

GW170814: OSSERVAZIONE DELLE ONDE GRAVITAZIONALI DALLA COALESCENZA DI DUE BUCHI NERI CON TRE RIVELATORI

L'evento GW170814 è la quarta osservazione confermata di onde gravitazionali riportata dalle collaborazioni scientifiche LIGO e Virgo dalla coalescenza di due buchi neri, e il primo segnale di questo tipo osservato dal rivelatore Advanced Virgo. Questa rivelazione mostra le migliori capacità di una rete globale di tre rivelatori (i due rivelatori Advanced LIGO più Advanced Virgo), in particolare nel localizzare nel cielo la sorgente di onde gravitazionali e nel testare la teoria della relatività generale. GW170814 segna quindi una importante svolta nel nuovo campo dell'astronomia delle onde gravitazionali.

INTRODUZIONE

Il primo agosto 2017 il rivelatore [Advanced Virgo](#) si è unito ad [Advanced LIGO](#) per il secondo ciclo di osservazione ('O2'), che è durato dal 30 novembre 2016 fino al 25 agosto 2017. Il 14 agosto 2017, alle 10:30:43 UTC, un segnale transiente di onde gravitazionali, ora identificato come **GW170814**, è stato rivelato da un programma automatizzato che analizza i dati registrati dai tre rivelatori Advanced. Il segnale era consistente con le fasi finali della coalescenza di due [buchi neri di masse stellari](#); successive analisi che hanno utilizzato tutte le informazioni disponibili dai tre rivelatori hanno mostrato una chiara evidenza del segnale anche nel rivelatore Advanced Virgo. Ciò rende GW170814 il primo evento confermato di onde gravitazionali che è stato osservato da tre rivelatori.



Veduta aerea del rivelatore di onde gravitazionali Virgo, situato a Cascina, vicino Pisa. Virgo è un interferometro di Michelson gigante con bracci lunghi 3km. (Immagine: Nicola Baldocchi / Collaborazione Virgo)

RIVELATORI E QUALITA' DEI DATI

I rivelatori LIGO e Virgo sono [interferometri di Michelson](#) giganti con bracci lunghi rispettivamente 4km e 3km. I rivelatori LIGO si trovano negli Stati Uniti mentre Virgo si trova in Italia: a Cascina, vicino Pisa. Questi tre rivelatori sono stati concepiti negli anni '90, costruiti attorno al 2000 e operativi – insieme a [GEO600](#) situato in Germania – nel decennio successivo in una configurazione iniziale. Successivamente sono stati oggetto di un programma di miglioramento pluriennale volto a migliorarne la sensibilità di circa un fattore 10 (e quindi ad aumentare il volume dell'Universo accessibile per una data sorgente di un fattore 1000).

Per LIGO, questo programma è cominciato nel 2010 ed è stato completato nel 2015 consentendo il primo ciclo di osservazione (O1) a partire dal settembre dello stesso anno. La [prima rivelazione di onde gravitazionali](#) è avvenuta pochi giorni dopo l'inizio della presa dati a cui sono seguite altre due nel [dicembre 2015](#) e [gennaio 2017](#) (in O2).

Il programma di aggiornamento di Virgo è cominciato un anno più tardi, nel 2011. L'intero apparato – dagli specchi e gli apparati da vuoto ai fotodiodi che rivelano i fasci laser – è stato migliorato e, dopo un anno di lavori, il nuovo rivelatore si è unito ad O2 il primo agosto 2017. I rivelatori LIGO e Virgo, pur usando lo stesso metodo (l'interferometria) per rivelare le onde gravitazionali e pur condividendo molte caratteristiche in comune, sono stati costruiti e vengono operati in modo del tutto indipendente.

In Figura 1 viene mostrato un confronto tra le tipiche [curve di sensibilità](#) raggiunte dai tre rivelatori vicino al tempo di GW170814. I dati sono stati puliti utilizzando sorgenti di rumore che contaminano la sensibilità in modo noto¹. Estesi controlli sullo stato ambientale e dei rivelatori in tutti e tre i siti non hanno mostrato alcun problema.

