

# UNA RICERCA SISTEMATICA DI LAMPI DI RAGGI GAMMA ASSOCIATI AD ONDE GRAVITAZIONALI NEL PERIODO OSSERVATIVO O3

Finora tutti gli eventi di onde gravitazionali osservati dai rivelatori LIGO e Virgo sono stati catalogati come coalescenze di sistemi binari compatti. Ciascuno di essi racconta la storia di due oggetti massicci, buchi neri o stelle di neutroni, che orbitano l'uno intorno all'altro avvicinandosi sempre più e sempre più velocemente fino alla fusione in un unico oggetto. Ciò accade a causa della forte attrazione gravitazionale, e nella fusione vengono emesse onde gravitazionali così energetiche che i nostri rivelatori di onde gravitazionali sono in grado di rivelarle anche se la maggior parte di questi eventi si verifica a miliardi di anni luce di distanza.

Gli scienziati di LIGO/Virgo/KAGRA (LVK) e molti altri astronomi e astrofisici non vedono l'ora di poter osservare questi eventi anche con altri telescopi, oltre che con gli interferometri gravitazionali. Questo interesse verso l'*astronomia multi-messaggero* coinvolge molti gruppi diversi e ha avuto un successo spettacolare nel 2017 con la rivelazione di GW170817: una fusione relativamente vicina (a 130 milioni di anni luce!) di due stelle di neutroni. Oltre alla caratteristica emissione di onde gravitazionali, la sorgente di GW170817 ha generato anche un [lambo di raggi gamma](#) (la forma di luce più energetica che osserviamo) circa 2 secondi più tardi, seguita dall'emissione di altri tipi di radiazione in tutto lo spettro elettromagnetico, dai [raggi X](#) alle onde radio. Abbiamo imparato molto da quell'evento, che finora è l'unico di questo tipo ad essere stato osservato; nonostante altre segnalazioni di potenziali associazioni, nessun'altra osservazione di onde gravitazionali è stata associata ad un' inequivocabile controparte elettromagnetica. Tuttavia il periodo osservativo O3 di LIGO-Virgo, che si è protratto da aprile 2019 a marzo 2020, ha osservato circa 8 volte più eventi rispetto ai precedenti periodi osservativi di LIGO e Virgo messi insieme, fornendo molto altro materiale di studio.

Ora un team di astronomi che collabora con gli scienziati LVK ha utilizzato i dati di due importanti missioni della NASA per cercare in modo sistematico altri segnali di raggi gamma che potrebbero essere associati alle onde gravitazionali osservate durante O3. Si tratta delle sonde Fermi e Swift della NASA che orbitano entrambe attorno alla Terra. Forme di luce ad alta energia (come i raggi gamma e i raggi X che arrivano come singole "particelle" di luce chiamate [fotoni](#)) provenienti dallo spazio profondo possono raggiungere le due sonde senza essere assorbite dall'atmosfera terrestre. Entrambe le missioni sono dotate di strumenti che monitorano continuamente vaste aree del cielo alla ricerca di lampi di raggi gamma: il

Gamma-ray Burst Monitor (GBM) su Fermi e il Burst Alert Telescope (BAT) su Swift. Essi rivelano e segnalano con regolarità [lampi di raggi gamma](#) (in inglese, Gamma-ray Bursts, GRB) a partire dall'analisi a bordo e a terra dei loro dati. Per tenere in considerazione solo eventi che hanno un'alta probabilità di essere veri eventi astrofisici si utilizzano precisi criteri statistici. Già in passato scienziati di LVK hanno setacciato i loro dati alla ricerca di segnali di onde gravitazionali vicini in tempo ai GRB identificati durante O3 (si veda [questo Science Summary](#)). La nuova analisi è una ricerca in profondità di raggi gamma che potrebbero essere andati persi perché troppo deboli o ambigui per soddisfare i normali criteri di identificazione dei GRB, ma che diventerebbero più interessanti se collegati a un evento di onde gravitazionali. Questi candidati interessanti sono indicati come "transienti di raggi gamma", anche se possono includere fotoni sia nell'intervallo di energia dei raggi gamma che in quello dei raggi X.

