

# RISULTATI DEL PERIODO OSSERVATIVO O3GK

## INTRODUZIONE

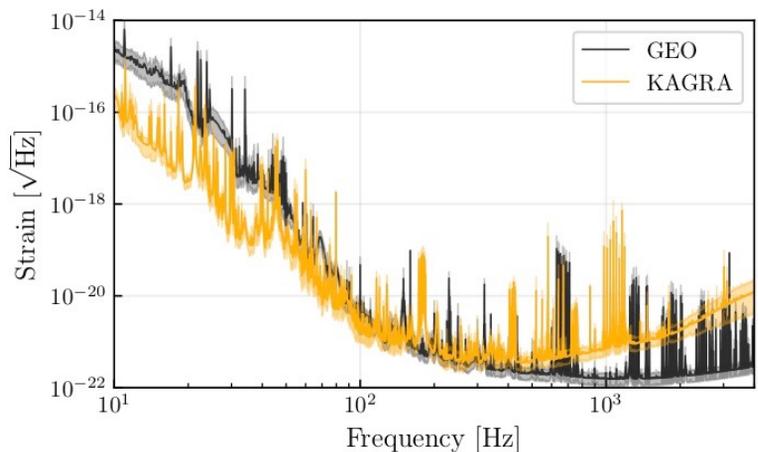
[KAGRA](#) è un nuovo rivelatore di onde gravitazionali (GW) che si trova in Giappone e che partecipa solo da poco tempo – dall'ottobre 2019 – alla rete internazionale di rivelatori che conta anche Advanced [LIGO](#) e Advanced [Virgo](#). Secondo i piani originali KAGRA avrebbe dovuto iniziare le osservazioni congiunte con Advanced LIGO e Advanced Virgo nell'aprile 2020, l'ultimo mese del terzo periodo osservativo (O3). Però, a causa della pandemia di COVID-19, Advanced LIGO e Advanced Virgo hanno dovuto cessare le osservazioni il 27 marzo 2020. Fortunatamente KAGRA ha trovato un partner, [GEO 600](#) (per brevità indicato qui solo come GEO) in Germania, uno strumento che prende dati con continuità nell'ambito della collaborazione LIGO.

Nell'aprile del 2020, GEO e KAGRA hanno osservato insieme per due settimane, in quello che noi chiamiamo il **periodo osservativo O3GK**. I risultati vengono riportati ora in un articolo scientifico. A causa della bassa **sensibilità** di entrambi i rivelatori, non è stata riportata alcuna osservazione di onde gravitazionali. Però durante queste due settimane sono stati osservati dagli astronomi parecchi **gamma-ray bursts (GRB)**, e la collaborazione LIGO-Virgo-KAGRA (LVK) ha cercato di individuare onde gravitazionali associate ad essi con **ricerche all-sky** di coalescenze di **stelle di neutroni binarie (BNS)** e di transienti gravitazionali generici, e con ricerche mirate di coalescenze di binarie compatte (CBC) e di transienti generici associati a GRB (**GRB-targeted searches**).

Nei dati ottenuti non è stato identificato alcun segnale di onda gravitazionale, come ci si attendeva sulla base della sensibilità dei rivelatori. Però queste analisi dimostrano che l'infrastruttura di analisi è pronta ad incorporare i dati di KAGRA, destinati a diventare sempre più importanti con l'avvicinarsi di KAGRA alla sua sensibilità di progetto.

## KAGRA E GEO 600

Il periodo osservativo O3GK è stato il primo in cui KAGRA a preso dati contemporaneamente ad un altro rivelatore di onde gravitazionali. KAGRA è un interferometro laser per la rivelazione di onde gravitazionali con bracci lunghi 3 km che si trova a Kamioka (Gifu) in Giappone. KAGRA è collocato in una miniera e le quattro masse di test sono realizzate con specchi raffreddati a bassa temperatura, accorgimenti che riducono il rumore sismico e termico. Ad aprile 2019 la maggior parte dei componenti dell'interferometro era stata installata, e il lavoro di *commissioning* (la procedura di messa a punto del rivelatore per renderlo più sensibile) era iniziato. Dopo il *commissioning* la sensibilità di KAGRA è migliorata fino a raggiungere una **distanza massima per le BNS** di circa 1 **megaparsec** (circa 3.26 milioni di anni luce) alla fine di marzo 2020. KAGRA è un nuovo rivelatore ancora in fase di miglioramento e non ha ancora raggiunto la sua sensibilità di progetto.



