Il Cosmo Svelato

alla Scoperta dello Spaziotempo coi dati di Onde Gravitazionali

Francesco Di Renzo – Università di Firenze
francesco.direnzo@unifi.it

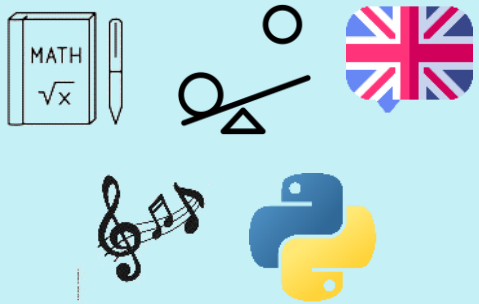
PID @ EGO, Marzo 23-27, 2026

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI FIRENZE

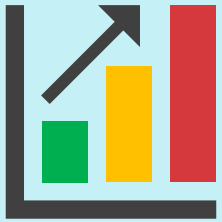
Programma della Lezione

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 candidti in O4 e prese dati precedenti
        2. Le allerte pubbliche di LIGO, Virgo e KAGRA
4. Discussione e Q&A

Conoscenze utili

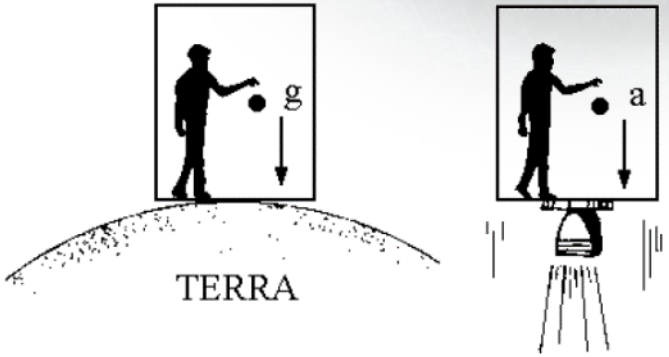


Difficoltà progressiva

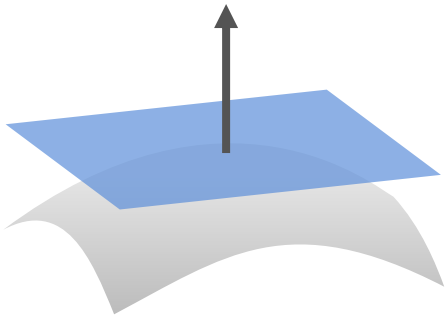


I Principi della Relatività Generale

- **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.



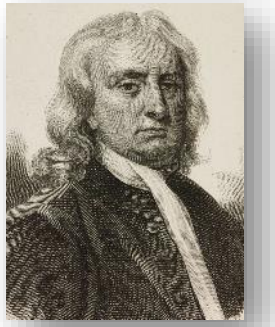
Si vede da queste considerazioni che nell'istituire la teoria della relatività generale saremo condotti a una teoria della gravitazione, in quanto siamo capaci di ``produrre`` un campo gravitazionale semplicemente cambiando il sistema delle coordinate. Si vede altresì che il principio della costanza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

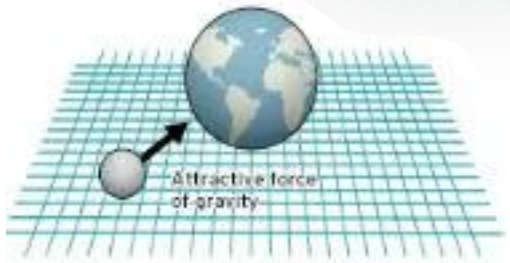
Albert Einstein, Annalen der Physik XLIX (1916)

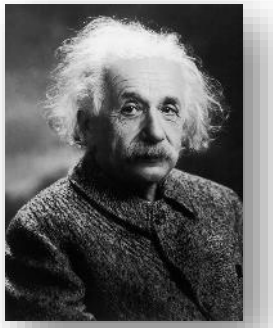
Gravitazione e Spaziotempo

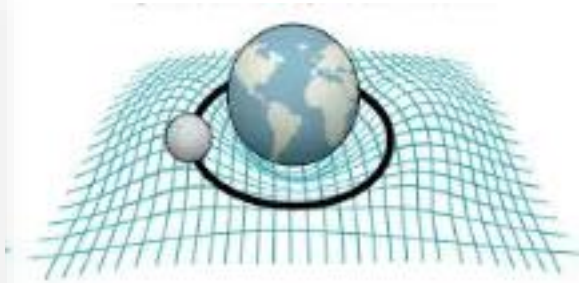
La Relatività Generale presenta una nuova teoria della gravitazione e dello spaziotempo:

- 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

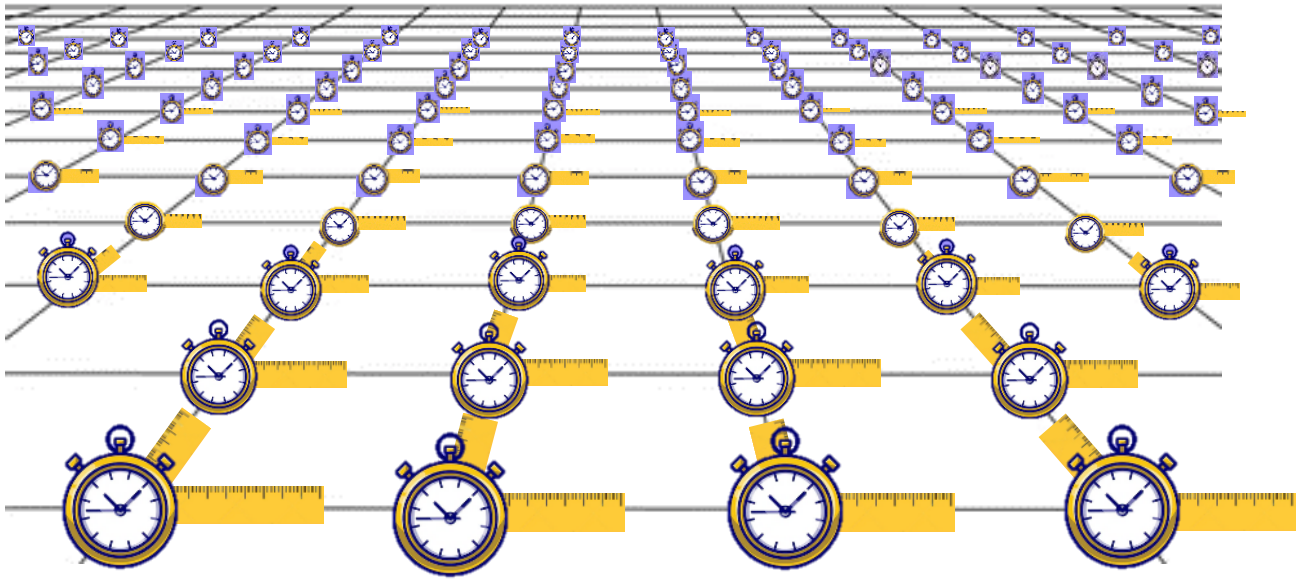
Lo Spaziotempo

- 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:

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



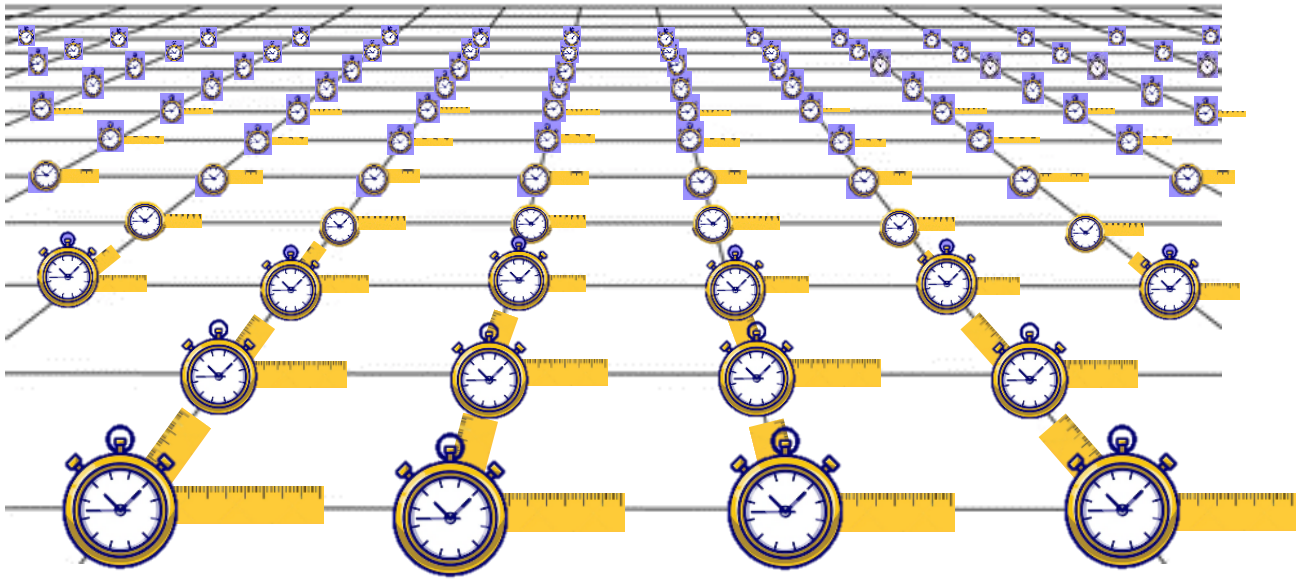
Lo Spaziotempo

- 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):

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

(metrica di Minkowski)

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

Spaziotempo curvo (con gravità):

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

Gravità e Moto dei Corpi

- Meccanica Newtoniana:

