

GWTC-3, IL TERZO CATALOGO DELLE OSSERVAZIONI DI ONDE GRAVITAZIONALI

Introduzione

GWTC-3 è il terzo catalogo di osservazioni di onde gravitazionali transienti prodotto da [LIGO](#), [Virgo](#), and [KAGRA](#). GWTC-3 aggiorna i cataloghi precedenti con osservazioni di onde gravitazionali effettuate nella seconda parte del terzo periodo osservativo (detto O3b), iniziato a novembre 2019 e concluso a marzo 2020. Allo stato attuale GWTC-3 è il più completo catalogo di osservazioni di onde gravitazionali.

Quali sono i cataloghi di onde gravitazionali usciti finora?

- [GWTC-1](#), che contiene un totale di 11 eventi del primo e secondo **periodo osservativo** (O1 e O2)
- [GWTC-2](#), che ha aggiunto 39 eventi a GWTC-1, portando il totale degli eventi a 50 (gli eventi di O1, O2, e O3a, la prima parte di O3).
- [GWTC-2.1](#) una rivisitazione dell'analisi di O3a, che da una parte ha permesso di scoprire altri 8 candidati, ma dall'altra ha riclassificato 3 candidati che si trovavano in GWTC-2 perché la loro probabilità di essere veri segnali astrofisici era scesa sotto il 50% (si veda nel seguito la sezione [Rivelare onde gravitazionali](#)). Questo ha portato il totale complessivo a 55 eventi.
- GWTC-3 (questa pubblicazione) aggiunge altri 35 eventi di onda gravitazionale osservati nel periodo O3b, portando a 90 il numero totale di eventi osservati ad oggi (la [Figura 3](#) qui sotto illustra il significato di questo numero e mostra la sempre crescente popolazione di eventi osservati).

Nel corso di O3b, KAGRA si è unito a LIGO e Virgo per la parte finale del periodo osservativo e nell'aprile 2020 ha completato un [periodo osservativo di due settimane](#) insieme al rivelatore [GEO 600](#) che si trova in Germania. I risultati di quest'ultimo periodo osservativo verranno presentati separatamente.

Tutte le osservazioni che abbiamo effettuato finora provengono da sistemi binari che si fondono e che sono composti da stelle di neutroni o buchi neri. Noi indichiamo questi oggetti con il nome di oggetti compatti, e riteniamo che essi siano ciò che resta di stelle massicce. Gli eventi includono fusioni di **buchi neri binari**, di sistemi binari di stelle di neutroni e di coppie formate da un buco nero ed una stella di neutroni. La frequenza delle scoperte è cresciuta proporzionalmente alla crescita della sensibilità dei nostri rivelatori. Abbiamo fatto molta strada dalla nostra prima scoperta nel 2015.

In questo testo spieghiamo come raccogliamo i nostri dati, come facciamo le nostre osservazioni, come stimiamo le proprietà degli eventi di fusione, e inoltre riportiamo la lista degli eventi più importanti di GWTC-3, così come la pianificazione dei prossimi periodi osservativi.

Rivelatori di onde gravitazionali

Nel corso degli anni, la sensibilità di LIGO e Virgo è migliorata grazie ad una combinazione di aggiornamenti dei rivelatori e di sempre migliori tecniche di calibrazione ed analisi dei dati. Ci sono parecchi modi per indicare la sensibilità di un rivelatore di onde gravitazionali. Uno di questi è la stima della distanza massima alla quale esso può rivelare la fusione di un tipico sistema binario di stelle di neutroni: tanto più è grande questa distanza e tanto più lontano si possono rivelare dei segnali, e quindi tanto maggiore è il numero di osservazioni che ci aspettiamo di fare. O3 è stato diviso in due metà (chiamate O3a e O3b) separate da un intervallo di un mese durante l'ottobre del 2019. Durante questa interruzione sono state effettuate molte riparazioni e molti miglioramenti, inclusa la [pulizia degli specchi di LIGO Livingston](#), la [sostituzione dell'apparecchiatura per l'alto vuoto a LIGO Hanford](#), e l'[aumento della potenza del laser di Virgo](#). Questo lavoro, così come la manutenzione continua durante i periodi osservativi, permette ai rivelatori di conservare o aumentare la loro sensibilità. La Figura 1 mostra come la **mediana** della distanza massima per **stelle di neutroni binarie** sia cambiata per ciascun rivelatore. Tra O3a e O3b, questa quantità è aumentata del 13.3% per Virgo, del 6.5% per LIGO Hanford ed è rimasta approssimativamente costante per LIGO Livingston (il nostro rivelatore più sensibile) con una leggera diminuzione dell'1.5%.

