

## GWTC-2: UN CATALOGO ESTESO DI OSSERVAZIONI DI ONDE GRAVITAZIONALI

Presentiamo un catalogo aggiornato di onde gravitazionali (indicato come GWTC-2 che sta per "Gravitational-Wave Transient Catalog 2" – "Catalogo di onde gravitazionali transienti 2") osservate da [LIGO](#) e [Virgo](#) a partire dalla primissima osservazione nel 2015 fino alla fine di O3a, la prima metà del terzo periodo osservativo. O3a è stato attivo dal 1 aprile al 1 ottobre 2019 e ha aggiunto 39 eventi di onde gravitazionali alla lista degli 11 eventi confermati in [GWTC-1](#), portando così il totale a 50 eventi in GWTC-2. Le scoperte di O3a coprono una vasta gamma di parametri astrofisici e rappresentano sorgenti che sono associabili alle coalescenze di buchi neri binari (BBH), stelle di neutroni binarie (BNS) e binarie formate da buchi neri e stelle di neutroni (NSBH).

È importante notare che il numero di nuove osservazioni confermate di eventi gravitazionali in O3a è circa il triplo del totale dei due periodi osservativi precedenti (O1 e O2). Inoltre il rivelatore Virgo ha affiancato i due LIGO per l'intera durata di O3a, così che per il 97% del tempo c'era almeno un rivelatore attivo, mentre ce n'erano almeno due per circa l'82% del tempo. Alcuni eventi particolarmente interessanti di O3a comprendono la seconda osservazione compatibile con la fusione di una coppia di stelle di neutroni, i primi eventi con masse chiaramente asimmetriche e un buco nero doppio molto massiccio con una massa totale circa 150 volte la massa del Sole. In questo sommario descriviamo i miglioramenti in LIGO e Virgo che hanno reso possibile tutto questo, così come il significato astrofisico di questi eventi.

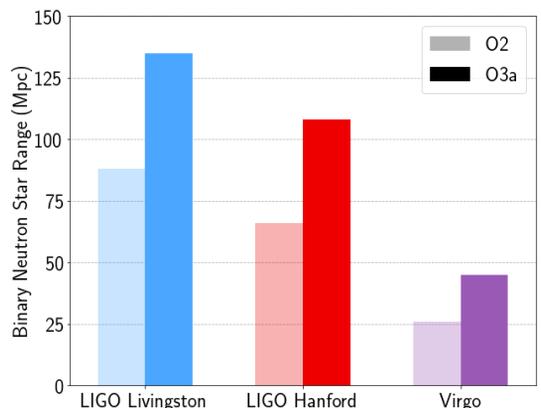
### LA RIVELAZIONE DELLE ONDE GRAVITAZIONALI

Le 39 scoperte di O3a sono il risultato dei miglioramenti apportati agli osservatori LIGO e Virgo, di una accresciuta qualità dei dati e della varietà dei metodi di ricerca delle onde gravitazionali. [Recenti miglioramenti](#) apportati alla strumentazione per ridurre il rumore e aumentare la sensibilità includono laser più potenti, specchi nuovi e migliorati e un miglior controllo della luce diffusa. Questi cambiamenti hanno portato ad un aumento sia nell'intervallo di frequenza sia nella distanza massima per tutti e tre i rivelatori, estendendo la nostra visione dell'Universo. In media, la **mediana** della distanza massima alla quale possiamo osservare una fusione tipica tra due stelle di neutroni è aumentata del 63% da O2 a O3a, ed il rivelatore di Livingston è arrivato alla distanza di 135 megaparsec, come mostrato in [Figura 1](#).

Un altro passo vitale per la scoperta delle sorgenti di onde gravitazionali consiste nel raffinamento dei dati che arrivano dai rivelatori. Questo [procedimento di condizionamento dei dati](#) comprende la loro calibrazione, la sottrazione del rumore e la rimozione dei difetti (glitch).