Potenziale gravitazionale

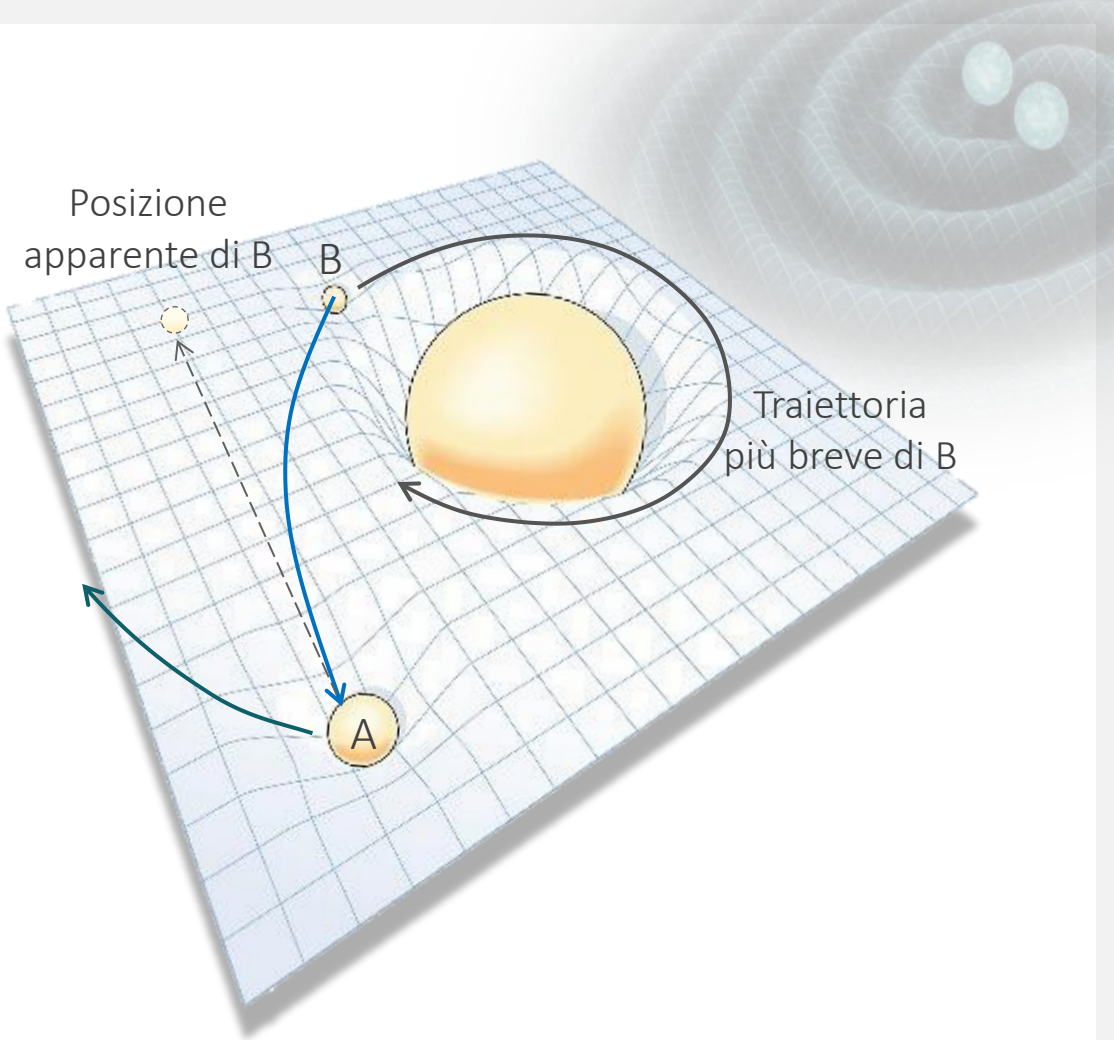
$$\frac{d^2x_i}{dt^2} = \frac{F_i}{m} = -\frac{\partial\phi}{\partial x_i} \qquad (i = 1,2,3)$$

Equazione di Poisson:

Densità di materia

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

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



Gravità e Moto dei Corpi

- Meccanica Newtoniana:

Potenziale gravitazionale

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

Equazione di Poisson:

Densità di materia

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

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

- Relatività Generale:

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

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

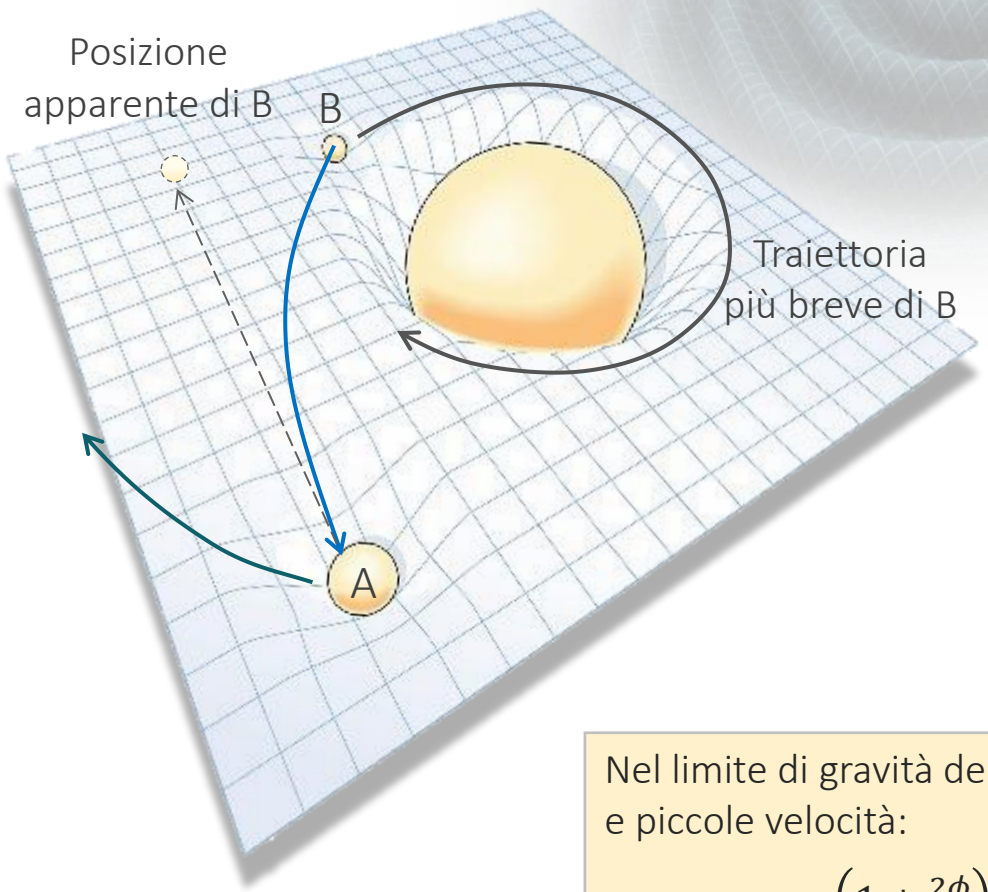
Equazione di Einstein:

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

dove: $R_{\mu\nu} = \frac{\partial\Gamma^\lambda_{\mu\nu}}{\partial x^\lambda} - \frac{\partial\Gamma^\lambda_{\mu\lambda}}{\partial x^\nu} + \Gamma^\lambda_{\mu\nu}\Gamma^\sigma_{\lambda\sigma} - \Gamma^\sigma_{\mu\lambda}\Gamma^\lambda_{\nu\sigma}, \qquad R = g^{\mu\nu}R_{\mu\nu}$

Tensore energia-impulso

Tensore di Ricci

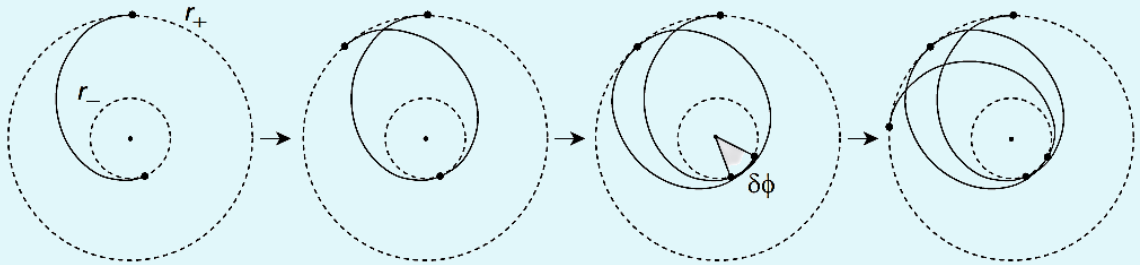


Nel limite di gravità debole e piccole velocità:

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

Conferme Sperimentali Classiche

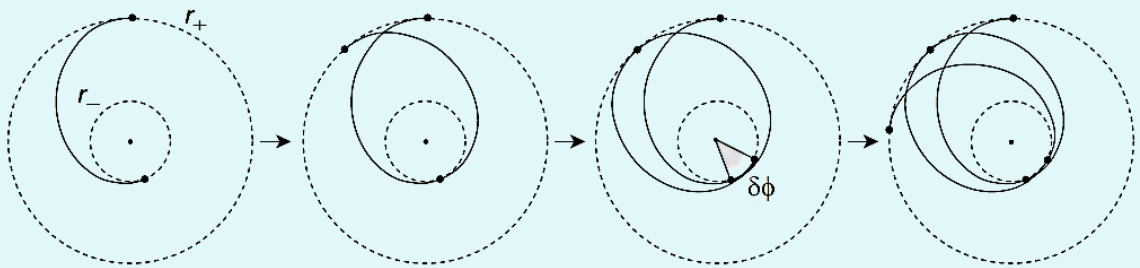
Precessione del perielio di Mercurio (La Verrier 1859)



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

Conferme Sperimentali Classiche

Precessione del perielio di Mercurio (La Verrier 1859)

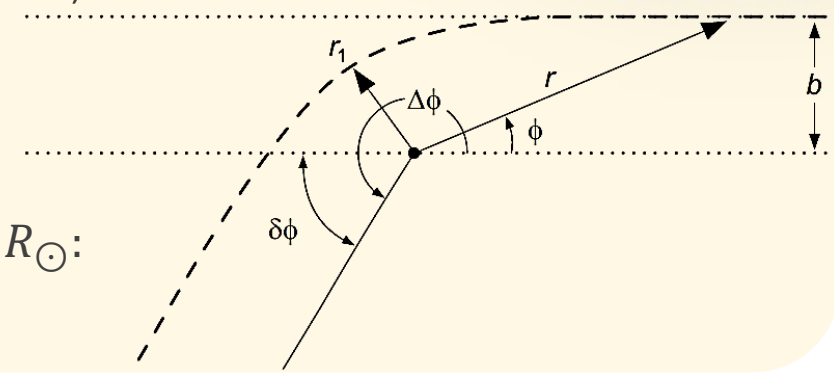


$$\delta\phi \approx \frac{4\pi G\, M}{ac^2(1-e^2)} \simeq 43''.$$

Deflessione della luce in un campo gravitazionale (Eddington 1919)

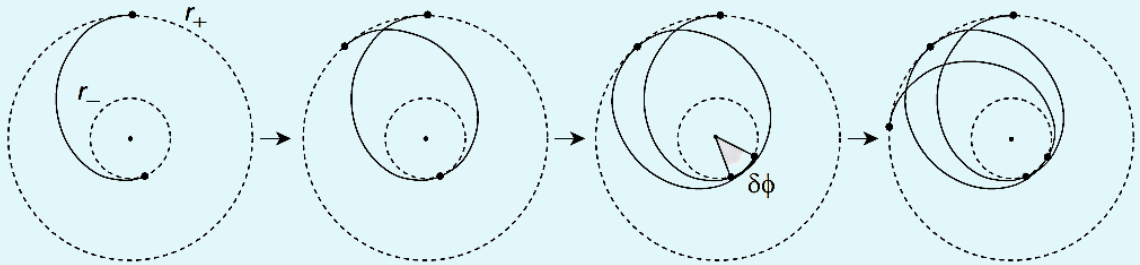
$$\delta\phi \approx \frac{4G\, M}{c^2 b}$$

