

UNA GUIDA AL RUMORE NEI RIVELATORI LIGO-VIRGO E ALL'ESTRAZIONE DI SEGNALI GRAVITAZIONALI TRANSIENTI

INTRODUZIONE

Le onde gravitazionali sono increspature straordinariamente piccole della struttura dello [spazio-tempo](#) che alternativamente viene stirato e compresso in misura minima quando esse lo attraversano. I due rivelatori Advanced LIGO negli Stati Uniti e Advanced Virgo in Italia misurano questa [deformazione](#), vale a dire il cambiamento relativo di lunghezza, osservando [l'interferenza](#) della luce laser che viaggia per diversi chilometri avanti e indietro lungo i bracci perpendicolari degli interferometri. Anche i più forti segnali di onde gravitazionali producono un cambiamento di lunghezza nei rivelatori LIGO e Virgo che è solo [1000 volte più piccolo del diametro di un protone](#). Estrarre questi segnali occasionali e deboli dal rumore di fondo del rivelatore è una vera sfida.

La comunità scientifica mostra un crescente interesse nei confronti dell'astronomia con le onde gravitazionali: pertanto la collaborazione scientifica LIGO e la collaborazione Virgo si sono attivate per facilitare la partecipazione all'analisi e all'interpretazione dei dati di LIGO-Virgo. In questo senso assume grande importanza la pubblicazione di una nuova guida al rumore e all'estrazione dei segnali di onde gravitazionali nei rivelatori LIGO-Virgo; l'obiettivo di questa guida è di fornire un'introduzione comprensibile ai dati dei rivelatori di onde gravitazionali, alle proprietà del rumore, e ai vari metodi di analisi dati utilizzati per rivelare e caratterizzare i segnali di onde gravitazionali. Gli esempi mostrati nella guida utilizzano dati che sono scaricabili dal Gravitational Wave Open Science Center (gw-openscience.org), insieme a guide e strumenti software per lavorare con i dati. Le collaborazioni LIGO e Virgo organizzano anche [workshops sui dati pubblici](#) offrendo ai partecipanti un'introduzione pratica al funzionamento degli strumenti software che permettono di utilizzare e analizzare i dati pubblici.

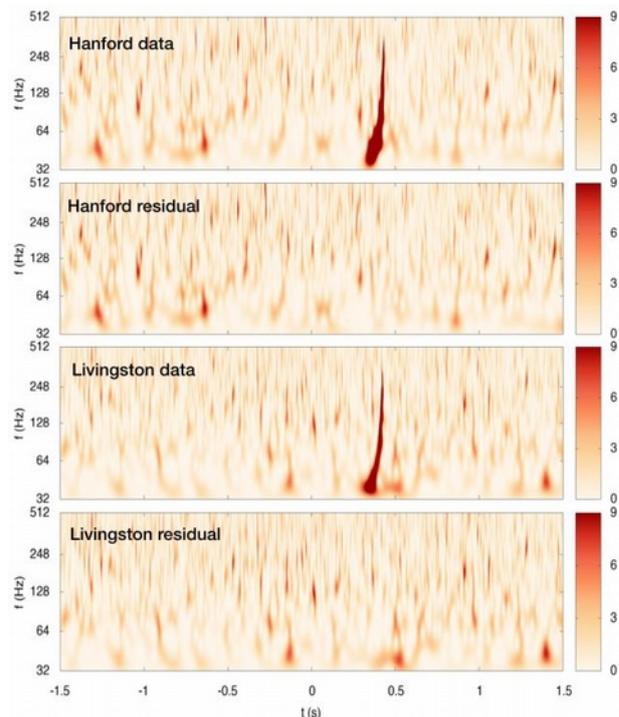
SEGNALI E RUMORE

Le tecniche usate per analizzare i dati di LIGO/Virgo sono basate sul lavoro fatto più di due secoli fa dal matematico francese [Pierre-Simon Laplace](#) e dal matematico tedesco [Carl Friedrich Gauss](#). Laplace pose le fondamenta della [teoria delle probabilità](#) che utilizziamo per inferire le proprietà delle sorgenti di onde gravitazionali, quali le loro masse, gli spin e la

posizione nel cielo. Indipendentemente, Gauss sviluppò un metodo per adattare un modello alle osservazioni che fornisce la soluzione "più verosimile". Questo concetto di "[verosimiglianza](#)" viene usato oggi nelle analisi di LIGO-Virgo, ed esprime l'idea che il [residuo](#) - ciò che resta dopo avere sottratto il modello dai dati - deve avere le proprietà del rumore.



Carl Friedrich Gauss (a sinistra) e Pierre-Simon Laplace (a destra) oltre due secoli fa hanno posto le basi delle analisi di LIGO/Virgo.



Scansioni tempo-frequenza nei rivelatori LIGO ad Hanford e Livingston al momento dell'evento di onda gravitazionale GW150914. Le scansioni dei dati mostrano delle regioni con un eccesso di potenza a forma di virgola, dovute al segnale di onda gravitazionale. Le corrispondenti scansioni dei residui dei dati, ottenute dopo avere sottratto il modello migliore per il segnale, non mostrano alcun eccesso di potenza. Questi residui risultano consistenti con un modello di rumore Gaussiano

Gauss dimostrò anche che in certe circostanze il rumore dovrebbe essere distribuito secondo una curva a campana - chiamata oggi Gaussiana o [distribuzione normale](#). Laplace sviluppò ulteriormente il lavoro di Gauss e dimostrò che il rumore di misura segue una distribuzione a campana ogni volta che viene causato da un gran numero di disturbi casuali.

