

## LA PRIMA MISURA DELLA FUSIONE DI BUCHI NERI E COSA ESSA SIGNIFICA

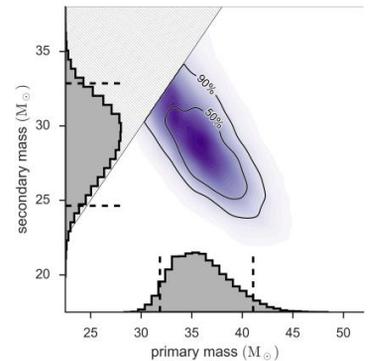
### SCOPRIRE LE ONDE GRAVITAZIONALI

Non ci è voluto molto perché i rivelatori **Advanced LIGO** (aLIGO) lasciassero il loro segno nell'astronomia e nell'astrofisica. La prima sorgente di **onde gravitazionali** rilevata dalla LIGO Scientific Collaboration e dalla Virgo Collaboration, chiamata **GW150914**, ha segnato l'inizio di un nuovo modo con cui possiamo conoscere l'universo. La sola scoperta di GW150914 è un traguardo straordinario, ma il vero divertimento inizia quando cerchiamo di decodificare ciò che ha da dirci. Per leggere di più sulla scoperta di GW150914 visita <http://www.ligo.org/science/outreach.php>. Qui riassumeremo alcuni dei primi fatti che abbiamo imparato in particolare su GW150914, e cosa questo significhi per l'astrofisica in generale.

### COSA HA PRODOTTO LE ONDE GRAVITAZIONALI?

Una volta che abbiamo identificato un'onda gravitazionale nei dati (per dettagli guarda <https://dcc.ligo.org/P1500229/public> e <https://dcc.ligo.org/P1500269/public>) supercomputer in diverse parti del mondo iniziano a ronzare per determinare che cosa abbia generato il segnale che abbiamo rilevato. A tal fine proviamo milioni di combinazioni di diversi numeri (parametri) che descrivono un segnale di onda gravitazionale. I parametri che descrivono una persona possono essere l'altezza, l'età, il colore degli occhi e dei capelli, etc. Il segnale dell'onda gravitazionale da GW150914 è venuto da due corpi densi mentre spiraleggiavano l'uno attorno all'altro fino a fondersi. I parametri che descrivono questo tipo di evento sono: quanto sono grandi i due corpi, quanto velocemente ruota ciascuno corpo, dove si trovano, e come sono orientati rispetto a noi. Vedendo quali combinazioni di questi parametri producono delle onde gravitazionali che riproducono i dati, misuriamo i diversi aspetti della sorgente reale. I dettagli sulla stima dei parametri di GW150914 si trovano su <https://dcc.ligo.org/P1500218/public>.

### ASSOCIATED FIGURES



**Figura 1:** Questa immagine mostra quali combinazioni delle masse di buchi neri sono coerenti con i dati, in unità di masse solari. I punti in cui le mappe sono più scure hanno più probabilità di essere corretti. Misuriamo una probabilità del 90% che le masse dei due buchi neri di GW150914 fossero all'interno del contorno nero contrassegnato "90%".

### I BUCHI NERI DI GW150914

Dalla stima dei parametri sappiamo che GW150914 ci è giunta dalla fusione di due **buchi neri di massa stellare**. I buchi neri che si sono fusi erano ciascuno circa 30 volte la massa del Sole, fatto che li rende i più grandi buchi neri di massa stellare mai osservati. I buchi neri di massa stellare si formano quando una grande stella collassa su sé stessa, possibilmente scatenando una esplosione di **supernova**. Al centro delle galassie esistono buchi neri milioni di volte più grandi rispetto ai buchi neri che hanno generato GW150914, ma non ci si aspetta che essi siano possibili sorgenti per Advanced LIGO e Advanced Virgo. I buchi neri che si sono fusi e che abbiamo rilevato si trovavano probabilmente in corrispondenza di una qualche parte dell'emisfero meridionale della Terra, e dalle misure sono risultati essere distanti circa 1 miliardo di **anni luce**. Le fusioni di buchi neri sono eventi incredibilmente violenti. **Se tutta l'energia rilasciata dalla fusione fosse giunta sotto forma di luce visibile, avrebbe brillato brevemente ma più intensamente della luna piena pur essendo distante un miliardo di anni luce.**

