

Analisi di GW150914

Sara Ardito

Maggio 2021

1 INTRODUZIONE

In questa esperienza si vuole studiare l'emissione dell'onda gravitazionale GW150914 proveniente dalla coalescenza di due oggetti compatti, ossia due buchi neri (*Binary Black Hole*, BBH). Si utilizzeranno i dati raccolti dagli interferometri LIGO durante la campagna osservativa Observing Run 1 (O1). L'onda oggetto di studio rappresenta il primo evento rivelato di coalescenza tra due buchi neri.

1.1 Detectors

Le due sedi LIGO sono situate presso Hanford (WA) e Livingston (LA), qui operano i due detector, due interferometri di Michelson modificati (Figura 1), i quali misurano lo strain gravitazionale a partire dalla differenza della lunghezza dei bracci ortogonali. Ogni braccio è formato da due specchi, che agiscono come masse di prova, separati da $L_x = L_y = L = 4$ km. Il passaggio di un'onda gravitazionale altera la lunghezza dei bracci cosicché la differenza misurata $\Delta L(t) = \delta L_x - \delta L_y = h(t)L$, dove h è l'ampiezza dello strain gravitazionale proiettato sul detector. Questa variazione di lunghezza altera la differenza di fase tra i due fasci luminosi che ritornano al divisore di fascio, trasmettendo un segnale ottico proporzionale allo strain dell'onda al fotorivelatore di uscita.

Affinchè la sensibilità sia tale da poter misurare segnali gravitazionali ogni braccio contiene una cavità ottica risonante, in modo da moltiplicare di un fattore 300 l'effetto dell'onda sulla fase. Inoltre all'ingresso viene usato uno specchio a ricircolo di potenza parzialmente trasmissivo, che permette di portare da 20 W a 700 W l'input del laser che incide sul divisore di fascio. Infine uno specchio di ricircolo del segnale parzial-

mente trasmissivo posto all'uscita ottimizza l'estrazione del segnale gravitazionale ampliando la larghezza di banda delle cavità del braccio. In secondo luogo è necessario che le masse di prova abbiano un basso rumore di spostamento, per cui devono essere isolate dal rumore sismico (basse frequenze) e da quello termico (frequenze intermedie).

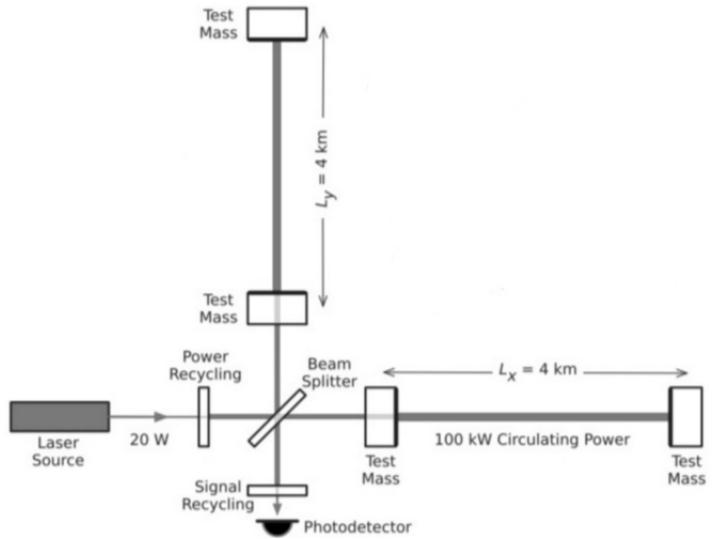


Figura 1: Schema semplificato della struttura degli interferometri LIGO (immagine non in scala).

1.2 GW150914

Il 14 Settembre 2015, alle 09:50:45 UTC i due detector del *Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory* (LIGO) hanno osservato simultaneamente un segnale gravitazionale transiente.

Secondo le analisi eseguite con il metodo di matched-filter la forma d'onda osservata sembra essere in accordo con quanto predetto dalla relatività generale per la coalescenza di due buchi neri con masse iniziali di $36^{+5}_{-4} M_\odot$ e $29^{+4}_{-4} M_\odot$ e la conseguente formazione di un singolo buco

nero di massa $62^{+4}_{-4} M_{\odot}$.

