

# Capitolo 1

## GW170817: osservazione di onde gravitazionali prodotte da un sistema binario di stelle di neutroni

Gli effetti fisici del passaggio di un'onda gravitazionale si manifestano nell'interazione con le masse, in particolare è necessario considerare sistemi di due o più corpi poiché, in accordo con il principio di equivalenza, è sempre possibile trovare un sistema di riferimento in cui poter applicare le leggi della relatività speciale. Ciò che bisogna considerare è invece l'accelerazione reciproca tra due corpi, in particolare si dimostra che, con il passaggio della GW, la distanza che separa i due corpi subisce periodicamente contrazioni e allungamenti nella direzione della congiungente.

È facile dedurre l'effetto che si osserva per sistemi di particelle sia quello di figura 1.1. Questo effetto può essere usato nella rivelazione, tuttavia non è possibile raggiungere sensibilità sufficienti.

Il metodo più usato per la rivelazione è invece quello interferometrico: è possibile massimizzare gli effetti del modello classico dell'interferometro di Michelson con tecniche come cavità ottiche, che permettono di avere bracci "efficaci" di lunghezze non ottenibili altrimenti, oltre che tecniche per minimizzare il rumore.

È possibile inoltre combinare vari detector in un network per coprire porzioni maggiori del cielo e per verificare la coerenza tra i segnali e poter scartare gli eventi di rumore rivelati dai singoli detector.

Il network LIGO-Virgo che si utilizza è composto da tre rivelatori (LIGO-Livingston in Luisiana, LIGO-Hanford in Washington e Virgo in Italia) e nel futuro verrà esteso con l'aggiunta di Kagra in Giappone e LIGO-India in India.

Rivelato il 17 Agosto 2017 dal network LIGO-Virgo, GW170817 è il primo segnale di onda gravitazionale generato dallo spiraleggiamento un sistema binario di stelle di neutroni. Il segnale osservato, alla fine del secondo run di misure O2, è tutt'ora il più energetico osservato tra questi tipi di segnale, con un rapporto segnale su rumore (SNR) di 32.4. Oltre al segnale di GW è stato osservato un gamma ray burst, dopo 1.7s dalla coalescenza.

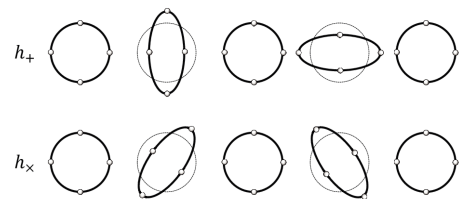


Figura 1.1: Effetto su un sistema di particelle su piano dovuto al passaggio di un'onda gravitazionale che si propaga ortogonalmente al piano, [Królak and Patil, 2017]

### 1.1 Osservazione dello spiraleggiamento

Dalla rappresentazione tempo-frequenza dei dati, a cui viene sottratto il rumore e sbiancati, si può notare immediatamente che il segnale che è ben visibile nei due rivelatori LIGO, mentre in Virgo, a causa della posizione celeste della sorgente del segnale, non è possibile distinguere visivamente nessun pattern rispetto

rumore di fondo. La (non) rivelazione risulta comunque utile, soprattutto per permettere l'individuazione della posizione celeste della sorgente.

L'analisi dell'evento mostra un segnale coerente nei due detector LIGO, grazie al quale si individua la sorgente in una regione identificata da un angolo solido di  $31 \text{ deg}^2$ , che a sua volta ha permesso l'identificazione della controparte elettromagnetica GRB170817A. Si è ottenuto inoltre un SNR combinato tra i detector di 32.4 che rendono questo segnale il più intenso rivelato finora [Abbott et al., 2017a].

Valgono le previsioni sulla frequenza fatte nel capitolo ?? per la prima fase di spiraleggiamento. Nelle fasi più avanzate, le orbite si stringono e aumenta la frequenza dell'onda gravitazionale, mentre la fase della GW è sempre più influenzata da effetti relativistici legati al rapporto tra le masse  $q = m_2/m_1$  e dagli accoppiamenti spin-orbita e spin-spin. La composizione interna degli oggetti diventa importante quando la distanza tra essi diventa paragonabile alle dimensioni dell'oggetto stesso.

