

GW170817: Osservazione di onde gravitazionali dallo spiraleggiamento di un sistema binario di stelle di neutroni

Il 17 Agosto 2017, alle 12:41:04 UTC (8:41:04am EDT in Nord America, e 2:41:04pm in Italia) la rete di rivelatori di onde gravitazionali LIGO -Virgo ha registrato un'onda gravitazionale proveniente dallo spiraleggiamento di due oggetti stellari compatti, noti come 'stelle di neutroni'. Questo evento è avvenuto solo tre giorni dopo la prima rivelazione congiunta LIGO-Virgo della fusione di un sistema binario di buchi neri, GW170814. Gli scienziati coinvolti nella ricerca delle onde gravitazionali si aspettavano di osservare onde gravitazionali dalla fusione di sistemi binari di stelle di neutroni, poiché le [stelle di neutroni](#) sono molto comuni nel nostro Universo e perché sistemi binari di stelle di neutroni erano già stati osservati con i radio telescopi. L'esempio più famoso è quello del [sistema binario di Hulse e Taylor](#), scoperto nel 1974. I radioastronomi hanno continuato a studiare la sua orbita per ormai 40 anni, mostrando che le due stelle stanno lentamente spiraleggiando l'una verso l'altra. Infatti, fra 300 milioni di anni circa, le stelle del sistema binario di Hulse e Taylor si fonderanno assieme, creando un segnale simile a quello che le collaborazioni LIGO e Virgo hanno appena osservato per GW170817. La rete di rivelatori era nella sua seconda presa dati (chiamata O2): i due rivelatori LIGO avevano iniziato la presa dati il 30 novembre 2016, mentre Virgo si è aggiunto il 1 agosto 2017. Più rivelatori permettono agli astronomi gravitazionali di misurare precisamente il punto nel cielo di provenienza del segnale. Più rivelatori ci sono, migliore sarà la localizzazione della sorgente nel cielo. Per questo evento, la localizzazione indicava una regione allungata (chiamata ellisse d'incertezza) larga circa 2 gradi e lunga 15, coprendo quindi un'area totale di circa 28 gradi quadrati (per confronto, queste sono circa le stesse dimensioni e forma di una banana vista alla distanza di un braccio). La zona del cielo è nella costellazione dell'Idra, centrata vicino alla stella [Psi Hydrae](#) visibile ad occhio nudo.

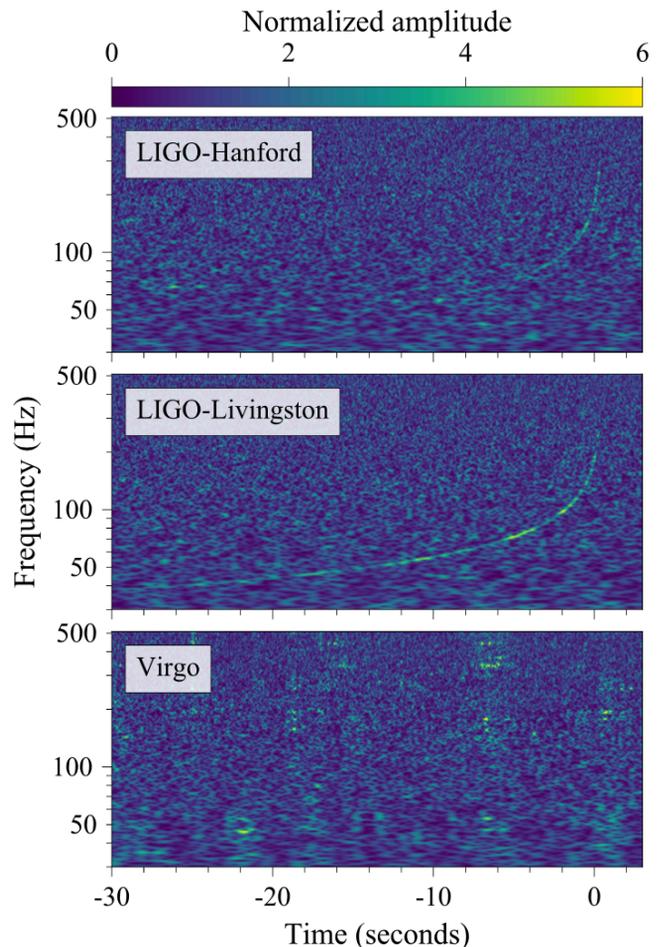


Figura 1: Queste figure mostrano gli spettrogrammi del segnale GW170817 per ciascuno dei rivelatori LIGO e per il rivelatore Virgo. Il tempo scorre sull'asse orizzontale mentre le frequenze sull'asse verticale. Il segnale di 'chirp' della binaria inizia in basso a sinistra e poi si impenna verso l'alto molto rapidamente verso destra. Il disturbo 'glitch' presente nei dati di LIGO-Livingston è stato mitigato e non si vede qui.