Poichè solo due detector hanno rivelato l'onda gravitazionale, sulla posizione della sorgente si può dire che è localizzata in un area di circa 600 deg² ed ad una distanza di $410^{+160}_{-180} Mpc$. (B.P.Abbot et al., 2016).

2 ANALISI DEL RUMORE

Per poter procedere all'analisi del segnale gravitazionale GW150914 ho scaricato i dati gravitazionali dal portale GWOSC. Utilizzando la funzione `fetch_open_data` di `gwpy` ho scaricato i dati intorno al tempo $t_0 = 1126259462.4$ s dell'evento, utilizzando un intervallo temporale che copre un periodo di un'ora centrato in t_0 , $\Delta t = 1126257662.40 - 1126261262.40$ s. Ho quindi proceduto a scaricare i dati relativi allo strain gravitazionale e ai segmenti di data quality per entrambi i detector che hanno rivelato l'evento, LIGO Hanford (H1) e LIGO Livingston (L1). A questo punto usando il pacchetto `gwpy` ho costruito la ASD in tutto l'intervallo temporale usando la funzione `asd()`, che usa il cosiddetto *Welch's method* per combinare FFT di blocchi di dati sovrapposti selezionando sottointervalli di 4 secondi. Ho eseguito questa operazione per entrambi gli interferometri e ho successivamente rappresentato in Figura 2 il risultato ottenuto.

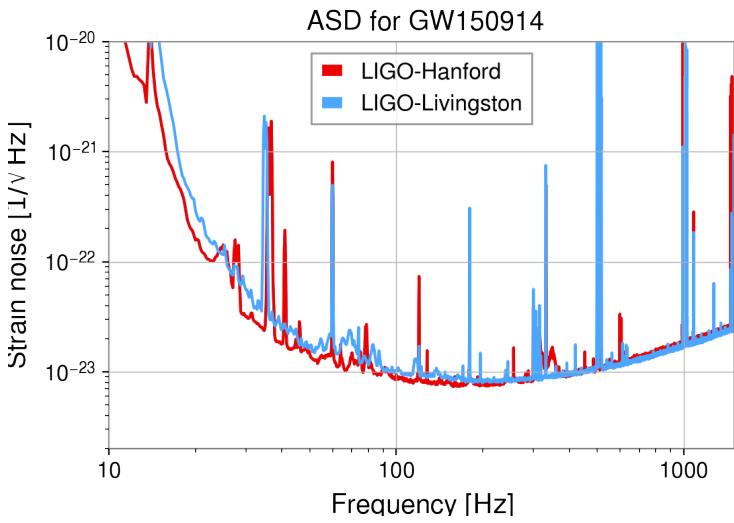


Figura 2: Strain noise di entrambi gli interferometri nell'intervallo temporale attorno all'evento. La sensibilità è limitata dallo shot noise sopra i 150 Hz e da una sovrapposizione di altri rumori nelle frequenze più basse. Tra i picchi sono evidenti le linee di calibrazione (33-38, 330 e 1080 Hz), i modi vibrazionali delle fibre di sospensione (500 Hz e le armoniche) e la frequenza della corrente elettrica a 60 Hz (B.P. Abbott et al., 2016).

Alcuni picchi visibili in Figura 2 sono dovuti a rumore strumentale, in particolare si notano in corrispondenza di alcune frequenze, tra cui ¹:

- 60 Hz e le armoniche a 60n Hz corrispondenti alle frequenze della linea di alimentazione elettrica
- 500 Hz e le armoniche (1000, 1500, 2000 Hz) che corrispondono ai cosiddetti 'violin modes', cioè alle eccitazioni termiche delle sospensioni degli specchi
- 300, 600, 900 Hz, corrispondenti ai 'violin modes' per le sospensioni del divisore di fascio
- le linee di calibrazione inserite spostando gli specchi finali; durante O1 esse erano H1: 35.9000, 36.7000, 37.3000, 331.900, 1083.700 Hz e L1: 33.7000, 34.7000, 35.3000, 331.300, 1083.100 Hz.

