

## GW150914: OSSERVAZIONE DI ONDE GRAVITAZIONALI DALLA FUSIONE DI DUE BUCHI NERI

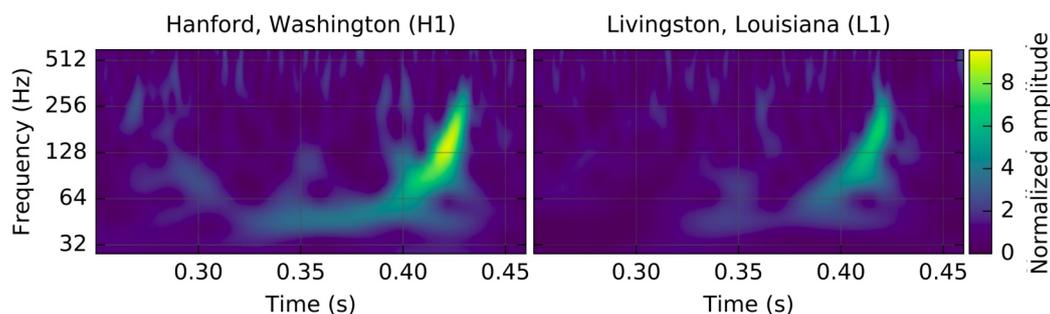
La teoria della [Relatività Generale](#) di Albert Einstein, pubblicata per la prima volta un secolo fa, fu descritta dal fisico Max Born come “la più grande impresa del pensiero umano sulla natura”. Presentiamo due importanti scoperte che coinvolgono previsioni chiave della teoria di Einstein: la prima rilevazione di [onde gravitazionali](#) e la prima osservazione della collisione e fusione di una coppia di [buchi neri](#).

Questo cataclisma, che ha prodotto il segnale di onde gravitazionali [GW150914](#), è avvenuto in una galassia distante dalla Terra più di un miliardo di [anni luce](#). E' stato osservato il 14 settembre 2015 dai due rilevatori dei Laser Interferometer Gravitational-wave Observatory ([LIGO](#)), all'epoca gli strumenti scientifici più sensibili. Le collaborazioni [LIGO](#) e [Virgo](#) hanno stimato che il picco di potenza irradiata in onde gravitazionali durante i momenti finali della fusione dei due buchi neri sia stata 10 volte maggiore della potenza luminosa di tutte le stelle e galassie dell'universo visibile messe insieme. Questa scoperta eccezionale segna l'inizio di una nuova eccitante era per l'astronomia in quanto apriamo una nuova finestra sull'universo, all'insegna delle onde gravitazionali.

### INTRODUZIONE E CONTESTO

Le onde gravitazionali sono “increspature” nello [spazio-tempo](#) generate da alcuni degli eventi più violenti del cosmo, ad esempio la collisione e fusione di stelle massicce compatte. La loro esistenza fu predetta da Einstein nel 1916, quando dimostrò che corpi massicci in accelerazione possono perturbare lo spazio-tempo al punto tale che onde di spazio distorto irradierebbero dalla fonte. Queste increspature viaggiano alla velocità della luce attraverso l'Universo, portando con sé informazioni riguardo il cataclisma che le ha generate, così come preziosissimi indizi sulla natura stessa della gravità .

Negli ultimi decenni gli astronomi hanno accumulato importanti prove a supporto dell'esistenza delle onde gravitazionali, soprattutto studiandone gli effetti sul moto di [coppie di stelle](#) in orbite molto vicine nella nostra galassia. I risultati di questi studi sono in ottimo accordo con la teoria di Einstein- con le loro orbite che si riducono, esattamente come predetto, a causa dell'emissione di energia tramite onde gravitazionali. Tuttavia la rivelazione *diretta* di onde gravitazionali arrivate sulla Terra è stata a lungo anticipata dalla comunità scientifica come una svolta che fornirebbe nuovi e più stringenti modi per mettere alla prova la teoria della



