

ALLA RICERCA DI DEBOLI SEGNALE DI ONDE GRAVITAZIONALI PRODOTTI DA GAMMA-RAY BURSTS NEL CORSO DEL PERIODO OSSERVATIVO O3b

Ad oggi, i rivelatori LIGO e Virgo hanno osservato molte onde gravitazionali (GW, dall'inglese *gravitational waves*; [il più recente catalogo degli eventi è reperibile qui](#)). Tuttavia, quanto più una GW è debole, tanto più diventa difficile identificarla. D'altra parte, riuscire a rilevare queste onde particolarmente deboli è fondamentale per raggiungere nuovi obiettivi scientifici. A tal scopo possiamo usare l'informazione fornita dallo spettro elettromagnetico per capire dove, all'interno dei nostri dati, si potrebbero nascondere dei deboli GW. Per tale motivo in questo lavoro abbiamo usato i **gamma-ray bursts** (GRB) – lampi di **raggi gamma**.

Gamma-ray bursts

I GRB sono immense esplosioni che in pochi secondi possono irraggiare, sotto forma di raggi gamma, tanta energia quanta ne emette il nostro Sole in tutto lo spettro elettromagnetico durante i suoi 10 miliardi di anni di vita. Ciò significa che i telescopi per raggi gamma possono rivelare i GRB a miliardi di anni luce di distanza, e osserviamo in media un GRB ogni giorno. Prestiamo grande attenzione ai messaggi di allerta inviati dagli astronomi ad ogni osservazione di GRB, dal momento che conoscendo la posizione e l'istante in cui si verifica un GRB possiamo concentrare i nostri sforzi in quella direzione, dandoci la possibilità di scoprire un'onda gravitazionale che altrimenti avremmo potuto ignorare.

Circa un terzo dei GRB dura meno di qualche secondo (GRB brevi). Questi sono causati dalla collisione di due **stelle di neutroni**, come nel caso di GW170817 & GRB 170817A, o forse da una stella di neutroni che viene fatta a pezzi mentre cade in un **buco nero**. Questi eventi cataclismici sono l'apice di un graduale avvicinamento a spirale dei due oggetti, un processo che produce un segnale di GW con una forma che sappiamo riconoscere, e che è chiamato *chirp*. A tale scopo abbiamo scritto un software dedicato alla ricerca di chirp associati a GRB brevi.

I restanti due terzi dei GRB hanno una durata che varia tra qualche secondo e qualche minuto. Questi GRB lunghi sono causati da stelle massicce che muoiono in grandi esplosioni, in cui il loro nucleo implode sotto la spinta della propria gravità per formare dei buchi neri, rilasciando un'enorme quantità di energia. Questo tipo di eventi può produrre lampi di onde gravitazionali con caratteristiche difficili da predire. Abbiamo scritto del software anche per cercare lampi di questo tipo (in inglese *burst*) anche se non sappiamo esattamente come potrebbero apparire. Poiché non facciamo alcuna assunzione sulle forme dei segnali, possiamo usare questo tipo di analisi per cercare GW associate sia a GRB brevi, sia GRB lunghi.