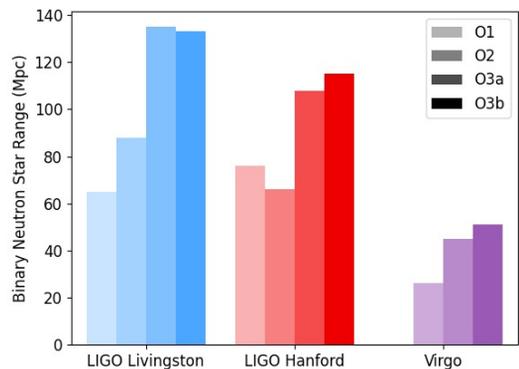


Figura 1: La mediana della distanza massima per stelle di neutroni binarie per ciascun rivelatore durante il primo periodo osservativo (O1), durante il secondo periodo osservativo (O2), e durante le due metà (O3a e O3b) del terzo periodo osservativo. Le distanze sono mostrate in unità di megaparsec. Crediti: LIGO-Virgo-KAGRA Collaborations/Hannah Middleton/OzGrav.

I dati grezzi forniti da un rivelatore di onde gravitazionali corrispondono all'andamento nel tempo dell'intensità della luce laser misurata all'uscita dell'interferometro. Questi dati grezzi richiedono una [calibrazione](#) per ottenere la corrispondente ampiezza della deformazione dovuta alle onde gravitazionali. La calibrazione va fatta con attenzione. Usiamo della luce laser per spingere con precisione gli specchi e misuriamo il corrispondente cambiamento dell'intensità luminosa all'uscita dell'interferometro. La calibrazione iniziale viene fatta quasi in tempo reale. Se necessario, si eseguono una ricalibrazione e una sottrazione dei rumori di lunga durata producendo così i dati calibrati più puliti che sono stati utilizzati in questa analisi.

Dopo la calibrazione e la sottrazione del rumore, viene controllata la qualità dei dati. Il problema più comune che incontriamo sono i disturbi transienti di breve durata (da secondi a minuti), detti *glitch* in inglese. L'origine di alcuni glitch è nota, come ad esempio la **luce diffusa**, mentre in altri casi l'origine è un mistero. Occasionalmente i glitch si sovrappongono ad un segnale di onda gravitazionale e in questi casi possiamo operare sottraendo i glitch per rimuoverli dai dati, come mostrato in [Figura 2](#). La sottrazione dei glitch è stata una parte importante della nostra analisi nel caso del primo segnale proveniente da un sistema binario di stelle di neutroni, [GW170817](#); in GWTC-3 7 eventi su 35 hanno richiesto la sottrazione dei glitch. Per scoprire altri aspetti dei glitch e aiutarci nel tentativo di capirli meglio, si visitino i siti dei progetti scientifici per tutti [Gravity Spy](#) e [GWhitchHunters](#).

La rivelazione delle onde gravitazionali

Durante tutto O3 abbiamo emesso messaggi pubblici di allerta in occasione di quelle che sembravano essere possibili nuove rivelazioni di onde gravitazionali. Messaggi rapidi di allerta consentono alla comunità astronomica di cercare segnali con molteplici messengeri emessi dagli eventi usando telescopi [elettromagnetici](#) e rivelatori di [neutrini](#). Messaggi di questo tipo venivano tipicamente distribuiti entro pochi minuti dalle osservazioni in O3b. La successiva rianalisi dei dati di onda gravitazionale può portare alla ritrattazione di alcuni candidati come pure alla scoperta di altri. L'analisi finale presentata in GWTC-3 beneficia di una calibrazione migliore, di una migliore qualità dei dati e dell'analisi del periodo osservativo nella sua interezza, per decidere se i candidati sono interessanti oppure no. In O3b ci sono stati 39 messaggi pubblici di allerta, 18 dei quali sono sopravvissuti alla rianalisi e sono inclusi in GWTC-3 come candidati con una probabilità superiore al 50% di essere eventi reali. Altri 17 sono stati riportati per la prima volta nell'analisi di GWTC-3.