*Figura 1. (Adattamento dalla Figura 1 del nostro articolo scientifico) L'evento gravitazionale osservato dagli interferometri LIGO Hanford (H1, a sinistra) e dal LIGO Livingston (L1, a destra). I due grafici mostrano come l'ampiezza dell'onda gravitazionale espressa in strain (vedi in basso) prodotta dall'evento in ciascun rilevatore LIGO vari come in funzione del tempo (in secondi) e della frequenza (in Hertz, o numero di cicli al secondo). Entrambe i grafici mostrano come la frequenza di GW150914 sia passata velocemente da da 35Hz a circa 150Hz in due decimi di secondo. GW150914 è arrivata prima a L1 e poi a H1, circa sette millesimi di secondo dopo – ciò è coerente con il tempo impiegato dalla luce, o dall'onda gravitazionale, per viaggiare da un rilevatore all'altro.*

relatività generale nelle condizioni più estreme e aprirebbe un modo completamente nuovo di esplorare l'universo.

Nello stesso anno in cui Einstein predisse le onde gravitazionali, il fisico Karl Schwarzschild dimostrò che il lavoro di Einstein permetteva l'esistenza dei [buchi neri](#): oggetti bizzarri così densi e compatti da non lasciar sfuggire nemmeno la luce dal loro campo gravitazionale. Anche se per definizione

non possiamo “vedere” direttamente la luce da un buco nero, gli astronomi hanno raccolto una grande quantità di prove circostanziali della loro esistenza studiando gli effetti degli ipotetici buchi neri nella zona a loro circostante. Ad esempio si pensa che la maggior parte delle galassie nell'universo, compresa la Via Lattea, abbia al centro un [buco nero supermassiccio](#) -con massa milioni o anche miliardi di volte superiori a quella del Sole. C'è anche evidenza di possibili buchi neri con masse molto minori (da qualche volta a una dozzina di volte superiore a quella del Sole), che si crede essere i resti di stelle morte che hanno subito

un'esplosione violentissima nota come [supernova a collasso del nucleo](#).

A fianco di questo progresso sostanziale nella osservazione indiretta di buchi neri, ci sono stati importanti miglioramenti nella nostra comprensione *teoretica* di questi corpi bizzarri- inclusi, durante la passata decade, dei notevoli passi avanti nel modellare una coppia di buchi neri (detta binaria) seguendola per diverse orbite prima della fusione finale. Questi modelli al computer ci hanno consentito di predire precise forme d'onda gravitazionali - cioè il modello delle onde gravitazionali emesse dai buchi neri mentre si avvicinano sempre di più e poi si fondono in un unico buco nero più grande- in accordo con le predizioni della relatività generale. L'osservazione diretta della fusione di un sistema binario di buchi neri fornirebbe dunque un potente laboratorio cosmico per testare la teoria di Einstein.

