

RICERCA DI ANISOTROPIE NEI FONDI DI ONDE GRAVITAZIONALI

Dopo la prima osservazione di un'onda gravitazionale – GW150914, dovuta alla fusione di due buchi neri – la rete di rivelatori LIGO-Virgo ha osservato onde gravitazionali da molte fusioni di buchi neri e da un paio di sistemi binari di stelle di neutroni. Questi eventi rappresentano però solo una piccola frazione del numero totale delle fusioni di sistemi binari di buchi neri e di stelle di neutroni che avvengono nell'universo. Data l'attuale **sensibilità** dei nostri rivelatori, non siamo capaci di risolvere individualmente ogni debole segnale che arriva da una fusione lontana. D'altra parte, l'insieme di tutti questi deboli segnali di fusione dà origine a un fondo di onde gravitazionali che potrebbe invece venire misurato da una rete di rivelatori come LIGO e Virgo. Inoltre ci si aspetta che esistano fondi di onde gravitazionali dovuti a diversi fenomeni, come le **transizioni di fase** e le fusioni di **buchi neri primordiali**, che potrebbero avere avuto luogo nel primo universo. Ci si aspetta che questi diversi fondi di onde gravitazionali abbiano un diverso comportamento in frequenza e ciò ci dovrebbe permettere di distinguerli.

In un [recente articolo](#), abbiamo cercato le componenti isotrope di diversi fondi di onde gravitazionali. La componente isotropa ci dice quanto il fondo di onde gravitazionali è uniforme nelle diverse direzioni del cielo. Poiché l'universo contiene strutture come le galassie e gli ammassi di galassie, ci aspettiamo che le sorgenti di questi deboli segnali di onda gravitazionale si trovino preferibilmente nelle regioni di cielo che contengono queste strutture, dando così origine ad anisotropie (caratteristiche che dipendono dalla direzione) nei fondi di onde gravitazionali.

Il fondo di onde gravitazionali è analogo alla **radiazione cosmica di fondo** (Cosmic Microwave Background, CMB) che inizialmente si pensava fosse uniforme in tutte le direzioni (isotropa), mentre studi successivi hanno rivelato caratteristiche dipendenti dalla direzione (anisotropie). Queste anisotropie della CMB sono considerate un'importante scoperta cosmologica, e spiegano la formazione di ammassi di galassie e altre strutture nell'universo. Allo stesso modo, ci aspettiamo di vedere caratteristiche dipendenti dalla direzione nei fondi di onde gravitazionali. Se osservate, queste anisotropie fornirebbero nuovi indizi per ricostruire la storia dell'universo primordiale e spiegare come la materia è distribuita nell'universo vicino a noi.

In questo articolo mettiamo in correlazione i dati di due o più rivelatori alla ricerca di anisotropie nei fondi di onde gravitazionali. La **correlazione incrociata**, con cui misuriamo la somiglianza dei dati provenienti da due rivelatori, è una tra le tante tecniche che ci permettono di estrarre segnali molto deboli immersi nel rumore dei rivelatori di onde gravitazionali. Utilizziamo la **radiometria** delle onde gravitazionali per cercare segnali dovuti ad un fondo di onde gravitazionali e in arrivo da direzioni diverse nel cielo. Nella radiometria, per cercare in una data direzione, spostiamo nel tempo i dati di uno dei rivelatori e quindi calcoliamo la correlazione incrociata con i dati di un secondo rivelatore. In questo metodo ogni direzione nello spazio corrisponde ad un particolare spostamento nel tempo dei dati di uno dei rivelatori rispetto l'altro.

Abbiamo cercato onde gravitazionali a larga banda (con frequenze nell'intervallo 20 Hz - 1726 Hz) che possono arrivare da qualunque direzione nel cielo usando i dati dei primi tre **periodi osservativi** dei rivelatori LIGO e Virgo, dove il primo periodo (O1) copre il periodo da settembre 2015 a gennaio 2016, il secondo periodo (O2) va da novembre 2016 ad agosto 2017 e il terzo periodo (O3) da aprile 2019 a marzo 2020, e senza fare quasi nessuna ipotesi sul fondo di onde gravitazionali atteso. Non abbiamo trovato alcuna evidenza di un fondo di onde gravitazionali, ma abbiamo posto invece dei **limiti superiori** all'intensità del fondo di onde gravitazionali in ogni direzione nel cielo (si veda la Fig. 1).

