)]}$$



Il cammino minimo AC è curvo ed è maggiore di quello BD



# Caratterizzare lo spazio-tempo con la luce

I punti di uno spazio tempo rappresentano eventi accaduti ad un certo istante  $t$  nel punto di coordinate  $x, y, z$

**ESEMPIO: la luce**

parte all'istante  $0$  dalla località  $P=(0,0,0)$  (**EVENTO 1**)

arriva all'istante  $dt$  alla località  $P'=(dx, dy, dz)$  (**EVENTO 2**)

$ds \rightarrow$  distanza infinitesima tra due eventi dello spazio tempo



**In assenza di gravità**

$$dx^2 + dy^2 + dz^2 = c^2 dt^2$$

ovvero

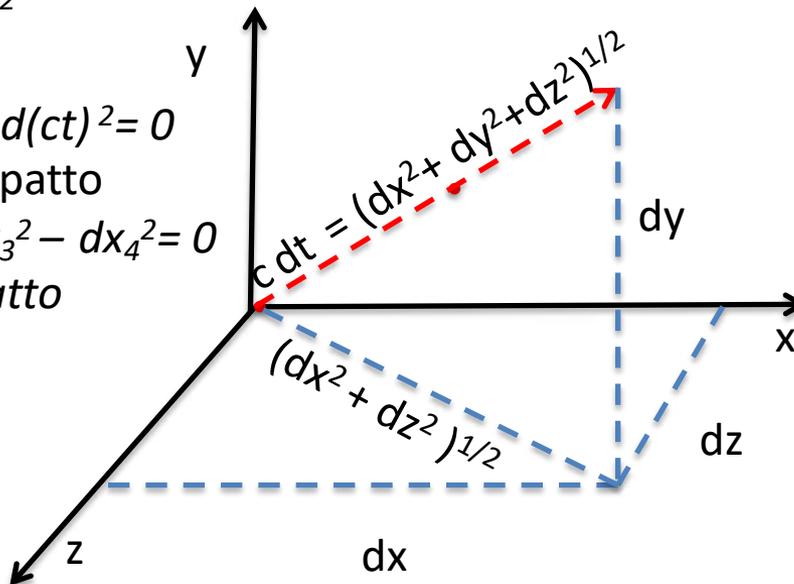
$$ds^2 = dx^2 + dy^2 + dz^2 - d(ct)^2 = 0$$

o in modo più compatto

$$ds^2 = dx_1^2 + dx_2^2 + dx_3^2 - dx_4^2 = 0$$

o ancora più compatto

$$ds^2 = \eta_{\mu\nu} dx_\mu dx_\nu$$



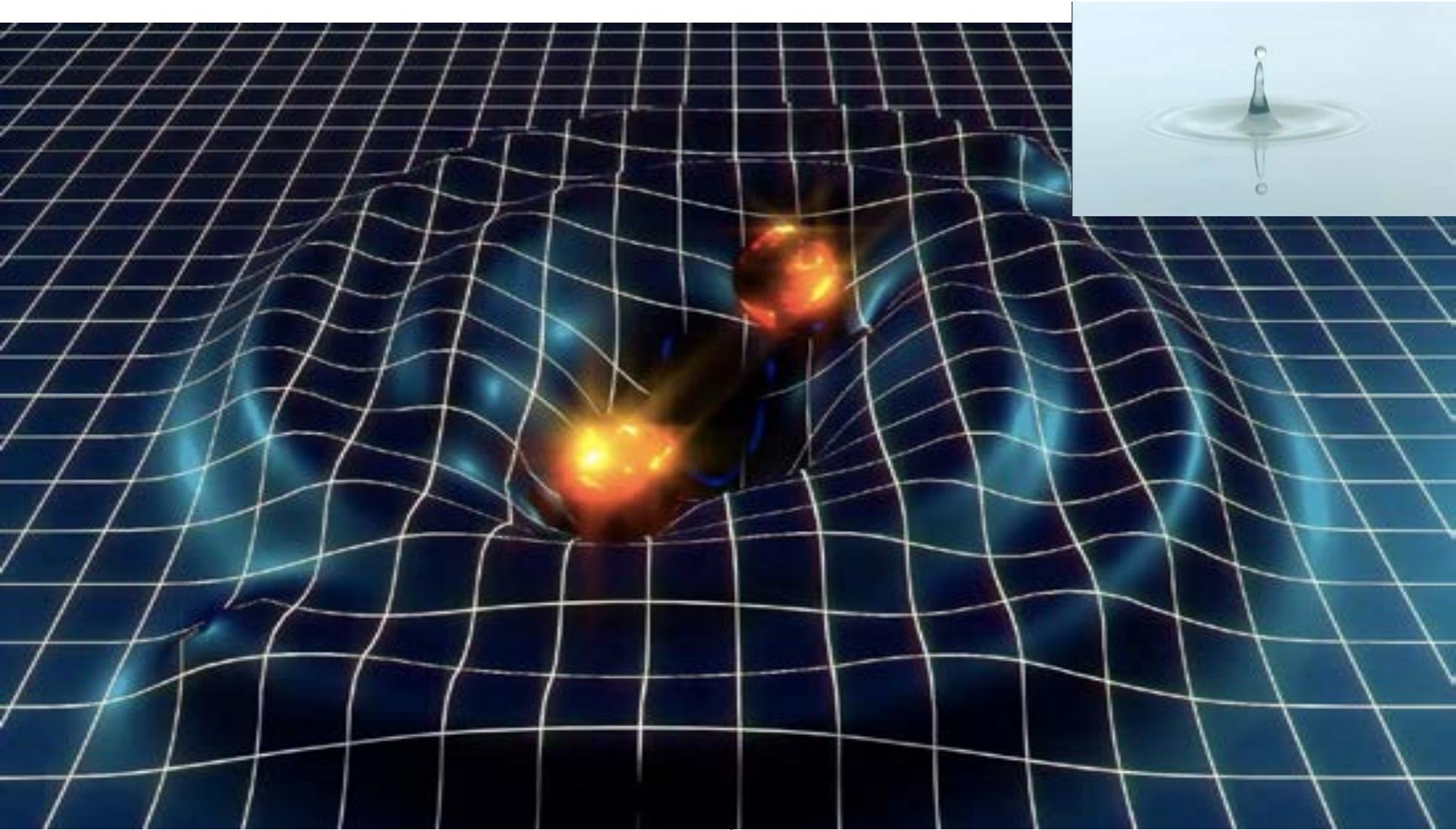
$$ds^2 = \eta_{\mu\nu} dx_\mu dx_\nu = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} dx_1 \\ dx_2 \\ dx_2 \\ dx_4 \end{pmatrix}$$