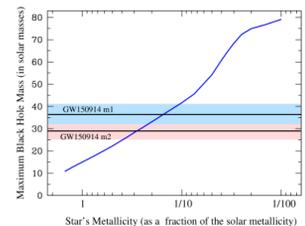
### BUCHI NERI DI MASSA STELLARE

Prima della scoperta di GW150914, il miglior metodo per studiare i buchi neri di massa stellare era attraverso l'osservazione di **binarie a raggi X** (XRB, dall'inglese X-ray binary), in cui materiale di una stella che orbita un buco nero cade in tale buco nero e, facendo ciò, emette raggi X. Al momento si conoscono 22 XRB per le quali la massa del buco nero è stata misurata dalla luce a frequenze ottiche emessa dal sistema binario; per la maggior parte la massa risulta essere tra 5 e 10 volte quella del Sole, in alcuni casi fino a 20 masse solari. Tutte le XRB tranne tre si trovano nella nostra galassia, fatto che rende i buchi neri che hanno generato GW150914 i chiari detentori del record nella massa e nella distanza dalla Terra. Il fatto che le masse dei buchi neri di GW150914 siano relativamente grandi ha delle conseguenze interessanti per la nostra comprensione della formazione di buchi neri.

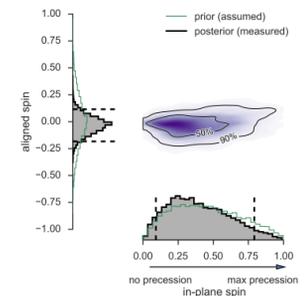
La formazione di buchi neri dal collasso di stelle è un processo fisico molto complicato e ci sono molti dettagli sconosciuti che influenzano il risultato finale, tra cui la massa della stella prima del collasso, quanto velocemente ruota, e dettagli come esattamente avvenga l'esplosione di supernova. Il fattore più critico per determinare la massa del buco nero rimanente è la **metallicità** della stella. Per gli astronomi, la "metallicità" si riferisce alla frazione di una stella composta da elementi più pesanti dell'idrogeno (H) o dell'elio (He). Elementi più pesanti di H e He si formano dentro le stelle o durante una supernova. Così come le masse dei corpi celesti sono tipicamente riferite alla massa del Sole, la metallicità delle stelle è riferita alla metallicità solare. Per formare buchi neri massicci come quelli che hanno generato GW150914, le stelle originarie (cioè quelle che hanno formato i buchi neri) devono aver avuto circa la metà della metallicità del Sole, magari anche fino al ¼. Misure come queste serviranno a aiutarci a comprendere i processi attraverso i quali le stelle convertono H e He in elementi più pesanti durante tempo cosmico.

### FORMAZIONE DI COPPIE DI BUCHI NERI

Mentre le masse individuali di GW150914 ci danno informazioni sulla formazione dei buchi neri, quali sono le possibilità che due di loro si fondano insieme? La maggior parte delle stelle più massicce si trovano in sistemi binari e le previsioni teoriche hanno a lungo suggerito l'esistenza di sistemi binari di buchi neri, sebbene non ne fosse mai stato osservato alcuno. L'osservazione di GW150914 non solo conferma che i sistemi binari di buchi neri esistono, ma anche che nascono sufficientemente vicini tra loro da poter infine fondersi, generando dei segnali di onde gravitazionali come quello che abbiamo rilevato. Ci sono sostanzialmente due casi principali per la formazione di sistemi binari di buchi neri: o ciascuna stella in un sistema binario passa attraverso una esplosione di supernova lasciando quindi un sistema di due buchi neri che infine si fondono, oppure due buchi neri distinti all'interno di un ammasso molto denso di stelle si avvicinano ed infine si fondono. Il tratto distintivo tra i due casi, che possiamo misurare dal segnale dell'onda gravitazionale, è lo spin dei due singoli buchi neri.