Le proprietà della sorgente di onde gravitazionali sono ottenute dal confronto con le forme d'onda predette dalla teoria. Viene fatta dunque una analisi Bayesiana nel range di frequenze 30-2048Hz che include gli effetti dell'incertezza di calibrazione di  $1\sigma$  sul segnale ricevuto.

Per la stima del rumore, le fonti risultano molteplici e data la difficoltà nello stimare il rumore in assenza di sorgenti, non potendo "spegnere" le fonti di onde gravitazionali, la stima viene fatta a partire dai dati di una sessione di misure limitata, che però viene riprodotta e traslata temporalmente tra un rivelatore e l'altro in modo da annullare eventuali coerenze tra i segnali rivelati. Con questa operazione si può ottenere un fondo di migliaia di anni a partire dai dati di pochi giorni.

La sorgente viene in questo modo identificata in una regione celeste di  $28 \text{ deg}^2$  di area e  $380 \text{ Mpc}^3$  di volume, utilizzando una combinazione di timing, fase e ampiezza dei tre detector. La distanza luminosa, la più prossima osservata finora, viene individuata in  $40^{+8}_{-14} \text{ Mpc}$ . Per le masse delle stelle compatte risulta più semplice dedurre la massa di chirp, indipendente dalla scelta della prior nell'analisi Bayesiana legata all'equazione di stato scelta per le stelle progenitrici, che si valuta in  $\mathcal{M} = 1.188^{+0.004}_{-0.002}$ , rispetto alle masse singole, che soffrono invece della degenerazione tra il rapporto tra le masse  $q$  e le componenti dello spin  $\chi_1$  e  $\chi_2$ . È necessario fare quindi assunzioni a partire dalle EOS che si considerano, ottenendo dei range  $m_1 \in (1.36, 2.26) M_\odot$  e  $m_2 \in (0.86, 1.36) M_\odot$  evidentemente meno precisi, ma comunque utili come evidenza della natura di stelle di neutroni del sistema binario, escludendo invece la possibilità di buchi neri che prevederebbe range di masse superiori [Abbott et al., 2017a].

## 1.2 Ricerca del post-merger del residuo

È stata effettuata un'analisi specifica per ricercare un eventuale segnale nella fase di post-coalescenza, tale analisi non ha portato ad evidenza statisticamente significativa di un oggetto in seguito alla coalescenza, ma ha permesso di ottenere informazioni sul limite superiore sulle ampiezze di strain ed energie di GW osservabili.

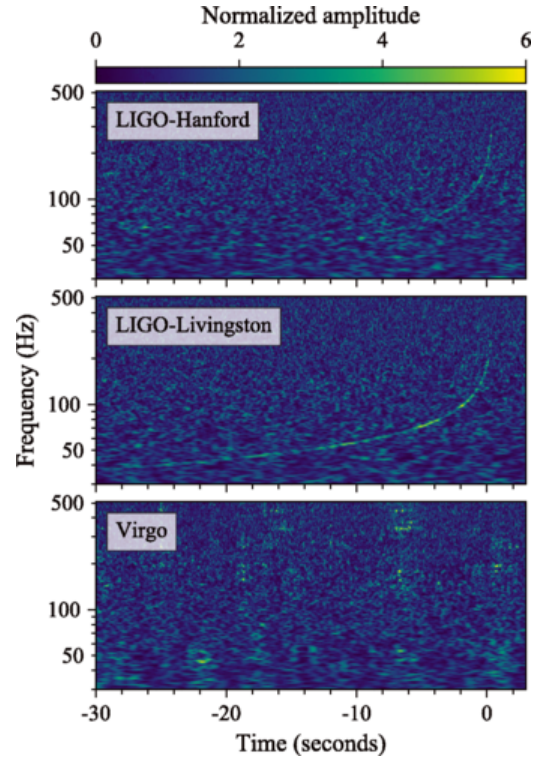


Figura 1.2: Segnali nella mappa tempo frequenza nel network, [Abbott et al., 2017a]

