

# Il Cosmo Svelato

## alla Scoperta dello Spaziotempo coi dati di Onde Gravitazionali

Francesco Di Renzo - IP2I, Lyon [f.di-renzo@ip2i.in2p3.fr](mailto:f.di-renzo@ip2i.in2p3.fr)  
PID @ EGO, Ottobre 14 -18, 2024



# Programma della Lezione

## 1. Introduzione teorica

1. Richiami di Relatività Generale 
2. Onde gravitazionali 

## 2. Laboratori

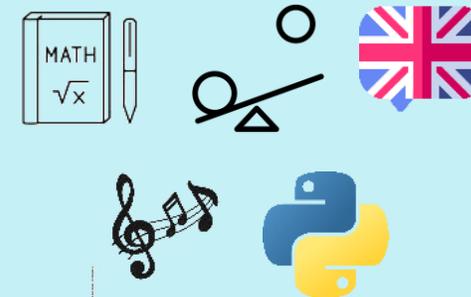
1. Laboratorio di elaborazione dei segnali 
2. Il portale di dati pubblici: ricerca e visualizzazione dei dati 
3. La guida di LIGO e Virgo al rumore e alla rivelazione di segnali gravitazionali 
4. (Opzionale) Altri tutorial e workshop dal GWOSC 

## 3. Rimanere aggiornati sulla ricerca di segnali gravitazionali

1. Gravitational-Wave Observatory Status e Summary Pages 
2. Il Gravitational-Wave Candidate Event Database (GraceDB) 
  1. Eventi candidi in O4 e prese dati precedenti
  2. Le allerte pubbliche di LIGO, Virgo e KAGRA

## 4. Discussione e Q&A

### Conoscenze utili

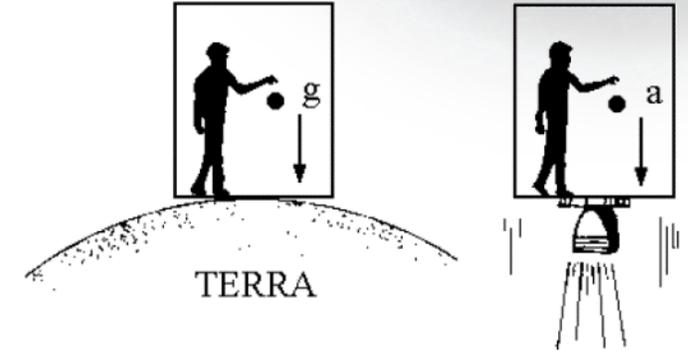
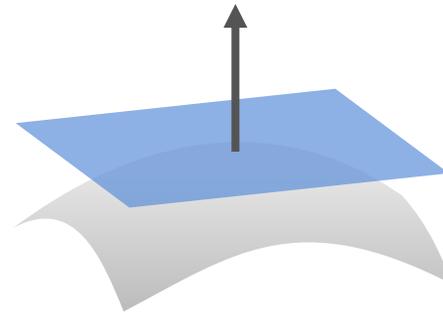


### Difficoltà progressiva



# I Principi della Relatività Generale

- Principio di equivalenza:
  - Debole: la **massa inerziale** equivale **quella gravitazionale**. Quindi, tutte le masse sentono la stessa accelerazione in un campo gravitazionale (indipendentemente dalla massa o da altre proprietà intrinseche)
  - Forte (o di Einstein, basato sull'esperimento mentale dell'ascensore): è impossibile **distinguere localmente** l'effetto di un ascensore fermo in presenza di gravità da quello di un razzo che accelera di una stessa quantità.
- Principio di general covarianza: un'equazione fisica è valida in presenza di gravità se:
  - È valida in assenza di gravità ed equivale alla sua espressione in Relatività Speciale
  - Mantiene la stessa forma funzionale rispetto a qualsiasi trasformazione di coordinate.



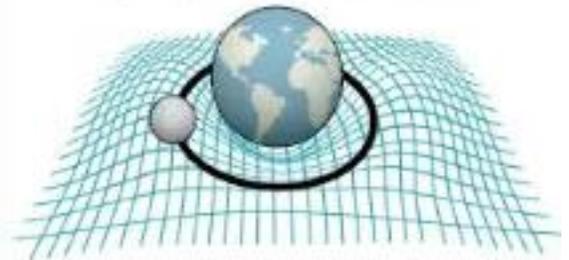
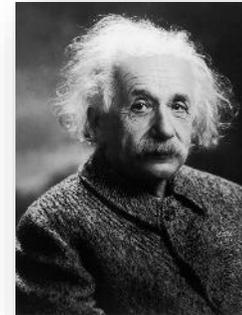
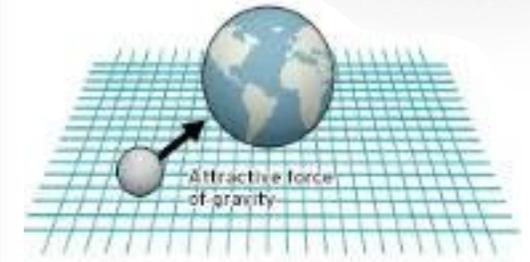
*Si vede da queste considerazioni che nell'istituire la teoria della relatività generale saremo condotti a una teoria della gravitazione, in quanto siamo capaci di "produrre" un campo gravitazionale semplicemente cambiando il sistema delle coordinate. Si vede altresì che il principio della costanza della velocità della luce nel vuoto deve venire modificato.*

Albert Einstein, Annalen der Physik XLIX (1916)

# Gravitazione e Spaziotempo

La Relatività Generale presenta una nuova teoria della gravitazione e dello spaziotempo:

- Sostituisce la Meccanica Newtoniana e la teoria della gravitazione di Newton
- Si riduce a queste due teorie nel limite di **velocità piccole** rispetto alla velocità della luce  $c$  e **campi gravitazionali deboli** (il potenziale gravitazionale  $\phi(x) \ll c^2$ )
- Si riduce alla teoria della Relatività Ristretta nel limite di campi gravitazionali deboli e per regioni *sufficientemente localizzate* dello spaziotempo
- L'effetto della gravità non si manifesta più con una forza (che agisce a distanza, istantaneamente) ma come il moto di una massa libera vincolata a muoversi lungo "il percorso più dritto possibile" in uno **spaziotempo curvo**.



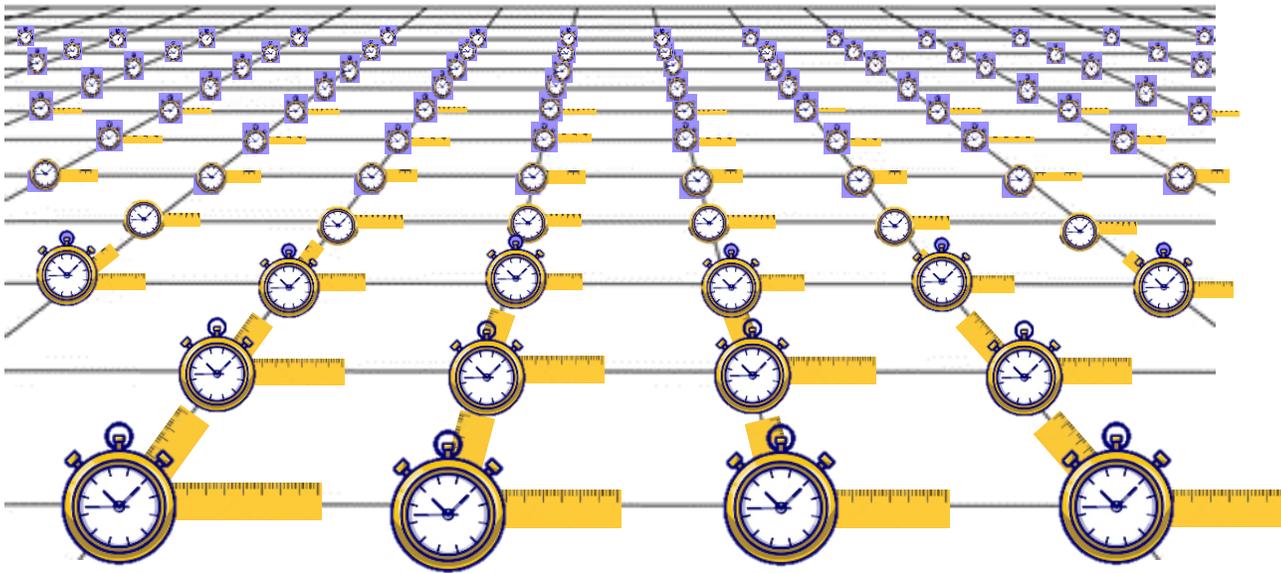
"Mass tells space how to curve;  
curved space tells matter how to  
move."

John Archibald Wheeler

# Lo Spaziotempo

- Collezione di **eventi** (dove e quando):  $x_\mu = (x_0, x_1, x_2, x_3) = (ct, x, y, z)$
- Dotati di una "misura" (*metrica*, **righelli** e **orologi**) della loro distanza:

$$\underbrace{ds^2}_{\text{intervallo relativistico}} = \underbrace{g_{\mu\nu}}_{\text{metrica}} dx^\mu dx^\nu$$



Regola di Einstein sugli indici ripetuti:

$$a_\mu b^\mu := \sum_{\mu=0,1,2,3} a_\mu b^\mu$$

Spaziotempo piatto (no gravità):

$$g_{\mu\nu} = \eta_{\mu\nu} = \text{diag}(-1, 1, 1, 1)$$

(metrica di Minkowski)

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

Spaziotempo curvo (con gravità):

$$\begin{aligned} ds^2 &= g_{\mu\nu}(x) dx^\mu dx^\nu \\ &= g_{00} dx_0^2 + g_{01} dx_0 dx_1 + \dots \\ &\quad \dots + g_{23} dx_2 dx_3 + g_{33} dx_3^2 \end{aligned}$$

# Gravità e Moto dei Corpi

- **Meccanica Newtoniana:**

$$\frac{d^2 x_i}{dt^2} = \frac{F_i}{m} = -\frac{\partial \phi}{\partial x_i} \quad (i = 1, 2, 3)$$

Potenziale gravitazionale

Equazione di Poisson:

$$\nabla^2 \phi := \sum_i \frac{\partial^2 \phi}{\partial x_i^2} = 4\pi G \rho$$

Densità di materia

(a distanza  $r$  da una massa  $M$ :  $\phi(r) = -GM/r$ ).

- **Relatività Generale:**

$$\frac{d^2 x^\lambda}{d\tau^2} + \Gamma_{\mu\nu}^\lambda \frac{dx^\mu}{d\tau} \frac{dx^\nu}{d\tau} = 0 \quad (\mu, \nu, \lambda = 0, \dots, 3)$$

dove  $\Gamma_{\mu\nu}^\lambda = \frac{1}{2} g^{\mu\nu} \left( \frac{\partial g_{\mu\nu}}{\partial x^\lambda} + \frac{\partial g_{\lambda\nu}}{\partial x^\mu} - \frac{\partial g_{\mu\lambda}}{\partial x^\nu} \right)$ .

