



LIGO Scientific Collaboration



GW151226: OSSERVAZIONE DI ONDE GRAVITAZIONALI DALLA COALESCENZA DI UN SISTEMA BINARIO DI BUCHI NERI DI 22 MASSE SOLARI

Pochi mesi dopo la [prima rivelazione](#) del [segnale gravitazionale GW150914](#) dalla fusione di buchi neri, il Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory (LIGO) ha osservato delle onde gravitazionali dalla collisione e fusione di una coppia di buchi neri. Questo segnale, chiamato GW151226, è arrivato ai rilevatori LIGO il 26 dicembre 2015 alle 03:38:53 UTC.

Il segnale, che è arrivato da una distanza di circa 1.4 miliardi di [anni luce](#), rappresenta un esempio di coalescenza di un sistema binario compatto, quando si fondono due oggetti estremamente densi. Sistemi binari come questo sono una delle molte sorgenti di onde gravitazionali che sono ricercate dai rilevatori LIGO e Virgo. Le onde gravitazionali sono increspature dello spazio-tempo e trasportano lontano l'energia di sistemi binari di questo tipo, causando lo spiraleggiamento dei due oggetti uno verso l'altro mentre orbitano. Questo spiraleggiamento avvicina sempre di più i due corpi, fino a che si fondono. Le onde gravitazionali prodotte dal sistema binario [dilatano e comprimono](#) lo spazio-tempo mentre si propagano nell'universo. Sono proprio queste dilatazioni e compressioni che possono essere rilevate da osservatori quali [Advanced LIGO](#) e [Advanced Virgo](#), ed essere usate per ricavare informazioni riguardo le sorgenti che producono le onde gravitazionali. GW151226 è la seconda osservazione certa della fusione di un sistema binario di buchi neri rivelata dalla LIGO Scientific Collaboration e dalla Virgo Collaboration. Insieme a GW150914, questo evento segna l'inizio di un'astronomia delle onde gravitazionali come un nuovo mezzo rivoluzionario per esplorare le frontiere del nostro universo.

IL SEGNALE

Proprio come la [prima rivelazione](#), GW151226 è stata osservata con la coppia di strumenti di LIGO, situati ad Hanford, Washington, e Livingston, Louisiana. **Figura 1** mostra i dati come sono stati osservati dai due strumenti durante il secondo finale prima che la fusione avvenisse. L'animazione alterna la visualizzazione dei dati grezzi del rilevatore a quella dei dati dopo che è stato estratto il segnale più corrispondente, permettendone una più facile identificazione. Ciò nonostante, e a differenza della prima osservazione (dove il segnale dell'evento emerge molto chiaramente sopra il rumore di fondo degli strumenti), in questo caso non è immediatamente chiaro che nei dati sia presente un segnale di onde gravitazionali. Questo accade perché il segnale di GW151226 (inteso come la distorsione gravitazionale misurata) è più debole. Inoltre, è anche più difficile da osservare in quanto il segnale è distribuito in un periodo di tempo maggiore, ben 1 secondo contro i 0.2 s della prima osservazione. Nonostante tutte le difficoltà nel riconoscere questo evento a occhio nudo, il nostro software di rilevazione è stato in grado di riconoscere il segnale tra i dati.

COME È STATO OSSERVATO?

La prima indicazione del segnale è arrivata da un metodo di ricerca online, che guarda ai dati dei rilevatori quasi in tempo reale. **Figura 2** mostra i risultati di uno dei metodi di ricerca. Questa analisi ha identificato GW151226 come una possibile onda gravitazionale a 70 secondi dal suo arrivo sulla Terra. Circa un minuto dopo, sono state calcolate le prime stime approssimate della possibile sorgente. Queste ricerche iniziali hanno usato una tecnica nota come [filtro ottimo](#) per identificare segnali di possibili onde gravitazionali. Con questo metodo, i dati vengono confrontati con molti segnali previsti (forme d'onda) per trovare la migliore corrispondenza. Se i dati di entrambi i rilevatori corrispondono a un segnale allo stesso tempo, allora si ha una possibile onda gravitazionale. Il filtro ottimo è stato essenziale sia per la rivelazione che per l'analisi di GW151226, a causa della debolezza del suo segnale rispetto a quello della prima osservazione (GW150914).