**Figura 2:** La massima massa di un buco nero consentita in funzione della metallicità. Le masse di GW150914 richiedono delle metallicità ben al di sotto del valore solare (posto a 1 in questo grafico). Adattato da Belczynski et al.2010, ApJ, 714, 1217.



**Figura 3:** Questa immagine mostra quali combinazioni degli spin dei buchi neri sono coerenti con i dati, in unità del massimo spin possibile.



## BUCHI NERI ROTANTI

Così come la Terra ruota attorno al proprio asse mentre orbita attorno al Sole, i due buchi neri ruotano mentre orbitano l'uno attorno all'altro. E, così come la Terra è inclinata nella sua orbita attorno al Sole, i buchi neri possono essere anch'essi inclinati. Quanto rapidamente i singoli buchi neri ruotino mentre orbitano l'uno attorno all'altro, e quanto siano inclinati l'uno rispetto all'altro, sono tra le prime cose che volevamo sapere su GW150914.

La Terra ruota una volta al giorno mentre orbita attorno al Sole. I buchi neri possono, in linea di principio, ruotare molto più velocemente di così ma fino ad un certo punto. Secondo la Teoria della Relatività Generale di Einstein c'è un tasso massimo per la rotazione ('spin' in inglese) di un buco nero. Lo spin massimo di un buco nero dipende dalla sua massa. Quantifichiamo lo spin dei buchi neri rispetto al massimo valore consentito. Un buco nero che ha uno spin di 1 starebbe ruotando alla massima velocità permessa dalle leggi della fisica; un valore di spin di 0.2 significa che il buco nero sta ruotando al 20% del valore massimo consentito.

Siamo anche molto interessati alla direzione dello spin dei buchi neri. Se pieghi le dita della tua mano destra attorno all'equatore della Terra nella direzione in cui sta girando, il tuo pollice punta lungo il polo nord geografico— quella è la "direzione" dello spin della Terra. Potresti fare lo stesso per ciascun buco nero rotante. Chiameremo quelle direzioni "S1" e "S2"— una per ogni buco nero. Ora, se pieghi le tue dita nella direzione in cui i buchi neri stanno orbitando l'uno attorno all'altro il tuo pollice punterà nella direzione orbitale, che chiamiamo "L". Se S1 e S2 puntano in direzioni diverse da L, l'orbita precede come una trottola, portando L a ruotare man mano che i buchi neri si avvicinano. Se S1 e S2 puntano nella stessa direzione di L (o in quella perfettamente opposta), l'orbita rimane stabile. Il fatto di poter misurare o meno la precessione orbitale è un indizio importante per definire come i buchi neri si siano inizialmente formati. Se non vi è alcuna precessione allora è più probabile che i buchi neri si siano formati insieme. Se vi è molta precessione è invece più probabile che i buchi neri si siano formati separatamente e prima di avvicinarsi. Per GW150914 non possiamo affermare in maniera definitiva quanto grandi o piccoli fossero gli spin individuali, o se portassero l'orbita a precedere. Possiamo affermare che lo spin totale S1+S2 è probabilmente piccolo. La misura dello spin per GW150914 suggerisce che gli spin individuali fossero piccoli, o che fossero puntati con direzione opposta, ciascuno cancellando l'effetto dell'altro. Mano a mano che Advanced LIGO e Advanced Virgo scopriranno altre fusioni di buchi neri cercheremo attentamente segni di precessione che ci aiutino a svelare come si formano in natura i sistemi binari di buchi neri.