Altre rivelazioni: Astronomia "multimessenger"

Solo 1.7 secondi dopo che la rete di rivelatori aveva rivelato il segnale gravitazionale, un impulso di raggi gamma (GRB, dall'inglese gamma-ray burst) noto come GRB170817A è stato rivelato da [Fermi-GBM](#). Segnali forti come GW170817 o GRB170817A sono spesso chiamati 'trigger' (in inglese, grilletto) poiché determinano l'inizio di altre ricerche astronomiche. Nel caso di questo evento, i trigger dell'onda gravitazionale e dei raggi gamma hanno generato un messaggio d'allerta che è stato mandato alla comunità astronomica, generando una campagna di ricerca che ha prodotto molte osservazioni di un'emissione luminosa morente proveniente dall'evento, vicino la galassia [NGC 4993](#). Per maggiori dettagli sulla campagna osservativa "multimessenger", che usa sia la luce che onde gravitazionali, si consiglia di leggere il riassunto scientifico relativo.

Segnale dell'onda gravitazionale

Le onde gravitazionali provenienti da stelle di neutroni in un sistema binario possono essere misurabili in un rivelatore per un minuto o più. Nel caso di GW170817, circa 100 secondi prima di fondersi assieme, le stelle di neutroni distavano circa 400 km e completano 12 orbite al secondo. Le onde gravitazionali portano via energia dal sistema con ogni orbita, causando l'avvicinarsi delle stelle. Mano a mano che l'orbita si restringe, le stelle di neutroni sono sempre più veloci, incrementando frequenza ed ampiezza del segnale gravitazionale. Il lento restringimento dell'orbita è chiamato spiraleggiamento e l'incremento della frequenza è chiamato 'chirp'. Il processo accelera finché le due stelle si fondono formando un singolo corpo. Per visualizzare il segnale gli astronomi gravitazionali trovano utile guardare i dati nella forma di [spettrogramma](#). Questa è un'immagine a colori, dove il tempo scorre sull'asse orizzontale e l'asse verticale mostra la frequenza delle fluttuazioni misurate nel rivelatore (le frequenze basse alla base dell'asse verticale, le frequenze alte in alto). *L'immagine a spettrogramma del chirp di un sistema binario di stelle di neutroni è simile ad una linea lunga e sottile, inizialmente molto piatta e alle basse frequenze, ma al passare del tempo inizia ad impennarsi verso l'alto sempre più rapidamente fino all'ultima piega luminosa appena prima che le stelle si fondano assieme.* Il segnale è chiaramente visibile negli spettrogrammi di entrambi i rivelatori LIGO, ma non nel rivelatore Virgo. Questo aspetto è molto importante per la localizzazione nel cielo. Ogni rivelatore ha una regione nel cielo in cui non può rivelare segnali altrettanto facilmente che in altre zone. Dal fatto che il segnale è facilmente visibile nei rivelatori LIGO ma non in Virgo, consegue che il segnale proviene da una delle zone nel cielo per le quali in quel particolare momento era difficile osservare per Virgo, fatto che ha aiutato in modo fondamentale nella localizzazione.

Pulizia del disturbo

Il software automatico di LIGO inizialmente non aveva visto il segnale nei dati di Livingston, nonostante il segnale fosse visibile ad occhio nudo. Il problema era che durante lo spiraleggiamento c'era stato un impulso di rumore nel rivelatore, analogo agli impulsi che sentite nelle casse dei vostri stereo. Gli scienziati che lavorano ai rivelatori chiamano 'glitch' tale impulsi di rumore; esso può essere rimosso dai dati prima della misura del segnale. La rimozione meticolosa del disturbo deve rimuovere il rumore, ma non il segnale: questa procedura è chiamata 'mitigazione'. I glitch compaiono nei rivelatori continuamente; infatti disturbi come quello successo durante GW170817 succedono ogni poche ore. Chi volesse imparare di più sui glitch presenti in LIGO è incoraggiato a visitare il sito relativo al nostro progetto scientifico Gravity Spy al link: <http://gravityspy.org>. In questo progetto, i partecipanti da tutto il mondo possono guardare gli spettrogrammi dei dati di LIGO e aiutare ad identificare e classificare i glitch. Questa informazione viene poi usato da LIGO per capire meglio il comportamento dei rivelatori e migliorare le analisi future.

