

## IL FONDO ISOTROPO DI ONDE GRAVITAZIONALI: LIMITI SUPERIORI OTTENUTI DAI PRIMI TRE PERIODI OSSERVATIVI DI ADVANCED LIGO ED ADVANCED VIRGO

La [radiazione cosmica di fondo](#) (CMB, dall'inglese Cosmic Microwave Background) è la radiazione elettromagnetica più antica che è possibile osservare e che quindi ci dà informazioni sull'origine dell'Universo. Esiste anche una [radiazione gravitazionale di fondo](#) (GWB, dall'inglese Gravitational Wave Background) che è dovuta alla sovrapposizione delle onde gravitazionali generate da diverse sorgenti astrofisiche e cosmologiche, e che ci permette di raggiungere tempi ancora più remoti grazie al debole accoppiamento tra onde gravitazionali (GW, dall'inglese Gravitational Waves) e materia.

Come esempi di sorgenti astrofisiche ricordiamo le [fusioni di sistemi binari compatti](#) (CBC, dall'inglese Compact Binary Coalescences) non risolte individualmente e le [supernove da collasso del nucleo](#). Sappiamo predire in modo approssimato l'intensità del fondo che proviene da CBC distanti, ma l'intensità del fondo da supernove al momento ha ampiezza ignota, benché siamo sicuri che ci sia. Inoltre ci sono anche sorgenti a livello più speculativo come le [stringhe cosmiche](#), l'[inflazione](#) e le [transizioni di fase di primo ordine](#), che sono alcuni esempi di sorgenti cosmologiche. Rivelare una qualunque di queste sorgenti del GWB costituirebbe un grande successo e ci fornirebbe conoscenze fondamentali in processi astrofisici e/o cosmologici.

Abbiamo analizzato i dati dei primi tre periodi osservativi di Advanced LIGO and Advanced Virgo (O1, O2 e O3). Non siamo riusciti a rivelare nulla, anche se abbiamo messo dei limiti più stringenti di quelli precedenti sull'intensità del GWB grazie agli ultimi dati di O3 (si veda la Figura 1).

Abbiamo migliorato la sensibilità della nostra ricerca applicando una procedura per la rimozione del rumore. Nel corso di questa procedura ci siamo assicurati che – al meglio della nostra conoscenza – non ci fosse alcun segnale correlato proveniente dal rumore ambientale, come quello da sorgenti strumentali, geologiche o dovute all'attività umana. Inoltre abbiamo ridotto l'effetto dei [glitch](#) più intensi con una tecnica chiamata gating, usata per la prima volta nella ricerca del GWB, che però è standard nelle ricerche di CBC. Consiste nell'azzeramento di ogni glitch nel [dominio del tempo](#). Questa è anche la prima volta in cui nella nostra ricerca del GWB abbiamo incluso dati dell'[interferometro](#) Virgo in aggiunta ai due strumenti LIGO. I dati di questi interferometri sono stati correlati e usati per determinare il limite superiore sull'ampiezza del GWB con un [livello di credibilità](#) del 95% per mezzo dell'[inferenza Bayesiana](#). La [correlazione incrociata](#) dei dati ci ha permesso di rimuovere il rumore ambientale restante dalla nostra analisi, assumendo che esso sia scorrelato nei diversi interferometri. I rivelatori con lo stesso allineamento e la stessa posizioni sono quelli più sensibili al GWB, ma anche alle sorgenti di rumore localizzate. Perciò la sensibilità al GWB è dominata dalla coppia di interferometri LIGO che sono quelli più allineati e vicini, benché la loro sensibilità sia comunque significativamente inferiore a quella massima. Il contributo del rivelatore Virgo alla sensibilità è solo di qualche percento, a causa della distanza ed orientamento in confronto ai rivelatori LIGO. Grazie allo sforzo ininterrotto di tutti gli scienziati nel miglioramento degli interferometri il nostro limite superiore attuale è migliore di un fattore 5 rispetto ai risultati precedenti. Benché una parte di questo miglioramento sia dovuta semplicemente alla maggiore quantità di dati, il contributo principale viene dall'aumento di sensibilità. Se gli interferometri avessero funzionato con la stessa sensibilità di O2 i dati aggiuntivi avrebbero migliorato il limite superiore di meno di un fattore 2.