**Figura 1:** (Riquadro a sinistra della Fig. 1 nella nostra pubblicazione) Grafico che mostra la sensibilità tipica di KAGRA (traccia gialla) e GEO (traccia nera) durante il periodo osservativo congiunto. L'asse verticale mostra il rumore associato alla **deformazione** nei rivelatori, che misura la fluttuazione tipica degli specchi in funzione della frequenza (asse orizzontale). Le curve continue mostrano la sensibilità media in funzione della frequenza e le aree ombreggiate mostrano la regione compresa tra il quinto e il novantacinquesimo percentile della distribuzione delle fluttuazioni per ciascun valore di frequenza durante il periodo di misura.

GEO è uno dei primi rivelatori interferometrici di onde gravitazionali e, anche se più piccolo con i suoi bracci di 600 metri, ha un ruolo importante come dimostratore di nuove tecnologie. La sensibilità dei rivelatori di onde gravitazionali è limitata dal rumore prodotto dagli strumenti.

Oltre al rumore di fondo del rivelatore, che resta sostanzialmente lo stesso nel corso del tempo, ci sono artefatti strumentali di breve durata che chiamiamo *glitch*. Nonostante i grandi sforzi fatti per limitare al massimo il rumore di fondo e i glitch, questi ultimi possono imitare segnali gravitazionali di breve durata. Utilizzando due rivelatori allo stesso tempo, possiamo ridurre significativamente il numero di glitch che si possono scambiare per segnali veri.

La **Figura 1** mostra la sensibilità tipica dei due rivelatori durante il periodo osservativo congiunto. Un valore più basso implica una sensibilità più alta. Alle basse frequenze KAGRA è più sensibile, mentre alle alte frequenze è GEO ad essere più sensibile. Durante il periodo osservativo KAGRA avrebbe potuto rivelare le fusioni di BNS fino ad una distanza di circa 0.8 megaparsec (2.6 milioni di anni luce) e GEO fino ad una distanza di circa 1.1 megaparsec (3.6 milioni di anni luce).

La **Figura 2** mostra la distanza massima per le BNS dei due rivelatori nel corso del periodo osservativo congiunto.

## RICERCHE ALL-SKY

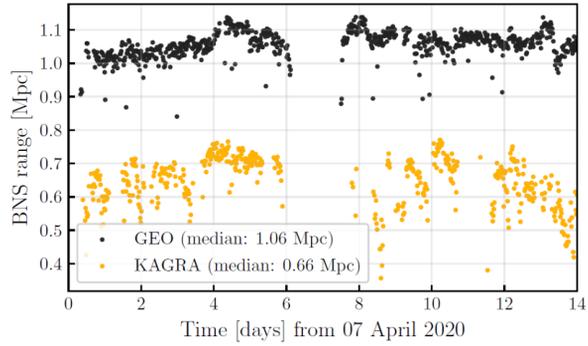
La collaborazione LVK ha realizzato ricerche **all-sky** (in tutto il cielo) di **sistemi binari** e di **segnali transienti**. La ricerca all-sky di sistemi binari utilizza un **filtro ottimo** che confronta i dati con un insieme di **forme d'onda** campionate basate su modelli teorici delle onde gravitazionali emesse dalla fusione di una binaria compatta (CBC, dall'inglese compact binary coalescence). Nel caso dei segnali transienti si cercano fenomeni che non hanno modelli fisici altrettanto precisi. Nelle due ricerche all-sky non abbiamo rivelato alcun nuovo segnale di onda gravitazionale. I risultati sono riassunti in **figura 3**.

## RICERCHE GRB-TARGETED

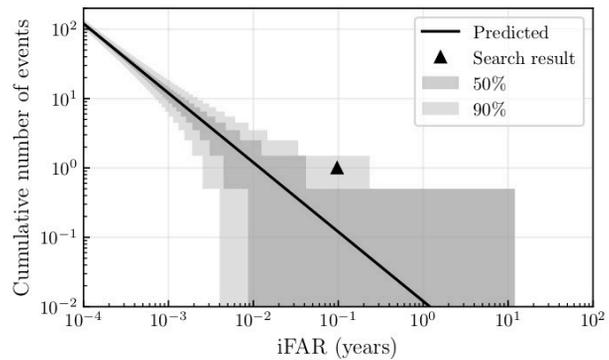
Durante il periodo osservativo si sono verificati alcuni interessanti eventi astronomici, dei GRB, che possono potenzialmente accompagnare l'emissione di onde gravitazionali. Abbiamo analizzato con cura i dati che sono stati presi a tempi vicini a questi eventi. Sia KAGRA che da GEO hanno preso dati in coincidenza con quattro GRB, di cui due **GRB lunghi** (di durata superiore a due secondi) e due **GRB brevi** (di durata inferiore a due secondi). La collaborazione LVK ha realizzato delle ricerche **GRB-targeted** di sistemi binari e di segnali transienti, in cui in la regione di cielo e il tempo di ricerca sono stati definiti dalle osservazioni elettromagnetiche dei GRB. A conclusione dell'analisi la collaborazione LVK non ha trovato alcuna evidenza di emissione di onde gravitazionali associata ai quattro GRB, né da sistemi binari né da altri fenomeni transienti.