## FIGURE TRATTE DALL'ARTICOLO

Per ulteriori informazioni su queste figure e sul modo in cui sono state prodotte, si legga il [preprint](#) disponibile gratuitamente.

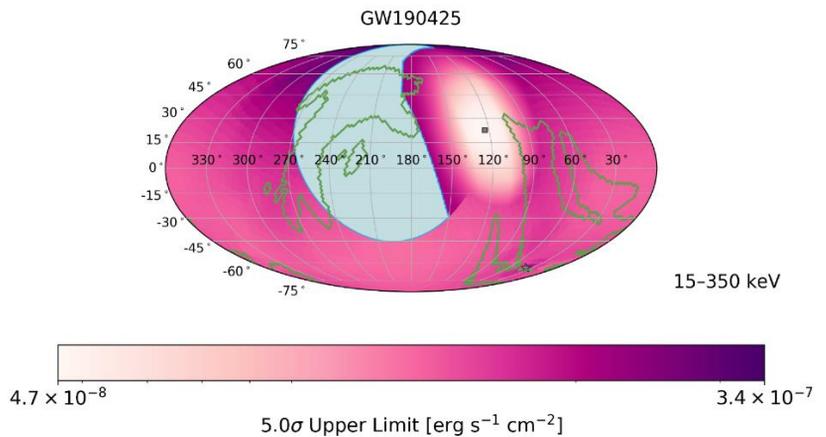


Figura 1 (corrispondente alla figura 6 dell'articolo): Mappa celeste del limite superiore del flusso di energia per l'evento GW190425, una fusione di una coppia di stelle di neutroni rivelata negli interferometri LIGO e Virgo. Come già analisi precedenti, anche questo studio non ha individuato una controparte elettromagnetica di questo evento (a differenza di GW170817, un'altra fusione di una coppia di stelle di neutroni). Il grande ovale è una mappa di tutto il cielo e i numeri indicati in gradi sono le coordinate celesti in termini di ascensione retta e declinazione. La regione azzurra è la parte di cielo oscurata dalla Terra dal punto di vista di Fermi e al di fuori del campo osservativo dello strumento Swift-BAT. I contorni verdi mostrano le regioni di cielo che contengono la posizione del segnale di onde gravitazionali con una probabilità del 90%. I dati di Fermi-GBM e Swift-BAT sono in grado di circoscrivere la posizione della sorgente tenendo conto di buona parte del cielo, ma si sovrappongono solo in parte alla regione identificata dai rivelatori di onde gravitazionali per questo evento.

## PER SAPERNE DI PIÙ:

Visitate [www.ligo.org](http://www.ligo.org)  
 i nostri [www.virgo-gw.eu](http://www.virgo-gw.eu)  
 siti web [www.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/](http://www.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/)



Il campione di possibili onde gravitazionali su cui ci siamo concentrati per questa analisi contiene 79 candidati osservati in O3, ciascuno con probabilità stimata di avere una vera origine astrofisica (e quindi non una fluttuazione del rumore del rivelatore) superiore al 50%. Le loro proprietà sono state pubblicate congiuntamente dalle collaborazioni LIGO, Virgo e KAGRA in due aggiornamenti del "catalogo", che sono riassunti online in "[GWTC-2.1: Catalogo esteso delle fusioni binarie osservate da LIGO e Virgo durante la prima metà del terzo ciclo di osservazione](#)" e "[GWTC-3, il terzo catalogo di osservazioni di onde gravitazionali](#)". Sono stati esaminati anche sei candidati marginali. Un piccolo numero di candidati contiene oggetti di piccola massa come le stelle di neutroni, che sono promettenti fonti di raggi gamma se una stella di neutroni (in un sistema doppio che include una stella di neutroni ed un buco nero) oppure una coppia di stelle di neutroni (in un sistema composto da due stelle di neutroni) viene distrutta da forze mareali durante la fusione, come nel caso di GW170817. Tutti gli altri eventi sono probabilmente fusioni di coppie di buchi neri, che difficilmente producono lampi di raggi gamma, tranne che in alcuni ambienti astrofisici non comuni. Anche se le proprietà specifiche dei transienti dei raggi gamma potrebbero essere diverse per i diversi tipi di fusioni, tutti gli eventi di onde gravitazionali sono stati trattati allo stesso modo in questa analisi.