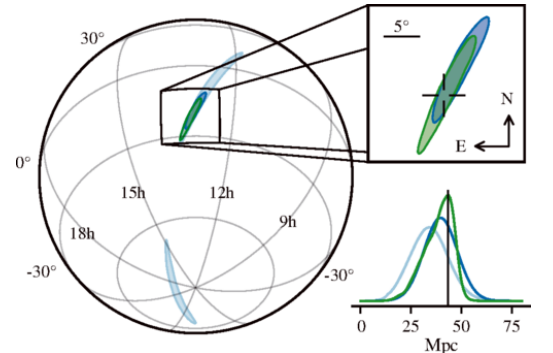


Figura 1.3: Sky location ricostruita per GW170817, nella versione preliminare in blu chiaro per Hanford-Livingston e in blu scuro per Handord-Livingston-Virgo, mentre nella versione finale in verde, presa da [Abbott et al., 2019]

Gli attuali detector infatti non hanno una sensibilità tale da permettere rivelazioni alle alte frequenze della post-coalescenza.

Per la ricerca di segnali con incertezze teoriche così grandi risulta inefficiente l'utilizzo di metodi di ricerca matched-filtering, ovvero metodi che utilizzano segnali di forme conosciute e, attraverso funzioni di filtraggio escludono la componente di rumore, usando come filtro la funzione che massimizza il rapporto segnale su rumore (SNR) per tale segnale [Maggiore, 2008]. È immediato comprendere che non conoscendo con certezza la forma che deve assumere il segnale questo metodo risulta inefficace per la ricerca del post-merger. Gli algoritmi che si usano invece ricercano eccessi di potenza in una mappa tempo-frequenza e, usando metodi di riconoscimento dei pattern, possono identificare la presenza di segnali di GW. In particolare gli algoritmi sono tali da considerare i dati del network e non dei singoli rivelatori, utilizzando tecniche che permettono di combinare coerentemente i dati dei singoli detector e dare risposte differenti a forme d'onda diverse.

Mentre lo studio del segnale elettromagnetico associato alla GW non permette di escludere nessuno dei possibili stati finali indicati in sezione ??; grazie ai valori ottenuti per le masse dei progenitori date nella sezione ?? si calcola che per un ampio range di equazioni di stato la coalescenza produce uno stato di NS ipermassiva. Questo spiega anche il ritardo del lampo gamma rispetto all'istante di rivelazione del segnale di merger.

Come si vedrà nella sezione ?? in base alla EOS che si considera si ottiene un contributo diverso nel post-merger che inizia attorno a  $\sim 1$  kHz. Più in generale, oltre alla EOS hanno fondamentale importanza le masse e gli spin degli oggetti iniziali. Per quanto riguarda invece la rivelazione di questa fase del segnale, anche considerando modelli ottimistici da stati finali di NS ipermassiva o supermassiva, l'SNR atteso per distanze di  $\sim 40$  Mpc è  $\sim 1 - 2$  ordini di grandezza più piccolo di quello rivelabile dal network LIGO-Virgo attualmente utilizzato, facendo uso di algoritmi di confronto con segnali modellati (che comunque sono meno utilizzati per il post-merger per i motivi già citati). Si ipotizza tuttavia che nei prossimi run la sensibilità del network sarà tale da permettere la rivelazione di queste emissioni [Abbott et al., 2017b].

Come si può osservare in figura 1.4 i tre detector del network hanno zone diverse di sensibilità, in particolare si nota che in generale la sensibilità diminuisce significativamente ad alte frequenze. Il rumore di LIGO Hanford è più alto rispetto a Livingston nella banda di frequenza compresa tra 100 Hz e 1 kHz, mentre Virgo ha sofferto grandi fluttuazioni di rumore e proprietà spettrali non stazionarie a frequenze superiori a 2.5 kHz.

La ricerca è stata effettuata utilizzando diversi algoritmi, e su diversi range di frequenza. È stato utilizzato l'algoritmo cWB, per la ricerca di segnali di breve durata (fino ai pochi secondi), nel range di frequenza 1024-4096 Hz. Un'ulteriore ricerca è stata effettuata per cercare segnali di più lunga durata (dalla decina alle poche centinaia di secondi) utilizzando l'algoritmo cWB nella banda di frequenza 24-2048 Hz, e STAMP nella banda 24-4000 Hz.