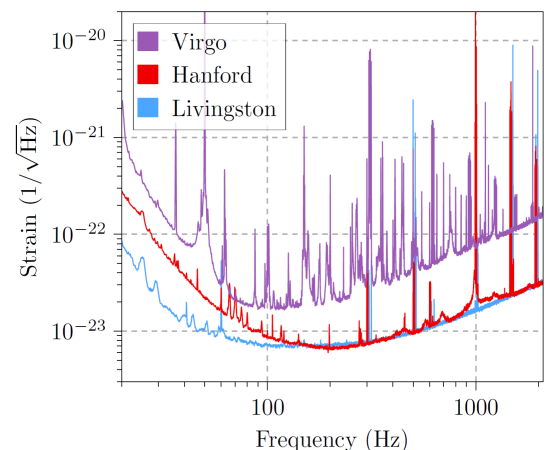


Figura 1: Questa figura (che è la Figura 2 nella nostra [pubblicazione](#)) confronta la sensibilità (indicata come 'Strain' sull'asse verticale) dei tre rivelatori in funzione della frequenza (in Hertz, sull'asse orizzontale). Da notare che entrambi gli assi sono in scala logaritmica. A una data frequenza, più bassa è la sensibilità sul grafico, più debole è il segnale che è possibile rivelare. La curva blu rappresenta la sensibilità di LIGO Livingston, la rossa quella di LIGO Hanford e la viola di Virgo.

1. Lo stesso principio è utilizzato dalle cuffie a cancellazione di rumore che monitorano l'ambiente circostante attraverso dei sensori sul dispositivo e inviano alle orecchie un segnale "opposto".

OSSERVAZIONE DI GW170814

L'identificazione di un nuovo segnale transiente di onde gravitazionali richiede diverse fasi. Per GW170814 il primo passo è consistito nell'utilizzare le cosiddette pipeline low-latency subito dopo l'acquisizione dei dati utilizzando la tecnica del filtro adattato per cercare dei trigger (cioè dei candidati) coincidenti nei tre rivelatori.

Il segnale di GW170814 è stato quindi osservato con un'elevata [confidenza](#) entro 30 secondi dal suo arrivo; è stata quindi generata un'allerta e inviata ai vari telescopi che collaborano con LIGO-Virgo. A questo punto, la confidenza della possibile rivelazione è stata calcolata con maggiore accuratezza utilizzando circa sei giorni di dati in coincidenza di LIGO e una [procedura simile](#) a quelle già utilizzate per gli eventi passati – consentendo il calcolo della [probabilità di falso allarme](#) dell'evento, ovvero quanto sarebbe necessario attendere affinché fluttuazioni di rumore nei due rivelatori possano concorrere a produrre un segnale apparente intenso almeno quanto quello osservato. Per GW170814, questa probabilità di falso allarme è inferiore a **1 ogni 27000 anni**, rendendo questa rivelazione davvero solida.

Anche Virgo ha visto questo evento di onde gravitazionali, come dimostrato da due analisi indipendenti. La prima, basata sul filtro adattato, confronta due modelli: uno assumendo GW170814 presente in tutti e tre i rivelatori (cioè includendo anche Virgo) e la seconda assumendo il segnale presente solo in LIGO più solo rumore in Virgo. Le nostre analisi hanno mostrato che il primo modello era 1600 volte più probabile del secondo. Il secondo metodo cerca segnali non modellati di onde gravitazionali con una frequenza che aumenta nel tempo – cioè come il segnale di [chirp](#) in LIGO-Livingston, 8 ms dopo in LIGO-Hanford e dopo altri 6 ms in Virgo. Questo prodotto dalla fusione di due oggetti compatti – ma senza assumere quella particolare forma d'onda. Questa analisi non è ottimale per la fusione di buchi neri ma può rivelare altri tipi di segnale ed effettua un'analisi coerente sulla rete di rivelatori consentendo di ricostruire il segnale gravitazionale. Inoltre, per tutte le rivelazioni confermate fino ad ora, le forme d'onda ricostruite sono in accordo con il modello per sistemi binari di buchi neri.

Per GW170814 sono state confrontate due analisi coerenti di questo tipo: una utilizzando solo i due rivelatori LIGO, l'altra utilizzando l'intera rete di tre rivelatori. Di nuovo, l'intensità del segnale ricostruito può essere convertita in una probabilità di falso allarme utilizzando la verosimiglianza delle fluttuazioni indipendenti di rumore che potrebbero produrre un segnale di quell'intensità. Utilizzando solo due rivelatori, il falso allarme era di circa 1 ogni 300 anni; con l'intera rete si è ridotto a meno di 1 ogni 5700 anni. Quindi, la rivelazione su tre rivelatori è favorita rispetto a quella su due. La Figura 2 mostra tre diversi modi per guardare ai dati registrati dai tre interferometri al momento dell'evento GW170814.

