

## GWTC-1: IL NUOVO CATALOGO DELLE RIVELAZIONI DI ONDE GRAVITAZIONALI

Presentiamo il nuovo catalogo (indicato come GWTC-1 dall'inglese "Gravitational-Wave Transient Catalog 1") delle sorgenti di onde gravitazionali scoperte durante il primo e il secondo periodo osservativo della rete globale di rivelatori avanzati di [onde gravitazionali](#).

Il nostro catalogo presenta quattro nuove fusioni di [sistemi binari di buchi neri](#) mai annunciate prima, inclusa anche una nuova 'tripla rivelazione', osservata sia dai due rivelatori [LIGO](#) che dal rivelatore [Virgo](#) il 18 agosto 2017. Per questo evento la posizione nel cielo della binaria di buchi neri, alla distanza di 2.4 miliardi di [anni luce](#) dalla Terra, è stata individuata con una precisione di 39 gradi quadrati, meglio di qualsiasi altra binaria di buchi neri osservata finora.

Abbiamo migliorato le nostre stime sulle proprietà delle sorgenti di tutti gli undici eventi gravitazionali confermati nel nostro catalogo, per un totale di dieci binarie di buchi neri e una binaria di [stelle di neutroni](#) rivelate ad oggi. Inoltre, forniamo una lista di possibili eventi candidati, che cioè non possiamo affermare con sicurezza essere rivelazioni di onde gravitazionali, come pure aggiorniamo le nostre stime per il tasso di occorrenza di fusioni di buchi neri e fusioni di stelle di neutroni nell'universo; infine diamo un limite superiore al tasso di fusione di sistemi misti con buchi neri e stelle di neutroni.

Si apre così un nuovo, eccitante capitolo dell'astronomia basata sulle onde gravitazionali

### I PRIMI DUE PERIODI OSSERVATIVI DI ADVANCED LIGO E ADVANCED VIRGO

I tre anni passati sono stati testimoni dei primi due periodi osservativi della rete di rivelatori di onde gravitazionali (abbreviato in GW dall'inglese Gravitational Waves) [Advanced LIGO](#) e [Advanced Virgo](#). Advanced LIGO ha effettuato il suo primo periodo osservativo (denominato O1) dal 12 settembre 2015 al 19 gennaio 2016 e il suo secondo periodo osservativo (denominato O2) dal 30 novembre 2016 al 25 agosto 2017.

Durante O2, precisamente il 1 agosto 2017, Advanced Virgo si è unito ai due rivelatori Advanced LIGO per la prima volta. Alcuni dei risultati principali di O1 e O2 sono stati:

- [GW150914](#): la prima rivelazione in assoluto di onde gravitazionali, generate dalla fusione di due buchi neri distanti oltre un miliardo di anni luce dalla Terra
- [GW170814](#): la prima rivelazione di onde gravitazionali effettuata dalla rete dei tre rivelatori, anch'esse provenienti dalla fusione di un sistema binario di buchi neri (indicato con BBH, dall'inglese Binary Black Hole)
- [GW170817](#): la prima rivelazione di onde gravitazionali dalla fusione di un sistema binario di stelle di neutroni (indicato con BNS, dall'inglese Binary Neutron Star) e anche il primo evento mai osservato anche con la luce, grazie a dozzine di telescopi che hanno coperto l'intero spettro elettromagnetico.