I membri del team hanno analizzato i dati prodotti dagli strumenti Fermi-GBM e Swift-BAT per cercare i transienti associati al campione di eventi di onde gravitazionali. I dati di Fermi-GBM per i singoli fotoni dei raggi gamma vengono regolarmente trasferiti a terra e archiviati. Questi dati sono stati analizzati utilizzando due metodi di ricerca che sono più sensibili dell'algoritmo integrato in Fermi per segnalare la presenza di lampi di raggi gamma. Il primo, la "Ricerca Generica", rianalizza tutti i dati, con una gamma più ampia di ipotesi sulle energie dei fotoni e sulla durata dei possibili lampi di raggi gamma, al fine di identificare un elenco ampliato di trigger. Il secondo, la "Ricerca Mirata", esegue un'[analisi coerente](#) dei dati provenienti da tutti i 14 [rivelatori a scintillazione](#) del GBM per verificare la presenza di un segnale debole ma coerente in vicinanza del tempo di ogni evento GW, considerando le durate da 0,064 a 8 secondi che sono i tempi di emissione tipici per i GRB "corti" associati alle fusioni binarie. Lo strumento Swift-BAT non invia dati fotone per fotone, tranne nei momenti in cui viene identificato un trigger a bordo, oppure quando viene inviato un comando speciale. Tuttavia, i dati elaborati da Swift-BAT che misurano i tassi di rivelazione dei fotoni in quattro intervalli di energia vengono inviati a terra e archiviati, e tali dati sono stati analizzati per cercare periodi con un elevato tasso di fotoni vicino ai tempi degli eventi di onde gravitazionali.

Queste ricerche non hanno individuato nessuna associazione tra lampi di raggi gamma ed eventi di onde gravitazionali in O3. Tuttavia, l'assenza di un segnale di raggi gamma in una fusione di oggetti compatti è anch'essa una scoperta scientifica. Il team di analisi ha continuato a calcolare i limiti superiori del [flusso di energia](#) dei raggi gamma per ogni evento di onde gravitazionali, cioè ha valutato la massima energia che avrebbe dovuto essere presente senza apparire come un segnale nelle analisi eseguite. Questi limiti superiori sono una funzione della direzione perché sia Fermi-GBM che Swift-BAT hanno sensibilità dipendenti dalla direzione, a seconda dell'orientamento del veicolo spaziale al momento dell'evento e della sua posizione rispetto la Terra, che blocca i raggi gamma. In seguito a questo calcolo, i limiti superiori vengono tracciati nel cielo. Inoltre, pesando il limite superiore con la probabilità dell'evento di onda gravitazionale e sommando su tutte le direzioni nel cielo, abbiamo calcolato i "[limiti superiori marginalizzati](#)" in modo da ottenere la migliore stima del limite di flusso di energia, nell'ipotesi che l'emissione di raggi gamma fosse realmente associata all'evento di onda gravitazionale. Questi limiti superiori vengono interpretati anche utilizzando diversi modelli teorici che prevedono l'emissione di raggi gamma a seguito di una fusione di buchi neri, ad esempio trasferendo energia dal momento angolare ("spin") del buco nero, dalle cariche elettriche nel sistema, o da un'intensa esplosione di [neutrini](#) che interagiscono con il materiale intorno ai buchi neri per produrre fotoni ad alta energia.