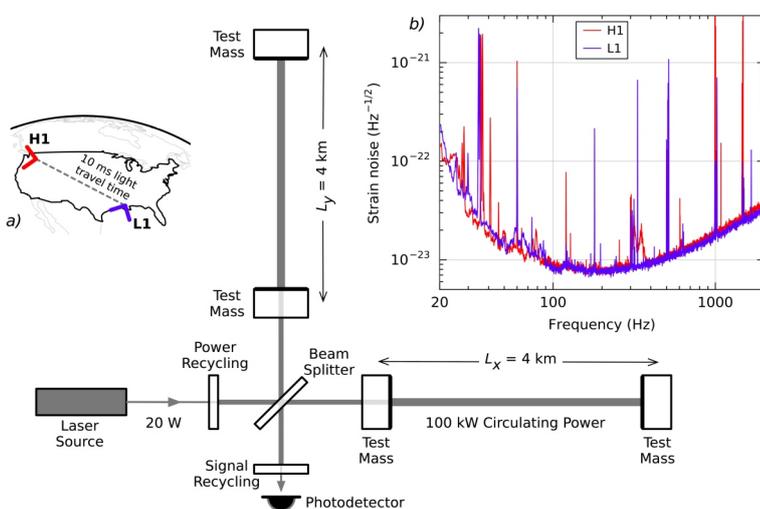
## GLI INTERFEROMETRI LIGO

L'osservatorio di onde gravitazionali LIGO è uno degli esperimenti di fisica più sofisticati di sempre. E' composto da due enormi [interferometri](#) laser a migliaia di chilometri di distanza tra loro, uno a Livingston, Louisiana e l'altro a Hanford, Washington, negli Stati Uniti. LIGO sfrutta le proprietà fisiche della luce e dello spazio stesso per rivelare le onde gravitazionali- un concetto proposto per la prima volta negli '60 e '70. Un insieme di interferometri iniziali fu completato entro i primi anni 2000 e includeva [TAMA300](#) in Giappone, [GEO600](#) in Germania, [LIGO](#) negli Stati Uniti e [Virgo](#) in Italia. Combinazioni di questi rivelatori fecero delle campagne osservative congiunte tra il 2002 e il 2011, ma non è stata rivelata nessuna sorgente di onde gravitazionali. Dopo alcuni miglioramenti sostanziali, nel 2015 gli interferometri LIGO hanno iniziato ad operare come Advanced LIGO: il primo di una rete mondiale di interferometri molto più sensibili. Un altro interferometro per onde gravitazionali molto simile a LIGO è Advanced Virgo, a Cascina (Pisa, Italia), che però nel 2015 non era ancora pronto per la presa dati.

Un [interferometro](#) come [LIGO](#) e [Virgo](#) consiste di due "bracci" (ognuno lungo 4km nel caso di LIGO e 3km nel caso di Virgo) perpendicolari tra loro, ciascuno percorso da un raggio laser che viene riflesso da uno specchio (sospeso come una massa di prova) alla fine. Quando passa un'onda gravitazionale, l'allungarsi e il contrarsi dello spazio causa l'alternativo allungamento e contrazione dei bracci, cosicché quando uno si allunga l'altro si contrae e viceversa. Poiché i bracci cambiano di lunghezza, il laser impiega un tempo diverso per attraversarli- il che significa che i due raggi non sono più "al passo"(o "in fase") e si produce quella che chiamiamo [figura d'interferenza](#). Questo spiega perché chiamiamo questi strumenti 'interferometri'.

La differenza delle lunghezze dei bracci è proporzionale all'ampiezza dell'[onda gravitazionale](#) che passa, detta '[strain](#)' in inglese perché è rappresenta una deformazione relativa, ed è straordinariamente piccola. Per una tipica onda che possiamo rilevare, ci si aspetta una deformazione di circa [1/10000 della larghezza di un protone!](#) Tuttavia gli interferometri LIGO sono così sensibili da poter rivelare anche deformazioni così piccole.

**Figura 2.** Schema semplificato di un interferometro Advanced LIGO (non in scala), che include diversi dei cambiamenti sostanziali rispetto allo schema base: una [cavità ottica](#) che riflette il laser diverse volte avanti e indietro in ciascun braccio dell'interferometro, moltiplicando l'effetto dell'onda gravitazionale sulla fase del fascio laser; uno specchio di riciclaggio della potenza ('power recycling' in inglese) che aumenta la potenza della luce laser nell'interferometro; uno specchio di riciclaggio del segnale ('signal recycling' in inglese) che ottimizza ulteriormente il segnale estratto al fotorivelatore. Questi miglioramenti incrementano la potenza del laser nella cavità ottica di un fattore di 5000, e aumentano il tempo totale in cui il segnale circola nell'interferometro. L'insero (a), sulla sinistra, mostra la posizione e l'orientamento dei due osservatori LIGO e indica il tempo che la luce impiega per viaggiare da uno all'altro. L'insero (b) mostra come il rumore strumentale espresso in strain sia variato con la frequenza in ciascun interferometro vicino al tempo



dell'evento. I picchi alti indicano stretti intervalli di frequenza in cui il rumore strumentale è particolarmente forte.