A questo punto si può valutare in maniera quantitativa se in un intervallo di frequenza il valore della ASD è costante oppure è variato nel corso della presa dati di un'ora.

In prima analisi ho usato la funzione `spectrogram2()` impostando come parametri `fftlength=4`, `overlap=2` e `window= 'hann'`. L'output di questa funzione è una PSD, quindi per ottenere una ASD ne ho preso la radice quadrata. Ho ripetuto la stessa operazione per entrambi i detector e ho riportato il risultato in Figura 3, in cui si vede come l'ASD evolve in un intervallo di 60 minuti attorno all'evento GW150914.

L'intensità della ASD varia su un range di 4 ordini di grandezza e si può vedere come a basse frequenze (<30 Hz) il rumore è soggetto a qualche variazione, invece ad alte frequenze (>100 Hz) è relativamente stabile.

Per avere una valutazione più quantitativa ho realizzato gli spettrogrammi a destra in Figura 3: ho selezionato un intervallo di frequenza da 0 a 1000 Hz e l'ho suddiviso in 100 sottointervalli da 10 Hz ciascuno.

Per ognuno di essi ho calcolato media e deviazione standard dell'informazione sullo strain noise restituita dalla funzione `spectrogram2()` in un intervallo temporale di 2 s lungo tutto l'arco temporale di 3600 s.

Successivamente per ogni sottointervallo di frequenza ho valutato quanti valori dello strain noi-