Anche nel caso di fusioni di coppie di stelle di neutroni, l'osservazione di un GRB potrebbe essere un evento raro poiché la luminosità dei raggi gamma dipende dalla distanza dal sistema, dalle proprietà delle stelle di neutroni e dall'orientamento della loro orbita. Nei GRB standard, si sa che i raggi gamma sono concentrati in due fasci e c'è solo una piccola probabilità che uno di essi punti in direzione della Terra. Per le fusioni di coppie di buchi neri c'è l'incertezza aggiuntiva sulla possibilità di produrre raggi gamma e, in tal caso, che siano abbastanza luminosi da poter essere osservati a grande distanza. Fortunatamente, i rivelatori LIGO, Virgo e KAGRA registreranno molte altre fusioni binarie in future osservazioni, fornendo numerose opportunità di osservare gli elusivi lampi di raggi gamma e di conoscere questi grandiosi, lontani eventi astrofisici, nonché di mettere alla prova i diversi modelli di emissione.

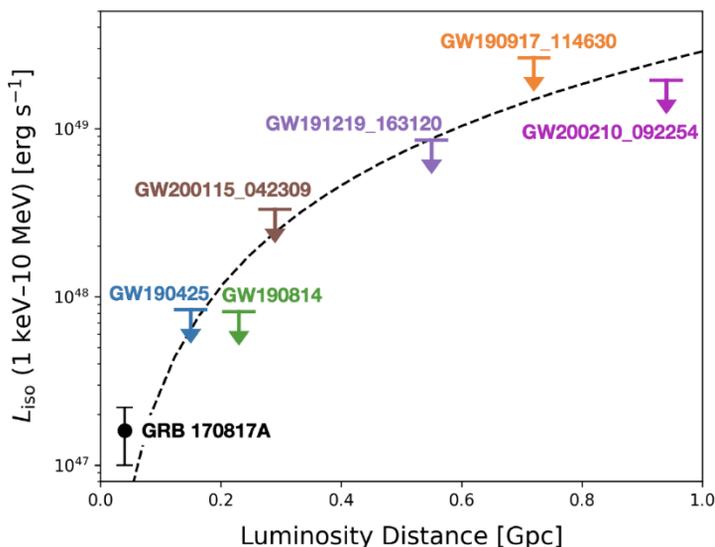
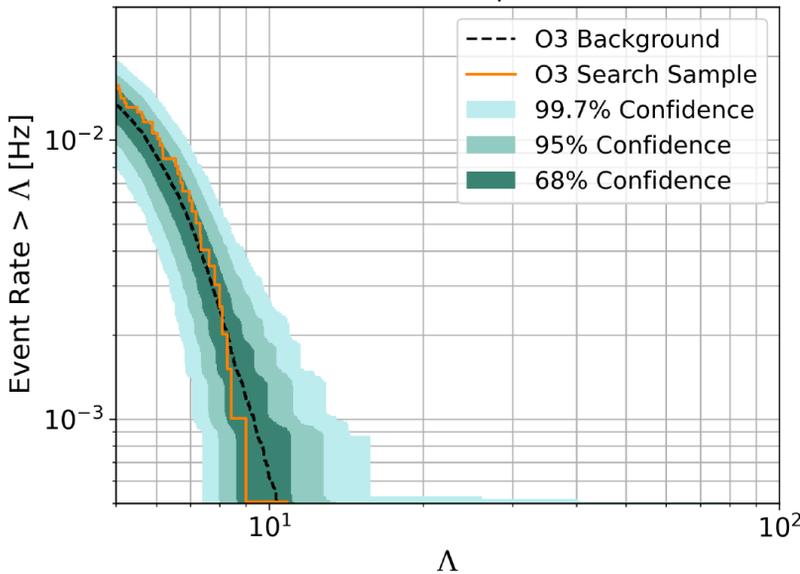