All'inizio calibriamo – quasi immediatamente dopo la prima rivelazione di un evento – le variazioni di intensità luminosa che arrivano da ciascun rivelatore per ottenere la **deformazione gravitazionale**. Successivamente ricalibriamo i dati per ridurre gli errori sistematici e sottraiamo il rumore per aumentare ulteriormente la distanza alla quale riusciamo a osservare sorgenti di onde gravitazionali, rivelando così segnali ancora più deboli nascosti nei dati.

I glitch sono il problema più comune che incontriamo nell'analisi dei segnali di onde gravitazionali. I glitch sono prodotti da transienti di rumore di breve durata, alcuni dei quali sono associati a sorgenti come l'otturatore meccanico di una macchina fotografica o la diffusione della luce del fascio laser. L'origine di alcuni glitch è più misteriosa, come i glitch di breve durata e larga banda chiamati blip. Uno dei modi in cui indentifichiamo e classifichiamo i glitch nei dati di LIGO e Virgo è attraverso la piattaforma Gravity Spy, con l'aiuto di migliaia di cittadini scienziati (scoprite come potete aiutarci a classificare i glitch con [Gravity Spy](#)). Dopo avere identificato i glitch significativi nei dati, li sottraiamo per rimuoverli dai candidati onde gravitazionali, così come mostrato in [Figura 2](#). Otto dei 39 eventi che abbiamo osservato in O3a hanno beneficiato della sottrazione dei glitch come passo di preanalisi prima della **stima dei parametri**.



**Figura 1:** Confronto della [mediana](#) della distanza massima alla quale si può rivelare la fusione di un sistema binario di stelle di neutroni per ciascun rivelatore durante il secondo periodo osservativo (O2) con la stessa quantità durante la prima metà del terzo periodo osservativo (O3a).

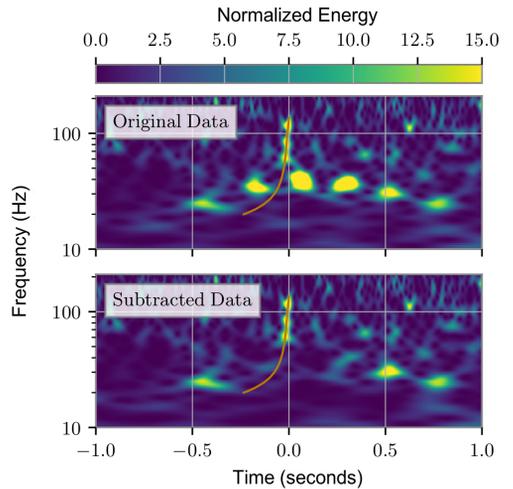
Nota: 1 megaparsec (Mpc) vale circa 3.26 milioni di anni luce.  
(Crediti: LIGO Virgo Collaboration / Eve Chase / Caitlin Rose / Northwestern / University of Wisconsin-Milwaukee).

Nella ricerca delle onde gravitazionali, l'identificazione dei candidati si svolge su due scale di tempo diverse. All'inizio, diversi programmi analizzano immediatamente i dati con lo scopo di generare dei [messaggi di allerta pubblici](#) entro pochi minuti. Successivamente rianalizziamo il segnale per produrre la lista curata di candidati in questo catalogo, usando una calibrazione aggiornata, una valutazione della qualità dei dati e metodi migliori per produrre la significatività statistica. Per decidere quali candidati considerare mettiamo la soglia della frequenza di false osservazioni a due eventi per anno, che significa che ci aspettiamo di osservare meno di due volte all'anno un candidato come quello considerato ma originato dal rumore di fondo. Dei 39 eventi in O3a, 26 sono già stati segnalati con messaggi di allerta quasi in tempo reale, mentre 13 sono riportati nel catalogo GWTC-2 per la prima volta.