Per rivelare con successo un evento come GW150914 gli interferometri devono avere nel contempo sia una straordinaria sensibilità sia la capacità di separare i segnali *reali* dalle sorgenti di **rumore strumentale**: piccoli disturbi, dovuti ad esempio ad effetti ambientali o al comportamento stesso degli strumenti, che potrebbero mimare- o anzi semplicemente sovrastare- il modello di strain che cerchiamo. Questo è uno dei principali motivi per cui ci sono due rivelatori Advanced LIGO e non uno, perché ci consente di distinguere le onde gravitazionali da effetti ambientali o strumentali locali: solo un vero segnale di onda gravitazionale apparirebbe in entrambi i rivelatori- separato da alcuni millesimi di secondo, a causa del tempo impiegato dalla luce (e da un'onda gravitazionale) per viaggiare da un rivelatore all'altro.

L'insero b della figura 2 mostra come il rumore strumentale dei rivelatori LIGO dipenda dalla frequenza. Si può notare che il rumore è minimo attorno a poche centinaia di **Hertz**, ma aumenta drasticamente a frequenze sia più alte che più basse. Ci sono anche diversi picchi stretti dove il livello di rumore è particolarmente alto, dovuto ad esempio alla vibrazione delle fibre che sostengono gli specchi e le masse di prova in ciascun interferometro.

Per raggiungere la sensibilità molto più alta di Advanced LIGO è stato necessario migliorare quasi tutti gli aspetti del design iniziale di LIGO. Questi miglioramenti includono:

- l'aumento sostanziale della potenza del laser, per ridurre la fonte principale del rumore ad alta frequenza
- la riprogettazione delle cavità di riciclaggio, per contenere meglio la distribuzione spaziale della luce del laser
- l'uso di masse di test più grandi in silice fusa ('fused silica' in inglese), per ridurre il movimento casuale (termico) degli specchi
- l'uso di fibre di fused silica per sostenere le masse di test, per ridurre il loro **rumore termico**
- l'uso di un pendolo a quattro stadi per sospendere le masse di prova, per migliorarne l'isolazione sismica
- l'uso di una strategia attiva di "misura e cancella" per ridurre l'impatto del movimento del terreno

Operare una rete di due o più rivelatori ci consente anche di "triangolare" la direzione nel cielo da cui vengono le onde gravitazionali, analizzando la differenza nel tempo di arrivo ad ogni rivelatore. Maggiore è il numero di rivelatori nella rete e migliore è la localizzazione nel cielo della sorgente delle onde gravitazionali. Nel 2017 il rivelatore Advanced Virgo, in Italia, si è unito alla rete globale- e altri rivelatori avanzati sono programmati per il futuro. Per più dettagli vedere ad esempio questa pubblicazione: [Prospects for observing and localizing gravitational-wave transients with Advanced LIGO, Advanced Virgo and KAGRA](#)

## LE NOSTRE OSSERVAZIONI E COSA SIGNIFICANO

Il 14 settembre 2015, alle 09:50:45 ora di Greenwich, gli osservatori LIGO a Hanford e Livingston hanno rivelato entrambi un segnale da GW150914. Il segnale è stato identificato inizialmente con metodi di ricerca detti "*a bassa latenza*" che sono fatti in modo da analizzare molto velocemente i dati raccolti dal rivelatore, cercando evidenza di un andamento simile a quello di un'onda gravitazionale senza però basarsi su un modello preciso della forma d'onda. Queste ricerche veloci hanno segnalato l'evento candidato entro soli tre minuti dall'arrivo dei segnali ai rivelatori. I dati di strain di onda gravitazionale sono stati poi confrontati con un vasto catalogo di forme d'onde predette teoricamente- un processo noto come **filtraggio adattato**, *matched filtering* in inglese- con lo scopo di trovare la forma che combaciava al meglio con i dati raccolti.

