

GWTC-2.1: UN CATALOGO ESTESO DI FUSIONI DI SISTEMI BINARI OSSERVATE DA LIGO E VIRGO DURANTE LA PRIMA METÀ DEL TERZO PERIODO OSSERVATIVO

Presentiamo qui il catalogo aggiornato di osservazioni di onde gravitazionali (GW) raccolte dai rivelatori LIGO e Virgo durante la prima metà del terzo [periodo osservativo](#) (O3a). Questo aggiornamento, chiamato GWTC-2.1 (Gravitational Wave Transient Catalog 2.1, vale a dire Catalogo di Onde Gravitazionali Transienti 2.1), corrisponde allo stesso periodo del catalogo [GWTC-2](#), che copre il periodo dal 1 aprile 2019 fino al 1 ottobre 2019, ma include eventi candidati con una più bassa significatività statistica per aiutare le ricerche multimessaggere, e utilizza miglioramenti nei metodi di analisi dei dati.

PRIMA LE COSE IMPORTANTI

Dopo che le onde gravitazionali vengono emesse da un evento astrofisico (di solito una collisione tra due oggetti compatti), esse viaggiano attraverso lo spazio, e se raggiungono la Terra fanno muovere di pochissimo gli specchi dei rivelatori di onde gravitazionali. Questi rivelatori sono eccezionali nella loro capacità di rivelare movimenti di questo tipo. Però, visto che anche molti fenomeni che non hanno nulla a che fare con le onde gravitazionali possono far muovere gli specchi, talvolta possiamo vedere un movimento che assomiglia a una debole onda gravitazionale, ma che in realtà non lo è. Analogamente, un vero segnale di onda gravitazionale potrebbe essere sepolto sotto una gran quantità di rumore di origine diversa, rendendo difficile l'identificazione della sua natura astrofisica. Per tale ragione, inizialmente si presta attenzione ai segnali (o meglio, agli "eventi candidati" o anche solo agli "eventi") che sono più intensi, e come tali sono identificati senza ambiguità (o almeno con un elevato livello di probabilità) come onde gravitazionali. Gli eventi gravitazionali che passano un certo livello elevato di significatività statistica vengono resi pubblici in cataloghi (Cataloghi di Onde Gravitazionali Transienti, o GWTC). Le collaborazioni scientifiche [LIGO](#) e [Virgo](#) hanno pubblicato nel 2020 il secondo catalogo di questo tipo, [GWTC-2](#). Quel catalogo include tutti gli eventi del primo catalogo GWTC-1 come pure quelli trovati durante la prima metà del terzo periodo osservativo (O3a) aventi una [frequenza di falso allarme](#) (FAR, dall'inglese false-alarm rate) inferiore a 2 per anno. In quel catalogo è stato identificato in O3a un totale di 39 nuovi segnali gravitazionali, che includono anche alcuni [eventi eccezionali](#).

DUNQUE ... A CHE SERVE GWTC-2.1?

Anche con i segnali più deboli si può fare scienza. Alcuni eventi astrofisici emettono anche altri tipi di radiazione oltre alle onde gravitazionali, in particolare onde elettromagnetiche (luce) e [neutrini](#). Lo scopo principale di questo catalogo è quello di aumentare la probabilità di trovare eventi candidati che coincidono in tempo e in posizione celeste con altri tipi di segnali astronomici, cosa che indicherebbe un'emissione da parte di un fenomeno unico. Questo porterebbe a nuove scoperte [multimessaggere](#) che si aggiungerebbero alla famosa fusione di stelle di neutroni osservata nel 2017 sia con onde gravitazionali, sia con la luce (si veda [qui](#) per imparare di più su questa eccitante scoperta). Dal momento che ci sono molti più eventi di bassa significatività che sono nascosti nei dati rispetto a quelli di alta significatività, le possibilità di trovare dei rari eventi multimessaggeri migliorano. Questa è la principale ragione per cercare segnali più deboli.

Purtroppo cercare deboli segnali di onde gravitazionali nei dati è un compito difficile, perché c'è molto rumore che in qualche caso può imitare un segnale. Quest'ultimo catalogo si avvantaggia di molti miglioramenti nei dati e nelle tecniche di analisi dei dati. Per esempio, le ricerche effettuate per questo catalogo aggiornato utilizzano dati che sono migliori sia in termini di accuratezza di calibrazione che di sottrazione del rumore. L'identificazione degli eventi candidati viene quindi eseguita con tre algoritmi per [filtri ottimi](#) che utilizzano i dati di tutti e tre i rivelatori (LIGO Hanford, LIGO Livingston, and Virgo), diversamente da GWTC-2, dove un solo algoritmo analizzava i dati della rete formata dai tre rivelatori.