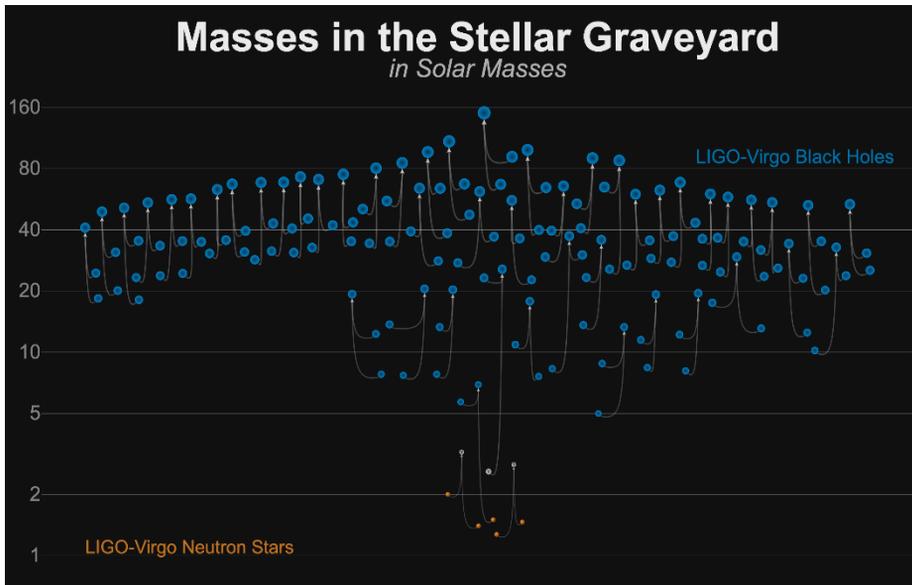
In GWTC-2 abbiamo introdotto una nuova nomenclatura per i segnali di onda gravitazionale. La vecchia convenzione secondo cui usiamo solo la data dell'osservazione è ancora valida per gli eventi già pubblicati, inclusi i più recenti: GW190412, GW190425, GW190521 e GW190814. Ai nuovi eventi in GWTC-2 viene aggiunto il tempo UTC dell'istante in cui vengono rivelati; per esempio GW190701\_203306 (si veda Figura 2) è stato rivelato alle ore 20:33:06 UTC del 1 luglio 2019. In questo modo possiamo identificare univocamente due eventi che rivelati nello stesso giorno, come è accaduto tre volte in O3a.

## LA MISURA DEI PARAMETRI ASTROFISICI

Noi investighiamo la natura astrofisica di ciascun evento con un metodo chiamato stima dei parametri che rivela i valori di numerose proprietà astrofisiche caratteristiche di ciascun evento di onda gravitazionale. Misuriamo i *parametri estrinseci* che descrivono la relazione di un sistema binario con noi qui sulla Terra, come la distanza dalla sorgente, la sua posizione nel cielo e l'orientamento del sistema binario dal punto di vista di un osservatore. Inoltre, misuriamo i *parametri intrinseci* che si riferiscono a proprietà come masse e spin di ciascun **oggetto compatto** nel sistema binario. A partire dai parametri dell'evento calcoliamo le **forme d'onda gravitazionali** che rappresentano l'andamento nel tempo della deformazione dovuta a ciascuna onda gravitazionale. Quindi confrontiamo questa predizione con i dati misurati da LIGO e Virgo, tenendo così conto del rumore presente nei rivelatori. Per mezzo di queste tecniche di stima dei parametri produciamo [intervalli di credibilità](#) al 90% che rappresentano l'intervallo di valori che sono ragionevolmente in accordo con i dati.