Usiamo due tipi di analisi per cercare le onde gravitazionali: ricerche basate su modelli e ricerche non basate su modelli. Le prime usano una selezione di segnali simulati da fusioni di sistemi binari compatti (segnali simulati che sono detti *templates*): li usiamo per cercare nei dati dei segnali che evolvono allo stesso modo. Nelle ricerche non basate su modelli, invece, non cerchiamo un segnale specifico, ma richiediamo piuttosto che esso compaia in più di un rivelatore. Di solito, l'approccio basato su templates è migliore nella ricerca di segnali provenienti da sistemi binari (dal momento che sappiamo che aspetto dovrebbero avere), ma l'approccio non basato su modelli ci rende sicuri di non mancare nessun segnale anche quando non abbiamo il template giusto. Per decidere se un candidato può corrispondere ad un segnale reale calcoliamo la probabilità che il rumore casuale produca un segnale simile. Normalmente, tanto più un segnale appare lo stesso in rivelatori diversi, tanto più siamo fiduciosi che esso sia reale.

In GWTC-3, elenchiamo tutti i candidati a cui assegniamo almeno il 50% di probabilità di essere reali e non semplice rumore. Questa stima si basa non solo sulla comprensione del rumore nei nostri rivelatori, ma anche sulla frequenza attesa dei segnali di onda gravitazionale. Dal momento che stiamo solo iniziando a conoscere le popolazioni di oggetti compatti che si fondono, questi numeri potranno cambiare in futuro. Quando avremo imparato di più sulle popolazioni grazie a nuove, future osservazioni, potremo rivisitare questa analisi e controllare i candidati di cui siamo meno sicuri.

Inoltre, GWTC-3 include una lista di segnali più deboli che non superano la probabilità del 50% di essere segnali reali. Proprio come in [GWTC-2.1](#), la lista degli eventi sotto soglia di GWTC-3 include qualunque candidato con una **frequenza di falso allarme** inferiore a 2 al giorno. Ci sono 1048 candidati sotto soglia che ci aspettiamo siano dovuti per lo più al rumore; tuttavia questa lista può essere utile agli astronomi per indentificare potenziali eventi multimessenger.

I nomi delle onde gravitazionali

I nomi delle onde gravitazionali indicano la data e ora dell'osservazione relativamente al [Tempo Coordinato Universale \(UTC\)](#). In precedenza il nome di molti eventi riportava solo la data ma ora questo non basta perché, grazie all'aumento di sensibilità dei rivelatori, può capitare di rivelare più di un evento al giorno. Quindi, come abbiamo fatto per GWTC-2 e GWTC-2.1, ora aggiungiamo ore minuti e secondi ai nomi per poterli distinguere più facilmente. Per esempio l'evento GW200208_222617 è stata osservato l'8 febbraio 2020 alle 22:26:17 UTC.

Le proprietà delle sorgenti di onde gravitazionali

Le onde gravitazionali che osserviamo ci danno informazioni sulle proprietà dei sistemi binari che le hanno prodotte. Le proprietà possono essere *intrinseche* o *estrinseche*. Le proprietà intrinseche descrivono la sorgente stessa, come le masse o gli **spin** degli oggetti compatti. Le proprietà estrinseche descrivono il modo in cui abbiamo osservato l'evento dalla Terra e includono la posizione della sorgente nel cielo, la sua distanza dalla Terra, e l'orientamento del piano orbitale dei due oggetti compatti.

Arriviamo a conoscere le proprietà dei sistemi binari attraverso un processo detto di **stima dei parametri**. Si tratta di una tecnica statistica in cui confrontiamo molte possibili **forme d'onda gravitazionali** (con proprietà differenti) con i dati osservativi. Il confronto ci dice quali valori delle proprietà della sorgente sono compatibili con i dati (supponendo di avere un vero segnale di onda gravitazionale). Nei nostri risultati scegliamo intervalli credibili al 90%, che significa che siamo certi al 90% che le proprietà del sistema binario stiano dentro questi intervalli.