Le analisi iniziali hanno potuto fornire solamente stime approssimate delle proprietà della sorgente - incluse le masse dei due oggetti compatti, le loro frequenze di rotazione e il loro orientamento, la loro distanza e posizione nel cielo. Per determinare queste proprietà (note come "parametri") più accuratamente, abbiamo utilizzato una [tecnica diversa](#): abbiamo provato molte combinazioni diverse di parametri e ogni volta abbiamo controllato quanto la forma dell'onda prevista con la data combinazione corrispondesse al segnale osservato. Questo approccio ci ha permesso di costruire una mappa delle diverse combinazioni di parametri che possono spiegare la nostra osservazione, e calcolarne la probabilità che sia corretta. **Figura 3** mostra l'eccellente concordanza tra il segnale di onda gravitazionale ricostruito (come osservato dal rilevatore di Livingston), creato usando un intervallo dei parametri più probabili, e un segnale calcolato da una soluzione numerica delle equazioni di Einstein per la [relatività generale](#).

COME POSSIAMO ESSERE SICURI CHE SIA STATO UN EVENTO REALE?

Proprio come per la prima rivelazione abbiamo fatto [molti controlli](#) sui rilevatori per essere sicuri che nessun effetto ambientale o strumentale possa aver causato il segnale. Questi effetti potrebbero essere causati da qualsiasi cosa, da [frigoriferi mal funzionanti](#) a [fulmini lontani](#)! Durante il tempo dell'evento, non ci sono stati disturbi di grandezza tale da spiegare GW151226, quindi abbiamo concluso che il segnale deve aver avuto un'origine astrofisica.

FIGURE DALL'ARTICOLO SCIENTIFICO

Per maggiori informazioni su come sono state generate queste figure e sul loro significato si rimanda all'articolo su [Physical Review Letters](#)

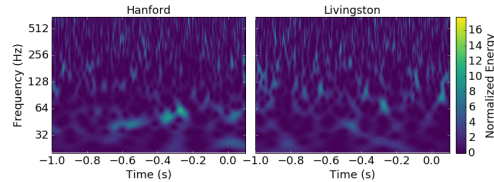


Figura 1: (Adattata dalla figura 1 dell'articolo scientifico) il segnale di onda gravitazionale GW151226 come osservato dai due rilevatori Advanced LIGO: LIGO Hanford (a sinistra) e LIGO Livingston (a destra). Le immagini mostrano i dati registrati dai rilevatori durante l'ultimo secondo prima della fusione, mentre il segnale varia in funzione del tempo (in secondi) e della [frequenza](#) (in Hertz o numero di oscillazioni dell'onda per secondo). Per essere certi che sia stata osservata un'onda gravitazionale reale, abbiamo confrontato i dati dei rilevatori con una serie di modelli predefiniti per la fusione di sistemi binari. Questo ci permette di trovare segnali di onde gravitazionali che sono immersi nel rumore di fondo degli strumenti e quasi impossibili da trovare a occhio nudo. La versione animata di questa figura, disponibile sul nostro [sito web](#), mostra i dati del rilevatore con e senza rimuovere il modello di onda gravitazionale più corrispondente, rendendolo molto più facile da identificare. Si può vedere come il segnale aumenti di frequenza mentre dei due buchi neri spiraleggiano. Questo segnale è molto più difficile da identificare a occhio nudo rispetto alla prima rivelazione [GW150914](#)! (Per vedere una versione animata della figura visitate il sito web)