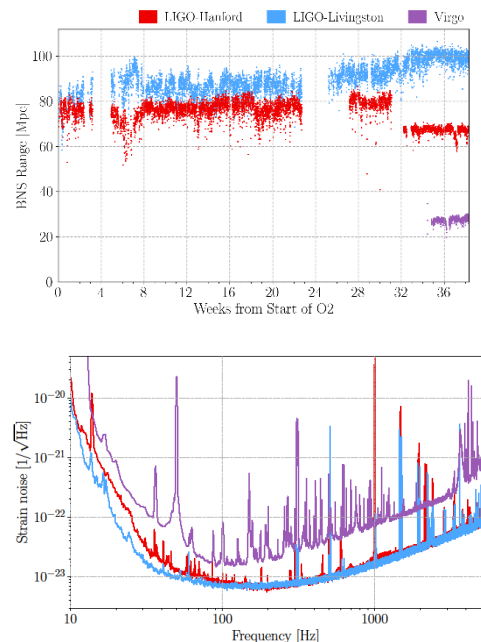
Nell'intervallo tra O1 e O2 la sensibilità di entrambi i rivelatori LIGO è stata migliorata e quella di LIGO Livingston (LLO) ha continuato a essere migliorata anche durante O2. Di conseguenza il '*BNS range*' (un numero usato per quantificare le prestazioni di un rivelatore, corrispondente circa alla distanza media alla quale può essere rivelata una fusione di stelle di neutroni) è passato da circa 60 Mpc (1Mpc = 1 milione di [parsec](#)) durante O1 a 80 Mpc all'inizio di O2 e a oltre 100 Mpc alla fine del periodo osservativo. Il '*BNS range*' di LIGO Hanford (LHO) era circa 80 Mpc alla fine di O1 ed è aumentato di circa il 20% durante O2.

Il rivelatore Advanced Virgo è stato realizzato a partire dal rivelatore Virgo di prima generazione e che era operativo fino al 2011. I miglioramenti principali apportati a Virgo comprendono un nuovo disegno ottico con fasci laser più larghi e maggiore [finesse](#) della cavità ottiche sui bracci, specchi di migliore qualità e banchi ottici sospesi e alloggiati in vuoto. Il '*BNS range*' di Advanced Virgo durante O2 è stato di circa 25 Mpc.

La Figura 1 mostra il BNS range dei tre rivelatori e la miglior sensibilità che hanno ottenuto durante O2

### FIGURE DALL'ARTICOLO SCIENTIFICO

Per maggiori informazioni su come sono state generate queste figure e sul loro significato, si veda la nostra [pubblicazione](#) disponibile gratuitamente.



**Figura 1:** il pannello superiore mostra il "range BNS" dei rivelatori LIGO e Virgo durante O2. La pausa alla terza settimana corrisponde alle vacanze di fine anno 2016. C'è stata un'interruzione aggiuntiva durante la settimana 23 per migliorare la sensibilità dello strumento. L'impatto sulla sensibilità dello strumento LIGO di Hanford, causato da un terremoto nel Montana, è visibile alla settimana 31. Virgo si è unito a O2 nella settimana 34. Il pannello inferiore mostra la sensibilità di ciascun rivelatore, indicata dall'ampiezza del rumore di deformazione ("strain noise") totale come una funzione di frequenza (una curva più bassa indica prestazioni migliori). Le curve rappresentano le migliori prestazioni di ciascun rivelatore durante l'O2. (Adattato dalla figura 1 della nostra [pubblicazione](#).)

Ciascuno dei due rivelatori LIGO ha preso dati per circa il 60% del tempo di osservazione nominale, e i due hanno preso dati contemporaneamente per circa il 45% del tempo: questi vengono indicati come dati in coincidenza ('coincidence data' in inglese). Dopo aver sottratto i periodi temporali affetti da disturbi strumentali, la durata dei dati in coincidenza è di 118 giorni. 15 di questi giorni sono stati anche in coincidenza con Virgo, che ha preso dati scientifici per circa l'80% del suo tempo di osservazione nominale.

Le ricerche per onde gravitazionali generate dalla fusione di sistemi binari compatti sono state svolte mediante due algoritmi indipendenti, denominati 'PyCBC' e 'GstLAL', che confrontano i dati osservativi con il segnale teorico previsto dalla [Relatività Generale](#) attraverso una tecnica chiamata 'del [filtro ottimo](#)'. In aggiunta, è stato usato anche un altro algoritmo di ricerca generico, denominato 'cWB', che non assume uno specifico modello teorico per il segnale gravitazionale.

Le migliorie apportate a questi algoritmi di ricerca e l'estensione della ricerca per quanto riguarda le proprietà degli oggetti astrofisici ricercati hanno motivato la rianalisi dei dati di O1. Similmente, l'applicazione di una procedura di 'pulizia dei dati' per rimuovere parte del rumore dei rivelatori e migliorarne la sensibilità ha motivato la rianalisi dei dati di O2.