**in assenza di gravità:**

$$ds^2 = g_{\mu\nu} dx_\mu dx_\nu = \begin{pmatrix} a & b & c & d \\ e & f & g & k \\ i & l & m & n \\ p & q & r & s \end{pmatrix} \begin{pmatrix} dx_1 \\ dx_2 \\ dx_2 \\ dx_4 \end{pmatrix}$$

**in presenza di gravità**

Le onde gravitazionali sono  
increspature della trama dello  
spazio - tempo



# Incrispature nel mare cosmico

- Metrica in assenza di gravità (spazio-tempo piatto o di Minkowski)

$$\eta_{\mu\nu} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{pmatrix}$$

- Nelle regioni di spazio lontano dalle sorgenti lo spazio è solo leggermente diverso da quello in assenza di materia

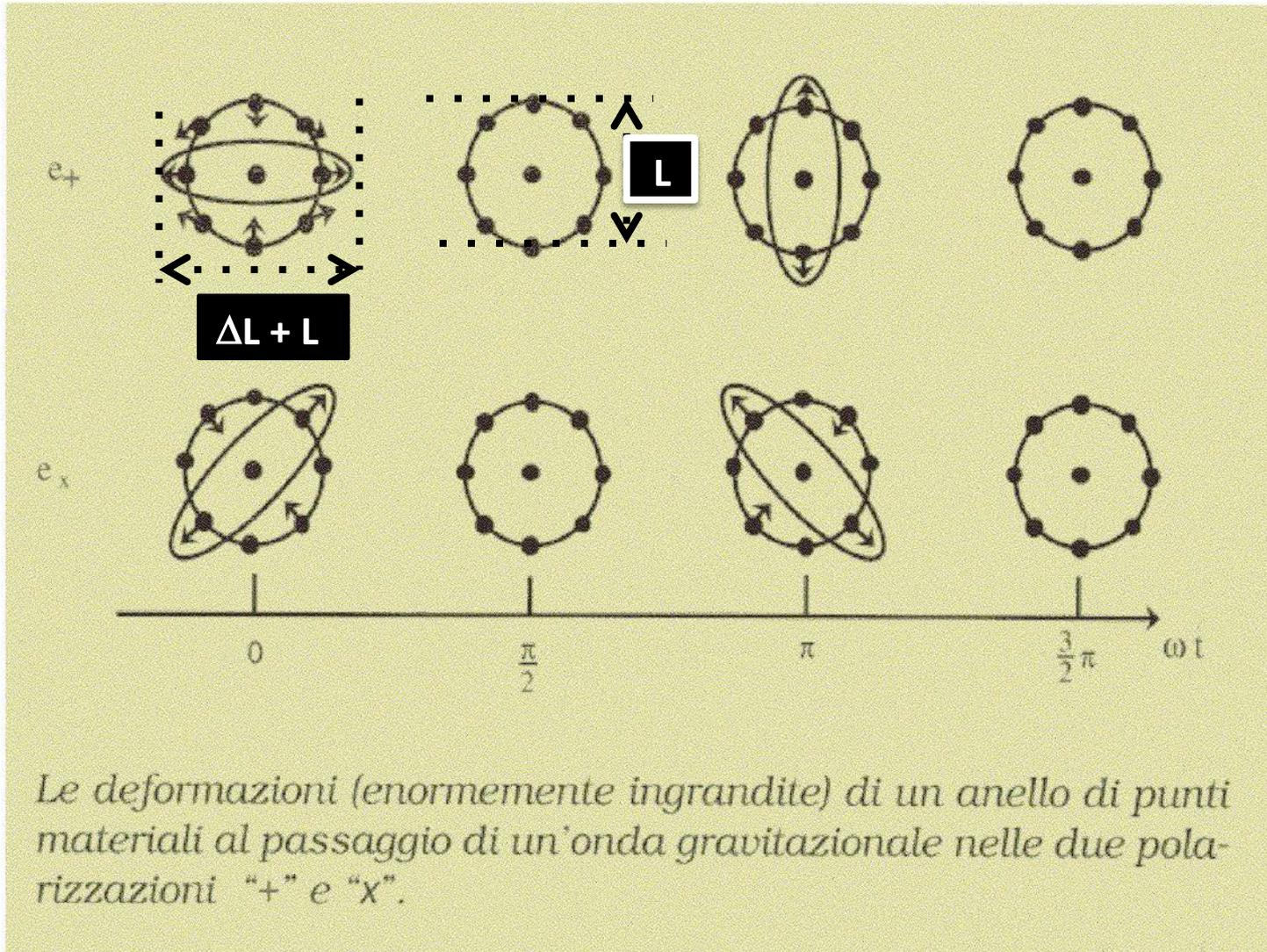
$$\mathbf{G}_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} \mathbf{T}_{\mu\nu}$$