LOCALIZZAZIONE DELLA SORGENTE DI GW170814

La localizzazione di una sorgente nel cielo può essere stimata utilizzando le differenze dei tempi di arrivo del segnale nei vari rivelatori della rete globale. Queste differenze sono dovute al valore finito della [velocità della luce](#) – per esempio, 10 ms per i due rivelatori LIGO che si trovano a 3000 km di distanza. Assumendo che i tempi arrivo siano conosciuti con esattezza, ogni differenza di tempo sarà associata ad un cerchio nel cielo che indica le posizioni con cui è consistente. Con una rete di tre rivelatori, si possono ottenere tre differenze in tempo e quindi tre cerchi che si intersecano in due punti².

In realtà, i tempi di arrivo hanno delle incertezze, ciò vuol dire che quei cerchi si trasformano in delle bande che coprono una regione del cielo più o meno ampia quando si intersecano. Per capire meglio si può ricordare che un rivelatore interferometrico di onde gravitazionali è più simile a un microfono che a un telescopio, nel senso che può essere sensibile a segnali provenienti da più direzioni, anche se con qualche limitazione: per esempio, un'onda gravitazionale proveniente esattamente sopra (o sotto) il piano contenente i bracci dello strumento sarà osservato meglio – al contrario lo stesso segnale proveniente dalla bisettrice dei bracci sarebbe completamente invisibile. In generale, più alta è la sorgente sull'orizzonte, migliore è la risposta del rivelatore. Inoltre, ogni rivelatore ha quattro punti ciechi, tutti situati sul piano dei bracci. Se un'onda gravitazionale non è rivelata da uno degli strumenti che in principio è abbastanza sensibile per vederlo, vuol dire che il segnale veniva dalla direzione di uno di quei punti ciechi.

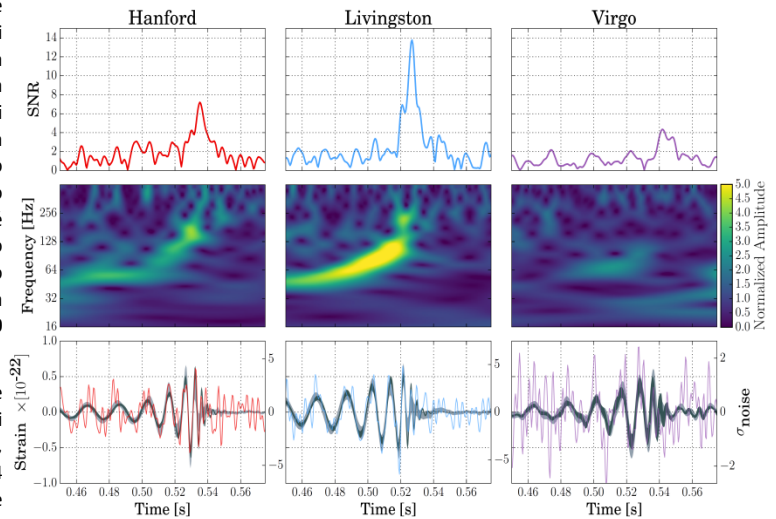


Figura 2: (Figura 1 nella pubblicazione)

In alto: Rapporto segnale rumore in funzione del tempo; I picchi sono leggermente disallineati in tempo in quanto l'onda gravitazionale viaggia alla velocità della luce che è grande ma non infinita. Quindi il segnale non raggiunge i diversi rivelatori allo stesso momento. GW170814 è arrivato prima in LIGO-Livingston, 8 ms dopo in LIGO-Hanford e dopo altri 6 ms in Virgo.
In mezzo: rappresentazione tempo-frequenza dei dati: più un pixel è brillante in ognuna di queste mappe 2D, più intenso è il segnale a quel particolare tempo e frequenza rispetto al rumore.
In basso: serie temporali con le migliori forme d'onda selezionate dal filtro adattato (curve nere) e ricerche che non utilizzano modelli.

2. Con quattro o più rivelatori, tutti i cerchi si intersecano in un singolo punto. Questo è il motivo per cui aggiungere un quarto interferometro (KAGRA in Giappone) alla fine di questa decade e un quinto (LIGO India) qualche anno più tardi migliorerà ancora di più la possibilità di localizzare il segnale dalla rete globale di rivelatori.