Ciascun metodo di ricerca produce una lista di eventi candidati che sono classificati in termini di intensità del segnale rispetto al rumore combinato dei rivelatori – da una quantità chiamata [rapporto segnale/rumore](#) (SNR, dall'inglese *signal-to-noise ratio*) – e della loro significanza statistica, quantificata dal [tasso di falsi allarmi](#) (FAR, dall'inglese *False Alarm Rate*), cioè il tasso al quale ci si può aspettare che un evento simile possa essere registrato per errore, semplicemente a causa delle caratteristiche di rumore dei dati dei rivelatori che mimano un vero segnale gravitazionale.

Scegliendo una soglia per il tasso di falsi allarmi inferiore a 1 in 30 giorni (circa 12.2 in un anno) in almeno uno dei due algoritmi di ricerca con filtro ottimo, abbiamo ristretto la lista dei eventi candidati e ne abbiamo esclusi un gran numero che molto probabilmente sono stati causati dal rumore dei rivelatori: all'interno di questa lista ristretta abbiamo trovato 11 candidati che hanno una probabilità superiore a 50% di essere di origine astrofisica invece che strumentale. Questi eventi sono indicati dal prefisso 'GW' seguito dalla data della rivelazione (ad esempio GW150914). Gli altri candidati sono considerati eventi 'marginali', con poca probabilità di essere di origine astrofisica.

## QUALCHE VECCHIO AMICO E ALCUNE NUOVE SCOPERTE

I nostri tre algoritmi di ricerca hanno identificato con alto grado di confidenza un totale di undici rivelazioni nei dati di O1 e O2. Sette di queste rivelazioni sono state già comunicate: tre fusioni di BBH da O1, tre ulteriori fusioni di BBH e una fusione di BNS da O2. Una delle fusioni di BBH di O1 era stata in precedenza riportata come LVT151012 (rivelata il 12 ottobre 2015), in quanto la sua scoperta iniziale comunicata nel 2016 aveva una [significanza statistica](#) troppo bassa per meritare all'epoca di essere considerata una rivelazione con alto grado di confidenza. Tuttavia la rianalisi dettagliata di questo evento ha dimostrato ora che di fatto soddisfa i criteri per una rivelazione con alto grado di confidenza e pertanto viene rinominato GW151012.

## MISURARE LE PROPRIETÀ DELLE NOSTRE SORGENTI DI ONDE GRAVITAZIONALI

Una coppia di buchi neri che percorrono orbite quasi circolari uno attorno all'altro prima di fondersi è descritta da una combinazione di 15 quantità fisiche, dette anche parametri. 8 di questi parametri sono proprietà del sistema stesso di buchi neri: le masse dei buchi neri e i loro 'spin', che sono legati al [momento angolare](#) di ciascun dei due corpi. I 7 ulteriori parametri dipendono da come la sorgente di onde gravitazionali è vista dalla Terra: la posizione della sorgente nel cielo, la sua distanza da noi, quanto è inclinato il [piano dell'orbita](#) del sistema binario di buchi neri rispetto alla linea di vista, l'angolo di [polarizzazione](#) delle onde gravitazionali emesse dalla sorgente, il tempo in cui i due buchi neri si fondono e la [fase](#) dell'onda gravitazionale emessa in quell'istante.

Poiché le stelle di neutroni sono fatte di materia, le onde gravitazionali emesse da un sistema BNS dipendono anche da un altro parametro, noto come la loro 'deformabilità mareale': esso misura quanto sia deformata ogni stella dalla [distorsione mareale](#) causata dalla sua compagna durante le ultime orbite prima della fusione. Misure della deformabilità mareale possono darci informazioni sulla struttura interna delle stelle di neutroni.

La Figura 2 mostra le nostre stime per le masse degli oggetti componenti per tutti gli eventi gravitazionali osservati, ricavate dai dati; per ciascun evento l'area indicata rappresenta l'intervallo di valori entro cui siamo sicuri al 90% che siano contenute le masse dei componenti – quantità indicata come [intervallo di confidenza](#) al 90%. Notare che indichiamo sempre come '1' il componente più pesante del sistema binario. Possiamo vedere che le masse delle componenti dei sistemi BBH coprono un vasto intervallo, da 5 volte la [massa del Sole](#) fino a circa 70 volte la massa solare – il che è consistente con l'intervallo che ci si aspetta per sistemi di BH di massa stellare. Il sistema BBH più pesante è GW170729 e i due più leggeri sono GW151226 e GW170608.