Equazione di Einstein:

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

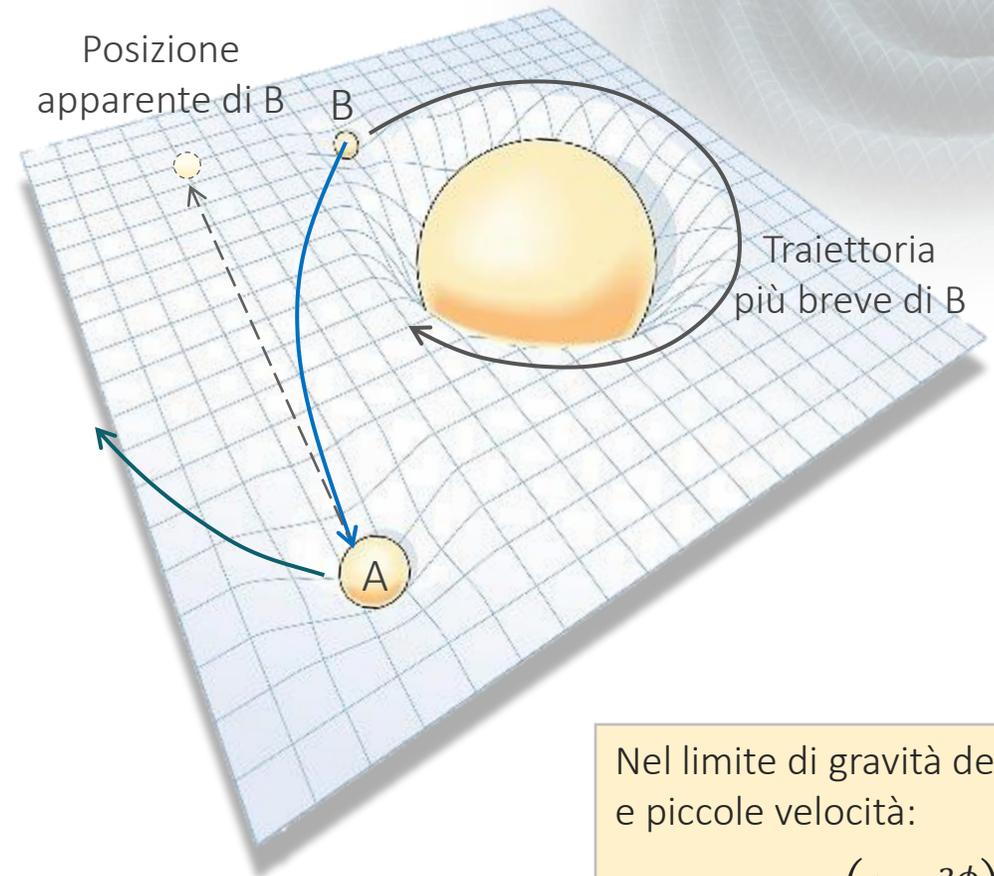
Tensore energia-impulso

dove:

$$R_{\mu\nu} = \frac{\partial \Gamma_{\mu\nu}^\lambda}{\partial x^\lambda} - \frac{\partial \Gamma_{\mu\lambda}^\nu}{\partial x^\nu} + \Gamma_{\mu\nu}^\lambda \Gamma_{\lambda\sigma}^\sigma - \Gamma_{\mu\lambda}^\sigma \Gamma_{\nu\sigma}^\lambda$$

Tensore di Ricci

$$R = g^{\mu\nu} R_{\mu\nu}$$

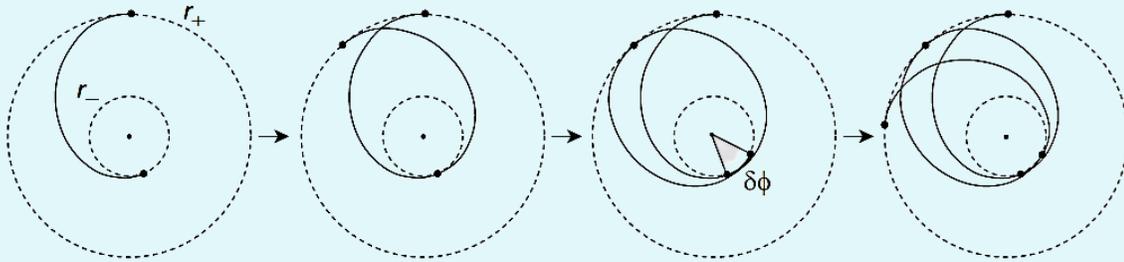


Nel limite di gravità debole e piccole velocità:

$$g_{00} \approx -\left(1 + \frac{2\phi}{c^2}\right)$$

# Conferme Sperimentali Classiche

Precessione del perielio di Mercurio (La Verrier 1859)

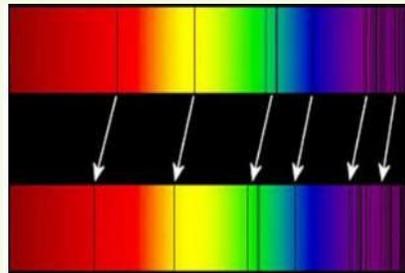


$$\delta\phi \approx \frac{4\pi G M}{ac^2(1-e^2)} \approx 43''.$$

Spostamento verso il rosso delle righe spettrali (Adams 1925)

$$z = \frac{\Delta\lambda}{\lambda} \approx \frac{GM}{Rc^2}$$

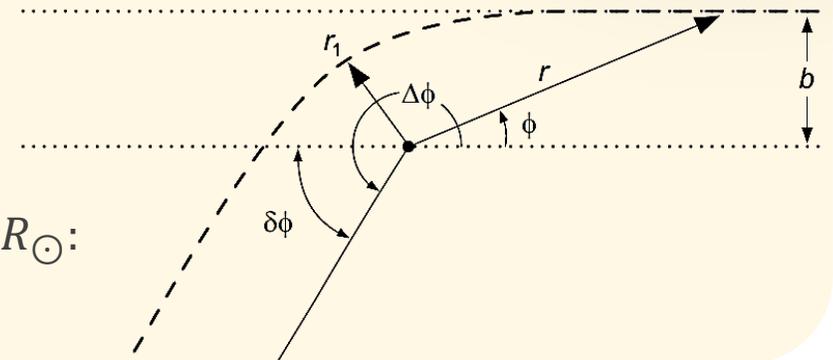
Il telescopio Hubble ha misurato per Sirius B  $\sqrt{z} \approx 56 \text{ km/s}/c$   
Per il Sole  $\sqrt{z} \approx 450 \text{ m/s}/c$



Deflessione della luce in un campo gravitazionale (Eddington 1919)

$$\delta\phi \approx \frac{4GM}{c^2 b}$$

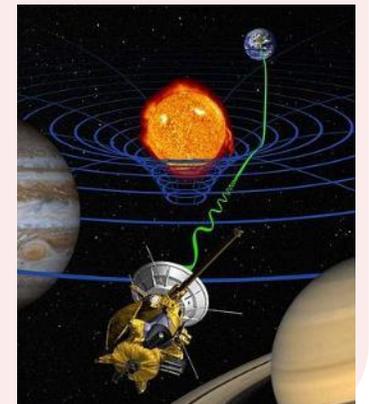
$$M = M_{\odot}, b = R_{\odot}: \\ \delta\phi \approx 1.75''$$



Ritardo di Shapiro (Shapiro 1964)

La luce che viaggia vicino a corpi massivi ritarda rispetto alla propagazione in spazio vuoto (piatto):

$$\frac{dt}{dr} = \frac{1}{b} \left(1 - \frac{2M}{r}\right)^{-1} \left(\frac{1}{b^2} - V(r)\right)^{-1/2}$$



# Letture in Classe

- Scuola superiore

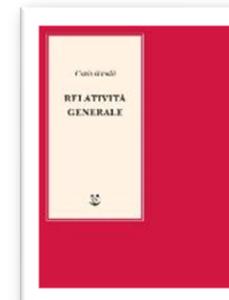
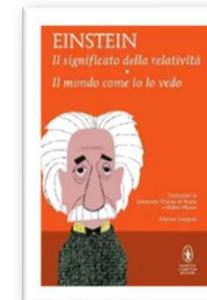
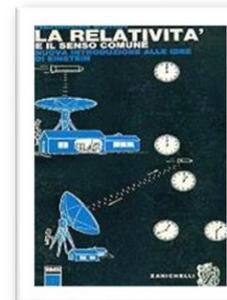


<b>CAPITOLO 9 LA RELATIVITÀ RISTRETTA</b>	236
1 I principi della relatività ristretta	237
L'esperimento di Michelson e Morley	238
Una soluzione «di principio»	239
2 Nuovi concetti di tempo e spazio	241
Un risultato costante	242
Il tempo, coordinata spaziale	242
La simultaneità	243
Orologi sincronizzati	244
3 Gli intervalli di tempo si dilatano	244
Diminuzione della dilatazione della durata	247
4 Le lunghezze si accorciano	248
Dimostrazione della contrazione della lunghezza	249
La composizione delle velocità	250
5 Lo spaziotempo	252
I casi di luce	253
Le distanze nello spaziotempo	253
6 Massa ed energia	254
L'equivalenza massa-energia	256
Alcune considerazioni	257
Filosofia	258
La teoria nella scienza secondo Karl Popper	258
Matematica	259
La quarta dimensione	259
A Christmas carol	260
Mappa dei concetti	262
Esercizi	264
<b>CAPITOLO 12 L'UNIVERSO</b>	331
1 Le stelle	332
Classificazione delle stelle	332
La distanza delle stelle	334
Sistemi stellari e sistemi planetari	336
2 Nascita, vita e morte delle stelle	337
Nascita di una stella	337
Stelle in equilibrio	338
3 I diversi destini delle stelle	339
Stelle di piccola massa	339
Il diagramma di Hertzsprung-Russell	340
Stelle di grande massa	341
Stelle di neutroni e buchi neri	341
4 Le galassie	343
La sequenza di Hubble	345
Ammassi e superammassi	345
5 Cenni di relatività generale	346
Le masse incurvano lo spaziotempo	347
La lente gravitazionale	348
Le onde gravitazionali	349
6 Cenni di cosmologia	350
Il Big Bang	350
La radiazione cosmica di fondo	351
Problemi aperti	352
L'oscurità del cielo notturno	354
I sistemi planetari	355
Comete	356
Mappa dei concetti	358
Esercizi	360



- Approfondimenti

- Hermann Bondi, *La Relatività ed il Senso Comune*, Zanichelli
- Albert Einstein, *Il Significato della Relatività*, Newton & Compton
- Carlo Rovelli, *un po' tutto...*



# Onde Gravitazionali e Onde Elettromagnetiche (I)

- La **teoria di Maxwell** delle interazioni elettromagnetiche ammette l'esistenza di soluzioni sotto forma di onde:

$$\left(\nabla^2 - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2}\right) A^\mu := \square A^\mu = \mu_0 J^\mu \quad \begin{pmatrix} E = -\nabla\phi - \frac{\partial A}{\partial t} \\ B = \nabla \times A \end{pmatrix}$$

con sorgente la quadricorrente:  $J^\mu = (c\rho, \mathbf{j})$ .