Siamo andati anche a caccia di correlazioni globali con il rumore magnetico conosciuto come "[risonanze di Schumann](#)", utilizzando sensori di campo magnetico dedicati a questa ricerca e posizionati accanto ai tre interferometri. Identificare le risonanze di Schumann è necessario perché possono sembrare effettivamente un fondo ed inquinare così il nostro segnale. I campi magnetici si accoppiano con parti critiche di un interferometro, come ad esempio i magneti usati per controllare gli specchi alle estremità e quindi l'interferometro. Se questo accoppiamento è abbastanza forte può imitare un segnale osservabile, dove lo spostamento dello specchio non è dovuto al transito di un'onda gravitazionale, ma ai campi magnetici. Per tale motivo le risonanze di Schumann possono causare correlazioni elevate che potrebbero portarci ad un'identificazione errata del GWB.

Per costruire una predizione di possibile contaminazione magnetica abbiamo bisogno di due ingredienti (si veda la Figura 2). Il primo è un'accurata misura del campo magnetico con i sensori dedicati in ciascun sito. Il secondo è una misura di come questi campi magnetici si accoppiano ai nostri interferometri e hanno dunque la possibilità di introdurre un "falso segnale di onda gravitazionale". Per determinare questo accoppiamento usiamo una bobina per creare intensi campi magnetici vicino all'interferometro e osservare il loro effetto sull'inferenza di un falso segnale di onda gravitazionale, mentre misuriamo con cura anche i campi magnetici. Cerchiamo la contaminazione magnetica in due modi. Anzitutto cerchiamo la contaminazione in ciascun [intervallo di frequenza](#). Secondariamente, cerchiamo di capire se la somma delle contaminazioni magnetiche in diversi intervalli di frequenza si possa accumulare per dare un risultato che è al di sopra del nostro limite di sensibilità.

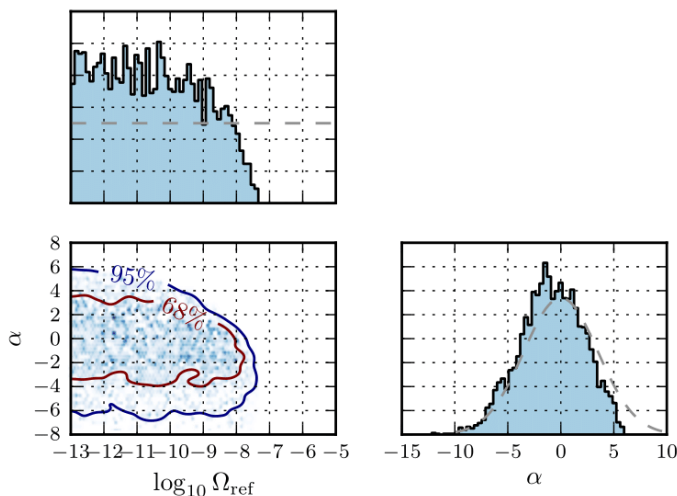


Figura 1: Grafico che mostra le distribuzioni di probabilità dell'ampiezza della radiazione gravitazionale di fondo  $\Omega_{ref}$  e l'indice spettrale  $\alpha$  in  $\Omega_{ref}(f/25 \text{ Hz})^\alpha$ , che rappresenta la nostra ipotesi sul modo in cui il GWB dipenda dalla frequenza  $f$  (che include la dipendenza dalla frequenza di un certo numero di possibili sorgenti). Queste distribuzioni mostrano che i dati preferiscono valori inferiori di  $\Omega_{ref}$ . Le linee tratteggiate grigie rappresentano le nostre assunzioni "a priori" relativamente ai valori di questi parametri. Le curve al 68% e 95% racchiudono regioni che corrispondono a queste probabilità.