Uno dei GRB analizzati, GRB 200415A, è stato associato ad un **flare gigante di una magnetar** nella galassia dello Scultore (NGC 253) ad una distanza di 3.5 megaparsec.

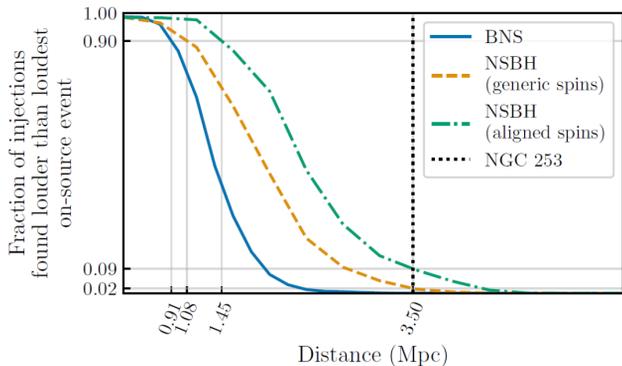
Il risultato della ricerca GRB-targeted di sistemi binari per GRB 200415A è mostrato in **figura 4**. La **distanza di esclusione** sulla base della nostra analisi è solo di pochi **kiloparsec** e questo non è abbastanza per escludere un'origine CBC e mettere alla prova l'ipotesi che il flare gigante abbia avuto origine da una magnetar. Il risultato della ricerca GRB-targeted di transienti generici è mostrato in **figura 5**. Per ciascun GRB viene calcolata la distanza di esclusione.



**Figura 2:** (Riquadro a destra della Fig. 1 nella nostra pubblicazione) Distanza massima per le BNS per KAGRA (punti gialli) e GEO (punti neri) durante il periodo osservativo O3GK. Viene mostrata la variabilità nel tempo della distanza massima. L'interruzione fra i giorni 6 e 7 è stata causata da condizioni atmosferiche avverse in entrambi i siti che hanno disturbato entrambi i rivelatori. I valori mediani delle distanze massime sono 0.66 megaparsec per KAGRA e 1.06 megaparsec per GEO.



**Figura 3:** (Fig. 5 nella nostra pubblicazione) Numero cumulativo di eventi in funzione dell'inverso della frequenza di falsi allarmi (iFAR, dall'inglese inverse false-alarm rate) individuati dalla ricerca all-sky di transienti generici. Viene identificato solo l'evento più luminoso (triangolo): si trova all'interno dell'intervallo 90% e questo significa che lo si considera dovuto al rumore. Le regioni ombreggiate mostrano le incertezze Poissoniane al 50% e 90%.



**Figura 4:** (Fig. 7 nella nostra pubblicazione) Distanze di esclusione per GRB 200415A nella nostra analisi GRB-targeted di segnali da sistemi binari formati da due stelle di neutroni (BNS) oppure da una stella di neutroni e un buco nero (NSBH). Le curve corrispondono a tre diverse popolazioni simulate: BNS (curva continua blu), NSBH con spin in direzione generica (curva tratteggiata arancio), NSBH con spin allineati (curva a punti e linee verde). Le distanze di esclusione al 90% di 0.91 megaparsec, 1.08 megaparsec, e 1.45 megaparsec sono marcate da linee verticali, e viene mostrata anche la distanza di NGC 253 (3.5 megaparsec). I livelli di confidenza che corrispondono alla distanza di NGC 253 per BNS, NSBH (spin generici), e NSBH (spin allineati) sono indicati da linee orizzontali: 0%, 2%, e 9%, rispettivamente. Quindi la sensibilità della ricerca non è sufficiente ad escludere eventi CBC.