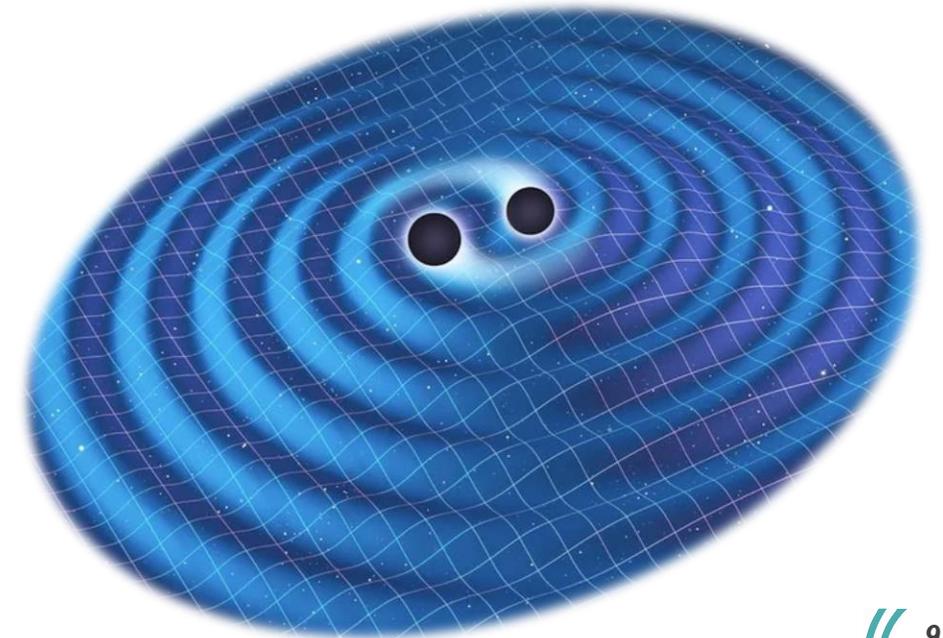
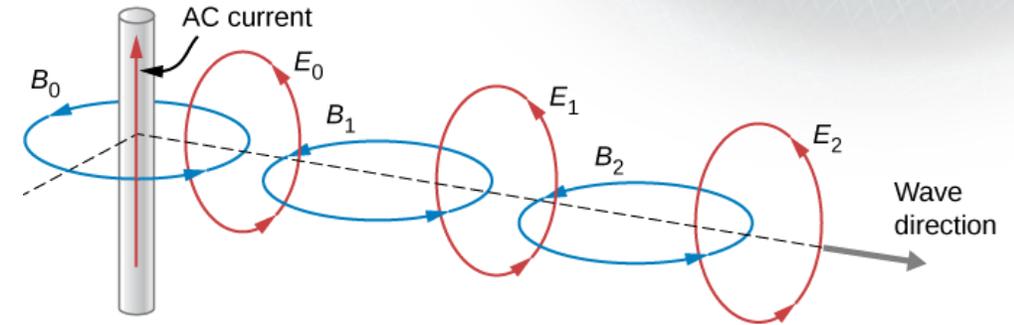
- Similmente, la **teoria di Einstein** predice *fluttuazioni* nella metrica dello spaziotempo che si possono propagare sotto forma di onde gravitazionali.
  - Metrica linearizzata ( $h_{\mu\nu}$  **perturbazione** "piccola"):
 
$$g_{\mu\nu}(x) \approx \eta_{\mu\nu} + h_{\mu\nu}(x)$$
  - Equazione di Einstein linearizzata:

$$\square h_{\mu\nu} = -16\pi G T_{\mu\nu}$$

Onda gravitazionale



Tensore energia-impulso



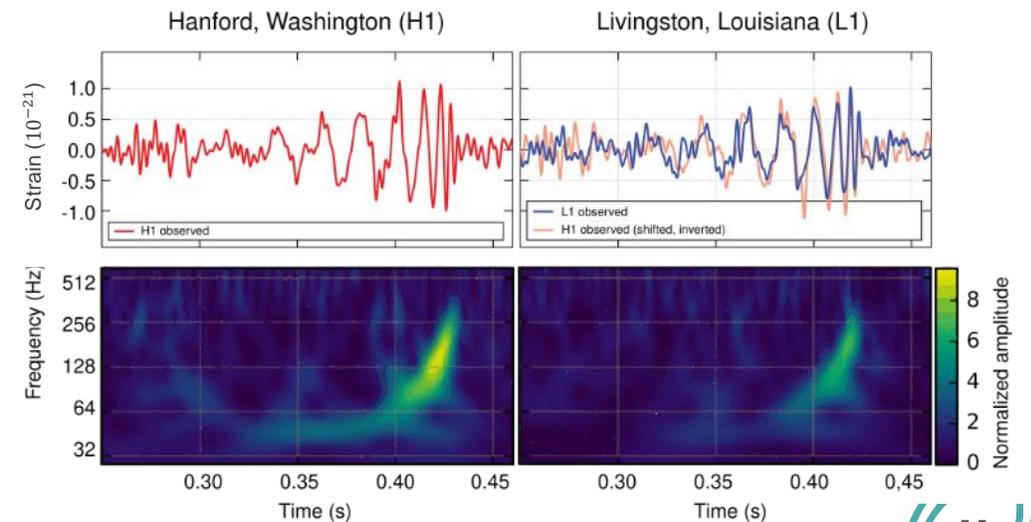
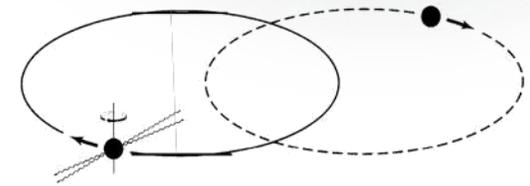
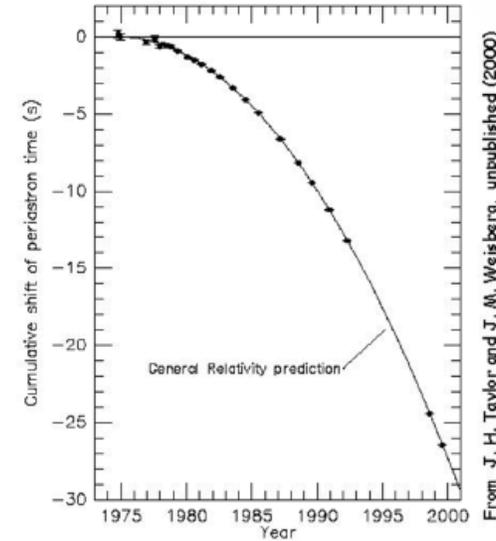
# Onde Gravitazionali e Onde Elettromagnetiche (II)

- **Interazione:** le GW interagiscono molto debolmente e non sono significativamente assorbite o deflesse dalla materia
  - **Lunghezze d' onda:** è paragonabile alle dimensioni della sorgente (e quindi non possono essere usate per creare immagini). Il segnale è generato dal *movimento coerente* della sorgente: la forma d'onda è ben modellabile e può essere usata per risalire alla distanza della sorgente.
- => Rivelare le onde gravitazionali è come udire il suono della sorgente mentre quelle EM è come vederne l'immagine.
- **Dispersione:** l'osservabile è lo strain (ampiezza) e scala come  $1/r$
  - **Rivelatori:** hanno un ampio campo di vista. Non possiamo rivelare onde gravitazionali localmente (principio di equivalenza). Ci servono due o più masse di prova.

- **Interazione:** le onde EM interagiscono fortemente con la materia: sono più facili da rivelare ma anche da alterare
- **Lunghezze d' onda:** i fotoni sono emessi localmente dalle cariche in movimento che nel complesso formano la sorgente. Possono essere usate per creare immagini. La produzione di ogni fotone avviene in modo incoerente
- **Dispersione:** l'osservabile è la potenza (e non l'ampiezza, data l'emissione incoerente) e scala come  $1/r^2$
- **Rivelatori:** i telescopi elettromagnetici possono avere un campo molto stretto.

# La Nascita dell'Astronomia Gravitazionale

- Fino al 2015 l'esistenza delle onde gravitazionali poteva essere dedotta solo indirettamente:
  - PSR B1913+16, pulsar in un sistema binario che perde energia per radiazione gravitazionale (Hulse e Taylor, premio Nobel 1993)
- **GW150914 (LIGO-Virgo collaboration)**  
Premio Nobel 2017 a Weiss, Thorne e Barish
  - Prime evidenza diretta delle onde gravitazionali
  - Conferma delle predizioni della Relatività Generale in regime di gravità forte e alte velocità
  - Conferma delle predizioni della Relatività Generale sulla propagazione delle onde, velocità e polarizzazioni
  - Esistenza di una popolazione di buchi neri di masse  $\sim 10 M_{\odot}$ , che può fondersi entro la vita dell'universo.



# Esplorare l'Universo con le Onde Gravitazionali

Molti fenomeni cosmici emettono energia sotto forma di radiazione gravitazionale ma poca energia elettromagnetica.

GW150914:

- **200  $M_{\odot}$  per secondo** sono state convertite in energia gravitazionale (nessuna controporta elettromagnetica evidente)

Le onde gravitazionali possono fornire un utile alternativa (e in molti casi l'unica possibilità) per lo studio del cosmo.

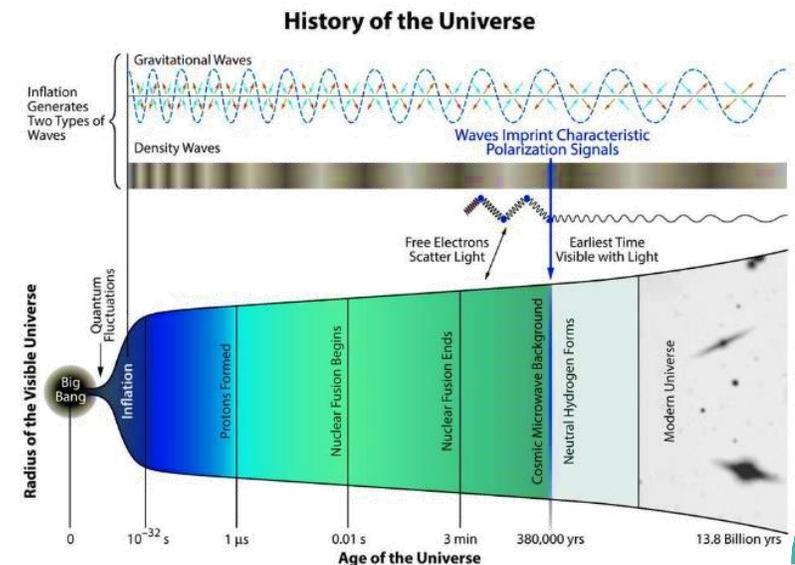
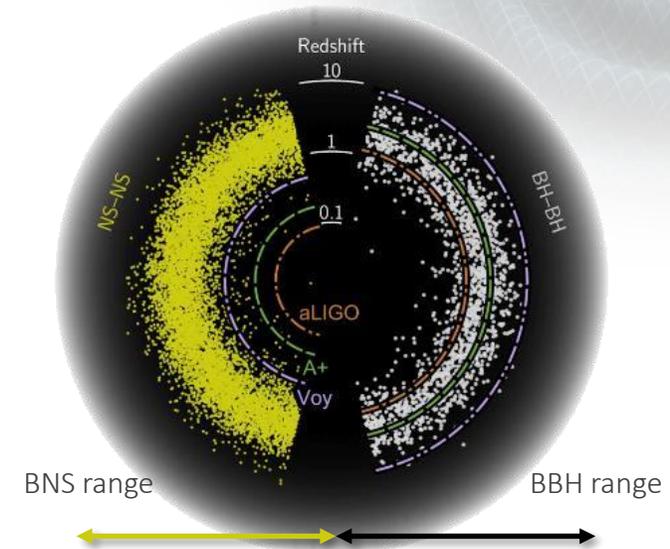
Il fatto che siano debolmente interagenti le rende difficili da rivelare ma ha anche dei vantaggi:

- Possono essere viste da epoche più remote. In base all'intensità dell'interazione, diversi tipi di segnali si sono **disaccoppiati** in epoche differenti:

**Fotoni:**  $\sim 10^5$  anni dopo il Big Bang

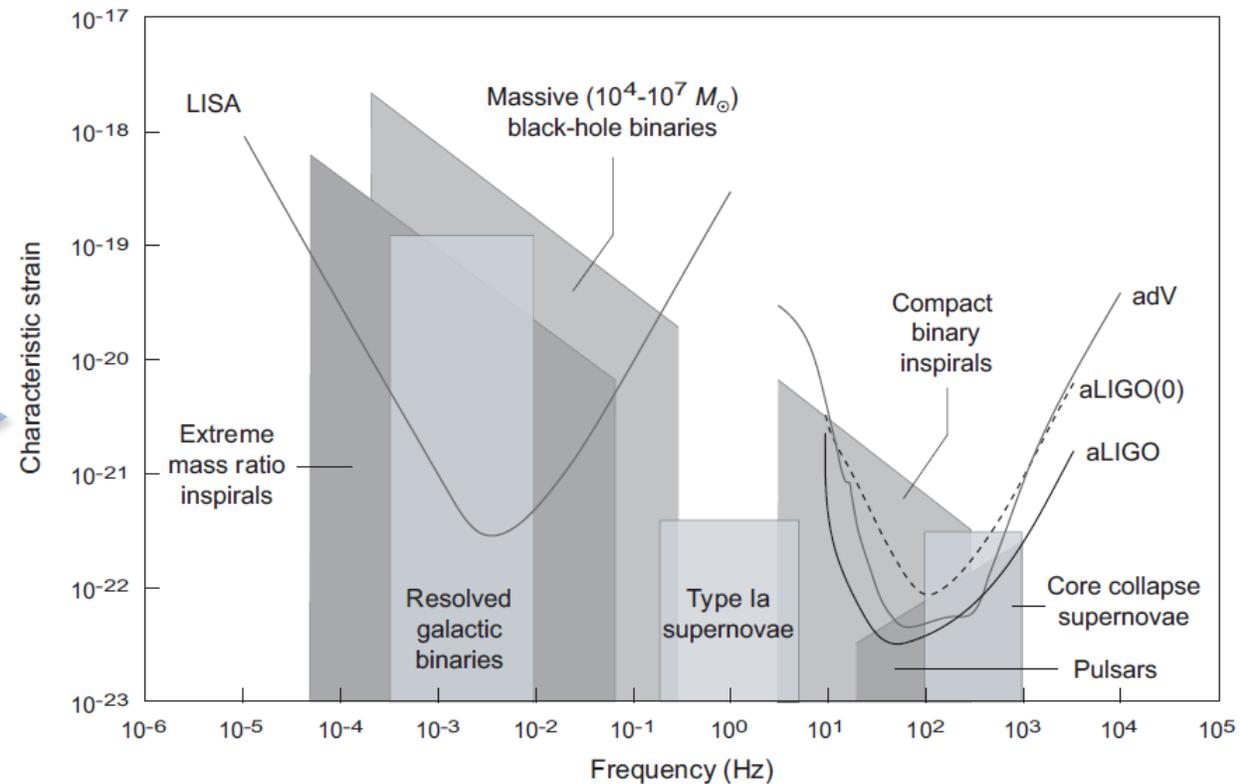
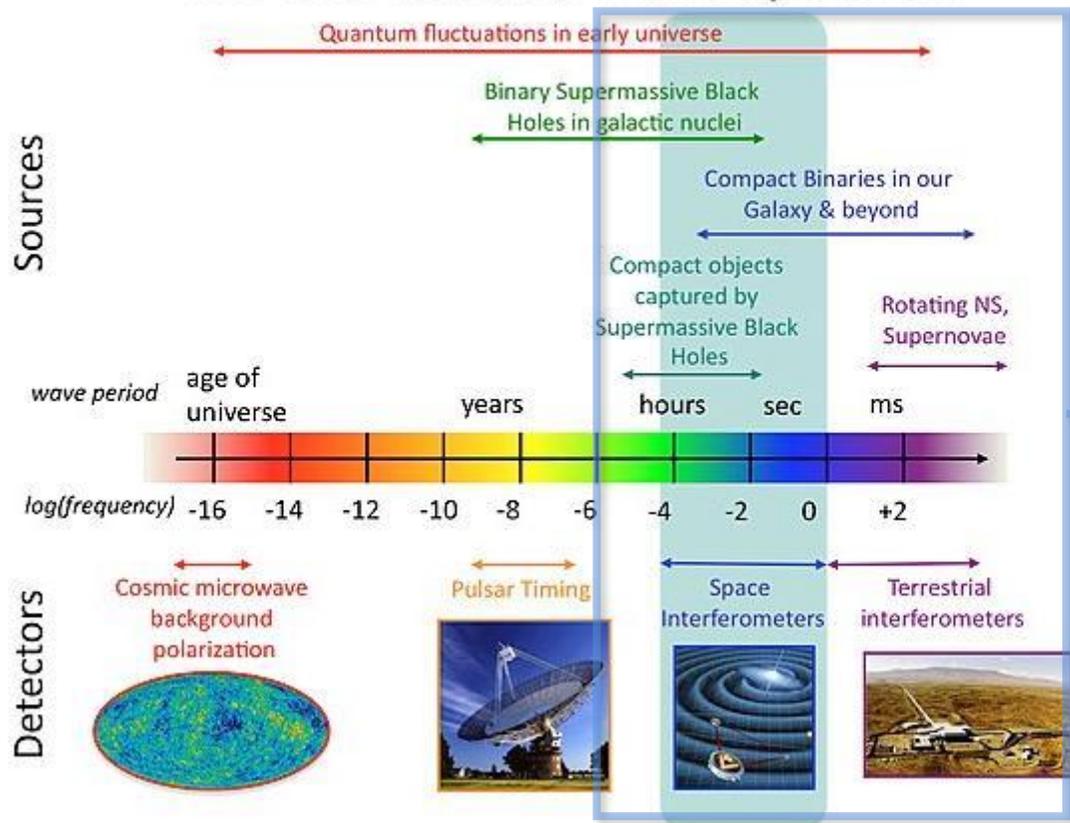
**Neutrini:** 1 secondo dopo il Big Bang

**Onde gravitazionali:** tempi della *scala di Planck* ( $10^{-43}$  sec).

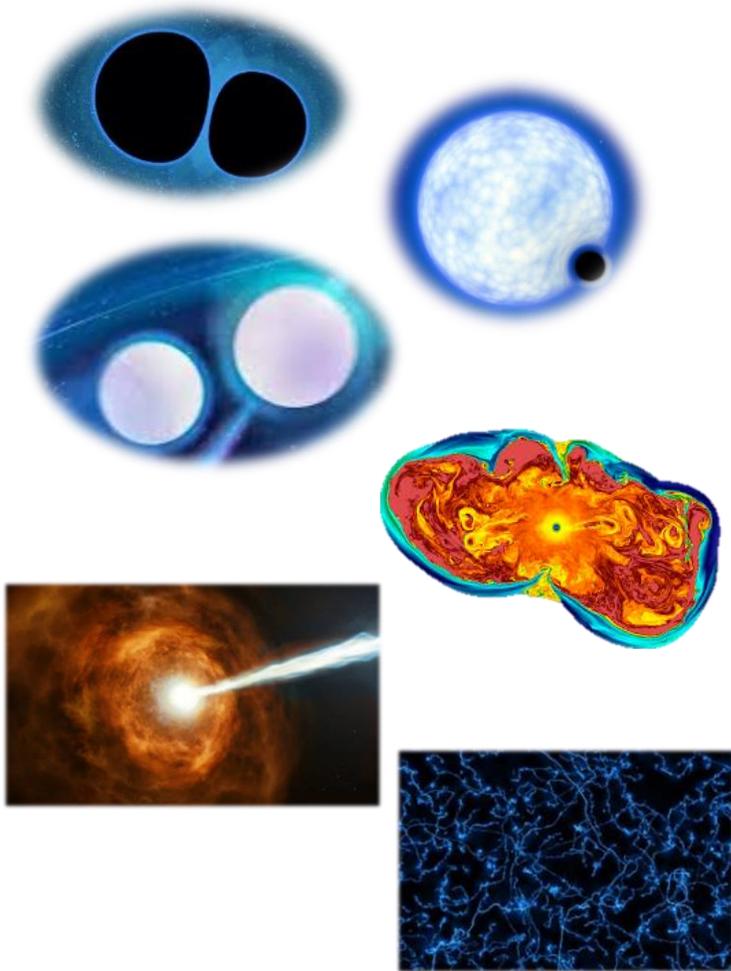


# Sorgenti di Onde Gravitazionali

## The Gravitational Wave Spectrum



# Sorgenti di Onde Gravitazionali Transienti



## Coalescenze di stelle compatte

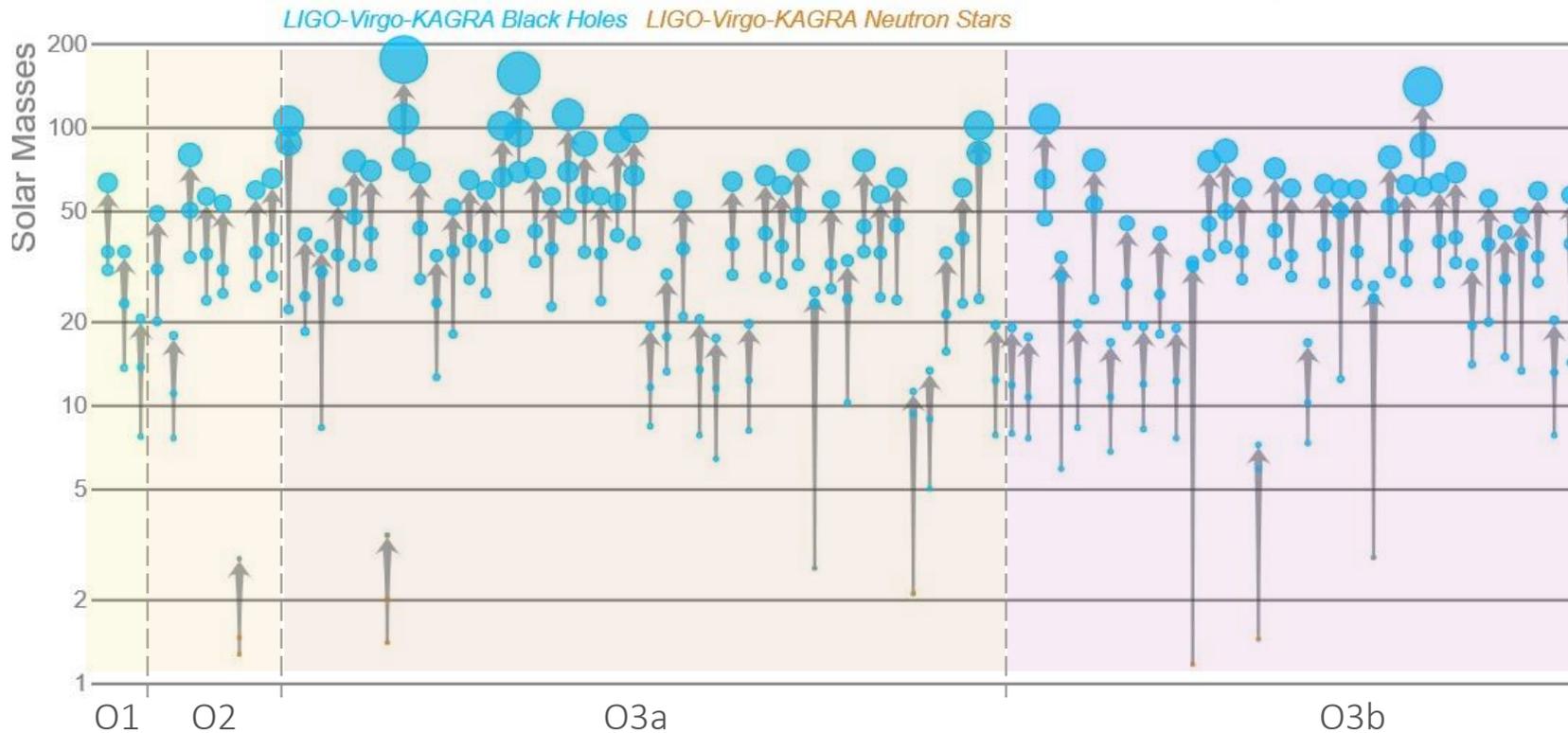
- Sistemi binari composti da buchi neri (BH) e stelle di neutroni (NS): BBH, NSBH, BNS. [GWTC-3](#)
- Oggetti compatti Sub-Solar Mass (SSM), [MNRAS 524, 5984 \(2023\)](#)

## Sorgenti di segnali “burst” non modellati o debolmente modellati

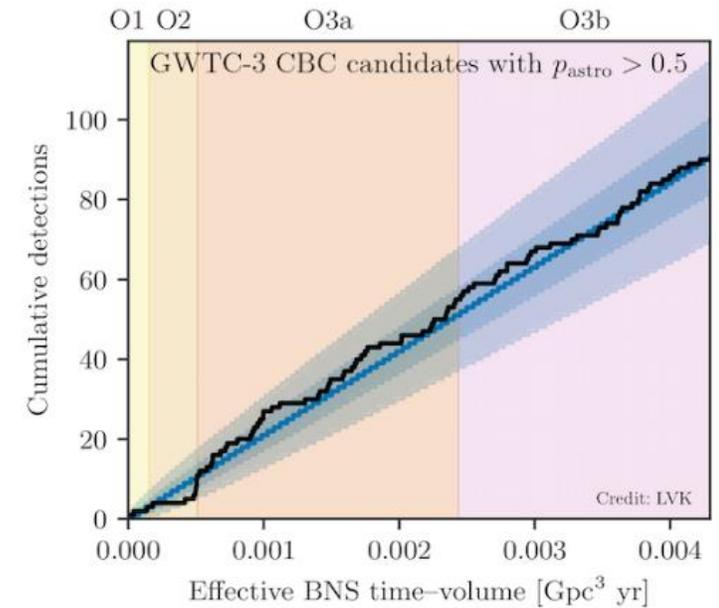
- Core-collapse supernovae (CCSNe)
- Magnetar bursts
- Sorgenti associate a fast radio bursts o gamma-ray bursts
- Cosmic strings cusps and kinks
- ...