Il segnale di onde gravitazionali generato ben prima della fusione, noto come [spiraleggiamento](#), dipende principalmente da una particolare combinazione delle masse individuali delle componenti, chiamata "[chirp mass](#)", un parametro che può essere misurato con grande precisione per sistemi binari di piccola massa. Altri importanti parametri, come il rapporto fra le masse delle componenti e lo "spin efficace allineato" (che è collegato ad una particolare combinazione degli spin delle singole componenti prima che si fondano) sono più difficili da misurare, perché valori differenti di questi parametri portano ad effetti simili sul segnale previsto di onde gravitazionali.

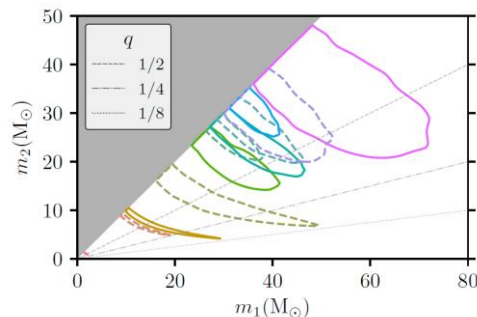


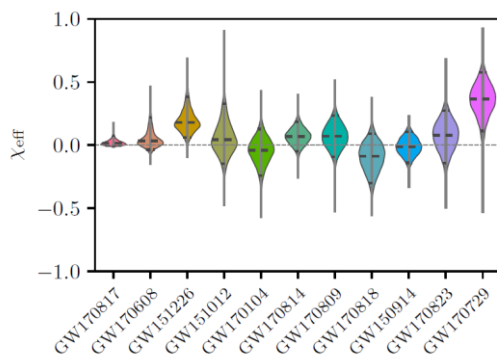
Figura 2: regioni di credibilità al 90% per le masse dei componenti stimati delle nostre rivelazioni di onde gravitazionali, in unità della massa del Sole. Le masse stimate delle stelle di neutroni in GW170817 sono mostrate nell'angolo in basso a sinistra del grafico. Tutti gli altri eventi sono fusioni binarie di buchi neri (l'uso del tratteggio per alcuni eventi ha il solo scopo di rendere le varie linee più distinguibili). Si può vedere che le masse stimate coprono un ampio intervallo, da circa 5 volte a circa 70 volte la massa del Sole. Per ogni evento abbiamo etichettato la componente più massiccia della coppia binaria come "1". (Adattato dalla figura 4 della nostra [pubblicazione](#))

Per esempio, in Figura 3, possiamo vedere che per tutti gli eventi la distribuzione dello spin efficace è centrata attorno allo zero, eccetto che per GW170729 e GW151226, per cui possiamo escludere un valore di zero per lo spin efficace con più del 90% di confidenza. Misure più precise degli spin e delle masse in futuro ci daranno maggiori informazioni su diversi scenari per come i sistemi stellari binari si formano ed evolvono. Per il momento, comunque, con la sensibilità attuale dei nostri rivelatori è difficile misurare gli spin dei singoli buchi neri.

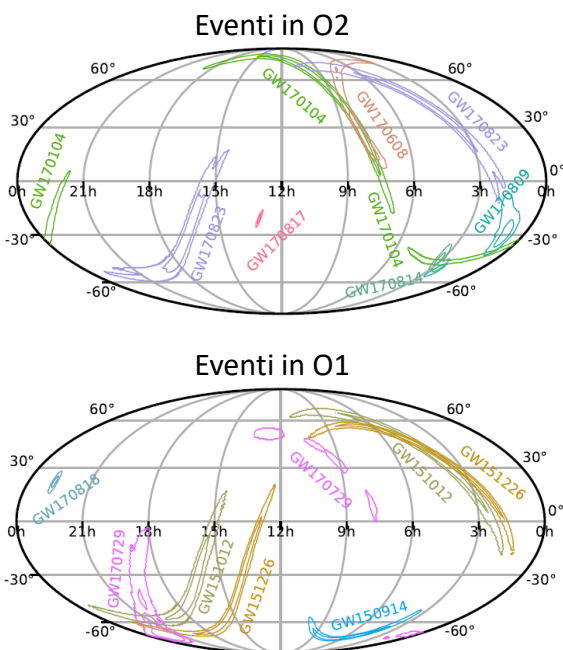
Alcune altre quantità, ricavate dal nostro segnale di onde gravitazionali, sono la massa finale e lo spin dell'oggetto risultante dalla fusione, la quantità di energia irradiata in GW e la corrispondente "luminosità di picco" emessa in GW. Troviamo che qualche per cento della massa totale è irradiata in GW: maggiore la massa totale, maggiore è l'energia irradiata. Per esempio per GW170729, il sistema BBH con massa maggiore rivelato fin ora, l'energia irradiata corrisponde a circa cinque masse solari, e la luminosità di picco a più di  $4 \times 10^{56}$  erg/s – o, all'incirca, 50 volte maggiore della potenza emessa in luce da tutte le stelle dell'intero Universo!