I contorni in **Figura 4** mostrano le regioni al 90% per due proprietà: la **massa totale** e il **rapporto di massa**. La massa totale ci dice quant'era pesante complessivamente il sistema. Le masse sono misurate in unità di massa solare M_{\odot} . Il rapporto di massa ci dice quant'erano diverse le masse dei due oggetti compatti che si sono fusi. Un rapporto di massa vicino a 1 significa che i due oggetti compatti erano approssimativamente della stessa massa.

Studiare le proprietà della popolazione nel suo insieme ci aiuta a capire come si sono formati questi sistemi. Possiamo anche usare queste osservazioni per mettere alla prova la teoria della relatività generale di Einstein e addirittura misurare la velocità con cui si espande l'universo.

Qui sotto elenchiamo alcuni eventi speciali di O3b.

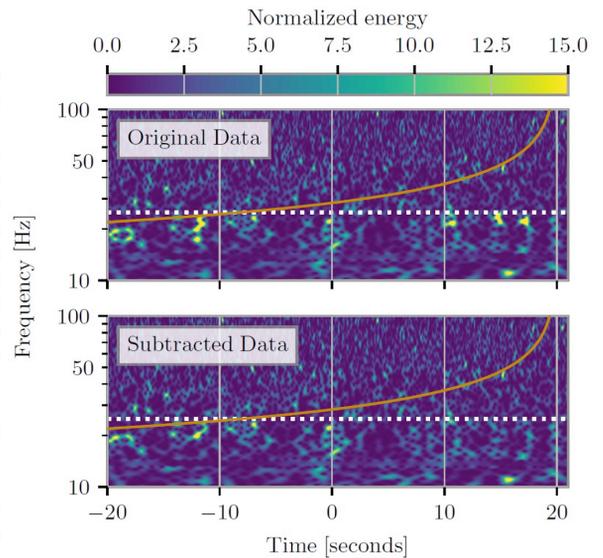


Figura 2: (Fig. 14 nella nostra pubblicazione) Un esempio di sottrazione di un glitch. I grafici mostrano i dati tempo-frequenza per l'evento GW200115_042309 e il colore indica l'energia in ciascun canale tempo-frequenza. Il grafico superiore mostra i dati non trattati e il grafico inferiore mostra i risultati della sottrazione del rumore. La traccia che corrisponde al segnale stimato è mostrata dalla linea arancione e non viene modificata dal processo di sottrazione del rumore.

Gli eventi più importanti di GWTC-3

In base alle proprietà dei 35 nuovi eventi elencati in GWTC-3, 32 di essi sono verosimilmente fusioni di buchi neri, e 3 sono possibili fusioni tra una stella di neutroni e un buco nero. Riteniamo che oggetti compatti la cui massa sia stimata essere inferiore a $3 M_{\odot}$ siano probabilmente stelle di neutroni. In O3b nessun candidato risulta classificabile come sistema binario di stelle di neutroni. La **Figura 5** riassume i valori più probabili di tre parametri chiave in otto eventi selezionati.

Fusioni di un buco nero con una stella di neutroni

Le tre possibili fusioni di un buco nero con una stella di neutroni sono:

- **GW191219_163120** è una fusione di stella di neutroni con un buco nero in cui i componenti hanno masse molto diverse. Il buco nero ha massa $31.1 M_{\odot}$ e la stella di neutroni ha massa $1.17 M_{\odot}$. La stella di neutroni è una tra le meno massicce mai osservate.
- **GW200115_042309** è chiaramente una fusione di buco nero con una stella di neutroni, ed è stata precedentemente descritta in un [articolo ad essa dedicato](#). Abbiamo stimato una massa di circa $5.9 M_{\odot}$ per il buco nero e $1.44 M_{\odot}$ per la stella di neutroni.
- **GW200210_092254** è una possibile fusione di un buco nero con una stella di neutroni. L'oggetto più pesante ha massa $24.1 M_{\odot}$ e non ci sono dubbi che sia un buco nero. D'altra parte la massa dell'oggetto più leggero, $2.83 M_{\odot}$, potrebbe indicare una stella di neutroni pesante oppure un buco nero leggero. Questo evento è molto simile ad un altro in O3a, **GW190814**. Dato quello che sappiamo sulle stelle di neutroni, GW200210_092254 corrisponde probabilmente ad un sistema di due buchi neri, ma non ne possiamo essere certi.