$M = M_\odot, b = R_\odot$:
$\delta\phi \simeq 1.75''$



Conferme Sperimentali Classiche

Precessione del perielio di Mercurio (La Verrier 1859)

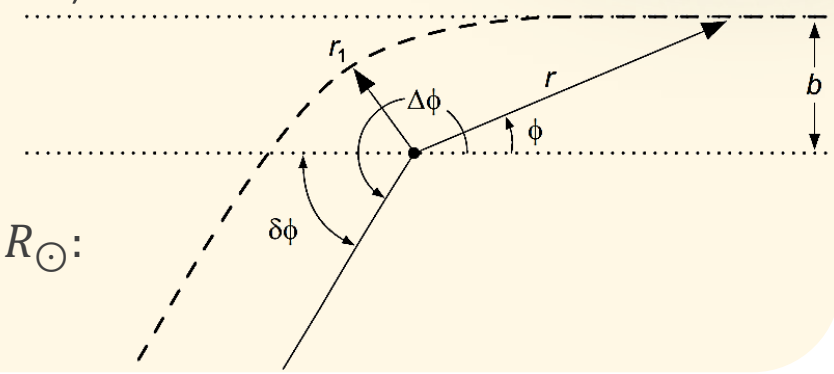


$$\delta\phi \approx \frac{4\pi G\, M}{ac^2(1-e^2)} \simeq 43''.$$

Deflessione della luce in un campo gravitazionale (Eddington 1919)

$$\delta\phi \approx \frac{4G\, M}{c^2 b}$$

$M = M_\odot, b = R_\odot$:
$\delta\phi \simeq 1.75''$

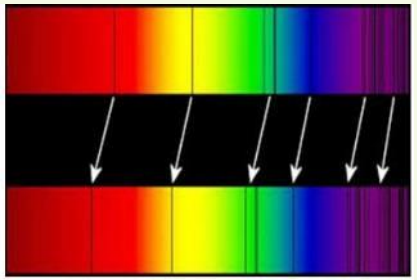


Spostamento verso il rosso delle righe spettrali (Adams 1925)

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

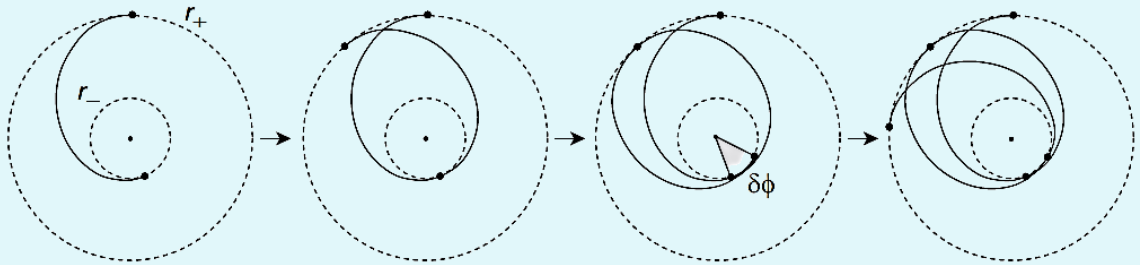
Il telescopio Hubble ha misurato per Sirius B $\sqrt{z} \simeq 56$ km/s $/c$

Per il Sole $\sqrt{z} \simeq 450$ m/s $/c$



Conferme Sperimentali Classiche

Precessione del perielio di Mercurio (La Verrier 1859)

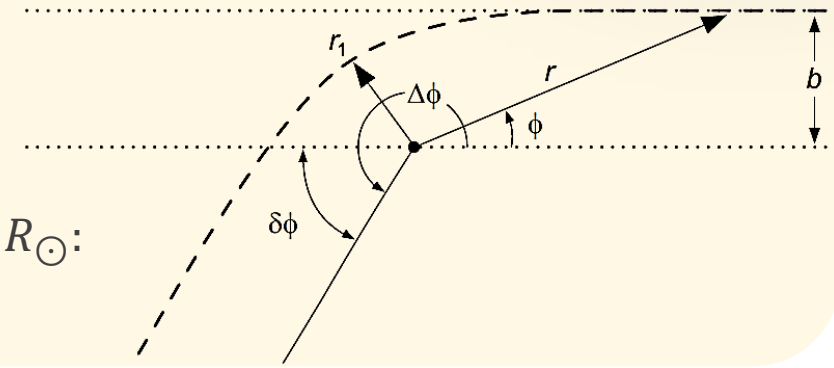


$$\delta\phi \approx \frac{4\pi G\, M}{ac^2(1-e^2)} \simeq 43''.$$

Deflessione della luce in un campo gravitazionale (Eddington 1919)

$$\delta\phi \approx \frac{4G\, M}{c^2 b}$$

$M = M_\odot, b = R_\odot$:
$\delta\phi \simeq 1.75''$

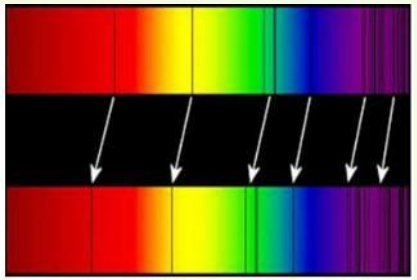


Spostamento verso il rosso delle righe spettrali (Adams 1925)

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

Il telescopio Hubble ha misurato per Sirius B $\sqrt{z} \simeq 56$ km/s $/c$

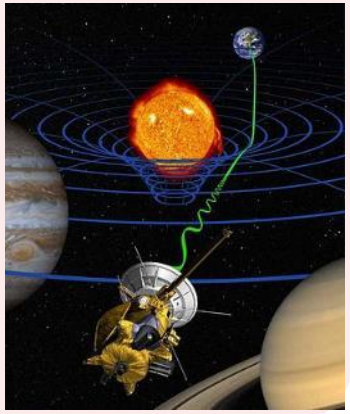
Per il Sole $\sqrt{z} \simeq 450$ m/s $/c$



Ritardo di Shapiro (Shapiro 1964)

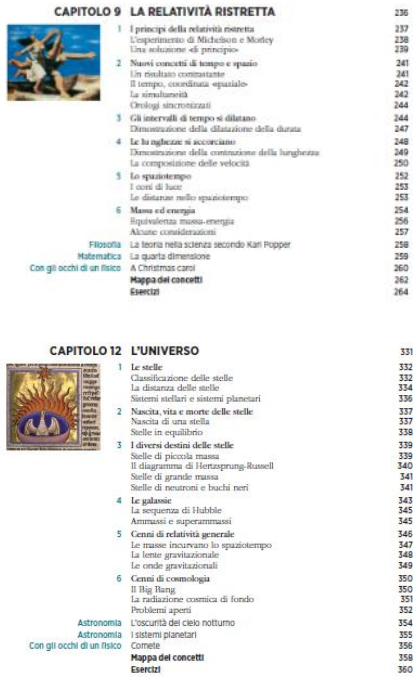
La luce che viaggia vicino a corpi massivi ritarda rispetto alla propagazione in spazio vuoto (piatto):

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



Letture in Classe

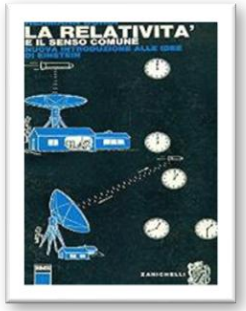
- Scuola superiore



CAPITOLO 9 LA RELATIVITÀ RISTRETTA 236
1 I principi della relatività ristretta 237
L'esperimento di Michelson e Morley 238
Una soluzione «il principio» 239
2 Nuovi concetti di tempo e spazio 241
Un risultato contrastante 241
Il tempo, coordinata «spaziale» 242
La simultaneità 242
Orologi sincronizzati 244
3 Gli intervalli di tempo si dilatano 244
Dimostrazione 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 coni di luce 253
Le distanze nello spaziotempo 253
6 Massa ed energia 254
Equivalenza massa-energia 256
Alcune considerazioni 257
Filosofia La teoria nella scienza secondo Karl Popper 258
Matematica La quarta dimensione 259
Con gli occhi di un fisico A Christmas carol 260
Mappa dei concetti 262
Esercizi 264

CAPITOLO 12 L'UNIVERSO 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
Astronomia L'oscurità del cielo notturno 354
Astronomia I sistemi planetari 355
Con gli occhi di un fisico 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…

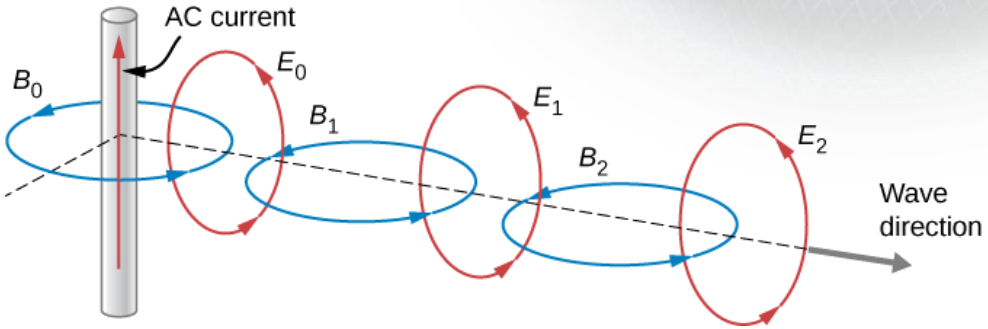


Onde Gravitazionali e Onde Elettromagnetiche (I)

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

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

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

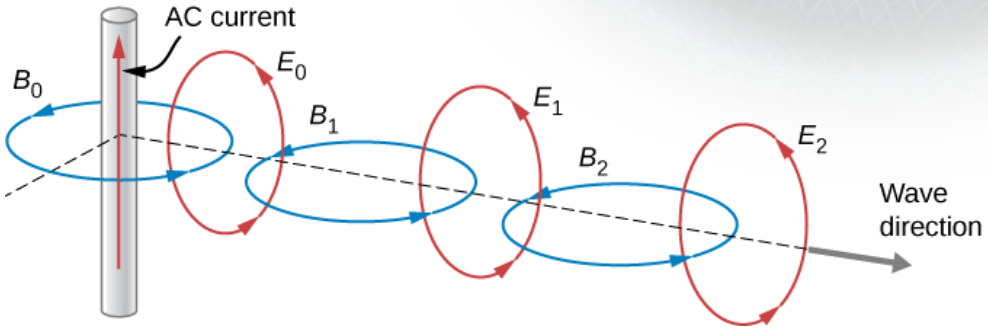


Onde Gravitazionali e Onde Elettromagnetiche (I)