$$\mathbf{g}_{\mu\nu} = \eta_{\mu\nu} + \mathbf{h}_{\mu\nu} \text{ with } |h_{\mu\nu}| \ll 1 \Rightarrow \left( \nabla^2 - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \right) h_{\mu\nu} = 0$$

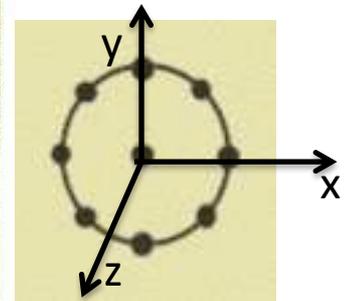
$$\mathbf{h}_{\mu\nu}(z, t) = \cos(\omega t - kz) \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & h_+ & h_x & 0 \\ 0 & h_x & -h_+ & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

# La Rivelazione delle ONDE GRAVITAZIONALI

Quando la nostra regione di spazio è investita dall' Onda Gravitationale, cambiano le proprietà geometriche dello spazio



$$h = \frac{\Delta L}{L}$$



# Luminosità di una sorgente GW e ampiezza dell'onda

• Luminosità:

$$P = \frac{G}{5c^5} \langle \ddot{Q}^{ij} \ddot{Q}_{ij} \rangle \approx \epsilon \cdot \frac{c^5}{G} \left( \frac{R_s}{R} \right)^2 \left( \frac{v}{c} \right)^6$$

10<sup>52</sup> W

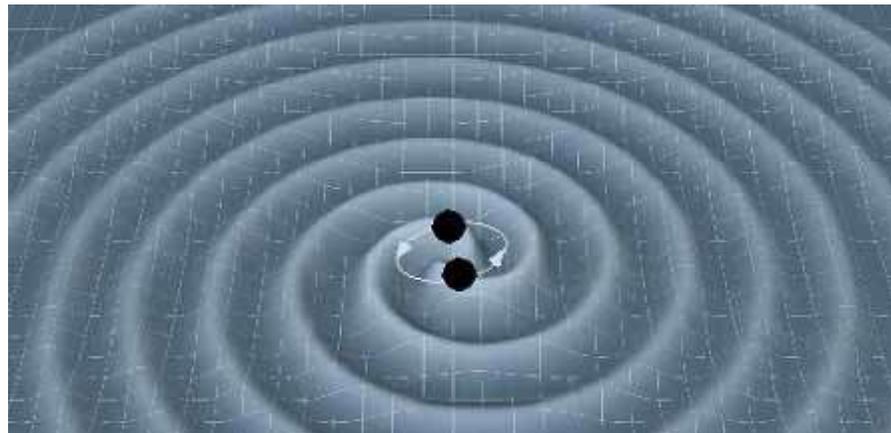
• Ampiezza:

$$h_{\mu\nu} = \frac{2G}{c^4} \cdot \frac{1}{r} \ddot{Q}_{\mu\nu}$$

Compattezza  $R/R_s$   
con  $R_s = 2GM/c^2$   
 1 for BH  
 0.3 for NS  
 10<sup>-4</sup> for WD