I lettori attenti potrebbero avere notato l'assenza di GW200105_162426, che è stato riportato assieme a GW200115_042309 in una [precedente pubblicazione](#). Quando consideriamo tutti gli eventi di O3b nel loro insieme, troviamo che la probabilità che GW200105_162426 sia un vero segnale astrofisico è il 36%, inferiore quindi alla soglia del 50% necessaria perché esso possa venire incluso nel catalogo. Per altre informazioni si veda la voce **GW200115_042309** nel glossario. A dispetto di ciò, l'evento è chiaramente significativo in mezzo al rumore di fondo e dunque lo consideriamo decisamente interessante! Se GW200105_162426 è reale, allora la sua sorgente è costituita da un buco nero di massa $9.0 M_{\odot}$ e da una stella di neutroni di massa $1.91 M_{\odot}$.

Fusioni di buchi neri binari

La selezione delle fusioni di buchi neri binari comprende:

- **GW200220_061928** è probabilmente il buco nero binario con la massa totale più alta in O3b (ma inferiore a quella di **GW190521** e **GW190426_190642** in O3a). La massa totale dei due buchi neri arriva a $148 M_{\odot}$ (con masse componenti $87 M_{\odot}$ e $61 M_{\odot}$). Il buco nero finale formato dalla fusione ha una massa di $141 M_{\odot}$, superando la soglia di $100 M_{\odot}$ per essere classificato come un [buco nero di massa intermedia](#).
- **GW191204_171526** è la fusione di un buco nero binario in cui siamo abbastanza sicuri che lo **spin efficace del sistema** (*effective inspiral spin* in inglese) sia positivo. Lo spin efficace del sistema è un parametro utile da misurare in un segnale di onda gravitazionale. Un valore positivo indica che almeno uno dei buchi neri è in rotazione e che nel loro insieme gli spin sono allineati con la direzione di rotazione orbitale (cioè perpendicolari al piano su cui orbitano i corpi del sistema binario). Questa informazione sullo spin è importante per capire come si è formato il sistema. Il primo segnale in cui abbiamo trovato un sistema con uno spin efficace positivo è **GW151226**. Nel caso di **GW191204_171526** le masse dei due buchi neri che si sono fusi sono $11.9 M_{\odot}$ e $8.2 M_{\odot}$, mentre quella del buco nero finale è $19.21 M_{\odot}$.
- **GW191129_134029** ha la più piccola massa totale tra gli eventi che noi attribuiamo con fiducia alla fusione di coppie di buchi neri. La sua massa totale è $17.5 M_{\odot}$ (con $10.7 M_{\odot}$ e $6.7 M_{\odot}$ le masse dei singoli buchi neri della coppia). Il buco nero risultante dalla fusione ha massa $16.8 M_{\odot}$.
- **GW191109_010717** proviene dalla fusione di un sistema binario di buchi neri per cui stimiamo che lo spin efficace sia negativo con un buon livello di significatività statistica. Ciò indicherebbe che globalmente gli spin dei singoli buchi neri sono allineati in direzione opposta a quella del momento angolare orbitale (questo significa che i due oggetti compatti probabilmente ruotavano in direzione opposta a quella del moto orbitale nel sistema binario). La probabilità che lo spin sia negativo è il 90%. Uno spin efficace negativo sembra essere meno frequente nelle nostre osservazioni di quello positivo. Questo evento è stato generato da una delle sorgenti più massicce, con masse $65 M_{\odot}$ e $47 M_{\odot}$ per i buchi neri