La figura 3 illustra i risultati fondamentali di queste analisi dettagliate- tutte indicano chiaramente che GW150914 è stato

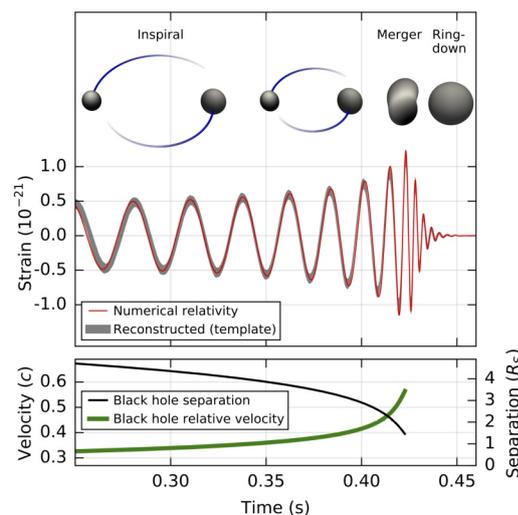


Figura 3. Alcuni dei risultati chiave della nostra analisi di GW150914, con il confronto tra l'ampiezza ricostruita dell'onda gravitazionale (come vista da H1 a Hanford) e le previsioni delle forme d'onda, calcolate con la relatività generale, che meglio corrispondono ai dati, durante i tre stadi dell'evento: spiraleggiamento, fusione e assestamento. Sono anche mostrate la separazione e velocità relativa dei buchi neri e come esse cambiano durante l'evento.

prodotto dalla fusione di due buchi neri. La parte centrale della figura mostra la ricostruzione dello strain gravitazionale, come visto dal rivelatore Hanford. Da notarsi in particolare l'impressionante corrispondenza tra questo andamento (in grigio) e quello (in rosso) della forma d'onda prodotta dalla collisione di due buchi neri e calcolata usando la relatività generale.

Immagine degli orizzonti dei buchi neri a vari stadi di questa analisi sono mostrate nella figura più in alto: lo spiraleggiamento, quando i due buchi neri si avvicinano; la fusione quando i buchi neri si uniscono e il conseguente decadimento ('ringdown'), quando il buco nero appena formatosi oscilla un poco prima di stabilizzarsi.

Mettere a confronto i dati raccolti con le previsioni teoriche ci permette anche di controllare se la relatività generale è in grado di descrivere pienamente l'evento. Il test è superato con il massimo dei voti: tutte le nostre osservazioni sono consistenti con le previsioni della relatività generale.

Inoltre possiamo usare i dati raccolti per stimare le caratteristiche fisiche del sistema che ha prodotto GW150914, ad esempio le masse dei due buchi neri prima della fusione, la massa del buco nero che si è originato dopo la fusione, e la distanza dell'evento.

I nostri risultati indicano che GW150914 è stato prodotto dalla fusione di due buchi neri con masse rispettivamente di circa 36 e 29 volte quella del Sole, e che la massa del buco nero finale è circa 62 volte quella del Sole. Inoltre deduciamo che il buco nero finale ruota su sè stesso (spin in inglese) - buchi neri rotanti furono predetti per la prima volta dal matematico [Roy Kerr](#) nel 1963. Infine, i nostri risultati indicano che GW150914 è accaduto a una distanza di oltre un miliardo di [anni luce](#). Dunque i rivelatori LIGO hanno osservato un evento veramente notevole che è accaduto molti tempo fa in una galassia molto, molto lontana!

Se confrontiamo le masse prima e dopo la fusione dei buchi neri, vediamo che la coalescenza ha convertito una massa pari a circa tre volte la massa del Sole (o circa 6 milioni di trilioni di trilioni di kg) in energia sotto forma di onde gravitazionali, la maggior parte della quale emessa in una frazione di secondo. A confronto il Sole converte solo due miliardesimi di un triliardesimo della sua massa in radiazione elettromagnetica ogni secondo. La potenza di picco irradiata in onde gravitazionali da GW150914 è almeno 10 volte maggiore di tutta la [luminosità](#) (cioè potenza luminosa) di ogni stella e galassia nell'universo visibile.

### **COME SAPPIAMO CHE GW150914 ERA UNA FUSIONE DI BUCHI NERI?**

Le masse stimate dei due componenti in GW150914 prima della fusione sembrano indicare fortemente che fossero *entrambi* buchi neri- soprattutto considerando le enormi velocità e piccola separazione dei due, come mostrato nella parte inferiore della figura 3. In questa figura si può notare come le velocità indicative dei due componenti siano frazioni significative della velocità della luce. In maniera simile si nota che la loro separazione approssimativa è solo qualche volta maggiore della dimensione caratteristica di un buco nero, nota come [raggio di Schwarzschild](#).