L'ampiezza del segnale GW che misuriamo è inversamente proporzionale alla distanza della sorgente (più specificamente, una misura particolare nota come "distanza di luminosità") il che ci permette di stimare la sua distanza. Le nostre stime hanno una incertezza rilevante, particolarmente per i sistemi più remoti, ma è chiaro che stiamo rivelando eventi di GW avvenuti "tanto tempo fa, in una galassia lontana lontana".

Dei dieci sistemi BBH nel nostro catalogo, sei hanno distanze stimate di circa 1 Gigaparsec (1 Gpc = 1 miliardo di parsec) o più: la sorgente più distante (che è anche la più massiccia) è GW170729 ad una distanza di 2.76 Gpc, o circa 9 miliardi di anni luce, mentre la sorgente più vicina è GW170608 che è a 0.32 Gpc (ovvero a 1 miliardo di anni luce). D'altra parte il sistema GW170817 è, relativamente parlando, sulla nostra 'porta di casa cosmica', ad una distanza di soli 0.04 Gpc, o 130 milioni di anni luce.



**Figura 3:** valori stimati dello spin allineato efficace per ciascuna delle nostre rivelazioni di onde gravitazionali (dove le 'gocce' sono più larghe è più alta la probabilità che si trovi il valore vero). Possiamo vedere che in tutti i casi la nostra stima di questa quantità è centrata attorno allo zero, ad eccezione di GW170729 e GW151226 in cui è possibile escludere un valore zero per lo spin effettivo con oltre il 90% di confidenza. (Adattato dalla figura 5 della nostra pubblicazione.)



**Figura 4:** Mappe del cielo che mostrano il 50% e il 90% di regioni credibili per la posizione misurata nel cielo delle nostre rivelazioni di onde gravitazionali. La localizzazione del cielo significativamente migliore fornita dalla rete di tre rivelatori (LLO, LHO e Virgo) è evidente per es. GW170818. (Adattato dalla figura 8 della nostra pubblicazione)

## L'IMPORTANZA DELLA RETE DI RIVELATORI

Quando un segnale GW raggiunge la Terra, arriverà nelle diverse posizioni dei nostri rivelatori in tempi leggermente diversi. Questi tempi di arrivo osservati, insieme all'ampiezza del segnale GW misurato su ciascun rivelatore, ci permettono di localizzare la direzione nel cielo da cui proviene il segnale. Due rivelatori possono vincolare la direzione in modo da trovarsi da qualche parte su un anello parziale nel cielo, ma con un terzo rivelatore nella rete possiamo individuare la posizione del cielo molto più precisamente - fornendo informazioni critiche per avvisare gli astronomi che possono cercare quella zona di cielo con telescopi che coprono l'intero spettro elettromagnetico (ottico e in altre lunghezze d'onda).

Nell'agosto 2017 la tripla rivelazione del sistema BNS GW170817, osservata dalla rete globale formata dai due rivelatori Advanced LIGO e Advanced Virgo, ha segnato un'emozionante nuova alba per l'era dell'astronomia multi-messaggero. Nel catalogo che abbiamo pubblicato, molti eventi sono "triplici" in questo senso: GW170729, GW170809, GW170814, GW170817 e GW170818.