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

$$\left(\nabla^2 - \frac{1}{c^2}\frac{\partial^2}{\partial t^2}\right) A^\mu := \Box\, A^\mu = \mu_0 J^\mu \qquad \left(\begin{array}{c} \boldsymbol{E} = -\nabla\phi - \frac{\partial \boldsymbol{A}}{\partial t} \\ \boldsymbol{B} = \nabla \times \boldsymbol{A} \end{array}\right)$$

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



- 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''):

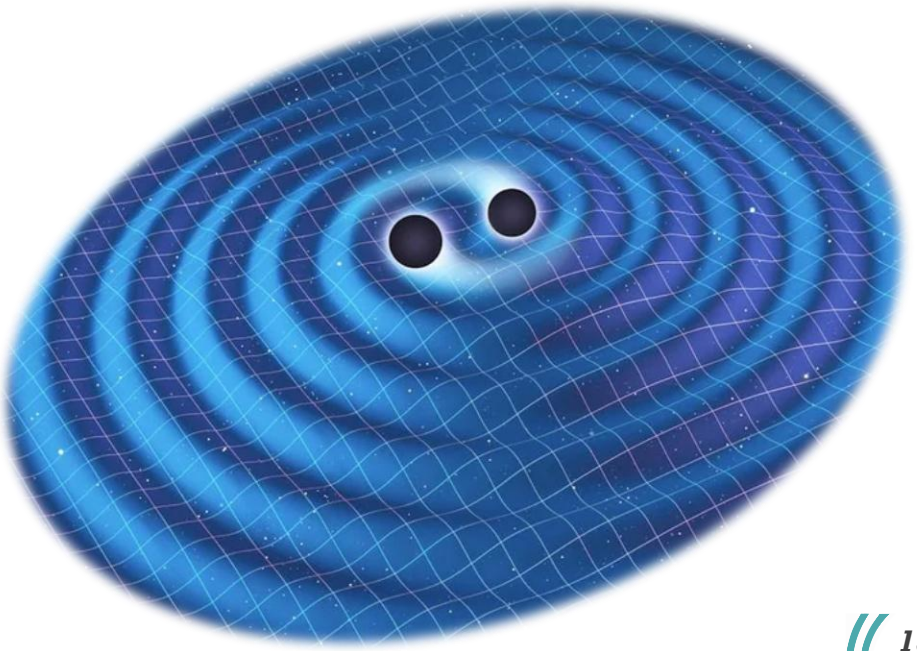
$$g_{\mu\nu}(x) \approx \eta_{\mu\nu} + h_{\mu\nu}(x)$$

  - Equazione di Einstein linearizzata:

$$\Box\, h_{\mu\nu} = -\frac{16\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

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.**

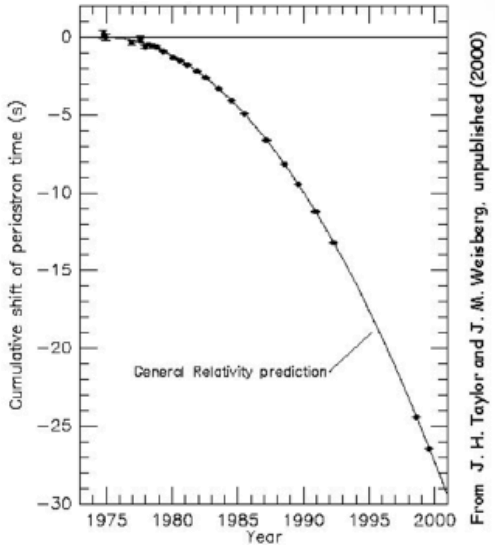
- **Dispersione:** l'osservabile è lo strain (ampiezza) e scala come $1/r$
- **Rivelatori:** hanno un ampio campo di vista. Non possiamo rivelare onde gravitazionali localmente (principio di equivalenza). Ci servono due o più masse di prova.

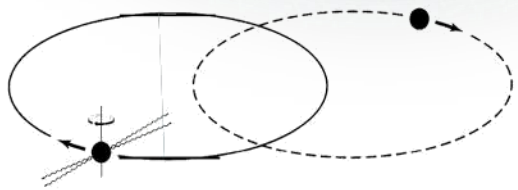
- **Interazione:** le onde EM interagiscono fortemente con la materia: sono più facili da rivelare ma anche da alterare
- **Lunghezze d' onda:** i fotoni sono emessi localmente dalle cariche in movimento che nel complesso formano la sorgente. Possono essere usate per creare immagini. La produzione di 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 un campo molto stretto.

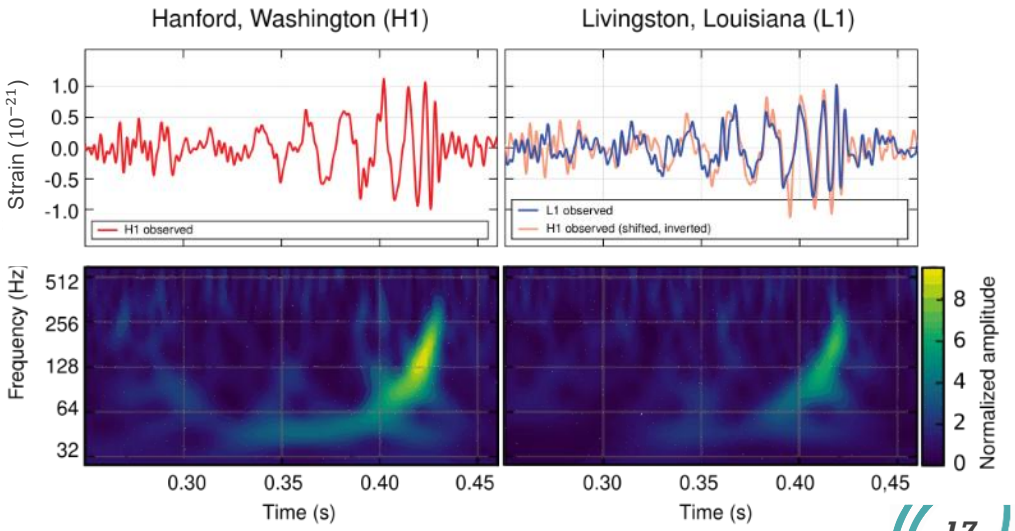
La Nascita dell'Astronomia Gravitazionale

- 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.

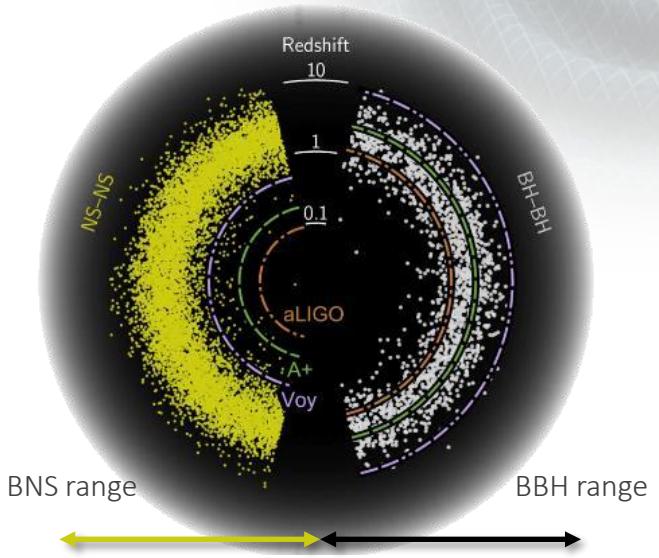
Il fatto che siano debolmente interagenti le rende difficili da rivelare ma ha anche dei vantaggi:

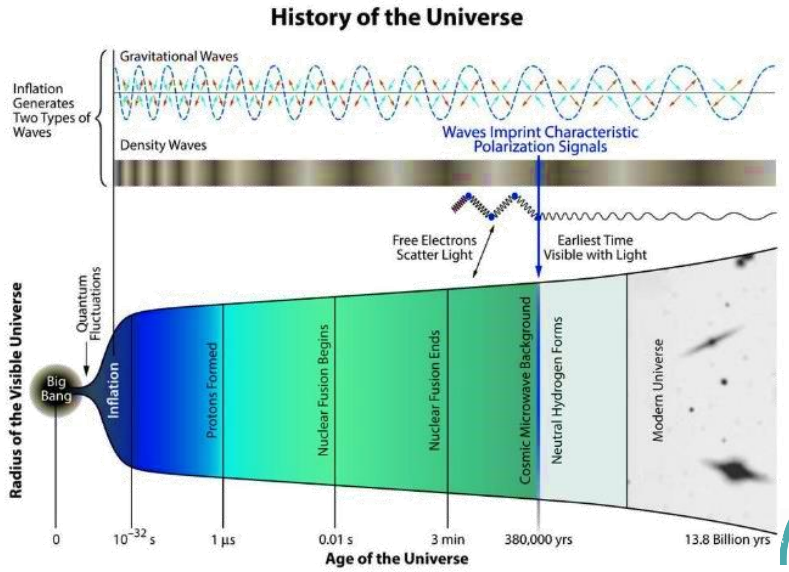
- Possono essere viste da epoche più remote. In base all'intensità dell'interazione, diversi tipi di segnali si sono disaccoppiati in epoche differenti:

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

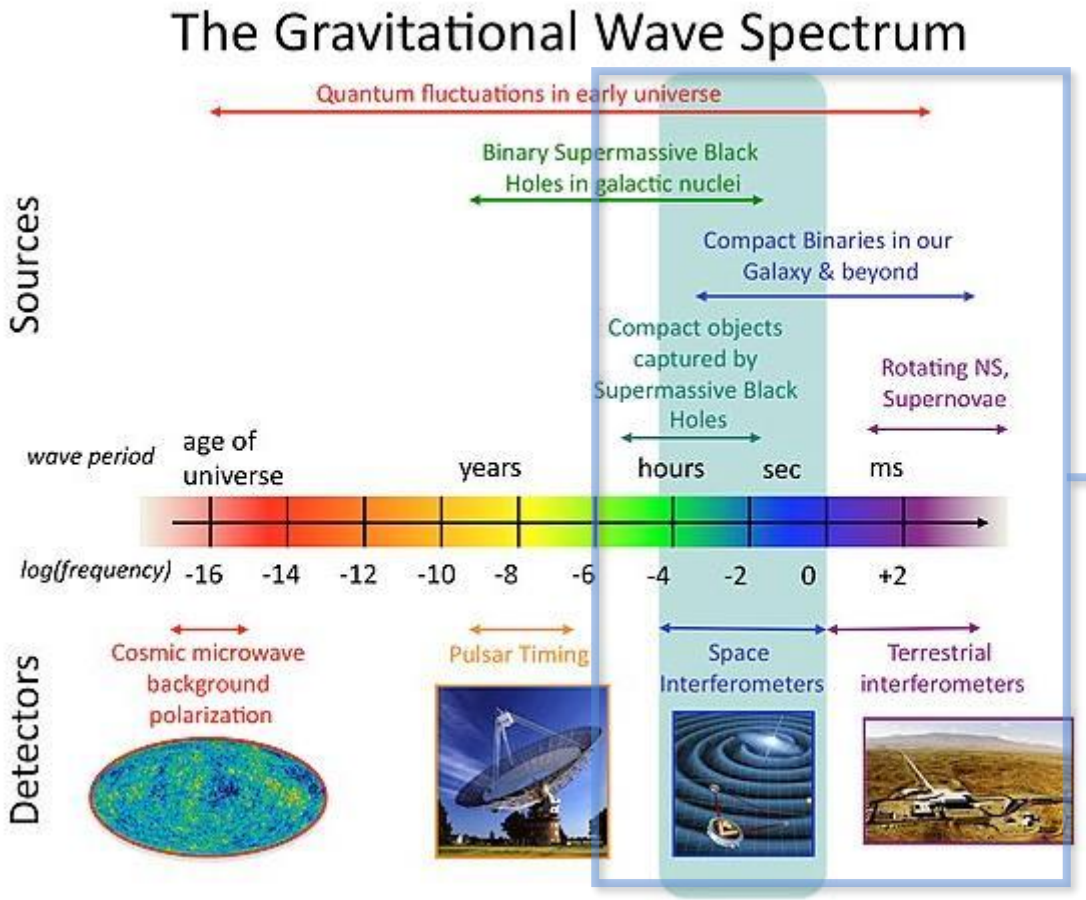
  Neutrini: 1 secondo dopo il Big Bang

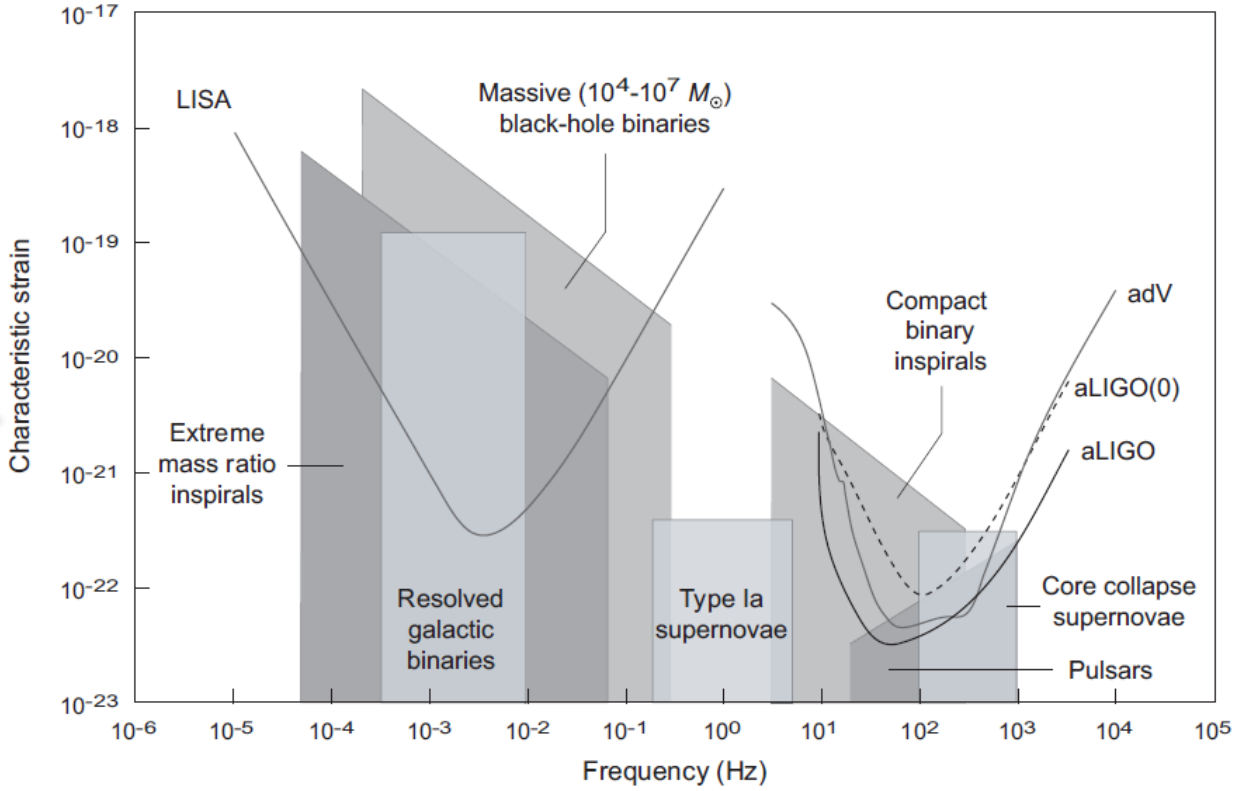
  Onde gravitazionali: tempi della *scala di Planck* (10^{-43} sec).



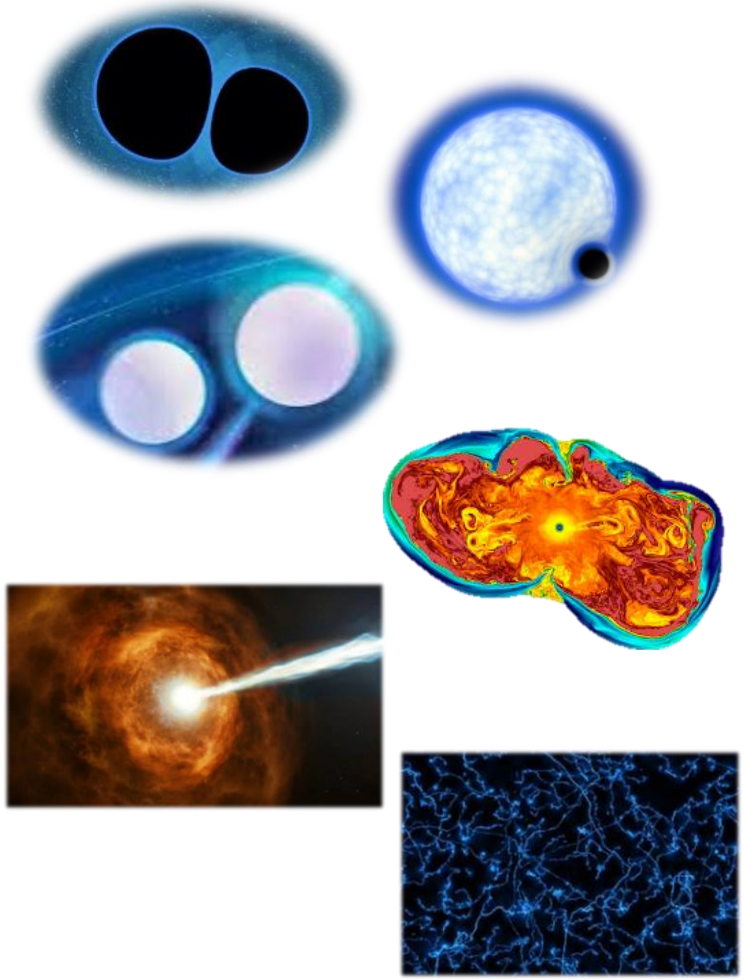


Sorgenti di Onde Gravitazionali





Sorgenti di Onde Gravitazionali Transienti



Coalescenze di stelle compatte

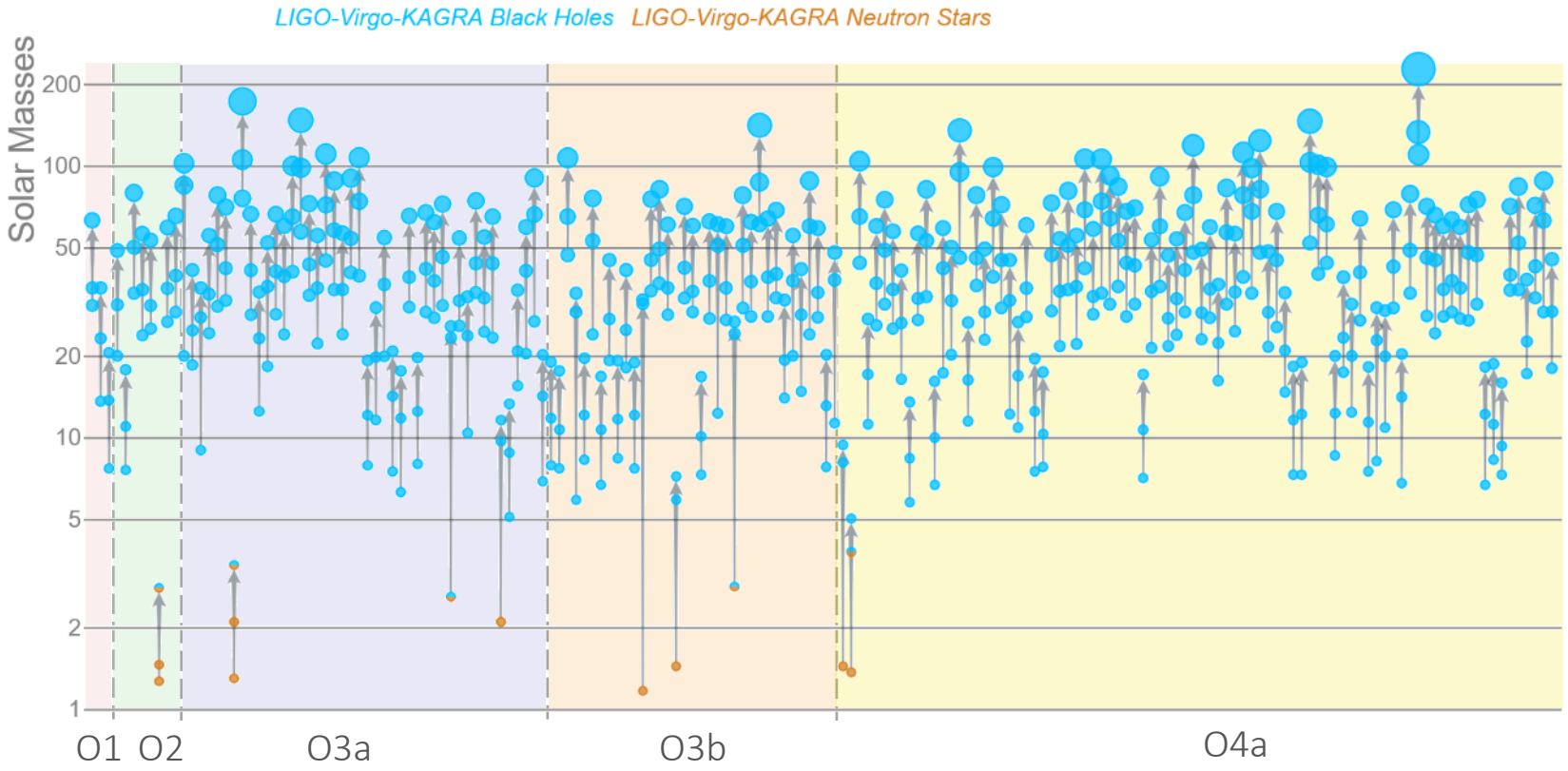
- Sistemi binari composti da buchi neri (BH) e stelle di neutroni (NS): BBH, NSBH, BNS. GWTC-3
- Oggetti compatti Sub-Solar Mass (SSM), MNRAS **524**, 5984 (2023)