FIGURE DALL'ARTICOLO

Per ulteriori informazioni su queste figure e su come sono state prodotte, si può consultare [l'articolo scientifico](#) liberamente disponibile.

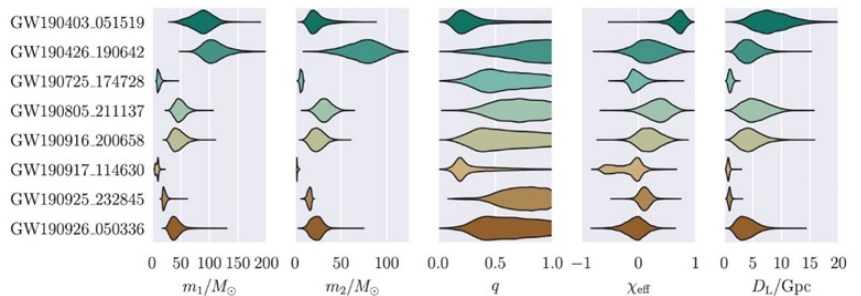


Figura 1 (Figura 2 nell'articolo): Parametri stimati per gli 8 eventi candidati più significativi in questo catalogo. Da sinistra a destra, la figura mostra la massa primaria m_1 e la massa secondaria m_2 (ciascuna espressa in unità di [massa solare \$M_\odot\$](#)), il rapporto di massa q , lo spin efficace χ_{eff} e la distanza di luminosità D_L (in [Gigaparsec](#)). La larghezza verticale di ciascuna regione colorata è proporzionale alla probabilità che il parametro abbia il valore corrispondente sull'asse orizzontale.

GWTC-2.1 include tutti gli eventi candidati con FAR inferiore a 2 al giorno, che è un valore molto più elevato di 2 all'anno che era il valore di soglia in GWTC-2. Per ciascuno di questi, gli algoritmi di ricerca calcolano una probabilità che il candidato sia di origine astrofisica (p-astro), o terrestre (p-terr, che significa che si tratta solo di rumore). Qualunque evento candidato che ha una probabilità astrofisica maggiore di quella terrestre (vale a dire, che ha un p-astro > 0.5 per almeno uno dei tre algoritmi) viene analizzato per determinare meglio la sua origine astrofisica.

Il catalogo GWTC-2.1 presenta 1201 candidati. In realtà ci aspettiamo che la maggioranza di questi eventi sia rumore. Tuttavia, usando questo catalogo e i dati dei telescopi, gli astronomi possono identificare potenziali eventi multimessaggeri. Tra i 1201 eventi candidati, 44 hanno una probabilità maggiore del 50% di avere un'origine astrofisica, 36 dei quali sono già stati riportati in GWTC-2, mentre 8 sono nuovi. Gli 8 candidati più promettenti sono mostrati in **Figura 1**.

SOMMARIO DEI NUOVI 8 CANDIDATI PIÙ PROMETTENTI

Nel seguito discutiamo le proprietà astrofisiche degli 8 nuovi candidati assumendo che siano tutti dei veri segnali di onda gravitazionale, vale a dire che non siano fluttuazioni dovute al rumore. Tutti i nuovi eventi candidati sembrano essere delle fusioni di coppie di buchi neri (BBH, dall'inglese Binary Black Holes), ma uno di essi potrebbe anche essere una fusione tra una stella di neutroni e un buco nero (NSBH, dall'inglese Neutron Star Black Hole) come le due osservazioni di eventi di questo tipo nei più nuovi dati di O3b [che abbiamo annunciato di recente](#). La maggioranza degli eventi sono composti da oggetti compatti con masse simili ([rapporto di massa](#) $q=1$), con un paio di eccezioni. La **Figura 2** mostra i rapporti di massa degli 8 eventi. GW190917_114630 (p-astro=0.77) è l'evento che potrebbe essere un NSBH, e lo si vede chiaramente in basso a sinistra nella figura (in questa figura *in basso a sinistra* significa una coppia più leggera con masse diseguali).

Tra gli eventi BBH ce ne sono due in cui i buchi neri iniziali hanno masse eccezionalmente alte. In particolare GW190426_190642 (p-astro=0.75), se davvero ha un'origine astrofisica, è una coppia con massa totale all'incirca 185 volte quella del Sole, e una massa residua circa 175 volte quella del Sole, surclassando così il precedente BBH più massiccio, GW190521, con massa totale e massa residua rispettivamente di 164 e 156 masse solari.