Il miglioramento della localizzazione nel cielo fornito dalla rete è molto chiaro nei nostri risultati e può essere visto nella Figura 4. Ad esempio, l'evento più scarsamente localizzato nel nostro catalogo è la fusione BBH GW170823 - che è stata osservata solo dai due rivelatori LIGO ed è stata associata ad un'area del cielo di oltre 1600 gradi quadrati (o circa 5000 volte l'area della luna piena). D'altra parte, la fusione di BBH GW170818, che aveva una potenza del segnale abbastanza simile a GW170823, è stata osservata da tutti e tre i rivelatori ed è stata localizzata in un'area di circa 39 gradi quadrati nel cielo. Solo il triplo rivelazione di BNS, GW170817, è stato localizzato più precisamente di questo - soli 16 gradi quadrati.

Infine, la Figura 5 mostra i dati GW per tutte le fusioni BBH visualizzate (nel pannello di sinistra per ogni fusione) come una mappa "tempo-frequenza": una rappresentazione dei dati che utilizza il tempo come asse orizzontale e la frequenza GW come l'asse verticale, con una misura della forza del segnale rappresentato dalla barra dei colori

In molti casi, il caratteristico pattern "chirp" verso l'alto che ci si aspetta per un sistema BBH spiraleggiante è chiaramente visibile. I pannelli di destra mostrano, per ogni fusione, le forme d'onda del segnale ricostruito usando due diversi metodi di ricostruzione; tenuto conto delle incertezze, le due ricostruzioni sono coerenti tra loro.

## GUARDANDO IL FUTURO

Le rivelazioni GW presentati nel nostro catalogo ci hanno permesso di migliorare la nostra stima della frequenza "globale" con cui le fusioni BBH e BNS hanno luogo nell'Universo e di porre un limite superiore al tasso di fusioni di sistemi misti di stelle di neutroni e buchi neri, in considerazione del fatto che non ne abbiamo rivelata alcuna in O1 o O2. Maggiori dettagli su queste stime e su come sono state ottenute possono essere trovati in un [articolo complementare](#) al nostro catalogo. Anche se le nostre stime dei tassi sono ancora piuttosto incerte, continueranno a migliorare grazie alle molte altre rivelazioni GW che effettueremo in futuro.

Advanced Virgo e Advanced LIGO stanno attualmente effettuando ulteriori aggiornamenti per migliorarne la sensibilità; un terzo periodo di osservazione, noto come [O3](#), dovrebbe iniziare nella primavera del 2019 e durare per un intero anno, portando alla rivelazione di decine di eventi di fusione binaria durante. Inoltre, anche il rivelatore giapponese [KAGRA](#) dovrebbe unirsi alla rete verso la fine di O3 - estendendo ulteriormente la rete globale e quindi migliorando ulteriormente la nostra capacità di localizzare le sorgenti GW nel cielo.

**La pubblicazione di GWTC-1 è un momento fondamentale per l'astronomia delle onde gravitazionali e un importante passo verso un futuro molto luminoso.**

## GLOSSARIO

**Buco nero:** una regione dello spazio-tempo con curvatura estrema, causata da una massa estremamente compatta, dove la gravità è così intensa da impedire che qualsiasi cosa, compresa la luce, possa fuoriuscire.

**Stella di neutroni:** un residuo estremamente denso derivante dal collasso di stelle più massicce.

**Rumore:** fluttuazione del segnale di misurazione dell'onda gravitazionale a causa di vari effetti strumentali e ambientali. La sensibilità di un rivelatore di onde gravitazionali è limitata dal rumore.

**Periodo osservativo:** un periodo di osservazione in cui i rivelatori di onde gravitazionali stanno acquisendo dati.

**Sensibilità:** una descrizione della capacità del rivelatore di rivelare un segnale. I rivelatori con rumore più basso sono in grado di rivelare i segnali più deboli e quindi si dice che abbiano una sensibilità maggiore (o più alta).

**Deformazione (strain):** il cambiamento frazionario della distanza tra due punti di misurazione a causa della deformazione dello spazio-tempo provocata da un'onda gravitazionale.

**Forma d'onda:** rappresentazione di come il segnale di un'onda gravitazionale varia nel tempo.

**Spin:** quantità che misura la velocità con cui un oggetto ruota attorno a se stesso.

**Polarizzazione dell'onde gravitazionale:** la forma geometrica dello stiramento e della compressione dello spazio-tempo causata da un'onda gravitazionale mentre si muove.