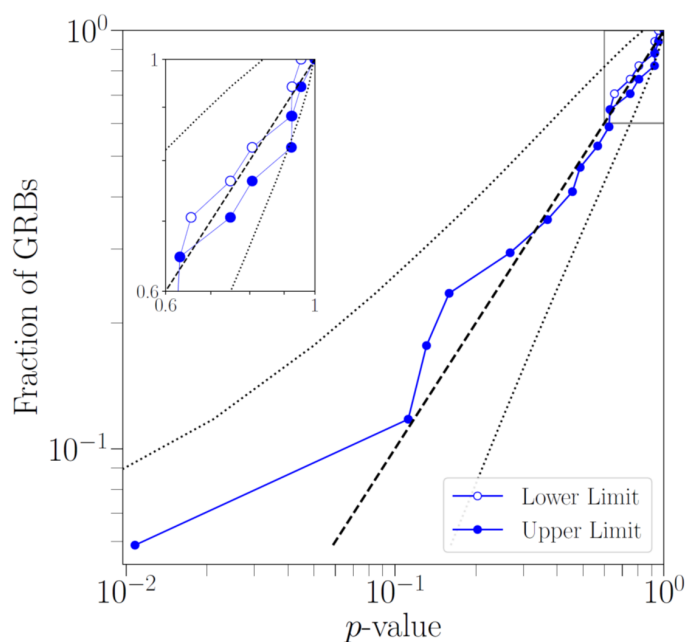


Figura 1: I *p*-valori (*p*-value in inglese) del miglior candidato trovato per ciascuno dei 17 GRB brevi analizzati con la nostra analisi a chirp, ordinati dal più piccolo al più grande (punti blu). I *p*-valori più piccoli rappresentano i candidati che si differenziano maggiormente dal rumore di fondo e sono proprio quelli che con maggiore probabilità potrebbero indicare un segnale di GW. Però se tutti i candidati fossero causati dal rumore ci aspetteremmo comunque di trovare dei *p*-valori piccoli per puro caso. Se fosse così, ci aspetteremmo di trovarli approssimativamente lungo la linea nera tratteggiata su questo grafico, con una probabilità del 10% di stare al di fuori delle linee punteggiate. Poiché i punti blu sono tutti compresi tra le linee punteggiate possiamo concludere che non c'è nulla di così sorprendente nei *p*-valori ottenuti che non possa essere spiegato dal caso.

Cosa abbiamo scoperto?

Nel periodo compreso tra il 1 novembre 2019 e il 27 marzo 2020, i satelliti dedicati alla rilevazione di raggi gamma Swift e Fermi hanno osservato 108 GRB. Tra questi, 86 si sono verificati mentre i nostri osservatori di GW erano operativi e raccoglievano dati scientifici utili per le nostre analisi, e in questo campione ridotto 17 di questi erano dei GRB brevi. Sfortunatamente i nostri metodi di analisi non hanno trovato alcuna onda gravitazionale associata ai GRB che abbiamo preso in esame. Questo però non è un esito inatteso, visto che la maggioranza dei GRB è originata da sorgenti estremamente distanti.

In entrambe le analisi prendiamo un segmento limitato di dati intorno all'istante in cui si verifica ciascun GRB per cercare un segnale di onda gravitazionale. Per l'analisi dei chirp il segmento è lungo 6 secondi, mentre nell'analisi dei burst usiamo un segmento molto più esteso, con una lunghezza di almeno 660 secondi. In entrambi i casi identifichiamo anzitutto il candidato di GW più promettente nel segmento e quindi confrontiamo con altri segmenti di dati in cui non ci aspettiamo di trovare un segnale (perché corrispondono ad intervalli di tempo in cui non si è osservato alcun GRB o altra sorgente elettromagnetica). Ciò ci permette di stimare la probabilità che il candidato selezionato sia soltanto frutto di normali fluttuazioni di rumore nei dati. Questa probabilità è detta **p-valore**. Più il p-valore è grande e tanto più il candidato assomiglia ad una fluttuazione del rumore di fondo. Al contrario, p-valori piccoli possono indicare un candidato GW più promettente. Sfortunatamente nessuno dei candidati individuati dalle nostre analisi dei GRB ha p-valori estremamente piccoli. Nel loro insieme, descrivono proprio lo scenario che ci si aspetta dall'osservazione di fluttuazioni casuali. Ciò significa che non crediamo di avere individuato alcuna nuova onda gravitazionale.

Poiché non abbiamo trovato onde gravitazionali ci si può: qual è la distanza limite della sorgente (o del GRB) per cui non si riesce a rilevare una GW da esso generata (o ad esso collegata)? Possiamo stimare questa "distanza di esclusione" inserendo artificialmente a diverse distanze dei segnali simulati nei nostri dati e notando fino a quale distanza riusciamo a