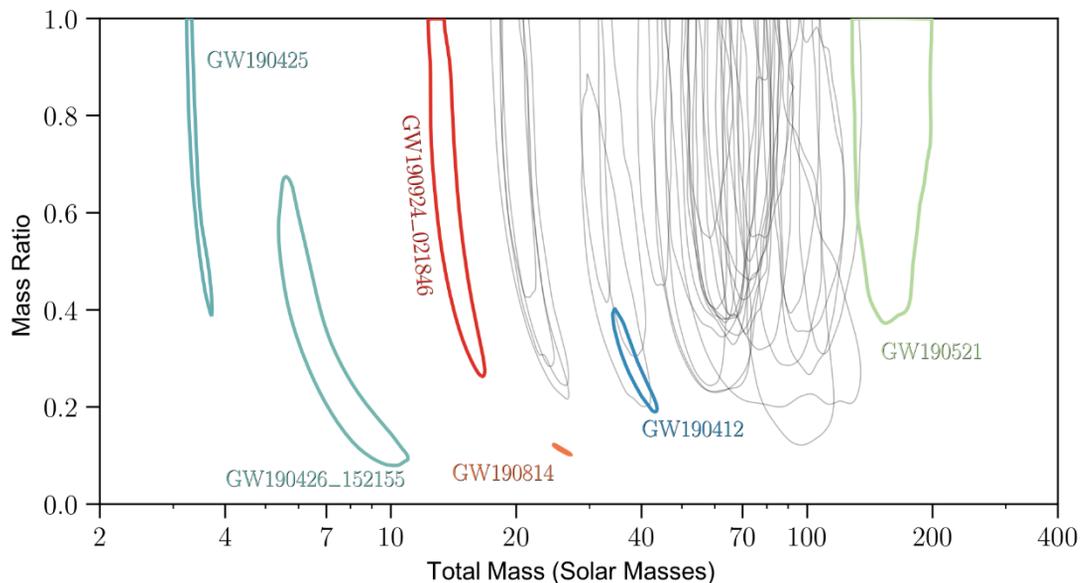


**Figura 2:** I dati tempo-frequenza dell'evento GW190701\_203306 prima e dopo la sottrazione del glitch. In questo caso la luce diffusa nel rivelatore LIGO Livingston ha creato un glitch sotto forma di eccesso di rumore a frequenze inferiori a ~40 Hz. (Adattato dalla Fig. 5 del [nostro articolo](#).)



**Figura 3:** Le masse di una vasta collezione di oggetti compatti. La grafica mostra buchi neri (blu), stelle di neutroni (arancio) e oggetti compatti di incerta natura (grigio) rivelati per mezzo di onde gravitazionali. Ogni fusione di oggetti compatti comprende tre oggetti compatti: i due che si fondono e il residuo finale. (Crediti: LIGO Virgo Collaboration / Frank Elavsky, Aaron Geller / Northwestern).

I nostri 39 eventi coprono una vasta regione di masse che codificano una grande ricchezza di informazione riguardante storia e formazione dei buchi neri e delle stelle di neutroni nell'Universo. Il segnale di onda gravitazionale generato ben prima della fusione dipende principalmente da una combinazione delle masse individuali dei componenti, detta **chirp mass**. Altri importanti parametri di massa includono la **massa totale** di ciascun sistema binario (la somma delle masse degli oggetti compatti) e il **rapporto di massa**, che è il rapporto tra la massa dell'oggetto più leggero e quella dell'oggetto più pesante.



**Figura 4:** Stime del rapporto di massa e della massa totale di tutti gli eventi di O3a. I contorni rappresentano intervalli di credibilità del 90%. Sei eventi speciali sono enfatizzati in colore. (Adattata dalla Fig. 6 del nostro [articolo](#).)

## SCOPERTE ECCEZIONALI DI O3A

La **Figura 3** illustra la gamma di masse in GWTC-2 che vanno da quelle delle stelle di neutroni di circa 1.4 masse solari fino a un buco nero di circa 150 masse solari. Le **Figure 4 e 5** enfatizzano i seguenti otto eventi, quattro dei quali sono descritti in pubblicazioni individuali:

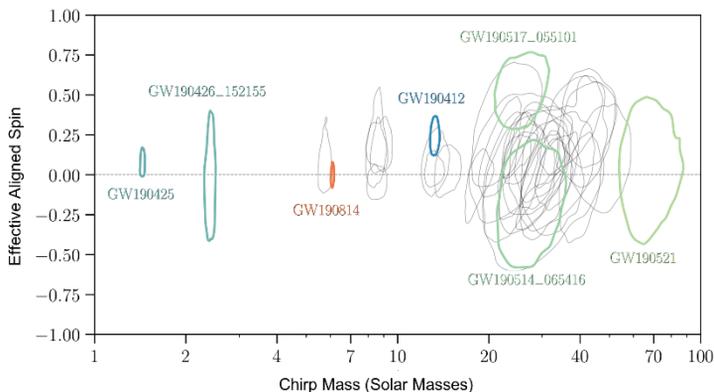
- [GW190412](#): il primo BBH con masse componenti decisamente diverse, che mostra anche indicazioni di [armoniche di ordine superiore](#)
- [GW190425](#): il secondo evento di onda gravitazionale compatibile con un sistema BNS dopo [GW170817](#)
- GW190426\_152155: un evento di bassa massa compatibile sia con un NSBH che con un BBH
- GW190514\_065416: un BBH con il più piccolo spin allineato efficace tra tutti gli eventi di O3a
- GW190517\_055101: un BBH con il più grande spin allineato efficace di tutti gli eventi di O3a
- [GW190521](#): un BBH con massa totale maggiore di 150 masse solari
- [GW190814](#): un sistema altamente asimmetrico di natura ambigua, corrispondente alla fusione di un buco nero di 23 masse solari con un oggetto compatto di 2.6 masse solari che potrebbe essere il buco nero più leggero oppure la stella di neutroni più pesante mai osservata in una sistema binario compatto
- GW190924\_021846: probabilmente il BBH con la massa più bassa, con entrambi i buchi neri più pesanti di 3 masse solari

Inoltre, GWTC-2 include eventi che coprono il cosiddetto "intervallo di massa inferiore" tra 2.5 e 5 masse solari. Da molti anni gli astrofisici teorizzano l'esistenza di questo intervallo di massa dovuto alla scarsità di osservazioni entro questa regione. O3a ha prodotto oggetti che si trovano potenzialmente in questo intervallo di massa, come i compagni leggeri di GW190814 e GW190924\_021846.

Come si vede in **Figura 4**, GW190521 corrisponde alla più grande massa totale osservata in O3a, quasi doppia di quella di GW170729, il BBH più pesante in [GWTC-1](#). Inoltre, è probabile che GW190521 includa il buco nero individuale più pesante individuato per mezzo delle onde gravitazionali ad oggi, con una massa di più di 90 masse solari. Parecchi altri eventi hanno masse totali superiori a 100 masse solari, inclusi GW190519\_153544, GW190602\_175927 e GW190706\_222641.

GWTC-2 presenta oggetti con masse più asimmetriche di qualunque sorgente presente in GWTC-1, così come GW190412 e GW190814, entrambe provenienti dalla fusione di un buco nero con un compagno più leggero. Fusioni asimmetriche aumentano l'intensità delle armoniche superiori, come dimostra l'osservazione di [GW190412](#). Questo catalogo aggiornato contiene altre importanti conquiste dell'astronomia delle onde gravitazionali. O3a include l'evento più lontano finora osservato così come nove eventi localizzati in una regione più piccola dell'1% dell'area totale del cielo.

Gli spin rivelano altre informazioni sulla storia evolutiva degli oggetti binari compatti. Gli spin sono associati al [momento angolare](#) di un dato oggetto compatto e vanno da una rotazione nulla fino alla rotazione massima. Tipicamente misuriamo lo spin con un parametro chiamato "spin allineato efficace" che corrisponde ad una particolare combinazione degli spin di ciascun oggetto compatto prima della fusione. La **Figura 5** mostra le stime di spin allineato efficace e chirp mass per ciascun evento. Un valore negativo di spin allineato efficace indica degli spin disallineati e suggerisce che il sistema binario si possa essere formato in un ambiente denso come un [ammasso globulare](#).