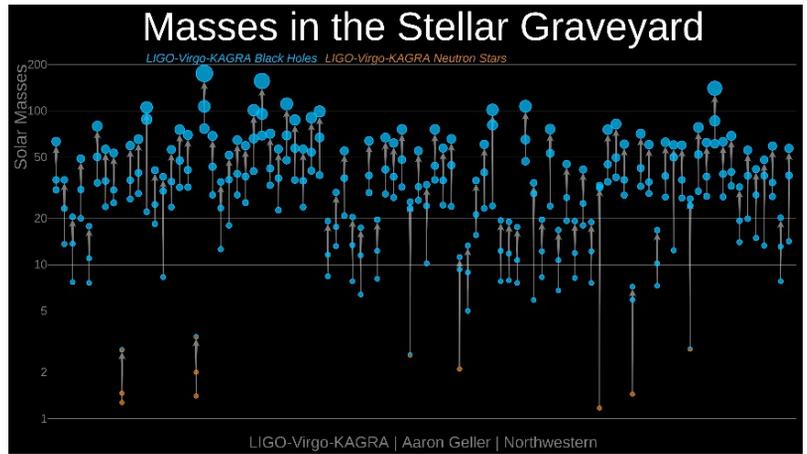


Figura 3: Masse degli oggetti compatti. Ogni cerchio rappresenta un oggetto compatto la cui massa è indicata sull'asse verticale in unità di **massa solare**. I cerchi blu rappresentano buchi neri e quelli arancione rappresentano stelle di neutroni. I cerchi misti, metà blu e metà arancioni, sono oggetti compatti la cui classificazione è incerta. Ogni fusione coinvolge tre oggetti compatti: i due oggetti che si fondono e l'oggetto risultante finale. Le frecce partono dagli oggetti che compongono il sistema binario e terminano sull'oggetto che risulta dalla fusione. Crediti: LIGO Virgo Collaboration/Frank Elavsky, Aaron Geller/Northwestern.

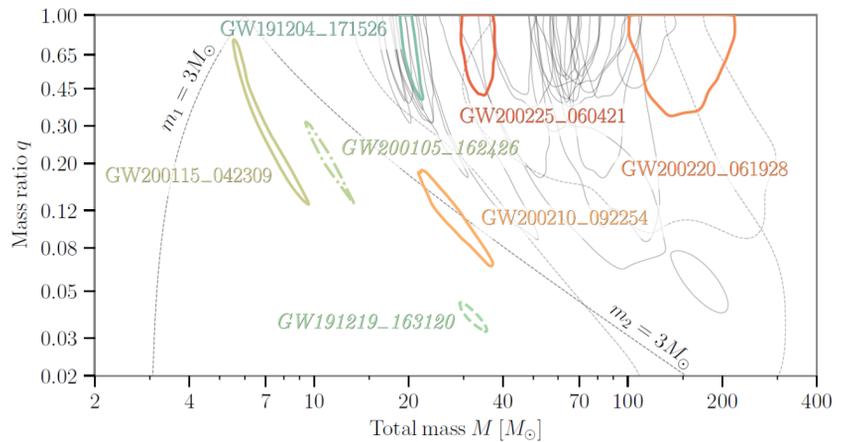


Figura 4: (Fig. 8 nella nostra pubblicazione) Stime di massa totale (M) e rapporto di massa (q) per tutti gli eventi di O3b. Ogni contorno rappresenta un diverso evento e racchiude i valori più probabili dei parametri con probabilità del 90% (la regione di credibilità al 90%). Parecchi eventi sono colorati per rimarcare le loro proprietà interessanti (si veda la descrizione nel testo e quella nel nostro articolo).

componenti e $107 M_{\odot}$ per il buco nero finale. Poiché la sua massa è vicina a quella di GW200220_061928, nei grafici noi mettiamo mettiamo in evidenza GW200225_060421, che è l'altro nostro candidato che ha con buona probabilità (circa l'85%) uno spin efficace negativo.

- **GW200210_092254** riteniamo che sia originato dalla fusione di una stella di neutroni e un buco nero. Siamo sicuri che l'oggetto più pesante sia un buco nero a causa della sua massa di $24.6 M_{\odot}$. D'altra parte l'oggetto più leggero ha una massa di $2.79 M_{\odot}$, e questo potrebbe indicare sia una stella di neutroni pesanti, sia un buco nero leggero. Questo evento è molto simile a quello di O3a [GW190814](#). In base a quello che sappiamo sulle stelle di neutroni, la sorgente di GW200210_092254 è con buona probabilità un buco nero, ma non possiamo esserne sicuri.