¹<https://www.gw-openscience.org/o1speclines/>

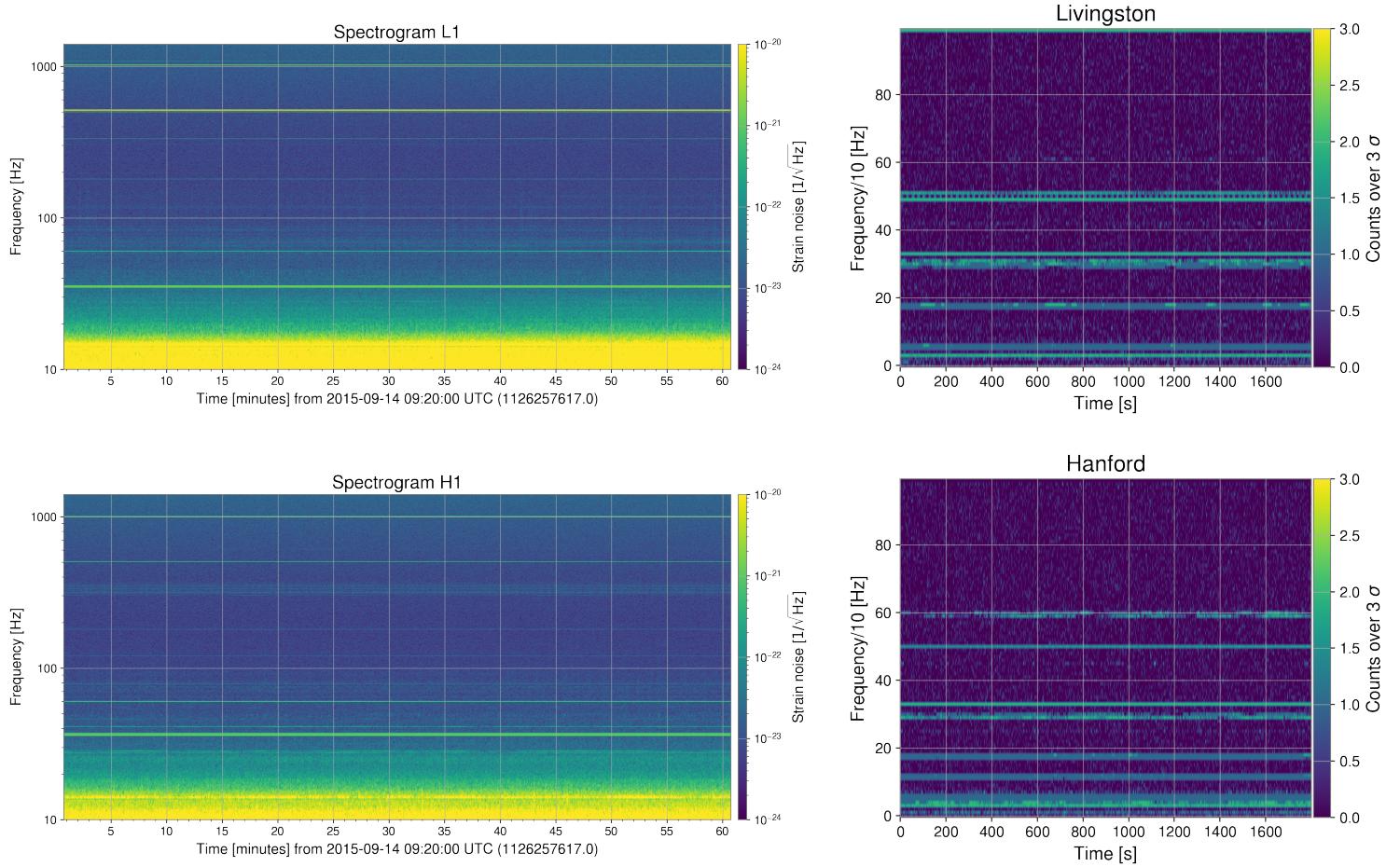


Figura 3: Spettrogramma e conteggi sopra 3 sigma per Livingston (alto) e per Hanford (basso).

se superano il valore medio di 3 sigma. Infine ho realizzato i grafici di cui sopra, ponendo sulle x il tempo (ciascun bin corrisponde a 2 s), sulle y i sottointervalli di 10 Hz e l'informazione contenuta in ciascun bin rappresenta il numero di conteggi oltre tre sigma per ciascun intervallo di tempo e frequenza.

Questi grafici confermano quanto detto precedentemente, cioè l'ASD presenta dei picchi in corrispondenza di determinate frequenze ma presenta un andamento costante nel tempo.

Sulla base dei risultati presentati fin ora e delle Figure 2 e 3 possiamo concludere che l'interferometro H1 è più sensibile alle basse frequenze (<100 Hz), mentre alle alte frequenze i due detector presentano un comportamento analogo e dunque hanno la stessa sensibilità.

3 ANALISI TEMPORALE

Prima di eseguire l'analisi temporale dei dati scaricati ho verificato che l'evento è avvenuto

in un periodo di *data quality* valido. Quindi ho usato la funzione *plot()* di *gwpy* e ho rappresentato i segmenti di *data quality*: i dati relativi all'evento sono validi.

Successivamente ho realizzato i grafici della serie temporale di strain $h(t)$ per entrambi i detector (Figura 4): si nota un picco nel caso di Hanford e un segnale dominato dal rumore nel caso di Livingston.

Sulla base di quanto detto nel paragrafo precedente è necessario filtrare i dati, in questo modo si elimina il rumore strumentale. Per entrambi gli interferometri ho usato un passabanda da 50 a 250 Hz ed un filtro notch a 60 Hz.

Il risultato finale è mostrato in Figura 4, in cui ho rappresentato i dati filtrati in una finestra di 2 s attorno all'evento. Ora i due picchi sono ben visibili e coincidono con l'istante in cui si verifica l'evento gravitazionale GW150914 (linea rossa tratteggiata).

