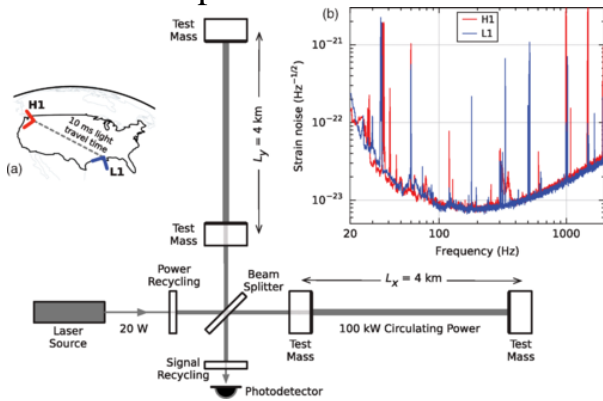


17/02/2016 – Ho atteso cent'anni...

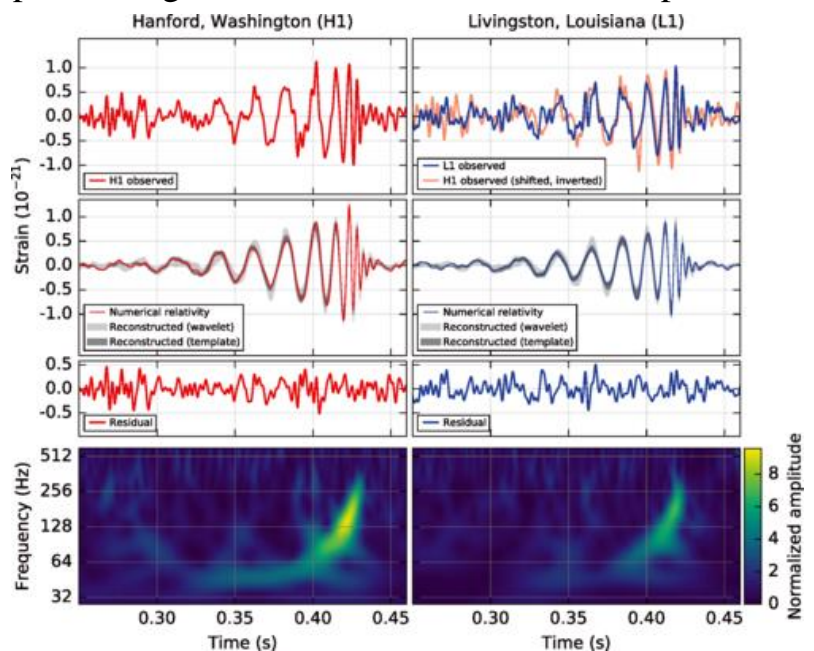
...e poi, quando è successo, mi sono fatto fregare dai media, INFN in testa, pur sapendo benissimo la verità. C'è voluto un trafiletto di un relativista della vecchia generazione, Kip Thorne, per farmi dare una manata sulla fronte. Però, scommetto che pure voi amici, che frequentate il salotto da poco meno di 14 miliardi di anni e conoscete la sottile distinzione, non ci avete pensato. Ma andiamo con ordine.



L'apparato sperimentale, semplificato assai, è sintetizzato nella figura accanto. Ci sono due rivelatori dello stesso tipo, uno sulla costa Est e uno sulla costa Ovest degli Stati Uniti, a circa 10 millisecondi-luce di distanza. Siccome le onde gravitazionali hanno la forma di "quadrupolo", allungano gli spazi in una direzione e li accorciano in direzione perpendicolare. In ogni rivelatore, perciò, troviamo due bracci perpendicolari lunghi 4 km, in cui scorrono due fasci laser perfettamente

"in fase", che vengono raccolti per mezzo di specchi semiargentati sul fotorivelatore in basso. Le "Test Mass" sono quelle sulle quali agisce l'onda gravitazionale, e anche loro sono semiriflettenti. Se non succede nulla, la figura di diffrazione sul fotorivelatore deve essere sempre la stessa; in pratica ci sono disturbi, mostrati come picchi per i due fotorivelatori (rosso per la costa Ovest, blu per quella Est, e la stessa convenzione di colori continuerà anche nelle prossime figure), ma si capisce che sono disturbi perché non capitano mai contemporaneamente, e perciò si possono ignorare. Il 14 settembre 2015, però, è successo qualcosa di diverso. Nel