Guardando al futuro

Le collaborazioni LIGO e Virgo hanno svelato un universo ricco di sorgenti di onde gravitazionali. Ad oggi, abbiamo osservato 90 eventi. GWTC-3 aggiunge 35 eventi, inclusi i nostri candidati migliori di fusioni tra una stella di neutroni e un buco nero. Continuando ad osservare altri eventi, impareremo sempre di più sugli oggetti che li producono e le loro proprietà come popolazione, e li useremo per mettere alla prova la Relatività Generale. Rivelando altri eventi aumenteremo anche la probabilità di osservare i membri più inusuali di queste popolazioni.

In questo momento (novembre 2021) i rivelatori LIGO e Virgo non stanno funzionando per aggiornamenti da completare prima del quarto periodo osservativo (O4) che dovrebbe [iniziare nel 2022](#). Il rivelatore [KAGRA](#) in Giappone parteciperà a tutto il periodo O4. Aggiungere altri rivelatori alla rete permetterà di migliorare la nostra capacità di localizzare potenziali sorgenti.

Nel frattempo continueremo ad analizzare i nostri dati, ad estrarre maggiori conoscenze dalle nostre osservazioni di oggetti compatti, e proseguiremo nella nostra ricerca di altri tipi ancora inosservati di onde gravitazionali, tra cui onde gravitazionali continue, il fondo stocastico di onde gravitazionali e naturalmente l'ignoto!

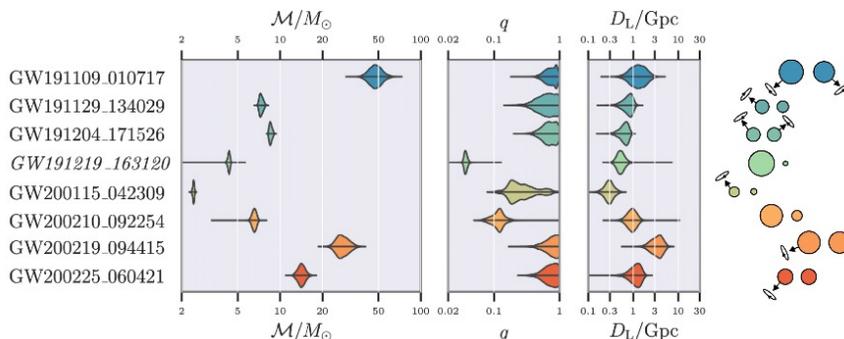


Figura 5: Grafici che mostrano i valori più probabili di tre parametri chiave di otto oggetti binari compatti contenuti nel catalogo GWTC-3: la massa di chirp del sistema binario, M ; il rapporto di massa tra il componente più leggero e quello più pesante, q ; e la distanza di luminosità, D_L . Ciascun sistema è illustrato a destra dei grafici con le masse rappresentate dalle dimensioni dei dischi e con lo spin (quest'ultimo non in scala).

Per saperne di più

Leggete le notizie sui nostri siti web:

<https://www.ligo.org/news.php>

<https://www.virgo-gw.eu/gwtc3>

<https://gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/>

Leggete l'articolo scientifico completo:

<https://dcc.ligo.org/LIGO-P2000318/public/main>

I dati di GWTC-3 sono disponibili qui:

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

Visitate i nostri siti web:

www.ligo.org

www.virgo-gw.eu

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



Glossario

Buco nero binario: Un sistema costituito da due buchi neri in orbita ravvicinata uno intorno all'altro. (Si veda anche [qui](#))

Stella di neutroni binaria. Un sistema consistente di due stelle di neutroni in orbita ravvicinata una intorno all'altra. (Si veda anche [qui](#))

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

Massa di chirp: Una combinazione matematica delle masse degli oggetti che compongono un sistema binario (si veda [qui](#) per la formula). La massa di chirp regola la caratteristica crescita di frequenza in un segnale gravitazionale di fusione, nel caso di piccole masse.

Oggetto compatto: Un oggetto astrofisico estremamente denso, come un buco nero, una stella di neutroni o una nana [bianca](#).

Spin efficace: Parametro che codifica l'informazione di spin in un segnale di onda gravitazionale e che è quello meglio misurato. Descrive quanto ciascuno dei buchi neri che compongono un sistema stia ruotando nella stessa direzione del moto orbitale (vale a dire, se lo spin e il moto orbitale procedono entrambi in senso orario o antiorario).

