

Experimental techniques for GW detection

Analisi di segnali

corso per il XXXVIII ciclo di dottorato in fisica

14 ore

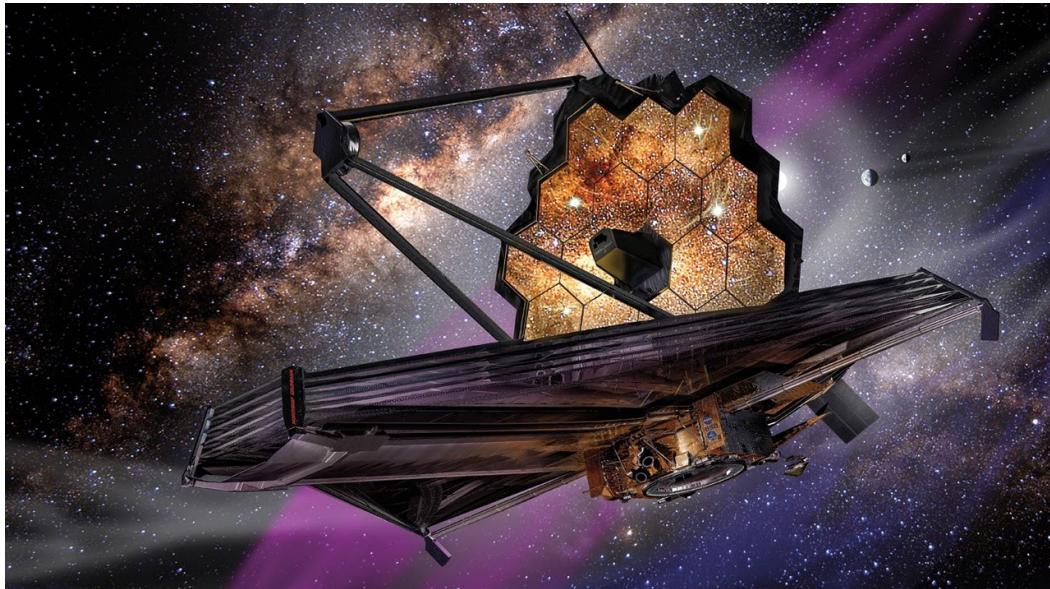
Mateusz Bawaj mateusz.bawaj@unipg.it



Rilevamento dei segnali gravitazionali

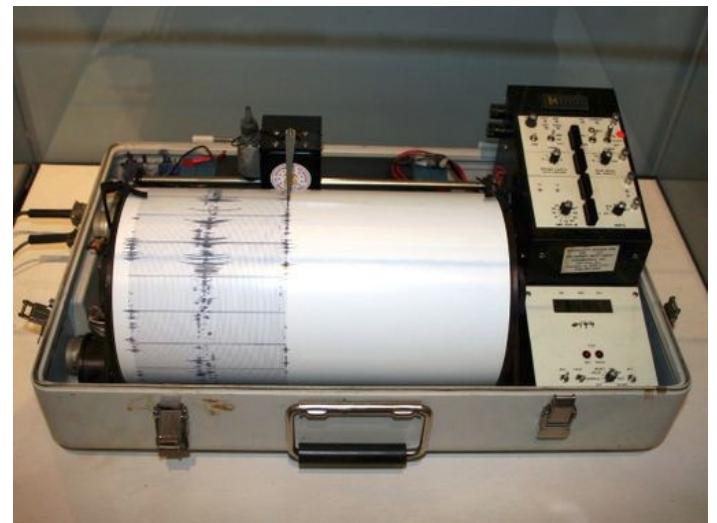
segna^{le} gravitazionale

che cosa immaginiamo



interpretazione artistica
del telescopio di James Webb

la cosa che abbiamo



sismografo

Rilevamento dei segnali gravitazionali

segnale gravitazionale

il problema generale da approcciare è saper ritrovare il segnale nascosto in un fondo di rumore di paragonabile ampiezza.

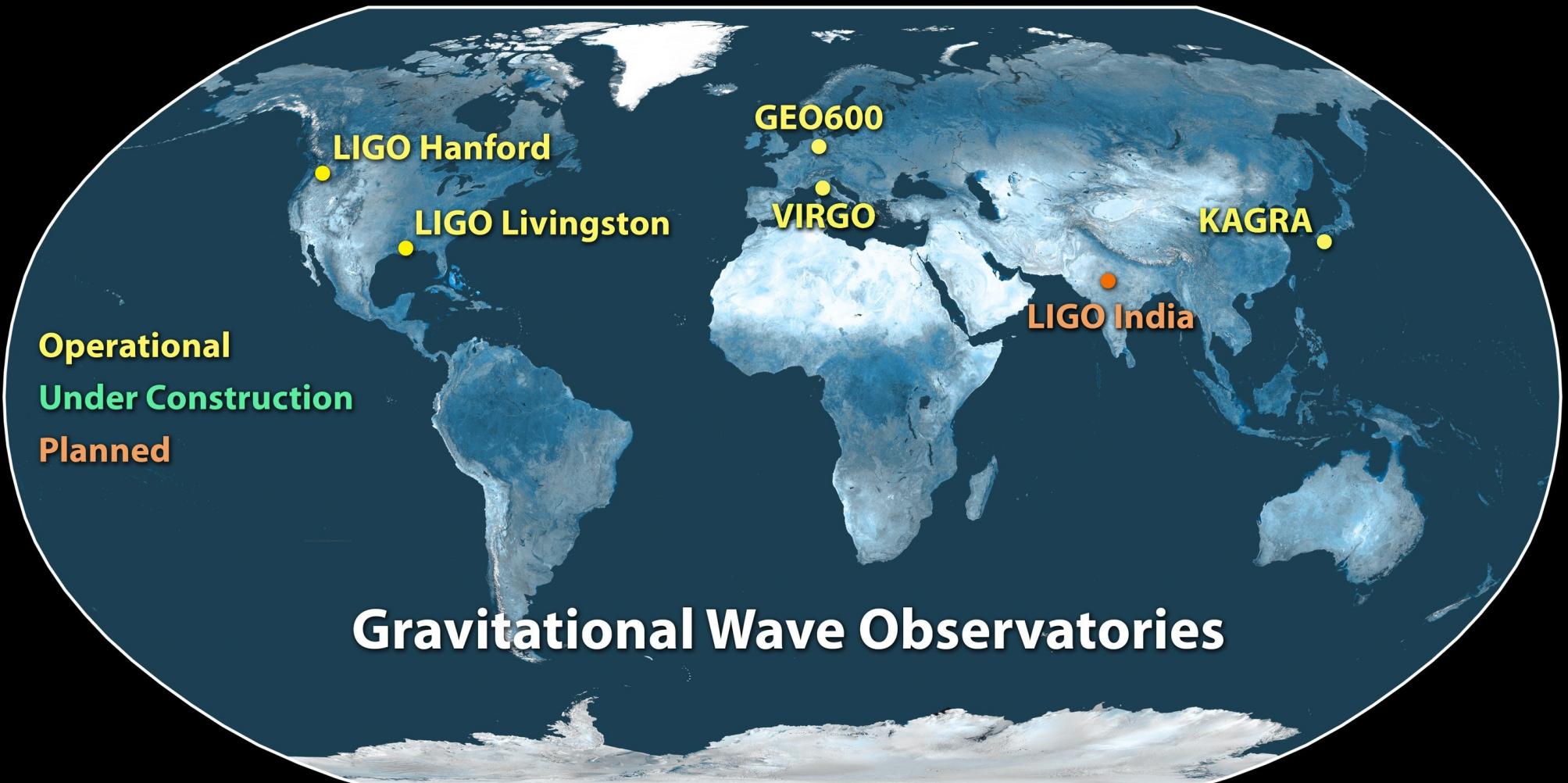
ancora meglio se sappiamo farlo efficientemente!

due approcci:

- 1) conoscere al meglio il rivelatore per poter sottrarre i rumori dalle fonti deterministiche.
- 2) conoscere la forma presunta del segnale ricercato e il modo in cui interagisce con il rivelatore per poter filtrare via i rumori che sicuramente non assomigliano il segnale presunto.

Rilevamento dei segnali gravitazionali

segnale gravitazionale



Localizzazione della sorgente

Localizzazione della sorgente

prima interpretazione dei segnali rivelati è l'analisi della direzione di provenienza.

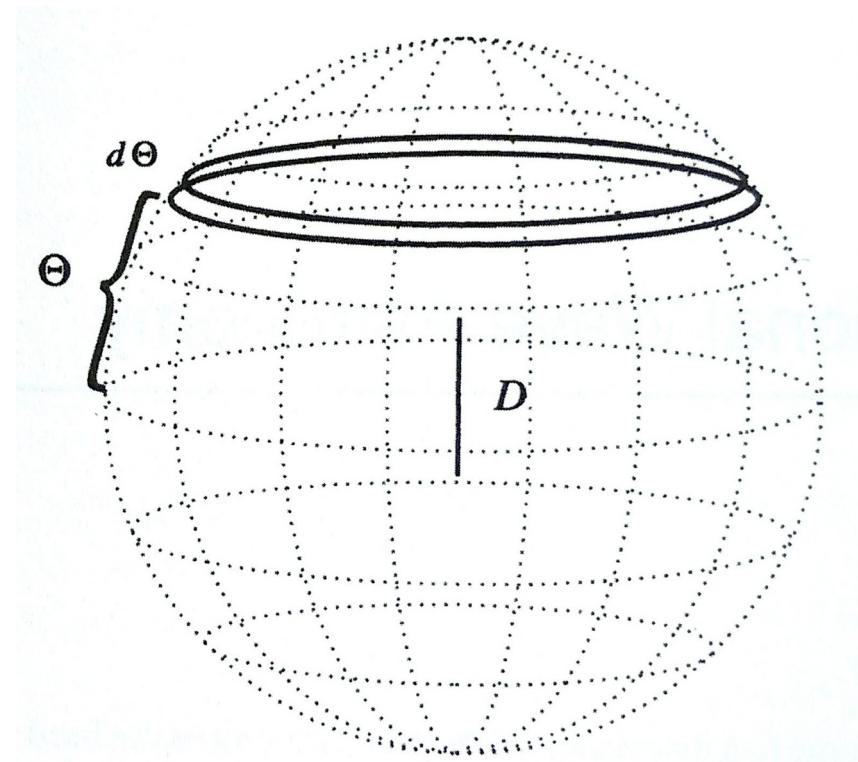
è l'informazione fondamentale per legare osservazioni attraverso le onde gravitazionali con il resto dell'astronomia.