Figura 2 (corrispondente alla Figura 5 dell'articolo): Le brevi linee orizzontali con frecce rivolte verso il basso rappresentano i limiti superiori sull'emissione di energia nell'intervallo di energia dei raggi X e dei raggi gamma per sei eventi di onde gravitazionali. Questi sei eventi sono di particolare interesse perché in questi casi il sistema binario che si è fuso potrebbe aver avuto una o due stelle di neutroni. L'asse verticale misura la "luminosità", che è l'energia emessa al secondo dalla sorgente, nell'ipotesi semplificativa che l'energia sia stata emessa ugualmente in tutte le direzioni. I limiti superiori del flusso di energia determinati direttamente dai dati di Fermi-GBM e Swift-BAT sono stati convertiti in limiti superiori di luminosità utilizzando le distanze stimate delle sorgenti di ciascuno di questi eventi di onde gravitazionali che sono mostrate sull'asse orizzontale in unità di gigaparsec. (Un gigaparsec vale circa 3,26 miliardi di anni luce.) La linea tratteggiata è un modello approssimativo per la sensibilità di Fermi-GBM, che aumenta nel grafico perché i suoi rivelatori di raggi gamma a bordo catturano una frazione minore dell'energia da sorgenti distanti. Per confronto, il lampo di raggi gamma rilevato nel 2017 insieme alla fusione di stelle di neutroni binarie GW170817 è mostrato come un punto con barre di errore. La sorgente dell'evento GW170817 era molto più vicina, quindi i raggi X e raggi gamma eventualmente emessi dagli altri sei eventi di onde gravitazionali mostrati in questa figura sarebbero stati rivelabili solo se la loro luminosità fossero state molto più grandi di quelle misurate per GRB 170817A.

## Normal Template



**Figura 3** (corrispondente alla figura 2 dell'articolo): Questo tipo di grafico è pensato per verificare se un insieme di molti eventi è coerente con un'ipotesi, oppure se un sottoinsieme contiene aspetti insoliti. Qui, è stato calcolato un valore "lambda" ( $\Lambda$ ) per ogni evento di onde gravitazionali, che è una misura di quanto sia probabile che l'evento sia realmente correlato con un lampo di raggi gamma, rispetto ad essere solo una fluttuazione di rumore nei dati dello strumento che rivela i raggi gamma. (un valore maggiore di  $\Lambda$  significa una maggiore probabilità di essere reale.) A causa delle variazioni statistiche nei segnali e del rumore casuale, è prevista un'ampia gamma di valori lambda. I 79 valori nella ricerca O3 sono stati ordinati e tracciati in questo grafico cumulativo andando da destra a sinistra, rappresentati dalla linea arancione di gradini (poiché la scala verticale è logaritmica, i gradini verticali sembrano diventare sempre più piccoli man mano che salgono, ma tutti i gradini rappresentano la medesima variazione di "event rate" – la frequenza degli eventi). Il più grande valore  $\Lambda$  è maggiore di 10, il che sarebbe piuttosto significativo se non fosse per il fatto che l'ordinamento evidenzia il più grande su 79 casi. Il vero test di significatività consiste nel confrontare la distribuzione osservata con quella che si avrebbe nell'ipotesi che nessuno degli eventi di onde gravitazionali abbia una controparte nei raggi gamma. Ciò è mostrato dalla linea tratteggiata etichettata "O3 Background", ordinata allo stesso modo (ma con passi verticali più piccoli a causa dell'utilizzo di un numero maggiore di campioni), e le bande colorate mostrano la gamma di variazioni attorno alla linea tratteggiata che ci si può aspettare che si verifichino a causa delle fluttuazioni casuali. Poiché i gradini arancione non si allontanano molto dalla linea tratteggiata in questo grafico, anche ai valori  $\Lambda$  più grandi, possiamo concludere che il campione di eventi è coerente con il fondo di rumore – cioè, non c'è alcuna prova convincente che uno qualsiasi degli eventi di onde gravitazionali abbia come controparte un lampo di raggi gamma.

## PER SAPERNE DI PIÙ:

Visitate i 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/)

Leggete un preprint gratuito dell'articolo completo ai link <https://dcc.ligo.org/P2100436/public> o [on arXiv.org](https://arxiv.org).

Website del Fermi Gamma-Ray Space Telescope: <https://fermi.gsfc.nasa.gov/>

Website del Neil Gehrels Swift Observatory: [https://www.nasa.gov/mission\\_pages/swift/main](https://www.nasa.gov/mission_pages/swift/main)

## GLOSSARIO

**Fotone:** Una particella di luce che trasporta una certa quantità di energia. All'inizio del 1900 divenne chiaro come la luce, che in precedenza era considerata un fenomeno ondulatorio, possa essere associata anche ad una particella. Ciò ha portato allo sviluppo della meccanica quantistica (vedi, ad esempio, [Storia della meccanica quantistica](#) in Wikipedia). Tutta la luce è composta da fotoni, con la quantità di energia in un fotone che determina il modo in cui interagisce con la materia.