Una sorgente efficiente di GW deve muoversi velocemente ed essere compatta

I rivelatori di GW misurano  $h$  : segnale attenuato dal fattore  $1/r$



Esempio:

Coalescenza di NS/NS nell'ammasso di galassie della Vergine

$r \sim 10 \text{ Mpc} = 3.2 \times 10^6 \text{ anni luce} = 3 \times 10^{20} \text{ km}$



$h \sim 10^{-21}$

# Le Sorgenti Astrofisiche di Onde Gravitazionali

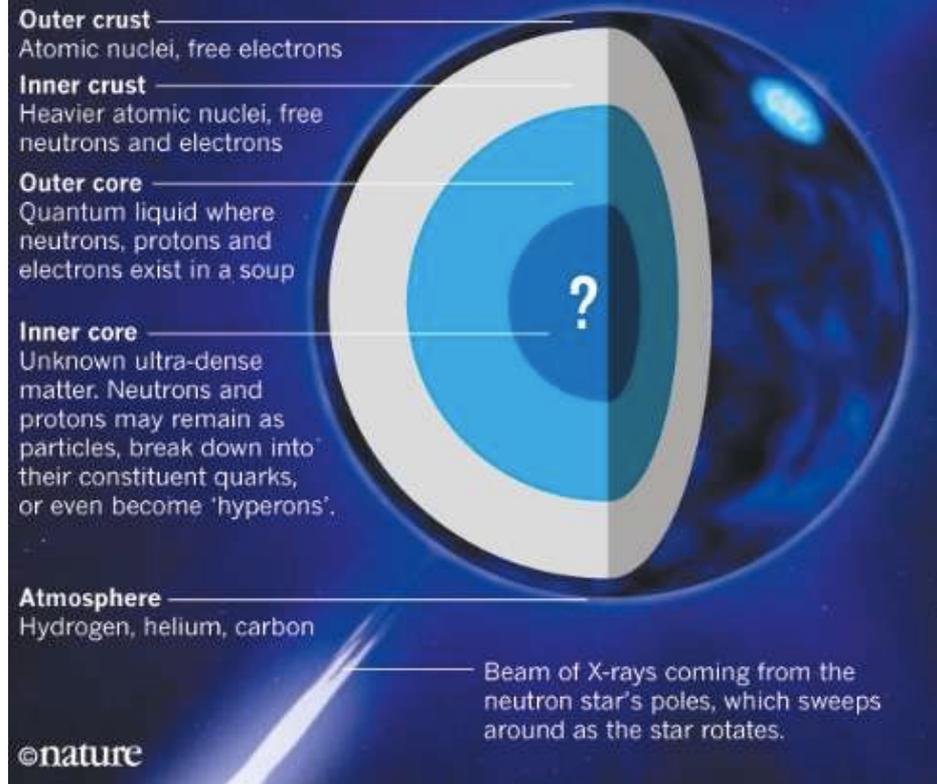
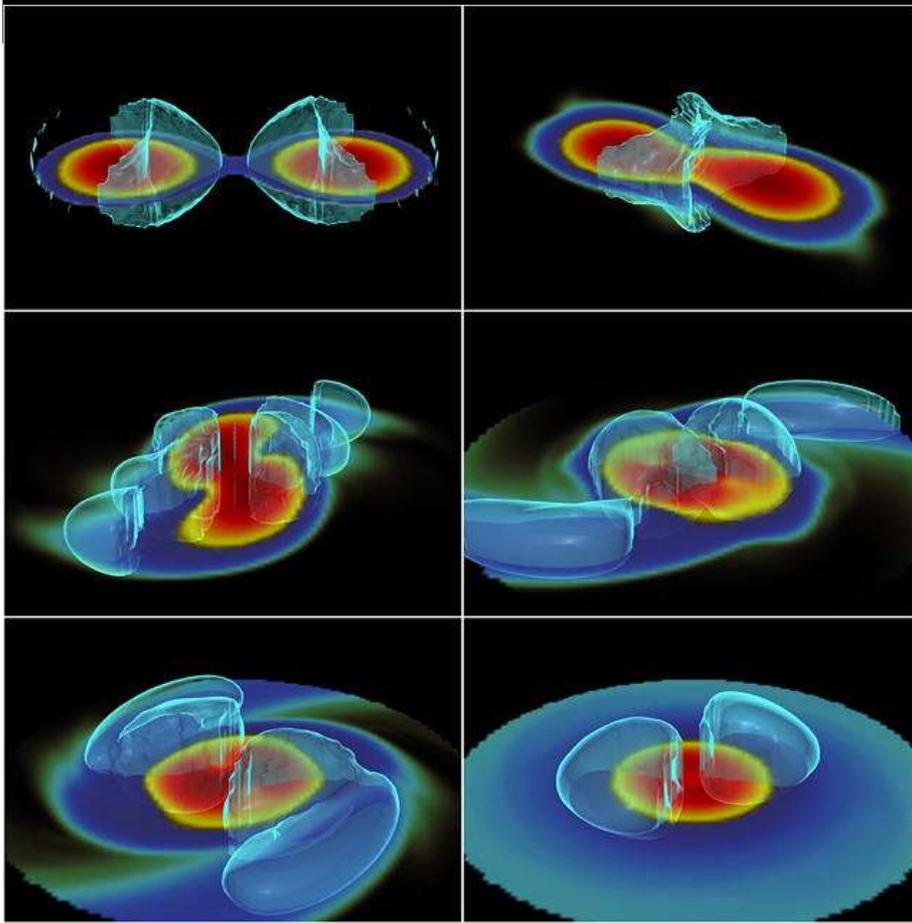
Movimenti rapidi di Grandi masse  
Moti Rapidi, velocità prossime a  $c$   
Materia estremamente densa