La figura 3 riassume la localizzazione della sorgente di GW170814 nel cielo fornita dalle analisi successive: localizzazione rapida solo con i rivelatori LIGO in blu; con aggiunta di Virgo in arancione; stima completa dei parametri in verde. La rete di rivelatori può anche fornire una stima della distanza della sorgente come mostrato dal grafico a destra in Figura 3. La localizzazione della sorgente è essere effettuata in tre dimensioni. Nei casi più favorevoli, il volume più probabile potrebbe contenere solo un numero limitato di galassie, semplificando quindi la ricerca per una controparte visibile con i telescopi. Per GW170814, 25 telescopi hanno provato ad osservare la sorgente ma nessuna parte elettromagnetica è stata trovata. Ad ogni modo, nessun altro tipo di emissione, oltre alle onde gravitazionali, è previsto per la fusione di sistemi binari di buchi neri.

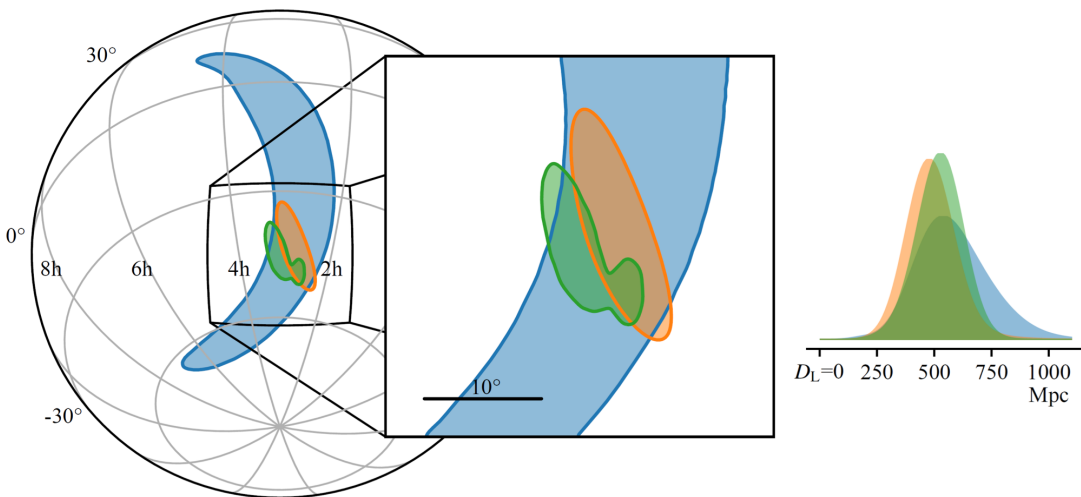


Figura 3: Localizzazione nel cielo di GW170814. La parte sinistra della figura confronta le regioni di cielo selezionate da analisi differenti come le più probabili per contenere la sorgente di GW170814. Queste sono chiamate regioni al 90% di [confidenza](#) in quanto sono definite dal 90% di probabilità che la sorgente si trovi al loro interno. L'area blu corrisponde alla localizzazione rapida basata sui dati dei due interferometri LIGO. Aggiungendo Virgo si ha l'area arancione, che è più di un ordine di grandezza più piccola: 100 gradi quadrati contro 1160. Infine, la regione verde è il risultato della stima dei parametri dall'analisi completa; un'area di 60 gradi quadrati usando tutti e tre i rivelatori, da confrontare con i 700 gradi quadrati ottenuti utilizzando solo i due interferometri LIGO. Per la stima dei parametri.

La parte destra della figura confronta le distribuzioni di probabilità per la [distanza di luminosità](#) della sorgente. Aggiungendo Virgo vengono tagliate fuori le code della distribuzione che corrispondono alle distanze maggiori, trovando la distanza più probabile della sorgente che è 540 Mpc.

MISURA DEI PARAMETRI DI GW170814

Un'accurata stima dei parametri di GW170814 è stata fornita dagli stessi [metodi di analisi](#) già utilizzati per le precedenti rivelazioni – ovvero confrontando i segnali rivelati con due famiglie di modelli di forme d'onda indipendenti, le cui caratteristiche dipendono dai parametri che si vogliono misurare. Migliore è la corrispondenza tra la forma d'onda generata per un dato set di parametri e il segnale, più vicini sono i parametri ai loro valori veri.