# Osservazioni di Stelle Compatte

## Masse nel "cimitero stellare"



Credit: [Visualization: LIGO-Virgo-KAGRA / Aaron Geller / Northwestern](#)



[arXiv:2111.03606](https://arxiv.org/abs/2111.03606)

# Risposta di Masse di Test alle Onde Gravitazionali

Per il Principio di Equivalenza, non possiamo rivelare le onde localmente. Avremo bisogno di due o più masse, in luoghi diversi.

- Assumiamo un'onda (polarizzazione +) che si muove in direzione  $z$ :

$$h_{\mu\nu}(t, z) = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} h(t - z/c)$$

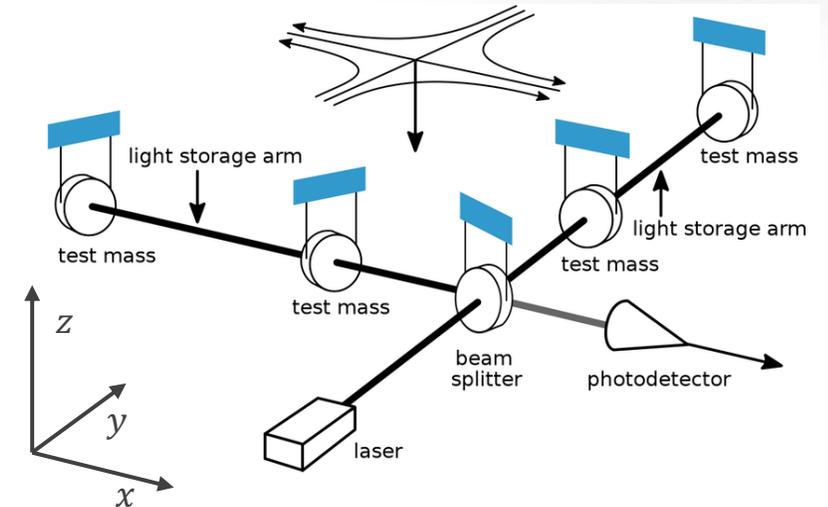
ed il corrispondente intervallo spaziotempo:

$$ds^2 = -c^2 dt^2 + (1 + h(t - z/c)) dx^2 + (1 - h(t - z/c)) dy^2 + dz^2$$

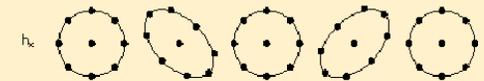
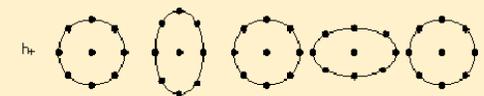
- Se le masse sono ferme, una nell'origine e l'altra a coordinata  $L_0$  lungo  $x$ , la loro distanza propria:

$$L(t) = \int_0^{L_0} \sqrt{1 + h(t)} dx \approx \int_0^{L_0} \left(1 + \frac{1}{2}h(t)\right) dx = \left(1 + \frac{1}{2}h(t)\right)L_0$$

$$\frac{\delta L(t)}{L_0} \approx \frac{1}{2}h(t)$$



Come le onde elettromagnetiche, le onde gravitazionali hanno **due polarizzazioni trasversali**: + e  $\times$ .



Phase 0  $\pi/2$   $\pi$   $3\pi/2$   $2\pi$  (( 16 ))

# Strain e Rivelatori di Onde Gravitazionali

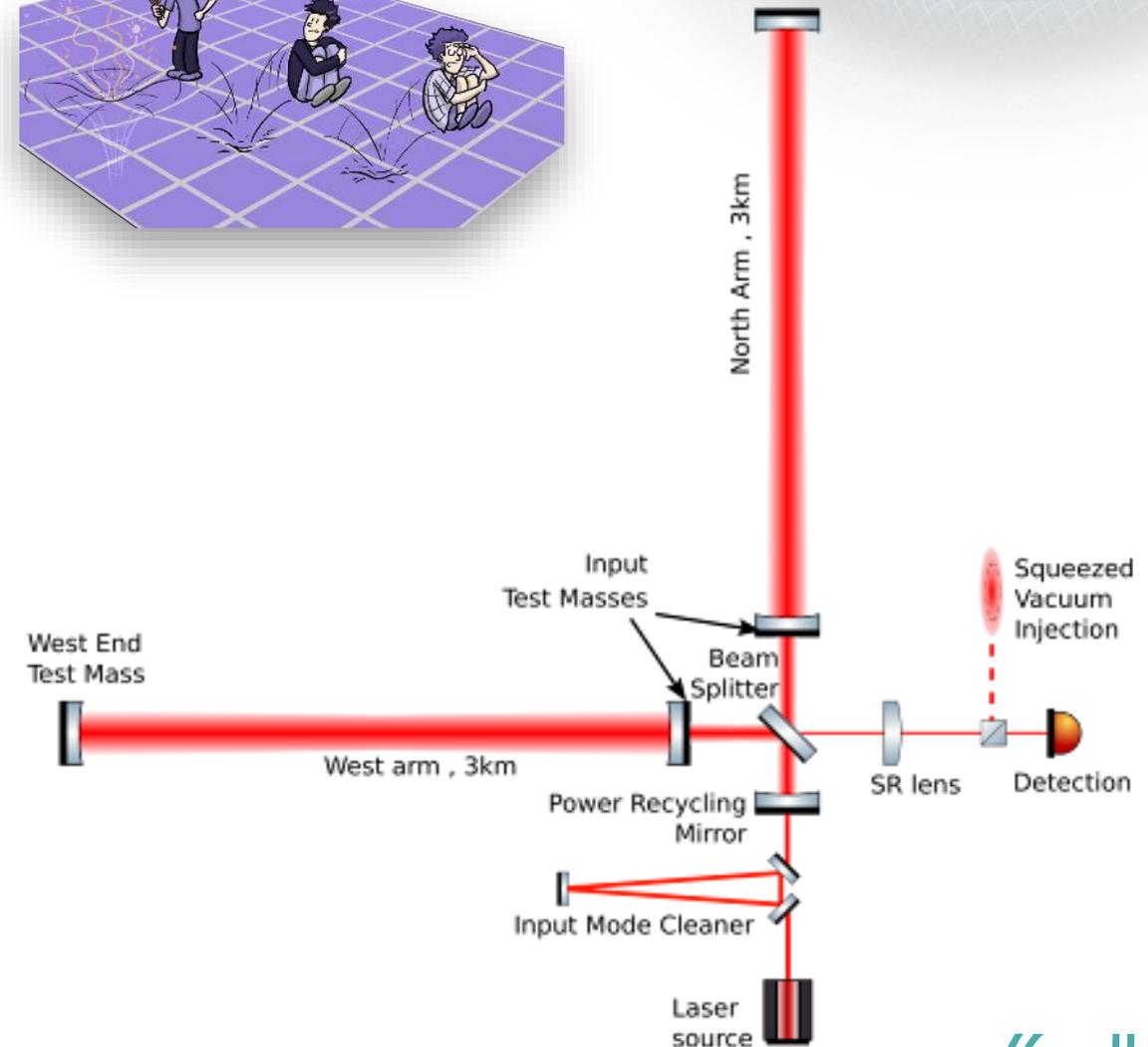
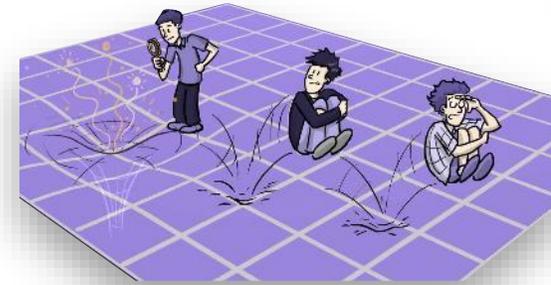
Se lo spaziotempo è pensato come un *mezzo elastico*:

- La quantità adimensionale  $\delta L/L_0$  prende il nome di **strain** (*frazionario*) associato alla deformazione prodotta dall'onda
- Lo strain gravitazionale atteso da tipiche sorgenti astrofisiche è  $\sim 10^{-21}$ . Questo vuol dire che "lo spaziotempo è un **mezzo molto rigido**": grandissimi energie sono richieste per produrre deformazioni apprezzabili.

Gli **interferometri** sono gli strumenti ideali per misurare questo tipo di deformazioni:

- Specchi sospesi fanno da masse di test
- Misurano la differenza di fase tra fasci laser che percorrono due bracci ortogonali.

Molti fenomeni non astrofisici possono produrre un effetto simile ad uno strain: *rumore*...



# Produzione di Onde Gravitazionali da Sorgenti Deboli

Consideriamo perturbazioni alla metrica nel seguente scenario:

- Onde emesse da una sorgente isolata, non relativistica (lenta)
- Grandi lunghezze d'onda
- Lontano dalla sorgente

Risolvendo l'equazione d'onda otteniamo la **formula di quadrupolo**:

$$h_{ij}(t, \mathbf{x}) \approx \frac{2G}{r} \frac{d^2}{dt^2} I_{ij}(t - r)$$

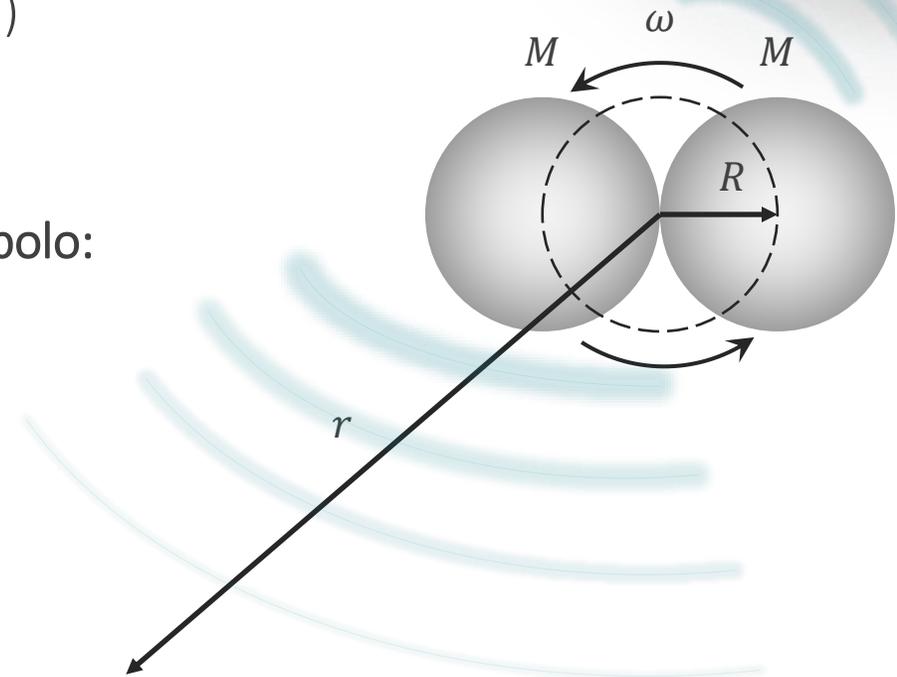
con  $I_{ij}$  il momento di quadrupolo:

$$I_{ij}(t - r) := \int \rho(t, \mathbf{x}) x_i x_j d^3x$$

**Esempio:** sistema binario molto semplificato

$$I_{ij} \sim MR^2 + MR^2 = 2MR^2$$

$$h_{ij} \approx \frac{4GMR^2}{r} \omega^2 = \frac{GMv^2}{\pi^2 r} \sim \frac{R_S v^2}{r c^2} \sim \epsilon^{2/7} \frac{R_S}{r} \approx 9.6 \times 10^{-20} \epsilon^{2/7} \left( \frac{M}{M_\odot} \right) \left( \frac{\text{Mpc}}{r} \right)$$