## PROSPETTIVE FUTURE

Tutte le analisi presentate qui hanno permesso alla collaborazione LVK di confermare che KAGRA darà un importante contributo alla rete di rivelatori di onde gravitazionali. Al momento i rivelatori di LVK non sono in funzione per miglioramenti che vengono introdotti in vista del quarto periodo osservativo (O4), che secondo la pianificazione attuale inizierà a metà dicembre 2022 (<https://www.ligo.org/scientists/GWEMAlerts.php>).

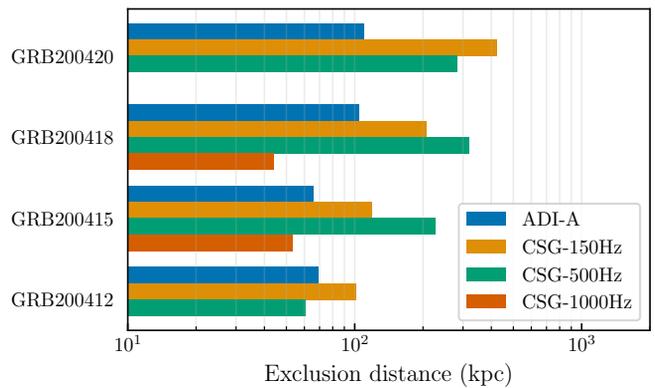
Quando KAGRA sarà operativo come da progetto, raggiungerà una sensibilità confrontabile a quella dei rivelatori Advanced LIGO e Advanced Virgo; KAGRA acquisterà allora un ruolo essenziale nella rivelazione dei segnali di onde gravitazionali. È fondamentale che ci siano più rivelatori nella rete per poter recuperare più informazioni e migliorare l'individuazione delle sorgenti. Il fatto che i bracci di KAGRA siano orientati in modo molto diverso rispetto agli altri rivelatori rende il suo contributo ancora più importante.

### Per scoprire di più

Leggete il comunicato stampa sui nostri siti web:  
<https://www.ligo.org/news.php>  
<https://www.virgo-gw.eu/gwtc3>  
<https://gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/>

Leggete l'articolo scientifico completo:  
<https://dcc.ligo.org/LIGO-P2100286/public>

I dati pubblici di GWTC-3: <https://www.gw-openscience.org/>



**Figura 5:** (Fig. 8 nella nostra pubblicazione) Distanze di esclusione per ciascuno dei quattro GRB analizzati nella ricerca GRB-targeted di transienti generici. Qui ciascun valore corrisponde ad un diverso modello di emissione di onda gravitazionale; i quattro modelli considerati sono il modello ADI-A (instabilità del disco di accrescimento) e i modelli di segnale Gaussiano polarizzato circolarmente con modulazione sinusoidale e frequenze centrali di 150 Hz, 500 Hz, e 1000 Hz.

### Visitate i nostri siti web

[www.ligo.org](http://www.ligo.org)  
[www.virgo-gw.eu](http://www.virgo-gw.eu)  
[gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/](http://gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/)



### Glossario

**Anno luce:** Unità di distanza equivalente alla distanza attraversata dalla luce in un anno. Un anno luce vale approssimativamente 9460 miliardi di km.

**Buco nero:** Una regione di spazio che ha una curvatura estrema dovuta ad una massa estremamente compatta, con una gravità così intensa da impedire perfino alla luce di sfuggire.

**Deformazione:** Il cambiamento relativo della lunghezza di un braccio del rivelatore, dovuto alla deformazione dello spazio-tempo indotta dal passaggio delle onde gravitazionali attraverso il rivelatore.

**Distanza di esclusione:** Distanza alla quale il 90% di una popolazione di segnali simulati può venire rivelata con una significatività statistica maggiore o uguale a quella dell'evento di rumore più intenso in prossimità dell'istante in cui si è verificato il GRB.

**Distanza massima per le BNS:** Una misura standard di sensibilità di un interferometro, che è la distanza media alla quale si può rivelare la coalescenza di un sistema di due stelle di neutroni per mezzo di un filtro ottimo con un rapporto segnale-rumore uguale ad 8.

**False Alarm Rate:** Quantità che misura quanto spesso una fluttuazione di rumore di un rivelatore può produrre un segnale simile all'evento candidato che si considera. Tanto più piccola è questa quantità e tanto più è probabile che l'evento abbia un'origine astrofisica.

**Filtro ottimo:** Una tecnica per rivelare segnali sepolti nel rumore dei dati. Forme d'onda caratteristiche calcolate per mezzo della relatività generale vengono confrontate con i dati finché si trova una corrispondenza.

**Flare gigante di una magnetar:** Un'esplosione gigante in cui in meno di un secondo viene emessa altrettanta energia di quanta ne verrebbe emessa dal Sole in 100 000 anni.