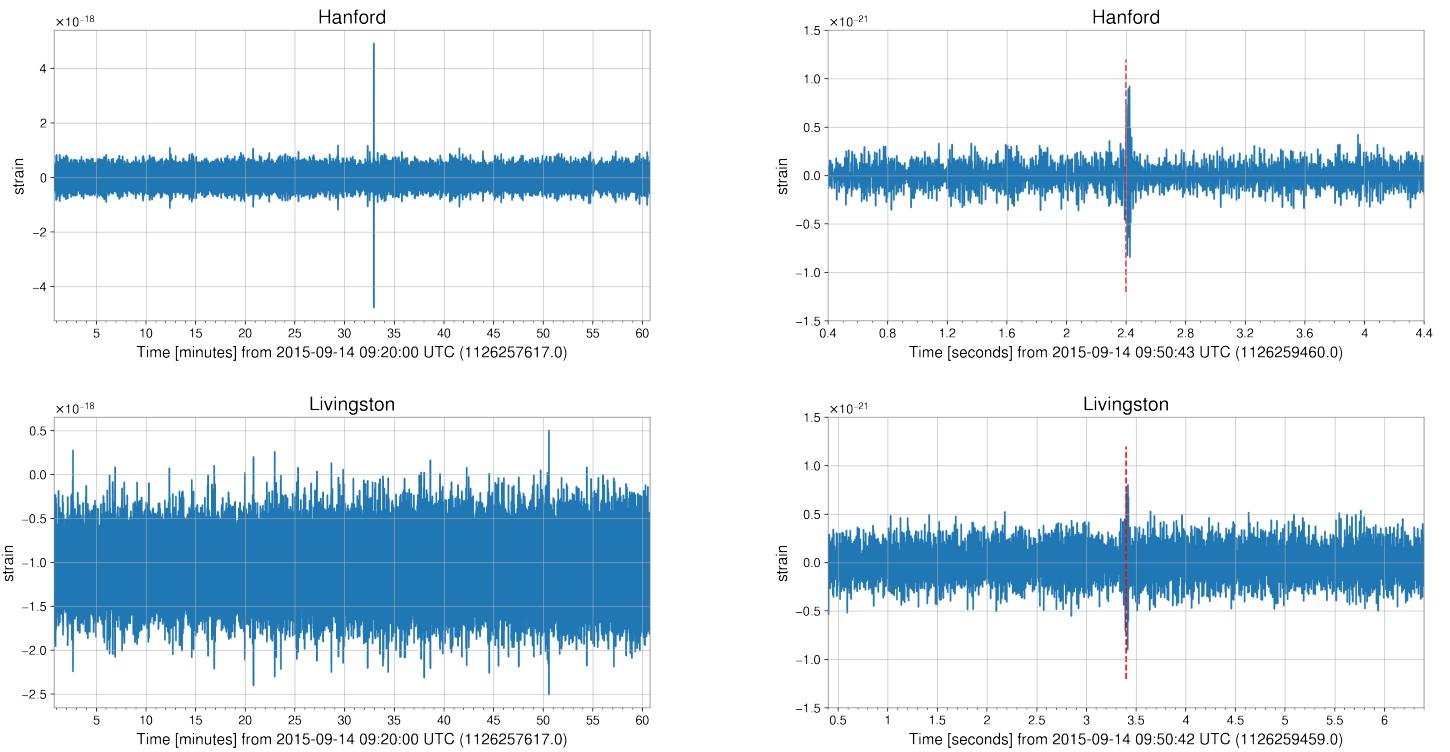


Figura 4: (sinistra) Strain della serie temporale per l’interferometro H1 (alto) e L1 (basso). (destra) Dati filtrati per i due interferometri (H1 in alto ed L1 in basso) in un intervallo di 2 s attorno all’evento gravitazionale (linea rossa tratteggiata)

4 RICERCA DEL SEGNALE

Usando il pacchetto *pyCBC* ho potuto costruire un template del segnale ed effettuare il matched filter. Per fare ciò ho selezionato i dati relativi ad una finestra temporale di 10 s attorno all’evento gravitazionale e usando la funzione *resample_to_delta_t()* ho effettuato un downsampling delle frequenze a 2048 Hz ed ho rimosso 2 s di dati all’inizio e alla fine per eliminare gli effetti di ringing ai bordi della serie temporale.

A questo punto usando la funzione *get_td_waveform* ho costruito un banco di modelli di funzioni d’onda per il segnale gravitazionale GW150914 assumendo la coalescenza di due oggetti di massa m_1 ed m_2 . Per trovare il valore delle masse per cui si ha un maggiore rapporto segnale-rumore ho costruito una griglia di coppie (m_1, m_2), dove entrambe le masse spaziano da $20 M_{\odot}$ a $40 M_{\odot}$ ad intervalli di $0.25 M_{\odot}$.