L'analisi dei segnali brevi ad alte frequenze consiste nella ricerca di eccessi di potenza nell'intervallo di 2 s che precede il segnale elettromagnetico GRB 170817a, in un intervallo che comprende quindi anche la coalescenza. In particolare l'algoritmo valuta la massima verosimiglianza di eccessi di potenza in una trasformata di wavelet a multi-risoluzione per ogni detector, classificando gli eventi in una gerarchia di SNR. La significanza degli eventi è data dal confronto con la distribuzione del fondo stocastico, che è generata con metodi che saranno precisati nel capitolo ??.

È convenzione esprimere la sensibilità della ricerca di una data forma d'onda in  $h_{rss}^{50\%}$ , ovvero la somma in quadratura delle ampiezze di strain di segnali che sono rivelati con un'efficienza del 50%. La quantità  $h_{rss}$  è definita come

$$h_{rss} = \sqrt{2 \int_{f_{min}}^{f_{max}} df (|\tilde{h}_+(f)|^2 + |\tilde{h}_\times(f)|^2)} \quad (1.1)$$

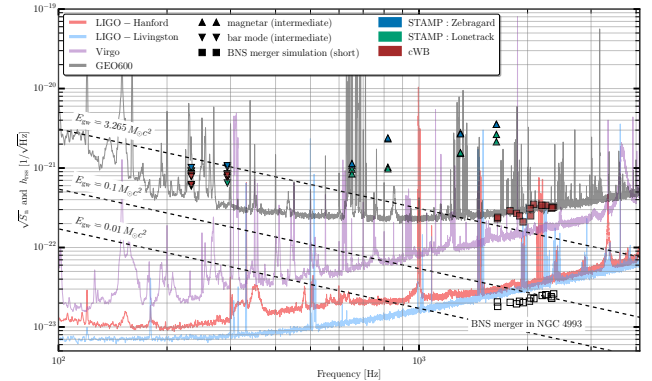


Figura 1.4: Sensibilità di ciascun rivelatore durante il run O2, indicata dall'ampiezza del rumore di strain in funzione della frequenza, [Abbott et al., 2017b]

dove  $f_{min}$  e  $f_{max}$  sono rispettivamente le frequenze massima e minima sulle quali si effettua la ricerca. Il criterio sulla soglia di rivelazione e quindi su  $h_{rss}^{50\%}$  per questo metodo di ricerca è tale da garantire una probabilità di falso allarme di  $10^{-4}$ . Per evitare la possibile perdita di segnali di EOS rigide, si fa la scelta conservativa di ricercare segnali a partire da 1024Hz, nonostante tutte le forme d'onda abbiano emissioni dominanti molto al di sopra di tale soglia.

In conclusione, non viene trovata evidenza di nessun segnale di GW in questa banda di frequenze. L'ampiezza di strain per produrre una probabilità del 50% di rivelazione di un segnale è compresa tra  $2.1 \times 10^{-22} \text{Hz}^{-1/2}$  e  $3.5 \times 10^{-22} \text{Hz}^{-1/2}$ . L'energia irradiata da un sorgente che emette isotropicamente è data da

$$E_{gw}^{iso} = \frac{\pi c^3}{2G} \mathcal{D}^2 \int d\Omega \int_{f_{min}}^{f_{max}} df f^2 (|\tilde{h}_+(f)|^2 + |\tilde{h}_\times(f)|^2) \approx \frac{\pi^2 c^3}{G} \mathcal{D}^2 \bar{f}^2 h_{rss}^2 \quad (1.2)$$

con  $\mathcal{D}$  è la distanza dalla sorgente e  $\bar{f}$  è la frequenza caratteristica data da

$$\bar{f} = \frac{2}{h_{rss}^2} \int_{f_{min}}^{f_{max}} df f (|\tilde{h}_+(f)|^2 + |\tilde{h}_\times(f)|^2) \quad (1.3)$$

In questo modo si ottiene un range di energie rivelabili secondo il criterio del  $h_{rss}^{500\%}$  è dato da  $4.8 - 19.6 M_\odot c^2$ , al di fuori delle masse in gioco per BNS, per cui non è possibile con i rivelatori attuali rivelare le emissioni di GW di NS ipermassive associate a GW170817.

Per segnali di durata intermedia si utilizzano i due algoritmi cWB e STAMP, concentrando la ricerca in una zona limitata dello spazio, indicata dalla controparte elettromagnetica che permette di evitare trigger accidentali.