**Forma d'onda:** Una rappresentazione dell'evoluzione nel tempo di un segnale di onda gravitazionale.

**Gamma-ray burst (GRB):** Un lampo di raggi gamma che vengono da una lontana sorgente astrofisica e che in molti casi durano meno di pochi secondi, ma possono durare fino a centinaia di secondi.

**GEO 600:** Il rivelatore GEO è un interferometro gravitazionale vicino ad Hannover in Germania.

**GRB breve:** GRB con durata inferiore a 2 secondi. Si pensa che siano dovuti alla fusione di oggetti compatti (BNS o NSBH).

**GRB lungo:** GRB con durata superiore a 2 secondi. Si pensa che siano dovuti al collasso del nucleo di stelle massicce.

**KAGRA:** Il rivelatore KAGRA è un interferometro sotterraneo collocato nella miniera di Kamioka, Gifu, Giappone. È un interferometro laser con bracci lunghi 3 km e specchi raffreddati a bassa temperatura.

**Kiloparsec (kpc):** Mille volte la distanza di un parsec, uguale a circa 3260 anni luce.

**LIGO:** Il Laser Interferometer Gravitational-wave Observatory è una coppia di interferometri con bracci di 4 km separata da circa 3000 km, con siti a Livingston, LA e Hanford, WA negli Stati Uniti.

**Magnetar:** Una stella di neutroni il cui intenso campo magnetico produce insoliti comportamenti, come brevi esplosioni.

**Megaparsec (Mpc):** Un'unità di distanza che vale un milione di parsec, vale a dire circa 3.26 milioni di anni luce.

**Oggetto compatto:** Un oggetto astrofisico estremamente denso come un buco nero, una stella di neutroni o una [nana bianca](#).

**Parsec (pc):** Unità di distanza molto usata in astronomia, uguale a circa 3.26 anni luce. Corrisponde a circa 3100 miliardi di km.

**Periodo osservativo:** Periodo di tempo in cui i rivelatori di onde gravitazionali prendono dati.

**Raggi gamma:** Fotoni con un'energia estremamente alta, maggiore di quella dei raggi X.

**Rapporto segnale-rumore:** Il rapporto tra la potenza del segnale e la potenza del rumore, usato per confrontare il livello del segnale con il livello del rumore. Confronta l'intensità del segnale con le sorgenti di rumore che possono contaminarlo.

**Ricerche all-sky:** Queste sono le ricerche standard. Nel caso dei dati di O3GK, la collaborazione LVK ha realizzato ricerche basate su filtri ottimi di fusioni di BNS e di transienti generici non modellati.

**Ricerca di transienti:** Ricerca di un eccesso di energia in coincidenza nella rete di rivelatori che viene fatta senza assumere un modello specifico per la forma d'onda.

**Ricerche GRB-targeted:** Ricerche di segnali di onda gravitazionale associati a GRB osservati nel corso del periodo osservativo. Utilizzando i tempi e le posizioni nel cielo dei GRB possiamo potenzialmente osservare segnali più deboli che nelle ricerche all-sky. Nel caso dei dati di O3GK, la collaborazione LVK ha realizzato ricerche di coalescenze di BNS e NSBH utilizzando filtri ottimi e ricerche di transienti generici.

**Rumore:** Fluttuazioni nella misura del segnale di onda gravitazionale dovute a vari effetti strumentali e ambientali. La sensibilità di un rivelatore di onde gravitazionali è limitata dal rumore.

**Sensibilità:** Descrizione della capacità di un rivelatore di rivelare un segnale. Rivelatori con rumore più basso possono rivelare segnali più deboli e quindi si dice che hanno una sensibilità più alta.

**Stella di neutroni:** Un oggetto estremamente denso che è ciò che resta dopo il collasso di una stella massiccia. Si tratta di una stella così densa che gli atomi non possono restare separati e l'intera stella è analoga ad un nucleo atomico gigantesco. Hanno masse comprese tra 1 e 2 volte quella del Sole, ma in soli 10 km di raggio.

**Stella di neutroni binaria:** Un sistema che consiste di due stelle di neutroni in orbita ravvicinata una intorno all'altra. (Si veda [qui](#))

**Sistema binario stella di neutroni – buco nero:** Un sistema che consiste di un buco nero e di una stella di neutroni in orbita ravvicinata uno intorno all'altra. (Si veda [qui](#).)

**Virgo:** Il rivelatore Virgo è un interferometro collocato a Cascina, vicino a Pisa.