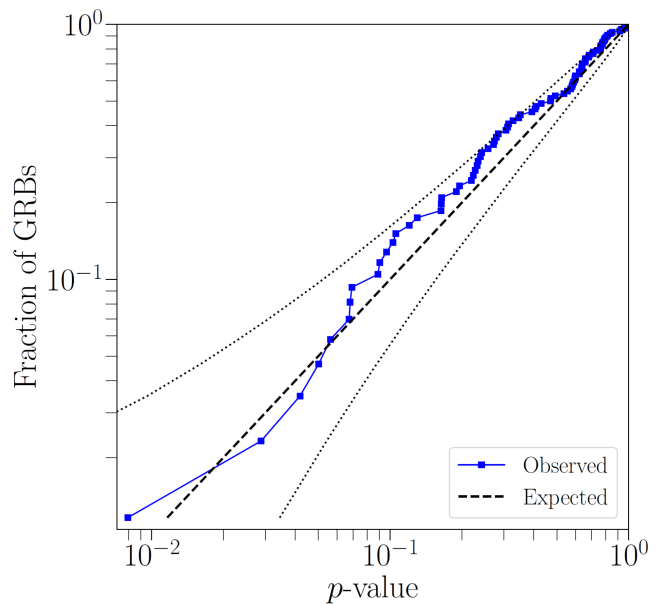


Figura 2: I p-valori (p-value in inglese) del miglior candidato individuato per ciascuno degli 86 GRB analizzati con l'analisi a burst, ordinati dal più piccolo al più grande (punti blu). Proprio come in Figura 1, i p-valori stanno approssimativamente lungo la linea nera tratteggiata, e possiamo nuovamente concludere che si possono spiegare con il rumore di fondo.

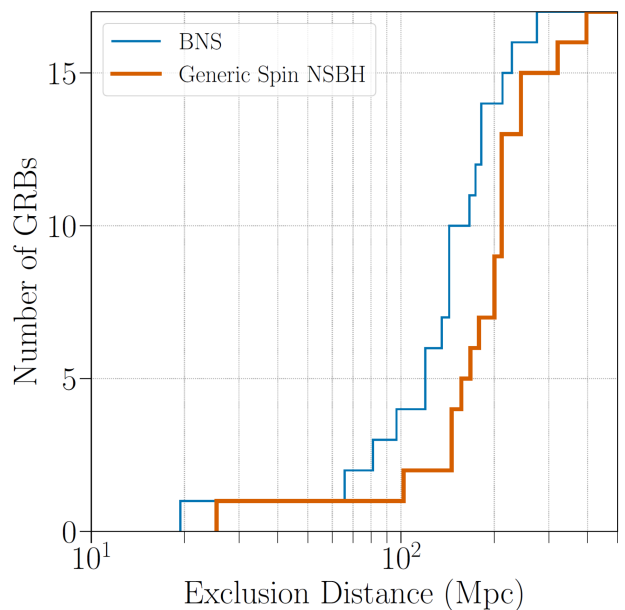


Figura 3: Distanze di esclusione ottenute dalla nostra analisi a chirp per due diversi modelli di segnali di GW. Una distanza di esclusione è una stima della distanza minima a cui si dovrebbe trovare un certo tipo di evento astronomico senza che vengano rivelate GW. I nostri rivelatori di onde gravitazionali non sono ugualmente sensibili in tutte le direzioni, e GRB diversi si sono manifestati quando diverse combinazioni dei nostri rivelatori erano operative. Ciò significa che la sensibilità combinata potrebbe variare in modo significativo da un GRB all'altro, producendo una varietà di distanze di esclusione. La linea blu sottile mostra che per stelle di neutroni binarie le distanze di esclusione variano da circa 20 megaparsec (Mpc) a circa 300 Mpc, con una mediana di 149 Mpc. Poiché le binarie di stelle di neutroni e buchi neri dovrebbero essere più massicce delle stelle di neutroni binarie i loro segnali di GW dovrebbero essere più intensi e la distanza di esclusione maggiore (linea arancione spessa; mediana 207 Mpc).

trovarli in modo affidabile. Ripetendo la procedura per diversi tipi di segnali simulati possiamo stimare diverse distanze di esclusione per ciascun tipo, dal momento che le nostre analisi possono avere differenti sensibilità per le differenti tipologie di segnale.

La mancata osservazione ci dice qualcosa riguardo ai GRB brevi?

I GRB brevi sono tutt'ora una classe di eventi astronomici non ben capiti. Per esempio, sembra abbiano valori di luminosità estremamente variabili e sappiamo molto poco su quanto possano essere comuni i più deboli GRB brevi e quanto possano effettivamente essere deboli; la maggior parte dei GRB che appaiono deboli potrebbe semplicemente essere più lontana. Possiamo usare i risultati della nostra analisi a chirp per capire meglio questo aspetto, combinando i risultati di questo lavoro con quelli precedenti riferiti al primo periodo osservativo di LIGO-Virgo, al secondo e alla prima parte del terzo.