Un altro aspetto interessante dei nuovi eventi è correlato al loro spin (vale a dire alla loro velocità di rotazione). Anzitutto i nuovi oggetti compatti di questo catalogo hanno spin che sono probabilmente nulli, proprio come accadeva nel caso di GWTC-2. È anche interessante notare che nel caso di GW190403_051519 (p-astro=0.61) e GW190805_211137 (p-astro=0.95) la probabilità che almeno uno dei due buchi neri abbia spin adimensionale $\chi > 0.8$ è maggiore del 50% (dove $\chi=1$ è il massimo spin adimensionale che un buco nero può avere). Con il segnale di onda gravitazionale gli spin dei singoli componenti si determinano meno bene di una certa loro combinazione chiamata spin efficace χ_{eff} . Osservazioni passate di onde gravitazionali hanno mostrato che c'è un surplus di fusioni con $\chi_{\text{eff}} > 0$, e questa tendenza continua con i nuovi eventi (si veda la **Figura 3**).

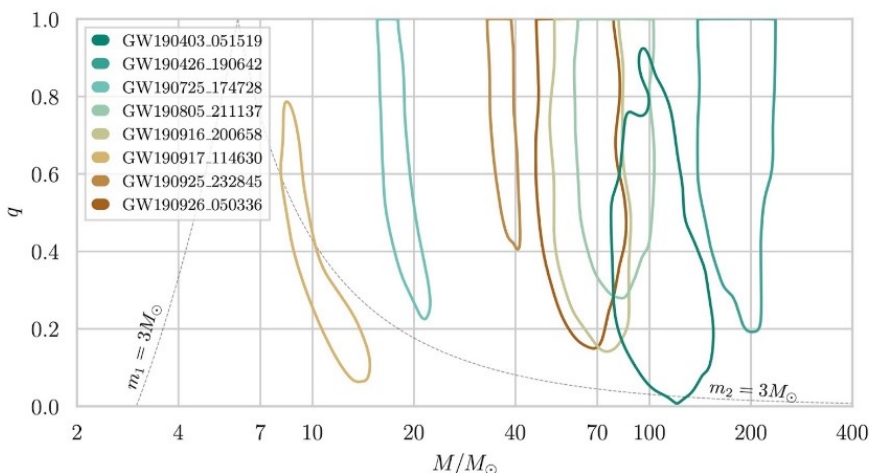


Figura 2 (Figura 3 nell'articolo): Massa totale (in unità di [massa solare \$M_{\odot}\$](#)) e rapporto di massa q per tutti i nuovi eventi. Ciascuno dei contorni colorati rappresenta un dato evento e racchiude un'area in cui ricadono la sua massa totale e rapporto di massa con una probabilità del 90%. Gli eventi seguono lo stesso schema di colore usato in Fig. 1. Le linee tratteggiate separano le regioni in cui il componente primario/secondario può avere una massa inferiore a $3M_{\odot}$.

IMPLICAZIONI ASTROFISICHE

Gran parte dell'astrofisica che possiamo imparare dai segnali di onde gravitazionali poggia sulla statistica delle popolazioni osservate. Per esempio, domande come "quanti sistemi binari di buchi neri ci sono?", "qual è la loro distribuzione di massa?" e "come è evoluta la frequenza di formazione di buchi neri nel tempo cosmico?" aspettano che i cataloghi di onde gravitazionali crescano ancora. Questo nuovo catalogo aggiunge nuovi eventi candidati, che, in aggiunta a quelli precedentemente noti, migliorano le nostre possibilità di rispondere a domande di questo tipo, o almeno la nostra capacità di intuire le risposte. Inoltre, esso fornisce un buon numero di candidati che vale la pena di combinare con i dati dei telescopi per individuare possibili osservazioni astronomiche multimessaggero.

Visitate i nostri siti web:

<http://www.ligo.org>

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



D'altra parte, singoli eventi possono a volte dare informazioni preziose sull'astrofisica e cosmologia. Come detto prima, questo catalogo riporta due candidati che, se hanno origine astrofisica, possiedono una massa eccezionalmente alta: GW190426_190642 e GW190403_051519. In entrambi i casi, la massa dell'[oggetto compatto](#) primario (cioè quello più massiccio tra i due che formano il sistema binario) cade *probabilmente* nel cosiddetto intervallo di massa proibito dalla instabilità di coppia. Questo è un intervallo di masse, tra circa 65 e 120 volte la massa del Sole, in cui, secondo i modelli attuali, non si possono trovare buchi neri provenienti dal collasso di una stella ordinaria alla fine della sua vita. Questo potrebbe indicare o un diverso canale di formazione dei buchi neri (ad esempio come risultato della fusione di un sistema binario precedente di buchi neri) o che i modelli di evoluzione stellare devono essere aggiornati per consentire alle stelle di formare buchi neri così massicci. Da notare che il catalogo GWTC-2 includeva già un segnale gravitazionale (nella fattispecie GW190521) il cui buco nero primario apparteneva allo stesso intervallo 'proibito'.