I dettagli di come sono stati misurati i parametri di GW170814 possono essere trovati nella nostra [pubblicazione](#) o nel [foglio informativo dell'evento](#). Per esempio, la Figura 4 mostra i limiti sulle masse dei buchi neri iniziali.

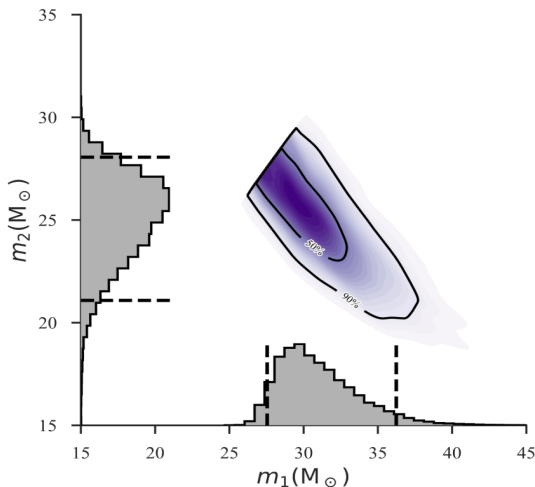


Figura 4: (pannello superiore della Figura 4 dalla nostra pubblicazione): misura delle masse iniziali (in unità di masse solari) dei due buchi neri di GW170814. La stima delle masse è stata effettuata simultaneamente, i limiti sulle masse sono mostrati nel piano m_2 vs. m_1 (dove adottiamo la convenzione che $m_2 \leq m_1$): più scuro il colore, maggiore è la probabilità che le masse siano uguali a quelle della coppia di valori (m_1, m_2) . I contorni neri mostrano le regioni rispettivamente al 50% e 90% di confidenza. In più, vengono mostrate le distribuzioni di probabilità per le masse individuali dei buchi neri su entrambi gli assi. Le masse più probabili per i due buchi neri sono 30 e 25 masse solari rispettivamente.

TEST DELLA RELATIVITA' GENERALE CON GW170814

Come nelle precedenti rivelazioni, per GW170814 abbiamo effettuato test della [relatività generale](#) simili a quelli [già effettuati](#) per gli eventi scorsi. I risultati sono consistenti con le previsioni teoriche della teoria di Einstein e simili a quelli già ottenuti in precedenza. Analisi più approfondite saranno affrontate in pubblicazioni future.

Utilizzare una rete di rivelatori che hanno orientamenti dei bracci differenti (i due LIGO sono quasi allineati tra di loro ma non Virgo) permette anche uno studio della [polarizzazione](#) delle onde gravitazionali – ovvero come deformano lo [spazio-tempo](#) al loro passaggio.

La relatività generale prevede che, le onde gravitazionali siano onde **trasversali**, questo vuol dire che allungano e comprimono lo spazio-tempo nel piano perpendicolare alla loro direzione di propagazione. Le deformazioni permesse sono solo di due tipi ('polarizzazioni'), chiamate '+' ('plus') e 'x' ('cross'). Il loro effetto su un anello di particelle è mostrato nei pannelli (a) e (b) di Figura 5.

Matematicamente parlando, una generica teoria **metrica della gravitazione** può permettere fino a sei diversi tipi di polarizzazione. Ogni stato aggiuntivo di polarizzazione andrebbe a deformare lo spazio-tempo in un modo diverso, cambiando la risposta del rivelatore al segnale. Questo comportamento potrebbe essere rivelato confrontando il segnale in due strumenti non paralleli, possibili differenze infatti potrebbero non essere spiegabili dalla relatività generale.

Un primo test della polarizzazione delle onde gravitazionali è stato condotto con i dati di GW170814. In particolare, l'intera stima dei parametri descritta sopra è stata effettuata una seconda volta – questa volta permettendo polarizzazioni proibite in relatività generale. Tutte le polarizzazioni alternative provate sono risultate essere sfortunate da questa analisi, indicando di nuovo come i dati di GW170814 siano consistenti con la teoria di Einstein.

CONCLUSIONI

GW170814 è la quarta coalescenza di buchi neri in un sistema binario confermata dalla collaborazione LIGO-Virgo. I buchi neri osservati sono simili a quelli del primo (GW150914) e terzo (GW170104) evento e sono consistenti con i dati sulla popolazione e sulla frequenza di questo tipo di eventi dedotto dalle precedenti osservazioni.