Compatezza media	Massa [kg]	Raggio [km]	Densità [kg/lt]
Acqua	1	bolla di 6.2 cm ~ 1 lt	1
Terra	$6 \times 10^{24}$	6400	5.5
Sole	$2 \times 10^{30}$	750000	1.4
<b>Stella Neutroni</b>	<b><math>4 \times 10^{30}</math></b>	<b>10</b>	<b><math>9 \times 10^{14}</math></b>
Protone	$1.7 \times 10^{-27}$	$1 \times 10^{-18}$	$4 \times 10^{14}$

*1 cm<sup>3</sup> di NS → ovvero un cucchiaino di materia di una Stella di Neutroni  
pesa  
900 milioni di tonnellate*

# Stelle di Neutroni

## NS binarie in fase di coalescenza

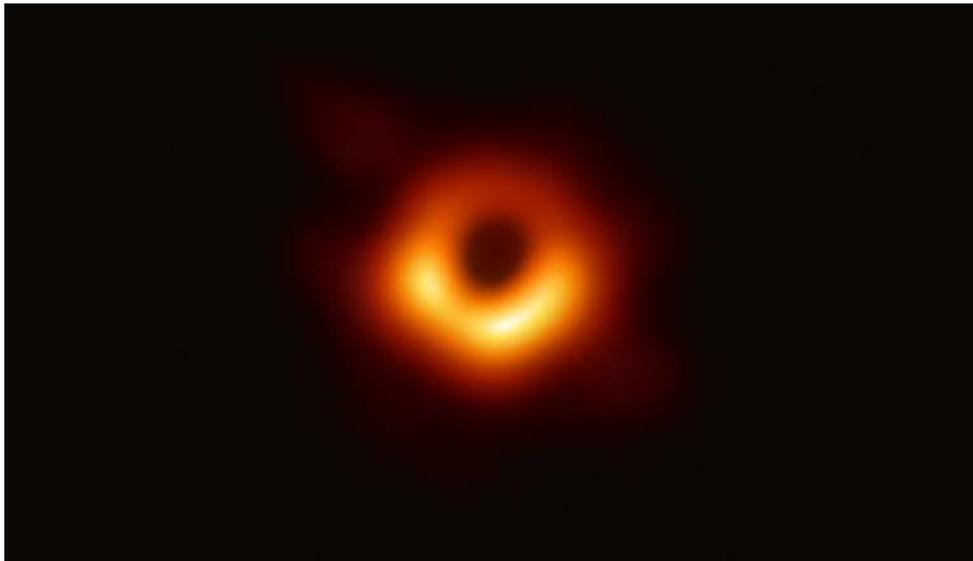


La scala dei colori intende mostrare la densità di materia dei due oggetti che stanno per fondersi.

Le isosuperfici di color azzurro-mare mostrano le deformazioni dello spazio attorno alla sorgente, ovvero il fronte dell'onda gravitazionale che si genera in questo fenomeno

# I Buchi Neri

Corpo celeste con un campo gravitazionale così intenso da creare una regione dello spaziotempo con una curvatura talmente grande che nulla dal suo interno può uscirne, nemmeno la luce!



$$r_{sh} = \left( \frac{2GM}{c^2} \right) \approx 2,95 \frac{M}{M_{Sole}} \text{ km,}$$