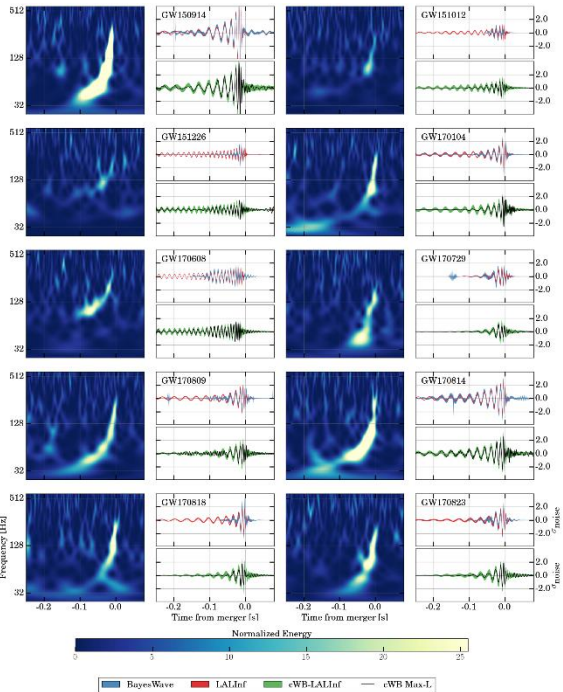
**Deformazione mareale:** deformazione di un oggetto indotta dal campo gravitazionale di un altro oggetto. Ad esempio, sulla Terra le maree sono causate dal Sole e dalla Luna e producono una deformazione della superficie degli oceani con conseguente fluttuazione quotidiana locale del livello degli stessi.

## MAGGIORI INFORMAZIONI:

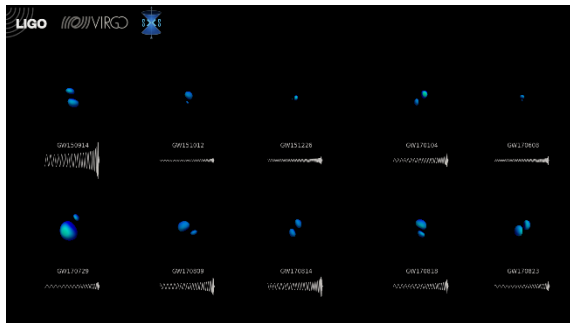
Visita i nostri siti web: <http://www.ligo.org>, <http://www.virgo-gw.eu>

Leggi l'articolo completo online [qui](#)

Leggi un articolo scientifico collegato a questo e riguardante le proprietà della popolazione dei sistemi binari di buchi neri, online [qui](#)  
Esplora il catalogo [qui](#) al [Gravitational Wave Open Science Center](#)



**Figura 5:** mappe di frequenza temporale e forme d'onda del segnale ricostruito per i dieci eventi di binarie di buchi neri riportati nel nostro catalogo. Nel pannello di destra, per ogni rivelazione, i diversi colori rappresentano metodi diversi per la ricostruzione delle forme d'onda; questi sono coerenti fra loro, considerate le incertezze nel processo. (Adattato dalla figura 10 della nostra [pubblicazione](#).)



**Figura 6:** Immagine fissa da "Binary Black Hole Orrery" di LIGO e Virgo: una visualizzazione dei buchi neri che LIGO e Virgo hanno osservato fondersi fino ad ora. Il video completo (disponibile [qui](#)) mostra i calcoli, effettuati con la relatività numerica, degli orizzonti dei buchi neri e le onde gravitazionali emesse, durante le ultime orbite dei buchi neri quando i due si muovono a spirale avvicinandosi, si fondono e il nuovo oggetto si rilassa. Ogni calcolo della relatività numerica è coerente con una delle osservazioni nel catalogo LIGO-Virgo. Quando gli orizzonti dei buchi neri spiraleggiano e si uniscono, le onde gravitazionali emesse diventano più forti (ampiezza maggiore) e più acute (più alte in frequenza). Questo film è ispirato [all'Orrery di Keplero](#). (Credito: Teresita Ramirez / Geoffrey Lovelace / SXS Collaboration / LIGO Virgo Collaboration).



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