## QUANTI ALTRI NE RIVELEREMO?

Subito dopo la rivelazione di GW150914 abbiamo iniziato a calcolare quanto fosse probabile trovarne altri durante il primo periodo di osservazione (O1, dall'inglese first observing run) di Advanced LIGO. Prevedere le probabilità di ulteriori scoperte non solo ci fornisce una prospettiva di ricerca, ma è anche una quantità che ha implicazioni sulla nostra comprensione di come le fusioni di buchi neri si verifichino in natura. Il numero che c'interessa calcolare è il tasso di fusioni di buchi neri come GW150914 nell'Universo. Il nostro calcolo del tasso di fusione di buchi neri è descritto in dettaglio in <http://dcc.ligo.org/P1500217/public>. Vi sono due ingredienti principali per calcolarlo: il numero di segnali che abbiamo rilevato, e la sensibilità dei nostri rilevatori. Misuriamo la sensibilità come il volume di Universo nel quale potremmo rilevare una fusione di buchi neri, moltiplicato per la quantità di tempo in cui abbiamo osservato. Ci riferiremo a questa quantità come al "volume spazio-tempo".

La quantità di dati analizzati fino a questo punto equivale a 16 giorni, anche se questi coprono il primo mese di O1 perché i rilevatori non sono costantemente in funzione, ed devono essere entrambi operativi per rivelare onde gravitazionali. Una volta calcolato il tasso di fusioni di buchi neri, possiamo usare quel numero e le nostre aspettative su quanto sensibili saranno Advanced LIGO e Advanced Virgo durante i prossimi periodi osservativi per fare previsioni sul numero di coalescenze di sistemi di buchi neri binari che osserveremo in futuro.

Maggiori informazioni sulle future campagne osservative di Advanced LIGO e Advanced Virgo si trovano in:

<http://www.ligo.org/science/Publication-ObservingScenario/Index.php>.

## CONTARE LE FUSIONI DI BUCHI NERI

Mentre GW150914 è stato l'unico evento nei primi 16 giorni di O1 che siamo pronti a dichiarare come "rivelazione", non è stato l'unica parte interessante dei dati che abbiamo analizzato fino ad ora. Un altro candidato, LVT151012, è stato trovato nei dati con una probabilità piuttosto bassa di essere un falso allarme (circa il 2%): questa è abbastanza bassa da attirare la nostra attenzione, ma non abbastanza per definirla una rivelazione. Le rivelazioni di onde gravitazionali sono indicate come "GW" (dall'inglese Gravitational Wave) seguito dalla data nel formato YYMMDD (anno-mese-giorno, ciascuno con 2 cifre). I candidati segnali di LIGO/Virgo iniziano con un "LVT" che sta per "LIGO-Virgo Trigger" seguito dalla data. LVT151012 è un candidato interessante, ma non è abbastanza significativo da poter essere "promosso" e diventare "GW". Abbiamo diversi eventi anche meno significativi tra i dati, molto probabilmente dovuti solo a qualche disturbo ai rilevatori, che influiscono tutti (pur debolmente) nel numero totale di possibili buchi neri rivelati.

## MISURARE LA SENSIBILITÀ DI ADVANCED LIGO

Per misurare quanto Advanced LIGO sia sensibile alle fusioni di buchi neri, analizziamo i dati in cui abbiamo aggiunto segnali simulati di onde gravitazionali per vedere quanto distante possa trovarsi la sorgente affinché sia ancora possibile rivelarla. Questa è una faccenda complicata perché la massa totale della fusione di un sistema binario di buchi neri determina la distanza massima a cui possiamo ancora osservarlo. Con solo uno o due segnali osservati abbiamo ancora molte poche indicazioni sulla varietà di possibili combinazioni di massa che potrebbero esserci. Per andare sul sicuro, mettiamo alla prova numerose ipotesi diverse per diverse popolazioni di fusioni di buchi neri e combiniamo i risultati nella speranza che la verità si trovi da qualche parte tra le diverse scelte che esploriamo.