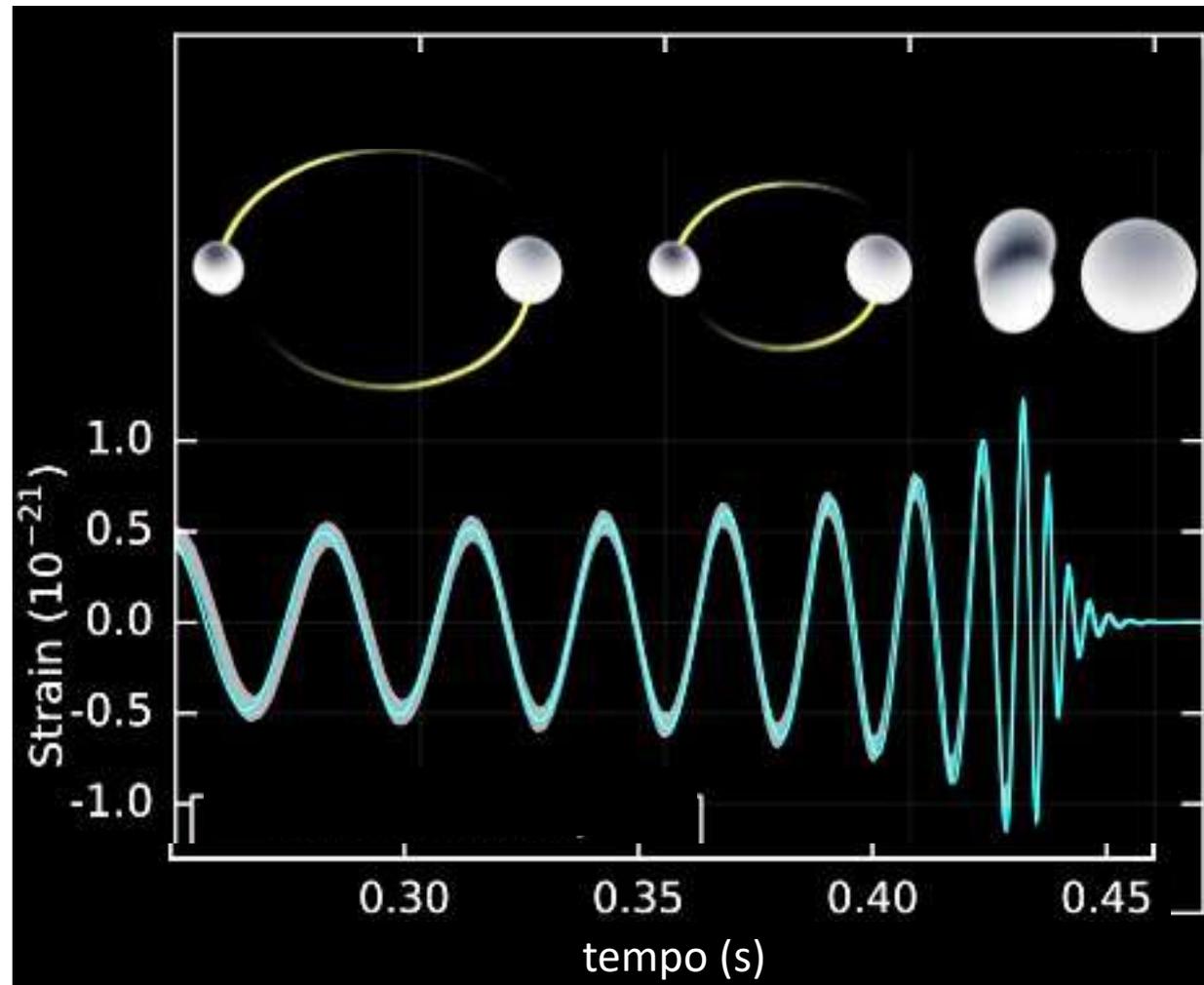
*Raggio di Schwarzschild:*

definisce il confine ideale (l'orizzonte degli eventi) oltre il quale qualunque cosa lo oltrepassi non sarà più in grado di tornare indietro

Classe	Massa
Buchi Neri Super Massicci	$\sim 10^5 - 10^{10} M_{Sole}$
Buchi Neri di Massa Intermedia	$\sim 10^2 - 10^5 M_{Sole}$
Buchi Neri di massa stellare	$\sim 3 - 10^2 M_{Sole}$
Buchi Neri Primordiali	$M \sim M_{Terra}$

**Coalescenza di un sistema binario:** due corpi compatti ruotano l'uno rispetto all'altro. Si avvicinano perdendo energia per emissione di onde gravitazionali sino a fondersi

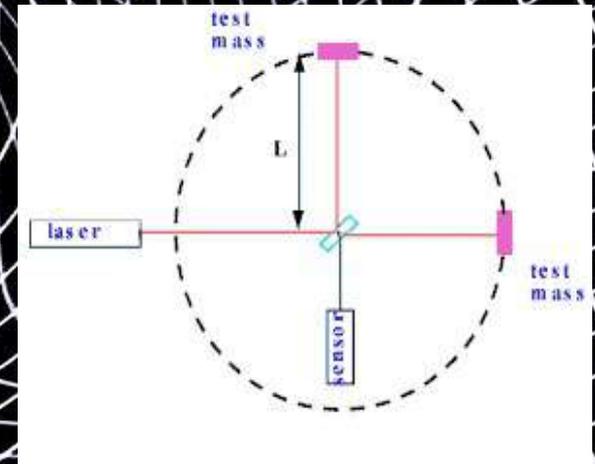
- La durata del segnale di onda gravitazionale che osserviamo dipende dallo strumento utilizzato e dal valore delle masse dei due oggetti
- Nella fase finale i due corpi si muovono a velocità prossime a  $c$