Raggio di Schwarzschild

Efficienza di produzione

# Coalescenze di Stelle Compatte

All'ordine dominante nello sviluppo in  $v/c$ , la forma d'onda del segnale prodotto è caratterizzata da una particolare combinazione delle masse detta **massa di chirp**:

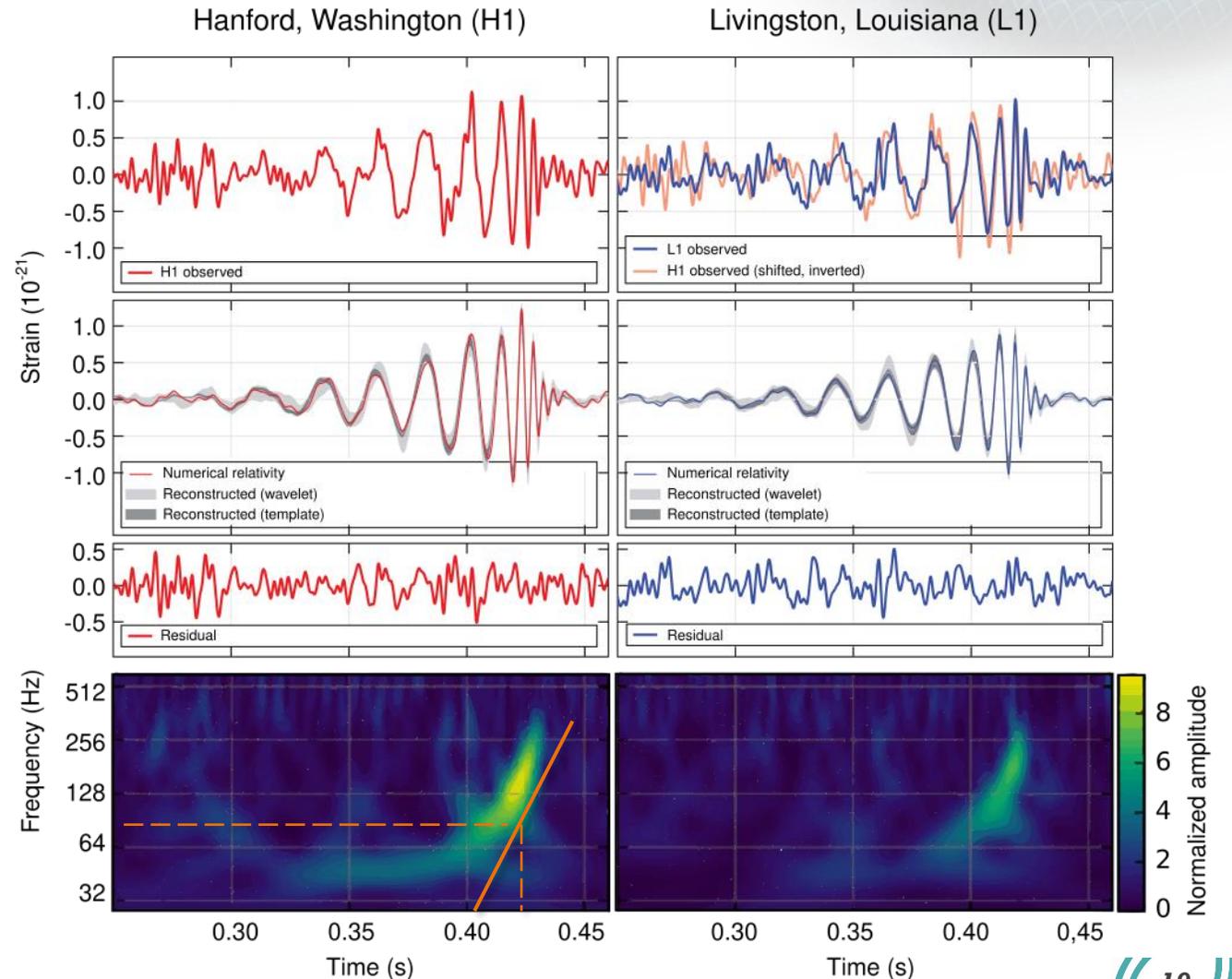
$$\mathcal{M} = \mu^{3/5} M^{2/5} = \frac{(m_1 m_2)^{3/5}}{(m_1 + m_2)^{1/5}}$$

$$= \frac{c^3}{G} \left( \frac{5}{96} \pi^{-8/3} f^{-11/3} \dot{f} \right)^{3/5}$$

$\mu = m_1 m_2 / (m_1 + m_2)$  è detta massa ridotta

$M = m_1 + m_2$  è la massa totale del Sistema

$f$  è la frequenza osservata e  $\dot{f}$  la sua derivata temporale.



# Video Didattici



## LIGO Virgo KAGRA

@LIGOVirgo · 3790 iscritti · 31 video

Welcome to the LIGO-Virgo-KAGRA YouTube Channel! ...altro  
[youtu.be/Il8fXnqfDHo](https://youtu.be/Il8fXnqfDHo) e 1 altro link

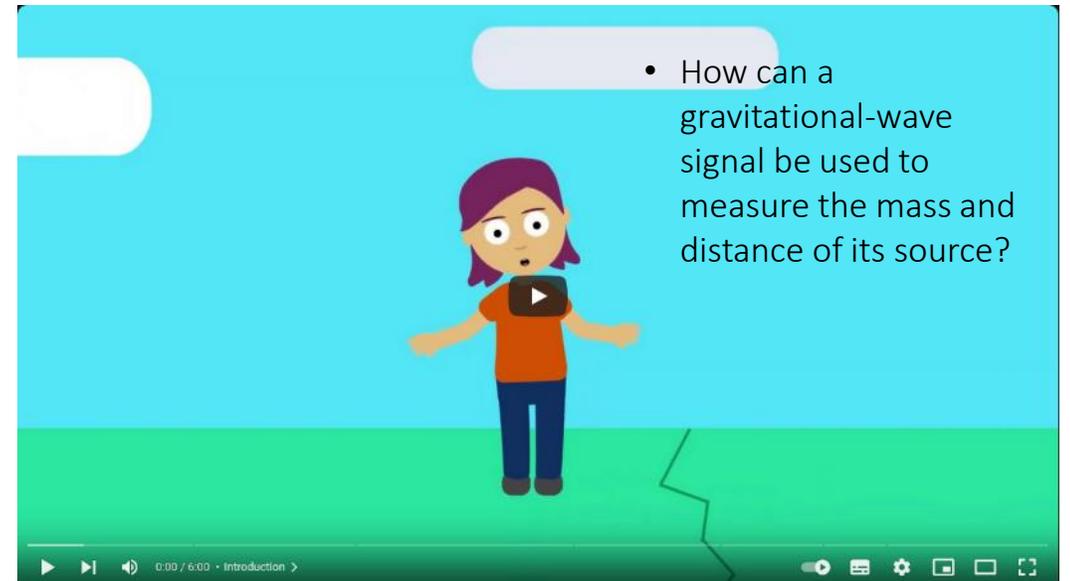
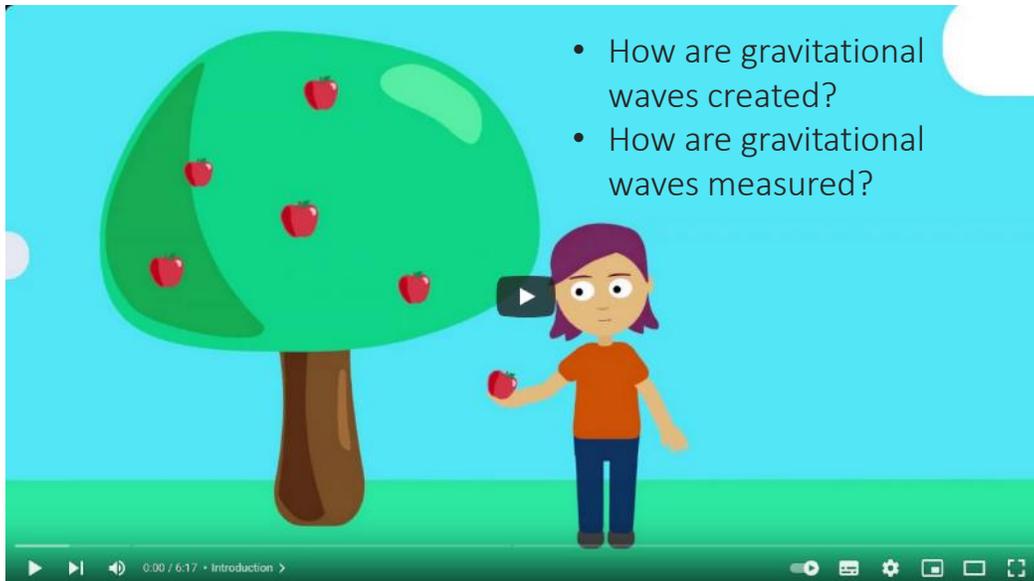
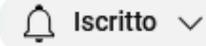


## EGO & the Virgo Collaboration

@EGOtheVirgoCollaboration · 655 iscritti · 93 video

Scopri di più su questo canale ...altro

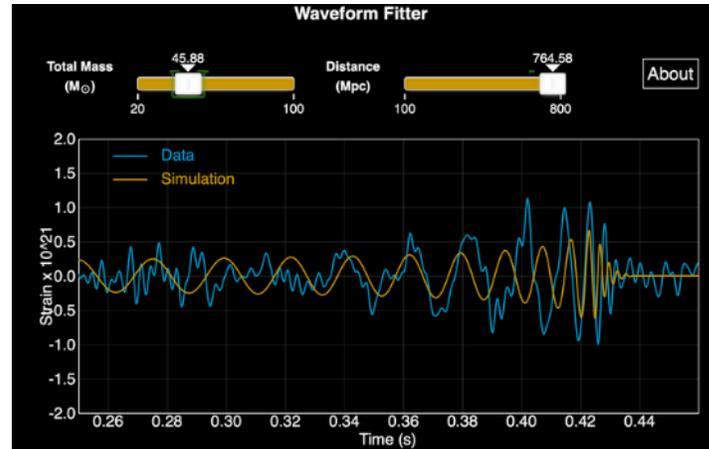
[facebook.com/EGOVirgoCollaboration](https://facebook.com/EGOVirgoCollaboration) e 3 altri link



# Laboratorio di Elaborazione dei Segnali

- Trova la forma d'onda più simile (matched filter):

[Gwfilter link](#), [video dimostrativo](#)