Proprietà del segnale

Ogni sorgente genera un'onda gravitazionale differente a seconda delle proprietà astrofisiche del sistema. Alcune proprietà importanti sono la massa dei singoli oggetti, la loro velocità di rotazione, quanto è facile deformarli, il raggio orbitale, l'inclinazione orbitale rispetto la linea di vista e così via. Tutte queste proprietà si combinano insieme per cambiare la forma, la potenza e i momentanei dettagli dell'onda gravitazionale. Gli astronomi gravitazionali misurano le variazioni nel segnale al meglio delle loro possibilità e da qui cercano a ritroso di capire le proprietà astrofisiche della sorgente. E' un processo imperfetto perché il segnale non può essere misurato perfettamente. La conseguenza è che i valori che assegniamo alle proprietà del sistema binario di stelle di neutroni sono in realtà dati come piccoli intervalli di numeri che descrivono la sorgente ugualmente bene (gli scienziati spesso chiamano questi intervalli 'barre d'incertezza'; nelle analisi effettuate dalla collaborazione LIGO-Virgo, l'intervallo di valori che otteniamo come risultato delle nostre analisi viene chiamato 'posterior').

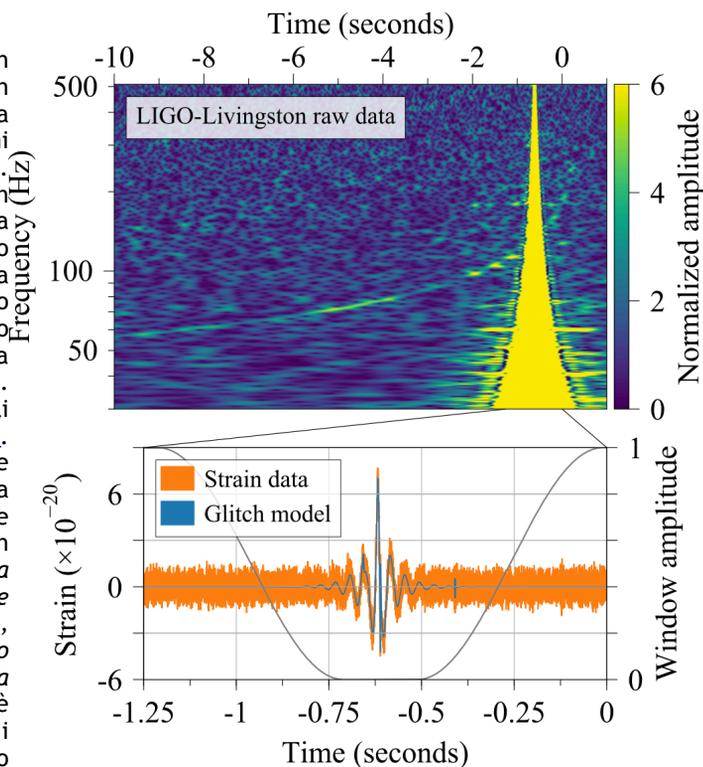


Figura 2: Il pannello in alto mostra il disturbo 'glitch' nei dati di LIGO-Livingston insieme al chiaro segnale di chirp del sistema binario. Il pannello inferiore mostra la deformazione relativa (la quantità che usiamo per descrivere l'ampiezza dei segnali in LIGO e Virgo) corrispondente al disturbo 'glitch' nel tempo. E' stretto (dura solo 1/4 di secondo circa) ma è molto forte. La mitigazione riduce il glitch al livello della traccia arancione, che è il livello del rumore di fondo sempre presente negli interferometri come LIGO e Virgo.