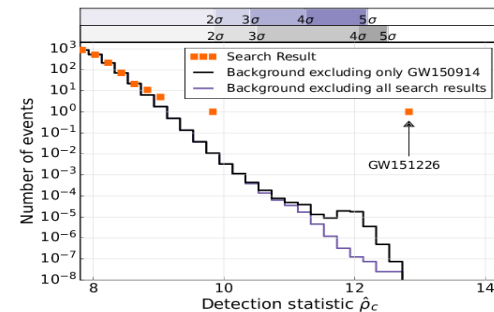


Figura 2: (Adattamento dalla figura 2 dell'articolo scientifico): Risultati della nostra ricerca di onde gravitazionali simili a GW151226 (e all'osservazione precedente, GW150914), che mostrano la rilevanza di questa osservazione rispetto a un fondo di falsi "eventi" causati dal rumore degli strumenti LIGO. Si può vedere che GW151226 è rivelata decisamente al di sopra del fondo

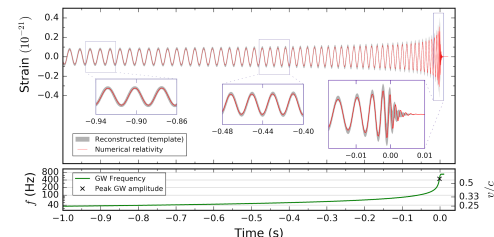


Figura 3: (Adattata dalla figura 5 dell'articolo scientifico) il pannello in alto confronta nel tempo il segnale di deformazione (*strain*) dell'onda gravitazionale come visto dal rilevatore di Livingston (in grigio) con un segnale calcolato da una simulazione di relatività numerica. Il tempo è espresso in secondi che mancano alla fusione dei buchi neri, che corrisponde allo zero. Il pannello inferiore mostra come la frequenza delle onde gravitazionali cambia nel tempo. La frequenza aumenta con lo spiraleggiamento dei due buchi neri. Questo può anche essere messo in relazione alla velocità orbitale v , mostrata sulla parte destra del pannello in basso, espressa in unità di misura di velocità della luce c . La croce nera indica il punto dove l'ampiezza del segnale era massima, che è anche, approssimativamente, il momento in cui è avvenuta la fusione.

QUINDI COSA ABBIAMO VISTO?

Confrontando i dati con milioni di segnali predetti, possiamo trovare quali combinazioni di parametri del sistema binario sono in grado di descrivere il segnale. **Figura 4** mostra la distribuzione di probabili combinazioni di masse per il sistema binario dedotta con questo metodo. Da questa figura possiamo dire con una certezza del 99% che la massa del corpo più piccolo non può essere minore di 4.5 volte la massa del Sole, valore che è ben al di sopra della più grande massa prevista per una [stella di neutroni](#). Di conseguenza si può essere fiduciosi sul sia stato osservato un sistema binario di buchi neri! La distribuzione delle combinazioni di massa tra i due buchi neri è centrata, rispettivamente, a circa 14 e 8 volte la massa del Sole. Dopo la fusione il buco nero risultante ha una massa 21 volte quella solare.

I buchi neri possono ruotare su se stessi (*spin*) mentre orbitano uno intorno all'altro --- esattamente come la Terra ruota sul proprio asse. Questa rotazione può essere inclinata a angoli diversi rispetto al moto orbitale; per la Terra questa inclinazione causa le diverse stagioni. Anche la velocità di rotazione dei buchi neri (grandezza dello spin) e la loro inclinazione (disallineamento dello spin) influiscono sulla lunghezza del segnale osservato. Se la rotazione è grande e allineata lungo la stessa direzione in cui orbitano i due buchi neri uno attorno all'altro, allora i due buchi neri possono avvicinarsi molto tra loro prima della fusione. Se invece i buchi neri ruotano (*spin*) in senso opposto alla loro rotazione orbitale, la loro fusione avverrà a una distanza maggiore, creando quindi un'onda gravitazionale con un segnale più corto. Quando le rotazioni su se stessi e le rotazioni orbitali non sono allineate, l'intero sistema binario oscilla mentre si avvicinano alla fusione (questo prende il nome di precessione dello spin)

La **figura 5** mostra la combinazioni dell'ampiezza dello spin e del suo disallineamento che possono descrivere i dati. Troviamo che è più probabile che il buco nero primario (il più massiccio tra i due) ruoti nella stessa direzione del moto orbitale. In ogni caso non possiamo dire come sia inclinato. Questa figura mostra anche che non siamo in grado di mettere alcun vincolo sulla rotazione del buco nero meno massiccio.