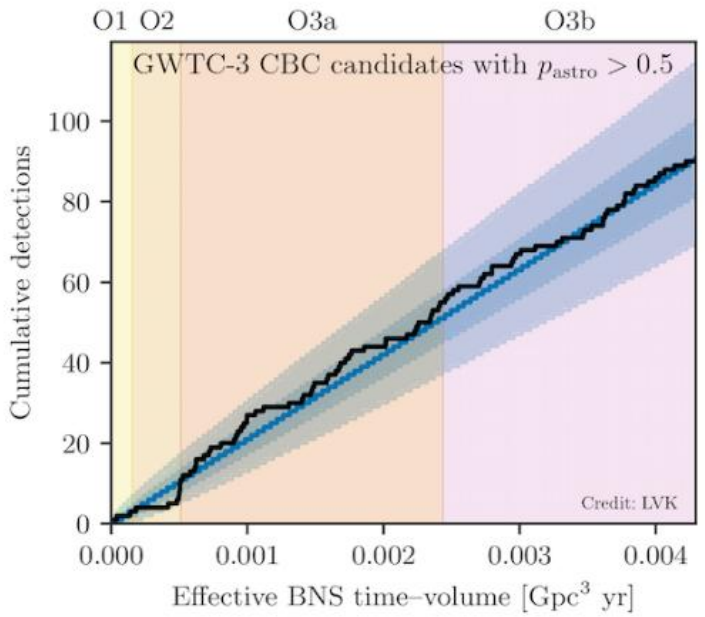
Sorgenti di segnali ``burst'' non modellati o debolmente modellati

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

Osservazioni di Stelle Compatte

Cimitero di masse stellari





arXiv:2111.03606

Credit: Visualization: LIGO-Virgo-KAGRA / Aaron Geller / Northwestern

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:

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

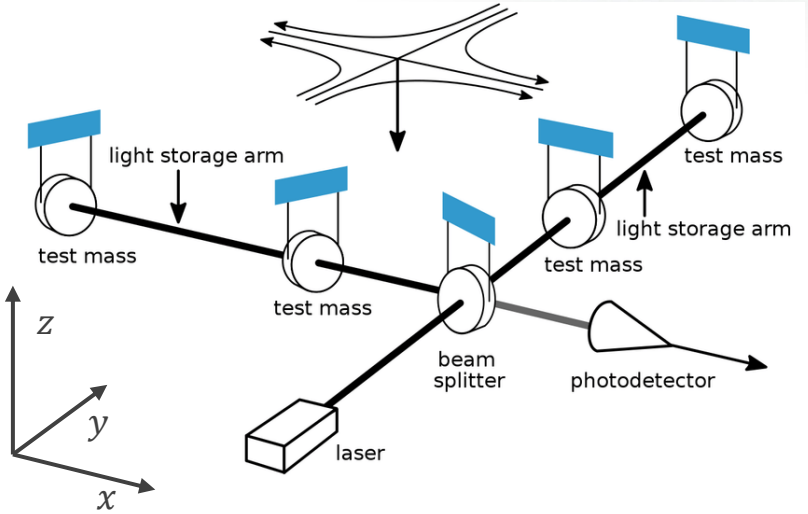
ed il corrispondente intervallo spaziotempo:

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

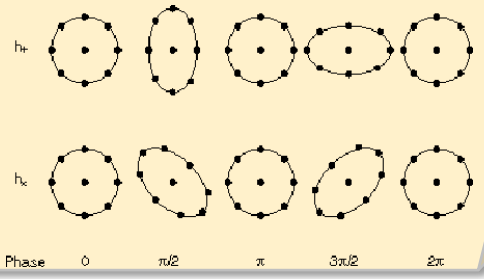
- Se le masse sono ferme, una nell'origine e l'altra a coordinata L_0 lungo x, la loro distanza propria:

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

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



Come le onde elettromagnetiche, le onde gravitazionali hanno **due polarizzazioni trasversali**: + e ×.



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.

Strain e Rivelatori di Onde Gravitazionali

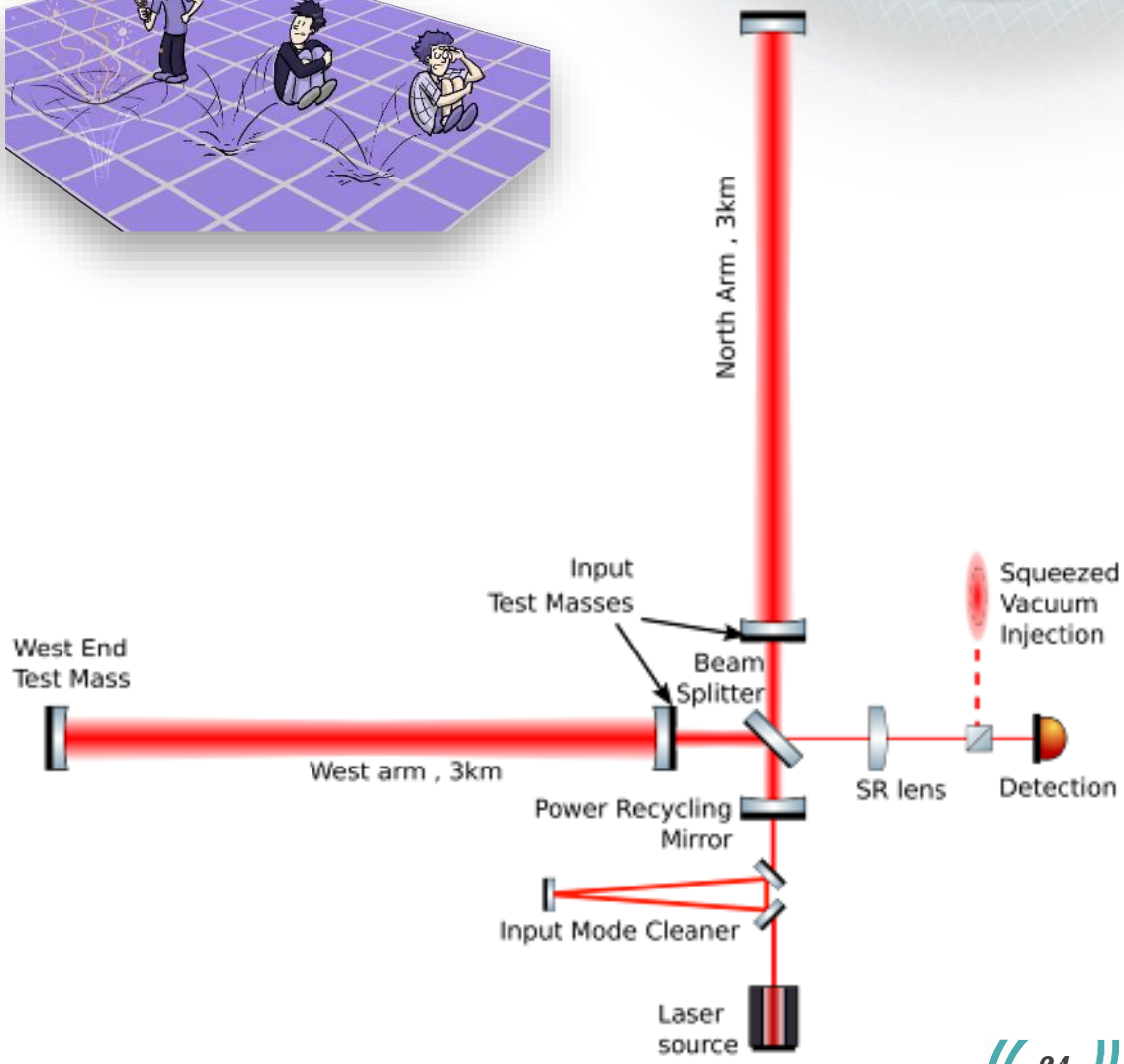
Se lo spaziotempo è pensato come un *mezzo elastico*:

- 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 sonio gli strumenti ideali per misurare questo tipo di deformazioni:

- Specchi sospesi fanno da masse di test
- Misurano la differenza di fase trai 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:

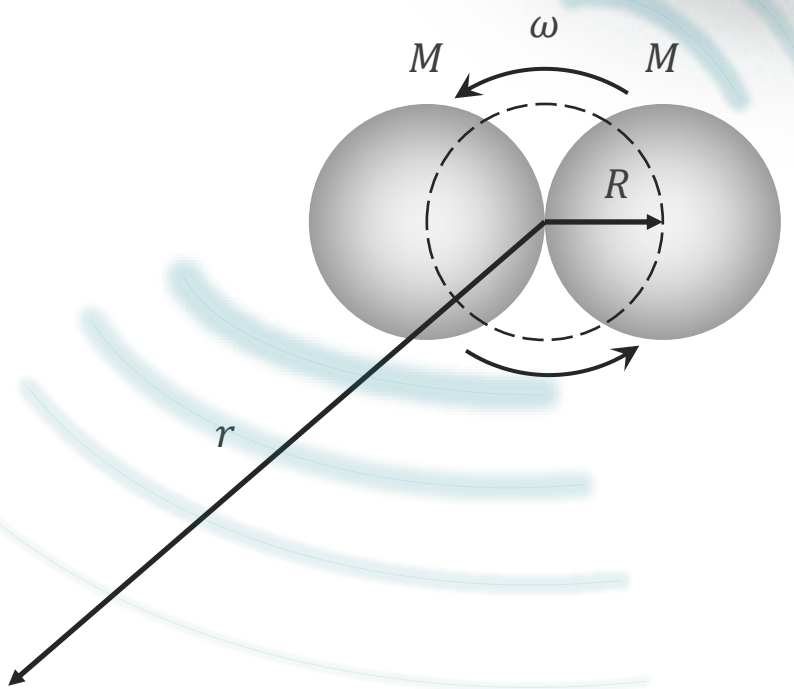
- Onde emesse da una sorgente isolata, non relativistica (lenta)
- Grandi lunghezze d'onda
- Lontano dalla sorgente