Quando un GRB breve è debole i nostri telescopi devono essere vicini per poterlo rivelare. Ma se è più vicino, allora diventa anche più probabile rivelare le onde gravitazionali emesse. Quindi, quanto più un GRB è intrinsecamente debole, allora tanto più probabile è la rivelazione di una GW associata ad esso. Sulla base del numero di GRB che abbiamo analizzato e notando che, eccetto GW170817, non si sono trovate GW provenienti da essi, possiamo calcolare con migliore approssimazione la frazione di GRB che è molto debole e quindi stimare la frequenza complessiva dei GRB deboli – di qualunque luminosità – nell'universo locale. Abbiamo quindi trovato che questa frequenza è consistente con quella delle fusioni di stelle di neutroni binarie che deduciamo dalle osservazioni di GW, e possiamo aspettarci che il prossimo periodo osservativo possa portare all'osservazione congiunta di una GW+GRB all'anno.

Per saperne di più

Leggete l'articolo scientifico completo:

<https://dcc.ligo.org/P2100091/public/main>

I dati pubblici di GWTC-3 sono disponibili qui:

<https://www.gw-openscience.org/>

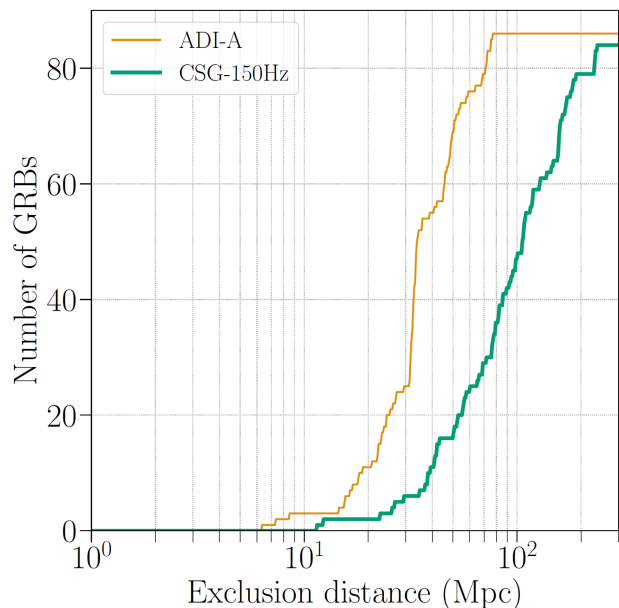


Figura 4: Distanze di esclusione ottenute con la nostra analisi a burst. Così come nella Figura 3, mostriamo le distanze per due diversi modelli di segnale di GW. In questo caso si tratta di un modello di instabilità del disco di accrescimento (ADI; linea arancione sottile) e un modello "circular sine-Gaussian" (CSG; linea verde spessa). Un disco di accrescimento è un disco di materiale che ruota intorno ad un buco nero fino a caderci dentro. Se il disco viene reso non uniforme dall'azione di campi magnetici, allora può produrre GW mentre ruota intorno al buco nero. Il modello CSG è un semplice modello che rappresenta l'emissione di GW da una stella che collassa su sé stessa. Le distanze di esclusione mediane per i modelli ADI e CSG sono rispettivamente 34 Mpc e 92 Mpc.

Glossario

Raggi gamma: onde elettromagnetiche con le lunghezze d'onda più corte e le energie più alte.

Gamma-ray burst (GRB): lampi cosmici di raggi gamma che possono durare da frazioni di secondo a molti minuti.

Stella di neutroni: il residuo estremamente denso del nucleo di una stella dopo che essa è morta, con una massa tipica compresa tra 1 e 2 volte la massa del Sole, ma con un diametro di solo 20 km circa.

Buco nero: una regione dello spazio-tempo in cui la gravità è così intensa che nulla può sfuggire, neppure la luce.

Megaparsec (Mpc): un'unità di distanza usata in astronomia. 1 Mpc = 1 milione di parsec = 3.26 milioni di anni luce.

p-valore: misura di significatività statistica che si può usare per determinare se il risultato di un esperimento o di un'osservazione è dovuto al rumore di fondo o meno.

Visitate i nostri siti web:

www.ligo.org

www.virgo-gw.eu

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