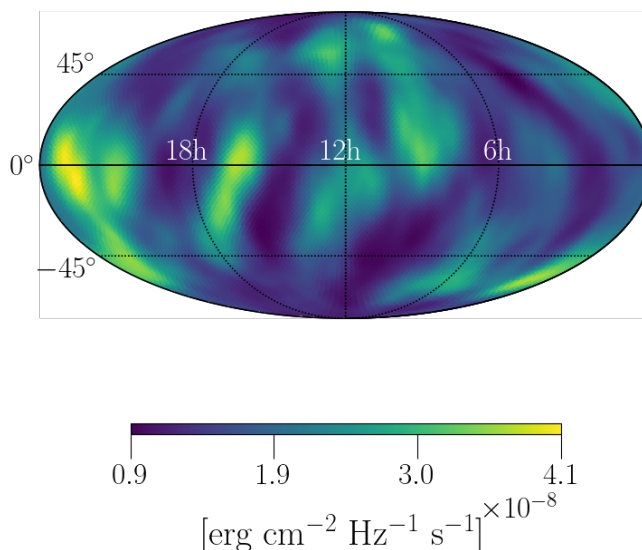


Figura 1: Mappa del cielo che mostra i limiti superiori al livello di credibilità del 95% sul flusso di energia associata ad onde gravitazionali provenienti da diverse direzioni del cielo nel caso di un segnale che consiste di fusioni di coppie di buchi neri e di stelle di neutroni. Questa mappa è in [coordinate equatoriali](#), con l'ascensione retta data in ore e la declinazione in gradi. Il flusso di energia corrisponde all'energia ricevuta per unità di superficie, frequenza e tempo. Qui il flusso viene dato in unità di [erg](#) per centimetro quadro, Hertz e secondo.

Visit our websites:

www.ligo.org

www.virgo-gw.eu

gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/



Questi limiti superiori corrispondono al limite di sensibilità della nostra analisi, e possono venire utilizzati per vincolare vari modelli di fondi di onde gravitazionali. I limiti superiori ottenuti in questa analisi migliorano quelli precedenti di un fattore ~ 3 .

Abbiamo cercato anche segnali di onde gravitazionali a banda stretta provenienti da tre direzioni interessanti nel cielo: [supernova 1987A](#), [Scorpius X-1](#) e [Centro della Via Lattea](#). Ci si aspetta che queste sorgenti emettano segnali di onde gravitazionali; però non si conosce né l'intensità, né la frequenza dei segnali di onde gravitazionali provenienti da queste sorgenti. Siamo andati alla ricerca di un fondo di onde gravitazionali a banda stretta da queste sorgenti nella banda 20 Hz - 1726 Hz. Non abbiamo trovato alcuna evidenza di emissione di onde gravitazionali e abbiamo quindi messo dei limiti superiori sull'intensità dei fondi di onde gravitazionali emesse da queste tre sorgenti (si veda ad esempio la Fig. 2 per i limiti superiori sulle onde gravitazionali emesse da Scorpius X-1).

Oltre a queste due ricerche, abbiamo anche setacciato il cielo alla ricerca di una diversa organizzazione spaziale dei segnali di onde gravitazionali nel cielo. In questo caso abbiamo cercato segnali di un fondo di onde gravitazionali provenienti da sorgenti estese nel cielo, come il piano galattico della [Via Lattea](#). Non abbiamo trovato indicazioni forti dell'esistenza di un fondo di questo tipo, così abbiamo messo limiti superiori ai fondi di onde gravitazionali con diverse dimensioni angolari nel cielo (si veda la Fig. 3).

Per le analisi presentate in questo articolo abbiamo usato per la prima volta **dati ripiegati** e un programma di analisi scritto in [Python](#), riducendo di più di 100 volte il costo computazionale dell'analisi. In seguito i miglioramenti in corso dei rivelatori attuali, ci aspettiamo di riuscire a rivelare anisotropie nel fondo di onde gravitazionali. Analogamente a quanto accaduto con il CMB, le future osservazioni di queste anisotropie potrebbero aiutarci a capire l'evoluzione dell'universo.

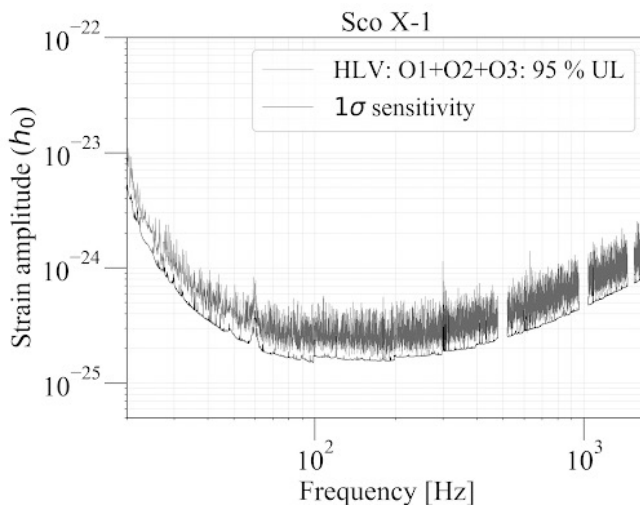


Figura 2: La curva grigia rappresenta il limite superiore con livello di credibilità del 95% sull'intensità dei segnali di onda gravitazionale a banda stretta in funzione della frequenza per una sorgente in direzione di Sco X-1. La curva nera corrisponde al livello di rumore dell'analisi.