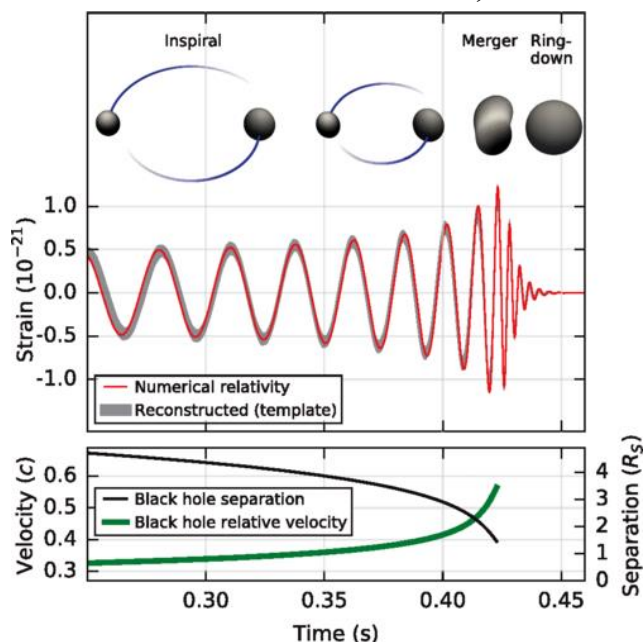
pannello superiore sono rappresentati: a) il segnale ricevuto a Ovest; b) il segnale ricevuto a Est, sovrapposto a quello Ovest rovesciato (i bracci dei due interferometri puntano in direzioni opposte) e con il ritardo dovuto alla velocità con cui viaggiano le onde gravitazionali (c). Non serve un esperto di sismologia astrofisica per capire che c'è stato un movimento da qualche parte. Nel pannello intermedio sono invece rappresentate le curve teoriche per un'onda gravitazionale in transito. Nel terzo pannello dall'alto, c'è la differenza tra il valore osservato e quello teorico; non è altro che il normale rumore di fondo, segno che è stata rivelata proprio un'onda gravitazionale. Nell'ultimo pannello si trova la frequenza dell'onda, in funzione del tempo in secondi, e il colore più chiaro sta a indicare l'intensità dell'onda.



Ora vediamo un'altra figura interessante: orbite, distanze e velocità in gioco per i due buchi neri che, ruotando uno attorno all'altro a distanza ravvicinata, hanno perso energia proprio per onde gravitazionali e alla fine si sono gettati l'uno nelle braccia dell'altro, dando luogo a un unico buco nero che ruota al 65% della velocità di "spaccatura".

Sopra vediamo, in funzione del tempo, i momenti precedenti il "merge", e sotto l'intensità delle onde gravitazionali. Nel pannello inferiore si vede la separazione dei buchi neri e la loro velocità relativa. Attiro la vostra attenzione proprio sulla curva verde: al momento del merge, la velocità relativa raggiungeva il 60% di quella della luce!

Altre informazioni quantitative: analizzando bene le curve e le distanze di tempo con una enorme quantità di curve teoriche, si è dedotto che l'evento si è verificato a una distanza di circa 1,3 miliardi di anni-luce, che i due buchi neri avevano masse, rispettivamente, di 29 e 36 M_{\odot} , e che il buco nero restante ha una massa pari a 62 M_{\odot} . Però, l'aritmetica dice che $29+36 = 65$; mancano 3 M_{\odot} . Dove sono finite? In energia delle onde gravitazionali: durante l'ultimo decimo di secondo quest'oggetto è stato "luminoso" circa 50 volte più di tutto l'universo causale, ma la sua luminosità era solo in onde gravitazionali. Se vi collegate al sito <http://apod.nasa.gov/apod/> e cercate nell'archivio l'immagine del 12 febbraio, c'è l'animazione di come sarebbe apparso il merge a un osservatore esterno.



Fin qui nulla da ridire, ma perfino l'INFN ha mostrato l'effetto di un'onda gravitazionale sulla Terra, come deformazione dell'equatore che si restringe, mentre i poli si allontanano, e poi il contrario, come un ovale che risuona. Dov'è lo sbaglio?

Il punto è questo: è verissimo che, in prossimità di un buco nero, lo spaziotempo si deforma in modo tale che lo spazio si *richiude* su se stesso, e anche le onde gravitazionali in prossimità del merge deformano pesantemente lo spazio, e non solo il tempo. Ma quando l'onda si diluisce e si allontana, l'effetto del tempo ritorna predominante come in qualsiasi campo gravitazionale *debole*. Cosa dice Kip Thorne? «I buchi neri in collisione che hanno prodotto queste onde gravitazionali, hanno creato una violenta tempesta nella struttura dello spazio e del tempo. Una tempesta in cui il tempo accelera, poi rallenta, e poi accelera di nuovo.»

Capito? Dovevamo saperlo: non è stato tanto l'allungamento e accorciamento dei bracci dell'interferometro, ma la diversa velocità con cui il tempo scorreva al loro interno, che *simula* un allungamento del braccio dell'ordine di circa un millesimo del raggio di un protone, e le apparecchiature sono in grado di misurarlo grazie alle frange di interferenza che si formano sul rivelatore.

Ultima chicca: finalmente abbiamo la prova sperimentale che i buchi neri esistono, perché nessun'altra struttura fisica può reggere ai campi che hanno generato l'onda gravitazionale. Ora il brainstorming, ma attenti a non far risuonare di nuovo LIGO.