Dopo la fusione, anche il buco nero finale è in rotazione, con uno spin che risulta essere il 70% del suo massimo valore possibile.

La massa del buco nero finale è minore della somma dei due buchi neri iniziali, in quanto parte della massa si è trasformata direttamente in energia delle onde gravitazionali durante lo spiraleggiamento e la fusione. La differenza di massa equivale alla conversione di circa la massa del nostro Sole in energia irradiata sotto forma di onde gravitazionali. Al suo picco, la potenza delle onde gravitazionali emessa dal sistema binario è maggiore della potenza luminosa combinata (che gli astronomi chiamano *luminosità*) di tutte le stelle e galassie nell'universo osservabile!

Possiamo anche dire che questa fusione è avvenuta a una distanza di circa 1.4 miliardi di [anni-luce](#) --- quindi queste onde gravitazionali hanno percorso una distanza simile a quelle della prima rivelazione, GW150914.

È possibile usare la differenza tra i momenti di arrivo delle onde gravitazionali in ciascun rilevatore per "triangolare" la posizione della sorgente dell'onda gravitazionale nel cielo. Comunque, con solamente i due rilevatori LIGO, la stima della posizione nel cielo risulta molto approssimata. Per GW151226, possiamo localizzare la posizione entro 850 [gradi quadrati](#) --- circa 4000 volte l'area della luna piena. La precisione del metodo di triangolazione sarà migliorata in futuro con l'aggiunta di ulteriori rilevatori di onde gravitazionali (per maggiori dettagli guardare questo [articolo](#)).

GW151226 è stata per circa 1 secondo nella banda sensibile di frequenze dei rilevatori, risultando quindi un segnale decisamente più lungo della prima rilevazione che è durata solo 0.2 s. Questo è dovuto al fatto che i buchi neri di questo sistema binario hanno massa minore: ciò ha reso possibile osservare una parte maggiore della fase di spiraleggiamento di questo evento nella banda sensibile dei rilevatori LIGO. Uno spiraleggiamento più lungo significa inoltre che GW151226 può essere usata per mettere dei vincoli migliori riguardo ogni eventuale violazione della [relatività generale](#). Non abbiamo trovato comunque nessun indizio che suggerisca che Einstein abbia sbagliato.

CHE COSA SIGNIFICA PER L'ASTROFISICA?

GW151226 è la prima osservazione diretta di un sistema binario di buchi neri in questo intervallo di masse. Siccome questi sistemi non dovrebbero emettere luce, le onde gravitazionali che emettono ci permettono di scoprire nuovi sistemi che non potrebbero essere osservati direttamente in nessun altro modo. Ciò detto, possiamo controllare la consistenza dei nostri risultati con altri metodi. Per esempio, le masse misurate (sia per i buchi neri iniziali che per quello finale) sono consistenti con le masse di altri buchi neri ricavate da osservazioni di [sistemi binari di raggi x](#). Comunque qui per la prima volta abbiamo osservato assieme due buchi neri in questo intervallo di masse in un sistema binario.

I buchi neri binari si possono formare in molti modi. Possono aver avuto origine da due stelle massicce che sono nate insieme e si sono evolute insieme, per diventare una coppia di buchi neri alla fine delle loro vite. Oppure, in aree dell'universo dove le stelle singole sono distribuite in modo più denso, un sistema binario di buchi neri potrebbe essersi formato a partire da due oggetti singoli che hanno interagito tra di loro per diventare un sistema binario più avanti nelle loro vite. Le proprietà di GW151226 sono consistenti con entrambe queste ipotesi di formazione, per cui al momento non possiamo preferirne una rispetto all'altra.