Questi grafici implicano che i due componenti erano solo a qualche centinaia di chilometri di distanza subito prima della fusione, cioè quando la frequenza delle onde gravitazionali era di circa 150 Hz. I buchi neri sono gli unici oggetti conosciuti abbastanza compatti da poter avvicinarsi così tanto senza fondersi assieme. Basandoci sulla nostra stima della massa totale dei due componenti, una coppia di [stelle di neutroni](#) non sarebbe abbastanza massiccia, e una coppia buco nero-stella di neutroni si sarebbe già fusa ad una frequenza inferiore a 150 Hz.

### **SIAMO SICURI CHE GW150914 SIA STATO UN VERO EVENTO ASTROFISICO?**

La risposta breve è "sì", ma ovviamente questa è una domanda cruciale e le collaborazioni LIGO e Virgo hanno fatto un grande sforzo per provare a rispondere, svolgendo una serie di controlli indipendenti e rigidi- ognuno dei quali contribuisce a rafforzare la tesi che GW150914 sia stato una vera rivelazione di onde gravitazionali.

Prima di tutto, come già notato, la differenza temporale tra le osservazioni fatte in ciascuno dei rivelatori LIGO è compatibile con il tempo che la luce mette a viaggiare da un sito all'altro. Inoltre, come evidente nella figura 1, i segnali rilevati da LIGO Hanford e Livingston mostrano forme simili, come ci si aspetta visto il quasi allineamento dei due interferometri, ed erano abbastanza forti da superare il rumore di fondo al tempo dell'evento - come una improvvisa risata sentita nonostante il mormorio di fondo in una stanza affollata.

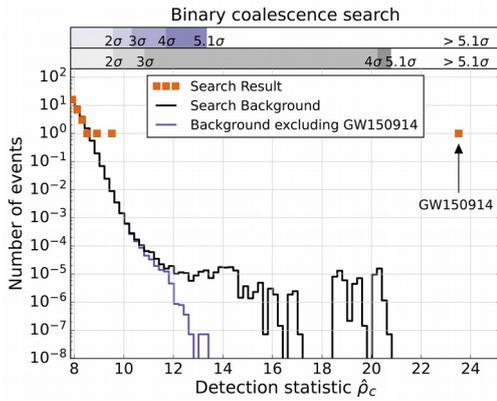


Figura 4. (Adattamento dalla figura 4 dello nostro articolo scientifico) I risultati della nostra ricerca sulla coalescenza di sistemi binari che quantificano quanto raro sia GW150914 a confronto con "eventi" falsi dovuti a fluttuazioni di rumore. Questa ricerca ha concluso che un evento di rumore che imiti GW150914 sarebbe estremamente raro- meno di 1 in 200000 anni di simili dati - un valore che corrisponde ad una significanza di rivelazione di più di 5 "sigma".

Capire questo rumore di fondo è una parte fondamentale della nostra analisi e coinvolge una grande varietà di dati ambientali registrati in entrambi i siti: movimenti del terreno, variazioni di temperatura e fluttuazioni di potenza della rete elettrica tanto per fare degli esempi. Parallelamente, molti canali di dati monitorano in tempo reale lo stato degli interferometri- controllando, per esempio, che i vari fasci laser siano correttamente centrati. Se uno qualsiasi di questi canali ambientali o strumentali indica un problema, i dati rilevati sono scartati. Comunque, nonostante studi esaustivi, nessun problema simile di qualità dei dati è stato riscontrato durante l'evento.

Forse però GW150914 era solamente una rara fluttuazione del rumore, occorsa per puro caso con caratteristiche simili in entrambi i siti? Per escludere questa possibilità dobbiamo calcolare quanto rara dovrebbe essere una tale fluttuazione: più raramente potrebbe accadere per caso, e più sicuramente possiamo escludere questa possibilità in favore dell'alternativa - cioè che GW150914 sia effettivamente un vero evento gravitazionale.