Io facciamo attraverso la correlazione incrociata fra i dati provenienti da due rivelatori.

determiniamo Δt_{sig} fra i due rivelatori distanti fra di loro di D .

<https://virgo.pg.infn.it/maps/>

e. g.: GW200306_093714



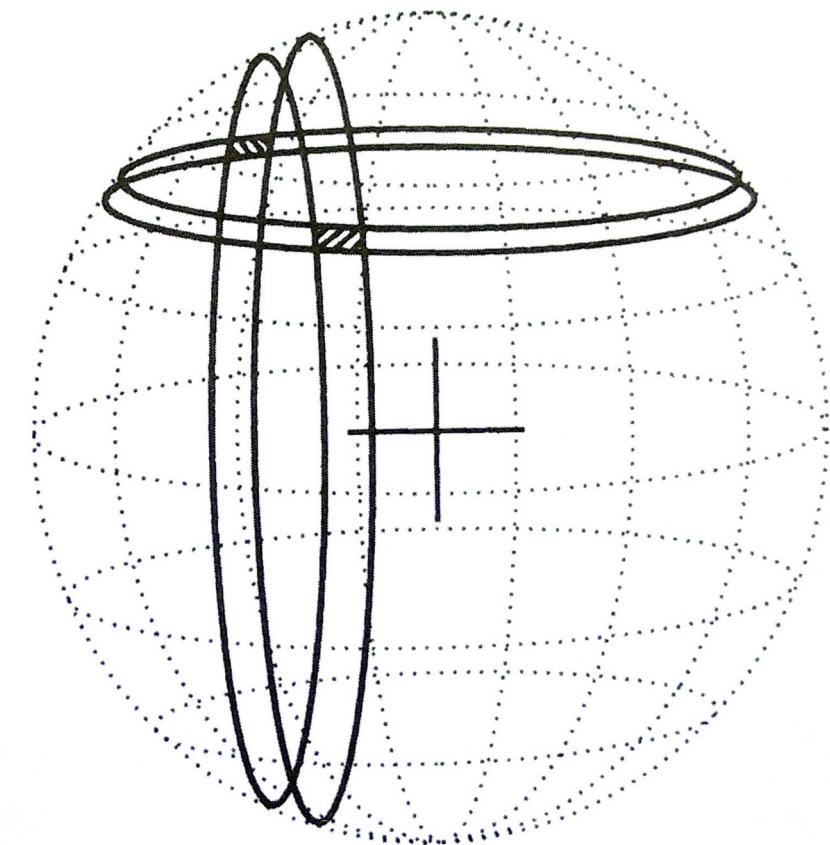
Localizzazione della sorgente

per questo scopo non ci serve un processing in tempo reale ma un preciso stampo temporale associato ai dati in tutti e due laboratori
a causa dell'incertezza di misura il cerchio si allarga e diventa un nastro che circola intorno all'asse che collega i due rivelatori

$$\Theta = \arcsin \frac{c\Delta t_{\text{sig}}}{D}$$

dove: D distanza fra gli osservatori,
 c – velocità della luce,
 Δt_{sig} – differenza nel tempo di arrivo

la precisione di localizzazione $d\Theta$
è legata alla precisione degli orologi



Localizzazione della sorgente

importanza

motivi per aumentare la precisione della localizzazione delle sorgenti e in conseguenza aumentare il numero dei rivelatori in rete:

- vista finita disponibilità temporale di ogni rivelatore aumenta la probabilità di rivelazione per intera rete
- migliora la discriminazione del segnale fra i dati rumorosi
- polarizzazione dell'onda e orientamento del rivelatore nel rispetto alla sorgente porta un informazione aggiuntiva che può essere confrontata con i modelli di emissione creati per diversi tipi di sorgenti (modello → dati)
- ottenere i dati con alto intervallo di confidenza permetterà di migliorare i modelli esistenti (dati → modello)
- interazione con astronomia EM (multimessagera) può portare ulteriore informazioni sulla distanza della sorgente e la sua natura

Virgo

Europa



parametri:

- lunghezza dei bracci: 3000 m
- masse di test: 42 kg
- potenza del laser (bracci): 200 kW
- orizzonte max (BNS O3): 60 Mpc



localizzazione:

- Italia, Cascina (PI) 43° 37' 53.08" N, 10° 30' 16.18" E alt. 53 m

anno di operatività: 2015



LIGO

Stati Uniti d'America



parametri:

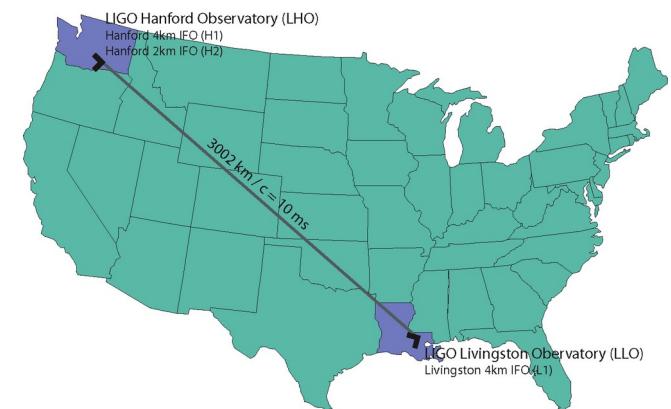
- lunghezza dei bracci: 4000 m
- masse di test: 42 kg
- potenza del laser (bracci): 650 kW
- orizzonte max (BNS O3): 120 Mpc



localizzazione:

- USA, Hanford 46° 27' 18.52" N, 119° 24' 27.56" W
- USA, Livingston 30° 33' 46.42" N, 90° 46' 27.27" W

anno di operatività: 2015



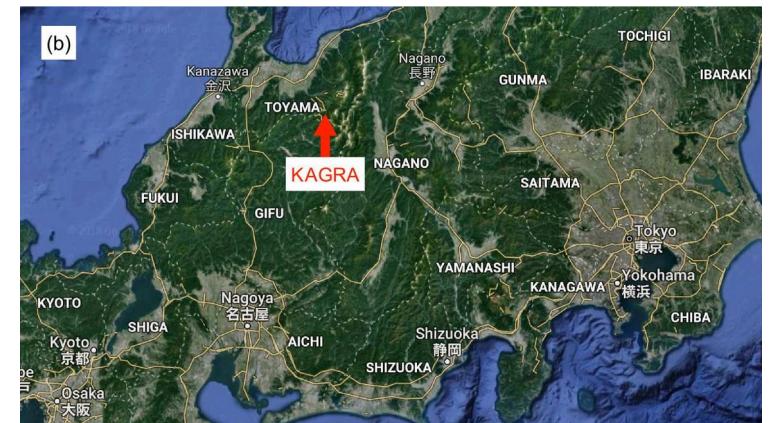
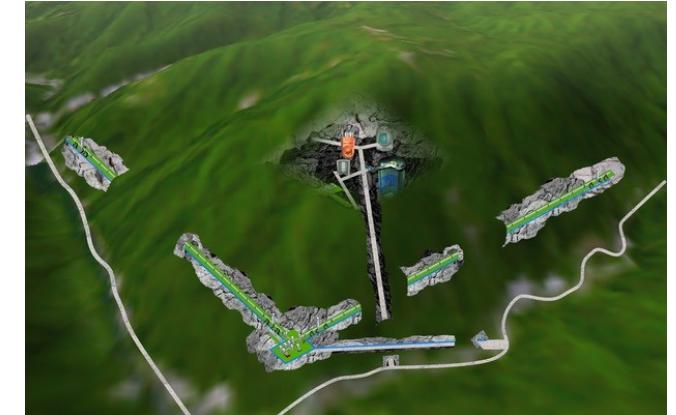
KAGRA

Giappone



parametri:

- lunghezza dei bracci: 3000 m
- masse di test: 23kg
- potenza del laser: 340 kW
- orizzonte medio: 40 Mpc



localizzazione:

Giappone, Kamioka 36° 24' 42.84" N, 137° 18' 20.88" E alt. 414 m

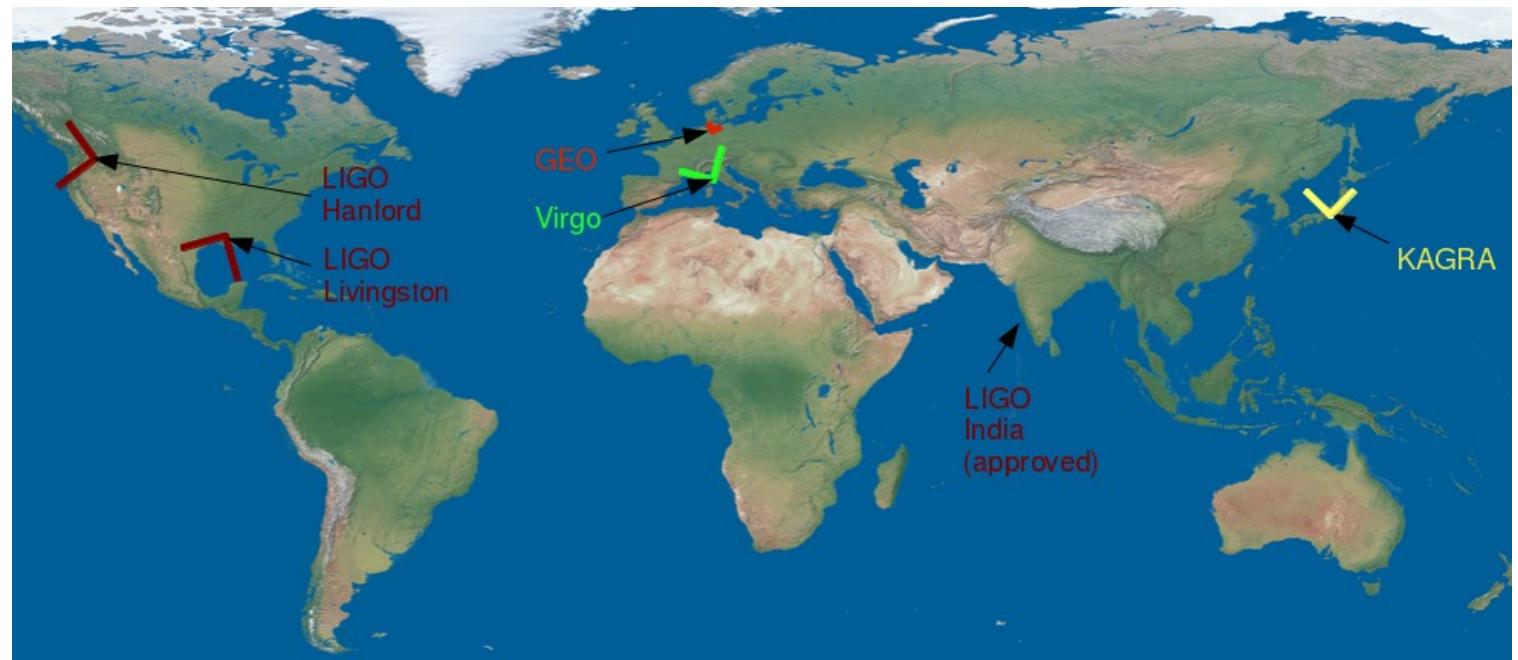
anno di operatività: 2019

La rete

reciproco scambio dei dati entro la collaborazione

pianificata e sincrona presa dati (prossimo run osservativo O4 06/2023)

presa dati sincronizzata attraverso il segnale GPS



attenzione!

unix time (anche Epoch time) = $315964800 + \text{GPS} + \text{"leap seconds"}$

Caratterizzazione della rete di osservatori

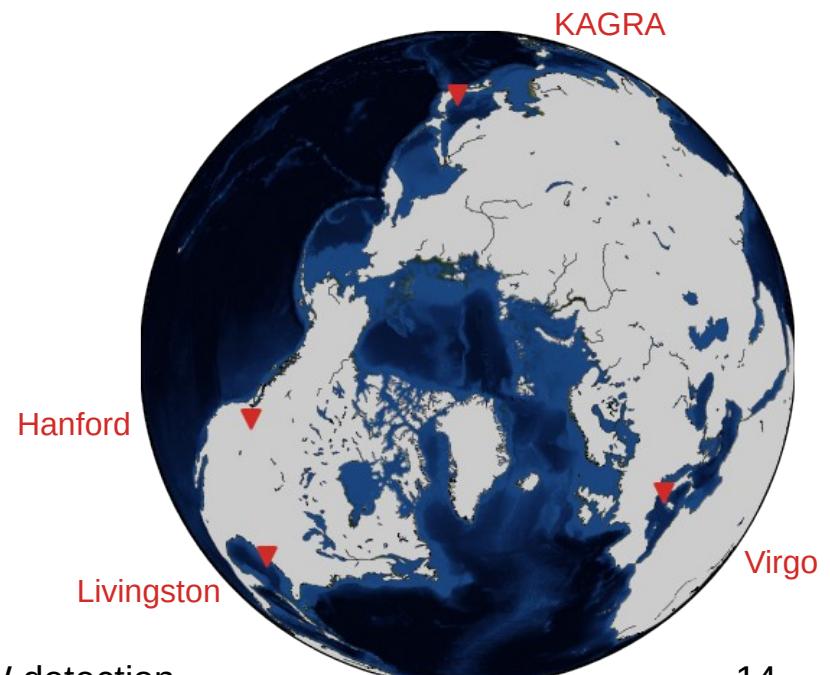
localizzazione dei rivelatori esistenti:

VIRGO Cascina $43^{\circ} 37' 53.08''$ N, $10^{\circ} 30' 16.18''$ E alt. 53 m

LIGO Hanford $46^{\circ} 27' 18.52''$ N, $119^{\circ} 24' 27.56''$ W

LIGO Livingston $30^{\circ} 33' 46.42''$ N, $90^{\circ} 46' 27.27''$ W

KAGRA $36^{\circ} 24' 42.84''$ N, $137^{\circ} 18' 20.88''$ E alt. 414 m



Risultati della rete

visualizzazione della localizzazione

aumentare la precisione della localizzazione
è l'obiettivo principale della collaborazione

- maggiore SNR del rivelatore ristinge l'area da lui fornita
- maggior numero di osservatori in rete ristinge l'area d'intersezione
- miglior modello teorico permette la stima dei parametri della sorgente più precisa



Powered by Aladin

Risultati della rete

comunicazione alla comunità astrofisica

comunità degli astronomi ha sviluppato gli standard informatici per rappresentare e scambiare i dati provenienti da diversi tipi di osservazioni.

i servizi forniti dal Virtual Observatory:

- immagini del cielo sotto le forma delle mappe
- cataloghi di osservazioni
- informazioni sugli oggetti astrofisici identificati

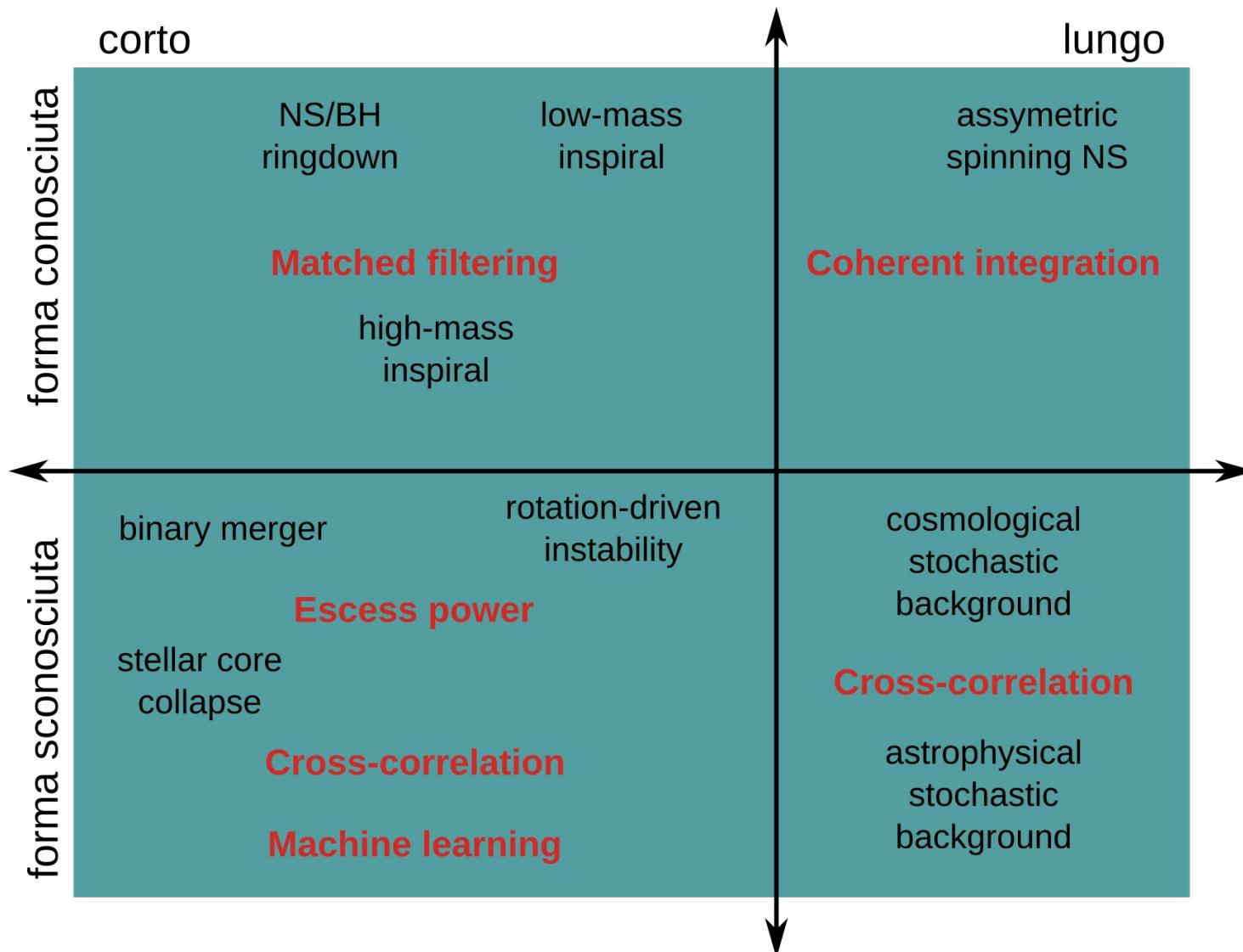
vedi:

<https://www.ivoa.net/> – Virtual Observatory

<https://aladin.u-strasbg.fr/> – Aladin

Algoritmi di analisi dati

roadmap



Rapporto segnale rumore

Signal to Noise Ratio (SNR)

definizione:

$$\text{SNR} = 2 \sqrt{\int_0^{\infty} \frac{|H(f)|^2}{S_n(f)} df}$$

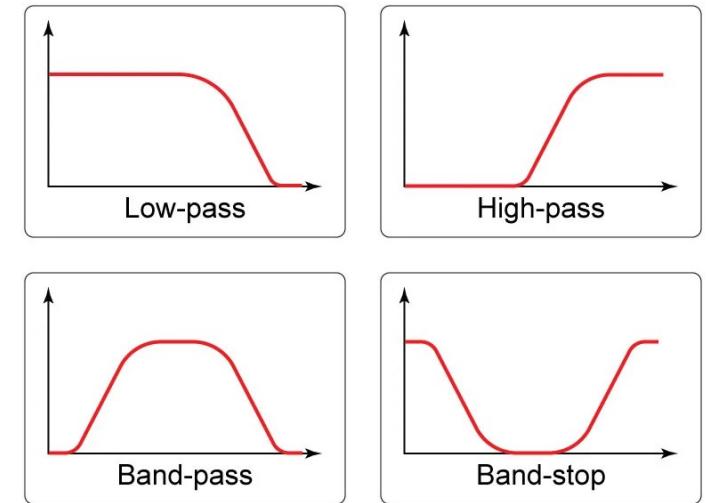
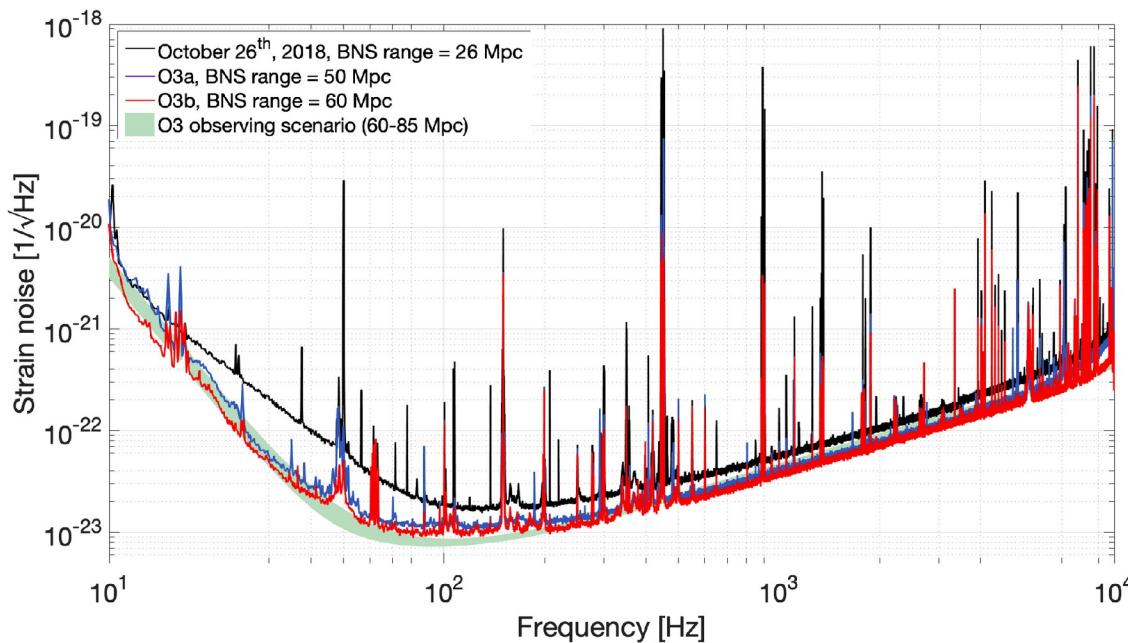
dobbiamo abbassare il fondo di rumore $S_n(f)$.

rumori provenienti dalle fonti conosciute abbiamo cercato di disaccoppiare durante la costruzione del rivelatore. Se ancora contribuiscono al segnale $h(t)$ possiamo filtrarli.

Filtr

passa basso, passa alto, passa banda, notch

in analisi dati usiamo filtri digitali per rimuovere dallo spettro del segnale $h(t)$ rumori stazionari provenienti dalle fonti dalle fonti conosciute (rete elettrica, risonanze meccaniche).



appositi filtri digitali sono già implementati nei pacchetti software per l'analisi dati (es. GWpy, PyCBC)

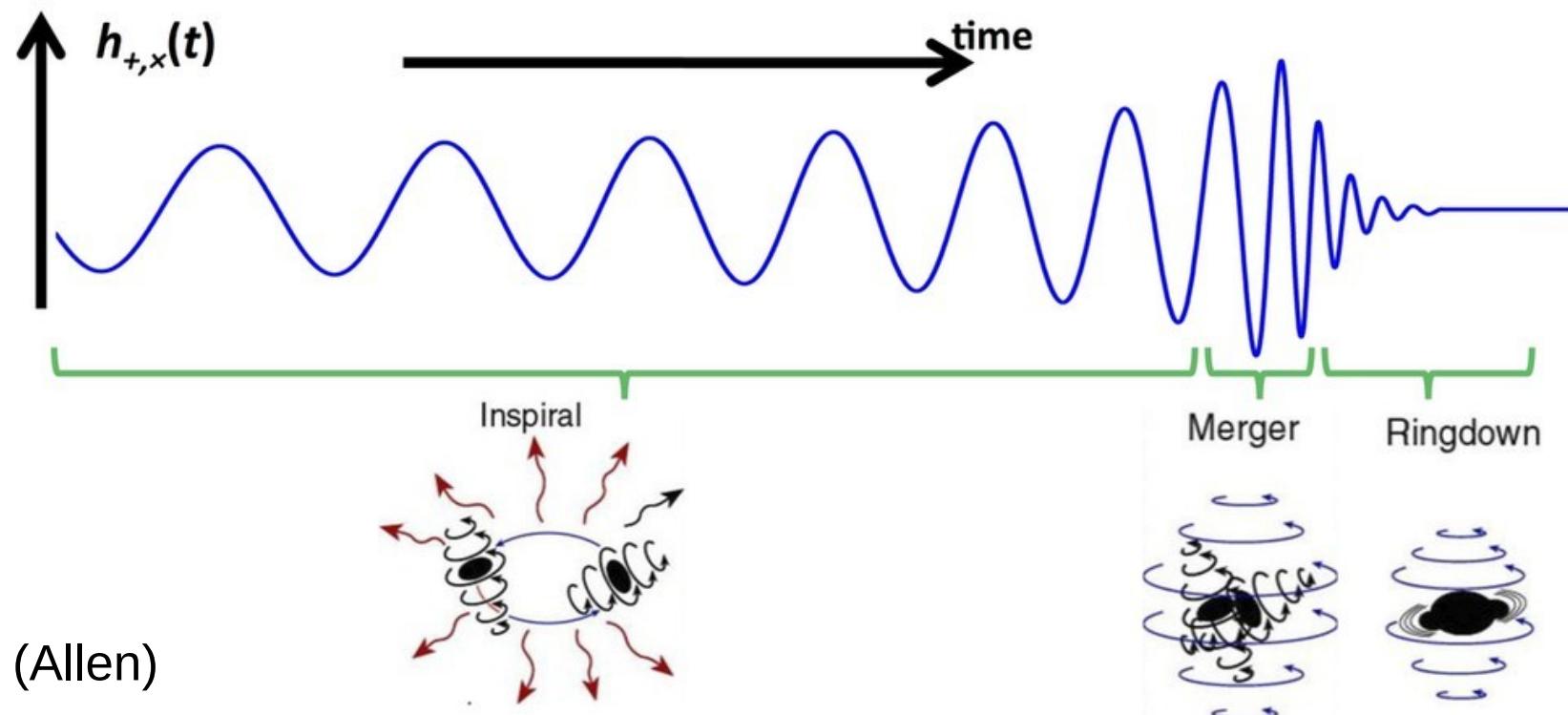
Jupyter:
• 6.2 - Digital filters

Matched filter

template for Compact Binary Coalescence (CBC)

cerchiamo una sagoma che approssima tutte le fasi dell'evento:

- avvicinamento – inspiral
- coalescenza – merger
- decadimento – ringdown



ref 2. (Allen)

Effective one-body and Numerical relativity

Effective One Body (EOB) e Numerical Relativity (NR) sono modelli di sagome prodotte dai buchi neri con lo spin allineato.

questa classe degli algoritmi è conosciuta come modelli SEOBNR.

sono basati sulla teoria EOB e le simulazioni numeriche NR.