**Raggi gamma:** Luce con una quantità molto grande di energia per fotone. Nonostante la parola "raggio" nel nome, i raggi gamma spesso si comportano come singole particelle. Tipicamente, nel caso di fotoni con un'energia maggiore di 100 keV (keV = kilo elettronvolt, vale a dire 1000 elettronvolt) si parla di raggi gamma, anche se questa non è una definizione univoca. I raggi gamma possono essere prodotti in reazioni nucleari, oppure nelle collisioni o decadimenti radioattivi di particelle con energia particolarmente alta.

**Raggi X:** Luce con una grande quantità di energia per fotone, ma non tanto quanto un raggio gamma. I fotoni con energie comprese tra circa 100 eV (elettronvolt) e 100 keV sono generalmente considerati fotoni a raggi X, sebbene vi sia una transizione senza soluzione di continuità tra i raggi X "duri" (ad alta energia) e i raggi gamma. I raggi X possono essere prodotti nelle collisioni di particelle ad alta energia, così come dal decadimento degli stati "eccitati" (stati con energia elevata rispetto lo stato fondamentale) degli elettroni negli atomi.

**GRB: Gamma-Ray Burst.** Un lampo di raggi gamma è un fenomeno astronomico in cui un oggetto distante emette improvvisamente un lampo molto potente di raggi gamma e raggi X, spesso seguito da luce a energie più basse (ultravioletto, visibile, infrarosso e onde radio). Mentre solo una piccola quantità di energia viene catturata dai rivelatori vicino alla Terra, la quantità di energia rilasciata deve essere enorme poiché la maggior parte dei GRB si verifica a miliardi di anni luce di distanza. Si ritiene che la maggior parte dei GRB sia prodotta dal collasso di stelle molto più massicce del nostro Sole o dalla fusione di stelle di neutroni in sistemi binari.

**Flusso di energia:** Una misura di quanta energia raggiunge un rivelatore per unità di area per unità di tempo. Ad esempio, il flusso di energia può avere unità di erg per centimetro quadrato al secondo. Questa definizione è utile quando il rivelatore è molto lontano dalla sorgente perché allora la quantità di energia raccolta da un rivelatore è proporzionale alla sua dimensione (area) e al tempo di osservazione. Tuttavia, il flusso di energia può essere presente solo per una frazione di secondo in un evento astrofisico transitorio come un GRB di breve durata.

**Neutrino:** Una particella fondamentale prodotta in alcuni processi di decadimento radioattivo e in reazioni di particelle ad alta energia. Una proprietà distintiva dei neutrini è che possono normalmente passare attraverso la materia con pochissime possibilità di interagire con essa, quindi a volte sono chiamati "particelle fantasma". I neutrini sono prodotti in gran numero dal Sole, nelle supernovae e forse anche nelle fusioni di sistemi binari compatti.

**Scintillatore:** Un tipo di rivelatore di particelle che produce un lampo di luce quando una particella energetica vi entra e viene fermata o diffusa. La luce viene raccolta, convertita in un segnale elettrico da un sensore ottico come un tubo fotomoltiplicatore e misurata per determinare la quantità di energia depositata nel rivelatore.

**Analisi coerente:** Un metodo per analizzare simultaneamente i dati registrati da più rivelatori che richiede che tutti siano coerenti con un singolo segnale fisico. Questo approccio può essere significativamente più efficace della semplice somma delle uscite dei rivelatori, soprattutto quando il modello dei segnali nei diversi rivelatori dipende da alcuni fattori come la posizione nel cielo.

**Marginalizzazione:** Metodo di calcolo utilizzato in statistica per concentrarsi su una quantità di interesse facendo la media dei valori incerti di una o più altre quantità che la influenzano. La media viene in genere eseguita utilizzando la verosimiglianza o la ponderazione della probabilità in modo che il valore marginalizzato rappresenti una stima migliore.