FATTI SIGNIFICATIVI

(Si tenga conto che in questa lista si assume che gli 8 eventi candidati abbiano un'origine astrofisica)

- Ci sono due eventi con masse all'interno dell'intervallo di instabilità di coppia.
- Un evento potrebbe essere una fusione NSBH, anche se la probabilità che sia un BBH è più alta.
- La maggioranza ha un rapporto di massa unitario, mentre due hanno masse diseguali.
- La maggioranza degli oggetti ha buchi neri con spin basso.
- Due eventi candidati hanno una buona probabilità di avere buchi neri con spin elevato, $\chi > 0.8$.
- Tutti gli eventi hanno spin efficaci positivi.

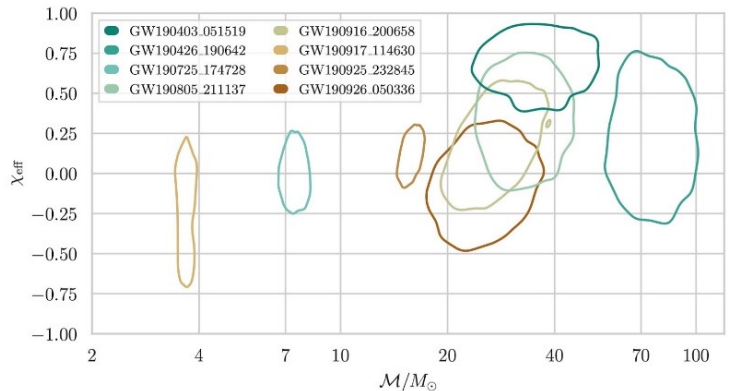


Figura 3 (Figura 4 nell'articolo): La [massa di chirp](#) M (in unità di [massa solare](#) M_{\odot}) e spin efficace χ_{eff} per tutti i nuovi eventi. Ciascun contorno colorato rappresenta un dato evento e racchiude un'area in cui ricadono la sua massa di chirp e lo spin efficace con una probabilità del 90%.

PER SAPERNE DI PIÙ:

Visitate le pagine web delle Collaborazioni LIGO e Virgo:

www.ligo.org

www.virgo-gw.eu

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

I dati sono disponibili [qui](#), [qui](#) e [qui](#).

DIZIONARIO / GLOSSARIO

Periodo osservativo: Periodo di tempo durante il quale i rivelatori di onde gravitazionali prendono dati per osservazioni astrofisiche.

Buco nero: Una regione di spazio-tempo prodotta da una massa estremamente compatta dove la gravità è così intensa da impedire a qualunque cosa, compresa la luce, di sfuggire.

Massa di chirp: una combinazione matematica delle masse dei due oggetti compatti in un sistema binario. La massa di chirp regola la crescita di frequenza che caratterizza un segnale gravitazionale per coppie di piccola massa.

Stella di neutroni: Ciò che resta di una stella massiccia che ha raggiunto la fine della sua vita. Quando una stella massiccia esaurisce il suo combustibile nucleare, muore in modo catastrofico – come supernova – e ciò può portare alla formazione di una stella di neutroni: un oggetto così massiccio e denso (anche se meno di un buco nero) che gli atomi non riescono a mantenere la loro struttura così come l'osserviamo sulla Terra. Queste stelle hanno una massa simile a quella del nostro sole, ma con un raggio di circa dieci km.

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

Buco Nero Binario (BBH): Un sistema formato da due buchi neri che orbitano uno attorno all'altro (si veda [qui](#)).

Stella di neutroni-Buco nero (NSBH): Un sistema formato da un buco nero e da una stella di neutroni che orbitano uno attorno all'altra (si veda [qui](#))

Rapporto di massa: rapporto tra la massa dell'oggetto compatto più leggero e la massa di quello più pesante.

Frequenza di falso allarme (FAR): Questa frequenza misura quanto spesso le fluttuazioni di rumore di un rivelatore possono produrre un segnale simile all'evento candidato che stiamo considerando. Quanto più questa frequenza è piccola e tanto più è probabile che il candidato abbia origine astrofisica.

Spin efficace: Il parametro che codifica l'informazione di rotazione che è meglio misurato in un segnale di onda gravitazionale. Formalmente si tratta della proiezione, pesata in base alla massa, degli spin individuali dei buchi neri nella direzione perpendicolare al piano orbitale.

Distanza di luminosità: La distanza tra l'osservatore e l'oggetto astrofisico dedotta dalla luminosità apparente dell'oggetto e dalla sua luminosità reale (assumendo che quest'ultima sia nota). Si veda [qui](#).

Filtro ottimi: Una tecnica per rivelare segnali nascosti nel rumore. L'algoritmo segnala quando in una scansione dei dati si individua la presenza di ben precise forme d'onda gravitazionali calcolate per mezzo della relatività generale (si veda anche [qui](#)),

M_{\odot} (massa solare): La massa del Sole (circa 2×10^{30} kg). La massa solare è un'unità comunemente utilizzata per rappresentare le masse in astronomia.