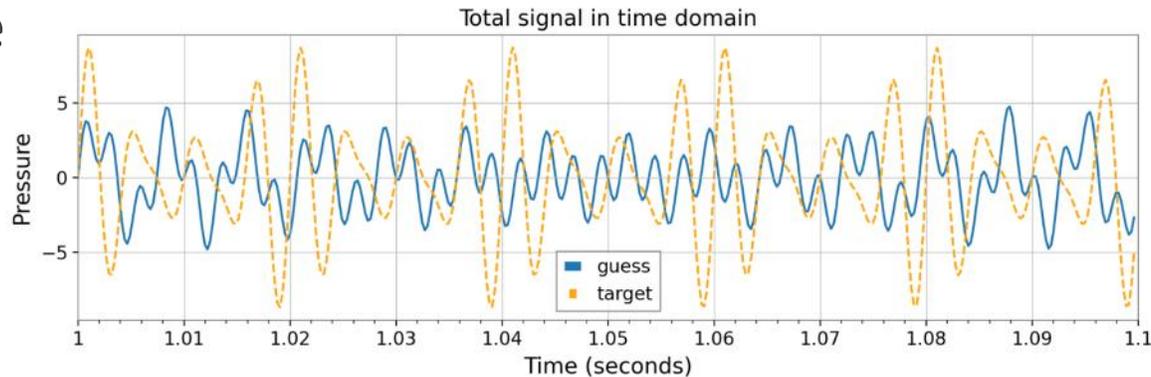
**Black Hole Hunter**  
Gioco online per trovare segnali di buchi neri  
<https://blackholehunter.org/game.html>



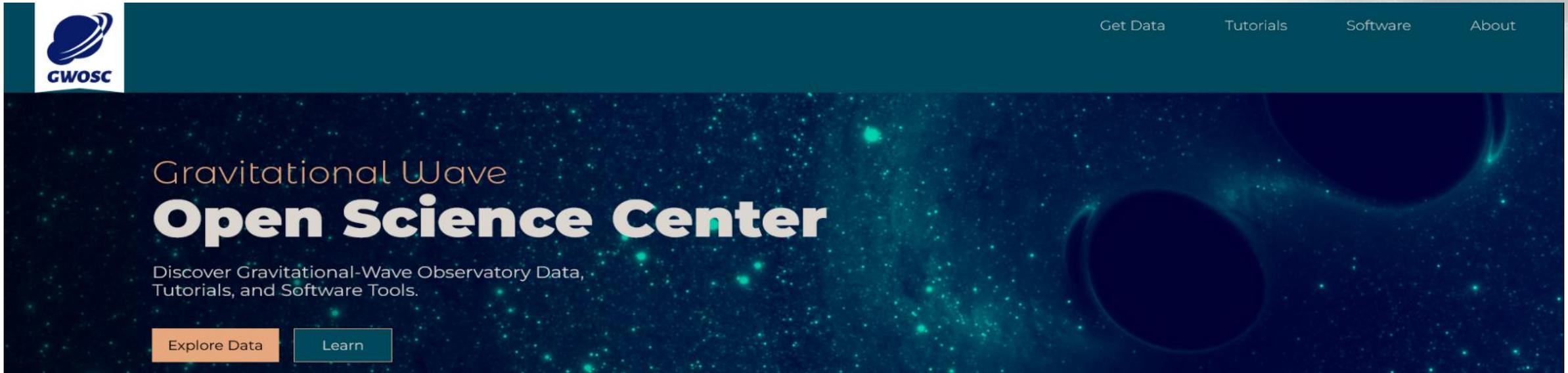
- Esplora il **dominio delle frequenze** ed il filtraggio dei segnali:

Trova il suono nascosto nei dati rumorosi: [link](#)

- Approfondimento su suoni, frequenze e rappresentazione dei segnali: [link](#)



# Esplora il Portale dei Dati Pubblici



GWOSC

Get Data Tutorials Software About

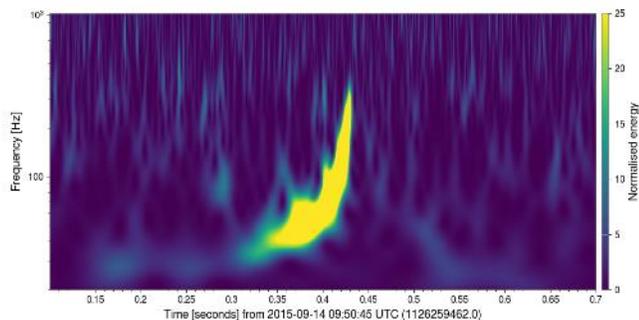
## Gravitational Wave Open Science Center

Discover Gravitational-Wave Observatory Data,  
Tutorials, and Software Tools.

Explore Data Learn

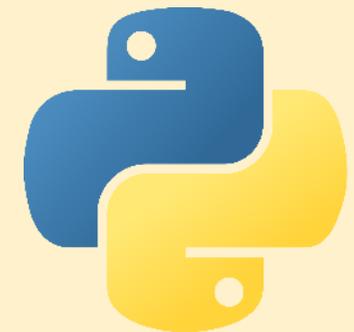
Esplora gli eventi  
gravitazionali rivelati  
da LIGO e Virgo

Naviga attraverso il  
[portale degli eventi](#)



Utilizza GW quickview

App: [link](#)  
Notebook (su mybinder):  
[Google Colab](#), [mybinder](#),  
[scarica da github](#)



# La Guida alla Rivelazione di Onde e al Rumore

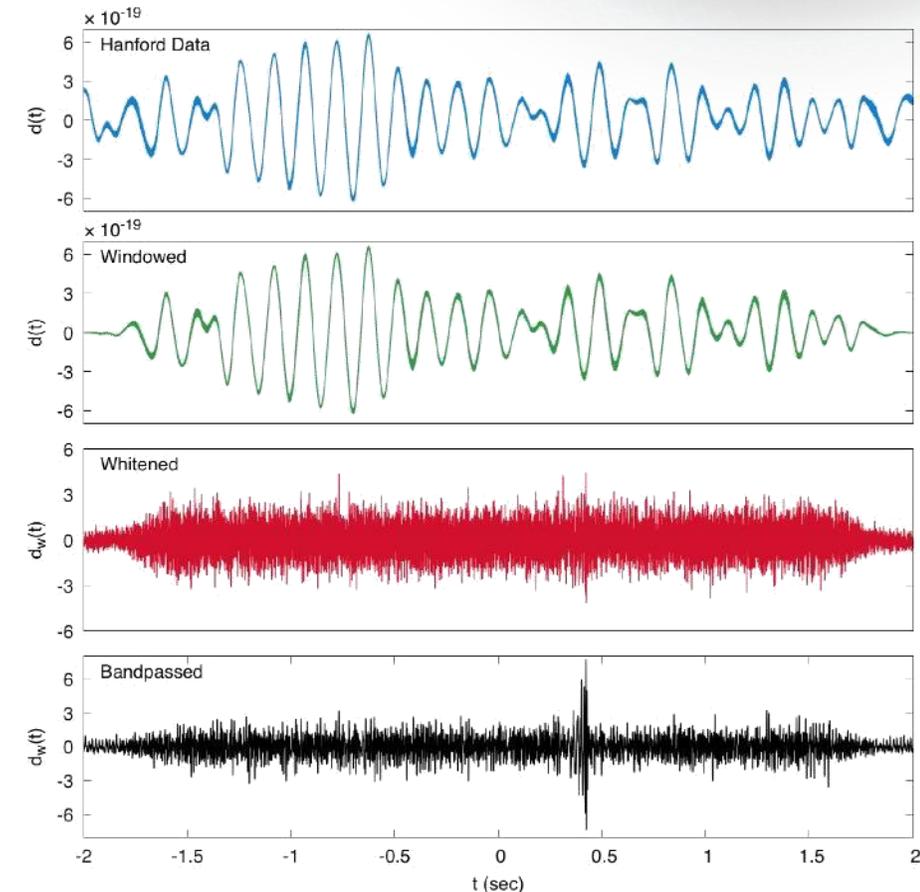
Gli algoritmi utilizzati per realizzare l'articolo: "[A guide to LIGO-Virgo detector noise and extraction of transient gravitational wave signals](#)"

- Codice usato per produrre l'articolo: [github](#)
- Jupyter notebook per illustrare come le figure più importanti sono state realizzate: [github](#) , [Google Colab](#), [mybinder](#)

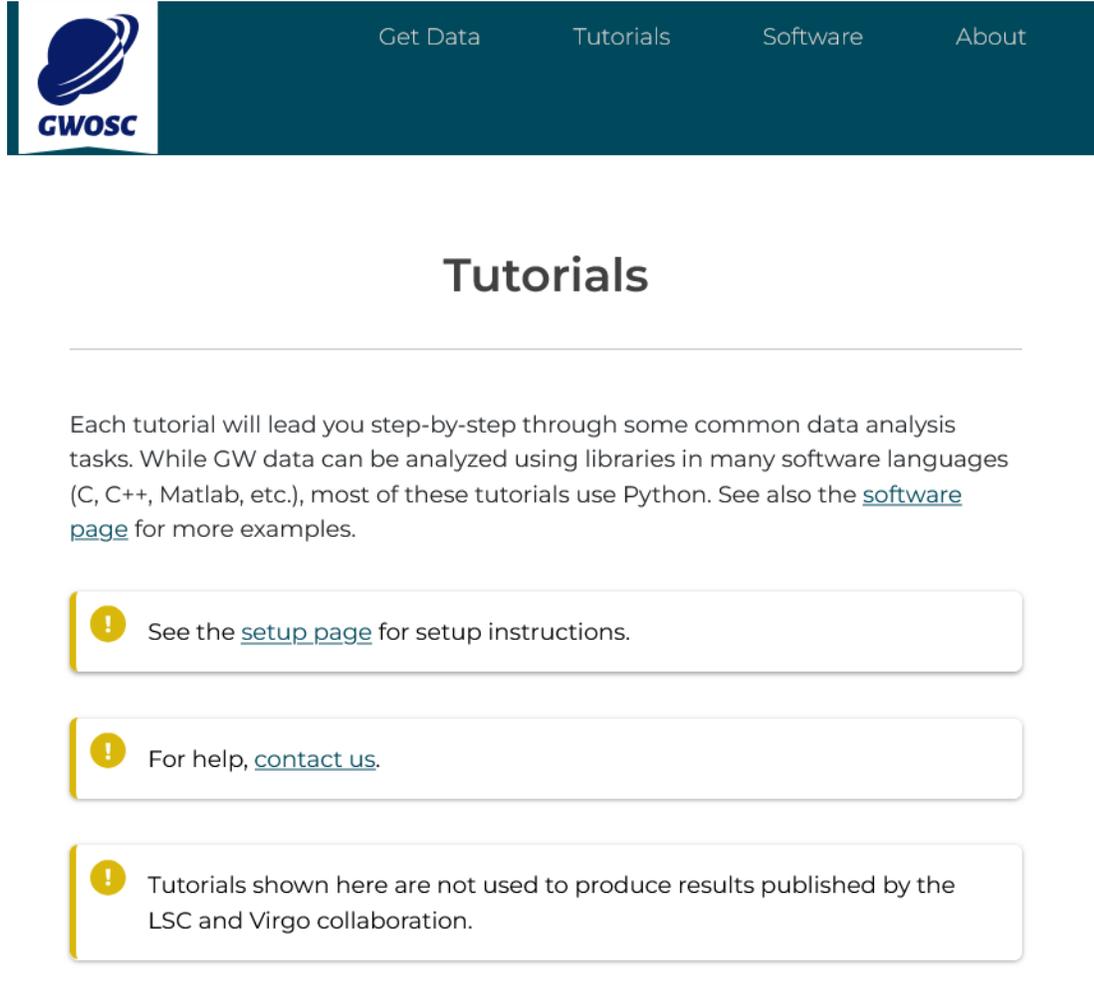


Starting repository: [gwosc-tutorial/Data\\_Guide/master](#)

New to Binder? Check out the [Binder Documentation](#) for more information



# Ulteriori Tutorial e Workshop



The screenshot shows the top navigation bar of the GWOSC website with the logo on the left and links for 'Get Data', 'Tutorials', 'Software', and 'About'. The main heading is 'Tutorials'. Below it, a paragraph explains that tutorials cover common data analysis tasks, often using Python. Three yellow callout boxes provide additional instructions: the first points to a 'setup page', the second suggests contacting support, and the third notes that the tutorials are not for LSC and Virgo collaboration results.