Comunque, sia GW151226 che GW150914 indicano che ci potrebbero essere nell'universo molti più sistemi binari di buchi neri con masse stellari di quanto inizialmente immaginato. Queste rivelazioni iniziali sono un primo passo importante per capire di più riguardo alla popolazione di questi sistemi binari, che finora ci era rimasta completamente nascosta.

PUNTI SALIENTI

La LIGO Scientific Collaboration e la Virgo Collaboration hanno osservato un'altra fusione di un sistema binario di buchi neri, rilevato da Advanced LIGO. Le osservazioni di GW151226 e GW150914 insieme indicano la presenza di una popolazione di buchi neri binari nell'universo. Le rivelazioni di onde gravitazionali confermano pertanto l'esistenza di buchi neri e forniscono un nuovo modo per scoprire i misteri dell'universo. L'era dell'astronomia gravitazionale è veramente iniziata!

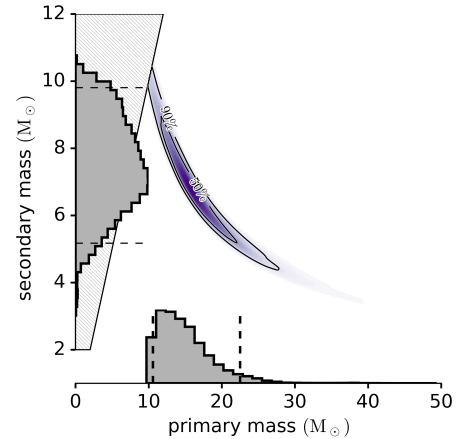


Figura 4: (Adattata dalla figura 3 dell'articolo scientifico) Questa figura mostra le combinazioni delle masse dei buchi neri (in unità della massa solare) che sono in grado di descrivere i dati osservati. Chiamiamo primario il buco nero più massiccio e secondario quello meno massiccio. Zone più scure corrispondono a combinazioni più probabili di masse, dove misuriamo una probabilità del 90% per GW151226 di avere masse comprese nella zona a contorno nero etichettata con "90%"

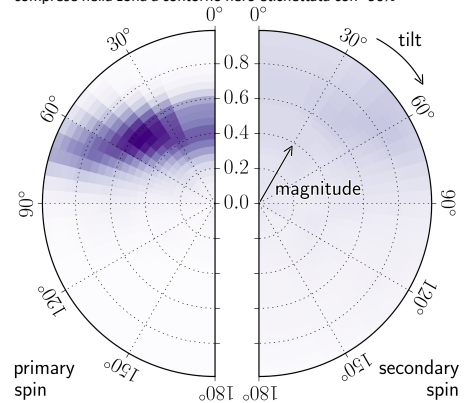


Figura 5: (Adattamento dalla figura 4 dell'articolo scientifico) Questa figura mostra le possibili grandezze degli spin (cioè quanto veloce ruotano) e del disallineamento (l'inclinazione rispetto al movimento orbitale) dei due buchi neri. Chiamiamo primario il buco nero più massiccio e secondario quello meno massiccio. Ogni blocco nel semicerchio rappresenta una combinazione diversa di grandezza e disallineamento, l'ombreggiatura più scura indica le combinazioni con una probabilità maggiore. Si possono porre dei vincoli sulla grandezza dello spin e del disallineamento per il buco nero primario, ma non riusciamo a porre alcuna restrizione per il secondario.

LEGGI DI PIÙ:

La pagina di LIGO Scientific Collaboration (include il link alla nostra pubblicazione in [Physical Review Letters](#)): www.ligo.org
La pagina di Advanced Virgo <http://www.virgo-gw.eu/>
Informazioni di base sulla tecnologia degli aggiornamenti Advanced LIGO tinyurl.com/ALIGO-upgrades-pdf
LIGO Open Science Center (con l'accesso ai dati di GW151226): <https://losc.ligo.org>



Visitate il nostro sito web :

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