Visitate in nostri siti web:

[www.ligo.org](http://www.ligo.org)

[www.virgo-gw.eu](http://www.virgo-gw.eu)

[gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/](http://gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/)



In conclusione stimiamo che le misure di rumore magnetico correlato siano molto al di sotto della sensibilità che abbiamo raggiunto in O3, sia nei singoli intervalli di frequenza, sia in una somma su frequenze multiple (si veda la Figura 2). Inoltre abbiamo implementato un sistema basato sull'inferenza Bayesiana per determinare contemporaneamente un GWB e le risonanze di Schumann nei nostri dati. In accordo con i nostri altri metodi, nei dati non troviamo segnali né di GWB né delle risonanze di Schumann. Ciononostante, questo nuovo sistema sarà estremamente utile nelle future ricerche, quando la nostra sensibilità sarà ancora migliore.

Abbiamo stabilito anche limiti superiori su un fondo di onde gravitazionali scalari o vettoriali [polarizzate](#). Si tratta di [polarizzazioni "proibite"](#) dalla [relatività generale](#), dove sono consentite solo onde gravitazionali tensoriali polarizzate. L'osservazione di polarizzazioni alternative indicherebbe che la teoria della relatività generale di Einstein deve venire modificata in qualcosa di più complicato. Queste ricerche di polarizzazioni non previste dalla relatività generale hanno beneficiato dell'aggiunta dei dati di Virgo perché aggiungere rivelatori alla rete di strumenti aiuta a distinguere polarizzazioni differenti. Non abbiamo trovato evidenza di queste polarizzazioni "proibite". Altre osservazioni di onde gravitazionali sono anch'esse compatibili con l'aver polarizzazioni puramente tensoriali, in particolare l'osservazione del segnale del sistema binario di stelle di neutroni [GW170817](#).

Abbiamo anche usato un modello per predire il GWB dovuto ai sistemi binari compatti (si veda la Figura 3), che potrebbe essere la prima sorgente di GWB a venire rivelata da LIGO e Virgo, secondo quanto discusso [qui](#). Abbiamo incorporato le osservazioni più recenti del catalogo [GWTC-2](#) di LIGO-Virgo. Abbiamo scoperto che il GWB potrebbe effettivamente venire osservato da una versione migliorata degli attuali rivelatori noti come [LIGO A+](#) e [Advanced Virgo Plus](#). Abbiamo anche analizzato congiuntamente il GWB e osservazioni individuali di sistemi binari compatti. Poiché il GWB è sensibile a fusioni di sistemi binari che si trovano a distanze maggiori di quelli che sono osservabili individualmente, è possibile che le misure del GWB possano migliorare le stime della frequenza di fusioni di buchi neri binari nel primo Universo. Benché questo non succeda nel caso di O3, dimostriamo che il GWB potrebbe essere utile in periodi osservativi futuri.

A dispetto del fatto che non siamo riusciti, almeno per ora, a rivelare il GWB, questa analisi è un grande passo avanti nel nostro campo. Sono state introdotte molte innovazioni nell'analisi, come l'inclusione dei dati da un terzo interferometro, l'utilizzo del gating per rimuovere i glitch, l'integrazione con l'analisi delle risonanze di Schumann in un contesto Bayesiano e l'uso di un modello per predire il GWB dovuto ai sistemi binari compatti. Queste nuove caratteristiche potrebbero dimostrarsi critiche per future ricerche quando raggiungeremo la sensibilità sufficiente per una prima osservazione.