Quello che rende questo evento abbastanza unico è che questa è la prima rivelazione effettuata da tre rivelatori: i due rivelatori LIGO e da Virgo. Una rete di tre rivelatori ha un enorme potenziale scientifico come dimostrato da GW170814 grazie ad grazie al miglioramento della localizzazione della sorgente (distanza e coordinate nel cielo) e da una migliore possibilità di poter effettuare test sulla relatività generale. Con la terza sessione di presa dati di LIGO-Virgo, 'O3', in programma tra circa un anno nel 2018, le prospettive per l'astronomia delle onde gravitazionali sono estremamente rosee.

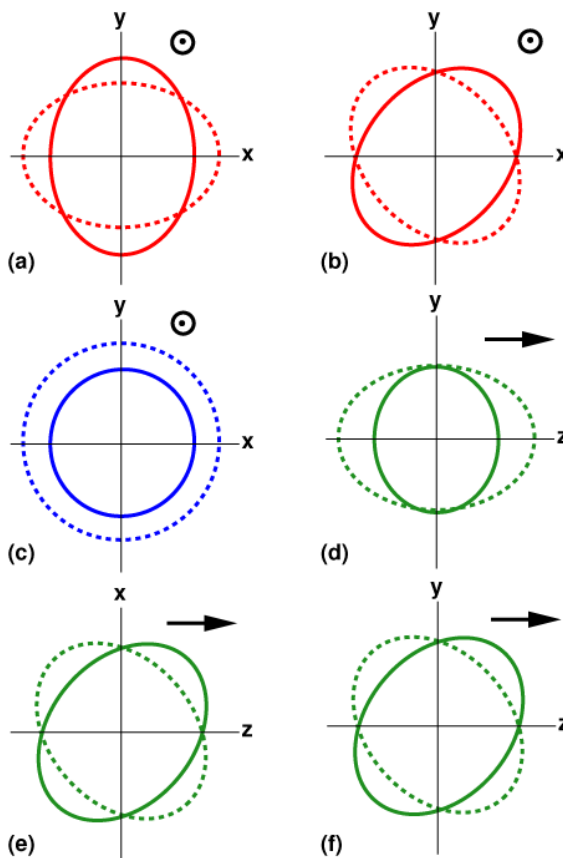


Figura 5: Rappresentazione delle sei polarizzazioni permesse nelle teorie "metriche" generali. I pannelli (a) e (b) mostrano rispettivamente le polarizzazioni '+' e 'x' permesse dalla Relatività Generale. In questi due casi la deformazione dello spazio tempo è sul piano perpendicolare alla direzione di propagazione dell'onda gravitazionale (perpendicolare alla pagina): un anello di particelle viene allungato in una direzione mentre è compresso nella direzione perpendicolare e viceversa. Nei pannelli da (c) a (f) vengono mostrate polarizzazioni non ammesse dalla Relatività Generale. Nel pannello (c) è ancora una polarizzazione trasversale, mentre nei pannelli da (d) a (f) vengono illustrate deformazioni che si propagano in una direzione (mostrata dalla freccia) che si trova sullo stesso piano della deformazione spazio-temporale. (Crediti: Clifford Will – Living Reviews in Relativity).



Visita i nostri siti web:

<http://www.ligo.org>

<http://www.virgo-gw.eu>



E' possibile leggere l'articolo completo, accettato per la pubblicazione in **Physical Review Letters** [qui](#).

GLOSSARIO

- **Buco Nero:** Una regione dello spazio tempo creata da un oggetto estremamente compatto dove la gravità è talmente forte che nulla può uscirne, nemmeno la luce.
- **Forma d'onda gravitazionale:** Una curva che descrive come la perturbazione causata dall'onda gravitazionale varia nel tempo.
- **Rumore:** Fluttuazione nella misura del segnale dell'onda gravitazionale causato da vari effetti sia strumentali che ambientali. La sensibilità di un rivelatore di onde gravitazionali è limitata dal rumore.
- **Presenza dati:** Un periodo di osservazione in cui i rivelatori prendono dati.
- **Sensibilità:** una descrizione della capacità del rivelatore di rivelare un segnale. I rivelatori con rumore più basso possono rivelare segnali più deboli e quindi si dicono avere una maggiore sensibilità.
- **Strain:** La variazione percentuale nella distanza tra due punti di riferimento dovuta alla deformazione dello spazio-tempo causata dal passaggio di un'onda gravitazionale.