Per ciascuna coppia ho ricavato il picco del SNR e il rispettivo istante temporale, poi ho cercato il massimo valore tra questi picchi e ho individuato le masse corrispondenti. Trovate le masse m_1 ed m_2 ho costruito un grafico che

sovrappone il template ai dati ed ho realizzato la Q-transform del segnale, avendo avuto cura in precedenza di shiftare e sbiancare i dati, cioè normalizzarli con la PSD.

4.1 Hanford

I risultati ottenuti per l’interferometro H1 sono riportati in Tabella 1.

m_1	$(38.25 \pm 0.25) M_{\odot}$
m_2	$(34.25 \pm 0.25) M_{\odot}$
SNR	19.524
Time [s]	1126259462.424805

Tabella 1: Risultati del template matching per H1.

In Figura 5 è riportato il grafico relativo ai dati dell’evento sovrapposti al template realizzato usando i valori di massa sopra citati. Inoltre ho riportato un grafico tempo-frequenza, realizzato mediante la Q-transform, in cui si vede la frequenza del segnale crescere nel tempo.

4.2 Livingston

I risultati ottenuti per l’interferometro L1 sono riportati in Tabella 2.

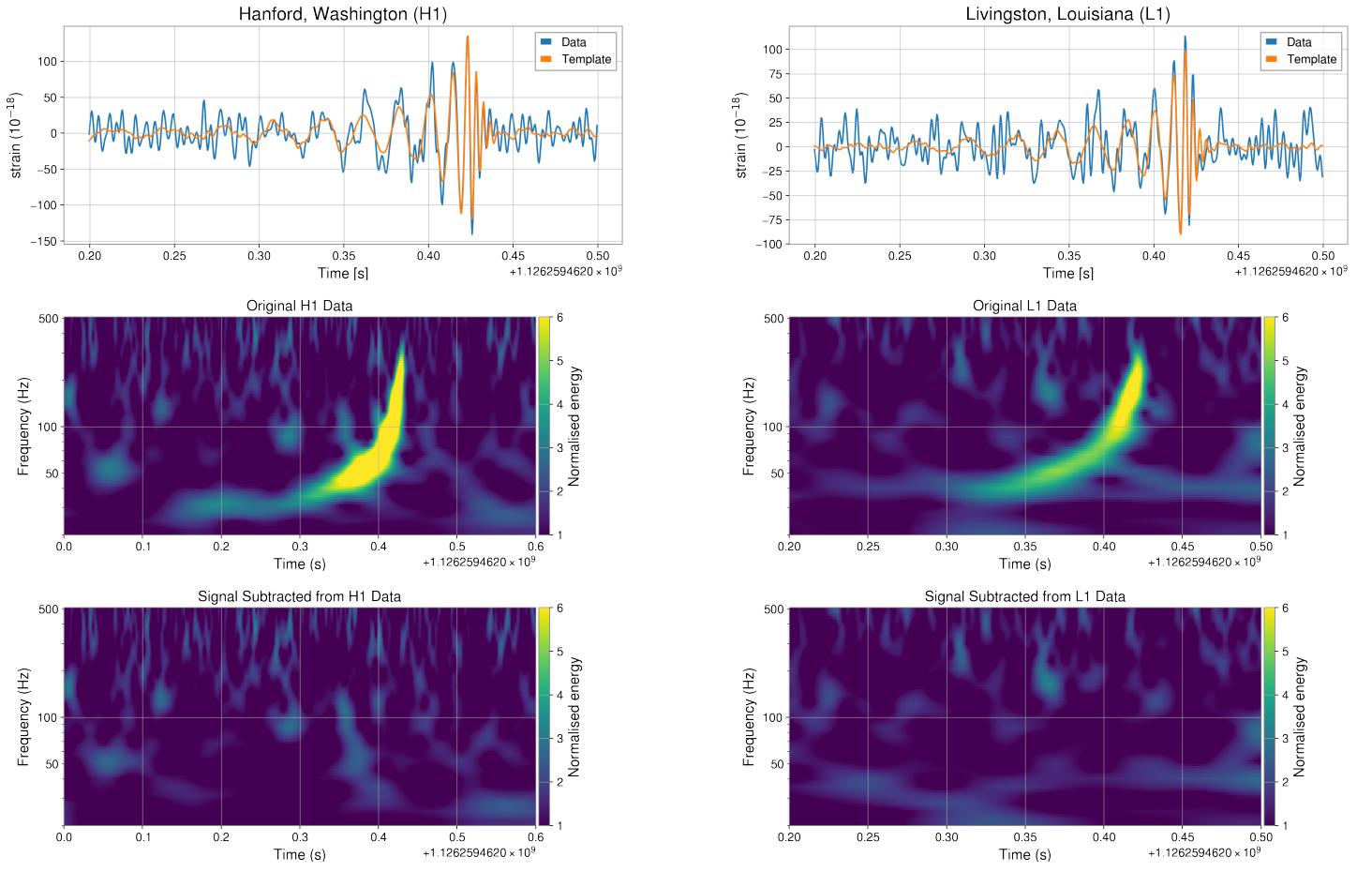


Figura 5: (sinistra) Rappresentazione dei dati (in blu) sovrapposti al template (in arancione) per l'interferometro H1 (alto), grafico tempo-frequenza dell'evento gravitazionale per H1 (in mezzo) e grafico tempo-frequenza in cui è stato rimosso il segnale gravitazionale per H1(basso). (destra) Grafici analoghi ma per l'interferometro L1.

m_1	$(36.75 \pm 0.25) M_{\odot}$
m_2	$(32.50 \pm 0.25) M_{\odot}$
SNR	13.306
Time [s]	1126259462.418457

Tabella 2: Risultati del template matching per L1.

Analogamente a quanto fatto per il rivelatore H1 riportato in Figura 5 il grafici ottenuti.

4.3 Considerazioni