GWOSC

Get Data Tutorials Software About

## Tutorials

Each tutorial will lead you step-by-step through some common data analysis tasks. While GW data can be analyzed using libraries in many software languages (C, C++, Matlab, etc.), most of these tutorials use Python. See also the [software page](#) for more examples.

- See the [setup page](#) for setup instructions.
- For help, [contact us](#).
- Tutorials shown here are not used to produce results published by the LSC and Virgo collaboration.



The screenshot shows the top navigation bar of the GWOSC website with the logo on the left and links for 'Get Data', 'Tutorials', 'Software', and 'About'. The main heading is 'GW Open Data Workshops'. Two workshop entries are listed: 'Gravitational Wave Open Data Workshop #7 (2024)' held from April 18-20, 2024, and 'Gravitational Wave Open Data Workshop #6 (2023)' held from May 15-17, 2023. Each entry includes a small icon and a 'Workshop' button.

GWOSC

Get Data Tutorials Software About

## GW Open Data Workshops

Gravitational Wave Open Data Workshop #7 (2024)

April 18-20, 2024

Workshop

Gravitational Wave Open Data Workshop #6 (2023)

May 15-17, 2023

Workshop

# Rimanere Aggiornati Sullo Stato degli Osservatori

GWOSC Calendar Today Yesterday O4 summary Previous Observing Runs

## Gravitational-Wave Observatory Status

Please select a date from the calendar above to see archived or current status.

Information is available for dates after November 30, 2016. The Advanced LIGO and Virgo detectors have begun the second half of the fourth observing run, known as O4b, as of April 10, 2024. The entry of the KAGRA detector into O4b has been postponed in order to continue detector commissioning activities and further increase the sensitivity of the detector. All detectors are planned to rejoin O4 by the end of the run. Summaries of the [current observing run](#) and previous observing runs are available in the menu above. For overviews of LIGO, Virgo, and KAGRA observing runs, see the [arXiv:1304.0670](#).

- [Today's Summary Page](#)
- [Current Status \(GWISTAT\)](#)
- [LIGO/Virgo Alerts \(GraceDB\)](#)
- [Hanford alog](#) – [Livingston alog](#) – [Virgo logbook](#) – [KAGRA klog](#)
- [LIGO Laboratory](#) – [Virgo](#) – [KAGRA Observatory](#) – [GEO600](#)



LIGO Hanford



LIGO Livingston



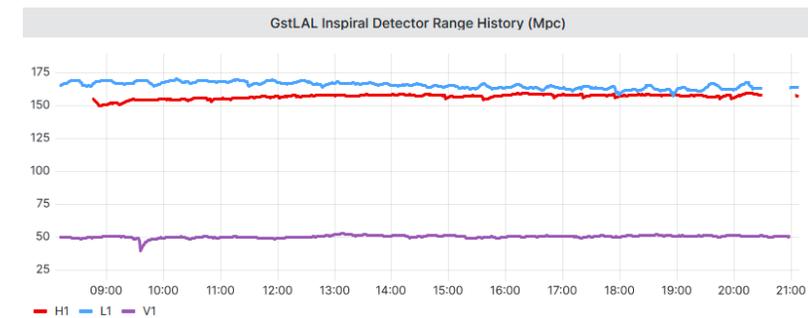
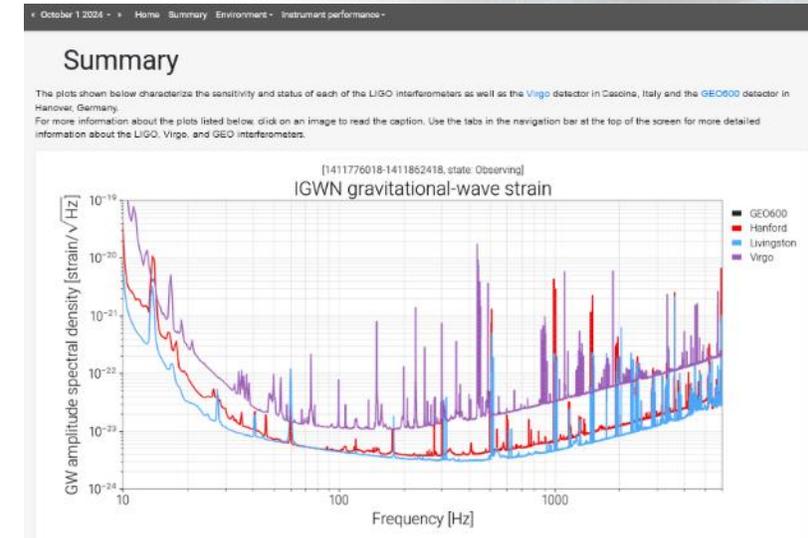
Virgo



KAGRA



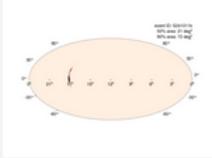
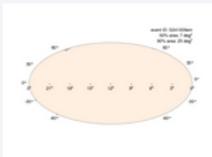
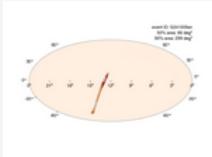
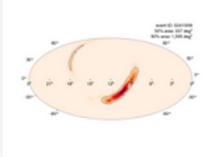
GEO600



# II Gravitational-Wave Candidate Event Database

GraceDB Public Alerts ▾ Latest Search Notifications Pipelines Documentation Logout

Authenticated as: Francesco DiRenzo  
 SORT: EVENT ID (A-Z)

Event ID	Possible Source (Probability)	Significant	UTC	GCN	Location	FAR	Comments	Ω Scan
<a href="#">S241011k</a>	BBH (>99%)	Yes	Oct. 11, 2024 23:38:34 UTC	<a href="#">GCN Circular</a> <a href="#">Query</a> <a href="#">Notices   VOE</a>		1 per 1.252e+26 years	<a href="#">Ω H1</a> <a href="#">Ω L1</a> <a href="#">Ω V1</a>	
<a href="#">S241009em</a>	BBH (>99%)	Yes	Oct. 9, 2024 22:04:55 UTC	<a href="#">GCN Circular</a> <a href="#">Query</a> <a href="#">Notices   VOE</a>		1 per 11.246 years	<a href="#">Ω H1</a> <a href="#">Ω L1</a> <a href="#">Ω V1</a>	
<a href="#">S241009an</a>	BBH (>99%)	Yes	Oct. 9, 2024 08:48:16 UTC	<a href="#">GCN Circular</a> <a href="#">Query</a> <a href="#">Notices   VOE</a>		1 per 16402 years	<a href="#">Ω H1</a> <a href="#">Ω L1</a> <a href="#">Ω V1</a>	
<a href="#">S241009l</a>	BBH (98%), Terrestrial (2%)	Yes	Oct. 9, 2024 02:28:35 UTC	<a href="#">GCN Circular</a> <a href="#">Query</a> <a href="#">Notices   VOE</a>		1.0446 per year	<a href="#">Ω H1</a> <a href="#">Ω L1</a> <a href="#">Ω V1</a>	

# Leggere le Allerte Pubbliche

- [Presentazione delle allerte pubbliche](#)
- [Guida LVK alle allerte pubbliche](#)

```
////////////////////////////////////
```

```
TITLE:      GCN/LVC NOTICE
NOTICE_DATE: Thu 18 May 23 13:38:21 UT
NOTICE_TYPE: LVC Preliminary
TRIGGER_NUM: S230518h
TRIGGER_DATE: 20082 TJD; 138 DOY; 2023/05/18 (yyyy/mm/dd)
TRIGGER_TIME: 46748.000000 SOD {12:59:08.000000} UT
SEQUENCE_NUM: 1
GROUP_TYPE: 1 = CBC
SEARCH_TYPE: 1 = AllSky
PIPELINE_TYPE: 15 = pycbc
FAR:        3.219e-10 [Hz] (one per 35957.2 days) (one per 98.51 years)
PROB_NS:    1.00 [range is 0.0-1.0]
PROB_REMNANT: 0.00 [range is 0.0-1.0]
PROB_BNS:   0.00 [range is 0.0-1.0]
PROB_NSBH:  0.86 [range is 0.0-1.0]
PROB_BBH:   0.03 [range is 0.0-1.0]
PROB_MassGap: -1 [range is 0.0-1.0] VALUE NOT ASSIGNED!
PROB_TERRES: 0.09 [range is 0.0-1.0]
TRIGGER_ID: 0x10
MISC:       0x189A003
SKYMAP_FITS_URL:
https://gracedb.ligo.org/api/superevents/S230518h/files/bayestar.multiorder.fits
EVENTPAGE_URL: https://gracedb.ligo.org/superevents/S230518h/view/
COMMENTS:   LVC Preliminary Trigger Alert.
COMMENTS:   This event is an OpenAlert.
COMMENTS:   LIGO-Hanford Observatory contributed to this candidate event.
COMMENTS:   LIGO-Livingston Observatory contributed to this candidate event
```

- Trigger time
- Search type
- Source classification
- EM-bright properties
- [More details in the EM-follow guide](#)
- Sky localization

## GCN Circular 33813

**Subject** LIGO/Virgo/KAGRA S230518h: Identification of a GW compact binary merger candidate  
**Date** 2023-05-18T14:06:25Z (5 months ago)  
**From** f.di-renzo@ip2i.in2p3.fr

The LIGO Scientific Collaboration, the Virgo Collaboration, and the KAGRA Collaboration report:

We identified the compact binary merger candidate S230518h during real-time processing of data from LIGO Hanford Observatory (H1) and LIGO Livingston Observatory (L1) at 2023-05-18 12:59:08.167 UTC (GPS time: 1368449966.167). The candidate was found by the PyCBC Live [1], GstLAL [2], and MBTAOnline [5] analysis pipelines.

The LIGO detectors are currently operating in an "engineering run" mode prior to the start of the O4 observing run. The data being collected at the time of this candidate is believed to be of good quality based on preliminary checks, but requires further investigation. A decision was made to alert the community promptly, with this caveat, due to the potential significance of this candidate.

S230518h is an event of interest because its false alarm rate, as estimated by the online analysis, is  $3.2e-10$  Hz, or about one in 98 years. The event's properties can be found at this URL: <https://gracedb.ligo.org/superevents/S230518h>

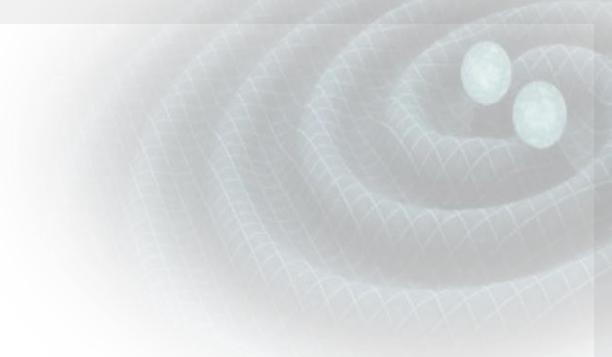
The classification of the GW signal, in order of descending probability, is NSBH (86%), Terrestrial (10%), BBH (4%), or BNS (<1%).

Assuming the candidate is astrophysical in origin, the probability that the lighter compact object is consistent with a neutron star mass (HasNS) is >99%. [3] Using the masses and spins inferred from the signal, the probability of matter outside the final compact object (HasRemnant) is < 1%. Both HasNS and HasRemnant consider the support of several neutron star equations of state. The probability that any one of the binary components lie between 3 to 5 solar mass (HasMassgap) is < 1%.

One sky map is available at this time and can be retrieved from the GraceDB event page:  
\* bayestar.multiorder.fits, an initial localization generated by BAYESTAR [4], distributed via GCN Notice about 39 minutes after the candidate event time.

For the bayestar.multiorder.fits sky map, the 90% credible region is 1002 deg<sup>2</sup>. Marginalized over the whole sky, the a posteriori luminosity distance estimate is 276 +/- 79 Mpc (a posteriori mean +/- standard deviation).

## [GCN Circular 33813](#)



# Discussione e Q&A

*Thanks for the attention!*