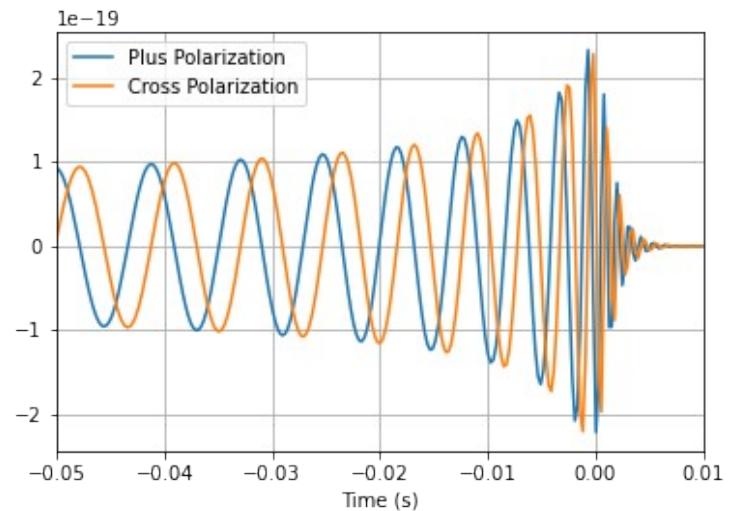
SEOBNR vengono usati nell'analisi dati per la ricerca del segnale e per l'estimazione dei parametri.

i modelli esistono in quattro versioni da 1 a 4 con crescente capacità di previsione e accuratezza.

ref. 3 (Bini)

Jupyter notebook da scaricare:

- 6.4 - Synthesize an EOB signal



Matched filter

ragionamento

- 1) Cerco l'assomiglianza di una forma d'onda nel dominio del tempo (template) con una funzione sconosciuta (segnale gravitazionale). Questo obiettivo raggiunge la correlazione incrociata.
- 2) So calcolare velocemente la convoluzione sfruttando il teorema dei sistemi LTI:
 - “In signal / image processing, convolution is defined as it is defined as the integral of the product of the two functions after one is reversed and shifted.”
 - “On the other hand, cross-correlation is known as sliding dot product or sliding inner-product of two functions.”
- 3) Posso invertire il template, calcolare la sua trasformata e implementare un calcolo veloce della correlazione incrociata. Così implemento la ricerca delle sagome nel segnale.

Matched filter

nel caso del rumore gaussiano filtro ottimale è l'operazione di correlazione incrociata della trasformata in frequenza del segnale $X(f)$ con la trasformata della sagoma invertita nel tempo $H^*(f)$ normalizzata per lo spettro di rumore del rivelatore $S_n(f)$.

$$\rho(t) = 4 \int_0^\infty \frac{X(f)H^*(f)}{S_n(f)} e^{2\pi i f t} df$$

cercare l'evento si riduce alla ricerca dei massimi di $|\rho(t)|$ oltre una soglia arbitraria.

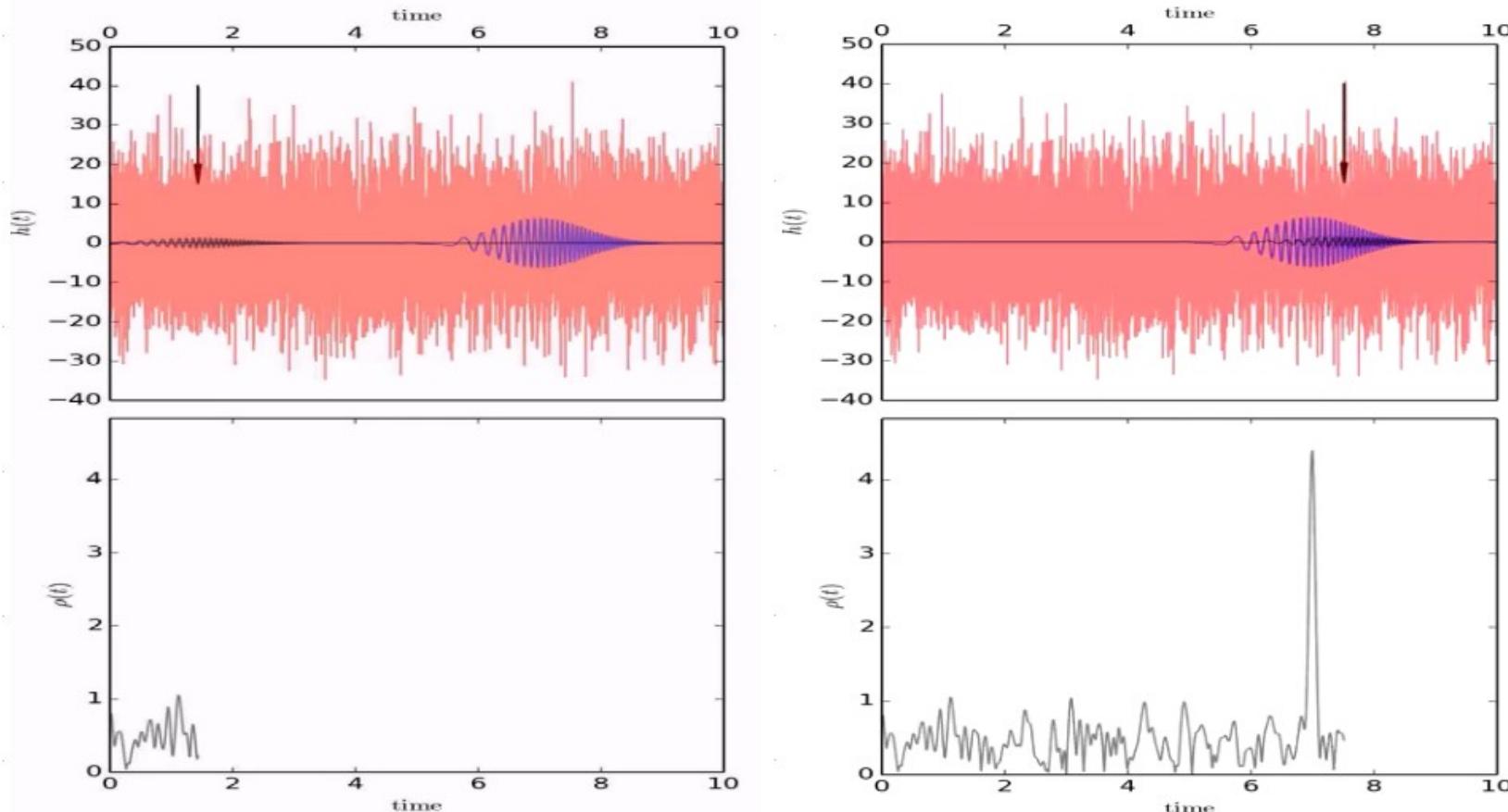
Jupyter notebook da scaricare:

- 6.3 - GW150914 Data Analysis 1

vedi lezione 4-Sistemi lineari

Matched filter

applicazione



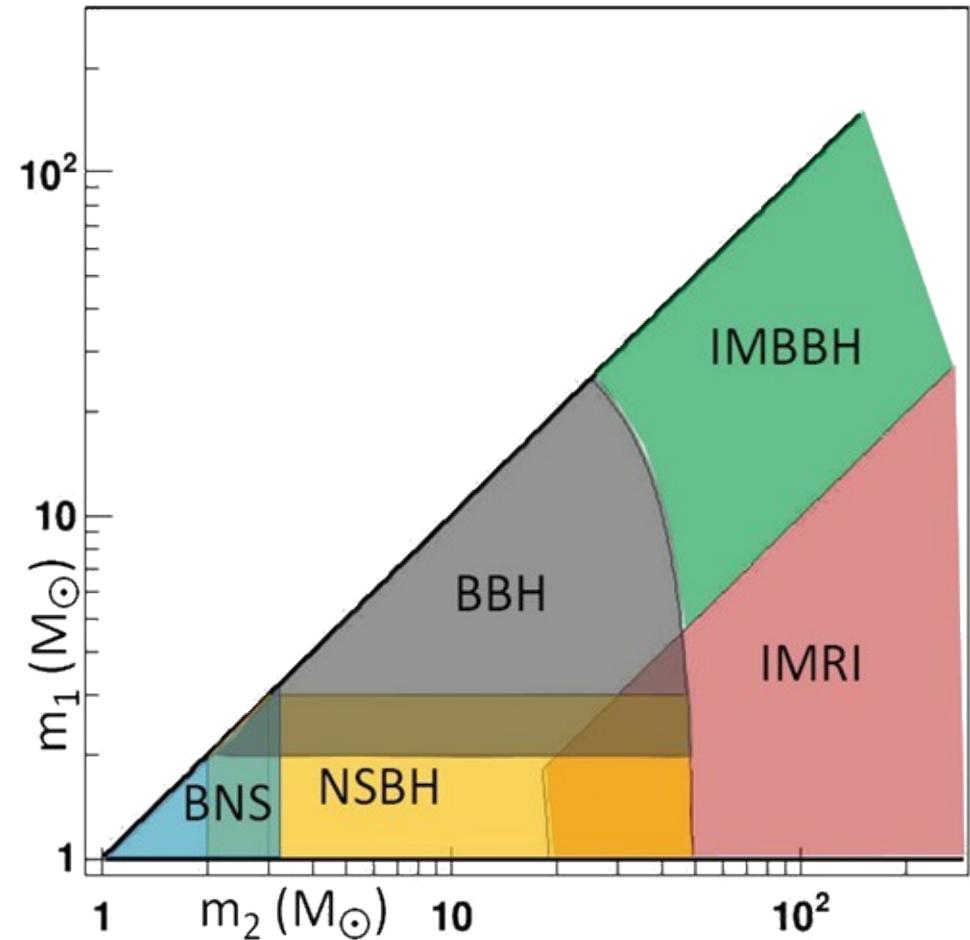
Jupyter notebook da scaricare:

- 6.5 - GW150914 Data Analysis 2
- 6.6 - Template fit and q-transform

Ricerca con matched filter

banca delle sagome

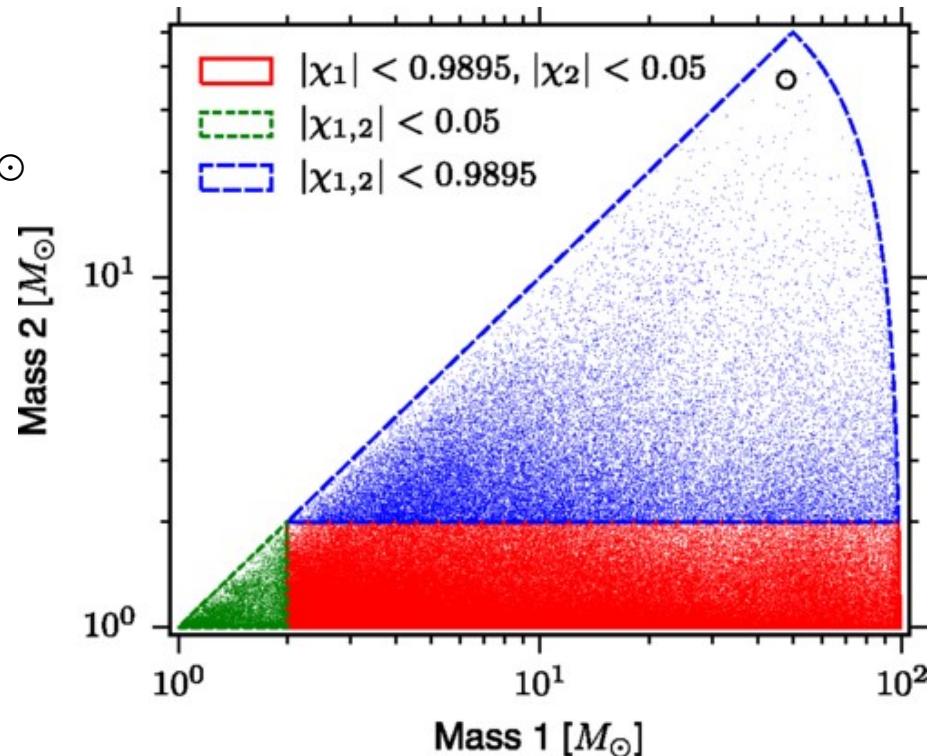
per coprire lo spazio dei possibili segnali è stata costruita una banca dei template in modo che le sagome sono distanti una dall'altra abbastanza vicine per garantire che la massima perdita dello SNR che può avvenire durante la ricerca con matched filter di 3%.



Ricerca con matched filter

banca delle sagome

- libreria di ~ 250000 sagome
- masse dei componenti: $1-99 M_{\odot}$
- massa totale: $<100 M_{\odot}$
- spin adimensionale χ_i :
 <0.99 (0.05 per $m < 2M_{\odot}$)

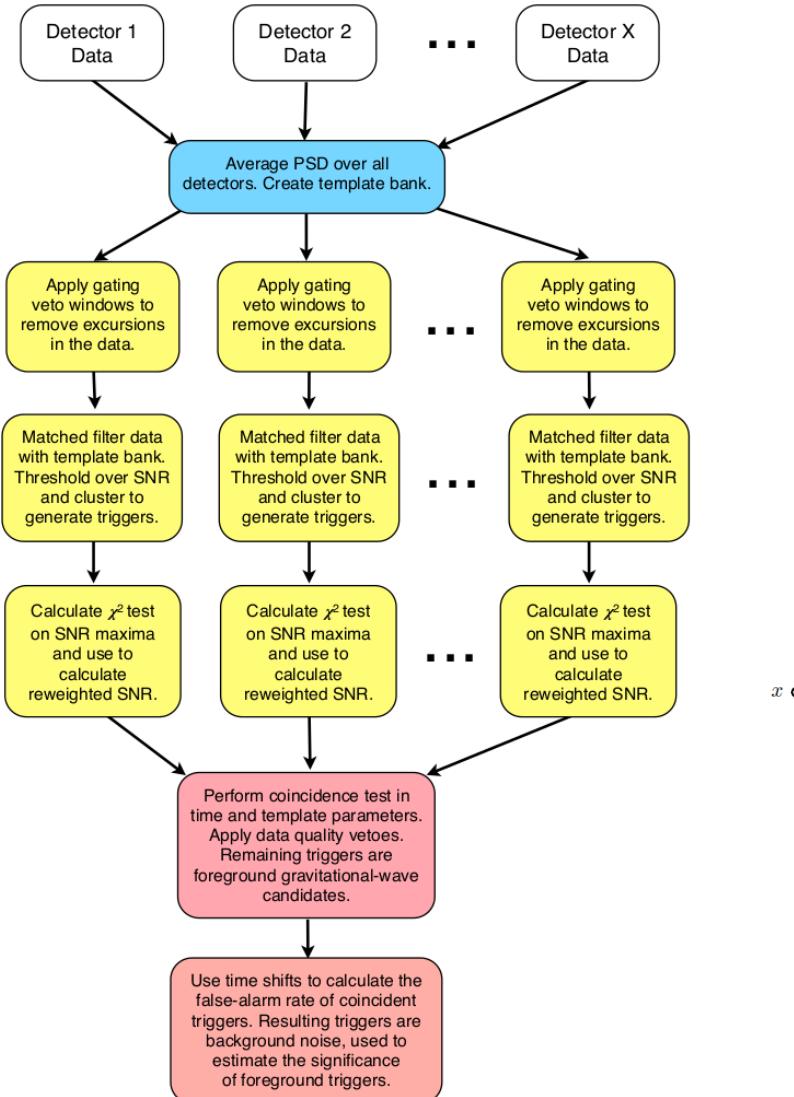


gli eventi sono suddivisi in tre categorie (rossa, verde e blu) in base alla durata della sagoma.

ref.4 (Abbott)

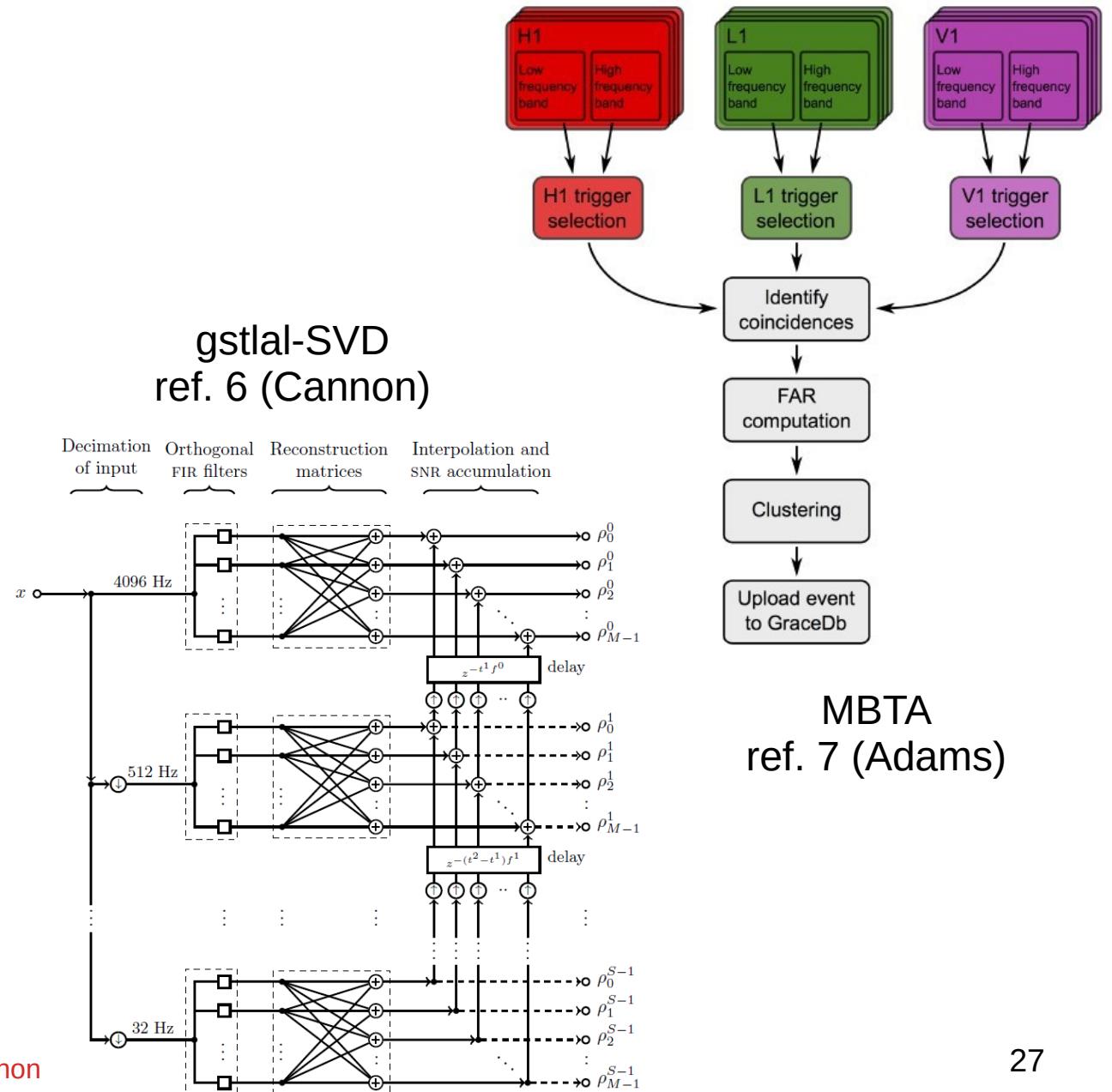
Ricerca con matched filter

Compact Binary Coalescence pipelines in LIGO e Virgo



pyCBC
ref. 5 (Usman)

questo pyCBC
della libreria python



Trigger

legame all'astrofisica multi-messaggera

trigger è un'allerta dell'evento.

trigger possono essere generati automaticamente dai pipeline o manualmente dopo l'analisi più approfondita.

un trigger viene inserito nella **GraceDB** e può essere reso pubblico.

dopo un trigger pubblico può avvenire un follow-up (elettromagnetico o di neutrini).