Per compiere questa analisi statistica abbiamo usato il corrispondente di 16 giorni di dati dei rivelatori stabili e di alta qualità, dal mese seguente all'evento. GW150914 è stato davvero il segnale di gran lunga più forte rilevato in quel periodo da entrambi i rivelatori. Abbiamo

poi introdotto una serie di traslazioni artificiali del tempo tra i dati di LIGO a Hanford (H1) e LIGO a Livingston (L1), creando l'equivalente di un set di dati molto più lungo in cui poter cercare segnali forti come (o più forti di) GW150914. Usando solamente traslazioni maggiori di 10 millisecondi (il tempo che la luce impiega per andare da un interferometro all'altro) siamo sicuri che questi insiemi artificiali di dati non possano contenere alcun segnale reale, ma solo coincidenze dovute al rumore. Possiamo dunque vedere, nel lungo set artificiale di dati, quanto spesso una coincidenza come GW150914 potrebbe apparire. Questa analisi ci dà il tasso di falsi allarmi: quanto spesso possiamo aspettarci di misurare quello che sembra un evento altrettanto tanto forte ma che in realtà è solo una fluttuazione del rumore di fondo (cioè un falso allarme).

La figura 4 (adattata dalla figura 4 della nostra pubblicazione) mostra il risultato di questa analisi statistica, per una delle ricerche condotte sui dati dei nostri interferometri. Le curve continue nere e viola rappresentano il 'fondo': il numero di eventi casuali dovuti al rumore che stimiamo si verificherebbero (secondo ipotesi leggermente diverse) per diverse ampiezze del segnale. I quadrati arancioni rappresentano cosa effettivamente abbiamo visto, senza le traslazioni di tempo artificiali. Il messaggio principale di questa figura è quanto lontano sia GW150914 dal rumore di fondo. Questo significa che un evento dovuto al rumore e che assomigli a GW150914 sarebbe *incredibilmente* raro- ci si aspetta infatti con questi dati di vedere per caso un evento forte quanto GW150914 solamente una volta ogni 200000 anni! Questo tasso di falsi allarmi può essere tradotto in numero di 'sigma' (indicato come  $\sigma$ ), quantità che si usa comunemente in analisi statistiche per misurare la significanza di un evento. Questa ricerca identifica GW150914 come un evento reale, con una significanza superiore a 5 sigma.

## CONCLUSIONE E PROSPETTIVE PER IL FUTURO

La prima rivelazione di onde gravitazionali e la prima osservazione della fusione di due buchi neri sono grandi conquiste, ma rappresentano solamente la prima pagina del nuovo capitolo dell'astronomia.

Il prossimo decennio vedrà ulteriori miglioramenti per i rivelatori Advanced LIGO e l'estensione della rete globale di rivelatori che includerà Advanced Virgo in Italia, KAGRA in Giappone, e un possibile terzo LIGO in India.

Questa rete globale potenziata migliorerà molto la nostra abilità di localizzare nel cielo la posizione delle sorgenti delle onde gravitazionali e stimerà con maggiore accuratezza le loro proprietà fisiche. Il nascente campo dell'astronomia delle onde gravitazionali ha un futuro molto brillante!

## MAGGIORI INFORMAZIONI

articolo scientifico:

[Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger](#) , Phys. Rev. Lett. **116**, 061102

dati di GW150914 disponibili sul [Gravitational Wave Open Science Center](#):

[www.gw-openscience.org/events/GW150914/](http://www.gw-openscience.org/events/GW150914/)

Riassunti divulgativi di altre pubblicazioni scientifiche delle collaborazioni LIGO e Virgo, disponibili sul sito di Virgo in italiano e attinenti GW150914:

- [GWTC-1: il nuovo catalogo delle rivelazioni di onde gravitazionali](#)
- [La prima misura della fusione di buchi neri e cosa essa significa](#)
- [GW170814: osservazione delle onde gravitazionali dalla coalescenza di due buchi neri con tre rivelatori](#)



Sito di LIGO: <http://www.ligo.org>

Sito di Virgo: <http://www.virgo-gw.eu>