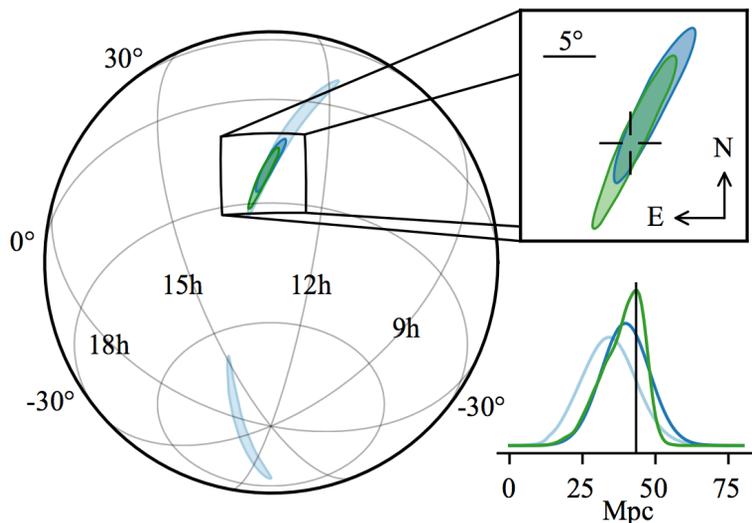


Figura 3: Mappa celeste sferica che mostra la localizzazione di GW170817 determinata da LIGO and Virgo. I due ovali (blu e verde) mostrano la localizzazione fatta da due differenti algoritmi della collaborazione LIGO-Virgo. La croce nera mostra la posizione della galassia NGC 4993 nella costellazione dell'Hydra. Il grafico inferiore a destra mostra la nostra stima della distanza della sorgente fatta in base ai dati.

L'analisi dell'onda gravitazionale ha prodotto un valore per le masse dei singoli gli oggetti compreso fra 0.86 e 2.26 masse solari. Non possiamo misurare la rotazione ('spin') delle stelle con precisione, e spin diversi cambiano il segnale in modo simile che con masse diverse. Se assumiamo che gli oggetti ruotano lentamente, allora i dati vengono altrettanto bene descritti da masse comprese fra 1.17 e 1.60 masse solari. In entrambi i casi, queste masse sono compatibili con le masse di tutte le stelle di neutroni note, uno dei motivi per cui pensiamo che questo sia un sistema binario di stelle di neutroni. Un'altra proprietà che possiamo ben misurare con le onde gravitazionali è la distanza della sorgente (o più precisamente, nel linguaggio degli astronomi, la [distanza di luminosità](#)). La distanza di luminosità derivata dal segnale dell'onda gravitazionale è di circa 40 Megaparsec (circa 130 milioni di anni luce) ed è consistente con la distanza di NGC 4993. Avendo sia la misura della distanza che l'identificazione ottica della galassia, abbiamo potuto fare, per la prima volta, una misura congiunta della costante di Hubble (vedere il riassunto scientifico corrispondente). Le stelle di neutroni sono fatte di materia super-densa, quindi non si comportano come gli oggetti che possiamo osservare sulla Terra. Quindi le osservazioni astrofisiche sono come un laboratorio per studiare la materia super densa. I fisici descrivono la materia super-densa tramite una relazione detta 'equazione di stato' che collega pressione e densità - come nel più familiare caso della legge dei gas perfetti $PV=nRT$. Ci sono molte differenti equazioni di stato, e gli astronomi vorrebbero capire quale descrive meglio le stelle di neutroni. Per le stelle di neutroni, la massa e l'equazione di stato determinano le dimensioni della stella, e come il suo potenziale gravitazionale cambia quando la stella viene deformato dalla gravità di una compagna vicina (un effetto che è chiamato 'deformazione mareale'). Questo effetto a sua volta può cambiare il segnale di onda gravitazionale. L'analisi di GW170817 ha fornito alcuni limiti interessanti sulla deformazione mareale dalle stelle di neutroni, ma non ci può dire in modo definitivo quale sia l'equazione di stato.

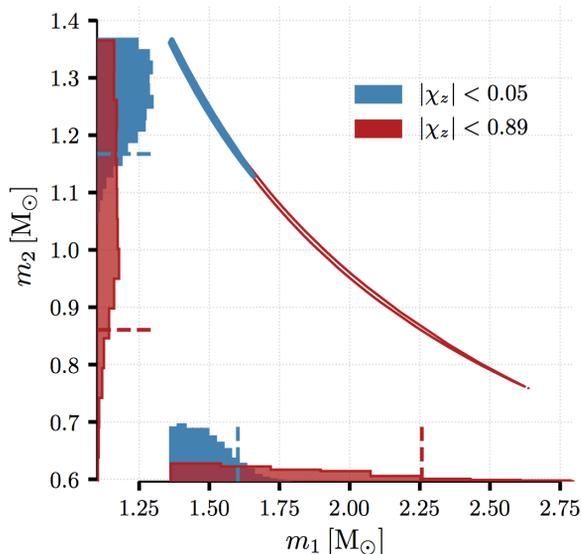


Figura 4: Questo grafico mostra la nostra stima migliore per le masse del due componenti del sistema binario. Tutti i valori nella falce diagonale sono possibili. Per ogni punto all'interno del contorno, disegnando una linea orizzontale verso sinistra e una linea verticale verso il basso si hanno le masse che corrispondono a quella particolare soluzione per l'onda gravitazionale. I colori indicano i risultati per il modello a basso spin (blu) ed alto spin (rosso).

Cos'altro potrebbe essere?