The screenshot shows a web browser displaying the GraceDB Public Alerts page at <https://gracedb.ligo.org/superevents/public/03/>. The page header includes links for GraceDB, Public Alerts, Latest, Search, Documentation, and Login. A message prompts users to log in to view full database contents. The main content area is titled "LIGO/Virgo O3 Public Alerts" and displays "Detection candidates: 56". A dropdown menu indicates the sort order is "EVENT ID (A-Z)". Below this, a table lists two events:

Event ID	Possible Source (Probability)	UTC	GCN	Location	FAR	Comments
S200316bj	MassGap (>99%)	March 16, 2020 21:57:56 UTC	GCN Circulars Notices VOE	[Empty box]	1 per 446.44 years	
S200311bg	BBH (>99%)	March 11, 2020 11:58:53 UTC	GCN Circulars Notices	[Empty box]	1 per 3.5448e+17	

GCN: The Gamma-ray Coordinates Network

(TAN: Transient Astronomy Network)

il sistema GCN distribuisce i comunicati con:

- la localizzazione dei burst di raggi gamma (GRB) e altri transienti rivelati dalle navicelle spaziali (la maggior parte in tempo reale quando il burst è ancora luminoso e altri post-factum a causa del ritardo nel link di comunicazione della telemetria).
- i rapporti delle osservazioni follow-up (Circulars) create dagli osservatori a terra o nello spaizio: ottici, radio, X-ray, TeV, e altri osservatori delle particelle.

questi due tipi di comunicazione costruiscono una rete per le osservazioni follow-up nel dominio di raggi gamma e altri osservatori degli eventi astrofisici.

<https://gcn.gsfc.nasa.gov/>

Significatività del segnale

veto – test chi²

per verificare di quanto i dati sono lontani dal fit possiamo eseguire il test χ^2 .

applicazione del test, specifica per i segnali gravitazionali, è descritta in ref. 8 (Allen)

- dividiamo la sagoma, che è stata usata per la rivelazione, in p parti e calcoliamo il contributo (ρ_i) di ogni parte alla ρ .
- calcoliamo il valore chi² come la somma quadratica delle differenze fra il contributo ρ_i e la porzione di ρ prevista in una parte p :

$$\chi^2 = \sum_{i=0}^p (\rho_i - \rho/p)^2$$

Jupyter notebook da scaricare:

- 6.7 - Statistical significance of GW170814 signal

Sorgenti sconosciute

Unidentified Astronomical Object UAO

- quando non conosciamo la forma del segnale?
- quando il nostro rumore non è gaussiano e non è stazionario?
- abbiamo bisogno delle pipline che non assumono la forma della sagoma!
- che cosa fare con i rumori transient?

omicron → trasformata-Q anche dei canali

ausiliari → nel caso di una coincidenza

netta con canale ausiliario pubblicare un voto

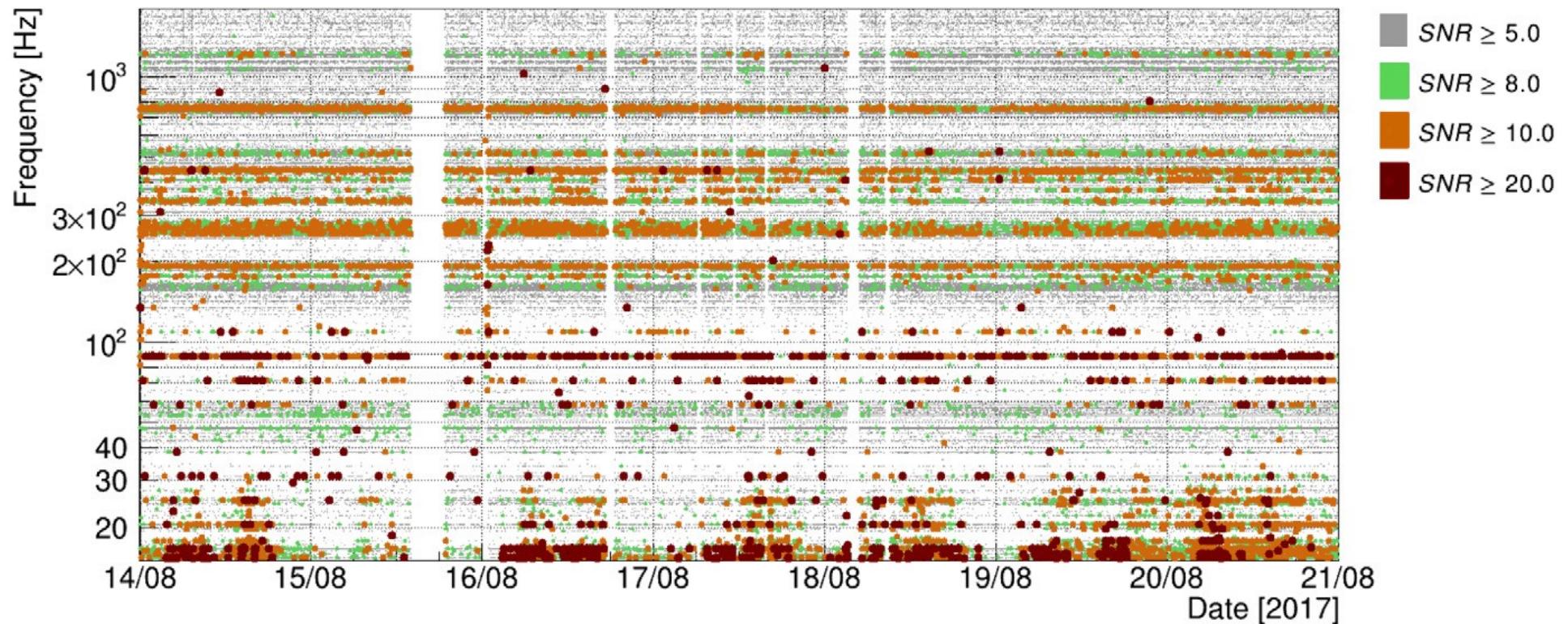


Rilevamento dei segnali gravitazionali

glitches

Omicron

distribuzione temporale e spettrale dei glitches rivelati da Omicron in Virgo durante una settimana.



Omicron è la principale sorgente di trigger e uno dei principali sorgenti di voto.

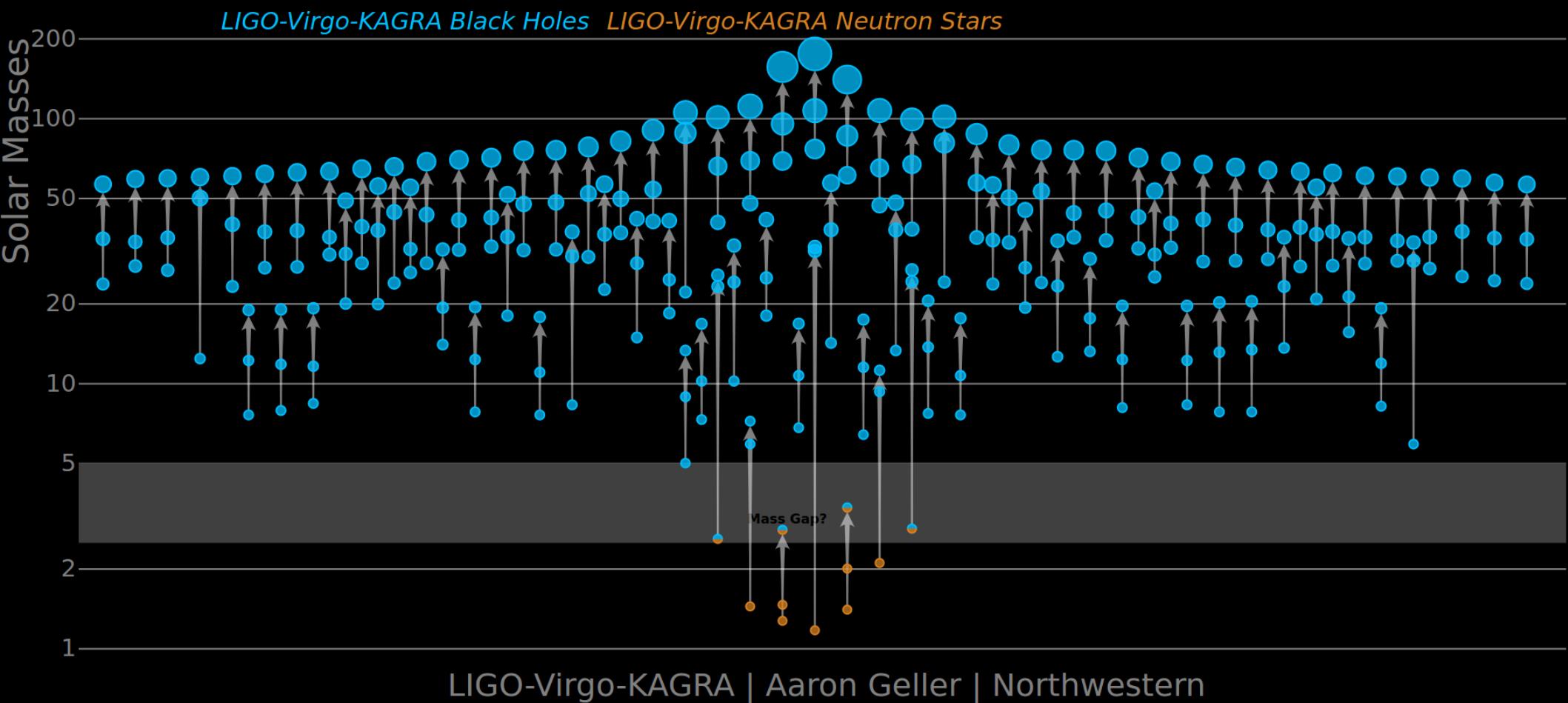
Qualità di dati

i dati vengono timbrati con le flag che indicano la loro qualità quando viene riconosciuto un accoppiamento fra i canali ausiliari e $h(t)$ le parti del segnale (secondi o ore) vengono escluse e timbrate con *data quality flag*:

- categoria 1: critical issue
- categoria 2: accoppiamento riconosciuto
- categoria 3: meccanismo dell'accoppiamento non conosciuto

algoritmi che identificano le correlazioni fra $h(t)$ e i canali ausiliari generano i voto di breve durata *data quality triggers* nella categoria 3.

Masses in the Stellar Graveyard



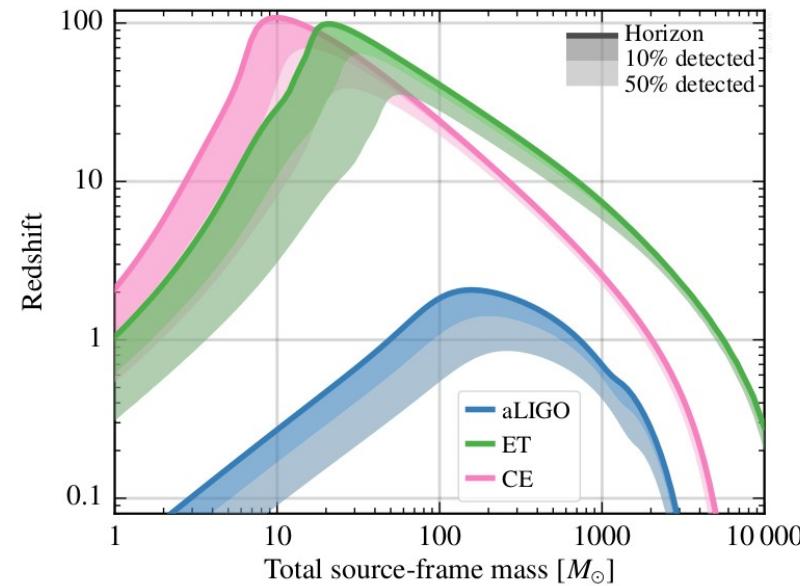
GWTC-1, GWTC-2.1, GWTC-3

Previsioni per il futuro

osservazioni

secondo la stima, Einstein Telescope rivelerà gli eventi con la frequenza:

- “*ET will detect binary black hole coalescences up to redshift $z \sim 20$, with a rate of order 10^5 – 10^6 events per year.*”
- “*ET will detect the coalescence of binary neutron stars up to $z \sim 2$ – 3 , with an estimated rate of about 7×10^4 events per year.*”



“Science Case for the EinsteinTelescope”

<https://arxiv.org/abs/1912.02622> M. Maggiore, et. al.

Glossario

- BBH – Binary black hole, a binary system composed of two black holes.
- BH – Black hole.
- BNS – Binary neutron star, a binary system composed of two neutron stars.
- burst – In the context of gravitational waves, a signal candidate that is detected without a template and without prior knowledge of the waveform. Examples of potential sources of gravitational-wave bursts include high mass BBH mergers, core-collapse supernovae, and cosmic string cusps.
- chirp mass – In a binary system, the chirp mass is a symmetric combination of the primary and secondary component masses m_1 and m_2 that parameterizes the leading-order time or frequency evolution of the gravitational-wave signal. It is usually denoted by a script “M” symbol, and is defined as $M=(m_1 m_2)^{3/5}(m_1+m_2)^{-1/5}$
- CBC – Compact binary coalescence.
- EMRI – Extreme Mass-Ratio Inspirals.
- FAR – False alarm rate, a statistic that is used to describe the significance of a gravitational-wave event. It is defined as the rate of accidental events due to detector noise or glitches, in the absence of any astrophysical sources, that are as loud as or louder than the event in question.
- FITS – Flexible Image Transport System, a format for astronomical tables, images, and multidimensional data sets. See NASA’s FITS Support Office (<https://fits.gsfc.nasa.gov>) for specifications, software, and documentation.

Glossario

- GCN – the Gamma-ray Coordinates Network (<https://gcn.gsfc.nasa.gov>), a portal for discoveries and observations of astronomical transients. Historically, GCN has served high-energy satellites but now also other electromagnetic wavelengths and also gravitational-wave, cosmic ray, and neutrino facilities.
- GraceDB – GRavitational wAve Candidate Event DataBase (<https://gracedb.ligo.org>), the official public marshal portal for LIGO/Virgo candidates.
- GRB – Gamma-Ray Burst.
- IMRI – Intermediate Mass-Ratio Inspiral.
- LHO – LIGO Hanford Observatory, site of a 4 km GW detector in Hanford, Washington, USA.
- LLO – LIGO Livingston Observatory, site of a 4 km GW detector in Livingston, Louisiana, USA.
- MassGap – compact binary systems with at least one compact object whose mass is in the hypothetical “mass gap” between neutron stars and black holes, defined here as 3-5 solar masses.
- MCMC – Markov chain Monte Carlo. A numerical algorithm for sampling complex, multidimensional probability distributions, or for integrating functions of many variables. Used extensively in gravitational-wave parameter estimation.
- NS – neutron star.
- NSBH – neutron star black hole, a binary system composed of one neutron star and one black hole.

Glossario

- primary – When referring to the two component compact objects or the masses of the two component compact objects in a binary, the primary is the more massive one, i.e., $m_1 \geq m_2$
- range – a figure of merit to describe the sensitivity of a gravitational-wave detector to a given source population at cosmologically significant distances. It is defined as the radius R of a Euclidean sphere with the volume equal to the sensitive volume V_z . It may be written as:

$$R = \sqrt[3]{\frac{3V_z}{4\pi}}$$

- secondary – when referring to the two component compact objects or the masses of the two component compact objects in a binary, the secondary is the less massive one, i.e., $m_2 \leq m_1$
- SN – supernova.
- SNR – signal-to-noise ratio, here applied to gravitational-wave signals. It is defined the square root of the integral over frequency of the power spectral density of the gravitational-wave signal over the integral over frequency of the average power spectral density of the noise.
- VOEvent – an XML format for describing astronomical transients. For the specification, see the official VOEvent IVOA Recommendation.
- VTP – VOEvent Transport Protocol, a simple TCP-based protocol for sending and receiving VOEvents, used by GCN. For the specification, see the official VTP IVOA recommendation.

Referenze

- 1) Saulson, P. R. "Fundamentals of Interferometric Gravitational Wave Detectors" capitolo: 15
- 2) Allen, B., et al. "FINDCHIRP: An Algorithm for Detection of Gravitational Waves from Inspiring Compact Binaries." *Physical Review D* 85, no. 12 (June 19, 2012): 122006. <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.85.122006>
- 3) Bini, D., et al. "High-Order Post-Newtonian Contributions to Gravitational Self-Force Effects in Black Hole Spacetimes." In *Innovative Algorithms and Analysis*, edited by Laurent Gosse and Roberto Natalini, 16:25–77. Springer INdAM Series. Cham: Springer International Publishing, 2017. https://doi.org/10.1007/978-3-319-49262-9_2
- 4) Abbott, B. P., et al. "GW150914: First Results from the Search for Binary Black Hole Coalescence with Advanced LIGO." *Physical Review D* 93, no. 12 (June 7, 2016): 122003. <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.93.122003>
- 5) Usman, S. A., et al. "The PyCBC Search for Gravitational Waves from Compact Binary Coalescence." *Classical and Quantum Gravity* 33, no. 21 (November 3, 2016): 215004. <https://doi.org/10.1088/0264-9381/33/21/215004>
- 6) Cannon, K., et al. "Toward Early-Warning Detection of Gravitational Waves from Compact Binary Coalescence." *The Astrophysical Journal* 748, no. 2 (April 1, 2012): 136. <https://doi.org/10.1088/0004-637X/748/2/136>
- 7) Adams, T., et al. "Low-Latency Analysis Pipeline for Compact Binary Coalescences in the Advanced Gravitational Wave Detector Era." *Classical and Quantum Gravity* 33, no. 17 (September 8, 2016): 175012. <https://doi.org/10.1088/0264-9381/33/17/175012>
- 8) Allen, Bruce. "A Chi-Squared Time-Frequency Discriminator for Gravitational Wave Detection." *Physical Review D* 71, no. 6 (March 18, 2005): 062001. <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.71.062001>
- 9) <https://www.gw-openscience.org/>
- 10) <https://git.ligo.org/explore/projects/starred>
- 11) <http://virtualobservatory.org/>