Il principio di rivelazione:  $h = \Delta L / L \rightarrow \Delta L = h L$

$c$  è un'invariante, quindi usiamo la luce per misurare  $\Delta L$ :  
cambia il tempo di propagazione della luce tra un punto e un altro  
dello spazio.

$$h = 10^{-21}, L = 1 \text{ km} \rightarrow \Delta L = 10^{-18} \text{ m}$$



# Spostamento da misurare: confronto degli ordini di grandezza

1 m



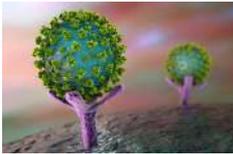
*Il metro da sarto - 1 m*

100  $\mu\text{m}$



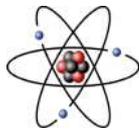
*Capello umano  $\sim 10^{-4}$  m*

50 -150 nm



*Virus SARS-CoV-2  $\sim 10^{-7}$  - $10^{-8}$  m*

100  $\mu\text{m}$



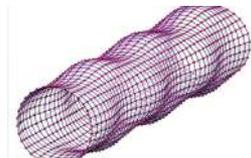
*Diametro atomico  $10^{-10}$  m*

1 fm



*Diametro Nucleare  $10^{-15}$  m*

1 am

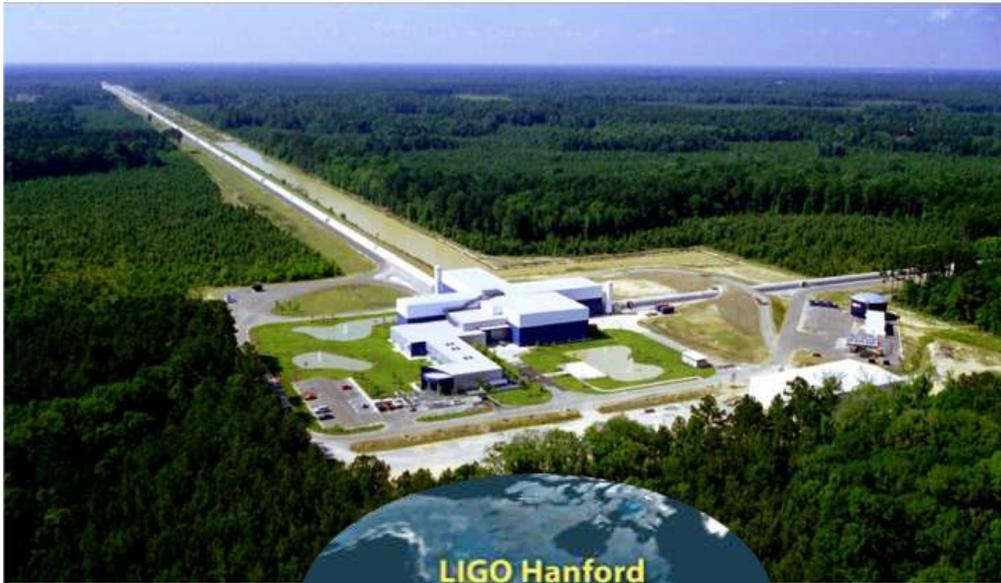


*Onda gravitazionale  $10^{-18}$  m*

# L'INTERFEROMETRO

misura  $\Delta L = h \lambda$





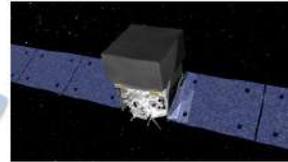
# Le prospettive future

## L'ASTRONOMIA MULTIMESSAGGERA

*La fusione di stelle di neutroni binarie*



**Onde Gravitazionali**



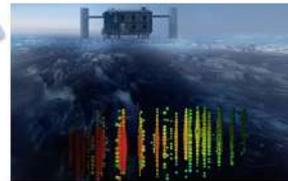