Sono considerate due morfologie di forme d'onda corrispondenti a GW da bar-modes secolari o causati da elicità causate dal campo magnetico nella stella nascente. I meccanismi di emissione attraverso modi-r non sono considerati per la durata che richiederebbe scale temporali più lunghe. Approfondire?

Mentre l'analisi fatta con l'algoritmo STAMP non viene qui approfondita, l'analisi con cWB è analoga alla precedente, ma considera un intervallo di tempo che parte dal merger e copre 1000s. Anche in questo caso, con probabilità di falso allarme di  $10^{-4}$  nessun candidato è trovato nella banda di frequenza considerata. È possibile confrontare il range di energie rivelabili in Figura 1.4.

Concludendo, non viene trovata nessuna evidenza di un segnale di post coalescenza nei dati considerati: se esiste un segnale questo è comunque troppo debole per essere rivelato dai rivelatori nel run O2 [Abbott et al., 2017b].

### 1.3 Sugli altri eventi rivelati: GW190425

Il secondo evento rivelato di inspiral di BNS è GW190425 durante il run O3 del network Virgo-LIGO. In realtà durante l'evento il detector LIGO Hanford era spento, quindi il network contava solo su due rivelatori e la soglia di SNR per Virgo era inferiore alla soglia minima. Non sono inoltre stati rivelati segnali elettromagnetici associati all'evento.

L'evento ha avuto un SNR di 12.9 per LIGO Livingston mentre di solo 2.5, ovvero sotto la soglia di trigger pari a 4, per Virgo. La differenza tra i due rivelatori è consistente con la differenza di sensibilità tra i due detector [Abbott et al., 2020].

In continuità con le definizioni fatte per le proprietà del segnale GW170817, si riportano brevemente le caratteristiche del segnale GW190425

Si individua la sorgente in un'area celeste di  $8284 \text{deg}^2$  al 90% di credibilità (estremamente più impreciso di GW170817) e la distanza viene valutata in  $159_{-71}^{+69} \text{Mpc}$ . La così più grande incertezza rispetto al primo segnale è dovuta al minor numero di detector coinvolti e all'impossibilità di escludere regioni grazie alla controparte elettromagnetica che non viene rivelata in questo caso. La massa di chirp è pari a  $1.4873_{-0.0006}^{+0.0008} M_\odot$ , mentre le masse delle stelle progenitrici sono  $m_1 \in (1.60, 2.52) M_\odot$  e  $m_2 \in (1.46, 1.68) M_\odot$  [Abbott et al., 2020].

# Bibliografia

- [Abbott et al., 2019] Abbott, B., Abbott, R., Abbott, T., Abraham, S., Acernese, F., Ackley, K., Adams, C., Adhikari, R., Adya, V., Affeldt, C., and et al. (2019). Gwtc-1: A gravitational-wave transient catalog of compact binary mergers observed by ligo and virgo during the first and second observing runs. *Physical Review X*, 9(3).
- [Abbott et al., 2017a] Abbott, B., Abbott, R., Abbott, T., Acernese, F., Ackley, K., Adams, C., Adams, T., Addesso, P., Adhikari, R., Adya, V., and et al. (2017a). Gw170817: Observation of gravitational waves from a binary neutron star inspiral. *Physical Review Letters*, 119(16).
- [Abbott et al., 2020] Abbott, B. P., Abbott, R., Abbott, T. D., Abraham, S., Acernese, F., Ackley, K., Adams, C., Adhikari, R. X., Adya, V. B., Affeldt, C., and et al. (2020). Gw190425: Observation of a compact binary coalescence with total mass  $\sim 3.4M_{\odot}$ . *The Astrophysical Journal*, 892(1):L3.
- [Abbott et al., 2017b] Abbott, B. P., Abbott, R., Abbott, T. D., Acernese, F., Ackley, K., Adams, C., Adams, T., Addesso, P., Adhikari, R. X., Adya, V. B., and et al. (2017b). Search for post-merger gravitational waves from the remnant of the binary neutron star merger gw170817. *The Astrophysical Journal*, 851(1):L16.
- [Królak and Patil, 2017] Królak, A. and Patil, M. (2017). The first detection of gravitational waves. *Universe*, 3(3).
- [Maggiore, 2008] Maggiore, M. (2008). *Gravitational Waves: Volume 1: Theory and Experiments*. Gravitational Waves. OUP Oxford.