Frequenza di falso allarme: Questo numero misura la frequenza con cui le fluttuazioni di rumore di un rivelatore producono un segnale simile a quello del candidato che si sta considerando. Tanto più questa frequenza di falso allarme è piccola e tanto più è probabile che il candidato abbia un'origine astrofisica.

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

GW200105_162426: Una possibile fusione tra una stella di neutroni ed un buco nero, già [riportata in precedenza](#). Questo candidato ha una probabilità del 36% di essere un vero segnale astrofisico. Si tratta di un caso particolarmente difficile da analizzare per due motivi. Il primo è che è stato osservato soltanto dal rivelatore LIGO Livingston. Al momento dell'evento, LIGO Hanford non stava prendendo dati. Virgo era in presa dati, ma non ha identificato alcun segnale. Ci si può aspettare di trovare un evento che è visibile in un rivelatore ma invisibile in un altro: dipende dalla sensibilità relativa degli strumenti e dalla posizione della sorgente di onde gravitazionali nel cielo (una situazione simile si è verificata per [GW170817](#)). È sempre difficile stimare la significatività statistica di un segnale in un caso come questo. La seconda ragione è che a questo stadio si sa poco della popolazione dei sistemi costituiti da una stella di neutroni ed un buco nero dal momento che non ne abbiamo identificati molti. Ciò rende difficile la classificazione delle fusioni di sistemi di questo tipo. Progredendo con le osservazioni di altri sistemi analoghi impareremo di più e potremo riesaminare candidati come GW200105_162426.

Luce diffusa: Quando la luce laser colpisce un componente ottico, una piccola frazione della luce può venire diffusa (riflessa o trasmessa in una direzione inattesa). La luce diffusa può venire riflessa da altre superfici e quindi rientrare nel percorso del fascio laser principale, causando così dei disturbi. Per ulteriori informazioni su questo tipo di glitch oltre che sugli altri, si vedano [Gravity Spy](#) e [G WitchHunters](#).

M_{\odot} (massa solare): La massa del Sole (circa 2×10^{30} kg). La massa solare viene usata spesso per rappresentare le masse in astronomia.

Rapporto di massa: Il rapporto tra la massa dell'oggetto compatto più leggero e la massa dell'oggetto compatto più pesante (si tratta quindi di un numero compreso tra 0 e 1).

Mediana: Il valore che si trova esattamente a metà di una distribuzione, così che la metà degli valori sta sopra, e l'altra metà sta sotto la mediana.

Megaparsec: Un'unità di distanza. Un megaparsec (1 Mpc) vale circa 3.26 milioni di anni luce.

Stella di neutroni: Ciò che resta di una stella massiccia. Dopo avere esaurito il suo combustibile nucleare una stella massiccia muore in un modo catastrofico, come supernova, ed è possibile che ciò porti alla formazione di una stella di neutroni: un oggetto così massiccio e denso (benché 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 un raggio di circa 10 km.

Sistema binario di stella di neutroni – buco nero: Un sistema che consiste di un buco nero e di una stella di neutroni in orbita ravvicinata l'uno intorno all'altra. (Si veda [qui](#).)

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

Stima dei parametri: Una tecnica statistica usata per dedurre i parametri astrofisici che corrispondono ad un segnale di onda gravitazionale.

Probabilità astrofisica: La probabilità che un segnale corrisponda ad una vera onda gravitazionale. Dipende sia dall'intensità del segnale rispetto al rumore di fondo e dalla nostra conoscenza della popolazione a cui appartiene la sorgente. Avere molte osservazioni di buchi neri binari ci aiuta a capire come sono distribuiti nello spazio e a calcolare la probabilità che dei candidati di quel tipo abbiano davvero un'origine astrofisica. Al momento abbiamo ancora poche osservazioni di fusioni di stelle di neutroni con buchi neri e perciò è possibile che si debbano rivedere le stime attuali su questi oggetti quando effettueremo nuove osservazioni e ne sapremo di più sulla loro popolazione.

Spin: La velocità e direzione di rotazione (vale a dire il momento angolare) di un buco nero intorno al proprio asse.

Massa totale: La somma delle masse dei due oggetti compatti in un sistema binario.