GLOSSARIO

Buchi neri primordiali: Buchi neri che si sono formati subito dopo il Big Bang. Per ulteriori informazioni si veda [qui](#).

Correlazione incrociata: Misura della somiglianza di due o più insiemi di dati. Se si scoprisse che i dati di due rivelatori di onde gravitazionali separati sono correlati, potremmo trovarci di fronte ad un fondo di onde gravitazionali (sempre che altre possibili sorgenti di correlazione vengano escluse).

Dati ripiegati: A causa della rotazione diurna della Terra intorno al suo asse, il cielo appare lo stesso ogni 24 ore circa. Tenendo conto di questa simmetria temporale, possiamo comprimere l'intero insieme di dati che copre parecchie centinaia di giorni in un unico giorno siderale. Questi dati compressi sono chiamati dati ripiegati.

Limite superiore: il valore massimo di una quantità osservabile che non viene escluso dall'esperimento.

Livello di credibilità: Intervallo entro cui si trova il valore di un parametro incerto, con una data probabilità.

Periodo osservativo: Periodo durante il quale i nostri interferometri raccolgono dati scientifici che vengono successivamente analizzati. Il terzo periodo osservativo (O3) è durato dal 1 aprile al 1 ottobre 2019 e poi dal 1 novembre 2019 al 27 marzo 2020.

Radiazione cosmica di fondo (Cosmic Microwave Background, CMB): Radiazione elettromagnetica proveniente dallo stadio iniziale dell'universo, nota anche come "radiazione fossile". Per ulteriori informazioni si veda [qui](#).

Radiometria: Tecnica che misura la distribuzione di intensità di radiazione in funzione della direzione di provenienza.

Sensibilità: Una misura della capacità di uno strumento di rivelare un segnale. Strumenti con basso rumore possono rivelare segnali più deboli e si dice quindi che hanno una sensibilità più alta.

Transizione di fase: Trasformazione termodinamica di un sistema da uno stato ad un altro. Un esempio di transizione di fase è quando l'acqua si raffredda e diventa ghiaccio. Per una breve introduzione alla transizione di fase nell'universo primordiale si veda [qui](#).

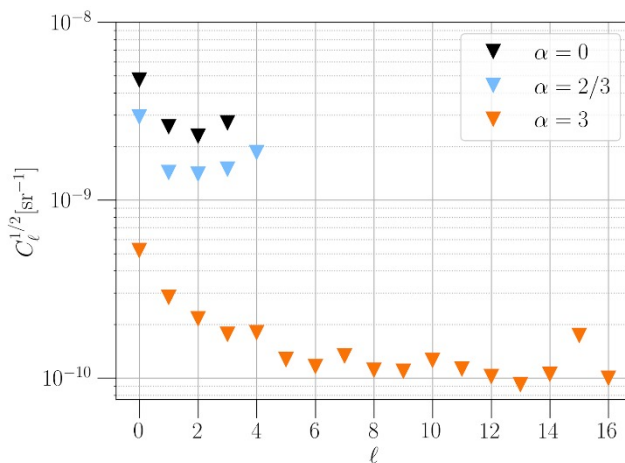


Figura 3: Limiti superiori con livello di credibilità del 95% sulle ampiezze dei fondi di onde gravitazionali per diverse dimensioni angolari nel cielo. Numeri più piccoli sull'asse orizzontale corrispondono a dimensioni angolari più grandi del fondo di onde gravitazionali nel cielo. Il grafico mostra i limiti superiori per tre diversi modelli indicati da diversi valori di α che corrispondono a diverse dipendenze dalla frequenza di un fondo di onde gravitazionali. Per esempio $\alpha=2/3$ corrisponde a una dipendenza dalla frequenza (f) del tipo $f^{2/3}$.

SCOPRITE DI PIÙ:

Visitate i nostri siti web:

- www.ligo.org
- www.virgo-gw.eu
- gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/

Leggete un preprint gratuito dell'intero articolo scientifico [qui](#)