**Figure 5:** Spin allineato efficace e chirp mass per tutti gli eventi di O3a. I contorni rappresentano intervalli di credibilità del 90%. (Adattata dalla Fig.7 del nostro [articolo](#).)

La **Figura 5** mette in luce l'evento GW190517\_055101 che probabilmente ha il più grande spin allineato efficace. In GWTC-2 non è stato identificato nessun valore chiaramente negativo, benché GW190514\_065416 abbia probabilmente il più piccolo spin allineato efficace. Inoltre, gli spin possono indicare la presenza di [precessione](#) nel sistema binario; GWTC-2 contiene indicazioni di una possibile precessione in alcuni eventi, come GW190412 e GW190521.

## UN LUMINOSO FUTURO PER L'ASTRONOMIA CON LE ONDE GRAVITAZIONALI

Per quanto possa sembrare surreale, l'osservazione di onde gravitazionali è ormai diventata un'abitudine, a soli cinque anni di distanza dalla [prima osservazione](#) nel settembre 2015. Adesso, con 50 osservazioni di onde gravitazionali siamo capaci di esplorare meglio la popolazione di buchi neri e stelle di neutroni nell'Universo (si veda [questo sommario](#)). Nuove osservazioni di onde gravitazionali fanno anche crescere la nostra comprensione della Teoria della Relatività Generale (si veda [questo sommario](#)).

Il futuro dell'astronomia con le onde gravitazionali appare sempre più promettente dopo l'aggiunta di 39 eventi osservati nei primi sei mesi del periodo osservativo O3. Attualmente è in corso l'analisi della seconda parte di O3 (chiamata O3b) e ci sarà un'ulteriore espansione del nostro catalogo di onde gravitazionali transienti. Dopo O3 i rivelatori verranno ancora migliorati per aumentare ulteriormente le loro capacità di osservare eventi astrofisici, in tempo per l'inizio del quarto periodo osservativo. Mentre aspettiamo i miglioramenti strumentali e la costruzione di nuovi rivelatori, la comunità scientifica continuerà ad esplorare la natura dei buchi neri e delle stelle di neutroni nell'Universo.

### GLOSSARIO

**Chirp mass:** una combinazione matematica delle masse di ciascun oggetto compatto in un sistema binario. La chirp mass definisce la legge di aumento di frequenza caratteristica di una fusione gravitazionale per sistemi binari di bassa massa.

**Deformazione gravitazionale:** il cambiamento della lunghezza di un braccio del rivelatore, dovuto alla deformazione dello spazio-tempo al passaggio di un'onda gravitazionale, diviso per la lunghezza totale del braccio.

**Forma d'onda gravitazionale:** rappresentazione dell'evoluzione nel tempo di un'onda gravitazionale.

**Massa solare:** la massa del Sole. La massa solare viene usata spesso in astronomia come unità di massa.

**Mediana:** il valore che divide esattamente a metà una distribuzione, così che metà dei valori sono sopra e metà sotto la mediana.

**Oggetto compatto:** un oggetto astrofisico estremamente denso come un buco nero, una nana bianca, o una stella di neutroni.

**Rapporto di massa:** la massa dell'oggetto più leggero divisa quella dell'oggetto più pesante.

**Stima di parametri:** tecniche statistiche utilizzate per inferire i parametri astrofisici che corrispondono ad un segnale di onda gravitazionale.

### PER SAPERNE DI PIÙ:

Visitate i nostri siti web:

<http://www.ligo.org>, <http://www.virgo-gw.eu>

Leggete un preprint gratuito dell'articolo scientifico completo: <https://dcc.ligo.org/P2000061/public>

I dati dei 39 eventi scoperti in O3a sono disponibili tramite il portale GWOSC all'indirizzo di rete:

<https://www.gw-openscience.org/eventapi/html/GWTC-2/>

Il sito web GWOSC include documentazione utile, programmi esemplificativi e tutorials che servono da guida nell'esplorazione di questi dati pubblicamente disponibili.



Visitate i nostri siti web:

<http://www.ligo.org>

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