Come con tutte le importanti scoperte in astronomia, abbiamo imparato moltissime cose ma ci sono ancora molte domande aperte. Le due maggiori domande che ancora abbiamo su GW170817 sono relative alla natura degli oggetti. Il segnale elettromagnetico associato ci dice che almeno uno degli oggetti nel sistema binario era una stella di neutroni, ma ciò non significa che lo fossero entrambi. Nonostante entrambi i componenti avessero masse compatibili con quelle delle stelle di neutroni note, è possibile che uno di essi fosse un buco nero. Gli astronomi non hanno mai osservato un buco nero con una massa simile a quella di una stella di neutroni, ma allo stesso tempo non hanno nemmeno nessuna solida evidenza osservativa che suggerisca che non ci possano essere. E' quindi possibile che GW170817 fosse un sistema binario composto da una stella di neutroni e un buco nero. Comunque, dato che la massa degli oggetti è simile a quella delle stelle di neutroni, noi favoriamo l'interpretazione che fossero due stelle di neutroni. L'altra domanda fondamentale riguarda invece che cosa è diventato GW170817 dopo la fusione. Ci sono due possibilità: o è diventato una stella di neutroni molto massiccia (sarebbe la stella di neutroni nota più massiccia), o è diventato un buco nero (sarebbe il buco nero noto più piccolo). Entrambe le possibilità sono molto allettanti e affascinanti ma semplicemente i nostri dati non sono abbastanza buoni da permetterci di decidere. Tutto quello che sappiamo è che l'oggetto rimanente, qualunque cosa sia, ha una massa di circa 3 masse solari.

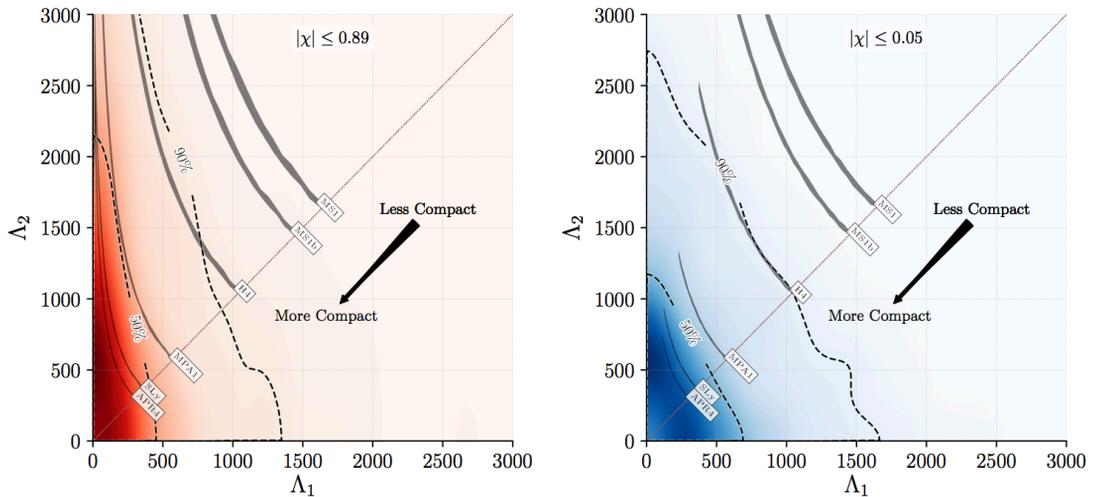


Figura 5: Queste figure mostrano le deformazione mareale delle stelle. Ogni asse corrisponde ad una delle due stelle e a quanto è deformabile. Il sistema di GW170817 si trova da qualche parte in questo grafico. Le linee tratteggiate indicate con 90% e 50% rappresentano la probabilità che il sistema si trovi sotto e a sinistra della linea tratteggiata. I casi di alto spin sono mostrati a sinistra, mentre i casi di basso spin sono mostrati a destra.

Per Saperne si più

Visita il nostro sito: <http://www.ligo.org>, <http://www.virgo-gw.eu>

Puoi leggere l'articolo completo, accettato per la pubblicazione su Physical Review Letters, [qui](https://arxiv.org/abs/1710.05832).



Visitate i nostri siti web:

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



GLOSSARIO

- **Buco nero:** una regione dello spazio-tempo causata da una massa estremamente compatta dove la gravità è così intensa che nulla, nemmeno la luce, può uscirne.
- **Neutrino:** particella elementare priva di carica elettrica
- **Raggi gamma:** radiazione elettromagnetica alle più alte energie dello spettro elettromagnetico.
- **Stella di neutroni:** Oggetto estremamente denso che rimane dopo il collasso di una stella massiccia.