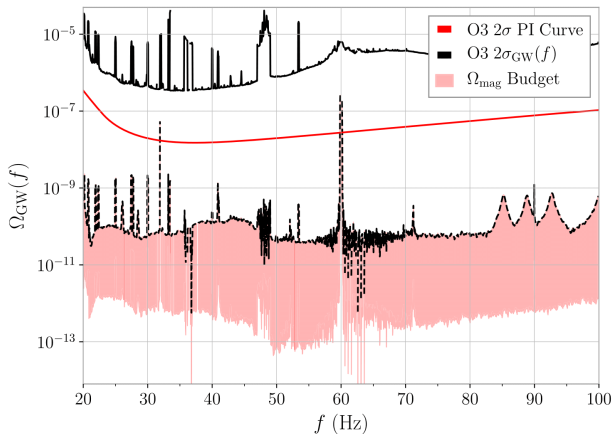


Figura 2: Questo grafico mostra l'effetto del segnale magnetico complessivo ( $\Omega_{\text{mag}}$  Budget, espresso in termini della densità di energia  $\Omega_{\text{GW}}$  delle onde gravitazionali che verrebbe inferita da un segnale simile a questo negli interferometri), sia per i singoli intervalli di frequenza (curva nera tratteggiata) sia sotto forma di effetto integrato su molteplici intervalli di frequenza (banda rossa). La parte alta della banda rossa (la curva nera tratteggiata) si trova sotto la curva di sensibilità nera, chiamata  $2\sigma_{\text{GW}}(f)$ , mostrando così che la contaminazione magnetica sta ben al di sotto della nostra sensibilità in ogni singolo intervallo di frequenza. La curva di sensibilità rossa, chiamata Curva  $2\sigma$  PI, mostra la sensibilità della ricerca ad un accumulo di rumore magnetico in molteplici intervalli di frequenza. Vediamo che la banda rossa sta molto al di sotto di questa curva di sensibilità rossa. Le nostre stime del rumore magnetico correlato sono molto sotto la sensibilità che raggiungiamo in O3, sia in relazione alle singole frequenze, sia quando sommiamo su molte frequenze.

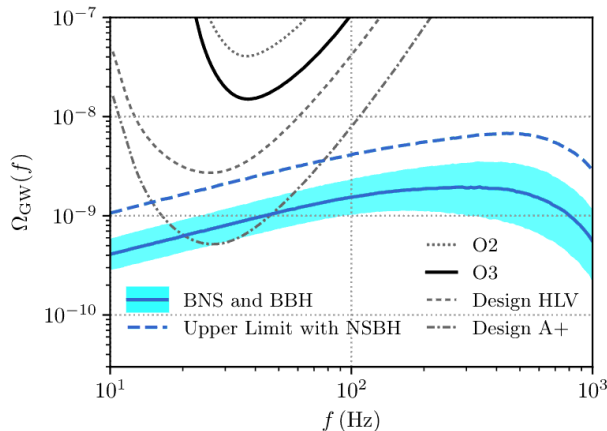


Figura 3: Questo grafico confronta le sensibilità delle osservazioni attuali e future con le predizioni per il fondo di CBC non risolto, che sono fusioni di stelle doppie di neutroni (BNS) e di sistemi binari di buchi neri (BBH). La linea blu è la stima mediana dell'intensità del GWB dovuto a BNS e BBH, mentre la banda azzurra è la regione di incertezza al 90%. Inoltre vengono mostrate le sensibilità corrispondenti al secondo e al terzo periodo osservativo (rispettivamente O2 e O3), così come quelle che corrispondono a ciò che ci aspettiamo di raggiungere alle sensibilità di progetto (Design HLV) e di progetto avanzato (A+), per la rete LIGO-Virgo, HLV. La linea blu tratteggiata rappresenta il limite superiore al 95% sul fondo CBC ottenuto quando si includono le fusioni di stelle di neutroni e buchi neri (NSBH). Non ci sono ancora fusioni confermate di tipo NSBH, e quindi la frequenza con cui avvengono è più incerta di quelle di BNS e BBH.