Sulla base dei tempi riportati in Tabella 1 e 2 possiamo dire che il segnale arriva prima al detector L1 e 6.35 ms dopo al detector H1. Per tale motivo in Figura 5 i dati di H1 sono riportati shiftati nel tempo di questo intervallo. Questo intervallo è compatibile con quanto riportato in letteratura, $\Delta t = 6.4^{+0.5}_{-0.4}$ ms (B.P.Abbott et al, 2016).

La Figura 5 mostra come vi sia un buon accordo tra i dati ed il template, infatti le principali caratteristiche di questo segnali sono tipiche della

coalescenza di due buchi neri: a partire da circa 0.2 s (rispetto al 14 settembre 2015, 09:50:45 UTC) la frequenza del segnale aumenta fino a raggiungere un massimo e poi decresce. Gli studi condotti da B.P.Abbott et al. dimostrano che i valori di massa e frequenza orbitale osservati sono compatibili esclusivamente con un evento di coalescenza tra due buchi neri.

Per quanto riguarda le masse riportate in Tabella 1 e 2 vediamo che tali valori non sono compatibili tra loro. Ciò può essere dovuto al fatto che ho supposto di conoscere le masse con un'incertezza di $0.25 M_{\odot}$, probabilmente una sottostima dell'effettivo errore, questo perché il mio procedimento di calcolo con tiene conto delle incertezze di altra natura se non della spaziatura esistente nella griglia delle masse di prova.

I valori riportati in letteratura sono $36^{+5}_{-4} M_{\odot}$ e $29^{+4}_{-4} M_{\odot}$ (B.P.Abbott et al, 2016) e risultano compatibili con quelli in Tabella 1 e 2.

Infine vediamo che l'interferometro più sensibile

è H1, con un valore di SNR di circa 19.5, a fronte di un valore per L1 di \sim 13.3. Questo è consistente con quanto ho riportato nei paragrafi precedenti.

5 CONCLUSIONI

L'analisi eseguita sull'evento gravitazionale GW150914 ha restituito risultati compatibili con quanto riportato in letteratura. Nel corso dell'analisi non ho riscontrato particolari problemi se non la difficoltà nell'attribuire una corretta incertezza alla stima delle masse.