I dati di LIGO-Virgo possono essere difficili da analizzare dal momento che le proprietà del rumore cambiano sia nel tempo che in [frequenza](#), e che dei transienti di rumore, [glitch](#) in inglese, causano deviazioni nelle proprietà statistiche del rumore che si discosta così dall'ideale Gaussiano. La guida all'analisi dati descrive le varie tecniche che sono state sviluppate dagli scienziati di LIGO-Virgo per seguire e mitigare gli effetti di queste fluttuazioni di rumore, e per produrre conclusioni solide e affidabili sulla [significatività](#) delle rivelazioni e sulle proprietà dei sistemi astrofisici che generano i segnali.

Nella rete LIGO-Virgo abbiamo rivelatori diversi e separati da migliaia di chilometri, fatto molto utile nell'analisi dei dati. Infatti, utilizzando le differenze dei tempi di arrivo in ciascun rivelatore, riusciamo a determinare da quale direzione nel cielo sono arrivati i segnali. Inoltre questo fatto ha un ruolo cruciale anche nella separazione dei segnali dal rumore: i segnali di onde gravitazionali producono una risposta [correlata](#) in tutta la rete, mentre il rumore in ogni strumento è scorrelato da quello negli altri. Questo permette di distinguere i segnali dalle fluttuazioni di rumore.

In passato sono state espresse preoccupazioni che i primi eventi di onde gravitazionali rivelati mostrassero segni di correlazione di rumore tra i rivelatori: in realtà dopo aver sottratto opportunamente i segnali, non c'è evidenza di correlazioni statistiche significative tra i residui. In effetti, i residui sono assolutamente in accordo con una distribuzione Gaussiana.

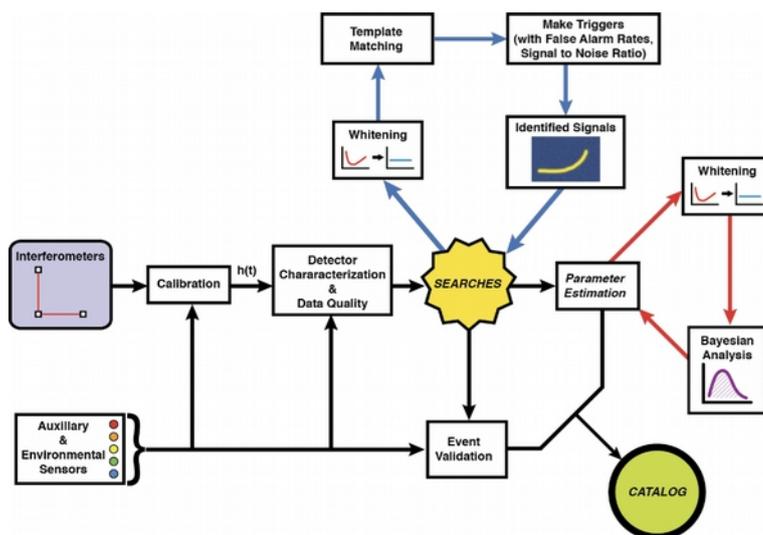


www.ligo.org
www.virgo-gw.eu
gw-openscience.org

Il preprint della guida è disponibile liberamente su:
<https://arxiv.org/abs/1908.11170>

GLOSSARIO

Deformazione: (strain in inglese) Il cambiamento relativo della distanza tra due punti di misura dovuta alla



Uno schema semplificato che mostra i passaggi principali nell'analisi dei dati di LIGO/Virgo.

ANALISI SCIENTIFICA

La guida all'analisi dati descrive le fasi principali dell'analisi di LIGO-Virgo: inizialmente si deve calibrare l'uscita del sistema che misura la variazione di lunghezza e convertirla in una misura di deformazione dovuta alle onde gravitazionali; quindi vengono fatti dei controlli di qualità per contrassegnare dati non validi; i dati quindi vengono analizzati da algoritmi di ricerca che identificano segnali candidati e assegnano loro una probabilità che siano significativi; i candidati più promettenti vengono quindi studiati ulteriormente e vengono prodotte [distribuzioni di probabilità](#) delle proprietà della sorgente; dopo ulteriori analisi e controlli di qualità dei dati, gli eventi sono aggiunti ad un catalogo di sorgenti. La guida descrive anche alcuni passaggi chiave dell'analisi, come l'utilizzo di "[finestre](#)", la stima dello [spettro](#) di rumore, e il calcolo della verosimiglianza che i dati siano coerenti con un certo particolare modello di segnale di onde gravitazionali.

deformazione dello spazio-tempo per il passaggio di un'onda gravitazionale.

Interferometro: Strumento usato in molti campi della scienza ed ingegneria che opera sommando due o più sorgenti di luce per creare una figura di interferenza che può essere misurata e analizzata e contiene informazioni sull'oggetto o fenomeno da studiare. Si veda anche [qui](#).

Glitch: Un'improvvisa esplosione di rumore nei dati degli interferometri per onde gravitazionali, simile allo scoppietto di cariche statiche udibile con un altoparlante per segnali audio, che può talvolta mascherare o simulare un vero segnale di onde gravitazionali.