### PER SAPERNE DI PIÙ:

Visitate i nostri siti web: [www.ligo.org](http://www.ligo.org), [www.virgo-ew.eu](http://www.virgo-ew.eu), [gwcenter.ircu.u-tokyo.ac.jp/en/](http://gwcenter.ircu.u-tokyo.ac.jp/en/).  
 Leggete un preprint gratuito dell'articolo scientifico [qui](#).  
 Altre informazioni sulle onde gravitazionali sono disponibili [qui](#).  
 Leggete di più sulla [necessità di utilizzare molteplici rivelatori](#).  
 Scoprite cosa sono le [polarizzazioni "proibite" in relatività generale](#).  
 Un breve testo sulle [fusioni di sistemi binari compatti \(CBC\)](#).

## GLOSSARIO

**Analisi nel dominio del tempo:** Analisi di funzioni matematiche o segnali fisici fatta rispetto al tempo.

**Intervallo di frequenza:** Intervallo tra campioni di frequenza quando l'analisi viene fatta rispetto alla frequenza piuttosto che rispetto al tempo.

**Correlazione incrociata:** Misura della somiglianza tra due (o più) insiemi di dati. La correlazione tra i dati di due rivelatori separati di onde gravitazionali può indicare la presenza di radiazione gravitazionale di fondo (dopo che si sono eliminate altre possibili sorgenti di correlazione).

**Curva di sensibilità:** La sensibilità di un rivelatore di onde gravitazionali viene determinata da un gran numero di sorgenti di rumore che corrispondono a molti diversi fenomeni fisici (per esempio, rumore sismico o elettronico). La somma di tutte queste sorgenti di rumore determina la sensibilità del rivelatore in corrispondenza a ciascuna frequenza, producendo così la curva di sensibilità.

**Glitch:** Rumore improvviso nei dati di onda gravitazionale, analogo allo scoppietto che si sente in mezzo al rumore di fondo di una radio, che può talvolta confondere o mascherare un vero segnale di onda gravitazionale. Per saperne di più si veda [questo link](#).

**Inferenza Bayesiana:** Metodo che ci permette di combinare dati nuovi con conoscenze che già possediamo (comunemente note come *informazioni a priori*), espresse come probabilità. La combinazione viene usata per aggiornare le nostre conoscenze attuali e viene espressa anch'essa come probabilità (la *probabilità a posteriori*). Altre informazioni sono disponibili [qui](#).

**Intensità del GWB:** La densità di energia associata alle onde gravitazionali. Si esprime come frazione dell'energia totale dell'Universo associata alle onde gravitazionali.

**Intervallo di credibilità:** Intervallo entro cui possiamo trovare un dato parametro con un certo livello di probabilità.

**Periodo osservativo:** Periodo in cui i nostri interferometri sono in piena azione e prendono dati da analizzare più tardi. Il terzo periodo osservativo (O3) è iniziato il 1 aprile 2019 ed è stato interrotto il 1 ottobre 2019 per riprendere poi il 1 novembre 2019 e concludersi il 27 marzo 2020.

**Polarizzazione delle onde gravitazionali:** Il modo in cui si deforma lo spazio-tempo quando viene attraversato da un'onda gravitazionale. Un diagramma illustrativo della deformazione è disponibile a [questo link](#).

**Radiazione cosmica di fondo (CMB):** Radiazione elettromagnetica proveniente da uno dei primi stadi dell'Universo, nota anche come "radiazione fossile". Per ulteriori informazioni si veda [qui](#).

**Risonanze di Schumann:** Onde radio di bassissima frequenza generate da fulmini e che vengono catturate tra la superficie terrestre e la ionosfera, uno strato atmosferico che inizia a circa 60 km di altezza. Leggete di più sulle risonanze di Schumann [qui](#).