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

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

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

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



Esempio: sistema binario molto semplificato

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

Raggio di Schwarzschild

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

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:**

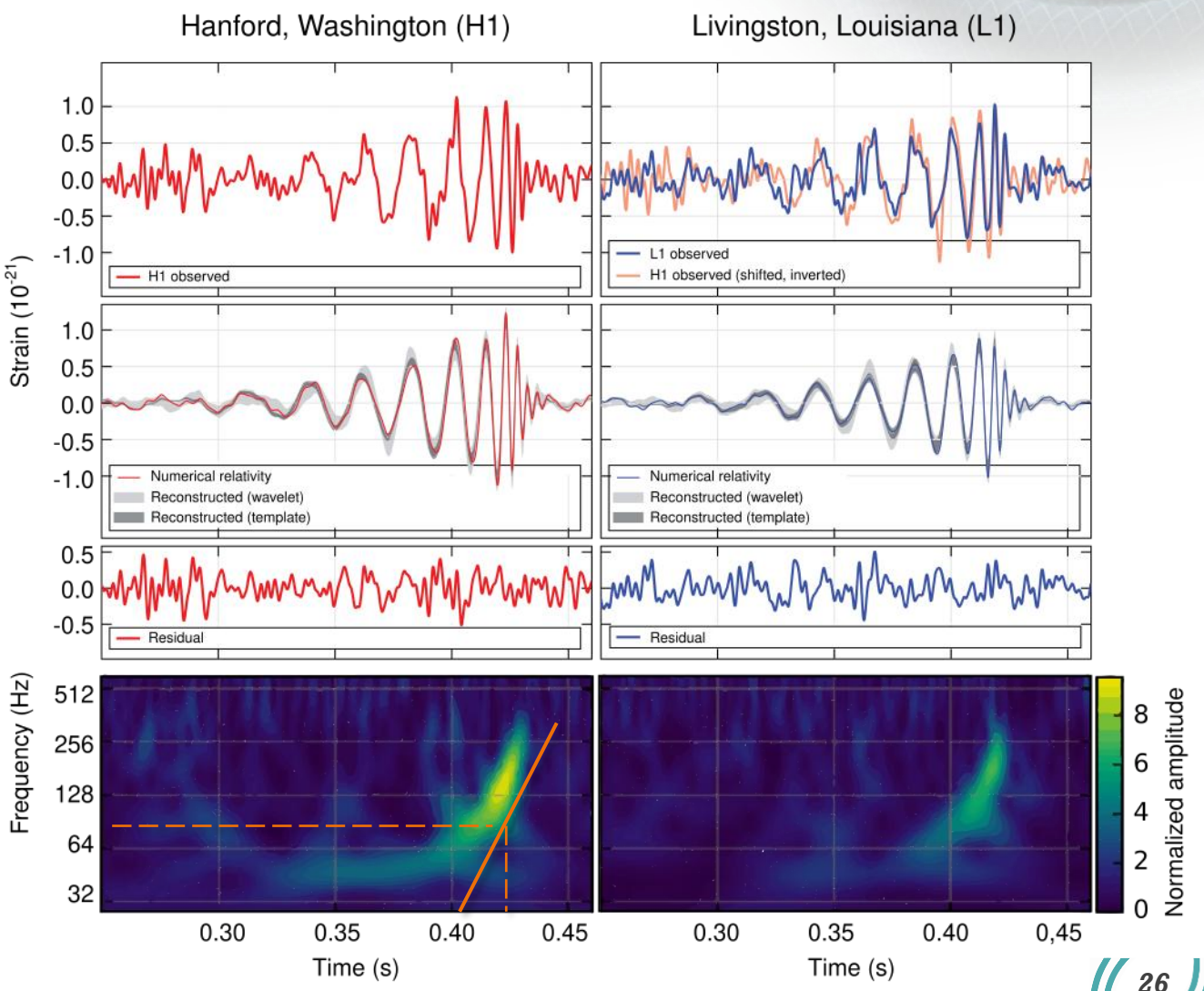
$$\mathcal{M} = \mu^{3/5} M^{2/5} = \frac{(m_1\, m_2\,)^{3/5}}{(m_1\ + m_2\,)^{1/5}}$$

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

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

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

f è la frequenza ossservata e $\dot{f}$ la sua derivate temporale.



Video Didattici

LIGO Virgo KAGRA

@LIGOVirgo · 3790 iscritti · 31 video

Welcome to the LIGO-Virgo-KAGRA YouTube Channel! ...altro

youtu.be/Il8fXnqfDHo e 1 altro link

Iscritto

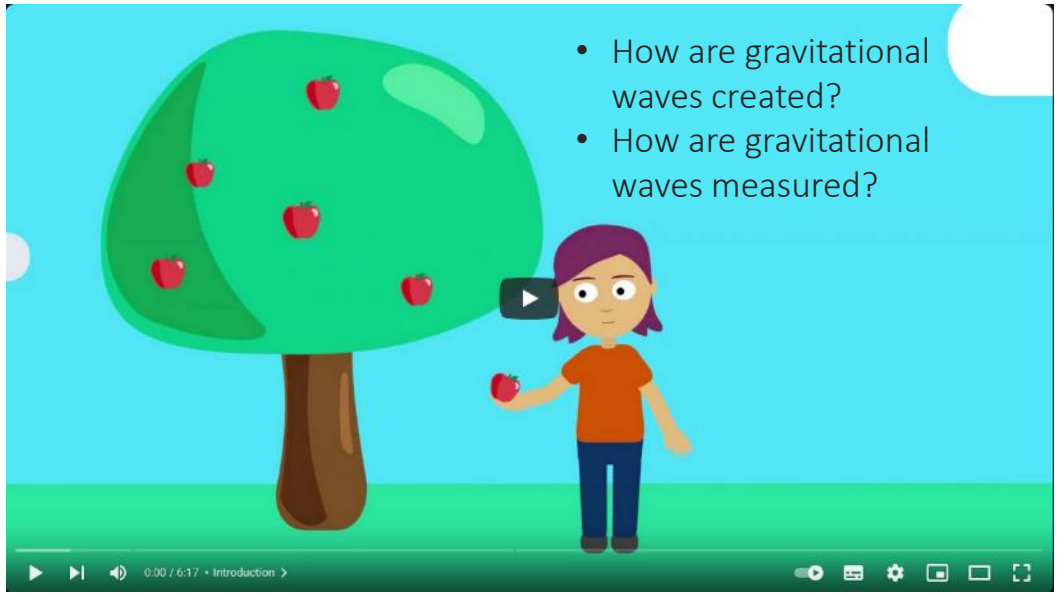
EGO & the Virgo Collaboration

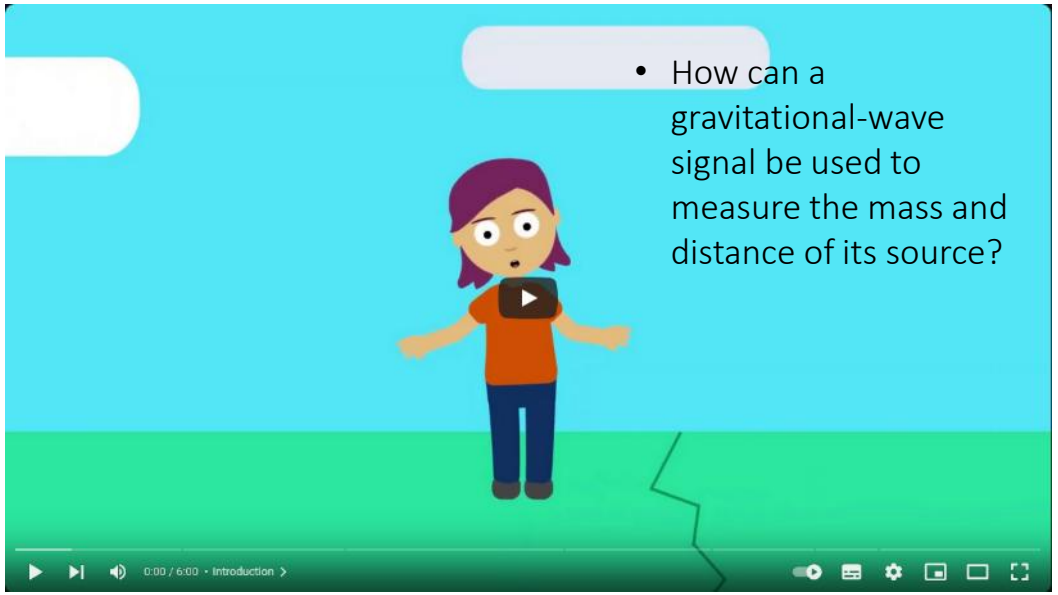
@EGOtheVirgoCollaboration · 655 iscritti · 93 video

Scopri di più su questo canale ...altro

facebook.com/EGOVirgoCollaboration e 3 altri link

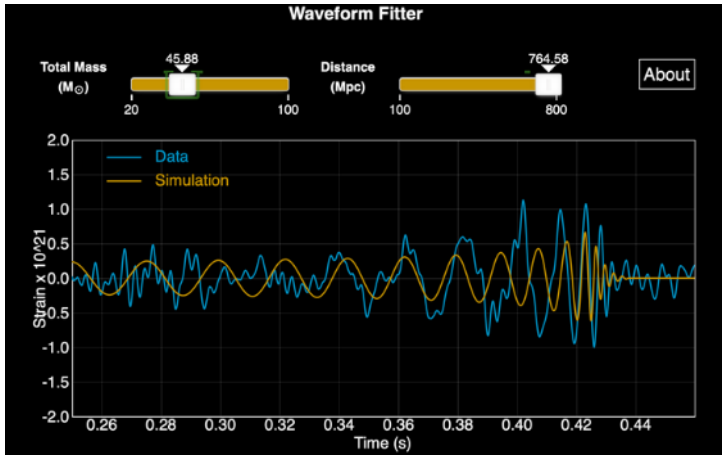
Iscritto





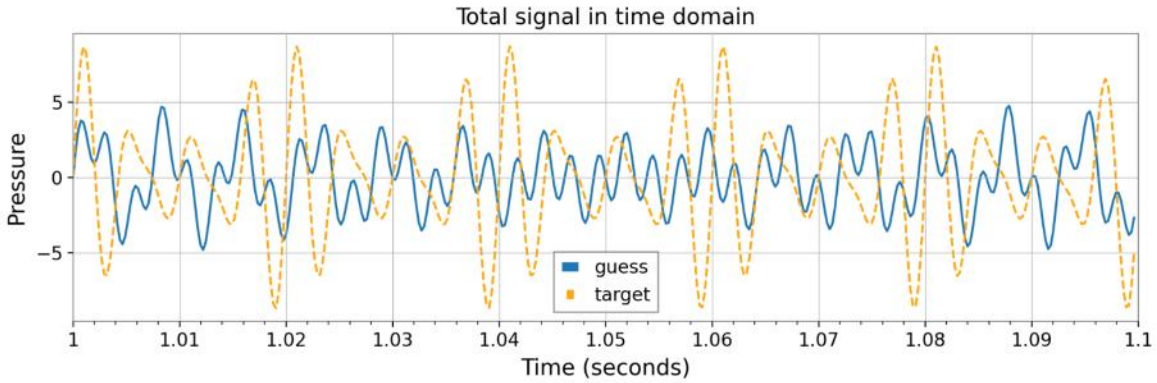
Laboratorio di Elaborazione dei Segnali

- Trova la forma d'onda più simile (**matched filter**): [Waveform filter link](), [video dimostrativo]()