**Raggi X e Gamma**



**Luce visibile e Infrarossa**

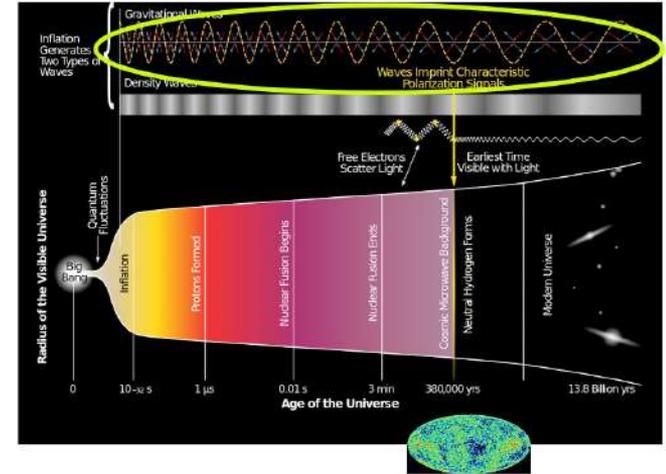


**Onde Radio**



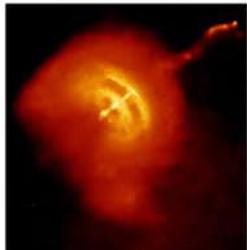
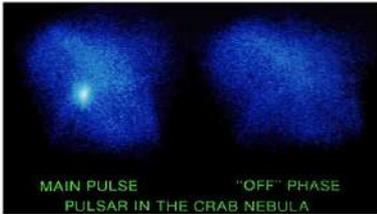
**Neutrini**

Il Rumore Cosmologico Gravitazionale  
Processi avvenuti nei primi istanti di vita dell'Universo dovrebbero aver prodotto un "mormorio di fondo" di onde gravitazionali

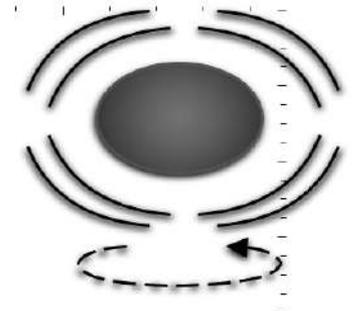
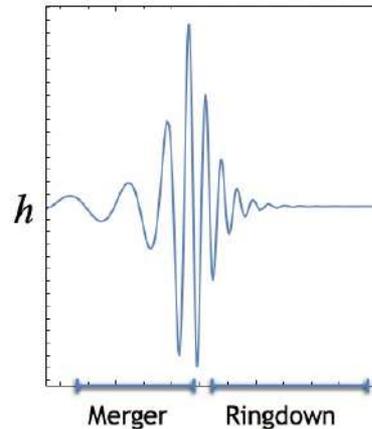
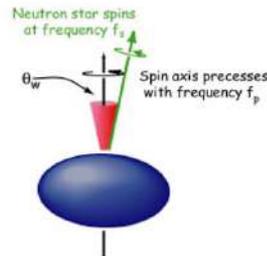


La Fisica dei buchi neri

### Stelle di Neutroni Rotanti: "segnali periodici"



In questo caso il segnale si ripete continuamente nel tempo (segnale periodico) con un periodo pari al doppio del periodo di rotazione della stella pulsante

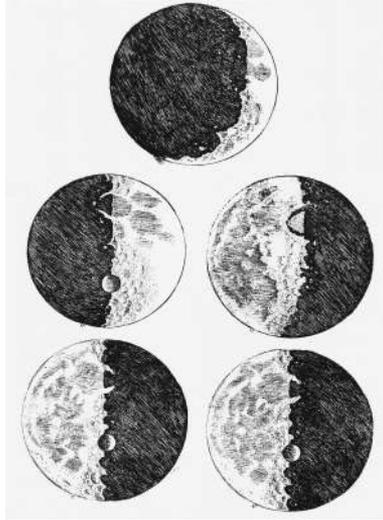


Le oscillazioni proprie di un buco nero riveleranno le sue proprietà proprie

L'analisi di questa parte dei segnali consentirà di verificare se è l'oggetto previsto da Einstein o se vi sono deviazioni che indicano l'esistenza di oggetti differenti.

# L'inizio di una nuova era

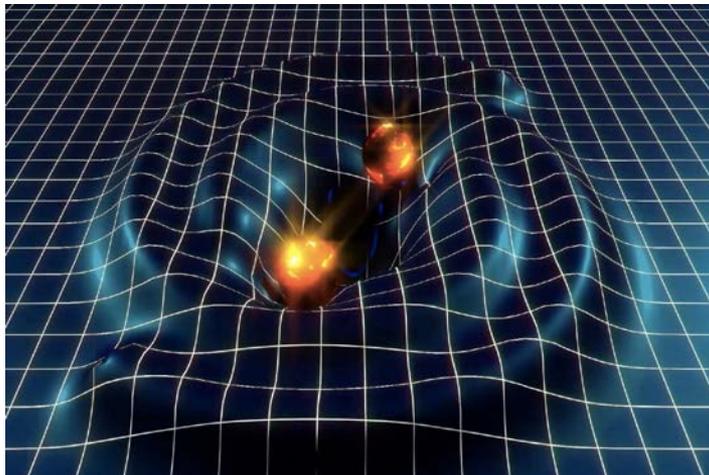
La luna di Galileo



La luna vista col telescopio di Hubble



dai buchi neri...



...ai wormhole?