Combinando le distanze tipiche alle quali Advanced LIGO è in grado di rilevare fusioni di buchi neri con la quantità di tempo in cui abbiamo osservato, otteniamo il volume spazio-tempo della campagna di osservazione. Dal numero delle rivelazioni di buchi neri e dal volume spazio-tempo misurato possiamo stimare che una volta ogni 15 minuti la Terra venga colpita da onde gravitazionali provenienti da fusioni di buchi neri avvenute in qualche parte nell'Universo!

## GUARDANDO AVANTI

Con il numero di fusioni di buchi neri contate nei dati, e la sensibilità di Advanced LIGO alle onde gravitazionali che esse producono, possiamo calcolare il tasso con cui i buchi neri si fondono nell'Universo. Il tasso che stimiamo può quindi essere combinato con la sensibilità prevista delle nuove campagne di osservazione Advanced LIGO e Advanced Virgo per stimare quante rivelazioni potremo pensare di ottenere. I numeri sono molto eccitanti!

Le figure 3 e 4 mostrano il numero di rivelazioni previste, e la probabilità di scoprire più di un numero N di rivelazioni, mentre aumentiamo il volume spazio-tempo misurato da Advanced LIGO e Advanced Virgo. Il volume spazio-tempo delle diverse campagne di osservazione è riportato nelle figure. Le previsioni sono molto incerte perché (a) con solo alcune rivelazioni non possiamo determinare precisamente il tasso e (b) la sensibilità di futuri periodi osservativi dipende da quanto bene andranno i miglioramenti agli osservatori. Prendendo in considerazione queste possibilità ci aspettiamo tra le 3 e le 90 rivelazioni significative di fusioni di buchi neri durante il prossimo periodo osservativo, e una probabilità quasi del 100% di rilevarne almeno una.

A mano a mano che riveleremo altri segnali di onde gravitazionali impareremo dettagli nuovi e più raffinati sulla popolazione di sistemi binari di buchi neri nell'universo. La rivelazione di GW150914 è solo un passo in un'era completamente nuova dell'astronomia e dell'astrofisica, e vi sono molte altre scoperte eccitanti che ci aspettano.

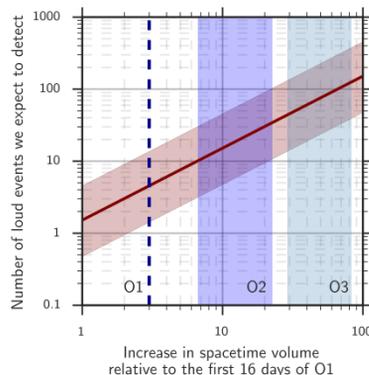


Figura 4: La striscia rossa mostra l'intervallo di possibili numeri di rivelazioni di onde gravitazionali intense che prevediamo di trovare all'aumentare del volume spazio-tempo osservato. Le strisce verticali mostrano le previsioni per il volume spazio-tempo osservato (paragonato ai primi 16 giorni di O1) relative ai successivi periodi osservativi O2 e O3.

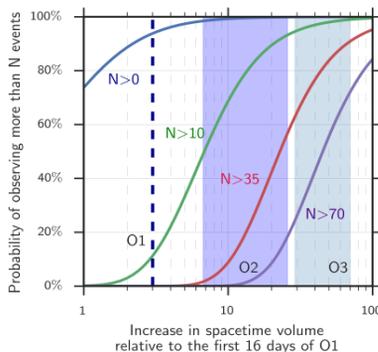


Figura 5: Linee di colore diverso mostrano la probabilità in percentuale di rivelare più di 0, 10, 35 e 70 segnali intensi di fusioni di buchi neri all'aumentare del volume spazio-tempo. La striscia verticale mostra il volume spazio-tempo previsto (relativo ai primi 16 giorni di O1) per la fine del primo periodo osservativo. Le bande verticali mostrano le previsioni per il volume spazio-tempo osservato alla fine dei prossimi periodi osservativi O2 e O3.