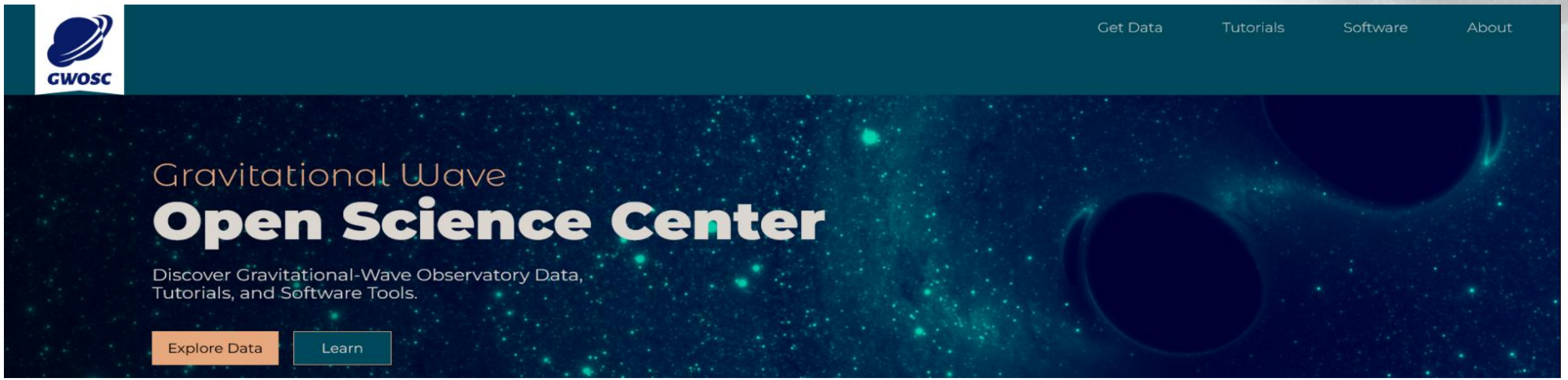


Black Hole Hunter
Gioco online per trovare segnali di buchi neri
https://blackholehunter.org/game.html

- 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

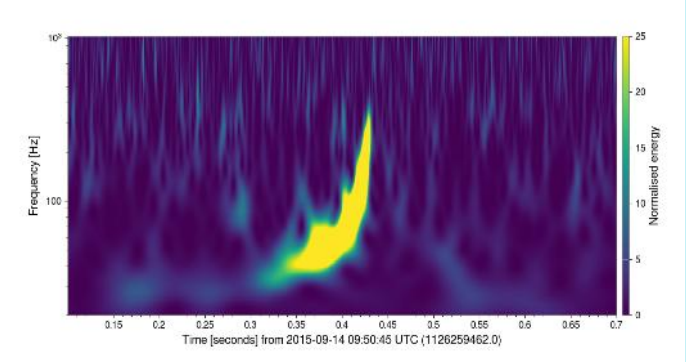


Esplora il Portale dei Dati Pubblici



Esplora gli eventi gravitazionali rivelati da LIGO e Virgo

Naviga attraverso il [portale degli eventi]



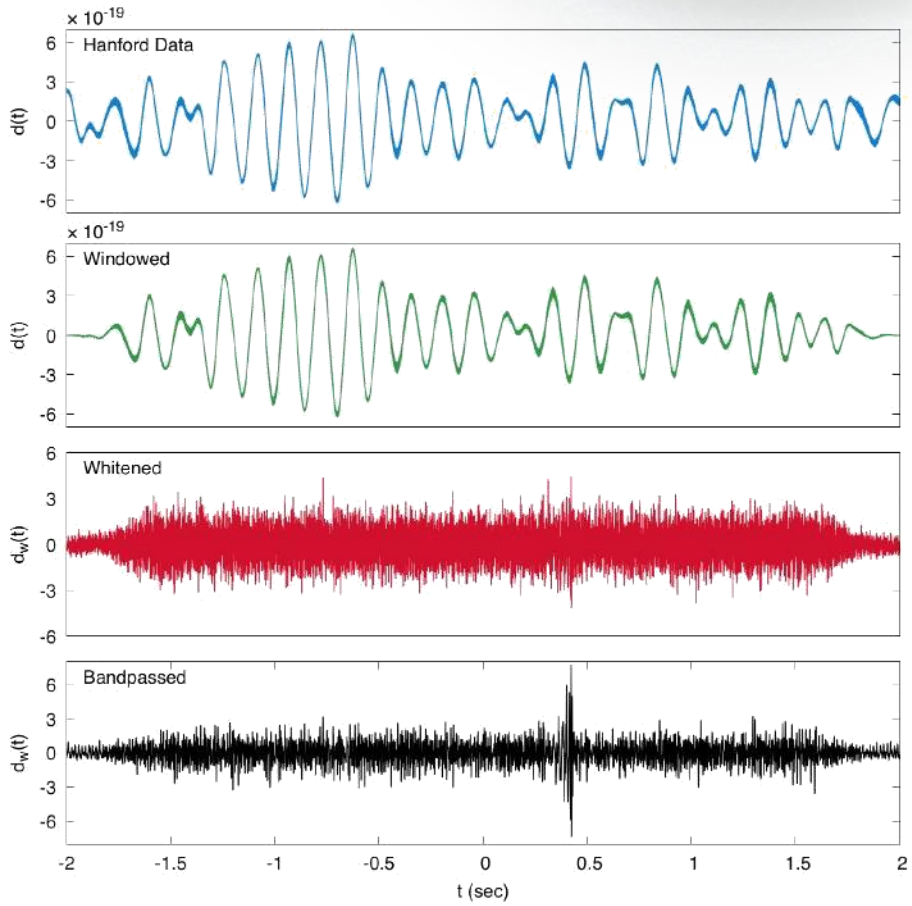
Utilizza GW quickview

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 importatnti 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 Tuotorial e Workshop

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.

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

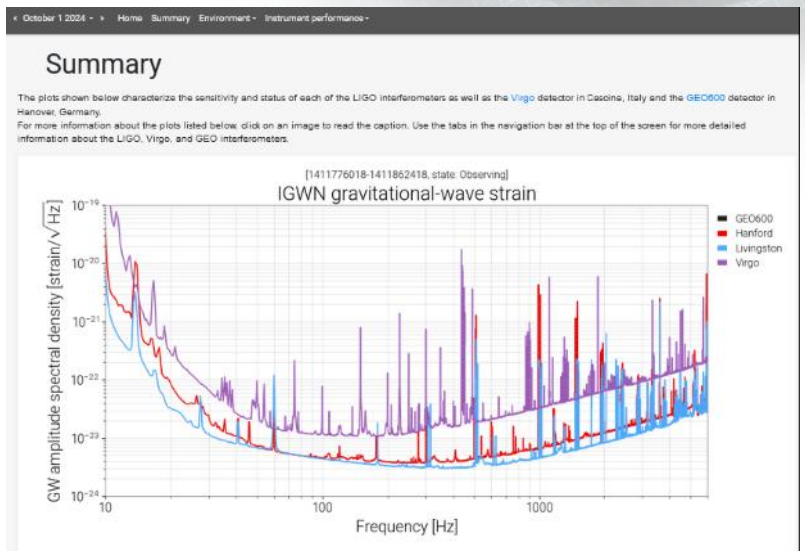
LIGO Hanford

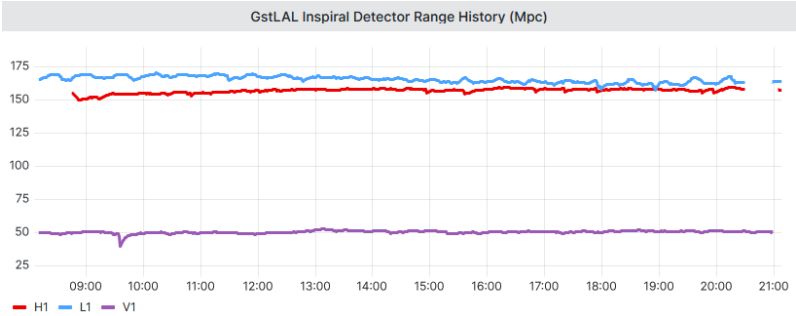
LIGO Livingston

Virgo

KAGRA

GEO600



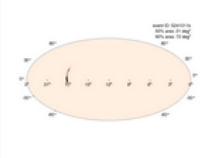
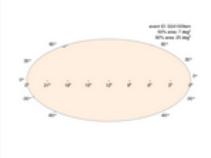
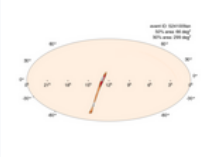
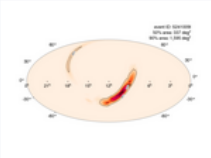


Il Gravitational-Wave Candidate Event Database

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
S241011k	BBH (>99%)	Yes	Oct. 11, 2024 23:38:34 UTC	GCN Circular Query Notices | VOE		1 per 1.252e+26 years		Ω H1 Ω L1 Ω V1
S241009em	BBH (>99%)	Yes	Oct. 9, 2024 22:04:55 UTC	GCN Circular Query Notices | VOE		1 per 11.246 years		Ω H1 Ω L1 Ω V1
S241009an	BBH (>99%)	Yes	Oct. 9, 2024 08:48:16 UTC	GCN Circular Query Notices | VOE		1 per 16402 years		Ω H1 Ω L1 Ω V1
S241009l	BBH (98%), Terrestrial (2%)	Yes	Oct. 9, 2024 02:28:35 UTC	GCN Circular Query Notices | VOE		1.0446 per year		Ω H1 Ω L1 Ω V1

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 deg2. 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!